

بسم الله الرحمن الرحيم

تحقق اهداف انقلاب فرهنگي بدون ايجاد يك
دگرگوني بنيادين در زمينه تحقيقات و مطالعات علمي امکان
پذير نيست و به همين منظور معرفي آثار محققان و
پژوهشگران جامعه اسلامي و آشنائي با تحقيقات و مطالعات و
دست آوردهاي نوين علمي مي تواند بعنوان گامي مؤثر و
اساسي در اين راستا تلقي شده و ضمن ايجاد تحول و ارتقاء
سطح دانش علمي کشور پشتوانه اي براي دست يابي به
استقلال و خود کفائي جمهوري اسلامي گردد . با اميد آنکه
خداوند متعال ما را در اين راه توفيق عنايت کند .

جهاد دانشگاهي دانشگاه مشهد

بنام خدا

فهرست مندرجات

۱۳	پیشگفتار
۱۵	مقدمه مولف
۱۹	مقدمه مترجم
۲۱	۱- تئوری جبران بار
۲۳	۱-۱ مقدمه: ضرورت جبران سازی
۲۳	۱-۲ اهداف در جبران سازی
۲۶	۱-۳ جبران کننده ایده‌ال
۲۷	۱-۴ ملاحظات عملی
۲۷	۱-۴-۱ بارهائی که به جبران سازی نیاز دارند
۲۹	۱-۴-۲ استانداردهای مورد قبول برای کیفیت تغذیه
۳۰	۱-۴-۳ مشخصات یک جبران کننده
۳۱	۱-۵ تئوری اساسی جبران: اصلاح ضریب توان و تنظیم ولتاژ در سیستم تکفاز
۳۲	۱-۵-۱ ضریب توان و اصلاح آن
۳۶	۱-۵-۲ تنظیم ولتاژ
۴۱	۱-۶ مشخصه‌های تقریبی توان راکتیو
۴۱	۱-۶-۱ تنظیم ولتاژ با بارالقایی متغیر
۴۴	۱-۶-۲ بهبود ضریب توان
۴۶	۱-۶-۳ بایاس کردن توان راکتیو
۴۷	۱-۷ مثال
۴۸	۱-۷-۱ جبران برای ولتاژ ثابت

۵۰	۱-۷-۲ جبران برای ضریب توان واحد
۵۰	۸-۱ جبران کننده بار بصورت رگولاتور ولتاژ
۵۵	۹-۱ متعادل کردن بارهای نامتقارن و اصلاح ضریب توان
۵۶	۱-۹-۱ شبکه جبران کننده ادمینانس ایده‌ال
۶۰	۱-۹-۲ جبران بار برحسب مولفه‌های متقارن
۶۸	۱۰-۱ نتیجه‌گیری
۶۹	ضمیمه
۷۲	مراجع
۷۳	۲- تئوری کنترل توان راکتیو در سیستم‌های انتقال الکتریکی در حالت ماندگار
۷۶	۱-۲ مقدمه
۷۶	۲-۱-۱ تاریخچه
۷۹	۲-۱-۲ نیازمندیهای اساسی در انتقال توان ac
۸۱	۲-۱-۳ فاکتورهای مهندسی که در پایداری و کنترل ولتاژ موثرند
۸۱	۲-۲ خطوط انتقال جبران نشده
۸۱	۲-۲-۱ پارامترهای الکتریکی
۸۳	۲-۲-۲ معادله اساسی خط انتقال
۸۴	۲-۲-۳ بار طبیعی یا امپدانس موج ضربه‌ای
۸۶	۲-۲-۴ خط مدار باز جبران نشده
۹۲	۲-۲-۵ خط جبران نشده در حالت بارداری: اثر طول خط، بار، ضریب توان بر ولتاژ و توان راکتیو
۹۸	۲-۲-۶ خط جبران نشده در حالت بارداری: حداکثر توان انتقال و ملاحظات پایداری
۱۰۷	۲-۳ خطوط انتقال جبران شده
۱۰۷	۲-۳-۱ انواع جبران‌سازی: Z_0 مجازی، θ مجازی و «جبران‌سازی با تقسیم‌بندی خط»
۱۰۹	۲-۳-۲ جبران کننده‌های اکتیو و پاسیو
۱۱۲	۲-۳-۳ جبران سازی ثابت پخش شده یکنواخت
۱۰۲	۲-۳-۴ جبران موازی قابل تنظیم پخش شده یکنواخت
۱۲۴	۲-۴ جبران موازی پاسیو
۱۲۴	۲-۴-۱ کنترل ولتاژ مدار باز با استفاده از راکتورهای موازی
۱۲۹	۲-۴-۲ کنترل ولتاژ بوسیله سوئیچ کردن جبران کننده موازی

۱۳۰	۲-۴-۳ خازن یاراکتور موازی واقع در نقطه میانی خط
۱۳۶	۲-۵ جبران سری
۱۳۶	۲-۵-۱ اهداف و محدودیت‌های عملی
۱۳۸	۲-۵-۲ خط متقارن جبران شده با خازن سری در نقطه میانی و راکتورهای موازی
۱۴۲	۲-۵-۳ مثال‌هایی از خط جبران شده سری
۱۴۶	۲-۶ جبران با تقسیم‌بندی خط (جبران موازی دینامیک)
۱۴۶	۲-۶-۱ مفاهیم اصلی
۱۴۸	۲-۶-۲ رفتار دینامیکی جبران کننده میانی
۱۵۲	۲-۶-۳ مثال خطی که بطریق تقسیم بندی خط جبران شده است
۱۵۵	مراجع
۱۵۷	۳- جبران توان راکتیو و رفتار دینامیکی سیستم‌های انتقال
۱۵۷	۳-۱ مقدمه
۱۵۷	۳-۱-۱ دینامیک سیستم قدرت الکتریکی
۱۵۸	۳-۱-۲ ضرورت جبران راکتیو قابل تنظیم
۱۵۹	۳-۲ چهار پرورد زمانی
۱۶۲	۳-۲-۱ پرورد گذرا
۱۶۵	۳-۲-۲ پرورد اولین نوسان و پایداری گذرا
۱۶۸	۳-۲-۳ پرورد نوسانی
۱۶۹	۳-۲-۴ جبران و دینامیک سیستم
۱۶۹	۳-۳ جبران موازی پاسیو
۱۷۰	۳-۳-۱ پرورد گذرا
۱۷۳	۳-۳-۲ پرورد اولین نوسان
۱۷۴	۳-۳-۳ پرورد نوسانی
۱۷۴	۳-۳-۴ خلاصه‌ای از جبران موازی پاسیو
۱۷۵	۳-۴ جبران کننده‌های استاتیک
۱۷۵	۳-۴-۱ پرورد گذرا
۱۸۸	۳-۴-۲ پرورد نوسان اول
۱۹۱	۳-۴-۳ اثر جبران کننده موازی استاتیک بر پایداری گذرا
۲۰۱	۳-۴-۴ پرورد نوسانی

۲۰۴	۳-۴-۵ ممانعت از ناپایداری ولتاژ با استفاده از جبران استاتیک
۲۰۷	۳-۴-۶ خلاصه-رفتار دینامیکی جبران کننده
۲۰۷	۳-۵-۵ کندانسور سنکرون
۲۰۹	۳-۵-۱ پریرودگذرا
۲۱۰	۳-۵-۲ پریرودهای اولین نوسان و نوسانی
۲۱۱	۳-۶-۶ جبران با خازن سری
۲۱۱	۳-۶-۱ پریرودگذرا
۲۱۱	۳-۶-۲ پریرود اولین نوسان و پایداری گذرا
۲۱۴	۳-۶-۳ پریرود نوسانی
۲۱۴	۳-۷ خلاصه
۲۱۶	مراجع
۲۱۷	۴-۱ اصول کار جبران کننده‌های استاتیک
۲۱۷	۴-۱ موارد استعمال جبران کننده‌ها
۲۱۸	۴-۱-۱ مشخصات جبران کننده‌های استاتیک
۲۲۰	۴-۱-۲ انواع اصلی جبران کننده
۲۲۱	۴-۲ راکتور تائیرستور کنترل (TCR) و انواع جبران کننده‌های مربوط به آن
۲۲۱	۴-۲-۱ اصول کار
۲۲۴	۴-۲-۲ مشخصه ولتاژ-جریان
۲۲۵	۴-۲-۳ هارمونیک
۲۳۱	۴-۲-۴ ترانسفورماتور تائیرستور کنترل
۲۳۱	۴-۲-۵ TCR همراه با خازنهای موازی
۲۳۴	۴-۲-۶ انواع سیستم کنترل
۲۳۹	۴-۲-۷ مشخصات دیگر جبران کننده‌های TCR
۲۴۳	۴-۳ خازن تائیرستور سوئیچ
۲۴۳	۴-۳-۱ اصول کار
۲۴۴	۴-۳-۲ گذرای سوئیچ کردن خازن و مفهوم سوئیچ کردن بدون گذرا
۲۵۲	۴-۳-۳ مشخصه ولتاژ-جریان
۲۵۵	۴-۴ جبران کننده‌های راکتور قابل اشباع
۲۵۵	۴-۴-۱ اصول کار

۲۵۸	۲-۴-۴ مشخصه‌های ولتاژ-جریان
۲۶۰	۵-۴ خلاصه
۲۶۳	۶-۴ پیشرفتهای آتی و نیازمندیها
۲۶۵	۵-طراحی کنترل کننده‌های تایرستوری
۲۶۵	۱-۵ تایرستور
۲۶۵	۲-۵ نقش تایرستور بعنوان سوئیچ؛ مقادیر نامی
۲۶۸	۳-۵ ملاحظات حرارتی
۲۷۱	۴-۵ توصیف کنترلر تایرستوری
۲۷۱	۱-۴-۵ کلیات
۲۷۳	۲-۴-۵ مدار ضربه گیر R-C
۲۷۵	۳-۴-۵ انرژی آتش کننده
۲۷۷	۴-۴-۵ حفاظت در مقابل اضافه ولتاژ
۲۷۸	۵-۴-۵ تغییرات تلفات کنترلر تایرستوری در خلال عملکرد آن
۲۷۸	۵-۵ سیستم خنک کننده
۲۸۰	۱-۵-۵ سیستم خنک کننده با هوای فیلتر شده
۲۸۰	۲-۵-۵ تغییرات سیستم خنک کننده با هوای فیلتر شده
۲۸۲	۳-۵-۵ سیستم هوای سیرکوله شده مجدد
۲۸۲	۴-۵-۵ سیستم خنک کننده باسیال
۲۸۳	۵-۵-۵ نظریات کلی در کاربرد سیستم‌های خنک کننده
۲۸۳	۶-۵ مثالی از کنترلر تایرستوری
۲۸۵	مراجع
۲۸۷	۶-مثالی از جبران کننده استاتیک جدید
۲۸۷	۱-۶ مقدمه
۲۸۸	۲-۶ آرایش اصلی
۲۹۰	۳-۶ توصیف اجزاء اصلی
۲۹۴	۴-۶ سیستم کنترل کنترلر تایرستوری
۲۹۸	۵-۶ آزمایش رفتار سیستم
۳۰۱	۷-خازنهای سری
۳۰۱	۱-۷ مقدمه

۳۰۲	۲-۷ تاریخچه
۳۰۲	۳-۷ طراحی و تجهیزات
۳۰۲	۱-۳-۷ واحدهای خازن
۳۰۴	۲-۳-۷ حفاظت با فیوز
۳۰۶	۳-۳-۷ فاکتورهای جبران سازی
۳۰۶	۴-۳-۷ آرایش فیزیکی
۳۰۷	۴-۷ وسایل حفاظتی
۳۱۳	۵-۷ روشهای وارد کردن مجدد خازن
۳۱۵	۶-۷ حفاظت با واریستور
۳۲۰	۷-۷ اثرات رزونانس با خازنهای سری
۳۲۳	۸-۷ خلاصه
۳۲۴	مراجع
۳۲۵	۸-کندانسورهای سنکرون
۳۲۵	۱-۸ مقدمه
۳۲۶	۲-۸ جنبه‌های طراحی کندانسور
۳۲۹	۳-۸ مشخصه‌های اصلی الکتریکی
۳۲۹	۱-۳-۸ ثابت‌های ماشین
۳۳۰	۲-۳-۸ دیاگرام فازوری
۳۳۱	۳-۳-۸ منحنی V
۳۳۳	۴-۳-۸ مدار معادل ساده شده
۳۳۴	۴-۸ عملکرد کندانسور
۳۳۴	۱-۴-۸ کنترل ولتاژ سیستم قدرت
۳۳۵	۲-۴-۸ تامین توان راکتیو اضطراری
۳۳۸	۳-۴-۸ تقلیل نوسانات گذرا
۳۴۰	۴-۴-۸ کاربردهای HVDC
۳۴۲	۵-۸ روشهای راه‌اندازی
۳۴۲	۱-۵-۸ راه‌اندازی با موتور
۳۴۴	۲-۵-۸ راه‌اندازی با ولتاژ کاهش یافته

۳۴۶	۸-۵-۳ راه انداز استاتیکی
۳۴۸	۸-۶ ملاحظات در طراحی پست
۳۴۸	۸-۶-۱ آرایش تک خطی
۳۴۹	۸-۶-۲ کنترل و حفاظت
۳۴۹	۸-۶-۳ سیستم‌های کمکی
۳۵۱	۸-۷ خلاصه
۳۵۲	مراجع
۳۵۳	۹-جبران راکتیو و کوره الکتریکی
۳۵۳	۹-۱ مقدمه
۳۵۴	۹-۲ کوره الکتریکی بعنوان بار الکتریکی
۳۵۴	۹-۲-۱ کوره الکتریکی در تولید فولاد
۳۵۴	۹-۲-۲ نیازمندیهای سیستم تغذیه کوره‌های الکتریکی
۳۶۰	۹-۳ چشمک زدن و اصول جبران سازی آن
۳۶۰	۹-۳-۱ ماهیت کلی مساله چشمک زدن
۳۶۶	۹-۳-۲ روشهای جبران چشمک زدن
۳۷۰	۹-۳-۳ انواع جبران کننده
۳۷۱	۹-۴ جبران کننده‌های تایریستور کنترل
۳۷۲	۹-۴-۱ ارتباط بین توان راکتیو جبران کننده و زاویه آتش تایریستور
۳۷۷	۹-۴-۲ تعیین توان راکتیو مورد نیاز
۳۷۹	۹-۴-۳ مثالی از نتایج حاصل از جبران چشمک زدن با استفاده از TCR
۳۷۹	۹-۵ جبران کننده‌های راکتور قابل اشباع
۳۷۹	۹-۵-۱ جبران کننده راکتور انشعابی / راکتور قابل اشباع
۳۸۲	۹-۵-۲ جبران کننده راکتور قابل اشباع چند فازه جبران شده هارمونیک
۳۸۵	مراجع
۳۸۷	۱۰-هارمونیک
۳۸۷	۱۰-۱ مقدمه
۳۸۷	۱۰-۲ منابع هارمونیک
۳۹۴	۱۰-۳ اثر هارمونیک بر تجهیزات الکتریکی
۳۹۵	۱۰-۴ رزونانس، خازنهای موازی و فیلترها

۱۲ / کنترل توان راکتیو

۳۹۹	۱۰-۵ سیستم فیلتر
۴۰۷	۱۰-۶ تداخل تلفنی
۴۱۰	مراجع
۴۱۱	۱۱-هماهنگی توان راکتیو
۴۱۱	۱۱-۱ مقدمه
۴۱۳	۱۱-۲ مدیریت توان راکتیو
۴۱۳	۱۱-۲-۱ اهداف موسسه برق
۴۱۴	۱۱-۲-۲ اقدامات موسسه
۴۱۵	۱۱-۲-۳ مدل ریاضی
۴۱۷	۱۱-۲-۴ فواید انتقال
۴۱۹	۱۱-۲-۵ تجربه در زمینه پخش توان راکتیو
۴۱۹	۱۱-۲-۶ تاثیر بر روی تجهیزات
۴۲۱	۱۱-۳ نتیجه گیری
۴۲۱	مراجع
۴۲۳	مراجع برگزیده

پیشگفتار

کنترل توان راکتیو بعنوان یک عامل حائز اهمیت در طراحی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت الکتریکی جریان متناوب از دیرباز مورد توجه بوده است. در یک بیان بسیار ساده و کلی می‌توان گفت از آنجائیکه امپدانس‌های اجزاء سیستم قدرت بطور غالب راکتیو می‌باشند، انتقال توان اکتیو مستلزم وجود اختلاف زاویه فاز بین ولتاژهای ابتدا و انتهای خط است (که در یک محدوده نسبتاً وسیع عملی است)، در حالیکه برای انتقال توان راکتیو لازم است که اندازه این ولتاژها متفاوت باشد (که فقط در یک محدوده خیلی کوچک عملی است).

اما به چه دلیل می‌خواهیم توان راکتیو را انتقال دهیم؟ آیا این یک مفهوم پردردسر نیست که توسط نظریه‌پردازان بوجود آمده است و باید به آن بی‌اعتنا بود؟ جواب این است که نه تنها اغلب اجزاء سیستم توان راکتیو مصرف می‌کنند بلکه اکثر بارهای الکتریکی نیز توان راکتیو مصرف می‌نمایند، بنابراین توان راکتیو مصرفی بایستی از محلی تامین گردد. اگر قادر نباشیم آنرا به سهولت انتقال دهیم آنگاه بایستی در محلی که مورد نیاز است آنرا تولید نمائیم.

البته همین مطلب در مورد توان اکتیو نیز صادق است، لیکن قیود و محدودیت مربوط به انتقال آن خیلی ضعیف‌تر و مربوط به جاییابی (و اندازه) آن شدیدتر است.

درک این موضوع حائز اهمیت است که وقتی راجع به انتقال انرژی الکتریکی صحبت می‌کنیم بایستی راجع به فواصل الکتریکی صحبت کنیم. بعنوان مثال، راکتانس ترانسفورماتور می‌تواند به بزرگی راکتانس ۵۰ مایل خط انتقال باشد. بنابراین، وقتی فاصله انتقال متوسط در آمریکا را فقط حدود ۱۰۰ مایل در نظر می‌گیریم، واضح است که حقیقتاً ما کاملاً از انتقال اجتناب نمی‌کنیم مگر اینکه تولید توان راکتیو درست در سطح ولتاژی انجام گیرد که مصرف می‌شود. این موضوع نسبتاً این حقیقت را توضیح می‌دهد که می‌توانیم در یک شبکه، جبران موازی را به صورت خازنهای موازی در سیستم توزیع در راکتورهای موزای در سیستم انتقال، مشاهده نمائیم.

یک رابطه بنیادی و مهمی بین انتقال توان راکتیو و اکتیو وجود دارد. همانطوریکه گفتیم انتقال توان اکتیو مستلزم جابجایی فاز ولتاژها می‌باشد. لیکن مقدار ولتاژها نیز به همین میزان حائز اهمیت است. مقدار آنها نه تنها بایستی بقدر کافی بالا باشد که بتواند بارها را حمایت نماید، بلکه لازم است بقدر کافی پائین باشد که منجر به

شکست عایق تجهیزات نگردد. بنابراین، بایستی در صورت لزوم ولتاژها را در نقاط کلیدی کنترل کرده و یا حمایت یا محدودیتی را بر آنها اعمال کنیم. این عمل کنترل می‌تواند در سطح وسیعی بوسیله تولید یا مصرف توان راکتیو در نقاط کلیدی صورت گیرد.

گرچه این جنبه از توان راکتیو از دیرباز مورد توجه بوده است لیکن امروزه حداقل بدو دلیل زیر اهمیت زیادی پیدا کرده است: دلیل اول مربوط به فشار روز افزون در جهت بهره‌برداری حداکثر ممکن از سیستم‌های انتقال است و دلیل دوم اینکه انواع جدیدی از جبران‌کننده‌های راکتیو استاتیکی قابل کنترل توسعه یافته است. در سنوات خیلی دور در روند رشد شبکه‌های قدرت الکتریکی برای حمایت ولتاژ و بهبود توانایی انتقال توان از کندانسورهای سنکرون استفاده گردید. همزمان در سیستم توزیع از خازنهای موازی برای بهبود پروفایل ولتاژ و کاهش بارگیری خط و تلفات (با اصلاح ضریب توان) استفاده شد. توسعه سریع و اقتصادی بودن خازنهای موازی منجر به جایگزینی آنها با کندانسورهای سنکرون در سیستم‌های انتقال گردید. ملاحظه گردید که عملاً می‌توان آنچه را که کندانسورهای سنکرون انجام می‌دادند از سوئیچ کردن خازنهای موازی با هزینه‌ای خیلی کمتر بدست آورد. هم اکنون نشانه‌هایی است که مجدداً شیوه، رجعت یافته و تامین توان راکتیو قابل کنترل در قالب وسایل استاتیکی مطرح شده است. البته از نقطه نظر اقتصادی، هنوز بایستی یک مهندس سیستم تعیین کند که چقدر از خازن ثابت (یا اندوکتانس ثابت) استفاده گردد و چه مقدار سوئیچ گردد و در نهایت چه مقدار بطور پیوسته و سریع کنترل گردد (مثلاً در خلال اغتشاش). البته هنوز این سؤال باقی می‌ماند که چه مقدار توان راکتیو توسط ژنراتورهای سنکرون تامین گردد.

تاکنون راجع به توان راکتیوی که از شبکه و یا به شبکه تامین می‌گردد را مورد بحث قرار دادیم. البته در ابتدای این پیشگفتار خاطرنشان کردیم که بخشی از توان راکتیو در عناصر سری شبکه - مثلاً در راکتانس خطوط و ترانسفورماتور - مصرف می‌شود. از اینرو، یکی از روشهای مستقیم افزایش توان انتقال در سیستم انتقال و کاهش افت ولتاژ در سیستم توزیع، جبران بخشی از راکتانس اندوکتیو سری بوسیله خازنهای سری است. البته عموماً این مساله را از دیدگاه کاهش راکتانس (بجای توان راکتیو) مورد عنایت قرار می‌دهند. در کاربرد خازنهای سری مواجه با مسائلی می‌گردیم و در سیستم‌های توزیع به ندرت کاربرد دارد، لیکن بهترین شیوه افزایش ظرفیت توان انتقالی در موارد متعدد است. همچنین از آنها در متعادل کردن بارگیری خطوط شبکه استفاده می‌شود. بنابراین در یک شبکه حلقوی بایستی کاربرد خازنهای سری هماهنگ گردد طوری که یک توزیع مناسب بارگیری خطوط بدست آید، در حالیکه کاربرد یک خازن موازی (یا هر وسیله حمایت ولتاژ) می‌تواند منجر به مزایایی در یک نقطه معین گردد.

کتاب حاضر مباحث تئوری و عملی مربوط به کنترل توان راکتیو و جبران سازی را دربر می‌گیرد و علاوه بر این یک فصل به هارمونیک اختصاص یافته است. بدون شک موضوع کنترل توان راکتیو اهمیت روز افزون می‌یابد و بنابراین این کتاب بخصوص در این زمان مناسب است. نویسندگان این کتاب همگی سالها در زمینه سیستم‌های قدرت و تکنولوژی مربوط به توان راکتیو تجربه کسب کرده‌اند.

مقدمه مؤلف

تقریباً سی درصد منابع انرژی اولیه در جهان برای تولید انرژی الکتریکی به مصرف می‌رسد و تقریباً تمامی این انرژی الکتریکی بوسیله جریان متناوب در فرکانس ۵۰ یا ۶۰ Hz انتقال یافته و توزیع می‌گردد. در حال حاضر بیش از هر زمانی طراحی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت با حداکثر بازده و بیشترین میزان قابلیت اعتماد و ایمنی حائز اهمیت است. این نیازمندیها انگیزه یک سلسله پیشرفت در تکنولوژی انتقال توان ac گردیده است و هدف این کتاب توصیف پاره‌ای از این پیشرفته‌ها از نظر تئوری و عملی می‌باشد.

بدلیل اهمیت کنترل توان راکتیو و بدلیل گستردگی موضوع و همچنین روش بررسی، این کتاب می‌تواند برای بخش وسیعی از مهندسين برق، الکترونیک و کنترل جالب باشد. مهندسين شاغل در موسسات برق و مراکز صنعتی، تئوری و توصیف تجهیزات کنترل توان راکتیو را در حل مسائل مربوط به اصلاح ضریب توان، کنترل و تثبیت ولتاژ، متعادل کردن فاز و رفتار هارمونیک، بسیار با ارزش یافته‌اند.

در دانشگاهها نیز این کتاب می‌تواند مبنایی ایده‌آل برای دانشجویان لیسانس و فوق لیسانس در دوره آموزشی آنها باشد و بخش‌های متعددی از آن قبلاً به همین منظور در دانشگاه Wisconsin و در دوره آموزشی سیستم‌های قدرت General Electric استفاده گردیده است.

کنترل توان راکتیو که موضوع این کتاب است، بدلائل متعددی که تعدادی از آنها به اختصار در اینجا ذکر می‌شود، اهمیت روز افزون یافته است. دلیل اول اینکه با توجه به قیمت سوخت، نیاز به بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های قدرت افزایش یافته است. برای توزیع یک مقدار معین توان، با به حداقل رساندن پخش توان راکتیو کل، تلفات کاهش می‌یابد. این اصل می‌تواند در شکل ساده یک خازن اصلاح‌کننده ضریب توان یک بار اندوکتیو و یا در قالب الگوریتم‌های پیشرفته تشریح شده در فصل ۱۱ که در یک شبکه بزرگ بکار می‌روند و توسط کامپیوتر کنترل می‌شوند، در سراسر سیستم اعمال گردد. دلیل دوم اینکه بواسطه میزان بالای نرخ سود عموماً و مشکلات مربوط به حریم خطوط انتقال در مواردی خاص، از توسعه و احداث شبکه‌های انتقال حتی الامکان جلوگیری می‌شود. در موارد متعددی سعی شده است که با استفاده از وسایل کنترل توان راکتیو و بهبود پایداری، میزان توان

انتقالی خطوط موجود را افزایش داد. دلیل سوم اینکه، در بهره‌برداری از منابع آبی، نیروگاه‌های دور دست - نظیر آنهایی که در اطراف Hudson Bay و در مناطق کوهستانی افریقا و آمریکای جنوبی است - توسعه یافته است. علی‌رغم توسعه تکنولوژی انتقال dc، در بسیاری از این طرح‌ها انتقال ac ترجیح داده شده است. مسائل پایداری و کنترل و لذا به مسائل کنترل توان راکتیو ارتباط داشته و راه‌حلهای زیادی ارائه گردیده است که از کاربرد راکتورها و خازنهای موازی شروع و تا خازنهای سری، کندانسورهای سنکرون و جبران‌کننده‌های استاتیکی جدید ادامه می‌یابد. دلیل چهارم اینکه، بواسطه مصرف روز افزون وسایل الکترونیکی (به‌خصوص کامپیوتر و تلویزیون رنگی) و همچنین رشد صنایع با فرایند پیوسته، نیاز به داشتن تغذیه با کیفیت بالا افزایش یافته است.

کاهش ولتاژ یا فرکانس اثرات نامطلوبی را بر روی چنین بارهایی اعمال می‌کند و قطع تغذیه می‌تواند خیلی صدمه آور و پرهزینه باشد. کنترل توان راکتیو یک ابزار اساسی در حفظ کیفیت تغذیه می‌باشد، به‌خصوص برای جلوگیری از اغتشاشات و لذا که از عمومی‌ترین نوع اغتشاش می‌باشد. انواع معین از بارهای صنعتی، از آنجمله کوره‌های الکتریکی، دستگاههای حفاری و دستگاههای جوشکاری با دریافت توان اکتیو و راکتیو از سیستم تغذیه تغییرات سریع و وسیعی را بر آن تحمیل می‌نمایند و اغلب لازم است که با بکارگرفتن وسایل تثبیت‌کننده و لذا نظیر جبران‌کننده‌های توان راکتیو استاتیکی این تغییرات را کاهش داد. دلیل پنجم اینکه، با توسعه و احداث خطوط انتقال dc کنترل توان راکتیو در طرف ac مبدلها ضرورت پیدا کرد تا بدینوسیله ولتاژ تثبیت گردیده و به عمل کموتاسیون مبدل مساعدت گردد.

تمامی این جنبه‌های مهندسی از نقطه نظر تئوری و عملی به بحث کشیده می‌شود. در فصول ۱ الی ۳ راجع به تئوری انتقال توان ac بحث و بررسی می‌شود. بحث از یک خازن اصلاح‌کننده ضریب توان شروع و به سمت اصولی که براساس آن جبران‌کننده‌های استاتیک با پاسخ سریع طراحی می‌شود، پیش می‌رود. در فصل ۲ اصول انتقال توان در ولتاژهای بالا و فواصل طولانی مورد بررسی قرار گرفته و در فصل ۳ جنبه‌های مهم دینامیک سیستم و نقش کنترل توان راکتیو در بهبود رفتار آن بحث و بررسی می‌گردد. در فصل ۲ بر روش عام «جبران سازی» تکیه می‌شود و سه روش اساسی جبران یعنی جبران با تقسیم‌بندی خط، جبران امپدانس ضربه‌ای و جبران طول خط تعریف و با یکدیگر مقایسه می‌گردد. در فصل ۱ روش عام جبران بار معرفی می‌گردد و شبکه جبران‌کننده برای اصلاح ضریب توان، تثبیت ولتاژ توصیف می‌شود و نهایتاً خواص شبکه جبران‌کننده بعنوان شبکه توالی ثابت مثبت و منفی که قادر است ولتاژ را تثبیت و ضریب توان را اصلاح و فازها را متعادل نماید تشریح می‌گردد (برحسب مقادیر لحظه‌ای و فازور جریانها و ولتاژها).

در فصل ۴ اصول کار جبران‌کننده‌های استاتیکی جدید شامل راکتور تایریستور کنترل، خازن تایریستور سوئیچ و راکتور قابل اشباع به تفصیل تشریح می‌گردد. توجه خاصی به جنبه‌های کنترلی آنها مبذول می‌گردد و راجع به پدیده سوئیچینگ خازن، در جبران‌کننده خازن تایریستور سوئیچ بطور مفصل بحث می‌شود.

در فصول ۵ و ۶ جبران‌کننده‌های استاتیک بیشتر مورد بررسی قرار می‌گیرند. در فصل ۵ کنترلر تایریستوری

قدرت - بالا و سیستم‌های مربوطه تشریح می‌گردد. در حالیکه در فصل ۶ تاسیسات یک جبران‌کننده جدید به انضمام سیستم کنترل و آزمایش رفتار آن، بطور کامل توصیف می‌گردد.

در فصل ۷ خازنهای سری تشریح می‌گردد. با حل مساله رزونانس زیر سنکرون (SSR)، و امکان وارد کردن لحظه‌ای مجدد خازن‌ها به مدار به کمک واریستور، خازنهای سری به عنوان وسیله‌ای موثر و اقتصادی در افزایش توان انتقالی و پایداری خطوط طویل محسوب می‌گردند. نحوه کنترل SSR و عملکرد واریستور هر دو در این فصل تشریح می‌شوند.

بدلیل اهمیت جبران سازی با کندانسور سنکرون، در فصل ۸ این نوع جبران‌کننده شرح داده می‌شود. کندانسور سنکرون بعنوان یک ماشین گردان جایگاه طبیعی و مهمی را در تئوری کنترل توان راکتیو ایفا می‌کند و تعداد زیادی از تاسیسات کندانسور سنکرون جدید بسیار بزرگ و پیشرفته می‌باشند. سیستم‌های تحریک پاسخ سریع و استراتژی‌های کنترل جدید رفتار کندانسور را بهتر نموده است.

در فصل ۹ نقش کنترل توان راکتیو در رابطه با کوره‌های الکتریکی به تفصیل تشریح گردیده است. کوره‌های الکتریکی از بارهایی هستند که مساله جبران سازی بار را به خود اختصاص داده و بمنظور کاهش دادن مساله چشمک زدن نیاز به جبران‌کننده با مقادیر نامی بزرگ و پاسخ خیلی سریع دارند. فصل ۹ بخاطر بررسی‌های آن بر روی محدودیتهای سرعت پاسخ روشهای مختلف کنترل توان راکتیو برای عموم مطالعه کنندگان جالب خواهد بود. همچنین مزایای جبران سازی را در فرایند تولید فولاد به وضوح نشان می‌دهد طوریکه رفتار بار بوسیله کنترل توان راکتیو و ولتاژ بهبود می‌یابد حتی وقتی که این عمل برای دلایل دیگری (نظیر کاهش چشمک زدن) صورت گیرد.

موضوع کنترل توان راکتیو ارتباط تنگاتنگی با موضوع هارمونیک دارد زیرا کنترل و جبران توان راکتیو در ارتباط با بارها ضرورت پیدا می‌کنند که خود نیز مولد هارمونیک هستند. دلیل دیگری که موجب اهمیت مساله هارمونیک در یک کتاب مربوط به کنترل توان راکتیو می‌گردد این است که تقریباً جبران راکتیو همواره بر روی فرکانسهای رزونانس سیستم قدرت تاثیر می‌گذارد (حداقل در محل) و خازن‌ها، راکتورها و جبران‌کننده‌ها بایستی به طریقی آرایش گردند که از وقوع رزونانسهای هارمونیک اجتناب گردد. فصل ۱۰ راجع به این موضوعات بحث کرده و با مثالهای عملی نقش فیلترها را بررسی می‌نماید.

فصل نهایی یعنی فصل ۱۱، راجع به یک موضوع نسبتاً جدیدی تحت عنوان هماهنگی توان راکتیو بحث می‌کند و تعدادی از روشهای منظم هماهنگ کردن کنترل توان راکتیو در یک سیستم بهم پیوسته بزرگ را توصیف می‌نماید. می‌نیمم کردن تلفات سیستم یکی از چندین شرایط بهینه‌ای است که می‌تواند به کمک کنترل و تحلیل کامپیوتری معین گردد. سرانجام خواننده را با این موضوع امیدبخش جدید به آینده می‌سپاریم.

مقدمه مترجم

کتاب حاضر ترجمه کتابی است تحت عنوان

Reactive power control in Electric systems

T. J. E Miller

که در سال ۱۹۸۴ میلادی توسط مولف فوق به چاپ رسیده است. این کتاب مشتمل بر یازده فصل است که در به رشته تحریر درآوردن آن، علاوه بر نویسنده فوق، ۸ نویسنده دیگر (که اسامی آنها در ابتدای هر فصل مشخص شده است) مشارکت داشته‌اند. مولف و نویسنده اصلی کتاب یعنی T. J. E Miller از اعضاء مرکز تحقیق و توسعه موسسه جنرال الکتریک (GEC) است و نویسندگان دیگر نیز همگی از اعضاء فعال مراکز تحقیقاتی موسسات مختلف برق و بخش‌های مهندسی متعدد مربوط به آنها هستند. بنابراین از این نقطه نظر این کتاب علاوه بر این که می‌تواند برای دانشجویان دوره کارشناسی و کارشناسی ارشد رشته برق مفید واقع گردد برای مهندسين برق، الکترونیک و کنترل شاغل در موسسات برق، مراکز صنعتی و موسسات تحقیقاتی (به‌خصوص در مراکز تحقیقاتی وزارت نیرو) قطعاً قابل استفاده و جالب خواهد بود.

به جرأت می‌توان اظهار کرد که این کتاب تنها کتابی است که در زمینه کنترل توان راکتیو تاکنون به چاپ رسیده است. و بمنظور آشنا شدن به این زمینه که بدلائل متعدد اهمیت روزافزون یافته است (دلایل آن در مقدمه مولف آمده است)، بسیار موثر خواهد بود. اینجانب قسمت عمده این کتاب را تحت عنوان مباحث ویژه در قدرت در چندین ترم متوالی برای دانشجویان دوره کارشناسی در دانشگاه فردوسی مشهد تدریس نموده‌ام. موضوع کنترل توان راکتیو یکی از دروس دوره کارشناسی ارشد برق است که در دانشگاه‌های مختلف ایران تدریس می‌گردد. کتاب فوق می‌تواند یکی از مراجع مهم این درس قرار گیرد که همراه با مقالات انتشار یافته در سالهای اخیر، دانشجو را با مبحث کنترل توان راکتیو، جبران‌سازی (در سیستم توزیع و انتقال)، انواع جبران‌کننده‌ها به‌خصوص

جبران‌کننده‌های استاتیکی (SVC) کاملاً آشنا می‌سازد. اینجانب تاکنون دو بار درس کنترل توان راکتیو را برای دانشجویان کارشناسی ارشد در دانشگاه فردوسی مشهد و یک‌بار در دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی تهران ارائه نموده‌ام.

با توجه به اینکه در زمینه جبران راکتیو و طراحی و ساخت چند نوع SVC کنترل شونده با میکروپروسسور در سالهای متمادی تجربه کسب نموده و همچنین به تدریس این موضوع پرداخته‌ام، بر خود لازم دانستم که به ترجمه کتاب فوق پردازم. امیدوارم که برای مهندسين برق و دانشجویان رشته برق قابل استفاده و مفید باشد. در خاتمه، لازم می‌دانم که از مسئولین محترم جهاد دانشگاهی مشهد که وسایل ترجمه، چاپ و نشر کتاب را فراهم نموده اند صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم. همچنین از آقای دکتر اصغریان عضو هیئت علمی دانشگاه فردوسی که در تصحیح دست نوشته‌ها با مترجم همکاری نموده‌اند سپاسگزاری می‌نمایم.

رضا قاضی

تئوری جبران بار^۱

T. J. E. MILLER

علائم اصلی

توجه: علائم (حروف) کوچک معرف مقادیر لحظه‌ای ولتاژ، جریان و غیره می‌باشند. علائم پررنگ بیانگر اعداد مختلط (یعنی امپدانسها، ادمیتانسها و جریانها و ولتاژهای فازور) می‌باشند. علائم ستاره‌دار بیانگر مزدوج مختلط می‌باشند. علائم مورب معرف مقادیر فازور ولتاژ و جریان می‌باشند.

علائم

سوسپتانس، S	B
ولتاژ منبع تغذیه، V	E
کنداکتانس، S	G
اپراتور مختلط، $e^{j2\pi/\tau}$	h
جریان، A	I
$\sqrt{-1}$	j
شیب مشخصه ولتاژ - جریان، اهم	K

P	توان، W
Q	توان راکتیو، VAR
R	مقاومت اهمی، اهم
S	توان ظاهری، VA
V	ولتاژ، V
X	راکتانس، اهم
Y	ادمیتانس، S
Z	امپدانس، اهم

علائم یونانی

ϕ	زاویه توان، درجه یا رادیان
Δ	یک تغییر کوچک در
ω	فرکانس زاویه‌ای

اندیس‌ها

c, b, a	سه فاز سیستم قدرت
k	نقطه زانو
ℓ	بار
mp	حداکثر (ماکزیمم) مجاز
R	مولفه اهمی یا واقعی
s	سیستم تغذیه
sc	اتصال کوتاه
X	مولفه راکتیو یا موهومی

اندیس یونانی

γ	جبران کننده
----------	-------------

۱-۱ مقدمه: ضرورت جبران سازی

در یک سیستم قدرت الکتریکی ac ایده آل، ولتاژ و فرکانس در هر نقطه تغذیه ثابت و عاری از هارمونیک و ضریب توان واحد خواهد بود. مخصوصاً این پارامترها مستقل از اندازه و مشخصات بارهای مصرفی خواهند بود. در یک سیستم ایده آل، هر بار مصرفی طوری طراحی می شود که به جای آنکه در یک محدوده وسیعی از ولتاژ غیرقابل پیش بینی رفتار و عملکرد مناسبی داشته باشد، در یک ولتاژ معین تغذیه بهترین عملکرد را داشته باشد. به علاوه، تداخلی^۱ بین بارهای مختلف که می تواند از تغییرات جریان هر بار ناشی شود، وجود نداشته باشد.

از کیفیت تغذیه^۲، بر حسب اینکه چگونه ولتاژ و فرکانس در نقطه تغذیه تقریباً ثابت است و چگونه ضریب توان به یک نزدیک است، می توان تصویری داشت. در سیستم های سه فاز بایستی، میزان متعادل بودن ولتاژها و جریان های سه فاز نیز در این تصور منظور شود. تعریف «کیفیت تغذیه» در عبارت عددی مشخص کردن میانگین حداکثر تغییرات مقدار موثر ولتاژ در یک فاصله زمانی است. این مشخص کردن می تواند با استفاده از مفاهیم آماری با دقت بیشتری انجام گیرد و این روش مخصوصاً در مواردی که تغییرات ولتاژ به طور سریع انجام می گیرد (مثلاً در تغذیه کوره های الکتریکی) مفید خواهد بود.

در این فصل بعضی از مشخصه های سیستم های قدرت و بارهایش که منجر به خراب کردن کیفیت تغذیه می شوند، با تاکید به آنهایی که با عمل جبران سازی - یعنی با تامین یا جذب کردن مقدار مناسب توان راکتیو - قابل تصحیح می باشند، شناسایی می گردند. مطالعه اینکه کیفیت تغذیه چگونه به وسیله چنین بارهایی خدشه دار می شود به تعریف جبران کننده «ایده آل»^۳ منتهی می شود. در بخش ۱-۴ راجع به انواع بار که نیاز به جبران دارند بحث و اثرات روند تکاملی جدید در طراحی مشخصه های الکتریکی مراکز صنعتی به اختصار تشریح خواهد شد. در بخش های بعدی تئوری جبران برای شرایط ماندگار^۴ و شرایط تغییرات کند ارائه خواهد شد.

۱-۲ اهداف در جبران بار

جبران بار عبارتست از مدیریت^۵ توان راکتیو که به منظور بهبود بخشیدن به کیفیت تغذیه در

1- Interference

4- Steady State

2- Quality of Supply

5- Management

3- Ideal Compensator

سیستم‌های قدرت ac انجام می‌گیرد. اصطلاح جبران بار در جایی استعمال می‌شود که مدیریت توان راکتیو برای یک بار تنها (یا گروهی از بارها) انجام می‌گیرد و وسیله جبران‌کننده معمولاً در محلی که در تملک مصرف‌کننده قرار دارد، در نزدیک بار نصب می‌شود. پاره‌ای از اهداف و روشهای به کار گرفته شده در جبران بار با آنچه که در جبران شبکه‌های وسیع تغذیه (جبران انتقال)^۱ مورد نظر است، به طور قابل ملاحظه‌ای تفاوت دارد.

در جبران بار اهداف اصلی سه گانه زیر مورد نظر است:

۱- اصلاح ضریب توان^۲

۲- بهبود تنظیم ولتاژ^۳

۳- متعادل کردن بار^۴

خاطر نشان می‌کنیم که اصلاح ضریب توان و متعادل کردن بار حتی در مواقعی که ولتاژ تغذیه فوق‌العاده «محکم»^۵ است (یعنی ثابت و مستقل از بار است) مطلوب خواهند بود.

اصلاح ضریب توان به این معناست که توان راکتیو مورد نیاز بار به جای آنکه از نیروگاه دور تامین گردد، در محل نزدیک بار تولید گردد. اغلب بارهای صنعتی دارای ضریب توان پس فاز هستند یعنی توان راکتیو جذب می‌نمایند. بنابراین جریان بار مقدارش از آنچه که برای تامین توان واقعی ضروری است بیشتر خواهد بود. تنها توان واقعی است که سرانجام در تبدیل انرژی مفید بوده و جریان اضافی نشان‌دهنده اتلاف است که مشتری نه تنها بایستی بها هزینه اضافی کابلی که آن را انتقال می‌دهد بپردازد بلکه تلفات ژولی اضافی ایجاد شده در کابل تغذیه را نیز می‌پردازد. موسسات تولیدکننده همچنین دلیل کافی برای عدم ضرورت انتقال توان راکتیو غیر ضروری از ژنراتورها به بار، را دارند و آن این است که ژنراتورها و شبکه‌های توزیع قادر نخواهند بود در ضریب بهره کامل کار کنند و کنترل ولتاژ در سیستم تغذیه بسیار مشکل خواهد شد. تعرفه‌های برق تقریباً همواره مشتریان صنعتی را به واسطه بارهای با ضریب توان پائین آنها جریمه می‌نمایند و این عمل سالیان متمادی انجام گرفته و در نهایت منجر به توسعه گسترده کاربرد سیستم‌های اصلاح ضریب توان در مراکز صنعتی شده است. تنظیم ولتاژ در حضور بارهایی که توان راکتیو مصرفی آنها تغییر می‌کند، یک موضوع مهم و در مواردی یک مساله بحرانی خواهد بود. توان راکتیو مصرفی کلیه بارها تغییر می‌کند، گرچه مقدار و میزان تغییرات آنها کاملاً متفاوت است. این تغییرات توان راکتیو در تمامی موارد منجر به تغییرات

1- Transmission compensation 2- Power - Factor correction 3- Voltage Regulation

4- Load balancing

5- Stiff

ولتاژ (یا تنظیم ولتاژ) در نقطه تغذیه می‌گردد و این تغییرات ولتاژ بر عملکرد مفید و موثر کلیه وسایل متصل به نقطه تغذیه مداخله نموده و منجر به امکان تداخل در بارهای مصرف‌کننده‌های مختلف می‌گردد. به منظور جلوگیری از این مساله موسسات تولیدکننده برق معمولاً موظف می‌شوند که ولتاژ تغذیه را در یک حد قانونی نگاه دارند. امکان دارد این حد از مقدار مثلاً $\pm 5\%$ میانگین در یک فاصله زمانی چند دقیقه یا چند ساعت، تا یک مقدار بسیار محدودتر تغییر نماید. این مقدار محدودتر از ناحیه بارهای بزرگ و دارای تغییرات سریع که منجر به ایجاد فرورفتگی در ولتاژ و اثر نامطلوب بر عملکرد وسایل حفاظتی یا چشمک زدن^۱ لامپ و آزار چشم می‌گردد، تحمیل می‌شود^۲. وسایل جبران کننده نقش اساسی را در نگاهداشتن ولتاژ در محدوده موردنظر بازی می‌کنند.

بدیهی‌ترین روش بهبود ولتاژ «قوی‌تر کردن»^۳ سیستم قدرت به کمک افزایش اندازه و تعداد واحدهای تولیدکننده برق و با هرچه متراکم‌تر کردن شبکه‌های به هم پیوسته، می‌باشد. این روش عموماً غیراقتصادی بوده و منجر به افزایش سطح اتصال کوتاه و مقادیر نامی کلیدها می‌شود. راه عملی‌تر و با صرفه‌تر این است که اندازه سیستم قدرت برحسب ماکزیمم تقاضای توان واقعی طراحی شود و توان راکتیو به وسیله جبران‌کننده‌ها - که دارای قابلیت انعطاف بیش از مولدها بوده و در تغییر سطح اتصال کوتاه دخالت ندارند - فراهم گردد.

مساله سومی که در جبران بار مد نظر است متعادل کردن بار است. اکثر سیستم‌های قدرت ac سه فاز بوده و برای عملکرد متعادل طراحی می‌شوند. عملکرد نامتعادل منجر به ایجاد مولفه‌های جریان توالی صفر و منفی می‌گردد. اینگونه مؤلفه‌های جریان اثرات نامطلوبی چون ایجاد تلفات اضافی در موتورهای و مولدها، گشتاور نوسانی در ماشین‌های ac، افزایش ریپل^۴ در یکسوکننده‌ها، عملکرد غلط انواع تجهیزات، اشباع ترانسفورماتورها و جریان اضافی سیم زمین را به دنبال خواهند داشت. انواع خاصی از وسایل (منجمله تعدادی از انواع جبران‌کننده‌ها) در عملکرد متعادل، هارمونیک سوم را کاهش می‌دهند. در شرایط کار نامتعادل این هارمونی نیز در سیستم قدرت ظاهر می‌شود.

محتوی هارمونیک در شکل موج ولتاژ تغذیه پارامتر مهمی در کیفیت تغذیه محسوب می‌شود اما این مساله‌ای است که به واسطه این حقیقت که طیف تغییرات کاملاً بالاتر از فرکانس پایه است، مستلزم توجه خاص جداگانه می‌گردد. هارمونیک‌ها معمولاً به وسیله فیلترها - که دارای اصول

1- Flicker

۲ - موسسات تولیدکننده برق همچنین موظف هستند که فرکانس تغذیه را در محدوده قانونی تعریف شده نگاهدارند تغییرات فرکانس در این فصل مورد بررسی قرار نمی‌گیرد.

3- Strengthen

4- Ripple

طراحی متفاوتی با جبران کننده‌ها هستند - حذف میگردند (۲). با وجود این، مسائل هارمونیک اغلب همراه با مسائل جبران پیش می‌آیند و همواره مساله هارمونیک و فیلتر کردن مورد توجه خواهند بود. به علاوه، تعداد زیادی از جبران کننده‌ها ذاتاً تولید هارمونیک می‌کنند که بایستی به روش داخلی و یا فیلتر خارجی تضعیف شوند.

۱-۳ جبران کننده ایده‌ال

با معرفی اجمالی اهداف اصلی در جبران بار، هم اکنون می‌توان مفهوم جبران کننده ایده‌ال را بیان کرد. جبران کننده ایده‌ال وسیله‌ای است که در نقطه تغذیه (یعنی به موازات بار) متصل و وظایف سه گانه زیر را به عهده می‌گیرد: (۱) ضریب توان را به مقدار واحد تصحیح می‌کند (۲) تنظیم (تغییر) ولتاژ را حذف می‌کند (و یا مقدارش را تا سطح قابل قبولی کاهش می‌دهد) و (۳) جریانهای سه فاز و یا ولتاژهای سه فاز را متعادل می‌کند. جبران کننده ایده‌ال در حذف اعوجاج ناشی از هارمونیک که در جریان و یا ولتاژهای تغذیه موجود است، نقشی ندارد (این عمل به عهده فیلتر مناسب می‌باشد)، لیکن جبران کننده ایده‌ال خودش نبایستی تولید هارمونی اضافی نماید. از خواص دیگر جبران کننده ایده‌ال توانائیش در پاسخ لحظه‌ای است که می‌تواند نقش سه گانه فوق را انجام دهد. مفهوم پاسخ لحظه‌ای، تعریف کردن ضریب توان لحظه‌ای و عدم تعادل فاز لحظه‌ای را ایجاب می‌کند. جبران کننده ایده‌ال همچنین توان متوسط مصرف نمی‌کند یعنی بدون تلفات در نظر گرفته می‌شود.

عملیات اصلی سه گانه جبران کننده ایده‌ال مستقل از یکدیگر هستند. البته، اصلاح ضریب توان و متعادل کردن فازها خود بخود منجر به بهبود در وضع تنظیم ولتاژ می‌گردد. در حقیقت در بعضی موارد، مخصوصاً وقتی که تغییرات بار کند و یا وقوع آن کم است، جبران کننده‌ای که برای اصلاح ضریب توان و یا متعادل کردن فازها طراحی شده است لازم نیست که عمل خاصی را به منظور تنظیم ولتاژ انجام دهد. جبران کننده ایده‌ال را می‌توان با بیان موارد زیر دقیق‌تر معرفی کرد و آن اینکه جبران کننده بایستی:

۱- بر طبق نیازمندی بار، مقدار متغیر و قابل کنترل توان را کتیو را بدون تاخیر فراهم نماید.

۲- در ترمینال خودش مشخصه ولتاژ ثابتی را ارائه نماید.

۳- قادر باشد که در سه فاز به طور مستقل عمل نماید.

مسئولیت جبران سازی با در نظر گرفتن عوامل مختلف، بین تولیدکننده برق و مصرف‌کننده

تقسیم می‌شود. از جمله این عوامل، اندازه و ماهیت بار، توسعه آن در آینده، استانداردهای بین‌المللی، کارهای انجام شده در محل و درجه تاثیرپذیری از مصرف‌کننده‌های دیگر را می‌توان نام برد. اما اغلب این طور است که مسئولیت اصلاح ضریب توان و متعادل کردن جریان بار را مشتریان عهده‌دار می‌شوند و در حقیقت اکثر تعرفه‌ها مشتریان را ملزم به انجام این کار می‌کنند. از طرف دیگر، تنظیم ولتاژ معمولاً بر عهده تولیدکنندگان برق است.

۴-۱ ملاحظات عملی

۱-۴-۱ بارهائی که به جبران‌سازی نیاز دارند

مساله اینکه آیا یک بار معین در شرایط پایدار نیاز به اصلاح ضریب توان دارد یا خیر، یک مساله اقتصادی است که جواب آن به عوامل مختلفی از آن جمله تعرفه برق، اندازه بار و ضریب توان جبران نشده بستگی دارد. برای بارهای صنعتی بزرگ با ضریب توان جبران نشده کمتر از ۰/۸ اصلاح ضریب توان از نظر اقتصادی مقرون به صرفه خواهد بود.

بارهایی که منجر به تغییرات سریع ولتاژ تغذیه می‌شوند بایستی برای اصلاح ضریب توان و همچنین تنظیم ولتاژ جبران شوند. درجه و میزان تغییرات ولتاژ «در نقطه کوپلاژ مشترک»^۱ (P.C.C) یا در «نقطه ارزیابی»^۲ ارزیابی می‌شود و این نقطه‌ای از شبکه است که در آن معمولاً محدوده مسئولیت تولیدکننده و مصرف‌کننده برق یکدیگر را تلاقی می‌کنند؛ به عنوان مثال، طرف فشار قوی ترانسفورماتور توزیع که یک کارخانه مشخص را تغذیه می‌کند.

نمونه بارهایی که مستلزم جبران هستند عبارتند از کوره‌های الکتریکی، کوره‌های القایی، دستگاه جوش الکتریکی، دستگاه جوش القایی، انواع دستگاه غلطک که برای شکل دادن فلزات به کار می‌رود، دستگاههایی که در کندن معدن و حفاری به کار گرفته می‌شوند، موتورهای بزرگ (بخصوص آنهایی که به کرات روشن و خاموش می‌شوند)، دستگاه چوب‌بری، دستگاههایی مثل سینکروترون^۳ که نیاز به منبع تغذیه با قدرت بالای پالسی^۴ دارند. این بارها را می‌توان به بارهایی که ذاتاً رفتار غیرخطی دارند و بارهایی که با قطع و وصل آنها ایجاد اغتشاش می‌شود، طبقه‌بندی کرد. بارهای غیرخطی معمولاً علاوه بر تولید هارمونیک باعث تغییرات ولتاژ فرکانس پایه می‌گردند. به عنوان

1- Point Of Common Coupling

2- Gauge Point

3- Synchrotrons

4- Pulsed High - Power Supply

مثال جبران کننده‌های به کار گرفته شده در کوره‌های الکتریکی، همیشه همراه با فیلتر هستند که معمولاً برای حذف هارمونی‌های ۳ و ۵ و ۷ و همچنین برای حذف هارمونی‌های ۲ و ۴ و ۱۱ و ۱۳ طراحی شده‌اند.

در صورتی که تعدادی از محرک‌های^۱ موجود در مراکز صنعتی به جای موتور القایی از نوع موتور سنکرون باشند، در ضریب توان و تنظیم ولتاژ بهبود حاصل می‌شود، زیرا موتور سنکرون قادر است که مقدار قابل کنترل توان راکتیو را وارد شبکه و یا از آن جذب نماید. موتور سنکرون همچنین به واسطه داشتن قسمت گردان، انرژی جنبشی را در خود ذخیره کرده و می‌تواند سیستم تغذیه را در موقع افزایش ناگهانی بار حمایت کند. در موارد زیادی می‌توان فرورفتگی‌هایی^۲ که در ولتاژ تغذیه در اثر راه‌اندازی موتور ایجاد می‌شود، را با راه‌اندازی آن از طریق یک ترانسفورماتور قابل تنظیم یا به وسیله یک محرک الکترونیکی^۳ توام با وسایل مربوط به راه‌اندازی تدریجی، جلوگیری کرد.

روند جدید در به کارگیری کنترل با تایریستور در محرک‌های dc بزرگ که در وضعیت «روشن و خاموش»^۴ استعمال می‌شوند، خودبخود مستلزم جبران هستند، زیرا تولید هارمونیک نموده و برای عمل کموتاسیون به توان راکتیو نیاز دارند و فاقد قسمت متحرک گردان هستند.

شکل ۱ نمونه تغییرات توان راکتیو مصرفی یک دستگاه نورد که برای شکل دادن فولاد به کار گرفته شده را نشان می‌دهد. تغییرات توان راکتیو نه تنها زیاد است (تقریباً ۵۰ MVAR) بلکه ناگهانی نیز می‌باشد طوریکه جبران‌کننده بایستی قادر باشد به سرعت به این تغییرات پاسخ دهد. با مشخص کردن بار بر طبق عناوین زیر می‌توان از جبران سازی و نیازمندیهایش ایده اولیه‌ای پیدا کرد.

۱- نوع محرک (dc یا ac، تغذیه با تایریستور یا با ترانسفورماتور)

۲- سیکل کار^۵ بر حسب نیاز توان اکتیو و راکتیو (مثلاً شکل ۱)

۳- سرعت یا میزان تغییر^۶ توان اکتیو و راکتیو (یا زمان لازم برای اینکه توان واقعی یا توان راکتیو از ماکزیمم به مینیمم نوسان نماید)

۴- تولید هارمونیک

۵- اتفاق همزمان نیازمندیهای حداکثر توان واقعی و توان راکتیو در مراکز صنعتی بار چندگانه^۷

1- Drive

4- On and Off

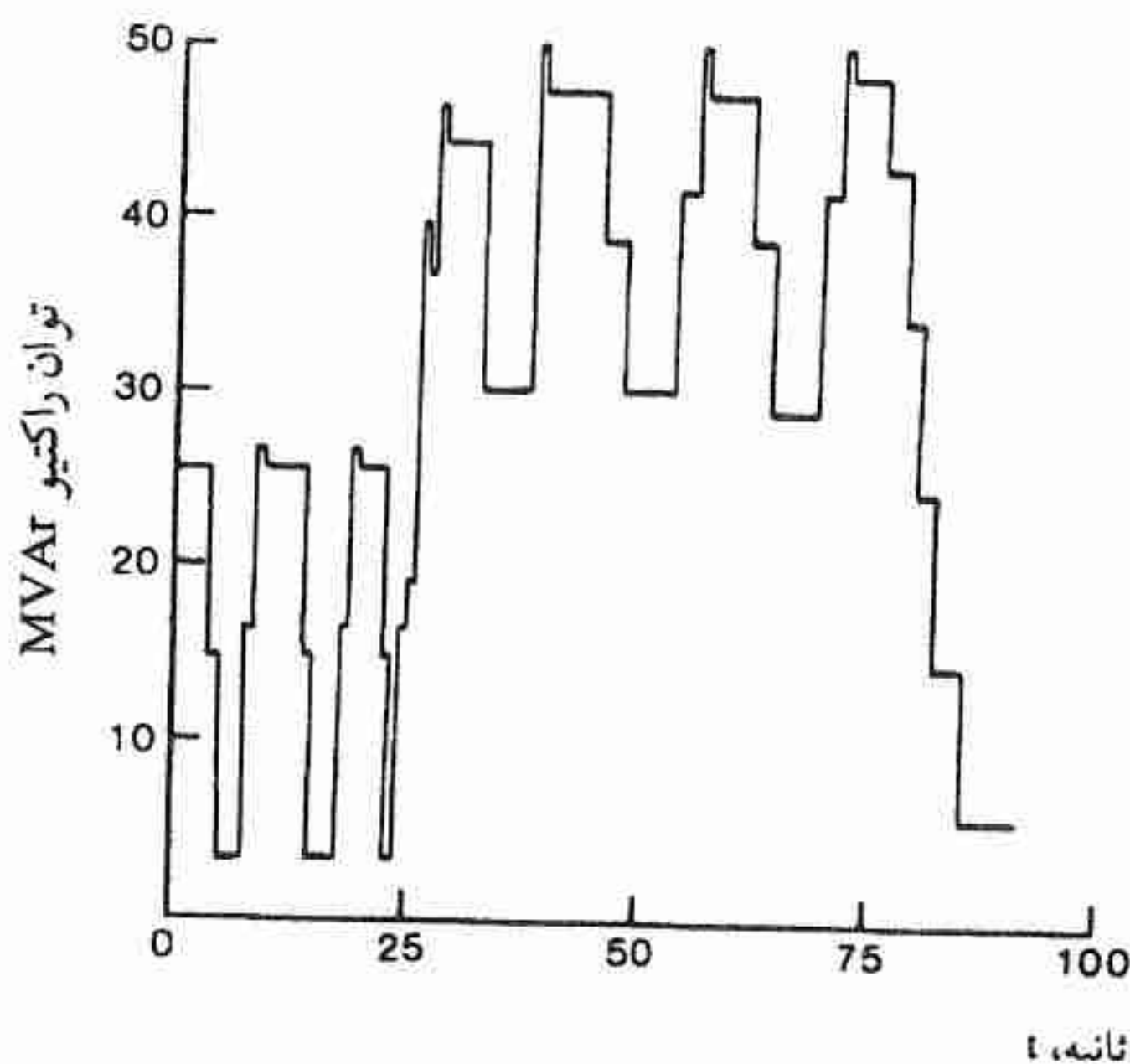
7- Multiple - Load Plants

2- Voltage Dips

5- Duty - Cycle

3- Electronic Drive

6- Rate of Change



شکل ۱ - نمونه تغییرات توان راکتیو مصرفی یک دستگاه نورد فولاد.

۱-۴-۲ استانداردهای مورد قبول برای کیفیت تغذیه

اولین اثر نامطلوب و اعتراض برانگیز تغییرات ولتاژ تغذیه در شبکه توزیع، اغتشاشی است که در روشنایی لامپ پیش می آید. به دلیل مشخصات حساسیت چشم انسان درجه تغییرات که منجر به اعتراض می شود نه تنها به مقدار تغییرات نور بستگی دارد بلکه همچنین به فرکانس و یا میزان تغییرات نیز وابسته است. تغییرات کند تا میزان ۳٪ قابل تحمل است و حال آنکه تغییرات سریع که در اثر کوره الکتریکی و دستگاه جوشکاری ایجاد می شود (بین ۱ تا ۲۵ Hz) در قسمت حداکثر حساسیت مرئی چشم قرار گرفته و بایستی مقدارش تا ۰/۲۵٪ یا کمتر محدود گردد. تعداد زیادی از بارهای دیگر مخصوصاً کامپیوترها، رله‌هاییکه در حفاظت و کنترل استفاده می شوند، موتورهای القایی و لامپهای تخلیه و فلورسنت همگی نسبت به تغییرات ولتاژ تغذیه حساس هستند.

تغییرات ولتاژ تغذیه اثرات نامطلوب بر عملکرد و رفتار صحیح بارهایی که این تغییرات را موجب شده‌اند، دارد. بنابراین با عمل جبران می توان این عملکرد را بهبود بخشیده و همچنین برای

سایر مصرف‌کننده‌ها ولتاژ بهتری را فراهم کرد.

جدول ۱ نشان دهنده نوع استاندارد است که می‌توان برای عملکرد و رفتار صحیح یک سیستم با بار متغیر تجویز کرد. در مورد دستگاه جوش، تغییرات ولتاژ مجاز با حساسیت چشم انسان در مقابل تغییرات نور به عنوان تابعی از فرکانس، نسبت معکوس دارد.

۱-۴-۳ مشخصات یک جبران‌کننده بار

پارامترها و فاکتورهایی که بایستی در تعریف یک جبران‌کننده بار در نظر گرفت، در لیست زیر به‌طور اجمال آمده است. منظور ارائه لیست کامل نیست بلکه هدف ارائه یک ایده از نوع عملی جبران‌کننده و در نظر گرفتن ملاحظات مهم است.

- ۱- حداکثر توان راکتیو پیوسته مورد لزوم که بایستی جذب یا تولید گردد.
- ۲- مقدار نامی اضافه بار^۱ و مدت زمان آن
- ۳- ولتاژ نامی و حدود ولتاژ که مقدار نامی توان راکتیو نبایستی از آن حدود تجاوز نماید.
- ۴- فرکانس و تغییرات آن
- ۵- دقت لازم در تنظیم ولتاژ
- ۶- زمان پاسخ^۲ جبران‌کننده در مقابل یک اغتشاش معین^۳
- ۷- نیازمندیهای کنترل ویژه
- ۸- حفاظت جبران‌کننده و هماهنگی آن با حفاظت سیستم و در نظر گرفتن محدودیت توان راکتیو در صورت لزوم
- ۹- حداکثر اعوجاج ناشی از هارمونیک^۴ با در نظر گرفتن جبران‌کننده
- ۱۰- اقدامات مربوط به انرژی دار کردن و اقدامات احتیاطی
- ۱۱- نگهداری^۵، قطعات یدکی، پیش‌بینی برای توسعه و آرایش جدید سیستم در آینده
- ۱۲- عوامل محیطی، سطح نویز^۶، نصب تاسیسات در محیط باز یا بسته، درجه حرارت، رطوبت، آلودگی هوا، باد و عوامل زلزله، نشی در ترانسفورماتورها، خازنها، سیستم‌های خنک‌کننده.
- ۱۳- رفتار و عملکرد در معرض ولتاژ تغذیه نامتعادل و یا بارهای نامتعادل

1- Overload Rating

2- Response

3- Specified

4- Harmonic Distortion

۵- Maintenance

6- Noise Level

۱۴- نیازمندیهای کابل کشی و طرح بندی و آرایش اجزاء^۱، قابل دسترسی بودن، محصور بودن، زمین کردن

۱۵- قابلیت اعتماد و خارج از سرویس (بدکی) بودن اجزاء^۲
در مورد جبران کوره های الکتریکی بایستی «نسبت بهبود»^۳ یا «نسبت کاهش چشمک زدن»^۴ به عنوان معیاری برای سنجش رفتار و عملکرد جبران کننده مشخص شود.

جدول ۱

نمونه استاندارد تغییرات ولتاژ

نوع بار	حد مجاز برای تغییرات ولتاژ
روشن شدن موتورهای بزرگ	۱-۳٪ برحسب فرکانس
دستگاههای حفاری و کندن معدن و غلطک ها	۱-۳٪ در ولتاژهای توزیع ۱-۱٪ در ولتاژهای انتقال
محرکه های dc تغذیه با تایریستور	۱-۴٪ برحسب فرکانس
دستگاههای جوش	تا ۱٪ برحسب زمان بین فواصل روشن کردن
کوره های القایی	به فصل ۹ مراجعه شود
کوره های الکتریکی	

۱-۵ تئوری اساسی جبران:

اصلاح ضریب توان و تنظیم ولتاژ در سیستم تک فاز

تئوری جبران بایستی در وهله اول ارتباط بین سیستم تغذیه، بار و جبران کننده را توضیح دهد. در بخش ۱-۵-۱ به بیان اصل اصلاح ضریب توان می پردازیم که در ساده ترین شکلش بدون آنکه نیازی به مراجعه به سیستم تغذیه باشد قابل مطالعه است. در بخش های بعدی، تنظیم ولتاژ و متعادل کردن فازها را بررسی و یک مفهوم کمی از جبران کننده ایده آل ارائه خواهیم کرد.

سیستم تغذیه، بار و جبران کننده را می توان به روشهای مختلف مشخص و یا مدل کرد. بنابراین

1- Layout

2- Redundancy

3- Improvement Ratio

4- Flicker Reduction Ratio

سیستم تغذیه را می‌توان به صورت مدار معادل تونن^۱ با ولتاژ مدار باز همراه با امپدانس سری و جریانش و یا همراه با توان واقعی و توان راکتیوش (یا ضریب توان) مدل کرد. جبران‌کننده را می‌توان به صورت امپدانس متغیر یا منبع جریان راکتیو متغیر^۲ و یا منبع توان راکتیو متغیر مدل کرد. انتخاب مدل برای هر یک از اجزاء و بر حسب نیازمندیها تغییر می‌کند و در بخش بعدی ملاحظه خواهیم کرد که مدل‌ها به طرق مختلف و مناسبی با هم ترکیب می‌شوند طوری که علاوه بر معادلات ریاضی بیشترین دید فیزیکی را ارائه می‌دهند. البته مدل‌های متفاوت برای یک جزء اساساً با هم معادل بوده و قابل تبدیل به یکدیگر می‌باشند.

تئوری جبران ابتدا برای شرایط سکون و یا نزدیک به سکون که دلالت بر این دارند که مشخصات سیستم و بار یا ثابت و یا تغییرات کند دارند (طوری که فازور^۳ را می‌توان به کار برد)، ارائه می‌شود. با این فرض تحلیل و بررسی فوق‌العاده آسان می‌شود. در اغلب موارد عملی معادلات فازور یا معادلات شبه سکون^۴ برای معین کردن مقدار نامی و مشخصه‌های خارجی جبران‌کننده کفایت می‌کند. برای آن دسته از بار که توان واقعی و توان راکتیو آنها سریع تغییر می‌نماید (مثل کوره‌های الکتریکی)، معادلات فازور قابل قبول نخواهد بود و بایستی روش تحلیل خاصی را به کار برد.

۱-۵-۱ ضریب توان و اصلاح آن

شکل ۲ الف یک بار تک‌فاز با ادمیتانس $Y_L = G_L + jB_L$ که از ولتاژ V تغذیه می‌شود را نشان می‌دهد. جریان بار I_L و برابر است با

$$I_L = V(G_L + jB_L) = VG_L + jVB_L = I_R + jI_X \quad (1)$$

V و I_L هر دو فازور هستند و معادله ۱ در دیاگرام فازور شکل ۲ ب که در آن V به عنوان مرجع انتخاب شده است، نشان داده شده است. جریان باردارای مؤلفه اهمی I_R همفاز با V و مؤلفه راکتیو $I_X = VB_L$ که با V اختلاف فاز ۹۰ درجه دارد. در این مثال I_X منفی و I_L پس‌فاز و بار القایی است (حالتی که عمومیت دارد). زاویه بین V و I_L برابر ϕ است. توان ظاهری^۵ که به بار داده می‌شود برابر است با^۶

$$\begin{aligned} S_L &= VI_L^* \\ &= V^* G_L - jV^* B_L \\ &= P_L + jQ_L \end{aligned} \quad (2)$$

1- Thevenin equivalent

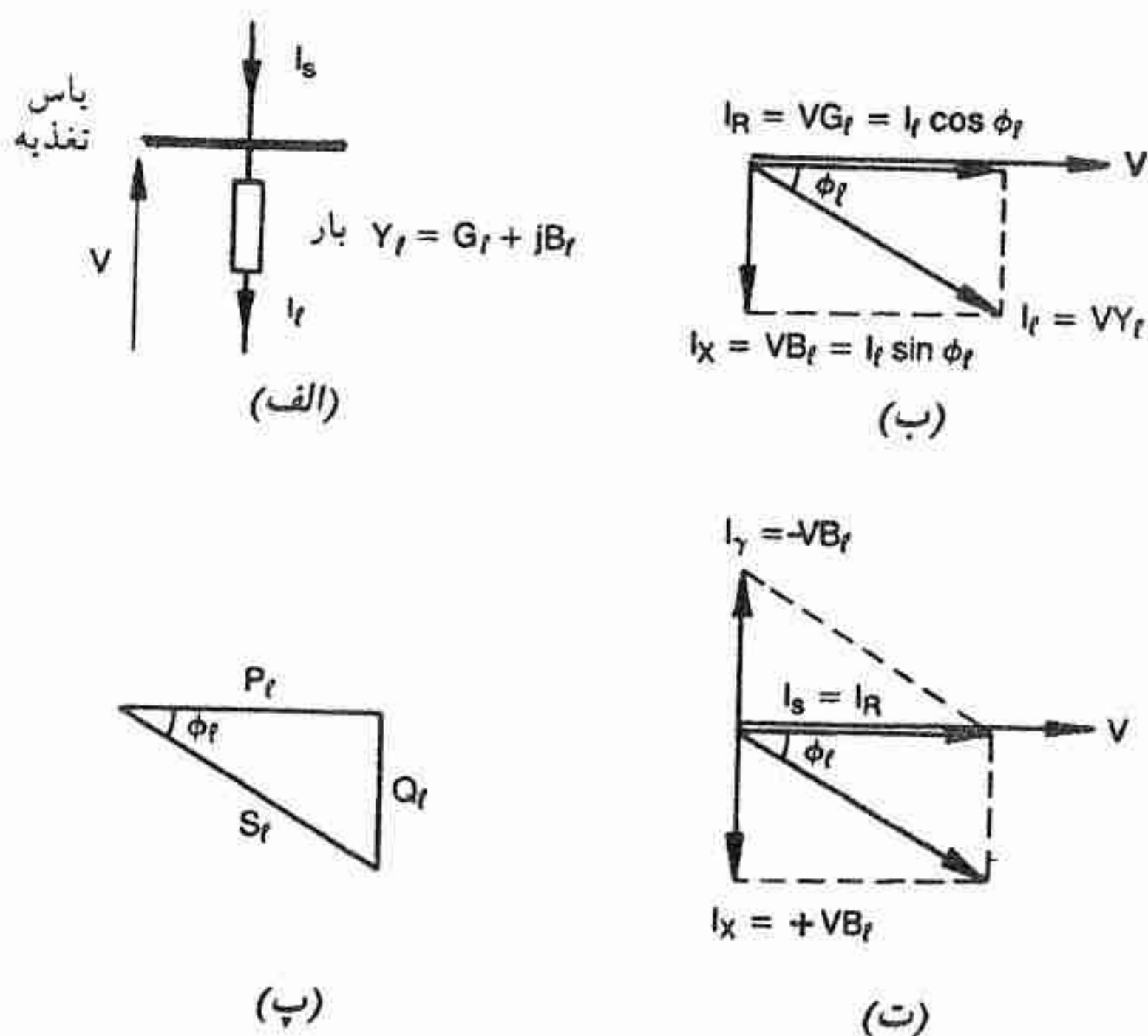
2- Variable source (sink) of Reactive Current

3- phasor

4- Quasi - Stationary

5- Apparent power

۶- توجه اینکه S_L ، P_L و Q_L کمیت‌های فازور نیستند.



شکل ۲ - (الف) الی (ت) اصلاح ضریب توان

بنابراین توان ظاهری دارای مؤلفه حقیقی P_L (یعنی توان مفیدی که به حرارت، کار مکانیکی، نور و یا اشکال دیگر انرژی تبدیل می شود) و یک مؤلفه راکتیو Q_L (توانی که به اشکال مفید انرژی تبدیل نمی شود اما با وجود این، وجودش ضرورت ذاتی بار است) است. به عنوان مثال در یک موتور القایی، Q_L نشانگر توان راکتیو مغناطیس کننده است. رابطه بین P_L ، Q_L و S_L در شکل ۲ پ نشان داده شده است. برای بارهای پس فاز (القایی) بر حسب قرارداد B_L منفی و Q_L مثبت است. جریان $I_s = I_L$ که از طرف سیستم فراهم می شود مقدارش از آنچه که برای تامین توان واقعی ضروری است به اندازه ضریب زیر بزرگتر است.

$$I_L/I_R = 1/\cos \phi_L \quad (3)$$

در اینجا $\cos \phi_L$ ضریب توان و برابر است با

$$\cos \phi_L = P_L/S_L \quad (4)$$

یعنی $\cos \phi_L$ عبارتست از کسری از توان ظاهری که به اشکال مفید انرژی تبدیل می شود. تلفات ژولی در کابل های سیستم تغذیه با ضریب $1/\cos^2 \phi_L$ افزایش می یابد. از اینرو مقادیر نامی

کابل بایستی افزایش یابد و بهاء آن به وسیله مشتری پرداخت شود.

اصلاح ضریب توان بر این اصل استوار است که بایستی توان راکتیو جبران شود به این معنا که با موازی کردن یک جبران‌کننده با بار (که دارای ادمیتانس راکتیو خالص $-jB_\ell$ می‌باشد)، توان راکتیو مورد نیاز در محل فراهم شود. بنابراین جریانی که از طریق سیستم به ترکیب بار و جبران‌کننده داده می‌شود برابر خواهد بود با

$$\begin{aligned} I_S &= I_\ell + I_\gamma \\ &= V(G_\ell + jB_\ell) - V(jB_\ell) = VG_\ell = I_R \end{aligned} \quad (5)$$

که این جریان با ولتاژ V هم‌فاز بوده و ضریب توان این مجموعه برابر ۱ می‌شود. شکل ۲ ت روابط فازوری را نشان می‌دهد. حال جریان تغذیه I_S کمترین مقدار را داشته و قادر است توان کل P_ℓ در ولتاژ V را تغذیه نماید و تمام توان راکتیو مورد نیاز بار توسط جبران‌کننده در محل فراهم می‌شود، بنابراین بار تماماً جبران می‌شود. سیستم تغذیه در این صورت دارای ظرفیت بیشتری شده که می‌تواند بارهای دیگر را تغذیه نماید.

جریان جبران‌کننده از رابطه زیر بدست می‌آید^۱

$$I_\gamma = VY_\gamma = -jVB_\ell \quad (6)$$

توان ظاهری که با سیستم تغذیه تبادل شده است برابر است با

$$\begin{aligned} S_\gamma &= P_\gamma + jQ_\gamma \\ &= VI_\gamma^* \\ &= jV^\wedge B_\ell \end{aligned} \quad (7)$$

بنابراین $P_\gamma = 0$ و $Q_\gamma = V^\wedge B_\ell = -Q_\ell$ است. جبران‌کننده به توان مکانیکی ورودی نیاز ندارد. اغلب بارها القایی بوده و نیاز به جبران خازنی دارند (B_γ مثبت، Q_γ منفی است).

در شکل ۲ پ ملاحظه می‌شود که به منظور جبران کامل توان راکتیو، مقدار نامی توان راکتیو جبران‌کننده با توان P_ℓ بار به وسیله رابطه زیر ارتباط دارد،

$$Q_\ell = P_\ell \operatorname{tg} \phi_\ell \quad (8)$$

و با توان ظاهری S_ℓ به وسیله رابطه زیر ارتباط دارد،

$$Q_\gamma = S_\ell \sin \phi_\ell = S_\ell \sqrt{1 - \cos^2 \phi_\ell} \quad (9)$$

۱- اندیس γ برای نشان دادن کمیت‌های جبران‌کننده بکار برده می‌شود. بکاربردن «C» باعث اشتباه با فاز «C» می‌گردد.

جدول ۲ مقدار نامی جبران‌کننده برحسب پریونیت S_{ϕ} برای ضریب توان‌های مختلف را نشان می‌دهد. جریان نامی جبران‌کننده از Q_{ϕ}/V به دست می‌آید که با جریان راکتیو بار در ولتاژ نامی برابر است. ممکن است کسری از بار جبران شود (یعنی $|Q_{\phi}| < |Q_{\phi}|$ ؛ $|B_{\phi}| < |B_{\phi}|$)، درجه جبران با مقایسه اقتصادی بین هزینه جبران‌کننده (که بستگی به مقدار نامی آن دارد) و هزینه فراهم آوردن توان راکتیو از سیستم تغذیه در یک فاصله زمانی تصمیم‌گیری می‌شود.

جدول ۲

توان راکتیو لازم جهت جبران کامل در ضریب توانهای مختلف	
ضریب توان بار $\cos \phi_{\phi}$	مقدار نامی جبران‌کننده Q_{ϕ} (برحسب پریونیت توان ظاهری بار)
۱/۰	۰
۰/۹۵	۰/۳۱۲
۰/۹۰	۰/۴۳۶
۰/۸۰	۰/۶۰۰
۰/۶۰	۰/۸۰۰
۰/۴۰	۰/۹۱۷
۰	۱/۰

در بررسی‌ای که تاکنون انجام گرفت، جبران‌کننده یک ادمیتانس (یا سوسپتانس) ثابت بود که قادر نخواهد بود به تغییرات توان راکتیو مورد نیاز پاسخ دهد. در عمل یک جبران‌کننده مانند یک مجموعه‌ای از خازن (یا راکتور) می‌تواند به بخش‌های موازی تقسیم شود که هر کدام می‌توانند به طور جداگانه به مدار متصل گردند، طوری که بر حسب تقاضای بار، تغییرات گسسته در توان راکتیو جبران‌کننده انجام گیرد. جبران‌کننده‌های بهتر (نظیر کندانسور سنکرون^۱ یا جبران‌کننده‌های استاتیک^۲) قادر هستند که توان راکتیو متغیر پیوسته ایجاد نمایند (به فصل ۴ مراجعه شود).

در تحلیل پیشین، اثر تغییرات ولتاژ تغذیه بر روی میزان تأثیر جبران‌کننده در نگهداری ضریب قدرت در مقدار واحد، در نظر گرفته نشده است. به طور کلی وقتی ولتاژ تغذیه تغییر می‌کند توان

راکتیو یک جبران‌کننده راکتانس ثابت همراه با تغییرات بار تغییر نمی‌کند و یک «خطای جبران»^۱ ایجاد می‌شود. در بخش بعدی اثرات تغییرات ولتاژ بررسی می‌شود و جنبه‌های بیشتری که یک جبران‌کننده ایده‌آل بایستی دارا باشد تا در هنگامی که پارامترهای بار و تغذیه تغییر می‌کنند نقش خود را به طور رضایت‌بخش انجام دهد، به دست داده می‌شود. همچنین ملاحظه خواهیم کرد که چگونه اصلاح ضریب توان خودبخود منجر به بهبود تنظیم ولتاژ می‌گردد.

۱-۵-۲ تنظیم ولتاژ

این بخش با معین کردن تنظیم ولتاژ بدون حضور جبران‌کننده آغاز و مهمترین پارامترهای بار و سیستم تغذیه مشخص می‌گردد. آنگاه مفهوم یک جبران‌کننده ایده‌آل که تقریباً با ثابت نگاهداشتن توان راکتیو در سیستم تغذیه، ولتاژ را در نقطه تغذیه ثابت نگاه می‌دارد، معرفی می‌گردد. سپس مشخصات جبران‌کننده به طور ترسیمی و تحلیلی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

تنظیم ولتاژ به صورت نسبت (یا پریونیت) تغییر مقدار ولتاژ تغذیه در ازاء تغییر معینی از جریان بار (مثلاً از بی‌باری تا تمام بار) تعریف می‌شود. تنظیم ولتاژ به واسطه افت ولتاژ حاصل در امپدانس سیستم تغذیه (در اثر عبور جریان بار) ایجاد می‌گردد. اگر سیستم تغذیه به وسیله مدار معادل تونن تک‌فاز شکل ۳ الف نشان داده شود، تنظیم ولتاژ از رابطه $(|E| - |V|) / |V| = (|E| - V) / V$ به دست می‌آید که در آن V ولتاژ فازور مرجع است.

در غیاب جبران‌کننده، تغییر ولتاژ سیستم تغذیه که در اثر جریان بار I_l ایجاد می‌شود در شکل ۳ ب به صورت ΔV نشان داده شده است و

$$\Delta V = E - V = Z_s I_l \quad (10)$$

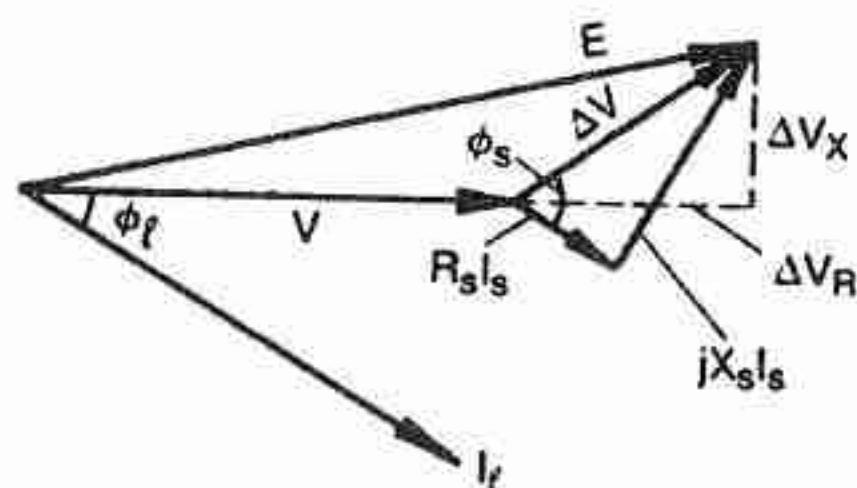
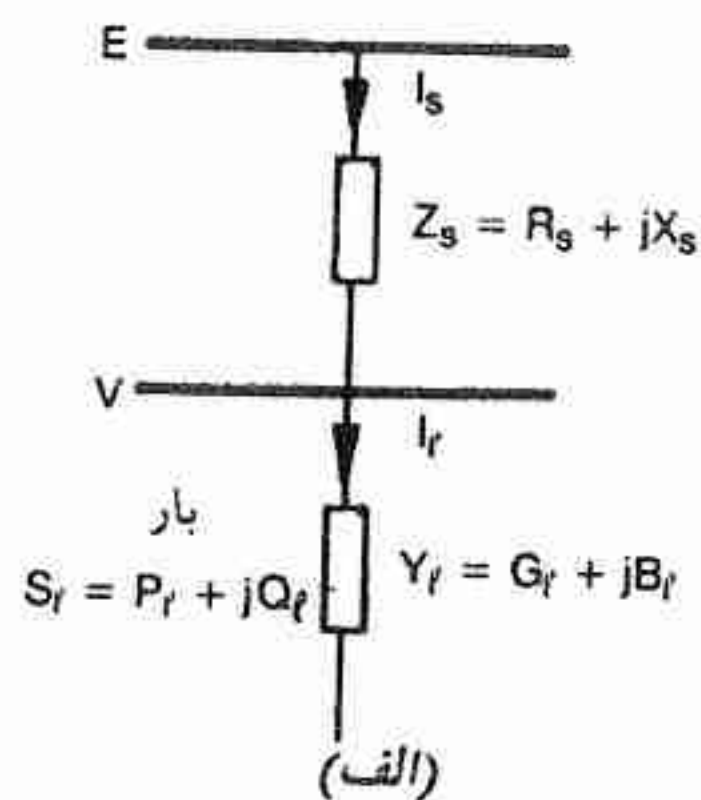
حال $Z_s = R_s + j X_s$ و از معادله ۲ داریم

$$I_l = \frac{P_l - jQ_l}{V} \quad (11)$$

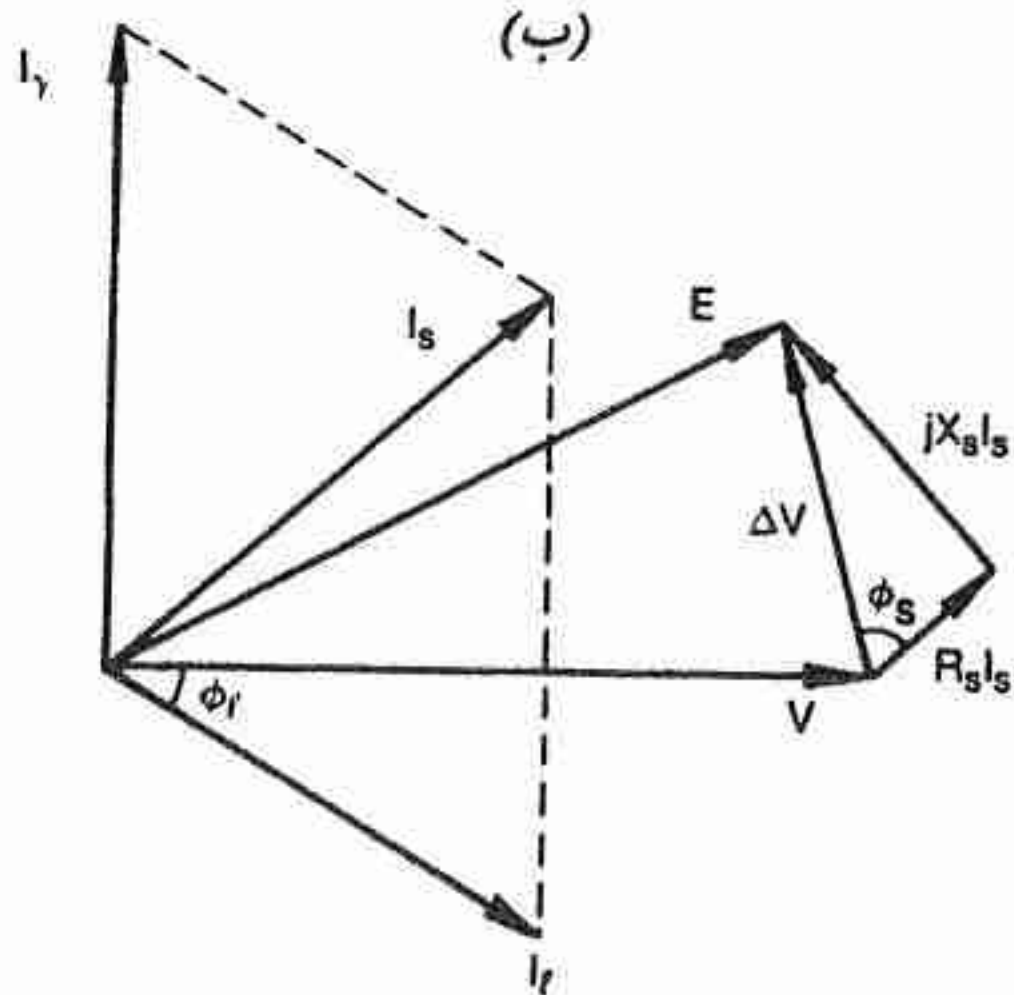
طوری که

$$\begin{aligned} \Delta V &= (R_s + j X_s) \left[\frac{P_l - jQ_l}{V} \right] \\ &= \frac{R_s P_l + X_s Q_l}{V} + j \frac{X_s P_l - R_s Q_l}{V} \end{aligned} \quad (12)$$

$$= \Delta V_R + j \Delta V_X$$



(ب)



(پ)

شکل ۳ - (الف) مدار معادل بار دو سیستم تغذیه (ب) دیاگرام فازور شکل ۳ الف (جبران نشده) (پ) دیاگرام فازور شکل ۳ الف (جبران برای ولتاژ ثابت).

تغییر ولتاژ، یک مؤلفه ΔV_R هم فاز با V و یک مؤلفه ΔV_R عمود بر V دارد، این مؤلفه‌ها در شکل ۳ ب نشان داده شده است. واضح است که هم مقدار و هم فاز V نسبت به ولتاژ تغذیه E ، تابعی از مقدار و فاز جریان بار هستند، به عبارت دیگر تغییر ولتاژ هم به توان راکتیو و هم به توان واقعی بار بستگی دارد.

با اضافه کردن یک جبران‌کننده به موازات بار می‌توان $|E| = |V|$ را ایجاد کرد یعنی تنظیم ولتاژ را به صفر رساند و یا اینکه با وجود بار مقدار ولتاژ تغذیه را در مقدار E ثابت نگاه داشت. این موضوع در شکل ۳پ برای یک جبران‌کننده راکتیو خالص نشان داده شده است. مقدار توان راکتیو Q_R در معادله ۱۲ با مقدار $Q_S = Q_R + Q_L$ جایگزین می‌شود و Q_R در مقداری تنظیم می‌شود که با چرخش ΔV ، $|E| = |V|$ گردد. از معادلات ۱۰ و ۱۲ داریم

$$|E|^2 = \left[V + \frac{R_S P_L + X_S Q_S}{V} \right]^2 + \left[\frac{X_S P_L - R_S Q_S}{V} \right]^2 \quad (13)$$

مقدار مطلوب Q_R با حل این معادله برای Q_S وقتی $|E| = V$ و $Q_R = Q_S - Q_L$ باشد به دست می‌آید. حل جبری معادله برای به دست آوردن Q_R در قسمت ضمیمه ب آمده است. در یک جبران‌کننده ایده‌آل مقدار آن به طور اتوماتیک در یک حلقه کنترل به دست می‌آید. آنچه اهمیت دارد این است که قطع نظر از مقدار P_L همواره یک مقدار برای Q_S به دست می‌آید و این امر به نتیجه‌گیری مهم زیر منجر می‌شود:

یک جبران‌کننده راکتیو خالص قادر خواهد بود که تغییرات ولتاژ تغذیه را که در اثر توان واقعی و راکتیو بار بوجود می‌آید حذف نماید.

در صورتی که توان راکتیو یک جبران‌کننده بتواند به طور پیوسته در یک رنج^۱ کافی (در جهت پس فاز و پیش فاز) و در یک میزان^۲ تغییرات کافی کنترل شود، جبران‌کننده می‌تواند به عنوان رگولاتور ولتاژ^۳ ایده‌آل عمل نماید. بایستی توجه داشت که فقط مقدار ولتاژ کنترل می‌شود و فاز آن بطور پیوسته با جریان بار تغییر می‌کند.

آموزنده است که این اصل را از دیدگاه‌های متفاوت مد نظر قرار دهیم. در بخش ۱-۵-۱ دیدیم که چگونه جبران‌کننده قادر است توان راکتیو تولید شده توسط سیستم را به صفر تقلیل دهد. در حقیقت جبران‌کننده به جای آنکه به صورت یک رگولاتور ولتاژ عمل نماید به صورت یک اصلاح‌کننده ضریب توان عمل می‌کند. اگر جبران‌کننده طوری طراحی شود که این عمل را انجام دهد می‌توانیم Q_R

را در معادله ۱۲ با $Q_s = Q_l + Q_r$ که مقدارش صفر است جایگزین نمائیم. آنگاه فازور تغییر ولتاژ برابر خواهد بود با

$$\Delta V = \frac{R_s P_l + jX_s P_l}{V} = (R_s + jX_s) \frac{P_l}{V} \quad (14)$$

که مستقل از Q_l بوده و تحت کنترل جبران کننده قرار ندارد. بنابراین: جبران کننده راکتیو خالص نمی تواند در یک زمان هم ولتاژ را ثابت نگاهدارد و هم ضریب توان را اصلاح نماید.

تنها استثنا در این قانون وقتی است که $P_l = 0$ باشد که این در عمل اهمیت ندارد. تذکر این اصل که به ضریب توان لحظه ای^۱ اشاره دارد حائز اهمیت است: یک جبران کننده راکتیو خالص به خوبی قادر است که ولتاژ را ثابت و ضریب توان میانگین^۲ را در مقدار واحد نگاهدارد. (به بخش ۱-۶ مراجعه شود)

فرمول تقریبی برای تنظیم ولتاژ. عبارات ΔV_R و ΔV_X در معادله ۱۲ را می توان گاهی به شکل مفید دیگری به صورت زیر بیان کرد. اگر سیستم در باس بار (شین)^۳ بار اتصال کوتاه گردد «توان ظاهری اتصال کوتاه»^۴ برابر خواهد بود با

$$S_{sc} = P_{sc} + jQ_{sc} = EI_{sc}^* = \frac{E^2}{Z_{sc}} \quad (15)$$

که در آن $Z_{sc} = R_s + jX_s$ و I_{sc} جریان اتصال کوتاه است. چون $|Z_{sc}^*| = |Z_{sc}|$ ، داریم

$$R_s = |Z_{sc}| \cos \phi_{sc} = \frac{E^2}{S_{sc}} \cos \phi_{sc} \quad (16)$$

$$X_s = |Z_{sc}| \sin \phi_{sc} = \frac{E^2}{S_{sc}} \sin \phi_{sc} \quad (17)$$

$$\tan \phi_{sc} = \frac{X_s}{R_s} \quad (18)$$

یعنی نسبت $R : X$ سیستم تغذیه. با جایگزینی X_s و R_s در معادله ۱۲ و نرمالیزه کردن ΔV_X و ΔV_R به V و با فرض $E/V \approx 1$ خواهیم داشت.

$$\frac{\Delta V_R}{V} \cong \frac{1}{S_{sc}} [P_l \cos \phi_{sc} + Q_l \sin \phi_{sc}] \quad (19)$$

1- Instantaneous Power - Factor

2- Average Power - Factor

3- Load Busbar

4- Short - Circuit Apparent Power

و

$$\frac{\Delta V_X}{V} = \frac{1}{S_{sc}} [P_\ell \sin \phi_{sc} + Q_\ell \cos \phi_{sc}] \quad (20)$$

اغلب از ΔV_X به دلیل آنکه تنها منجر به تغییر فاز در ولتاژ تغذیه (نسبت به E) می‌گردد صرفنظر می‌شود، قسمت اعظم تغییر در مقدار ولتاژ، به وسیله ΔV_R ایجاد می‌شود. معادله ۱۹ اغلب در نوشته‌ها ذکر می‌شود. گرچه فرمول تقریبی است لیکن چون بر حسب سطح اتصال کوتاه S_{sc} ، نسبت $X : R$ (یعنی $\tan \phi_{sc}$) و توان اکتیو و راکتیو بار P_ℓ و Q_ℓ بیان شده است مفید می‌باشد. برای نتایج دقیق، بایستی جملات معادلات ۱۹ و ۲۰ در مقدار E^2/V^2 ضرب شوند.

تاکنون بر اساس اینکه ΔV با تغییر کامل بار از ۰ تا P_ℓ یا از ۰ تا Q_ℓ مربوط بود، معادلات نوشته شد. معادلات ۱۲ و ۱۹ و ۲۰ همچنین برای تغییرات کوچک در P_ℓ و Q_ℓ قابل قبول است بنابراین به عنوان مثال برای تغییرات کوچک داریم،

$$\frac{\Delta V_R}{V} = \frac{1}{S_{sc}} [\Delta P_\ell \cos \phi_{sc} + \Delta Q_\ell \sin \phi_{sc}] \quad (21)$$

اگر مقاومت سیستم تغذیه R_s خیلی کوچکتر از راکتانس X_s باشد می‌توان از تغییرات ولتاژ ناشی از توان واقعی ΔP_ℓ صرفنظر کرد بنابراین تنظیم ولتاژ از معادله زیر به دست می‌آید.

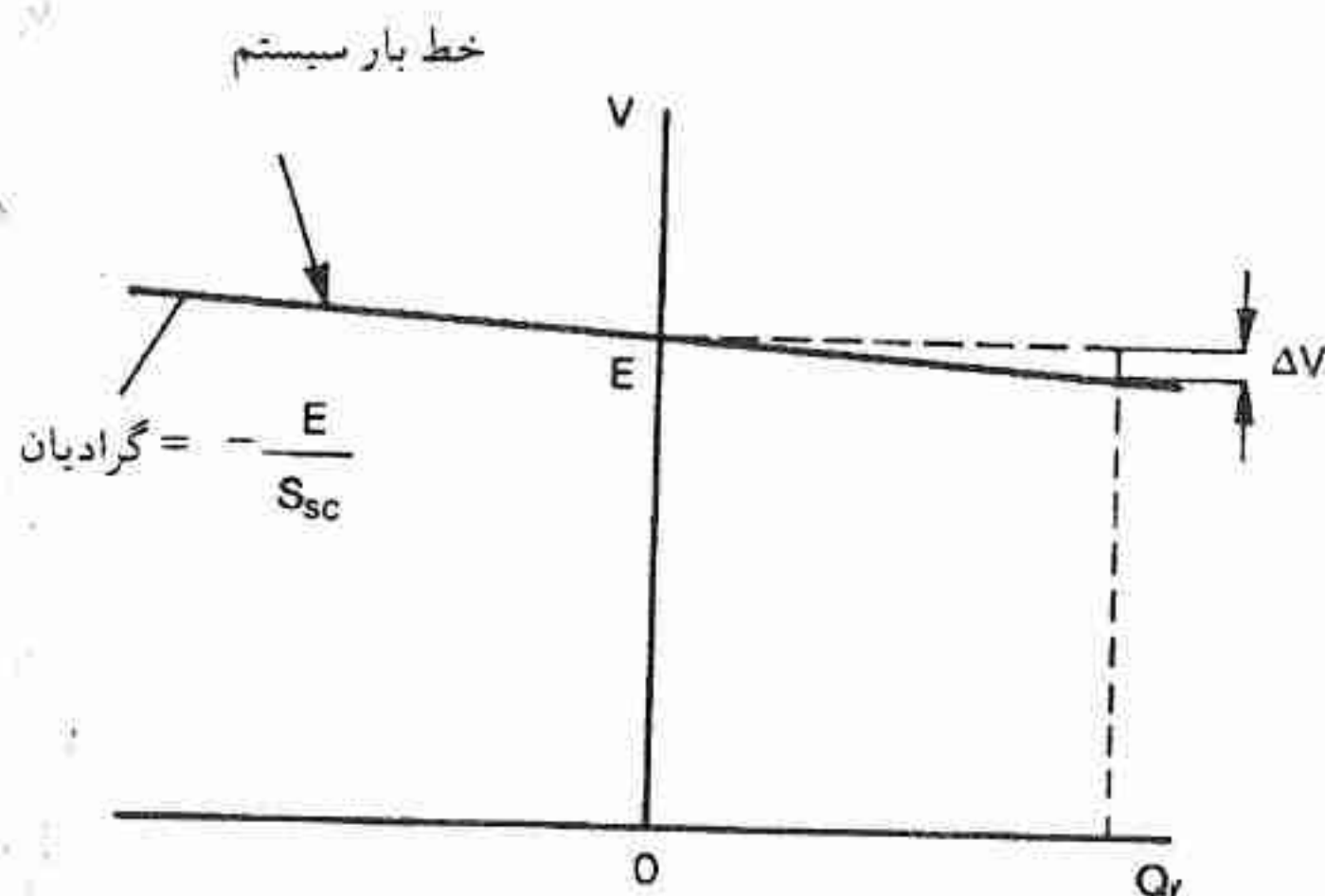
$$\frac{\Delta V}{V} \cong \frac{\Delta V_R}{V} = \frac{\Delta Q_\ell}{S_{sc}} \sin \phi_{sc} \cong \frac{\Delta Q_\ell}{S_{sc}} \quad (22)$$

بنابراین تغییر پریونیت ولتاژ برابر است با نسبت تغییر توان راکتیو به سطح اتصال کوتاه سیستم تغذیه. این رابطه به صورت ترسیمی در شکل ۴ نشان داده شده است، که عبارت خواهد بود از مشخصه ولتاژ سیستم تغذیه^۱ (یا خط بار سیستم^۲) که تقریباً خطی است. فرم نمایش دیگر آن به صورت زیر است:

$$V \cong \frac{E}{1 + Q_\ell/S_{sc}} \cong E \left[1 - \frac{Q_\ell}{S_{sc}} \right] \quad (23)$$

در صورتی که $Q_\ell \ll S_{sc}$ باشد.

گرچه مشخصه تقریبی است لیکن همانطوری که در شکل زیر ملاحظه می‌شود به منظور داشتن تصویری از عملکرد و نقش جبران‌کننده بسیار مفید است.



شکل ۴ - مشخصه تقریبی ولتاژ - توان راکتیو سیستم تغذیه.

۱-۶-۶ مشخصه‌های تقریبی توان راکتیو

۱-۶-۱ تنظیم ولتاژ با بار القایی متغیر

در این بخش خواص یک جبران‌کننده ایده‌آل که به منظور بهبود تنظیم ولتاژ در یک بار القایی متغیر به کار گرفته می‌شود، استنتاج می‌گردد. فرض می‌شود که بار سه فاز، متعادل و تغییرات آن به قدر کافی کند است طوری که معادلات تک فاز را می‌توان برای آن به کار برد. فرض می‌شود تغییرات بار کوچک است طوری که $\Delta V \ll V$ و همچنین فرض می‌شود $R_s \ll X_s$ طوری که معادلات تقریبی ۲۲ و ۲۳ را می‌توان به کار برد. شکل ۵ الف طرز قرار گرفتن سیستم، جبران‌کننده و بار را نشان می‌دهد. مشخصه سیستم در شکل ۵ ب ترسیم شده است. این مشخصه نزولی است یعنی یک افزایش در Q_s فراهم شده توسط سیستم، منجر به کاهش ولتاژ در نقطه تغذیه می‌شود. با جایگزین کردن Q_r در معادله ۲۳ توسط $Q_s = (Q_r + Q_l)$ داریم

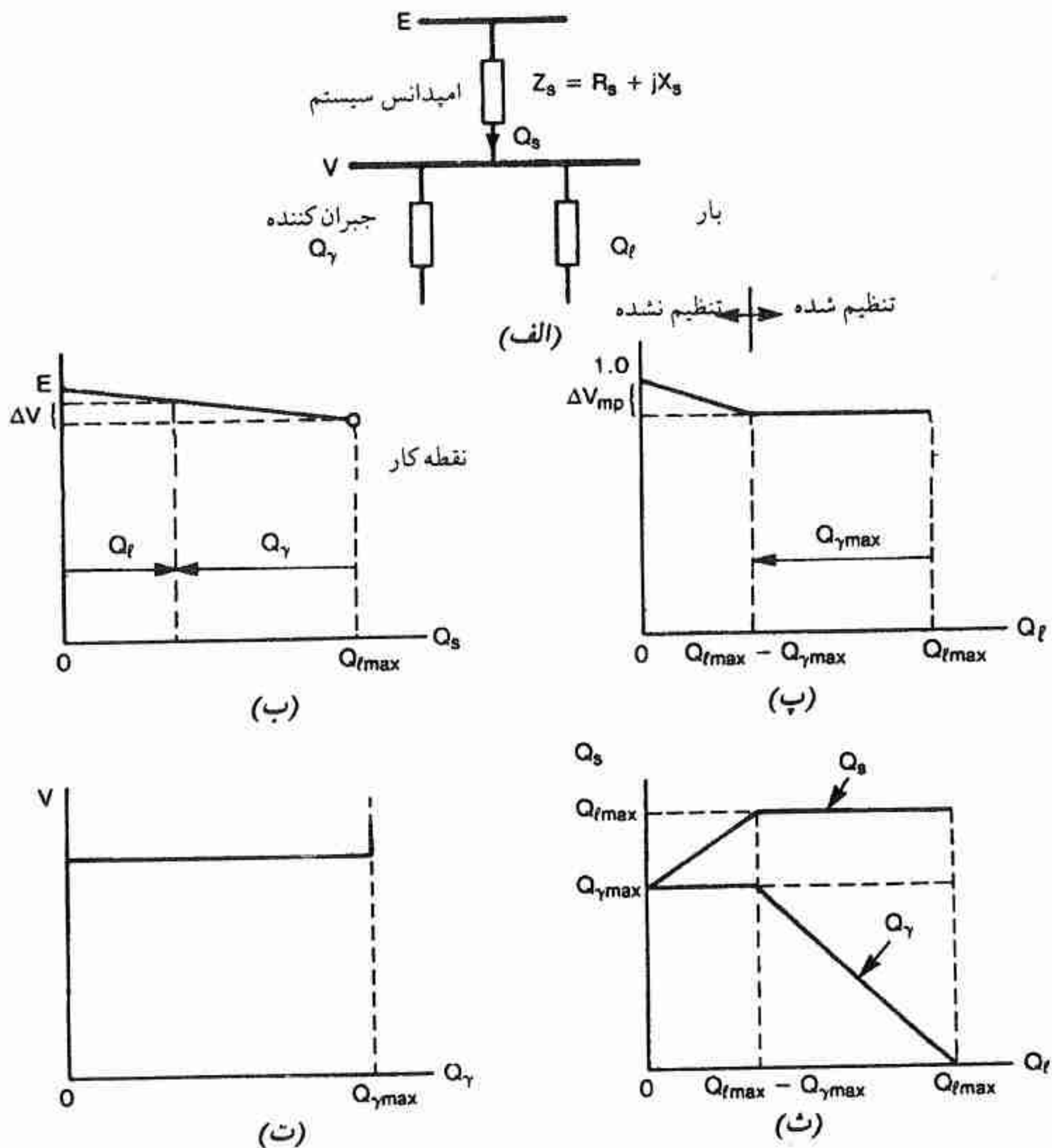
$$V \approx E \left[1 - \frac{Q_s}{S_{sc}} \right] \quad (24)$$

یا

$$\frac{\Delta V}{V} \approx \frac{Q_s}{S_{sc}} \quad (25)$$

توان راکتیو Q_s تامین شده توسط سیستم به وسیله رابطه زیر به دست می‌آید.

$$Q_s = Q_r + Q_l \quad (26)$$



شکل ۵ - مدار معادل تکفاز بار جبران شده (ب) مشخصه تقریبی ولتاژ - توان راکتیو سیستم جبران شده کامل (پ) مشخصه تقریبی ولتاژ - توان راکتیو سیستم جبران شده ناقص (ت) مشخصه تقریبی ولتاژ - توان راکتیو جبران کننده ایده آل (ث) دیاگرام تعادل توان راکتیو (تغییرات Q_s و Q_γ نسبت به Q_l)

واضح است که اگر توان راکتیو جبران کننده Q_γ به طریقی تغییر نماید که مقدار Q_s را ثابت نگاه دارد ولتاژ تغذیه ثابت می ماند. در حالت خاص اگر $Q_s = Q_{lmax} = \text{cont}$ (۲۷) باشد آنگاه V ثابت و برابر است با $E(1 - Q_{lmax} / S_{sc})$ همانطوری که در شکل ۵ ب نشان داده شده است. وقتی که توان راکتیو بار Q_l افزایش می یابد، توان راکتیو جذب شده توسط جبران کننده کاهش می یابد طوری که

مجموع آنها ثابت می‌ماند. وقتی $Q_r = 0$ است جبران‌کننده حداکثر مقدار توان راکتیو Q_{rmax} را جذب می‌کند و وقتی $Q_r = Q_{max}$ است جبران‌کننده کاملاً قطع بوده و توان راکتیوی جذب نمی‌نماید. توجه داریم که جبران‌کننده القایی خالص^۱ بوده و ولتاژ تغذیه را برای بار القایی ثابت نگاه می‌دارد. جبران‌سازی نشان داده شده در شکل ۵ ب جبران کامل^۲ نامیده می‌شود زیرا در رنج توان راکتیو بار، ولتاژ ثابت نگاهداشته می‌شود. اگر چنانچه مقدار نامی توان راکتیو جبران‌کننده برابر و یا بیشتر از Q_{max} باشد تنظیم ولتاژ $\Delta V / V$ می‌تواند برابر صفر گردد. اگر مقدار توان راکتیو جبران‌کننده در مقدار Q_{max} (کمتر از Q_{max}) محدود گردد وقتی $Q_r = 0$ است جبران‌کننده مقدار Q_{rmax} را جذب نموده و تنظیم ولتاژ برابر خواهد بود با

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{Q_{max} - Q_{rmax}}{S_{sc}} \quad (28)$$

این وضعیت در شکل ۵ پ نشان داده شده است، جبران‌سازی در این حالت «جبران جزئی^۳ یا ناقص» نامیده می‌شود. این معادله نشان می‌دهد که جبران‌کننده چه تاثیری بر ولتاژ سیستم دارد، که در آن ماکزیمم مقدار $\Delta V / V$ که با تغییر توان راکتیو از صفر تا ماکزیمم ایجاد می‌شود، از رابطه $-Q_{rmax}/S_{sc}$ بدست می‌آید. به عنوان مثال در باس بار ۱۰ kV با سطح اتصال کوتاه ۲۵۰ MVA کوچکترین جبران‌کننده‌ای که بتواند ۱٪ در ولتاژ تغییر ایجاد نماید دارای مقدار نامی $2/5 \text{ MVA} = 250 \times 0.01$ خواهد بود. حداقل مقدار نامی جبران‌کننده را می‌توان طوری انتخاب کرد که $-Q_{rmax}/S_{sc}$ با حداکثر تغییر مجاز ولتاژ مطابقت داشته باشد، بنابراین

$$Q_{rmax} = Q_{max} - S_{sc} \frac{\Delta V_{mp}}{V} \quad (29)$$

حال آموزنده خواهد بود که به کمک تعادل توان راکتیو نشان داده شده در شکل ۵ ث، شکل ۵ ب را به دو دیاگرام مجزا مطابق شکل ۵ پ و ۵ ت تقسیم کرد. شکل ۵ پ تغییرات ولتاژ نقطه تغذیه نسبت به Q_r را نشان می‌دهد؛ این شکل مشخصه سیستم جبران شده را نمایش می‌دهد و بایستی با مشخصه جبران نشده شکل ۵ ب مقایسه شود. جبران‌کننده در مقدار نامی $Q_{rmax} < Q_{max}$ قرار دارد و به طور ایده‌ال به طریقی کنترل می‌شود که مقدار Q_r معادله ۲۷ را ثابت نگاه دارد مشروط به اینکه از مقدار نامی آن تجاوز نکند به این معنا که جبران‌کننده به صورت رگولاتور ولتاژ ایده‌ال عمل می‌کند. شکل ۵ پ نشان می‌دهد که لازم نیست مقدار نامی توان راکتیو جبران‌کننده از تغییرات توان

1- Purely Inductive Compensator

2- complete

3- partial

راکتیو بار بیشتر باشد تا اینکه بتواند در موقع تغییر بار، ولتاژ سیستم تغذیه را ثابت نگاه دارد. این مساله با توجه به اینکه توان راکتیو بار بین ماکزیمم و کسری از آن مثلاً $0.5pu$ تغییر می‌کند، منجر به انتخاب اقتصادی مقدار نامی جبران‌کننده می‌شود. به شرط آن که مقدار نامی جبران‌کننده بر طبق معادله ۲۹ اختیار شود، آنگاه قطع نظر از مقدار توان راکتیو بار، تغییرات ولتاژ تغذیه از مقدار ΔV_{mp} تجاوز نمی‌کند.

دو قطعه خط شکل ۵ پ را می‌توان به عنوان فاصله تنظیم نشده برای $(Q_{rmax} - Q_{ymax}) < Q_r < Q_{rmax}$ و فاصله تنظیم شده برای $0 < Q_r < (Q_{rmax} - Q_{ymax})$ مشخص کرد. در خلال فاصله تنظیم نشده، جبران‌کننده توان Q_{ymax} را جذب می‌کند و افزایش ولتاژ را تا سطح مجاز ماکزیمم ΔV_{mp} محدود می‌کند. در فاصله تنظیم شده، جبران‌کننده مقدار Q_s را ثابت نگاه داشته و $\Delta V = 0$ است.

مشخصه کنترلی جبران‌کننده در شکل ۵ ت نشان داده شده است. از آنجائی که در $0 < Q_r < Q_{ymax}$ تغییر ولتاژ وجود ندارد، در فاصله تنظیم شده مشخصه مسطح است، اگر چنانچه Q_r مقدارش زیر این فاصله تنظیم شده قرار گیرد، جبران‌کننده قطع نظر از ولتاژ مقدار ثابت Q_{ymax} را جذب می‌کند.

۱-۶-۲ بهبود ضریب توان

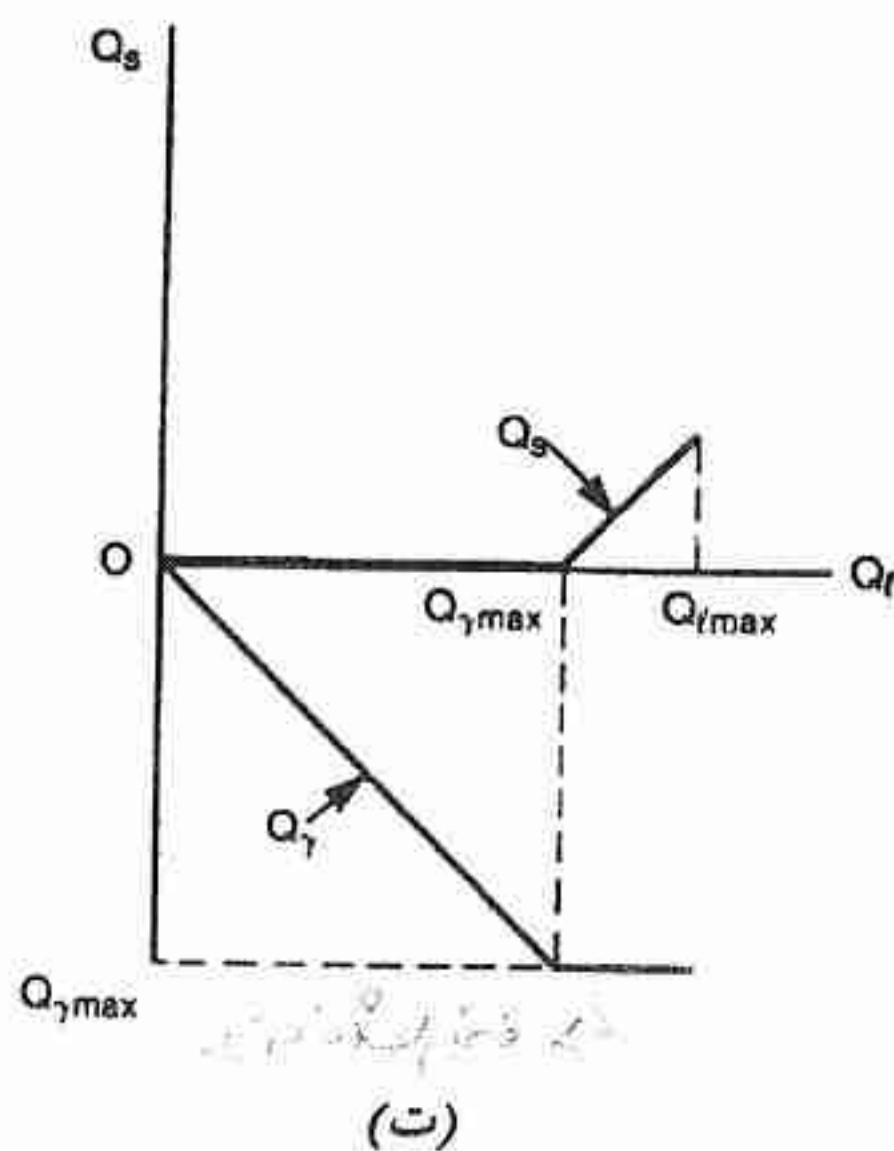
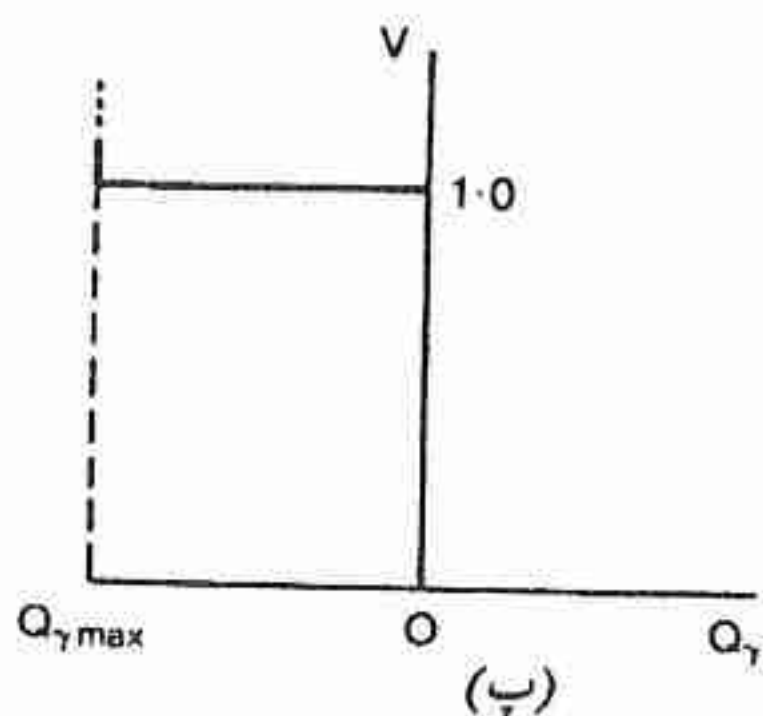
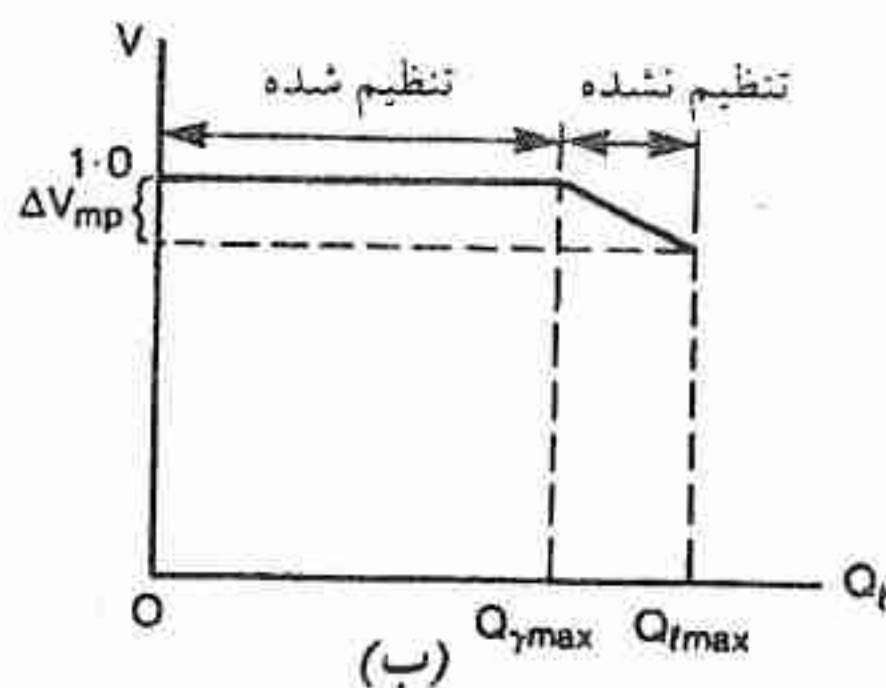
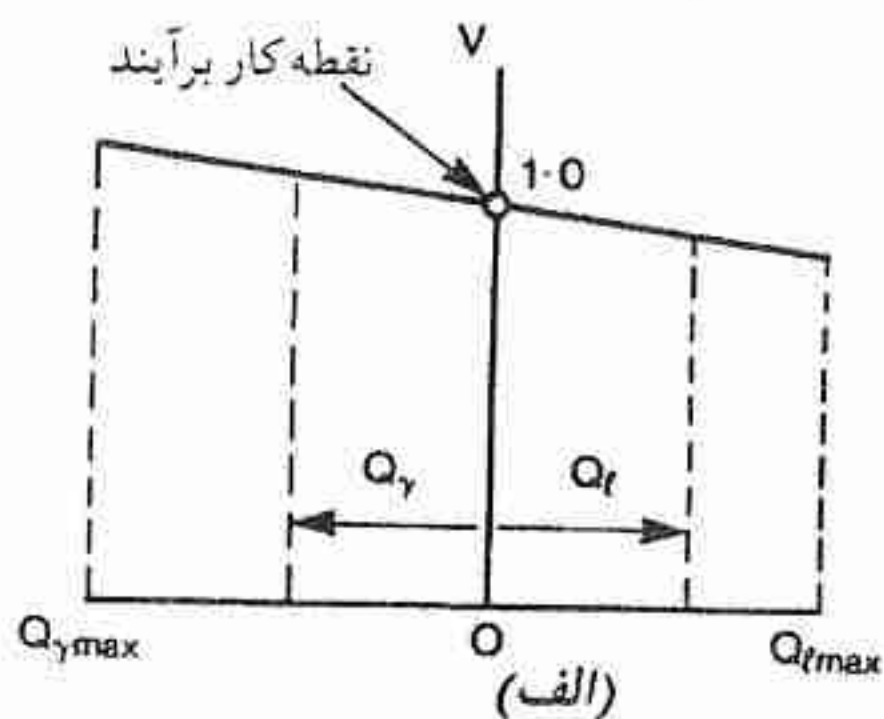
ضریب توان میانگین بار القایی که به طور القایی جبران شده است اساساً از ضریب توان بار جبران نشده بدتر است. اگر به عنوان مثال توان راکتیو میانگین بار یعنی \bar{Q}_r نصف حداکثر مقدارش باشد، آنگاه توان راکتیو میانگینی که از طرف سیستم به بار جبران شده تحویل می‌گردد برابر $2\bar{Q}_r$ یعنی دو برابر خواهد بود.

به منظور به دست آوردن تنظیم ولتاژ ایده‌ال و همچنین ضریب توان میانگین واحد، واضح است که یک جبران‌کننده کاپاسیتیو (خازنی) لازم است. به جای آنکه رابطه $Q_s = \text{Constant} = Q_{rmax}$ را در معادله ۲۷ ثابت نگاهداریم جبران‌کننده بایستی رابطه زیر را برقرار کند.

$$Q_s = \text{Constant} = 0 \quad (30)$$

با صرف نظر کردن از تغییرات توان بار، با روشی مشابه بخش ۱-۶-۱ مشخصه ولتاژ - توان راکتیو جبران‌کننده ایده‌ال بدست خواهد آمد، اشکال ۶ الف الی ۶ ت روشها را نشان می‌دهند، شکل ۶ پ مشخصه جبران‌کننده ایده‌ال را نشان می‌دهد. حداقل مقدار نامی کاپاسیتیو جبران‌کننده به وسیله معادله

۲۹ به دست می‌آید و فرض می‌شود که جبران‌کننده در فواصل خارج از محدوده تنظیم خود، توان راکتیو ثابت Q_{rmax} را تولید می‌کند. حال ولتاژ واحد مربوط می‌شود به شرایط جبران کامل که توسط معادله ۳۰ تعریف می‌شود، و نقطه کار میانگین در $V = 1 \text{ pu}$ با $Q_s = 0$ می‌باشد.



شکل ۶ - مشخصه تقریبی ولتاژ - توان راکتیو سیستم جبران نشده (ب) مشخصه تقریبی ولتاژ - توان راکتیو سیستم جبران شده (پ) مشخصه تقریبی ولتاژ - توان راکتیو جبران‌کننده ایده‌آل (ت) دیاگرام تعادل توان راکتیو (تغییرات Q_s و Q_r نسبت به Q_l).

به جای اینکه به مقدار کانی توان راکتیو جذب شود تا اینکه مقدار کل $Q_r + Q_l$ را برابر Q_{lmax} کند، حال جبران‌کننده می‌تواند به مقداری که بار جذب می‌کند تولید نماید، در اینصورت جبران‌کننده کاپاسیتیو خالص است. اگر جبران‌کننده به عنوان رگولاتور ولتاژ ایده‌آل طراحی شود، آنگاه Q_s

مقدارش کاملاً صفر نیست زیرا توان بار دارای تغییرات است. عموماً این اثر خیلی ناچیز است. (به مثالهای حل شده بخش ۱-۷ مراجعه شود.)

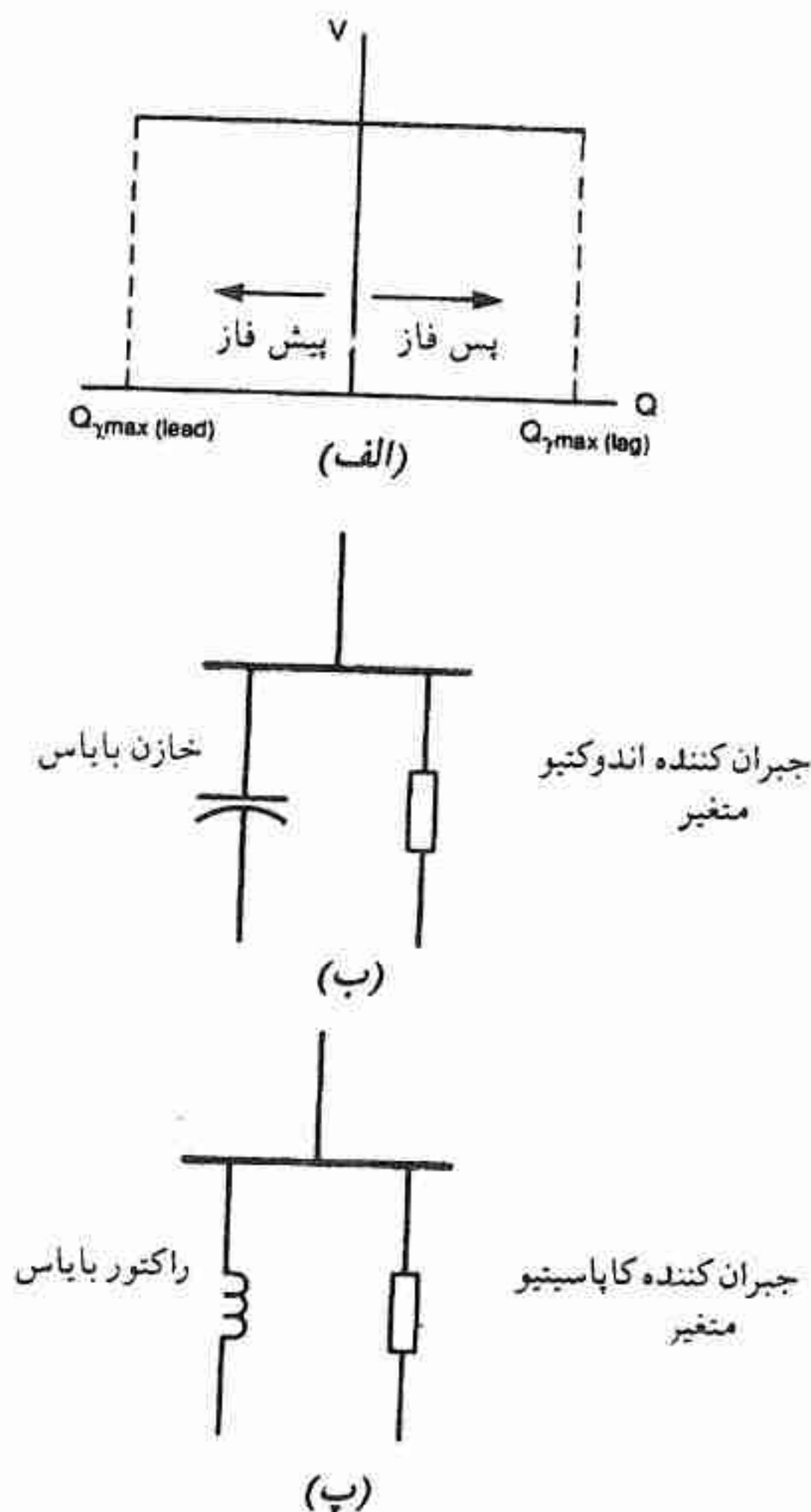
۱-۶-۳ بایاس کردن توان راکتیو^۱

اگر توان راکتیو قادر باشد از پیش فاز تا پس فاز تغییر نماید آنگاه بایستی مشخصه تنظیم شده $V - Q$ جبران کننده مطابق شکل ۷ الف در هر دو ربع مختصات امتداد یابد. مشخصه جبران کننده اندوکتیو شکل ۵ پ را می توان به وسیله یک خازن موازی ثابت مطابق شکل ۷ پ - بایاس کرد. و به همین صورت جبران کننده کاپاسیتیو را می توان با راکتور موازی ثابت به سمت ربع پس فاز - مطابق شکل ۷ پ - بایاس کرد. اگر چنانچه خازن موازی شکل ۷ ب به قدر کافی بزرگ باشد، آنگاه جبران کننده اندوکتیو می تواند بایاس گردد طوری که مشخصه آن کاملاً در سمت ربع پیش فاز قرار گیرد. وقتی جبران کننده اندوکتیو با خازن موازی ثابت ترکیب می شود جبران کننده قادر خواهد بود هم ولتاژ را تثبیت نماید و هم ضریب توان میانگین بار اندوکتیو را به واحد برساند.

حال به نظر می رسد که متمایز نمودن جبران کننده اندوکتیو از جبران کننده کاپاسیتیو قدری مصنوعی است اما از نقطه نظر کاربرد عملی حائز اهمیت است زیرا به استثناء کندانسور سنکرون تمامی جبران کننده های واقعی با کنترل جریان در بانک خازن یا راکتور کار می کنند. به عنوان مثال جبران کننده راکتور قابل اشباع به وسیله خازنهای موازی به سمت ربع پیش فاز بایاس می شود، یک راکتانس موازی ثابت از یک جبران کننده متغیر که دارای توان راکتیو نامی یکسان با آن است، ارزانتر است و در مواردی از نظر اقتصادی بهتر است که اندازه جبران کننده طوری باشد که فقط با تغییرات توان راکتیو بار منطبق باشد، و برای بدست آوردن ضریب توان میانگین مورد نظر آن را با راکتانس ثابت موازی بایاس نمود.

در شکل های ۵ و ۶ و ۷ مشخصه های ولتاژ - توان راکتیو جبران کننده و سیستم تغذیه هیچکدام خط مستقیم نبوده بلکه درجه دوم هستند. با فرض اینکه V از $1/0 \text{ pu}$ چندان منحرف نمی شود، مشخصه ها به صورت خطوط مستقیم نشان داده شده اند.

برای نتایج دقیق تر محاسبات دقیق تر معادلات ۱۲ و ۱۳ ضروری است. همچنین می توان به جای توان راکتیو، عملیات را بر حسب جریان انجام داد.



شکل ۷ - (الف) مشخصه تقریبی ولتاژ - توان راکتیو جبران کننده ایده آل که در محدوده پیش فاز تا پس فاز عمل می کند. (ب) جبران کننده اندوکتیو متغیر با بایاس خازنی (پ) جبران کننده کاپاسیتیو متغیر با بایاس القایی

۱-۷ مثال

سیستم تغذیه ای را در نظر بگیرید که در ولتاژ خط - نول 10 kV و با سطح اتصال کوتاه 250 MVA و نسبت $R_s : X_s$ برابر ۵، یک بار اندوکتیو با اتصال - ستاره و توان میانگین 25 MW و توان راکتیو متغیر صفر تا 50 MVAR را تغذیه می نماید، تمامی کمیت ها برای یک فاز بیان شده اند. امپدانس تونن سیستم تغذیه برابر است با $Z_s = E_s^2 / S_{sc} = (10 \text{ kV})^2 / 250 \text{ MVA} = 0.4 \text{ Ohm/phase}$. با $\phi_{sc} = 78.69^\circ$ داریم $\tan \phi_{sc} = 5$ و $X_s = Z_s \sin \phi_{sc} = 0.3922 \text{ Ohm}$ ، طوری که

$E = 1 \text{ pu} = 10 \text{ kV}$ یا بناکردن دیاگرام فازور با $R_s = 0.0784 \text{ Ohm}$ با محاسبه «پخش بار»^۱

$$\Delta V = 3/1806 + j0.8678 \text{ kV و } V = 6/782 \text{ kV (l - n)}$$

حال جریان خط در بار کامل و ضریب توان پس فاز 0.447 از رابطه زیر به دست می آید:

$$I = (P_\ell - jQ_\ell)/V = 3/686 - j7/372 = 8/242 \angle -63/44^\circ \text{ kA}$$

دیاگرام فازور در شکل ۸ الف رسم شده است. اندازه ولتاژ به مقدار $3/218 \text{ kV}$ و $10 - 6/782 = 3/218$

کاهش می یابد. در این محاسبات معادلات دقیق ۱۹ و ۲۰ مورد استفاده قرار گرفته است.

۱-۷-۱ جبران برای ولتاژ ثابت

پیرو روش ارائه شده در قسمت ب ضمیمه، با ولتاژ $V = 10$ داریم

$$a = R_s^2 + X_s^2 = 0.160$$

$$b = 2VX_s = 2 \times 10^2 \times 0.3922 = 78/44$$

$$c = (V^2 + R_s P_\ell)^2 + X_s^2 P_\ell^2 - E^2 V^2$$

$$= (10^2 + 0.0784 \times 25)^2 + (0.3922 \times 25)^2 - 10^2 \times 10^2$$

$$= 491/98$$

بنابراین

$$Q_s = \frac{-78/44 \pm \sqrt{78/44^2 - 4 \times 0.160 \times 491/98}}{2 \times 0.160}$$

$$= -6/35 \text{ یا } -484 \text{ MVar}$$

تنها جواب اول، ولتاژ $E = 10 \text{ kV}$ را در معادله ۱۳ نتیجه می دهد، طوری که

$$\Delta V_R = \frac{R_s P_\ell + X_s Q_s}{V} = \frac{0.0784 \times 25 + 0.3922 \times (-6/35)}{10} = -0.0532 \text{ kV}$$

$$\Delta V_X = \frac{X_s P_\ell + R_s Q_s}{V} = \frac{0.3922 \times 25 - 0.0784 \times (-6/35)}{10} = 1/0.30 \text{ kV}$$

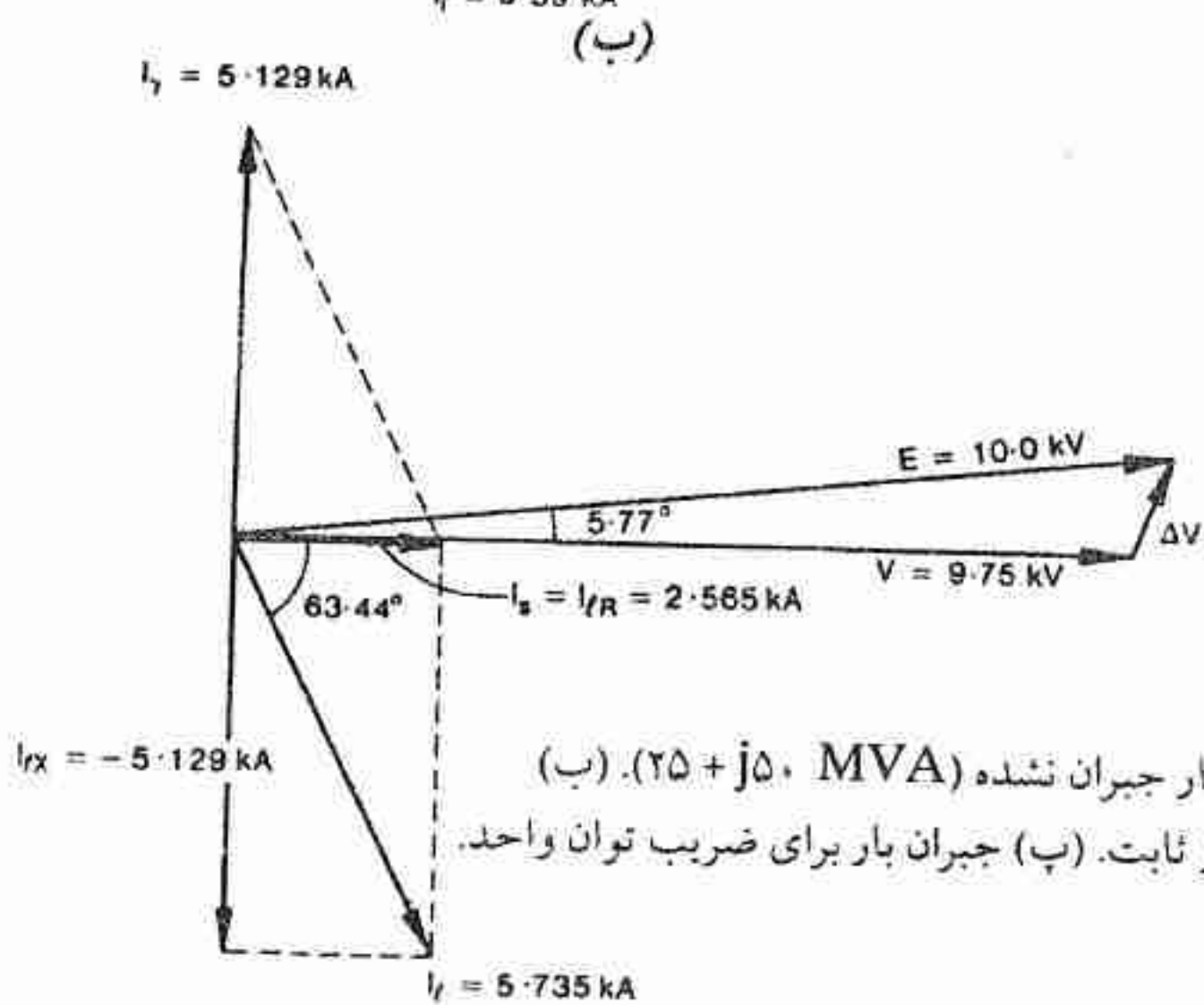
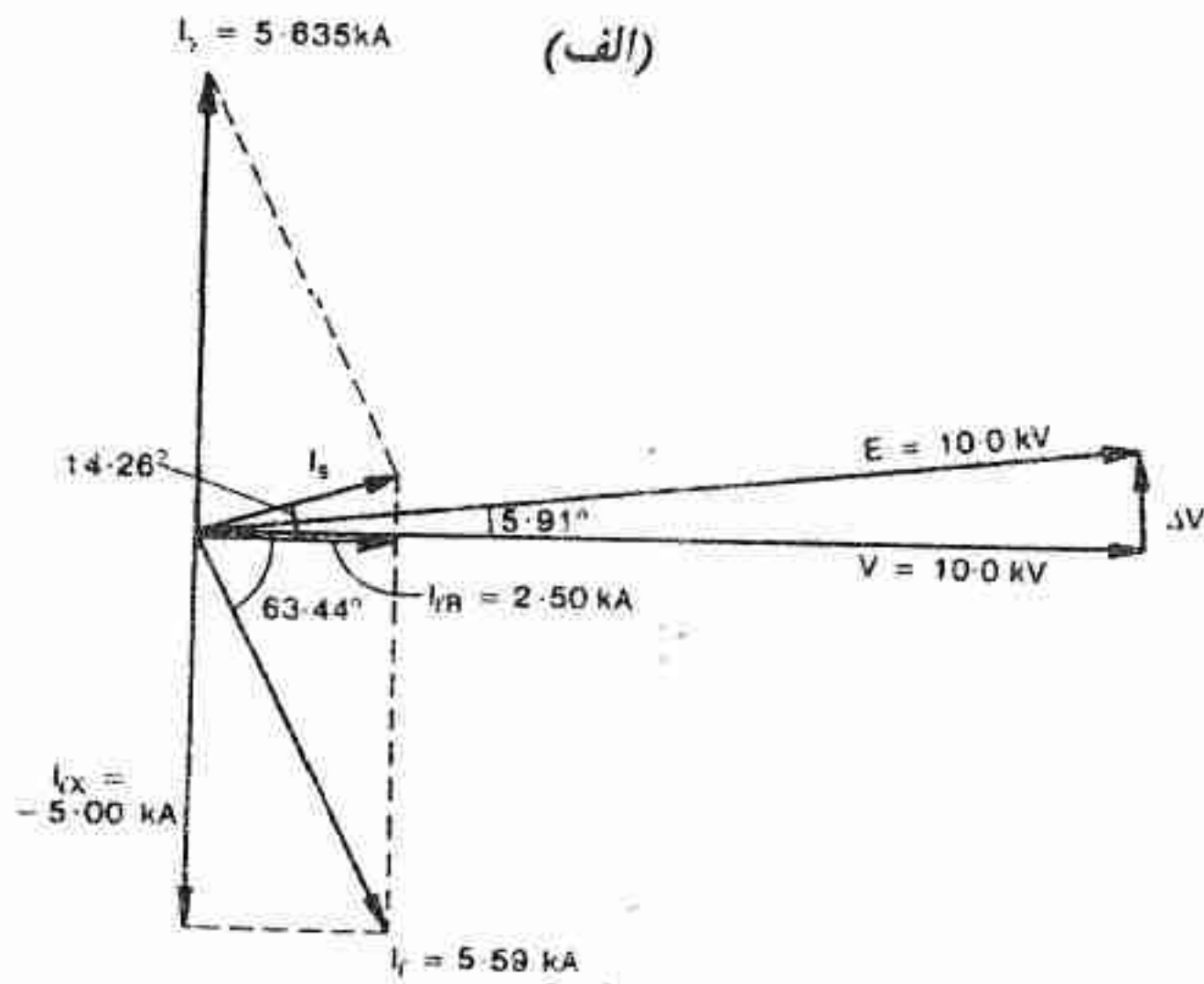
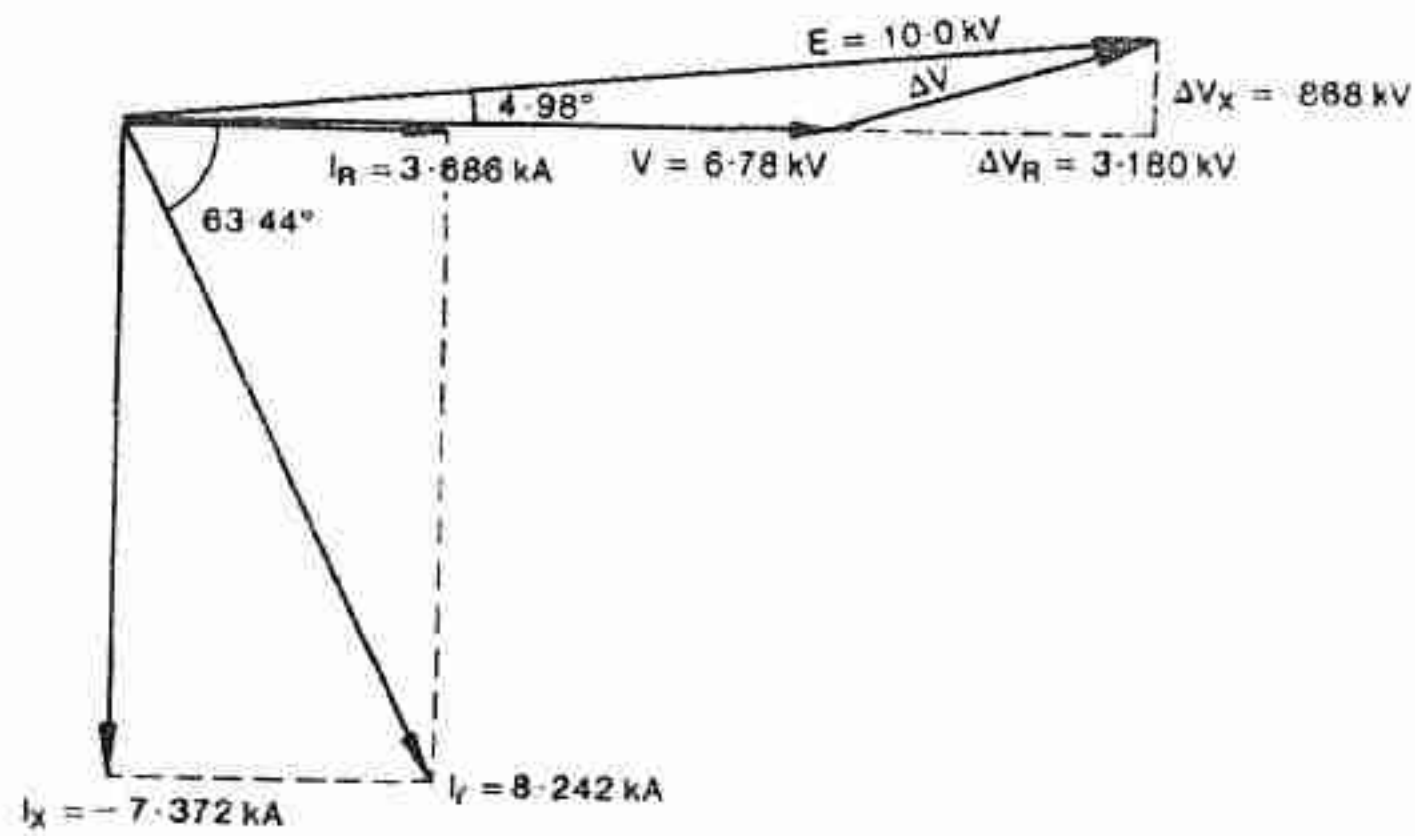
جریان کل در خطوط تغذیه برابر است $(P_\ell - jQ_s)/V = 2/50 + j0.635 \text{ kA}$ و جریان

جبران کننده به وسیله $-jQ_\ell/V = +j5/635 \text{ kA}$ با $-56/35 \text{ MVar}$ Q_ℓ بدست می آید.

دیاگرام فازور در شکل ۸ ب نشان داده است و نکات جالبی را ارائه می کند. اندازه ولتاژ دقیقاً در مقدار

$1/0 \text{ pu}$ نگاه داشته می شود و در این حالت مجاز نیست که ΔV_R را به جای ΔV محاسبه نموده و از

۱- به بخش ب ضمیمه در انتهای این فصل مراجعه شود.



(پ)

شکل ۸ - (الف) بار جبران نشده $(25 + j50 \text{ MVA})$. (ب) جبران بار برای ولتاژ ثابت. (پ) جبران بار برای ضریب توان واحد.

ΔV_x صرف نظر کنیم. بایستی هر دو مؤلفه دقیقاً محاسبه گردد. توان راکتیو جبران‌کننده با توان راکتیو بار برابر نیست و به واسطه جبران تنظیم ولتاژ که در اثر توان واقعی P_r ایجاد می‌شود، به اندازه $6/35 \text{ MVar}$ از آن بیشتر است. در نتیجه ضریب توان سیستم واحد نبوده بلکه برابر با $25 / \sqrt{25^2 + 6/35^2} = 0/969$ پیش‌فاز است. از روی دیاگرام ملاحظه می‌شود که جریان خط I_s از ولتاژ به اندازه $\cos^{-1}(0/969) = 14/3^\circ$ جلوتر است.

۱-۷-۲ جبران برای ضریب توان واحد

با $Q_r = Q_l$ ، دیاگرام فازور مطابق شکل ۸ پ است. که $I_r = j 5/129 \text{ kA} = -I_x$ و $Q_s = 0$. با $\Delta V_R = 0/201 \text{ kV}$ و $\Delta V_X = 1/006 \text{ kV}$ ، ولتاژ برابر است با $V = 9/748 \text{ kV}$ و بنابراین مقدار کاهش ولتاژ برابر است با $9/748 - 10/0 = -0/252 \text{ kV}$ یا تقریباً برابر $2/5\%$ است. بنابراین تصحیح ضریب توان به طور قابل ملاحظه‌ای تنظیم ولتاژ را بهبود می‌بخشد. در بسیاری موارد چنین بهبودی کافی است و جبران‌کننده را می‌توان به عنوان وسیله فراهم‌کننده توان راکتیو مورد نیاز بار- به جای رگولاتور ولتاژ ایده‌ال - طراحی کرد.

۱-۸ جبران‌کننده بار به صورت رگولاتور ولتاژ

مشخصه کنترلی نشان داده شده در شکل‌های ۵ و ۶ را می‌توان به صورت زیر به وسیله سه عدد مشخص کرد:

۱- ولتاژ نقطه زانوی V_k

۲- مقدار ماکزیمم یا نامی توان راکتیو $Q_{r\max}$

۳- ضریب بهره K_r

ضریب بهره به صورت تغییر توان راکتیو Q_r تقسیم بر تغییر ولتاژ تعریف می‌شود، بنابراین

$$K_r = \frac{dQ_r}{dV} \quad (31)$$

اگر مشخصه کنترلی خطی باشد، آنگاه برای $Q_r < Q_{r\max}$ ، مشخصه به کمک معادله زیر نشان داده می‌شود.

۱- با روش ارائه شده در بخش پ ضمیمه فصل محاسبه شده است.

$$V = V_k + Q_r / K_r \quad (32)$$

در شکل‌های ۵ ت و ۶ پ، ضریب بهره K_r بی‌نهایت است و جبران‌کننده دقیقاً مقدار صحیح توان راکتیو را جذب یا تولید می‌کند تا مقدار ولتاژ نقطه تغذیه^۱ را در برابر تغییرات بار ثابت نگاه دارد. حال با در نظر گرفتن مقدار معینی برای ضریب بهره K_r خواص تنظیم‌کنندگی ولتاژ جبران‌کننده را وقتی که در سیستم با سطح اتصال کوتاه معین S_{sc} کار می‌کند تعیین می‌کنیم. مطابق بخش ۱-۶-۱ سؤال اصلی این است که چگونه مقدار ولتاژ نقطه تغذیه با بار تغییر می‌کند (مخصوصاً با توان راکتیو بار)

با توجه به مطالبی که تاکنون بیان شد جبران‌کننده ایده‌آل در عملکرد تنظیم‌کنندگی ولتاژ خود، دارای ضریب بهره معین K_r است. در عمل مقادیر خیلی زیاد K_r به ندرت وجود دارد. زیرا مقادیر زیاد، پایداری سیستم را در نقطه کار جبران‌کننده ضعیف می‌نمایند و در بعضی از انواع معین جبران‌کننده‌ها طراحی آن با ضریب بهره زیاد ذاتاً گران‌قیمت است. بنابراین بررسی رفتار جبران‌کننده با K_r معین، حائز اهمیت است.

بررسی را بر پایه هرفاز^۲ یا تک‌فاز و با فرض متعادل بودن شرایط ادامه می‌دهیم. فرض می‌شود که نسبت X_s / R_s سیستم تغذیه بزرگ باشد و از تغییرات توان بار صرف‌نظر گردد. سیستم مطابق آنچه که در شکل ۵ الف نشان داده شده است، می‌باشد. تعادل توان راکتیو به وسیله رابطه زیر بیان می‌شود.

$$Q_l + Q_r = Q_s \quad (33)$$

مشخصه ولتاژ سیستم یا خط بار به وسیله معادله ۲۴ بدست می‌آید که تقریباً برابر است با

$$V \approx E \left[1 - \frac{Q_s}{S_{sc}} \right]$$

(به شکل ۹ الف مراجعه شود). گرادیان خط بار نشان‌دهنده حساسیت ذاتی ولتاژ سیستم تغذیه نسبت به تغییرات توان راکتیو Q_s است، بنابراین،

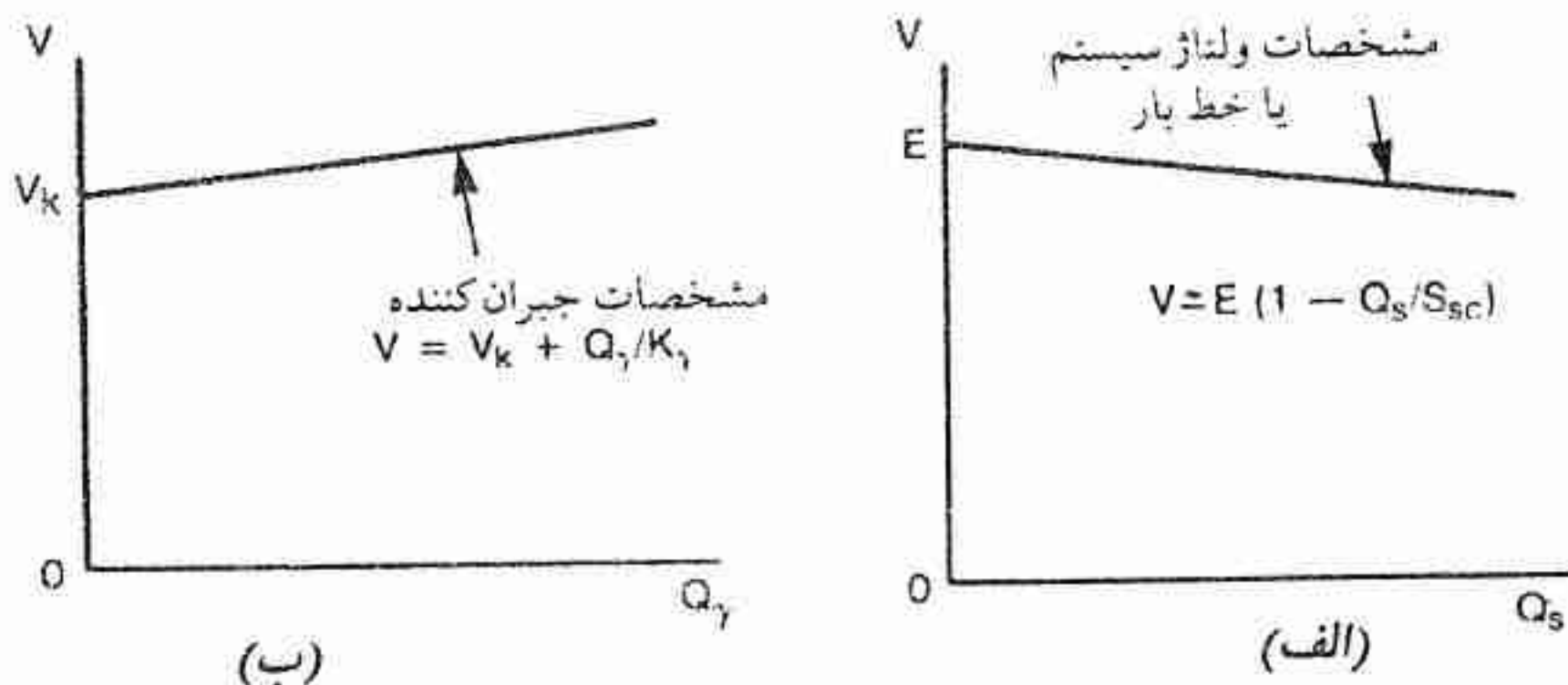
$$\frac{dV}{dQ_s} = - \frac{E}{S_{sc}} \quad (34)$$

سطح اتصال-کوتاه بالا S_{sc} منجر به کاهش حساسیت ولتاژ^۳ گردیده و خط بار را مسطح می‌نماید و در نتیجه گفته می‌شود که سیستم «محکم»^۴ است.

در حالت جبران‌نشده، $Q_r = 0$ و $Q_s = Q_l$ ، طوری که حساسیت ولتاژ نسبت به توان راکتیو بار Q_l برابر حساسیت ذاتی اش یعنی $-E/S_{sc}$ می‌باشد. در حضور جبران‌کننده از معادلات ۲۴ و ۳۳

داریم

$$V \cong E \left[1 - \frac{Q_f + Q_r}{S_{sc}} \right] \quad (35)$$

و چون Q_r تابعی از V است، حساسیت تغییر خواهد کرد.

شکل ۹ - (الف) مشخصه تقریبی ولتاژ-توان راکتیو سیستم تغذیه (ب) مشخصه ولتاژ-توان راکتیو جبران کننده ایده آل

توان راکتیو جبران کننده Q_r به وسیله تفاوت ولتاژ $V - V_k$ مطابق معادله ۳۲ بدست می آید (به شکل ۹ ب مراجعه شود) طوری که

$$Q_r = K_r (V - V_k) \quad (36)$$

قبلا ملاحظه کردیم که ضریب بهره بالای K_r یک مشخصه V/Q مسطح را ایجاب می کند، یعنی یک مشخصه ولتاژ ثابت «محکم» بدست می آید. بر > ۱ پریونیت یک ضریب بهره مثلا ۴۰ pu به این معناست که برای یک تغییر در ولتاژ V یا $(V - V_k)$ برابر $\frac{1}{40}$ یا ۰/۰۲۵ pu، توان راکتیو جبران کننده از مقدار ۱ pu تا ۰ تغییر می کند. در ذیل آسان تر است که از سیستم پریونیت استفاده نمائیم که در آن توان راکتیو مبنا Q_{rmax} و ولتاژ مبنا E خواهد بود.

اثر جبران کننده با جایگزینی مقدار Q_r از معادله ۳۶ در معادله ۳۵ مشخص می گردد به این صورت

$$V = E \left[\frac{1 + K_r V_k / S_{sc}}{1 + K_r E / S_{sc}} - \frac{Q_f / S_{sc}}{1 + K_r E / S_{sc}} \right] \quad (37)$$

این معادله نشان می دهد که چگونه ولتاژ نقطه تغذیه V نسبت به توان راکتیو بار Q_f با وجود جبران کننده و با شرط $Q_r < Q_{rmax}$ ، تغییر می کند. گرچه تقریبی است اما اثر تمامی پارامترهای مهم یعنی توان راکتیو بار، مشخصه V_k و K_r جبران کننده، و مشخصه E و S_{sc} سیستم، را مستقیما نشان می دهد.

اگر بار جبران نشده باشد داریم $K_r = Q_r = 0$ و معادله ۳۷ به معادله ۲۴ تقلیل می‌یابد. از معادله ۳۷ واضح است که جبران‌کننده دارای دو اثر است: جبران‌کننده ولتاژ نقطه تغذیه در حالت بی‌باری را تغییر می‌دهد و حساسیت ولتاژ نقطه تغذیه نسبت به توان راکتیو بار را، تغییر می‌دهد.

اگر ضریب بهره جبران‌کننده K_r مثبت باشد، آنگاه حساسیت ولتاژ به معادله زیر تقلیل می‌یابد:

$$\frac{dV}{dQ_r} = - \frac{E / S_{sc}}{1 + K_r E / S_{sc}} \quad (38)$$

به عنوان مثال، فرض کنید $E = 1/0 \text{ pu}$ و $S_{sc} = 25 \text{ pu}$ (بر مبنای Q_{rmax})، آنگاه حساسیت ولتاژ جبران‌نشده نسبت به تغییرات توان راکتیو بار (از معادله ۳۴) برابر است با $-0/04 \text{ pu}$. یک

جبران‌کننده با $K_r = 100 \text{ pu}$ این حساسیت را کاهش می‌دهد یعنی

$$\frac{-0/04}{1 - 100 \times 0/04} = \frac{-0/04}{5} = -0/008 \text{ pu} \quad (39)$$

ولتاژ نقطه تغذیه در حالت بی‌باری به وسیله اولین جمله سمت راست معادله ۳۷ بیان می‌شود. مقدار آن را می‌توان با مقدار ولتاژ بی‌باری جبران نشده E به کمک برقرار کردن $V_k = E$ ، برابر نمود. مفید است که گرادیان $-E/S_{sc}$ را به شکلی مشابه با K_r بیان کنیم: اگر رابطه زیر را بنویسیم

$$\frac{1}{K_s} = - \frac{E}{S_{sc}} \quad (40)$$

آنگاه K_s نشان‌دهنده «ضریب بهره» سیستم است که برابر است با میزان^۱ توان راکتیوی که بایستی از سیستم جذب شود تا اینکه ولتاژ سیستم به اندازه واحد تنزل یابد. بنابراین K_s سیستم با K_r جبران‌کننده شباهت دارد. و نقشی که جبران‌کننده در تعیین حساسیت کلی ولتاژ نقطه تغذیه نسبت به توان راکتیو بار دارد، تابعی از نسبت K_r / K_s می‌باشد مشروط به اینکه $Q_r < Q_{rmax}$ باشد.

توان راکتیو جبران‌کننده که به یک مقدار معین Q_r مربوط می‌شود را می‌توان از معادلات ۳۶ و ۳۸

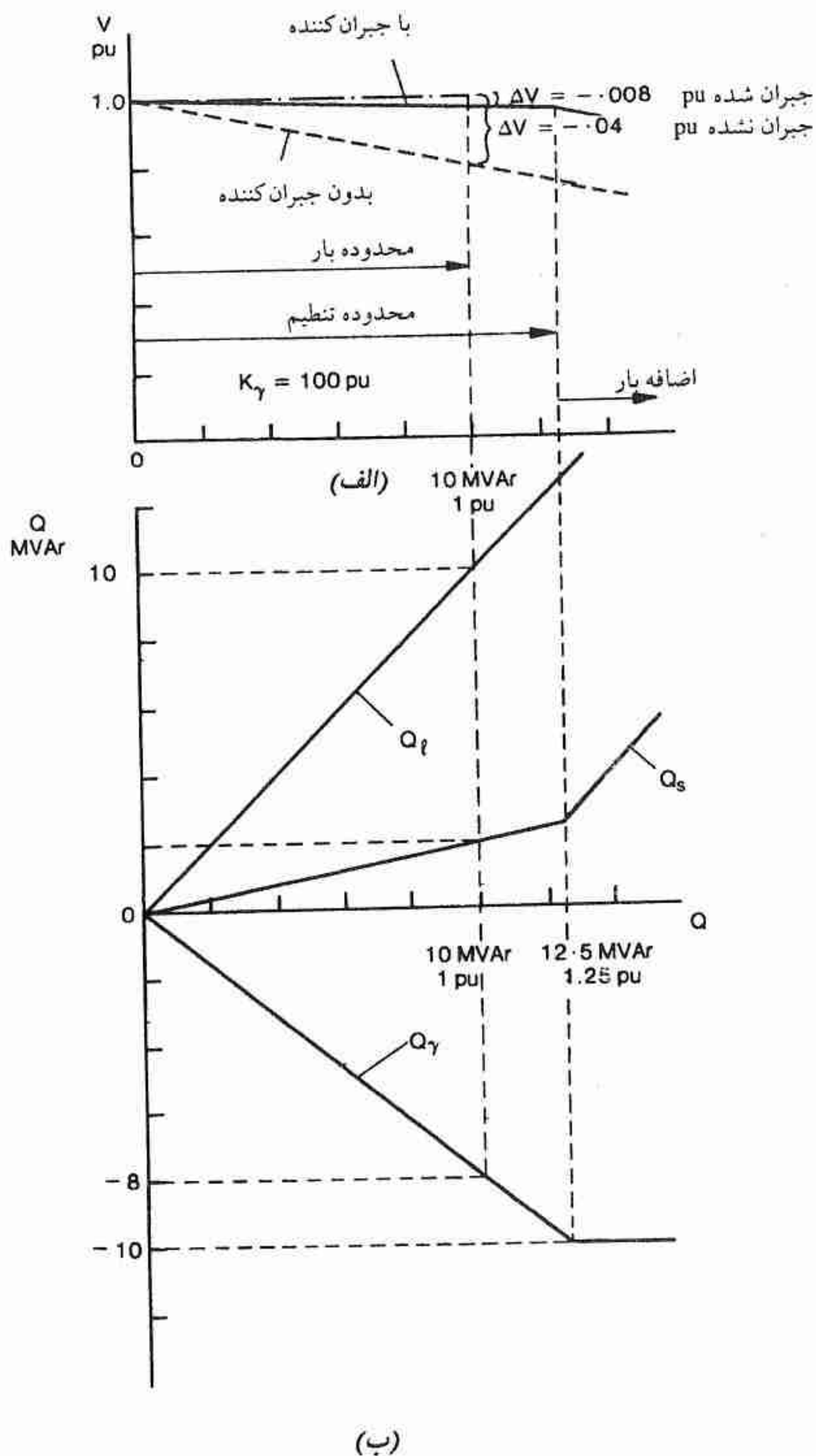
بصورت زیر تعیین کرد

$$Q_r = \frac{K_r}{1 + K_r E / S_{sc}} \left[E \left(1 - \frac{Q_r}{S_{sc}} \right) - V_k \right] \quad (41)$$

و اگر $E = V_k$ باشد داریم

$$Q_r = - \frac{K_r E / S_{sc}}{1 + K_r E / S_{sc}} Q_r \quad (42)$$

رابطه بین این مشخصه‌ها به کمک مثال که در آن $S_{sc} = 250 \text{ MVA}$ و با فرض



شکل ۱۰ - (الف) مشخصه ولتاژ - توان راکتیو سیستم جبران شده. (ب) دیاگرام تعادل توان راکتیو

به دلیل اینکه ضریب بهره جبران‌کننده مقدار معینی است، جبران توان راکتیو کامل نیست و Q_s از مقدار ۵ تا ۲ MVar (۰/۲۰ pu) تغییر می‌کند وقتی که Q_r از ۵ تا ۱۰ MVar تغییر می‌نماید. توان راکتیو جبران‌کننده از ۵ تا ۸ MVar تغییر می‌کند در حالی که در این محدوده تنظیم ولتاژ در ۰/۰۰۸ pu نگاه داشته می‌شود (شکل ۱۰ الف). هنگامی که توان راکتیو بار برابر با توان راکتیو نامی جبران‌کننده است، جبران‌کننده هنوز ۲ MVar (۲۰٪) در اختیار دارد طوری که محدوده تنظیم در این مثال به سمت محدوده اضافه بار تا توان راکتیو بار ۱۲/۵ MVar (۱/۲۵ pu) توسعه می‌یابد.

۱-۹ متعادل کردن بارهای نامتقارن و اصلاح ضریب توان

تاکنون بحث جبران بار بر مبنای هرفاز یا تک‌فاز قرار داشت و هم اکنون می‌خواهیم سومین هدف اساسی در جبران بار، یعنی متعادل کردن بارهای سه‌فاز نامتعادل (نامتقارن)^۱ را مورد بحث قرار دهیم. در بیان مفهوم جبران‌کننده ایده‌آل که به عنوان اصلاح ضریب توان یا بهبود تنظیم ولتاژ به کار می‌رفت، آن را به صورت منبع توان راکتیو قابل کنترل یا وسیله راکتیوی که دارای مشخصه کنترل ولتاژ-ثابت است، مدل کردیم. گرچه هر دو مدل معادل همدیگر هستند اما ممکن است یکی از آنها در یک کاربرد معین از مدل دیگر بسیار مناسب‌تر باشد. در مطالعه بارهای نامتعادل مناسب است که با مدل کردن بار و جبران‌کننده بر حسب ادمیتانس و امپدانس آنها، آغاز کنیم. با عنایت به این نکته در خلال این بخش، از مقاله جالبی که توسط Otto ، Gyugyi و Putman ارائه شده است تبعیت می‌کنیم و خواننده می‌تواند برای آشنایی با جزئیات بیشتر به آن مراجعه نماید. تحلیل انجام‌گرفته به قدر کافی کلی است و همزمان اصلاح ضریب توان را نیز دربردارد زیرا این مطلب کمک می‌کند تا پیوستگی با تحلیل قبلی حفظ شود. از این مهم‌تر، با در نظر گرفتن همزمان متعادل کردن فاز و اصلاح ضریب توان بر حسب ادمیتانس‌های بار و جبران‌کننده منجر به یک دیدگاه اساسی جبران بار می‌گردد که با جنبه‌هایی که تاکنون توسعه یافته است متفاوت است و دید بیشتری را نسبت به ماهیت مساله ارائه می‌کند.

1- Unbalanced (Unsymmetrical) Load

۱-۹-۱ شبکه جبران کننده ادمیتانس ایده‌ال

فرض می‌شود که ولتاژهای تغذیه متعادل باشند. بار توسط شبکه با اتصال مثلث مطابق شکل ۱۱ نشان داده می‌شود که در آن ادمیتانسهای Y_{ℓ}^{ab} ، Y_{ℓ}^{bc} و Y_{ℓ}^{ca} مختلط و نامساوی هستند. بار با اتصال ستاره را می‌توان با تبدیل ستاره - مثلث مطابق شکل ۱۱ الف نشان داد (به بخش الف ضمیمه مراجعه شود). فرض می‌شود که تغییرات بار به قدر کافی کند باشد یا «شبه سکون»^۱ باشد طوری که تحلیل فازور مجاز گردد و فرض می‌شود که بار خطی باشد.

جبران کننده بار ایده‌ال (اگر وجود داشته باشد) را می‌توان به صورت شبکه ادمیتانس سه فاز پاسیو تصور کرد که وقتی موازی با بار قرار می‌گیرد یک بار واقعی و متقارن را به سیستم تغذیه عرضه می‌کند.

ابتدا با مفهوم اصلاح ضریب توان معادله ۵ شروع می‌کنیم، هر ادمیتانس واقع در شاخه اتصال مثلث را می‌توان با موازی کردن یک سوسپتانس جبران کننده که با مقدار منفی سوسپتانس شاخه برابر است، به مقدار واقعی خالص تبدیل کرد. بنابراین اگر

$$Y_{\ell}^{ab} = G_{\ell}^{ab} + j B_{\ell}^{ab} \quad (43)$$

سوسپتانس جبران کننده برابر است با

$$B_{\gamma}^{ab} = - B_{\ell}^{ab} \quad (44)$$

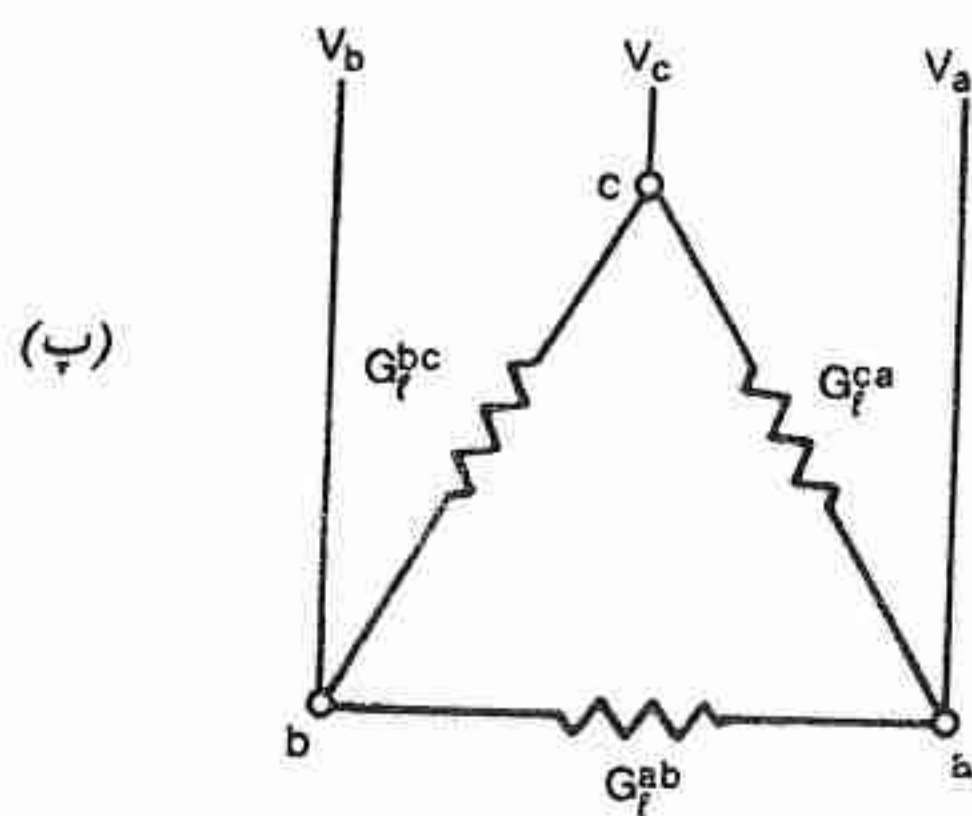
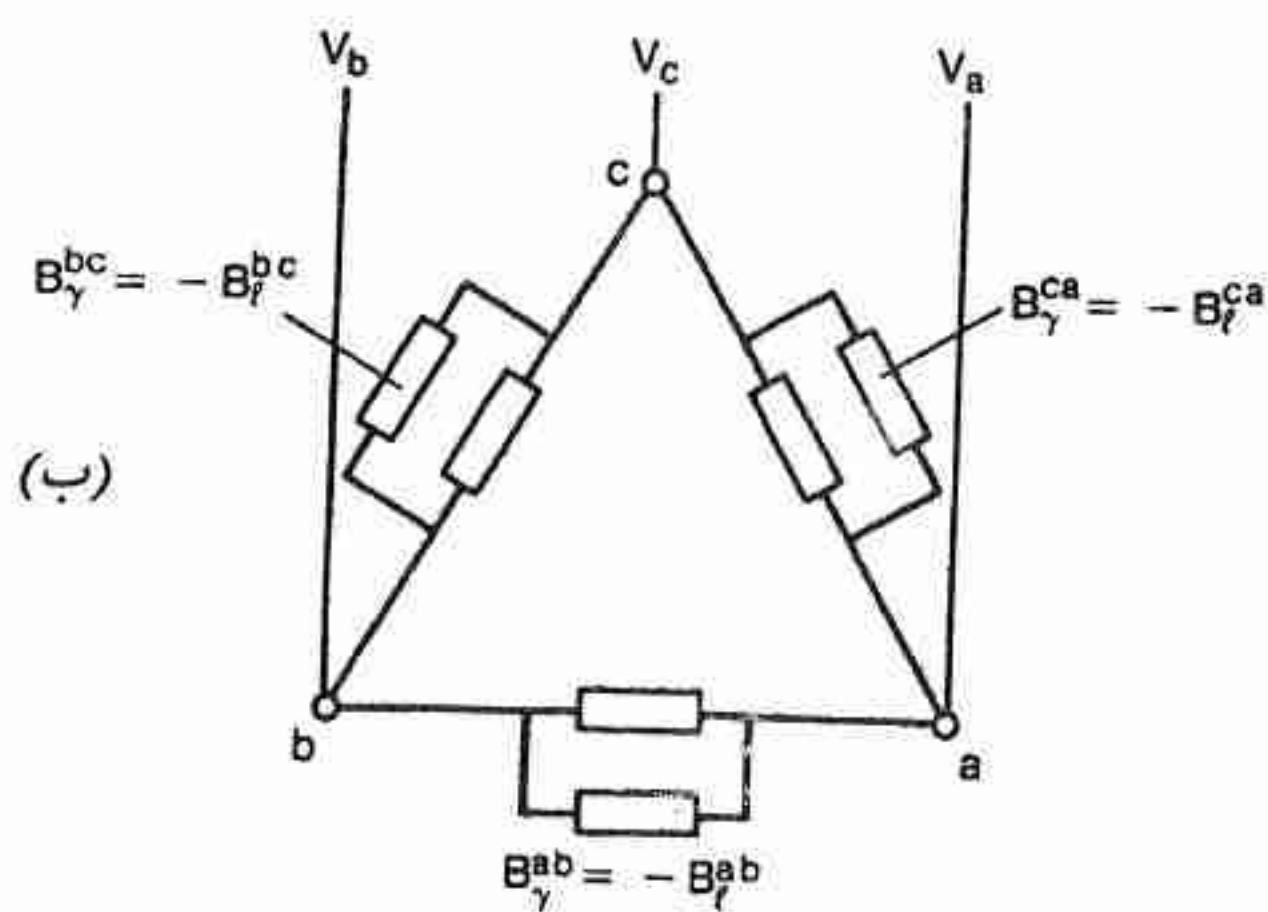
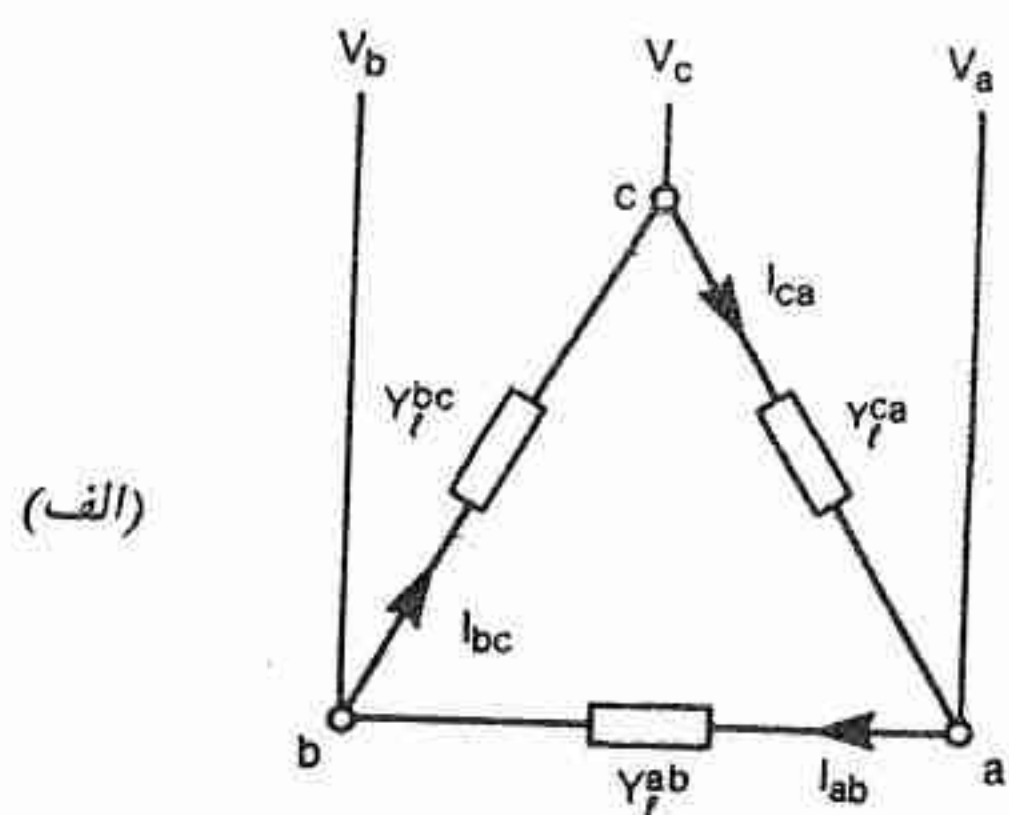
به همین ترتیب سوسپتانسهای جبران کننده $B_{\gamma}^{bc} = -B_{\ell}^{bc}$ و $B_{\gamma}^{ca} = -B_{\ell}^{ca}$ به ترتیب موازی با Y_{ℓ}^{bc} و Y_{ℓ}^{ca} قرار می‌گیرند. همانطوری که در شکل ۱۱ ب نشان داده شده است. ادمیتانسهای بار حاصل در شکل ۱۱ پ نشان داده شده است. این ادمیتانسها مقدار واقعی هستند و ضریب توان را به واحد می‌رسانند اما هنوز نامتقارن باقی می‌مانند.

به عنوان اولین قدم در جهت متعادل کردن این بار سه فاز واقعی نامتقارن، بار تک فاز G_{ℓ}^{ab} (شکل ۱۲ الف) را در نظر می‌گیریم. جریانهای توالی مثبت سه فاز را می‌توان با اتصال دادن سوسپتانس کاپاسیتیو زیر بین فازهای b و c

$$B_{\gamma}^{bc} = \frac{G_{\ell}^{ab}}{\sqrt{3}} \quad (45)$$

و سوسپتانس اندوکتیو زیر بین فازهای c و a متعادل کرد.

$$B_{\gamma}^{ca} = \frac{-G_{\ell}^{ab}}{\sqrt{3}} \quad (46)$$



شکل ۱۱ - (الف) بار سه فاز نامتعادل (ب) اتصال دادن سوسپتانس اصلاح کننده ضریب توان در هر فاز به یک جداگانه (پ) بار منتهجه با ضریب توان واحد اما نامتعادل

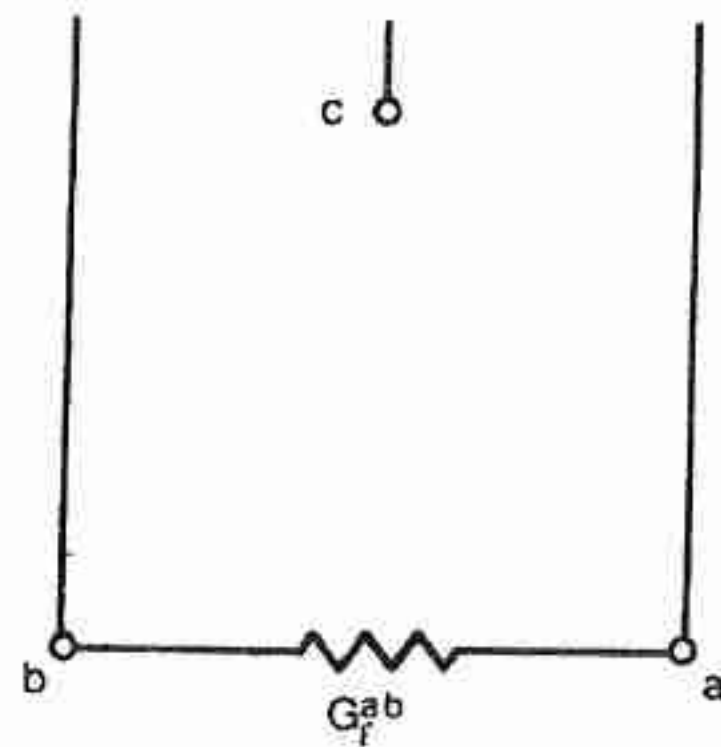
این مطلب در شکل ۱۲ ب نشان داده شده است. دیاگرام جریانهای خط I_a ، I_b و I_c برای ولتاژهای توالی مثبت V_{ab} ، V_{bc} و V_{ca} در شکل ۱۳ الف نشان داده شده است. جریانهای خطوط نه تنها متقارن هستند بلکه با ولتاژهای مربوط به خودشان همفاز نیز می باشند، طوری که هر فاز سیستم تغذیه با اتصال ستاره، یک سوم توان کل را تامین نموده و نیازی به تغذیه توان راکتیو نیست. بنابراین برای ولتاژهای توالی مثبت، مدار معادل شامل مقاومتهای با اتصال - ستاره خواهند بود که هر کدام دارای کندوکتانس G_{ab} هستند، همانطوری که در شکل ۱۲ پ نشان داده شده است. توان کل برابر است با $3V^2 G_{ab}$ که در آن V مقدار موثر ولتاژ خط-نول سیستم تغذیه است که فرض شده است متقارن باشد. ضریب توان کل و ضریب توان هر فاز سیستم تغذیه برابر واحد است. گرچه جریانها در سه شاخه اتصال مثلث نامتعادل هستند یک تعادل توان راکتیو در دورن اتصال مثلث وجود دارد که در آن توان راکتیو تولید شده توسط خازن واقع بین خطوط b و c ، با توان جذب شده توسط اندوکتانس واقع بین خطوط c و a برابر است طوری که سیستم تغذیه توان راکتیو جذب و یا تولید نمی کند. به منظور تاکید این حقیقت که تعادل به توالی فازها بستگی دارد، شکل ۱۳ ب جریانهای خط را، که با ولتاژهای توالی منفی سیستم به دست آمده است نشان می دهد. جریانهای خطوط و جریانهای شاخه ها در اتصال مثلث هر دو نامتعادل هستند، گرچه توان کل مقدارش تغییر نمی کند ($= 3V^2 G_{ab}$) و توان راکتیوی توسط سیستم جذب و یا تولید نمی شود. ضریب توان در سه فاز سیستم تغذیه هیچکدام برابر واحد نیستند.

ادمیتانس واقعی دوفاز دیگر bc و ca را می توان به همین روش به نوبت متعادل کرد. بنابراین G_{bc} را می توان با سوسپتانس های جبران کننده $B_{bc}^{ca} = -G_{bc} / \sqrt{3}$ و $B_{ca}^{ab} = G_{ca} / \sqrt{3}$ که به ترتیب بین خطوط a و b و خطوط b و c قرار می گیرند، متعادل کرد.

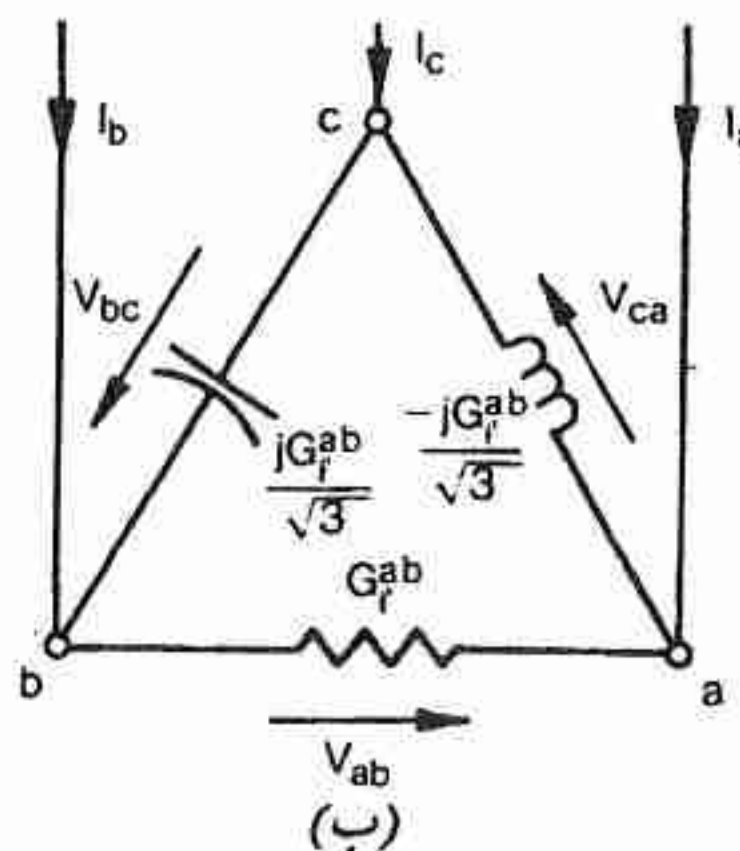
این سوسپتانس ها توام با سوسپتانس تصحیح کننده ضریب توان داده شده توسط معادله ۴۴، سه سوسپتانس جبران کننده خواهند بود که به موازات هر شاخه اتصال مثلث قرار می گیرند که در مجموع یک شبکه جبران کننده ایده ال^۱ با اتصال مثلث سه فاز را تشکیل می دهند که به C.P.Steinmetz نسبت داده می شود:

$$\begin{aligned} B_{\gamma}^{ab} &= -B_{\ell}^{ab} + (G_{\ell}^{ca} - G_{\ell}^{bc}) / \sqrt{3} \\ B_{\gamma}^{bc} &= -B_{\ell}^{bc} + (G_{\ell}^{ab} - G_{\ell}^{ca}) / \sqrt{3} \\ B_{\gamma}^{ca} &= -B_{\ell}^{ca} + (G_{\ell}^{bc} - G_{\ell}^{ab}) / \sqrt{3} \end{aligned} \quad (47)$$

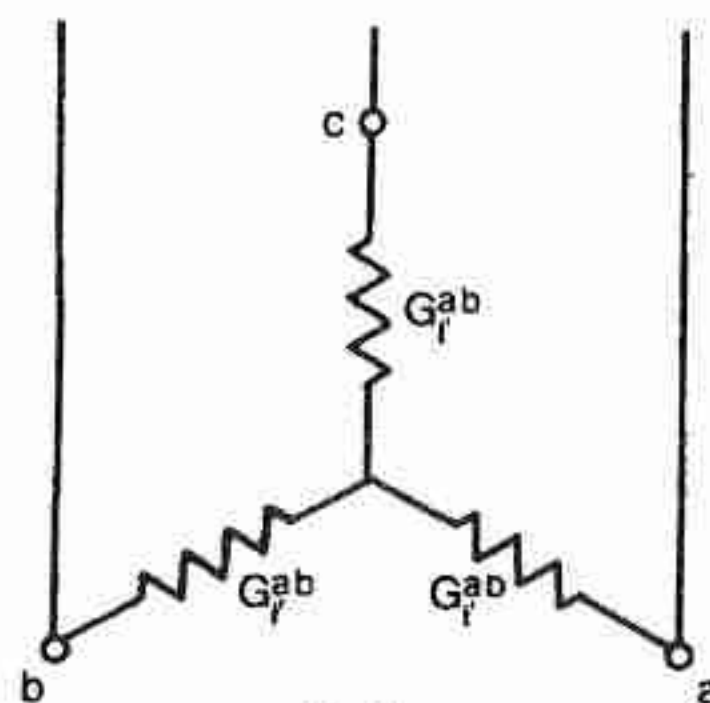
این مطلب در شکل ۱۴ الف نشان داده شده است. ادمیتانسهای بار جبران شده، حقیقی خالص و متعادل است همانطوری که در شکل ۱۴ ب نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

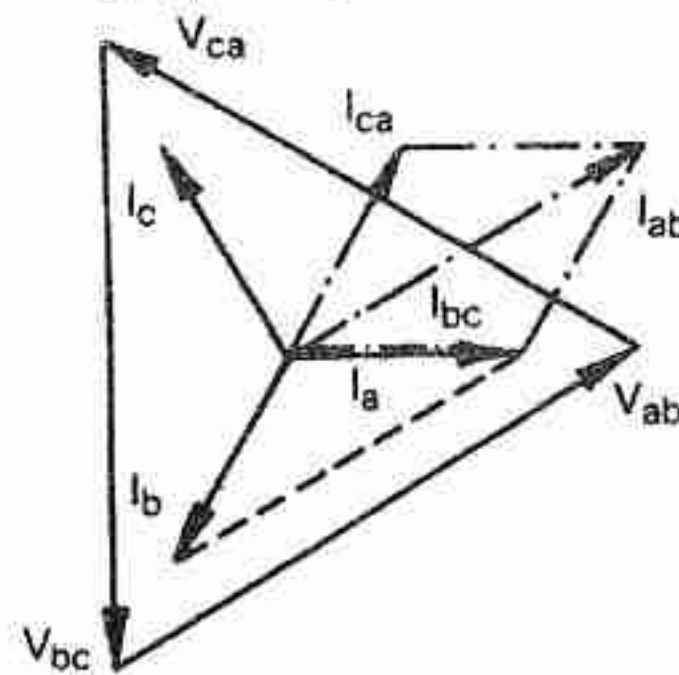


(پ)

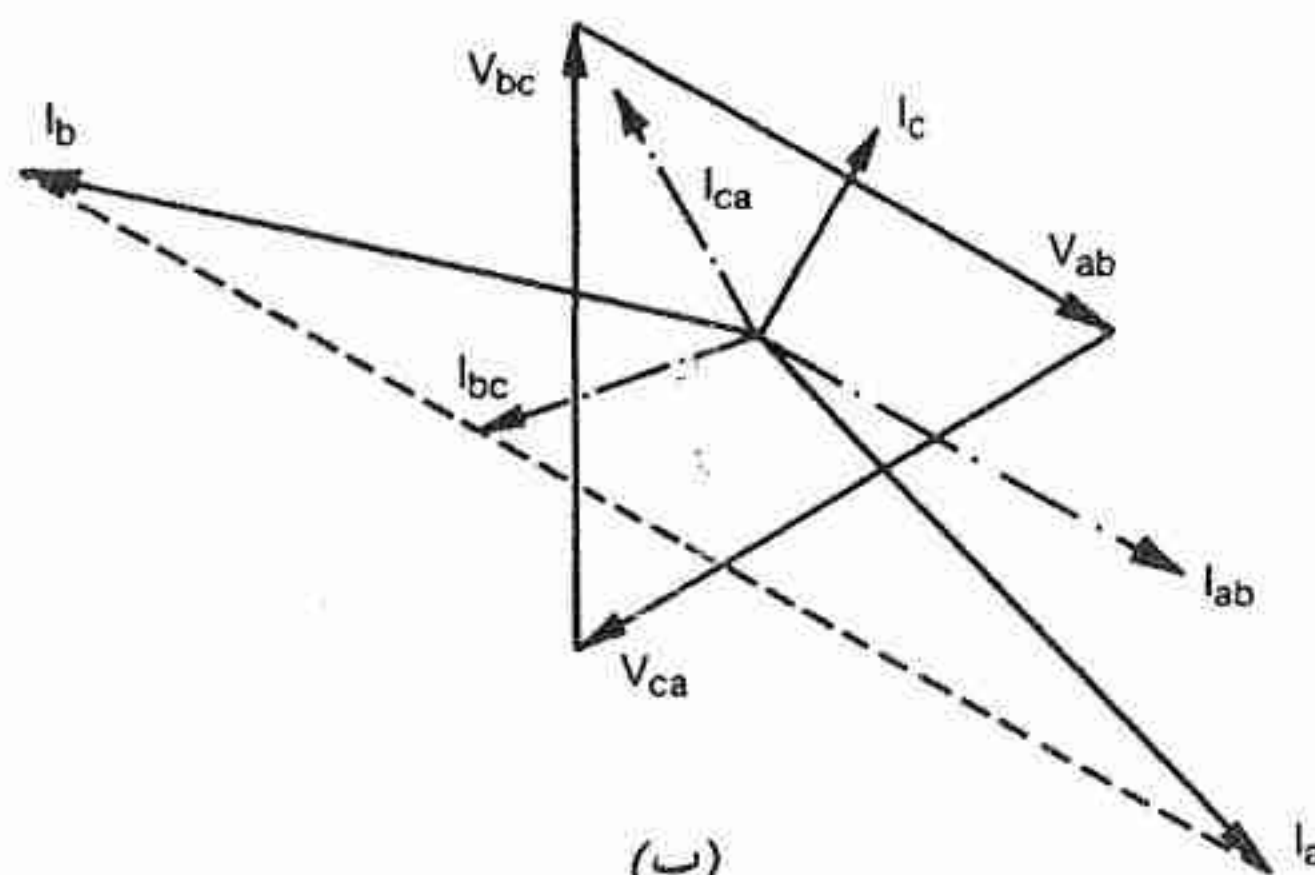
شکل ۱۲ - (الف) بار تک فاز با ضریب توان واحد قبل از متعادل کردن آن (ب) متعادل کردن توالی مثبت بار تکفاز با ضریب توان واحد (پ) مدار معادل توالی مثبت بار تکفاز جبران شده.

اگر کندوکتانسهای بار متعادل باشند (که ایجاب می کند که بار در هر سه فاز توان یکسانی را نیاز

داشته باشد)، آنگاه $G_{bc}^{ca} - G_{bc}^{bc} = 0$ و به همین ترتیب برای بقیه، و شبکه جبران‌کننده فقط توان راکتیو هر شاخه را جذب می‌کند و بیشتر از این کاری را انجام نمی‌دهد. می‌توانیم این شیوه جبران بار را در اصول مهم زیر خلاصه نمائیم:



(الف)



(ب)

شکل ۱۳ - دیاگرام فازور توالی مثبت که به شکل ۱۲ پ مربوط می‌شود (ب) دیاگرام فازور توالی منفی که به شکل ۱۲ پ مربوط می‌شود.

۱- هر بار سه فاز زمین نشده خطی نامتعادل، را می‌توان به کمک یک شبکه جبران‌کننده ایده‌آل که به موازات بار قرار می‌گیرد، به بار سه فاز حقیقی متعادل تبدیل کرد بدون آنکه در توان حقیقی مبادله شده بین بار و سیستم تغذیه تغییری پیش آید.

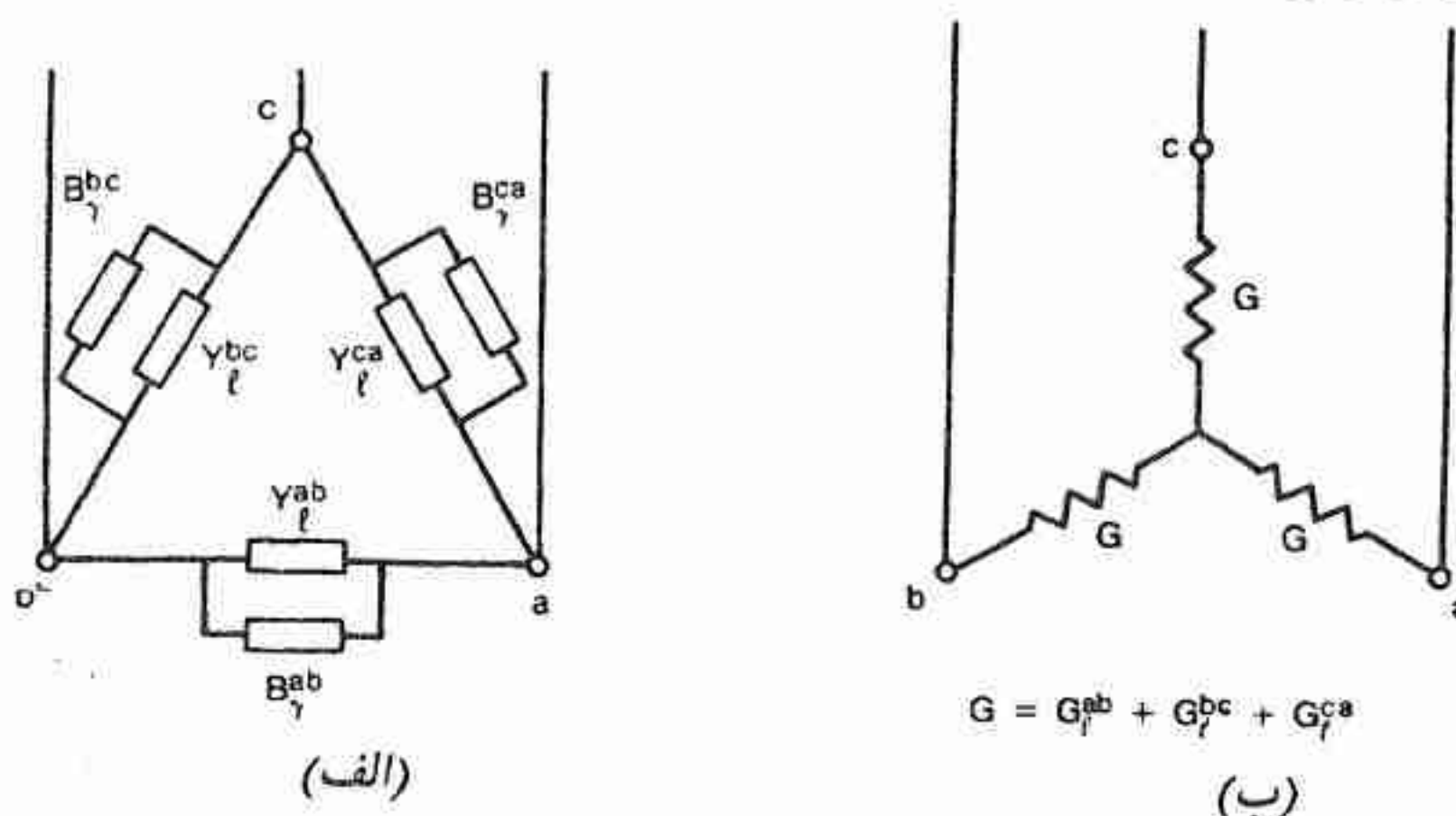
۲- شبکه جبران‌کننده ایده‌آل، راکتیو صرف خواهد بود.

اگر ادمیتانسهای بار تغییر نمایند، آنگاه در صورتی که بخواهیم جبران کامل انجام گیرد، بایستی سوسپتانسهای شبکه جبران‌کننده نیز تغییر نمایند.

۱-۹-۲ جبران بار بر حسب مؤلفه‌های متقارن

اصول جبران بار که در معادله ۴۷ خلاصه شد و در خلاصه قبل بیان شد، بیان تئوریک مفیدی از

آنچه که جبران‌کننده راکتیو می‌تواند انجام دهد، می‌باشند. البته در طراحی جبران‌کننده، اگر معادله ۴۷ را مبنای سیستم کنترل آن قرار دهیم، کار را آسان نکرده‌ایم، زیرا مقادیر مطلوب سوسپتانس جبران‌کننده بر حسب مقادیر ادمیتانس بار بیان شده است که به سهولت جریانها و ولتاژها قابل اندازه‌گیری نیستند. اگر فرمولی داشته باشیم که در آن مقادیر مطلوب سوسپتانس جبران بر حسب مقادیر ولتاژ و جریان بیان شده باشد مطلوب ما خواهد بود. در این بخش نشان داده خواهد شد که چگونه چنین فرمولی به دست می‌آید.



شکل ۱۴ - (الف) شبکه جبران‌کننده ایده‌آل کلی (ب) مدار معادل برای ولتاژهای توالی مثبت.

فرمول مستقیماً نشان خواهد داد که چگونه می‌توان سیگنالهای الکتریکی که نشان‌دهنده تقاضای سوسپتانس کاپاسیتیو یا اندوکتیو هر فاز است، را تولید کرد. سیستم کنترل جبران‌کننده بایستی سوسپتانس موثر جبران‌کننده را تنظیم نماید طوری که این تقاضا برآورده شود. بر حسب نوع جبران‌کننده، عناصر عملیاتی سیستم کنترل، ممکن است صریحاً از طریق مدارهای الکترونیکی و یا تلویحاً از طریق معادلاتی که اشباع آهن را در جبران‌کننده راکتور قابل اشباع توصیف می‌نمایند، انجام گیرد. چنین ملاحظات موضوع بحث فصول بعدی خواهد بود.

تاکنون تجزیه و تحلیل بار نامتعادل تلویحاً بر حسب جریانها و ولتاژهای واقعی خط، یعنی در «مختصات فاز» صورت گرفته است. از آنجائی که این جریانها و ولتاژها به سهولت اندازه‌گیری می‌شوند، فرمول مربوط به مقادیر مطلوب سوسپتانس جبران نیز بر حسب این مقادیر بیان خواهد شد. لیکن مشکل تحلیلی که در این روش وجود دارد این است که راه دقیقی که بتوان به طور ریاضی

مشخص کرد که جریانها در سیستم جبران شده بایستی متعادل باشند، وجود ندارد. این مشکل ابتدا با تبدیل جریانها و ولتاژها به مؤلفه‌های متقارن خودشان برطرف می‌گردد. سپس با عمل عکس، مقادیر مطلوب سوسپتانس جبران‌کننده را می‌توان بر حسب جریان و ولتاژ واقعی خط بیان کرد.

به کارگیری مؤلفه‌های متقارن همچنین در معین کردن رفتار انواع جبران‌کننده‌ها با بار نامتعادل مفید خواهد بود. جبران‌کننده‌ها از نقطه نظر مشخصه‌های توالی منفی‌اشان با یکدیگر متفاوت خواهند بود.

بار نامتعادل شکل ۱۱ الف به وسیله ولتاژهای سه فاز متعادل با توالی فاز مثبت تغذیه می‌شود. مقادیر rms ولتاژهای خط-نول عبارتند از

$$V_a = V, V_b = h^*V, V_c = hV \quad (48)$$

که در آن

$$h = e^{j^{2\pi/3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (49)$$

ولتاژهای خط-خط عبارتند از

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_a - V_b = (1 - h^*)V \\ V_{bc} &= V_b - V_c = (h^* - h)V \\ V_{ca} &= V_c - V_a = (h - 1)V \end{aligned} \quad (50)$$

جریانهای بار در سه شاخه مثلث عبارتند از

$$\begin{aligned} I_{ab} &= Y_{\ell}^{ab} V_{ab} = Y_{\ell}^{ab} (1 - h^*)V \\ I_{bc} &= Y_{\ell}^{bc} V_{bc} = Y_{\ell}^{bc} (h^* - h)V \\ I_{ca} &= Y_{\ell}^{ca} V_{ca} = Y_{\ell}^{ca} (h - 1)V \end{aligned} \quad (51)$$

و جریانهای خط عبارتند از

$$\begin{aligned} I_a &= I_{ab} - I_{ca} = [Y_{\ell}^{ab} (1 - h^*) - Y_{\ell}^{ca} (h - 1)]V \\ I_b &= I_{bc} - I_{ab} = [Y_{\ell}^{bc} (h^* - h) - Y_{\ell}^{ab} (1 - h^*)]V \\ I_c &= I_{ca} - I_{bc} = [Y_{\ell}^{ca} (h - 1) - Y_{\ell}^{bc} (h^* - h)]V \end{aligned} \quad (52)$$

مؤلفه‌های متقارن جریانهای خط به وسیله رابطه زیر بدست می‌آیند:

۱- فاکتور $\frac{1}{\sqrt{3}}$ را در معادلات منظور کرده‌ایم تا در عمل تبدیل مؤلفه‌های متقارن $C^{-1} = C^*$ گردد. این عمل باعث تغییر توان نمی‌گردد و عمل تبدیل را آسان می‌کند.

$$\begin{cases} I_0 = (I_a + I_b + I_c) / \sqrt{3} \\ I_1 = (I_a + hI_b + h^2I_c) / \sqrt{3} \\ I_2 = (I_a + h^2I_b + hI_c) / \sqrt{3} \end{cases} \quad (53)$$

که در آن I_0 ، I_1 و I_2 به ترتیب توالی صفر، مثبت و منفی خواهند بود. با توجه به معادله ۵۲ داریم

$$\begin{cases} I_0 = 0 \\ I_1 = (Y_{\ell}^{ab} + Y_{\ell}^{bc} + Y_{\ell}^{ca}) V \sqrt{3} \\ I_2 = -(h^2 Y_{\ell}^{ab} + Y_{\ell}^{bc} + h Y_{\ell}^{ca}) V \sqrt{3} \end{cases} \quad (54)$$

خط سوم معادله ۵۴ نشان می‌دهد که در بار متعادل جریان توالی صفر وجود ندارد زیرا

$$(h^2 + 1 + h) Y_{\ell}^{ab} = Y_{\ell}^{bc} = Y_{\ell}^{ca}$$

از روی تشابه، مؤلفه‌های متقارن جریانهای خط، در جبران‌کننده راکتیو با اتصال مثلث برابر

خواهد بود با

$$\begin{cases} I_{0(\gamma)} = 0 \\ I_{1(\gamma)} = j (B_{\gamma}^{ab} + B_{\gamma}^{bc} + B_{\gamma}^{ca}) V \sqrt{3} \\ I_{2(\gamma)} = -j (h^2 B_{\gamma}^{ab} + B_{\gamma}^{bc} + h B_{\gamma}^{ca}) V \sqrt{3} \end{cases} \quad (55)$$

اگر جریان توالی - منفی صفر باشد بار جبران شده متعادل خواهد شد، بنابراین لازم است

$$I_{2(0)} + I_{2(\gamma)} = 0 \quad (56)$$

که در آن اندیس γ به منظور تاکید بر اینکه $I_{2(0)}$ جریان بار است، اضافه گردیده است. این معادله بر هر

دو قسمت حقیقی و موهومی $I_{2(0)}$ و $I_{2(\gamma)}$ اعمال می‌شود. اگر قسمت موهومی توالی - مثبت جریان

خط صفر باشد ضریب توان کلی خط جبران شده واحد خواهد بود و لازمه‌اش این است که

$$\text{Im} [I_{1(0)} + I_{1(\gamma)}] = 0 \quad (57)$$

اگر جریانهای جبران‌کننده $I_{1(\gamma)}$ و $I_{2(\gamma)}$ از معادله ۵۵ در معادلات ۵۶ و ۵۷ جایگزین شود و معادلات

حاصل برای B_{γ}^{ab} ، B_{γ}^{bc} و B_{γ}^{ca} حل شود، آنگاه فرمول زیر برای سوسپتانس جبران‌کننده ایده‌ال

بدست می‌آید

$$\begin{aligned} B_{\gamma}^{ab} &= -\frac{1}{3\sqrt{3}V} [\text{Im } I_{1(0)} + \text{Im } I_{2(0)} - \sqrt{3} \text{Re } I_{2(0)}] \\ B_{\gamma}^{bc} &= -\frac{1}{3\sqrt{3}V} [\text{Im } I_{1(0)} - 2 \text{Im } I_{2(0)}] \\ B_{\gamma}^{ca} &= -\frac{1}{3\sqrt{3}V} [\text{Im } I_{1(0)} + \text{Im } I_{2(0)} + \sqrt{3} \text{Re } I_{2(0)}] \end{aligned} \quad (58)$$

مقادیر سمت راست معادله بالا را بایستی به کمک معادله ۵۳ به مختصات فازی تبدیل کرد. اگر

جریان توالی صفر موجود نباشد نتیجه زیر حاصل می‌شود

$$\begin{aligned}
 B_{\gamma}^{ab} &= -\frac{1}{3V} [\text{Im } I_{a(\ell)} + \text{Im } h I_{b(\ell)} - \text{Im } h^* I_{c(\ell)}] \\
 B_{\gamma}^{bc} &= -\frac{1}{3V} [\text{Im } h I_{b(\ell)} + \text{Im } h^* I_{c(\ell)} - \text{Im } I_{a(\ell)}] \\
 B_{\gamma}^{ca} &= -\frac{1}{3V} [\text{Im } h^* I_{c(\ell)} + \text{Im } I_{a(\ell)} + \text{Im } h I_{b(\ell)}]
 \end{aligned} \quad (59)$$

این معادله، مقادیر مطلوب سوسپتانس جبران‌کننده را بر حسب جریانهای فازور خط $I_{a(\ell)}$ ، $I_{b(\ell)}$ و $I_{c(\ell)}$ بار بیان می‌کند.

بیان مقادیر مطلوب سوسپتانس جبران‌کننده بر حسب جریان و ولتاژ لحظه‌ای. مقدار مطلوب سوسپتانس جبران‌کننده را می‌توان بر حسب جریانها و ولتاژهای بار بیان کرد. و این کار می‌تواند به دو صورت انجام گیرد: یکی روش نمونه‌برداری^۱ و دیگری روش میانگین^۲ است. ابتدا روش نمونه‌برداری را در نظر می‌گیریم، جمله $\text{Im } I_{a(\ell)}$ با جریان لحظه‌ای i_a به وسیله معادله زیر ارتباط دارد

$$i_a = \sqrt{2} \text{Re} [(I_{aR} + jI_{aX}) e^{j\omega t}] = \sqrt{2} (I_{aR} \cos \omega t - I_{aX} \sin \omega t) \quad (60)$$

حال $\text{Im } I_{a(\ell)}$ ، یعنی I_{aX} برابر است با i_a در لحظه‌ای که $\sin \omega t = -1$ و $\cos \omega t = 0$ می‌باشد. به منظور تعریف کردن این لحظه به یک مرجع فازور نیاز داریم و ساده‌تر خواهد بود اگر ولتاژ خط-نول V_a را انتخاب نماییم.

$$v_a = \sqrt{2} \text{Re} [V e^{j\omega t}] = \sqrt{2} V \cos \omega t \quad (61)$$

بنابراین لحظه مورد نظر به صورت زیر تعریف می‌شود

$$v_a = 0 \quad \text{و} \quad \frac{dv_a}{dt} > 0 \quad (62)$$

شرط مثبت بودن مشتق به این دلیل ضرورت دارد که بتوان لحظه مورد نظر را از لحظه‌ای که $\cos \omega t = 0$ و $\sin \omega t = +1$ است که در حقیقت نیم سیکل دیرتر اتفاق می‌افتد، تشخیص داد. بنابراین می‌توانیم بنویسیم

$$\text{Im } I_a = I_{aX} = \frac{i_a}{\sqrt{2}} \quad \left| \begin{array}{l} v_a = 0 \\ dv_a/dt > 0 \end{array} \right. \quad (63)$$

بنابراین به وسیله نمونه‌برداری از جریان i_a در لحظه‌ای که $v_a = 0$ و dv_a/dt مثبت است، یعنی در نقطه صفر مثبت شونده ولتاژ^۳ v_a ، می‌توان مقدار $\text{Im } I_a$ را اندازه‌گیری کرد.

تمام جملات سمت راست معادله ۵۹ را می‌توان بر حسب مقادیر لحظه‌ای جریان و ولتاژ و مشتقات آن بیان کرد، نتایج زیر بدست می‌آید:

$$\begin{aligned}
 B_{\gamma}^{ab} &= -\frac{1}{3\sqrt{2}V} \left[\begin{array}{c|c|c} i_a & +i_b & -i_c \\ \hline v_a = 0 & v_b = 0 & v_c = 0 \\ dv_a/dt > 0 & dv_b/dt > 0 & dv_c/dt > 0 \end{array} \right] \\
 B_{\gamma}^{bc} &= -\frac{1}{3\sqrt{2}V} \left[\begin{array}{c|c|c} i_b & +i_c & -i_a \\ \hline v_b = 0 & v_c = 0 & v_a = 0 \\ dv_b/dt > 0 & dv_c/dt > 0 & dv_a/dt > 0 \end{array} \right] \\
 B_{\gamma}^{ca} &= -\frac{1}{3\sqrt{2}V} \left[\begin{array}{c|c|c} i_c & +i_a & -i_b \\ \hline v_c = 0 & v_a = 0 & v_b = 0 \\ dv_c/dt > 0 & dv_a/dt > 0 & dv_b/dt > 0 \end{array} \right]
 \end{aligned} \tag{۶۴}$$

بنابراین سوسپتانس‌های مطلوب جبران‌کننده، بر حسب سه جریان خط که در لحظات صفر مثبت شونده ولتاژهای خط-نول v_a ، v_b و v_c نمونه‌برداری شده‌اند، بیان شده است. (توجه اینکه لازم است در مدار اندازه‌گیری یک نول مصنوعی ایجاد شود). معادله ۶۴ را می‌توان مستقیماً به عنوان مبنای سیستم کنترل جبران‌کننده، مورد استفاده قرار داد. از آنجائی که نقطه صفر مثبت شونده v_a ، v_b و v_c به فاصله $\frac{2\pi}{3}$ رادیان الکتریکی در پی یکدیگر می‌آیند، سیگنالی که معرف مقدار مطلوب سوسپتانس جبران‌کننده است، می‌تواند در هر سیکل ۳ بار تجدید شود. مقدار مطلوب سوسپتانس جبران‌کننده بر حسب کمیت‌های میانگین توان واقعی و راکتیو - از آنجائی که $V_a = V$ ، $V_b = hV$ و $V_c = hV$ ، مقادیر V_a ، V_b و V_c را می‌توان در معادله ۵۹ به روش زیر منظور کرد:

$$\begin{aligned}
 B_{\gamma}^{ab} &= \frac{1}{3V^2} [\text{Im}(V_a I_a^*) + \text{Im}(V_b I_b^*) - \text{Im}(V_c I_c^*)] \\
 B_{\gamma}^{bc} &= \frac{1}{3V^2} [\text{Im}(V_b I_b^*) + \text{Im}(V_c I_c^*) - \text{Im}(V_a I_a^*)] \\
 B_{\gamma}^{ca} &= \frac{1}{3V^2} [\text{Im}(V_c I_c^*) + \text{Im}(V_a I_a^*) - \text{Im}(V_b I_b^*)]
 \end{aligned} \tag{۶۵}$$

حال از رابطه زیر استفاده می‌کنیم

$$\text{Im} [VI^*] = \frac{1}{T} \int_T v(-\frac{\pi}{2}) i dt \quad (66)$$

که در آن $v(-\pi/2)$ معرف سیگنالی است که در فرکانس پایه به اندازه $-\pi/2$ جابجایی فاز پیدا کرده است و T پریود $2\pi/\omega$ می باشد. این عبارت را می توان به عنوان توان راکتیو میانگین در یک سیکل کامل تفسیر کرد. بنابراین عبارت اول در معادله ۶۵ برابر است با

$$\text{Im} [V_a I_a^*(t)] = \frac{1}{T} \int_T v_a(-\frac{\pi}{2}) i_a(t) dt \quad (67)$$

البته توان راکتیوی را که به وسیله ی این معادله به دست می آید بی معنی است که به یک فاز و یا یک شاخه مدار بار اختصاص دهیم زیرا ولتاژهای V_a ، V_b و V_c بر حسب تعریف متعادل هستند، در حالی که جریانهای $I_a(t)$ ، $I_b(t)$ و $I_c(t)$ نیستند. حال در عمل سیگنالهای $v_a(-\pi/2)$ و نظایر آن را می توان از دیاگرامی که ولتاژهای خط-نول را به ولتاژهای خط-خط مربوط می کند، بدست آورد. (به بخش ۳ ضمیمه مراجعه شود). چون $V_{ab} = -j\sqrt{3} V_c$ ، $V_{bc} = -j\sqrt{3} V_a$ و $V_{ca} = -j\sqrt{3} V_b$ است داریم

$$\begin{aligned} v_a(-\frac{\pi}{2}) &= \frac{v_{bc}}{\sqrt{3}} \\ v_b(-\frac{\pi}{2}) &= \frac{v_{ca}}{\sqrt{3}} \\ v_c(-\frac{\pi}{2}) &= \frac{v_{ab}}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (68)$$

طوری که معادله ۶۵ سرانجام به صورت زیر درمی آید

$$\begin{aligned} B_{\gamma}^{ab} &= \frac{1}{3\sqrt{3} V^2} \frac{1}{T} \int_T (v_{bc} i_a(t) + v_{ca} i_b(t) - v_{ab} i_c(t)) dt \\ B_{\gamma}^{bc} &= \frac{1}{3\sqrt{3} V^2} \frac{1}{T} \int_T (v_{ca} i_b(t) + v_{ab} i_c(t) - v_{bc} i_a(t)) dt \\ B_{\gamma}^{ca} &= \frac{1}{3\sqrt{3} V^2} \frac{1}{T} \int_T (v_{ab} i_c(t) + v_{bc} i_a(t) - v_{ca} i_b(t)) dt \end{aligned} \quad (69)$$

مشابه معادله ۶۴ همچنین از این معادله هم می توان به عنوان مبنای سیستم کنترل جبران کننده استفاده کرد، زیرا تمام عملیات ریاضی بر روی عبارات سمت راست معادله را می توان به سهولت به کمک مدارهای الکترونیکی انجام داد. گرچه انتگرال گیری یا میانگین گرفتن در یک پریود فرکانس پایه

صورت گرفته، اما لزومی ندارد که در هر سیکل انتگرال گیر الکترونیکی مجدد تنظیم^۱ شود و بنابراین یک سیگنال دائم که بیانگر مقدار مطلوب سوپرتانس است برای هر شاخه جبران کننده تولید می گردد. و همچنین لزومی ندارد که زمان ثابت انتگرال گیری برابر T باشد، در بعضی کاربردها (مثلا کوره های الکتریکی) ممکن است این زمان کوتاه تر گردد تا سرعت پاسخ جبران کننده سریع تر شود. البته معادله ۶۹ اطلاعاتی راجع به پاسخ جبران کننده در شرایط تغییرات سریع در اختیار نمی گذارد.

جبران کننده که به صورت شبکه ادمیتانس توالی منفی و مثبت نشان داده شده است - این امکان وجود دارد که شبکه جبران کننده را به دو شبکه تقسیم کرد، که یکی مؤلفه های توالی مثبت جریان جبران کننده و دیگری مؤلفه های توالی منفی را تغذیه می نماید. می توانیم مؤلفه های توالی را از معادله ۵۴ در معادله ۵۸ جایگزین نمائیم. نتیجه به قرار زیر است

$$\begin{aligned} B_{\gamma}^{ab} &= B_{\gamma_1}^{ab} + B_{\gamma_2}^{ab} \\ B_{\gamma}^{bc} &= B_{\gamma_1}^{bc} + B_{\gamma_2}^{bc} \\ B_{\gamma}^{ca} &= B_{\gamma_1}^{ca} + B_{\gamma_2}^{ca} \end{aligned} \quad (70)$$

که در آن $B_{\gamma_1}^{ab}$ و نظایر آن، شبکه جبران کننده توالی مثبت را تشکیل می دهند:

$$B_{\gamma_1}^{ab} = B_{\gamma_1}^{bc} = B_{\gamma_1}^{ca} = -\frac{1}{3} [B_{\ell}^{ab} + B_{\ell}^{bc} + B_{\ell}^{ca}] \quad (71)$$

و $B_{\gamma_2}^{ab}$ و نظایر آن، شبکه جبران کننده توالی منفی را تشکیل می دهند:

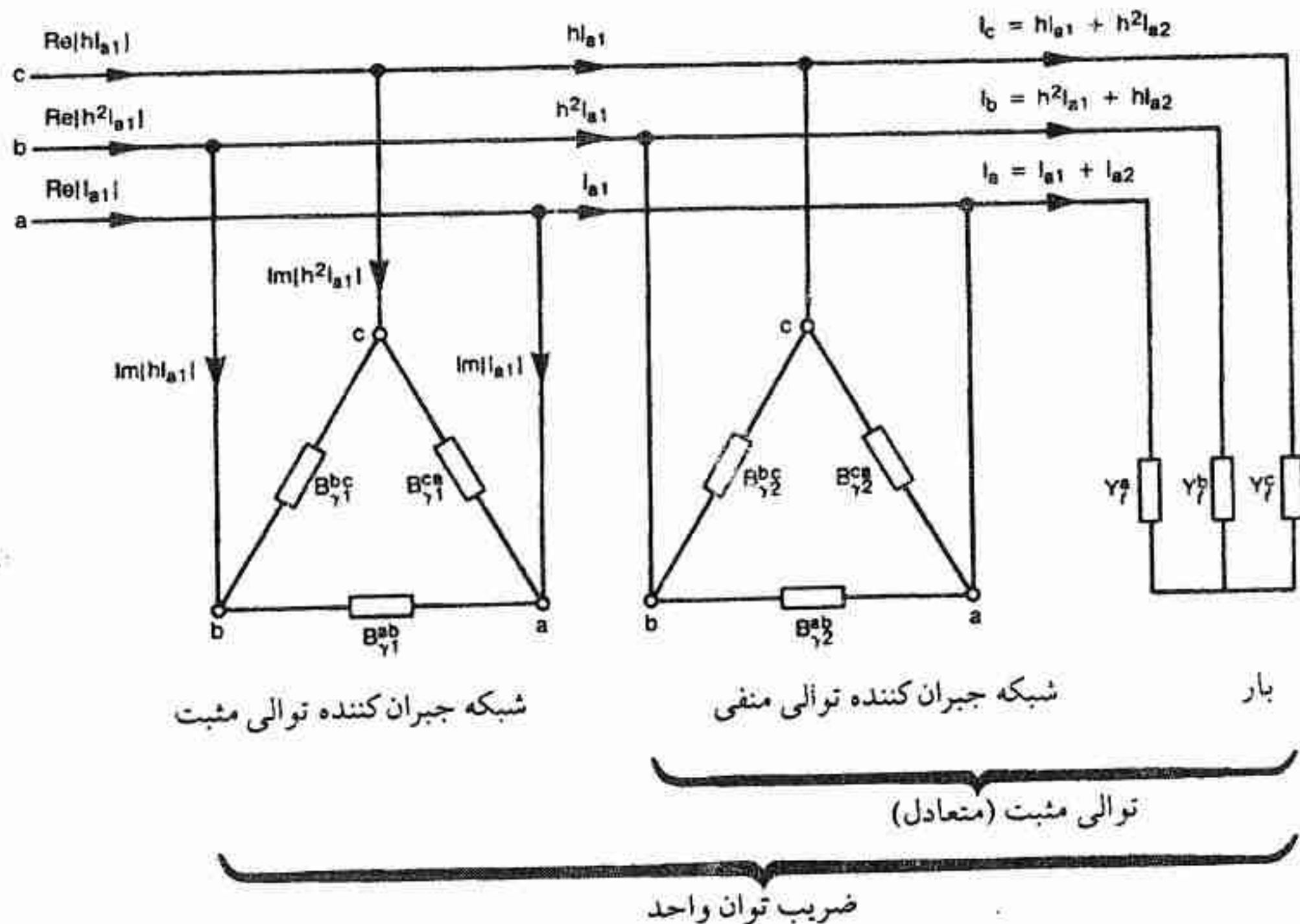
$$\begin{aligned} B_{\gamma_2}^{ab} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{\ell}^{ca} - G_{\ell}^{bc}) + \frac{1}{3} (B_{\ell}^{bc} + B_{\ell}^{ca} - 2B_{\ell}^{ab}) \\ B_{\gamma_2}^{bc} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{\ell}^{ab} - G_{\ell}^{ca}) + \frac{1}{3} (B_{\ell}^{ca} + B_{\ell}^{ab} - 2B_{\ell}^{bc}) \\ B_{\gamma_2}^{ca} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{\ell}^{bc} - G_{\ell}^{ab}) + \frac{1}{3} (B_{\ell}^{ab} + B_{\ell}^{bc} - 2B_{\ell}^{ca}) \end{aligned} \quad (72)$$

این شبکه ها در شکل ۱۵ نشان داده شده است. شبکه جبران کننده توالی -منفی، جریان توالی منفی را که برای متعادل کردن بار لازم است حمل می کند، طوری که از سیستم تغذیه جریان توالی - منفی داخل یا خارج نمی شود. شبکه جبران کننده توالی -مثبت توان راکتیوی که برای اصلاح ضریب توان به واحد لازم است را فراهم می نماید (همزمان برای سه فاز). به عنوان آزمایش، معادلات ۷۰، ۷۱ و

۷۲ یعنی مجموع سوسپتانسهای جبران‌کننده توالی مثبت و منفی با معادله ۴۷ موافقت دارد.

۱-۱۰ نتیجه‌گیری

به منظور بررسی اعمال اصلی اصلاح ضریب توان، تنظیم ولتاژ و متعادل کردن بار از دیدگاه عملی، تئوری جبران بار، جبران‌کننده را به عنوان منبع توان راکتیو قابل کنترل، وسیله تنظیم‌کننده ولتاژ و شبکه با سوسپتانس‌های مطلوب تبیین می‌نماید.



شکل ۱۵ - شبکه جبران‌کننده ایده‌آل که به مولفه‌های منفی و مثبت تفکیک شده است.

نشان داده شده است که جبران‌کننده سه‌فاز راکتیو خالص می‌تواند اعمال اصلی اصلاح ضریب توان، تنظیم ولتاژ و متعادل کردن بار را انجام دهد. مشخصاتی که ضروری است جبران‌کننده دارا باشد تا این اعمال را انجام دهد بدست آمده است. یک جبران‌کننده با سیستم کنترل تنظیم‌کنندگی - ولتاژ قادر نخواهد بود که در تمام مواقع ضریب توان را در یک نگاه دارد اما می‌تواند ضریب توان میانگین

واحد را بدست دهد.

تجزیه و تحلیل جبران بار بر اساس مولفه‌های متقارن موجب می‌گردد که بتوان روش بسیار کلی‌تری را فرموله کرد. این روش منجر می‌شود که بتوان در یک جبران‌کننده واقعی به طریقی سیگنال‌ها را کنترل «سوسپتانس مورد تقاضا»^۱ را به طور فیزیکی بدست آورد. و همچنین امکان مقایسه رفتار انواع مختلف جبران‌کننده را در شرایط نامتعادل فراهم می‌نماید.

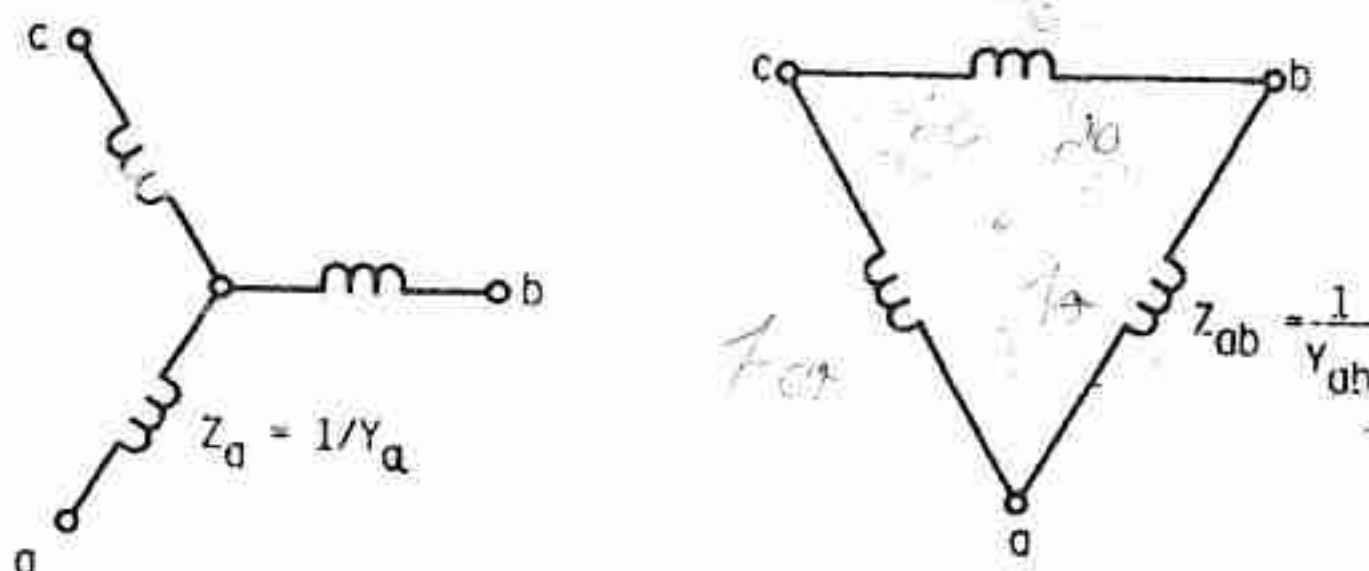
ضمیمه

الف - تبدیل امپدانس ستاره - مثلث

برحسب امپدانسها و ادمیتانسهای که در شکل الف مشخص شده‌اند داریم

$$Z_a = \frac{Z_{ab} Z_{ca}}{Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ca}} \quad \text{و} \dots$$

$$Y_{ab} = \frac{Y_a Y_b}{Y_a + Y_b + Y_c} \quad \text{و} \dots$$



شکل الف ۱ - تبدیل امپدانس ستاره - مثلث

ب - تعیین مقدار توان راکتیو جبران به منظور رسیدن به ولتاژ ترمینال معین

مساله عبارتست از پیدا کردن Q_s از معادله ۱۳ طوری که $E = V$ گردد. آنگاه $Q_r = Q_s - Q_l$

با مرتب کردن معادله ۱۳ داریم

$$aQ_s^2 + bQ_s + c = 0$$

که در آن

$$a = R_s^* + X_s^*$$

$$b = 2V^* X_s$$

$$c = (V^* + R_s P_\ell)^* + X_s^* P_\ell^* - E^* V^*$$

بنابراین

$$Q_s = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

پ - محاسبه مقدار ولتاژ در صورت معلوم بودن توان واقعی و راکتیو از معادله ۱۲ داریم:

$$\Delta V = \frac{PR_s + QX_s}{V} + j \frac{PX_s - QR_s}{V} = \frac{A}{V} + j \frac{B}{V}$$

از معادله ۱۳،

$$\begin{aligned} E^* &= \left[V + \frac{A}{V} \right]^* + \left[\frac{B}{V} \right]^* \\ &= V^* + 2A + \frac{A^* + B^*}{V^*} \end{aligned}$$

که می‌توان آن را در یک معادله ساده درجه ۲ برحسب V^* مرتب کرد.

ت - تبدیل مولفه‌های متقارن

عمل تبدیل با ضریب $1/\sqrt{3}$ نوشته شده است تا اینکه توان تغییر نکند. بنابراین در این تبدیل $C^{-1} = \hat{C}^*$ است. برحسب ماتریس، تبدیل مستقیم به قرار زیر است

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & h & h^2 \\ 1 & h^2 & h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

که در آن $h = e^{j2\pi/3}$ است. عمل تبدیل معکوس با ماتریس زیر انجام می‌شود

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & h^2 & h \\ 1 & h & h^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}$$

ث - توان واقعی و راکتیو میانگین برحسب مقادیر لحظه‌ای ولتاژها و جریانها

با در نظر گرفتن $V_a = V$ به عنوان فازور مرجع، $I_a = I_{aR} + jI_{aX}$ نشان دهنده جریان بار اندوکتیو

(پس فاز) در فاز "a" است. توان ظاهری برابر است با

$$S_a = V_a I_a^* = V_{aR} - j V_a I_{aX} = P_a + j Q_a$$

یعنی

$$P_a = \text{Re} [V_a I_a^*] \quad \text{و} \quad Q_a = -\text{Im} [V_a I_a^*]$$

مقدار لحظه‌ای ولتاژ در فاز "a" برابر است با

$$v_a = \sqrt{2} V \text{Re} [e^{j\omega t}] = \sqrt{2} V \cos \omega t$$

به همین ترتیب

$$\begin{aligned} i_a &= \sqrt{2} \text{Re} [(I_{aR} + j I_{aX}) e^{j\omega t}] \\ &= \sqrt{2} [I_{aR} \cos \omega t - I_{aX} \sin \omega t] \end{aligned}$$

با انتگرال‌گیری در یک سیکل کامل پریود T و تقسیم آن بر T ، توان میانگین برابر است با

$$P_a = \frac{1}{T} \int_T v_a i_a dt = V I_{aR}$$

اگر $(-\pi/2)$ بیانگر V_a باشد که -90° درجه یا $\pi/2$ رادیان انتقال فاز داده است، آنگاه

$$V_a(-\pi/2) = \sqrt{2} V \cos(\omega t - \pi/2) = \sqrt{2} \sin \omega t$$

توجه اینکه همچنین

$$v_a(-\pi/2) = \sqrt{2} V \text{Re} [e^{j(\omega t - \pi/2)}] = \sqrt{2} V \text{Re} [-j e^{j\omega t}]$$

با ضرب آن در جریان لحظه‌ای i_a داریم

$$\begin{aligned} v_a(-\pi/2) i_a &= 2V [I_{aR} \cos \omega t \sin \omega t - I_{aX} \sin^2 \omega t] \\ &= V [I_{aR} \sin 2\omega t - I_{aX} (1 - \cos 2\omega t)] \end{aligned}$$

با انتگرال‌گیری از یک سیکل کامل پریود T و تقسیم آن بر مقدار T ، توان راکتیو میانگین برابر است با

$$Q_a = \frac{1}{T} \int_T v_a(-\pi/2) i_a dt = V I_{aX}$$

روابط زیر در بخش ث بکار رفته است:

$$V_{ab} = -j \sqrt{3} V_c$$

$$V_{bc} = -j \sqrt{3} V_a$$

$$V_{ca} = -j \sqrt{3} V_b$$

مراجع

1. L. E. Bock and A. H. Moore, "Application of Capacitors in Arc Furnace Power Supply Systems," *Industrial Power Syst.*, 18-23. (September 1976).
2. D. E. Steeper and R. P. Stratford, "Reactive Compensation and Harmonic Suppression for Industrial Power Systems Using Thyristor Converters," *Trans. IEEE IA-12*, 232-257. (May/June 1976).
3. P. H. Ashmole, "Technical Summary of Reactive Compensation in Power Systems Industrial Applications," IEE Digest 1979/52, University of Birmingham, England. (11-12 September 1979).
4. L. Gyugyi, R. A. Otto, and T. H. Putman, "Principles and Application of Static Thyristor-Controlled Shunt Compensators," *Trans. IEEE, Power Appar. Syst.* 97, 1935-1945. (September/October 1978).

تئوری کنترل توان راکتیو در سیستم‌های انتقال الکتریکی در حالت ماندگار

T . J . E . MILLER

علائم و قراردادهای

توان راکتیو

مطابق قراردادی که بطور وسیع استفاده می‌شود،

۱- توان راکتیو در یک نیروگاه تولیدی

مثبت است اگر چنانچه تولید گردد.

منفی است اگر چنانچه جذب گردد.

۲- توان راکتیو در یک مصرف‌کننده

منفی است اگر تولید گردد.

مثبت است اگر جذب گردد.

۳- انتهای یک خط انتقال (طرف گیرنده) همواره به عنوان بار تلقی می‌گردد.

نسبت به واحد (پریونیت) و واحدهای معمولی

اغلب معادلات برحسب کمیت‌های فاز-نول توالی مثبت بیان می‌شوند. سیستم پریونیت بر ولتاژ نامی V_o و امپدانس ضربه‌ای Z_o استوار است. بنابراین اگر V_o ولتاژ فاز-نول باشد توان مبنا برابر V_o^2/Z_o است و اگر V_o ولتاژ فاز-فاز باشد، توان مبنا برابر V_o^2/Z_o است. در هر دو مورد توان مبنا، توان سه‌فاز می‌باشد.

گاهی از حروف کوچک برای ولتاژهای پریونیت، جریانهای پریونیت و غیره استفاده می‌گردد. وقتی اندوکتانس‌ها و کاپاسیتانس‌ها با حروف کوچک نشان داده می‌شوند به مفهوم مقادیر آنها برای یک مایل است. این مقادیر می‌توانند برحسب پریونیت یا واحدهای معمولی باشند.

خطوط متقارن و شعاعی

اصطلاح خط شعاعی برای توصیف یک خط انتقال منفردی بکار برده می‌شود که ولتاژ ابتدای آن (طرف فرستنده) توسط ماشینهای سنکرون واقع در آن کنترل می‌شود و ولتاژ انتهای خط (طرف گیرنده) کنترل نمی‌شود. خط متقارن از دو طرف به ماشینهای سنکرون متصل است و ولتاژ ابتدا و انتهای آن با هم برابر است.

Emf و ولتاژ

علامت E برای emf یا ولتاژ کنترل شده بکار برده می‌شود.

علامت V برای ولتاژ بطور عموم استفاده می‌شود.

فازورها با حروف درشت نشان داده می‌شوند، به عنوان مثال E

علائم پریم معرف کمیت‌های جبران شده یا مجازی می‌باشند مثلاً P'

فرض می‌شود که فرکانس ۶۰ Hz می‌باشد.

علائم

a	طول خط، mi
B	سوسپتانس موازی، S

کاپاسیتانس بر مایل، F/mi (مدار معادل فاز-نول توالی مثبت)	c
ولتاژ (کنترل شده)	E
جریان، A	I
ضریب جبران نقطه میانی	K_m
درجه (میزان) جبران‌کنندگی سری	K_{se}
درجه (میزان) جبران‌کنندگی موازی	K_{sh}
اندوکتانس بر مایل، H/mi (مدار معادل فاز - نول توالی مثبت)	ℓ
توان، W	P
بار طبیعی یا بار امپدانس ضربه‌ای (SIL) ، W	P_o
حداکثر توان قابل انتقال، W	P_{max}
توان راکتیو VAR	Q
ضریب جبران سری	s
ولتاژ	V
راکتانس، Ω	X
ادمیتانس، S	Y
امپدانس Z	Z
امپدانس مشخصه یا امپدانس موج ضربه‌ای، Ω	Z_o
طول موج، mi / رادیان	β
زاویه انتقال، رادیان یا درجه	δ
طول الکتریکی خط، رادیان	θ
ثابت انتشار	Γ

اندیس‌ها

انتهای خط (طرف گیرنده)	r
ابتدای خط (طرف فرستنده)	s
کاپاسیتیو (خازنی)	c

۶	اندوکتیو (القایی)
۷	جبران‌کننده
۵	طبیعی یا مشخصه

۲-۱ مقدمه

۲-۱-۱ تاریخچه

مسائل اقتصادی همواره مهندسین طراح را بر آن داشته است که تا سرحد امکان حداکثر توان الکتریکی را از یک خط انتقال معین انتقال دهند. البته امروزه قیود بیشتر از گذشته مطرح است. اولاً، وابستگی مراکز بار به تولید مستمر برق بحرانی تر شده است (با مشاهده حوادثی که در اثر خاموشی شمال شرق در ۱۹۶۵ و خاموشی شهر نیویورک در سال ۱۹۷۷ رخ داد^(۶)). این بدان معناست که ایمنی یا قابلیت اعتماد سیستم انتقال بایستی بطور پیوسته بهبود پیدا کند. روشهای جدید جبران به امکان این بهبود کمک کرده است. ثانیاً، توسعه گسترده‌ای در زمینه منابع دوردست هیدروالکتریک انجام گرفته است نظیر EL Chocoma - Cerros Colorados در آرژانتین که ۱۰۰۰ کیلومتر از Buenos Aires فاصله دارد و طرح James Bay در Quebec که ۱۰۰۰ کیلومتر از Montreal Quebec City فاصله دارد^(۱۶). در هر یک از این دو طرح ac، توان زیادی از مسیر طولانی انتقال داده می‌شوند (بیش از ۱۱۰۰۰ MW در طرح James Bay). توسعه طرح‌های جبران کمک نموده است که انتقال ac را هم به لحاظ تکنیکی و هم اقتصادی، حتی در زمانی که انتقال dc پیشرفت زیادی نموده است قابل رقابت نماید. سوم اینکه، مشکلاتی که در رابطه با حریم در نصب خطوط انتقال جدید مطرح است (موسوم به بحران کوریدور)^۱. فشار روزافزون در بهره‌برداری ماکزیمم از خطوط انتقال موجود و خطوط انتقال جدید، در ایجاد انگیزه برای توسعه و کاربرد سیستم جبران کمک نموده است. این فصل با بیان نیازمندیهای اساسی سیستم انتقال ac، یعنی پایداری و کنترل ولتاژ آغاز می‌شود. سپس با این فرض که جبران بطور یکنواخت و پخش شده در طول خط انجام می‌گیرد، اصول کار انواع اصلی جبران‌کننده در شیوه کلی مطالعه خواهد شد. آنگاه در بخش ۲-۴، ۲-۵ و ۲-۶ به ترتیب به جبران موازی متمرکز، جبران سری و جبران موازی دینامیک به تفصیل توجه خواهد شد. اثرات هر یک از انواع جبران بر روی کنترل ولتاژ، نیازمندیهای توان راکتیو و حد پایداری ماندگار، بررسی خواهد شد.

مسائل، کاربردها و مقاصد:		روشها یا تجهیزات موجود										وسایل جبران کننده مقاصد خاص							
		Improve steady-state stability	Increase transmission voltage	Increase No. of lines in parallel	Transformer tapchanging	Slow AVR control	Fast AVR control	Fast turbine valving	Rapid line-switching operations, reclosing of circuit-breakers	Braking resistors	Shunt reactor (switched/unswitched; linear/nonlinear)	Shunt capacitor	Series reactor	Series capacitor	Synchronous condenser	Polyphase saturated reactor*	Thyristor controlled reactor*	Thyristor switched capacitor (or fault current limiter)	Short-circuit limiting coupling
نیازمندی اساسی #۱	Improve steady-state stability	•	•																
	Improve dynamic stability																		
	Improve transient stability	•																	
	Limit rapid voltage decline																		
	Limit slow voltage decline																		
نیازمندی اساسی #۲	Limit rapid voltage increase																		
	Limit slow voltage increase																		
	Limit fast-wavefront overvoltages due to lightning switching, etc.																		
	Reactive power support at dc converter terminals																		
نیازمندیهای دیگر	Increase short-circuit level																		
	Decrease short-circuit level																		

* در صورت لزوم با خازنهای موازی همراه می گردد.

مسائل، کاربردها و مقاصد:

۲-۱-۲ نیازمندیهای اساسی در انتقال توان ac

انتقال مقدار عظیم توان الکتریکی ac وقتی امکان پذیر است که نیازمندیهای اساسی زیربرآورده گردد:

۱- ماشین های سنکرون بزرگ بایستی در وضعیت سنکرون باقی بمانند.

ماشینهای سنکرون بزرگ در یک سیستم انتقال عبارتند از ژنراتورها و کندانسورهای سنکرون که تمامی آنها فقط وقتی بطور مفید کار می کنند که با ماشین های دیگر سنکرون باشند.^۱ مفهوم اصلی در نگهداری سنکرونیزم پایداری است. پایداری عبارتست از تمایل سیستم قدرت الکتریکی (و به ویژه ماشین های سنکرون) به اینکه در مُد موردنظر^۲ بطور پایدار بکارش ادامه دهد.^۳ همچنین پایداری بیانگر توانایی ذاتی سیستم است که خود را از اغتشاشات فاحش^۴ (مثل اتصال کوتاه، رعد و برق و تغییر بار) و به علاوه از اغتشاشات پیش بینی شده در طراحی (نظیر سوئیچینگ) باز یابد.

یکی از محدودیت های بهره برداری از خطوط انتقال این است که در یک خط با طول معین با افزایش توان انتقالی، پایداری آن کاهش می یابد. اگر توان انتقالی به تدریج افزایش یابد (بدون بروز اغتشاش فاحش) در سطح معینی از توان انتقالی سیستم ناگهان ناپایدار می شود. ماشین های سنکرون در دو انتهای خط از سنکرون خارج می شوند. این سطح توان انتقالی به حد پایداری ماندگار^۵ موسوم است زیرا ماگزیمم توانی است که می تواند در حالت ماندگار (از نظر ثوری) انتقال یابد. این حد یک مقدار لایتغیر که با طراحی ماشین سنکرون و تجهیزات خط تثبیت شده باشد نیست و با عوامل مختلف بطور قابل ملاحظه تغییر می کند. مهمترین آنها تحریک ماشین سنکرون (و بنابراین ولتاژ خط)، تعداد و اتصال خطوط انتقال، تعداد و انواع ماشین های سنکرون متصل به شبکه (که اغلب در زمانهای مختلف روز تغییر می کند)، پاترن^۶ (الگوی) پخش توان واقعی و راکتیو سیستم و موضوع مورد علاقه مان در اینجا اتصال و مشخصه تجهیزات جبران کننده خواهد بود.

۱- موتورهای سنکرون معمولاً (البته نه همواره) از کوچکترین ژنراتورها هم کوچکترند. معمولاً در مطالعه و طراحی سیستم انتقال بزرگ بصورت منفرد در نظر گرفته نمی شوند، گرچه می توانند در اثر از دست دادن سنکرونیزم موجب اغتشاشات محلی متعدد گردند. گاهی ماشینهای سنکرون اصلی یک نیروگاه یا یک ناحیه را بصورت گروه در نظر گرفته و آنها را بعنوان یک ماشین تلقی می کنند تا اینکه تحلیل یک سیستم کلی را آسان نمایند. هر گروهی به گروه معادل دینامیکی موسوم است و بایستی با تمام گروههای متصل به آن در حالت سنکرون باقی بمانند.

2- Intended Mode

۳- مد مورد نظر یا مد طبیعی، مدی است که در آن توانهای اکتیو، راکتیو مقادیر مورد نظر را دارا هستند در حالیکه ولتاژها، جریانه ها را رویه مکانیکی بین روتورهای ماشینهای سنکرون ثابت می باشند.

4- Large Disturbances

5- Steady State / Stability Limit

6- Pattern

در عمل، سیستم انتقال نمی‌تواند خیلی نزدیک به حد پایداری ماندگارش کار کند بلکه بایستی برای اغتشاشات (نظیر تغییر بار، اتصالی و عمل کلیدزنی) مارجینی^۱ (فاصله اطمینانی) را در توان انتقالی در نظر گرفت. در معین کردن یک مارجین مناسب مفهوم پایداری دینامیکی و گذرا مفید خواهد بود. یک سیستم انتقال از نظر دینامیکی پایدار است وقتی که عملکرد نرمال خود را پس از یک اغتشاش کوچک^۲ مشخص، بازیابد. درجه پایداری دینامیکی را می‌توان بر حسب میزان میرایی مولفه‌های ولتاژ و جریان و زاویه بار ماشین‌های سنکرون بیان کرد. میزان میرایی نکته اصلی در مطالعه پایداری دینامیکی است. از این رو، محاسبات جدید معمولاً بر تئوری اغتشاشات کوچک و تجزیه تحلیل مقادیر خاص^۳ استوار است.

سومین مطلب در مورد پایداری این است که آیا سیستم پس از یک اغتشاش فاحش، نظیر اتصال کوتاه شدید که منجر به قطع مدار بزرگ یا از کار افتادن جزء مهم شبکه نظیر ژنراتور، خط هوایی یا ترانسفورماتور می‌گردد، عملکرد نرمال خود را باز خواهد یافت. این پایداری به پایداری گذرا موسوم است. یک سیستم دارای پایداری گذراست وقتی که پس از یک اغتشاش فاحش عملکرد نرمال خودش را باز یابد. اینکه آیا بازگشت به کار طبیعی و نرمال ممکن است یا خیر، از میان عوامل مختلف به سطح انتقال توان قبل از اتصال کوتاه بستگی دارد. حد پایداری گذرا بالاترین سطح توان انتقالی است که سیستم پس از یک اغتشاش معین پایداری گذرا خواهد داشت^۴.

۲- ولتاژ بایستی نزدیک مقادیر نامی آنها نگاهداشته شود.

دومین نیازمندی اساسی شبکه انتقال ac نگهداری سطوح صحیح ولتاژ است. سیستم‌های قدرت جدید ولتاژهای غیرعادی را حتی برای مدت زمان کوتاه هم تحمل نمی‌کنند. کاهش ولتاژ که عموماً در اثر بار زیاد و یا قطع تولید ایجاد می‌شود منجر به رفتار و عملکرد نامطلوب بار مخصوصاً موتورهای القایی می‌شود. در سیستم‌های تحت بار زیاد، کاهش ولتاژ^۵ ممکن است نشانه این باشد که بار به حد پایداری ماندگار نزدیک می‌شود. کاهش ولتاژ ناگهانی ممکن است در اثر اتصال دادن بارهای خیلی بزرگ ایجاد گردد.

اضافه ولتاژ^۶ به دلیل ریسک جرقه‌زدن و شکست عایق، یک شرایط خطرناکی است. اشباع ترانسفورماتورهای که در معرض اضافه ولتاژ قرار دارند منجر به تولید جریان زیاد محتوی

1- Margin

2- Minor Disturbances

3- Eigenanalysis

۴- برای مطالعه بیشتر پایداری به ماخذ ۷ الی ۹ مراجعه شود.

5- Under Voltage

6- Overvoltage

هارمونیک می‌شود که در صورت وجود کاپاسیتانس کافی ریسک فرورزونانس^۱ و رزونانس^۲ هارمونیک وجود دارد. اضافه ولتاژ منشاء متعددی دارد. کاهش بار در قسمت‌های معینی از سیکل بار روزانه سبب افزایش ولتاژ تدریجی می‌شود. اگر این اضافه ولتاژ کنترل نگردد سبب کاهش عمر مفید عایق‌ها می‌گردد، حتی اگر چنانچه به سطح شکست عایق نرسیده باشد. اضافه ولتاژ ناگهانی از قطع بار یا تجهیزات دیگر سیستم ناشی می‌شود، در حالی که اضافه ولتاژ سریع و تند از عمل کلیدزنی اتصال کوتاه و رعد و برق ناشی می‌شود. در سیستم انتقال طولانی اگر چنانچه از جبران‌کننده استفاده نشده باشد، اثر فرانتی^۳ (اضافه ولتاژ در بار کم) مقدار توان انتقالی و فاصله انتقال را محدود می‌کند.

۲-۱-۳ فاکتورهای مهندسی که در پایداری و کنترل ولتاژ موثرند

طراحی هر یک از اجزاء سیستم انتقال حداقل با یکی از نیازمندیهای بحث شده بالا ارتباط دارد. مطالعه کلی کنترل ولتاژ و پایداری از عهده این فصل که مربوط به بیان روشهای جبران است، خارج می‌باشد. از این نقطه نظر یک تصویر کلی از پایداری و کنترل ولتاژ به طور خلاصه در جداول ۱ و ۲ آمده است (همچنین به منابع انتهای فصل مراجعه شود).

در جدول ۱ مسائل اصلی یا کاربردهای وسایل جبران‌کننده بر حسب نیازمندیهای اساسی انتقال که قبلاً بحث شد، به دو گروه تقسیم شده است و ملاحظه می‌شود که اغلب جبران‌کننده‌هایی که برای مقاصد خاص هستند نقش‌های متعددی دارند. و این سبب می‌شود که موضوع وسایل جبران‌کننده پیچیده و در نتیجه مطالب مربوط به آن گسترده باشد. در این فصل بر تئوری اینکه با بکار بردن جبران‌کننده‌های خازن سری، خازنهای موازی، راکتورهای موازی، راکتورهای چندفاز قابل اشباع^۴ و جبران‌کننده‌های تایریستور کنترل^۵، چه نتایجی حاصل می‌شود تاکید می‌گردد. در بخش بعدی با در نظر گرفتن خط جبران نشده نیازمندیهای اساسی جبران مشخص می‌گردد.

۲-۲ خطوط انتقال جبران نشده

۲-۲-۱ پارامترهای الکتریکی

یک خط انتقال با ۴ پارامتر پخش شده مشخص می‌گردد: مقاومت سری ۲ و اندوکتانس سری ۱ و

1- Ferroresonance

2- Harmonic Resonance

3- Ferranti Effect

4- Saturated Reactors

5- Thyristor - Controlled Compensators

کنداكتانس موازی g و کاپاسیتانس c ، حروف کوچک نشان دهنده مقادیر بر مایل هستند. تمامی ۴ پارامتر توابعی از طرح خط یعنی اندازه هادی، نوع، فاصله هادیها، ارتفاع آنها از زمین، فرکانس و درجه حرارت هستند. همچنین مقادیر آنها بر حسب تعداد خطوط موازی نزدیک به هم تغییر می کنند و برای جریانهای توالی مثبت و منفی مقادیر متفاوتی به دست می آید. مقادیر نمونه از پارامترها در جدول ۳ آمده است.

در مشخصه رفتار خط اندوکتانس سری و کاپاسیتانس موازی غلبه دارند. در این رفتار مقاومت سری خط آنچنان تاثیری ندارد و در مشخص کردن تلفات اهمیت پیدا می کند. در این فصل در اکثر موارد از آن صرف نظر شده است. مقادیر نامی توالی مثبت را در نظر گرفته و از کنداكتانس موازی هم صرف نظر شده است. به استثناء مواردی که ذکر گردیده در بقیه موارد از شرایط متعادل و از مدار معادل توالی مثبت استفاده شده است.

جدول ۳

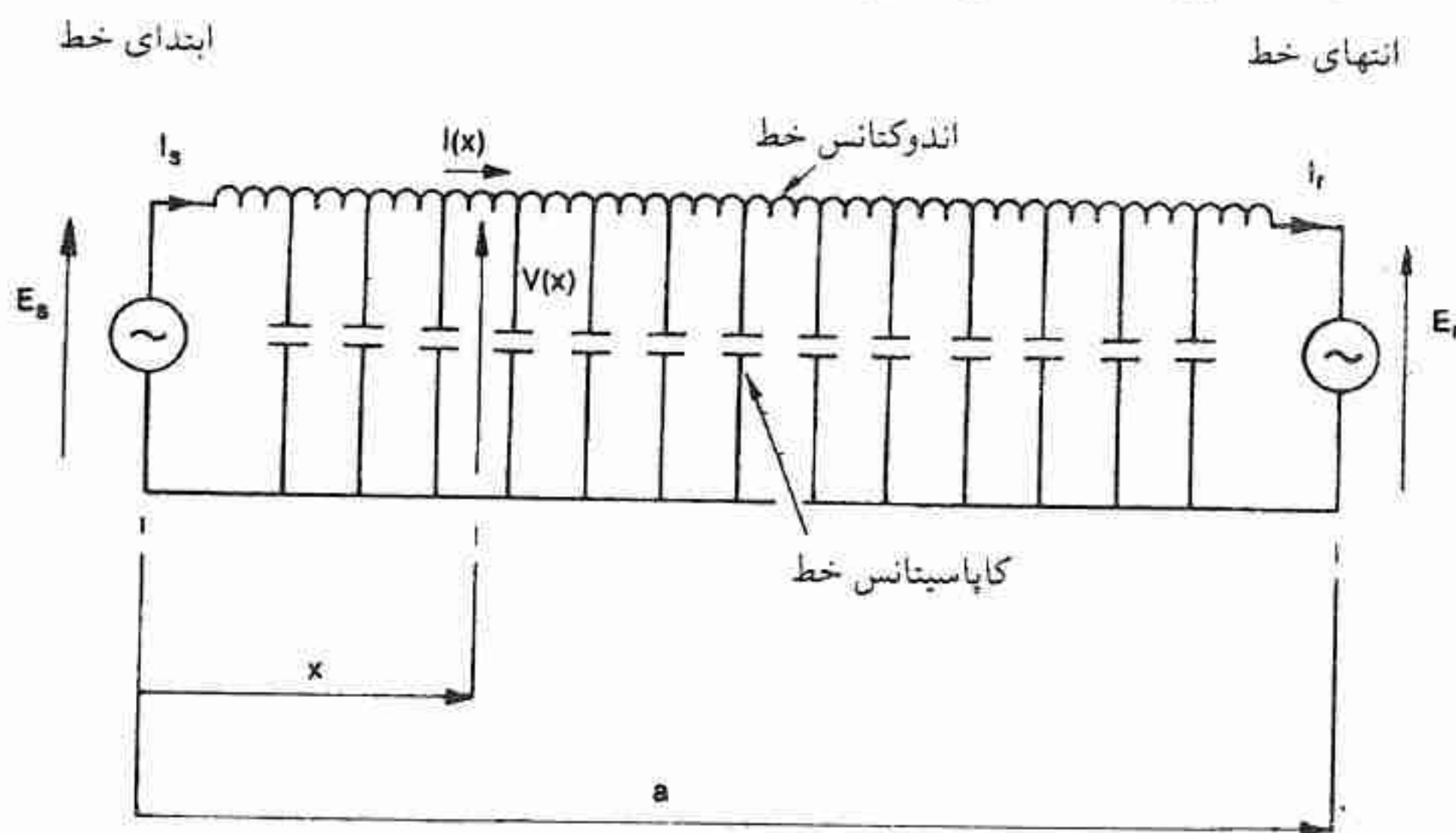
مقادیر نمونه از پارامترهای خطوط انتقال EHV - UHV^{b, a}

ولتاژ نامی (kV)										
345			500			765		1100		1500
ارایش هادیها										
مشخصات	Hor. Delta		Hor. Vert. Delta			Hor. Delta		Hor. Delta		Hor.
ωl (Ω/mi)	0.59	0.59	0.60	0.49	0.51	0.53	0.53	0.48	0.47	0.47
r (Ω/mi)	0.060	0.060	0.025	0.026	0.019	0.020	0.020	0.0079	0.0076	0.0072
ωc ($\mu\text{S}/\text{mi}$)	7.27	7.29	7.23	8.80	8.35	8.02	8.01	8.94	8.92	9.21
β ($\text{rad}/\text{mi} \times 10^{-3}$)	2.07	2.07	2.08	2.08	2.06	2.06	2.06	2.07	2.05	2.08
Z_0 (Ω) امپدانس ضربه‌ای	285	283	287	235	247	258	257	232	231	225
P_0 (MW) بار طبیعی	417	420	870	1060	1010	2270	2280	5220	5250	10000
MrA (MVA/mi) بارگیری	0.866	0.868	1.81	2.20	2.09	4.70	4.70	10.8	10.8	20.7
جریان خط در SIL (A)	700	700	1000	1230	1170	1710	1720	2740	2750	3850

a. پاکسب اجازه از J. J. Laforset Electric Utility System Engineering Department چاپ شده است.

b. این جدول پارامترهای توالی مثبت خطوط انتقال را از ولتاژ ۳۴۵ تا ۱۵۰۰ کیلوولت و فرکانس ۶۰ Hz نشان می دهد.

شکل ۱ مدار معادل یک فاز خط انتقالی که ماشین‌های سنکرون مشابه در ابتدا و انتهای آن متصل شده است را نشان می‌دهد. به چنین خطی خط متقارن^۱ گفته می‌شود.



شکل ۱ - نمایش خط انتقال طویل به کمک اجزاء متمرکز

۲-۲-۲ معادله اساسی خط انتقال

معادله اساسی که بر انتشار انرژی در طول خط انتقال حاکم است معادله امواج سیار می‌باشد.

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = \Gamma^2 V \quad \text{که در آن} \quad \Gamma^2 = (r + j\omega l)(g + j\omega c) \quad (1)$$

فرکانس ثابت فرض می‌شود و V فازور ولتاژ $\sqrt{2} ve^{j\omega t}$ در هر نقطه روی خط می‌باشد. فازور جریان I همچنین معادله را برقرار می‌کند. (برای آشنایی با نحوه بدست آوردن معادلات به مرجع ۱۰ مراجعه شود). چون x فاصله روی خط، اندازه‌گیری شده از هر نقطه مرجع مناسب است، معادله تغییرات ولتاژ V و جریان I را در طول خط نشان می‌دهد و بیان می‌کند که هر دو دارای تغییرات سینوسی و یا موجی هستند.

حل معادله موج خط انتقال - امواج ساکن

اگر فرض شود که خط بدون تلفات است معادله کلی ۱ (برای ولتاژ و جریان) بصورت زیر حل

خواهد شد:

$$V(x) = V_r \cos \beta(a - x) + j Z_0 I_r \sin \beta(a - x) \quad (2 \text{ الف})$$

$$I(x) = j \left[\frac{V_r}{Z_0} \right] \sin \beta(a - x) + I_r \cos \beta(a - x) \quad (2 \text{ ب})$$

که در آن β از ثابت انتشار Γ ، با قرار دادن $r = g = 0$ ، بدست می‌آید و بنابراین $\Gamma = j\beta$ و

$$\beta = \omega \sqrt{LC} \quad (3)$$

شکل معادله ۲ نشان می‌دهد که تغییرات ولتاژ V و جریان I در طول خط هر کدام دارای دو جمله یا مولفه هستند. گفته می‌شود که V و I تشکیل امواج ساکن^۱ می‌دهند. و این به خاطر آن است که قسمت حقیقی و موهومی هر دو در طول خط دارای تغییرات سینوسی هستند. کمیت $\sqrt{LC} / 1$ سرعت انتشار اثرات الکترو مغناطیسی در طول خط است. برای خطوط هوایی ولتاژ بالا مقدارش کمتر از سرعت نور یعنی $3 \times 10^8 \text{ m/sec} = 1/86 \times 10^5 \text{ mi/sec}$ ، u ، است. چون $\omega = 2\pi f$ معادله ۳ بصورت زیر نوشته می‌شود

$$\beta = \frac{2\pi f}{u} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (4)$$

که در آن λ طول موج است. β تعداد موج است، یعنی تعداد موج کامل در واحد طول خط است. در 60 Hz $\lambda = 3100 \text{ mi}$ و β می‌تواند به عنوان یک طول موج در 3100 mi بیان شود یعنی 360° درجه بر 3100 mi یا $0.166^\circ / \text{mi}$ درجه بر mi ، یا $10^{-3} \times 2/0.27 \text{ rad/mi}$ کمیت $\beta\alpha$ طول الکتریکی خط است که بر حسب رادیان یا طول موج بیان می‌شود و با θ نشان داده می‌شود.

۲-۲-۳ بار طبیعی^۲ یا امپدانس موج ضربه‌ای^۳

ثابت Z_0 در معادله ۲ عبارتند از امپدانس موج ضربه‌ای (گاهی امپدانس مشخصه گفته می‌شود):

$$Z_0 = \sqrt{L/C} \quad (5)$$

مقدار آن به طرح خط (مراجعه شود به بخش ۲-۲-۱ و جدول ۳) بستگی دارد. برای خطوط هوایی ولتاژ بالا مقدار توالی مثبت آن در حدود $200 - 400 \Omega$ قرار دارد.

اگر از تلفات صرف نظر شود خط کاملاً با طولش و با پارامترهای Z_0 و β مشخص می‌شود. چون این مقادیر تقریباً برای تمام خطوط قابل مقایسه است، رفتار تمام خطوط اساساً یکسان است و تفاوت تنها بر حسب طول، ولتاژ و سطح توان انتقالی ظاهر می‌شود. امپدانس موج ضربه‌ای عبارت

است از امپدانس ظاهری یک خط بی نهایت طویل، یعنی، برابر نسبت ولتاژ به جریان در هر نقطه از طول خط خواهد بود. یک خط با طول معینی که از یک طرف به امپدانس Z_0 متصل شده است از نظر الکتریکی با یک خط بی نهایت متمایز نمی باشد، طوریکه اگر $V_r/I_r = Z_0$ باشد، آنگاه از معادله ۲ امپدانس ظاهری در هر نقطه خط برابر است با

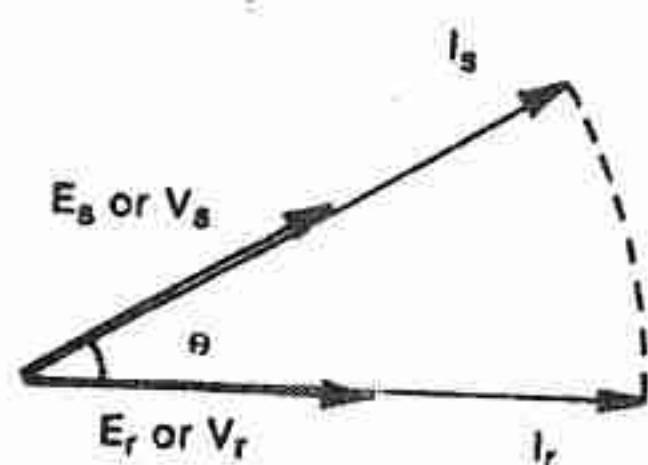
$$Z(x) = \frac{V(x)}{I(x)} = \frac{Z_0 I_r [\cos \beta(a-x) + j \sin \beta(a-x)]}{I_r [\cos \beta(a-x) + j \sin \beta(a-x)]} = Z_0 \quad (۶)$$

که مستقل از x خواهد بود و از آن مهمتر

$$V(x) = V_r [\cos \beta(a-x) + j \sin \beta(a-x)] = V_r e^{j\beta(a-x)} \quad (۷ \text{ الف})$$

$$I(x) = I_r [\cos \beta(a-x) + j \sin \beta(a-x)] = I_r e^{j\beta(a-x)} \quad (۷ \text{ ب})$$

یعنی V و I هر دو در طول خط دارای دامنه ثابتی هستند. گفته می شود که خط دارای پروفایل ولتاژ مسطح است^۱، در حالی که V و I در طول خط با هم همفاز هستند هر دو از نظر فازی چرخش دارند. زاویه فاز بین مقادیر در ابتدا و انتهای خط در معادله V تلویحا بیان شده است، $\theta = \beta a$ است. برای خط به طول ۲۰۰ مایل در فرکانس ۶۰ Hz زاویه 0.405 رادیان یا 23.2 درجه است. روابط فازوری در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲ - دیاگرام فازور خط با بار طبیعی.

در این شرایط گفته می شود که خط بارش، بار طبیعی است. بار طبیعی (یا بار امپدانس ضربه ای SIL) برابر است با

$$P_0 = \frac{V_0^2}{Z_0} \quad (۸)$$

که V_0 ولتاژ نامی خط است. اگر V_0 ولتاژ خط به زمین باشد معادله ۸ مقدار توان امپدانس ضربه ای هر فاز را بدست می دهد، اگر V_0 ولتاژ خط به خط باشد P_0 مقدار توان سه فاز خواهد بود. بار طبیعی یک کمیت مرجع مهمی است که به طور گسترده از آن استفاده می کنیم.

یکی از امتیازات اینکه خط در بار طبیعی کار کند این است که پروفایل ولتاژ مسطح بوده و عایق در تمام نقاط بطور یکنواخت تحت فشار خواهد بود. بار طبیعی یک خط جبران نشده با مجذور

ولتاژ افزایش می‌یابد (معادله ۸) و این توضیح می‌دهد که چرا وقتی سطح توان انتقالی افزایش می‌یابد ولتاژ انتقال را هم افزایش می‌دهیم. جدول ۳ بار طبیعی برای تعدادی از ولتاژ خطوط را نشان می‌دهد.

امپدانس ضربه‌ای Z_0 یک عدد واقعی است. بنابراین در بار طبیعی ضریب توان یعنی کسینوس زاویه بین V و I در تمام نقاط خط منجمله ابتدا و انتهای خط برابر یک است. این موضوع با توجه به معادله ۶ روشن است. مفهوم آن این است که در بار طبیعی لازم نیست که توان راکتیو در ابتدا و انتهای خط جذب یا تزریق گردد. توان راکتیوی که توسط کاپاسیتانس موازی خط تولید می‌شود دقیقاً توسط راکتانس سری خط جذب می‌گردد. این شرایط مهم را بیشتر به شرح زیر توضیح می‌دهیم. در هر جزء یا المان کوچک خط توان راکتیو تولید شده توسط کاپاسیتانس خط در هر واحد طول برابر است با $V^2 b = V^2 \omega c$ ، در حالی که توان راکتیو جذب شده توسط اندوکتانس خط در واحد طول برابر است با $I^2 \omega l$ برای اینکه در این المان تعادل توان راکتیو برقرار باشد لازم است

$$V^2 \omega c = I^2 \omega l$$

$$\frac{V}{I} = \sqrt{\frac{l}{c}} = Z_0 \quad (9)$$

این رابطه برای تمام نقاط منجمله ابتدا و انتهای خط بایستی صادق باشد. بنابراین در بار طبیعی با مقدار $P_0 = V^2 / Z_0$ تعادل توان راکتیو برقرار است. این تنها مقدار توان انتقالی است که پروفایل ولتاژ مسطح و ضریب توان واحد را در ابتدا و انتهای خط ایجاد می‌کند. وقتی که P_0 توان طبیعی خط است، توان راکتیو طبیعی خط صفر است.

۲-۲-۴ خط مدار باز جبران نشده

پروفایل ولتاژ و جریان - یک خط بدون تلفات که انتهایش باز و از ابتدا توسط ژنراتور انرژی‌دار می‌شود به وسیله معادلات ۲ الف و ۲ ب با $I_r = 0$ تعریف می‌شود بنابراین

$$V(x) = V_r \cos \beta(a - x) \quad (10 \text{ الف})$$

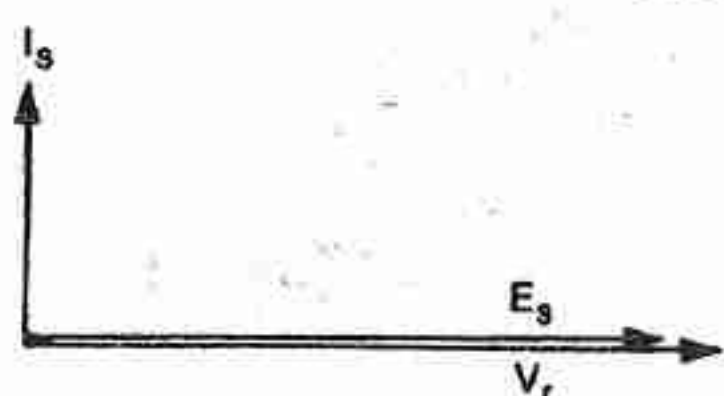
$$I(x) = j \left[\frac{V_r}{Z_0} \right] \sin \beta(a - x) \quad (10 \text{ ب})$$

ولتاژ و جریان در ابتدای خط از این معادلات با $x = 0$ بدست می‌آید

$$E_s = V_r \cos \theta \quad (11 \text{ الف})$$

$$I_s = j \left[\frac{V_r}{Z_o} \right] \sin \theta = j \left[\frac{E_s}{Z_o} \right] \operatorname{tg} \theta \quad (۱۱ \text{ ب})$$

E_s و V_r همفاز هستند و با این حقیقت که توان انتقالی صفر است سازگار می باشد (به بخش ۲-۲-۶ مراجعه شود). دیاگرام فازور در شکل ۳ نشان داده شده است.



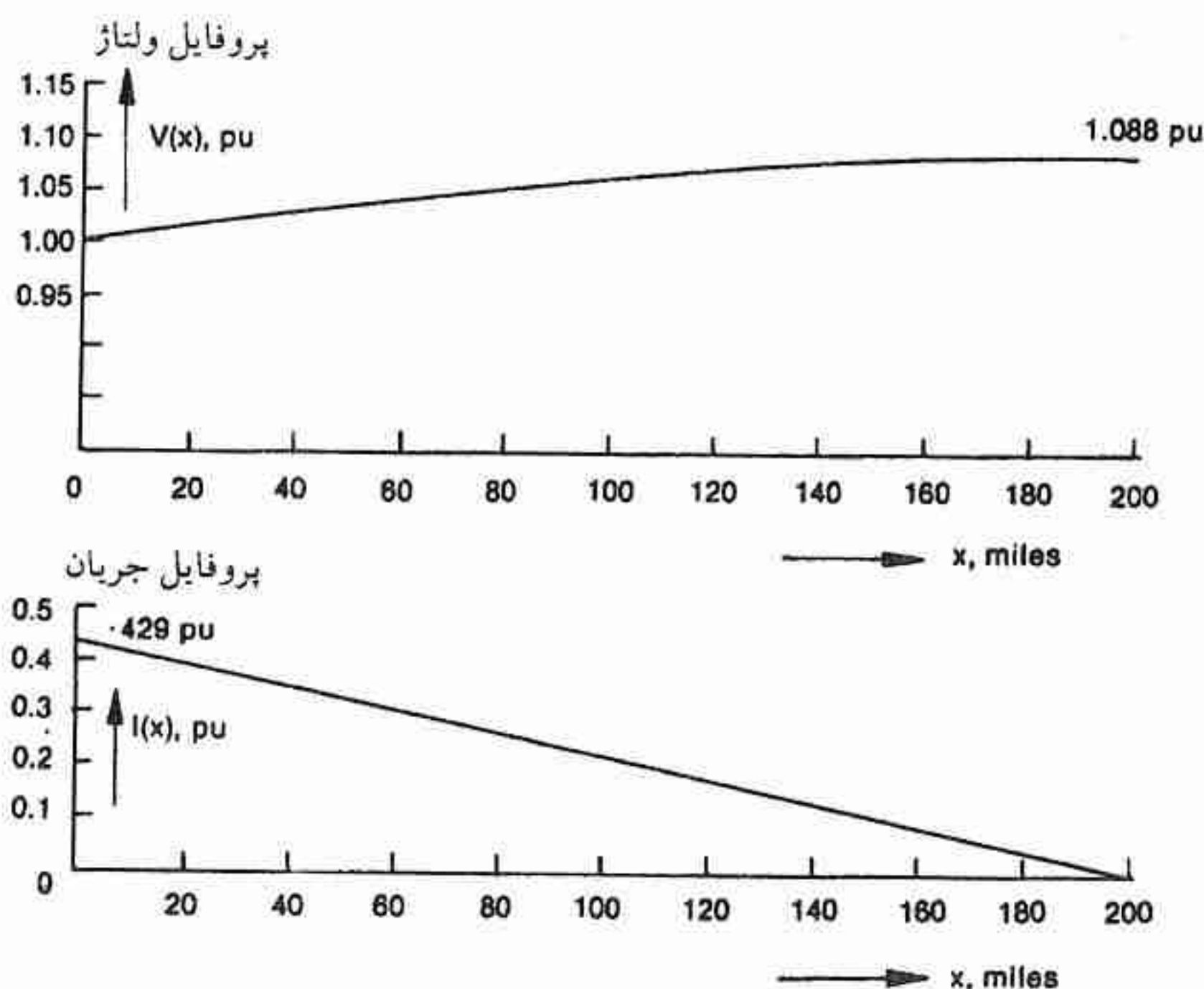
شکل ۳ - دیاگرام فازور خط ۲۰۰ مایل که انتهای خط باز است

پروفایل ولتاژ خط که به وسیله معادله ۱۰ الف بیان شده است را می توان بر حسب E_s به شکل بهتری نوشت:

$$V(x) = E_s \frac{\cos \beta(a-x)}{\cos \theta} \quad (۱۲ \text{ الف})$$

به طریق مشابه پروفایل جریان از رابطه زیر بدست می آید

$$I(x) = j \frac{E_s}{Z_o} \frac{\sin \beta(a-x)}{\cos \theta} \quad (۱۲ \text{ ب})$$



شکل ۴ - پروفایل ولتاژ و جریان برای خط ۲۰۰ مایل که انتهای خط باز است

این پروفایل ولتاژ و جریان برای خط ۲۰۰ mi و فرکانس ۶۰ Hz و $\theta = 0.405 \text{ rad}$ در شکل ۴ نشان داده شده است. اگر $E_s = 1 \text{ pu}$ باشد ولتاژ در انتهای خط برابر است با $V_r = 1/0.88 \text{ pu}$ ، یعنی ۸/۸٪ افزایش ولتاژ وجود دارد. این افزایش ولتاژ به اثر فرانتی موسوم است.

یک افزایش ۸/۸٪ ولتاژ مسائل خطرناکی را برای عایق و یا وسایل تنظیم ولتاژ پیش نخواهد آورد. اما در خط ۴۰۰ مایل مدار باز ولتاژ در انتهای خط برابر $1/0.579 \text{ pu}$ است که اگر چنانچه خطرناک نباشد غیرقابل قبول است، و در خط ۷۷۵ مایل ($\frac{1}{4}$ طول موج) افزایش ولتاژ بی‌نهایت خواهد بود و بهره‌برداری از این خط بدون وسایل جبران‌کننده عملاً غیرممکن است.

در عمل افزایش ولتاژ مدار باز بزرگتر از مقداریست که از معادله ۱۱ الف که در آن ولتاژ در ابتدای خط ثابت فرض شده بدست می‌آید. با بازشدن ناگهانی انتهای خط ولتاژ در ابتدای خط بلافاصله به مقدار ولتاژ مدار باز ژنراتور ابتدای خط افزایش می‌یابد، یعنی ولتاژ ترمینال تقریباً به اندازه افت ولت در راکتانس اتصال کوتاه که به واسطه عبور جریان قبل از مدار باز به وجود می‌آید افزایش پیدا می‌کند. این موضوع علیرغم اهمیت عملی آن بیشتر مورد بررسی قرار نخواهد گرفت ولی توجه می‌دهیم که بطور نمونه مطلوب این است که در بدترین شرایط یعنی - وقتی که تمام خطوط موازی در مدار هستند، کمترین ژنراتورها در مدار هستند، و تحریک ژنراتورها هنوز عمل کاهش ولتاژ را انجام نداده‌اند - بایستی افزایش ولتاژ در ابتدای خط تا ۲۵٪ و در انتهای خط تا ۴۰٪ محدود شود. مقدار I_s در شکل ۳ برابر 0.429 pu است. این بدان معناست که جریان بارگیری خط^۱ (جریان شارژ خط) که از ژنراتورهای ابتدای خط عبور می‌کند $42/9\%$ جریان مربوط به بار طبیعی خط است. خط متقارن در حالت بی‌باری - خط متقارن در حالت بی‌بار، مشابه خط مدار بازی است که از یک طرف انرژی‌دار می‌شود. خط متقارن بی‌بار خطی است که از دو سر به ژنراتور سنکرون مشابه متصل گردیده و انتقال توانی صورت نمی‌گیرد. فرض کنید که ولتاژهای ترمینال کنترل می‌شوند طوری که مقادیر آنها برابر شود یعنی $E_r = E_s$. از معادله ۲ الف و ۲ ب با $x = 0$ داریم

$$E_s = E_r \cos \theta + j Z_0 I_r \sin \theta \quad (13 \text{ الف})$$

$$I_s = j \left[\frac{E_r}{Z_0} \right] \sin \theta + I_r \cos \theta \quad (13 \text{ ب})$$

وقتی توان انتقال پیدا نمی‌کند شرایط الکتریکی در دو سر خط یکسان است بنابراین با تقارن^۲

1- Line charging current

۲- علامت منفی در معادله ۱۴ به این دلیل است که بر طبق قرارداد جریان مثبت از ابتدای خط (طرف فرستنده) به سمت انتهای خط (طرف گیرنده) می‌باشد.

$$I_s = -I_r \quad (14)$$

از معادله ۱۳ ب داریم

$$-I_r = j \frac{E_r}{Z_o} \frac{\sin \theta}{1 + \cos \theta} = j \frac{E_r}{Z_o} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \quad (15)$$

با جایگزینی این مقدار I_r در معادله ۱۳ الف داریم

$$E_s = E_r \quad (16)$$

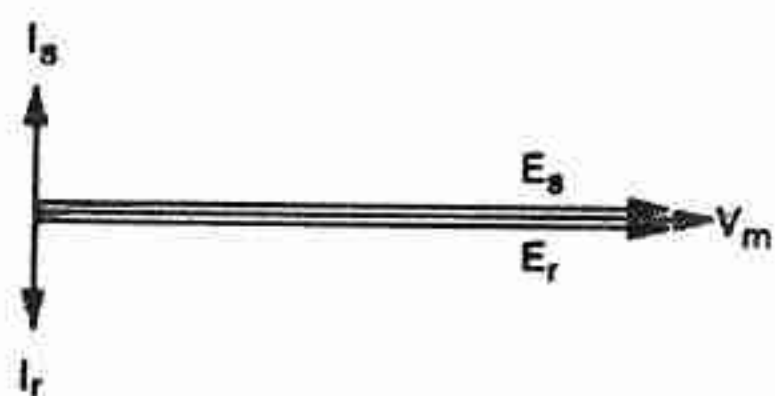
و بنابراین

$$I_s = j \frac{E_s}{Z_o} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \quad (17)$$

معادله ۱۶ نشان می‌دهد که E_r و E_s همفاز هستند که دوباره با این حقیقت که توان انتقالی وجود ندارد، سازگار است. جریان در هر دو سر خط جریانی بارگیری خط است. مقایسه معادلات ۱۵ و ۱۷ با معادله ۱۱ ب نشان می‌دهد که در این حالت خط با دو خط که از وسط نصف شده و پشت به پشت به هم متصل شده باشد، معادل است. نصف جریان شارژ خط از هر طرف تامین می‌شود. دیاگرام فازور در شکل ۵ برای $a = 200 \text{ mi}$ با $E_r = V_o = E_s = 1 \text{ pu}$ نشان داده شده است.

از روی تقارن، جریان در نقطه میانی صفر است. ولتاژ در نقطه میانی برابر است با ولتاژ مدار باز خطی که طولش نصف طول کل خط می‌باشد:

$$V_m = \frac{E_s}{\cos(\theta/2)} \quad (18)$$



شکل ۵ - دیاگرام فازور خط متقارن بطول ۲۰۰ مایل

پروفایل ولتاژ و جریان برای خط متقارن بدون بار را می‌توان از معادلات ۱۲ الف و ۱۲ ب با جایگزینی $a/2$ به جای a بدست آورد:

$$V(x) = E_s \frac{\cos \beta(a/2 - x)}{\cos(\theta/2)} \quad (19 \text{ الف})$$

و

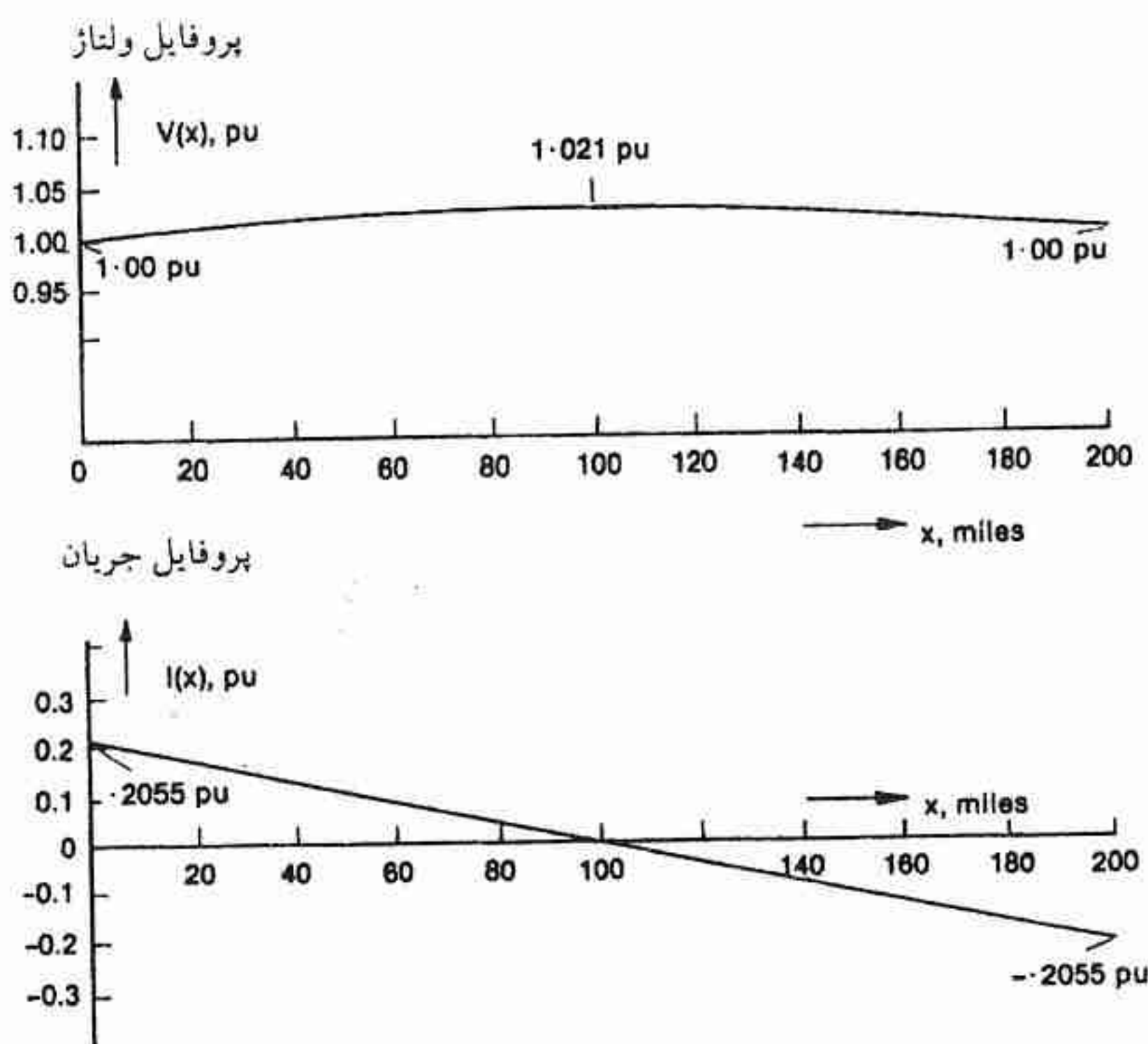
$$I(x) = j \frac{E_s}{Z_o} \frac{\sin \beta(a/2 - x)}{\cos(\theta/2)} \quad (19 \text{ ب})$$

که در آن $x \leq a/2$ است. برای نصف دیگر خط یعنی $a/2 \leq x \leq a$ داریم

$$V(x) = V(a - x) \quad (19 \text{ پ})$$

$$I(x) = -I(a - x) \quad (۱۹ \text{ ت})$$

پروفایل ولتاژ و جریان در شکل ۶ نشان داده شده است. جالب است که با شکل ۴ مقایسه شود. اگر $E_s \neq E_r$ پروفایل جریان و ولتاژ دیگر متقارن نخواهد بود و بالاترین مقدار ولتاژ در نقطه میانی نخواهد بود، بلکه بالاترین ولتاژ نزدیک به انتهای خطی است که دارای ولتاژ ترمینال بالاتری است. جریان ماشین‌های سنکرون نیز برابر نخواهد بود.



شکل ۶ - پروفایل ولتاژ و جریان برای خط متقارن بطول ۲۰۰ مایل

عملکرد زیر تحریک^۱ ژنراتورها به واسطه جریان بارگیری خط (جریان شارژ خط) - با $I_r = 0$ توان راکتیو شارژ در ابتدای خط از رابطه زیر بدست می‌آید

$$Q_s = \text{Im} (E_s I_s^*) \quad (۲۰)$$

جریان شارژ خط از معادله ۱۱ ب بدست می‌آید طوریکه اگر E_s برابر ولتاژ نامی خط باشد داریم

$$Q_s = -P_o \text{tg } \theta \quad (۲۱)$$

جریان شارژ از ولتاژ ترمینال خط به اندازه ۹۰ درجه پیش فاز است و از ژنراتورها عبور می‌کند. برای خط به طول ۲۰۰ mi $I_s = 0.429 \text{ Pu}$ و Q_s تقریباً ۴۳٪ بار طبیعی است که بر حسب MVA بیان شده است. در ولتاژ ۴۰۰ KV ژنراتورها ۱۷۲ MVA_r جذب خواهند کرد. توانایی ژنراتورهای سنکرون به لحاظ جذب توان راکتیو به دو دلیل محدود است: اول اینکه، عملکرد زیر تحریک ژنراتور منجر به افزایش حرارت در انتهای هسته استاتور می‌شود. دوم اینکه، کاهش جریان میدان منجر به کاهش e.m.f داخلی ژنراتور و در نتیجه باعث ناپایداری آن می‌شود (بعدا ملاحظه خواهد شد). حد جذب توان راکتیو بطور نمونه نمی‌تواند بیش از ۰/۴۵ پریونیت MVA نامی باشد. در مثال خط ۲۰۰ mi اگر مقدار نامی کل ژنراتورهای سنکرون برابر بار طبیعی باشد توان راکتیو شارژ برابر 0.43 Pu است که تقریباً در محدوده قرار دارد. اما اگر (برای مساله اقتصادی) نیمی از ژنراتورها از مدار قطع شود، و بار کوچک یا صفر باشد بقیه ژنراتورها بایستی ۰/۸۶ پریونیت MVA ظرفیتشان را جذب نمایند که مسلماً خارج از محدوده فوق است.

قطع نظر از کاربرد جبران‌کننده‌ها، گاهی با دو روش دیگر نیز می‌توان این مساله را بهبود داد. اول اینکه اگر خط از دو یا تعداد بیشتری مدار موازی درست شده باشد، یک مدار و یا بیشتر را می‌توان در شرایط بار کم یا مدار باز قطع کرد. البته این کار وقتی مجاز است که کاهش ایمنی ناشی از این کار در انتهای خط قابل قبول باشد. ثانیاً، اگر ژنراتور در جذب توان راکتیو از نقطه نظر پایداری محدود گردد (نه با گرم شدن هسته)، جذب توان راکتیو را می‌توان با استفاده از یک سیستم تحریک پاسخ سریع افزایش داد که در نتیجه قادر است هنگامیکه در شرایط ماندگار جریان تحریک کم است، مارجین پایداری^۱ را بازیابد.

عملکرد زیر تحریک ژنراتور در مقایسه با افزایش ولتاژ مدار باز، محدودیت بیشتری را برای حداکثر طول خط جبران نشده، ایجاد می‌کند. فرض کنید مقدار نامی کل ژنراتور برابر P_g و حداکثر توان راکتیوی که می‌تواند جذب نماید $q_u P_g$ باشد. این مقدار نبایستی کمتر از توان راکتیو بارگیری خط که از معادله ۲۱ بدست می‌آید، باشد. بنابراین ظرفیت ژنراتور بایستی رابطه زیر را برقرار نماید

$$P_g \geq \frac{P_o \operatorname{tg} \theta}{q_u} \quad (22)$$

به عنوان مثال اگر $q_u = 0.3$ و ظرفیت تولید در ابتدای خط برابر $P_g = P_o$ باشد حداکثر طول خط

جبران نشده برابر $144mi$ خواهد بود، و یا اینکه در خط به طول $200mi$ لازم است $P_g \geq 1/43 P_o$ باشد اگر چنانچه q_u در مقدار $0/3$ محدود شود. بطور کلی اختصاص دادن چنین ظرفیت تولید اضافی به منظور برآورده کردن نیازمندی که در بارگیری خط مطرح است عملی غیراقتصادی است. بهتر است که این نیازمندی را توسط جبران کننده برآورده کرد. راکتورهای موازی کندانسورهای سنکرون یا جبران کننده های استاتیک در انتهای خط و یا در نقطه ای در طول خط، به خط متصل می شوند. مقادیر نامی آنها و همچنین نقاط اتصال دادن آنها به شبکه بایستی بهینه و هماهنگ با سایر تجهیزات سیستم شود تا در تمامی شرایط کنترل ولتاژ رضایت بخش حاصل شده و همچنین مقدار توان راکتیو اضافی که ژنراتور باید جذب نماید، را کاهش دهد.

۲-۲-۵ خط جبران نشده در حالت بارداری:

اثر طول خط، توان بار و ضریب توان بر ولتاژ و توان راکتیو

خط شعاعی با ولتاژ ثابت در ابتدای خط - یک بار $P + jQ$ واقع در انتهای یک خط انتقال جریان زیر را می کشد.

$$I_r = \frac{P - jQ}{V_r} \quad (23)$$

از معادله ۲۲ الف با $x = 0$ ، اگر خط بدون تلفات فرض شود ولتاژ ابتدای خط و انتهای خط به وسیله رابطه زیر به هم ارتباط داده می شوند.

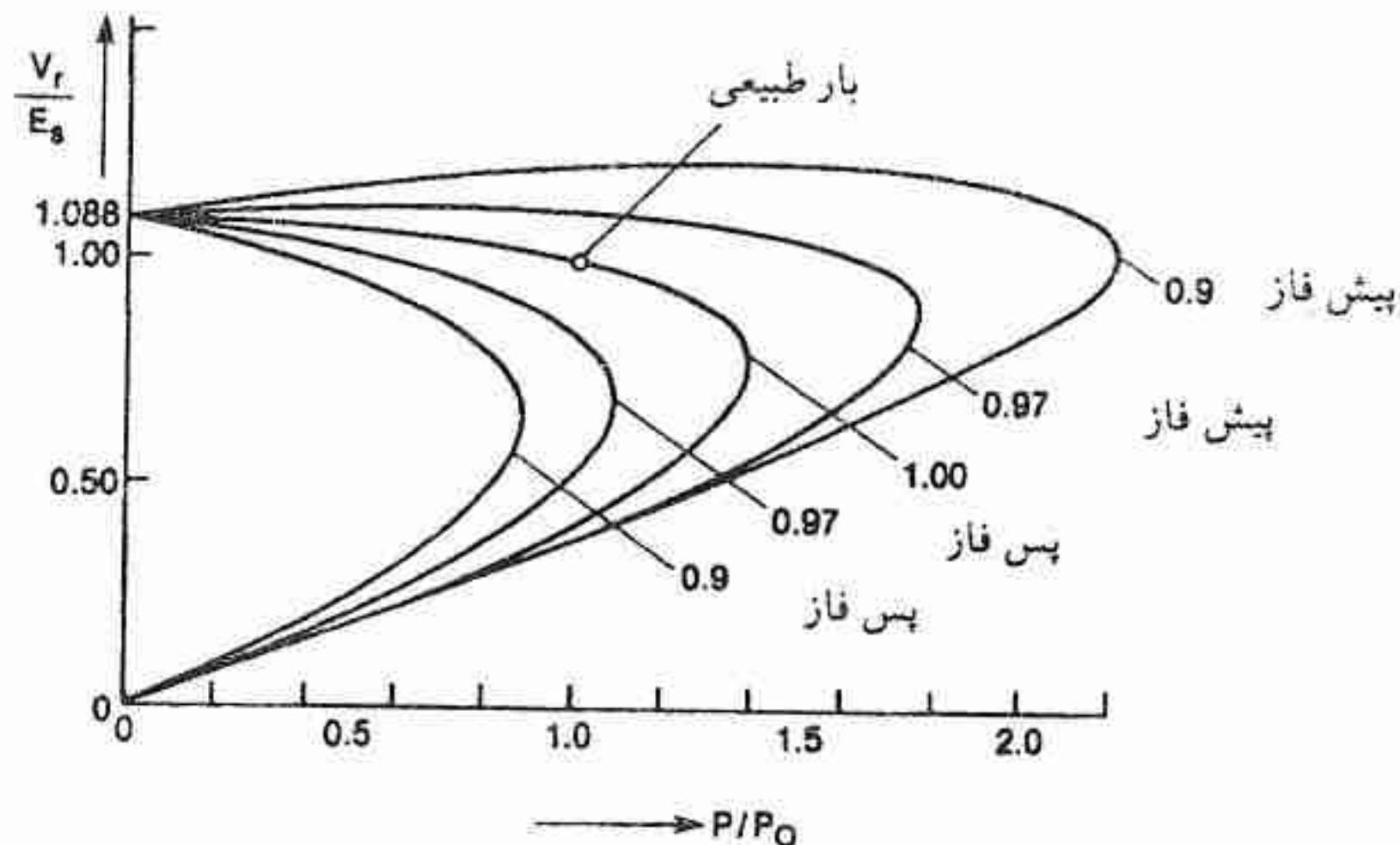
$$E_s = V_r \cos \theta + j Z_o \sin \theta \frac{P - jQ}{V_r} \quad (24)$$

اگر E_s ثابت باشد این معادله درجه دوم برای V_r قابل حل است. حل معادله نشان می دهد که چگونه V_r با بار و ضریب توان و طول خط تغییر می کند. یک جواب نمونه در شکل ۷ نشان داده شده است که در آن $a = 200mi$ است. مقدار V_r بر حسب توان بار نرمال شده P / P_o برای ۵ ضریب توان مختلف با $E_s = V_o = 1 Pu$ رسم شده است.

چندین خاصیت مهم انتقال ac از شکل ۷ به وضوح استنباط می شود. برای هر ضریب توان بار یک حداکثر توان انتقالی وجود دارد (به بخش ۲-۵ مراجعه شود). برای هر مقدار P کمتر از ماگزیمم دو جواب برای V_r وجود دارد (یعنی دو ریشه معادله ۲۴). عملکرد نرمال سیستم قدرت همیشه در مقدار بالایی ولتاژ است که در محدوده حول $1 Pu$ قرار دارد.

وقتی $P=Q=0$ معادله ۲۴ به معادله ۱۱ الف که مربوط به شرایط مدار بار است تقلیل می یابد.

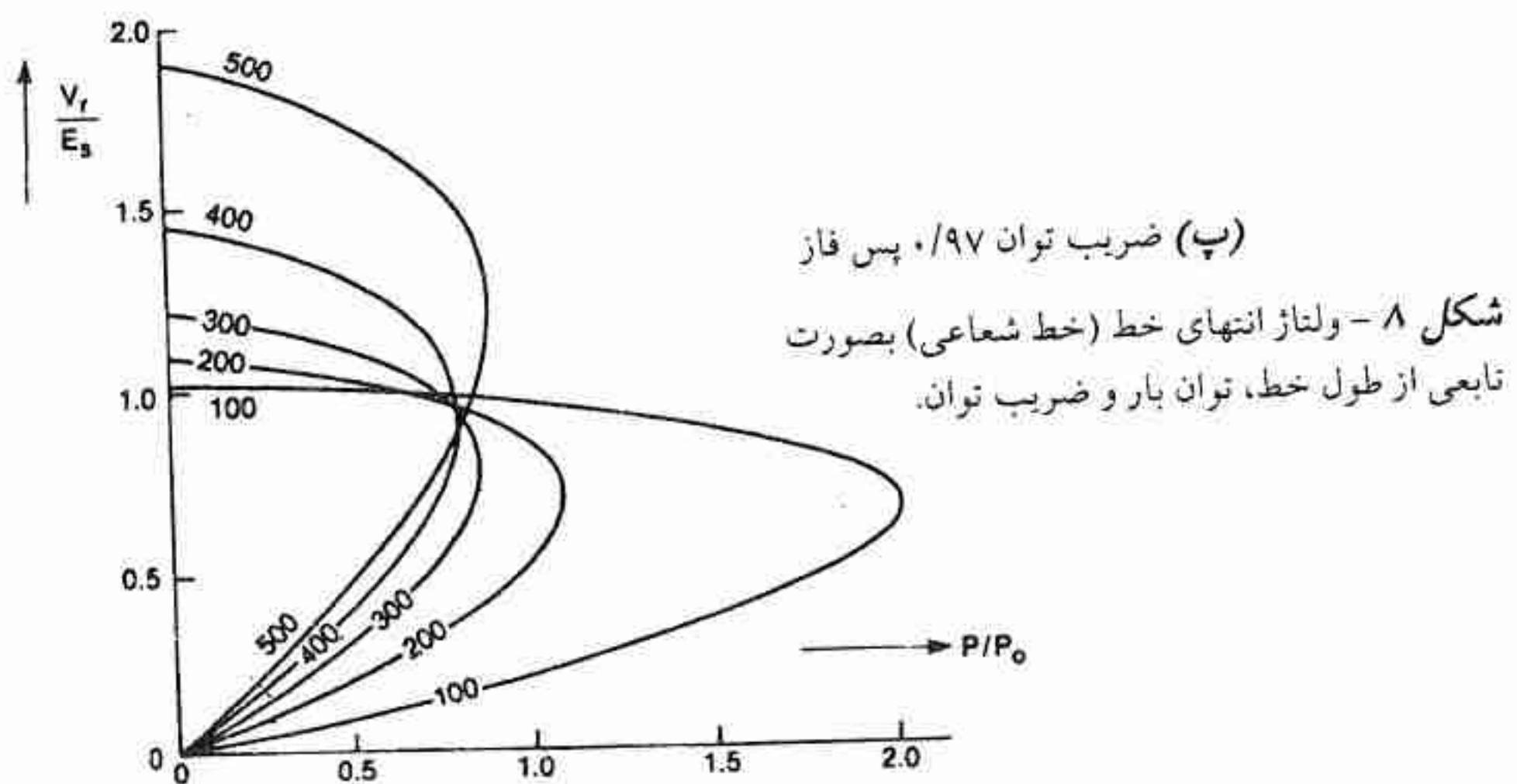
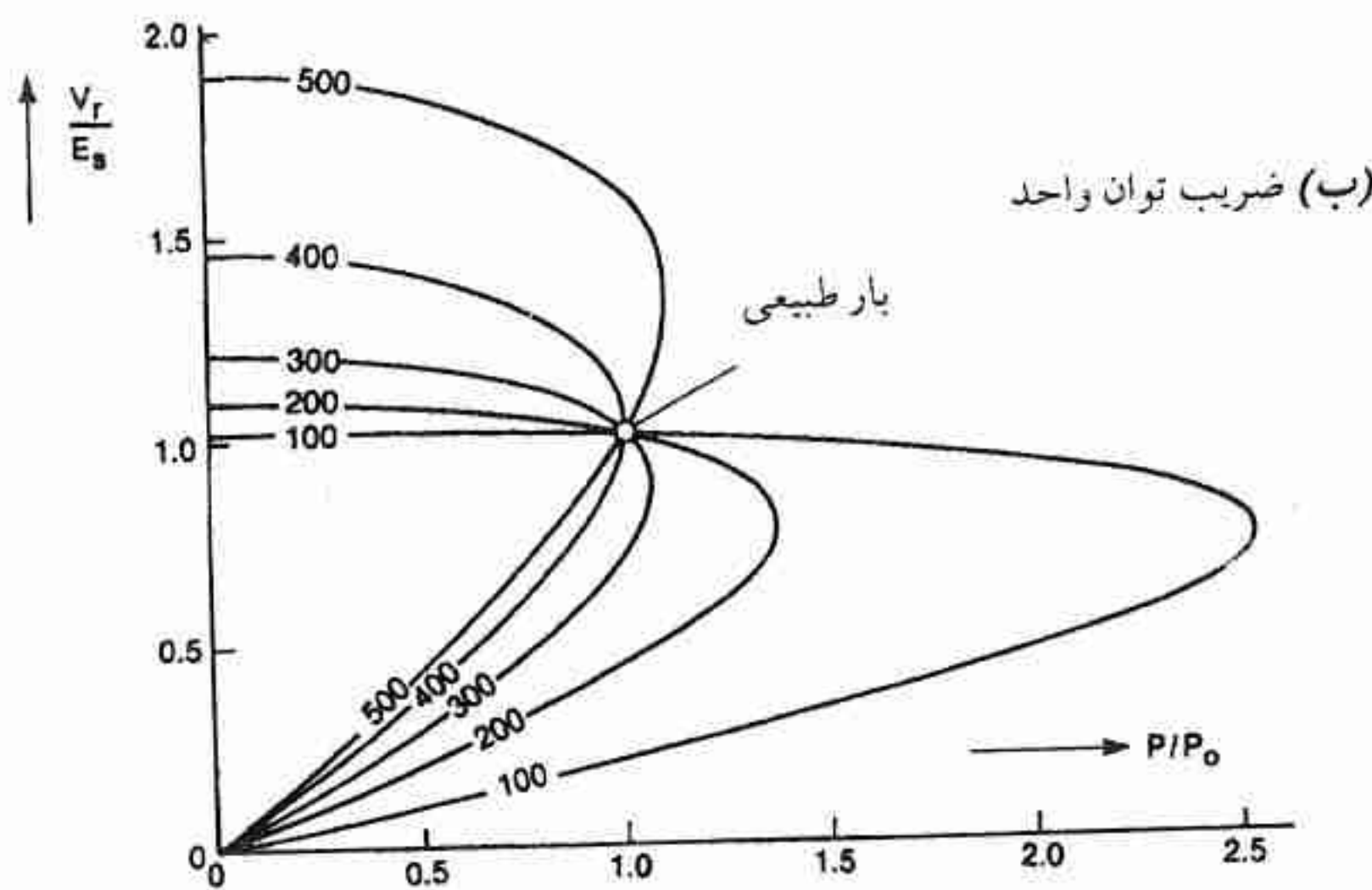
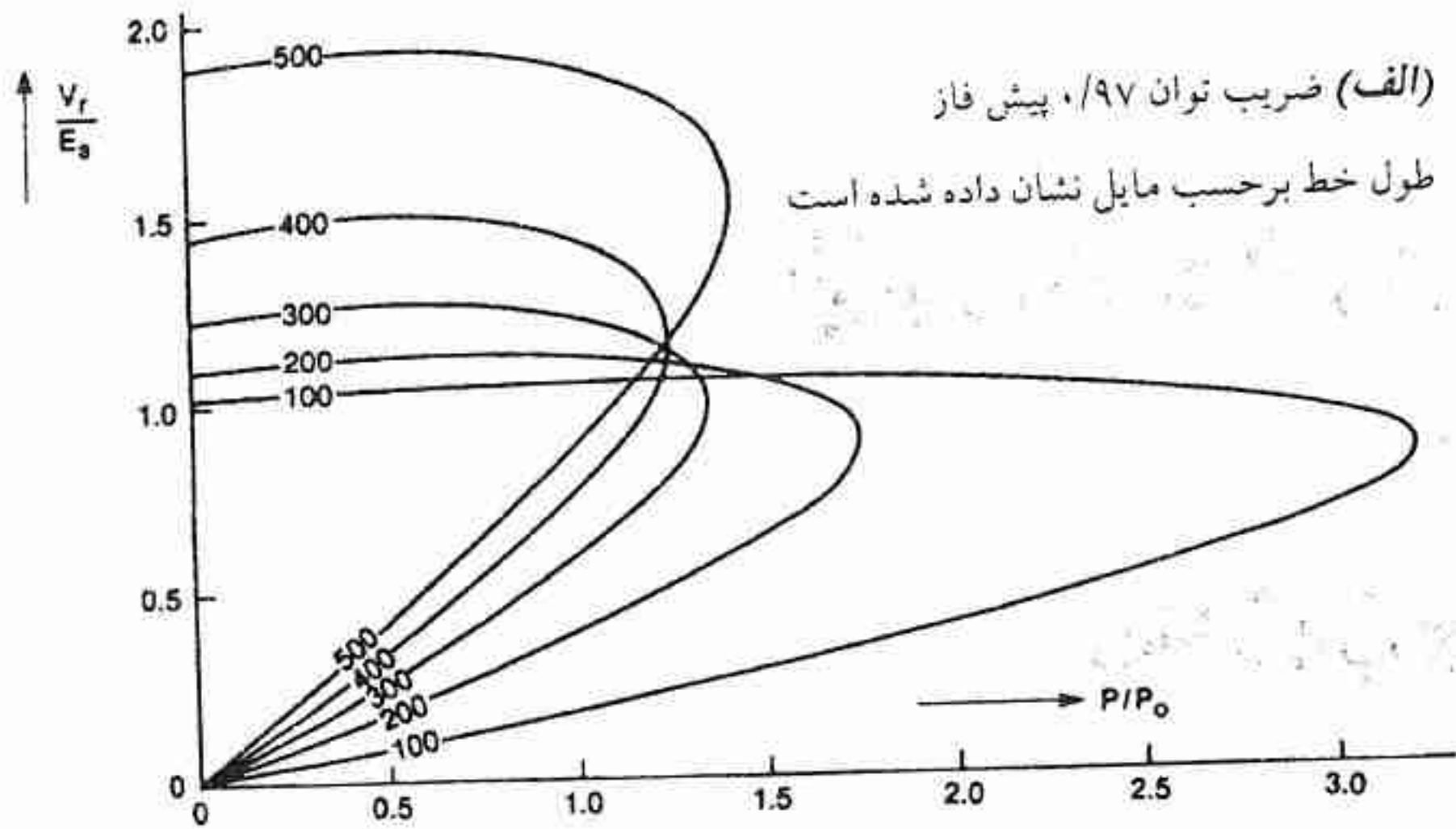
همچنین از شکل ۷ بوضوح برمی آید که پروفایل ولتاژ مسطح در ضریب قدرت واحد وقتی که $P=P_0$ است بدست می آید یعنی $V_r = E_s$ است.



شکل ۷ - مقدار ولتاژ انتهای خط، در یک خط شعاعی ۲۰۰ مایل بدون تلفات، بصورت تابعی از توان بار (P) و ضریب توان

ضریب توان بار یک تأثیر شدیدی بر روی ولتاژ انتهای خط دارد. بارهای با ضریب قدرت پس فاز، با ضریب قدرت واحد یا با ضریب قدرت پیش فاز بالا، تمایل دارند که با افزایش P ولتاژ V_r را کاهش دهند. در بارهای با ضریب قدرت پیش فاز (به استثناء آنهایی که نزدیک به ۱ هستند) ولتاژ V_r افزایش می یابد تا وقتی که P به مقدار خیلی بالاتر برسد. بارهای با ضریب قدرت پیش فاز توان راکتیو تولید می کنند که تکمیل کننده توان راکتیو بارگیری خط است و ولتاژ خط را تقویت می نمایند. اثر طول خط را می توان با ترسیم مجدد شکل ۷ برای مقادیر مختلف a معین کرد. اشکال ۸ الف الی ۸ پ نتایج برای سه مقدار ضریب توان متفاوت و با $a = 100, 200, 300, 400, 500$ mi را نشان می دهند. از شکل ۸ مشاهده می شود که خطوط جبران نشده با طول بین ۱۰۰ و ۲۰۰ مایل به شرط آنکه ضریب توان بالا باشد، می توانند در ولتاژ نامی کار کنند. خطوط طویل تر بواسطه تغییرات وسیع ولتاژشان در تمام ضریب قدرتها غیر عملی هستند مگر اینکه وسایل کنترل ولتاژ و یا جبران فراهم شود.

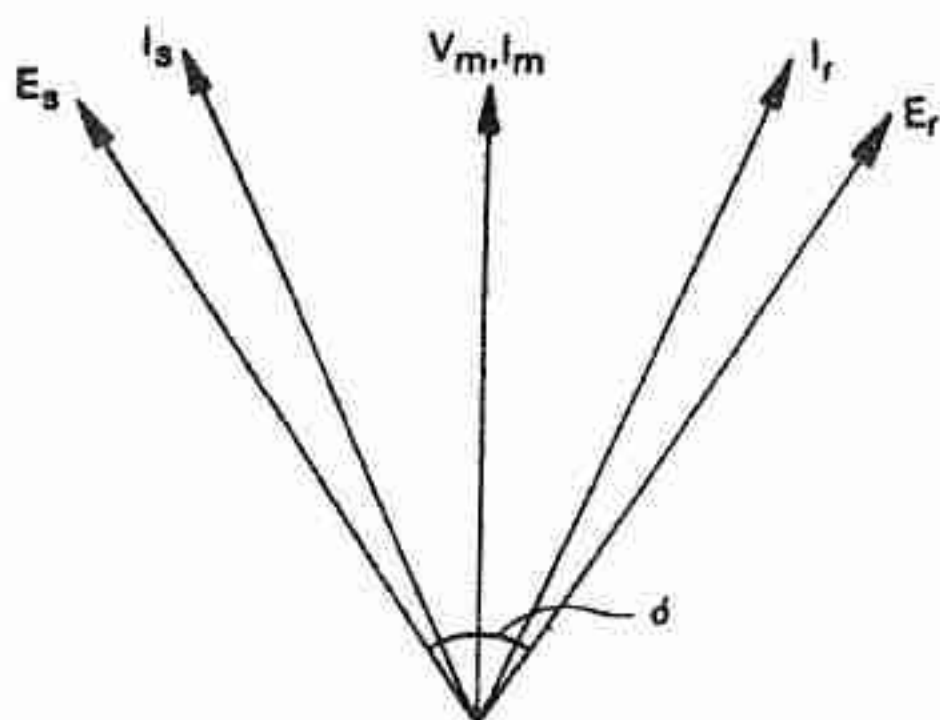
گرچه در بار طبیعی $V_r = E_s = 1 \text{ pu}$ ($p+jQ = P$) است اگر چنانچه طول خط بزرگتر از ۲۰۰ mi باشد V_r نسبت به تغییرات P خیلی حساس خواهد بود. اگر a بزرگتر از ۳۹۰ mi یا $\lambda/8$ (یعنی $\theta > 45^\circ$)



باشد در بار طبیعی ولتاژ در انتهای خط برابر کمترین مقدار از بین دو ریشه معادله ۲۴ خواهد بود:
رجوع شود به شکل ۸ ب برای ۵۰۰ و ۴۰۰ mi با $\frac{P}{P_0} = 1$ در تمام حالات چنین عملکردی
ناپایدار خواهد بود.

خط متقارن - در بخش ۲-۲-۴ رفتار خط متقارن بدون بار بر حسب دو خط مدار باز با طول نصف
طول کل خط که بصورت پشت به پشت متصل شده‌اند، بررسی شد. خط متقارن با بار را نیز می‌توان
به همان شیوه بررسی کرد. گرچه خط متقارن یک حالت خاصی است، ولی این شیوه یک درک
فیزیکی از مسأله را فراهم می‌کند که در بررسی حالت‌های پیچیده‌تر مفید خواهد بود.

بر حسب تعریف در خط متقارن $E_s = E_r$ است. در شرایط بارداری ولتاژ E_s از نظر فاز از E_r
جلوتر می‌افتد و از روی تقارن ولتاژ نقطه میانی از نظر فاز بین دو فاز قرار می‌گیرد: به شکل ۹ مراجعه
شود. مجدداً از روی تقارن می‌توان گفت که بایستی زاویه ضریب توان در یک طرف خط نسبت به
زاویه ضریب توان در طرف دیگر خط، منفی باشد و حال آنکه ضریب توان در نقطه میانی مقدارش
واحد است. با توجه به این مطالب با استفاده از شکل ۸ ب به سهولت می‌توان توضیح داد که چگونه
 V_m با توان انتقالی تغییر می‌کند. مشروط به اینکه $E_s = E_r = 1 \text{ pu}$ بوده و طول خط با $a/2$
جایگزین شود مقدار V_m را می‌توان از روی شکل ۸ ب بدست آورد. به عنوان مثال، تغییرات ولتاژ
نقطه میانی بر روی یک خط متقارن ۲۰۰ mi مشابه تغییرات ولتاژ در انتهای خط در یک خط ۱۰۰ mi
با ضریب توان بار واحد است. در خط ۲۰۰ mi با داشتن ماشین‌های سنکرون در دو سر خط منجر به
بهبود قابل ملاحظه‌ای می‌شود. البته در یک خط متقارن ۵۰۰ mi تغییرات وسیع ولتاژ در نقطه میانی
هنوز غیر قابل قبول است (معادل است با تغییرات ولتاژ در انتهای خط ۲۵۰ mi).



شکل ۹ - دیاگرام فازور خط متقارن با $P > P_0$.
توجه اینکه ضریب توان در انتهای خط پیش فاز
است و از انتهای خط توان راکتیو وارد خط می‌شود.

نیازمندی توان راکتیو - نیازمندی توان راکتیو خط به وسیله ولتاژ و سطح توان انتقالی مشخص می‌شود. اهمیت دارد که بدانیم این نیازمندی‌ها چیست، زیرا اینها هستند که مقادیر نامی توان راکتیو ماشین‌های سنکرون ترمینال و همچنین وسایل جبران‌کننده را تعیین می‌کنند. باید توجه داشت که ضریب توان ترمینال منتجه تمام مدارهایی است که به آن طرف خط متصل گردیده‌اند. به عنوان مثال اگر بار القایی در ابتدای خط متصل شود به ژنراتور سنکرون در جذب توان راکتیو بارگیری خط کمک می‌نماید. بطور کلی، بدون حضور وسایل جبران‌کننده، ماشین‌های سنکرون بایستی تفاوت بین توان راکتیو خط و بار محلی را تولید و یا جذب نمایند.

معادلات مربوط به نیمه طرف ابتدای یک خط متقارن برابر است با

$$E_s = V_m \cos \frac{\theta}{\gamma} + j Z_o I_m \sin \frac{\theta}{\gamma} \quad (25 \text{ الف})$$

$$I_s = j \frac{V_m}{Z_o} \sin \frac{\theta}{\gamma} + I_m \cos \frac{\theta}{\gamma} \quad (25 \text{ ب})$$

در نقطه میانی

$$P_m + j Q_m = V_m I_m^* = P \quad (26)$$

که در آن P توان انتقالی است. توجه اینکه $Q_m = 0$ یعنی بعد از نقطه میانی توان راکتیو عبور نمی‌کند. توان واقعی و راکتیو که بایستی در ابتدای خط فراهم شود برابر است با

$$P_s + j Q_s = E_s I_s^* \quad (27)$$

با جایگزینی E_s و I_s از معادله ۲۵ و با در نظر گرفتن V_m به عنوان مبنای فازور، $P_m = V_m I_m$ و

$$P_s + j Q_s = P + j \frac{\sin \theta}{\gamma} \left[Z_o I_m^2 - \frac{V_m^2}{Z_o} \right] \quad (28)$$

چون خط بدون تلفات فرض می‌شود، انتظار می‌رود که $P_s = P$ باشد و همینطور در انتهای خط $P_r = P$. عبارت Q_s را می‌توان به صورت زیر منظم کرد با استفاده از رابطه $P_o = \frac{V_o^2}{Z_o}$ و

$$P_m = V_m I_m$$

$$Q_s = P_o \frac{\sin \theta}{\gamma} \left[\left(\frac{P}{P_o} \right)^2 \left(\frac{V_o}{V_m} \right)^2 - \left(\frac{V_m}{V_o} \right)^2 \right] \quad (29)$$

این معادله نشان می‌دهد که چگونه ولتاژ نقطه میانی خط متقارن با توان راکتیو مورد لزوم رابطه دارد. از روی تقارن می‌توان گفت که معادله ۲۹ به هر دو انتهای خط اعمال می‌شود و هر طرف نیمی از

خط کل را تغذیه می‌کند. با توجه به علامت قراردادی توان راکتیو می‌توان نوشت $Q_s = -Q_r$. جایی که $P = P_0$ باشد یعنی خط در بار طبیعی باشد اگر $V_m = 1 \text{ Pu}$ معادله ۲۹ نتیجه می‌دهد که $Q_s = 0$ است، نتیجه‌ای که برایمان آشناست. در این شرایط همچنین $Q_r = 0$ و $E_s = E_r = V_m = V_0 = 1 \text{ Pu}$ است. در حالت بی‌باری یعنی $P = 0$ ، اگر ولتاژهای ترمینال تنظیم شوند طوریکه $E_s = E_r = V_0 = 1 \text{ Pu}$ باشد سپس $I_m = 0$ و از معادله ۲۹ داریم

$$Q_s = -P_0 \tan \frac{\theta}{2} \quad (30)$$

که این معادله با معادله ۲۱ یکسان است. این معادله نشان می‌دهد که وقتی $E_s = E_r$ و $P = 0$ ، توان راکتیو ابتدای خط همان توان بارگیری نصف خط است. اگر ولتاژهای ترمینال بطور پیوسته تنظیم شوند طوریکه ولتاژ نقطه میانی $V_m = V_0 = 1 \text{ Pu}$ در تمام سطوح توان انتقالی باشد، آنگاه از معادله ۲۹ داریم

$$Q_s = P_0 \frac{\sin \theta}{2} \left[\left(\frac{P}{P_0} \right)^2 - 1 \right] = -Q_r \quad (31)$$

به علاوه از معادلات ۲۵ و ۲۶ می‌توان نشان داد که برای $V_m = V_0$ داریم:

$$E_s = V_m \sqrt{1 - \sin^2 \frac{\theta}{2} \left[1 - \left(\frac{P}{P_0} \right)^2 \right]} = E_r \quad (32)$$

این دو معادله رفتار کلی خط متقارن را نشان می‌دهند. اگر $P < P_0$ ولتاژ نقطه میانی بزرگتر از ولتاژ ترمینال است. اگر $P > P_0$ عکس این مطلب صادق است و برای $P = P_0$ پروفایل ولتاژ مسطح خواهد بود. وقتی $P < P_0$ توان راکتیو بارگیری اضافی در خط وجود دارد یعنی Q_s منفی و Q_r مثبت است، نشان دهنده این است که در دو انتهای خط توان راکتیو جذب می‌شود. وقتی $P > P_0$ نشان دهنده کمبود توان راکتیو در کل خط است. توان راکتیو اضافی و یا توان راکتیو کمبود خط را می‌توان همانطوری که در بخش ۲-۳ دیده می‌شود، به وسیله جبران‌کننده‌ها تصحیح کرد.

بایستی توجه داشت که نیازمندیهای توان راکتیو به وسیله مجذور توان انتقالی مشخص می‌شود. به عنوان مثال، یک خط متقارن جبران نشده به طول 200 mi با $P = 1/5 P_0$ را در نظر بگیرید. سپس $\sin \theta = 0.394$ و $Q_s = -Q_r = 0.246 P_0$ برای هر مگاوات توان انتقالی لازم است که مقدار کل $0.329 \text{ MVAR} = 0.246 \times \frac{1}{5} \times 2$ توان راکتیو از دو انتهای خط فراهم شود. معادلات مفید دیگری برای تعیین توان راکتیو مورد نیاز بعداً در بخش ۲-۲-۶ ارائه خواهد شد.

۲-۲-۶ خط جبران نشده در حالت بارداری: حداکثر توان انتقالی و ملاحظات پایداری

خط متقارن - اگر بار در انتهای خط انتقال بدون تلفات برابر $P + jQ$ باشد، ولتاژهای ترمینال به وسیله معادله ۲۴ به هم ارتباط داده می‌شوند:

$$E_s = E_r \cos \theta + j Z_o \frac{P - jQ}{E_r} \sin \theta \quad (۳۳)$$

این معادله برای بارهای سنکرون و غیرسنکرون قابل قبول است. در اینجا فرض می‌شود که بار سنکرون است و E_r به جای V_r نوشته شده است. اگر E_r به عنوان مرجع فازور گرفته شود E_s را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$E_s = E_s e^{j\delta} = E_s (\cos \delta + j \sin \delta) \quad (۳۴)$$

که در آن δ زاویه فاز بین E_r و E_s است (شکل ۹ ملاحظه شود). δ زاویه بار^۱ یا زاویه انتقال^۲ نامیده می‌شود. با برابر کردن قسمت‌های حقیقی و موهومی معادلات ۳۳ و ۳۴ داریم

$$E_s \cos \delta = E_r \cos \theta + Z_o \frac{Q}{E_r} \sin \theta \quad (۳۵)$$

$$E_s \sin \delta = Z_o \frac{P}{E_r} \sin \theta \quad (۳۶)$$

معادله ۳۶ را می‌توان به شکل زیر مرتب کرد

$$P = \frac{E_s E_r}{Z_o \sin \theta} \sin \delta \quad (۳۷)$$

این معادله به لحاظ سادگی و قابل قبول بودنش در یک رنج وسیع، معادله مهمی است. معادله همچنین وقتی $E_s \neq E_r$ باشد و وقتی بار از نوع سنکرون و یا غیرسنکرون باشد قابل قبول است. تنها نقص معادله این است که از تلفات خط صرف‌نظر شده است. یک شکل آشناتر معادله وقتی به دست می‌آید که برای خطی که از نظر الکتریکی کوتاه است $\sin \theta$ با $\theta = \beta a = \omega a \sqrt{lc}$ جایگزین شود. آنگاه $\sqrt{lc} = \omega a l = X_1$ که برابر راکتانس سری خط است و داریم

$$P \cong \frac{E_s E_r}{X_1} \sin \delta \quad (۳۸)$$

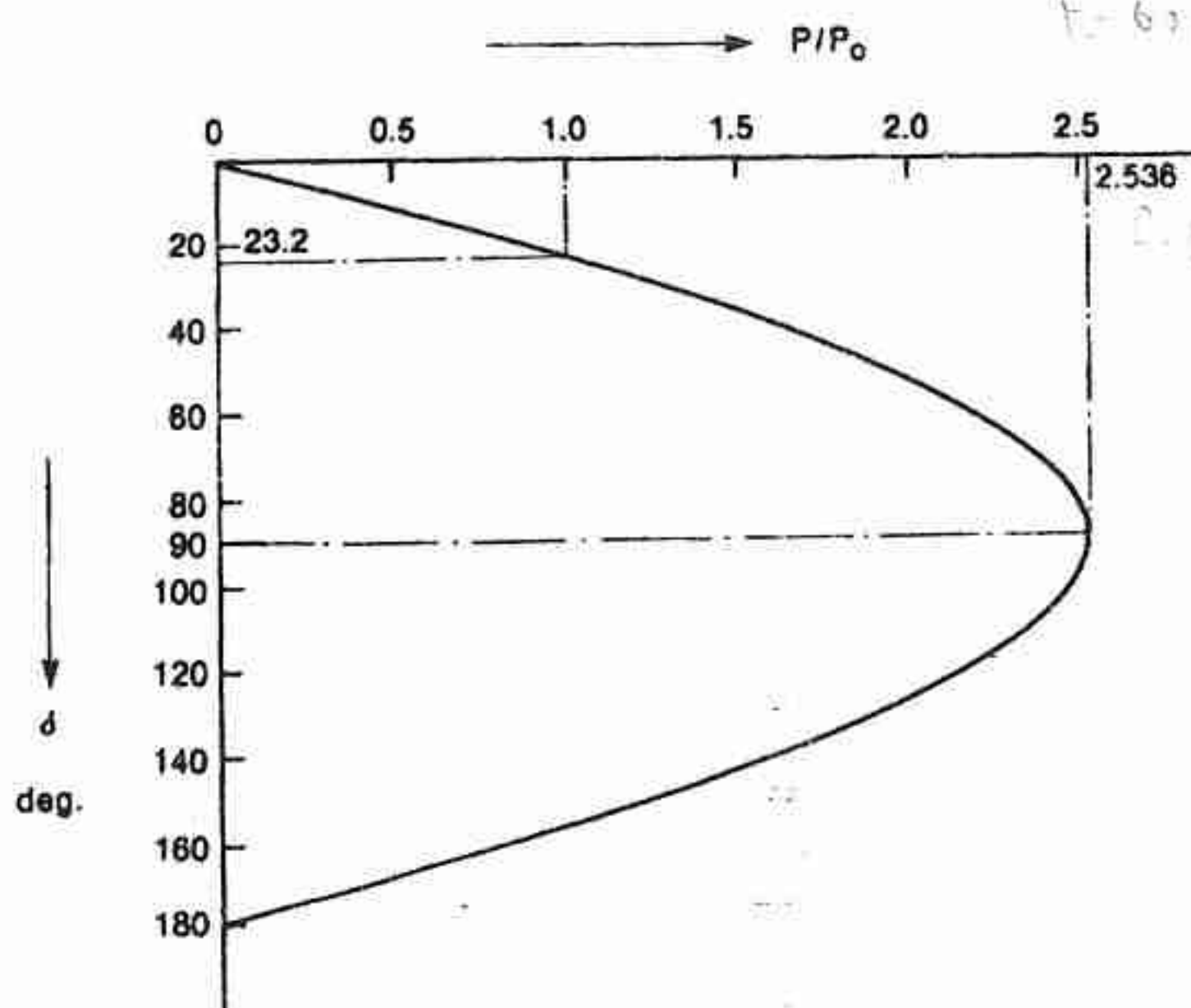
معادله ۳۷ نشان می‌دهد که اگر E_r و E_s ثابت باشند توان انتقالی تنها تابع یک متغیر یعنی زاویه انتقال δ خواهد بود. اگر $E_s = E_r = V_o$ سپس

$$P = \frac{P_o}{\sin \theta} \sin \delta \quad (39)$$

شکل ۱۰ این رابطه را برای یک خط ۲۰۰ mi و فرکانس ۶۰ Hz که در آن $\theta = 0.405 \text{ rad}$ و $\sin \theta = 0.394$ است نشان می‌دهد. در رسم گراف معمولاً محور عرضی مختصات برای P در نظر گرفته می‌شود اما در اینجا به اندازه 90° درجه در جهت حرکت عقربه ساعت چرخیده است تا این حقیقت را که P متغیر مستقل و δ متغیر وابسته است را منعکس نماید. همچنین تشابهی با مشخصه توان - ولتاژ شکل ۸ ب خواهد داشت که برای سهولت مجدداً در شکل ۱۱ برای خط متقارن با طولهای مختلف رسم شده است. همانطوری که ملاحظه می‌شود وقتی بار از مقدار صفر افزایش می‌یابد زاویه بار نیز افزایش پیدا می‌کند. اگر E_r و E_s ثابت نگاهداشته شوند در پروفایل ولتاژ ایجاد «شکم»^۱ می‌شود که نقطه میانی پایین‌ترین سطح ولتاژ را خواهد داشت.

همانطوری که در بخش ۲-۲-۵ نشان داده شد یک توان ماگزیمم قابل انتقال وجود دارد. مفید است که یک درک فیزیکی از این پدیده داشته باشیم. فرض کنید که ماشین‌های سنکرون واقع در ابتدای خط معادل یک ژنراتور سنکرون و ماشین‌های واقع در انتهای خط معادل یک موتور سنکرون باشد. در آن صورت زاویه بار δ نشان دهنده وضعیت مکانیکی نسبی روتور دو ماشین است که با سرعت سنکرون می‌چرخند. البته فرض می‌شود که ولتاژهای ترمینال به کمک کنترل تحریک ثابت نگاهداشته می‌شوند. توان بار را می‌توان با افزایش گشتاور بر روی محور (شفت) موتور افزایش داد. این کار سبب می‌شود که حرکت موتور کند شود طوری که اگر فرض شود که ژنراتور با سرعت ثابت به کارش ادامه دهد، زاویه بار افزایش می‌یابد. طبق شکل ۱۰ و معادله ۳۷ افزایش زاویه بار با افزایش توان انتقالی توأم است که دوباره موتور سرعت گرفته تا اینکه در یک وضعیت پایدار جدیدی در یک سطح توان انتقالی جدید به کارش ادامه می‌دهد. حال V_m از مقدار قبل کوچکتر و I_m بزرگتر خواهد بود. اگر توان پی در پی افزایش یابد این روند نمی‌تواند بطور نامحدود ادامه یابد زیرا به نقطه‌ای خواهیم رسید که در آن کاهش V_m بیش از افزایش I_m بوده و حاصلضرب آنها $P = V_m I_m$ برای افزایش بیشتر زاویه انتقال هر اندازه کوچک، کاهش می‌یابد. این نقطه وقتی اتفاق می‌افتد که $\delta = 90^\circ$ باشد و اگر $E_s = E_r = V_o$ پس $V_m = V_o / \sqrt{2}$ میشود. اگر گشتاور بار کمی افزایش یابد، δ افزایش می‌یابد اما توان انتقالی کاهش پیدا می‌کند طوری که اگر سرعت ژنراتور ثابت بماند موتور سرعتش کاهش بیشتری یافته تا آنکه از حالت سنکرون خارج می‌شود. سیستم ناپایدار است و اگر این شرایط در یک روند تدریجی همانطوری که در بالا شرح دادیم، فراهم گردد گفته می‌شود که توان

انتقالی از حد پایداری ماندگار $P_o / \sin \theta$ تجاوز کرده است. در خط ۲۰۰ mi این مقدار توان برابر است با $P_o = 2/54 = 0.37$. حد پایداری ماندگار برای خطوط با طولهای مختلف در جدول شکل ۱۱ داده شده است و مکان هندسی آن نیز ترسیم شده است. برای خطوط با طول کمتر از $\lambda/4$ (۷۷۵ mi) در فرکانس ۶۰ Hz) حد پایداری ماندگار با افزایش طول خط به سرعت کاهش می یابد.



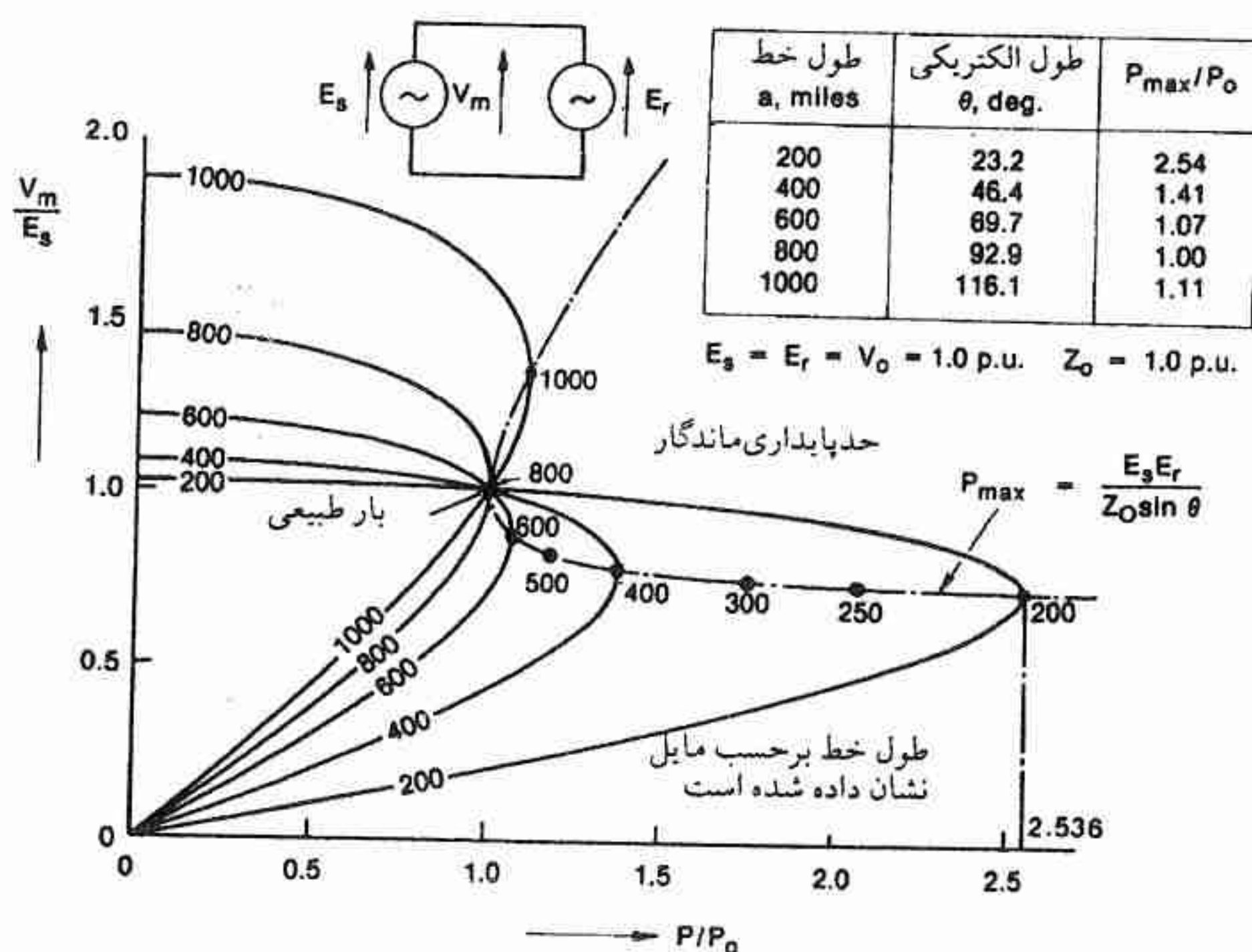
شکل ۱۰ - مشخصه زاویه انتقال توان برای خط بطول ۲۰۰ مایل.

به واسطه وجود اغتشاشات دایمی کوچک در توان انتقالی در هر سیستم واقعی و همچنین اغتشاشات فاحش اتفاقی که در اثر خطا و یا عمل کلیدزنی بوجود می آید عملاً خط جبران نشده قادر نخواهد بود خیلی نزدیک به حد پایداری ماندگار خودش کار کند. یک مارجین (فاصله اطمینان) لازم است و بر اساس تجربه یک قانون کلی این است که زاویه بار در خط جبران نشده نبایستی از 30° درجه تجاوز نماید که در این زاویه خط نصف توان ماکزیمم را انتقال می دهد. اگر از این قانون تجربی تبعیت کنیم حداکثر طول الکتریکی خط جبران نشده که از آن بار طبیعی می تواند عبور نماید از حل معادله $P = P_o$ و $\delta = 30^\circ$ بدست می آید که برابر است با $\theta = 30^\circ$ یا $a = 260 \text{ mi}$ در فرکانس ۶۰ Hz.

مقادیر کوچکتر توان می تواند بطور پایدار از خطوط طولانی تر انتقال داده شود، اما وقتی از جبران کننده ها استفاده نمی شود حداکثر طول مجاز خط هنوز به وسیله مقدار ولتاژی باری V_m یا

مقادیر نامی توان راکتیو ماشین‌های سنکرون (که در حالت بی‌باری جذب و یا در تمام بار تولید می‌کنند) محدود می‌گردد.

از شکل ۱۱ برمی‌آید که اگر طول خط جبران‌نشده از $\frac{1}{4}$ طول موج تجاوز نماید در هر مقدار توان انتقالی پایدار، پروفایل ولتاژ مسطح حاصل نخواهد شد. این حقیقت که حد پایداری ماندگار برای خطوط با $a > \lambda/4$ با طول خط افزایش می‌یابد به واسطه ولتاژ زیاد و نیازمندی توان راکتیو که در عمل میسر نیست و حساسیت ولتاژ بالا که مربوط به قسمت فوقانی منحنی‌ها (برای $a > \lambda/4$) می‌شود، در عمل قابل توجه نمی‌باشند. حتی قطع نظر از این مشکلات در عمل غیرممکن است که بدون عبور از یک رنج ناپایدار، بتوان خط را در یک چنین شرایط کاری قرار داد.



شکل ۱۱ - تغییرات ولتاژ نقطه میانی خط متقارن بر حسب توان انتقالی خط.

خط شعاعی با بار غیرسنکرون - اشکال ۷ و ۸ نشان می‌دهند که حتی وقتی که بار سنکرون نمی‌باشد یک حداکثر توان از خط انتقال می‌یابد مقدار این حداکثر توان را می‌توان برای بار با ضریب توان واحد به سهولت حساب کرد. از تئوری مدار مقدماتی می‌دانیم که حداکثر توانی که توسط یک

بار با ضریب توان واحد، از منبع تغذیه که با ولتاژ مدار باز و امپدانس اتصال کوتاه سری شده با آن نمایش داده شده است کشیده می شود از معادله زیر بدست می آید:

$$P_{\max} = \frac{E_o I_s}{2(1 + \cos \phi_s)} \quad (40)$$

E_o ولتاژ مدار باز، I_s جریان اتصال کوتاه و ϕ_s زاویه فاز بین این دو است وقتی که تغذیه اتصال کوتاه می شود. اگر منبع تغذیه را به عنوان emf ابتدای خط همراه با خط انتقال ادامه یافته تا انتهای خط، در نظر بگیریم، سپس از معادلات ۲ الف و ۲ ب داریم

$$E_o = \frac{E_s}{\cos \theta} \quad (41)$$

$$I_s = \frac{E_s}{(j Z_o \sin \theta)} \quad (42)$$

چون E_o از I_s 90° درجه جلوتر است، $\phi_s = 90^\circ$ ، $\cos \phi_s = 0$ و از معادله ۴۰ داریم:

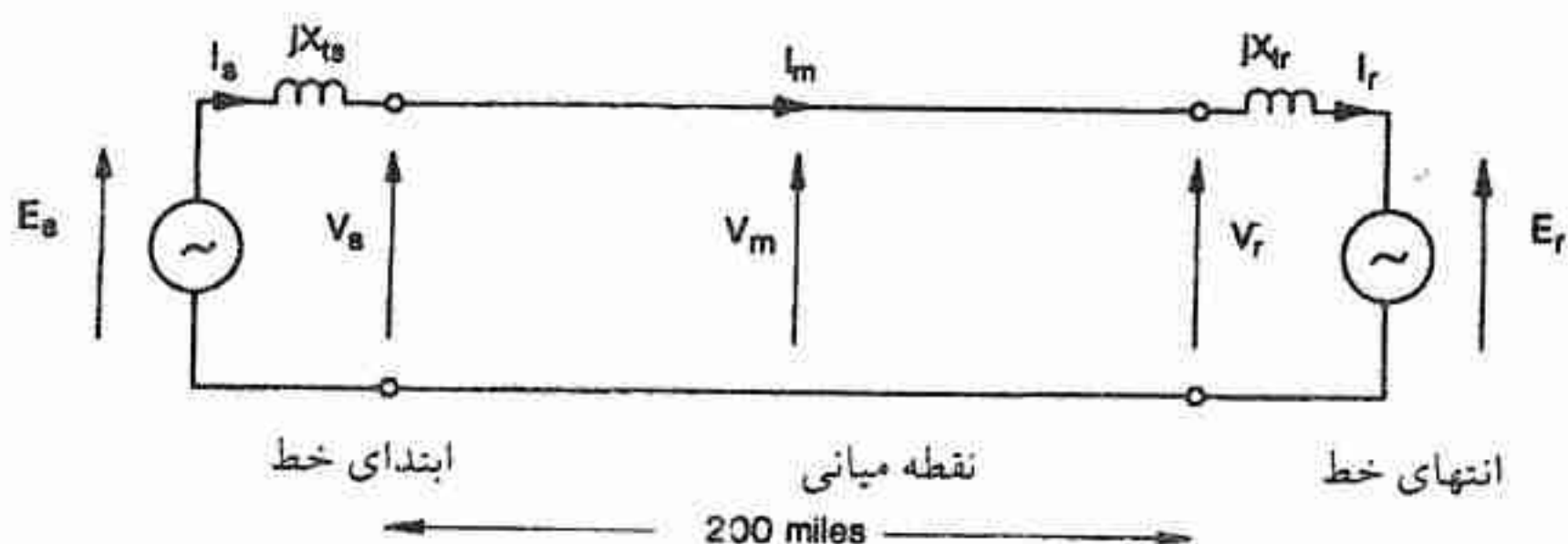
$$P_{\max} = \frac{E_s^2}{Z_o \sin 2\theta} \quad (43)$$

این معادله مکان هندسی را توصیف می کند که تمامی نقاط توان ماگزیمم شکل ۸ ب بر روی آن قرار دارند.

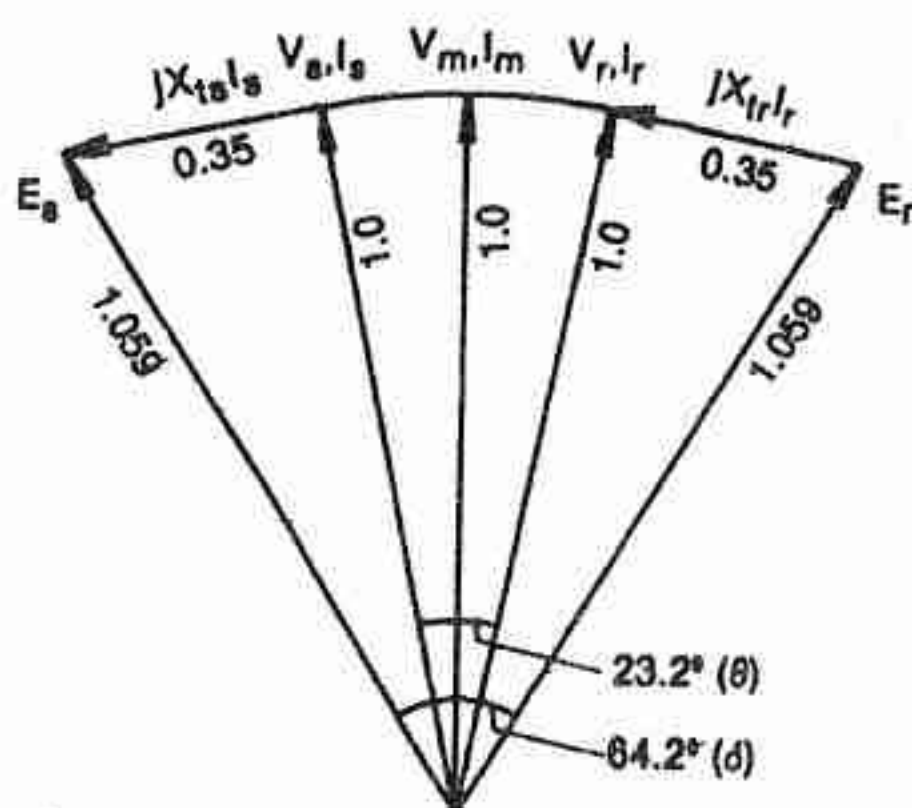
چون بار غیر سنکرون است، زاویه δ را نمی توان برحسب وضعیت نسبی روتور ماشین های سنکرون ابتدا و انتهای خط تفسیر کرد. بنابراین مساله حفظ سنکرونیزم موضوعیت ندارد. اگر سیستم بر روی قسمت بالایی یکی از منحنی های شکل ۸ ب کار کند با کاهش مقاومت موثر بار می توان توان انتقالی خط را افزایش داد. در عمل این کار با اتصال دادن بارهای روشنایی بیشتر انجام می گیرد. روش دیگر این است که گشتاور بار موتور القایی را افزایش دهیم که منجر به کاهش سرعت آن می گردد یعنی لغزش افزایش یافته و در نتیجه مقاومت موثر آن کاهش می یابد. با کاهش یافتن مقاومت جریان بیشتری از سیستم تغذیه کشیده می شود و مطابق شکل ۸ ب در ضریب توان واحد ولتاژ کاهش پیدا می کند. تا نقطه توان ماگزیمم حاصلضرب ولتاژ و جریان افزایش می یابد و سیستم پایدار است. بعد از فرارسیدن این نقطه با کاهش بیشتر مقاومت موثر بار توان انتقالی کاهش می یابد.

اثر راکتانس ژنراتور - راکتانس داخلی ماشین های سنکرون واقع در ابتدا و انتهای خط، مقدار راکتانس سری را افزایش داده و در نتیجه زاویه فاز بین emf های داخلی را تغییر می دهد این مطلب را می توان با یک مثال نشان داد.

شکل ۱۲ یک خط متقارن به طول ۲۰۰ mi که بار طبیعی P_0 را انتقال می دهد را نشان می دهد. سیستم قدرت در ابتدا و انتهای خط توسط یک ماشین سنکرون معادل همراه با ترانسفورماتور نشان داده می شود. فرض می شود که مقادیر نامی هر کدام از این ماشین ها برابر P_0 و راکتانس گذرای آنها $x'_d = ۰/۲۵$ pu باشد. راکتانس ترانسفورماتور در همان مبنا برابر $x_T = ۰/۱$ pu فرض می شود بنابراین، $x_{ts} = x_{tr} = x'_d + x_T = ۰/۲۵ + ۰/۱ = ۰/۳۵$ pu، در شکل ۱۳ نشان داده شده است. تحریک ماشین های سنکرون تنظیم می شوند طوری که $V_s = V_r = V_0 = ۱$ pu باشد، بنابراین پروفایل ولتاژ در طول خط مسطح و $V_m = ۱$ pu است.



شکل ۱۲ - خط انتقال متقارن که بار طبیعی P_0 را انتقال می دهد: اثر راکتانس ژنراتورهای دو انتهای خط.



شکل ۱۳ - دیاگرام فازور مربوط به شکل ۱۲ (مقادیر بر حسب pu نشان داده شده اند)

مقدار زاویه بار همانطوری که در بخش ۲-۲-۳ محاسبه شد و یا از طریق معادله ۳۷ برابر $۲۳/۲^\circ$ درجه است. ضریب توان در ابتدا و انتهای خط واحد است طوری که اگر از مقاومت اهمی ماشین ها

۱- راکتانس گذرا با این فرض بکار برده می شود که ژنراتورها به رگولاتورهای ولتاژ سریع مجهز می باشند. به مرجع ۹ مراجعه شود.

صرفنظر شود افت ولتاژ در x_{ts} و x_{tr} با I_s و I_r 90° درجه اختلاف فاز دارد و چون $I_s = I_r = 1 \text{ pu}$ است مقدار هر دو برابر با 0.35 pu است. زاویه انتقال کل برابر $64/2$ درجه است، تقریباً $2/8$ برابر وقتی است که خط تنها در نظر گرفته شود. در حالت کلی خط متقارن (با $X_{ts} = X_{tr} = X_l$) ارتباط بین P و δ (یعنی زاویه فاز بین E_r و E_s) را می توان از معادلات ۲۵ الف و ۲۵ ب با $P = V_m I_m$ بدست آورد نتیجه به صورت زیر است

$$E_s = V_s + j x_{ts} I_s \quad (44)$$

$$P = \frac{E_r}{\left[Z_o - \frac{x_l^2}{Z_o} \right] \sin \theta + 2x_l \cos \theta} \sin \delta \quad (45)$$

که در آن $E_s = E_r = E$ است. فرم این رابطه دقیق مانند آن است که در شکل ۱۰ نشان داده شده است و با قرار دادن $x_l = 0$ این معادله به معادله ۳۷ تبدیل می شود. حداکثر توان انتقالی بطور قابل ملاحظه ای با x_l تغییر می کند. اثر آن به طول خط بستگی دارد و در شکل ۱۴ حداکثر توان انتقالی بصورت تابعی از x_l برای مقادیر مختلف طول خط نشان داده شده است. در عمل، خطوط جبران نشده طول آنها از ۱۰۰-۲۰۰ مایل تجاوز نمی کند و x_l معمولاً کمتر از Z_o می باشد. بنابراین اثر راکتانس ژنراتور این است که زاویه فاز δ را برای یک توان انتقالی معین افزایش دهد و یا برای یک زاویه فاز معین سطح انتقال را کاهش می دهد. (برای خطوط خیلی طویل وقتی x_l بزرگ است یک افزایش در توان ماگزیمم وجود دارد. این پدیده در عمل جالب و قابل توجه نیست زیرا عملکرد در چنین شرایطی متضمن ولتاژهای بالا و سطح توان راکتیو بالاست).

رابطه انتقال توان را می توان با جایگزین کردن E با V_m در معادله ۴۵ به شکل زیر بیان کرد

$$P = V_m \frac{\cos \frac{\theta}{2} - \frac{x_l}{Z_o} \sin \frac{\theta}{2}}{Z_o \sin \frac{\theta}{2} + x_l \cos \frac{\theta}{2}} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \quad (46)$$

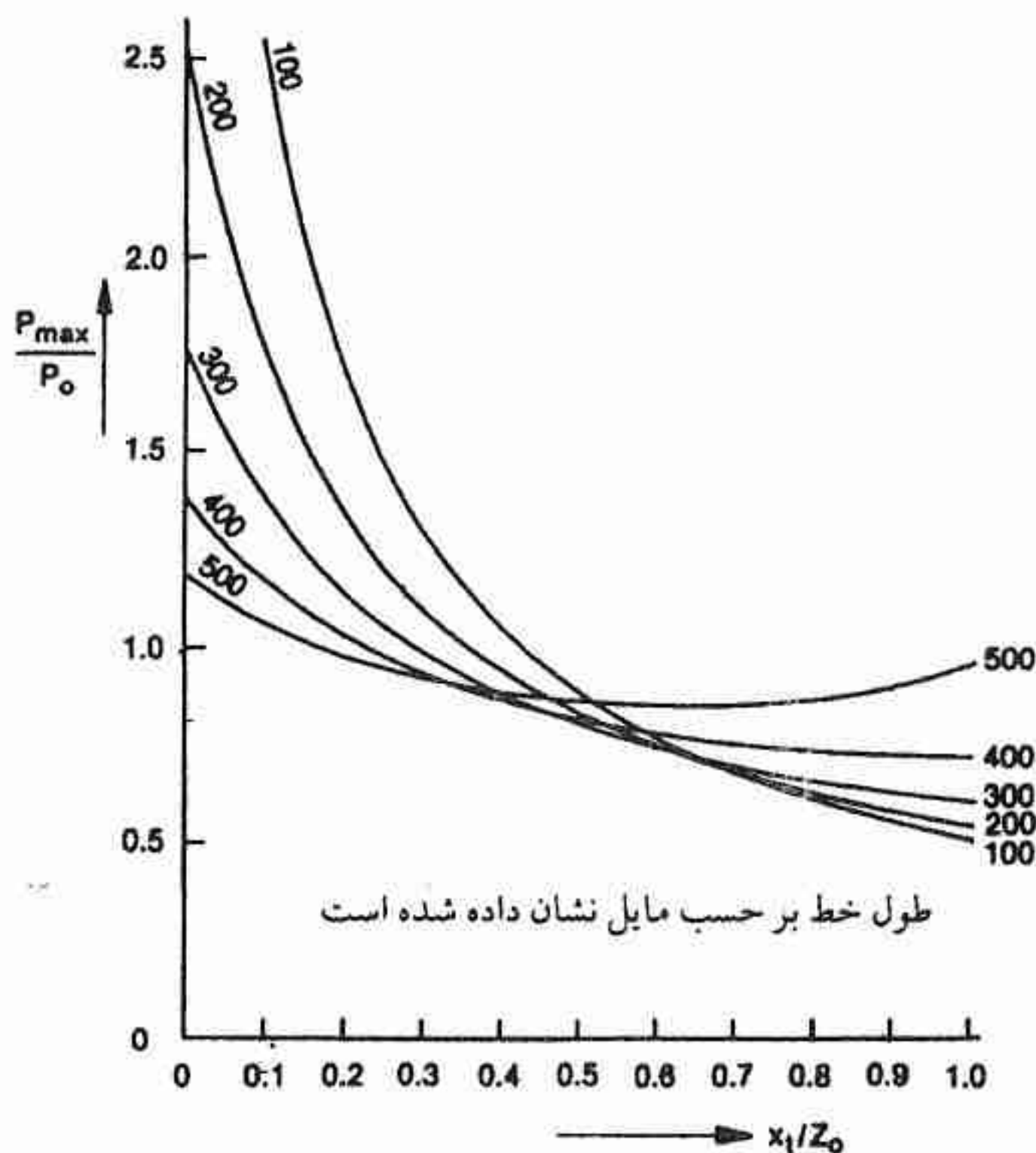
اگر $x_l = 0$ معادله به شکل زیر تقلیل پیدا می کند

$$P = \frac{V_m^2}{Z_o \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}} \operatorname{tg} \frac{\delta}{2} \quad (47)$$

عبارت دیگری برای نیازمندی توان راکتیو - در بخش ۲-۲-۵ معادله ۲۹ برای توان راکتیو مورد نیاز در ابتدا و انتهای خط متقارن وقتی V_m مشخص است، بدست آمد. یک فرمول مفید دیگر با استفاده

از معادله ۳۵ برای توان راکتیو در انتهای خط بدست می آید:

$$Q_r = \frac{V_r(V_s \cos \delta - V_r \cos \theta)}{Z_o \sin \theta} \quad (48)$$



شکل ۱۴ - اثر راکتانس ژنراتور بر حداکثر توان انتقالی خط برای خطوط با طولهای متفاوت.

یک روش مشابهی را می توان بکار برد تا فرمول زیر را برای توان راکتیو در ابتدای خط بدست آورد:

$$Q_s = \frac{V_s(V_r \cos \delta - V_s \cos \theta)}{Z_o \sin \theta} \quad (49)$$

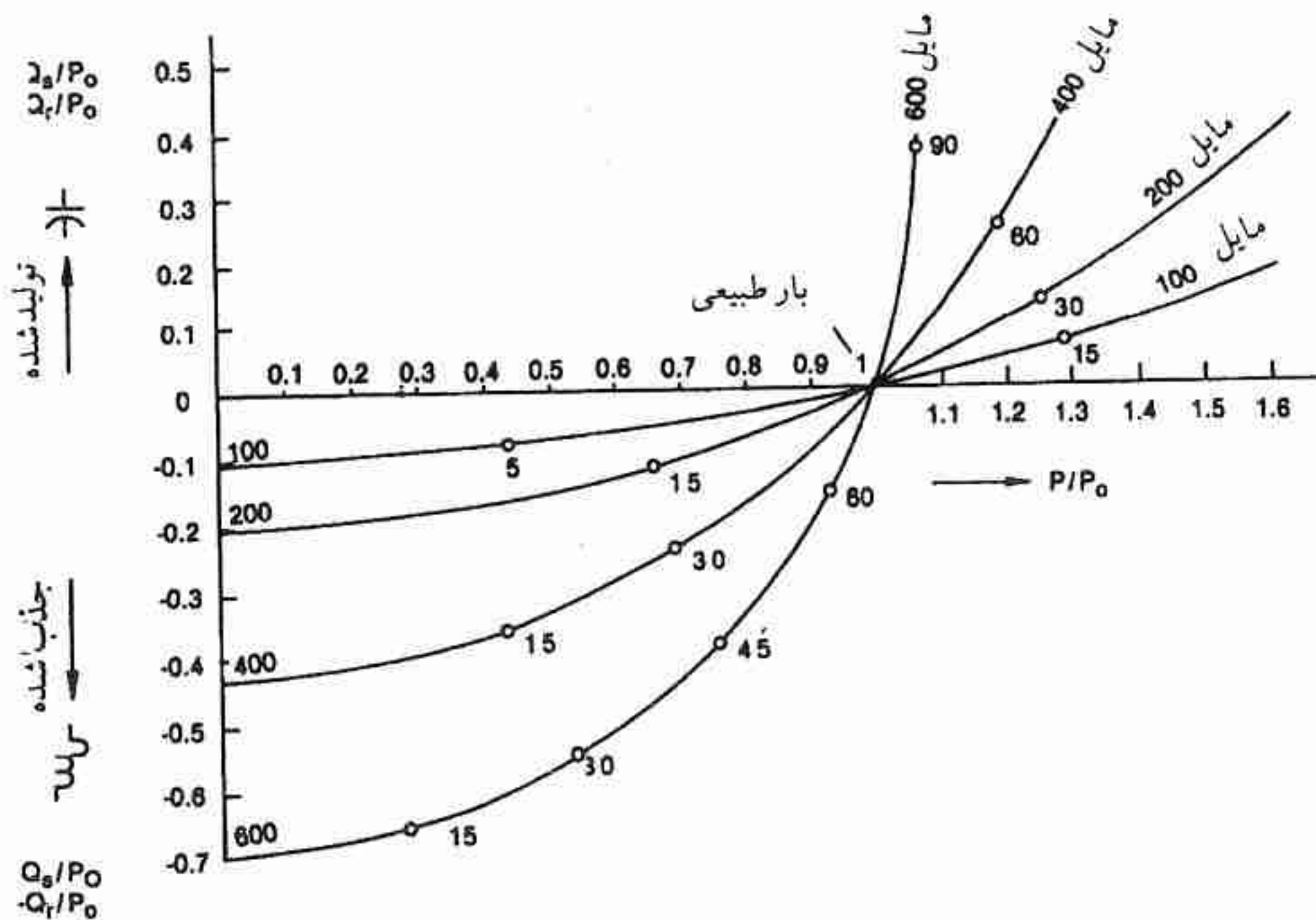
این عبارات برای وقتی که خط متقارن نباشد، یعنی $V_s \neq V_r$ باشد قابل قبول است. اگر $V_s = V_r$ خط متقارن بوده و داریم

$$Q_s = - \frac{V_s^2 (\cos \delta - \cos \theta)}{Z_o \sin \theta} = -Q_r \quad (50)$$

اگر $P < P_o$ و $V_s = 1 \text{ pu}$ ، δ کوچک تر از θ ، $\cos \delta > \cos \theta$ ، و Q_s منفی است در حالیکه Q_r مثبت است و این مطلب بیانگر این است که توان راکتیو در ابتدا و انتهای خط هر دو جذب می شوند. اگر $P > P_o$ توان راکتیو در ابتدا و انتهای خط تولید می شود و حال آنکه $P = P_o$ ، $Q_s = Q_r = 0$ خواهد بود. اگر $P = 0$ ، $\cos \delta = 1$ معادله ۵۰ به معادله ۳۰ تقلیل پیدا می کند. نیازمندی توان راکتیو در ترمینال که به وسیله معادله ۵۰ بدست می آید در شکل ۱۵ نشان داده شده است. برای یک خط کوتاه الکتریکی، $\cos \theta \rightarrow 1$ ، $Z_o \sin \theta \rightarrow X_l$ بنابراین معادله ۵۰ به معادله زیر کاهش می یابد.

$$Q_s = \frac{V_s(1 - \cos \delta)}{X_l} = -Q_r \quad (51)$$

که در آن $V_s = V_r$ است.



شکل ۱۵ - نیازمندی توان راکتیو در ترمینالهای خط متقارن بصورت تابعی از توان انتقالی و طول خط (اعداد نشان داده شده در شکل معرف زاویه انتقال δ است)

۲-۳ خطوط انتقال جبران شده

۲-۳-۱ انواع جبران سازی: Z_0 - مجازی^۱، θ - مجازی^۲،

و «جبران سازی با تقسیم بندی خط^۳»

در این فصل جبران سازی^۲ به معنای تغییر مشخصات الکتریکی خط به منظور افزایش ظرفیت توان انتقالی و برآورده کردن نیازمندیهای انتقال که در بخش ۱-۲ بیان شد، می باشد. با این هدف کلی، یک سیستم جبران کننده ایده آل اعمال زیر را انجام خواهد داد:

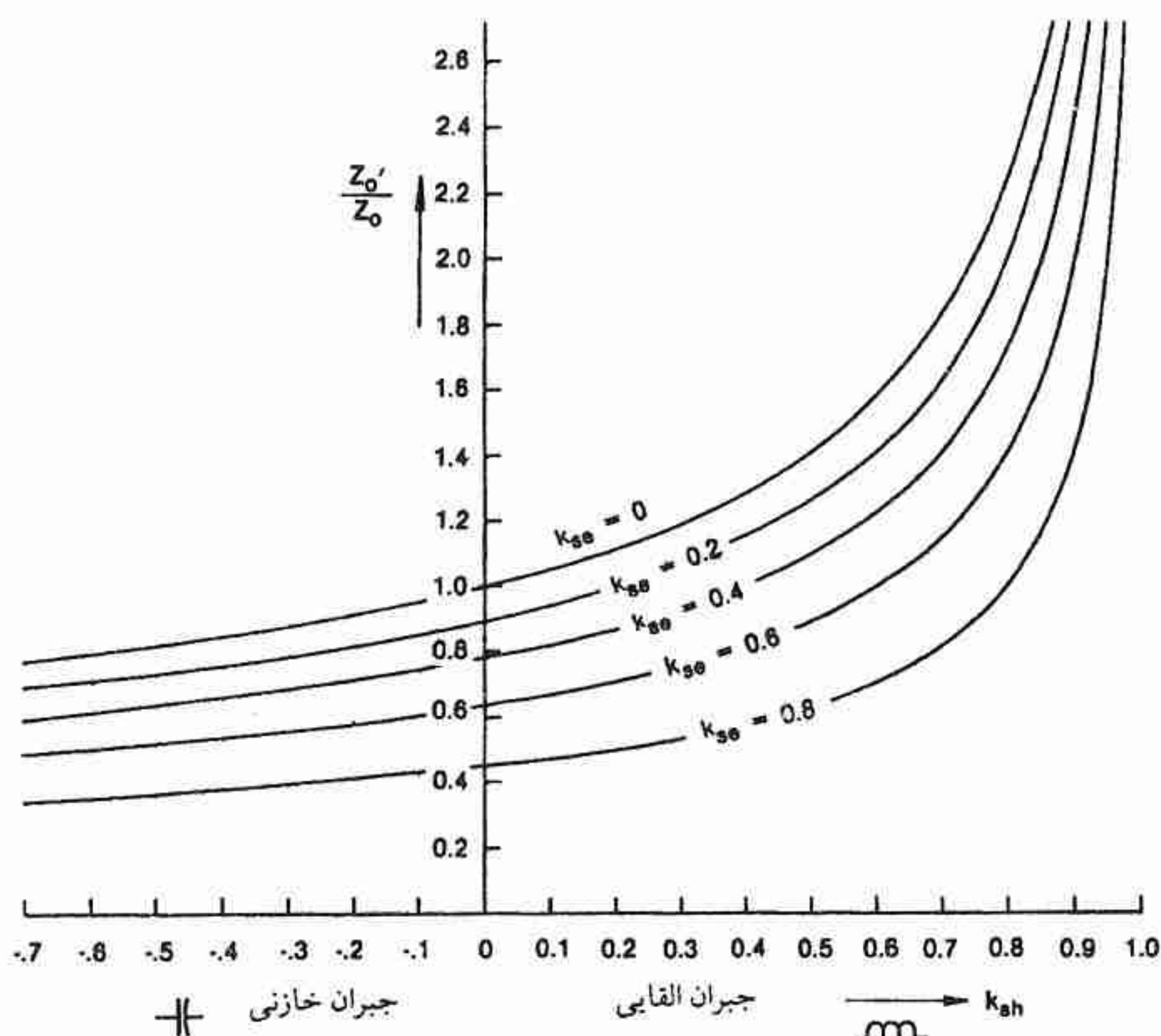
- ۱- در ایجاد یک پروفایل ولتاژ مسطح در تمامی سطوح انتقال توان مساعدت می نماید.
 - ۲- با افزایش حداکثر توان قابل انتقال پایداری را بهبود می بخشد.
 - ۳- یک روش مقرون به صرفه در جوابگویی به نیاز توان راکتیو در سیستم انتقال را فراهم می کند.
- عددی که برای ارزیابی میزان تاثیر سیستم جبران کننده به کار می رود عبارت از حاصلضرب طول خط در ماگزیمم توان قابل انتقال خواهد بود. در بخش ۲-۲ نشان داده شد که مثلاً در ۶۰ Hz بدون عمل جبران سازی از خطوط بلندتر از ۲۰۰ mi عملاً نمی توان حتی بار طبیعی را انتقال داد. خطوط جبران شده قادر خواهند بود که بار طبیعی را از مسافت های بیشتر انتقال دهند و خطوط کوتاه جبران شده قادر هستند که بیش از بار طبیعی را انتقال دهند.

یک پروفایل ولتاژ مسطح حاصل می شود اگر چنانچه امپدانس ضربه ای موثر خط تغییر داده شود طوری که مقدار مجازی Z_0' را دارا گردد که در آن بار طبیعی مجازی V_0^2 / Z_0' برابر با بار واقعی است. امپدانس ضربه ای جبران نشده خط برابر است با $Z_0 = \sqrt{l/c}$. در فرکانس پایه می توان آن را به صورت $\sqrt{x_1 x_c}$ نوشت که این مطلب را می رساند که اگر راکتانس سری x_1 و یا راکتانس موازی x_c تغییر داده شوند (مثلاً با اتصال دادن خازن یا راکتور مناسب) در آن صورت خط دارای یک امپدانس ضربه ای مجازی Z_0' خواهد شد که بار طبیعی مجازی مربوط به آن برابر است با

$$P_0' = \frac{V_0^2}{Z_0'} = P \quad (52)$$

که در آن P توان واقعی است که بایستی انتقال یابد و V_0 ولتاژ نامی خط است. چون بار P تغییر می کند و گاهی هم تغییرات ناگهانی دارد، جبران کننده ایده آل بایستی توانایی تغییرات سریع داشته

باشد. جبران‌کننده‌ای که نقش تغییر Z_o (یا P_o) را دارد به جبران امپدانس ضربه‌ای یا جبران Z_o موسوم است.



شکل ۱۶ - امپدانس ضربه‌ای مجازی Z_o' بصورت تابعی از k_{se} و k_{sh} (جبران پخش شده بکنواخت)

کنترل کردن امپدانس ضربه‌ای مجازی به منظور انتقال توان مشخص (طبق معادله ۵۲)، به این معنا نیست که اطمینان حاصل نمائیم که در انتقال توان در فاصله‌های طولانی‌تر، پایداری حفظ می‌گردد. این مطلب از شکل ۱۱ به وضوح برمی‌آید که نشان می‌دهد بدون حضور جبران‌کننده حتی در شرایط ایده‌آل (بدون اغتشاش) امکان انتقال بار طبیعی در فواصل بزرگتر از $1/4$ بطور پایدار، وجود ندارد. در عمل در غیاب جبران‌کننده در فواصل خیلی کوتاه‌تر از این، پایداری یک فاکتور محدود کننده می‌باشد.

هر دو پارامتر اساسی خط یعنی Z_0 و θ از طریق تاثیر بر روی زاویه انتقال δ بر پایداری تاثیر می‌گذارند (به معادله ۳۷ مراجعه شود). وقتی خطی از طریقی جبران می‌شود که معادله ۵۲ را برقرار نماید - تا پروفایل ولتاژ مسطح بدست آید - Z_0 مشخص می‌گردد و تنها راه بهبود پایداری کاهش مقدار مؤثر θ خواهد بود. برای نیل به این مقصود دو روش جبران به کار گرفته شده است. یکی کاربرد خازنهای سری و کاهش X_1 و در نتیجه کاهش θ است، زیرا در فرکانس پایه $\theta = \beta a = \sqrt{X_1/X_c}$ می‌باشد. این روش به جبران طول الکتریکی خط یا جبران θ^1 موسوم است. روش دیگر این است که خط را به بخش‌های کوچک‌تر تقسیم کنیم که تقریباً هر بخش از بخش‌های دیگر مستقل باشد (به جز آنکه همگی توان مشترکی را انتقال می‌دهند). این روش به جبران با تقسیم‌بندی خط θ^2 موسوم است. این کار با اتصال دادن جبران‌کننده ولتاژ ثابت در فواصل مختلف خط انجام می‌شود. حداکثر توان قابل انتقال توانی است که از ضعیف‌ترین بخش خط عبور می‌کند و چون این بخش خط از کل خط کوتاهتر است یک افزایش در حداکثر توان انتقالی و در نتیجه در پایداری انتظار می‌رود. تمامی سه نوع جبران‌سازی را می‌توان در یک خط انتقال به کار گرفت.

۲-۳-۲ جبران‌کننده‌های اکتیو و پسیو

مفید است که جبران‌کننده‌های پسیو^۳ از جبران‌کننده‌های اکتیو^۴ تمیز داده شوند. جبران‌کننده‌های پسیو شامل خازنها و راکتورهای موازی، خازنهای سری می‌باشند. این وسایل جبران‌کننده ممکن است به طور دائم در مدار قرار گیرند و یا به مدار سوئیچ شوند، اما عموماً قادر به تغییرات پیوسته (بدون پله) نخواهند بود. اینها با تغییر دادن کاپاسیتانس و اندوکتانس طبیعی کار می‌کنند و کارشان اساساً استاتیک می‌باشد. قطع نظر از عمل سوئیچینگ، غیرقابل کنترل می‌باشند. جبران‌کننده‌های پسیو فقط برای جبران امپدانس ضربه‌ای و جبران طول خط به کار برده می‌شوند. به عنوان مثال، راکتورهای موازی برای جبران اثرات خازن پخش شده خط، مخصوصاً برای محدود کردن افزایش ولتاژ ناشی از بی‌باری یا بار کم، به کار برده می‌شوند. امپدانس ضربه‌ای مجازی را افزایش و بار طبیعی مجازی P_0 را کاهش می‌دهند. از خازنهای موازی برای افزایش کاپاسیتانس خط در شرایط بار زیاد، استفاده می‌شود. اینها با تولید توان راکتیو موجب افزایش ولتاژ می‌گردند. امپدانس

1- Line - Length Compensation Or θ - Compensation

2- Compensation By Sectioning

3- Passive Compensator

4- Active Compensator

ضربه‌ای مجازی را کاهش و بار طبیعی P_0 را افزایش می‌دهند. از خازنهای سری در جبران طول خط استفاده می‌گردد. معمولاً خازنهای سری لزوماً همراه با جبران‌سازی امپدانس ضربه‌ای به کار گرفته می‌شوند و اینکار به کمک جبران‌کننده اکتیو عملی است.

جبران‌کننده‌های اکتیو معمولاً جبران‌کننده‌های موازی هستند که دارای این خصیصه هستند که قادرند ولتاژ را در ترمینال خودشان ثابت نگاهدارند. این عمل را با تولید یا جذب مقدار صحیح مورد نیاز توان راکتیو به منظور جبران تغییرات ولتاژ در نقطه اتصال، انجام می‌دهند. آنها معمولاً قادرند تغییرات سریع و پیوسته (بدون پله) را فراهم نمایند. کنترل آنها ممکن است ذاتی نظیر جبران‌کننده قابل اشباع و یا به وسیله یک سیستم کنترل نظیر کاندانسور سنکرون و جبران‌کننده‌های تایریستور کنترل، انجام گیرد.

جبران‌کننده‌های اکتیو در جبران امپدانس ضربه‌ای یا جبران با تقسیم‌بندی خط به کار برده می‌شوند. در روش جبران Z_0 ، این جبران‌کننده‌ها قادرند تمامی نقشی که خازنها و راکتورهای موازی ثابت دارند را ایفا نموده و علاوه بر این از امتیاز قابلیت تغییر پیوسته و پاسخ سریع نیز برخوردار باشند. در جبران با تقسیم‌بندی خط، مساله اساساً متفاوت است چه در آن تنها می‌توان از جبران‌کننده‌های اکتیو که قادرند به تغییرات کوچک ولتاژ یا توان پاسخ سریع بدهند و رفتار دینامیکی دارند، استفاده کرد. تمامی جبران‌کننده‌ها بجز راکتور قابل اشباع قادرند همچنین به عنوان جبران‌کننده‌های پاسیو عمل نمایند. در جدول ۴، طبقه‌بندی انواع اصلی جبران‌کننده‌ها بر طبق عملکرد معمولشان به طور خلاصه بیان گردیده است. (اغلب این جبران‌کننده‌ها تا نیمه ۱۹۲۰ پیشنهاد گردیده‌اند و بسیاری از آنها را می‌توان در مقاله E.F.W. Alexanderson یافت که او در سال ۱۹۲۵ کاربرد راکتور کنترل شده با تیراترون - که نشانه‌ای از به کار گرفتن جبران‌کننده تایریستور کنترل در آینده بود - را مورد بحث قرار داد).

سیستم‌های تحریک پاسخ سریع که در ماشین‌های سنکرون به کار گرفته می‌شوند همچنین یک اثر جبران‌کنندگی قوی و مهمی بر سیستم قدرت الکتریکی دارند. وقتی در هر یک از ژنراتورهای ابتدا و یا انتهای خط قرار می‌گیرند راکتانس سری موثر خط را تغییر داده و منجر به بهبود در کنترل ولتاژ و پایداری سیستم می‌گردند. اثر آنها کاهش دادن راکتانس سنکرون موثر ماشین به راکتانس گذرای X_d است.

جدول ۴

طبقه بندی جبران کننده ها بر حسب نوع و عملکرد آنها

عملکرد	پاسیو	اکتیو
جبران امپدانس ضربه ای (جبران Z_0 مجازی) کنترل ولتاژ و مدیریت توان راکتیو	راکتورهای موازی (خطی یا غیر خطی) خازنهای موازی	ماشین های سنکرون کندانسورهای سنکرون جبران کننده های راکتور قابل اشباع خازنهای تایریستور سوئیچ راکتورهای تایریستور کنترل
جبران طول الکتریکی خط (جبران θ - مجازی) و کنترل ولتاژ، مدیریت توان راکتیو، بهبود پایداری	خازنهای سری	کندانسورهای سنکرون جبران کننده های راکتور قابل اشباع خازنهای تایریستور سوئیچ راکتورهای تایریستور کنترل
جبران با تقسیم بندی خط جبران دینامیکی موازی، بهبود پایداری در خطوط طویل		

در کاربرد جبران توان راکتیو تا حد امکان بایستی ملاحظات اقتصادی را رعایت کرد. در بعضی موارد وارد کردن تغییرات در سیستم طراحی شده موجود (یا در دست طرح برای آینده) به منظور مدیریت توان راکتیو در مقایسه با نصب وسایل جبران کننده، روشی ارزان تر می باشد. به عنوان مثال، با وارد کردن سیگنالهای فیدبک در رگولاتور ولتاژ اتوماتیک^۱ ماشین های سنکرون می توان پایداری سیستم و توان انتقالی را افزایش داد. مثال دیگر اینکه خازنها و راکتورهای موازی می توانند پس از یک پریرود تغییر تکاملی در پاترن (الگوی) بار سیستم، دوباره جایابی شوند. البته معمولاً از وسایل جبران کننده استفاده می کنند زیرا ارزانترین راه برآورده کردن نیازمندی توان راکتیو است. بطور نمونه وقتی که راههای ممکن دیگر عبارت از افزایش تعداد خطوط انتقال، یا افزایش مقادیر نامی ژنراتورها، و یا افزایش سطح ولتاژ می باشد، از روش جبران سازی استفاده می شود.

کاربردهای دیگر جبران کننده ها در سیستم انتقال شامل مدیریت توان راکتیو عبوری از خطوط به منظور کاهش تلفات، مستهلک کردن نوسانات، فراهم کردن توان راکتیو مورد نیاز مبدل های dc می باشد. در این فصل به بررسی این موارد نخواهیم پرداخت.

امروزه جبران‌کننده‌های اکتیو و پاسیو هر دو مورد استفاده قرار می‌گیرند و روشهای Z_o - مجازی، θ - مجازی و جبران با تقسیم‌بندی خط، را شامل می‌شوند. گرچه اغلب مفاهیم اساسی سابقه طولانی دارند لیکن تلاشهای جدید خود قابل ملاحظه است. در زمینه توسعه وسایل جبران، تلاش و فعالیت بر روی کنترلر استاتیک توان راکتیو^{۱*} یا جبران‌کننده استاتیک متمرکز است تا بازده، قابلیت اعتماد و مشخصه‌های پاسخ آن را بهبود بخشند. در زمینه تحلیلی توجه به توسعه بهینه جبران‌کننده‌ها، امتیازات کاربرد طرح‌های جبران موازی و سری (در خطوط طویل) نسبت به یکدیگر، و مدل کردن جبران‌کننده‌ها بر روی کامپیوتر دیجیتال، معطوف می‌باشد.

در خلال بقیه بخش‌های این فصل تلاش در جهت ارائه تئوری جبران‌سازی انجام می‌گیرد که بر اساس آن نقش روشهای مختلف جبران‌سازی و کاربردهای آنها را می‌توان دریافت. برای مطالعه بیشتر منابع معرفی شده در انتهای فصل مفید خواهد بود.

۲-۳-۳ جبران‌سازی ثابت پخش شده یکنواخت^۲

پارامترهای تغییر یافته خط: Z_o ، θ مجازی و P_o . معمولاً جبران‌کننده‌ها در دو انتهای خط و یا در فواصل معین در طول خط نصب می‌شوند. علیرغم طبیعت متمرکز یا فشرده آنها، مفید است که روابط را برای حالت ایده‌آل جبران پخش شده یکنواخت بدست آوریم زیرا این روابط در عین حال ساده و مستقل از مشخصات نوع خاصی از جبران‌کننده خواهند بود. به علاوه یک دید فیزیکی خوبی را ارائه کرده و در تعیین ماهیت نوع جبران مورد لزوم کمک می‌نماید بدون آنکه نیازی به مطالعه گسترده کامپیوتری باشد. فرمولهای بدست آمده بطور تقریب در اغلب موارد برای سیستم‌های عملی با جبران متمرکز - به دلیل اینکه فاصله بین جبران‌کننده‌ها با همان عواملی که حداکثر طول خط جبران‌نشده را محدود می‌نمایند، محدود می‌گردد - قابل قبول است.

امپدانس ضربه‌ای Z_o خط جبران‌نشده را می‌توان به شکل زیر نوشت

$$Z_o = \sqrt{\frac{l}{c}} = \sqrt{\frac{j\omega l}{j\omega c}} = \sqrt{x_l x_c} \quad (53)$$

اگر L_{sh} (H/mi) را به عنوان اندوکتانس جبران موازی پخش شده یکنواخت در نظر بگیریم، مقدار

1- Static reactive power controller

* این کنترلر شامل راکتور تایریستور کنترل (TCR)، ترانسفورماتور تایریستور کنترل (TCT) و خازن تایریستور سویچ (TSC) و شکل‌های ترکیبی می‌باشد.

2- Uniformly distributed Fixed Compensation

موثر ادمیتانس کاپاسیتیو موازی در هر مایل برابر خواهد شد با

$$(j\omega c)' = j\omega c + \frac{1}{j\omega l_{ysh}} \\ = j\omega c(1 - k_{sh}) \quad (54)$$

که در آن k_{sh} درجه جبران‌کنندگی موازی است:

$$k_{sh} = \frac{1}{\omega^2 l_{ysh} c} = \frac{x_c}{x_{ysh}} = \frac{b_{ysh}}{b_c} \quad (55)$$

که در اینجا x_{ysh} و b_{ysh} راکتانس و سوسپتانس بر مایل اندوکتانس جبران‌کننده موازی است. با جایگزینی $(j\omega c)'$ در معادله ۵۳ امپدانس ضربه‌ای دارای مقدار موثر یا مجازی زیر می‌گردد:

$$Z_o' = \frac{Z_o}{\sqrt{1 - k_{sh}}} \quad (56)$$

اگر به جای اندوکتانس موازی، کاپاسیتانس موازی، c_{ysh} به شبکه افزوده شود، آنگاه k_{sh} منفی بوده و دارای مقدار زیر است:

$$k_{sh} = \frac{c_{ysh}}{c} = \frac{x_c}{x_{ysh}} = \frac{b_{ysh}}{b_c} \quad (57)$$

که در آن x_{sh} و b_{sh} راکتانس و سوسپتانس بر مایل کاپاسیتانس جبران‌کننده موازی است. بنابراین جبران اندوکتیو موازی، امپدانس ضربه‌ای مجازی را افزایش می‌دهد، در صورتی که جبران کاپاسیتیو موازی آن را کاهش می‌دهد.

به روش مشابه می‌توان اثر خازن سری پخش شده یکنواخت c_{yse} را نشان داد که در این صورت داریم:

$$Z_o' = Z_o \sqrt{1 - k_{se}} \quad (58)$$

که در آن k_{se} درجه جبران‌کنندگی سری است و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$k_{se} = \frac{1}{\omega^2 c_{yse} x_1} = \frac{x_{yse}}{x_1} = \frac{b_1}{b_{yse}} \quad (59)$$

x_{yse} و b_{yse} راکتانس و سوسپتانس بر مایل کاپاسیتانس جبران‌کننده سری است. پارامترهای k_{sh} و k_{se} در تعیین مقدار نامی توان راکتیو جبران‌کننده‌ها مفید هستند.

با ترکیب اثر جبران موازی و سری داریم

$$Z_o' = Z_o \sqrt{\frac{1 - k_{se}}{1 - k_{sh}}} \quad (60)$$

و بار طبیعی مجازی مربوط به چنین امپدانس ضربه‌ای مجازی، برابر خواهد بود با P_o' که از رابطه

V_o^2 / Z_o' داریم:

$$P_o' = P_o \sqrt{\frac{1 - k_{sh}}{1 - k_{se}}} \quad (61)$$

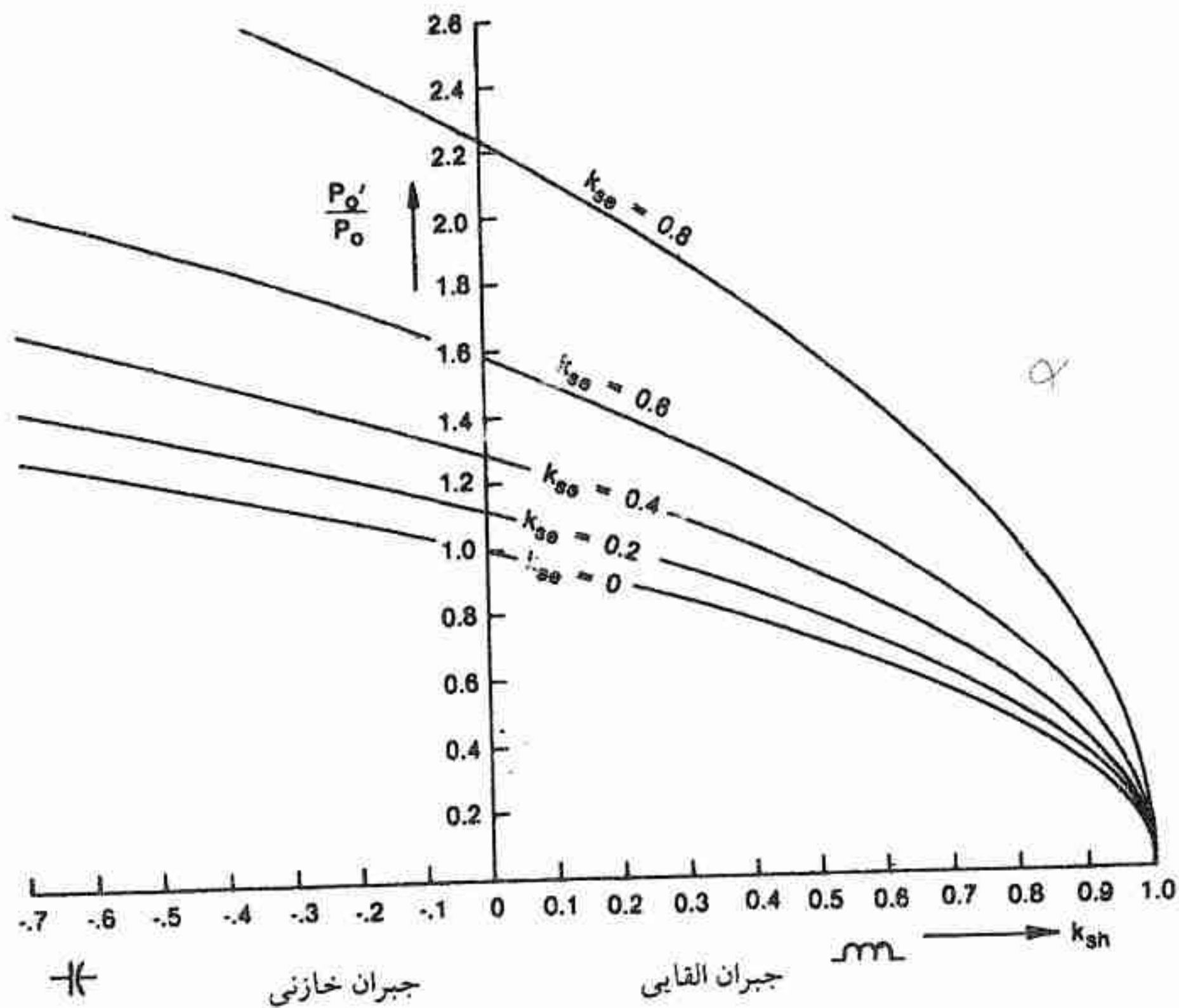
تعداد موج β' نیز تغییر یافته و دارای مقدار مجازی زیر خواهد بود

$$\beta' = \beta \sqrt{(1 - k_{sh})(1 - k_{se})} \quad (62)$$

طول الکتریکی θ همچنین طبق معادله زیر تغییر می یابد

$$\theta' = \theta \sqrt{(1 - k_{sh})(1 - k_{se})} \quad (63)$$

که در آن $\theta = a\beta$ و $\theta' = a\beta'$ است. این روابط بصورت ترسیمی در اشکال ۱۶، ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است.

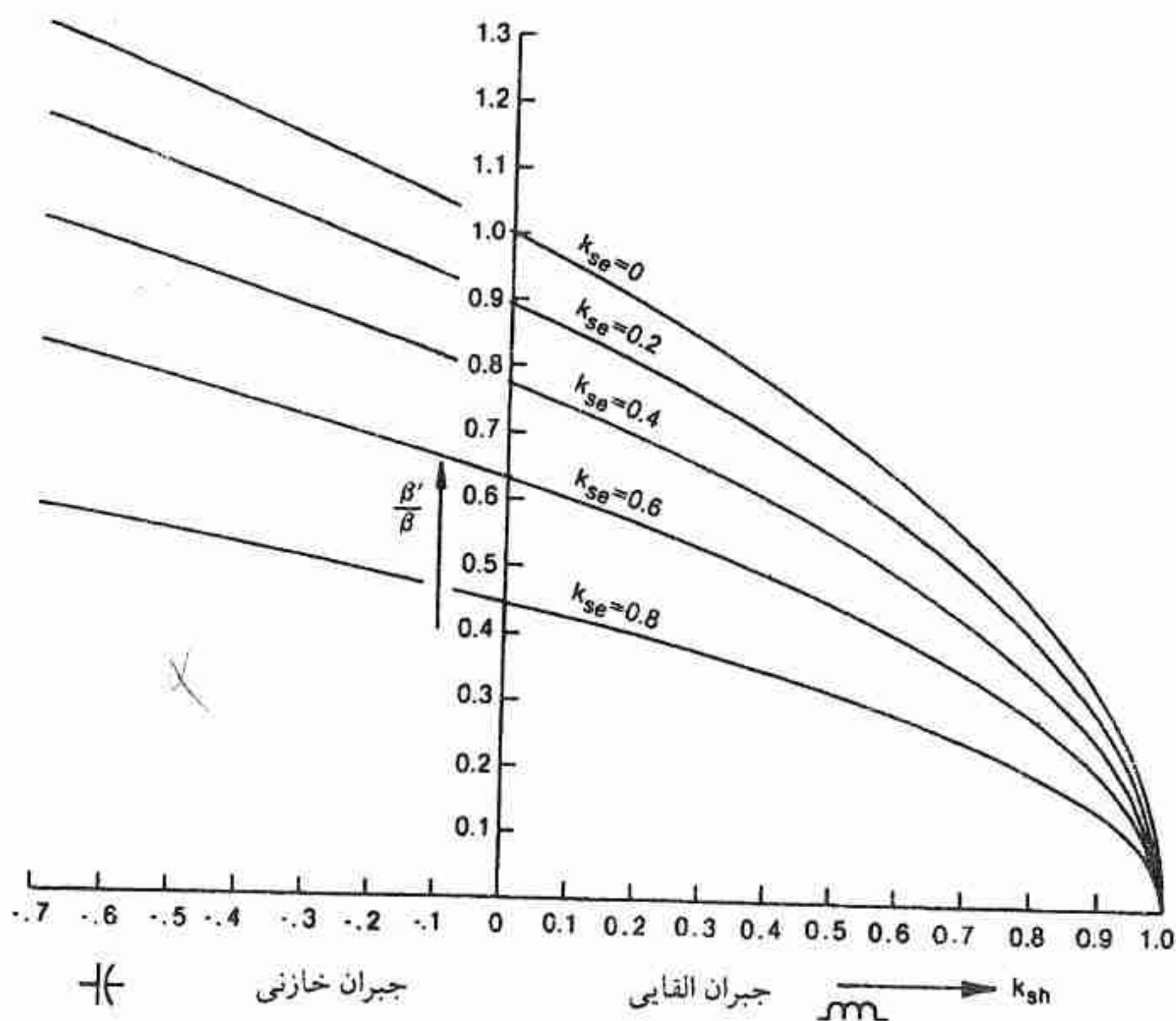


شکل ۱۷ - بار طبیعی مجازی P_o' بصورت تابعی از k_{sh} و k_{se}

تمامی معادلات بخش ۲-۲ برای خط با جبران پخش شده یکنواخت معتبر خواهد بود در

صورتی که امپدانس ضربه‌ای مجازی Z_o' و تعداد موج مجازی β' (یا $\theta' = a\beta'$) با مقادیر جبران نشده جایگزین گردد. به این معنا که مثلاً می‌توان از شکل ۱۱ برای تعیین ولتاژ میانی خط جبران شده تحت بار، از معادله ۳۷ برای تعیین حداکثر توان قابل انتقال و زاویه بار، و از معادله ۲۹ برای تعیین توان راکتیو مورد نیاز ابتدا و انتهای خط، استفاده کرد.

اثر جبران پخش شده بر کنترل ولتاژ - برای هر مقدار ثابت جبران سری، جبران موازی خازنی اضافی موجب افزایش θ' و P_o' و کاهش Z_o' می‌گردد و حال آنکه جبران موازی القایی اضافی اثر معکوس دارد. جبران موازی القایی ۱۰۰٪ (یعنی $k_{sh} = 1$) θ' و P_o' را به صفر تقلیل و Z_o' را به بی‌نهایت افزایش می‌دهد و این یک پروفایل ولتاژ مسطح را در بار صفر ایجاد نموده و بکار گرفتن راکتورهای موازی به منظور حذف اثر فرانتی را توصیه می‌نماید. در شرایط بار زیاد، پروفایل ولتاژ مسطح با به کار گرفتن خازنهای موازی به جای راکتور حاصل می‌شود. به عنوان مثال، اگر بخواهیم



شکل ۱۸ - تعداد موج مجازی β'/β بصورت تابعی از k_{sh} و k_{se} (جبران پخش شده یکنواخت)

توان P_0 را انتقال داده و پروفایل ولتاژ مسطح داشته باشیم و اگر خازنهای سری موجود نباشد ($k_{se} = 0$) به 0.45 pu جبران خازنی موازی پخش شده نیاز داریم، (از شکل ۱۷) یعنی $K_{sh} = -0.45$

اثر جبران خازنی سری ($k_{se} > 0$) کاهش Z_0 و θ' و افزایش P_0 می باشد. اصولاً جبران خازنی سری را می توان به جای خازنهای موازی به کار گرفت تا در شرایط بار زیاد پروفایل ولتاژ مسطح را ایجاد نمود. به عنوان مثال، اگر بخواهیم توان P_0 را انتقال داده و ولتاژ مسطح داشته باشیم و اگر جبران موازی نداشته باشیم ($k_{sh} = 0$) مطابق شکل ۱۷ به 0.30 pu جبران سری پخش شده نیاز مدیم، یعنی $k_{se} = 0.3$ است. در واقع بواسطه ماهیت متمرکز خازنهای سری، برای کنترل ولتاژ مناسب نخواهند بود. موارد استعمال طبیعی آنها در تثبیت ولتاژ با کاهش طول خط مجازی θ' است. در حالت بی باری ولتاژ میانی خط متقارن جبران شده توسط معادله ۱۸ بدست می آید:

$$V_m = \frac{E_s}{\cos \theta' / 2} \quad (64)$$

ملاحظه می شود که از طریق اثر بر روی θ' ، جبران پخش شده خازنی سری و القایی موازی هر دو باعث کاهش اضافه ولتاژ فرانتی می گردند در صورتی که جبران خازنی موازی باعث افزایش اضافه ولتاژ فرانتی می گردد.

اثر جبران پخش شده بر روی توان راکتیو بارگیری خط - در حالت بی باری توان راکتیو بارگیری خط که بایستی توسط ماشین های سنکرون ترمینال جذب شود با رابطه زیر بدست می آید

$$Q_s = -P_0' \operatorname{tg} \theta' \quad \text{برای خط شعاعی} \quad (65)$$

$$Q_s = -P_0' \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} = -Q_r \quad \text{برای خط متقارن} \quad (66)$$

وقتی خط به میزان قابل ملاحظه ای به روش جبران خازنی سری و یا القایی موازی جبران می شود θ' مقدارش آنقدر کوچک است که $\operatorname{tg} \theta' \approx \theta'$ و $\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \approx \frac{\theta}{2}$ خواهد بود. حال اگر P_0' و θ' از معادلات ۶۱ و ۶۳ در معادله ۶۶ جایگزین شوند، فاکتور $\sqrt{1 - k_{se}}$ حذف شده و برای خط متقارن داریم

$$Q_s = -\frac{P_0 \theta}{2} (1 - k_{sh}) = -Q_r \quad (67)$$

در غیاب جبران القایی موازی ($k_{sh} = 0$) توان راکتیو بارگیری تولید شده توسط خط جبران شده سری در حالت بی باری، تقریباً با توان راکتیو بارگیری خط کاملاً جبران نشده با طول یکسان، برابر است. اگر خط آنقدر طویل است که در وهله اول جبران سری را ایجاد می نماید، در آن صورت در شرایط بی باری نیاز است که در ترمینال ماشین های سنکرون توان راکتیو اضافی جذب گردد. به علاوه

عملکرد زیر تحریک ماشین‌های سنکرون در بارهای زیاد پایداری را - که خازنها قصد افزایش آن را داشته‌اند - کاهش می‌دهد. این مساله را می‌توان با اعمال جبران القایی موازی اضافی مرتفع کرد (به معادله ۶۷ مراجعه شود). طرح‌های جبران سری ضرورتاً همواره با کندانسورهای سنکرون و یا راکتورهای موازی برای همین منظور توأم است. به جای کندانسورهای سنکرون و یا راکتورهای موازی برای همین منظور توأم است. بجای کندانسورهای سنکرون همچنین می‌توان از کنترلرهای توان راکتیو استاتیک که از مزیت برخوردارند، استفاده کرد.

اثر جبران پخش شده بر روی حداکثر توان انتقالی - معادله انتقال توان ۳۷ را می‌توان به طور تقریب به صورت زیر نوشت

$$P \cong P'_0 \frac{\delta}{\theta} \quad (68)$$

وقتی $P = P'_0$ ، $\delta = \theta$ و معادله کاملاً صحیح است. اولین هدف کلی از یک طرح جبران، تولید حداکثر مقدار برای P'_0 است یعنی سطح توان انتقالی که در آن پرو فایل ولتاژ مسطح باشد. اگر سیستم در توان P نزدیک به P'_0 کار می‌کند ضرورتاً δ نزدیک به θ خواهد بود. حال طرح جبران هدف دومی را نیز بایستی کسب نماید و آن اینکه θ آنقدر کوچک باشد که انتقال توان در حالت پایدار صورت گیرد، یعنی، P خیلی نزدیک به حد پایداری ماندگار نباشد. این اهداف به عنوان نیازمندیهای اساسی سیستم انتقال (در بخش ۲-۱-۲) خاطر نشان گردید.

در شکل ۱۷ یک مقدار P'_0 بالایی را می‌توان برای حالت جبران خازن سری و یا جبران خازنی موازی بدست آورد، از طرف دیگر، با استفاده از خازنهای سری و یا جبران موازی القایی می‌توان یک مقدار کوچکی از β' (و θ') را بدست آورد (شکل ۱۸). البته جبران خازنی سری در هر دو هدف نقش دارد.

البته در تمام خطوطی که نیاز به جبران سازی دارند لازم نیست هر دو هدف برآورده شود. خطوط کوتاه نیاز به حمایت ولتاژ و در نتیجه افزایش توان P'_0 دارند گرچه طول الکتریکی آنها خیلی کمتر از ۹۰ درجه است، و اینکار به کمک خازنهای موازی انجام می‌گیرد مشروط به اینکه منجر به افزایش زیاد θ نگردد. خطوط جبران شده موازی که طولشان از ۲۰۰ mi تجاوز نمی‌کند عموماً بیش از مقدار بار طبیعی جبران نشده بارگیری می‌شوند. از طرف دیگر، خطوط طویل تر از ۵۰۰ - ۳۰۰ - به دلیل طول الکتریکی جبران نشده زیادشان - نمی‌توانند حتی در مقدار بار طبیعی شان بارگیری شوند. در اینگونه موارد کاهش θ در اولویت قرار دارد.

اثر جبران پخش شده یکنواخت بر روی توان انتقالی ماکزیمم (یعنی حد پایداری ماندگار) توسط

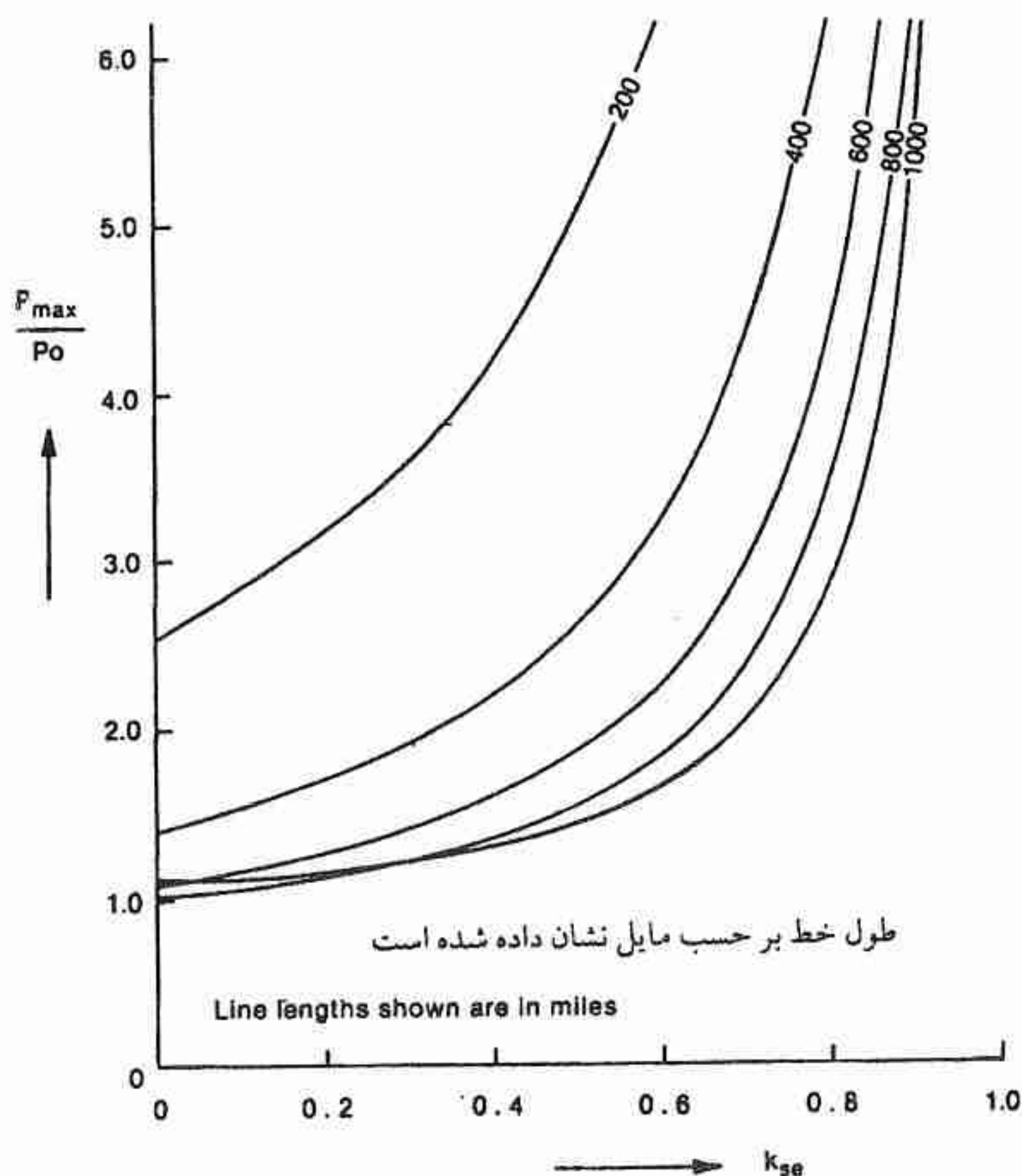
معادله ۳۷ به شرح زیر تعیین می‌گردد. اگر ولتاژ ترمینالها در مقدار V_o ثابت نگاهداشته شود، توان ماگزیمم از رابطه زیر بدست می‌آید

$$P'_{\max} = \frac{V_o^2}{Z_o \sin \theta'} \quad (69)$$

با ترکیب این معادله با معادلات ۸، ۶۱ و ۶۳ خواهیم داشت:

$$\frac{P'_{\max}}{P_o} = \frac{1}{\sqrt{\frac{(1-k_{se})}{(1-k_{sh})}} \sin [\theta \sqrt{(1-k_{se})(1-k_{sh})}]} \quad (70)$$

این معادله نشان می‌دهد که اثر یک درجه معینی از جبران سری بر روی P'_{\max} بیش از اثر همان مقدار جبران موازی بر روی P'_{\max} است زیرا فاکتورهای $(1-k_{sh})$ موجود در مخرج کسر اثرات مخالف ایجاد می‌نماید. این موضوع با مثالهای عددی تایید می‌گردد. اثر جبران سری به تنهایی



شکل ۱۹ - اثر جبران سری بر روی حداکثر توان قابل انتقال (جبران موازی وجود ندارد)

($k_{sh}=0$) در شکل ۱۹ نشان داده شده است که در آن P'_{max} / P_0 تابعی از k_{se} برای طولهای مختلف رسم شده است. برای مقادیر بزرگتر k_{se} ($k_{se} > 0.5$)، بهبود قابل توجهی در P'_{max} / P_0 حاصل شده است. مقادیر زیاد k_{se} می تواند منجر به مساله رزونانس گردد و در عمل به ندرت $k_{se} > 0.8$ است.

نحوه استفاده از اشکال ۱۶ الی ۱۹ و معادلات مربوطه طی مثالی در ذیل تشریح می گردد. یک خط به طول ۶۰۰ mi دارای مقادیر جبران نشده $\theta = 69/7^\circ$ ، $P_{max} = 1/0.66 P_0$ است. بار طبیعی آن خیلی نزدیک به حد پایداری بوده و قابل قبول نمی باشد. اگر خط در زاویه انتقال $\delta = 30^\circ$ کار کند توان انتقالی نبایستی از نصف بار طبیعی تجاوز نماید. با $P = 0.5 P_0$ معادله ۳۲ نشان می دهد که اگر چنانچه بخواهیم ولتاژ نقطه میانی را در ۱ pu نگاهداریم ولتاژ ترمینالها بایستی برابر $E_s = E_r = 0.869$ pu باشند. این ولتاژها خیلی کم بوده و غیر قابل قبول می باشند. به علاوه با توجه به معادله ۳۱ ماشینهای سنکرون ترمینالها بایستی به ازاء هر kW توان انتقالی ۰/۷۰۴ KVAR توان راکتیو بارگیری خط (توان شارژ خط) را جذب نمایند و در نتیجه در ضریب توان پیش فاز (زیر تحریک) ۰/۸۱۸ کار می کنند. با وجود ۸۰٪ جبران سری از شکل ۱۹ داریم $P'_{max} = 4/321 P_0$ ، از شکل ۱۸ داریم $\theta = 31/2^\circ$ ، $\theta' = 0/447$ و از شکل ۱۷ داریم $P'_0 = 2/236 P_0$. حال اگر توان انتقالی برابر با بار طبیعی مجازی P'_0 باشد زاویه انتقال برابر است با

$$\sin^{-1} (P'_0 / P'_{max}) = \sin^{-1} (2/236 / 4/321) = 31/2^\circ = \theta'$$

و پروفایل ولتاژ مسطح خواهد بود. ضریب توان ترمینالها برابر یک بوده و نیازی نیست که در آنها توان راکتیو تزریق و یا جذب گردد. و این یک بهبود قابل توجهی است که در مشخصه توان انتقالی خط حاصل می شود.

در حالت بی باری ولتاژ نقطه میانی این خط به مقدار ۱/۲۱۸ pu (معادله ۱۸) افزایش می یابد. با وجود جبران سری ولتاژ نقطه میانی تا مقدار ۱/۰۳۸ pu افزایش می یابد. راکتانس داخلی ماشینهای سنکرون ترمینال موجب می شود که این ولتاژ بیشتر افزایش یابد و شایسته است که با به کار گرفتن راکتورهای موازی چنین اضافه ولتاژی را محدود نمود که در این صورت علاوه بر محدود کردن ولتاژ، همچنین می توان ژنراتورها را از جذب بخشی از توان راکتیو آزاد کرد. با افزودن راکتانس موازی پخش شده یکنواخت $k_{sh} = 0.5$ ، $\theta' = 22^\circ$ ، $P'_0 = 1/581 P_0$ و P'_{max} برابر خواهد شد با $4/214 P_0$. حداکثر توان انتقالی از این جبران راکتیو موازی چندان تاثیری نمی پذیرد، لیکن بار طبیعی مجازی و در نتیجه طول الکتریکی به طور قابل ملاحظه ای کاهش یافته است. در بار

طبیعی مجازی زاویه انتقال میانی برابر $22/0^\circ$ است و ولتاژ نقطه مبانی در حالت بی‌باری برابر $1/019 \text{ pu}$ است که با خط متقارن جبران نشده به طول 190 mi قابل مقایسه است.

بطور ایده‌آل خوب است که یک خط به طریقی جبران شود که بار واقعی برابر با بار طبیعی مجازی P_o^* باشد. همانطوری که قبلاً خاطر نشان شد به منظور ارزیابی پایداری مفید است که کسر P_{\max}^*/P_o^* برای خط جبران شده محاسبه گردد، با توجه به معادلات ۷۰ و ۶۱ این کسر برابر است با

$$\frac{P_{\max}^*}{P_o^*} = \frac{1}{\sin [\theta \sqrt{(1 - k_{se})(1 - k_{sh})}]} \quad (71)$$

اثر جبران‌سازی بهبود کسر P_{\max}^*/P_o^* یعنی کاهش زاویه انتقال در بار طبیعی مجازی است. نتیجه مشابهی را می‌توان از شکل ۱۸ بدست آورد زیرا در بار طبیعی مجازی $\delta = \theta = \beta a$ است. یک حالت خاص وقتی پیش می‌آید که $k_{sh} = 1$ است یعنی خط با جبران راکتیو موازی 100% ، جبران می‌شود. معادله ۷۰ به صورت زیر تقلیل می‌یابد

$$\frac{P_{\max}^*}{P_o^*} = \frac{1}{\theta (1 - k_{se})} \quad (72)$$

این رابطه چندان با شکل ۱۹ تفاوت ندارد. مجدداً، ماکزیمم توان انتقالی چندان از جبران موازی متاثر نمی‌شود. البته با $k_{sh} = 1$ ، $P_o^* = 0$ ، یعنی پرو فایل ولتاژ مسطح فقط در بار صفر ایجاد می‌شود. خط جبران شده توسط جبران‌کننده موازی 100% دقیقاً مشابه راکتانس یا اندوکتانس سری $X_1 = \omega l$ رفتار می‌کند. با جبران (خازنی) سری راکتانس به مقدار $X_1' = X_1 (1 - k_{se})$ تغییر می‌یابد.

۲-۳-۴ جبران موازی قابل تنظیم پخش شده یکنواخت^۱

در این بخش تئوری جبران موازی قابل تنظیم پخش شده یکنواخت که یک سیستم جبران ایده‌آل است ارائه می‌گردد و در عمل نزدیکترین روش جبران به این سیستم جبران ایده‌آل، روش جبران با تقسیم‌بندی خط است که در بخش ۲-۶ توصیف می‌شود.

خطی که در بار طبیعی کار می‌کند دارای پرو فایل ولتاژ مسطح است، و با توجه به معادله ۳۹ زاویه انتقال با طول الکتریکی خط برابر است یعنی $\delta = \theta$ است. اگر فقط جبران موازی را در نظر بگیریم ($k_{se} = 0$) فرض کنید که k_{sh} بتواند بطور مداوم به $P_o^* = P$ تنظیم شود که همواره برقرار باشد، (به معادله ۶۱ مراجعه شود). در نتیجه همواره

بنابراین،

$$\frac{P}{\delta} = \frac{P_o}{\theta'} \quad (73)$$

با قراردادن مقادیر P_o و θ' از معادله ۶۱ و ۶۳ در این معادله داریم

$$\frac{P}{\delta} = \frac{P_o \sqrt{1 - k_{sh}}}{\theta \sqrt{1 - k_{sh}}} = \frac{P_o}{\theta} = \text{ثابت} \quad (74)$$

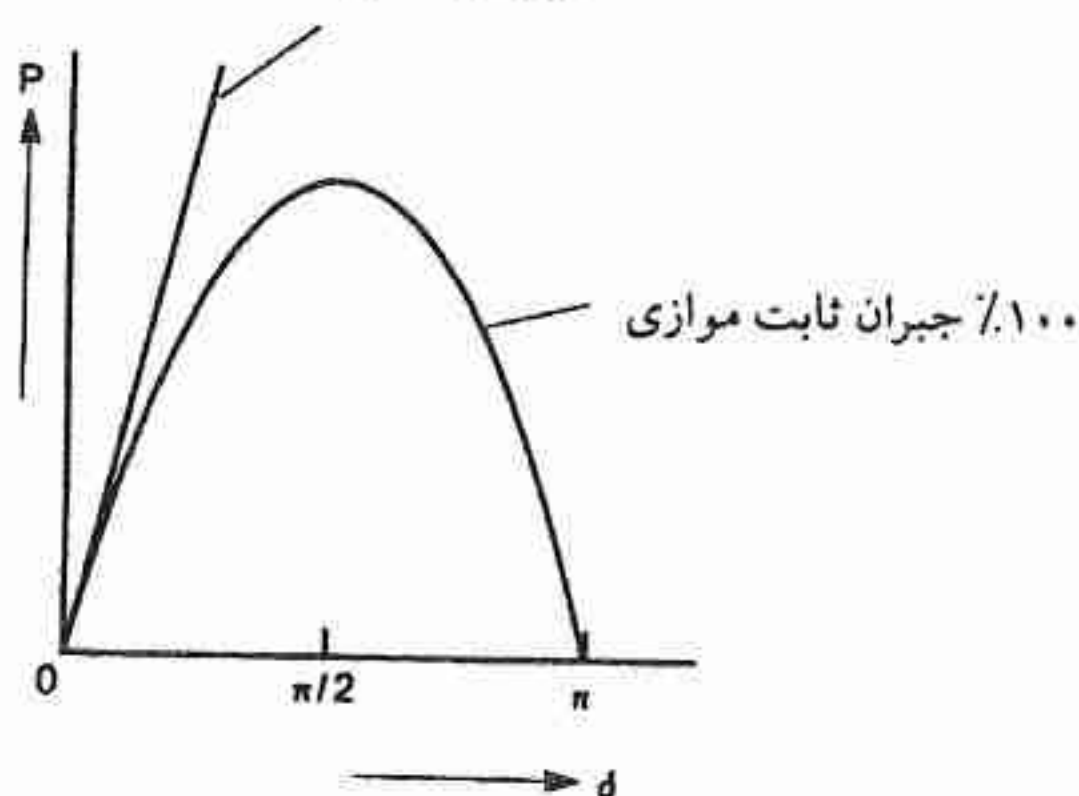
این معادله رابطه خطی بین P و δ را مطابق شکل ۲۰ الف ایجاب و حداکثر توان انتقالی بی نهایت را پیشنهاد می کند. ثابت معادله ۷۴ عبارتند از شیب مشخصه $P - \delta$ و از رابطه زیر بدست می آید

$$\frac{P_o}{\theta} = \frac{V_o^2}{Z_o \beta a} = \frac{V_o^2}{X_1} \quad (75)$$

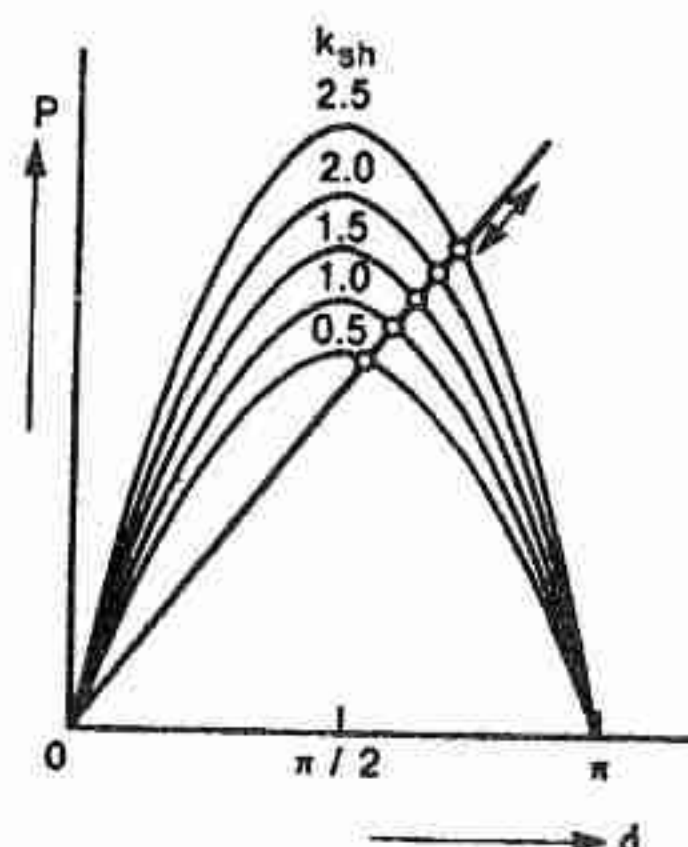
بنابراین در توان صفر، خط $P - \delta$ بر مشخصه سینوسی $P - \delta$ خط جبران شده (که با جبران کننده موازی ثابت به میزان ۱۰۰٪ جبران شده است $k_{sh} = 1$)، مماس می باشد.

رفتار جبران موازی قابل تنظیم را می توان به کمک شکل ۲۰ ب بیشتر درک کرد. برای هر مقدار ثابت k_{sh} یک منحنی سینوسی $P - \delta$ با حداکثر توان P_{max}' که از معادله ۶۹ با $k_{se} = 0$ بدست می آید، وجود دارد. تعدادی از این منحنی ها در شکل ۲۰ ب رسم شده است. وقتی که توان تغییر می کند مکانیزم تنظیم کننده (به هر شکلی باشد) k_{sh} را تنظیم می کند طوری که نقطه کار بطور مداوم از یک منحنی به منحنی دیگر شیفست می نماید به طریقی که همواره بر روی خط مستقیم با شیب مثبت قرار می گیرد.

جبران موازی تنظیم شده که همواره
 $P_o' = P$ را ایجاد می کند



(الف)



(ب)

شکل ۲۰- (الف) اثر جبران موازی تنظیم شده بر مشخصه توانهای انتقالی (ب) ترکیب شکل ۲۰ الف با منحنی های k_{sh}

درک این مطلب ضروری است که در زوایای انتقال بزرگ در صورتی پایداری حفظ می شود که k_{sh} بتواند با سرعت کافی تغییر نماید تا با هر تغییری که در P رخ خواهد داد برابری نماید. اگر k_{sh} به کندی تغییر نماید یک تغییر سریع در P منجر می شود که نقطه کار بر روی منحنی $P - \delta$ مربوط به مقدار جاری k_{sh} ، حرکت نماید و اگر $\delta > \pi/2$ رادیان باشد سیستم پایدار نخواهد بود. خطی که با جبران موازی قابل تنظیم ایده آل جبران شود، گفته می شود که خط بطور دینامیکی تثبیت^۲ می گردد. تنظیم k_{sh} نه تنها بایستی بقدر کافی سریع باشد بلکه بایستی پیوسته باشد. وجود هر نوع «لختی»^۳ یا «باند آزاد یا بدون واکنش»^۴ در پاسخ k_{sh} نسبت به تغییرات P ، منجر می شود که نقطه کار بر روی منحنی سینوسی $P - \delta$ «جاری» حرکت کند و آنگاه که جبران کننده عکس العمل نشان می دهد، بایستی تصحیح مجدد انجام گیرد.

معادلاتی که تاکنون بکار برده شدند در عمل در نحوه محقق ساختن چنین جبران کننده ای پیشنهادی را ارائه نمی کنند. در عمل وسایل جبران کننده به صورت پخش شده یکنواخت نمی باشند بلکه به صورت متمرکز به فواصل معین در طول خط قرار دارند. ساده ترین و شاید عملی ترین روش کنترل جبران کننده این است که به جای کنترل مستقیم k_{sh} جبران کننده را به صورت رگولاتور ولتاژ ثابت^۵ طراحی نمائیم زیرا در این صورت ولتاژ بطور دائم در چندین نقطه در طول خط در مقدار V_o ثابت نگاهداشته می شود و در نتیجه قطع نظر از مقدار P شرایط $P_o = P'$ بطور اتوماتیک برقرار می گردد. چنین جبران کننده های ولتاژ - ثابت، جبران کننده های اکتیو بوده و می توانند از نوع کندانسور سنکرون، جبران کننده راکتور قابل اشباع یا جبران کننده تائریستور کنترل باشند.

توان راکتیو مورد نیاز جبران کننده - کل توان راکتیوی که جبران کننده بایستی جذب و یا تحویل نماید را می توان به سهولت محاسبه کرد زیرا ولتاژ خط ثابت است. مقدار آن توسط معادله زیر بدست می آید

$$Q_y = -(I\omega l - V\omega c)a = P_o \theta \left[1 - \left(\frac{P}{P_o} \right)^2 \right] \quad (76)$$

این معادله را همچنین می توان برحسب مقدار جاری k_{sh} نوشت. از معادلات ۷۶ و ۶۱ با $K_{se} = 0$ و $P = P_o$ داریم

$$Q_y = P_o \theta k_{sh} \quad (77)$$

1- Current Value

4- Dead Band

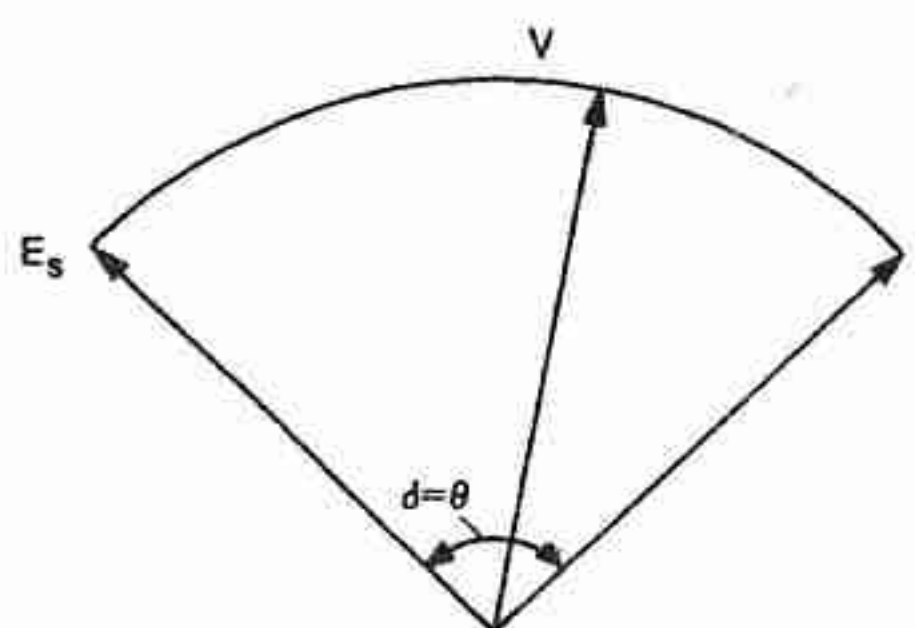
2- Dynamically Stabilized

5- Constant Voltage Regulator

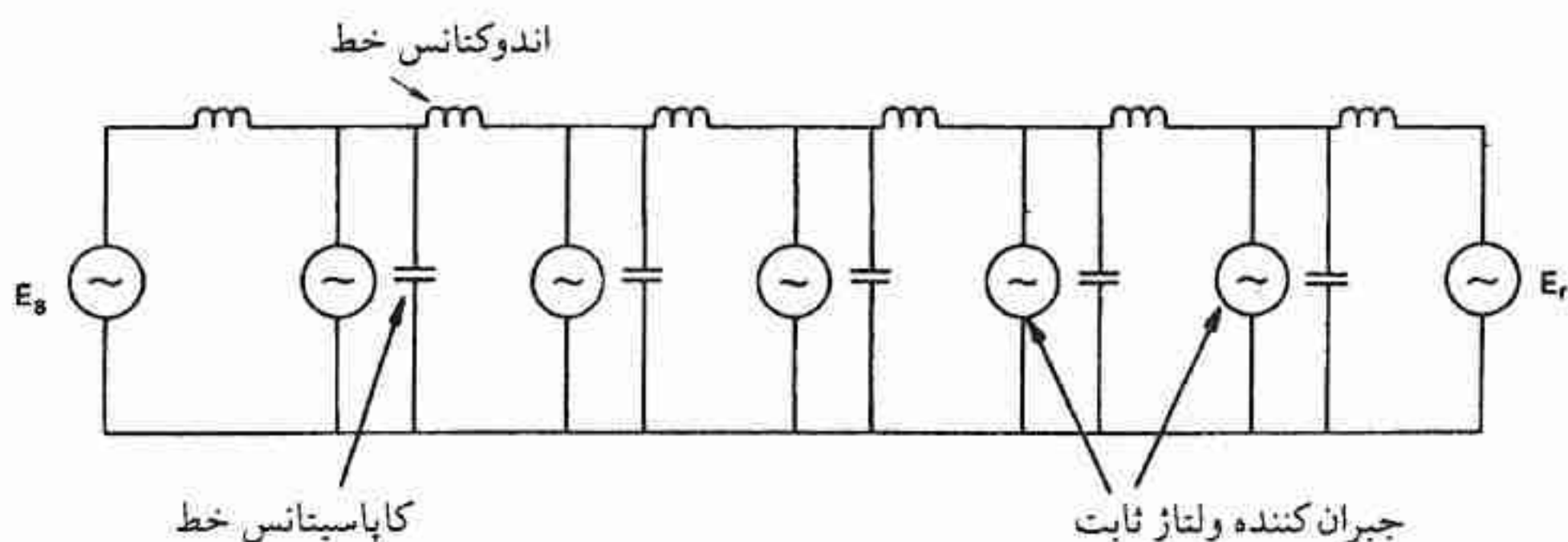
3- Slack

این معادله همچنین برای جبران ثابت در صورت برقراری $P = P'$ قابل قبول است. توان راکتیو مورد لزوم کاپاسیتیو است اگر چنانچه $P > P'$ باشد و مقدارش با مجذور توان انتقالی افزایش می‌یابد. یک سطح معینی از توان انتقالی وجود دارد که برای انتقال توان بیش از آن سطح فراهم کردن توان راکتیو مورد نیاز غیراقتصادی خواهد بود و برای انتقال این سطح توان لازم است که راههای دیگر (نظیر انتقال در ولتاژ بالاتر، استفاده از جبران سری علاوه بر جبران موازی، یا استفاده از انتقال توان به وسیله ولتاژ بالای جریان مستقیم HVDC) را مورد نظر قرار داد. محدودیت‌های عملی دیگری نیز در رفتار جبران‌کننده موازی قابل تنظیم وجود دارد. یکی از آنها سرعت پاسخ جبران‌کننده‌ها است. مساله دوم این است که اگر چنانچه جبران‌کننده عمل تنظیم‌کنندگی خود را از دست بدهد (و یا اینکه اگر جبران‌کننده به حد توان راکتیو خود برسد و به عنوان سوسپتانس موازی ثابت به کارش ادامه دهد) پایداری کل سیستم شدیداً مورد خطر قرار خواهد گرفت. شاید بیشترین محدودیت این است که مشخصه دینامیکی تنها وقتی که وسیله جبران‌کننده در محدوده جریان نامی کاپاسیتیو خود قرار دارد، خط مستقیم است. برای اینکه مشخصه انتقال را به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود داده و

در نقطه میانی



شکل ۲۱ - دیاگرام فازور خط که با جبران موازی بخش شده یکنواخت و قابل تنظیم، جبران شده است.



شکل ۲۲ - مدار معادل تقریبی خطی که با جبران موازی بخش شده یکنواخت، جبران شده است.

در عین حال مارجین پایداری در مقدار مناسبی حفظ گردد، به مقدار زیادی کاپاسیتانس جبران‌کننده نیاز داریم (به بخش ۲-۶ مراجعه شود).

دیاگرام فازور سیستم همراه با جبران‌کننده موازی قابل تنظیم که در اشکال ۲۱ و ۲۲ نشان داده شده است یک مدار معادل متمرکز تقریبی است.

ذکر این نکته جالب است که مفهوم جبران موازی پخش شده در سال ۱۹۲۱ توسط F.G.Baun به عنوان وسیله‌ای برای تثبیت ولتاژ در طول خط طویل پیشنهاد گردید، اما در آن زمان مساله پایداری کاملاً درک نشده بود و بنابراین از ماهیت دینامیک جبران‌کننده ذکر به میان نیامده بود. جبران‌کننده‌های Baum از نوع کندانسورهای سنکرون بودند. یک خط جبران شده دینامیکی واقعی تا نیم قرن بعد ساخته نشده بود. بزرگترین آنها طرح انتقال ۷۳۵ کیلو ولت James Bay بین James Bay و Montreal ، Quebec ، کانادا بود.

۲-۴ جبران موازی پاسیو

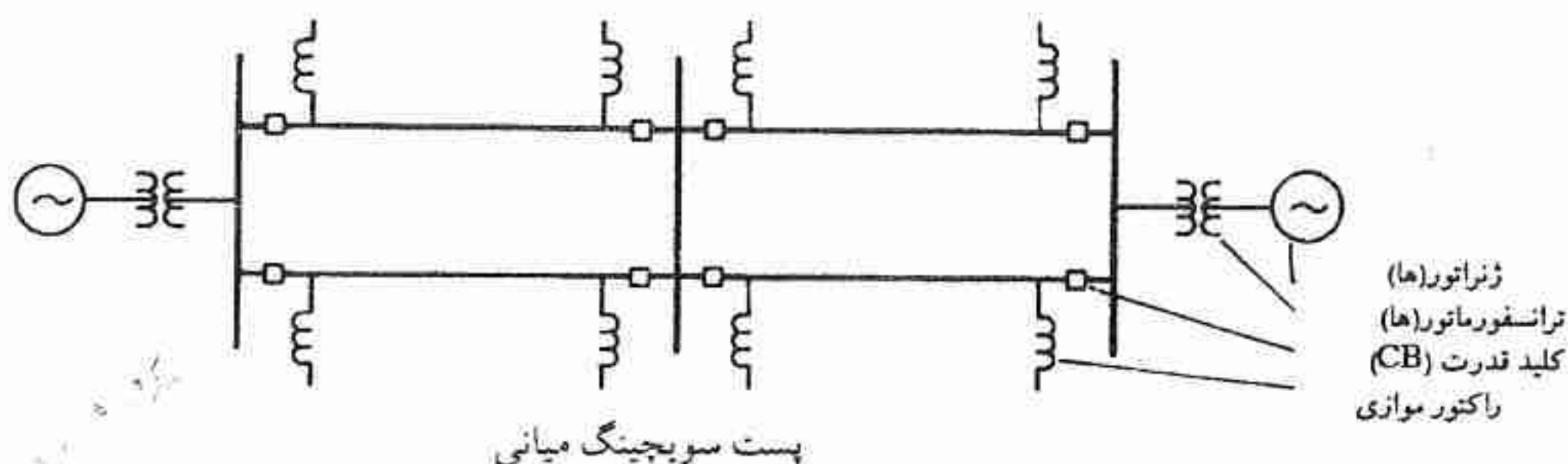
۲-۴-۱ کنترل ولتاژ مدار باز با استفاده از راکتورهای موازی

جبران‌کننده با راکتورهای موازی، امپدانس ضربه‌ای مجازی را افزایش (شکل ۱۶) و بار طبیعی مجازی، یعنی باری که در آن پروفایل ولتاژ مسطح حاصل می‌شود، را کاهش می‌دهد. با $k_{sh} = 1$ پروفایل ولتاژ در حالت بی‌باری (یا مدار باز) مسطح است.

در عمل راکتورهای موازی نمی‌توانند به طور یکنواخت در طول خط پخش شوند. آنها در ابتدا و انتهای خط و در نقطه میانی خط - معمولاً در پست‌های سویچینگ^۱ میانی - متصل می‌گردند. یک ترتیب قرار گرفتن آنها برای یک خط دو مداره^۲ در شکل ۲۳ نشان داده شده است. در یک خط شعاعی طویل پست‌های کلیدزنی^۳ در فواصل بین ۵۰ مایل و ۲۵۰ مایل قرار می‌گیرند.

در خطوط بسیار طویل حداقل تعدادی راکتورهای موازی بطور دائم به خط متصل می‌شوند (مطابق شکل ۲۳) تا اینکه حداکثر ایمنی را در مقابل اضافه ولتاژ ناشی از قطع ناگهانی بار و یا باز شدن خط، فراهم نمایند. در خطوط کوتاه‌تر و یا قسمتی از خطوط که بین راکتورهای سوئیچ نشده قرار دارند، مساله اضافه ولتاژ از شدت کمتری برخوردار است و راکتورها را می‌توان بطور مکرر به مدار متصل نمود تا ساعت به ساعت به موازات تغییرات بار، توان راکتیو را تنظیم نمایند. خازنهای

موازی معمولاً به مدار سوئیچ می‌شوند. در صورت وقوع ناگهانی بار^۱ یا باز شدن خط، بایستی آنها را به سرعت از مدار قطع نمود تا از افزایش بیشتر ولتاژ ممانعت نموده و احتمال وقوع فرورزونانس - در جایی که ترانسفورماتورها در مدار قرار دارند - کاهش داده شود.



شکل ۲۳ - نحوه قرار گرفتن راکتورها بر روی خط انتقال ac طولی و لتاز بالا

مقادیر راکتانس مورد نیاز راکتورهای موازی - محاسبه مقادیر نامی بهینه خازنها و راکتورهای موازی و نقاط اتصال آنها عموماً به کمک مطالعات پخش بار، با در نظر گرفتن تمامی پیکربندیهای^۲ ممکن سیستم، انجام می‌گیرد^۳. با وجود این ارائه یک روش ساده برای یک خط، آموزنده خواهد بود. مدار ساده شکل ۲۴ را در نظر بگیرید که در آن یک راکتور موازی با راکتانس X در انتهای خط و یک منبع ولتاژ خالص E_s در ابتدای خط قرار دارد. ولتاژ انتهای خط به وسیله رابطه زیر بدست می‌آید:

$$V_r = j X I_r \quad (۷۸)$$

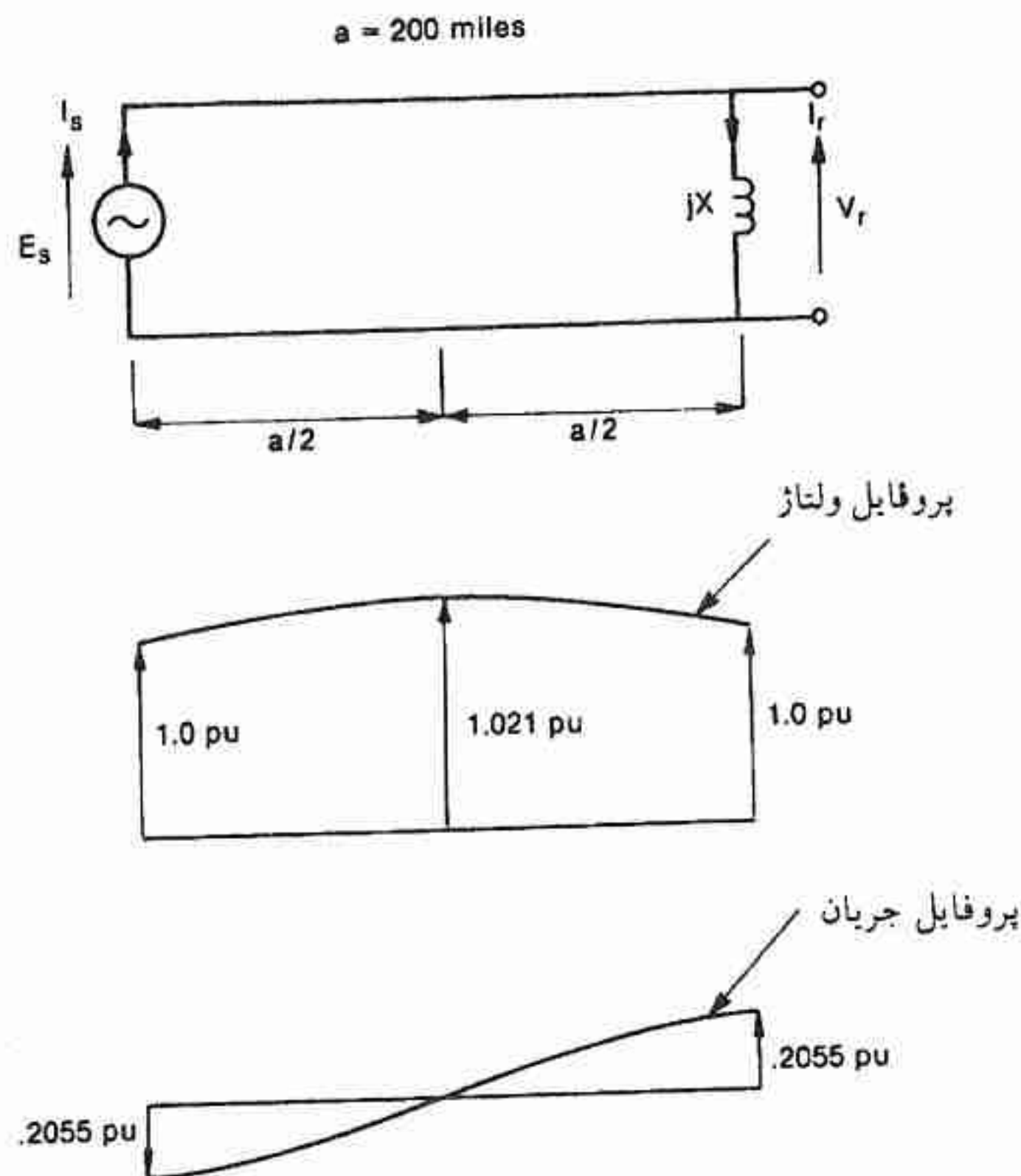
از معادله ۲ الف داریم

$$\begin{aligned} E_s &= V_r \cos \beta a + j Z_o I_r \sin \beta a \\ &= V_r \left[\cos \theta + \frac{Z_o}{X} \sin \theta \right] \end{aligned} \quad (۷۹)$$

V_r و E_s همفاز هستند که با این حقیقت که توان واقعی انتقال نمی‌یابد سازگار است. برای اینکه ولتاژ ابتدا و انتهای خط برابر باشند X بایستی از رابطه زیر بدست آید

$$X = Z_o \frac{\sin \theta}{1 - \cos \theta} \quad (۸۰)$$

جریان ابتدای خط از معادله ۲ ب بدست می آید



شکل ۲۴ - پروفایل ولتاژ و جریان در یک خط جبران شده موازی در حالت بدون بار.

$$I_s = j \frac{E_s}{Z_o} \sin \theta + I_r \cos \theta \quad (۸۱)$$

با استفاده از معادلات ۷۸، ۷۹ و ۸۰ این رابطه را می توان مطابق زیر مرتب کرد

$$I_s = j \frac{E_s}{Z_o} \frac{1 - \cos \theta}{\sin \theta} = j \frac{E_s}{X} = -I_r \quad (۸۲)$$

زیرا $E_s = V_r$ است. مفهوم آن این است که ژنراتور ابتدای خط رفتاری مشابه راکتور موازی انتهای خط دارد چه هر دو به مقدار مساوی توان راکتیو جذب می نمایند:

$$Q_s = -Q_r = \frac{E_s^2}{X} = \frac{E_s^2}{Z_o} \left[\frac{1 - \cos \theta}{\sin \theta} \right] \quad (۸۳)$$

جریان شارژ (جریان بارگیری خط) بطور مساوی بین دو نیمه خط تقسیم می شود. پروفایل ولتاژ نسبت به نقطه میانی تقارن دارد و در شکل ۲۴ همراه با پروفایل جریان خط نشان داده شده است. در

نیمه سمت چپ خط جریان بارگیری منفی است، در نقطه میانی صفر و در نیمه سمت راست مثبت است. ما گزیمم ولتاژ در نقطه میانی خط رخ داده و مقدارش از معادله ۲ الف با $x = a/2$ بدست می آید:

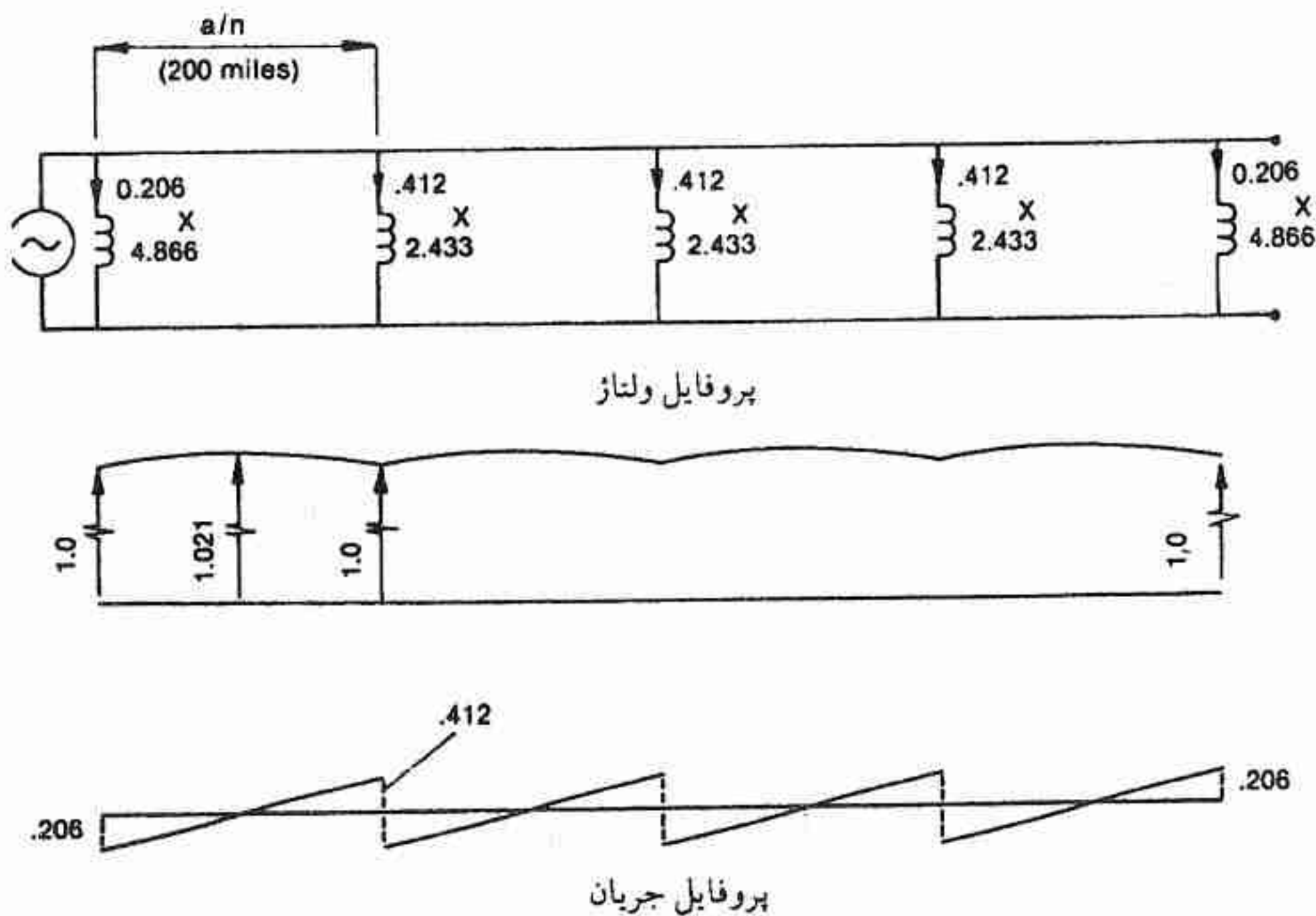
$$V_m = V_r \left[\cos \frac{\theta}{2} + \frac{Z_o}{X} \sin \frac{\theta}{2} \right] = \frac{E_s}{\cos(\theta/2)} \quad (۸۴)$$

توجه اینکه V_m با E_s و V_r همفاز است. برای خط به طول ۲۰۰ mi با $V_o = 1 \text{ pu}$ ولتاژ E_s ولتاژ نقطه میانی برابر است با $1/0.21 \text{ pu}$ و توان راکتیوی که در ابتدا یا انتهای خط جذب می شود برابر با $0.2055 P_o$ است. این مقادیر بایستی با ولتاژ انتهای خط به مقدار $1/0.88 \text{ pu}$ و توان راکتیو جذب شده در ابتدای خط به مقدار $0.429 P_o$ که در غیاب راکتور جبران کننده وجود دارد مقایسه گردد، مقدار نامی راکتور شکل ۲۴ برای خط با ولتاژ ۵۰۰ kV (خط به خط) بایستی $68/5 \text{ MVAR}$ برفاز باشد تا وظیفه اش را بطور مداوم در حالت بی بار انجام دهد و مقدار Z_o برابر 250Ω است. معادله ۸۴ نشان می دهد که خط همراه با راکتور موازی در حالت بی باری مشابه دو خط مدار باز جداگانه که پشت به پشت در نقطه میانی به هم متصل شده باشند، رفتار می کند. افزایش ولتاژ مدار باز هر نیمه خط از طریق معادله ۸۴ بدست می آید.

راکتورهای موازی متعدد در طول یک خط طویل - تحلیل حالت ساده نشان داده شده در شکل ۲۴ را می توان برای توصیف رفتار خطی که به وسیله $n - 1$ راکتور به n بخش مساوی تقسیم گردیده است (به انضمام راکتورهای ابتدا و انتهای خط) تعمیم داد. به واسطه طبیعت امواج ساکن تغییرات موج ولتاژ و جریان در طول خط، پروفایل ولتاژ و جریان شکل ۲۴ را می توان برای هر بخش خط در نظر گرفت مشروط به اینکه طول هر بخش خط a و شرایط ترمینال ها یکسان باشند. ولتاژهای ترمینال هر بخش خط مطابق شکل ۲۴ دارای مقدار و فاز مساوی هستند. جریان ها مساوی اما در فاز مخالف هستند. بنابراین یک شرایط صحیح با اتصال دادن راکتور موازی - با مقدار سوسپتانس دو برابر آنچه که از معادله ۸۰ بدست می آید - در نقطه اتصال^۱ دو قسمت خط حاصل می شود. مفهوم ایجاد چنین خط طویل جبران شده در شکل ۲۵ نشان داده شده است. راکتورهای موازی ابتدا و انتهای خط دارای نصف سوسپتانس راکتورهای میانی هستند. اگر a طول کل خط مرکب باشد با جایگزینی a/n به جای a در معادله ۸۰ مقدار راکتانس مورد لزوم راکتورهای میانی بدست می آید:

$$X = \frac{Z_o}{2} \left[\frac{\sin(\theta/n)}{1 - \cos(\theta/n)} \right] \quad (۸۵)$$

در شکل ۲۵ ژنراتور ابتدای خط جریان راکتیو تولید نمی‌کند. در عمل تنها تلفات را تامین می‌نماید. هر راکتور میانی جریان شارژ یا توان راکتیو دو نیمه هر بخش طرفین خود را که هریک دارای طول a/n هستند، جذب می‌نماید، در حالی که راکتور ابتدا و انتهای خط فقط توان راکتیو یک نیمه یک بخش را جذب می‌نمایند، و این مجدداً بیان می‌کند که چرا سوسپتانس راکتورهای میانی دو برابر است.



شکل ۲۵ - خط جبران شده بوسیله راکتورهای موازی چندگانه در حالت بدون بار

در سیستم جبران موازی شکل ۲۴ و ۲۵، درجه جبران‌کنندگی معادل k_{sh} تقریباً برابر واحد است. توان راکتیوی که از هر نیمه یک بخش خط 200 mi جذب می‌شود دقیقاً از معادله ۸۳ به مقدار $0.2055 P_o$ بدست می‌آید. با جبران پخش شده یکنواخت و $k_{sh} = 1$ توان راکتیوی که بایستی از هر نیم بخش خط 100 mi جذب شود با توجه به معادله ۷۷ برابر با $0.2027 P_o$ است. این دو عدد تقریباً $1/4\%$ با هم تفاوت دارند.

تعریفی که برای k_{sh} در بخش ۲-۳-۲ ارائه شد (معادله ۵۵) را می‌توان برای مشخص کردن k_{sh}

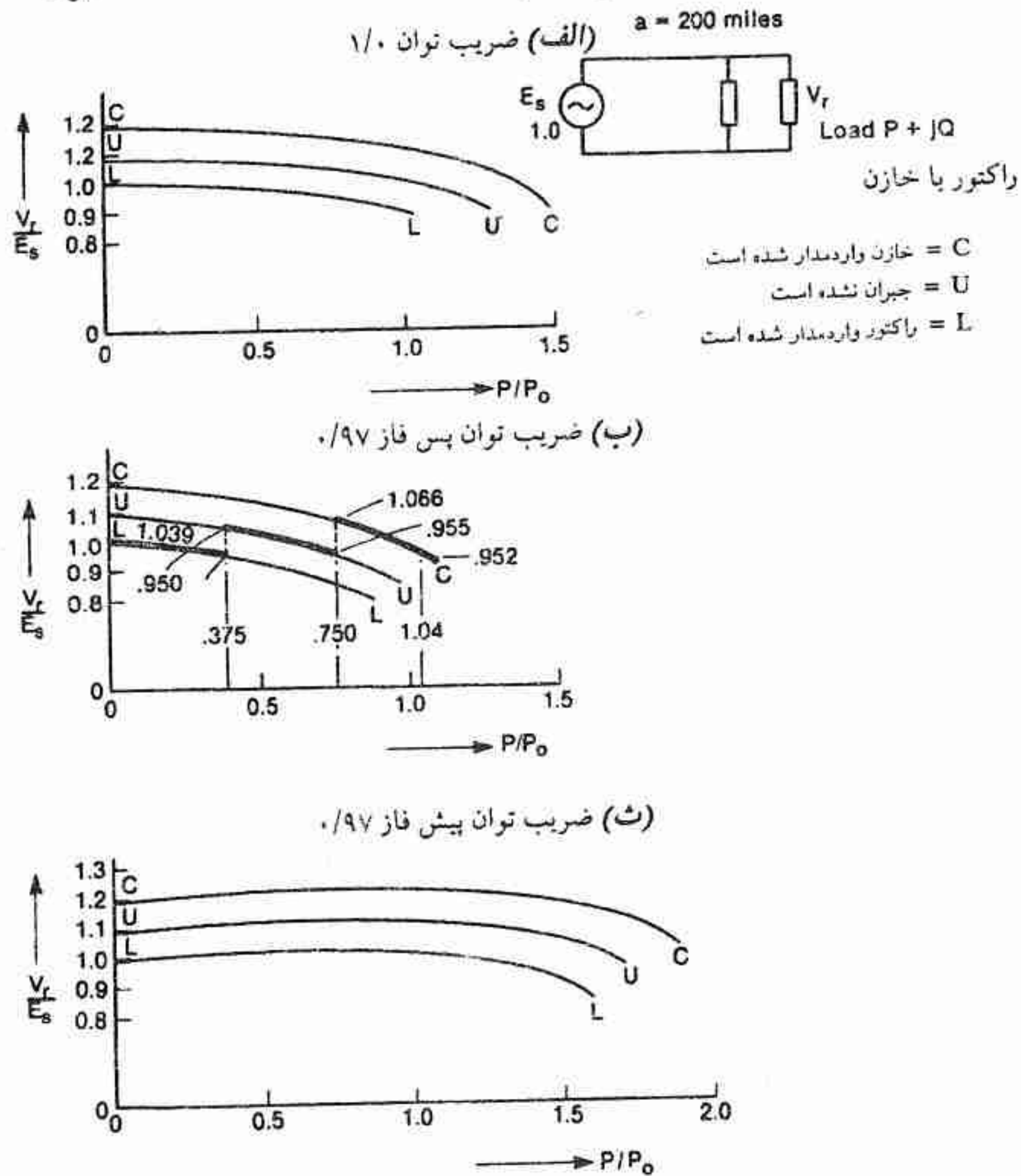
در جبران متمرکز به کار برد، مشروط به اینکه k_{sh} با سوسپتانس جبران‌کننده موازی و b_c با کاپاسیتانس موازی کل خط جایگزین شود. به عنوان مثال: یک مقدار نمونه b_c در 500 kV برابر $0.212 \mu\text{F}/\text{mi}$ ($c = 0.212 \mu\text{F}/\text{mi}$) است که توان راکتیو بارگیری $2 \text{ MVar}/\text{mi}$ (سه فاز) را موجب می‌شود. اگر $Z_0 = 250 \Omega$ باشد آنگاه از معادله 80 راکتور موازی انتهای خط دارای $B = 8/22 \times 10^{-4} \text{ s}$ و توان راکتیو $205/5 \text{ MVar}$ خواهد بود و این توان مربوط است به توان بارگیری نصف خط که برابر با 200 MVar 2×100 است، مقدار متمرکز k_{sh} در این مثال برابر است با $1/0.28 = (100 \times 8 \times 10^{-6}) / (8/22 \times 10^{-4})$. بنابراین در بکاربردن و تفسیر k_{sh} در خطوط با بخش‌های طویل‌تر بایستی ملاحظات لازم را مراعات کرد.

۲-۴-۲ کنترل ولتاژ به وسیله سوئیچ کردن جبران‌کننده موازی

دیاگرام تنظیم ولتاژ برای خط شکل ۲۴ برای سه ضریب توان متفاوت در شکل ۲۶ رسم شده است. منحنی‌هایی که با U مشخص شده است مربوط به خط جبران‌نشده و آنهایی که با L مشخص شده است مربوط به وقتی است که راکتور موازی مورد بحث بخش ۲-۴-۱ به خط متصل می‌گردد و آنهایی که با C مشخص شده است مربوط به وقتی است که به جای راکتور موازی، خازن موازی با همان راکتانس به مدار متصل می‌گردد. این حقیقت که منحنی « L » در هر حالت پائین‌تر از منحنی « U » قرار دارد بازگوکننده این واقعیت است که در خط جبران‌نشده توان راکتیو بارگیری خط (شارژ خط) تا حدودی ولتاژ خط را در شرایط بارداری حمایت می‌کند. در صورتی که راکتور موازی به طور دائم در مدار قرار داشته باشد این امتیاز از آن سلب می‌گردد.

شکل ۲۶ ب اصولی را نشان می‌دهد که بر اساس آن می‌توان ولتاژ انتهای خط را در هنگام تغییر بار با سوئیچ کردن خازن و راکتور، تا حدودی ثابت نگاهداشت. در این مثال فرض می‌شود که ضریب توان بار 0.97 پس فاز باشد. در بار صفر، راکتور موازی به مدار متصل می‌گردد و در نتیجه ولتاژ مدار باز خط جبران‌نشده را از 1.088 pu به 1.0 pu کاهش می‌دهد. راکتور تا وقتی که توان انتقالی به $0.375 P_0$ می‌رسد در مدار باقی می‌ماند و در این سطح توان ولتاژ انتهای خط به مقدار 0.95 pu کاهش می‌یابد. از این پس راکتور از مدار جدا شده و مدار در فاصله $P = 0.375 P_0$ و $P = 0.75 P_0$ جبران نمی‌شود. در سطح توان انتقالی اخیر ولتاژ به مقدار 0.955 pu کاهش می‌یابد. وقتی که $P = 0.75 P_0$ است خازن به مدار سوئیچ می‌شود و در نتیجه ولتاژ را تا فرارسیدن سطح توان انتقالی $0.94 P_0$ ، به مقدار بالاتر از 0.95 pu نگاه می‌دارد. در عمل سوئیچ کردن راکتورها و یا خازنها با

کنترل تپ چنجر ترانسفورماتور و سایر وسایل تنظیم ولتاژ هماهنگ می‌گردد تا اینکه ولتاژ در محدوده کوچکتري از آنچه که در شکل ۲۶ ب نشان داده شده است، نگاهداشته شود.



۲-۴-۳ خازن یا راکتور موازی واقع در نقطه میانی خط

خط متقارن همراه با راکتور یا خازن موازی واقع در نقطه میانی آن، یک حالت خاصی از خط همراه با ۱ - n راکتوری است که در بخش ۲-۴-۱ مورد بررسی قرار گرفت. در این حالت خاص $n=2$ است. مطالعه تفصیلی این حالت مفید خواهد بود زیرا می‌توان آن را با خط جبران شده سری که در بخش ۲-۵ مورد بحث قرار خواهد گرفت و خط جبران شده با تقسیم‌بندی خط که در بخش ۲-۶

مورد بحث قرار خواهد گرفت، مقایسه کرد. مورد استعمال اصلی آن در کنترل ولتاژ و ضریب توان خواهد بود که بعداً ملاحظه خواهیم کرد.

هر نیمه خط را با مدار معادل π مطابق شکل ۲۷ الف نشان می‌دهیم. ماشین‌های سنکرون ترمینال را بدون راکتانس داخلی و با ولتاژ ثابت فرض می‌کنیم. در این تجزیه و تحلیل می‌توان از دو سوسپتانس خازنی واقع در دو انتهای خط صرف‌نظر کرد زیرا باید بیاد بیاوریم که ماشین‌های سنکرون ترمینال همواره توان راکتیویشان را جذب می‌نمایند. برای منظور کردن این موضوع جریان I_s به صورت $I_s = I'_s + j(B_c/4) E_s$ نوشته می‌شود و همین‌طور جریان I_r را هم می‌توان از روی تشابه نوشت. در نتیجه کاپاسیتانس $\frac{1}{4}$ خط از دو انتهای خط 100% جبران می‌شود. نیمه مرکزی خط به وسیله یک راکتور یا خازن که می‌توان آن را وارد مدار یا از مدار خارج کرد و سوسپتانس آن به طور پیوسته قابل تغییر نیست، جبران می‌شود. درجه جبران نیمه مرکزی خط از رابطه زیر بدست می‌آید

$$k_m = \frac{B_r}{1/2 B_c} \quad (۸۶)$$

k_m مثبت اختیار می‌شود در صورتی که B_r اندوکتیو باشد و منفی است در صورتی که B_r کاپاسیتیو باشد و واحد است اگر $B_r = B_c/2$ باشد که در آن سوسپتانس موازی کل خط است. در فرکانس پایه، مدار معادل به شکل ۲۷ ب تقلیل می‌یابد. دیاگرام فازور در شکل ۲۷ پ داده شده است. روابط اصلی چنین است:

$$P = V_m I_m \quad (۸۷)$$

$$V_m = E_r + j \frac{X_l}{2} I'_r = E_s - j \frac{X_l}{2} I'_s \quad (۸۸)$$

و

$$I_{sh} = I'_s - I'_r = 2(I'_s - I_m) = 2(I_m - I'_r) = j \frac{B_c}{2} (1 - k_m) V_m \quad (۸۹)$$

با توجه به این روابط می‌توان نشان داد که با توجه $E_s = E_r = E$ داریم

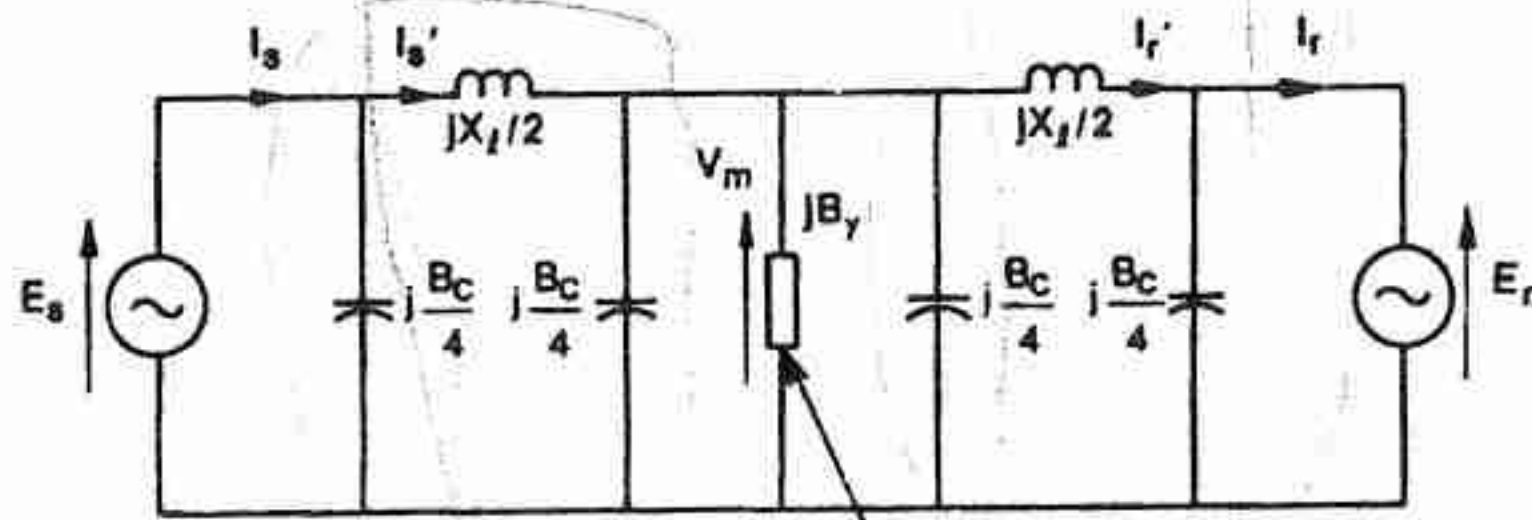
$$P = \frac{E^2}{X_l(1-s)} \sin \delta \quad (۹۰)$$

که در آن

$$s = \frac{X_l}{2} \frac{B_c}{4} (1 - k_m) \quad (۹۱)$$

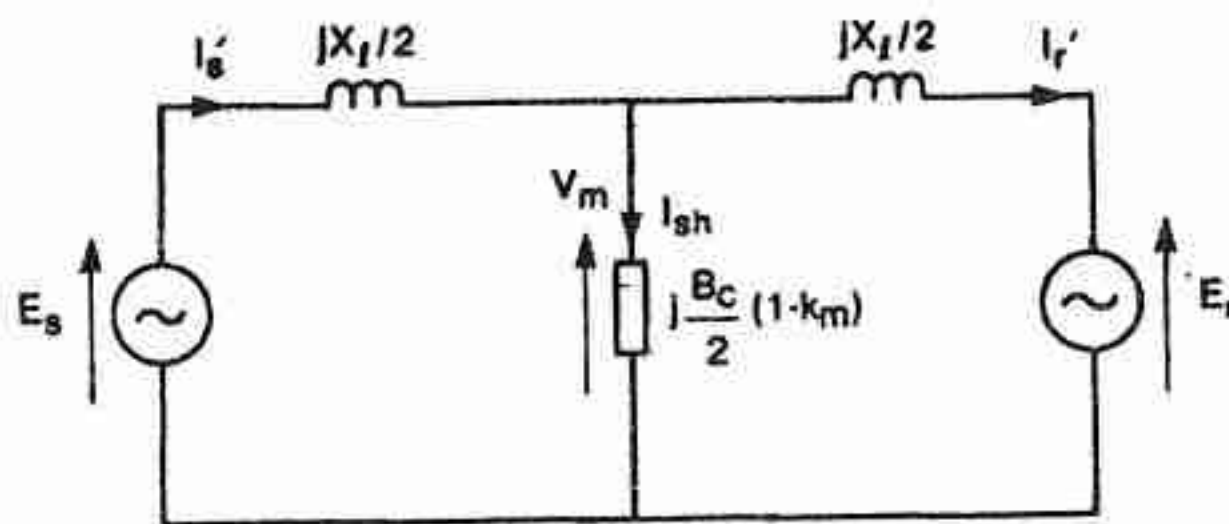
ولتاژ نقطه میانی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد

$$V_m = \frac{E \cos(\delta/2)}{1-s} \quad (۹۲)$$

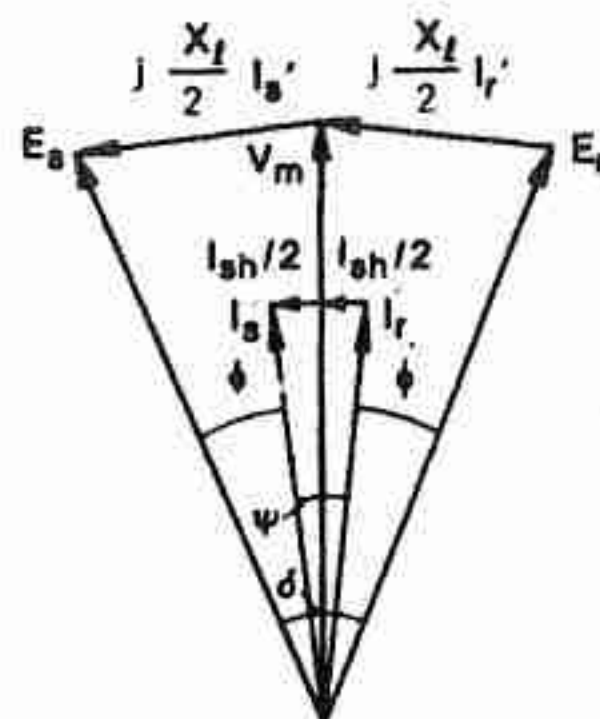


سوسپانسیس جبران کننده

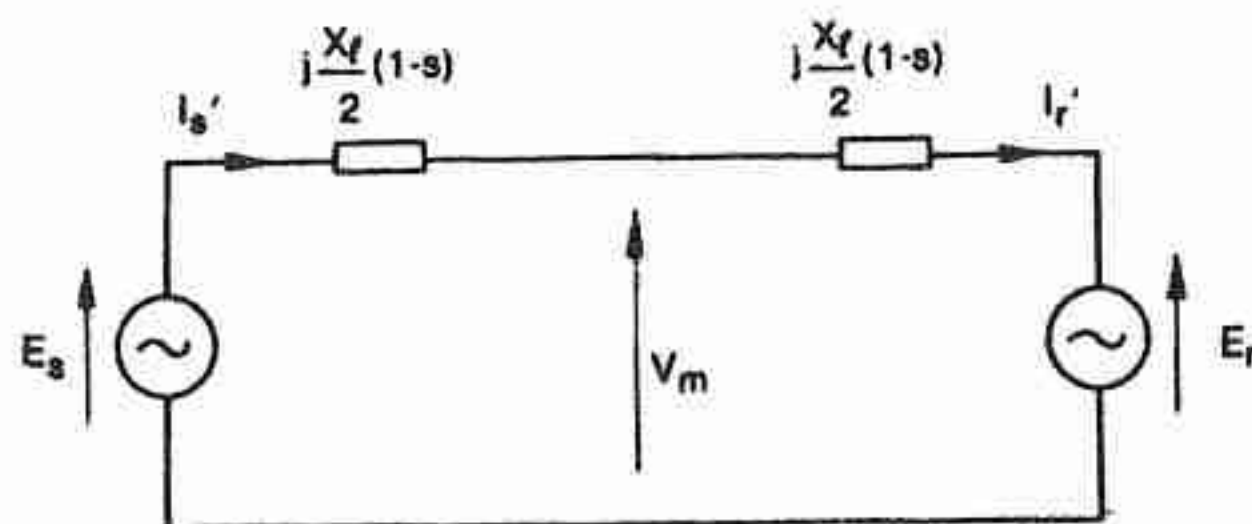
(الف)



(ب)



(پ)



(ت)

شکل ۲۷ - تحلیل خطی که بوسیله راکتور یا خازن نقطه میانی جبران شده است.

این رابطه نشان می‌دهد که با $s < 1$ ، جبران نقطه میانی، باعث افزایش ولتاژ نقطه میانی با ضریب $(1-s)/1$ می‌گردد. این ضریب افزایش، افت ولت در راکتانس سری را جبران می‌نماید در نتیجه در شرایط بارداری از ایجاد شکم در پروفایل ولتاژ در نقطه میانی جلوگیری می‌نماید. اگر $\cos(\delta/2)/(1-s) > 1$ باشد حتی در شرایط بار زیاد ولتاژ میانی از ولتاژ ترمینال تجاوز می‌کند. اگر $k_m = 1$ باشد، کاپاسیتانس موازی کل خط حذف شده و بار طبیعی مجازی را صفر می‌نماید. آنگاه سوسپتانس جبران‌کننده یک راکتور به ادمیتانس $B_c/2$ خواهد بود (معادله ۸۶). فقط در شرایط بی‌باری پروفایل ولتاژ مسطح است. و خط عملاً به امپدانس سری خود تقلیل می‌یابد. اگر در حالی که توان انتقالی افزایش می‌یابد، ولتاژهای ترمینال تنظیم گردد تا $V_m = V_o = 1 \text{ pu}$ ثابت نگاهداشته شود، آنگاه مقادیر ولتاژها از معادله زیر بدست می‌آید

$$E_s = E_r = V_o \sqrt{1 + \left[\frac{x_l}{2} \right]^2 \left[\frac{P}{P_o} \right]^2} \quad (93)$$

که می‌توان آن را از دیاگرام فازور بدست آورد. باید توجه داشت که در اینجا نوشته‌ایم

$$x_l = X_l / Z_o = \theta = \beta a$$

از میان معادلات مورد علاقه‌مان در رابطه با خط متتارن جبران‌شده نقطه میانی، معادلات زیر هستند. جریانهای ترمینال به وسیله معادله زیر بدست می‌آید

$$I_s = I_r^* = I_m \left[1 - \frac{B_c X_l}{8} \right] + j V_m \frac{B_c}{4} (2 - k_m - s) \quad (94)$$

توان راکتیو ترمینال‌ها به وسیله معادله زیر به دست می‌آید

$$Q_s = -Q_r = \frac{P^2}{V_m^2} \frac{X_l}{2} \left\{ 1 - \frac{B_c X_l}{8} \right\} - V_m^2 \frac{B_c}{4} (1-s)(2-k_m-s) \quad (95)$$

این معادله توان راکتیو شاخه‌های خازنی مدار معادل π را که در دو انتهای خط قرار دارند، و همواره توسط ماشین‌های سنکرون جذب می‌شوند را نیز در بر دارد.

توان راکتیو سوسپتانس جبران‌کننده نقطه میانی از رابطه زیر بدست می‌آید

$$Q_v = E^2 \frac{B_c k_m}{4(1-s)^2} (1 + \cos \delta) \quad (96)$$

توجه اینکه برای راکتور ($K_m > 0$) مثبت و برای خازن ($K_m < 0$) منفی است.

طی مثال زیر جنبه‌های مختلف خط جبران شده نقطه میانی تشریح می‌شود.

برای یک خط ۲۰۰ mi، $B_c / Y_0 = X_l / Z_0 = \theta = ۰/۴۰.۵۴ \text{ pu}$ است.^۱ برای جبران ۱۰۰٪ کاپاسیتانس خط $B_r = B_c / ۲ = ۰/۲۰.۲۷$ پریونیت Y_0 است. در ۵۰۰ kV با $Z_0 = ۲۵۰ \Omega$ راکتور موازی مورد نیاز دارای راکتانس (فاز به نول) زیر است

$$X_r = \frac{۲}{B_c} Z_0 = \frac{۲}{۰/۴۰.۵۴} \times ۲۵۰ = ۱۲۳۳ \Omega \quad (۹۷)$$

و مقدار نامی توان راکتیو آن برای هر فاز برابر خواهد بود با $۶۷/۶ \text{ MVA}$ با $[۵۰۰/\sqrt{۳}]^۲/۱۲۳۳ = ۶۷/۶ \text{ MVA}$. این عدد با عددی که تقریباً با احتساب $۲ \text{ MVA} / \text{mi}$ برای بخش میانی بطول ۱۰۰ mi خط سه فاز بدست می آید، موافقت دارد. (به جدول ۳ مراجعه شود). در حالت بی باری ماشین‌های سنکرون هر یک بایستی توان راکتیو $۱۰۱/۴ \text{ MVA}$ را جذب نمایند و این توان تقریباً یک دهم بار طبیعی خط است. در صورت متصل بودن راکتورها $k_m = ۱$ و $s = ۰$ است. با $E_s = E_r = V_m = ۵۰۰ \text{ kV}$ (فاز به فاز) پروفایل ولتاژ تقریباً مسطح است. بدون حضور راکتور ولتاژ نقطه میانی برابر $V_m = ۱/۰.۲۱ \text{ pu} = ۵۱۰/۵ \text{ kV}$ خواهد بود (به شکل ۵ ب مراجعه شود).

در صورت متصل بودن راکتورها در نقطه میانی، در بار طبیعی (سه فاز) $P = P_0 = ۱۰۰۰ \text{ MW}$ و از معادله ۹۰ داریم $\sigma = ۲۳/۹۲$ درجه. ولتاژ نقطه میانی به وسیله معادله ۹۲ بدست می آید: با $E = ۱/۰ \text{ pu} = ۵۰۰ \text{ kV}$ (سه فاز) $V_m = \cos(\delta/۲) = ۰/۹۷۸ \text{ pu} = ۴۸۹ \text{ kV}$ است. پروفایل ولتاژ مطابق شکل ۲۸ ب است. توان راکتیو ترمینال به وسیله معادله ۹۵ بدست می آید، یعنی در هر انتهای خط ۲۱۲ MVAR تولید می شود که در نتیجه ضریب توان پس فاز $۰/۹۸۷$ در ابتدای خط و ضریب توان پیش فاز $۰/۹۷۸$ در انتهای خط حاصل می گردد.

اگر راکتور با خازن دارای سوسپتانس یکسان $k_m = -۱$ جایگزین شود از معادله ۹۱ داریم

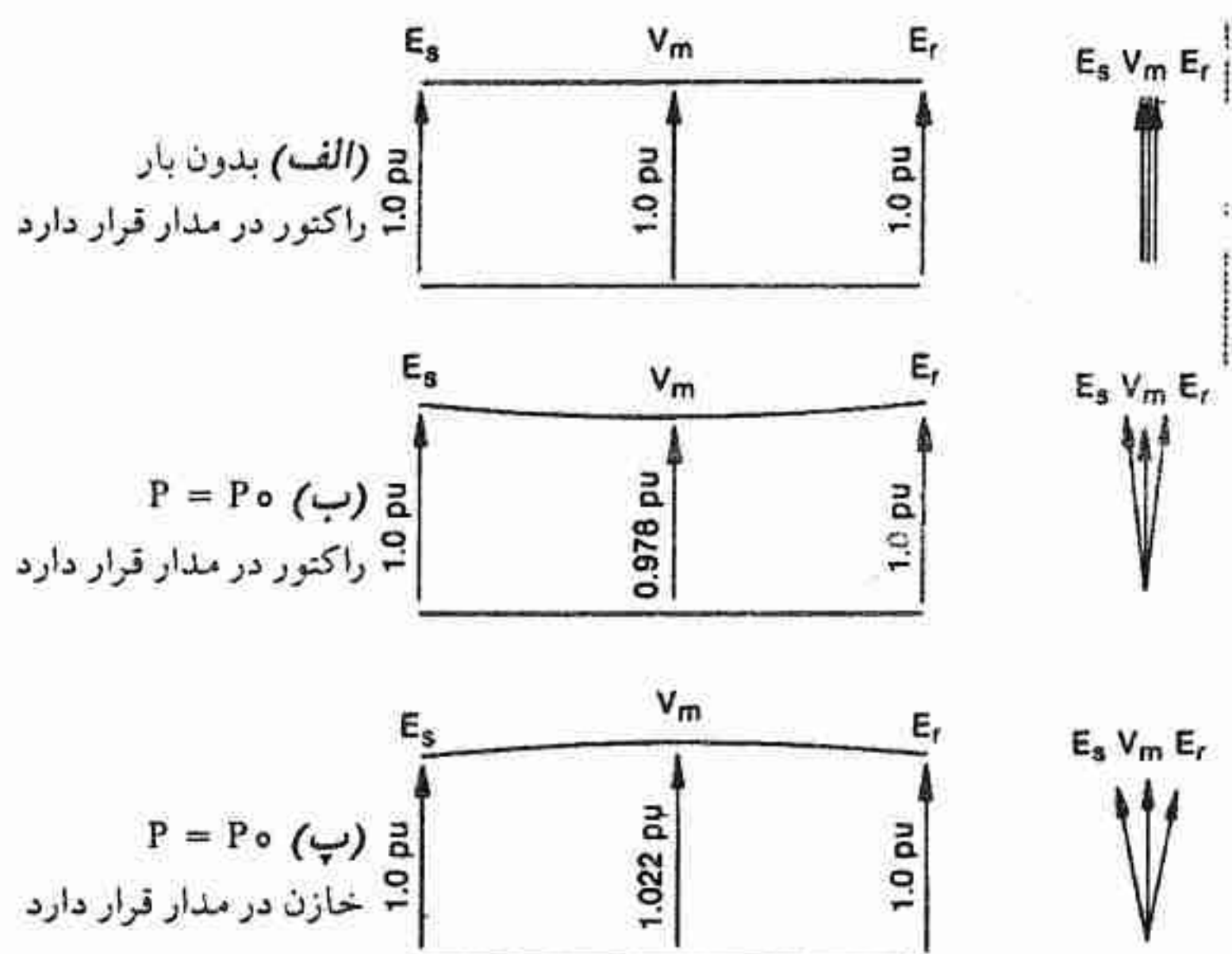
$$s = \frac{۰/۴۰.۵۴ Z_0}{۲} \times \frac{۰/۴۰.۵۴ Y_0}{۴} [۱ - (-۱)] = ۰/۰.۴۱۱ \quad (۹۸)$$

در بار طبیعی با توجه به معادله ۹۰، $\delta = ۲۲/۸۸^\circ$ و از معادله ۹۲، $V_m = ۱/۰.۲۲ \text{ pu}$ است. حال توان جذب شده در هر ترمینال برابر ۹ MVAR است. همانطوری که انتظار می رود با چنین مقدار کم s ، اثر پایدارکنندگی خازن نقطه میانی چندان قابل توجه نیست گرچه حمایت ولتاژ نقطه میانی ارزشمند است.

در مثال قبل نقش سوسپتانس نقطه میانی در کنترل ولتاژ خط و ضریب توان ترمینال، بسیار موثرتر از نقش آن در کاهش زاویه انتقال است. طبیعتاً برای کنترل ولتاژ و ضریب توان از این نوع

۱- در این مثال از مدار معادل π استفاده شده است.

جبران استفاده می شود. از معادله ۹۰ آشکار است که هرگاه مقدار δ بیش از آنچه در مثال بود باشد، تاثیر قابل توجهی بر روی زاویه انتقال خواهد گذاشت: این حالت وقتی پیش می آید که طول خط خیلی بیشتر و یا سوسپتانس خازنی جبران کننده خیلی زیاد باشد. البته، از آنجائی که ولتاژ نقطه میانی همچنین در معرض ضریب $(1 - \delta)/1$ قرار دارد با چنین جبران زیاد، ولتاژ یا بطور غیرقابل قبولی افزایش یافته، یا نسبت به سوئیچ کردن خازن، فوق العاده حساس شده و یا هر دو مساله ایجاد می شود. به همین دلیل سوسپتانس موازی پاسیو به تنهایی یک روش عملی برای افزایش حداکثر توان انتقالی در خطوط طولانی نخواهد بود. برای خطوط طویل، سوسپتانس بایستی بزرگ و بطور دینامیکی قابل کنترل باشد، به عنوان مثال جبران کننده های راکتور قابل اشباع و تایریستور کنترل (به بخش ۲-۶ مراجعه شود).



شکل ۲۸ - پروفایل ولتاژ خطی که نقطه میانی جبران شده است

شکل معادله ۹۰ توازی بین خط جبران شده نقطه میانی و خط جبران شده سری را پیشنهاد می کند زیرا ضریب $\sin \delta$ در معادله ۹۰ مشابه ضریب $\sin \delta$ در معادله ۱۰۹ است که در آن k_{se} جایگزین δ شده است. در این معنا δ را می توان به عنوان درجه جبران سری معادل تفسیر کرد. اثر خازن سری در مشخصه زاویه انتقال ضعیف بوده و فقط با $\delta < 1$ حاصل می شود. این الزام می کند که $k_m < 1$ باشد یعنی اگر B_r اندوکتیو است نبایستی آنقدر بزرگ باشد که تمام کاپاسیتانس نیمه مرکزی

خط را جبران کند. به عبارت دیگر، کاپاسیتانس موازی خط اثر پایداری بر روی توان انتقالی دارد که در صورت کاپاسیتیو بودن B_r ($k_m < 0$) این اثر تقویت و در صورت اندوکتیو بودن B_r ($k_m > 0$) تضعیف می شود.

۲-۵ جبران سری

۲-۵-۱ اهداف و محدودیت های عملی

همانطوری که در بخش ۲-۳ بحث شد مفهوم اصلی جبران سری این است که بخشی از راکتانس خط به وسیله خازن سری حذف می گردد. حداکثر توان انتقالی افزایش، در یک سطح معینی از توان انتقالی زاویه انتقال کاهش و بار طبیعی مجازی افزایش می یابد. البته راکتانس خط به طور موثر کاهش یافته و در نتیجه مقدار کمتری از توان راکتیو بارگیری خط را جذب نموده و بنابراین نوعی جبران موازی القایی را ایجاد می نماید.

خازن های سری به عنوان وسیله کاهش «راکتانس انتقالی»^۱ واقع بین ابتدا و انتهای یک خط، دارای کاربرد طبقه بندی اصلی دوگانه زیر است:

۱- برای افزایش توان انتقالی خط (با هر طولی) می تواند به کار برده شود. در تقسیم بار بین دو یا چند خط موازی گاهی خازن سری برای افزایش توان انتقالی در یکی از خطوط موازی - به خصوص در جایی که خط ولتاژ بالا، در بالای خط ولتاژ پایین در یک مسیر مشترک قرار دارند - استفاده می شود.

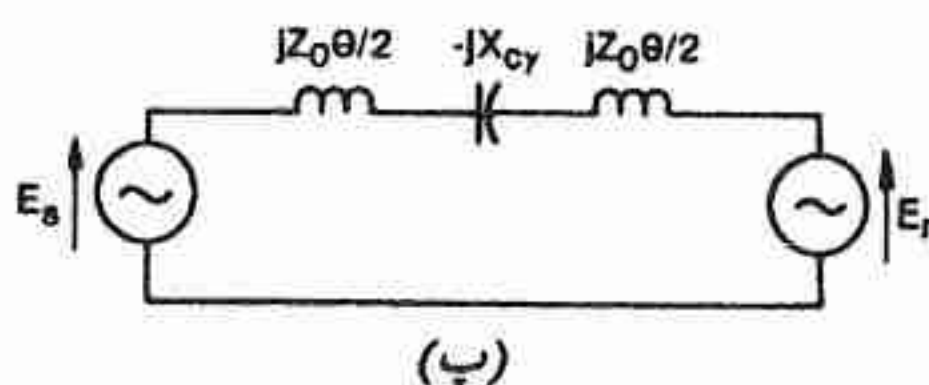
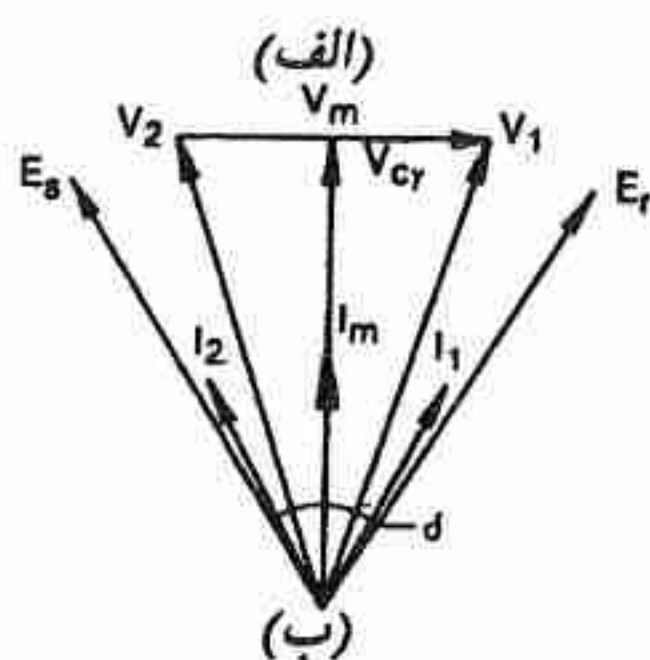
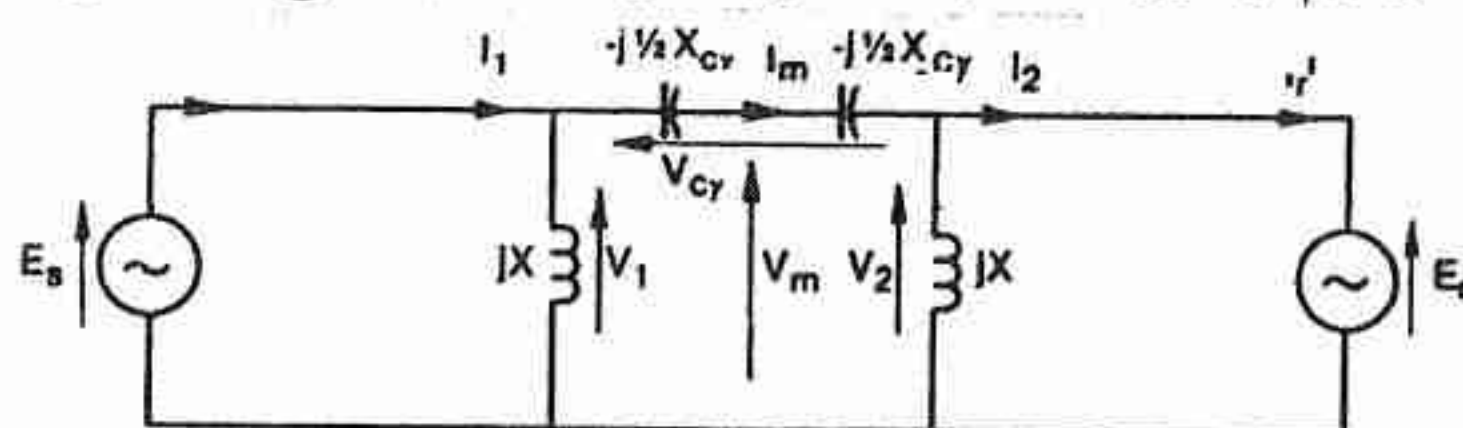
۲- برای انتقال پایدار توان از خطوط طویل - که بدون عمل جبران این انتقال میسر نیست - بکار برده می شود. در خطوط طویل همچنین برای محدود کردن ولتاژ خط، کاربرد جبران کننده اندوکتیو موازی ضروری است.

در عمل جبران سری حداکثر تا 0.8 محدود می گردد. با $k_{se} = 1$ راکتانس موثر خط برابر صفر بوده و در نتیجه کوچکترین اغتشاش در زاویه نسبی روتور ماشین های سنکرون ترمینال، منجر به عبور جریان زیاد از خط می گردد. همچنین در فرکانس پایه مدار رزونانس تشکیل شده و کنترل ولتاژ و جریان در خلال اغتشاشات بسیار مشکل خواهد بود.

راکتانس خازن، به وسیله مشخصه های توان انتقالی گذرا و پایدار و همچنین محل قرار گرفتن

خازن در خط، تعیین می‌گردد. محل قرار گرفتن خازن بر اساس عوامل اقتصادی و میزان شدت جریانه‌های اتصال کوتاه (که تابع محل قرار گرفتن خازن هستند) مشخص می‌گردد. مقدار نامی ولتاژ به وسیله میزان شدت جریانه‌های اتصال کوتاه که در بدترین حالت منتظره از خازن‌ها و وسایل بای پاس عبور می‌کنند، تعیین می‌گردد. «شدت اتصال کوتاه» نه تنها به مقدار بلکه به مدت اتصال کوتاه نیز بستگی دارد.

واضح است که در عمل ممکن نیست که خازن را در واحدهای کوچک در طول خط توزیع کرد. در عمل خازن‌ها را بطور متمرکز در نقاط محدود (به طور نمونه یک یا دو) در طول خط قرار می‌دهند. همانطوری که خواهیم دید این مساله به ایجاد پروفایل ولتاژ غیرمسطح منجر می‌گردد.



شکل ۲۹ - (الف) خط متقارن با خازن سری در نقطه میانی و راکتورهای موازی (ب) دیاگرام فازور شکل ۲۹ الف (ب) مدار معادل با جبران موازی کامل.

۲-۵-۲ خط متقارن جبران شده با خازن سری نقطه میانی و راکتورهای موازی

خط متقارن بدون تلفات را که خازن سری در نقطه میانی آن و دو راکتور موازی مساوی در دو طرف خازن قرار دارد، را مورد مطالعه قرار می دهیم (به شکل ۲۹ الف مراجعه شود)*. برای سهولت تحلیل، خازن سری به دو خازن مساوی تقسیم شده است. هدف از کاربرد راکتورهای موازی کنترل ولتاژ خط است و این موضوع طی مثالی در بخش ۲-۵-۳ نشان داده شده است.

مشخصه توان انتقالی و حداکثر توان انتقالی - دیاگرام فازور کلی در شکل ۲۹ ب نشان داده شده است. با در نظر گرفتن قسمتی از خط که در سمت چپ قرار دارد (ابتدای خط) به کمک معادله اساسی ۲، می توان روابط زیر را بین ابتدا و انتهای این قسمت خط نوشت:

$$E_s = V_1 \cos \frac{\theta}{2} + j Z_o I_1 \sin \frac{\theta}{2} \quad (۹۹ \text{ الف})$$

$$I_s = j \frac{V_1}{Z_o} \sin \frac{\theta}{2} + I_1 \cos \frac{\theta}{2} \quad (۹۹ \text{ ب})$$

نیمه خط طرف انتهای خط رفتاری مشابه دارد. راکتانس خازن برابر است با $X_{cy} = 1/\omega C_y$ و ولتاژ دو سر آن از رابطه زیر بدست می آید

$$V_{cy} = V_1 - V_2 = -j I_m X_{cy} \quad (۱۰۰)$$

از روی تقارن می توان نوشت $E_s = E_r$ ، $P = V_m I_m$ و

$$V_m = V_1 - 1/2 V_{cy} = V_2 + 1/2 V_{cy} \quad (۱۰۱)$$

جریانهای I_1 و I_2 به وسیله رابطه زیر بدست می آید

$$I_m = I_1 + \frac{j V_1}{X} = I_2 - j \frac{V_2}{X} \quad (۱۰۲)$$

با استفاده از این روابط و در نظر گرفتن V_m به عنوان مبنای فازور، با تبعیت از روشی که در بخش ۲-۲-۶ در بدست آوردن مشخصه توان انتقالی به کار رفت (معادله ۳۷) نتیجه زیر حاصل می شود:

$$P = \frac{E_s V_m}{Z_o \sin \frac{\theta}{2} - \frac{X_{cy}}{2} \left[\cos \frac{\theta}{2} + \frac{Z_o}{X} \sin \frac{\theta}{2} \right]} \sin \frac{\delta}{2} \quad (۱۰۳)$$

و

$$E_s \cos \frac{\delta}{2} = V_m \left[\cos \frac{\theta}{2} + \frac{Z_o}{X} \sin \frac{\theta}{2} \right] = E_r \cos \frac{\delta}{2} \quad (۱۰۴)$$

* آرایش های دیگر در مرجع ۲ مورد مطالعه قرار گرفته است.

اگر V_m از معادله ۱۰۴ در معادله ۱۰۳ قرار گیرد نتیجه زیر برای خط متقارن حاصل می شود، اگر $E_s = E_r$:

$$P = \frac{E_s E_r}{\left[Z_o \sin \theta - \frac{X_{cy}}{2} (1 + \cos \theta) \mu_x \right] \mu_x} \sin \delta \quad (105)$$

که در آن

$$\mu_x = 1 + \frac{Z_o}{X} \frac{\sin \theta}{1 + \cos \theta} = 1 + \frac{Z_o}{X} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \quad (106)$$

در غیاب راکتورهای موازی $\mu_x = 1$ است. در صورت ثابت بودن ولتاژهای ترمینال، $E_s = E_r = E$ برای هر سطح توان انتقالی کمتر از ماکزیمم توان، زاویه انتقال δ را می توان از معادله ۱۰۵ بدست آورد. وقتی δ مشخص شد با استفاده از معادله ۱۰۴ مقدار V_m معین می گردد. آنگاه V_1 ، V_2 و کمیت های دیگر به کمک معادله های ۹۹ الی ۱۰۱ مشخص می شوند.

موارد خاص:

۱- با صرف نظر کردن از کاپاسیتانس موازی خط و برداشتن راکتورهای موازی، آشناترین فرم مشخصه توان انتقالی خط جبران شده با خازن سری از معادله ۱۰۵ حاصل می شود. آنگاه $Z_o \sin \theta$ جایگزین می شود و $\mu_x = 1$ ، بنابراین با $E_s = E_r = E$ داریم

$$P = \frac{E^2}{X_1 - X_{cy}} \sin \delta \quad (107)$$

اگر درجه جبران سری k_{se} با رابطه زیر تعریف شود

$$k_{se} = \frac{X_{cy}}{X_1} = \frac{X_{cy}}{\omega a l} \quad (108)$$

آنگاه

$$P = \frac{E^2}{X_1 (1 - k_{se})} \sin \delta \quad (109)$$

که با معادله ۷۲ مطابقت دارد. این فرم مشخصه توان انتقالی به خاطر سادگی اش مفید می باشد. خطای ناشی از صرف نظر کردن کاپاسیتانس موازی خط در مثال بخش ۲-۵-۳ نشان داده شده است.

۲- یک حالت خاص دیگر وقتی پیش می آید که کاپاسیتانس خط کاملاً توسط راکتورهای موازی جبران گردد. همانطور که در بخش ۲-۴-۱ ملاحظه کردیم. آنگاه راکتانس هر یک برابر خواهد بود با

$$X = Z_o \frac{\sin(\theta/2)}{1 - \cos(\theta/2)} \quad (110)$$

از معادله ۱۰۶ ضریب راکتانس موازی μ_x به مقدار زیر تقلیل می‌یابد

$$\mu_x = \sec \frac{\theta}{2} \quad (111)$$

و مشخصه توان انتقالی به صورت زیر خواهد شد ($E_s = E_r = E$)

$$P = \frac{E^2}{2 Z_o \sin \theta/2 - X_{cy}} \sin \delta \quad (112)$$

وقتی کاپاسیتانس هر نیمه خط بطور کامل جبران می‌شود، مطابق شکل ۲۹ پ، فقط راکتانس سری در مدار معادل باقی می‌ماند. در این مدار معادل، حقیقتی در نظر گرفته نشده است و آن اینکه در جبران اندوکتیو موازی متمرکز، حتی در حالت بی‌باری، پرو فایل ولتاژ مسطح نخواهد بود. حداکثر توان قابل انتقال که از معادله ۱۰۵ بدست می‌آید را می‌توان با مقداری که از طریق جبران سری و موازی پخش شده یکنواخت بدست می‌آید (معادله ۷۰) مقایسه کرد. در مرجع ۲ چنین مقایسه‌ای برای سیستم شکل ۲۹ الف همراه با چندین موقعیت قرارگرفتن خازن انجام گرفته است. (همچنین به بخش ۲-۵-۳ مراجعه شود)

توان راکتیو مورد نیاز ترمینالها - توان راکتیو در ترمینال ابتدای خط به وسیله رابطه زیر بدست می‌آید

$$Q_s = \text{Im} (E_s I_s^*) \quad (113)$$

با استفاده از معادلات ۹۹ الی ۱۰۲ می‌توان نشان داد که

$$E_s = \mu_x V_m \cos \frac{\theta}{2} + j \frac{P}{V_m} \left[Z_o \sin \frac{\theta}{2} - \frac{\mu_x X_{cy}}{2} \cos \frac{\theta}{2} \right] \quad (114)$$

و

$$I_s = I_m \left[\frac{\mu_x X_{cy}}{2 Z_o} \sin \frac{\theta}{2} + \cos \frac{\theta}{2} \right] + j \frac{\mu_x V_m}{Z_o} \sin \frac{\theta}{2} \quad (115)$$

که در آن

$$\mu_x = 1 - \frac{Z_o}{X} \frac{1 + \cos \theta}{\sin \theta} = 1 - \frac{Z_o}{X} \text{ctg} \frac{\theta}{2} \quad (116)$$

در غیاب راکتورهای موازی ($\mu_x = 1$) با جایگزینی برای E_s و I_s^* در معادله ۱۱۳ نتیجه زیر حاصل می‌شود

$$Q_s = \frac{P_o}{2} \left[\frac{P}{P_o} \right]^2 \left[\frac{V_o}{V_m} \right]^2 \left\{ \frac{X_{cy}}{2 Z_o} [(\mu_x - \mu_x) - (\mu_x + \mu_x) \cos \theta] \right\}$$

$$+ \left[1 - \left[\frac{X_{cy}}{2Z_0} \right]^2 \dot{\mu}_x \mu_x \right] \sin \theta \} - \frac{P_0}{2} \left[\frac{V_m}{V_0} \right]^2 \dot{\mu}_x \mu_x \sin \theta \quad (117)$$

از روی تقارن توان راکتیو در انتهای خط برابر است با $Q_r = -Q_s$. در تمام موارد V_m از معادله ۱۰۴ بدست می‌آید که در آن δ از معادله ۱۰۵ بدست می‌آید.

موارد خاص:

۱- در غیاب راکتورهای موازی $\dot{\mu}_x = \mu_x = 1$ و معادله ۱۱۷ برای Q_s و $-Q_r$ به رابطه زیر تقلیل می‌یابد.

$$Q_s = \frac{P_0}{2} \left\{ \sin \theta \left\{ \left[\frac{P}{P_0} \right]^2 \left[\frac{V_0}{V_m} \right]^2 \left[1 - \left[\frac{X_{cy}}{2Z_0} \right]^2 \right] - \left[\frac{V_m}{V_0} \right]^2 \right\} - \cos \theta \left[\frac{P}{P_0} \right]^2 \left[\frac{V_0}{V_m} \right]^2 \frac{X_{cy}}{Z_0} \right\} \quad (118)$$

در غیاب خازن سری و راکتورهای موازی این معادله به معادله ۲۹، که برای خط جبران نشده است، تقلیل می‌یابد.

۲- اگر راکتورهای موازی برای جبران بدون بار کامل طراحی شوند (معادله ۱۱۰)، آنگاه μ_x از معادله ۱۱۱ و $\dot{\mu}_x$ از معادله زیر بدست می‌آید

$$\dot{\mu}_x = \frac{Z_0}{X} \csc \frac{\theta}{2} \quad (119)$$

آنگاه رابطه ساده زیر بدست می‌آید

$$(\dot{\mu}_x - \mu_x) - (\dot{\mu}_x + \mu_x) \cos \theta = 2 \left[1 - 2 \cos \frac{\theta}{2} \right] \quad (120)$$

و

$$\dot{\mu}_x \mu_x = \frac{2 Z_0}{X \sin \theta} \quad (121)$$

توان راکتیو ترمینال برابر خواهد بود با

$$Q_s = \frac{P_0}{2} \left[\frac{P}{P_0} \right]^2 \left[\frac{V_0}{V_m} \right]^2 \left\{ \frac{X_{cy}}{Z_0} \left[1 - 2 \cos \frac{\theta}{2} \right] + \left[1 - \left[\frac{X_{cy}}{2Z_0} \right]^2 \frac{2Z_0}{X \sin \theta} \right] \sin \theta \right\} - \frac{P_0}{2} \left[\frac{V_m}{V_0} \right]^2 \frac{2Z_0}{X} \quad (122)$$

که $Q_s = -Q_r$ است. توجه اینکه در حالت بی‌باری ($P = 0$)، Q_s به $-V_m^2/X$ تقلیل می‌یابد،

یعنی، توان راکتیو جذب شده در ابتدای خط با توان راکتیو جذب شده توسط راکتور سمت چپ برابر است. (به بخش ۲-۴-۱ مراجعه کنید)

از روی تشابه، در بی‌باری توان راکتیو جذب شده در انتهای خط برابر است با توان راکتیوی که به وسیله راکتور سمت راست جذب می‌شود و هر دو برابر است با V_m^2/X . در شرایط بی‌باری در خازن سری جریانی وجود ندارد و دو نصفه خط رفتارشان مشابه دو خط مدار بازی است که پشت به پشت به هم متصل شده و در انتهای هر کدام یک راکتور موازی متصل شده باشد.

۲-۵-۳ مثالهایی از خط جبران شده سری

مثال زیر مکانیزم جبران سری را در حالت ماندگار نشان می‌دهد، به منظور نشان دادن اهمیت راکتورهای موازی، مثال با حضور و غیاب آنها حل می‌شود.

مجددا تاکید می‌شود که قرار دادن خازن سری در نقطه میانی خط به این معنا نیست که لزوما همیشه از نظر تکنیکی یا اقتصادی از بهترین موقعیت‌ها است بلکه از میان امکانات متعدد، این یک امکان است. یک مطالعه مقایسه‌ای برای موقعیت‌های مختلف قرار گرفتن خازن در شرایط ماندگار در مرجع ۲ انجام گرفته است که خواننده می‌تواند رجوع کند.

خازن سری واقع در نقطه میانی بدون حضور راکتورهای موازی - در این مثال خط ۴۰۰ mi را در نظر گرفته‌ایم تا مقایسه با مثالهای دیگر این فصل به آسانی صورت گیرد. با $a = 400$ mi طول الکتریکی خط برابر است با $\theta = \beta a = 0.8108 \text{ rad} = 46.5^\circ$. در سیستم پریونیت و در مبنای ولتاژ V_o و امپدانس Z_o راکتانس پریونیت برابر است با $X_1 = 0.8108$ و سوسپتانس کل کاپاسیتیو موازی برابر است با $B_c = 0.8108 \text{ pu}$. جبران خازنی سری طوری انتخاب شده است که 50% راکتانس خط را جبران می‌نماید بنابراین $X_{cr} = 0.5 \times 0.8108 = 0.4054 \text{ pu}$ (در ولتاژ 500 kV) با $Z_o = 250 \Omega$ داریم $X_{cr} = 101/4 \Omega$. بدون حضور راکتورهای موازی نقطه میانی $X = \infty$ و $\mu_x = \mu_x = 1$ است. فرض می‌شود که ولتاژهای ترمینال ثابت هستند $E_s = E_r = V_o = 1 \text{ pu}$. از معادله ۱۰۴ ولتاژ نقطه میانی در شرایط بی‌باری ($\delta = 0$) برابر است با $1/\cos(\theta/2) = 1.0882 \text{ pu}$. از آنجائی که از خازن سری جریانی عبور نمی‌کند این ولتاژ همچنین در طرفین آن ظاهر می‌شود. از معادله ۱۰۵، مشخصه توان انتقالی از رابطه زیر بدست می‌آید.

۱- توجه اینکه برای هر دو نیمه خط نمایش کامل پارامترهای پخش شده بکار برده شده است و بر خلاف بخش‌های ۲-۴ و ۲-۶ از مدار معادل π استفاده نشده است.

$$P = \frac{\sin \delta}{\sin 0.8108 - \frac{1}{2} \times 0.4054 (1 + \cos 0.8108)} = 2.6144 \sin \delta \quad (123)$$

اگر عمل جبران انجام نمی‌گرفت P_{\max} برابر $1/3796$ pu بود (از معادله ۳۷)، بنابراین خازن سری P_{\max} را با ضریب $1/8950 = 2.6144 / 1/3796$ افزایش داده است. اگر جبران به صورت پخش شده یکنواخت با $k_{se} = 0.5$ می‌بود P_{\max} برابر $2.6072 P_0$ می‌شد (از معادله ۷۰)، که با حالت خازن متمرکز فقط در حدود 0.25% تفاوت داشت.

توان راکتیو مورد نیاز ترمینال از معادله ۱۱۸ به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$Q_s = -Q_r = \left[0.2079 \frac{P_r^2}{V_m^2} - 0.3624 v_m^2 \right] P_0 \quad (124)$$

که در آن $p = P / P_0$ و $v_m = V_m / V_0$ می‌باشد. با استفاده از معادلات ۱۰۰ و ۱۰۱ ولتاژ در هر طرف خازن ($V_1 = V_2$) به وسیله رابطه زیر بدست می‌آید

$$V_1 = \left| V_m - j 0.2027 \frac{P}{V_m} \right| \quad (125)$$

ولتاژ دو سر خازن سری به وسیله رابطه زیر بدست می‌آید

$$V_{cy} = -j I_m X_{cy} = -j 0.4054 \frac{P}{V_m} \quad (126)$$

جدول ۵ تغییرات این پارامترها را وقتی که توان انتقالی از صفر تا $2/0$ pu افزایش می‌یابد، نشان می‌دهد. همچنین تغییرات زاویه انتقال را نشان می‌دهد. برای یک سطح توان انتقالی معین، زاویه انتقال بدون جبران‌کننده تقریباً دو برابر وقتی است که از خازن سری استفاده شده است.

گرچه زاویه انتقال بطور قابل ملاحظه کاهش یافته است، اما ولتاژ دو طرف خازن سری $V_1 (=V_2)$ نسبتاً زیاد است و به ازاء افزایش توان انتقالی کاهش آن خیلی کم است. به علاوه در دو انتهای خط توان راکتیو زیادی، حتی در بار طبیعی P_0 ، جذب می‌شود. این مطلب می‌تواند در این ارتباط باشد که عموماً ولتاژ در طول خط در مقدار بالایی است و همچنین خازن سری خود توان راکتیو تولید می‌کند.

خازن سری واقع در نقطه میانی همراه با راکتورهای موازی. مساله ولتاژ بالای خط و جذب توان راکتیو در دو انتهای خط را می‌توان با استفاده از راکتورهای موازی اصلاح کرد. مقدار مورد نیاز X برای هر طرف خازن سری به وسیله معادله ۱۱۰ به صورت $X = 4/8656 Z_0$ بدست می‌آید. از معادلات ۱۱۹ و ۱۱۱ مقادیر $\mu_x = 0.5211$ و $\mu_x = 1/0.882$ می‌باشد با جایگزینی در معادله ۱۰۵،

جدول ۵

رفتار خط جبران شده با خازن سری در نقطه میانی و بدون حضور راکتورهای موازی
 $(a = ۴۰۰ \text{ mi}, k_{se} = ۰/۵)$

$p = \frac{P}{P_0}$	$v_m = \frac{V_m}{V_0}$	توان راکتیو ترمینال $\frac{Q_s}{P_0} = -\frac{Q_r}{P_0}$	زاویه انتقال δ (°)	$\frac{V_1}{V_0}$	$\frac{V_{cy}}{V_0}$	δ بدون جبران (°)
0	1.0882	-0.4292	0	1.0882	0	0
0.25	1.0870	-0.4172	5.487	1.0880	0.0932	10.440
0.50	1.0832	-0.3809	11.026	1.0872	0.1871	21.249
0.75	1.0767	-0.3193	16.671	1.0859	0.2824	32.932
1.00	1.0673	-0.2303	22.488	1.0841	0.3798	46.456
1.25	1.0546	-0.1109	28.563	1.0816	0.4805	64.966
1.50	1.0378	0.0440	35.011	1.0784	0.5860	ناپایدار
2.00	0.9866	0.5015	49.906	1.0688	0.8218	ناپایدار

یا مستقیماً از معادله ۱۱۲ داریم

$$P = ۲/۶۰۸۴ \sin \delta \quad (۱۲۷)$$

حداکثر توان قابل انتقال، با وجود راکتورهای موازی چندان تغییر نمی‌کند. با جبران موازی پخش شده یکنواخت $k_{sh} = ۱$ و از معادله ۷۲ داریم $P = P_0 / ۰/۸۱۰۸ (۱ - ۰/۵) = ۲/۴۶۶۷ P_0$.

ولتاژ نقطه میانی V_m با استفاده از معادله ۱۰۴ به صورت زیر می‌باشد

$$V_m = ۱ \cos \frac{\delta}{۲} \quad (۱۲۸)$$

که نشان می‌دهد در شرایط بی‌باری ($\delta = ۰$) پروفایل ولتاژ مسطح است. توان راکتیو مورد نیاز با

توجه به معادله ۱۲۲ یا ۱۱۷ بدست می‌آید اینطور

$$Q_s = -Q_r = P_o \left[0.1841 \frac{P_r}{v_m^2} - 0.2055 v_m^2 \right] \quad (129)$$

ولتاژ دو طرف خازن سری ($V_1 = V_2$) همان ولتاژ دو سر راکتور موازی است که مجدداً با رابطه زیر به دست می‌آید

$$V_1 = \left| V_m - j \cdot 0.2027 \frac{P}{V_m} \right| \quad (130)$$

و ولتاژ خازن برابر است با

$$V_{cy} = -j \cdot 0.4054 \frac{P}{V_m} \quad (131)$$

جدول ۶

رفتار خط جبران شده با خازن سری در نقطه میانی همراه با راکتورهای موازی

($a = 40.0 \text{ mi}$, $k_{se} = 0.5$ راکتور موازی $X = 4/8656 \text{ } \Omega$)

$p = \frac{P}{P_o}$	$v_m = \frac{V_m}{V_o}$	توان راکتور ترمینال	زاویه انتقال δ	$\frac{V_1}{V_o}$	$\frac{V_{cy}}{V_o}$	δ بدون جبران
		$\frac{Q_s}{P_o} = -\frac{Q_r}{P_o}$	δ ($^\circ$)			($^\circ$)
0	1	-0.2055	0	1	0	0
0.25	0.9988	-0.1935	5.500	1.000	0.1015	10.440
0.50	0.9954	-0.1572	11.051	1.001	0.2036	21.249
0.75	0.9894	-0.0954	16.710	1.001	0.3073	32.932
1.00	0.9807	-0.0062	22.543	1.002	0.4134	46.456
1.25	0.9689	0.1135	28.635	1.004	0.5230	64.966
1.50	0.9534	0.2689	35.104	1.005	0.6378	ناپایدار
2.00	0.9061	0.7282	50.063	1.011	0.8948	ناپایدار

جدول ۶ تغییرات این پارامترها را، وقتی که توان انتقالی از صفر تا $2P_o$ افزایش می‌یابد، نشان

می‌دهد.

ولتاژ در طرفین خازن سری، در رنج توان انتقالی، تقریباً برابر $1/0 pu$ است که اتصال دائمی راکتورهای موازی را - بدون اینکه معایبی داشته باشند - ایجاب می‌کند. توان راکتیو جذب شده در ترمینال‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و در مقدار بالای P ضریب توان ترمینال‌ها پس‌فاز بوده که برای پایداری گذرا - به دلیل افزایش ولتاژهای داخلی ژنراتور - مفید خواهد بود.

توجه اینکه راکتورها در دو انتهای خط متصل نگردیده‌اند گرچه کاملاً عملی است که این کار انجام گیرد. در محاسبات، ژنراتورها نقش جبران‌کنندگی موازی را ایفا نموده و در شرایط بی‌باری هر یک دقیقاً مقدار توان راکتیوی را که راکتور مرکزی جذب می‌نماید، جذب می‌کنند، یعنی توان راکتیو بارگیری بخش 100 mi خط $(= 0/2055 P_0)$ را جذب می‌کنند.

۲-۶ جبران با تقسیم‌بندی خط (جبران موازی دینامیک)

۲-۶-۱ مفاهیم اصلی

اگر یک ماشین سنکرون در نقطه میانی یک خط انتقال اتصال داده شود، قادر خواهد بود که ولتاژ را در آن نقطه ثابت نگاه دارد، درست مشابه آنچه که ماشین‌های سنکرون در دو انتهای خط عمل می‌کنند. با این عمل خط به دو قسمت کاملاً مستقل تقسیم می‌شود. پرو فایل ولتاژ، حداکثر توان قابل انتقال و نیازمندی توان راکتیو هر قسمت می‌تواند به طور مستقل مشخص شود، و مسائل مبتلا به هر قسمت، از کل خط کمتر خواهد بود. در این حالت حداکثر توان قابل انتقال یک خط، به وسیله ضعیف‌ترین قسمت خط - که در حقیقت طویل‌ترین قسمت می‌باشد - تعیین می‌گردد. به عنوان مثال اگر یک خط به دو قسمت مساوی تقسیم شود در صورتی که از کاپاسیتانس خط صرف‌نظر شود (و یا اینکه توسط راکتورهای موازی کاملاً جبران شود)، مشخصه انتقال توان برای هر قسمت خط از معادله ۳۸ به طور جداگانه بدست می‌آید. بنابراین با جایگزینی δ با $\delta/2$ و X_1 با $X_1/2$ و با $E_s = E_r = E$ داریم

$$P = \gamma \frac{E_m E}{X_1} \sin \frac{\delta}{2} \quad (132)$$

که در آن E_m ولتاژ نقطه میانی است که به وسیله ماشین سنکرون و یا جبران‌کننده، ثابت نگاهداشته می‌شود. حداکثر توان انتقالی دو برابر می‌شود. این طرح «جبران با تقسیم‌بندی خط» نامیده می‌شود که در سال ۱۹۲۱ توسط F.G. Baum پیشنهاد گردید (به مرجع ۳ مراجعه شود). Baum پیشنهاد کرد که در صورت اتصال دادن کندانسور سنکرون به خط در فواصل تقریباً

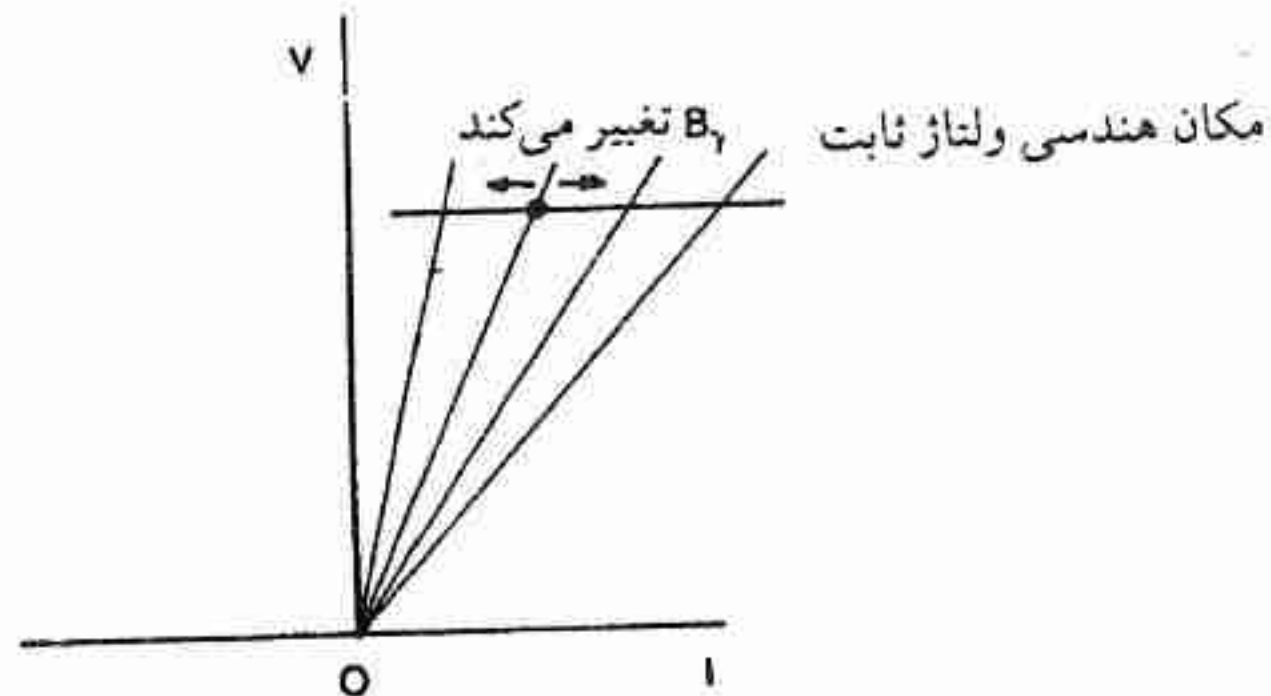
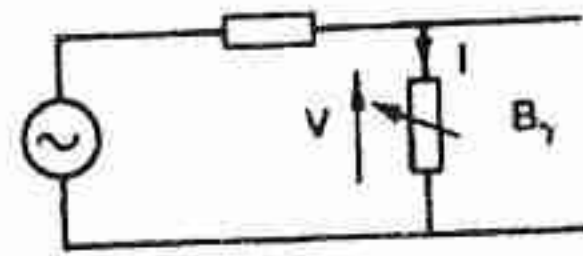
۱۰۰ mi موجب می‌شود که در تمام سطوح توان انتقالی، یک پروفایل ولتاژ تقریباً مسطحی داشته باشیم. کندانسورها مقدار بار طبیعی مجازی خط P'_{ϕ} را تنظیم می‌نمایند تا همواره مقدارش برابر با بار واقعی باشد. Baum مثالی از خط ۸۰۰ mi که در ولتاژ ۲۲۰ kV در حدود ۱۰۰ MW (تقریباً $P_{\phi}/0$) با زاویه انتقال کل در حدود 146° را انتقال می‌دهد، را محاسبه کرد، او گرچه تنظیم ولتاژ و نیازمندیهای توان راکتیو را به تفصیل شرح داد ولی مساله پایداری را در نظر نگرفت. بعداً مساله پایداری خطوط طولی که به این طریق جبران شدند در کاربرد عملی آن، شناخته شد (بخش ۲-۳-۴ ملاحظه شود)

اگر از تلفات صرف‌نظر شود جریانی که توسط ماشین سنکرون میانی کشیده می‌شود کاملاً راکتیو است (یعنی با ولتاژ نقطه اتصال ۹۰ درجه اختلاف فاز دارد) و ماشین تنها از خط توان راکتیو جذب و یا به آن تحویل می‌دهد. بنابراین، در شرایط ماندگار ماشین بدون اینکه نیاز به نیروی محرکه مکانیکی اولیه داشته باشد قادر است ولتاژ را در نقطه اتصال ثابت نگاه دارد. در یک شرایط ماندگار مفروض بین جریان جبران‌کننده I_r و ولتاژ نقطه اتصال جبران‌کننده V نسبت معینی وجود دارد. این نسبت دارای دیمانسیون سوسپتانس بوده و اگر I_r نسبت به V پیش‌فاز باشد، سوسپتانس کاپاستیو و اگر پس‌فاز باشد اندوکتیو می‌باشد. این موضوع مبین این است که در شرایط ماندگار ماشین سنکرون می‌تواند با یک خازن و یا یک راکتور جایگزین گردد.

البته، اگر توان انتقالی در طول خط تغییر نماید ولتاژ V تغییر خواهد کرد. به منظور برگرداندن ولتاژ V به مقدار ثابت، مقادیر سوسپتانس کاپاستیو و یا اندوکتیو همچنین بایستی تغییر نماید. این مطلب پیشنهاد می‌کند که اگر سوسپتانس یک خازن و یا راکتور واقعی بتواند تغییر نماید و یا کنترل شود به طریقی که ولتاژ را در نقطه اتصال ثابت نگاهدارد، این وسیله عملاً معادل با ماشین سنکرون خواهد بود. شکل ۳۰ اصل تغییر یافتن سوسپتانس به طریقی که ولتاژ ترمینال ثابت بماند، را نشان می‌دهد.

تاکنون راجع به اینکه وسیله جبران‌کننده موازی بایستی مقدار ولتاژ را در نقطه اتصال خودش ثابت نگاه دارد بحث شد. تحت شرایط ماندگار یا شرایطی که تغییرات خیلی کند است، جبران‌کننده استاتیک (یعنی جبران‌کننده‌ای که دارای قسمت متحرک نمی‌باشد) می‌تواند وظیفه ماشین سنکرون که در نقطه میانی خط نصب می‌شود، را انجام دهد. در شرایطی که تغییرات خیلی سریع است اینرسی روتور ماشین سنکرون فاز ولتاژ را در نقطه اتصال تحت تاثیر قرار می‌دهد و علتش این است که بین آن و سیستم در موقع شتاب گرفتن و یا کند شدن روتور، انرژی جنبشی مبادله می‌شود. جبران‌کننده

استاتیک خالص نمی تواند با سیستم تبادل انرژی نماید و این امر منجر می شود به اینکه در شرایط تغییرات سریع تاثیر متفاوتی بر سیستم وارد شود.



شکل ۳۰ - اصل ثابت ماندن ولتاژ ac در ترمینال سوسپانسیون قابل کنترل.

در این بخش تئوری جبران با تقسیم بندی خط در شرایط ماندگار و شرایط تغییرات بسیار کند - یعنی شرایط تغییرات کندی که بتوان از تغییرات انرژی جنبشی ماشین گردان صرف نظر کرد - ارائه می گردد. علیرغم این، ملاحظه می شود که در رژیم های معینی، جبران با تقسیم بندی خط اساساً یک فرایند دینامیک می باشد (از دیدگاه مهندس کنترل).

۲-۶-۲ رفتار دینامیکی جبران کننده میانی

سوسپانسیون موازی نقطه میانی ثابت در بخش ۲-۴-۳ مورد بحث قرار گرفت. در این بخش همان نمایش خط انتقال، یعنی مدل π را مطابق شکل ۲۷ الف برای هر نیمه خط بکار می بریم. البته در اینجا فرض می شود که سوسپانسیون جبران کننده به طور پیوسته به طریقی کنترل می شود که ولتاژ نقطه میانی در مقدار E_m ثابت نگاهداشته می شود. تجزیه و تحلیل کاملاً یکسانی برای کندانسور سنکرون به جای سوسپانسیون قابل کنترل اعمال می شود.

حال ولتاژ نقطه میانی به وسیله معادله ۹۲ به ولتاژ ترمینال مربوط می شود، بنابراین با $E = E_s = E_r$ نتیجه می شود که

$$1 - s = \frac{E}{E_m} \cos \frac{\delta}{2} \quad (133)$$

در این مرحله جالب نیست که δ را به عنوان معادل درجه جبران کنندگی سری تفسیر نمائیم. بلکه از آن در بدست آوردن سوسپتانس B_r ، که برای برقرار کردن معادله ۱۳۳ لازم است، استفاده می شود. بنابراین (با جایگزینی از معادلات ۸۶ و ۹۱ داریم)

$$B_r = -\frac{4}{X_l} \left[1 - \frac{E}{E_m} \cos \frac{\delta}{2} \right] + \frac{B_c}{2} \quad (134)$$

که در آن B_c سوسپتانس کاپاسیتیو کل خط و X_l راکتانس کل خط، مطابق شکل ۲۷ الف است. حال این معادله به ما می گوید که چگونه B_r بایستی با زاویه انتقال δ تغییر نماید تا ولتاژ در نقطه میانی در مقدار E_m ثابت نگاهداشته شود. بدیهی است که از طریق δ ، B_r با توان انتقالی خط تغییر می یابد. از آنجائی که هم اکنون δ با δ تغییر می کند (معادله ۱۳۳)، مشخصه توان انتقالی تغییر می کند. از

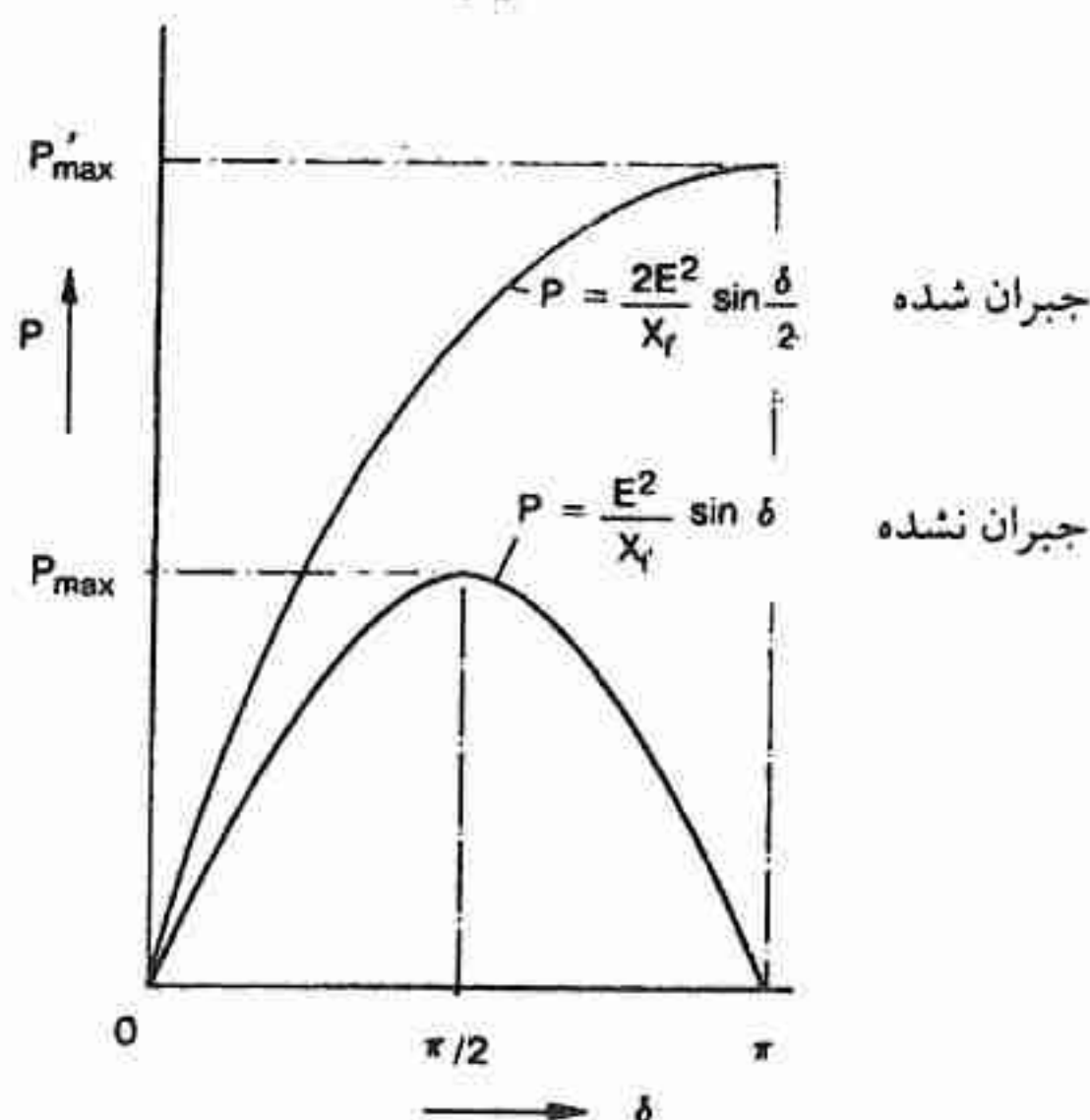
معادله ۹۰ داریم

$$P = \frac{E^2}{X_l (1 - s)} \sin \delta = \frac{E_m E}{X_l \cos (\delta/2)} \sin \delta \quad (135 \text{ الف})$$

یعنی

$$P = 2 \frac{E_m E}{X_l} \sin \frac{\delta}{2} \quad (135 \text{ ب})$$

این معادله با معادله ۱۳۲ یکسان است. این دلالت دارد به اینکه در حالت ماندگار خط به دو نیمه



شکل ۳۱ - مشخصه توان انتقالی خط با حضور جبران کننده ولتاژ - ثابت واقع در نقطه میانی ($E_m = E$)

مستقل تقسیم می شود. اگر $E_m = E$ مشخصه توان انتقالی خط از معادله زیر به دست می آید

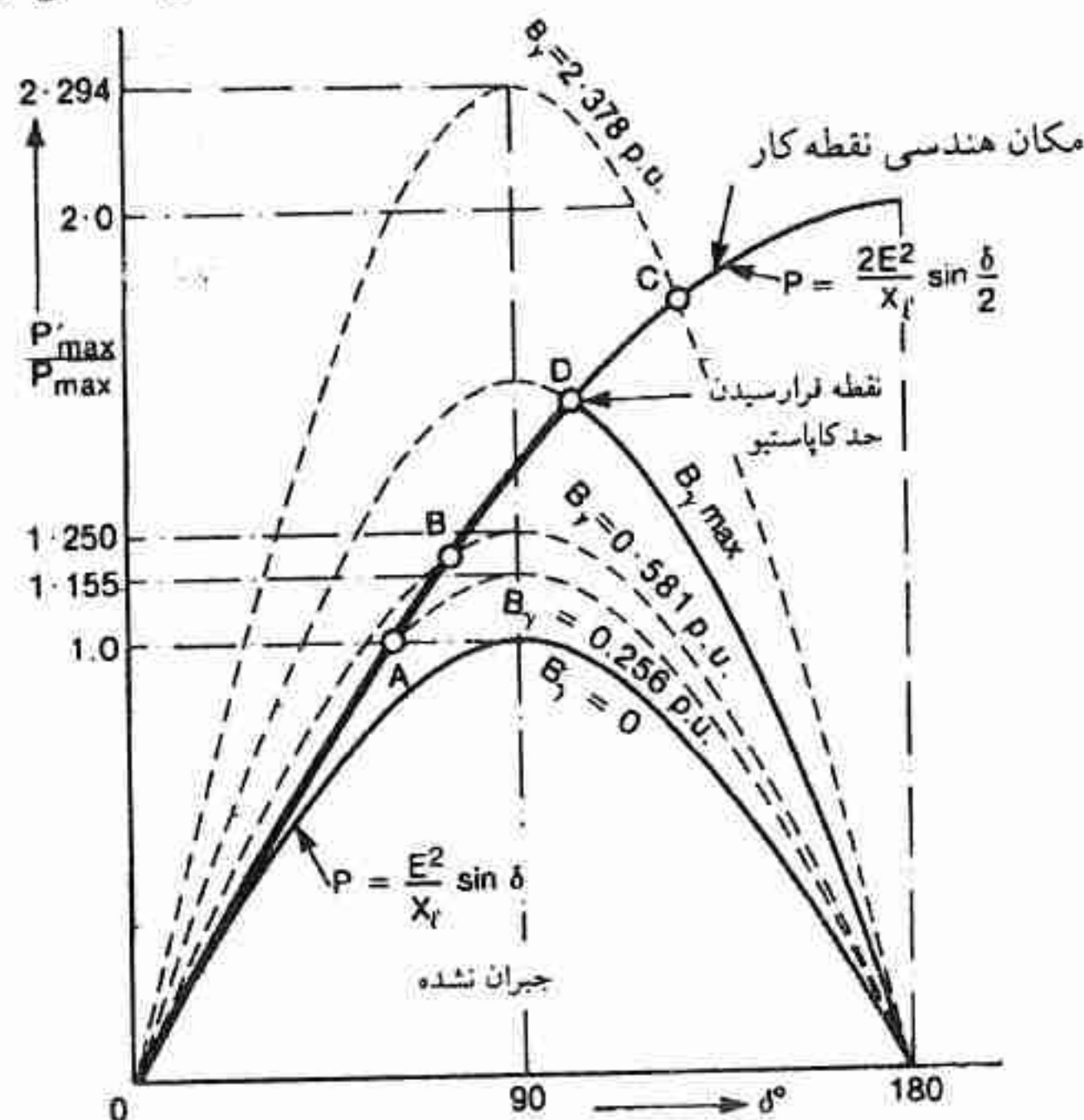
$$P = \frac{2E^2}{X_1} \sin \frac{\delta}{2} \quad (136)$$

این معادله در شکل ۳۱ (منحنی بالایی) نشان داده شده است. حداکثر توان انتقالی برابر است با $2E^2/X_1$ ، که دو برابر حد توان انتقالی حالت ماندگار خط جبران نشده است. و این حد در $\delta/2 = \pi/2$ یعنی در زاویه انتقال ۹۰ درجه در هر نیمه خط و زاویه انتقال ۱۸۰ درجه در کل خط، اتفاق می افتد. (الف) نمایش رفتار دینامیکی - مشخصه انتقالی که به وسیله معادله ۹۰ بیان شده است را می توان به صورت یک موج سینوسی که دامنه اش P'_{\max} و بر حسب δ تغییر می کند، تفسیر کرد. در معادله ۱۳۵، P'_{\max} همچنین بر حسب δ تغییر می کند و بنابراین همچنین بر حسب P تغییر می کند (از طریق معادله ۱۳۵ ب). بنابراین می توان نوشت

$$P = P'_{\max} \sin \delta \quad (137)$$

$$P'_{\max} = \frac{E_m E}{X_1 \cos(\delta/2)} \quad (138)$$

(δ) را همواره می توان از معادله ۱۳۵ ب بدست آورد، زیرا E ، E_m و X_1 ثابت هستند. و این منجر به مفهوم یک دسته موج سینوسی با دامنه های متغیر P'_{\max} مطابق شکل ۳۲ می گردد (منحنی های خط



شکل ۳۲ - رفتار دینامیکی جبران کننده موازی واقع در نقطه میانی

چین). هر کدام از منحنی ها مربوط به یک مقدار ثابت سوسپتانس جبران کننده B_r است. به عنوان مثال، فرض کنید مقدار P برابر حد پایداری حالت ماندگار خط جبران نشده باشد، $P_{\max} = E^2/X_1$

از معادله ۱۳۶ با $E_m = E$ ، $\delta = 2 \sin^{-1}(1/2) = 60^\circ$ است. نقطه کار در نقطه A شکل ۳۲ خواهد بود. از معادله ۱۳۸، $P'_{\max} = P_{\max} / \cos(30^\circ) = 1/155 P_{\max}$ ، یعنی مشخصه توان انتقالی جدید دارای حداکثر توان انتقالی $1/155 P_{\max}$ می‌باشد.

اگر توان انتقالی تا مقدار $1/2 P_{\max}$ ، افزایش یابد زاویه δ تا مقدار $2 \sin^{-1}(1/2) = 73/74^\circ$ و P'_{\max} تا مقدار $P_{\max} / \cos(36/87^\circ) = 1/25 P_{\max}$ افزایش می‌یابد. نقطه کار در نقطه B مطابق شکل ۳۲ است. اثر کنترلی جبران‌کننده میانی مجبور می‌کند که نقطه کار بر روی مکان هندسی که توسط معادله ۱۳۶ تعریف می‌شود، حرکت نماید و در هنگام تغییر P از یک منحنی سینوسی مربوط به B_r ثابت به منحنی دیگر به آرامی عبور کند.

برای $P > \sqrt{2} P_{\max}$ ، δ بزرگتر از 90° درجه است. و مادامی که $dP/d\delta > 0$ است سیستم پایدار است (یعنی، مادامی که یک افزایش در زاویه انتقال با یک افزایش در توان انتقالی همراه است، رجوع شود به بخش ۲-۲-۶). البته، حال نقطه کار در طرف ناپایدار منحنی سینوسی B_r (ثابت) قرار دارد. به عنوان مثال، اگر $P = 1/8 P_{\max}$ و $\delta = 2 \sin^{-1}(1/8) = 128/32^\circ$ و $P'_{\max} = 2/294 P_{\max}$ ، نقطه کار در نقطه C شکل ۳۲ است. سیستم پایداری خود را حفظ می‌کند به این صورت که اگر زاویه δ به تدریج افزایش یابد، جبران‌کننده فوراً با تغییر B_r ، پاسخ می‌دهد طوری که V_m را ثابت نگاهداشته و توان P'_{\max} را به مقداری که معادله ۱۳۸ را برقرار کند افزایش می‌دهد و در نتیجه نقطه کار بر روی مشخصه پایدار $P = 2 P_{\max} \sin(\delta/2)$ حرکت خواهد کرد.

بطور نمونه، در سیستم‌های انتقالی که بطریق تقسیم‌بندی خط، عمل جبران انجام می‌شود و خطوط در سطوح توان بالایی کار می‌کنند، سوسپتانس جبران‌کننده موثر B_r کاپاسیتو می‌باشد. در عمل یک حد اقتصادی در مورد توان راکتیو کاپاسیتو جبران‌کننده وجود دارد. در انواع متعددی از جبران‌کننده‌ها، وقتی این حد فرا می‌رسد جبران‌کننده نقش خود را در ثابت نگاهداشتن ولتاژ در ترمینال خود از دست داده و بصورت یک سوسپتانس ثابت رفتار می‌نماید. در نتیجه، نقطه کار، مشخصه پایدار دینامیکی $P = 2 P_{\max} \sin \lambda/2$ را ترک نموده و بر روی منحنی سینوسی $B_r -$ ثابت که مربوط به مقدار حداکثر B_r ، یعنی $B_{r\max}$ است، حرکت می‌نماید. این نقطه عزیمت و ترک منحنی در نقطه D شکل ۳۲ نشان داده شده است. هرچه مقدار $B_{r\max}$ بیشتر باشد شیب (منفی) مشخصه B_r (ثابت) در نقطه عزیمت تندتر است. اگر $B_{r\max}$ کوچکتر باشد نقطه عزیمت در طرف پایدار یکی از منحنی‌های سینوسی خط‌چین شکل ۳۲ نظیر نقاط A و B اتفاق می‌افتد. البته، مقدار توان انتقالی P و زاویه انتقال θ بایستی در مقدار خیلی کمتری نگاهداشته شوند. به عبارت دیگر، مقدار نامی جریان

خازنی جبران‌کننده، یکی از فاکتورهای مهمی است که افزایش ممکن در حداکثر توان انتقالی را محدود می‌کند.

(ب) توان راکتیو مورد نیاز در ترمینال‌ها - از معادلات ۹۵، ۱۳۳ و ۱۳۴ مشاهده می‌شود که توان راکتیو مورد نیاز در ابتدای خط بوسیله رابطه زیر بدست می‌آید.

$$Q_s = \frac{2E^2}{X_\ell} \left[\left(1 - \frac{X B_c}{\lambda} \right) - \frac{E_m}{E} \cos \frac{\delta}{2} \right] \quad (139)$$

که در آن $E_s = E_r = E$ در نظر گرفته شده است. از روی تقارن $Q_s = -Q_r$ می‌باشد.

(پ) کنترل جبران‌کننده و نیازمندی توان راکتیو - یک سیستم کنترل عملی برای تغییر دادن $B\lambda$ بر معاله ۱۳۴ استوار نخواهد بود، زیرا در پست جبران‌کننده میانی اطلاعاتی راجع به - در دسترس نیست، و می‌توان از یک سیستم کنترل با فیدبک برای برقرار کردن $V_m = E_m$ استفاده کرد. در جبران‌کننده از نوع راکتور قابل اشباع، چنین هدفی طی یک فرایند تنظیم ذاتی برآورده می‌شود. با ثابت بودن $V_m = E_m$ ، توان راکتیو جبران‌کننده $Q_r = V_m^2 B_r$ تابعی از δ خواهد بود.

$$Q_r = V_m^2 B_r = -E_m^2 \left\{ \frac{2}{X_\ell} \left[1 - \frac{E}{E_m} \cos \frac{\delta}{2} \right] - \frac{BC}{2} \right\} \quad (140)$$

Q_r ، از طریق پارامتر δ و بوسیله معادلات ۱۳۵ و ۱۴۰ به توان انتقالی P ارتباط داده می‌شود. توجه داریم که $X_\ell B_c = \omega^2 a^2 lc = \theta^2$ ، که θ طول الکتریکی خط برحسب رادیان است.

۲-۶-۳ مثال خطی که به طریق تقسیم‌بندی خط جبران‌شده است^۱

به عنوان مثالی از جبران خط با تقسیم‌بندی (یا جبران موازی دینامیکی)، یک خط ۴۰۰ mi با جبران‌کننده ولتاژ ثابت نقطه میانی را در نظر بگیرید. مطابق بخش ۲-۵-۳، $X_l = 0.8108 Z_0$ و $B_c = 0.8108 / Z_0$ است. مشخصه توان انتقالی به وسیله معادله ۱۳۲ داده شده است که

$$P = \frac{2 \times 1^2}{0.8108} \sin \frac{\delta}{2} P_0 = 2.4667 P_0 \sin \frac{\delta}{2} \quad (141)$$

که در آن $E_s = E_r = E = 1 \text{ pu}$ است. \dot{P}_{\max} کاملاً به مقدار $2.4667 P_0$ که با ۵۰ درصد جبران

۱- دو نیمه خط مجدداً بصورت مدار معادل π نمایش داده شده است.

$$Q_r = - \left[4/9334 \left(1 - \cos \frac{\delta}{2} \right) - 0/4054 \right] P_0 \quad (142)$$

و توان راکتیو ترمینال از معادله ۱۳۹ بدست می آید بنابراین

$$Q_s = -Q_r = 2/4667 \left(0/9178 - \cos \frac{\delta}{2} \right) P_0 \quad (143)$$

در حالت بی باری $Q_s = -0/2027 P_0$ مربوط به توان راکتیو شارژ کردن خط به طول ۱۰۰ مایل نزدیک به ابتدای خط است. (توجه اینکه این متفاوت از مقدار $0/2055 P_0$ است که از معادله ۳۰ بدست آمده است. این به واسطه تقریبی است که در مدار معادل π وجود دارد). در حالت بی باری، $Q_r = 0/4054 P_0$ مربوط به توان راکتیو شارژ خط به طول ۲۰۰ مایل در قسمت مرکزی خط است.

تغییرات پارامترهای اصلی در جدول ۷ بر حسب تغییرات توان نشان داده شده است. ملاحظه می شود که توان راکتیو جذب شده و یا تولید شده در هر ترمینال دقیقاً برابر با نصف توان جبران کننده است. ماشین های سنکرون ترمینال، قسمت انتهایی ۱۰۰ مایل خط و جبران کننده، قسمت مرکزی ۲۰۰ مایلی خط را جبران می نمایند.

گرچه زاویه انتقال δ در کل از 90° درجه تجاوز می کند، مادامی که ولتاژ نقطه میانی ثابت نگاهداشته می شود انتقال تا زاویه 180° درجه پایدار می ماند. ملاحظه می شود که در انتقال توان تا مقدار $1/25 P_0$ نیازی به توان راکتیو خازنی اضافی جبران کننده وجود ندارد. اینکه آیا سیستم در این سطح انتقال توان دارای پایداری گذرا هست یا خیر سئوالی است که در فصل آینده مورد بحث قرار خواهد گرفت.

جدول ۷

مثالی از خط ۴۰۰ مایلی که بوسیله جبران کننده ولتاژ - ثابت
واقع در نقطه میانی خط، جبران میشود

$p = \frac{P}{P_0}$	E_m	$\frac{Q_s}{P_0} = -\frac{Q_r}{P_0}$	$-Q_r/P_0$	δ (°)	δ بدون جبران (°)
0	1.000	-0.2027	-0.4054	0	0
0.25	1.000	-0.1900	-0.3800	11.634	10.440
0.50	1.000	-0.1515	-0.3030	23.390	21.249
0.75	1.000	-0.0859	-0.1718	35.402	32.932
1.00	1.000	0.0091	0.0182	47.832	46.456
1.25	1.000	0.1375	0.2749	60.895	64.966
1.50	1.000	0.3058	0.6116	74.905	ناپایدار
1.75	1.000	0.5256	1.0512	90.380	ناپایدار
2.00	1.000	0.8202	1.6404	108.34	ناپایدار
2.25	1.000	1.2530	2.5060	131.60	ناپایدار
2.4667	1.000	2.2640	4.5280	180.00	ناپایدار

α به علامت قراردادی برای Q_s و Q_r توجه شود: Q_s و $-Q_r$ برای حالت جذب هر دو منفی هستند و آنگاه جبران کننده اندوکتیو است Q_s و $-Q_r$ برای حالت تولید مثبت هستند، آنگاه جبران کننده کاپاسیتیو است.

مراجع

1. A. Boyajian, "The Physics of Long Transmission Lines," *Gen. Electr. Rev.* 15-22, July 1949.
2. F. Illiceto and E. Cinieri, "Comparative Analysis of Series and Shunt Compensation Schemes for AC Transmission Systems," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* 96(6), 1819-1830 (1977).
3. F. G. Baum, "Voltage Regulation and Insulation for Large Power Long Distance Transmission Systems," *J. AIEE* 40, 1017-1032 (1921).
4. C. L. Fortescue and C. F. Wagner, "Some Theoretical Considerations of Power Transmission," *J. AIEE* 43, 106-113 (1924).
5. E. W. Kimbark, "How to Improve System Stability Without Risking Subsynchronous Resonance," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* 96 (5), 1608-1613 (1977).
6. G. L. Wilson and P. Zarakas, "Anatomy of a Blackout," *IEEE Spectrum*, 15(2), 38-46 (February 1978).
7. S. B. Crary, *Power System Stability*, Wiley, New York, 1945, 1947.
8. E. W. Kimbark, *Power System Stability*, Wiley, New York, 1948.
9. R. T. Byerly and E. W. Kimbark, *Stability of Large Electric Power Systems*, IEEE Press, 1974.
10. C. A. Gross, *Power System Analysis*, Wiley, New York, 1979.
11. G. Jancke, N. Fahlén, and O. Nerf, "Series Capacitors in Power Systems," *IEEE Trans., Power Appar. Syst.* 94, 915-925 (1975).
12. S. A. Miske, "A New Technology for Series Capacitor Protection," *Electr. Forum*, 5(1), 18-20 (1979).
13. G. D. Breuer, H. M. Rustebakke, R. A. Gibley, and H. O. Simmons Jr., "The Use of Series Capacitors to Obtain Maximum EHV Transmission Capability," *IEEE Trans., Power Appar. Syst.* 83, 1090-1102 (1964).
14. L. O. Barthold et al., "Static Shunt Devices for Reactive Power Control," *CIGRE Paper* 31-08, (1974).
15. E. Friedlander and K. M. Jones, "Saturated Reactors for Long Distance Bulk Power Lines," *Electr. Rev.*, 940-943 (June 1969).
16. R. Elsliger et al., "Optimization of Hydro-Québec's 735-kV Dynamic-Shunt-Compensated System Using Static Compensators on a Large Scale," *IEEE PES Winter Power Meeting, Paper A78 107-5*, New York, 1978.
17. D. A. Woodford and M. Z. Tarnawsky, "Compensation of Long Distance AC Transmission Lines by Shunt Connected Reactance Controllers," *IEEE Trans., Power Appar. Syst.* 94, 655-664 (1975).
18. E. Friedlander, "Transient Reactance Effects in Static Shunt Reactive Compensators for Long AC Lines," *IEEE Trans., Power Appar. Syst.* 95, 1669-1680 (1976).
19. J. D. Ainsworth et al., "Long Distance AC Transmission Using Static Voltage Stabilizers and Switched Linear Reactors," *CIGRE Paper* 31-01, (1974).
20. J. D. Ainsworth et al., "Recent Developments towards Long Distance AC Transmission Using Saturated Reactors," *IEE Conf. Publ.* 107, 242-247 (1973).
21. M. Boidin and G. Drouin, "Performance Dynamiques des Compensateurs Statiques à Thyristors et Principes de Regulation," *Rev. Gen. Electr.*, 88(1), 58-73 (1979). (In French)

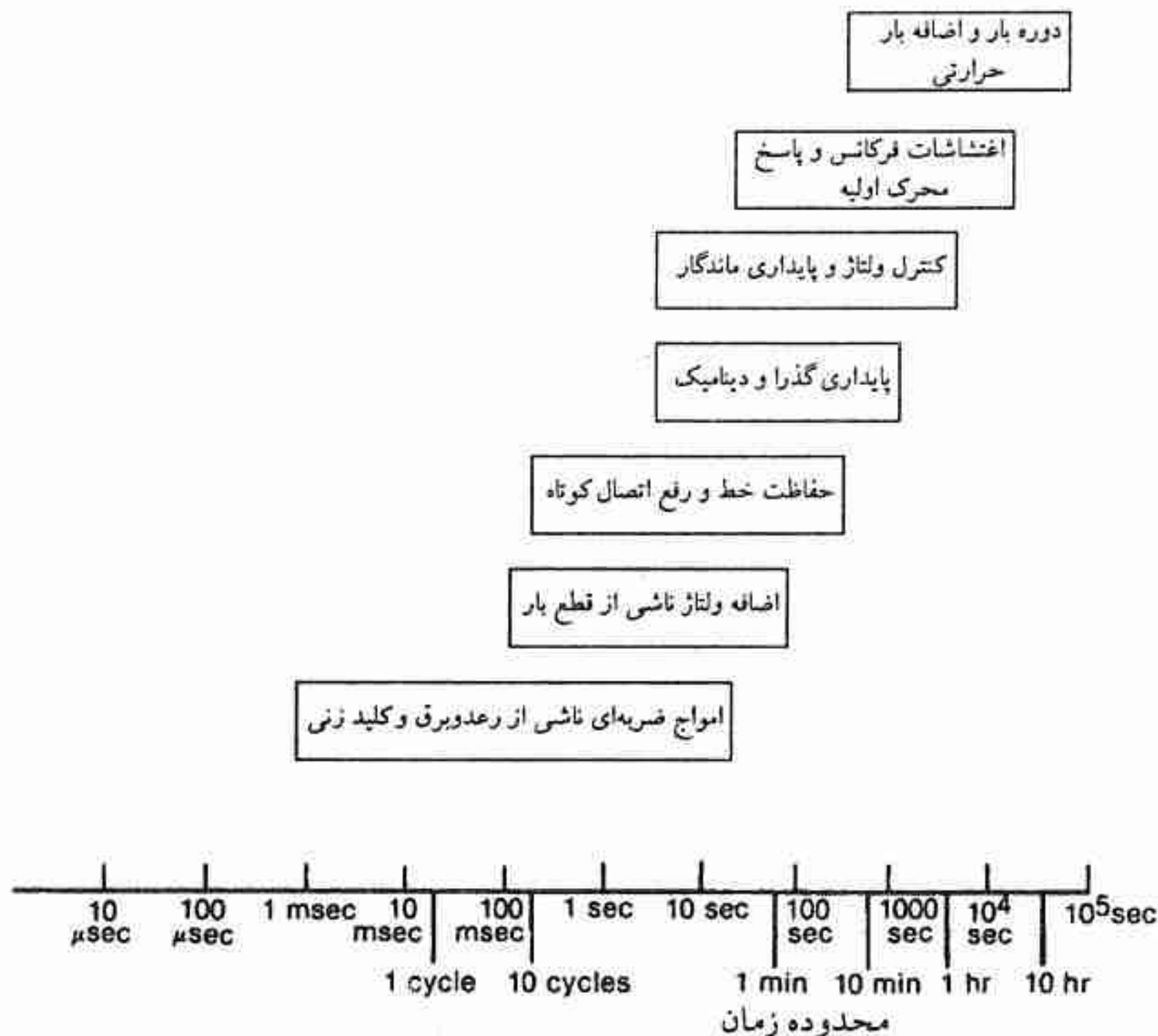
جبران توان راکتیو و رفتار دینامیکی سیستم‌های انتقال

R . L . HAUTH

۳-۱ مقدمه

۳-۱-۱ دینامیک سیستم قدرت الکتریکی

یک سیستم قدرت الکتریکی هرگز برای مدت طولانی در حالت تعادل باقی نمی‌ماند. تغییرات دائمی، حالت تعادل را بهم زده طوری که سیستم تقریباً همیشه در انتقال و عبور بین شرایط تعادل و ماندگار است. تئوری فصل ۲ در شرایط ماندگار و وقتی تغییرات به‌کندی انجام می‌گیرد قابل قبول است. این فصل رفتار دینامیکی سیستم الکتریکی را در خلال انتقال و عبور از یک شرایط تعادل به شرایط دیگر تعادل بحث و بررسی می‌کند. شکل ۱ رنج کامل پدیده‌های دینامیک را - که رفتار یک سیستم قدرت را مشخص می‌کنند - نشان می‌دهد. شرایط ماندگار که در فصل ۲ بررسی شد در انتهای سمت راست نشان داده شده است. در اینجا انتقال دینامیک بیشتر مورد نظر ماست که فاصله زمانی نزدیک به مرکز شکل ۱ را در بر می‌گیرد. در این رژیم کنترل تغییرات ولتاژ و توزیع مجدد گشتاور (اندازه حرکت)^۱ میان ماشین‌های سنکرون که از اتصال کوتاه، عمل کلیدزنی و تغییرات بار ناشی می‌شود، ضرورت دارد. کنترل بایستی سریع و دقیق باشد، چه در غیر این صورت سیستم پایداری خود را در محل و یا در کل سیستم از دست می‌دهد.



شکل ۱ - محدوده زمانی انتقالات در حالت یک سیستم قدرت الکتریکی

در این فصل تاکید بر نقش کنترلی جبران‌کننده‌های مختلف نظیر خازنهای سری و موازی، راکتور موازی، کندانسورهای سنکرون و به خصوص جبران‌کننده‌های راکتیو استاتیکی است. گرچه اینها تنها وسایل کنترل ولتاژ و نوسانات توان نیستند، بلکه به دلیل هزینه بالای تجهیزات خطوط و ضرورت انتقال حداکثر توان ممکن از کمترین تعداد خطوط، اینها اهمیت فراوانی می‌یابند.

۳-۱-۲ ضرورت جبران راکتیو قابل تنظیم

نیاز به جبران توان راکتیو قابل تنظیم را می‌توان به سه طبقه زیر تقسیم‌بندی کرد:

۱- نیاز به حفظ پایداری ماشین‌های سنکرون - خواهیم دید که کنترل ولتاژ به وسیله جبران توان راکتیو، در خلال اغتشاش که منجر به تغییرات سریع در زاویه روتور ماشین‌های سنکرون می‌گردد، اثر مثبتی در پایداری سیستم دارد. پایداری گذرا و پایداری دینامیکی سیستم هر دو تقویت می‌گردند. حتی این امکان وجود دارد که در هنگام وقوع خطا و یا سایر اغتشاشات فاحش، با استفاده از

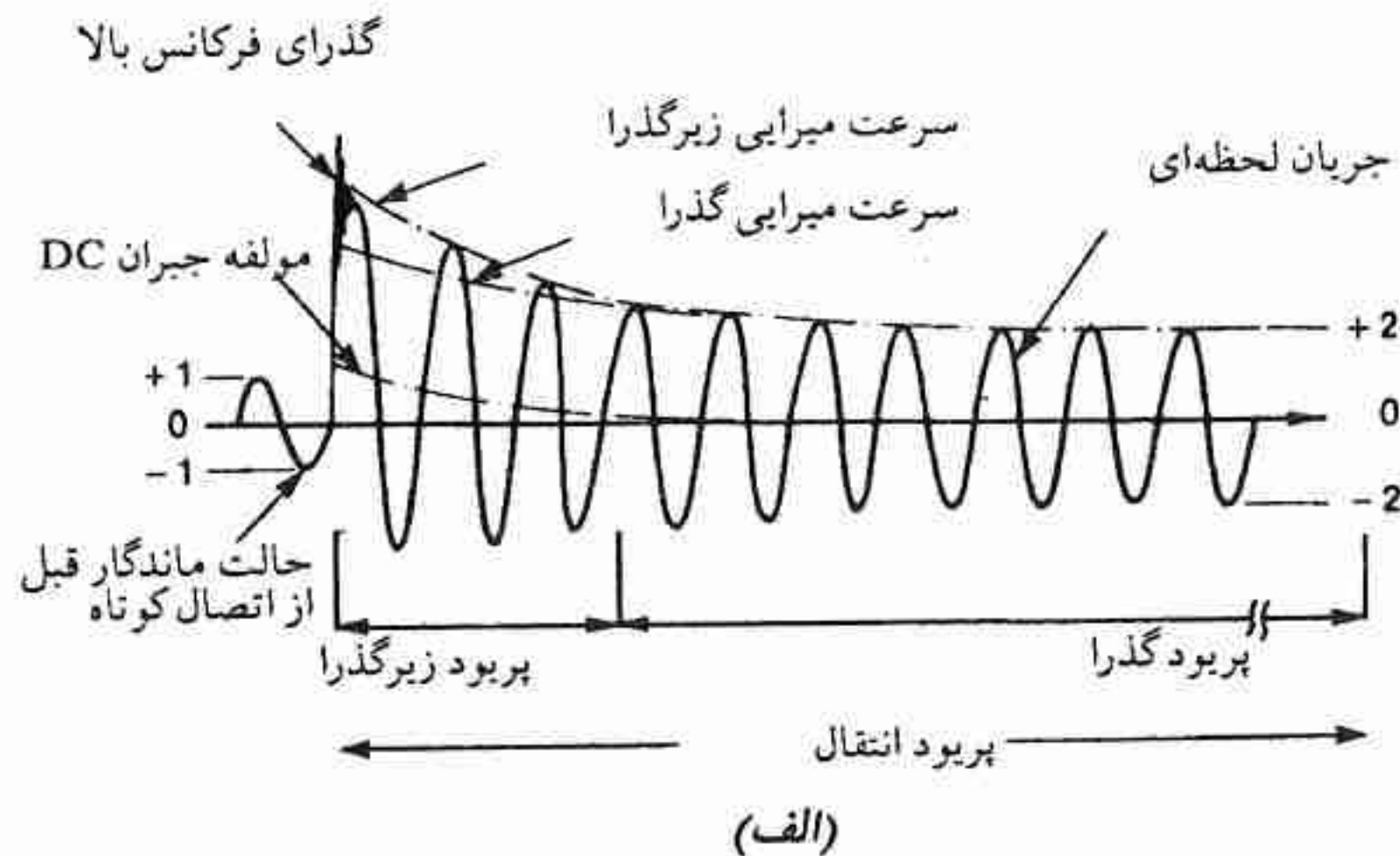
جبران‌کننده‌ها و لتاژها را برای چندین ثانیه از محدوده مقادیر نامی ماندگارشان خارج ساخت و به این ترتیب پایداری سیستم را باز هم افزایش داد.

۲- ضرورت کنترل و لتاژ و نگهداری آن در محدوده قابل قبول حول مقدار مطلوب ماندگار به منظور فراهم آوردن کیفیت سرویس به بارهای مصرفی - به دنبال وقوع تغییرات ناگهانی در بار و یا در پیکربندی شبکه^۱ به واسطه عمل کلیدزنی، لازم است که در فاصله زمانی کوتاه چند سیکل فرکانس پایه عمل تصحیح و لتاژ انجام گیرد. برای سایر تغییرات و لتاژ تصحیح و لتاژ در فاصله چند ثانیه کفایت می‌کند. این تغییرات و لتاژ، حتی اگر موقتی باشد اگر چنانچه کنترل نگردد منجر به قطع و یا وارد آمدن خسارت به موسسه یا وسایل مصرف‌کنندگان برق می‌گردد. حتی تغییرات کوچک و لتاژ، مخصوصاً تغییراتی که منجر به چشمک زدن لامپ می‌گردند اغلب قابل اعتراض هستند. (مساله چشمک زدن لامپ با توجه خاصی در فصل ۹ بررسی خواهد شد و در این فصل بحث نخواهد شد).

۳- نیاز به تنظیم پروفایل و لتاژ در شبکه به منظور جلوگیری از عبور توان راکتیو غیر ضروری از خطوط انتقال انرژی. به این منظور با استفاده از جبران توان راکتیو می‌توان تلفات انتقال را به حداقل رساند. در حالی که جبران توان راکتیو بایستی تنظیم شود و یا متناوباً تغییر نماید تا اینکه تلفات در حداقل قرار گیرد، این تنظیم می‌تواند ندرتا در چند دقیقه انجام گیرد تا تغییر مطلوب را ایجاد نماید. به منظور سهولت در توصیف تاثیر روشهای مختلف جبران‌سازی بر روی رفتار دینامیکی سیستم، پرپود انتقالی بین شرایط تعادل، به پرپودهای زمانی مجزا که در بخش ۳-۲ تعریف می‌شوند، تقسیم می‌گردند. به دلیل نقش جبران‌سازی در حفظ پایداری سیستم، اشکال مختلف ناپایداری که می‌تواند رخ دهد را نیز در بخش ۳-۲ مرور می‌کنیم.

۳-۲ چهار پرپود زمانی

به طور کلی، هر اغتشاشی که منجر به تغییرات قابل توجه در و لتاژ گردد، را می‌توان بر حسب ۴ پرپود یا ۴ مرحله از آغاز اغتشاش تا پایان، وقتی که سیستم به پایداری جدیدی رسیده است، بررسی نمود. ۴ پرپود را می‌توان به کمک شکل ۲ که به وسیله یک اتصال کوتاه خط، اغتشاش شروع شده است، تعریف نمود. اینها نه با فاصله زمانی شان که می‌تواند در محدوده وسیعی تغییر نماید، بلکه با حوادث و فرایندهایی که در آنها رخ می‌دهد مشخص می‌شوند.



شکل ۲ - مشخصه پریودهای زمانی: تقسیمات فرعی پریود انتقال. (الف) پریودهای گذرا و زیر گذرا، هنگامیکه نوسانات زاویه انتقال ناچیز است، بکار برده می شود.

چند سیکل اول پس از اغتشاش نظیر خطا، پریود زیر گذرا^۱ نامیده می شود. در خلال این فاصله زمانی یک کاهش سریع اولیه در مولفه های ac و dc جریان خطا وجود دارد. این مولفه ها همچنین ممکن است مولفه های فرکانس بالا را نیز در بر داشته باشند که معمولاً به سرعت از بین می روند. در خلال این پریود است که برق گیرها^۲، جرقه گیرها^۳ و راکتورهای غیرخطی (به انضمام راکتانس مغناطیس کننده ترانسفورماتور) عمل کرده و از ولتاژ زیاد که ممکن است به خرابی عایق ها منجر شود، جلوگیری می نمایند.

پریود گذرا^۴ از نظر توالی در مرحله دوم است. همانطوری که در شکل ۲ الف ملاحظه می شود پس از پریود زیر گذرا، این پریود به مدت چندین سیکل طول می کشد. در خلال این مدت ماشین های سنکرون گاهی به طور تقریب با یک emf در پشت یک راکتانس ثابت موسوم به راکتانس گذرا X_d' نشان داده می شوند. در این فصل منظور ما از پریود گذرا پریودی است که بتوان فرض کرد در آن تغییرات قابل ملاحظه ای در زاویه روتور ماشین های سنکرون رخ نمی دهد.

تعداد زیادی از اغتشاشات که در سیستم قدرت رخ می دهند طوری کوچک هستند که منجر به تغییرات قابل ملاحظه در سرعت یا زاویه روتور ماشین های سنکرون نمی گردند. می توان از تغییرات

1- Subtransient Period

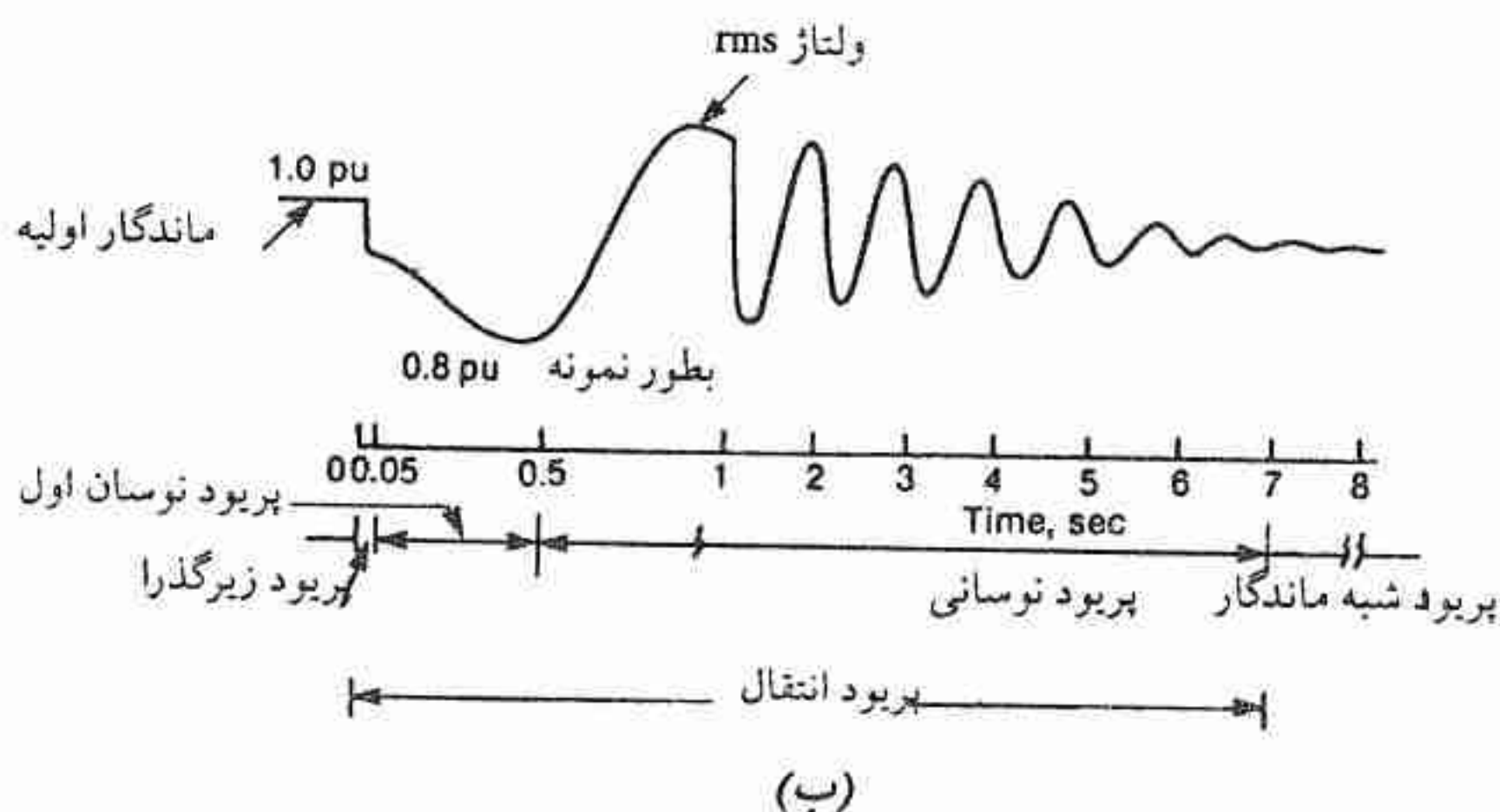
2- Surge Arrester

3- Spark Gap

4- Transient Period

زاویه روتور ماشین‌های سنکرون ناشی از اغتشاشات فاحش هم صرف‌نظر کرد در صورتی که اغتشاش خیلی دور (از نظر الکتریکی) از ژنراتور باشد. وقتی وضعیت به اینگونه است، این فصل به پروردهای زمانی شکل ۲ الف مراجعه می‌کند. هنگامی که نوسان زاویه روتور در نقطه مورد نظر قابل ملاحظه است تقسیم‌بندی فرعی یا زیر تقسیم‌بندی^۱ شکل ۲ ب مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۲ ب پرورد انتقال کامل شامل پرورد زیر گذرا، پرورد نوسان اول^۲ و پرورد نوسانی^۳ را نشان می‌دهد. پرورد نوسان اول اشاره دارد به فاصله زمانی اولین نوسان (نیم نوسان کامل^۴) زاویه روتور یا نوسان توان سنکرون‌کننده که پس از اغتشاش فاحش نظیر اتصال کوتاه پیش می‌آید. این پرورد به طور نمونه تقریباً ۱ - ۰/۵ ثانیه طول می‌کشد. در این پرورد، همچنین ماشین‌های سنکرون گاهی تقریباً با فلوی پیوسته ثابت (ولتاژ داخلی ثابت) پشت راکتانس گذرای ماشین مشخص می‌شوند. این پرورد اغلب یک پرورد بحرانی است که در خلال آن پایداری گذرا حفظ و یا از بین می‌رود (فصل ۲ بخش ۲-۱-۲).

پرورد نوسانی پروردی است که متعاقب نوسان اول می‌آید. در خلال این پرورد تغییرات دوره‌ای^۵ قابل ملاحظه‌ای در ولتاژ، جریان و توان راکتیو رخ می‌دهد. نوسانات توان سنکرون‌کننده که در اثر نوسانات زاویه روتور ماشین سنکرون به وجود آمده است به مدت ۲۰ - ۳۰ ثانیه پس از اتصال کوتاه شدید ادامه می‌یابد. مدت زمان دقیق آن به میرایی که از ناحیه کنترل تحریک و جریان میرایی در ماشین سنکرون، کنترل سرعت گاورنر توربین، و بارها ایجاد می‌شود بستگی دارد.



(ب) پروردهای نوسان اول و نوسانی، هنگامیکه نوسانات زاویه انتقال قابل ملاحظه است بکار برده می‌شود.

1- Subdivision

2- First - Swing Period

3- Oscillatory - Period

4- Half Oscillation

۵- Cyclic

پریود شبه ماندگار آخرین پریودی است که هنگامی که توان سنکرون‌کننده و نوسانات زاویه روتور از بین می‌روند، فرا می‌رسد. تئوری که در فصل ۲ بحث شد رفتار سیستم را در این رژیم توصیف می‌کند.

تعداد زیادی از اغتشاشات در سیستم قدرت با ولتاژ بالا یا خیلی ملایم هستند یا اینکه خیلی دور از ژنراتور به وقوع می‌پیوندند و موجب تغییرات قابل ملاحظه زاویه روتور نمی‌شوند. در اینگونه حالات پریود انتقال فقط شامل پریود زیرگذار و گذرا خواهد بود و ضرورت ندارد که راجع به اولین نوسان یا پریود نوسانی بحث نمائیم.

در قسمت اعظم این فصل، نحوه پاسخ سیستم قدرت جبران‌شده را بر حسب فازور جریان و ولتاژ مورد نظر قرار می‌دهیم. البته بررسی فازوری در پریودهای گذرا و زیرگذار کاملاً صحیح نیست. دلیل آن این است که، بلافاصله پس از وقوع اغتشاش ولتاژها و جریان‌ها امواج سینوسی خالص نیستند. جریان‌ها و ولتاژها دربرگیرنده مولفه‌های جریان i_{dc} ، عدم تعادل بین فازها و همچنین در صورت وجود عناصر غیرخطی شامل هارمونیک می‌باشند. به همین دلیل است که پاسخ سیستم جبران شده را به روشهای مختلف آزمایش، شبیه‌سازی کامپیوتر و مدل کردن بر روی تحلیل‌گر گذرا TNA به دست می‌آورند.

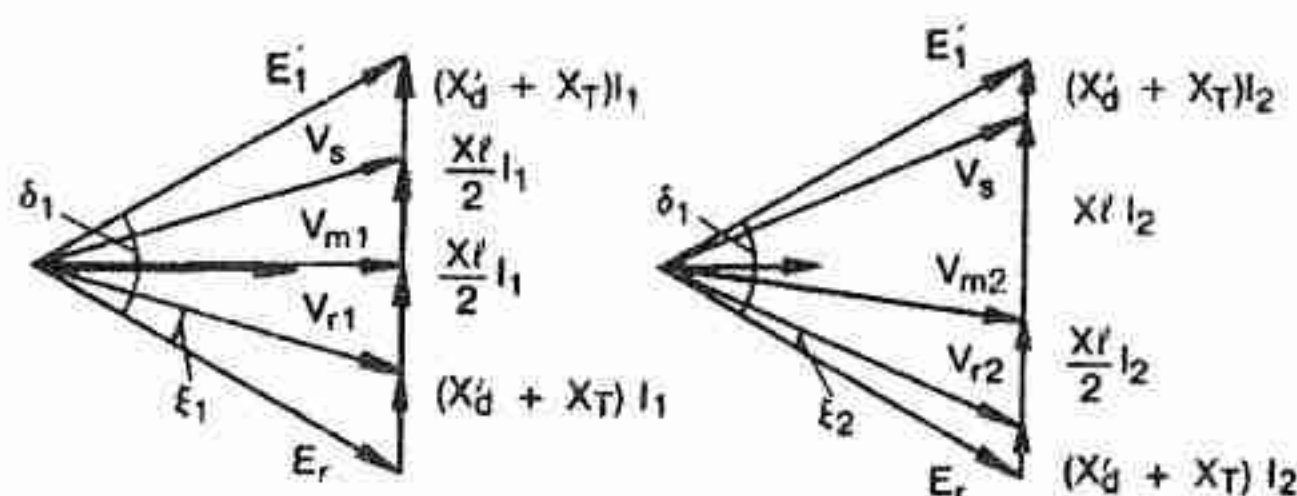
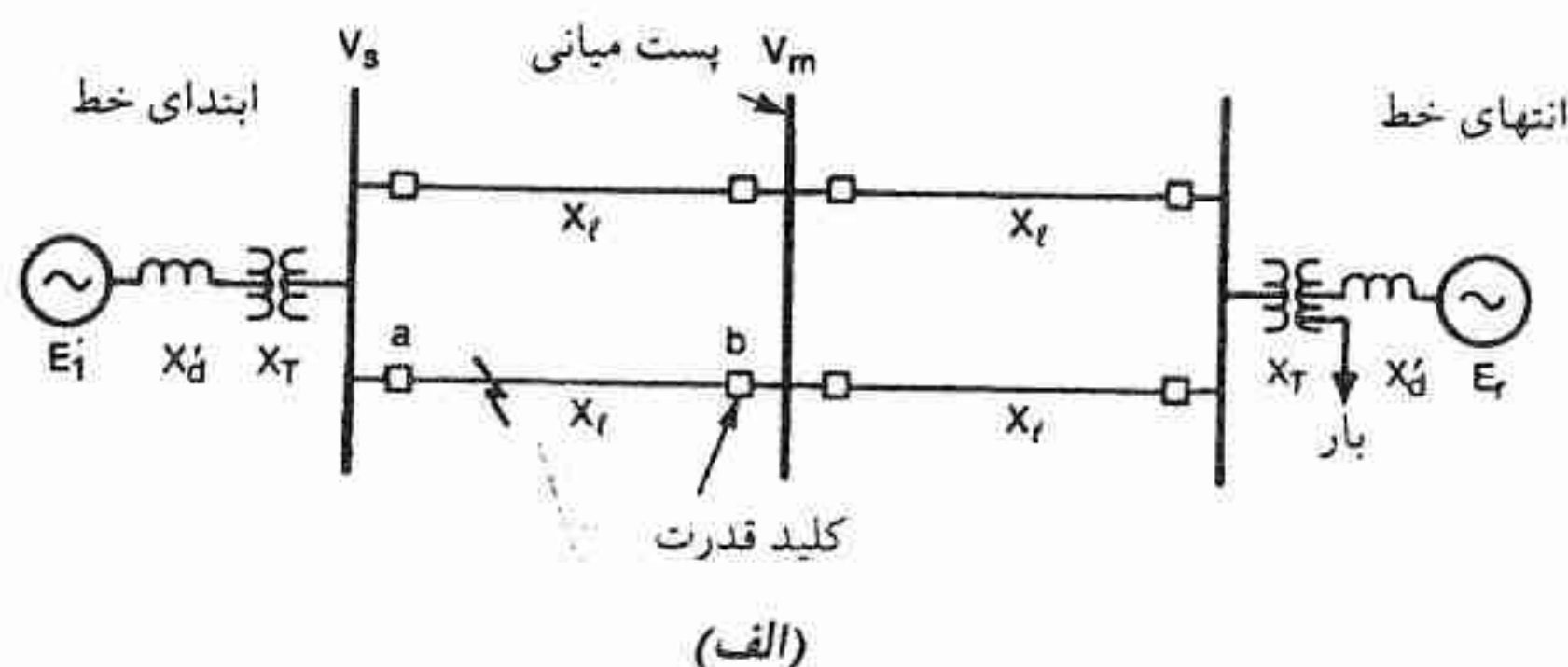
در اغلب مواردی که در این فصل مورد مطالعه قرار گرفته است از پریود زیرگذار صرف‌نظر کرده و فرض کرده‌ایم که پس از وقوع اغتشاش بلافاصله پریود گذرا شروع شده است. با توجه به این حقیقت که روش‌های جبران راکتیو که مورد نظر ماست در پریود گذرا و پریودهای بعد از آن موثر خواهند بود، اعمال چنین فرضی قابل قبول است. بعضی از جبران‌کننده‌ها در پریود زیرگذار در محدود کردن اضافه ولتاژ نقش مفید دارند اما به طور کلی این زمان برای آنکه جبران راکتیو موثر واقع شود بسیار کوچک است تنها اینکه بایستی در این فاصله زمانی حفاظت جبران‌کننده و هماهنگی آن با برق‌گیرها و سایر وسایل حفاظتی سرعت بالا رعایت گردد.

۳-۲-۱ پریود گذرا

به منظور تشریح رفتار سیستم در خلال این پریود، توالی مثبت یک فاز مدار معادل سیستم دو ماشینی شکل ۳ الف را در نظر می‌گیریم. فرض می‌شود که سیستم بدون تلفات (در ژنراتورها یا

عناصر شبکه مقاومت اهمی وجود ندارد) بوده و از کاپاسیتانس خط صرف نظر می شود. البته تئوری بر مداری که شامل مقاومت اهمی و جریان بارگیری باشد اعمال خواهد شد و این مفروضات فقط برای سهولت تشریح انجام گرفته است.

راکتانس ها طوری انتخاب شده اند که سیستم در حول باس بار (شین) V_m میانی که دارای ولتاژ V_m است، از نظر الکتریکی متقارن باشد. فرض می شود که ولتاژ منبع E_1 و E_r از نظر مقدار برابر باشند. بار در سیستم فقط باری است که در انتهای سیستم که با منبع ولتاژ ثابت E_r نشان داده می شود، وجود دارد. ژنراتور ابتدای خط توان الکتریکی را به سیستم انتهای خط تحویل می دهد که متناسب با جریان I_1 است که در حالت ماندگار اولیه جریان دارد. دیاگرام فازوری شکل ۳ ب مربوط به این شرایط اولیه است.



(ب) $|I_2| < |I_1|$ (پ)

$$\xi_2 < \xi_1$$

$$|V_{m2}| > |V_{m1}|$$

$$|V_{r2}| > |V_{r1}|$$

شکل ۳- (الف) دیاگرام تک خطی سیستم دو ماشینی (ب) دیاگرام فازور نشاندهنده شرایط اولیه (پ) دیاگرام فازور برای بلافاصله پس از قطع کلیدهای a و b .

فرض کنید که کلیدهای a و b به طور همزمان باز می‌شوند و بدین وسیله یکی از اجزا حامل جریان را از مدار قطع می‌نمایند. بلافاصله دیاگرام فازوری شکل ۳ پ نتیجه می‌شود.

حال دیاگرام فازوری را بررسی می‌کنیم. زاویه δ_1 بین ولتاژهای E'_1 و E_r ماشین‌های سنکرون ثابت باقی می‌ماند زیرا اینها به فازورهای اینرسی دورانی^۱ که نمی‌توانند سرعت دورانی خودشان را لحظه‌ای تغییر دهند، تثبیت شده‌اند. چون E'_1 و E_r مقدارشان لحظه‌ای تغییر نمی‌کند و ثابت هستند و با زاویه ثابت با هم اختلاف فاز دارند، مجموع افت ولتاژ در سیستم ثابت باقی می‌ماند. البته، چون راکتانس بین فازور V_m و V_s در اثر خارج شدن خط دو برابر شده است، جریان I_2 از مقدار اولیه I_1 تقلیل پیدا کرده است.

همانطوری که در دیاگرام فازور شکل ۳ نشان داده شده است تمامی ولتاژهای باس V_s ، V_m و V_r به طور لحظه‌ای نسبت به یکدیگر و نسبت به E_r و E'_1 شیفیت پیدا کرده‌اند. بنابراین در پریود گذرا مقادیر ولتاژهای باس به طور لحظه‌ای افزایش می‌یابند. اگر فازور ولتاژ هر دو منبع از نظر فاز و مقدار ثابت بمانند، پریود انتقال کامل بوده و دیاگرام فازور (شکل ۳ پ) حالت پایدار نهایی را نشان می‌دهد.

حال فرض می‌کنیم سیستم انتهای خط از نظر ظرفیت MVA آنقدر بزرگ است که E_r به لحاظ مقدار ثابت بوده و به طور پیوسته در سرعت سنکرون (377 rad/sec در یک سیستم 60 Hz) ثابت می‌چرخد. پس فازور E'_1 به واحد تولیدکننده با مقدار نامی معین MVA مربوط می‌شود. اگر فرض شود که توان مکانیکی اعمال شده از ناحیه توربین به ژنراتور در ابتدای سیستم ثابت است، واحد توربین - ژنراتور ابتدای سیستم شتاب می‌گیرد. دلیلش این است که با کاهش جریان از مقدار I_1 به I_2 توان الکتریکی خروجی ژنراتور کاهش یافته است. تفاوت لحظه‌ای بین توان ورودی (از توربین) و توان خروجی منجر می‌شود که واحد شتاب بگیرد و در این فاصله زمانی زاویه δ_1 افزایش می‌یابد. هنگامی که اغتشاش به قدری فاحش باشد (نظیر خارج شدن خط در مقیاس وسیع) که به تغییر سرعت واحد منجر شود، هر چند لحظه‌ای باشد پریود انتقال با پریود «نوسان اول» و پریود «نوسانی» که بعداً بررسی خواهیم کرد، همراه خواهد بود.

بنابراین در این مثال فازور ولتاژ E'_1 می‌چرخد تا اینکه زاویه δ_1 را افزایش دهد و سرانجام در یک زاویه بزرگتر که با توان اکتیو اولیه تولیدشده توسط ژنراتور ابتدای سیستم سازگار است، استقرار می‌یابد. مقادیر ولتاژ V_s ، V_m و V_r با عمل رگولاتور ولتاژ به سمت مقادیر اولیه‌شان برگشت خواهند

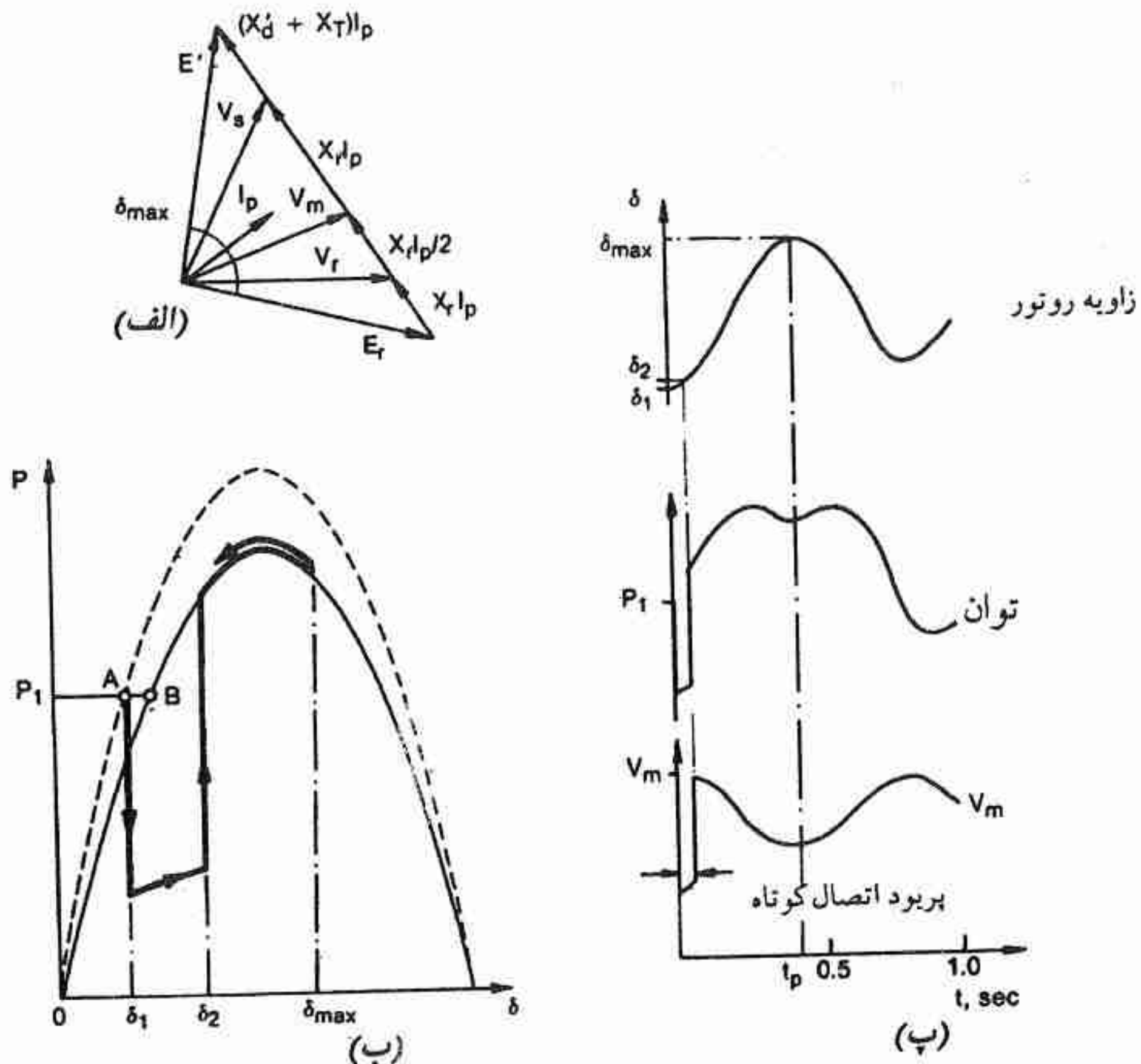
کرد. تنظیم نقاط^۱ رگولاتور، جبران‌کننده پاسیو قابل سوئیچ و یا جبران‌کننده‌های قابل کنترل، می‌توانند کنترل اضافی را فراهم کنند که سبب می‌شود ولتاژها مقادیر نامی و یا مطلوبشان را بازیابند.

۳-۲-۲ پرورد اولین نوسان و پایداری گذرا

در مثالی که در شکل ۳ مورد بحث قرار گرفت، فرض کردیم که توان ورودی به ژنراتور ابتدای سیستم (از طریق محرک اولیه) در مقدار قبل از اتصال کوتاه ثابت باقی بماند و حال آنکه توان خروجی ژنراتور کاهش یافته است. این امر سبب شد که ژنراتور شتاب بگیرد. اگر چنانچه یک اتصال کوتاه قبل از خارج شدن خط وقوع یابد و باعث عمل کلیدهای تحت کنترل رله گردد شتاب واحد بیش از وقتی خواهد بود که کلیدها بدون وقوع اتصال کوتاه باز شوند. زاویه انتقال δ هنوز یک معیار اندازه‌گیری مستقیمی از زاویه فاز مکانیکی بین روتورهای ماشین‌های سنکرون ابتدا و انتهای سیستم محسوب می‌گردد. شتاب گرفتن ژنراتور ابتدای خط پس از رفع اتصال کوتاه منجر به افزایش زیادتر δ و توزیع مجدد گذرای گشتاور زاویه‌ای^۲ وابسته به آن می‌گردد که بایستی محدود گردد، چه در غیر این صورت پایداری حفظ نخواهد شد. در بسیاری از سیستم‌ها ضرورت دارد که در مدت زمان کمتر از یک ثانیه اعمالی انجام گیرد تا از، از دست دادن پایداری گذرا جلوگیری شود.

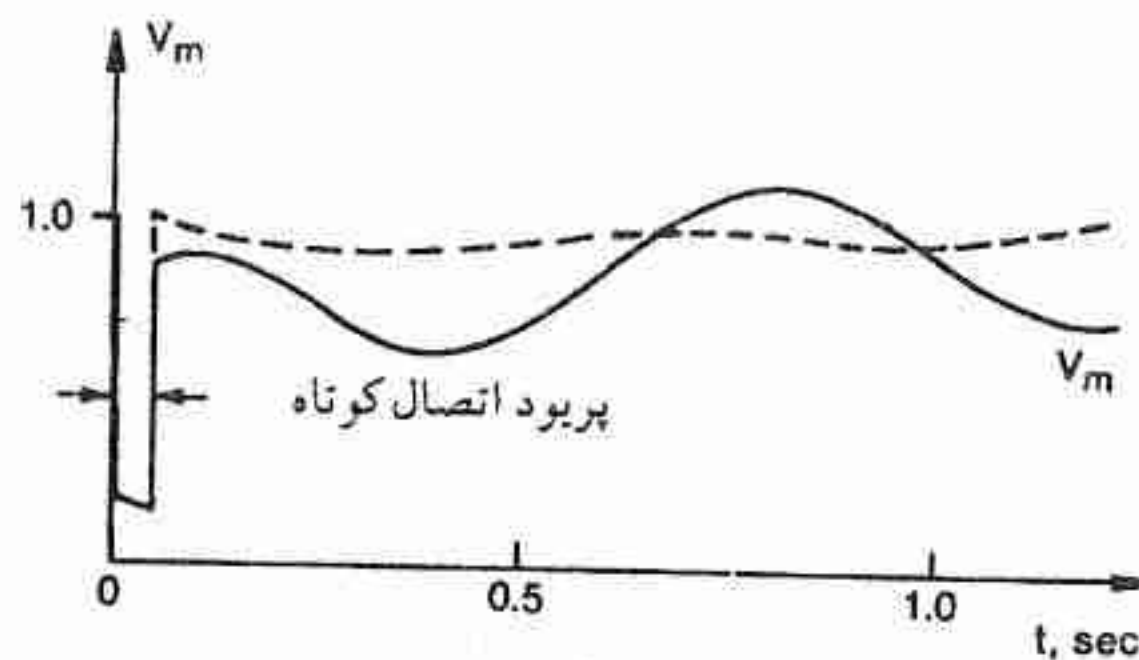
این تغییرات دینامیکی برای اتصال کوتاه مورد بحث در شکل ۴ نشان داده شده است. شکل ۳ ب شرایط اولیه این مثال را نشان می‌دهد. شکل ۴ الف دیاگرام فازور برای $t = t_p$ وقتی $\delta = \delta_{\max}$ است را نشان می‌دهد. شکل ۴ ب انتقال توان الکتریکی P نسبت به زاویه δ را بر روی دیاگرام توان - زاویه گذرا نشان می‌دهد. بالاخره، زاویه بار ماشین δ ، توان الکتریکی P و ولتاژ باس میانی V_m برای فرایند کامل، به انضمام پرورد اتصال کوتاه و پرورد اولین نوسان در شکل ۴ پ نشان داده شده است. با توجه به تغییرات V_m در شکل ۴ پ و دیاگرام فازور در شکل ۴ الف، ضرورت جبران راکتیو دینامیک بدیهی است. با افزایش توان P ولتاژ V_m در لحظه t_p به حداقل مقدار خود می‌رسد. جبران راکتیو در باس m سبب می‌شود که تغییرات وسیع ولتاژ در خلال این پرورد زمانی به حداقل مقدار برسد. شکل ۵ الف چنین بهبودی را نشان می‌دهد. جبران‌کننده می‌تواند از نوع کندانسور سنکرون و یا جبران‌کننده استاتیک باشد و رفتار انواع مختلف جبران‌کننده در بخش‌های ۳-۴ و ۳-۵ به طور کامل تشریح خواهد شد. حمایت ولتاژی که در نقاط میانی فراهم می‌گردد تغییرات زاویه انتقال را مطابق

شکل ۵ ب کاهش می‌دهد. در بعضی موارد قادر است که پایداری گذرا را حفظ نماید چه در غیر این صورت سیستم ناپایدار می‌گشت.

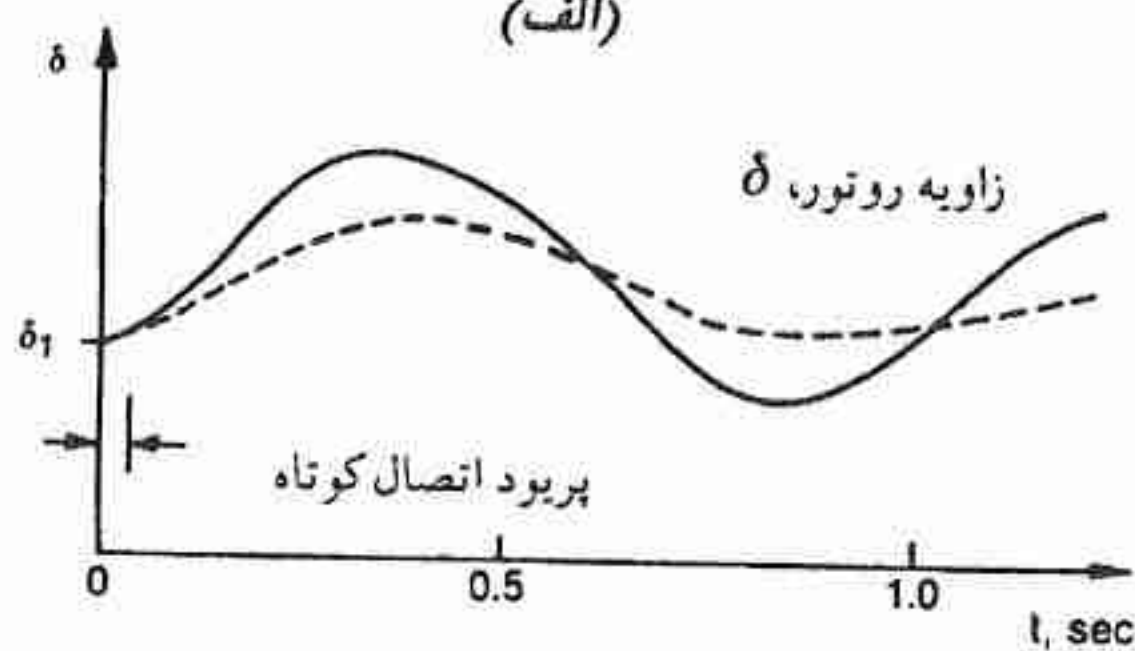


شکل ۴ - (الف) دیاگرام فازور برای سیستم شکل ۳ الف در ماکزیمم زاویه انتقال، $t = t_p$ (ب) منحنی‌های توان نسبت به زاویه: = قبل از اغتشاش، — = بعد از آنکه قسمتی از خط قطع شود؛ A = نقطه کار اولیه B = نقطه کار نهایی (پ) پاسخ گذرای سیستم شکل ۳ الف.

رفتار الکترو مکانیکی ماشین‌های سنکرون در خلال اولین نوسان با آنچه که در پریود گذرا بیان شد تفاوت دارد. در خلال پریود اولین نوسان ولتاژ داخلی E' به واسطه افزایش سریع جریان تحریک، افزایش می‌یابد. با توجه به معادله ۳۸ از فصل دوم این افزایش، توانایی توان انتقالی ژنراتور و سیستم انتقال را به ازاء یک δ معین، افزایش می‌دهد. و این امر منجر به کاهش تغییرات زاویه (δ) اولین نوسان در خلال نوسانات توان سنکرون‌کننده بعد از اغتشاش خواهد شد.

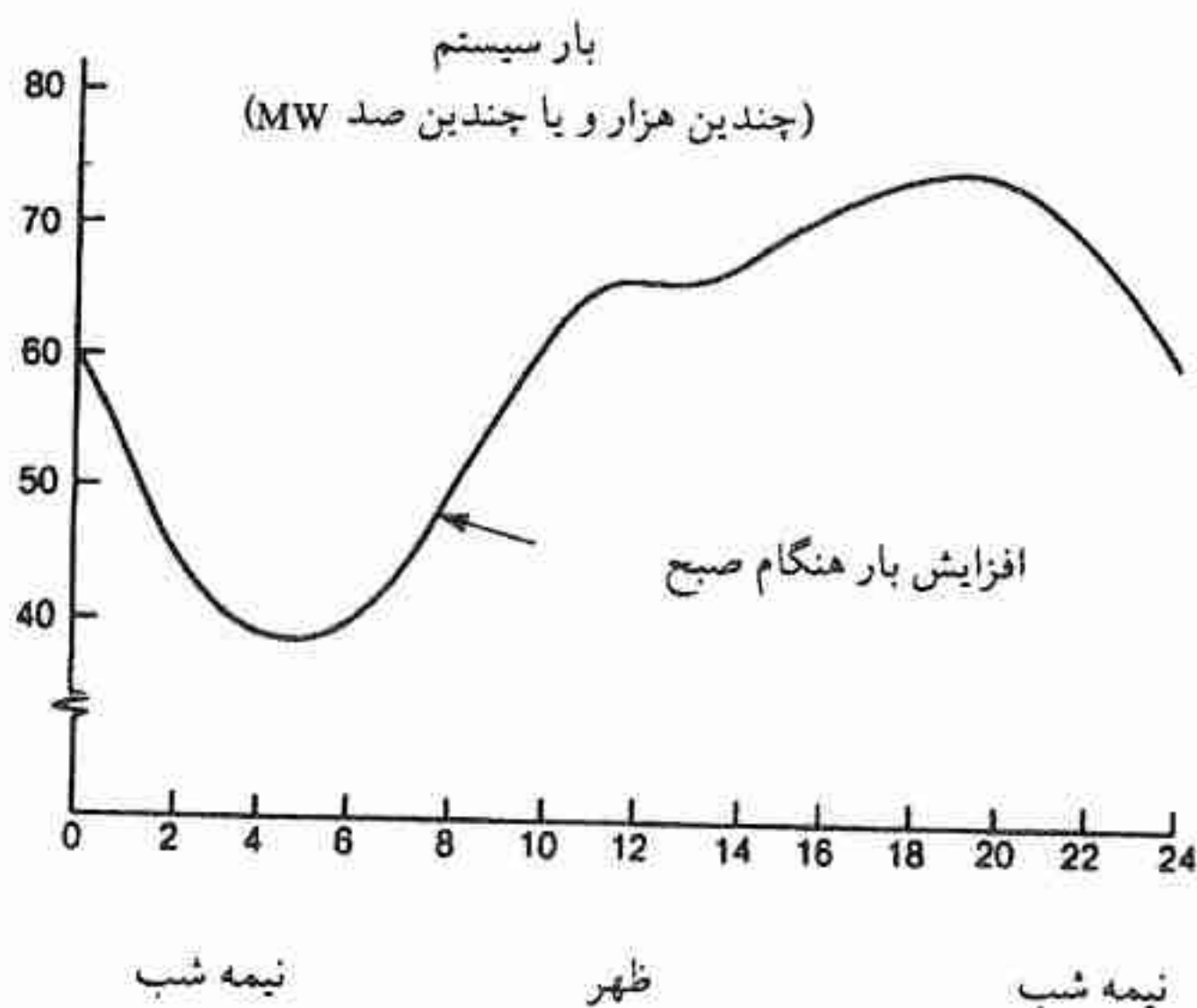


(الف)



(ب)

شکل ۵ - اثر جبران راکتیو دینامیک بر روی ولتاژ و تغییرات زاویه توان (الف) و لتاژ در پست میانی (ب) زاویه انتقال: — = جبران نشده، = با جبران کننده دینامیک بزرگ واقع در باس m .



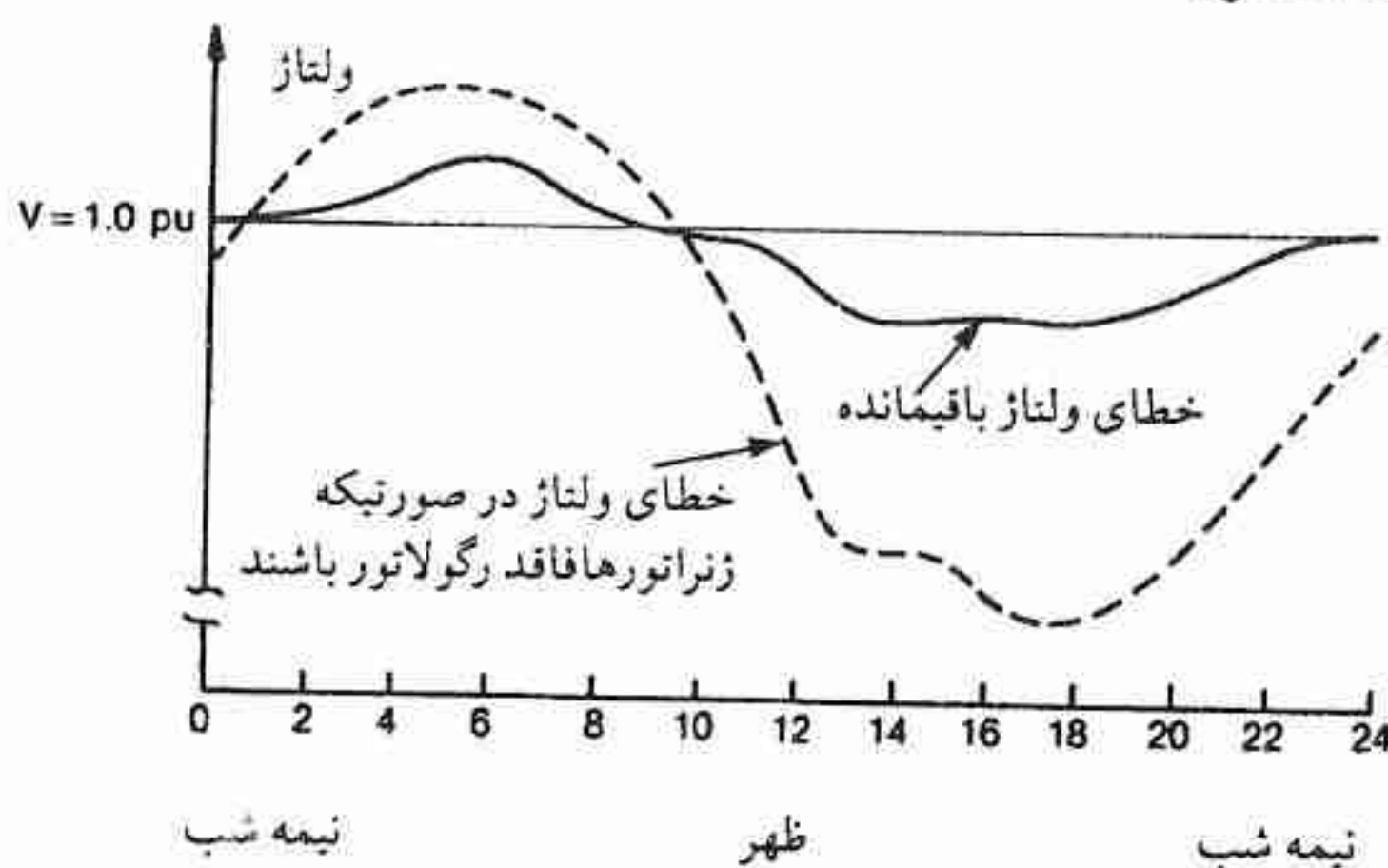
شکل ۶ - سیکل بار روزانه در یک سیستم قدرت نمونه. پروفایل زمستان و تابستان متفاوت بوده و اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین یک سیستم و سیستم دیگر وجود دارد.

۳-۲-۳ پریود نوسانی

سومین پریود زمانی پس از وقوع اغتشاش، در شکل ۲ به عنوان پریود نوسانی تعریف شد، و آن پریودی بین اولین نوسان در توان سنکرون‌کننده (و زاویه روتور ماشین) و زمانی که سیستم به یک حالت ماندگار رسیده است، می‌باشد. بر حسب مشخصات سیستم قدرت نوسانات از ۲ تا ۲۰ ثانیه مستهلک خواهند شد. گاهی میرایی منفی موجود منجر می‌شود که نوسانات پس از اغتشاش تشدید شده و سرانجام یک و یا چند ژنراتور از سنکرون خارج شوند. این شکل ناپایداری گاهی به «ناپایداری دینامیکی» موسوم است. در سیستم‌هایی که در آنها توان زیاد در فواصل طولانی انتقال داده می‌شود احتمال وجود میرایی یا مستهلک‌کنندگی منفی در نوسانات پس از اغتشاش زیاد است. به منظور حفظ پایداری گذرای ژنراتورها در اینگونه سیستم‌ها، سیستم‌های تحریک با ضریب بهره بالا و پاسخ سریع به کار گرفته می‌شود. در ژنراتورهای با ثابت زمانی میدان تحریک نسبتاً بزرگ، تمایل به ناپایداری نوسانی وجود دارد و اغلب همراه با سیستم کنترل تحریک‌کننده (اکسایتر)^۱ مدارهای پایدارکننده کمکی^۲ استفاده می‌شود. اینگونه پایدارکننده‌ها، نوسانات در سرعت روتور، تغییرات در فرکانس یا توان را تشخیص داده و سیگنال مرجع رگولاتور ولتاژ در کنترلر تحریک را مدوله کرده و نوسانات را میرا می‌نمایند. با ارتباط دادن خطوط ولتاژ بالای dc به شبکه ac، می‌توان برای میرا کردن نوسانات توان سنکرون‌کننده شبکه ac مجاور استفاده کرد. در پاسخ به تغییرات فرکانس ac کنترل‌های میرایی مخصوص بر روی پخش توان dc عمل می‌کنند و به موجب آن بر روی نوسانات توان ac ایجاد میرایی می‌نمایند. همچنین بعداً ملاحظه خواهیم کرد که با مدوله کردن پخش توان راکتیو در یک سیستم، جبران‌کننده‌ها می‌توانند میرایی مثبت قابل ملاحظه‌ای را بر آن اعمال کنند.

حالت ماندگاری که در انتهای پریود نوسانی فرا می‌رسد برای مدت طولانی مصون از تغییرات نمی‌ماند. حتی اگر چنانچه اغتشاشات فاحش به وقوع نپیوندد، بار در سیستم به طور پیوسته با میزان تغییرات مختلف، تغییر می‌نماید. یک تغییرات نمونه بار در طول ۲۴ ساعت در یک سیستم قدرت بزرگ به هم پیوسته در شکل ۶ نشان داده شده است. گرچه به نظر می‌رسد که میزان تغییرات در مقایسه با تغییرات در خلال اتصال کوتاه و بعد از آن، کند است افزایش بار به هنگام صبح به میزان ۱۰۰ MW بر دقیقه یا بیشتر است. شکل ۷ نشان می‌دهد که این تغییرات بار می‌توانند چه اثری بر ولتاژ سیستم در حضور و غیاب رگولاتور ولتاژ ژنراتورها داشته باشند. تغییرات یا خطای ولتاژ

باقیمانده (پس ماند)^۱ را می توان به روش های پاسخ - کند مثل تغییر تپ ترانسفورماتور و سوئیچ کردن خازن و گاهی راکتور، تصحیح کرد. معمولا برای انجام چنین مقصودی به کار گرفتن جبران کننده های پاسخ - سریع ضرورت ندارد. البته اگر چنین جبران کننده هایی برای مقاصد دیگر (نظیر بهبود پایداری گذرا) به کار گرفته شوند از آنها می توان برای تغییرات کند آنچنان که در فصل ۲ توصیف شد استفاده کرد.



شکل ۷ - اثر سیکل بار روزانه بر روی ولتاژ سیستم.

۳-۲-۴ جبران سازی و دینامیک سیستم

اشکال مختلف جبران اعم از پاسیو یا قابل کنترل، موزی یا سری بر روی رفتار دینامیکی سیستم در مرحله انتقال و عبور تاثیر می گذارند. اثرات آنها در ۴ بخش بعدی بحث خواهد شد. در بخش ۳-۳ راجع به راکتور و خازنهای ثابت، در بخش ۴-۳ راجع به جبران کننده های استاتیک، در بخش ۵-۳ راجع به کندانسورهای سنکرون و در بخش ۶-۳ راجع به خازنهای سری بحث خواهد شد. اثرات هر یک از جبران کننده ها بر رفتار سیستم در خلال چهار پرورد زمانی به نوبت بحث خواهد شد.

۳-۳ جبران موزی پاسیو

خازنهای موزی و یا راکتورهای موزی می توانند در هر یک از باس های (شین های) شکل ۳ قرار گیرند. به عنوان مثال، خازنهای موزی ممکن است به منظور جلوگیری از کاهش ولتاژ در شرایط پیک

بار به شبکه متصل گردند. در شرایط بار کم راکتورهای موازی به منظور حذف بخشی از توان راکتیو خازنی خط و در نتیجه جلوگیری از افزایش ولتاژ به شبکه متصل می‌شوند. وجود خازن و راکتور همچنین در موقع وقوع اغتشاش بر رفتار دینامیکی سیستم اثر می‌گذارد. از آنجایی که معمولاً در خلال اغتشاش از مدار قطع یا وصل نمی‌شوند اثرات آنها از این حقیقت که پارامترهای خط، به ویژه امپدانس ضربه‌ای خط، طول الکتریکی آن و امپدانس‌های نقطه شروع (تحریک)^۱ در باس‌های سیستم، را تغییر می‌دهند ناشی می‌شود.

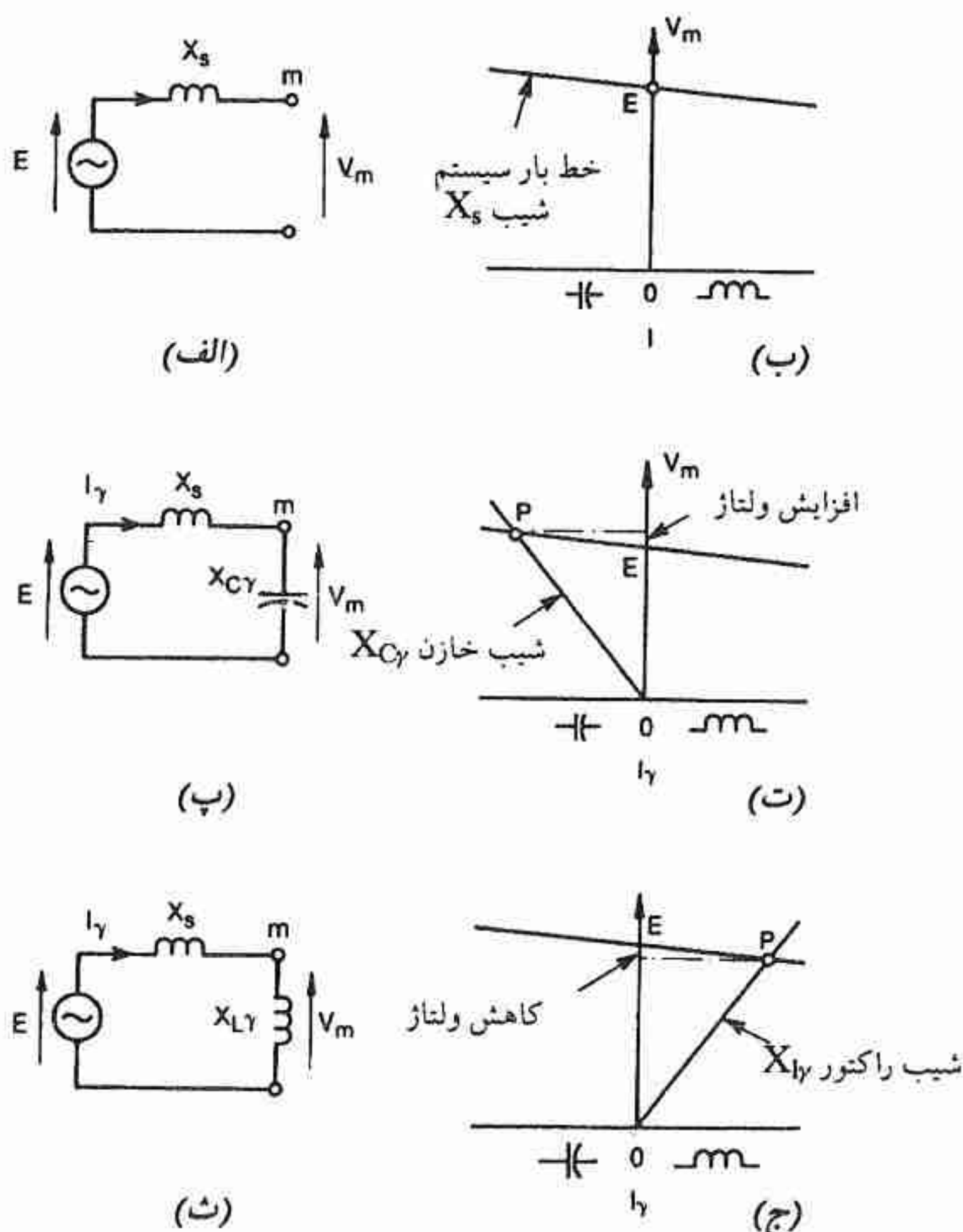
۳-۳-۱ پر یود گذرا

در اینجا مفهوم خط بار راکتیو سیستم که در توصیف حالت شبه ماندگار در فصل ۱ معرفی گردید را توسعه داده و اثر خازن و راکتورهای ثابت را بر روی مولفه توالی مثبت ولتاژ در خلال پر یودهای انتقال منجمله پر یود گذرا، مطالعه می‌کنیم. به عنوان مثال می‌توانیم سیستم شکل ۳ الف را از باس m نگاه کرده و مدار معادل تونن را مطابق شکل ۸ الف نشان دهیم، که در آن گره m معرف باس m در شکل ۳ الف است. خط بار راکتیو در شکل ۸ ب نشان داده شده است. اشکال ۸ پ و ۸ ت کاربرد این خط بار هنگامی که یک خازن به باس m متصل شده است را نشان می‌دهند. اشکال ۸ ث و ۸ ج مفهوم مشابهی را وقتی یک راکتور به باس m متصل گردد، نشان می‌دهند.

در غیاب وسیله راکتیو موازی در باس m اغتشاش خارج شدن خط که با توجه به شکل ۳ قبلاً بحث گردید، منجر به انتقال خط بار مطابق شکل ۹ الف می‌شود. بر طبق این شکل ولتاژ مدار باز V_m از مقدار E_1 به مقدار E_2 کاهش و شیب خط بار از X_{s1} به X_{s2} افزایش می‌یابد. شکل ۹ ب نشان می‌دهد که با حضور خازن موازی با راکتانس X_{Cp} تغییر ولتاژ ($V_{C1} \rightarrow V_{C2}$) از وقتی که خازن وجود ندارد یعنی ($E_1 \rightarrow E_2$) کمتر است. شکل ۹ پ نشان می‌دهد که با وجود یک راکتور با راکتانس X_L در باس m ، افت ولتاژ ($V_{L1} \rightarrow V_{L2}$) از وقتی که راکتور وجود ندارد یعنی ($E_1 \rightarrow E_2$) بیشتر است. به طور کلی خازن‌ها و راکتورها بر مقدار تغییرات ولتاژ و جهت آن (افزایش یا کاهش) تاثیر می‌گذارند. مثلاً، در شکل ۹ ب اگر مقدار نامی خازن دو برابر شود ($X_{Cp}/2$)، به جای کاهش ولتاژ، افزایش ولتاژ ایجاد می‌شود، یعنی ولتاژ از مقدار \hat{V}_{C1} به مقدار \hat{V}_{C2} افزایش می‌یابد.

راکتورهای ثابت، ولتاژ حالت ماندگار را مخصوصاً در پر یود پیک بار کاهش می‌دهند. بنابراین

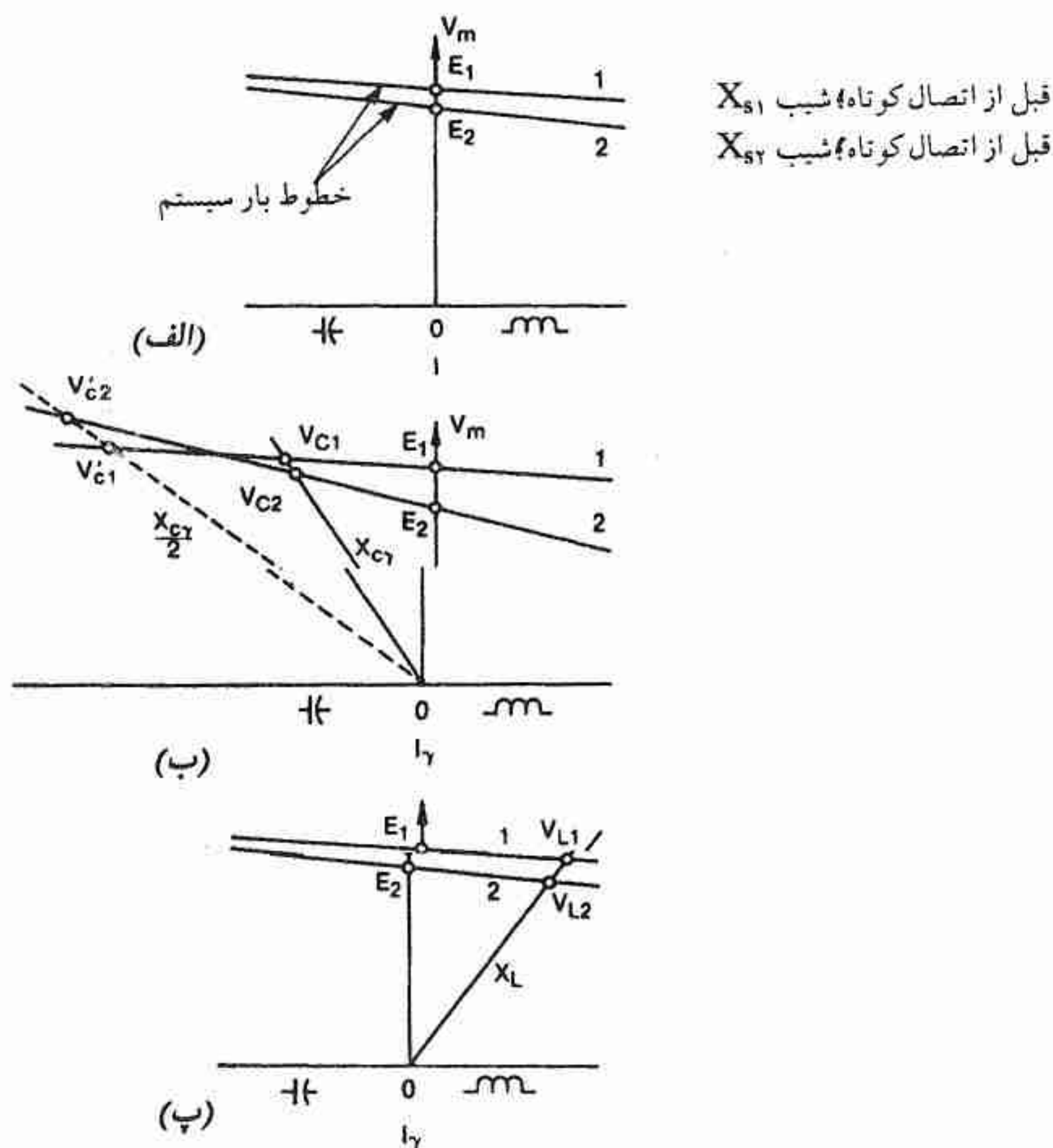
ظرفیت توان انتقالی خط را در حالت ماندگار کاهش می‌دهند. معمولاً در خلال پریود پیک بار راکتورها از شبکه جدا نمی‌شوند زیرا با سیستم کنترل سنتی^۱ و کلید قدرت^۲ قادر نخواهیم بود که آنها را آنچنان سریع دوباره وارد مدار کنیم که در وقوع ناگهانی قطع بار اضافه ولتاژ را محدود نمایند. کلیدهای مکانیکی با سرعت بالا که قادر هستند راکتور را در فاصله ۲-۳ سیکل دوباره وارد مدار نمایند موجود است، اما برای تکرار عمل قطع و وصل مناسب نیستند (دو یا چند بار در روز برای کنترل ولتاژ حالت ماندگار از طریق اپراتور) چه در اثر تکرار فرسودگی زیاد در قسمت‌های متحرک و



شکل ۸ - مدارهای معادل، خطوط بار و نقاط کار. (الف) مدار معادل تونن سیستم شکل ۳ الف از دیدگاه باس m (ب) خط بار سیستم از دیدگاه باس m (پ) خازنهای موازی واقع در باس m (ت) نقطه کار P با حضور خازنهای موازی (ث) راکتور موازی واقع در باس m (ج) نقطه کار P با حضور راکتور موازی.

کنتاکت‌های آن ایجاد می‌شود.

خازن‌های ثابت مسائل متفاوت دیگری را پیش می‌آورند. از آنجایی که توان راکتیو تولید شده توسط آنها در موقع کاهش ولتاژ، با مجذور ولتاژ کاهش می‌یابد، بنابراین تکیه زیاد بر خازن‌های ثابت در حمایت ولتاژ و بهبود پایداری گذرا اقتصادی نخواهد بود. همچنین با وجود بانک وسیع خازن امکان اضافه ولتاژ به هنگام قطع بار وجود دارد. بنابراین اندازه بانک خازنی^۱ از جهت اینکه بتوان آنها را در چنین شرایطی خیلی سریع از مدار خارج کرد که خود مستلزم سیستم کنترل و کلیدهای قدرت گران قیمت و پیشرفته است، محدود می‌گردد.



شکل ۹ - اثر راکتور یا خازن موازی روی نقطه کار (الف) انتقال خط بار در باس m ناشی از قطع قسمتی از خط در شکل ۳ الف (ب) اثر خازن واقع در باس m (پ) اثر راکتور واقع در باس m .

۳-۳-۲ پریود اولین نوسان

نمونه‌ای از پاسخ سیستم به یک اغتشاش که موجب نوسان ولتاژ، توان و زاویه روتور می‌گردد قبلاً در شکل ۵ نشان داده شد و مجدداً در شکل ۱۰ ترسیم شده است. در این مثال پریود اولین نوسان حدود نیم ثانیه طول می‌کشد. خازن‌ها و راکتورهای موازی اثرات محدودی بر روی تغییرات ولتاژ در خلال اولین نوسان دارند، مگر اینکه در لحظات مورد لزوم به مدار وصل و یا قطع گردند. به منظور جبران فرورفتگی عمیق ولتاژ^۱ در خلال پریود اولین نوسان بایستی خازن‌های موازی که هنوز انرژی دار نشده‌اند را در زمان اتصال کوتاه و یا بلافاصله پس از آن وارد مدار نمود. اگر چنانچه کاپاسیتانس کافی را دقیقاً در زمانی که اتصال کوتاه رفع شده است وارد مدار نمائیم، منحنی خط چین ولتاژ شکل ۱۰ الف حاصل می‌شود. حداقل ولتاژی که سیستم در خلال اولین نوسان با آن مواجه است بیشتر شده و از این رو توان انتقالی پس از رفع اتصال کوتاه افزایش یافته و در نتیجه از شتاب ژنراتور که در اثر اتصال کوتاه افزایش یافته بود، کاسته می‌شود و تغییرات زاویه بار کاهش می‌یابد. (این مطلب در شکل ۱۰ نشان داده نشده است اما به اشکال ۲۵ و ۲۶ مراجعه شود)

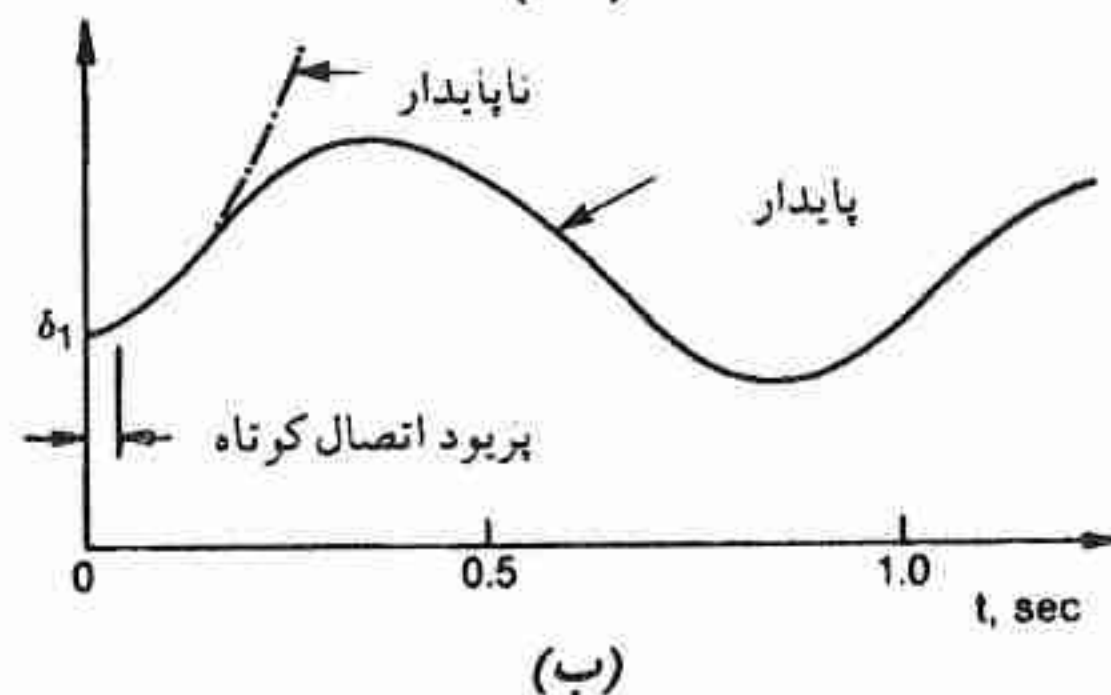
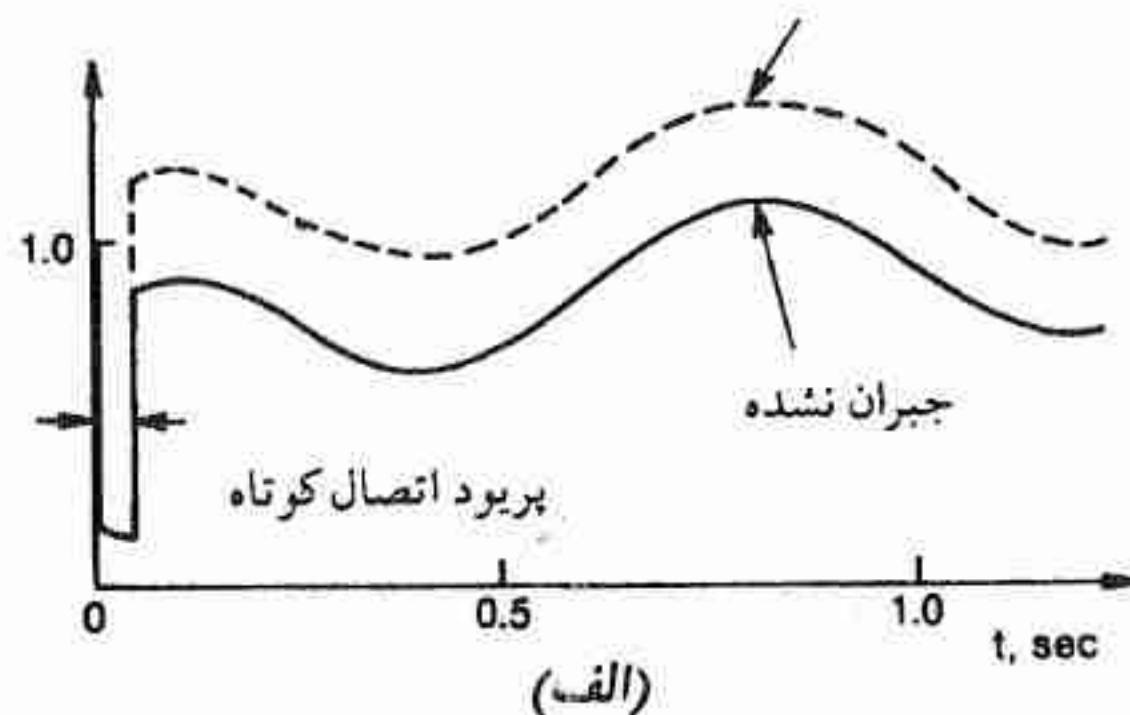
دلایل متعددی وجود دارد بر اینکه چرا سوئیچ کردن خازن موازی (یا راکتور) در شکل سنتی به ندرت در روشی که هم اکنون شرح دادیم به کار گرفته می‌شود. در شکل ۱۰ فرض بر این بود که خازن‌ها دقیقاً در لحظه رفع اتصال کوتاه به مدار سوئیچ می‌شوند. از آنجایی که کلیدهای قدرت مدرن و رله‌ها دارای زمان عمل ۳ تا ۷ سیکل هستند کلیدهایی که خازن‌ها را به مدار متصل می‌نمایند بایستی در چنین فاصله زمانی کار کنند. وسایل سوئیچ‌کننده سنتی معمولاً در فاصله ۶ تا ۳۰ سیکل کار می‌کنند. سوئیچ‌های کندتر نمی‌توانند تأثیری بر فرورفتگی ولتاژ در اولین نوسان داشته باشند. به طور ایده‌آل، بانک خازنی بایستی مجدداً بلافاصله پس از اولین نوسان از مدار قطع گردد تا از افزایش ولتاژ مستمر در خلال نوسانات بعدی جلوگیری شود.

بنابراین در اینجا مجدداً کلیدهای با سرعت بالا که قادر باشند در ۲ الی ۳ سیکل باز و بسته گردند بایستی به کار برده شوند اما تکرار قطع و وصل منجر به خرابی کنتاکتورها و مکانیزم سوئیچینگ می‌گردد.

۳-۳-۳ پر یود نوسانی

مشابه پر یود اولین نوسان جبران موازی تاثیر محدودی بر ولتاژ، توان و نوسانات زاویه ماشین در خلال پر یود نوسانی دارد. برای اینکه عمل جبران بر میرایی نوسانات ولتاژ، توان و زاویه ماشین تاثیر داشته باشد، راکتورهای موازی و خازنهای موازی بایستی به طور مکرر در زمانهای معین وارد مدار شده و یا از مدار قطع شوند تا اینکه به طور موثر راکتانس انتقالی بین ماشینهای سنکرون را افزایش یا کاهش دهند. عمل سوئیچینگ با استفاده از تایرستور به جای کلیدهای مکانیکی سنتی، به طور مطمئن و سریع انجام پذیر است (به بخش ۳-۴ مراجعه شود).

با خازن موازی ثابت واقع در باس m



شکل ۱۰ - اثر خازن موازی ثابت بر روی پاسخ بعد از اتصال کوتاه سیستم شکل ۳ الف (الف) ولتاژ در باس میانی m (ب) زاویه انتقال.

۳-۳-۴ خلاصه‌ای از جبران موازی پاسیو

در این بخش ملاحظه شد که خازن‌ها و راکتورهای موازی بر روی تغییرات ولتاژ پس از رفع اغتشاش، تاثیر دارند و تا حد محدودی بر روی پایداری ژنراتورهای سیستم تاثیر می‌گذارند.

خازن‌های ثابت و راکتورهای ثابت مقدار میانگین افزایش و یا کاهش ولتاژ را در پریود انتقالی پس از اغتشاش، صرفاً با یاس می‌نمایند.

اگر قرار باشد که اضافه ولتاژ و یا فرورفتگی ولتاژ را به طور لحظه‌ای (نیم ثانیه) اصلاح نمایند لازم است که کلیدها به سرعت عمل نمایند و در بعضی موارد به طور مکرر عمل نمایند. عموماً این کار با استفاده از کلیدهای سنتی امکان‌پذیر نمی‌باشد.

۳-۴ جبران‌کننده‌های استاتیک

جبران‌کننده استاتیک را می‌توان یک سوسپتانس موازی قابل تنظیم تلقی کرد. توانایی آن مافوق راکتورها و خازن‌های ثابت موازی می‌باشد. قبلاً (در فصل ۲، شکل ۱۰) ملاحظه کردیم که چگونه یک سوسپتانس موازی قابل تنظیم با پاسخ سریع قادر است مثل یک وسیله ولتاژ - ثابت^۱ رفتار نماید. اینگونه جبران‌کننده‌ها می‌توانند به طریقی کنترل شوند که پاسخ سیستم قدرت را در خلال تمامی ۴ پریود زمانی تعریف شده در شکل ۲، بهبود بخشند.

در عمل انواع مختلف جبران‌کننده استاتیک وجود دارد. خواص آنها به طور وسیع از یکدیگر متفاوت است. اصول کار اصلی و مشخصات کنترل آنها در فصل ۴ توصیف می‌شود. در این فصل بر روی عمومی‌ترین انواع جبران‌کننده‌ها، راکتور تایریستور کنترل^۲ (TCR)، خازن‌های تایریستور سوئیچ^۳ (TSC) و راکتور قابل اشباع^۴ (SR) تکیه می‌نماییم. جبران‌کننده‌های TCR و SR عموماً به صورت موازی با بانک‌های خازنی که ممکن است با وسایل مختلف سوئیچ شوند، بکار برده می‌شوند. جبران‌کننده TCR را به عنوان وسیله اصلی برای توصیف خواص دینامیکی جبران‌کننده‌های استاتیک، بکار می‌گیریم. باز هم از علامت V_m برای بیان ولتاژ فازور یاس جبران‌کننده استفاده می‌کنیم.

۳-۴-۱ پریود گذرا

راکتور تایریستور کنترل - خازن ثابت^۵ (TCR - FC). جبران‌کننده TCR همانطوری که در سیستم

1- Constant - Voltage Device 2- Thyristor - Controlled Reactor

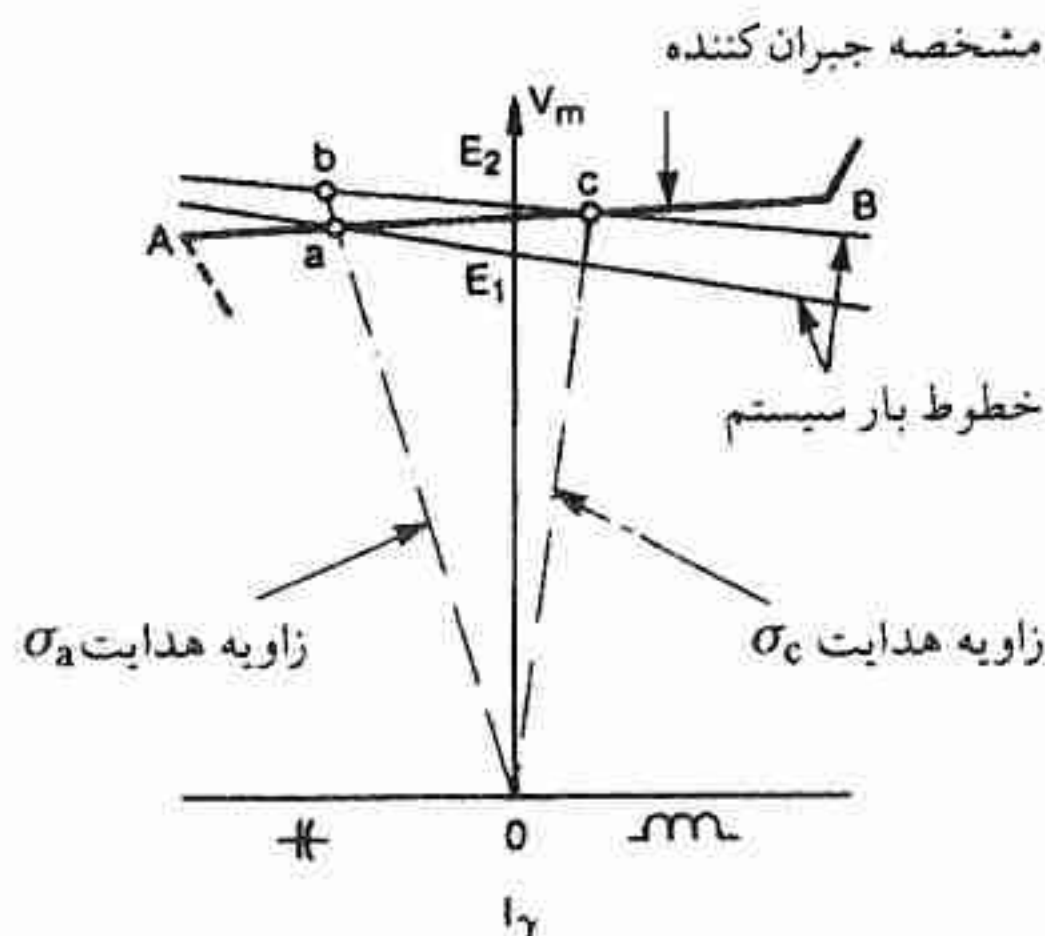
3- Thyristor - Switched Capacitor

4- Saturated Reactor

5- Fixed Capacitor - Thyristor Controlled Reactor

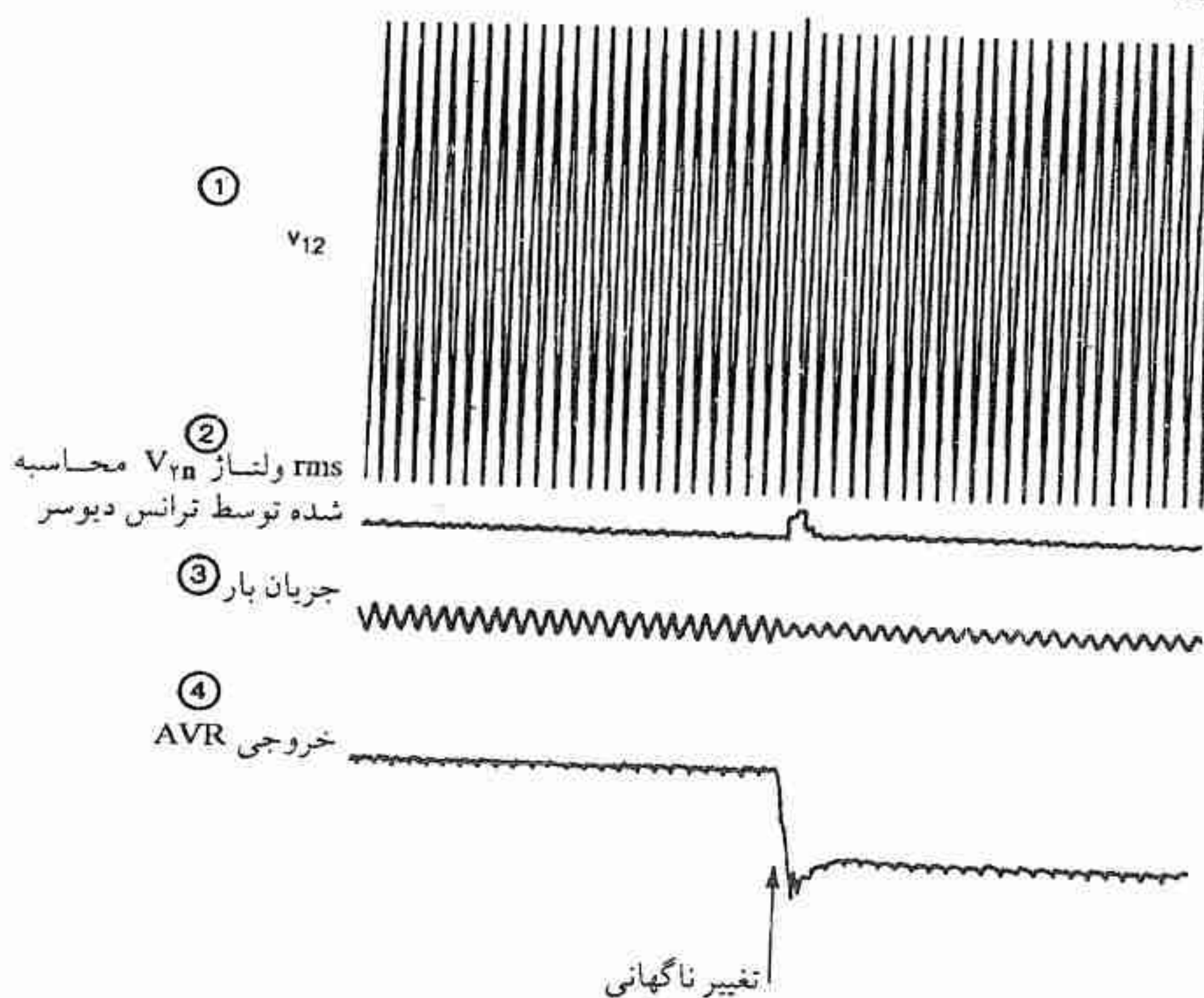
انتقال به کار رفت شامل رگولاتور ولتاژ مدار بسته و سیستم کنترل زاویه آتش تائریستور است. در تصحیح تغییر ولتاژ V_m ناشی از اغتشاشات وارده بر سیستم، سیستم‌های کنترل دارای پاسخ زمانی تاخیری هستند. تاخیر زمانی ماهیتا آماری است اما می‌توان یک تاخیر $\frac{1}{6}$ سیکل تا $\frac{1}{4}$ سیکل را برای TCR فرض کرد.

پاسخ گذرای یک سیستم جبران شده با TCR را می‌توان از روی شکل ۱۱ دریافت. عموماً مشخصه ولتاژ - جریان جبران‌کننده از جریان پیش‌فاز تا جریان پس‌فاز امتداد دارد، در جبران‌کننده TCR مطابق آنچه در فصل ۱ و ۴ تشریح شده است، این عمل با موازی کردن خازن با آن انجام می‌گیرد. فرض کنید یک اغتشاش ناگهانی در سیستم سبب شده است که خط بار در باس جبران‌کننده از وضعیت ۱ به ۲ تغییر یافته است (شکل ۱۱). قبل از اغتشاش سیستم در شرایط ماندگار در نقطه a کار می‌کرده است. اگر پاسخ سیستم کنترل TCR کند می‌بود نقطه کار از نقطه a در یک خط مستقیم به نقطه b انتقال می‌یافت. و زاویه هدایت تائریستور ابتداً با زاویه هدایت در نقطه a یکسان بود. سپس، سیستم کنترل رگولاتور - ولتاژ زاویه هدایت را در TCR افزایش داده و نقطه کار را به نقطه c انتقال می‌دهد. بالاترین ولتاژی که در این فاصله بر باس جبران‌کننده اعمال می‌شود ولتاژ نقطه b خواهد بود که در این مثال مقدارش بیش از ولتاژ E_2 است که در غیاب جبران‌کننده به طور مستمر بر باس آن اعمال می‌گردید. در عمل پاسخ سریع TCR موجب می‌گردد که در فاصله حدود $1/5$ سیکل در نقطه کار c استقرار یابد. با وجود چنین پاسخ سریعی افزایش ولتاژ در هر کدام از فازها دارای مدت زمان کوتاهی بوده و حتی به نقطه b هم نخواهد رسید.



شکل ۱۱ - اثر جبران‌کننده TCR بر روی نقطه کار.

(الف) مطالعه سیمولاتور. به منظور نشان دادن مزایای چنین پاسخ سریعی با وارد کردن سیستم کنترل واقعی TCR در مدل سیستم، یک مطالعه شبیه‌سازی^۱ انجام گرفته است. مدل سیستم شامل یک بار سه‌فاز است که به باس جبران‌کننده در یک شبکه‌ای مطابق شکل ۳ الف، متصل گردیده است. اسیلوگرام جریان مربوط به یک‌فاز همراه با ولتاژ بین فاز ۱ و ۲ (v_{12}) در باس جبران‌کننده، در شکل ۱۲ نشان داده شده است. جریان بار به طور ناگهانی کاهش یافته و افزایش ولتاژ فاز به فاز را سبب شده است. زمان استقرار از روی نمودار ۲ شکل ۱۲ - که اندازه‌گیری از ولتاژ فاز ۲ به نول (محاسبه شده توسط ترانس دیوسر اندازه‌گیری ولتاژ جبران‌کننده)^۲ می‌باشد - به وضوح ملاحظه می‌شود. ترانس دیوسر دائمی ولتاژ فاز - به - نول را اندازه‌گیری کرده و مقدار rms را در هر سیکل شکل موج ولتاژ محاسبه می‌کند. خروجی منفصل^۳ برای هر نیم سیکل رسم می‌گردد و از اسیلوگرام به وضوح برمی‌آید که تقریباً ۱/۵ سیکل پس از وقوع اغتشاش ولتاژ تصحیح شده و به مقدار مطلوب برگشت داده شده است.



شکل ۱۲ - اسیلوگرام پاسخ TCR به تغییر پله‌ای در بار. (AVR = رگولاتور ولتاژ اتوماتیک)

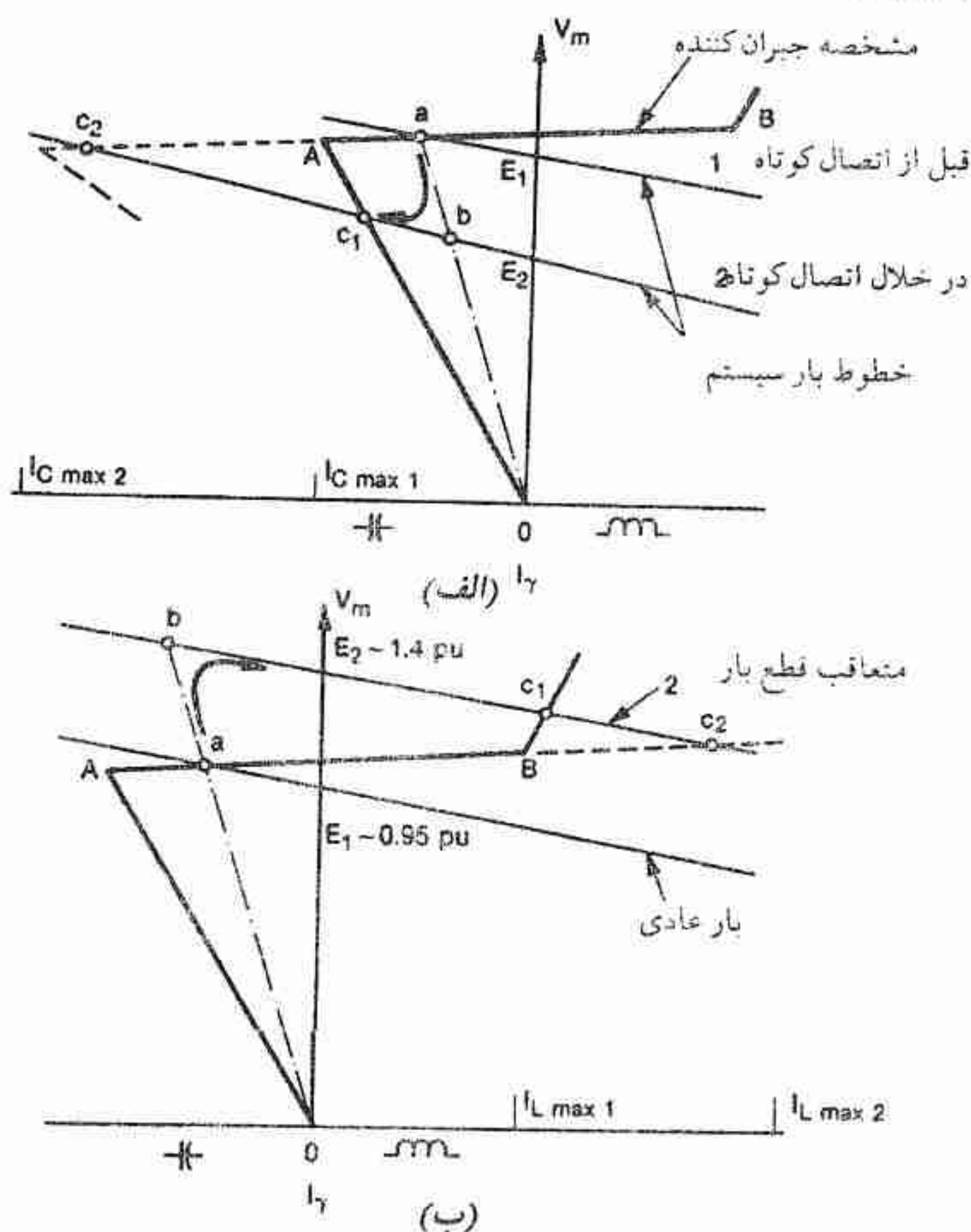
جریان تایریستور هر فاز در پاسخ به یک تغییر پله‌ای در زاویه آتش آن فاز، می‌تواند در فاصله نیم سیکل از هدایت کامل تا قطع کامل تغییر کند، (فصل ۵). با اعمال هم زمان چنین ورودی پله‌ای به سه فاز، جریان موثر توالی مثبت در اندکتور سه فاز می‌تواند تقریباً در یک سیکل تغییر نماید. به واسطه ثابت زمانی کوچک رگولاتور ولتاژ که خطای ولتاژ را به سیگنال زاویه آتش مورد نیاز تبدیل می‌کند، $1/5$ سیکل طول می‌کشد تا در شکل ۱۲ تغییر ولتاژ انجام گیرد.

(ب) اغتشاشات فاحش. اغتشاشات فاحش ممکن است موجب شود که جریان جبران‌کننده از محدوده کنترلی نرمال آن (AB) خارج شود، همانطوری که در شکل ۱۳ نشان داده شده است. فرض کنید یک اتصال کوتاه سه فاز متقارن در سیستم به وقوع پیوسته و در نتیجه خط بار از وضعیت ۱ به ۲ تغییر یافته و در وضعیت اخیر برای چندین سیکل باقی مانده است. (شکل ۱۳ الف)

در وهله اول ولتاژ در باس جبران‌کننده از نقطه a به نقطه b افت می‌نماید. ولتاژ در نقطه b بیشتر از ولتاژ E_r که در غیاب جبران‌کننده بر باس آن اعمال می‌شد، نیست، دلیل آن این است که جریان جبران‌کننده I_r با کاهش ولتاژ به طور خطی کاهش می‌یابد. پس از تاخیر کمی ($\frac{1}{6}$ تا $\frac{1}{4}$ سیکل) همانطوری که قبلاً ذکر شد، سیستم کنترل TCR بر حسب اینکه مقدار نامی کاپاسیتور جبران‌کننده چقدر باشد ولتاژ را به نقطه c_1 یا c_2 می‌رساند. اگر مقدار نامی کاپاسیتور برای بازگرداندن ولتاژ به ولتاژ نامی خیلی کوچک باشد، نقطه c_1 ایجاد می‌شود. در صورتی که مقدار نامی کاپاسیتور خیلی بیشتر باشد (به جای I_{Cmax1} ، I_{Cmax2} باشد. شکل ۱۳ الف) جبران‌کننده قادر خواهد بود حتی در شرایط اتصال کوتاه ولتاژ را به مقدار نامی برگرداند. از آنجایی که اتصال کوتاه معمولاً در فاصله چند سیکل رفع می‌شود چنین مقدار نامی کاپاسیتور بالا به ندرت تایید می‌گردد. مقدار نامی کاپاسیتور غالباً طوری انتخاب می‌شود که بتواند در پریود پس از رفع اتصال کوتاه ولتاژ را به مقدار نامی برگرداند (همانطوری که در بخش ۳-۴-۲ بحث شد).

به عنوان مثال دوم، شکل ۱۳ ب نشان می‌دهد که چگونه در اثر قطع بار وسیع، جریان جبران‌کننده از محدوده کنترلی اش (در منطقه پس فاز) خارج می‌شود. در یک TCR با مقدار نامی متوسط. در فاصله ۱ تا ۲ سیکل نقطه کار از مسیر abc_1 تبعیت می‌کند، اما وقتی در «هدایت کامل» ($\sigma = 180^\circ$)، مراجعه شود به فصل ۴) قرار می‌گیرد، TCR به صورت یک راکتور خطی کامل عمل می‌کند و قادر نخواهد بود که ولتاژ را در ترمینال جبران‌کننده در مقدار کمتر از c_1 نگاه دارد. در صورتی که مقدار نامی TCR بیشتر باشد (I_{Lmax2} در شکل ۱۳ الف)، ولتاژ در نقطه پایین تر c_2 قرار می‌گیرد. در بدترین حالت یعنی در غیاب جبران‌کننده ولتاژ تا سطح $1/4 \text{ pu}$ $E_r \approx$ افزایش می‌یافت. فراهم

کردن جبران‌کننده TCR با مقدار نامی زیاد که قادر باشد در بدترین حالت قطع بار ولتاژ را به مقدار نامی بازگرداند بسیار گران‌قیمت خواهد بود. البته، اگر بتوان خازن‌های موازی را به سرعت از مدار قطع کرد، امکان این وجود دارد که TCR را با مقدار نامی اضافه بار کوتاه مدت نظیر آنچه که به I_{max2} مربوط می‌شود، طراحی کرد. وقتی که خازن‌ها از مدار قطع می‌شوند TCR نیازی به فراهم کردن جریان بایاس مربوط به خازن‌ها نداشته و در نتیجه جریان اندوکتیو I_{Lmax1} به طور موثر افزایش می‌یابد.

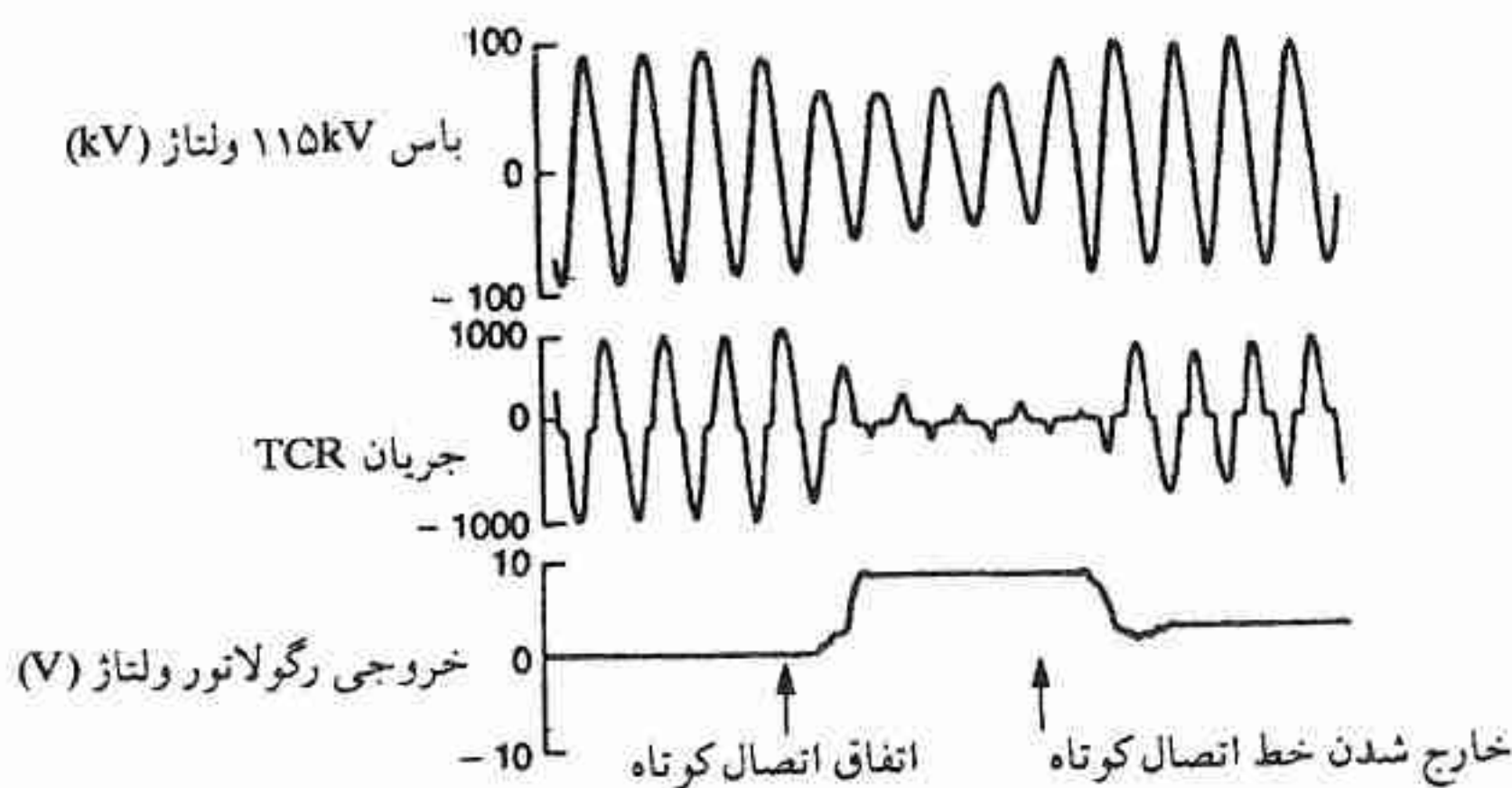


شکل ۱۳ - جبران‌کننده TCR با مقدار نامی بالا (الف) در خلال کاهش ولتاژ (ب) در خلال افزایش ولتاژ.

(پ) انجام آزمایش با اعمال اغتشاش فاحش. نمودارهای اوسیلوگراف نشان داده شده در شکل ۱۴ از انجام آزمایش بر روی جبران‌کننده‌ای که به منظور کنترل ولتاژ در سیستم نصب گردیده به دست آمده است. جبران‌کننده شامل یک بانک خازنی ثابت ۳۰ MVar و یک TCR ۴۰ MVar است که به

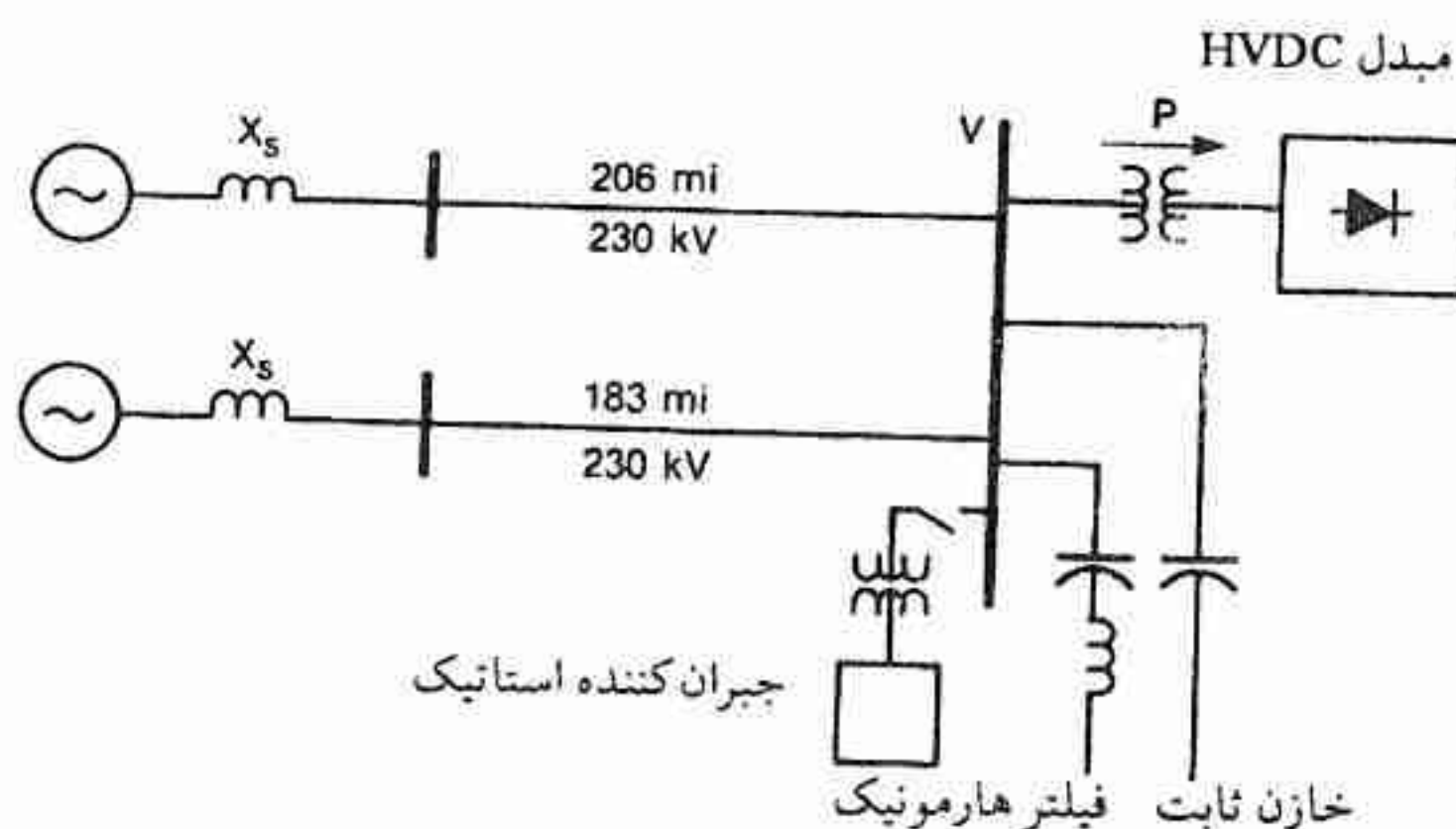
سیم پیچی سوم $13/8 \text{ kV}$ یک اتوترانسفورماتور $230/115 \text{ kV}$ متصل شده است. این جبران کننده ولتاژ باس 115 kV را تنظیم می کند تا اینکه تغییرات ولتاژ را به حداقل رسانده و ظرفیت انتقال توان را در شبکه 115 kV افزایش دهد. با اعمال اتصال کوتاه یک فاز به زمین در فاصله ۱۵ مایلی جبران کننده آزمایش انجام گرفت. اتصال کوتاه از طریق رله و عمل کلید در حدود ۵ سیکل رفع گردید. نمودار مربوط به ولتاژ باس 115 kV ، اثر اتصال کوتاه را به وضوح نشان می دهد. قابل توجه است که جریان TCR در فاصله زمانی یک سیکل از لحظه وقوع اتصال کوتاه، به طور موثر به حداقل رسیده است. (جریان TCR هرگز دقیقاً به مقدار صفر تنزل داده نمی شود زیرا با این کار خطر اینکه کنترل زاویه آتش از بین برود وجود دارد). به محض اینکه راکتور توان راکتیوی جذب نکند سیستم انتقال از توان راکتیوی که از ناحیه بانک خازنی وارد سیستم می شود بهره می گیرد.

با عمل کلیدهای قدرت و خارج شدن خط اتصال کوتاه شده، ولتاژ سیستم به مقدار نامی اش برمی گردد. همانطوری که در شکل ملاحظه می شود جریان TCR به مقدار کمتری - در مقایسه با جریان آن قبل از وقوع اتصال کوتاه - می رسد، و این امر نشان دهنده این است که پس از خارج شدن خط اتصال کوتاه شده، جبران کننده بایستی توان راکتیو کاپاسیتیو بیشتری وارد مدار نماید تا بتواند ولتاژ را در حد مطلوب نگاه داد. نمودار مربوط به خروجی رگولاتور ولتاژ نشان می دهد که جبران کننده در خلال $1/5$ سیکل پس از خارج شدن خط، در نقطه جدید کار استقرار یافته است. چون نوسان زاویه روتور قابل ملاحظه ای وجود نداشته بنابراین پریود انتقال (در مدت اتصال کوتاه و پس از رفع آن)، فقط پریود گذرا بوده و پریود نوسان اول و پریود نوسانی مطرح نیست.



شکل ۱۴ - نتایج آزمایش که نشان دهنده پاسخ TCR به اتصال کوتاه فاز به زمین است.

(ت) پاسخ‌گذاری جبران‌کننده در مجاورت ترمینال مبدل HVDC. در مثال زیر راجع به ولتاژ در باس ac در ورودی مبدل HVDC^۱ بحث می‌شود. اگر چنانچه ظرفیت اتصال کوتاه^۲ سیستم ac در ایستگاه مبدل HVDC کم باشد ولتاژ ac نسبت به تغییرات توان اکتیو که توسط مبدل جذب یا تحویل داده می‌شود، کاملاً حساس خواهد بود. ترمینال مبدل تقریباً معادل ۶۰ درصد توان نامی dc، توان راکتیو جذب می‌نماید. غالباً بانک‌های خازنی را در باس ac به کار می‌برند تا توان راکتیو مورد نیاز در حالت ماندگار مبدل را فراهم نمایند. تعدادی از این بانک‌های خازنی همچنین نقش فیلتر را دارند. فرض کنید وقتی که ترمینال در شرایط بار کار می‌کند قطع بار رخ می‌دهد و سوئیچ‌های الکترونیکی مبدل به طور ناگهانی مسدود می‌شوند. این مسدود شدن ممکن است در نتیجه اتصال کوتاه فاحش در سیستم ac مجاور ترمینال در طرف دیگر خط dc باشد که مستلزم از کار انداختن لحظه‌ای و یا دائمی انتقال توان برای حفاظت مبدل‌های dc می‌باشد.



شکل ۱۵ - سیستمی که برای مطالعه اضافه ولتاژ ناشی از قطع بار در ترمینال مبدل HVDC بکار رفته است.

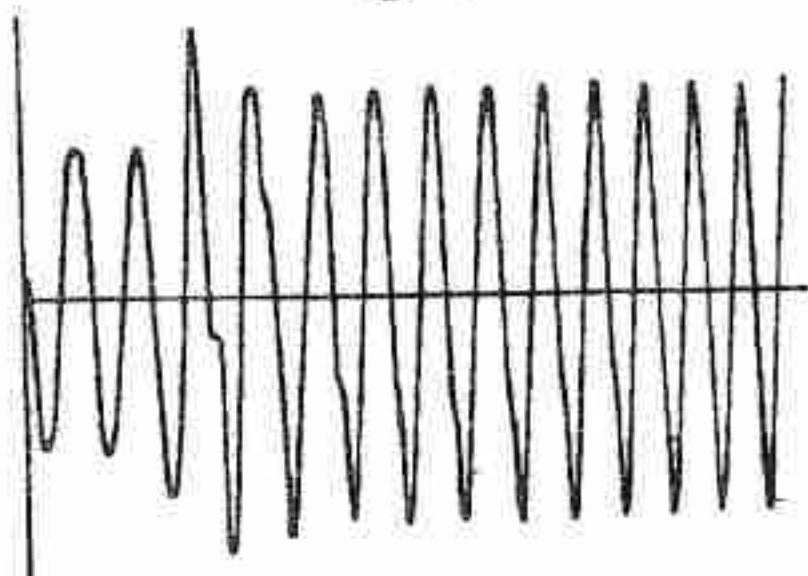
به منظور نشان دادن توانایی جبران‌کننده در کنترل اضافه ولتاژ ناشی از قطع بار، سیستم شکل ۱۵ بر روی تحلیل‌گر گذرا (TNA) مطالعه گردیده است. ترمینال یکسوکننده ابتدا در مقدار نامی ۲۰۰ MW کار می‌کند. فیلتر ac و بانک‌های خازن مجموعاً مقدار نامی شان ۱۱۴ MVAR می‌باشد. جبران‌کننده از دیدگاه باس ۲۳۰ kV دارای مقدار نامی ۱۳۰ MVAR - اندوکتیو می‌باشد. سه حالت مربوط به از کار افتادن HVDC مورد مطالعه قرار گرفته است.

۱- بدون حضور جبران‌کننده.

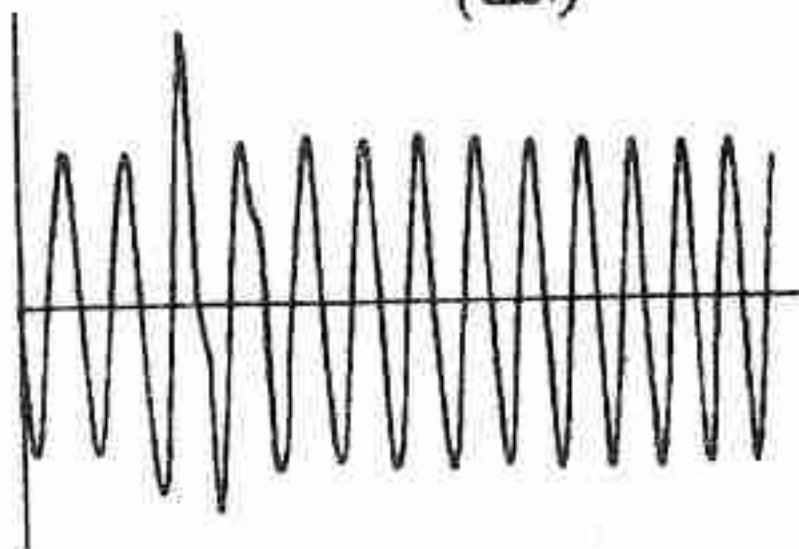
۲- با حضور جبران‌کننده که ولتاژ باس 230 kV را از طریق رگولاتور ولتاژ اتوماتیک کنترل می‌نماید.

۳- با حضور TCR که به وسیله سیگنال کنترل دریافتی از مبدل HVDC به طور کامل هدایت می‌کند. در این حالت فرمان به TCR و عمل کنترل مسدود کردن سوئیچ‌های الکترونیکی dc به طور همزمان اتفاق می‌افتند.

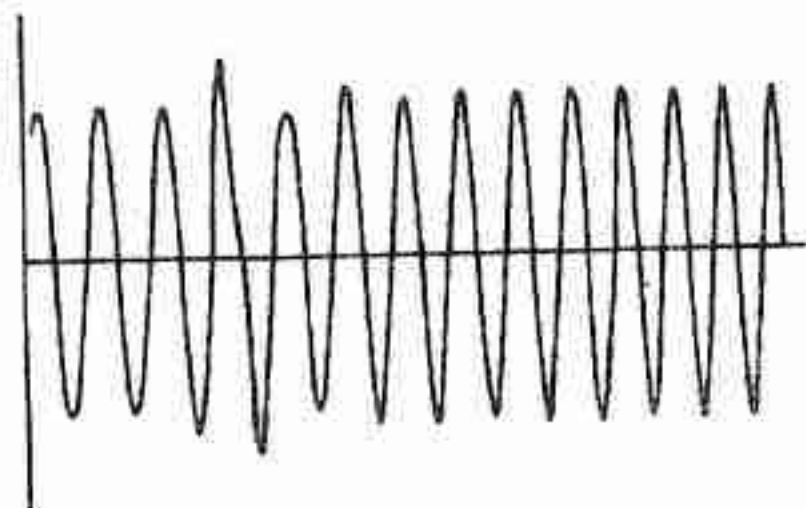
نتایج این مطالعات سه گانه بر روی TNA به ترتیب در شکل ۱۶ الف و ب و پ نشان داده شده است. ولتاژ فاز a به نول در باس 230 kV در هر سه شکل نشان داده شده است. عمل مسدود شدن سوئیچ‌های الکترونیکی (قطع بار) در پنجمین نقطه صفر ولتاژ از طرف چپ رخ داده است.



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۱۶ - قطع بار در ترمینال مبدل HVAC.

نمودارها ولتاژ (V) HVAC را نشان می‌دهند.

(الف) بدون جبران‌کننده (ب) با جبران‌کننده رگولاتور

ولتاژ (پ) با جبران‌کننده که سیگنال متقاضی جریان

اندوکتیو کامل را دریافت می‌کند. این سیگنال از مبدل

مشتق می‌شود که هدایت dc را مسدود می‌کند.

جدول ۱

مثال اضافه ولتاژ قطع بار بر روی TNA

	1	2	3
زمان (سیکل)	بدون جبران پیک V	کنترل AVR پیک V	کنترل هماهنگ شده پیک V
0 ^a	± 0.95	± 0.95	± 0.95
0.25	- 1.27	- 1.2	- 1.11
1.75	+ 1.65	+ 1.65	+ 1.2
1.25	- 1.65	- 1.32	- 1.27
1.75	+ 1.27	+ 1.01	+ 0.90
2.25	- 1.52	- 1.08	- 1.01
2.75	+ 1.33	+ 1.01	+ 1.08
مستمر	± 1.33	± 1.02	± 1.02

^a زمان = ۰ وقتی که مسدود شدن dc رخ می‌دهد، تقریباً در پنجمین نقطه صفر ولتاژ فاز *a* در اسبلوگرام

پیک ولتاژ بعدی در جدول ۱ نشان داده شده است. وقتی که جبران‌کننده از طریق رگولاتور ولتاژش عمل می‌کند (حالت ۲)، قادر نخواهد بود که پیک اول (-) و پیک دوم (+) را کاهش دهد. وقتی جبران‌کننده از کنترل dc دریافت سیگنال می‌کند (حالت ۳) قادر است این پیک‌ها را کاهش دهد. در هر دو حالت جبران‌کننده‌ها اضافه ولتاژ را به طور قابل ملاحظه کاهش می‌دهند. یک جبران‌کننده با مقدار نامی اندوکتیو بیشتر، اضافه ولتاژ را باز هم محدودتر می‌کند. در این مثال از مقدار نامی آن به طور کامل استفاده شده و موقتاً بالاتر از رنج کنترل ولتاژ نامی‌اش کار کرده است.

راکتور قابل اشباع با خازن ثابت^۱ (SR - FC) در جبران‌کننده‌های راکتور قابل اشباع عموماً از سیستم کنترل الکترونیکی استفاده نمی‌شود. با وجود این، تاخیر کمی در پاسخ آنها وجود دارد طوری که زمان استقرار پس از اغتشاش، با زمان ۱ تا ۲ سیکل جبران‌کننده‌های TCR قابل مقایسه است. تاخیر پاسخ علاوه بر خواص دینامیک سیستم ac، به مدار میرایی که به صورت موازی با خازن تصحیح‌کننده

1- Saturated - Reactor Fixed Capacitor

شیب قرار دارد، بستگی دارد. مدار میرایی برای جلوگیری از ناپایداری زیر هارمونیک^۱ ضرورت دارد (فصل ۴ به بخش ۴-۲-۲ مراجعه شود).

مشابه جبران کننده TCR، توانایی محدود کردن اضافه ولتاژ آن به وسیله مقدار نامی اندوکتیو راکتور قابل اشباع تعیین می شود و این خود با مقدار نامی ولتاژ خازن تصحیح کننده شیب - که به وسیله برقگیر فاصله جرقه^۲ موازی با آن حفاظت می گردد و در ولتاژ مثلاً مربوط به سه برابر جریان نامی تنظیم می شود - محدود می گردد. حتی وقتی که برقگیر جرقه، خازن تصحیح کننده شیب را اتصال کوتاه می کند راکتور به تنهایی تا جریان های خیلی زیاد مشخصه ولتاژ - جریان نسبتاً مسطح را ابقا می نماید (مثلاً ۸ الی ۱۵ درصد شیب). توانایی اضافه بار راکتور از نظر مقدار به وسیله نیازمندی های عایق و نیروهای وارده بر سیم پیچی ها و از نظر مدت زمان به وسیله ظرفیت حرارتی^۳ آن محدود می گردد. در مواردی که، از تاسیسات خازن سری تصحیح کننده شیب برقگیر فاصله جرقه استفاده شده است، معمولاً لازم است که یک کلید بای پاس^۴ با فاصله جرقه^۵ همراه باشد که در هنگام کار آنها بسته شود و زمانی که ولتاژ به وضع نرمالش برگشت، مجدداً باز شود.

برای اغتشاش کوچک یا فاحش که منجر به کاهش ولتاژ می گردد جبران کننده راکتور قابل اشباع مطابق شکل ۱۳ الف کار می کند. برای اغتشاشات کوچک که منجر به افزایش ولتاژ می گردد، مشابه TCR، مطابق شکل ۱۱ رفتار می کند. در اینجا به واسطه ثابت زمانی طبیعی اش کندی در پاسخ آن وجود دارد و این درست مشابه TCR است که در آن به واسطه تاخیر کوچک در آتش کردن تایریستور کندی وجود دارد.

خازن تایریستور سوئیچ^۶ (TSC). همان طوری که در فصل ۴ بیان شد خازن تایریستور سوئیچ شامل تعدادی بانک خازنی موازی است که هر کدام از آنها به هنگام لزوم به کمک تایریستور به مدار وصل و یا قطع می گردند. TSC دارای سیستم کنترلی است که مقدار ولتاژ را نشان می دهد. هرگاه ولتاژ از مقدار مطلوب - به مقدار بیش از خطای تنظیم شده قبلی (باند آزاد) - در جهت منفی یا مثبت منحرف گردد سیستم کنترل یک یا چند بانک خازنی را وارد مدار نموده یا از مدار خارج می کند تا ولتاژ در محدوده باند مجاز قرار گیرد، البته انجام این کار مشروط به این است که در موقع وارد کردن خازن،

1- Subharmonic Instability

2- Spark - Gap

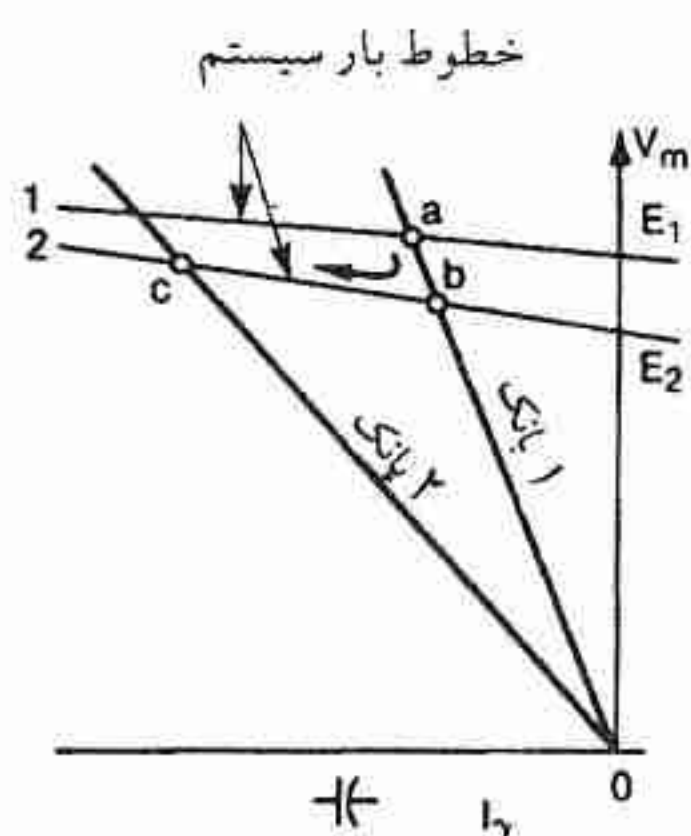
3- Thermal capacity

4- By - Pass Switch

5- gap

6- Thyristor - Switched Capacitor

تمام خازن‌ها قبلاً وارد مدار نشده باشند. همین طور در موقع خارج کردن خازن‌ها، تمامی آنها قبلاً از مدار خارج نشده باشند. شکل ۱۷ مکان هندسی پاسخ را - برای اغتشاشی که منجر به کاهش ولتاژ می‌گردد - نشان می‌دهد. با فرض اینکه در TSC دو بانک خازنی وجود دارد وقتی یک بانک خازن سوئیچ می‌شود در شرایط نرمال نقطه a نقطه کار خواهد بود. در آغاز اغتشاش ولتاژ به نقطه b کاهش می‌یابد تا وقتی که بانک خازن دوم نیز وارد مدار گردد که در نتیجه ولتاژ را تا نقطه c افزایش می‌دهد.

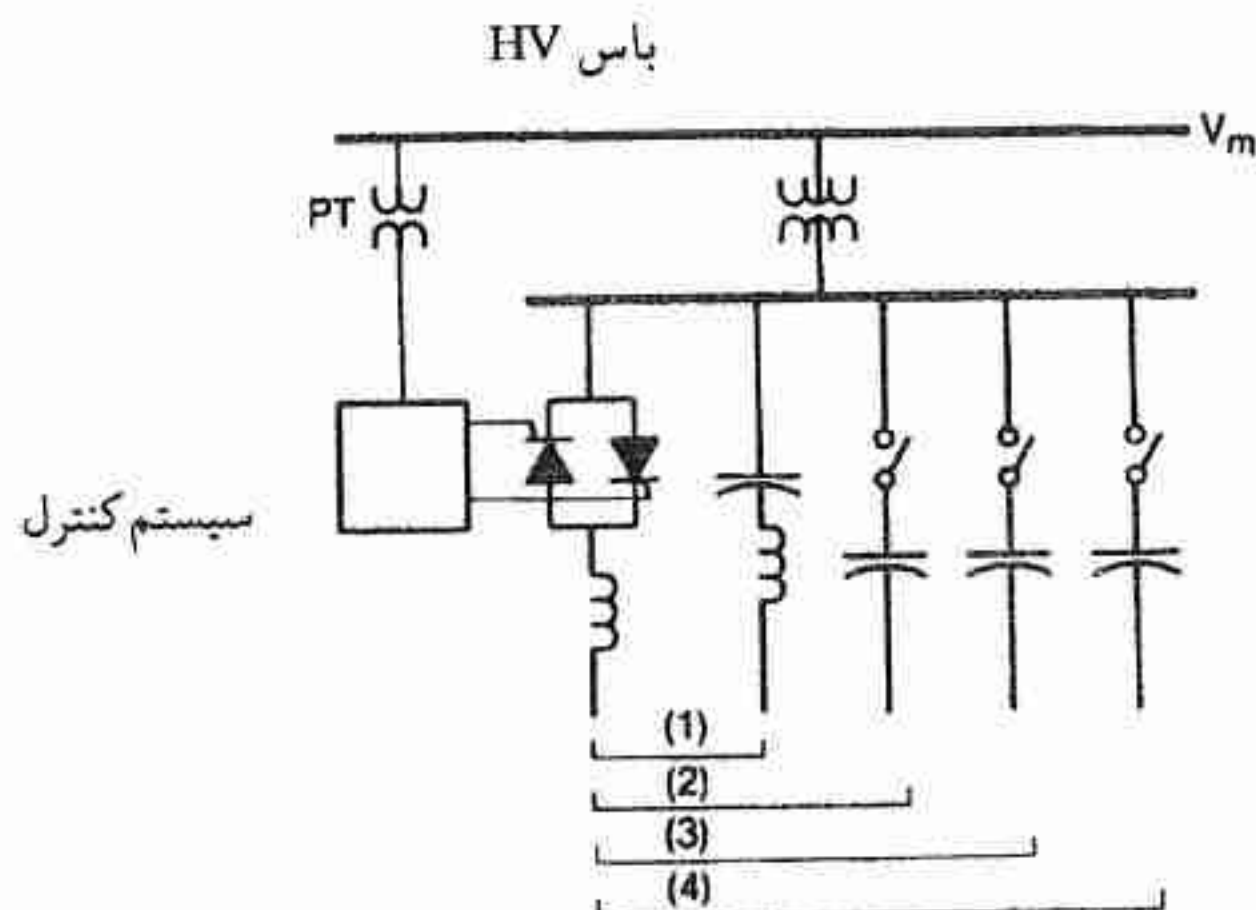


شکل ۱۷ - اثر جبران‌کننده TSC بر روی نقطه کار.

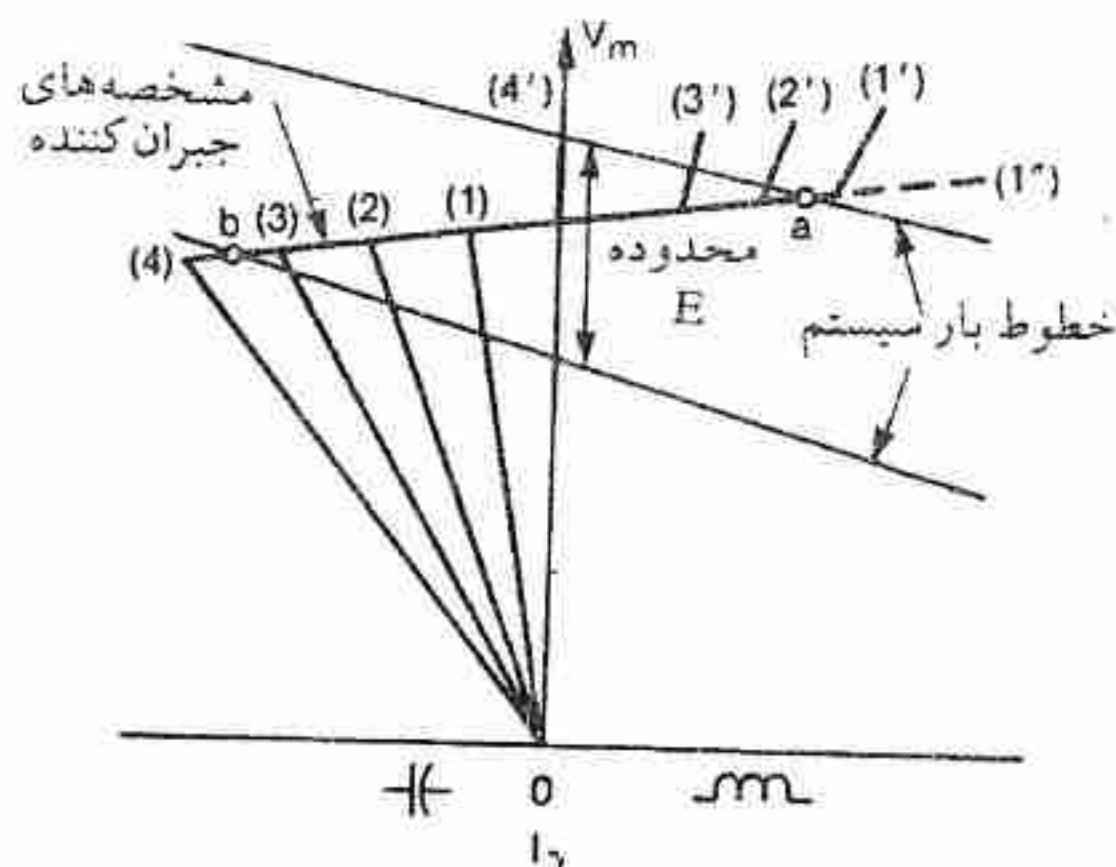
ذکر این نکته اهمیت دارد که به دلیل ماهیت سیستم کنترل TSC که فقط عمل قطع و وصل خازن‌ها را انجام می‌دهد، جریان جبران‌کننده قادر است که فقط به صورت پله‌ای ناپیوسته تغییر نماید. وقتی در ولتاژهای بالا به کار برده می‌شوند، به علت بالا بودن هزینه تایریستورها، تعداد بانک‌های خازنی به تعداد کم (مثلاً ۳ یا ۴) محدود می‌شود. در نتیجه پله‌های ناپیوسته جریان جبران‌کننده خیلی بزرگ خواهند شد، که منجر به کنترل در مقیاس بزرگ می‌گردد. نکته دیگری که حائز اهمیت است این که خازن‌ها وقتی می‌توانند به مدار متصل گردند که در لحظه اتصال، ولتاژ ذخیره شده در خازن برابر یا نزدیک به مقدار لحظه‌ای ولتاژ سیستم باشد. و این منجر به یک تأخیر مؤثری که می‌تواند تا یک سیکل باشد، می‌گردد (به فصل ۴ مراجعه شود). TSC قادر نخواهد بود که اضافه ولتاژگذار را محدود نماید مگر اینکه در این شرایط از مدار خارج شود. دارای این مزیت است که قادر است در کنترل نوسانات توان سنکرون‌کننده که پس از اتفاق اغتشاش ایجاد می‌شود، کمک نماید (به بخش ۳-۴-۲ همین فصل مراجعه شود).

ترکیب راکتور تایریستور کنترل و خازن تایریستور سوئیچ. دیاگرام تک خطی شکل ۱۸ یک جبران‌کننده راکتور تایریستور کنترل همراه با ۴ بانک خازنی را نشان می‌دهد. یکی از بانک‌های خازن

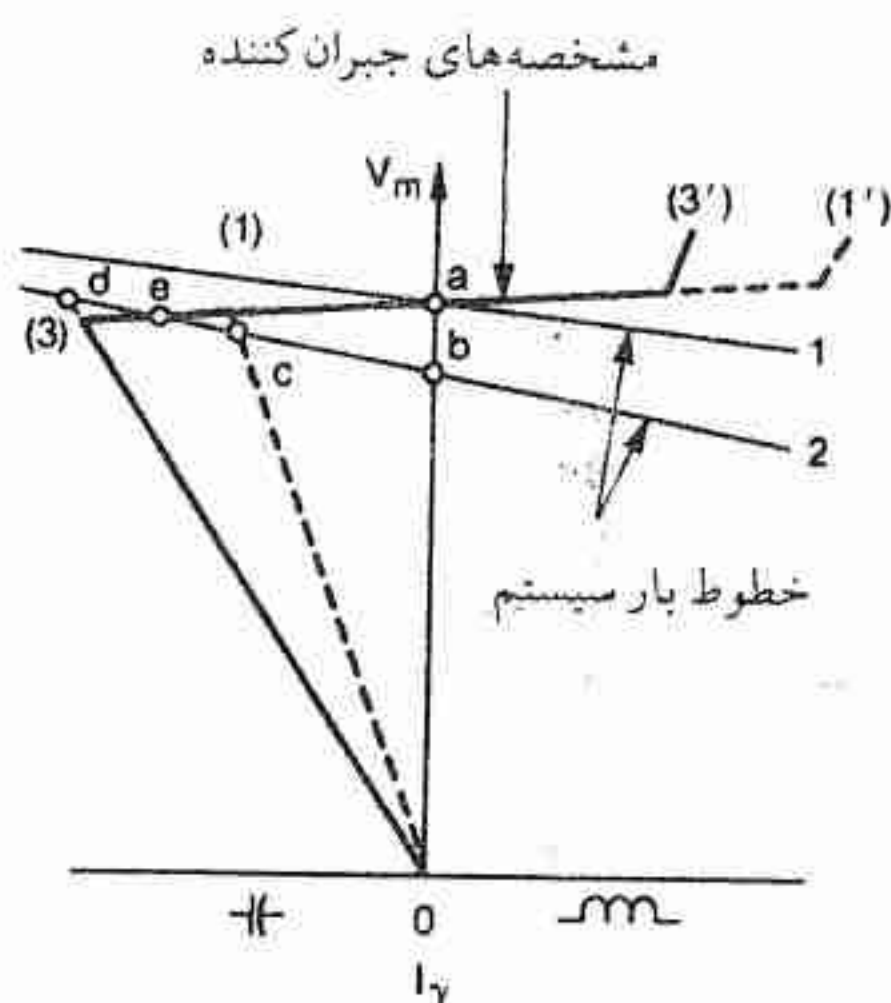
همواره در مدار قرار دارد و همراه با راکتور نقش فیلتر را دارد و جریان‌های هارمونیک ناشی از عمل کنترل فاز TCR را جذب می‌نماید. TCR همراه با بانک خازن فیلتر ثابت (FC) پیکربندی ۱ را در شکل ۱۸ تشکیل می‌دهد. مشخصه ولتاژ - جریان برای این پیکربندی در شکل ۱۹ به صورت ۱-۱-۰ یا ۱-۱-۰ (در صورت وجود ظرفیت اضافه بار کوتاه مدت در TCR) نشان داده شده است. مشخصه‌های دیگر مربوط به حالاتی است که یک یا دو یا سه بانک خازن به مدار متصل شده‌اند. با هماهنگی مناسب بین کنترل TCR و سوئیچ کردن خازن‌ها می‌توان مشخصه کلی ولتاژ - جریان پیوسته ۱-۴-۰ یا ۱-۴-۰ (۱-۴-۰) را به دست آورد. این جبران‌کننده قادر است که ولتاژ را در رنج تغییر خط بار نشان داده شده در شکل ۱۹، ثابت نگاه دارد. نقطه تنظیم ولتاژ TCR و کنترل شیب^۱ (یا ضریب بهره) بایستی هر بار که یک بانک خازن وارد مدار می‌شود تنظیم گردد تا مشخصه کلی پیوسته نشان داده شده در شکل بدست آید. رفتار کنترل ولتاژ جبران‌کننده ترکیبی در خلال پریود گذرا در شکل ۲۰ نشان داده شده است. فرض می‌شود که نقطه کار اولیه در نقطه a یعنی محل تقاطع مشخصه جبران‌کننده خط چین ۱-۱-۰ و خط بار راکتیو اولیه سیستم می‌باشد. فرض کنید که اغتشاشی رخ داده و خط بار را مطابق شکل از وضعیت ۱ به ۲ تغییر می‌دهد. ولتاژ جبران‌کننده V_m شروع به کاهش به سمت نوع b می‌نماید تا اینکه TCR با کنترل فازش (قطع جریان) نقطه کار را در فاصله ۱ سیکل به نقطه c می‌رساند. در این توالی تاکنون عمل سوئیچ کردن خازن صورت نگرفته است.



شکل ۱۸ - جبران‌کننده ترکیبی (1) TCR + خازن (فیلتر) ثابت (2) TCR + خازن ثابت + یک خازن؛ (3) TCR + خازن ثابت + دو خازن (4) TCR + خازن ثابت + سه خازن.



شکل ۱۹ - مشخصه‌های جبران‌کننده ترکیبی.



شکل ۲۰ - اثر جبران‌کننده ترکیبی بر روی نقطه کار

در لحظه‌ای که سیستم کنترل TCR فرمان کاهش جریان راکتور به صفر را صادر می‌کند، همزمان فرمان سوئیچ کردن خازن می‌تواند صادر گردد. ولتاژ در نقطه c باقی می‌ماند تا وقتی که خازن انرژی دار گردد. مدت زمانی که V_m در ولتاژ نقطه c باقی می‌ماند بستگی به روش سوئیچ کردن خازن دارد. اگر از تایریستور استفاده گردد این زمان به زمان کوتاه ۱ سیکل می‌رسد. در صورت استفاده از کلیدهای مکانیکی یا کلیدهای قدرت این زمان به چندین سیکل افزایش می‌یابد. با انرژی دار شدن خازن تا نقطه d پرش می‌نماید تا اینکه سرانجام TCR ولتاژ را در نقطه نهایی e استقرار می‌دهد. با کردن از سریع‌ترین کلیدهای مکانیکی (۲ سیکل) یا تایریستور (۱ سیکل) برای سوئیچ کردن

عمل کنترل باعث میشود که توالی $a-b-c-d-e$ در کمتر از ۲ سیکل، با توجه به حداکثر مکث نیم سیکل در نقاط b و d ، کامل گردد. اصولاً با استفاده کامل از دقت زمانی سوئیچ‌های تایریستوری برای TCR و خازنها، توالی فوق می‌تواند بدون داشتن پرش در نقطه d به توالی $a-b-e$ کاهش یابد.

ترکیب راکتور قابل اشباع (SR) و سوئیچ کردن خازن. توالی مورد بحث که به کمک شکل ۲۰ انجام گرفت، همچنین بوسیله این نوع جبران کننده قابل تحقق است. تنها تفاوت این است که در این نوع جبران کننده، عمل سوئیچینگ خازن بوسیله «کنترل اجباری»^۱ انجام می‌گیرد و حال آنکه راکتور دارای مشخصه «کنترل ذاتی» یا خود تنظیمی است. تصمیم سوئیچ کردن خازن در پاسخ به ترکیب سیگنالهایی که معرف ولتاژ باس جبران کننده و جریان راکتور می‌باشد، انجام می‌گیرد.

خلاصه - رفتار جبران کننده استاتیک در خلال پریود گذار. گرچه جبران کننده‌های استاتیک عموماً از نظر ظرفیت و سرعت پاسخ قادر نیستند که ولتاژگذرای بسیار سریع نظیر آنهاییکه بوسیله عمل سوئیچینگ و یا رعد و برق ایجاد میشود را محدود نمایند، اما در عین حال پاسخ آنها دارای سرعت کافی است که ولتاژ انتقال را در فاصله «پریود گذار» تثبیت نماید. انواع جبران کننده‌ها به شیوه‌های متفاوتی عمل می‌نمایند اما بیش و کم نتایج یکسانی را بدنبال دارند. وقتی هزینه، تلفات، و رفتار به لحاظ هارمونیک را مد نظر قرار دهیم در رفتار کلی تفاوت‌های مهمی با یکدیگر خواهند داشت. TCR و مخصوصاً جبران کننده SR هر دو در محدود کردن اضافه ولتاژ دارای توانایی زیاد هستند، اما در هر کاربردی بایستی مطالعه مفصل انجام گیرد زیرا پاسخ سیستم واقعی به پارامترهای متعدد منجمله به نقطه کار اولیه بستگی دارد.

۳-۴-۲ پریود نوسان اول

تاکنون اغتشاشاتی را که می‌توان بوسیله تغییر مرحله‌ای خط بار راکتیو در باس جبران کننده نشان داد، را در نظر گرفته‌ایم. این نمایش عموماً فقط برای چند سیکل پس از اغتشاش قابل قبول است و فقط اگر مقدار اغتشاش خیلی کوچک باشد و یا اگر ولتاژهای منبع توسط ماشین‌های سنکرون با مقدار نامی خیلی بزرگ - نسبت به وسایل جبران کننده مورد نظر - تولید گردند. اما اگر چنانچه اغتشاش

منجر به هم خوردن توزیع گشتاور (اندازه حرکت) بین ماشینهای سنکرون گردد، خط بار در باس جبران‌کننده بطور پیوسته برای زمان طولانی‌تر تغییر می‌کند (افزایش یا کاهش)، و احتمالاً مقدار تغییر در خلال پریود نوسان اول زیاد خواهد بود.

رفتار جبران‌کننده موازی در خلال پریود اولین نوسان، با آنچه که در پریود گذرا تشریح شد شباهت خیلی زیادی دارد. مشخصه جبران‌کننده و توالی خطوط بار راکتیو سیستم در شکل ۲۱ الف نشان داده شده است. توالی خطوط بار راکتیو ۱ و ۲ و ۳ به شرح زیر ایجاد میشود.

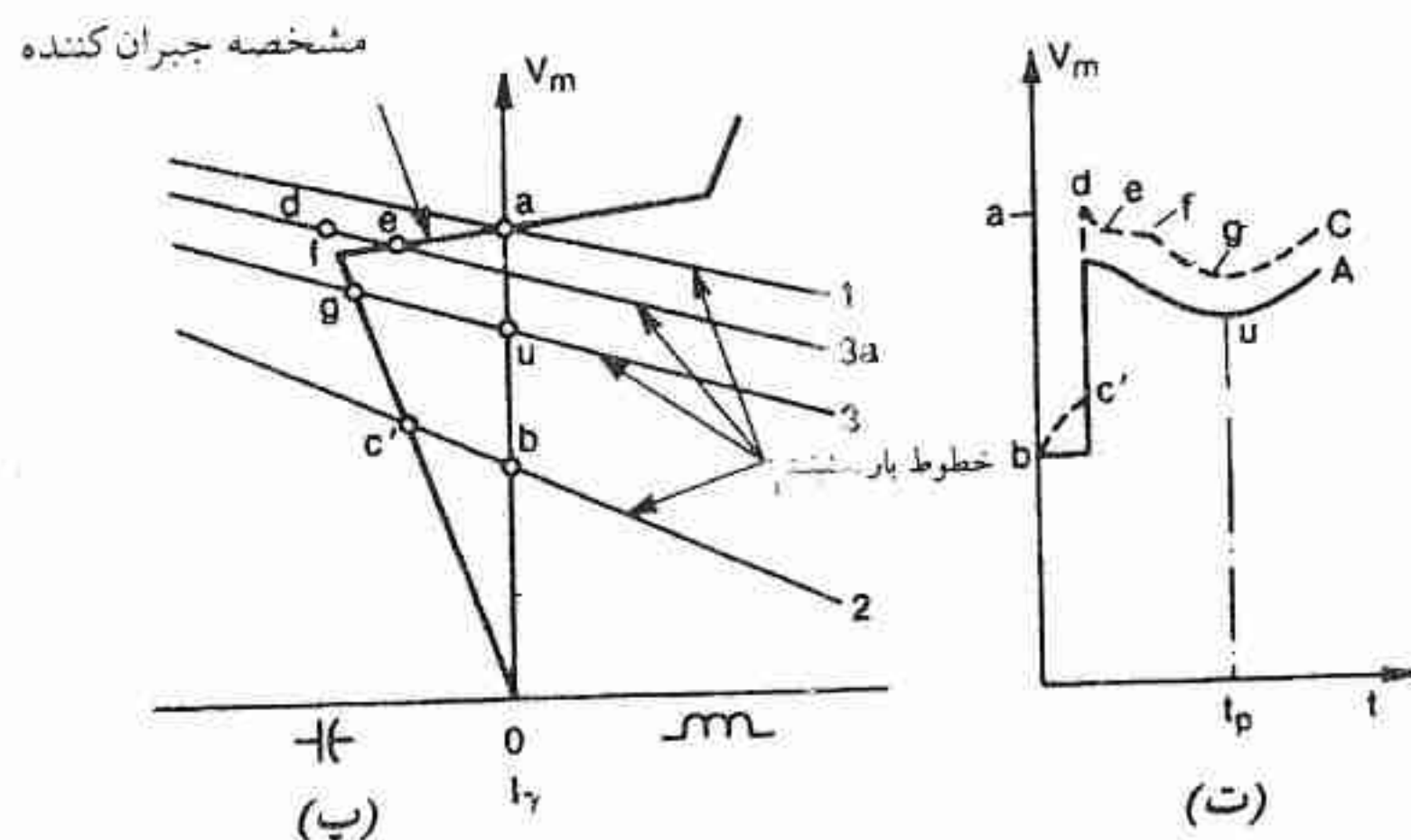
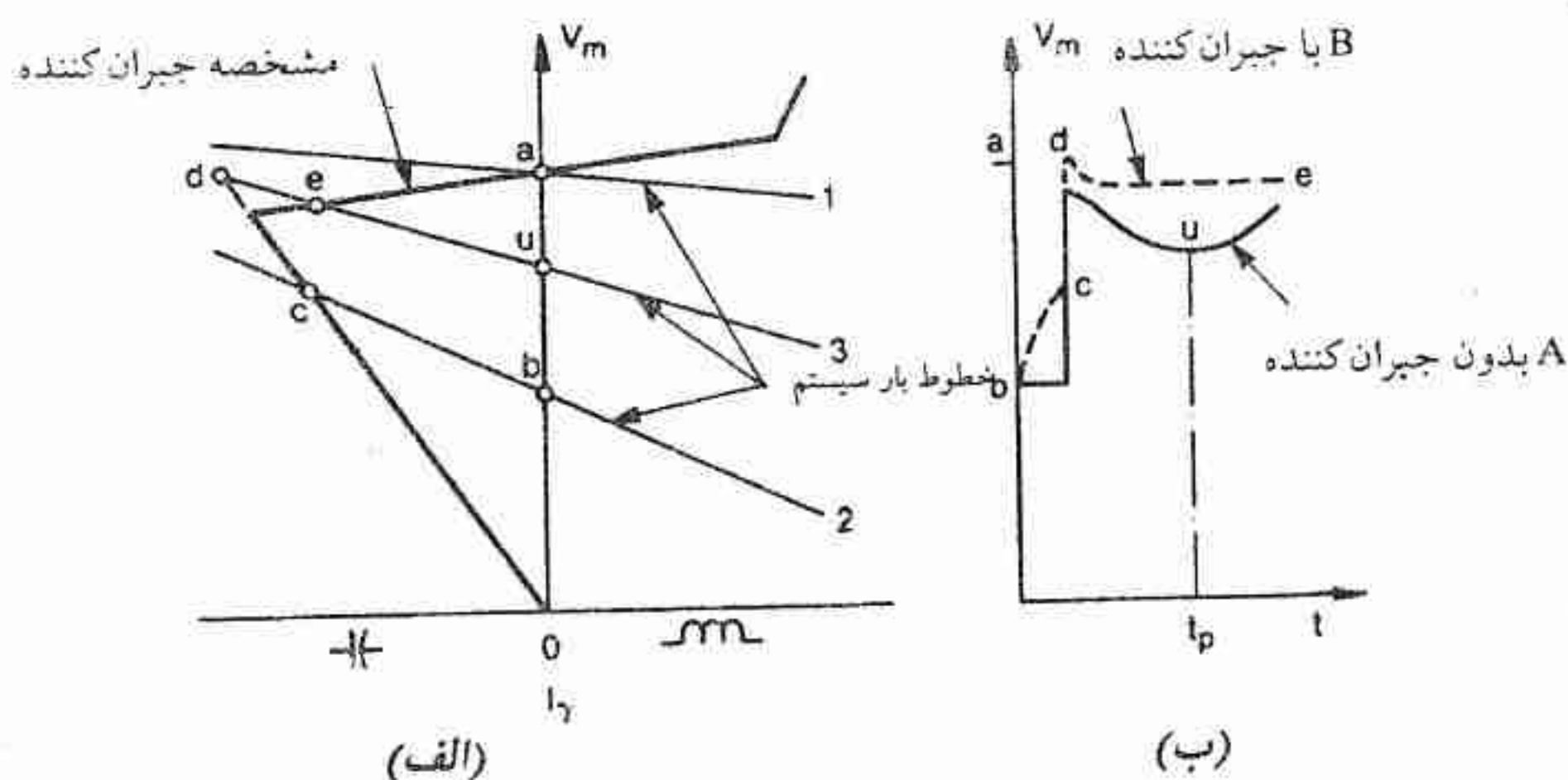
- ۱- این خط بار شرایط قبل از اتصال کوتاه را در سیستم نوع نشان داده شده در شکل ۳، نشان میدهد.
- ۲- یک اتصال کوتاه در سمت راست کلید قدرت a در شکل ۳ رخ داده است و خط بار را به مقدار زیادی به پائین سوق داده است. فرض بر این است که خط بار ۲ در طول اتصال کوتاه ثابت می‌ماند.

- ۳- پس از آنکه خط اتصال کوتاه شده (در شکل ۳) با باز شدن کلیدهای b ، a از سیستم خارج میشود، خط بار ابتدا به بالای وضعیت ۳ پرش کرده و در خلال پریود اولین نوسان به پائین‌ترین وضعیت (حداقل ولتاژ)، وضعیت ۳ مطابق شکل ۲۱ الف افت می‌نماید.

اغتشاش، منجر به حالت گذرای نوسانی در توان، در ولتاژ V_m و در زاویه انتقال δ می‌گردد. اولین نیم نوسان V_m در شکل ۴ پ نشان داده شده است و مجدداً بصورت نمودار A در شکل ۲۱ ب رسم شده است. با گذر زمان خط بار ۳ به بالا و پائین حرکت می‌کند. در نمودار ولتاژ A در ارتباط با توالی خطوط بار، ولتاژ بطور لحظه‌ای از نقطه a به نقطه b بر روی محور عرض‌ها مطابق شکل ۲۱ ب افت می‌نماید. در طول اتصال کوتاه ولتاژ در نقطه b ثابت می‌ماند و وقتی خط اتصال کوتاه شده از سیستم قطع می‌گردد ولتاژ به مقداری بین نقاط u ، a بر می‌گردد. چون δ افزایش می‌یابد ولتاژ در زمان t_p به مقدار حداقل خود (نقطه u) مطابق شکل ۲۱ ب افت می‌نماید.

اگر یک جبران‌کننده نسبتاً بزرگ بر روی باس m مطابق شکل ۳ انجام وظیفه نماید نمودار ولتاژ خط چین B شکل ۲۱ ب حاصل میشود. فرض بر این است که جبران‌کننده قبل از وقوع اتصال کوتاه در نقطه a کار می‌کرده و جریان آن برابر صفر بوده است. بمحض وقوع اتصال کوتاه و با وجود جبران‌کننده، ولتاژ V_m به نقطه b افت می‌نماید. در فاصله نیم سیکل، TCR جریانش را به حداقل رسانده و ولتاژ بر روی خط خازن ثابت مطابق شکل ۲۱ الف تا نقطه c افزایش می‌یابد. هنگامیکه خط اتصال کوتاه شده از سیستم جدا میشد، ولتاژ تا نقطه d پرش می‌نماید. پس از تاخیر کمی کمتر یا برابر $1/2$ سیکل، TCR عمل نسوده و ولتاژ را در نقطه e پایدار می‌نماید. نمودار خط چین B شکل ۲۱ ب

نشان می‌دهد که با استفاده از جبران کننده در باس m بهترین شکل کنترل ولتاژ در سیستم مورد نظر بدست می‌آید.



شکل ۲۱ - پاسخ جبران کننده استاتیک در پریود نوسان اول (الف) جبران کننده بزرگ (ب) پاسخ گذرای V_m با جبران کننده بزرگ (پ) جبران کننده کوچک (ت) پاسخ گذرای V_m با جبران کننده کوچک.

اشکال ۲۱ پ و ۲۱ ت رفتار سیستم با یک جبران کننده کوچکتر که جریان و ولتاژ آن در خلال نوسانات توان پس از رفع اتصال کوتاه از رنج کنترل نرمال خارج میشود، را نشان میدهند. با مقدار نامی کاپاسیتو کوچکتر از آنچه که در شکل ۲۱ الف در نظر گرفته شده، شیب Of بدست می‌آید. نمودار با خط A در شکل ۲۱ ت مجدداً پاسخ جبران نشده را نشان میدهد. نمودار خط چین C اثر جبران کننده کوچکتر را نشان میدهد.

نمودار ولتاژ با جبران‌کننده کوچکتر توالی مشابهی را در طول اتصال کوتاه نشان می‌دهد: a به b سپس به c . سطح ولتاژ c از سطح ولتاژ a در اشکال ۲۱ الف و ۲۱ ب بواسطه کمتر بودن مقدار نامی کاپاسیتو جبران‌کننده، مقداری پائین‌تر است. ملاحظه می‌شود که هیچکدام از این جبران‌کننده‌ها نمی‌توانند تاثیر آنچنانی در تصحیح ولتاژ در خلال پریود اتصال کوتاه داشته باشند.

هنگامیکه اتصال کوتاه رفع می‌شود و خط بار پس از رفع اتصال کوتاه به خط $3a$ (که بین خطوط بار ۱ و ۳ قرار دارد) بازگردانده می‌شود ولتاژ V_m همچنین بهبود می‌یابد. نمودار ولتاژ C نشان می‌دهد که جبران‌کننده قادر است که در رنج کنترل ولتاژ خود کار کند و برای زمان کوتاه بین e و f ولتاژ را تقریباً ثابت نگاه دارد تا اینکه نوسان توان منجر می‌شود که نقطه کار از f منته‌الیه سمت چپ مشخصه جبران‌کننده کاهش یابد و به وضعیت می‌نیم g روی خط بار ۳ برسد. بنابراین در پریود اولین نوسان حداقل ولتاژ را بجای نقطه u در نقطه g محدود می‌نماید.

در این بخش بطور ضمنی پذیرفته‌ایم که تغییرات خط بار از عمل جبران‌کننده تاثیر نمی‌پذیرد. بطور کلی، جبران‌کننده تغییرات زاویه انتقال δ را کاهش می‌دهد که این خود تغییرات خط بار را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در بخش بعد تاثیر جبران‌کننده را بر روی زاویه انتقال و پایداری گذرای سیستم بررسی می‌کنیم.

۳-۴-۳ اثر جبران‌کننده موازی استاتیک بر پایداری گذرا

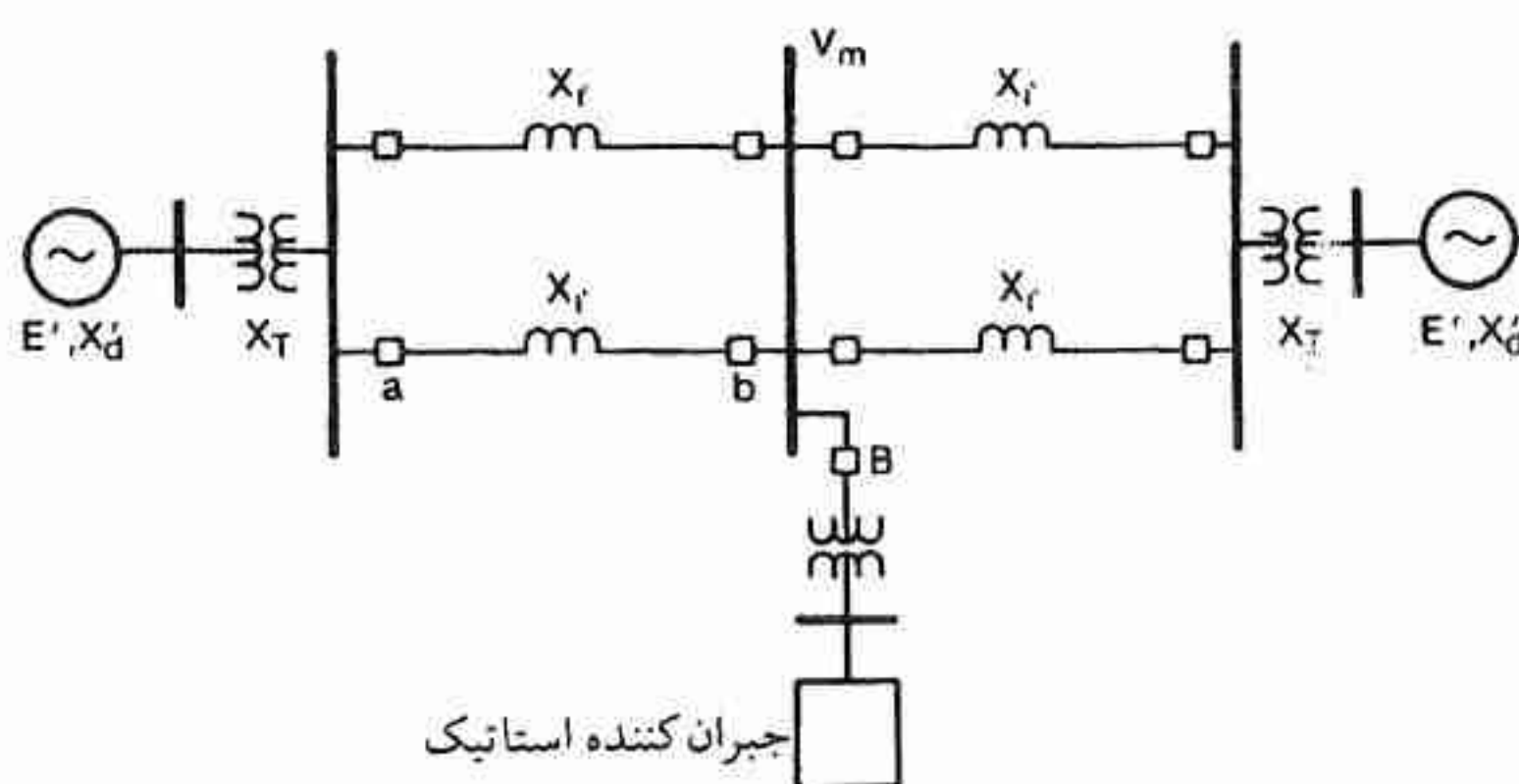
در بخش ۲-۶ فصل ۲ مفهوم جبران با تقسیم بندی خط که در آن یک سیستم انتقال بوسیله جبران‌کننده‌های موازی - که ولتاژ را در نقطه اتصال ثابت نگاه میدارند - به دو قسمت یا بیشتر تقسیم می‌گردد، معرفی گردید. مخصوصاً نشان داده شد که ظرفیت توان انتقالی ماندگار یک خط متقارن با افزودن یک جبران‌کننده دینامیک موازی در نقطه میانی الکتریکی خط، افزایش می‌یابد. با عمل کنترل ولتاژ کامل در نقطه میانی ظرفیت توان انتقالی ماندگار در حد دو برابر خواهد شد (به شکل ۳۲ فصل ۲ مراجعه شود).

برای سیستم متقارن نشان داده شده در شکل ۲۲، این افزایش دو برابر توان انتقالی با افزایش منحنی P/δ شکل ۲۳ از a به b نشان داده شده است. در غیاب جبران‌کننده منحنی a بوسیله معادله ۳۸ فصل ۲ بدست می‌آید که در آن E برابر با «نیروی محرکه پشت راکتانس گذرا» یعنی (E') ژنراتورها و X_1 راکتانس کل سری، برابر با مجموع راکتانس ترانسفورماتور و خط $X_T + X_L$ و راکتانس‌های گذرای ژنراتورها X_d (که مساوی فرض شده است) است. از اثر کاپاسیتانس موازی خط صرف‌نظر شده

است. با حضور جبران کننده ایده‌ال که ولتاژ نقطه میانی را در مقدار \dot{E} ثابت نگاه می‌دارد منحنی توان-زاویه b طبق معادله زیر بدست می‌آید:

$$P = \frac{\dot{E}^2}{2X_d' + X_T + X_\ell} \sin \frac{\delta}{2} \quad (1)$$

این منحنی وقتی قابل قبول است که مشخصه ولتاژ-جریان (گذرا) جبران کننده مسطح بوده، و جبران کننده بطور لحظه‌ای پاسخ داده و دارای توانایی جریان کاپاسیتیو کافی باشد. بطور کلی، هیچکدام از این شرایط برآورده نمیشود. وجود شیب کوچک در مشخصه ولتاژ-جریان و تاخیر کوچک در پاسخ مجموعاً منجر به کاهش منحنی توان-زاویه از b به c میشوند، در حالیکه محدود بودن توانایی جریان کاپاسیتیو منجر به گسستن منحنی در نقطه D گشته و در نتیجه جبران کننده بصورت یک خازن ثابت در زاویه بار بالاتر، یعنی منحنی d رفتار می‌نماید (همچنین به شکل ۳۲ فصل ۲ مراجعه شود).

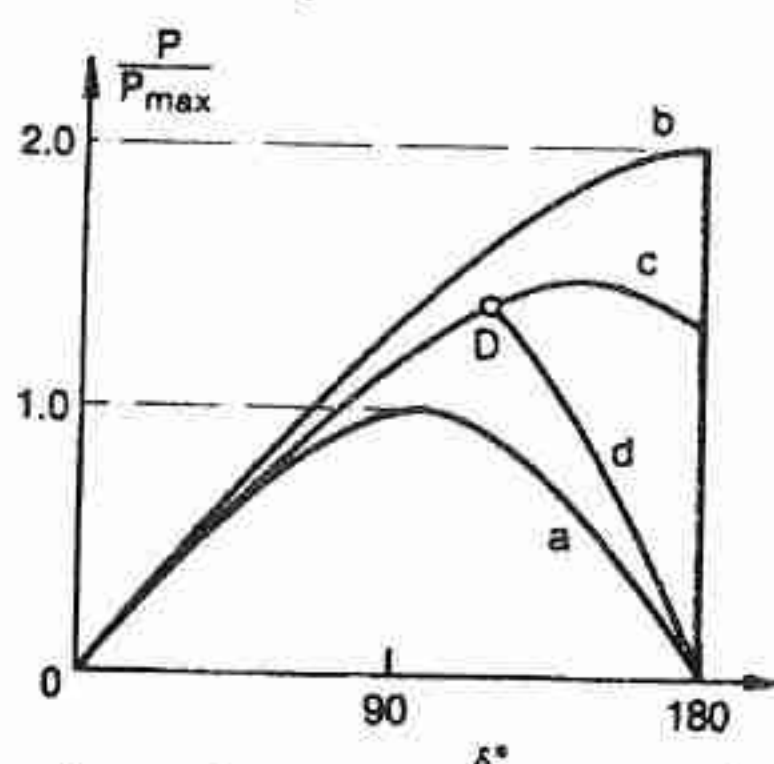


شکل ۲۲ - سیستم دو ماشینی با جبران کننده دینامیک واقع در نقطه میانی.

تئوری بهبود پایداری گذرا. حال در وضعیتی هستیم که با بکار بردن معیار سطوح معادل^۱، پایداری گذرا را در حضور و غیاب جبران کننده موازی دینامیک مقایسه نمائیم. ابتدا مورد بدون جبران کننده را در نظر می‌گیریم.

تصور کنید که یک اتصال کوتاه در فاصله بین کلیدهای قدرت a و b در شکل ۲۲ بوجود می‌پیوندد و بوسیله همین کلیدها رفع می‌شود. منحنی ۱ در شکل ۲۴ الف منحنی توان-زاویه گذرای قبل از اتصال کوتاه را نشان می‌دهد که دارای ماگزیمم زیر است:

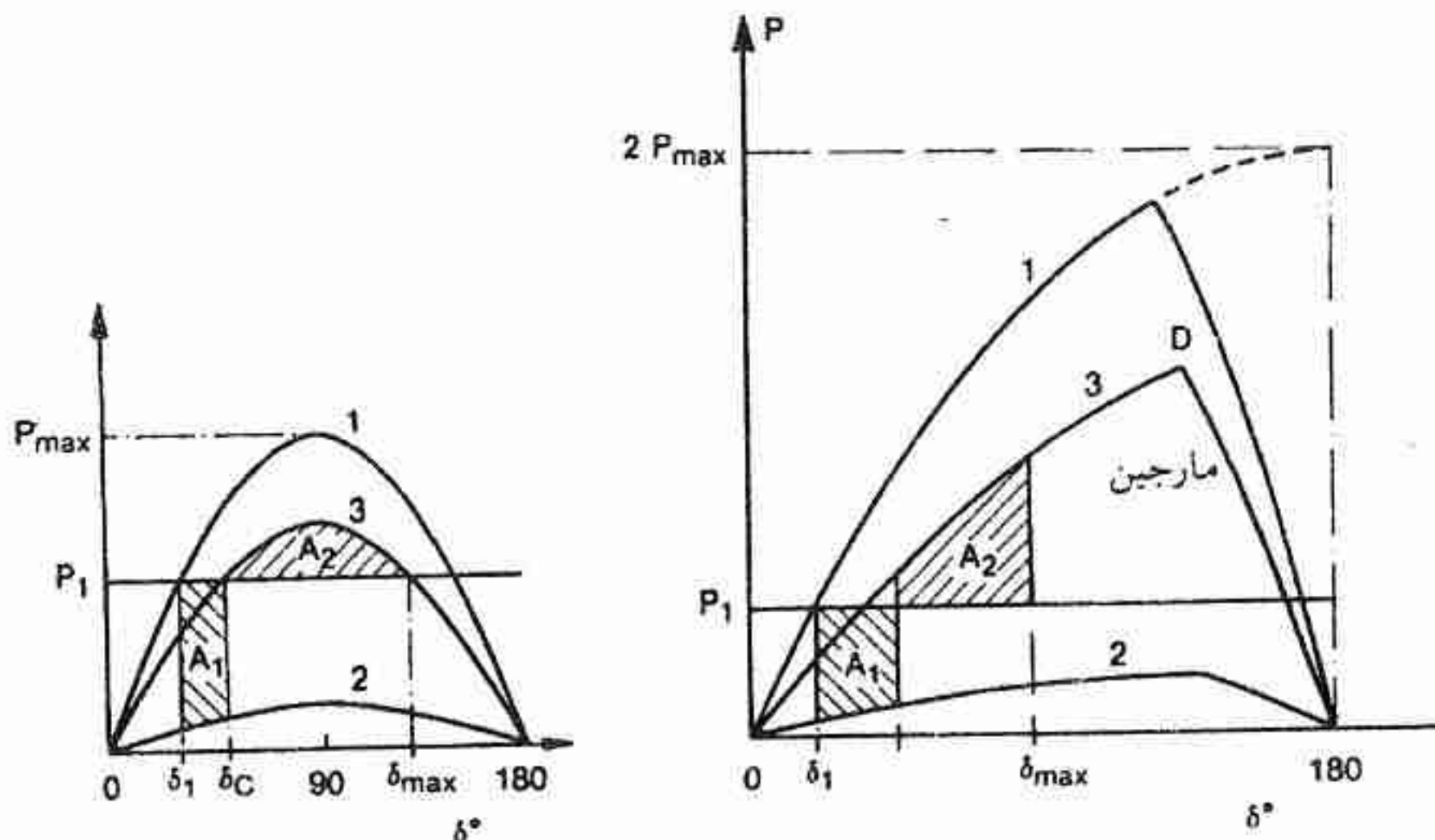
$$P_{\max} = \frac{\dot{E}^2}{X_d + 2(X_T + X_d')} \quad (2)$$



شکل ۲۳ - منحنی‌های توان - زاویه گذرا با حضور و غیاب جبران‌کننده موازی دینامیک: a ، بدون جبران‌کننده b ، با جبران‌کننده ایده‌آل c ، جبران‌کننده با مشخصه ولتاژ نزولی و d ، جبران‌کننده با مقدار نامی محدود تا نقطه D

منحنی ۲ در طول اتصال کوتاه حکمفرماست. منحنی ۳ پس از جداشدن خط اتصال کوتاه شده حاصل می‌شود و با منحنی ۱ از این جهت که X_d با $3X_d/2$ جایگزین شده است، متفاوت است. فرض شده است که \dot{E} در طول پریود نوسان اول ثابت است. در غیاب جبران‌کننده‌ها برای اتصال کوتاه مورد بحث، سیستم می‌تواند تا حد توان پایداری گذرای P_1 بارگیری شود طوری‌که انرژی کندکننده موجود A_2 برابر انرژی شتاب دهنده A_1 خواهد بود. در عمل بمنظور فراهم کردن یک فاصله اطمینان (مارجین) پایداری^۱ سطح توان انتقالی مقداری از این حد کمتر خواهد بود.

اثر جبران‌کننده موازی میانی بزرگ و دارای پاسخ سریع در شکل ۲۴ ب نشان داده شده است. منحنی‌های ۱ و ۲ و ۳ شکل ۲۴ الف به ترتیب با منحنی‌های بالاتر ۱ و ۲ و ۳ جایگزین شده است. برای توان انتقالی یکسان P_1 و مدت اتصال کوتاه یکسان، سطح انرژی کندکننده موجود در این حالت بزرگتر بوده و تنها قسمتی از آن بهره‌برداری شده است، و یک فاصله اطمینان (مارجین) همانطوری‌که در شکل ۲۴ ب نشان داده شده است، باقی می‌گذارد. به عبارت دیگر، حد پایداری گذرا افزایش یافته است، یعنی توان انتقالی را می‌توان تا نقطه‌ای که از تمامی مارجین بهره‌برداری شود افزایش داد. واضح است که توانایی جریان کاپاسیتیو جبران‌کننده یک فاکتور محدودکننده در پایداری گذراست، زیرا سطح مارجین شکل ۲۴ ب را تا سمت راست نقطه D کاهش می‌دهد. با وجود این، یک جبران‌کننده در اندازه محدود، بهبود ارزشمندی را در پایداری گذرا ممکن می‌نماید.

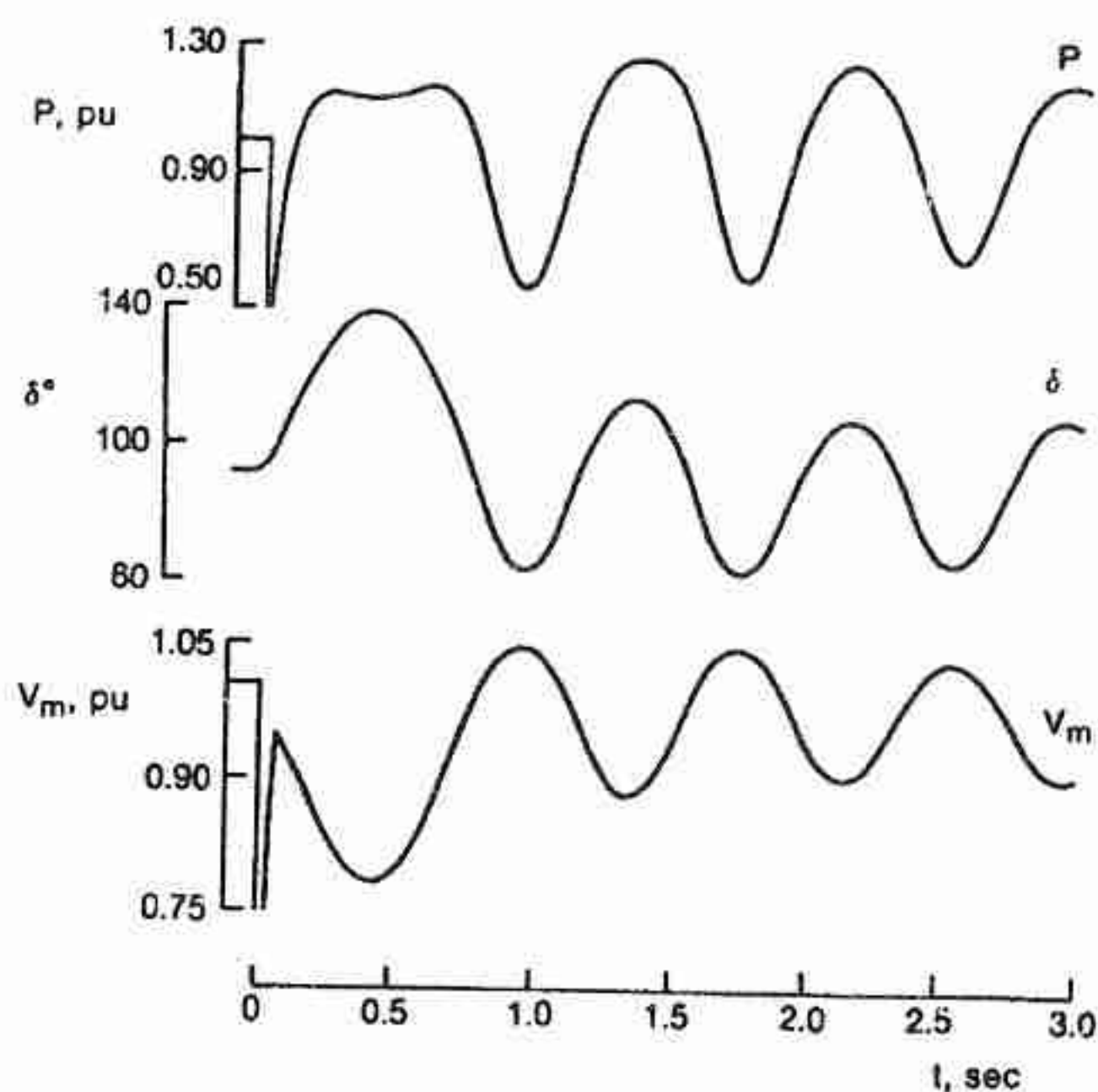


شکل ۲۴ - روش سطوح معادل نشان می‌دهد که با بکار گرفتن جبران کننده موازی دینامیک، پایداری گذرا افزایش یافته است. (الف) جبران کننده در باس m وجود ندارد (ب) جبران کننده موازی دینامیک در باس m وجود دارد که مقدار نامی آن زیاد بوده و در خلال پریود نوسان اول ولتاژ را کنترل می‌نماید.

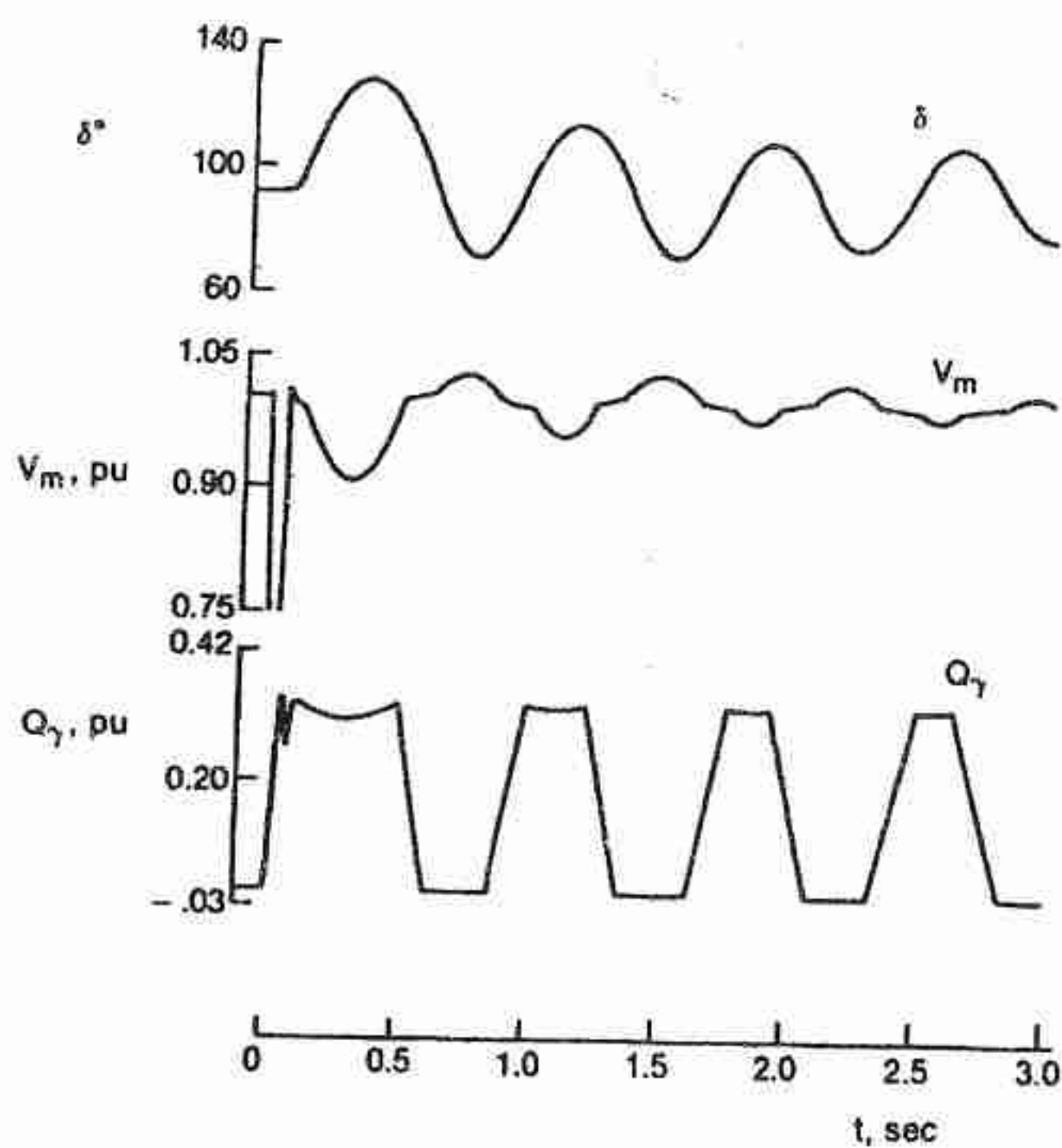
مثالهایی از شبیه سازی کامپیوتری. رفتار دینامیکی سیستم‌های جبران شده را می‌توان بتفصیل به کمک شبیه سازی کامپیوتری مورد مطالعه قرار داد. در ذیل سه مثال تشریح میشود که طی آن مزایای حاصله از جبران کننده در رفتار سیستم نشان داده خواهد شد.

مثال ۱- افزایش مارجین پایداری گذرا در یک توان انتقالی معین

فرض میشود که مدل دو ماشینی شکل ۲۲ معرف یک ژنراتور ۱۰۰۰ MW باشد که یک مدار دویل خط ۵۰۰ kV را تغذیه می‌کند. فرض میشود که ماشین انتهای خط یک باس بی نهایت باشد. شصت درصد جریان خازنی خط باراکتورهای موازی ثابت جبران شده است. ژنراتور دارای سیستم تحریک پاسخ- بالا^۱ است. شکل ۲۵ پاسخ زاویه انتقال δ ، توان و ولتاژ باس میانی سیستم را، پس از وقوع اتصال کوتاه سه فاز بر روی مدار نزدیک به ژنراتور، نشان می‌دهد. مدار اتصال کوتاه شده از سیستم قطع و سیستم پایدار باقی می‌ماند؛ گرچه نوسانات بزرگ زاویه روتور ایجاد میشود ولی لغزش- قطب^۲ بوقوع نمی‌پیوندد.



شکل ۲۵ - پاسخ سیستم شکل ۲۲ در برابر یک اتصال کوتاه سه فاز، بدون جبران‌کننده.



شکل ۲۶ - پاسخ سیستم شکل ۲۲ در برابر اتصال کوتاه سه فاز، با وجود جبران‌کننده.

نتایج مطالعه بر روی همان سیستم که با جبران کننده شامل 300 MVar و 300 MVar TCR خازن موازی، مجهز شده است، در شکل ۲۶ نشان داده شده است. نوسان اول و نوسان‌های بعدی زاویه روتور در مقایسه با حالت جبران نشده، بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است که نشان دهنده افزایش پایداری گذرا می‌باشد. ولتاژ در باس میانی 500 kV سه ثانیه پس از وقوع اتصال کوتاه به حالت پایدار می‌رسد. نقاطی که در آنها جبران کننده از رنج کنترل خارج^۱ میشود بوضوح در دو نمودار تحتانی مشاهده می‌گردد. گرچه این نتایج بر یک مدل ساده استوار است، مطالعات جامع و گسترده‌تر نشان داده است که در سیستم‌های واقعی با پیکربندی‌های^۲ دیگر چنین بهبودهایی قابل حصول است.

مثال ۲- افزایش توان انتقالی با حفظ پایداری گذرا

سیستم مورد مطالعه در این مثال سیستم انتقالی 500 kV شکل ۲۷ می‌باشد. سیستم انتقال یک نیروگاه دور دست را به شبکه بزرگ سیستم قدرت ارتباط می‌دهد. این سیستم انتقال شامل دو خط 300 مایل و یک ایستگاه سوئیچینگ میانی^۳، باس ۲ است. فرض بر این است که یک بار 500 MW در نیروگاه دور دست وجود دارد. در بررسی پایداری گذرا، اغتشاش وارده به سیستم عبارت از اتصال کوتاه سه فاز با امپدانس صفر در نقطه X بوده است و خط انتقالی در فاصله ۵ سیکل از مدار قطع گردیده است.

هدف از این مطالعه نشان دادن کاربرد جبران کننده‌های موازی استاتیک در افزایش توان انتقالی بوده است طوری که بتوان توان انتقالی بیشتری را از یک مجموعه خطوط انتقال ثابت عبور داد بدون اینکه سیستم در هنگام وقوع اتصال کوتاه مشخص^۱ پایدار گردد. این حالت منطبق بر شرایط واقعی است که یا در احداث خطوط جدید با مشکل مواجه هستیم و یا راه‌های مقرون به صرفه مورد نظر است. برخلاف انتقال توان ثابت فرض بر این است که قدرت و توانایی تولید ژنراتور (و ترانسفورماتورهای مربوطه) افزایش می‌یابد و این با توانایی افزایش توان انتقالی که با کاربرد جبران کننده میسر است، سازگار است.

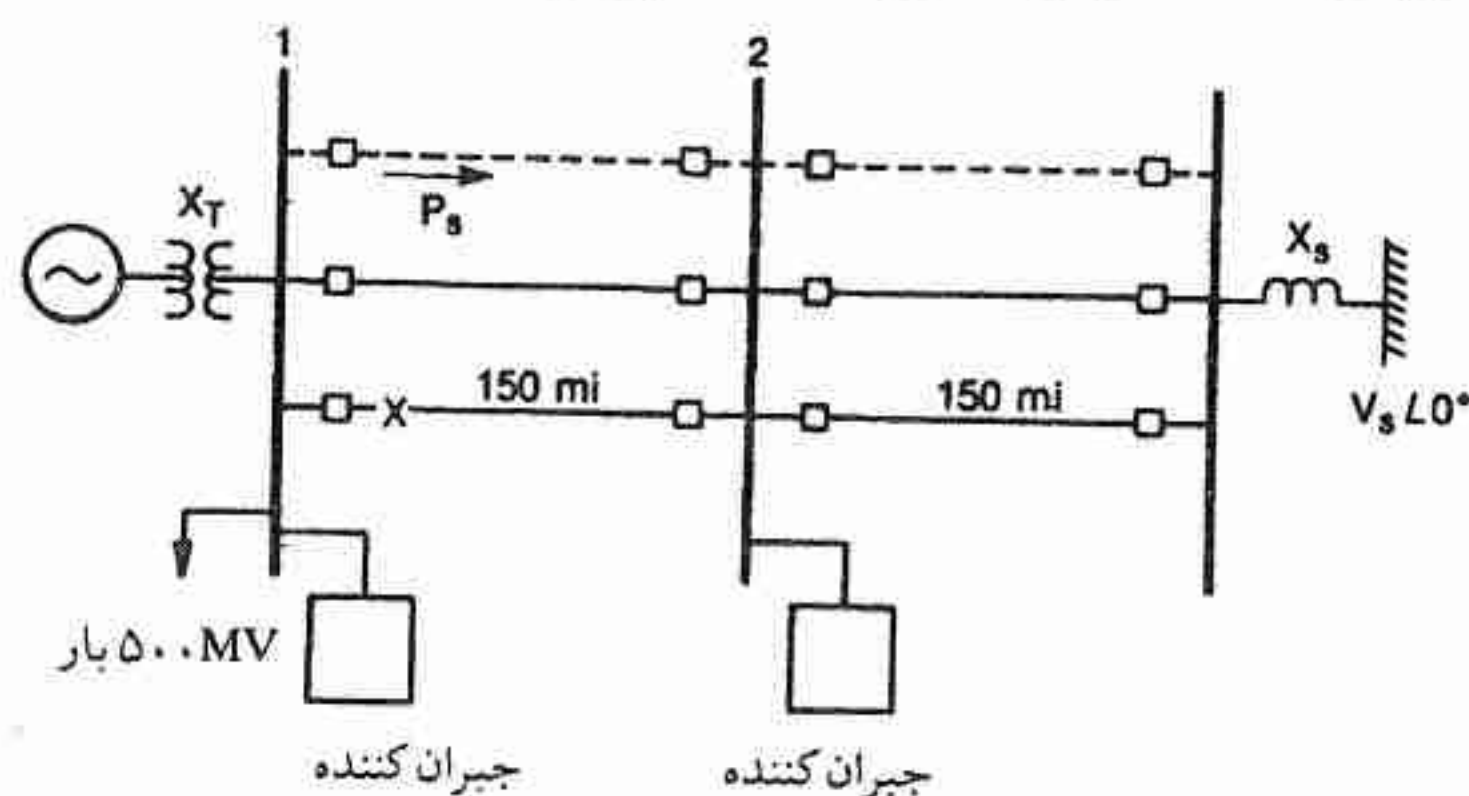
در این بررسی از برنامه کامپیوتری پایداری سیستم قدرت استفاده شده است. جبران کننده‌ها در باس ۱ و باس ۲ قرار داشته‌اند. برای سطوح متعدد توان P_s و مقادیر متعدد MVar کاپاسیتیو جبران کننده باس ۱، برنامه‌های گوناگونی اجرا شد تا طی آن حداقل MVar کاپاسیتیوی که جبران کننده

1- Over - Ranged

2- Configurations

3- Intermediate Switching Station

باس ۲ نیاز دارد تا پایداری گذرا را برای اتصال کوتاه مورد نظر حفظ کند، معین گردد. برای هر مقدار P_s ، راکتانس (پریونیت)^۱ ژنراتور و ترانسفورماتور ثابت نگاهداشته و مقدار MVA مبنا افزایش داده شده است. مقدار اهمی امپدانس خط ثابت نگاهداشته شد و بدینوسیله اثر تلاش برای عبور توان تولیدی بیشتر و بیشتر از یک خط انتقال ثابت مورد مطالعه قرار گرفت.



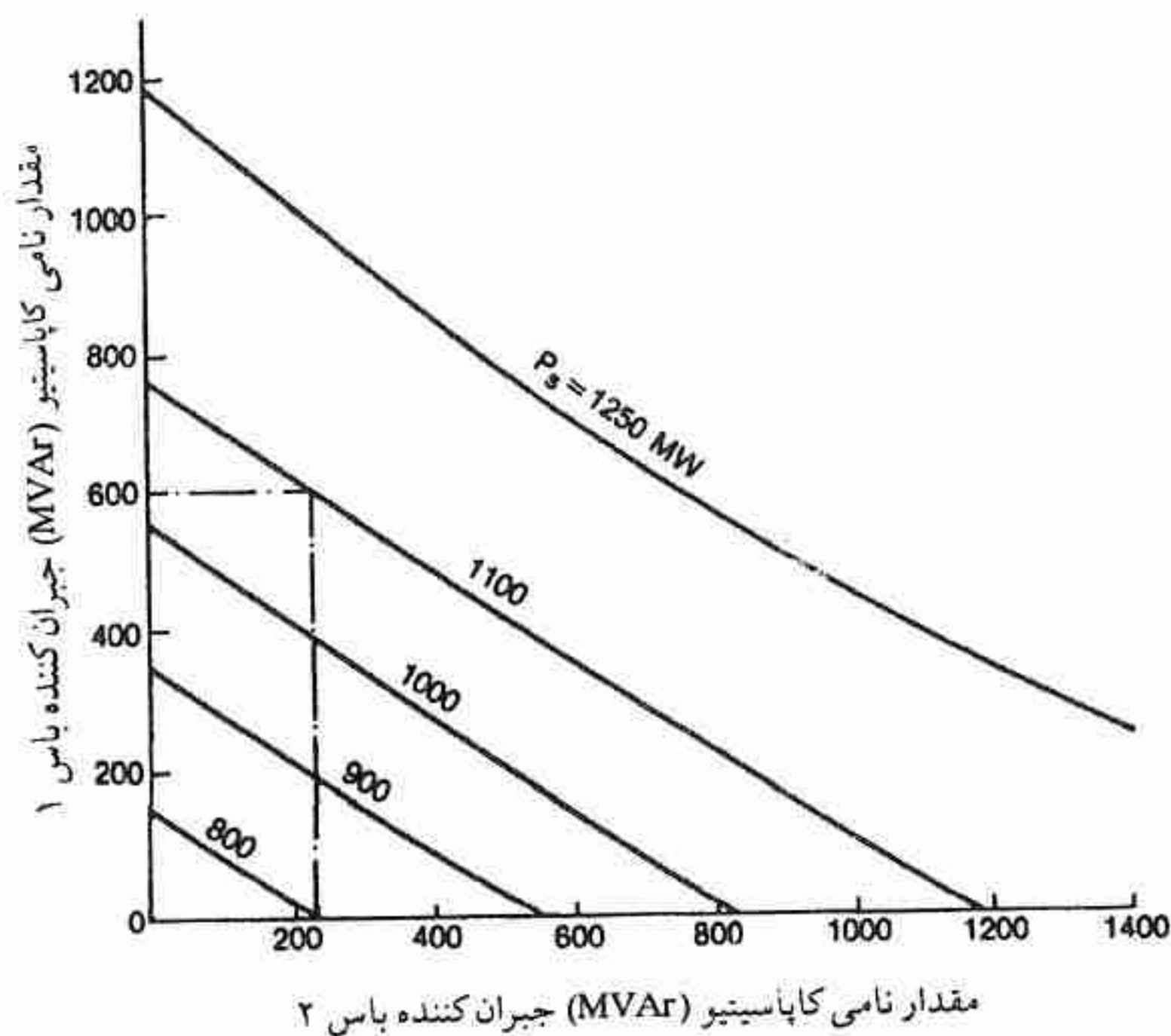
شکل ۲۷ - سیستم ۵۰۰-kV

نتایج در شکل ۲۸ نشان داده شده است که برای هر مقدار P_s ترکیب مقدار نامی کاپاسیتو هر دو جبران‌کننده که در آن پایداری گذرا حفظ می‌شود را نشان می‌دهد. بعنوان مثال، برای $P_s = 1100 \text{ MW}$ ، مقادیر نامی کاپاسیتو 600 MVAR در باس ۱ و 230 MVAR در باس ۲ لازم است. رنج توان انتقالی از مقدار 720 MW - که حد پایداری گذرا در حالت جبران نشده است - تا مقدار 1250 MW که حد توان با وجود خط سوم (در شکل ۲۷ خط چین نشان داده شده) و در غیاب جبران‌کننده است بررسی شده است. در تمامی موارد، MVA نامی ژنراتورها و ترانسفورماتورهای مربوطه برابر با توان عبوری قبل از اتصال کوتاه در نظر گرفته شده است. تنظیم کنترل^۲ جبران‌کننده‌ها طوری مدل شده‌اند که در شرایط اولیه (قبل از اتصال کوتاه) خروجی آنها صفر بوده است.

نتایج بررسی نشان می‌دهد که جبران‌کننده‌ها حد پایداری گذرا را افزایش می‌دهند. و این افزایش در چنین مداری تقریباً برای هر 200 MVAR افزایش در جبران، 100 MW افزایش در توان خواهد بود و سطح توان انتقالی از سه خط بدون جبران‌کننده را می‌توان از دو خط با استفاده از جبران‌کننده بدست آورد.

همچنین این نتایج، محل مناسب قرار گرفتن جبران‌کننده‌ها را - که در آن به ازاء یک ترکیب معین

از مقادیر نامی جبران کننده‌ها، حداکثر افزایش در توان انتقالی فراهم گردد - نشان می‌دهد. در کاربرد جبران کننده‌ها در یک سیستم واقعی، لازم است تعدادی شرایط اتصال کوتاه و شرایط اضطراری در نظر گرفته شود و سرانجام محل مناسب آنها انتخاب گردد. بهر حال، برای اتصال کوتاهی که در این مثال مورد مطالعه قرار گرفت محل مناسب برای قرار دادن یک جبران کننده واحد در باس ۱ می‌باشد. دلیل آن این است که باس ۱ به نقطه میانی الکتریکی شبکه پس از رفع اتصال کوتاه^۱، نزدیکتر است. محلی است که در غیاب جبران کننده‌ها و در خلال نوسانات زاویه ژنراتور - که متعاقب رفع خطا ایجاد میشود - بیشترین فرورفتگی ولتاژ را داراست.

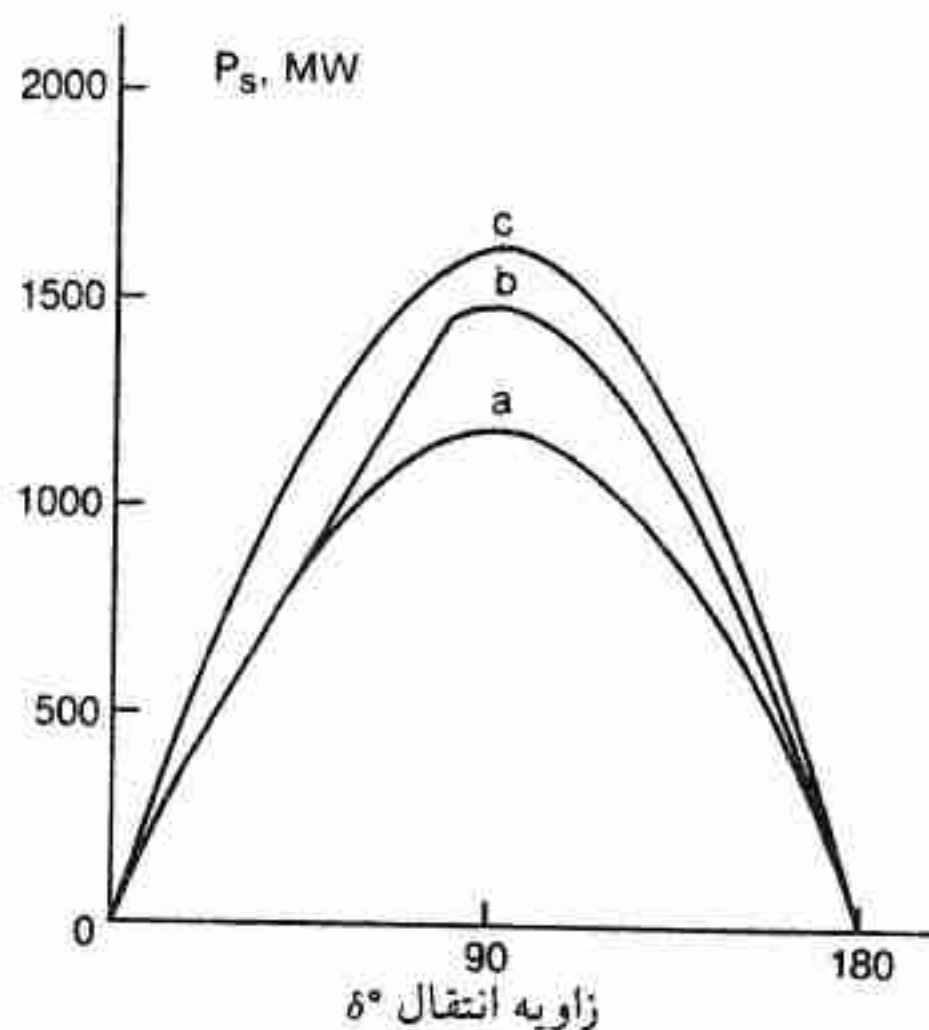


شکل ۲۸ - حداقل مقدار نامی جبران کننده‌ها که برای حفظ پایداری در سطوح مختلف توان انتقالی قبل از وقوع اتصال کوتاه لازم است.

منحنی تقریبی توان - زاویه گذرای سیستم جبران شده بوسیله منحنی b در شکل ۲۹ نشان داده شده است. این منحنی با منحنی‌های a ، c که به ترتیب مربوط به مدار شامل دو خط و سه خط بدون جبران کننده است، مقایسه شده است. از آنجائیکه اثرات بر روی توان انتقالی (P_s) مورد نظر ماست، محاسبات برای بدست آوردن منحنی‌ها بر این فرض که بار محلی وجود ندارد و ظرفیت تولید ثابت و

برابر ۱۰۰۰ MVA است، استوار بوده است. منحنی‌ها برای شرایط پس از رفع اتصال کوتاه محاسبه گردیده و ژنراتورها بعنوان یک ولتاژ ثابت پشت راکتانس گذرا مدل شده‌اند. نقطه گسیختگی بر روی منحنی b ، نقطه‌ای است که در آن جبران‌کننده‌ها به انتهای رنج کنترل‌شان رسیده‌اند و برای ولتاژهای پائین که مربوط به زوایای انتقال بزرگتر است بصورت خازن ثابت عمل می‌کنند.

شبیه‌سازی دینامیک دیگری نیز بمنظور بررسی اثر پارامترهای دیگر جبران‌کننده بر مقدار نامی مورد نیاز جبران‌کننده در فراهم آوردن پایداری گذرا برای سطوح مشخص توان انتقالی، انجام گرفته است. در تمامی شبیه‌سازی‌های قبل، جبران‌کننده‌ها با ضریب بهره کنترل^۱ ۱۰۰ (افت ولتاژ ۱ درصد در رنج کنترل جبران‌کننده) و یک ثابت زمانی تاخیری ۳۳ میلی ثانیه مدل شده‌اند. (به فصل ۴ مراجعه شود). نقش دو نوع تغییرات مطالعه گردیده و نتایج در شکل ۳۰ نشان داده شده است. یکی از تغییرات کاهش ضریب بهره کنترل به ۲۰ (افت ولتاژ ۵٪ در رنج کنترل) بود. این کاهش منجر به افزایش کمی در مقادیر نامی کاپاسیتو مورد لزوم گردید.

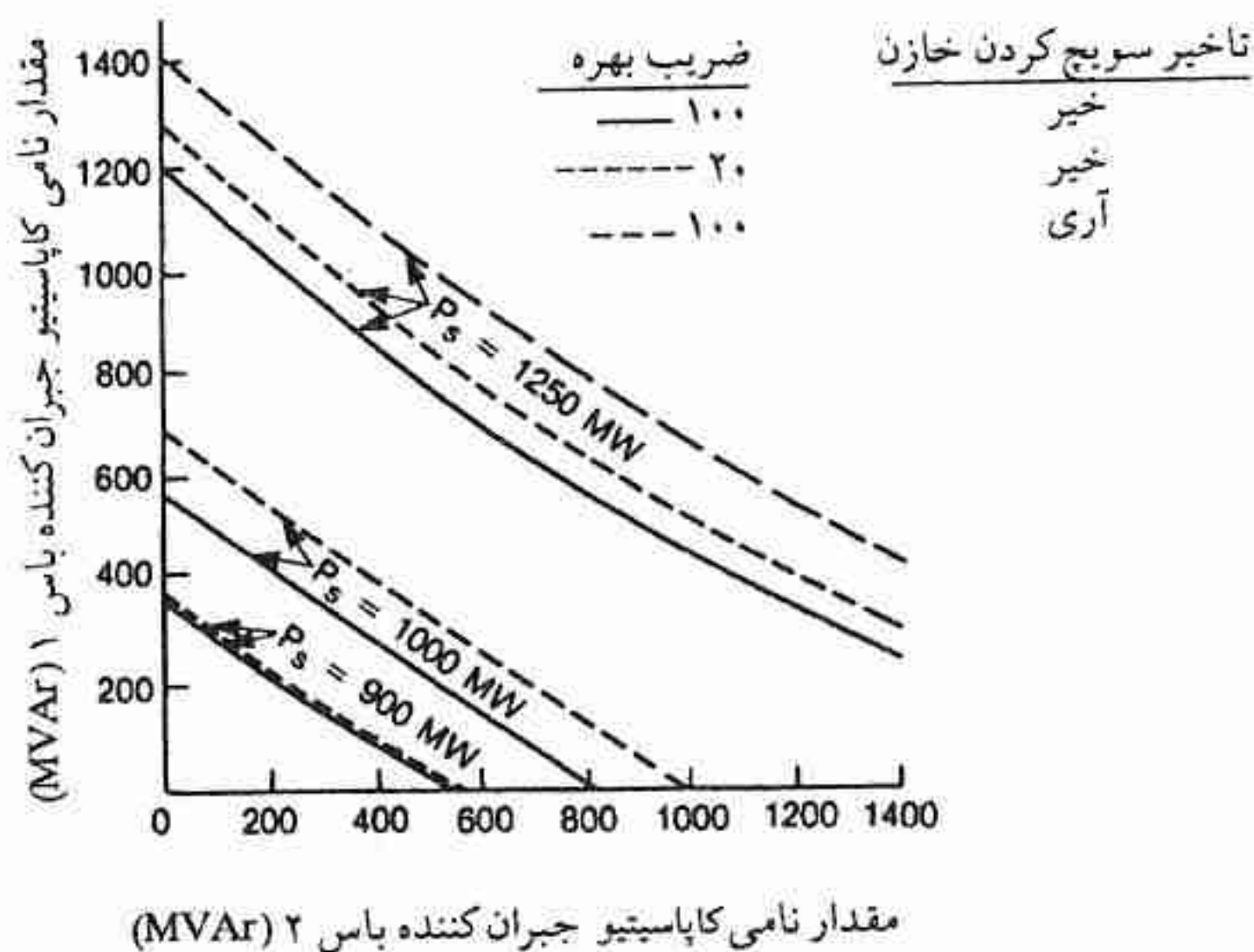


شکل ۲۹ - منحنی‌های توان - زاویه پس از اتصال کوتاه برای سیستم شکل ۲۷: a ، دو خط بدون جبران‌کننده؛ b ، دو خط با جبران‌کننده؛ c ، سه خط بدون جبران‌کننده.

دومین تغییراتی که در نظر گرفته شد عبارت بود از تاخیری که در توان راکتیو خروجی جبران‌کننده پس از رفع اتصال کوتاه وجود دارد. در خلال اولین نوسان فاحش زاویه و کاهش ولتاژ مربوط به آن، خروجی جبران‌کننده نقش مهمی در حفظ پایداری سیستم در اولین نوسان دارد. خازنهای جبران

کننده سه سیکل (۵۰ msec) پس از رفع اتصال کوتاه به مدار سوئیچ شدند. چنین تاخیری وقتی وجود دارد که از کلیدهای مکانیکی استفاده گردد. همانطوریکه در شکل ۳۰ نشان داده شده است، تأخیر سوئیچینگ، ۲۰٪ افزایش مقدار نامی جبران را لازم دارد تا برای سطوح توان مشخص مورد بررسی، پایداری گذرا را حفظ نماید.

ملاحظات دیگر در مقادیر نامی جبران کننده عبارت از اندازه راکتورهای موازی متصل به خط می باشد. مدار شکل ۲۷ شامل ۸۱ MVAR راکتور موازی است که بطور دائم در انتهای هر قسمت خط متصل شده است. این راکتورها ۶۰٪ خازن خط را جبران می کنند. این راکتورهای ثابت در تمامی موارد در حضور یا غیاب جبران کننده مدل شده اند. در عمل بایستی محل قرار گرفتن آنها، مقادیر نامی آنها و شیوه سوئیچ کردن آنها با جبران کننده هماهنگ شود. در مدار مورد مطالعه این هماهنگی منجر به کاهش مقدار نامی کاپاسیتور جبران کننده ها شده است.



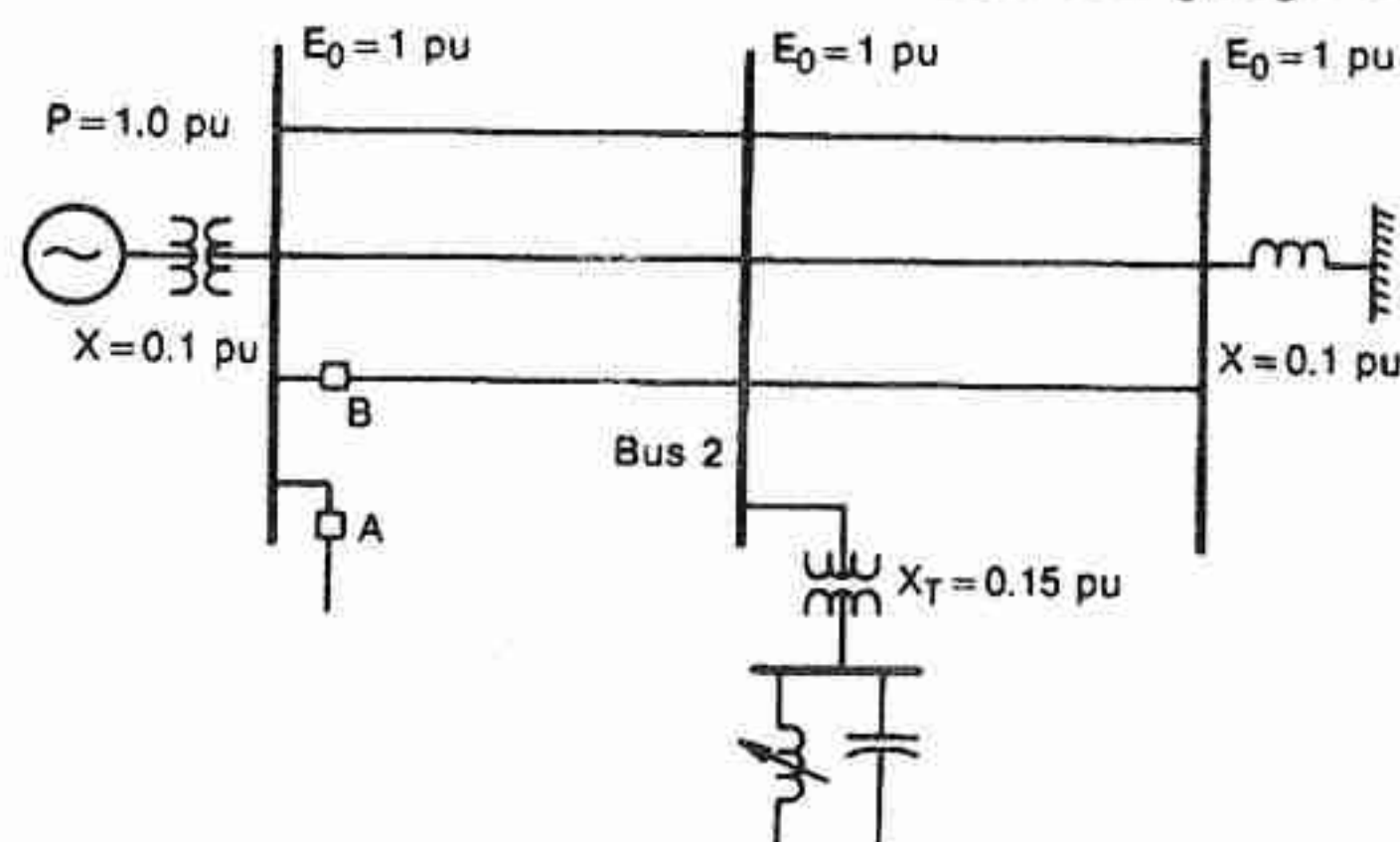
شکل ۳۰ - اثر ضریب بهره و تأخیر بر روی مقادیر نامی جبران کننده که برای حفظ پایداری گذرای خط در سطوح مختلف توان قبل از اتصال کوتاه (P_s) لازم است

مثال ۳- افزایش زمان رفع اتصالی بحرانی^۱ برای توان انتقالی معین

بررسی دیگری از پایداری گذرا بر روی سیستم ۳۴۵ - kV نشان داده شده در شکل ۳۱ انجام گرفت. در این مثال تقویت پایداری اولین نوسان بوسیله یک جبران کننده در باس ۲ برحسب افزایش در زمان

رفع اتصالی بدست آمده است. اغتشاش وارده بر سیستم، اتصال کوتاه سه فاز با امپدانس صفر در نقاط A یا B بوده است. این دو مورد بدترین شرایط سیستم بعد از رفع اتصالی را در بر می‌گیرد. اتصال کوتاه دائمی در نقطه B منجر به خارج شدن خط می‌شود. اتصال کوتاه در نقطه A منجر به قطع خط اصلی که حامل بار اولیه نیست، می‌گردد. اتصال کوتاه در نقطه B با عمل بسته شدن مجدد لحظه‌ای کلید منجر به نتیجه مشابه با اتصال کوتاه در نقطه A می‌شود. در تمام موارد مقادیر نامی ژنراتورها و ترانسفورماتورها و توان قبل از وقوع خطا (۱۲۰۰ MW) همگی یکسان بوده‌اند.

اثر مقدار نامی کاپاسیتیو جبران‌کننده بر زمان رفع اتصالی برای اتصال کوتاه در نقطه A برای مقادیر متعدد طول خط انتقال در شکل ۳۲ نشان داده شده است. منحنی‌ها نشان می‌دهند که با افزایش مقدار نامی کاپاسیتیو جبران‌کننده یک افزایش معین در زمان رفع اتصالی بحرانی ایجاد شده است. در این مطالعه از راکتورهای ولتاژ بالای موازی که در شرایط نرمال برای جبران جریان کاپاسیتیو خط بکار برده می‌شوند، صرف‌نظر شده است.

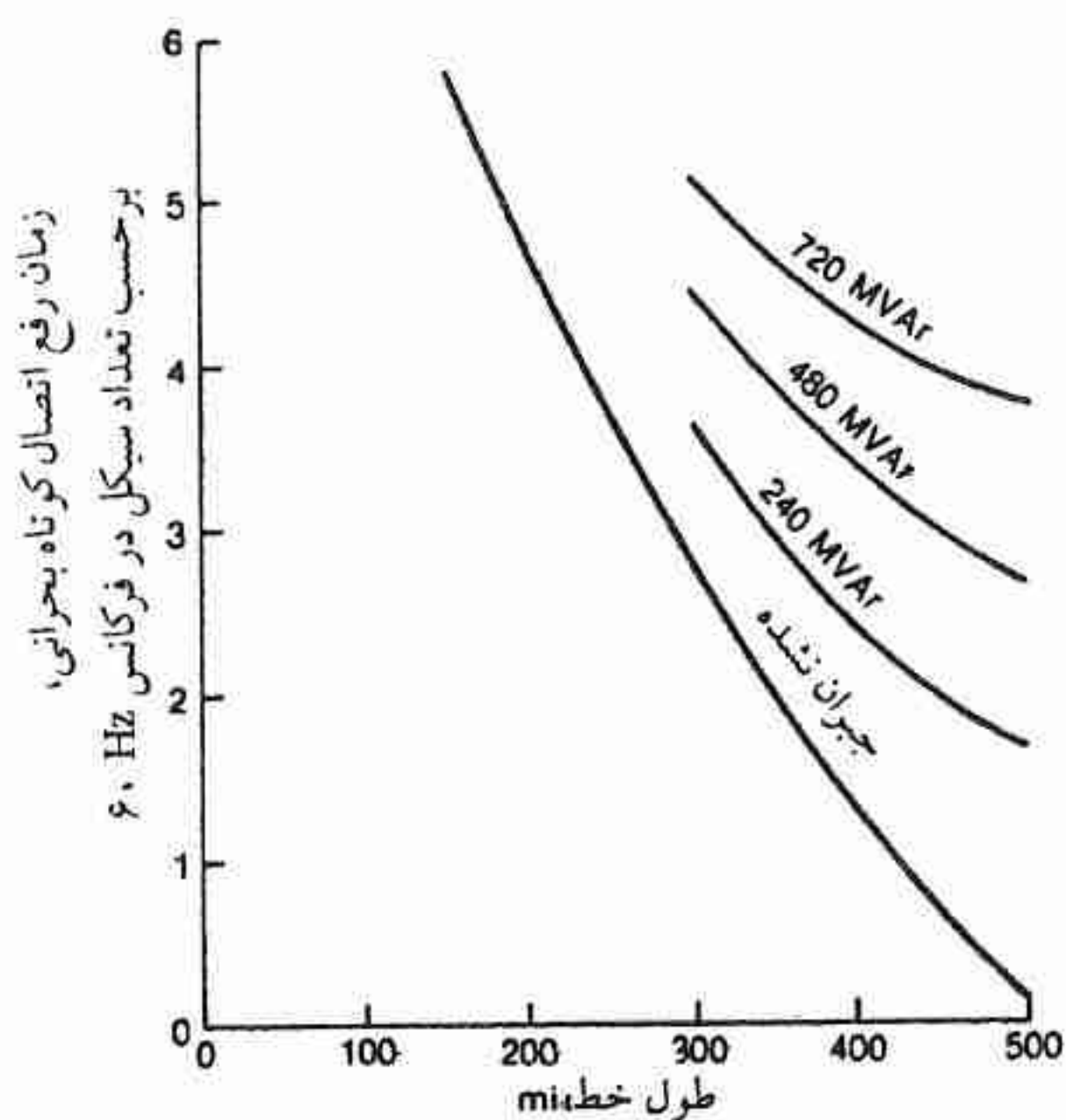


شکل ۳۱ - سیستم ۳۴۵kV، ۱۲۰۰ MVA مبنای ۱۲۰۰ است، به استثناء X_T جبران‌کننده. (X_T بر مبنای مقدار نامی کاپاسیتیو متغیر جبران‌کننده برابر ۰/۱۵pu بوده است)

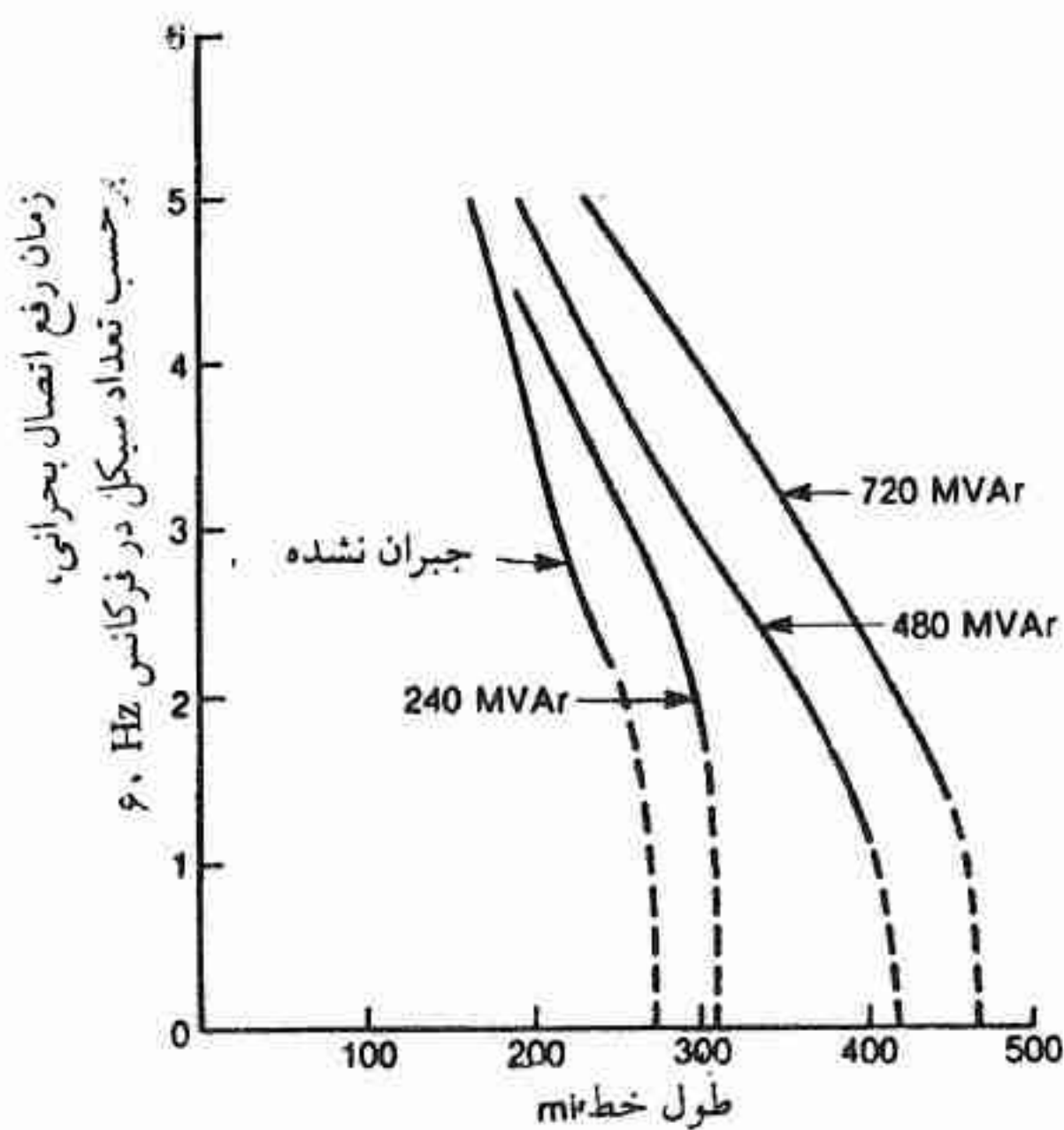
نتایج مربوط به اتصال کوتاه در نقطه B در شکل ۳۳ نشان داده شده است. در اینجا از طریق عمل تثبیت ولتاژ جبران‌کننده، یک افزایش قابل توجه در زمان رفع اتصالی بحرانی بدست آمده است.

۳-۴-۴ پیرو نویسی

مشابه تمامی سیستم‌های کنترل، ضریب بهره^۱ و تاخیر پاسخ^۲ جبران‌کننده استاتیک، مدها^۳ (یا

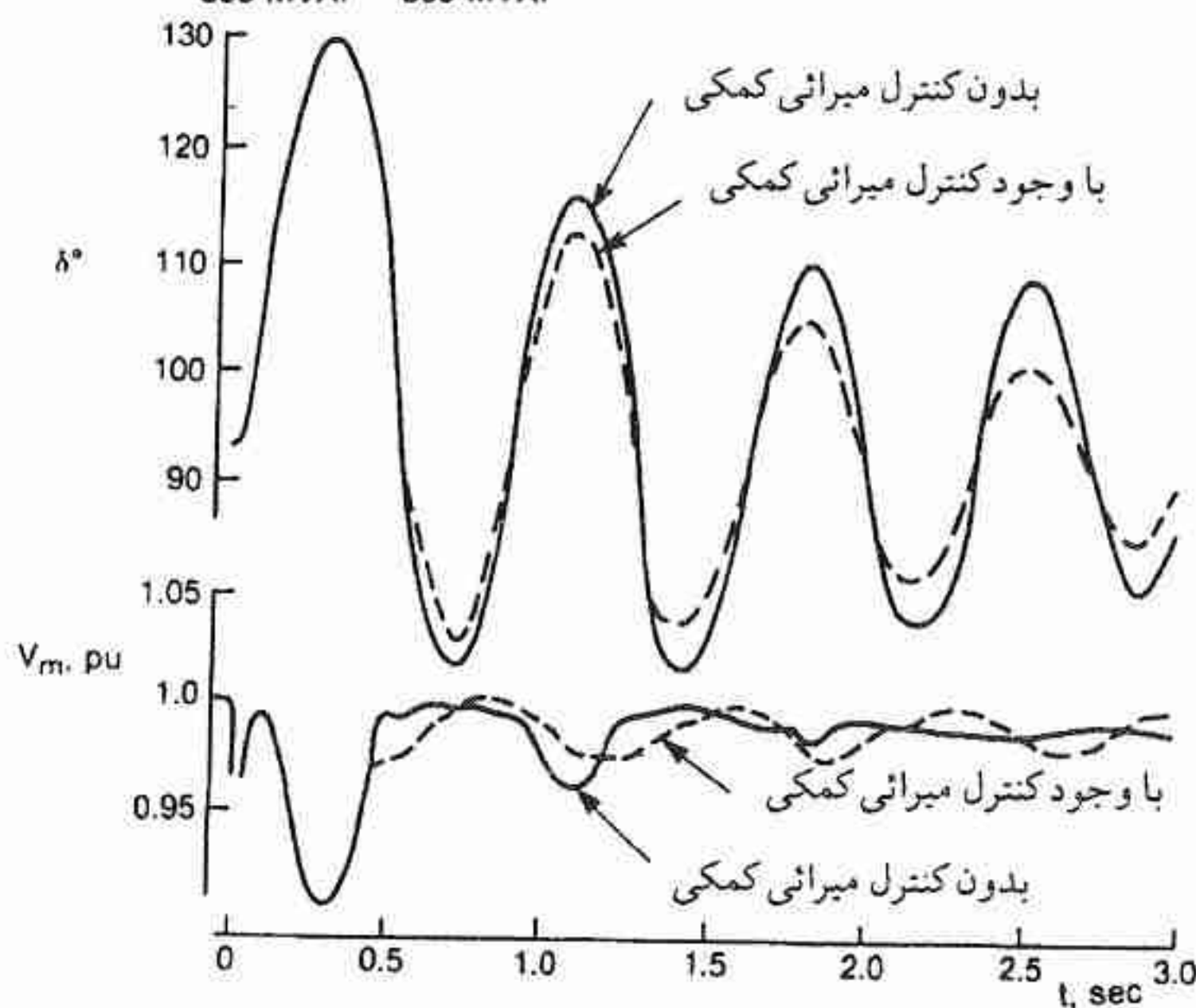
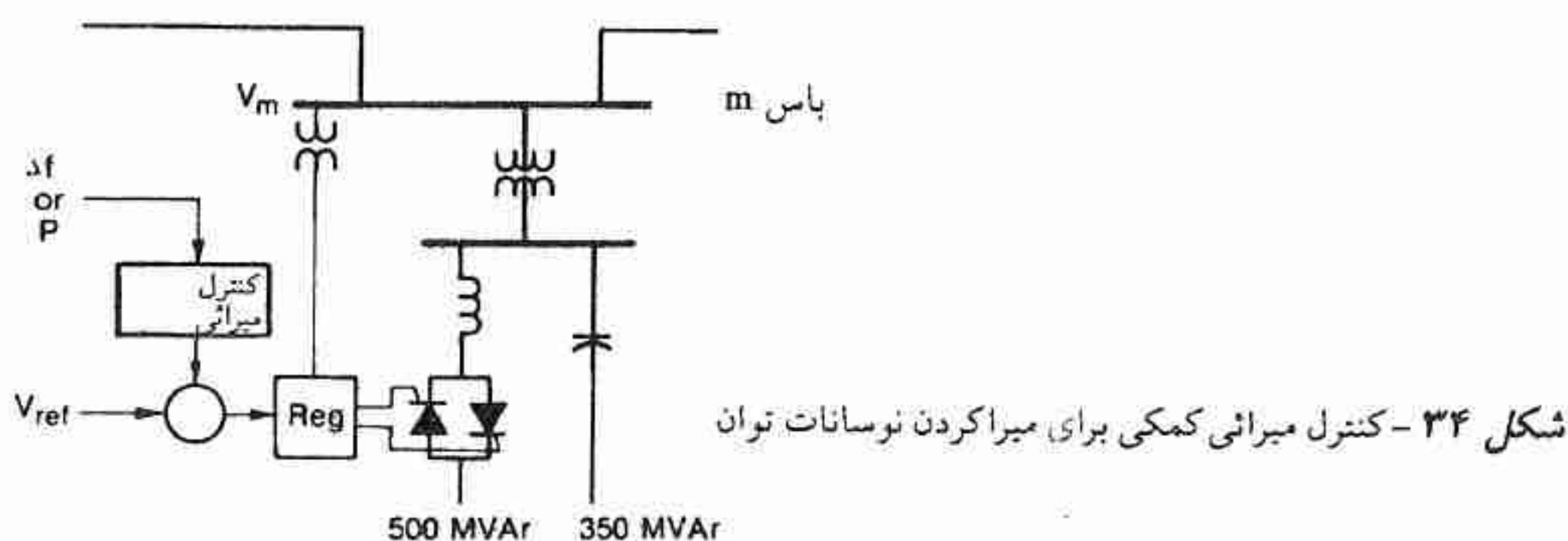


شکل ۳۲ - اثر مقدار نامی کاپاستیو جبران کننده بر روی زمان رفع اتصالی بحرانی برای طولهای مختلف خط (اتصال در نقطه A شکل ۳۱)



شکل ۳۳ - اثر مقدار نامی کاپاستیو جبران کننده بر روی زمان رفع اتصالی بحرانی برای طولهای مختلف خط (اتصال در نقطه B شکل ۳۱)

مقادیر خاص^۱ سیستم قدرت را تحت تاثیر قرار می‌دهند. در بحث میرایی نوسانات قدرت در شکل ۲۵ و ۲۶، جبران‌کننده بعنوان سیستمی که دارای رگولاتور ولتاژ با ضریب بهره بالا و پاسخ سریع است، تشریح شد. چنین خواص دینامیکی سیستم کنترل الکترونیکی جبران‌کننده را، می‌توان تغییر داده و میرایی سیستم را خیلی بیش از آنچه که با جبران‌کننده راکتیو «ولتاژ ثابت مسطح»^۲ میسر است، بهبود بخشید. (پایدارکننده‌های^۳ کمکی بر روی سیستم تحریک ژنراتورهای سنکرون نیز بکار برده میشوند). استفاده از کنترل میرایی کمکی در رگولاتور ولتاژ جبران‌کننده بخوبی در یک مثال شبیه سازی تشریح شده است. سیستمی که در این مثال بکار رفته است از نظر ساختمان مشابه چیزی است که در شکل ۲۲ نشان داده شده است.



کنترل میرایی نشان داده شده در شکل ۳۴ را که بمنظور مدوله کردن توان راکتیو جبران کننده در پاسخ به خطای ولتاژ و فرکانس یا نوسانات توان، طراحی شده است را در نظر بگیرید. رفتار سیستم در شکل ۳۵ نشان میدهد که با وارد کردن سیگنالی که از توان عبوری از خط مشتق شده است، به رگولاتور ولتاژ، نوسانات زاویه میرا شده است. همچنین نشان داده شده است که با استفاده از فرکانس باس، میرایی بهتری فراهم گردیده است. باید توجه داشت که بمنظور افزایش میرایی در نوسانات زاویه توان، در توانایی کنترل ولتاژ قدری مصالحه شده است. اگر چنانچه تقویت پایداری از اهمیت خاصی برخوردار باشد چنین مصالحه‌ای ضرورت دارد.

۳-۴-۵ ممانعت از ناپایداری ولتاژ با استفاده از جبران استاتیک

در شرایط ماندگار ناپایداری ولتاژ^۱ وقتی می‌تواند رخ دهد که تقاضای توان راکتیو بار در موقع کاهش ولتاژ افزایش یابد که این افزایش خود منجر به کاهش بیشتر ولتاژ میگردد. این توالی «کاهش شدید (سقوط) ولتاژ^۲» با یک اغتشاش ناگهانی آغاز می‌گردد. این کاهش شدید یا سقوط ولتاژ مخصوصاً برای سیستمی که بعداً مورد بررسی قرار میدهیم که در آن کارخانه‌های صنعتی با فرایند پیوسته^۳ نصب گردیده، بسیار مخرب خواهد بود و بواسطه قطع تولید و کاهش سود خسارت فوق العاده‌ای به شرکت وارد می‌آید.

توانایی جبران کننده موازی استاتیک در جلوگیری از رخ دادن این نوع ناپایداری بوسیله شبیه سازی زیر بخوبی نشان داده شده است. سیستمی که پدیده کاهش شدید ولتاژ را در غیاب حمایت کننده ولتاژ دینامیکی، نمایش میدهد، در شکل ۳۶ نشان داده شده است. سیستم معرف ناحیه بار صنعتی و خانگی است که نیمی از تقاضای MW آن توسط تولید محلی موجود برآورده می‌گردد. بنابراین ناحیه بار به توان ورودی به خط انتقال وابسته است. بعنوان مثال، اغتشاش باعث میشود که با باز شدن کلید a یکی از ژنراتورهای MW ۶۰ از مدار خارج شود. فرض بر این است که در موقع اغتشاش تنها خط انتقال متصل به ناحیه بار که در حال باردهی است، خط kV ۱۳۸ می‌باشد.

ثابت شده است که مدل بار در این شبیه سازی برای مطالعه پدیده «کاهش شدید ولتاژ» اهمیت دارد. بار MW ۲۲۰ شامل MW ۱۶۰ موتورهای القایی و بقیه بطور مساوی بین بار از انواع امپدانس - ثابت^۴ و جریان - ثابت^۵ تقسیم شده است. موتور القایی بتفصیل با در نظر گرفتن اینرسی آن

1- Voltage Instability

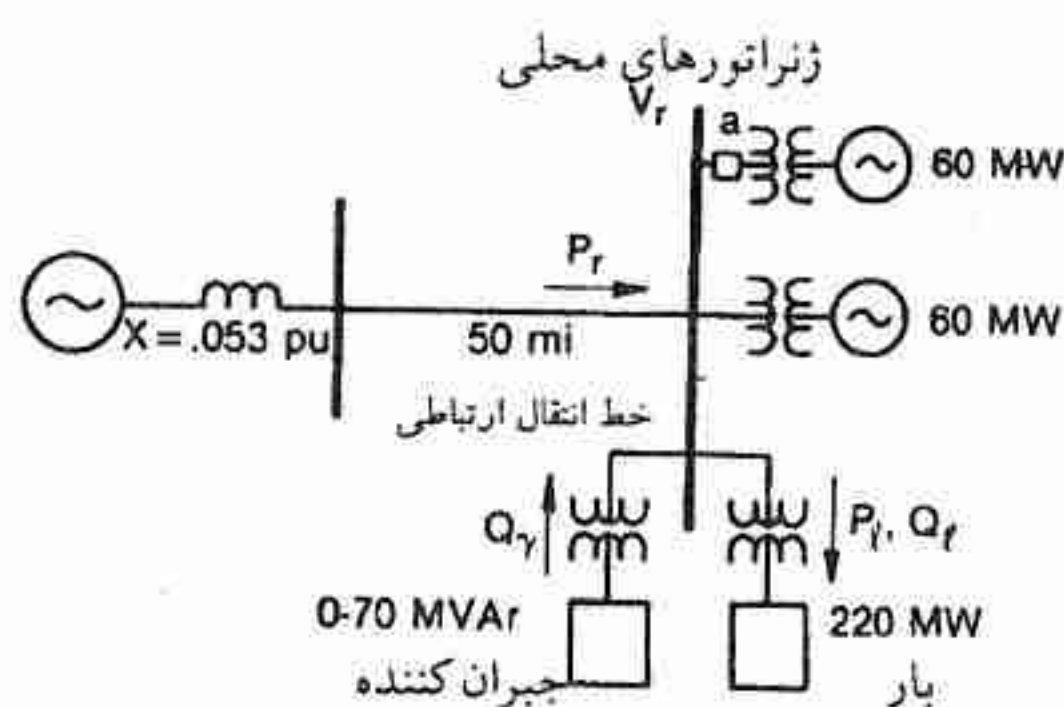
2- Voltage Collapse

3- Continuous - Process

4- Fixed - Impedance

5- Constant Current

مدل شده است. در شرایط اولیه ماندگار توان راکتیو مورد لزوم موتورهای برابر 77 MVAr است که بوسیله خازن موازی ثابت (که بخشی از جبران‌کننده محسوب نمیشود) تا ضریب توان ۱ جبران شده است. فرض بر این است که انواع دیگر بار نیاز به توان راکتیو ندارند. قبل از وقوع اغتشاش ژنراتورهای محلی در مقادیر MVA نامیشان کار می‌کرده‌اند و بمنظور نگهداری ولتاژ باس انتهای خط در مقدار 1 pu ، توان راکتیو را به خط انتقال تحویل می‌داده‌اند. ژنراتورهای محلی با تحریک‌کننده (اکسایتر) پاسخ - سریع مدل شده‌اند. فرض بر این است که جبران‌کننده ابتدا در جبران صفر کار می‌کند و با ضریب بهره ۱۰۰ (شیب ولتاژ ۱٪) و ثابت زمانی یگانه^۱ 33 msec مدل شده است (به فصل ۴ مراجعه شود).



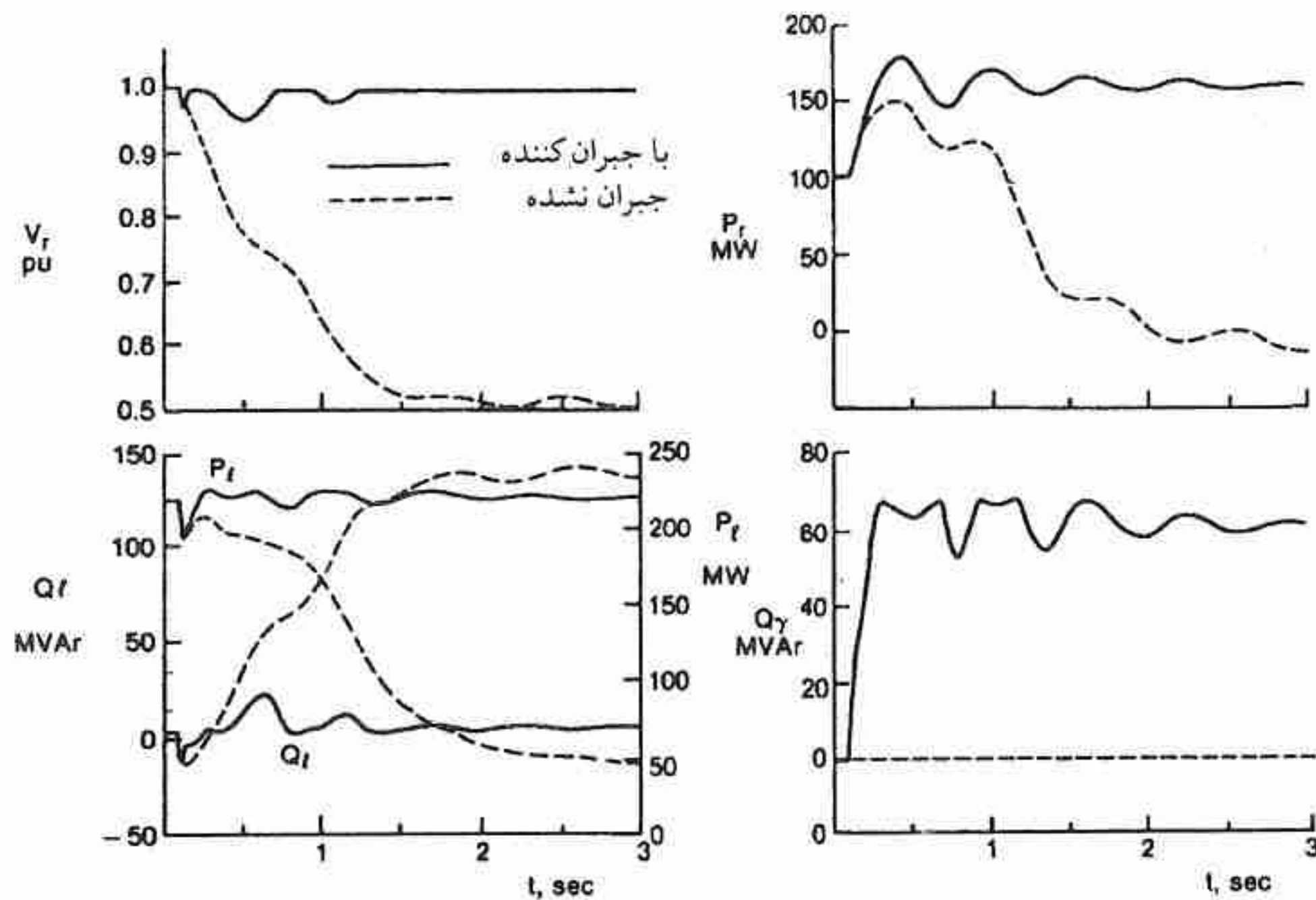
شکل ۳۶ - سیستم 138 kV ، ناپایداری ولتاژ (مبنای $\text{MVA} = 100$)

شکل ۳۷ اثر قطع ژنراتور را در حضور و غیاب جبران‌کننده نشان می‌دهد. در غیاب جبران‌کننده، قطع یکی از ژنراتورهای محلی منجر به کاهش شدید و ناگهانی ولتاژ و در نتیجه از کار ایستادن موتورهای القایی میشود. اما در صورت وجود جبران‌کننده از سقوط ولتاژ جلوگیری به عمل می‌آید. دلایل کاهش شدید یا سقوط ولتاژ را می‌توان به کمک مشخصه ولتاژ انتهای خط انتقال ارتباطی^۲ نسبت به توان انتقالی شکل ۳۸ دریافت. (به فصل ۲ شکل ۸ مراجعه شود). هر منحنی مربوط به یک سطح معین از توان راکتیو در انتهای خط است. منحنی‌ها برای خازن‌ها یا راکتورهای موازی در نمو 25 MVA (بر پایه 1 pu ولتاژ) رسم شده‌اند. توان راکتیو (یا ضریب توان) انتهای خط، تاثیری زیادی بر حداکثر توان انتقالی می‌گذارد. با رویهم در نظر گرفتن این و دسته منحنی‌های شکل ۳۸، مسیر پاسخ سیستم (آغاز شده از نقطه ۱ و تا ۳ ثانیه پس از قطع ژنراتور) در غیاب و حضور جبران‌کننده مشخص شده است. واضح است که جبران‌کننده (همراه با ژنراتور باقیمانده) توان راکتیو اضافی مورد

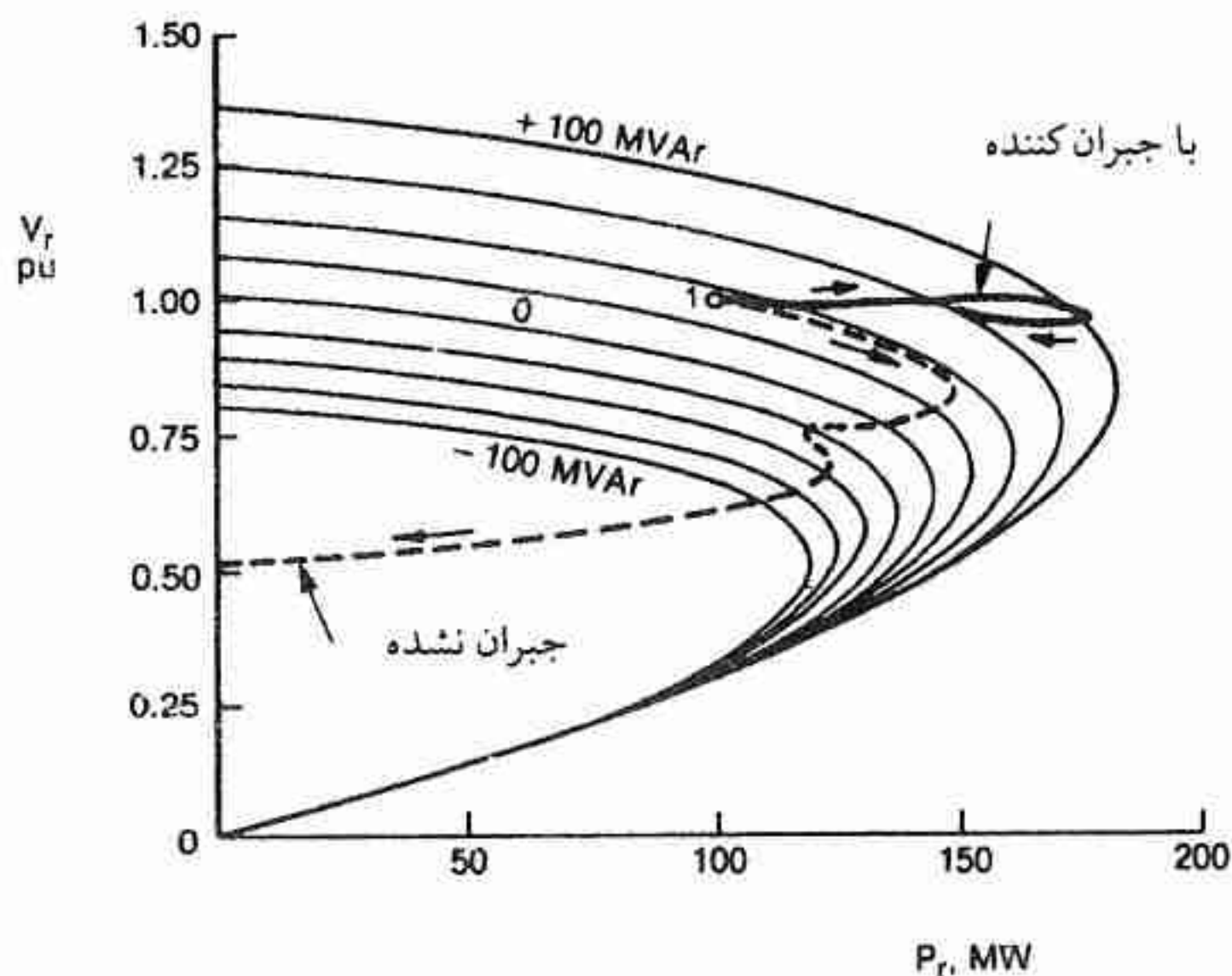
1- Single time constant

2- Transmission link

نیاز برای نگهداری پایداری را فراهم می‌کنند و در عین حال توان ورودی به خط ارتباطی انتقال هم افزایش یافته است.



شکل ۳۷ - پاسخ سیستم شکل ۳۶ در برابر قطع ژنراتور محلی با حضور و غیاب جبران کننده



شکل ۳۸ - مشخصه‌های توان - ولتاژ انتهای خط

۳-۴-۶ خلاصه - رفتار دینامیکی جبران کننده

پاسخ دینامیکی جبران کننده‌ها به چندین نمونه از اغتشاشات وارده بر سیستم، برحسب فرکانس پایه و اثرات سه فاز متعادل توصیف شد. با توسعه تئوری شناخته شده ماشین‌های سنکرون و پایداری سیستم قدرت، انتقالات دینامیکی، برحسب توالی شرایط شبه ماندگار و با استفاده از مشخصه‌های ولتاژ-جریان و مفاهیم مربوطه، متکی بر تجزیه و تحلیل فازوری، توضیح داده شد. در تشریح رفتار دینامیکی جبران کننده از روش ترسیمی استفاده گردیده و این روش به کمک شبیه سازی کامپیوتری و همچنین به کمک اوسیلوگرام‌های حاصل از آزمایش واقعی^۱ و آزمایش‌های مدل^۲ بدست آمده از تحلیل گر گذرا^۳ (TNA) ربط داده شده است.

به کمک چندین مثال شبیه سازی، توانایی جبران کننده موازی استاتیک در کمک به پایداری سیستم از طریق تنظیم سریع توان راکتیو، به معرض نمایش گذاشته شده است. سرعت پاسخ و مقادیر نامی اندوکتیو و کاپاسیتیو جبران کننده پارامترهای کلیدی هستند که مزایای خود را در رفتار دینامیکی سیستم قدرت معین می نمایند. کاربرد یک یا چند جبران کننده همراه با احداث خطوط انتقال دیگر مجموعه کاملی است که نیاز به توانایی توان انتقالی بیشتر را برآورده می نماید. قابل کنترل بودن جبران کننده‌هایی که بر TCR استوار هستند، امکان استفاده از سیگنالهای کمکی بمنظور سرعت دادن به بازگشت سیستم پس از اغتشاش به وضع عادی، را فراهم می کند.

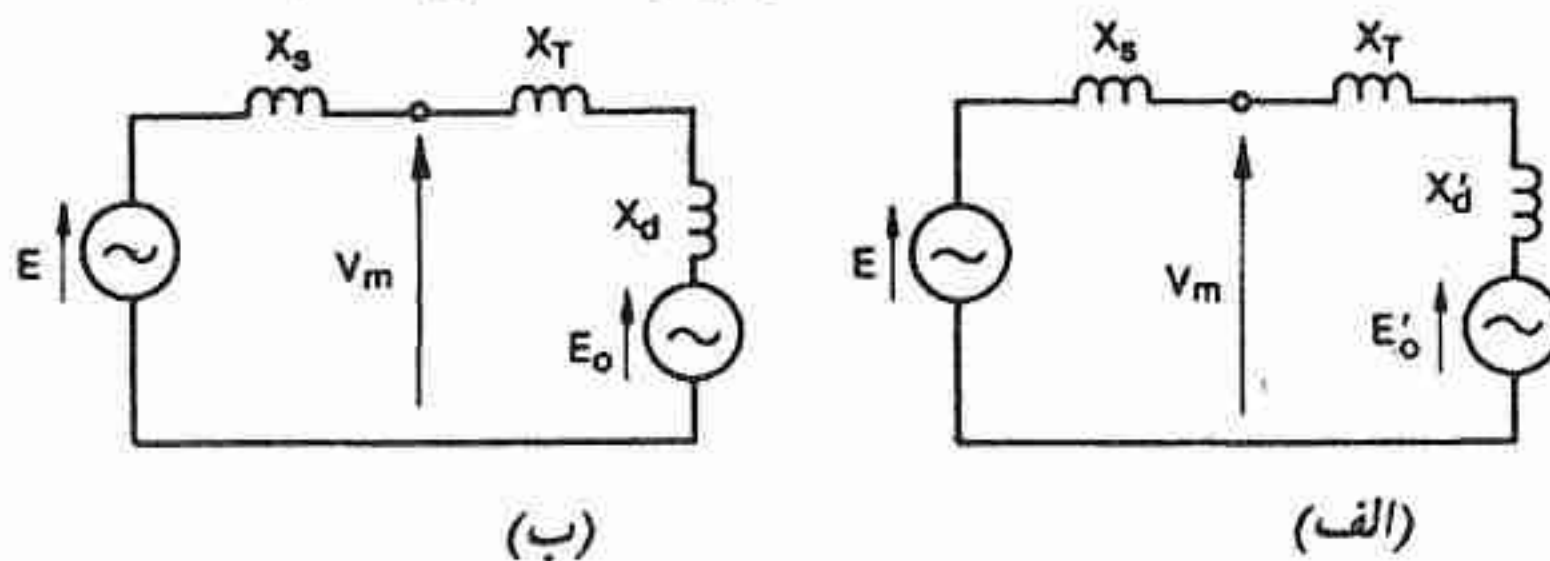
۳-۵ کندانسور سنکرون

کندانسورهای سنکرون یا جبران کننده‌ها سنکرون ماشین‌های سنکرونی هستند که برای جبران توان راکتیو طراحی شده‌اند. کندانسورهای سنکرون در طبقه بندی جبران کننده‌های اکتیو که در فصل ۲ تشریح شد، قرار دارند. ژنراتور سنکرون نیز به این دلیل که از طریق اصول مشابه الکترو مغناطیسی با سیستم انتقال تبادل توان راکتیو می نماید، در همین طبقه بندی قرار می گیرد. کاربرد کندانسورهای سنکرون در فصل ۸ توضیح داده خواهد شد. در اینجا عملکرد آن را بعنوان جبران کننده موازی اکتیو در نظر می گیریم.

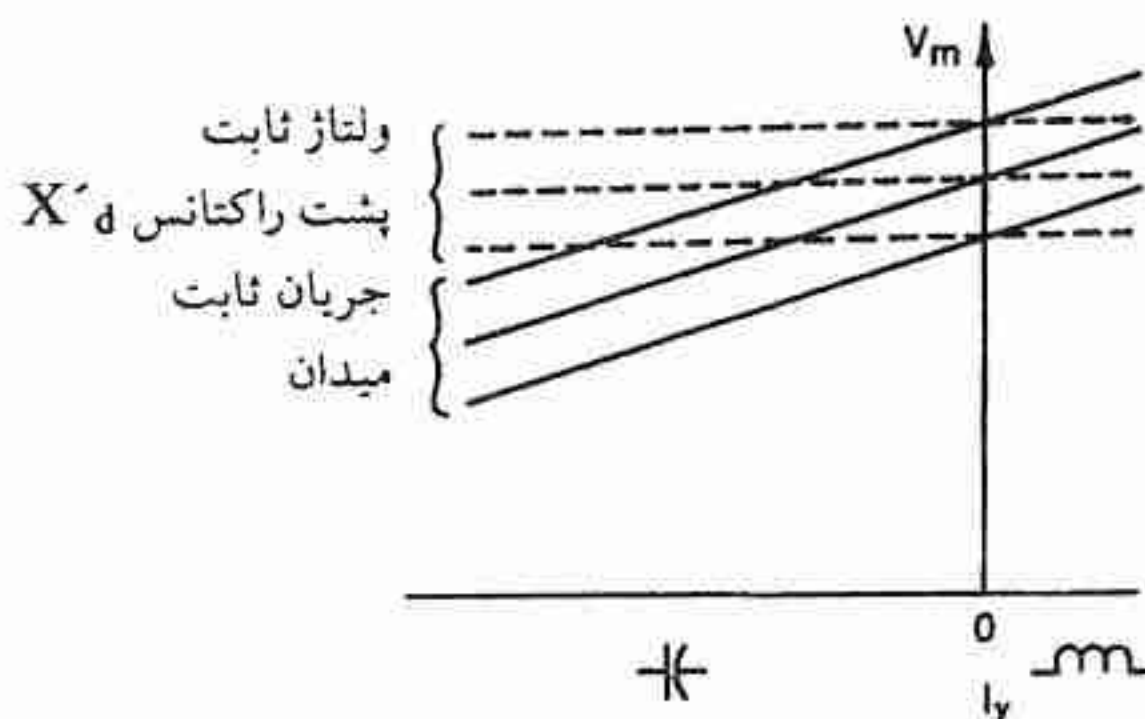
در شرایط ماندگار، کندانسور سنکرون با جریان میدان ثابت را تقریباً می توان با یک نیروی محرکه تولیدی E_o که با راکتانس سنکرون X_s سری شده است نشان داد (شکل ۳۹ الف). این مدار معادل

دارای مشخصه‌های جریان - ولتاژ است که بوسیله دسته خطوط شیب‌دار مطابق شکل ۴۰ نشان داده شده است. هر خطی معرف یک مقدار ثابت جریان تحریک یا ولتاژ معادل مدار باز E_0 است. شیب خطوط پرمتناسب است با $(X_d + X_T)$. این مشخصه‌ها فقط برای وقتی که جریان میدان ثابت است - نظیر وقتی که تحت «ماگزیمم تحریک» که بمنظور محدود کردن اضافه بار بکار برده میشود قرار دارد - کاربرد دارند.

در شرایط گذرا کندانسور سنکرون رفتارش طوری است که گویی راکتانس سنکرونش به راکتانس گذرای X_d' که مقدارش خیلی کمتر از X_d است کاهش یافته است. بنابراین حتی بدون تغییر جریان میدان، کندانسور تمایل دارد که مشخصه ولتاژ - جریان گذرای مسطح‌تری نسبت به خطوط میدان ثابت شکل ۴۰ را دارا باشد. شیب مشخصه گذرای خط چین متناسب با $(X_d' + X_T)$ است. با رگولاتور ولتاژ - سریع کنترل کننده V_m ، ماشین می‌تواند بطور پیوسته خیلی نزدیک به مشخصه گذرای خط چین کار کند. مدار معادل موثر برای این پریود در شکل ۳۹ ب نشان داده شده است.



شکل ۳۹ - مدار معادل کندانسور سنکرون (الف) شرایط ماندگار (ب) شرایط گذرا



شکل ۴۰ - مشخصه‌های ولتاژ - جریان حالت ماندگار و گذرای کندانسور سنکرون

۳-۵-۱ پیرو گذرا

مدار معادل شکل ۳۹ ب دارای مشخصه ولتاژ- جریان تسوالی مثبت مشابه با جبران کننده استاتیک است. البته یک تفاوت اساسی وجود دارد که هم اکنون بطور خیلی خلاصه مورد بحث قرار میدهیم.

ولتاژ داخلی E_o یک emf تولید شده واقعی است که بوسیله فلوی پیوسته با فاصله هوایی تولید شده است و در مدت زمان کوتاه (مثلا در خلال پیرو گذرا) ثابت باقی می ماند. بهمین دلیل تغییرات ولتاژ گذرا نمی تواند از مشخصه ولتاژ - جریان گذرای نشان داده شده در شکل ۴۰ زیاد منحرف گردد. در حقیقت، هر چه ولتاژ بخواهد سریعتر تغییر نماید، بواسطه جریانهای (زیر گذرا) القایی در سیم پیچی های مستهلک کننده نوسانات، شیب این مشخصه مسطح تر می گردد. چنین رفتاری متضاد رفتار جبران کننده TCR است طوریکه مشخصه ولتاژ- جریان آن میخواهد در خلال تغییرات خیلی سریع، به شیب خیلی تند راکتور کنترل نشده برگردد که می بایست با عمل کنترل - که نمی تواند بطور لحظه ای عمل کند - تصحیح گردد. با وجود این، وقتی که بر حسب پریونیت بر مبنای مناسب بیان می گردد، از نظر اقتصادی شیب مشخصه ولتاژ- جریان کندانسور سنکرون به مقدار حداقل معینی محدود میشود و این مشابه چیزی است که در جبران کننده راکتور قابل اشباع مطرح است.

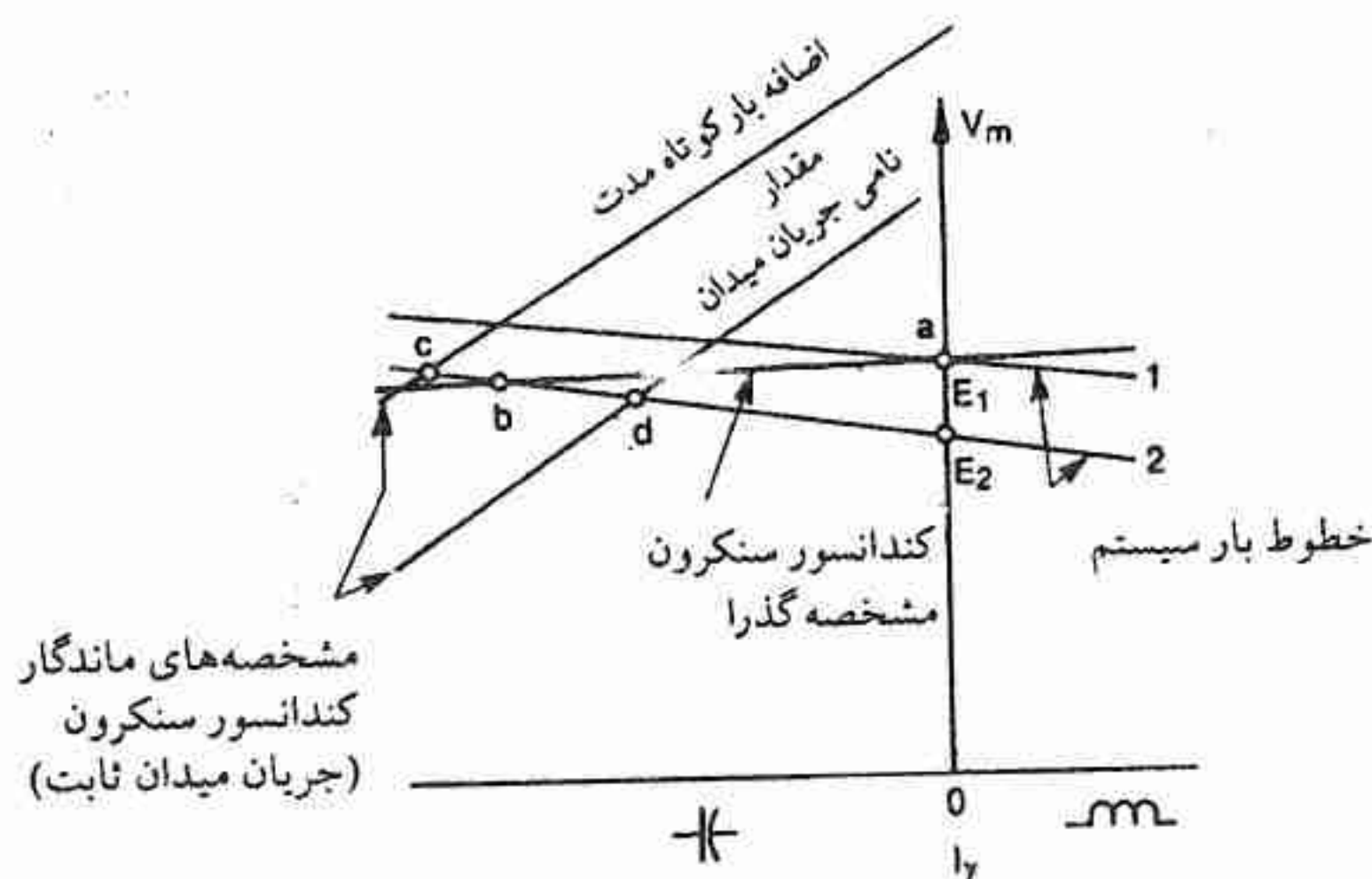
شکل ۴۱ کندانسوری را که ابتدا در جریان صفر، نقطه a قرار می گیرد نشان می دهد. اغتشاش وارده به سیستم را در نظر بگیرید که موجب میشود خط بار بطور ناگهانی از ۱ به ۲ تغییر نماید. در غیاب کندانسور ولتاژ در باس جبران کننده به مقدار E_r کاهش می یابد. در صورت وجود کندانسور نقطه کار مسیر $a-b$ را تعقیب می نماید. این مسیر تا حدودی از مشخصه گذرا مسطح تر می باشد و دلیلش جریان زیر گذرای است که در سیم پیچی های مستهلک کننده نوسانات القا میشود و اثرش در مدت چند سیکل لازم برای عبور از نقطه a به نقطه b از بین می رود.

ولتاژ نقطه b از مقدار E_r بیشتر است و بنابراین نشان دهنده توانایی کندانسور در تامین فوری توان راکتیو اضافی به سیستم می باشد. در نقطه b کندانسور فوق تحریک کار می کند اما ولتاژش از ولتاژ ترمینال اولیه کمتر است. رگولاتور ولتاژ بطور خودکار جریان میدان را افزایش می دهد تا ولتاژ ترمینال کندانسور به نقطه کار c برگردانده شود. اگر مقدار نامی کندانسور کافی باشد نقطه c نقطه کار نهایی ماندگار خواهد بود. البته، اغلب چنین نقطه کاری خارج از مقدار نامی کندانسور بوده و در اینصورت کندانسور می تواند در حدود یک دقیقه یا بیشتر بر حسب اینکه توانایی اضافه بار کوتاه مدت آن چقدر باشد، کار کند. اگر نقطه c خارج از مقدار نامی کندانسور باشد، جریان میدان به نقطه

کار جدیدی نظیر d کاهش می‌یابد (با تنظیم خودکار نقطه تنظیم رگولاتور ولتاژ^۱ انجام می‌گیرد). در این بحث، مشابه موارد جبران کننده استاتیک، خود را به اثرات سه فاز متعادل محدود کرده‌ایم. برحسب ماهیت اغتشاش وارده بر سیستم، ولتاژ در باس جبران کننده ممکن است در نیم سیکل اول یا دوم بیشتر و همچنین در این فاصله زمانی نامتعادل باشد. اگر کندانسور تنها وسیله محدود کردن این تغییرات ولتاژ باشد، بطور سریع در یک پریود متناسب با ثابت زمانی اتصال کوتاه آرمیچر، این عمل را انجام خواهد داد.

۳-۵-۲ پریودهای اولین نوسان و نوسانی

کندانسور سنکرون نظیر سایر جبران کننده‌های موازی اکتیو قادر است که نوسانات ولتاژ و توان ناشی از اغتشاشات را کاهش دهد، و تاثیر آن در پریود اولین نوسان و پریود نوسانی به کمک مثالهایی در فصل ۸ نشان داده شده است. مشابه سیستم کنترل الکترونیکی TCR، رگولاتور ولتاژ کندانسور (که مشابه رگولاتور ولتاژ TCR است) را می‌توان با سیگنال‌های میرائی کمکی ترکیب و پاسخ سیستم را بهبود داد.



شکل ۴۱ - پاسخ کندانسور سنکرون در برابر شرایط کاهش ولتاژ

۳-۶ جبران با خازن سری

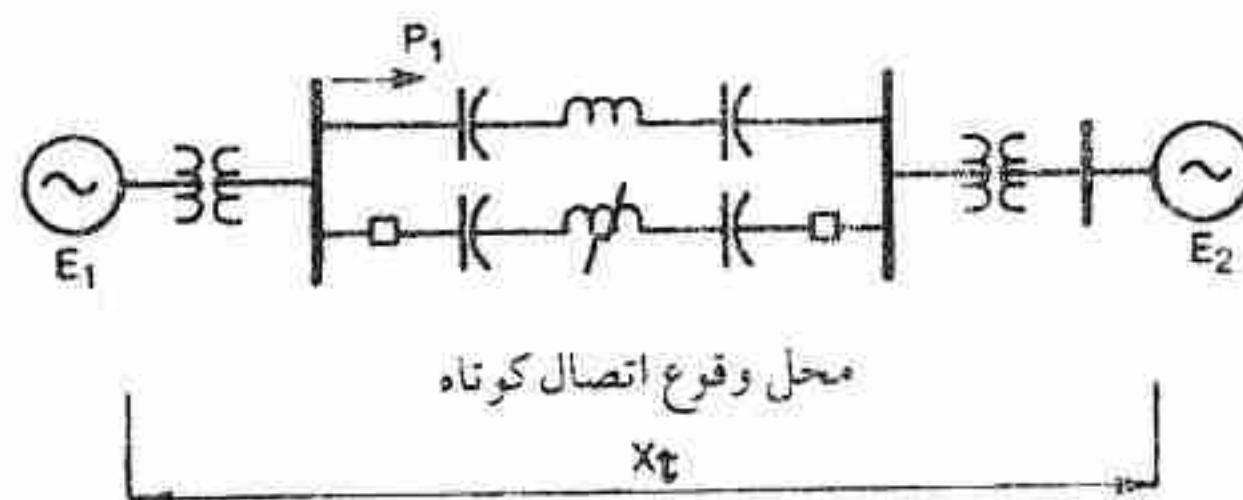
در فصل ۲ خازنهای سری را بعنوان وسایلی جهت کاهش راکتانس القایی خطوط انتقال مورد بحث قرار دادیم. مزایای کاربرد آنها در شرایط ماندگار شامل کنترل بهتر (پرو فایل) ولتاژ، مدیریت توان راکتیو، کاهش تلفات و افزایش توانایی انتقال توان بود. در فصل ۷ کاربرد خازنهای سری به تفصیل بحث خواهد شد. در این فصل تئوری فصل ۲ را، بمنظور بررسی رفتار دینامیکی و پایداری گذرای سیستم جبران شده با خازن سری، توسعه می دهیم. و مطابق گذشته به ترتیب پریودهای گذرا، اولین نوسان و نوسانی را در نظر می گیریم.

۳-۶-۱ پریود گذرا

با کاهش راکتانس سری خط انتقال، خازن سری باعث میشود که ولتاژ نسبت به اغلب اغتشاشات کمتر حساس باشد. مثالی از این در بخش ۲-۵-۳ فصل ۲ برای شرایط ماندگار ارائه شده است. در صورتیکه وسیله بای پاس خازن^۱ (وسیله حفاظتی) عمل نکرده باشد، در پریود گذرا نیز رفتار مشابهی دارد گویی اینکه یک رنج توان مندرج در جدول ۵ (فصل ۲) در یک پریود کوتاه جارو شده است. در خلال اغتشاشات فاحش (نظیر اتصال کوتاه) وسیله حفاظتی خازن می تواند یک اثر قابل ملاحظه ای داشته باشد. راجع به این موضوع در بخش بعدی و فصل ۷ بیشتر بحث خواهد شد.

۳-۶-۲ پریود اولین نوسان و پایداری گذرا

با مفهوم جبران طول خط با استفاده از خازنهای سری در فصل ۲ آشنا شدیم. خطوطی که در آنها خازنهای سری نصب شده است، بواسطه کاهش راکتانس القایی موثرشان قادر هستند که پایداری سیستم شامل ژنراتورها را با کاهش زاویه انتقال در یک سطح توان انتقالی معین، افزایش دهند (فصل ۲ معادله ۱۰۷). یک افزایش در پیک توان سنکرون کننده نیز حاصل خواهد شد. این اثر دومی را می توان با مراجعه به سیستم شعاعی شکل ۴۲ ملاحظه نمود. فرض کنید که راکتانس کل X_1 با استفاده از خازنهای سری واقع در دو خط موازی، به میزان ۱۰٪ کاهش یافته است. توانایی پیک توان سنکرون کننده (P_{max} در شکل ۲۴ الف) ۱۰٪ افزایش می یابد. بنابراین ژنراتورها برای توان کار اولیه یکسان P_1 ، مارجین (فاصله اطمینان) پایداری بیشتری خواهند داشت.



شکل ۴۲ - سیستم جبران شده با خازن سری

مطابق شکل ۲۴ الف، با افزایش ۱۵٪ در توانایی پیک توان سنکرون کننده، انرژی کند کننده موجود (سطح A_2) همچنین افزایش می یابد. برای مقدار توان اولیه یکسان، اتصال کوتاه و زمان رفع اتصال کوتاه یکسان، سیستم جبران شده با خازن سری در اولین نوسان پایدارتر خواهد بود. با افزایش P_{max} منحنی ۲، انرژی شتاب دهنده (سطح A_1) همچنین کاهش می یابد و در نتیجه منجر به افزایش پایداری در اولین نوسان می گردد، البته این در صورتی است که خازنهای در طول اتصال کوتاه بوسیله وسایل حفاظتیشان بای پاس نشده باشند.

امکان دارد که خازنهای سری بطور خودکار در موقع اتصال کوتاه، بای پاس (اتصال کوتاه) شوند تا بدینوسیله در مقابل اثر تخریبی جریان اتصال کوتاه حفاظت گردند. عمل بای پاس معمولاً در یک سطح ولتاژی که قبلاً تعیین گردیده است و متناسب با جریان است انجام می گیرد. بعنوان مثال، می توان از فاصله جرقه حساس به ولتاژ^۱ استفاده کرد که کلید بای پاس^۲ را تریگر^۳ نماید. و یا اینکه می توان از مقاومت غیرخطی Zno استفاده کرد (به فصل ۷ مراجعه شود). از آنجائیکه کلید بای پاس در صورتی عمل می کند که ولتاژ دوسر خازن از مقدار تعیین شده از قبل تجاوز نماید، لزوماً تمامی خازنهای موجود در یک سیستم معین بای پاس نخواهند شد بلکه فقط خازنهایی که نزدیک به اتصال کوتاه بوده و دارای ولتاژ زیاد هستند بای پاس میشوند. برای اتصال کوتاههای بدترین حالت، ممکن است آن تعداد از خازن بای پاس شوند که سیستم پس از رفع اتصال کوتاه را، در ممانعت از ناپایداری گذرا، فوق العاده ضعیف نمایند مگر آنکه تمام آن خازنها و یا تعدادی از آنها، پس از رفع اتصال کوتاه به سرعت دوباره وارد مدار گردند (با باز کردن مدار بای پاس).

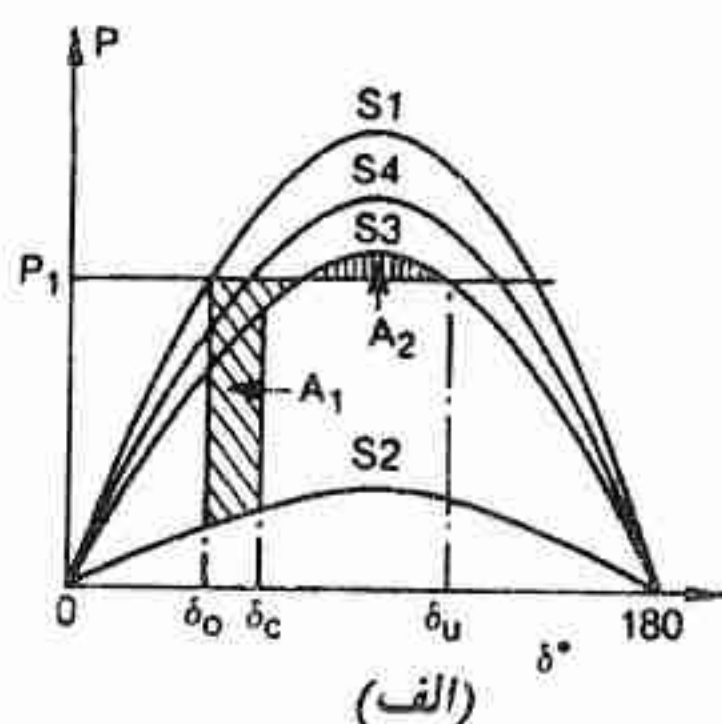
شکل ۴۳ اثر وارد کردن مجدد خازن سری را در پایداری ماشین نشان می دهد. شکل ۴۳ الف

1- Voltage - Sensitive Spark Gap

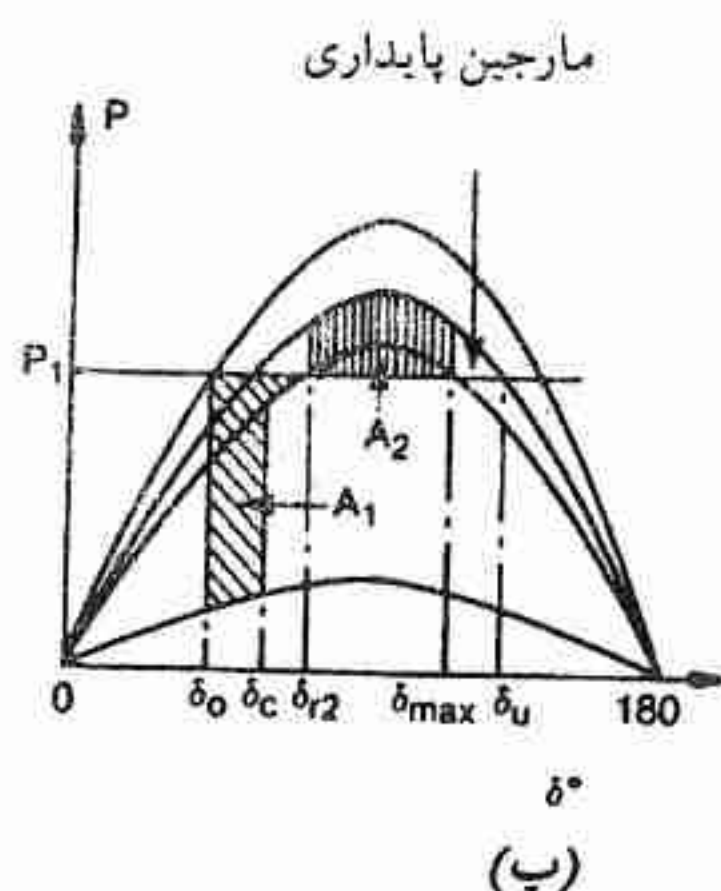
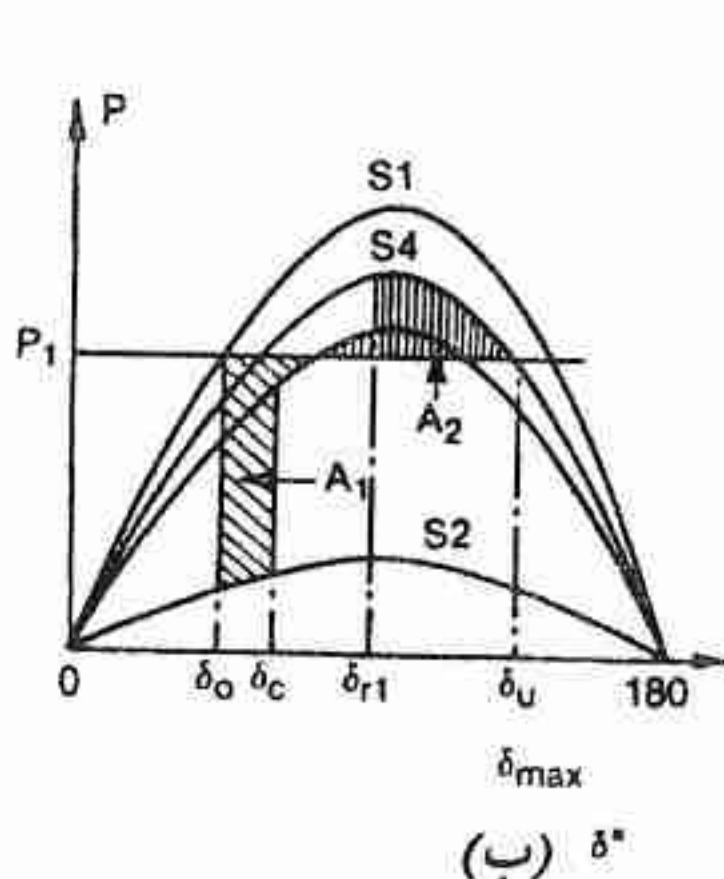
2- Bypass Switch

3- Trigger

شرایط اتصال کوتاه بدترین حالت را نشان می‌دهد که در آن خازن‌های خطوط غیر اتصالی بای پاس گردیده و تا مدت زیادی پس از خارج شدن خط اتصالی در همان حالت باقی می‌مانند. واضح است که سیستم در این شرایط ناپایدار است زیرا انرژی شتاب دهنده A_1 از انرژی کند کننده موجود A_2 بزرگتر است.



S_1 - قبل از اتصال کوتاه تمام خطوط در مدار هستند
 S_2 - خلال اتصال کوتاه
 S_3 - پس از رفع اتصال کوتاه، خازن‌ها بای پاس شده‌اند
 S_4 - پس از رفع اتصال کوتاه، بای پاس برداشته شده‌اند
 δ_o - زاویه اولیه
 δ_c - زاویه در زمان رفع اتصالی
 δ_u - آستانه ناپایداری
 δ_{max} - پیک زاویه نوسان پایدار



شکل ۴۳ - اثر بای پاس خازن‌های سری و وارد کردن مجدد آنها. (الف) $A_2 < A_1$ ناپایدار، بای پاس برداشته نشده است (ب) $A_2 = A_1$ پایدار بحرانی $\delta_{max} \approx \delta_u$ (پ) $A_2 = A_1$ پایدار با حفظ مارجین $\delta_{max} < \delta_u$

شکل ۴۳ ب همان اتصال کوتاه را نشان می‌دهد اما در این حالت خازن‌های سری خطوط غیر اتصالی، هنگامیکه زاویه انتقال به δ_{r1} می‌رسد مجدداً وارد مدار می‌گردند. این مثال طوری انتخاب شده است که سیستم پایدار می‌ماند: یعنی زاویه δ_{max} برابر با مقدار بحرانی δ_u است. در این حالت «مارجین پایداری» وجود ندارد زیرا از تمام انرژی کند کننده (سنکرون کننده) موجود بهره برداری شده است یعنی انرژی موجود A_2 دقیقاً با انرژی شتاب دهنده A_1 برابر است.

شکل ۴۳ پ مشابه حالت قبل است با این تفاوت که خازن‌های سری خطوط غیر اتصالی، زودتر

وارد مدار شده‌اند. زاویه در زمان وارد شدن مجدد خازن‌ها برابر δ_{r2} است که از مقدار δ_{r1} شکل ۴۳ ب کوچکتر است. در حالت اخیر δ_{max} که در آن $A_1 = A_2$ است از δ_u کوچکتر است و A_2 مقدارش از کل انرژی کندکننده موجود کمتر است. همانطوریکه در شکل ۴۳ پ مشخص شده است قسمت بهره برداری نشده از کل انرژی سنکرون کننده موجود، «مارجین» پایداری را تشکیل می‌دهد.

اگر چنانچه در طرح حفاظتی بای پاس خازن‌های سری از Zno استفاده شده باشد، وارد شدن مجدد خازن‌ها به مدار اساساً لحظه‌ای صورت می‌گیرد. بعلاوه، تعدادی از خازن‌ها در خلال اتصال کوتاه بای پاس میشوند (به فصل ۷ شکل ۱۰ ب مراجعه شود).

خازن‌های سری موجود در خطوط غیراتصال‌ی در زمان رفع اتصال کوتاه مجدداً وارد مدار میشوند ($\delta = \delta_c$). در این حالت یک «مارجین» پایداری بیش از آنچه که در شکل ۴۳ پ بدست می‌آید، حاصل میشود. در عمل بخشی از این مارجین اضافی بوسیله کار کردن سیستم در توان انتقالی اولیه بالاتر مورد بهره‌برداری قرار خواهد گرفت و در نتیجه از سیستم انتقال بطور موثرتری استفاده میشود.

۳-۶-۳ پریرود نوسانی

از زمانیکه این پریرود شروع میشود مدار بای پاس اکثر خازن‌های سری موجود در خطوط جبران شده مجدداً باز شده‌اند. خازن‌های سری باقیمانده، نوسانات زاویه و توان را کاهش می‌دهند چه بدون آنها نوسانات بیشتر رخ می‌داد.

جبران خازن سری به ژنراتورهای سیستم در ایجاد گشتاور سنکرون کننده مساعدت می‌نماید. با مقایسه منحنی‌های گذرای S_2 و S_4 شکل ۴۳ این مطلب روشن میشود. منحنی S_2 مشخص کننده سیستم پس از رفع اتصال کوتاه است که خازن‌ها بای پاس شده‌اند. منحنی S_4 پس از وارد کردن مجدد خازن‌ها حاصل میشود و دارای حداکثر توان سنکرون کننده بیش از منحنی S_2 است. برای هر نوسان معین از توان، نوسانات زاویه از نظر مقدار برای منحنی S_4 کمتر از منحنی S_2 است.

۳-۷ خلاصه

در این فصل رفتار دینامیکی سیستم پس از بروز اغتشاش، که از یک حالت تعادل به حالت تعادل دیگر عبور می‌کند، توصیف میشود. برای سهولت، پریرود انتقال به پریرودهای: گذرا، نوسان اول و نوسانی تقسیم شده است. آخرین مرحله تعادل سیستم به پریرود شبه ماندگار نام گذاری شد.

انواع وسایل متعدد جبران توان راکتیو قابل کنترل و غیر قابل کنترل براساس اثرات و نقش آنها در رفتار دینامیکی سیستم در خلال پریودهای انتقال مشخص گردیدند. این بحث خازنهای موازی، راکتورهای موازی، خازنهای سری، جبران کننده‌های استاتیک و کندانسورهای سنکرون را در بر می‌گرفت.

جبران‌کننده‌های پاسیو و اکتیو (قابل کنترل) نقش مهمی را در رفتار ماندگار سیستم ایفا می‌نمایند. جبران‌کننده‌های قابل کنترل و یا قابل سوئیچ رفتار دینامیکی سیستم ac را در پریود انتقال بین حالت‌های متعادل بهبود می‌بخشند. به کمک جبران قابل کنترل مناسب دامنه نوسانات توان اکتیو، زاویه و ولتاژ در خلال پریودهای انتقال کاهش یافته و میرا می‌گردند.

از اوسیلوگرام‌های آزمایش و شبیه‌سازی کامپیوتری در نشان دادن اثرات جبران بر رفتار دینامیکی سیستم بکار گرفته شد. فصول بعدی که دربرگیرنده جبران‌کننده‌های استاتیک، کندانسورهای سنکرون و خازنهای سری است، بیانگر شواهد بیشتری مبنی بر بهبود رفتار دینامیکی سیستم در صورت بکارگیری وسایل مناسب جبران توان راکتیو است.

مراجع

1. *Test Procedures for Synchronous Machines*, IEEE Pub. 115.
2. IEEE Task Force On Terms and Definitions, "Proposed Terms and Definitions for Power System Stability," *IEEE paper 81WM 082-7*, Atlanta, Georgia (Feb. 1981).
3. E. W. Kimbark, *Power System Stability*, Wiley, New York, 1948 (Vol. I) and 1956 (Vol. II).
4. S. B. Crary, *Power System Stability*, Wiley, New York, 1945 (Vol. I) and 1947 (Vol. II).
5. R. T. Byerly and E. W. Kimbark, *Stability of Large Electric Power Systems*, IEEE Press, 1974.
6. R. L. Hauth and R. J. Moran, *The Performance of Thyristor Controlled Static Var Systems in HVAC Applications*, Part I. IEEE Tutorial Course Text 78EH0135-4-PWR, 56-64 (July 1978).
7. R. L. Hauth, R. J. Newell, and T. Humann, "Application of a Static Var System To Regulate System Voltage in Western Nebraska," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, 97 (5), 1955-1964 (Sept./Oct. 1978).
8. R. J. Newell, M. D. Risan, D. D. Raatz, and R. L. Hauth, "Staged Field Testing of The Victory Hill Static Var Control," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* 99 (2), 426-433 (March/April 1980).
9. R. L. Hauth et al., *Static Reactive Power Compensators for High Voltage Power Systems*, Report for U.S. Department of Energy and Los Alamos National Laboratory, April 1981, DOE/NBM-1010
10. E. Kimbark, "How to Improve System Stability Without Risking Subsynchronous Resonance," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* 96 (5), 1608-1619 (Sept./Oct. 1977).
11. B. M. Weedy, *Electric Power Systems*, 2nd Ed., 161-164 Wiley, New York, 1979.
12. E. V. Larsen and W. W. Price, *MANSTAB/POSSIM Power System Dynamic Analysis Programs — A New Approach Combining Nonlinear Simulation and Linearized State-Space/Frequency Domain Capabilities*, PICA Conference Proceedings, May 1977.

اصول کار جبران‌کننده‌های استاتیک

T.J.E MILLER and R.W.LYE

۴-۱ موارد استعمال جبران‌کننده‌ها

مطلوب بودن جبران توان راکتیو در سیستم‌های قدرت الکتریکی طی فصول ۱ الی ۳ توصیف شده است. در این فصل و فصول بعدی اصولی را که بر اساس آن جبران‌کننده‌ها در عمل تحقق پیدا می‌کنند، بررسی خواهد شد.

این فصل به جبران‌کننده‌های موازی استاتیک مربوط می‌شود. این وسایل جبران‌کننده در طبقه جبران‌کننده‌های اکتیو قرار می‌گیرند (فصل ۲ بخش ۲-۳-۲). استاتیک به این معناست که برخلاف کندانسورهای سنکرون، دارای قسمت متحرک نمی‌باشند. این نوع جبران‌کننده‌ها در جبران امپدانس ضربه‌ای و جبران با تقسیم‌بندی خط در خطوط ولتاژ بالا، و طولیل، به کار برده می‌شوند. به علاوه کاربردهای متنوعی در زمینه جبران بار دارند. کاربردهای آنها در جدول ۱ لیست شده است. عناوین اصلی در جدول ۱ مربوط به نیازمندی‌های اساسی برای عملکرد سیستم‌های قدرت ac می‌باشد که در فصول ۱-۳ مورد بحث قرار گرفت. کاربردهای دیگری است که در این جدول نیامده است لیکن بسیار سودمند می‌باشند از آن جمله کنترل ولتاژ ac در مجاورت ترمینال مبدل HVDC، به حداقل رساندن تلفات سیستم با هماهنگی توان راکتیو (فصل ۱۱) و میرا کردن رزونانس^۱ زیر سنکرون، را

می‌توان نام برد. بعضی از انواع جبران‌کننده‌ها را می‌توان برای محدود کردن اضافه ولتاژهای دینامیکی طراحی کرد (فصل ۳).

۴-۱-۱ مشخصات جبران‌کننده‌های استاتیک

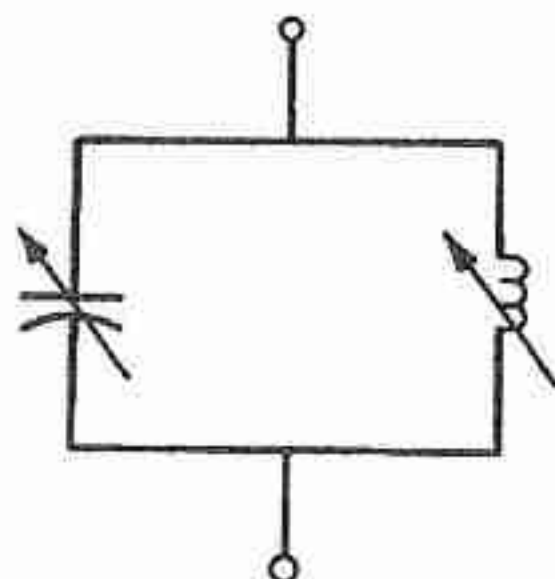
در فصل ۲ نحوه ثابت نگاه‌داشتن ولتاژ ac در ترمینال یک سوسپتانس قابل کنترل توضیح داده شد. اصول این کار در شکل ۳۰ فصل ۲ بر حسب مشخصه ولتاژ - جریان یا مشخصه کنترل نشان داده شد. شکل ۱ یک جبران‌کننده استاتیک ایده‌ال را نشان می‌دهد. یک جبران‌کننده ایده‌ال وسیله‌ای است که قادر است که توان راکتیو خود را به طور پیوسته تنظیم نموده و پاسخ آن سریع و بدون تاخیر باشد و در یک رنج نامحدود (پس‌فاز و پیش‌فاز) عمل نماید.

از مهم‌ترین مشخصه جبران‌کننده استاتیک این است که قادر است با تنظیم توان راکتیوی که با سیستم تبادل می‌نماید، ولتاژ را به طور قابل ملاحظه‌ای در ترمینال خود ثابت نگاهدارد. این خاصیت ولتاژ - ثابت جبران‌کننده اولین نیازمندی جبران موازی دینامیک یا جبران با تقسیم‌بندی خط (فصل ۲) را تشکیل می‌دهد و به همین میزان در کاهش چشمک‌زدن لامپ و تغییرات ولتاژ ناشی از بارهای متغیر، از اهمیت برخوردار است.

جدول ۱

کاربردهای عملی جبران‌کننده‌های استاتیک در سیستم‌های قدرت الکتریکی

ثابت نگاه‌داشتن ولتاژ در یک سطح معین و یا نزدیک به آن
تحت شرایط تغییرات کند ناشی از تغییرات بار
تصحیح تغییرات ولتاژ ناشی از حوادث غیرمنتظره (مثل قطع بار، خارج شدن خط یا ژنراتور)
کاهش چشمک‌زدن لامپ ناشی از تغییرات سریع بار (نظیر، کوره‌های الکتریکی)
بهبود پایداری سیستم قدرت
با حمایت ولتاژ در نقاط کلیدی (مثلا در نقطه میانی یک خط طولانی)
با بهبود میرایی نوسانات
بهبود ضریب توان
تصحیح عدم تقارن فازها



شکل ۱ - جبران‌کننده راکتور استاتیک ایده‌آل.

از مشخصه‌های مهم دیگر جبران‌کننده استاتیک، سرعت پاسخ آن است. توان راکتور جبران‌کننده بایستی در پاسخ به تغییرات کوچک ولتاژ ترمینال، با سرعت کافی تغییر نماید. راجع به اینکه چه چیزی پاسخ با سرعت کافی را تشکیل می‌دهد نمی‌توان قاعده کلی را بیان کرد. در سیستم‌های انتقال ثابت‌های زمانی که در برقراری مجدد سیستم به وضعیت پایدار (پس از اغتشاش) حکمفرماست (یعنی مدهای سیستم یا مقادیر خاص^۱) به همان میزانی که به سیستم قدرت خارجی بستگی دارند به جبران‌کننده بستگی خواهند داشت و آنها همچنین با تغییر پیکربندی سیستم^۲، تغییر خواهند کرد. گرچه عموماً یک پاسخ سریع مطلوب ما است، اما امکان دارد که عوامل دیگر، پایداری سیستم را محدود کنند به طریقی که جایی برای مشخص کردن جبران‌کننده با پاسخ سریع - به میزانی که از نظر تئوری امکان‌پذیر است - باقی نماند. در جبران بار، کاهش چشم‌زدن تنها با انواع جبران‌کننده‌ها با پاسخ خیلی سریع امکان‌پذیر است.

مشخصه کنترل معمولاً یک شیب مثبت کوچکی دارد تا نقطه کار را - که از تلاقی آن با خط بار سیستم به دست می‌آید - تثبیت نماید. جریان راکتور جبران‌کننده در رژیم‌های پس‌فاز و پیش‌فاز توسط فاکتورهای دخیل در طراحی جبران‌کننده و همچنین در اصول کار آن، محدود می‌گردد. و همچنین بر حسب میزان تغییر جریان و ولتاژ، مشخصه می‌تواند از خط مستقیم منحرف شده و دارای گسستگی و تغییر شیب باشد.

اصول متعددی در طراحی جبران‌کننده به کار گرفته شده است تا مشخصه کنترل مشابه شکل ۳۰ فصل ۲ داشته باشد. بر روی سه نوع اصلی جبران‌کننده متمرکز می‌شویم: راکتور تایریستور کنترل (TCR)^۳، خازن تایریستور سوئیچ (TSC)^۴ و راکتور قابل اشباع (SR)^۵. این جبران‌کننده‌ها همراه با

1- Eigenvalue

2- System Configuration

3- Thyristor Controlled Reactor

4- Thyristor Switched Capacitor

5- Saturated Reactor

ترکیبات مختلف آن، اکثریت کاربردهای جبران‌کننده در سیستم‌های انتقال و توزیع را در برمی‌گیرند. کندانسور سنکرون که از قدیمی‌ترین نوع جبران‌کننده قابل کنترل است در فصل ۸ تشریح خواهد شد.

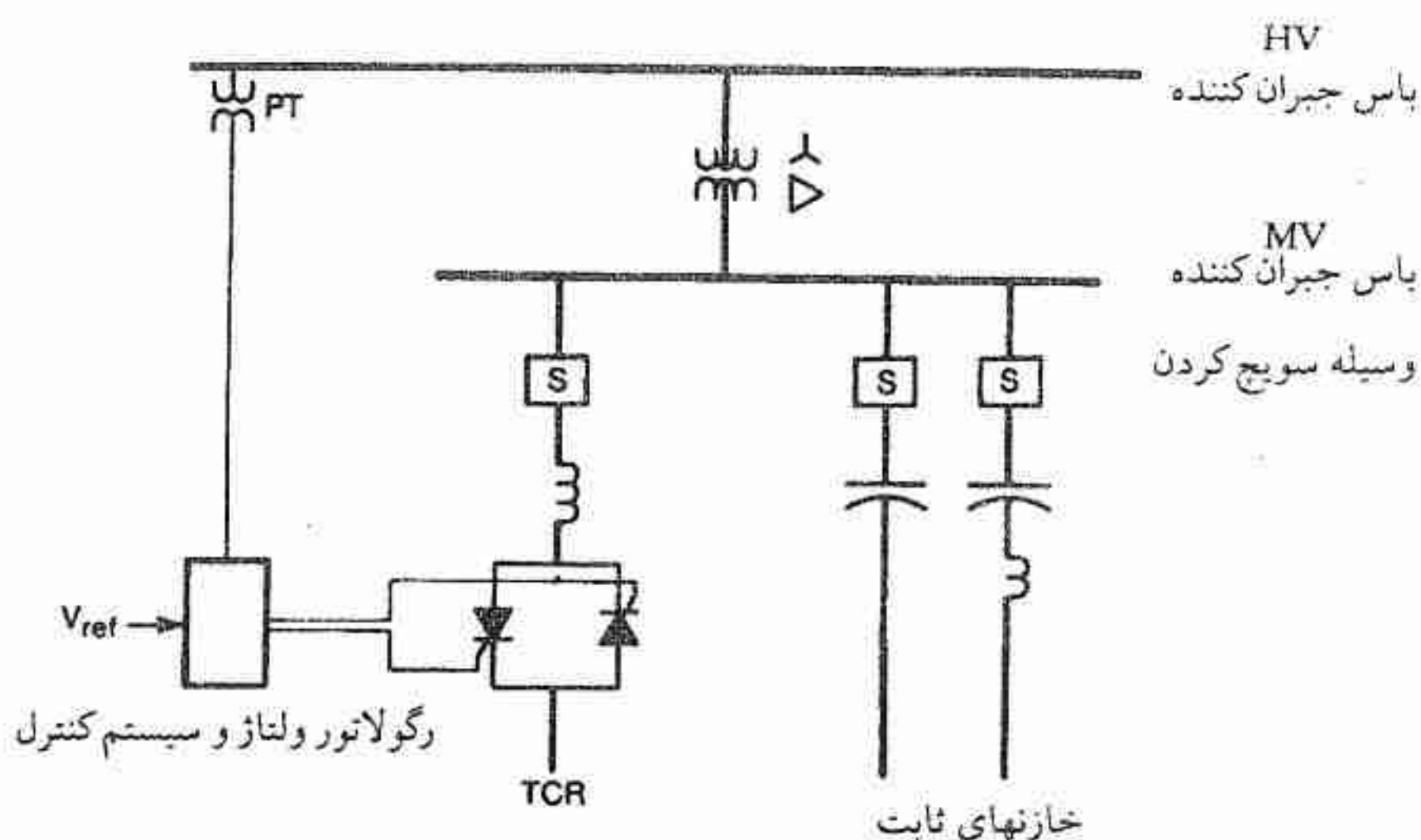
۴-۱-۲ انواع اصلی جبران‌کننده

شکل‌های ۲ الی ۴ دیاگرام تک خطی انواع اصلی جبران‌کننده را نشان می‌دهند. قبل از آنکه به بررسی تفصیلی هر یک پردازیم چند وجه کلی را متذکر می‌شویم. اول اینکه عموماً خازن‌های ثابت به موازات سوسپتانس قابل کنترل قرار می‌گیرند. خازنهای ثابت اغلب با راکتورهای کوچک برای فرکانس‌های هارمونیک که ممکن است عدد صحیح یا غیر صحیح باشند، هم‌نوا می‌گردند. این عمل هم‌نوایی به منظور جذب هارمونیک‌هایی که توسط سوسپتانس قابل کنترل (SR یا TCR) ایجاد می‌شود و یا اجتناب از رزونانس‌های مزاحم (به فصل ۱۰ مراجعه شود)، انجام می‌گیرد. خازن‌های ثابت موجب می‌شوند که خروجی راکتیو جبران‌کننده به سمت رژیم پیش‌فاز (تولید توان راکتیو) سوق داده شود. وجه کلی دیگر در جبران‌کننده‌های اشکال ۲ الی ۴، به کار گرفتن ترانسفورماتور کاهنده است. ترانسفورماتور همیشه وجود ندارد لیکن وقتی که وجود دارد عملکرد و رفتار جبران‌کننده را به خصوص نسبت به هارمونیک، تلفات و اضافه ولتاژ به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر قرار می‌دهد. خازن‌های موازی ثابت در بعضی مواقع به طرف فشار قوی این ترانسفورماتور متصل می‌شوند، اما عموماً در باس جبران‌کننده با ولتاژ متوسط، به طور مشترک با عنصر کنترل شده قرار می‌گیرند. گاهی جبران‌کننده به سیم‌پیچی سوم^۱ ترانسفورماتور موجود در شبکه متصل می‌شود. در جبران‌کننده‌های از نوع TCR اتصال دادن خازن‌های موازی به طرف فشار قوی مستلزم ترانسفور کاهنده بزرگتری است و این امر تاثیر نامطلوبی بر تلفات می‌گذارد (بعدا بحث خواهد شد). عین همین مطلب در مورد جبران‌کننده نوع ترانسفورماتور تایریستور کنترل^۲ (TCT) که از TCR مشتق شده است، صادق است. بالاخره، تشابه موجود در اشکال ۲-۴ کاملاً مفهوم است. طرح پست^۳ و قرارگرفتن انواع جبران‌کننده‌ها می‌تواند به طور متنوع تغییر نماید. به عنوان مثال، راکتور قابل اشباع از نظر ساختمان از نوع ترانسفورماتور است در صورتی که کنترلر تایریستور در جبران‌کننده‌های TSC و TCR از نظر فیزیکی از خازن‌ها و راکتورهایشان جدا هستند و اغلب در یک ساختمان ساده برای حفاظت در مقابل جو، نگهداری می‌شوند.

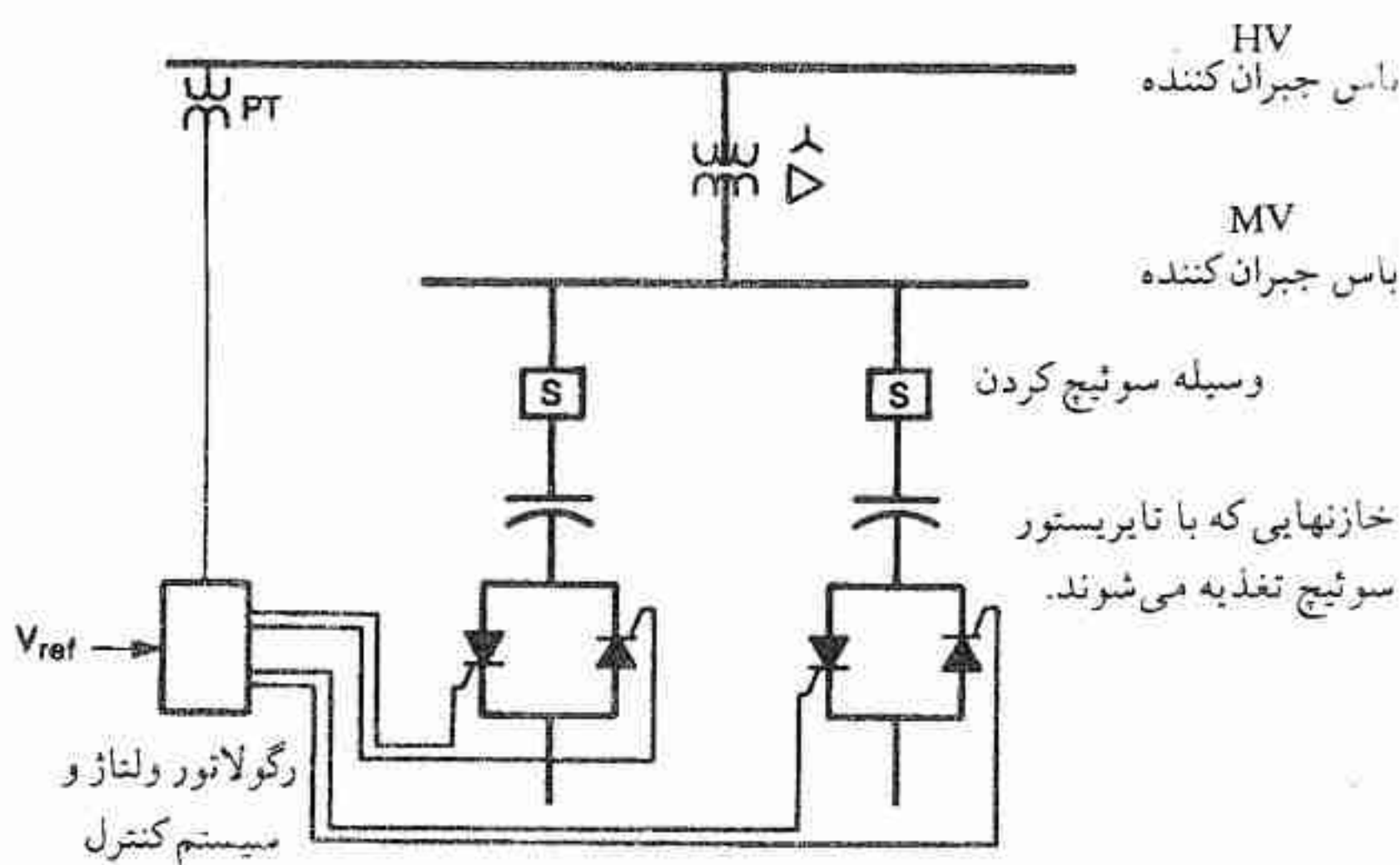
1- Tertiary

2- Thyristor - Controlled Transformer

3- Substation - Layout



شکل ۲ - دیاگرام تک خطی جبران کننده TCR همراه با خازنهای ثابت موازی.



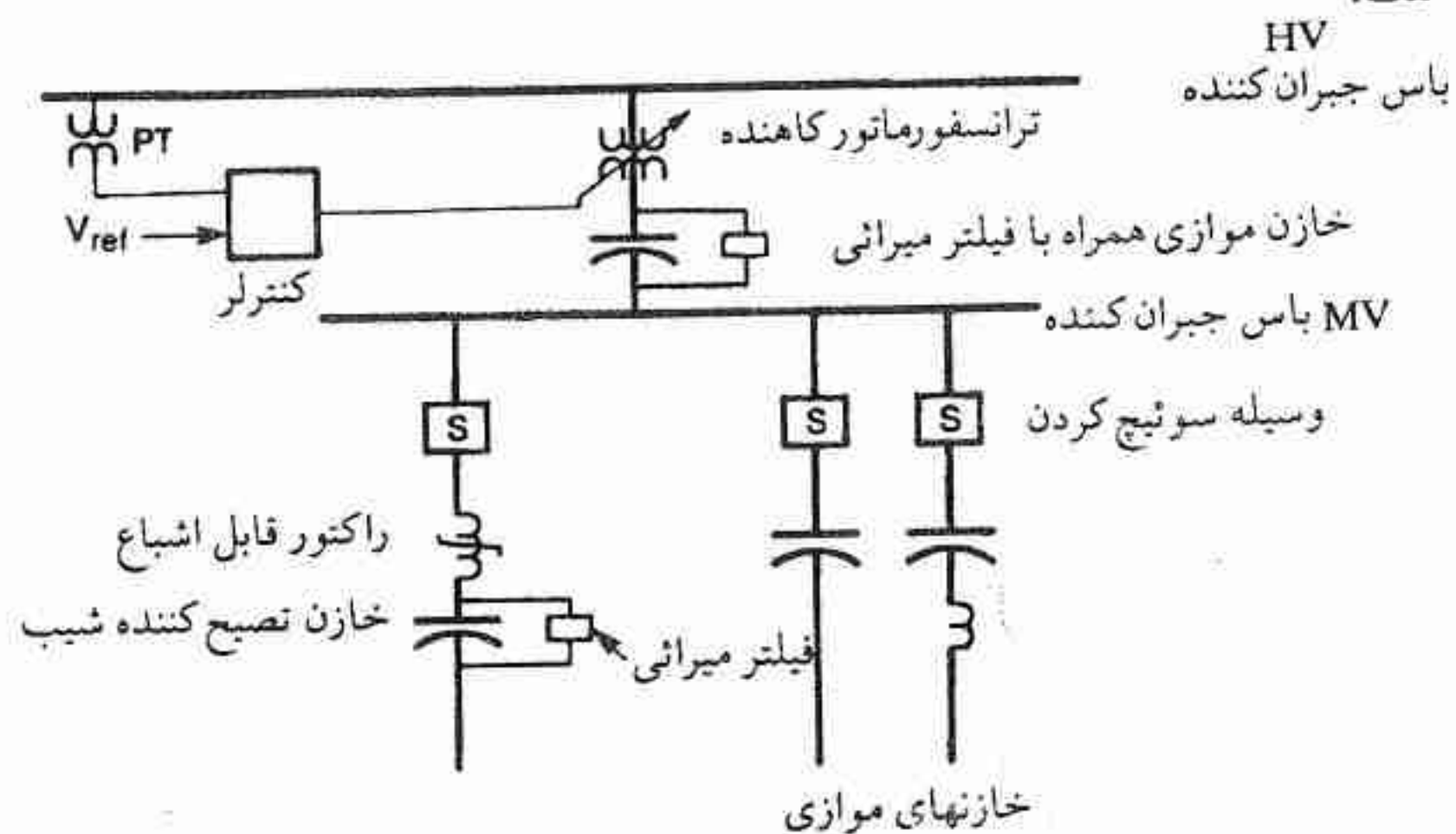
شکل ۳ - دیاگرام تک خطی جبران کننده TSC

۴-۲ راکتور تایریستور کنترل (TCR) و انواع جبران کننده مربوط به آن

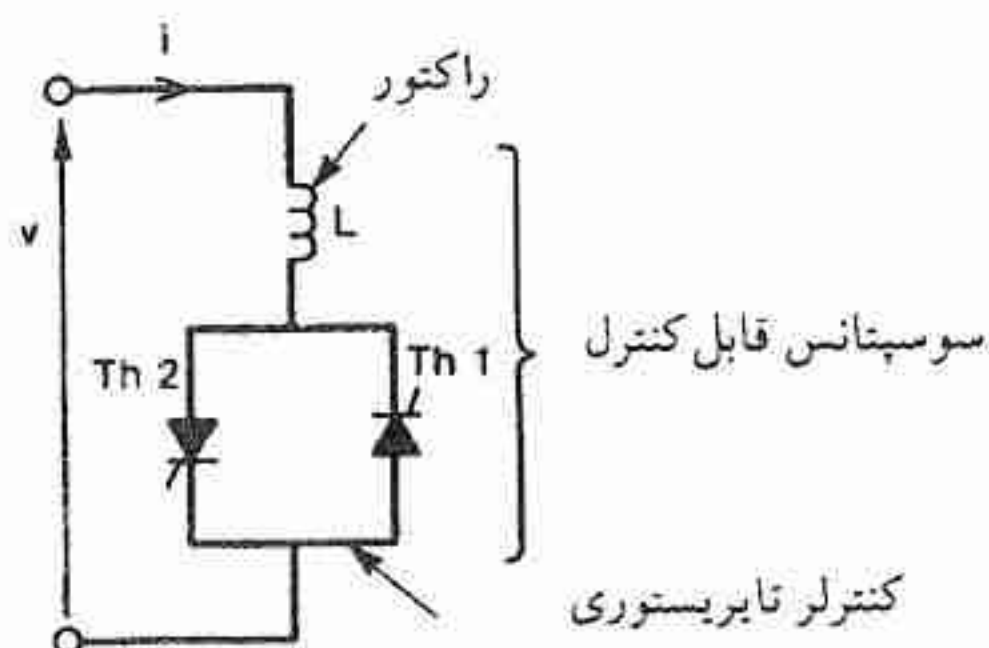
۴-۲-۱ اصول کار

اصول راکتور تایریستور کنترل (TCR) در شکل ۵ نشان داده شده است. عنصر کنترل کننده،

کنترلر تایریستوری^۱ است که در آن یک زوج تایریستور هر یک در جهت خلاف هم قرار گرفته و در نیم سیکل متوالی فرکانس تغذیه هدایت می کنند. اگر تایریستورها دقیقا در لحظه پیک ولتاژ تغذیه، آتش شوند، تایریستورها به طور کامل هدایت کرده و جریان عبوری از راکتور مشابه وقتی است که کنترلر تایریستور اتصال کوتاه شده باشد. جریان اساسا راکتیو بوده و از ولتاژ تقریبا ۹۰ درجه عقب تر است. این جریان به واسطه تلفات راکتور که ممکن است ۲-۵٪ توان راکتیو باشد، دارای مولفه کوچک همفاز با ولتاژ می باشد. هدایت کامل به وسیله شکل موج جریان در شکل ۶ الف نشان داده شده است.



شکل ۴ - دیاگرام تک خطی جبران کننده راکتور قابل اشباع همراه با خازنهای موازی و اصلاح کننده شیب.

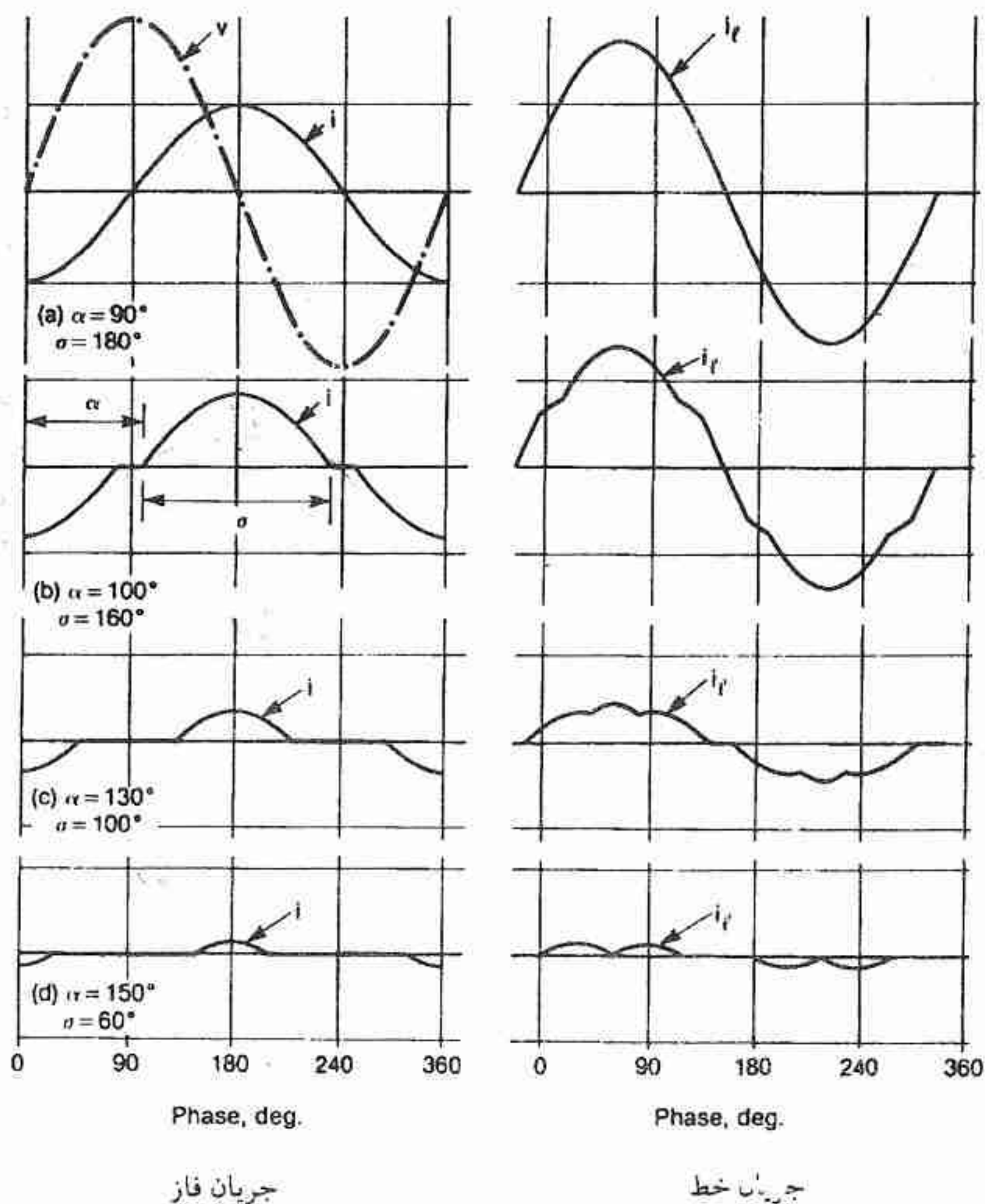


شکل ۵ - راکتور تایریستور کنترل مقدماتی

اگر در آتش کردن تایریستورها به مقدار مساوی تاخیر ایجاد گردد یک مجموعه شکل موج های

جریان به دست می آید که طی اشکال ۶ الف تا ۶ ت نشان داده شده است. هر یک از این شکل موج‌ها مربوط به یک زاویه آتش α معین است که از نقطه صفر موج ولتاژ اندازه‌گیری شده است. در زاویه آتش ۹۰ درجه هدایت کامل صورت می‌گیرد. کسری از هدایت با زاویه آتش بین ۹۰ درجه و ۱۸۰ درجه به دست می‌آید.

اثر افزایش زاویه آتش، کاهش دادن مولفه هارمونیک جریان است. و این امر معادل است با افزایش اندوکتانس راکتور که در نتیجه جریان و توان راکتور آن کاهش می‌یابد. تاکنون تا جایی که به مولفه جریان پایه مربوط می‌شود، راکتور کنترل شده با تایریستور یک سوسپتانس قابل کنترل بوده و بنابراین می‌تواند به عنوان جبران‌کننده استاتیک به کار برده شود.



شکل ۶ - شکل موج جریان خط و فاز در جبران‌کننده TCR با اتصال مثلث.

جریان لحظه‌ای i از رابطه زیر به دست می‌آید

$$i = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}V}{X_L} (\cos \alpha - \cos \omega t) & \alpha < \omega t < \alpha + \sigma \\ 0 & \alpha + \sigma < \omega t < \alpha + \pi \end{cases} \quad (1)$$

که در آن ولتاژ V و $X_L = \omega L$ راکتانس راکتور در فرکانس پایه (بر حسب اهم)، $\omega = 2\pi f$ و زاویه α تاخیر آتش است. مبدأ زمان طوری انتخاب شده است که با نقطه - صفر مثبت شونده موج ولتاژ منطبق باشد. مولفه پایه به وسیله تحلیل فوریه طبق رابطه زیر به دست می‌آید

$$I_1 = \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi X_L} V \quad \text{A rms} \quad (2)$$

که در آن σ زاویه هدایت است و به وسیله رابطه زیر با α مرتبط می‌شود

$$\alpha + \sigma/2 = \pi \quad (3)$$

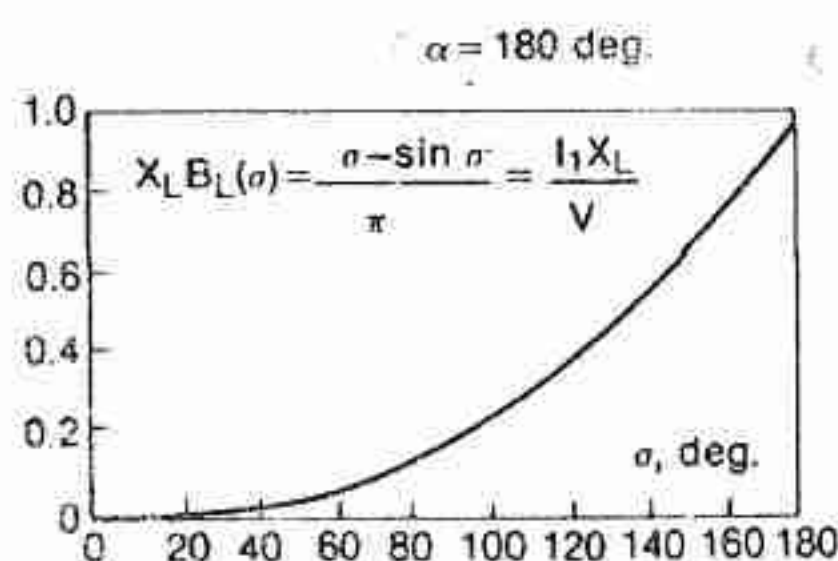
معادله ۲ را می‌توان به صورت زیر نوشت

$$I_1 = B_L(\sigma) V \quad (4)$$

که در آن $B_L(\sigma)$ سوسپتانس قابل تنظیم فرکانس پایه است و با زاویه هدایت طبق قانون زیر کنترل می‌شود،

$$B_L(\sigma) = \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi X_L} \quad (5)$$

این قانون کنترل در شکل ۷ نشان داده شده است. حداکثر مقدار B_L برابر است با $1/X_L$ که با $\sigma = \pi$ یا 180° درجه یعنی در هدایت کامل تایریستور به دست می‌آید. حداقل مقدار B_L صفر است که با $\sigma = 0$ ($\alpha = 180^\circ$) به دست می‌آید. این چنین کنترلی به کنترل فاز^۲ موسوم است.



شکل ۷ - فاعده کنترل TCR مقدماتی

۴-۲-۲ مشخصه ولتاژ - جریان

جبران کننده TCR مستلزم داشتن سیستم کنترلی است که لحظه آتش کردن تایریستور (و در

نتیجه σ) را معین و پالس‌های آتش را به تایریستورها صادر نماید. در بعضی از طرح‌ها، سیستم کنترل به سیگنالی که مستقیماً معرف سوئیچتانس مطلوب B_L است، پاسخ می‌دهد. در موارد دیگر، سیستم کنترل طی الگوریتمی پارامترهای مختلف سیستم جبران‌شده (مثلاً، ولتاژ) را پردازش نموده و پالس‌های آتش را مستقیماً - بدون به کار گرفتن یک سیگنال B_L (بعداً بحث خواهد شد) - تولید می‌کند. در هر یک از این دو حالت، یک مشخصه ولتاژ - جریان مطابق شکل ۸ به دست می‌آید. در حالت ماندگار سیستم در نقطه تلاقی این مشخصه با خط سیستم کار می‌کند.

به عنوان مثال این نقطه کار مطابق شکل در زاویه هدایت ۱۳۰° درجه است که منجر به ولتاژ قدری بالاتر از $۱/۰ \text{ pu}$ می‌گردد اما این یکی از بی‌نهایت امکان است که بر حسب خط بار سیستم، تنظیم سیستم کنترل^۱ و مقدار نامی جبران‌کننده به دست می‌آید. مشخصه کنترل نشان داده شده در شکل ۸ را می‌توان به وسیله معادله زیر تعریف کرد

$$V = V_k + jX_s I_1, \quad 0 < I_1 < I_{\max} \quad (۶)$$

که در فصول ۱ و ۳ به کار گرفته شده است. در شکل ۸، I_{\max} به طور نرمال جریان نامی راکتور است که در اینجا به مقدار $۱/۰ \text{ pu}$ نشان داده شده است.

۴-۲-۳ هارمونیک

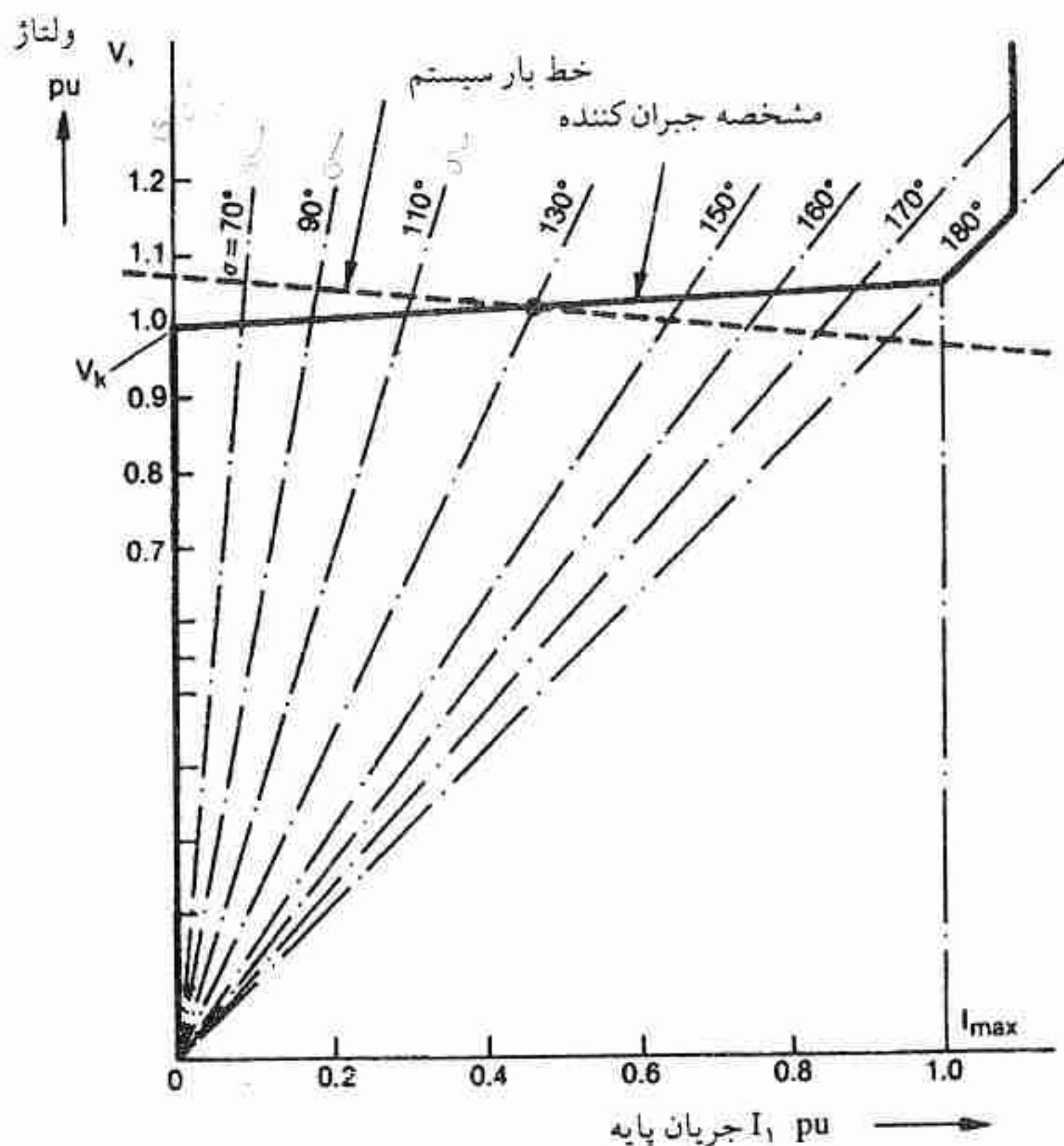
افزایش زاویه آتش (کاهش زاویه هدایت) دو اثر مهم دیگری نیز دارد. اولین اثر این که تلفات توان در تایریستور و راکتور کاهش می‌یابد. اثر دوم این که شکل موج جریان به میزان بیشتری از شکل سینوسی خارج می‌شود، به عبارت دیگر TCR جریان‌های هارمونیک تولید می‌کند. اگر زاویه‌های آتش متعادل باشد (یعنی برای هر دو تایریستور یکسان باشد)، تمامی هارمونیک‌های فرد ایجاد می‌شود و مقدار I_{ms} مولفه n ام هارمونیک به وسیله رابطه زیر به دست می‌آید

$$I_n = \frac{4}{\pi} \frac{V}{X_L} \left[\frac{\sin(n+1)\alpha}{2(n+1)} + \frac{\sin(n-1)\alpha}{2(n-1)} - \cos\alpha \frac{\sin n\alpha}{n} \right] \quad (۷)$$

$$n = 3, 5, 7$$

شکل ۹ الف تغییرات مقادیر تعدادی از هارمونیک‌های مرتبه پایین را بر حسب زاویه هدایت و شکل ۹ ب تغییرات کل هارمونیک را نشان می‌دهد. جدول ۲ حداکثر مقدار هارمونیک از مرتبه ۱ تا

۳۷ را نشان می‌دهد. (توجه اینکه ماگزیمم در تمامی آنها در زاویه هدایت یکسان اتفاق نمی‌افتد)

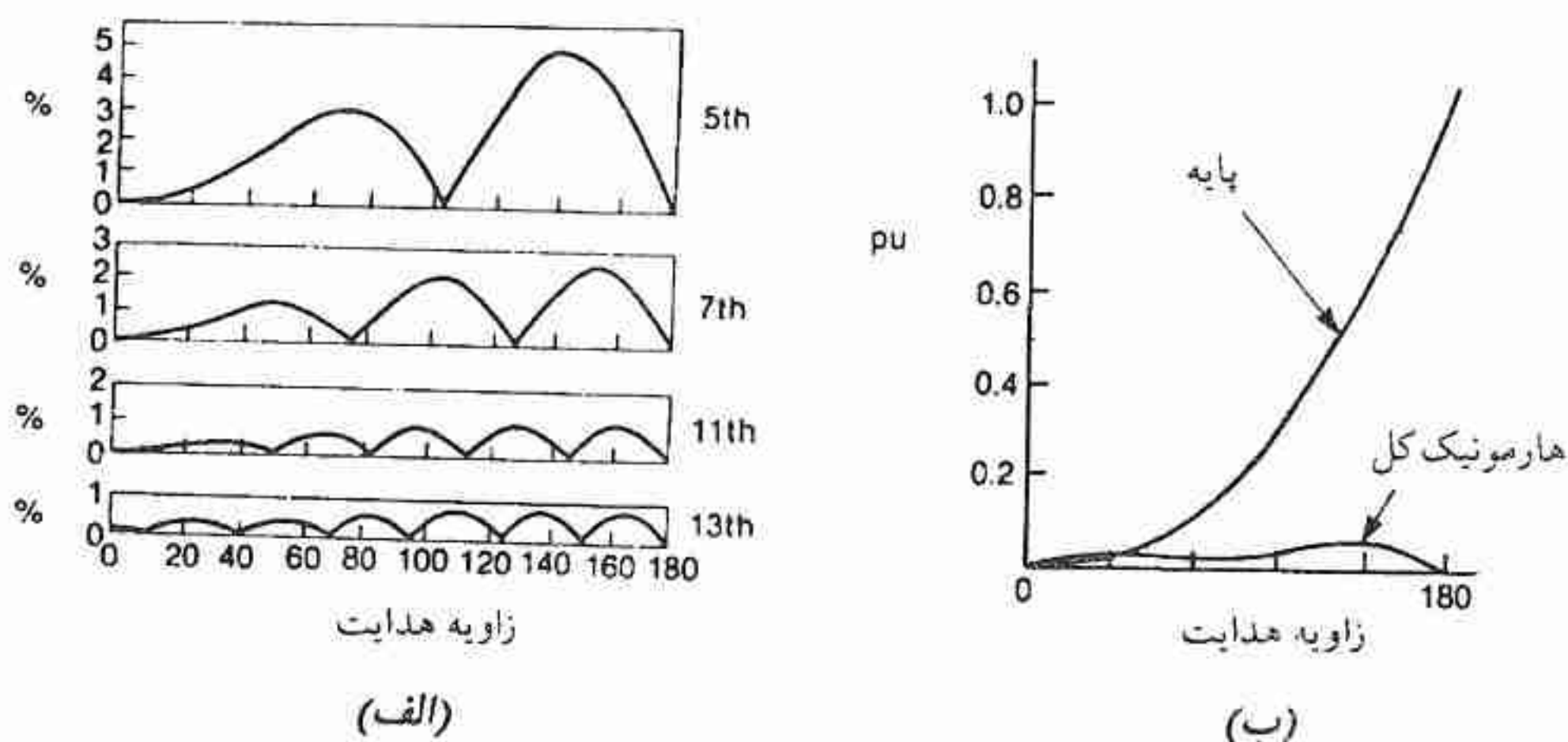


شکل ۸ - مشخصه ولتاژ - جریان جبران کننده TCR.

تاکنون TCR را به عنوان وسیله تک فاز تشریح کرده ایم. برای سیستم سه فاز ترتیب شکل ۱۰ که در آن سه TCR تک فاز به صورت مثلث بسته شده اند، ترجیح داده می شود. وقتی سیستم متقارن باشد تمامی هارمونیک سوم در مثلث بسته به گردش در می آیند و از جریان های خط حذف می گردند. تمامی هارمونیک های دیگر در جریان های خط حضور دارند و مقادیرشان همان است که در شکل ۹ و جدول ۲ آمده است. البته، شکل موج آنها از جریان های فاز متفاوت است که برای تعدادی زاویه هدایت معین در شکل ۶ نشان داده شده است.

در TCR این مساله حائز اهمیت است که مطمئن باشیم زاویه هدایت در دو تایریستور که در جهت خلاف هم قرار دارند یکسان است. نامساوی بودن زاویه هدایت منجر به تولید مولفه های هارمونیک زوج و مولفه dc در جریان می گردد. آنها همچنین منجر به تنش حرارتی نابرابر در زوج

تایریستور می‌گردند. ضرورت هدایت برابر همچنین α را در حداکثر مقدار 180° درجه محدود می‌نماید. البته، اگر چنانچه راکتور شکل ۵ به دو راکتور جداگانه تقسیم شود (شکل ۱۱) زاویه هدایت در هر یک از شاخه‌ها می‌تواند تا مقدار 360° درجه افزایش یابد. این آرایش TCR، نسبت به شکل ۵ دارای هارمونیک کمتری است، گرچه به واسطه جریان گردش بین دو شاخه، تلفات توان افزایش می‌یابد.



شکل ۹ - هارمونیک‌های TCR - (الف) هارمونیک اصلی TCR. هر یک بصورت درصدی از مولفه پایه در هدایت کامل، نشان داده شده است. این درصد برای جریان فاز و خط یکسان است. (ب) هارمونیک کل موجود در جریان TCR، بصورت کسری از مولفه پایه در هدایت کامل. درصد آن برای جریان خط و فاز یکسان است.

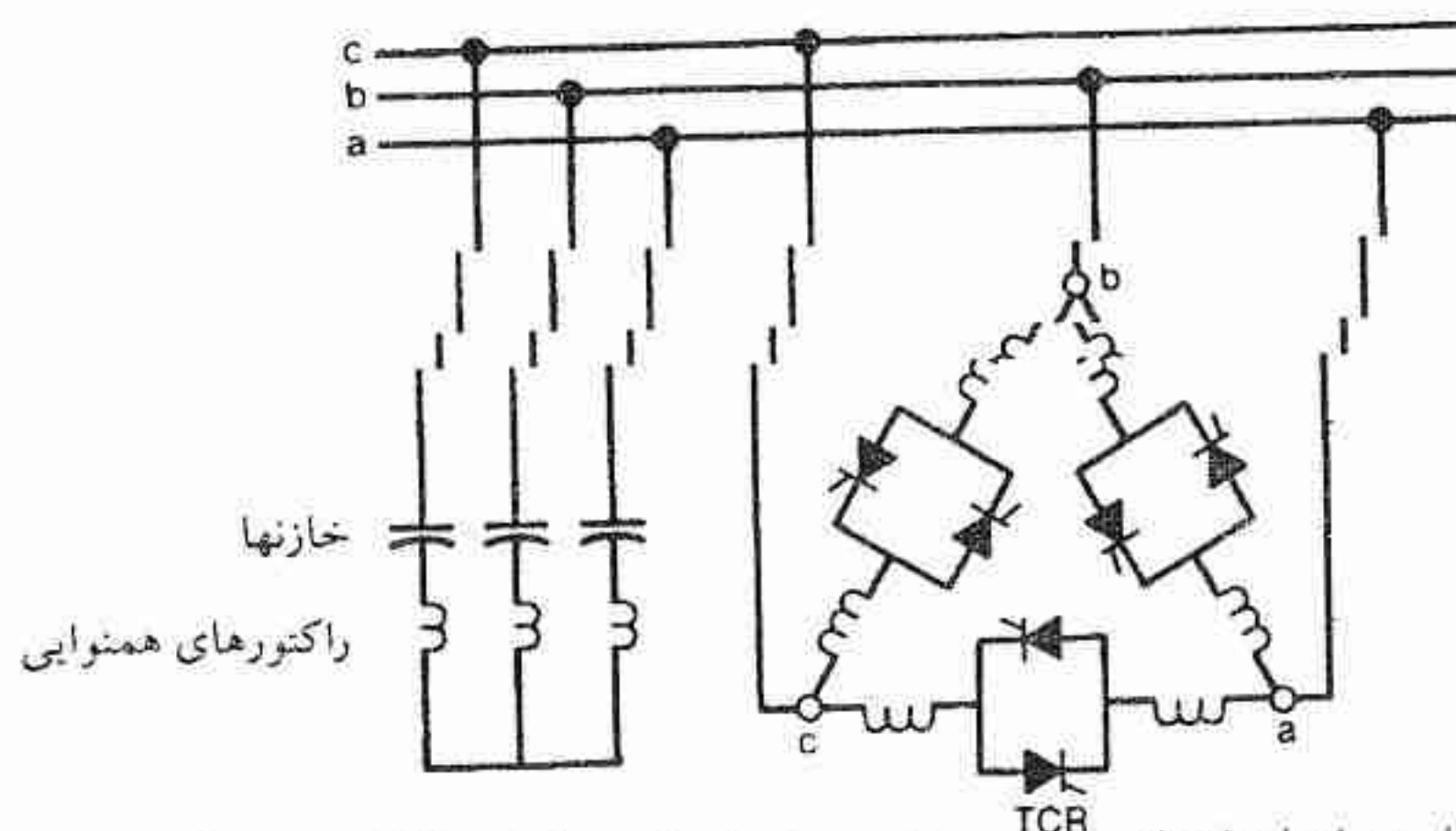
همانطوری که قبلاً بیان شد، جریان‌های هارمونیک TCR، گاهی توسط فیلتر حذف می‌شوند (شکل ۱۰). روش دیگر حذف هارمونیک‌های مرتبه ۵ و ۷ این است که TCR را به دو قسمت تقسیم کرده طوری که هر دو قسمت از ثانویه‌های یک ترانسفورماتور کاهنده که یکی دارای اتصال ستاره و دیگری مثلث است، مطابق شکل ۱۲ تغذیه شوند. به این ترتیب یک جابجایی فاز 30° درجه بین جریان‌ها و ولتاژهای دو TCR بوجود آمده و هارمونیک ۵ و ۷ را از جریان خط در طرف اولیه ترانسفورماتور حذف می‌نماید. این ترتیب قرار گرفتن TCR به ترتیب یا آرایش ۱۲ پالس^۱ معروف است، زیرا در هر پریود ۱۲ تایریستور تریگر می‌شوند. به منظور حذف هارمونیک روش مشابهی در ترانسفورماتورهای موجود در ایستگاه یکسوساز HVDC به کار برده می‌شود و شباهت زیادی با

جدول ۲

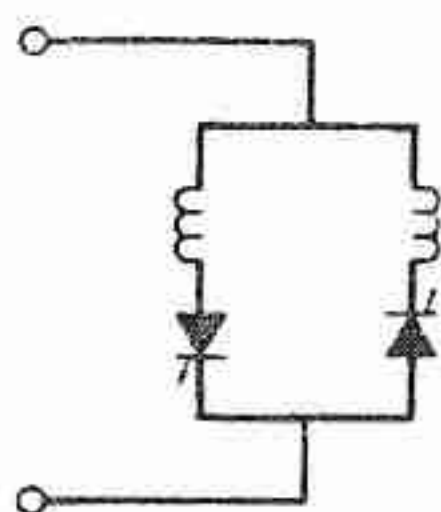
حداکثر دامنه جریانهای هارمونیک در ^{a}TCR

درصد	مرتبه هارمونیک
100	1
(137.78)	3
5.05	5
2.59	7
(1.57)	9
1.05	11
0.75	13
(0.57)	15
0.44	17
0.35	19
(0.29)	21
0.24	23
0.20	25
(0.17)	27
0.15	29
0.13	31
0.12	33
0.10	35
0.9	37

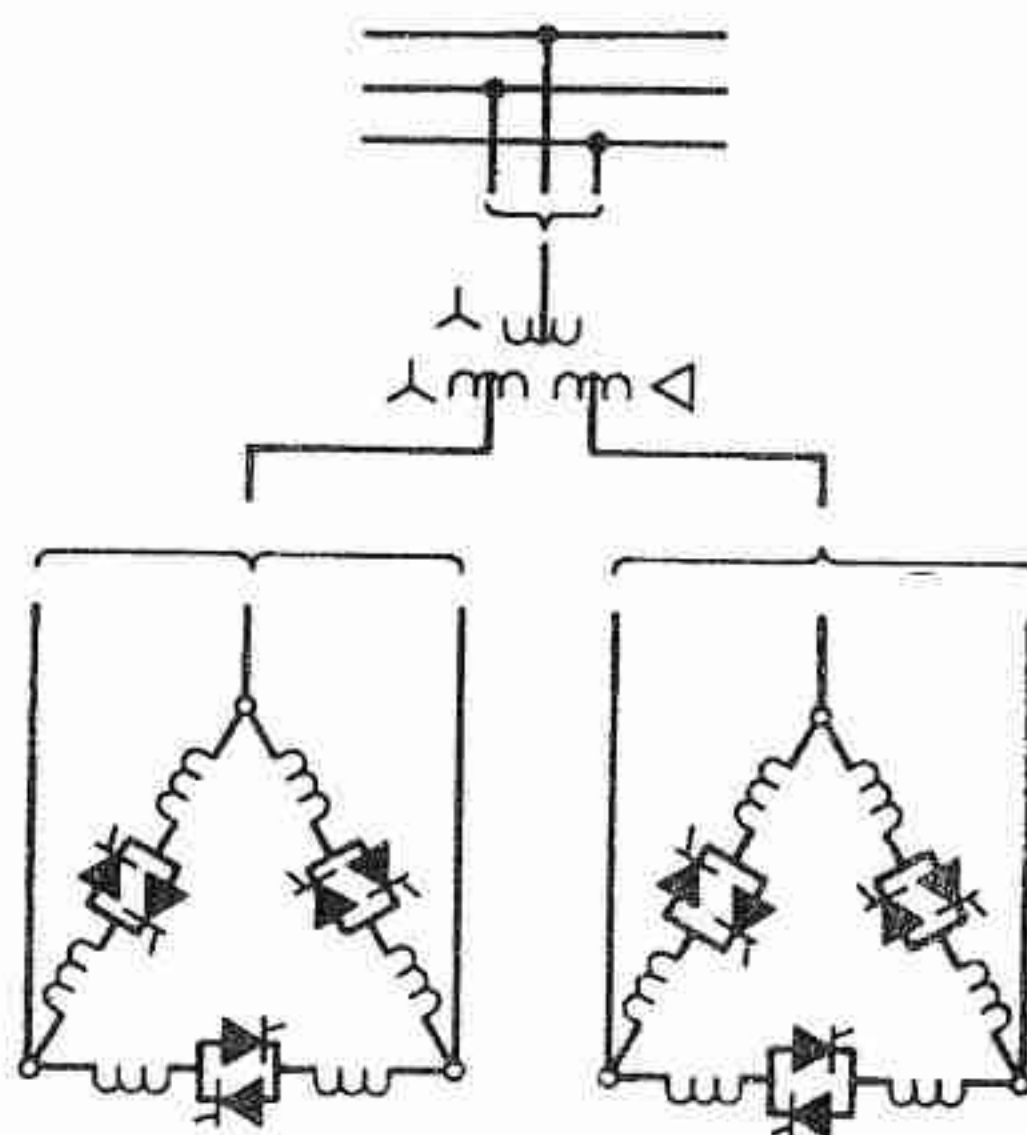
a : مقادیر بصورت درصدی از دامنه مولفه پایه در هدایت کامل بیان شده است. مقادیر به جریانهای فاز و خط اعمال می گردند، به استثناء اینکه هارمونیکهای سوم در جریانهای خط ظاهر نمی شوند. شرایط متعادل فرض شده اند.



شکل ۱۰ - TCR سه فاز همراه با خازنهای موازی. دو قسمت کردن راکتور باعث حفاظت بیشتر تایریستورها در موقع وقوع اتصال کوتاه می گردد.



شکل ۱۱ - TCR که در آن هدایت هر تایریستور می تواند از 180° تجاوز نماید و هارمونیک کاهش یابد.



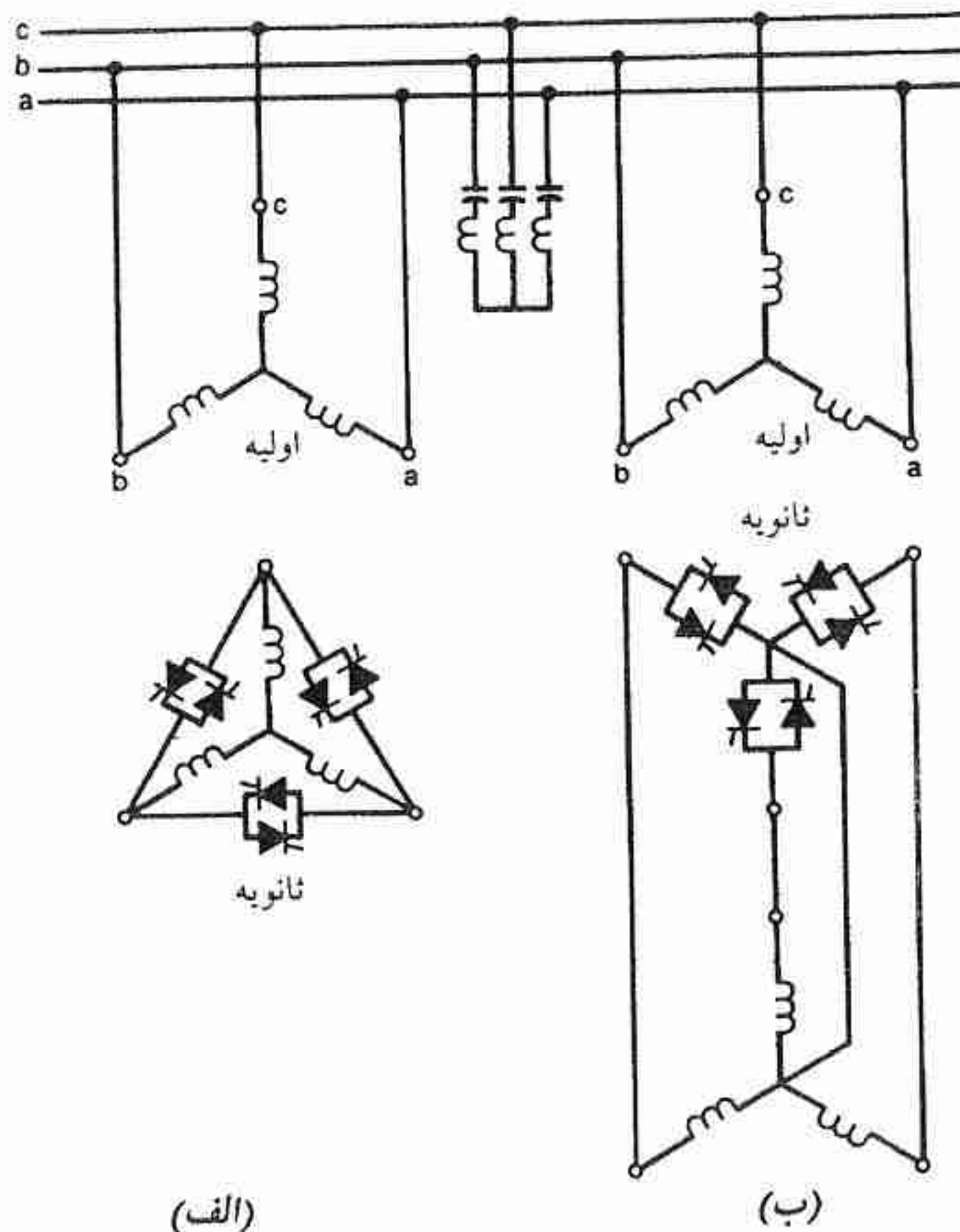
شکل ۱۲ - آرایش TCR با ترانسفورماتور شامل دو ثانویه با ترتیب ۱۲ پالس.

جبران کننده راکتور قابل اشباع چندفازه از نوع چند برابر کننده فرکانس دارد که بعداً مورد بحث قرار خواهد گرفت. در ترتیب ۱۲ پالس پایین ترین مرتبه هارمونیک مشخص، هارمونیک مرتبه ۱۱ و ۱۳ است. بنابراین می توان آن را بدون فیلتر هارمونیک ۵ و ۷ به کار برد که در صورت اتفاق رزونانس در نزدیکی این فرکانس ها، این نوع دارای امتیاز است. برای هارمونیک های مرتبه بالاتر اغلب اتصال یک خازن به طرف فشار ضعیف ترانسفورماتور کاهنده کفایت می کند. در غیر این صورت یک فیلتر بالا - گذر بایستی به کار گرفته شود. تولید جریان های هارمونیک سوم در شرایط نامتعادل، با آنچه که در ترتیب ۶ - پالس شکل ۱۰ وجود دارد، شباهت دارد.

در جبران کننده های TCR ۱۲ پالس و یا ۶ پالس، لزوم به کار گرفتن فیلتر و پاسخ های فرکانسی آنها با توجه به امکان رفتار نامتعادل آنها، بایستی محاسبه گردد. همچنین بایستی اثرات بانک های

خازنی دیگر و منابع تولید هارمونیک که در مجاورت الکتریکی جبران کننده ها قرار دارند، را در نظر گرفت. برای این منظور از برنامه های کامپیوتری مربوط به انتشار هارمونیک استفاده می شود، و گاهی ضروری است که یک قسمت عظیمی از سیستم به هم پیوسته را پوشاند.

ترتیب ۱۲ پالس مزیت دیگری نیز دارد و آن اینکه اگر چنانچه در یکی از قسمت ها اتصال کوتاه رخ دهد، قسمت دیگر قادر است که به طور نرمال کار کند. سیستم کنترل بایستی جابجایی فاز ۳۰ درجه موجود بین دو TCR را در نظر بگیرد و بایستی طوری طراحی گردد که به طور مطمئن باعث حذف هارمونیک ها گردد. در نوع دیگر TCR ۱۲ پالس به جای یک ترانسفورماتور با دو ثانویه از دو ترانسفورماتور جداگانه استفاده می شود.



شکل ۱۳ - جبران کننده ترانسفورماتور تایریستور کنترل. (الف) اتصال ستاره راکتورها و اتصال مثلث تایریستورها (ب) اتصال ستاره راکتورها و اتصال ستاره تایریستورها (سیستم ۴ - سیمه)

۴-۲-۴ ترانسفورماتور تائریستور کنترل

نوع دیگر TCR، ترانسفورماتور کنترل شده با تائریستور است (شکل ۱۳). به جای اینکه از ترانسفورماتور کاهنده جداگانه و راکتورهای خطی استفاده گردد، ترانسفورماتوری با راکتانس پراکندگی بالا طراحی شده و سیم پیچی های ثانویه آن به وسیله کنترل کننده تائریستوری کاملاً اتصال کوتاه می شوند. برای به دست آوردن راکتانس پراکندگی بالا به کار بردن هسته با فاصله هوایی ضروری است و ترانسفورماتور می تواند از سه ترانسفورماتور جداگانه تک فاز تشکیل گردد. در ترتیب نشان داده شده در شکل ۱۳، باس (شین) ثانویه وجود ندارد و خازن های موازی بایستی به ولتاژ اولیه متصل گردند مگر آنکه یک ترانسفورماتور کاهنده جداگانه ای در سیستم موجود باشد. راکتانس پراکندگی بالا، ترانسفورماتور را در مقابل نیروهای ناشی از اتصال کوتاه در خلال اتصال کوتاه ثانویه، حفاظت می کند. به واسطه خطی بودن و ظرفیت حرارتی بالای آن، TCR قادر است که اضافه بار را در رژیم پس فاز (جذب توان راکتیو) تحمل نماید.

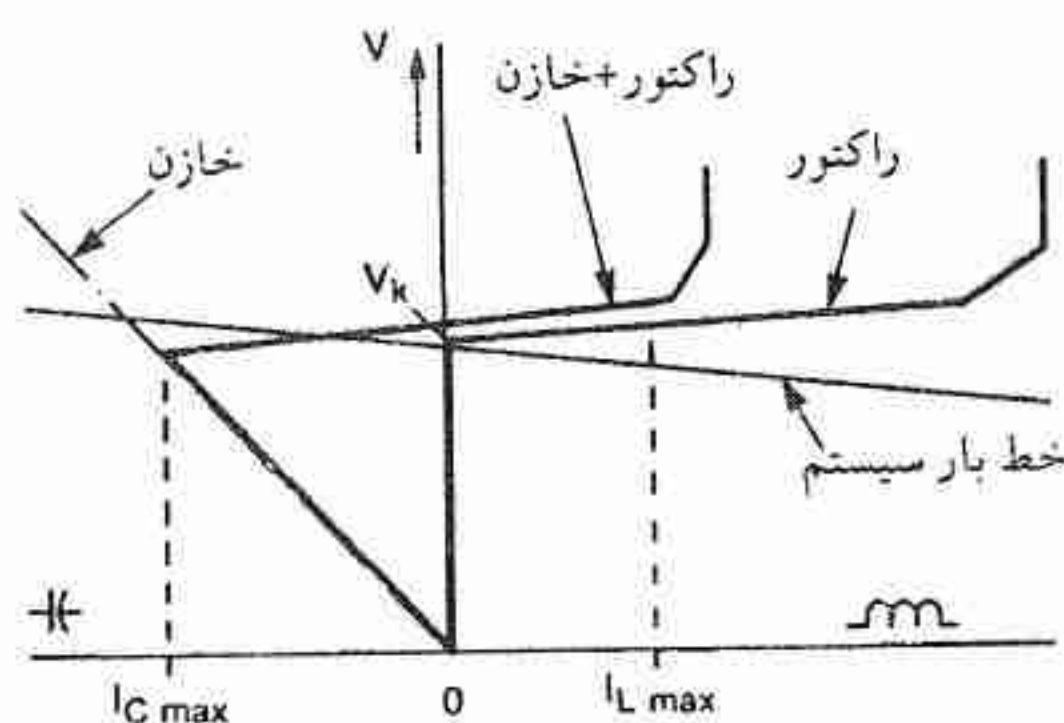
۴-۲-۵ TCR همراه با خازن های موازی

توجه به این نکته حائز اهمیت است که جریان TCR (جریان جبران کننده) قادر است به طور پیوسته، یعنی بدون پله، از صفر تا حداکثر مقدار که به هدایت کامل مربوط می شود، تغییر نماید. جریان همواره پس فاز است بنابراین همواره توان راکتیو جذب می گردد. البته، جبران کننده TCR می تواند با خازن های موازی توأم گشته طوری که قادر باشد همچنین توان راکتیو را تولید نماید (فصل ۱). اثر افزودن جریان خازنی به جریان TCR نشان داده شده در شکل ۸، این است که مشخصه کنترل را مطابق شکل ۱۴ در ربع دوم با یاس^۱ نماییم. در سیستم سه فاز اتصال ستاره خازن ها مطابق شکل ۱۰ ترجیح داده می شود. البته جریان نشان داده شده در شکل ۱۴ مولفه توالی مثبت است و اگر در بین I_{Lmax} و I_{Cmax} واقع شود مشخصه کنترل دوباره به وسیله معادله ۶ نشان داده می شود. اما اگر ضریب بهره رگولاتور ولتاژ تغییر نکند شیب راکتانس X_s در صورت افزون خازن ها، قدری افزایش می یابد.

همانطوری که در مورد بانک های خازنی موازی معمول است، ممکن است خازن ها به بیش از یک گروه سه فاز تقسیم گردند طوری که هر گروه بطور جداگانه با کلید قدرت سوئیچ می شوند. با سری

کردن راکتورهای کوچک با خازن‌های هر فاز می‌توان آنها را برای فرکانس‌های معین هم‌نوا کرده طوری که جریان‌های هارمونیک تولید شده به وسیله TCR را فیلتر نموده و از عبور آنها از سیستم خارجی ممانعت کرد.

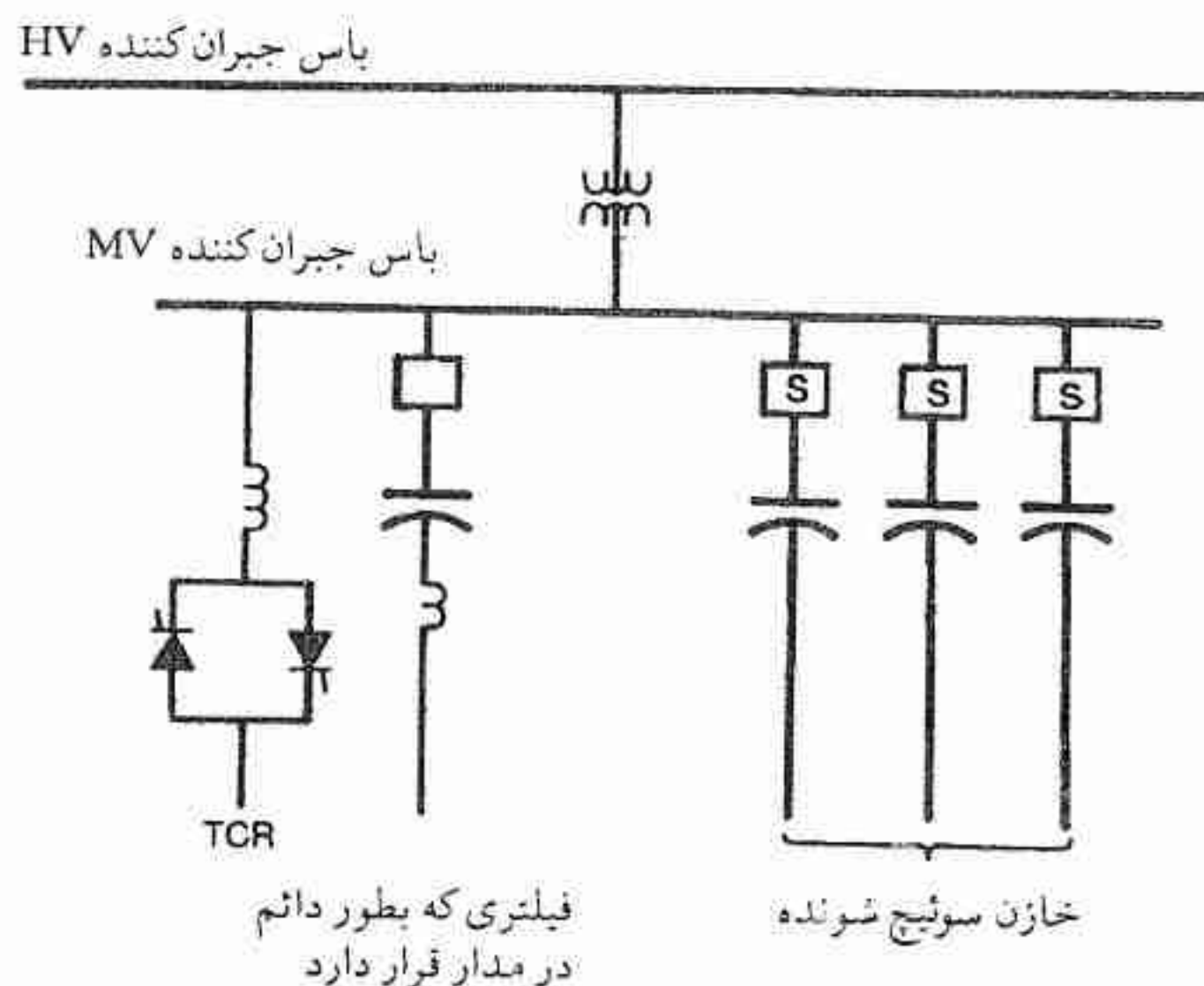
یک انتخاب ممکن این است که گروه‌هایی را برای هارمونیک ۵ و ۷ هم‌نوا کنیم و گروه‌های دیگری را به عنوان فیلتر بالاگذر قرار دهیم. لازم است خازن‌هایی که به عنوان فیلتر قرار داده شده‌اند و همچنین کل جبران‌کننده را با توجه به اثرات آنها بر روی رزونانس سیستم (در نقطه اتصال آنها)، طراحی کرد (به فصل ۱۰ رجوع شود).



شکل ۱۴ - مشخصه ولتاژ و جریان TCR
I_T جریان پایه

از لوازمات عمومی جبران‌سازی این است که جبران‌کننده از رنج پیش‌فاز تا پس‌فاز بسط داده شود. یک TCR توام با خازن‌های ثابت قادر نیستند جریان پس‌فاز تولید نمایند مگر اینکه مقدار نامی توان راکتیو TCR از مقدار نامی راکتیو خازن‌ها تجاوز نماید. مقدار نامی توان راکتیو جذب شده نتیجه برابر با تفاوت مقدار نامی توان راکتیو TCR و خازن‌های ثابت می‌باشد. در اینگونه موارد در حقیقت مقدار نامی TCR خیلی زیاد خواهد بود (در کاربردهای سیستم انتقال تا چند صد MVAR). وقتی که توان راکتیو منتجه کوچک و یا پس‌فاز است جریان زیاد راکتیو بین TCR و خازن‌ها در گردش خواهد بود بدون آنکه عمل مفیدی را در سیستم انجام دهند. به همین دلیل در بعضی مواقع خازن‌ها را طراحی می‌کنند که به صورت گروهی به مدار سوئیچ شوند طوری که میزان با یاس کاپاسیتیو در مشخصه ولتاژ - جریان به صورت مرحله‌ای تنظیم می‌گردد. با انجام این عمل یک TCR با مقدار نامی کمتر را می‌توان به کار برد. یک مثال به طور شماتیک در شکل ۱۵ نشان داده شده است که در آن خازن‌های موازی به سه گروه تقسیم شده است. کنترلر TCR سیگنالی را که معرف تعداد خازن‌ها

می باشد فراهم می کند و طوری طراحی می شود که در کل یک مشخصه ولتاژ - جریان پیوسته را فراهم کند. هنگامی که یک گروه خازن از مدار قطع یا به مدار سوئیچ می شود، زاویه هدایت همراه با سایر سیگنال های مرجع بلافاصله تنظیم می شود طوری که مقدار توان راکتیو خازنی که اضافه یا کم می شود دقیقا با تغییر توان راکتیو القایی TCR معادل است. آنگاه مطابق نیازمندی های سیستم زاویه هدایت به طور پیوسته تغییر می نماید تا اینکه سوئیچ کردن خازن بعدی انجام گیرد. مثالی از اثر سوئیچ کردن خازن در فصل ۷ شکل ۱۳ ارائه شده است.



شکل ۱۵ - جبران کننده ترکیبی شامل TCR و خازن های موازی قابل سوئیچ S می تواند کلید قدرت مکانیکی و با سوئیچ تائریستوری باشد.

رفتار این مجموعه متشکل از TCR و خازن های موازی قابل سوئیچ، به روش و استراتژی سوئیچ کردن خازن ها بستگی دارد. ارزان ترین روش سوئیچ کردن خازن ها، به کار گرفتن کلیدهای قدرت مرسوم است. اگر نقطه کار دائما بر روی مشخصه ولتاژ - جریان به بالا و پایین تغییر کند عمل سوئیچ کردن مکرر ممکن است منجر به مساله نگهداری کلیدهای قدرت گردد. همچنین در استعمال آنها در سیستم انتقال در مواقع وقوع اتصال کوتاه های شدید از اینکه آیا خازن ها بایستی وارد سیستم یا خارج گردند، تناقض پیش می آید. در تحت چنین شرایطی عمل سوئیچینگ مکرر وظیفه سنگینی را بر خازن ها و کلیدهای قدرت بار می کند و در اغلب موارد تنها با منع کردن جبران کننده از سوئیچ کردن خازن ها، می توان از این کار اجتناب کرد. متاسفانه این عمل سبب می شود که نتوانیم از پتانسیل

کامل خازن ها در وقتی که قادرند نقش فوق العاده مفیدی در پایداری سیستم داشته باشند استفاده نمائیم. در بعضی موارد برای قطع و وصل خازن ها با استفاده از تایریستور - به جای کلید قدرت - که توانایی و عمر سوئیچینگ نامحدود دارند، این مشکل رفع شده است. از دقت زمانی تایریستورها می توان استفاده نموده و بدین وسیله شدت وظیفه سوئیچینگ را کاهش داد اما با وجود این در خلال اغتشاشات این وظیفه سنگین خواهد بود. تعداد گروه های خازن موجود در جبران کننده های سیستم انتقال معمولاً کمتر از ۴ است که به طور جداگانه سوئیچ می شوند.

۴-۲-۶ انواع سیستم کنترل

برای اهداف کاربردی، مشخصه اصلی جبران کننده، مشخصه ولتاژ - جریان آن است که خواص آن در فصول ۱ الی ۳ مورد بحث قرار گرفته است. یک مشخصه نمونه TCR در شکل ۸ نشان داده شده است (خط پر). در تمامی مقادیر ولتاژ، جریان TCR به وسیله اندوکتانس راکتورها و زاویه هدایت σ مشخص می گردد. بر طبق معادلات ۴ و ۵ هر نقطه واقع بر روی خط پر نشانگر یک مقدار مشخص B_L است. قبلاً ملاحظه کردیم (فصل ۱) که جبران کننده در نقطه تقاطع مشخصه V/I_1 و خط بار سیستم، کار می کند. سیستم کنترل به طور اتوماتیک لحظه آتش تایریستور (و بنابراین σ) را طوری تنظیم می کند که این شرایط برقرار گردد.

انواع اصلی سیستم کنترل که می تواند مورد استفاده قرار گیرد کنترل مدار بسته^۱ و کنترل مدار باز^۲ است. کنترل «مدار بسته» مطابق شکل ۱۶ الف همان سیستم فیدبک کلاسیک^۳ است. کنترل «مدار باز» مطابق شکل ۱۶ ب سیستم بدون فیدبک می باشد. در اینجا تابع انتقال^۴ G از قبل برنامه ریزی می شود طوری که به ازاء مقدار معین C یک مقدار معین R حاصل گردد. هیچ نوع اندازه گیری بر روی C انجام نمی گیرد و در نتیجه نتایج بازرسی نمی شود. به عبارت دیگر، بایستی تمامی شرایط پیشاپیش به وسیله تابع G در نظر گرفته شود. اگر چنانچه شرایط پیش بینی نشده ای مشخصه های خارجی سیستم را تغییر دهد، آنگاه C نتیجه پیش بینی شده را نمی دهد. مزیت اصلی سیستم مدار بسته دقت آن است. مزیت اصلی سیستم مدار باز پاسخ سریع آن است.

کنترل مدار - باز. این سیستم کنترل به طور موفقیت آمیز در کاهش چشمک زدن لامپ که در آن

1- Closed - Loop

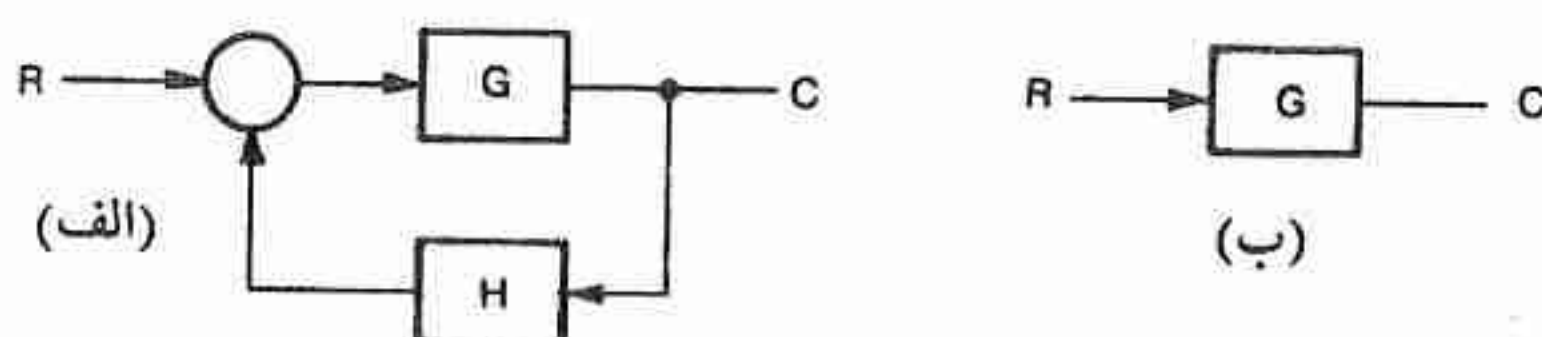
2- Open - Loop

3- Classical Feedback System

4- Transfer Function

پاسخ سریع ضروری است، مورد استفاده قرار گرفته است. اصول آلوگوریتمی متعددی در طراحی مداری که پالس‌های آتش کردن تایریستور را تولید می‌کند، اعمال گردیده است و مثال‌های به خصوص در فصل ۹ توصیف شده است. در عبارت کلی سیستم مدار - باز را می‌توان به کمک شکل ۱۷ توصیف کرد. محاسبه‌کننده سوسپتانس^۱ SC، با استفاده از سیگنال‌های ورودی که معرف ولتاژ و جریان بار و مشخصات مورد لزوم جبران‌کننده است، مقدار مطلوب سوسپتانس جبران‌کننده را محاسبه می‌کند. سوسپتانس جبران‌کننده مطلوب ممکن است به طرق متعددی بیان شود (فصل ۱). سیگنال معرف سوسپتانس به کمک محاسبه‌کننده زاویه هدایت^۲ (CAC) پردازش گردیده و در نتیجه بر طبق معادله زیر سیگنال معرف زاویه هدایت مورد لزوم را تولید می‌نماید.

$$B_r = B_L(\sigma) - B_C \quad (۸)$$

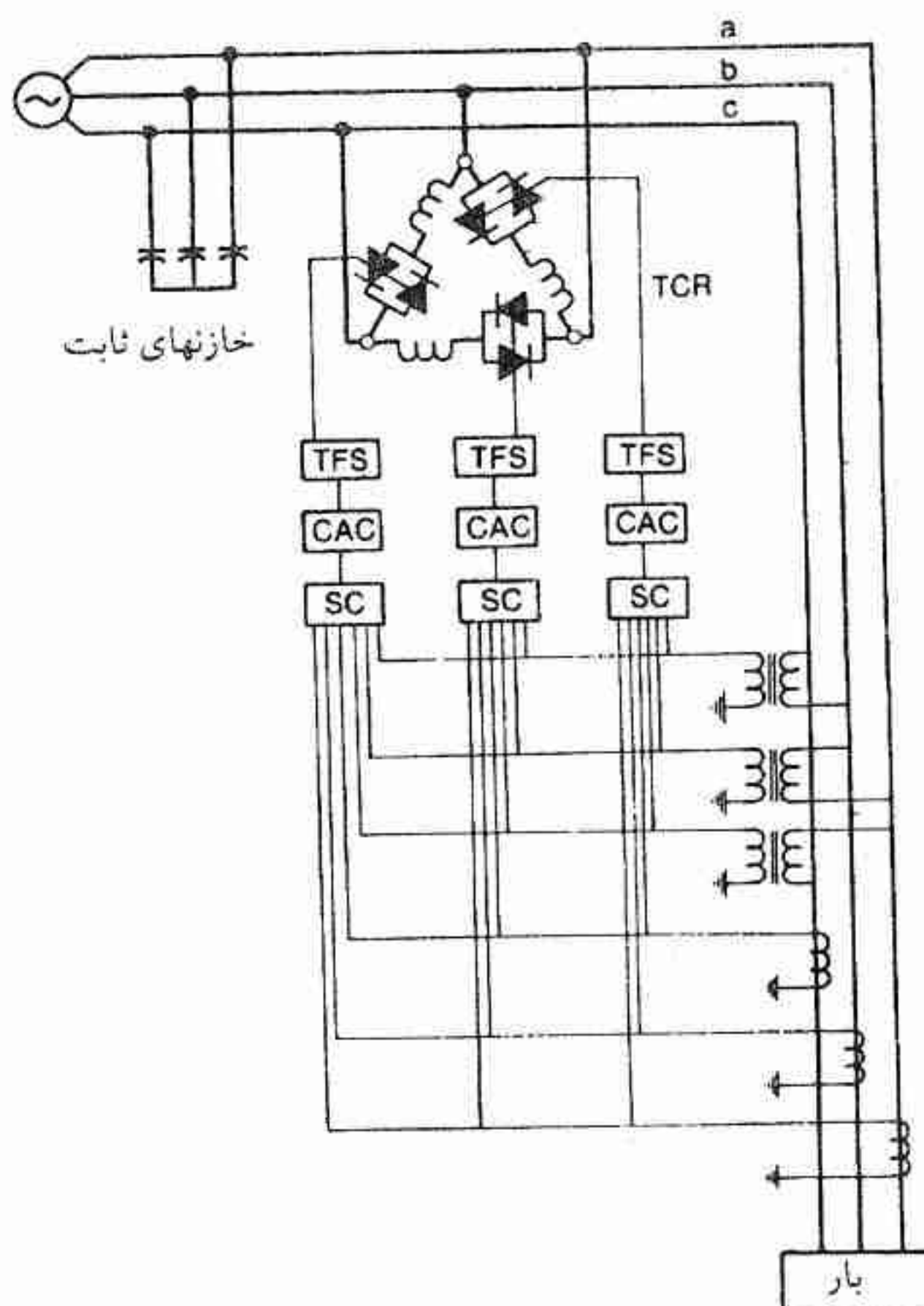


شکل ۱۶ - روشهای کنترل (الف) مدار بسته $C = RG / (1 + GH)$ (ب) مدار باز $C = RG$ $H =$ تابع انتقال برگشت (فیدبک) $G =$ تابع انتقال رو به جلو (فوروارد).

که در آن $B_L(\sigma)$ از معادله ۵ و شکل ۷ به دست می‌آید. در نتیجه، این دو معادله جبری بایستی برای σ حل شوند. معادله ۵ غیرخطی است و یکی از روش‌های عملی این است که مداری با تابع انتقال $(\sigma - \sin \sigma) k_v \pi$ را تشکیل دهیم. وقتی چنین تابعی قبل از تابع انتقال TCR (معادله ۵) در حلقه کنترل قرار گیرد، در نتیجه یک رابطه خطی بین سیگنال سوسپتانس مطلوب و سوسپتانس واقعی جبران‌کننده حاصل می‌شود. این موضوع برای یک فاز در شکل ۱۸ نشان داده شده است. K_1 و K_2 ضریب بهره قابل تنظیم هستند. بایستی خاطرنشان کرد که تولید سیگنالی که صریحا معرف مقدار مطلوب B_L باشد، در تمام سیستم‌های کنترل جبران‌کننده صورت نمی‌گیرد. البته این مرحله در روش‌های مشخصی که تعدادی از آنها در فصل ۹ تشریح می‌شود، حذف می‌گردد.

روش کنترل مدار بازی که تاکنون توصیف شد برای جبران بار مناسب است که در آن پاسخ مطلوب جبران‌کننده کاملاً برحسب ادمیتانسهایی که از جریان و ولتاژ لحظه‌ای بار محاسبه می‌شود

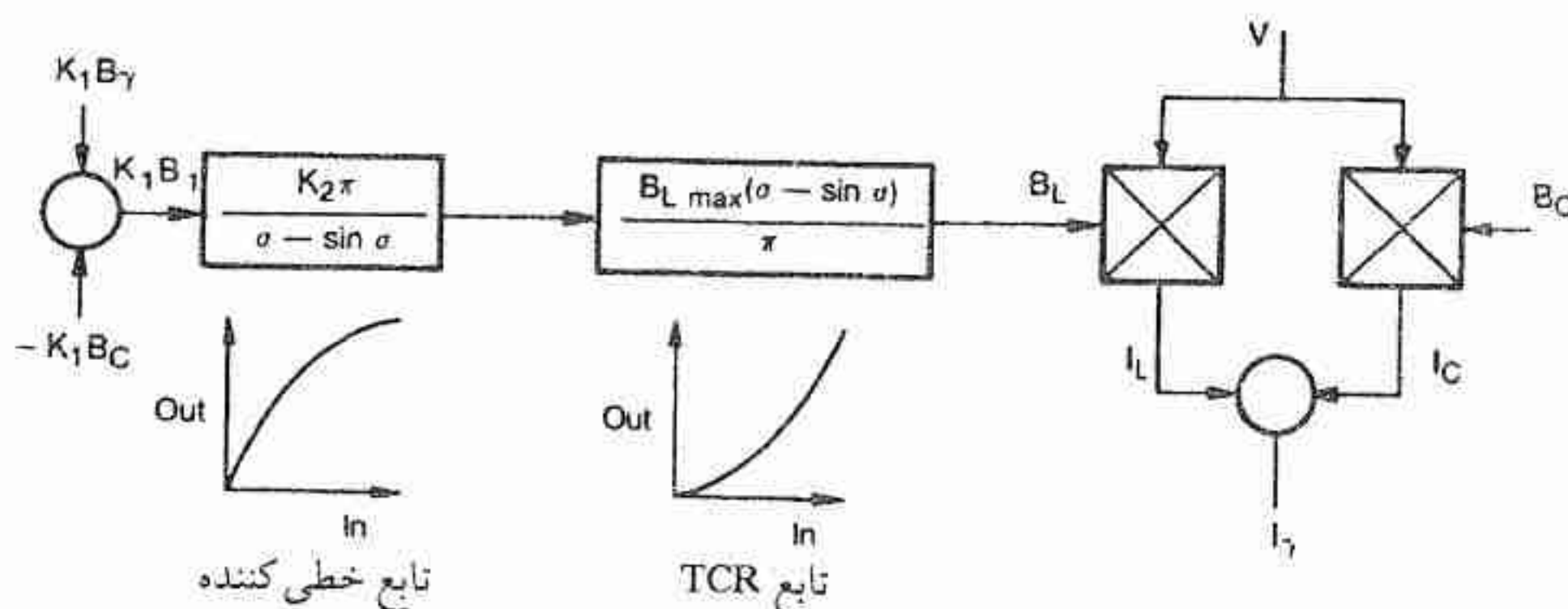
بیان می گردد. در این روش کنترل، عمل تنظیم کنندگی ولتاژ^۱ صریح وجود ندارد.



شکل ۱۷ - سیستم کنترل مدار باز در جبران کننده چشمک زدن لامپ. TFS=سیستم آتش کننده تابریستور
CAC=محاسبه کننده زاویه هدایت SC=محاسبه کننده سوسپتانس.

کنترل مدار بسته. روش کنترل مدار - باز که هم اکنون تشریح شد، را نمی توان در نقطه میانی خط انتقال که دور از بار و منبع تغذیه است اعمال کرد. در این گونه موارد معمولاً هدف تنظیم کردن ولتاژ است و از سیستم کنترل مدار - بسته استفاده می گردد. یک خطای ولتاژ^۲ (یعنی تفاوت بین ولتاژ واقعی و ولتاژ مرجع^۳ اعمال شده به جبران کننده) اندازه گیری شده و از آن برای افزایش یا کاهش سوسپتانس جبران کننده استفاده می شود تا آنکه خطای ولتاژ به سطح قابل قبولی کاهش یابد.

عملکرد این نوع کنترل در شکل ۱۹ نشان داده شده است.



$$B_L = \frac{K_1 B_1 K_2}{(\sigma - \sin \sigma) / \pi} \times \frac{B_{L \max} (\sigma - \sin \sigma)}{\pi}$$

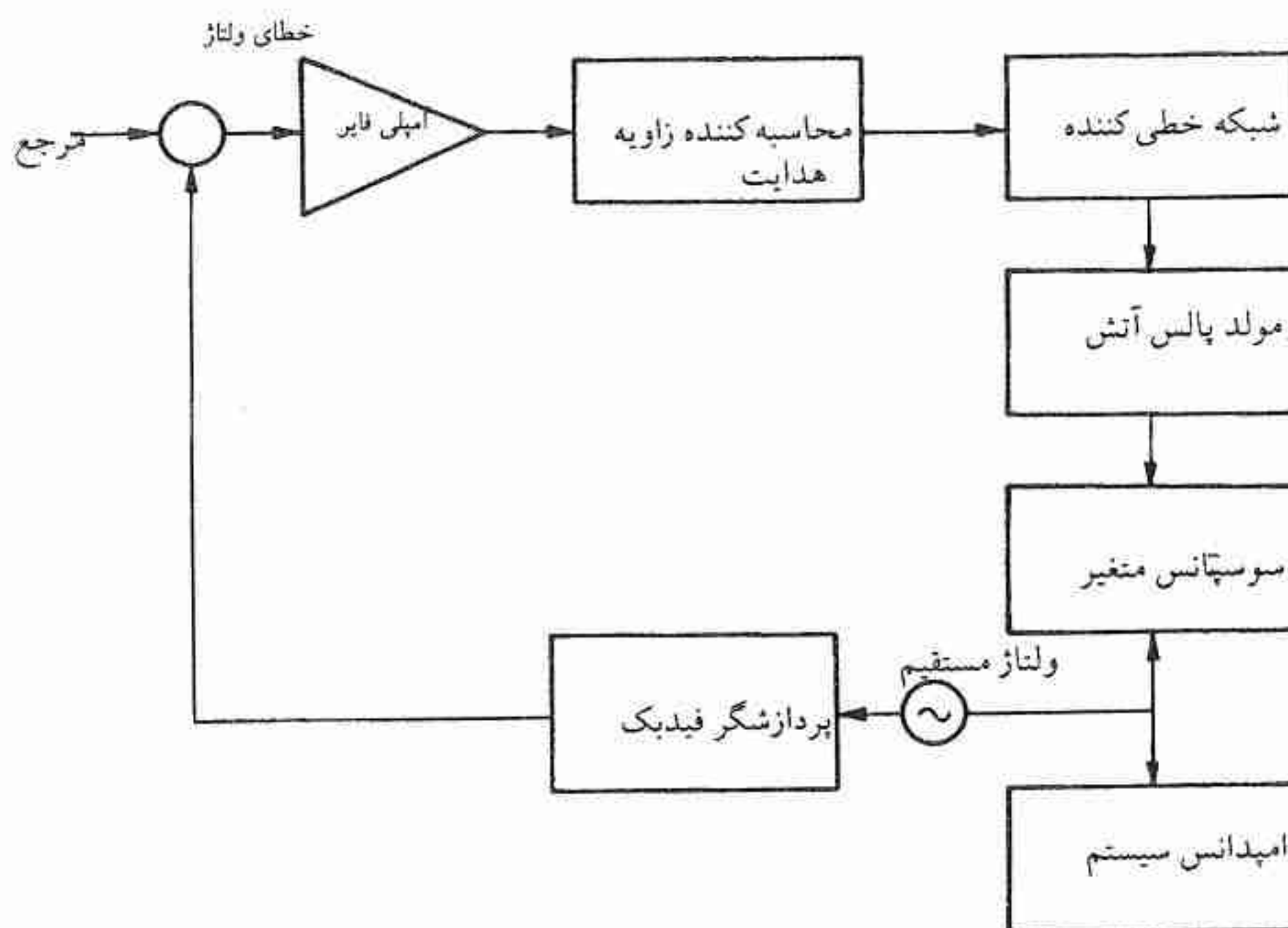
$$= K_1 K_2 B_1 B_{L \max}$$

$$= K B_1$$

شکل ۱۸ - بلوک دیاگرام TCR. $K_1 B_1$ = سیگنالی که معرف سوسپتانس جبران کننده مورد لزوم است (از روی جریان و ولتاژ بار محاسبه می شود).

نسبت جریان جبران کننده به خطای ولتاژ، شیب مشخصه ولتاژ - جریان را مشخص می کند. سرعت پاسخ و پایداری به وسیله ضریب بهره حلقه^۱ و ثابت های زمانی سیستم تنظیم، معین می گردد. ضریب بهره حلقه با امپدانس منبع (یا سیستم) متناسب است. معنایش این است که وقتی امپدانس سیستم افزایش می یابد جبران کننده پاسخ سریع تری خواهد داشت اما پایداری آن کاهش می یابد. از آنجایی که رابطه بین خطای ولتاژ و جریان جبران کننده طبیعتاً غیرخطی است، یک شبکه خطی کننده (در اصول مشابه محاسبه کننده سوسپتانس) لازم است تا مشخصه خطی مطلوب حاصل شود. دقت سیستم تنظیم کننده به خطی بودن، پایداری و دقت کلیه اجزاء نشان داده شده در شکل ۱۹ (به استثناء امپدانس سیستم) بستگی خواهد داشت. به این معنا که امپدانس خازن ها، راکتورها و ترانسفورماتورها همگی بایستی ثابت و معلوم باشند.

دقت سیستم را می توان با به کار بردن دو حلقه کنترل بهبود داد (شکل ۲۰). حلقه کنترل داخلی در قالب رگولاتور جریان به رگولاتور ولتاژ اصلی اضافه شده است. اگر ضریب بهره این حلقه خیلی زیاد

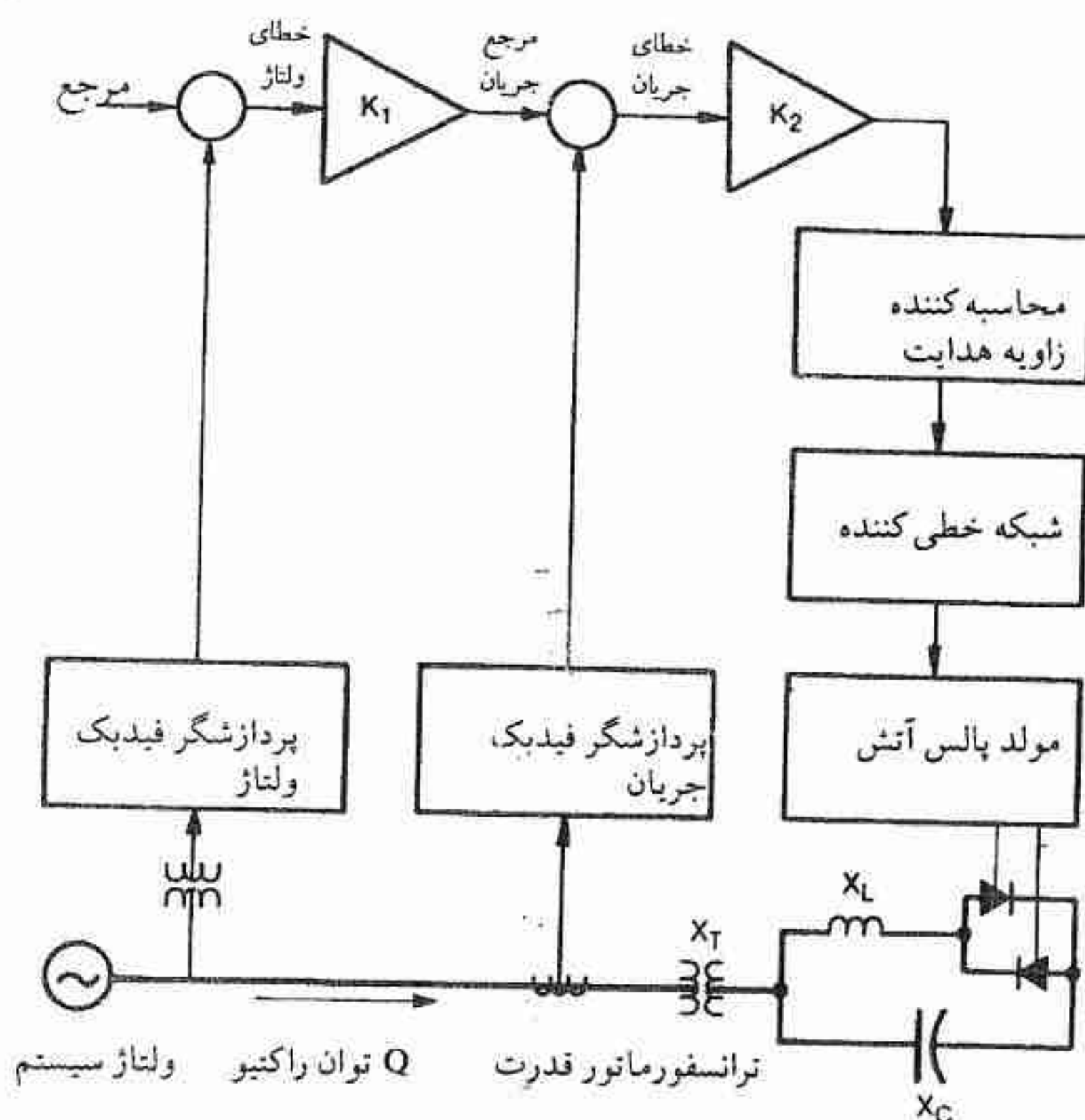


شکل ۱۹ - جبران کننده با رگولاتور ولتاژ

باشد آنگاه خطای جریان قابل صرف نظر کردن است. معنایش این است که جریان راکتیو کنترل شده، متناسب با خطای ولتاژ و مستقل از مقادیر X_L ، X_C و X_T و مستقل از ضریب بهره محاسبه کننده زاویه هدایت، شبکه خطی کننده و مولد پالس آتش خواهد بود. شیب مشخصه کنترل به وسیله ضریب بهره K_1 معین می شود. تقویت کننده (آمپلی فایر) خطای جریان^۱ (K_2) ممکن است یک انتگرال گیر باشد طوری که خطای جریان اساساً صفر می باشد.

ترکیب کنترل مدار باز و مدار بسته. اغلب دو نوع کنترل به صورت ترکیب به کار برده می شوند (شکل ۲۱). به عنوان مثال، در جبران کننده بار (که ممکن است سیستم کنترل مدار باز مشابه شکل ۱۷ در آن به کار رفته باشد) مناسب است که کنترل مدار بسته نیز به آن افزوده شود تا بتواند کمیت هایی را در مقدار میانگین مجاز نگاهدارد. در جبران سازی یک امکان این است که ضریب توان میانگین کلی (بار به علاوه جبران کننده) را تنظیم کرد. امکان دیگر این است که جبران خالص^۲ را در مقدار میانگین

صفر $MVAR$ تنظیم کرد. این روش مفهومی این است که برای بار در حالت ماندگار، جبرانی وجود ندارد اما برای تغییرات بار جبران سریع توسط سیستم کنترل مدار باز اعمال می شود. سرعت پاسخ تنظیم کننده (رگولاتور) توان راکتیو یا ضریب توان مدار بسته در مقایسه با کنترل مدار باز کندتر است. به طور نمونه کنترل مدار باز در حدود ۱ سیکل پاسخ می دهد و حال آنکه سیستم کنترل مدار بسته در حدود ۱ ثانیه پاسخ می دهد.



شکس ۲۰ - جبران کننده همراه با رگولاتور ولتاژ و جریان

۷-۲-۴ مشخصات دیگر جبران‌کننده‌های TCR

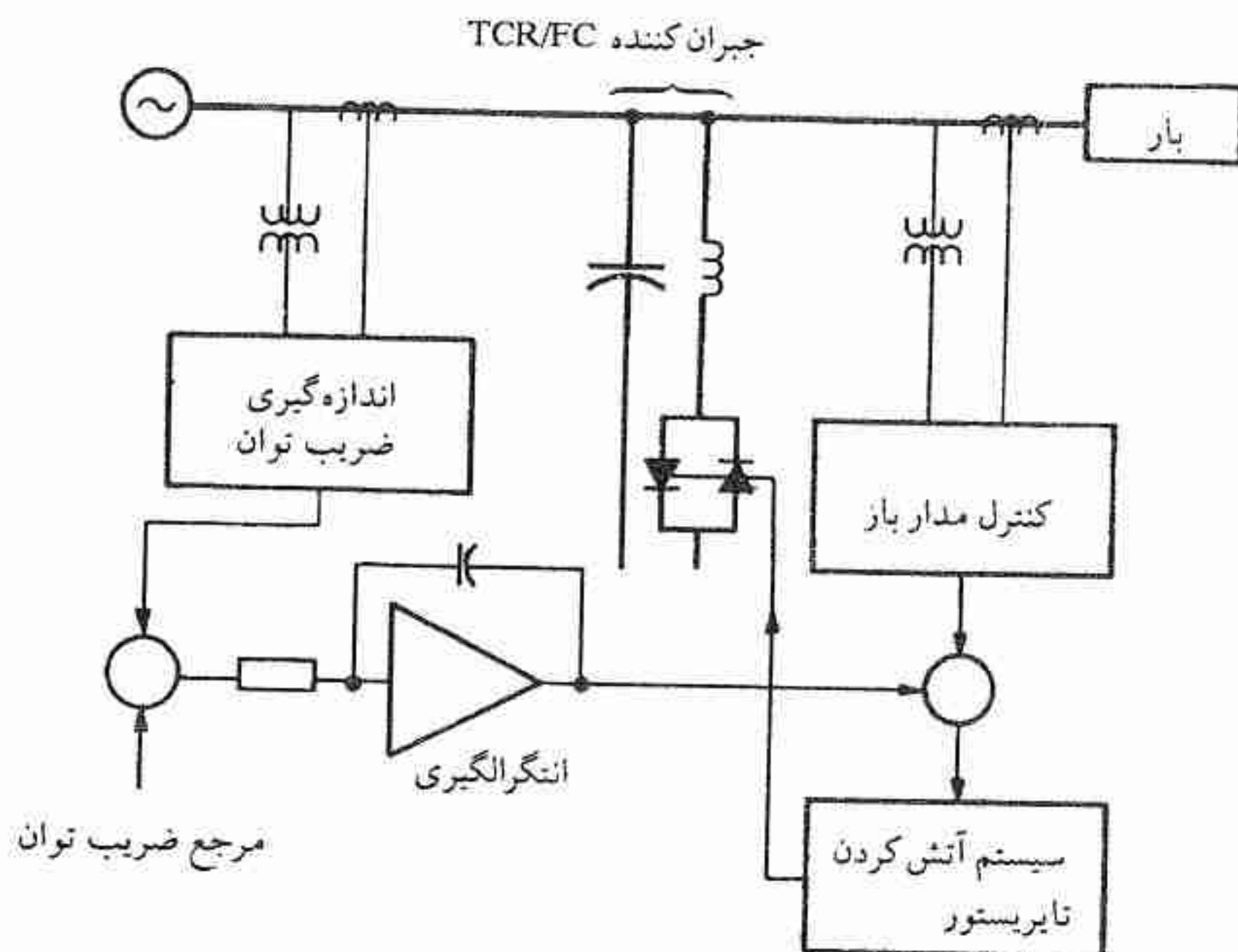
سرعت پاسخ. از بخش ۴-۲-۱ واضح است که زاویه هدایت در هر فاز TCR می تواند در فاصله نیم سیکل های متوالی فرکانس تغذیه با هر مقداری تغییر نماید مشروط بر اینکه σ کمتر از 180° درجه باقی بماند. در کاربردهای سیستم های انتقال ولتاژ بالا که در آنها پایداری و کنترل ولتاژ معمولاً از

اهمیت زیادی برخوردار است به چنین پاسخ سریعی نیازی نیست. با وجود این، زمان پاسخ مجموعه TCR و خازن ثابت برای اغتشاشات فاحش ولتاژ می‌تواند به کوچکی ۲ سیکل (یا حتی کمتر) باشد. در کاربردهای کوره‌های الکتریکی پاسخ سریع از اهمیت زیادی برخوردار است و ماهیت پاسخ انواع جبران‌کننده‌های TCR و TSC به تفصیل در فصل ۹ بحث خواهد شد.

کنترل هر فاز به طور مستقل. در مفهوم TCR مستتر است که سه فاز را می‌توان به طور مستقل کنترل کرد. بنابراین از TCR می‌توان در متعادل کردن فاز همانطوری که در فصل ۱ تشریح شد، استفاده کرد. جبران‌کننده TSC نیز قابلیت کنترل مستقل هر فاز را دارا است، اما به واسطه اینکه در آن تنها تغییر پله‌ای توان راکتیو میسر است، در متعادل کردن سه فاز از دقت خوبی برخوردار نیست. خازن‌های موازی با TCR نه تنها از توانایی TCR در متعادل کردن فاز نمی‌کاهند، بلکه باعث تقویت آن می‌شوند زیرا شبکه جبران‌کننده هر فاز (فصل ۱) به طور کلی به ادمیتانس کاپاسیتیو یا اندوکتیو در هر فاز نیازمند است. TCR نامتعادل در مقایسه با شرایط متعادل، هارمونیک بیشتری را تولید می‌نماید و در نتیجه نیازمندی به فیلتر را افزایش می‌دهد. مخصوصاً هارمونیک سوم در جریان خطوط ظاهر می‌گردد.

پاسخ اضافه ولتاژ و کاهش ولتاژ. یکی دیگر از مشخصه‌های مهم تمامی جبران‌کننده‌های استاتیک رفتار آنها تحت شرایط ولتاژ خیلی زیاد و ولتاژ خیلی پایین است. از نقطه نظر سیستم، این موضوع قبلاً در فصل ۳ مورد بحث قرار گرفته است.

با مراجعه به مشخصه ماندگار V/I_1 شکل ۸، چنانچه ولتاژ از نقطه‌ای که مربوط به حداکثر زاویه هدایت است افزایش یابد، کنترل‌ها تا سرحد محدود کنترل خودشان پیش رفته و تا جایی که به جریان پایه مربوط می‌شود، TCR مشابه یک راکتور خطی رفتار می‌نماید. ممکن است راکتانس TCR برای محدود کردن افزایش ولتاژ سیستم در بدترین شرایط، خیلی زیاد باشد و سرانجام ممکن است ضرورت داشته باشد که زاویه هدایت را کاهش دهیم تا تایریستورها را از حرارت زیاد ناشی از جریان زیاد حفاظت نماییم مخصوصاً هنگامی که این جریان به طور مستمر ادامه یابد. بعضی از کنترلرهای تایریستوری مجهز به مبدل (ترانس‌دیوسر) حرارتی^۱ و یا مداری که درجه حرارت پیوند تایریستور را نشان می‌دهد، می‌باشند. (فصل ۵). وقتی درجه حرارت در پیوند تایریستور زیاد باشد



شکل ۲۱ - ترکیب کنترل مدار بسته و مدار باز

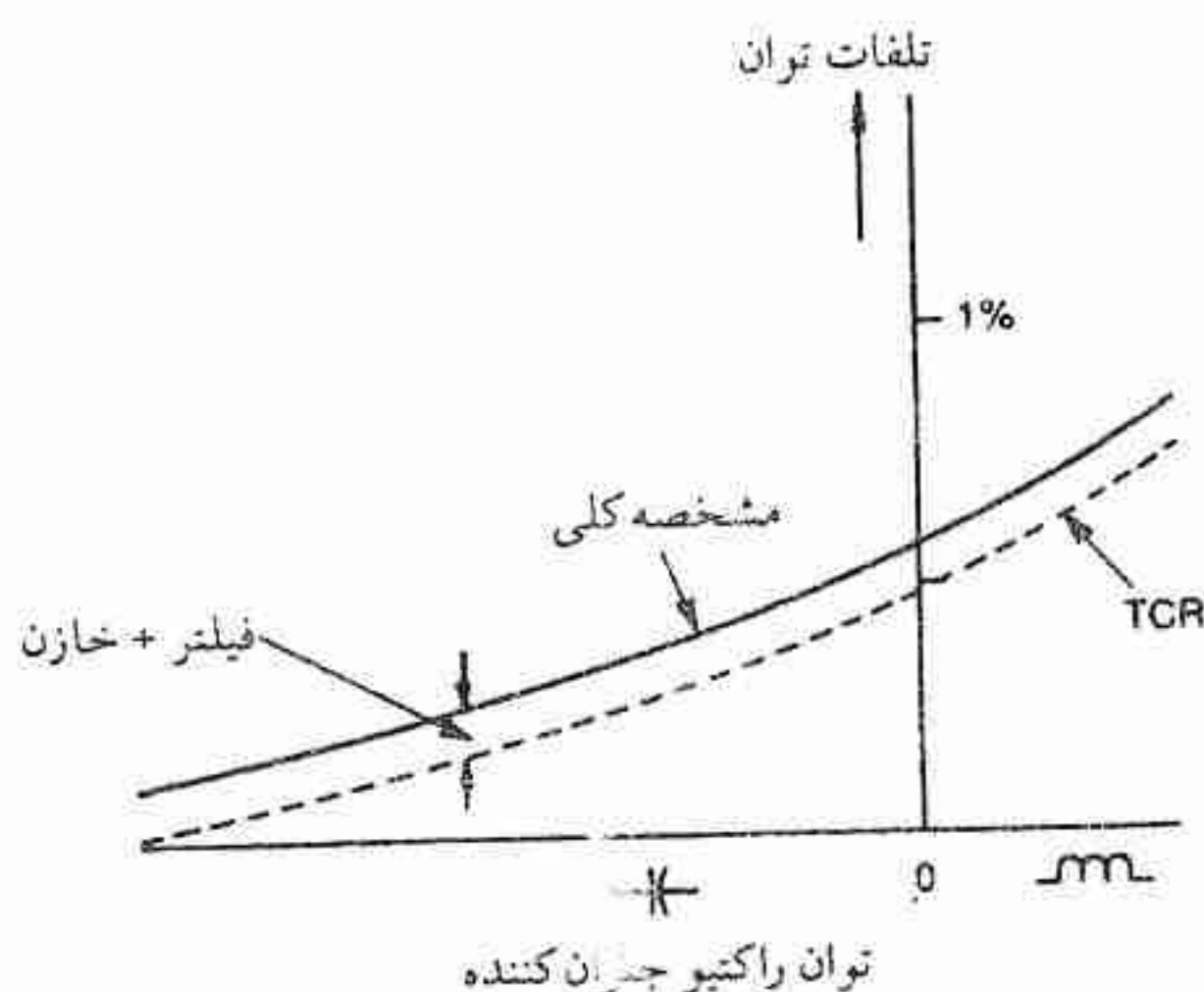
احتمال خسارتی که از ناحیه اضافه ولتاژ بر آن وارد می شود، افزایش می یابد. جنبه محدود بودن جریان سیستم کنترل در شکل ۸ نشان داده شده است. ولتاژهای بالاتر از آنچه در شکل ۸ نشان داده شده است، منجر به اشباع ترانسفورماتور کاهنده گردیده و در نتیجه جریان مغناطیس کننده به سرعت افزایش می یابد. در باس ولتاژ - بالا این مساله در کاهش ولتاژ اثر مفیدی خواهد داشت. اصول مشابهی را می توان در TCT اعمال کرد. نبایستی ولتاژ زانوی اشباع ترانسفورماتور خیلی پایین باشد، در غیر این صورت مساله فرو رزونانس^۱ تحقق خواهد یافت. در ولتاژهای بالاتر از این کاربرد وسایل حفاظتی ضروری است و این شامل عملکرد کلیدهای قدرت و برقگیرها خواهد بود. البته فراهم کردن یک مارجین (فاصله اطمینان) اضافه بار^۲ زیاد ذاتی در رنج کنترل TCR امکان پذیر است اما این کار مستلزم هزینه سنگینی است.

وقتی ولتاژ سیستم پایین تر از رنج کنترلی جبران کننده قرار می گیرد، جبران کننده مشابه یک خازن ثابت رفتار می کند و تایریستورها خاموش می شوند. اگر چنانچه خازن های موازی موجود نباشند و یا قبلاً از مدار خارج شده باشد، TCR به تنهایی اثری نخواهد داشت. مواردی پیش می آید که در آنها

1- Ferroresonance

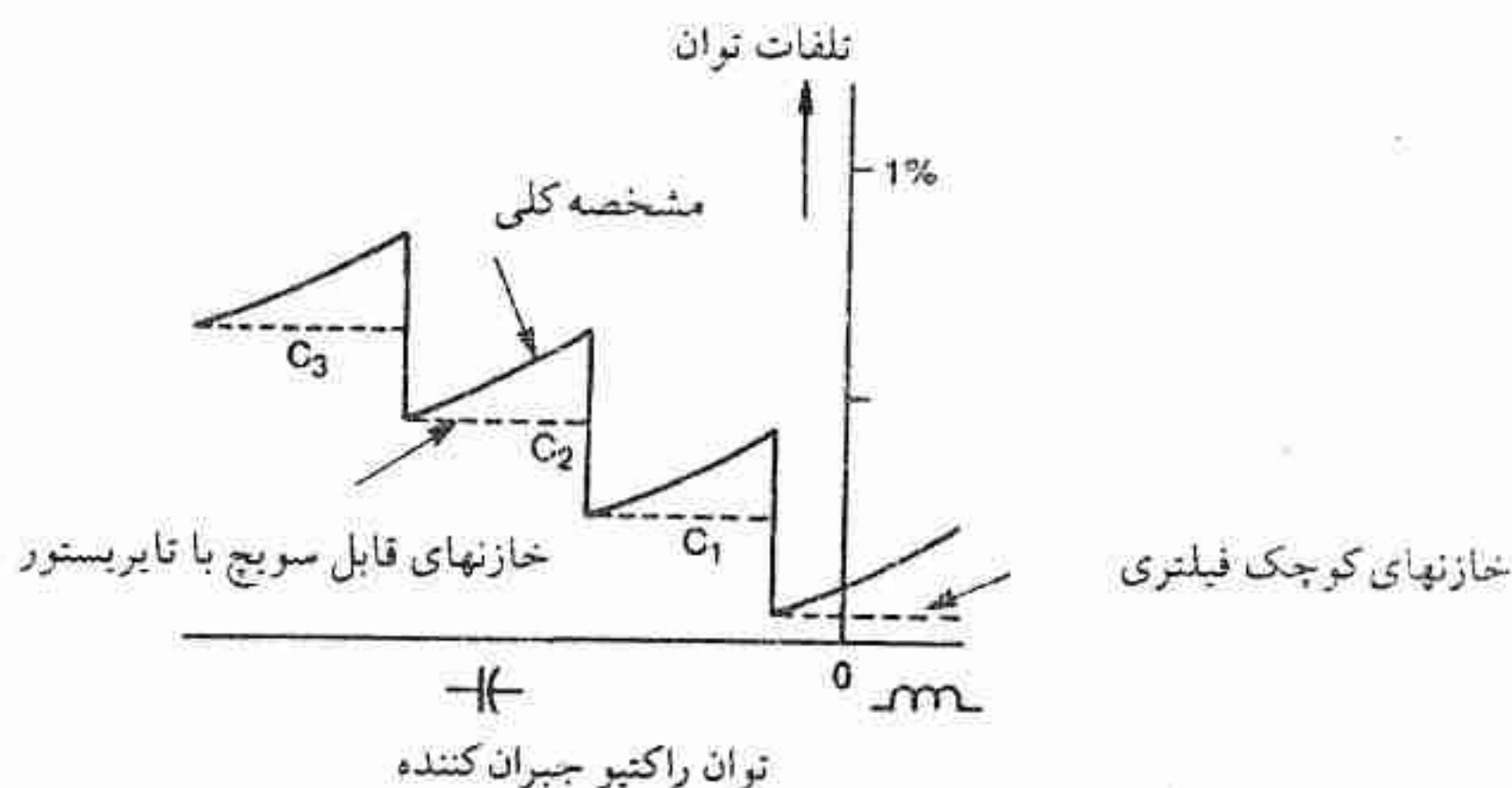
2- Overload - Margin

وقتی اتصال کوتاه رفع می گردد ولتاژ ابتدا به مقدار زیادی افزایش می یابد و در اینگونه موارد TCR در محدود کردن اضافه ولتاژ نقش مفیدی دارد و ممکن است در حقیقت تا حدودی به همین منظور نصب شده باشد. متعاقباً، از ظرفیت کامل پس فاز و پیش فاز جبران کننده می توان در میرا کردن نوسانات توان استفاده کرد (فصل ۳). و با دخالت دادن سیگنال فیدبک مخصوص در سیستم کنترل TCR اثر میرایی را افزایش داد.



شکل ۲۲ - مشخصه تلفات توان در جبران کننده TCR با خازن یا فیلتر موازی.

تلفات توان - تلفات توان در جبران کننده مساله حائز اهمیتی است. به واسطه هزینه بالای انرژی، سرمایه گذاری برای تلفات با سرمایه گذاری قیمت جبران کننده قابل مقایسه است. در یک جبران کننده TCR توام با خازن موازی ثابت تلفات با زاویه هدایت افزایش می یابد که در شکل ۲۲ بر حسب درصد توان راکتیو خازنی نامی نشان داده شده است. تلفات در برگیرنده تلفات اهمی راکتور و هدایت، سوئیچینگ و تلفات دیگر کنترلر تایریستور، می باشد. (تلفات ترانسفورماتور و وسایل کمکی در شکل ۲۲ منظور نشده است). تلفات با کاهش توان راکتیو پیش فاز و افزایش توان راکتیو پس فاز، افزایش می یابد. روند مخالف این در جبران کننده ترکیبی - که در آن خازن ها به صورت گروهی سوئیچ می شوند و TCR کوچک تر است - حاصل می گردد. مشخصه تلفات این نوع جبران کننده مطابق شکل ۲۳ می باشد. این مثال مربوط به جبران کننده با خازن های تایریستور سوئیچ است. شکل کلی مشخصه جبران کننده ای که در آن خازن ها بطور مکانیکی سوئیچ می شوند مشابه همین است اما تلفات آن در رژیم پیش فاز (کاپاسیتیو) خیلی کمتر است.



شکل ۲۳ - مشخصه تلفات توان در جبران کننده ترکیبی TSC/TCR

۳-۴ خازن تایرستور سوئیچ^۱

۳-۴-۱ اصول کار

اصول کار خازن تایرستور سوئیچ (TSC) در شکل ۲۴ و ۲۵ نشان داده شده است. سوسپتانس به وسیله کنترل کردن تعداد خازنهای در حال هدایت تنظیم می گردد. همواره هر خازن برای مجموعه ای از نیم سیکل ها هدایت می کند. وقتی k خازن به k موازی قرار دارند و مطابق شکل ۲۵ هر یک توسط یک سوئیچ کنترل می شود سوسپتانس کل می تواند ترکیبی از k سوسپتانس تکی، یعنی مقادیر ۰، ۱، ۲، ... یا k در هر زمان باشد. بنابراین سوسپتانس کلی در یک روش پله ای تغییر می کند. در اصول می توان پله ها را تا حد امکان با افزایش تعداد خازن ها کوچک کرد. برای یک تعداد معین k حداکثر تعداد پله ها در صورتی حاصل می شود که حداقل تمامی سوسپتانس های تکی متفاوت باشند. البته به دلیل پیچیدگی کنترل و مقرون به صرفه بودن داشتن سوسپتانس های تکی برابر، معمولاً در جبران کننده ها چنین قابلیت انعطافی مشاهده نمی شود. یک روش بینابین داشتن سیستم دوتایی یا باینری^۲ است که در آن $k = 1$ سوسپتانس مساوی B و یک سوسپتانس $B/2$

۱- مطالب این بخش با کسب اجازه از انجمن مهندسين برق (IEE) چاپ شده است. (مراجعه شود به مقاله:

T.J.E Miller and P.Chadwick "An analysis of switching transients in thyristor - switched - capacitor compensated system" IEE conf. pub. NO. 205 (الی آخر)

2- Binary System

وجود دارد. سوسپتانس نصف، تعداد ترکیب‌ها را از k به $2k$ افزایش می‌دهد. رابطه بین جریان جبران‌کننده و تعداد خازن‌های در حال هدایت در شکل ۲۶ نشان داده شده است (برای ولتاژ ترمینال ثابت). با صرف‌نظر کردن از گذرای ناشی از سوئیچ کردن خازن، جریان سینوسی است یعنی حاوی هارمونیک نمی‌باشد.

۴-۳-۲ گذرای سوئیچ کردن خازن و مفهوم سوئیچ کردن بدون گذرا^۱

هنگامی که جریان هر خازن به نقطه صفر طبیعی‌اش می‌رسد تایریستورها می‌توانند خاموش شوند و در نتیجه جریانی عبور نمی‌کند. توان راکتیو تحویلی به سیستم قدرت به طور ناگهانی متوقف می‌گردد. بنابراین خازن قطع شده از مدار به صورت باردار باقی می‌ماند (شکل ۲۷ الف). به واسطه وجود همین بار، ولتاژ دو سر تایریستورها بین صفر و ۲ برابر پیک ولتاژ فاز تغییر می‌کند. تنها لحظه‌ای که تایریستورها می‌توانند بدون گذرا آتش شوند، لحظه‌ای است که ولتاژ دو سر آنها برابر صفر است (شکل ۲۷ ب). و این لحظه بر پیک ولتاژ فاز منطبق است.

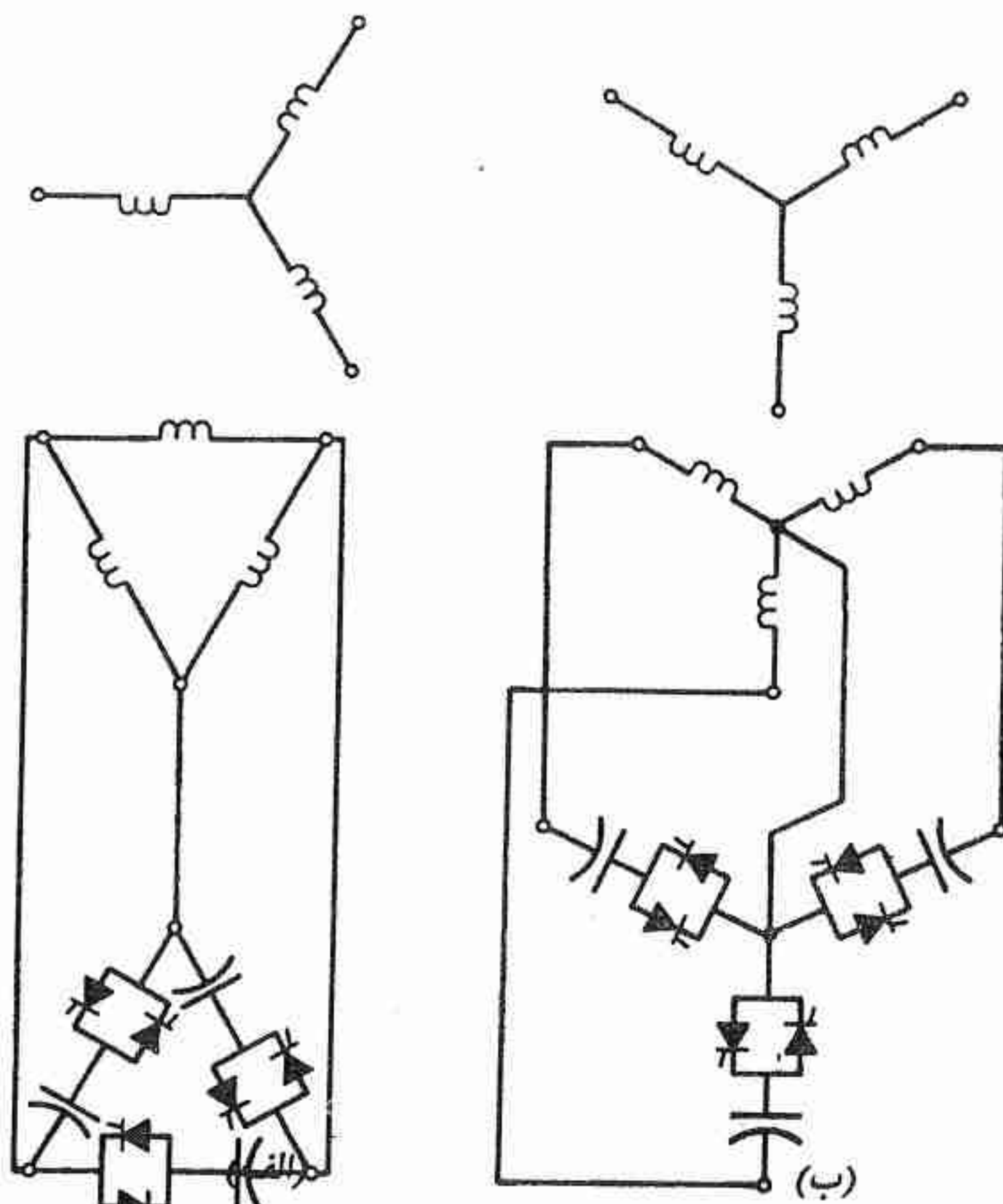
سوئیچ کردن بدون گذرای ایده‌ال. به منظور توصیف اهمیت مفهوم سوئیچ کردن بدون گذرا، مدار ساده‌ای مرکب از خازن و منبع ولتاژ - بدون در نظر گرفتن سایر عناصر مدار - به کار برده می‌شود. شکل ۲۸ چنین مداری را نشان می‌دهد. با منبع ولتاژ سینوسی $v = \hat{v} \sin(\omega t + \alpha)$ تایریستورها فقط می‌توانند در پیک ولتاژ آتش شوند، یعنی وقتی که

$$\frac{dv}{dt} = \omega \hat{v} \cos(\omega t + \alpha) = 0 \quad (9)$$

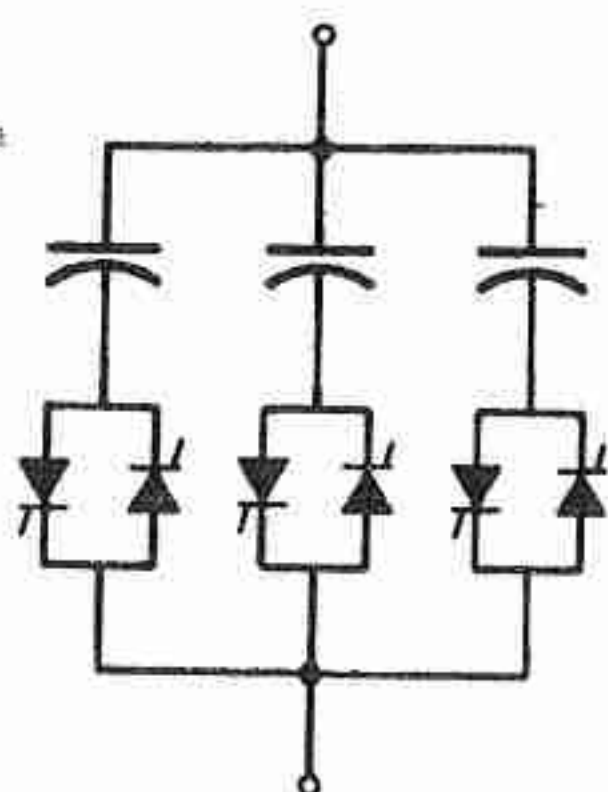
آتش کردن تایریستور در لحظات دیگر مستلزم این است که جریان $i = C dv / dt$ یک تغییر پله‌ای منفصل در لحظه $t = 0 +$ داشته باشد. البته در عمل به واسطه وجود اندوکتانس چنین تغییر پله‌ای تحقق پیدا نمی‌کند که آن را در بخش بعدی مورد نظر قرار می‌دهیم. برای تحلیل شکل ۲۸ لازم است که هدایت تایریستور در پیک ولتاژ صورت گیرد و با این محدودیت، جریان توسط رابطه زیر بدست می‌آید.

$$i = C \frac{dv}{dt} = \hat{v} \omega C \cos(\omega t + \alpha) \quad (10)$$

که در آن $\alpha = \pm \pi/2$ است. حال $\omega C = B_C$ سوسپتانس فرکانس پایه خازن و $X_C = 1/B_C$ راکتانس



شکل ۲۴ - آرایش دیگری از خازن تایرستور سوئیچ سه فاز. (الف) ثانویه با اتصال مثلث، TSC با اتصال مثلث (ب) ثانویه با اتصال ستاره، TSC با اتصال ستاره (سیستم ۴ سیمه)



شکل ۲۵ - اصول کار TSC. هر فاز شکل ۲۴ شامل ترکیب موازی از خازنهای سوئیچ شونده این نوع می باشد.

آن است طوری که با $\alpha = \pm \pi/2$

$$i = \pm \hat{v} B_c \sin \omega_0 t = +\hat{i}_{ac} \sin \omega_0 t \quad (11)$$

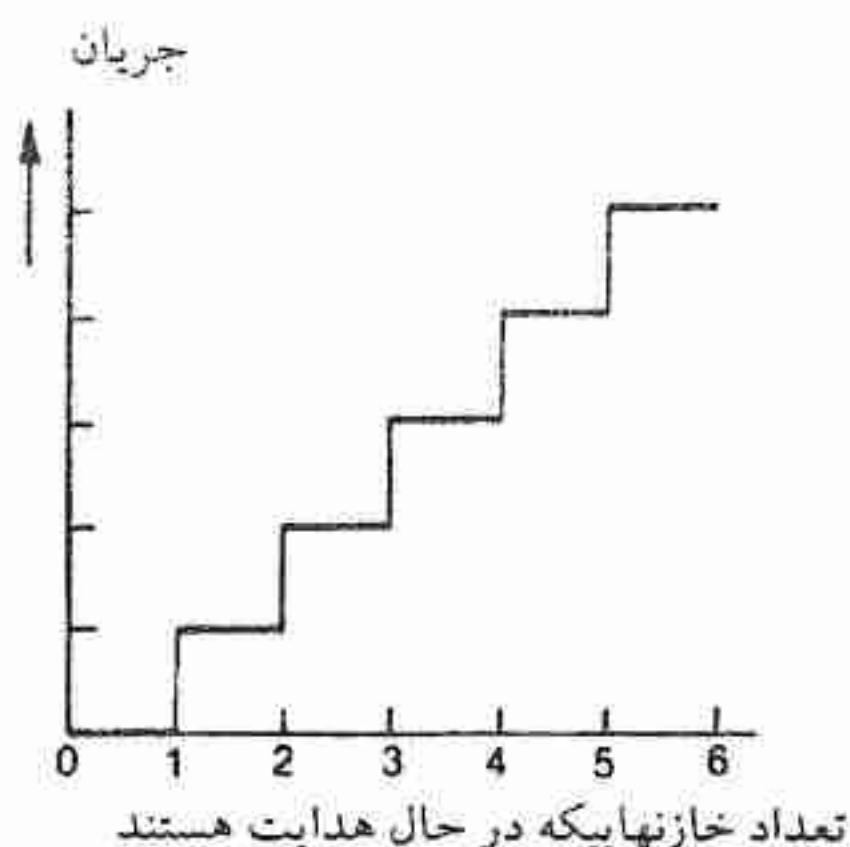
که در آن مقدار پیک ac است، $\hat{i}_{ac} = \hat{v} B_c = \hat{v}/X_c$

در غیاب سایر عناصر مدار، همچنین لازم است مشخص گردد که خازن تا ولتاژ $V_{co} = \pm \hat{v}$ قبلاً شارژ گردیده است، یعنی خازن بایستی بار قبلی $\pm \hat{v} / C$ را نگاه دارد. این به این دلیل است که هر ولتاژ dc قبلی خازن را نمی‌توان در مدار ساده شکل ۲۸ تبیین کرد. در عمل این ولتاژ در دو سر اندوکتانس و مقاومت توزیع شده و بخشی از آن در دو سر تایریستور قرار می‌گیرد.

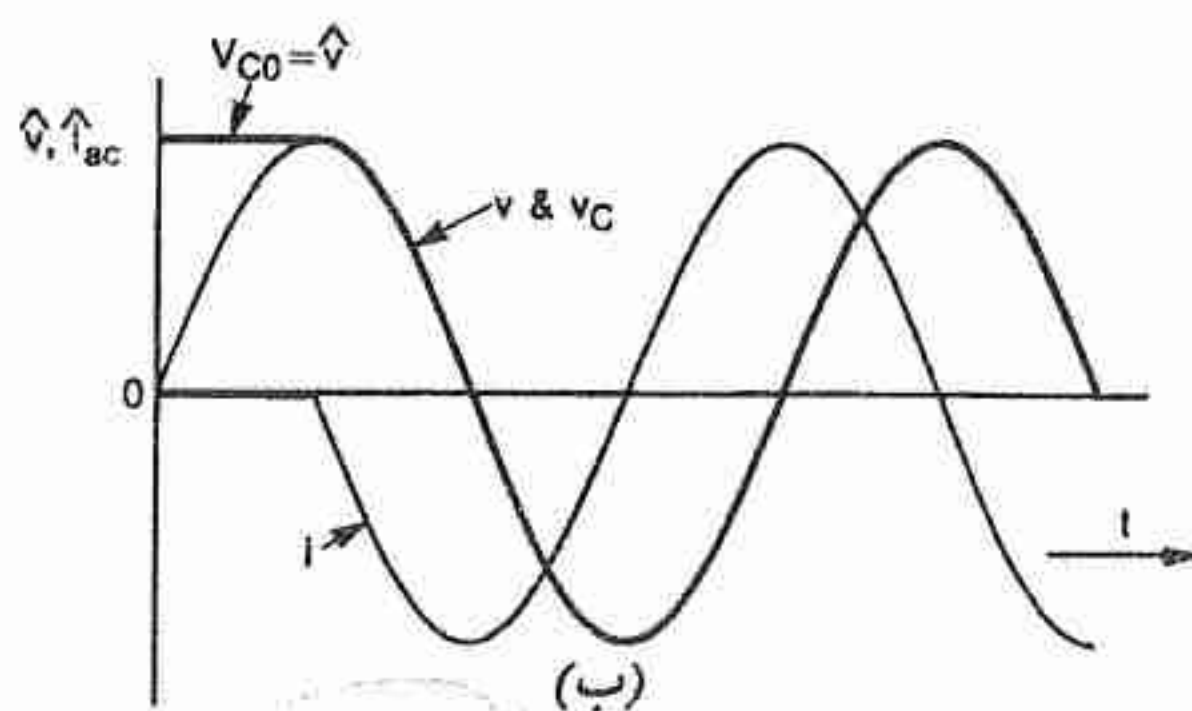
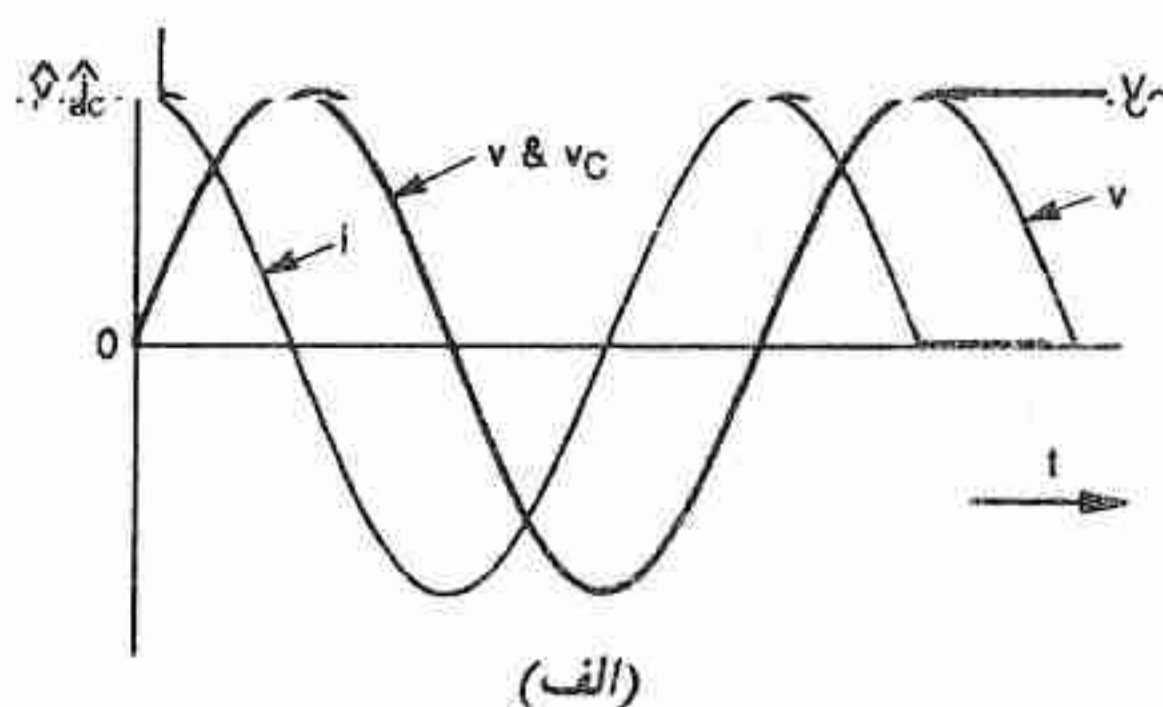
با این محدودیت‌ها، یعنی $dv/dt = 0$ و $V_{co} = \pm \hat{v}$ در $t = 0$ ، مطابق شکل ۲۷ یک حالت سوئیچینگ بدون گذرای ایده‌آل داریم. این مفهوم اساس و پایه کنترل سوئیچینگ در جبران‌کننده TSC است. در اصل، هرگاه هر یک از خازن‌ها تا پیک مثبت یا منفی ولتاژ سیستم شارژ می‌شود می‌توان هر یک از آنها و یا تمامی آنها را برای هر تعدادی از نیم سیکل‌ها بدون گذرا به مدار وصل و یا از آن قطع نمود.

گذاری سوئیچ کردن خازن در حالت کلی. در شرایط عملی لازم است اندوکتانس و مقاومت اهمی مدار را در نظر گرفت. در وهله اول افزودن اندوکتانس به مدار شکل ۲۸ را در نظر می‌گیریم، در هر مدار عملی TSC بایستی یک حداقل مقدار اندوکتانس سری کافی وجود داشته باشد تا di/dt را در محدوده توانایی تایریستور نگاه دارد. در بعضی از مدارها ممکن است مقدار اندوکتانس بیشتر از این حداقل مقدار باشد. در تحلیل زیر از مقاومت اهمی صرف‌نظر می‌شود زیرا مقدارش عموماً کوچک است و حذف آن چندان تفاوت قابل ملاحظه‌ای در محاسبات چند پیک اولیه ولتاژ و جریان ایجاد نمی‌کند.

حضور توام اندوکتانس و کاپاسیتانس باعث ایجاد گذرای نوسانی می‌گردد. نشان داده خواهد شد که فرکانس طبیعی گذرا یک عامل کلیدی در اندازه ولتاژ و جریان پس از عمل سوئیچینگ است، که کاملاً تحت کنترل طراح نخواهد بود زیرا اندوکتانس سری کل در برگیرنده اندوکتانس سیستم تغذیه است که اگر نگوئیم به کلی نامشخص است، ممکن است مقدارش به طور تقریب مشخص باشد. همچنین این اندوکتانس شامل اندوکتانس ترانسفورماتور کاهنده (اگر به کار رفته باشد) است که در معرض قیود دیگری است که نمی‌توان آن را آزادانه انتخاب کرد.

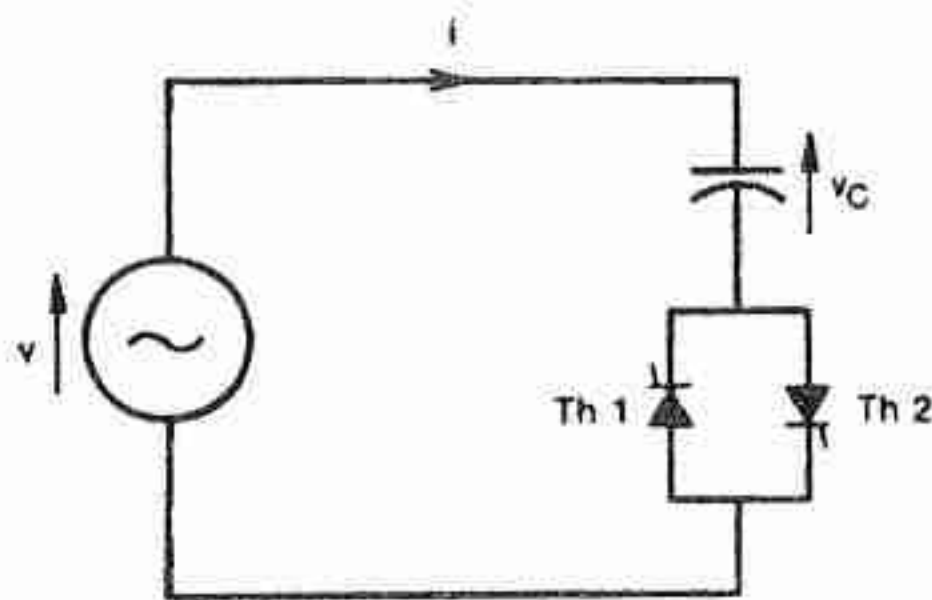


شکل ۲۶ - ارتباط بین جریان و تعداد خازنهای TSC که در حال هدایت هستند.



شکل ۲۷ - شکل موجهای سوئیچ کردن ایده آل بدون گذرا (الف) وصل کردن خازن (ب) قطع کردن خازن.

همیشه ممکن نیست که خازن را در لحظه پیک ولتاژ تغذیه به سیستم اتصال داد، ضرورت دارد که سوال کنیم چه لحظات دیگری از سیکل ولتاژ تغذیه را می توان تشخیص داده و برای آتش کردن تایرستور به کار بندیم و در این صورت گذرای حاصل چگونه خواهد بود.



شکل ۲۸ - مداری که برای تحلیل سوییچ کردن بدون گذرا بکار رفته است.

مدار مطابق شکل ۲۹ است. معادله ولتاژ بر حسب تبدیل لاپلاس به شکل زیر است،

$$V(s) = \left[Ls + \frac{1}{Cs} \right] I(s) + \frac{V_{co}}{s} \quad (12)$$

ولتاژ تغذیه با رابطه $v = \hat{v} \sin(\omega_o t + \alpha)$ داده شده است. زمان از اولین لحظه آتش تایریستور که مطابق با زاویه آتش α بر روی موج ولتاژ است، اندازه‌گیری می‌شود. با عملیات ساده تبدیل و تبدیل عکس می‌توان جریان لحظه‌ای را به دست آورد.

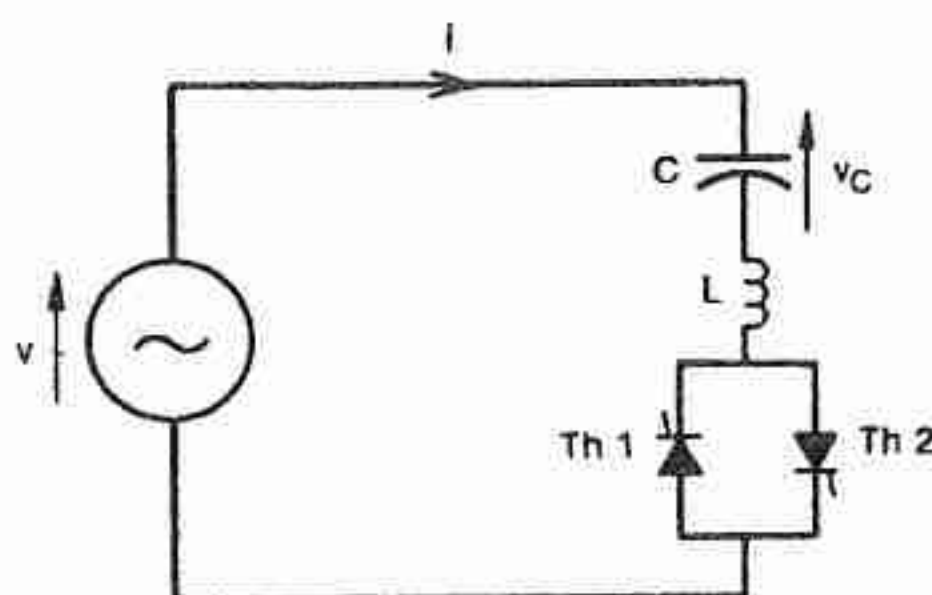
$$i(t) = \hat{i}_{ac} \cos(\omega_o t + \alpha) - nB_c \left[V_{co} - \frac{n^2}{n^2 - 1} \hat{v} \sin \alpha \right] \sin \omega_n t - \hat{i}_{ac} \cos \alpha \cos \omega_n t \quad (13)$$

که در آن فرکانس طبیعی مدار

$$\omega_n = 1/\sqrt{LC} = n\omega_o \quad (14)$$

و

$$n = \sqrt{X_C/X_L} = \frac{\omega_o L}{1/\omega_o C} = \omega_o^2 LC \quad (15)$$



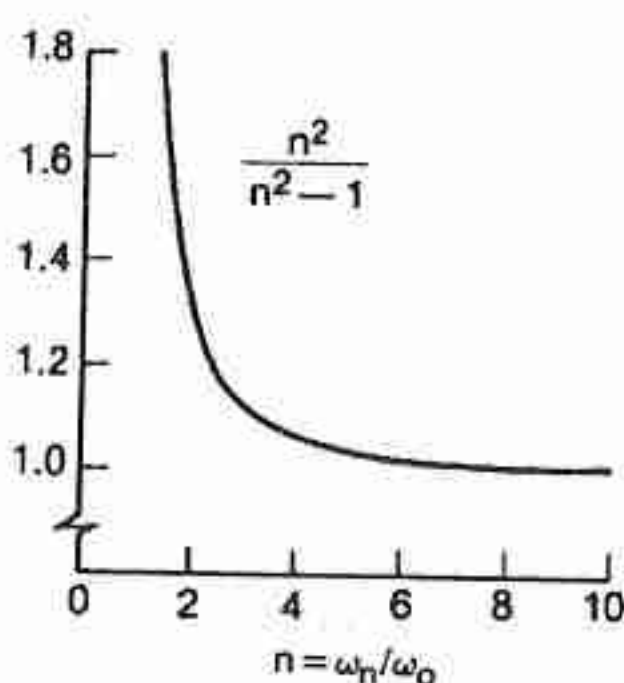
شکل ۲۹ - مداری که برای تحلیل سوییچ کردن خازن در شرایط عملی بکار رفته است.

که در آن n پریونیت فرکانس طبیعی است.

جریان دارای مولفه فرکانس پایه i_{ac} است که از ولتاژ تغذیه $\pi/2$ رادیان جلوتر است. دامنه آن \hat{i}_{ac} به وسیله رابطه زیر به دست می آید

$$\hat{i}_{ac} = \hat{v} B_c \frac{n^2}{n^2 - 1} \quad (16)$$

که به طور طبیعی با سوسپتانس فرکانس پایه خازن و اندوکتانس سری متناسب است یعنی $B_c n^2/(n^2 - 1)$ جمله $n^2/(n^2 - 1)$ ضریب بزرگنمایی است که همناوبی جزئی مدار $L - C$ را توضیح می دهد. اگر مقدار قابل ملاحظه اندوکتانس موجود باشد، n می تواند مقدار کم $2/5$ و یا حتی کمتر را به خود بگیرد و ضریب بزرگنمایی به مقدار $1/2$ یا بالاتر می رسد. در شکل ۳۰ ترسیم شده است.



شکل ۳۰ - $n^2/(n^2 - 1)$ ضریب بزرگنمایی جریان و ولتاژ.

افزایش دادن L و C

دو جمله انتهایی سمت راست معادله ۱۳ نمایانگر مولفه های نوسانی جریان مورد انتظار است که دارای فرکانس ω_n است. در عمل، مقاومت اهمی باعث کاهش این جملات می شود. در بخش بعدی رفتار مولفه های نوسانی تحت شرایط عملی مهم مورد نظر قرار می گیرد.

(الف) شرایط لازم برای سوئیچینگ بدون گذرا - برای سوئیچ کردن بدون گذرا، بایستی مولفه های نوسانی جریان در معادله ۱۳ صفر گردند. و این وقتی تحقق پیدا می کند که دو شرط زیر به طور همزمان برقرار گردد.

$$(A) \cos \alpha = 0 \quad (\sin \alpha = \pm 1, \text{ یعنی}) \quad (17)$$

$$(B) V_{co} = \pm \hat{v} \frac{n^2}{n^2 - 1} = \pm X_c \hat{i}_{ac} \quad (18)$$

مفهوم شرط اول این است که بایستی تایرستورها در پیک مثبت یا منفی موج سینوسی ولتاژ آتش شوند. شرط دوم به این معناست که همچنین خازن ها بایستی تا ولتاژ $\hat{v} n^2/(n^2 - 1)$ از قبل شارژ

شده باشند (با همان پلاریته موج ولتاژ). وجود اندوکتانس ایجاب می کند که برای داشتن کلیدزنی بدون گذرا، لازم است خازن بیش از ولتاژ \hat{v} یعنی با ضریب بزرگنمایی $(n^2 - 1)/n^2$ شارژ گردد. برای مقادیر پایین n این ضریب قابل ملاحظه خواهد بود (به شکل ۳۰ مراجعه شود).

از دو شرط فوق، شرط از قبل شارژ کردن خازن (شرط B) اکیدا خارج از کنترل مدار کنترل آتش تایریستور است زیرا V_{co} ، n و \hat{v} همگی می توانند در پریود غیرهدایت قبل از آنکه تایریستورها آتش شوند، تغییر نمایند. خازن به آرامی تخلیه شده منجر به کاهش V_{co} می گردد در حالی که ولتاژ سیستم تغذیه و اندوکتانس موثر به طریق نامشخصی تغییر یافته و منجر به تغییر n می گردند. بنابراین، به طور کلی تضمین اتصال مجدد خازن بدون گذرای کامل امکان پذیر نیست.

در عمل سیستم کنترل بایستی سبب شود که تایریستورها طوری آتش شوند که گذرای نوسانی در محدوده قابل قبول قرار گیرد. از بین دو شرط A و B شرط A اصولا می تواند همواره برقرار گردد. شرط B در شرایط نرمال تقریبا برقرار می گردد. برای مقادیر ولتاژ نزدیک ۱ pu، در صورتی که خازن تا مقدار ولتاژ پایین تخلیه نشود (در پریودی که هدایت صورت نمی گیرد) و یا اینکه ولتاژ خازن نزدیک به مقدار $(n^2 - 1)/n^2 \pm \hat{v}$ نگاهداری و یا از قبل شارژ گردد، شرط B تقریبا برقرار می گردد. (ب) گذرای سوئیچینگ در شرایط غیر ایده آل - مواردی است که در آنها شرایط A و B برقرار نمی شود. یکی از آن موارد این است که خازن به طور کامل تخلیه شده باشد، به عنوان مثال وقتی که جبران کننده برای مدت زمان طولانی خارج از مدار بوده است، آنگاه $V_{co} = 0$ است. بنابراین بر روی موج ولتاژ نقطه ای یافت نمی شود که شرایط A و B به طور همزمان برقرار گردد.

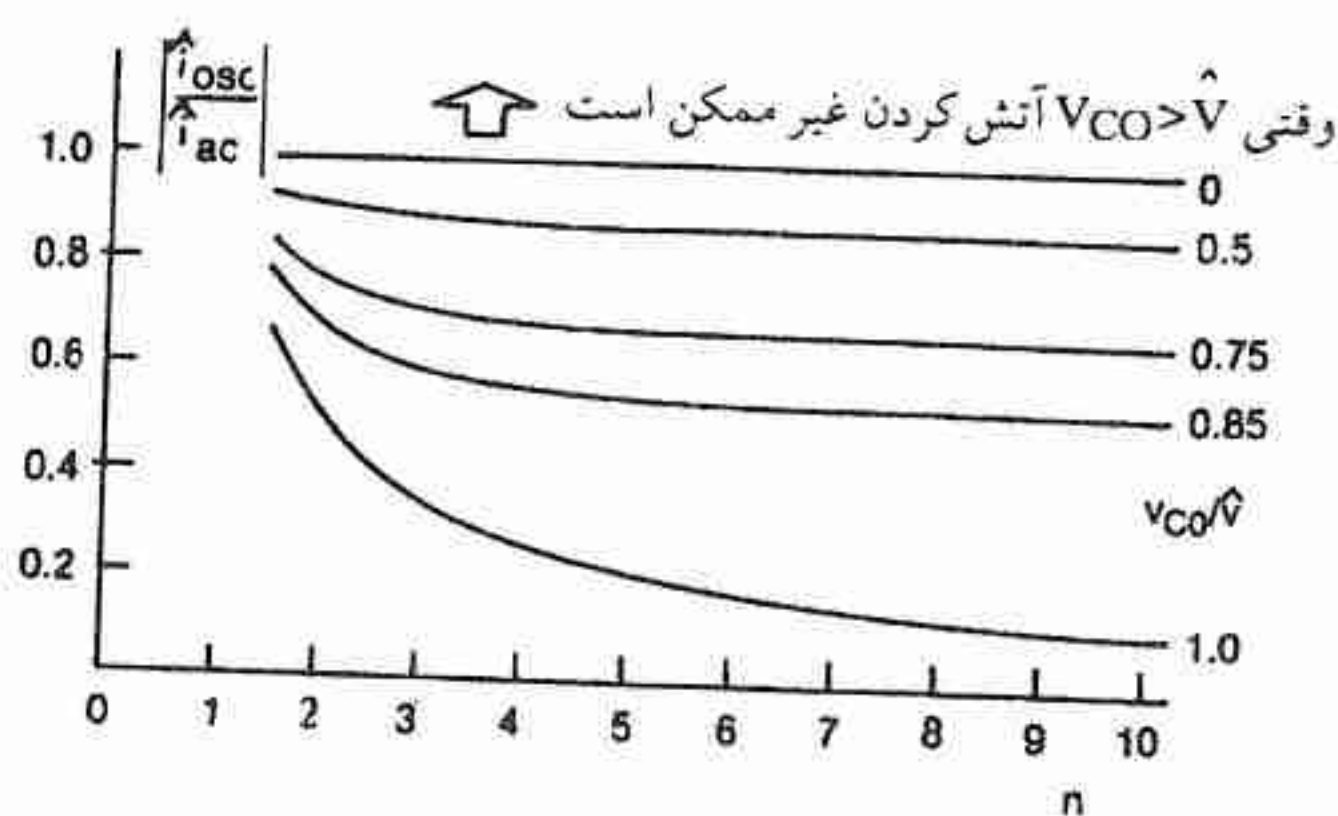
در عمومی ترین حالت، بر حسب شرایطی که تحت آن هدایت متوقف می شود و مدت زمان آن، V_{co} می تواند هر مقداری را به خود اختصاص دهد. آنگاه این سؤال مطرح می شود که دامنه مولفه نوسانی چگونه به V_{co} بستگی دارد؟ چگونه لحظه آتش تایریستور را می توان انتخاب کرد که مولفه نوسانی را به حداقل رساند؟

دو انتخاب عملی زاویه آتش عبارتند از (الف) در لحظه ای که $v = V_{co}$ که منجر به $\sin \alpha = V_{co}/\hat{v}$ می شود و (ب) وقتی که $dv/dt = 0$ که منجر به $\cos \alpha = 0$ می شود. اگر چنانچه خازن بیش از ولتاژ \hat{v} شارژ شده باشد هرگز حالت اول اتفاق نمی افتد. دامنه مولفه نوسانی جریان \hat{i}_{osc} می تواند از معادله ۱۳ برای دو زاویه آتش مختلف به دست آید. در شکل ۳۱ و ۳۲ نتایج به دست آمده از مقدار \hat{i}_{osc} نسبت به \hat{i}_{ac} به صورت تابعی از V_{co} و n برای هر یک از دو زاویه آتش نشان داده شده است.

از این دو شکل واضح است که اگر V_{co} دقیقا برابر \hat{v} باشد مولفه نوسانی جریان صفر نبوده و برای

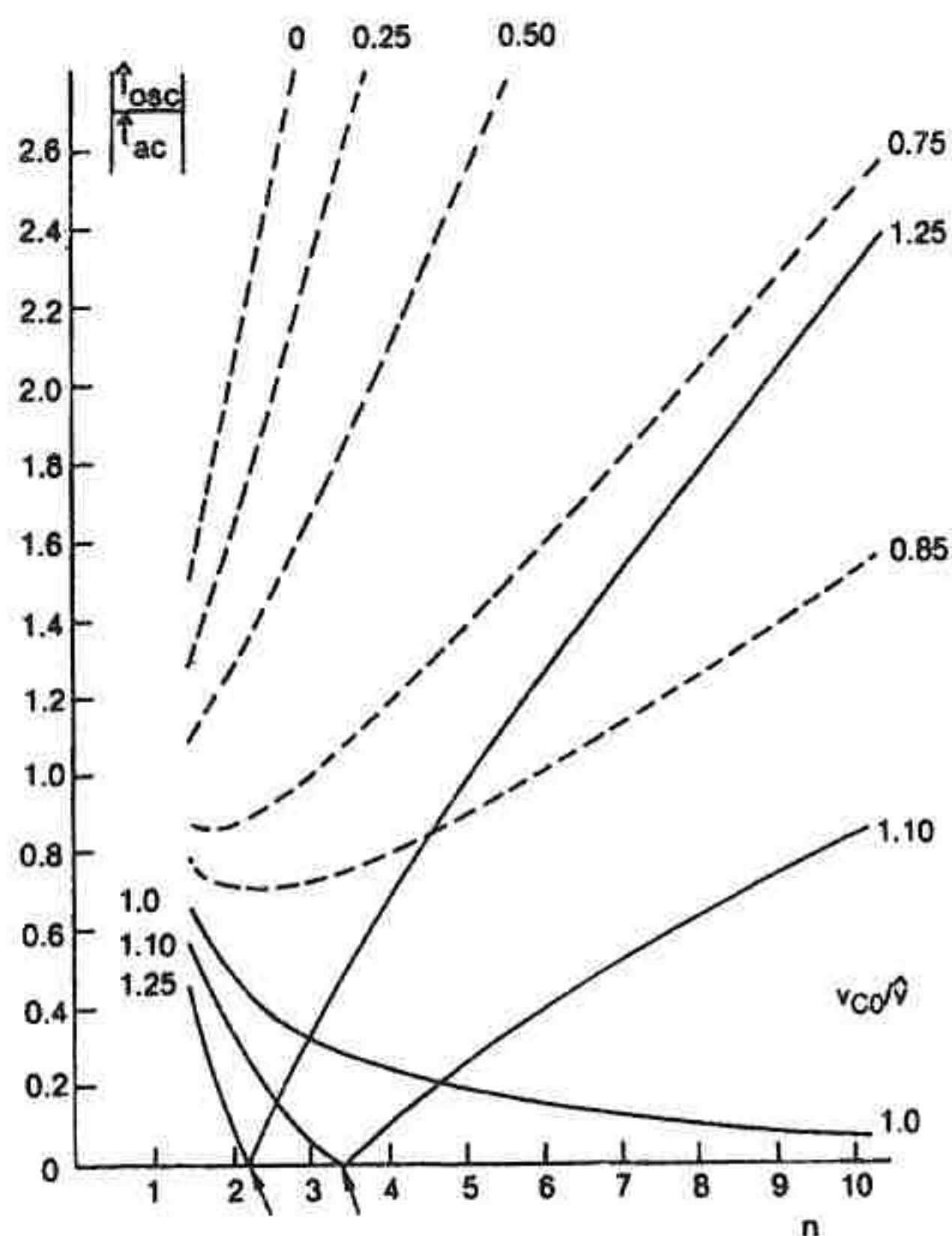
هر دو زاویه آتش قطع نظر از مقدار فرکانس طبیعی n دارای دامنه یکسان است. برای مقادیر V_{co} کمتر از \hat{v} ، آتش کردن با $v = V_{co}$ همیشه منجر به مولفه نوسانی کوچکتر می شود (مقدار n هر چه باشد).

شرایط سوئیچ کردن بدون گذرا بر حسب ولتاژ شارژ قبلی^۱ مورد لزوم برای دو فرکانس طبیعی که مربوط به $n = 2/3$ و $n = 3/6$ می باشد در شکل ۳۲ نشان داده شده است.



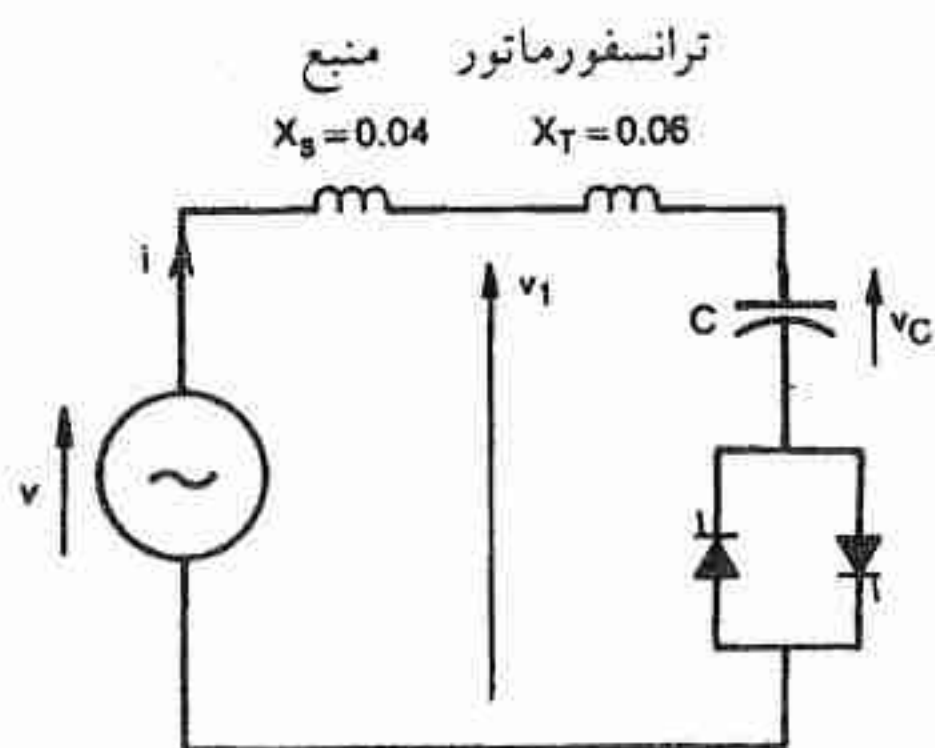
شکل ۳۱ - دامنه مولفه نوسانی جریان، تایرستورها وقتی که $V_{co} > \hat{v}$ است آتش شده اند.

سوئیچ کردن خازن تخلیه شده. در این حالت $V_{co} = 0$ است. دو زاویه آتش مورد بحث عبارت بودند از (الف) وقتی که $v = V_{co} = 0$ و (ب) وقتی که $\cos \alpha = 0$ ($dv/dt = 0$). در حالت اول فقط شرط B (معادله ۱۸) برقرار است. از معادله ۱۳ مشاهده می شود که در حالت دوم (آتش کردن در هنگام $dv/dt = 0$) مولفه نوسانی جریان بزرگتر از حالت اول است (آتش کردن در هنگام $v = V_{co} = 0$). یک مثال در شکل ۳۳ و ۳۴ نشان داده شده است. راکتانس ها طوری انتخاب گردیده اند که $\hat{i}_{ac} = 1$ pu و فرکانس طبیعی برابر با $n = X_c / (X_s + X_l) = 3/6$ pu باشد. در حالت (الف) دامنه مولفه نوسانی جریان دقیقا برابر \hat{i}_{ac} است. در حالت (ب) مولفه نوسانی دارای دامنه $n\hat{i}_{ac}$ است و جریان پیک خیلی بزرگتری ایجاد می شود. خازن پیک های ولتاژ بالاتری را متحمل شده و اعوجاج ولتاژ تغذیه بیشتر می گردد.



سویچ کردن بدون گذرا

شکل ۳۲ - دامنه مولفه نوسانی جریان. تایریستورها وقتی که $dv/dt = 0$ است آتش شده‌اند.

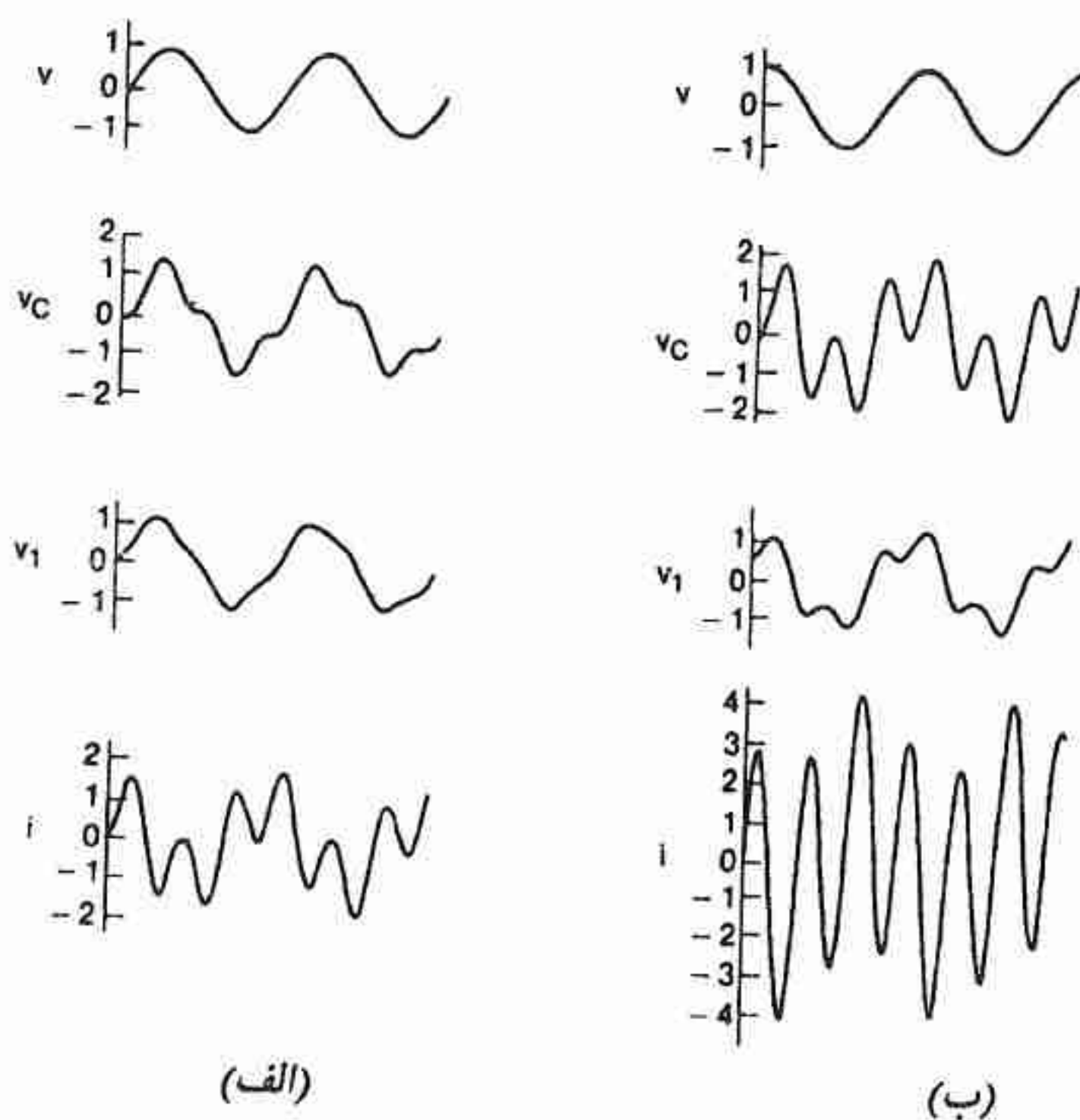


شکل ۳۳ - سویچ کردن خازن تخلیه شده، دیاگرام مداری

۴-۳-۳ مشخصه ولتاژ - جریان

وقتی جبران کننده TSC در سیستم انتقال به کار برده می‌شود هزینه کلیدهای تایریستور و

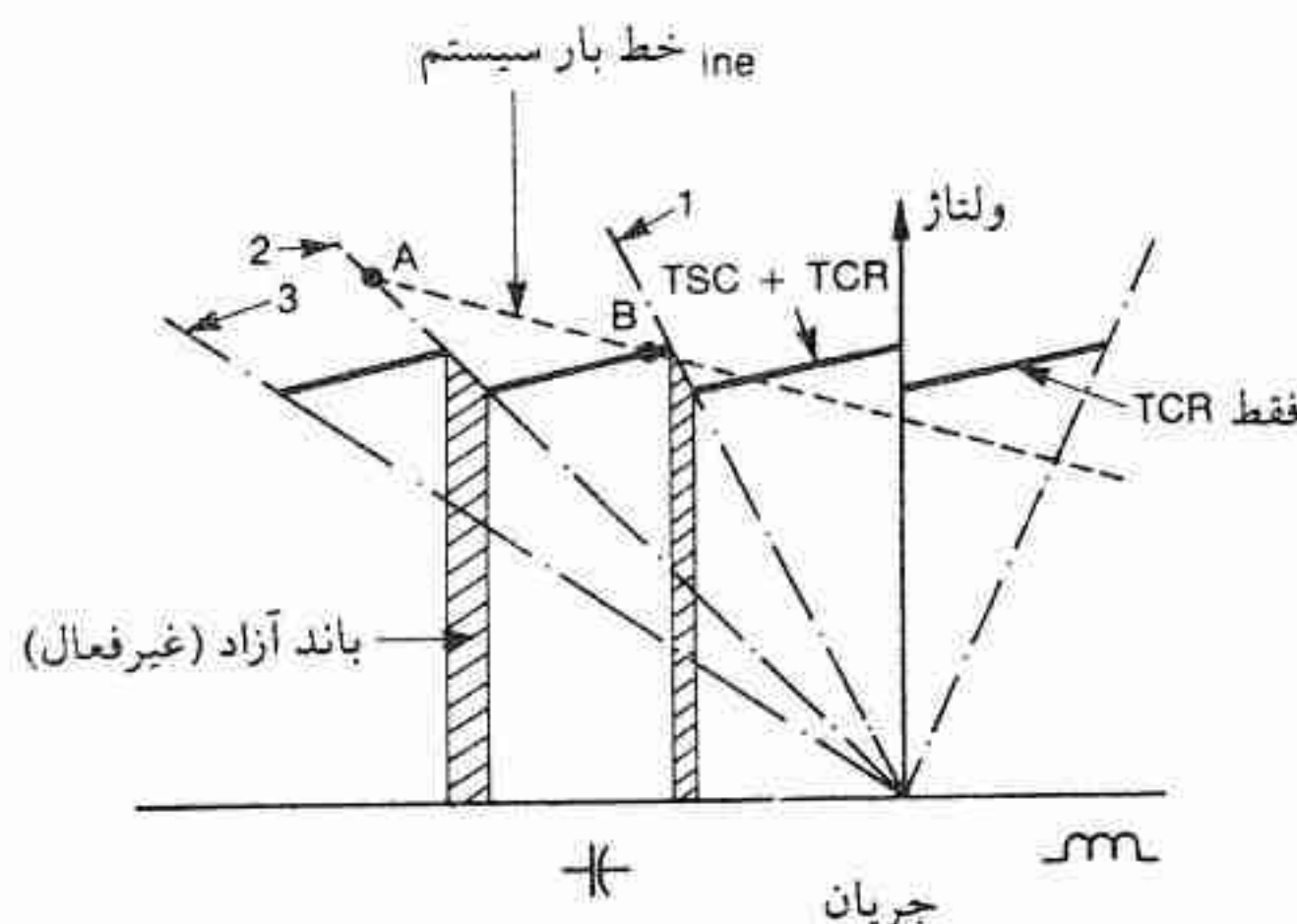
پیچیدگی‌های دیگر ایجاب میکند که تعداد واحدهای خازن‌های موازی را به حداقل برسانیم. تعداد ۳ یا ۴ نمونه‌ای از جبران‌کننده‌های موجود و یا در دست طراحی است. با چنین تعداد محدود خازن یک مشخصه ولتاژ - جریان یکنواخت به دست نخواهد آمد بلکه یک مشخصه پله‌ای حاصل می‌شود (شکل ۳۵). مشخصه‌های خازن ۱ و ۲ و ۳، مشخصه ولتاژ - جریان سیستم را در نقاط جداگانه قطع خواهند کرد و بر حسب اینکه چه تعداد خازن در مدار قرار می‌گیرد نقطه کار منطبق بر یکی از این نقاط خواهد بود. وقتی دو خازن در مدار قرار می‌گیرند نقطه کار نقطه A خواهد بود.



شکل ۳۴ - گذرای ناشی از سوییچ کردن خازن تخلیه شده (الف) آتش کردن به هنگام $v = V_{C0} = 0$ (ب) آتش کردن به هنگام $dv/dt = 0$

به منظور به دست آوردن مشخصه ولتاژ - جریان یکنواخت‌تر معمول این است که یک جبران‌کننده موازی TCR در بین مشخصه‌های خازن جا داده شود. اگر چنانچه مشخصه TCR شیب مثبت کوچکی داشته باشد، مشخصه منتهی به وسیله قطعه خط پر مطابق شکل ۳۵ نشان داده می‌شود. این ساختار نشان می‌دهد که در ولتاژ نامی جریان نامی TCR بایستی کمی بزرگتر از مقدار

نامی یک بانک خازنی باشد چه در غیر این صورت همانطوری که در شکل ۳۵ با هاشور زدن نشان داده شده است باندهای آزاد (غیرفعال) ایجاد می‌گردد. با افزایش مقدار نامی TCR قطعه خط‌های پر از طریق این باندها به سمت چپ امتداد می‌یابند.



شکل ۳۵ - اثر موازی کردن TSC و TCR قبل از آنکه سیستم‌های کنترل بطور مناسبی هماهنگ شده باشند.

با کنترل‌های ثابت TCR (یعنی ثابت بودن ولتاژ زانو و شیب) مشخصه ولتاژ - جریان جبران‌کننده ترکیبی TSC/TCR هنوز پله‌ای بوده و منجر به امکان عملکرد دو پایا (بی‌استابل)^۱ می‌گردد. بنابراین لازم است در موقع قطع و یا وصل خازن هر بار شیب و ولتاژ زانو تا حدودی تنظیم گردد. و در اصل این عمل به وسیله ایجاد تغییرات در سیستم کنترل مدار باز یا مدار بسته (جریان فیدبک) انجام می‌شود که منجر به مشخصه پیوسته V/I مطابق شکل ۱۴ می‌گردد. برای بهبود بیشتر می‌توان اثر هیستریزیس^۲ را در سیستم کنترل در نظر گرفت طوری که خازن‌ها در ولتاژ کمتر از ولتاژی که در آن از مدار خارج شده‌اند، به مدار وصل گردند. این مساله از ناپایداری «شناور شدن»^۳ - که در صورتی که مشخصه سیستم، مشخصه جبران‌کننده را در نزدیک تقاطع دو قطعه خط، تلاقی نماید پیش می‌آید - جلوگیری می‌کند.

۴-۴ جبران‌کننده‌های راکتور قابل اشباع

از انواع مختلف وسایل ساخته شده از آهن قابل اشباع^۱، برای تثبیت ولتاژ مورد استفاده قرار گرفته است. حداقل ۴ نوع اساسی کاربرد پیدا کرده است، اما تنها یکی از آنها در کاربرد سیستم انتقال توسعه یافته و بقیه آنها فقط در اندازه‌های کوچک‌تر و در ولتاژهای پایین‌تر به کار گرفته شده است. نوع توسعه یافته به راکتور چند فازه قابل اشباع و جبران‌شده هارمونیک موسوم است. این جبران‌کننده شباهت زیادی به چند برابر کننده فرکانس از نوع چند فازه دارد که انواع مختلفی از آن از سال ۱۹۱۲ در اروپا و آمریکا توسعه یافته است.

انواع دیگر تثبیت کننده ولتاژ از نوع راکتور قابل اشباع، شامل ترانسفورماتور ولتاژ - ثابت فرورزونانس^۲، مبدل مغناطیسی (ترانسداکتور)^۳ و جبران‌کننده راکتور قابل اشباع / راکتور انشعابی^۴ است. نوع ترانسفورماتور ولتاژ - ثابت فرورزونانس در مقیاس kVA در آمریکا ساخته شد. ترانسداکتور دارای سیم پیچی کنترل dc است و به صورت سوسپتانس قابل کنترل کار می‌کند. سرعت پاسخ آن با انواع دیگر جبران‌کننده مقایسه می‌گردد. جبران‌کننده راکتور قابل اشباع / راکتور انشعابی اساساً تک فاز بوده و علاوه بر عنصر موازی دارای عنصر سری نیز هست. بنابراین این نوع تنها برای جبران بار (مثلاً کوره‌های الکتریکی کوچک) مناسب است و نمی‌توان آن را به عنوان تثبیت کننده ولتاژ به باس سیستم قدرت متصل نمود.

۴-۴-۱ اصول کار

اصول کار راکتور قابل اشباع در شکل ۳۶ نشان داده شده است. (جالب است که با شکل ۵ که مربوط به TCR است مقایسه شود). عنصر کنترل کننده، هسته مغناطیسی قابل اشباع است که مشخصه مغناطیسی ایده‌آل آن بر حسب فلوی مغناطیسی و جریان در شکل ۳۶ ب نشان داده شده است. فرض کنید که یک جریان سینوسی از سیم‌بندی عبور می‌کند. آنگاه شکل موج فلوی مغناطیسی و ولتاژ ($v = N d\phi / dt$) در شکل ۳۶ ب نشان داده شده است. شکل موج فلوی تقریباً به شکل موج مربع است و بین دو سطح اشباع $\pm\phi_s$ متناوباً تغییر می‌کند. شکل موج ولتاژ تقریباً به صورت پالس‌های متناوبی است ولی از آنجایی که شکل موج فلوی تقریباً مستقل از جریان است

1- Saturating - Iron Devices

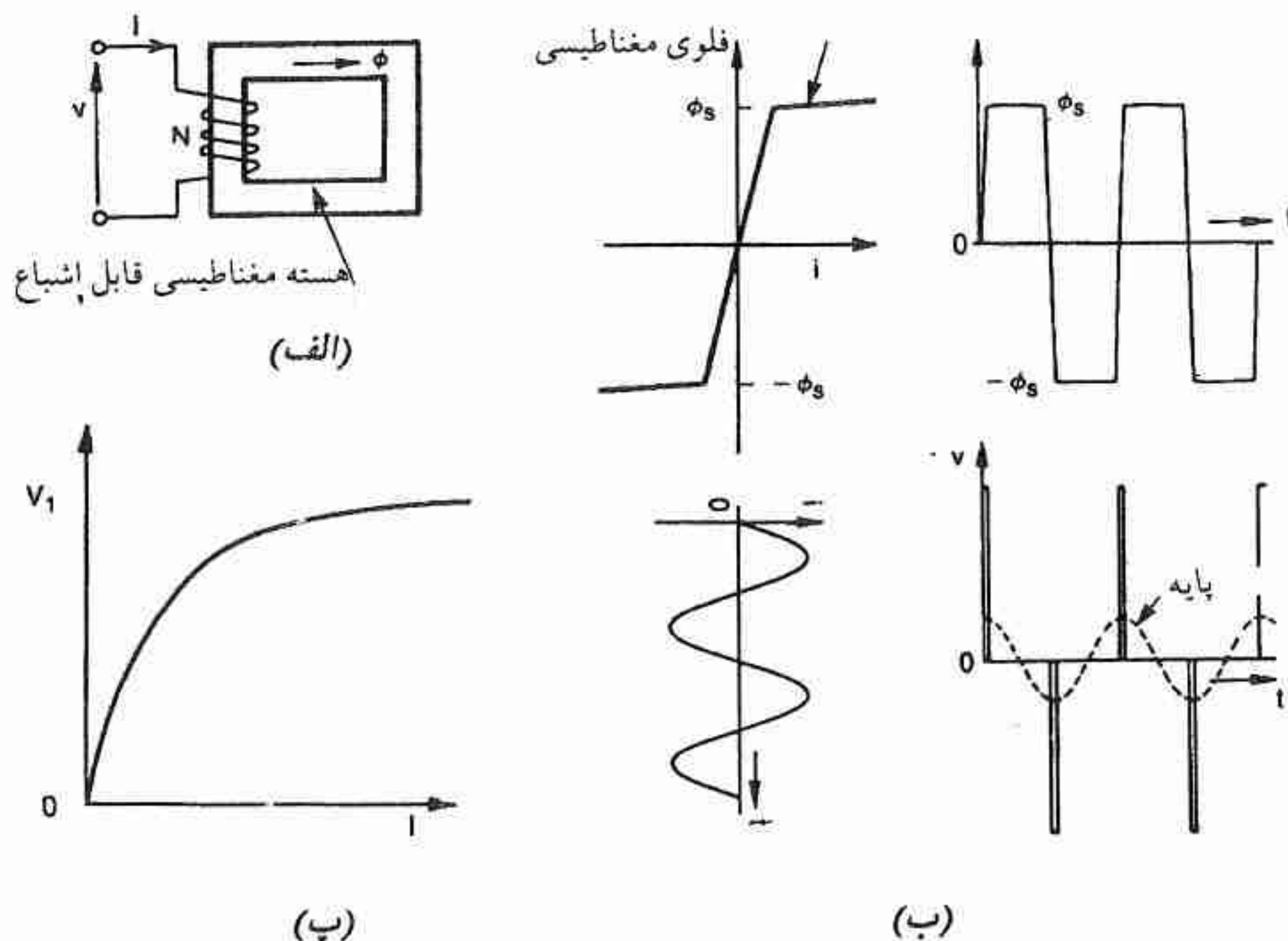
2- Ferroresonance Constant - Voltage Transformer

3- Transductor

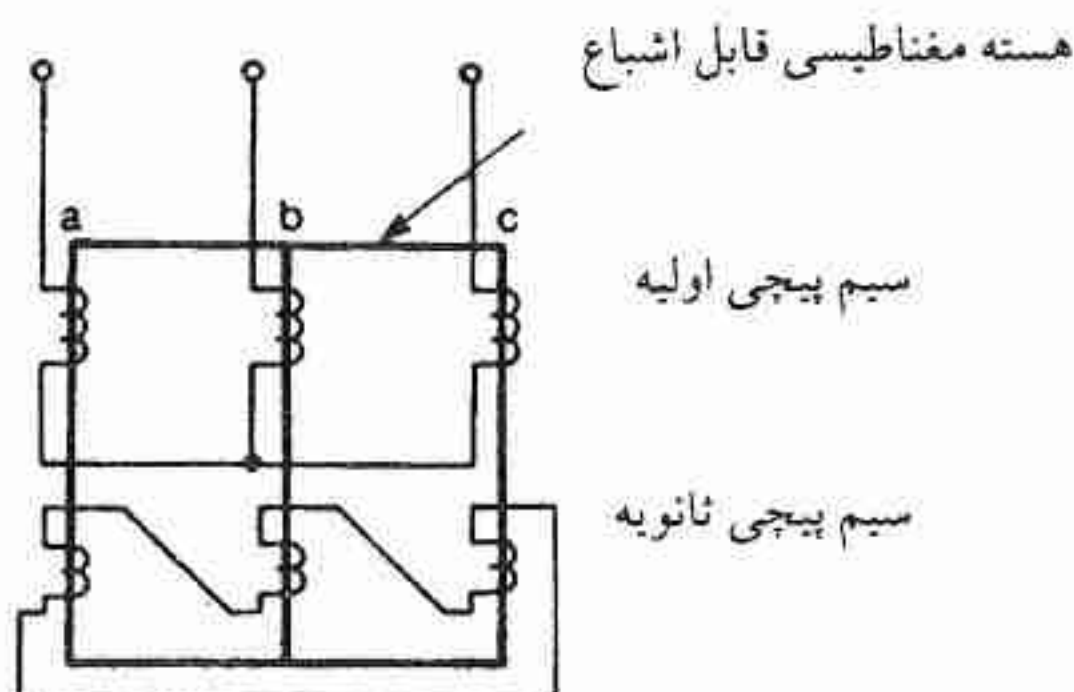
4- Tapped Reactor / Saturated Reactor Compensator

مولفه پایه ولتاژ، ثابت است. در عمل مشخصه مغناطیسی کاملاً مسطح نبوده بلکه در مقدار بیش از ϕ_s تقریباً خطی بوده و دارای شیبی متناسب با قابلیت نفوذ مغناطیسی خلأ است. حاصل آن مشخصه پایه ولتاژ - جریان مطابق شکل ۳۶ پ است، که دارای شیب مثبت کمی است. خاصیت ثابت بودن ولتاژ پایه مستقیماً از عبور کردن از اشباع هسته است که در آن یک پالس ولتاژ ثابت (ولت-ثانیه) در سیم پیچی القاء می‌شود، نتیجه می‌گردد قطع نظر از اینکه با چه سرعتی این عبور از اشباع صورت می‌گیرد. ولتاژ پایه ۹۰ درجه از جریان عقب‌تر بوده و توان را کتیو جذب می‌گردد.

مشخصه مغناطیسی ایده‌آل



شکل ۳۶ - اصول کار راکتور قابل اشباع مقدماتی (الف) اجزاء راکتور قابل اشباع (ب) شکل موجهای فلو مغناطیسی، جریان و ولتاژ (پ) تغییرات ولتاژ پایه نسبت به جریان (بافرض سینوسی بودن)



شکل ۳۷ - سه برابر کننده فرکانس مقدماتی که دارای مشخصه تقریبی ولتاژ ثابت است.

راکتور قابل اشباع توصیف شده، برای کاربرد سیستم‌های انتقال مناسب نیست زیرا ولتاژ یا جریان یا هر دو کاملاً اعوجاج دارند. در جبران‌کننده‌های سیستم انتقال هارمونیک تولید شده توسط روش جبران داخلی تا سطح پایینی تنزل داده می‌شود. روش جبران داخلی برای کاهش هارمونیک، در اصول مشابه روشی است که در ترانسفورماتورهای چند برابرکننده - فاز یا چند برابرکننده فرکانس مغناطیسی به کار گرفته می‌شود و به کمک شکل ۳۷ که در آن یک راکتور قابل اشباع سه‌فاز دارای یک سیم‌پیچی اضافی دلتای مسدود است، به اختصار توضیح داده می‌شود. در غیاب سیم‌پیچی ثانویه، جریان‌های اولیه به شدت غیرسینوسی است. اما اگر چنانچه سیم‌پیچی ثانویه مدار بسته باشد، از روی تقارن سه‌فاز می‌توان دریافت که مولفه‌های هارمونیک سوم مربوط به نیروهای محرکه مغناطیسی هر شاخه هسته، به وسیله جریان ثانویه فراهم می‌گردد. جریان اولیه از این جریان‌های هارمونیک عاری می‌گردد. جریان‌های ثانویه اغلب هارمونیک سوم بوده و بنابراین مدار، یک سه برابرکننده فرکانس مقدماتی بشمار می‌آید، که در نتیجه شباهت این نوع تثبیت‌کننده ولتاژ و چند برابرکننده فرکانس را نشان می‌دهد. (در چند برابرکننده فرکانس، انتقال توان فرکانس بالا به بار با قرار دادن مستقیم آن در مدار ثانویه یا با کوپلاژ ترانسفورماتوری صورت می‌گیرد).

جریان‌های اولیه، در شرایط متعادل، عاری از هارمونیک‌های مرتبه پایین‌تر از هارمونیک ۵ و ۷ می‌باشند. در سال‌های ۱۹۳۰ آشکار شد که با قرار دادن یک راکتور با مقدار مناسب در مدار ثانویه، حتی امکان کاهش این هارمونیک‌ها نیز وجود دارد. این پدیده موسوم به جبران نسبی هارمونیک^۱ مخصوصاً توسط Friedlander توسعه و مورد بهره‌برداری قرار گرفته است.

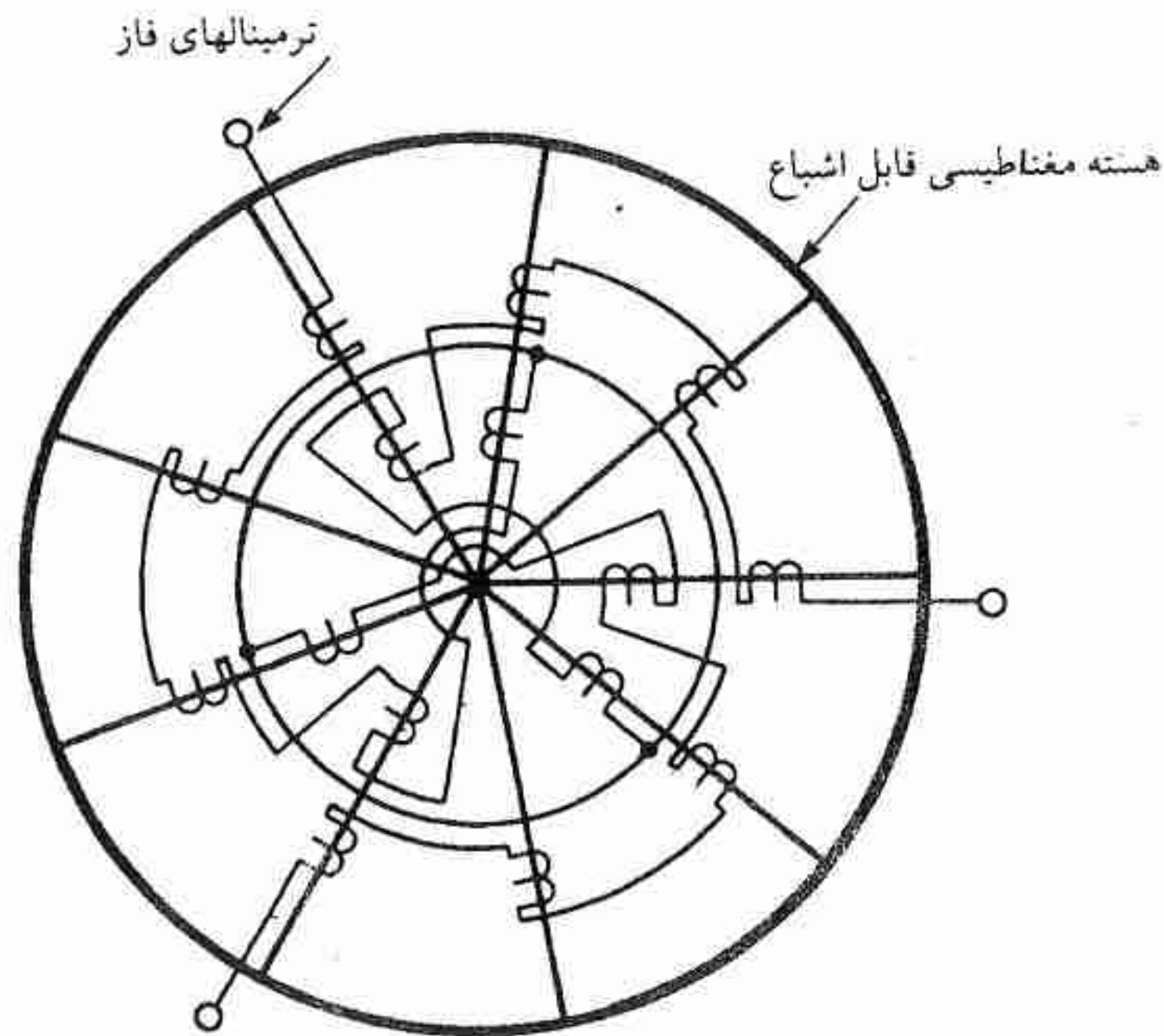
رفتار هارمونیک و مشخصه‌های ولتاژ - جریان سه‌برابرکننده فرکانس عادی^۲ به قدر کافی برای کاربرد در سیستم‌های قدرت مناسب نیستند، و با به کار گرفتن چندبرابرکننده فرکانس تا ۹ برابر - مثلاً راکتور سه‌برابرکننده سه‌گانه^۳ مشخصه‌های بهتری حاصل می‌شود. این چندبرابرکننده با سه‌برابرکننده عادی، در سیم‌پیچی مدار باز ثانویه که هارمونیک ۹ را انتقال می‌دهد مشترک است، اما برای ایجاد آن از سیستم سه‌فاز متعادل، یک آرایش چندبرابرکننده فاز مطابق شکل ۳۸ لازم است. در هسته مغناطیسی ۹ شاخه یا عضو وجود دارد و مشابه سایر چندبرابرکننده فرکانس مغناطیسی در هر زمان تنها یکی از آنها در وضعیت غیراشباع قرار دارد. هر شاخه به تناوب در دو جهت اشباع می‌شود و در نتیجه در هر سیکل ۱۸ وضعیت غیر اشباع را منجر می‌گردد. پایین‌ترین مرتبه هارمونیک مشخص^۴ در

1- Partial Harmonic Compensation

2- Plain Frequency Tripler

3- Treble - Tripler Reactor 4- Characteristic Harmonic

راکتور سه‌برابرکننده سه‌گانه، مرتبه ۱۷ و ۱۹ است، اما با طراحی یک بار القایی در مدار حلقه هارمونیک ۹، می‌توان آنها را تا حدود ۲٪ کاهش داد. خازن‌های عادی موازی را می‌توان به طور نرمال برای جذب هارمونیک‌های باقیمانده به کار برد.



شکل ۳۸ - راکتور سه‌برابرکننده سه‌گانه چند فاز. طرز قرار گرفتن هسته مغناطیسی و سیم‌پیچی‌های آن (بخشی از سیم‌پیچی برای سهولت حذف شده است)

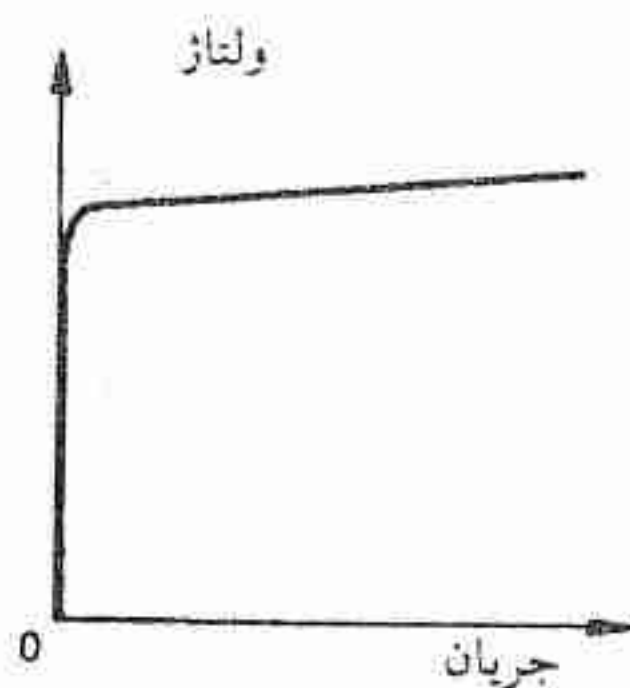
۴-۴-۲ مشخصه‌های ولتاژ - جریان

مشخصه ولتاژ - جریان راکتور قابل اشباع در شکل ۳۹ نشان داده شده است. یک شیب بین ۵ و ۱۵٪ (بر مبنای مقدار نامی راکتور) وجود دارد که به طراحی راکتور و مخصوصاً به اندوکتانس سیم‌پیچی پس از اشباع بستگی دارد. داشتن شیب راکتانس پایین‌تر مستلزم طراحی راکتور بزرگ‌تر و با هزینه بالاتر است. و مشخصه راکتور برای مقادیر بیش از ۱۰ درصد جریان نامی فوق‌العاده خطی است. در بعضی موارد شیب کمتر با قرار دادن خازن سری با راکتور به دست می‌آید. اندازه خازن تصحیح کننده شیب را می‌توان طوری تنظیم کرد که شیب جبران‌کننده صفر و یا منفی گردد، اما شیب نمونه همان مقداری است که در مورد TCR وجود دارد. اثر خازن تصحیح کننده شیب در شکل ۴۰ نشان

داده شده است.

دقیقا مشابه جبران‌کننده TCR، عملکرد تثبیت‌کنندگی ولتاژ جبران‌کننده قابل اشباع را می‌توان به کمک خازن‌های موازی به ناحیه ضریب توان پیش‌فاز هدایت کرد. در صورتی که برای رزونانس سیستم به فیلتر نیاز باشد می‌توان آنها را به صورت فیلتر طراحی کرد، گرچه برای هارمونیک‌های مشخص راکتور چنین ضرورتی وجود ندارد.

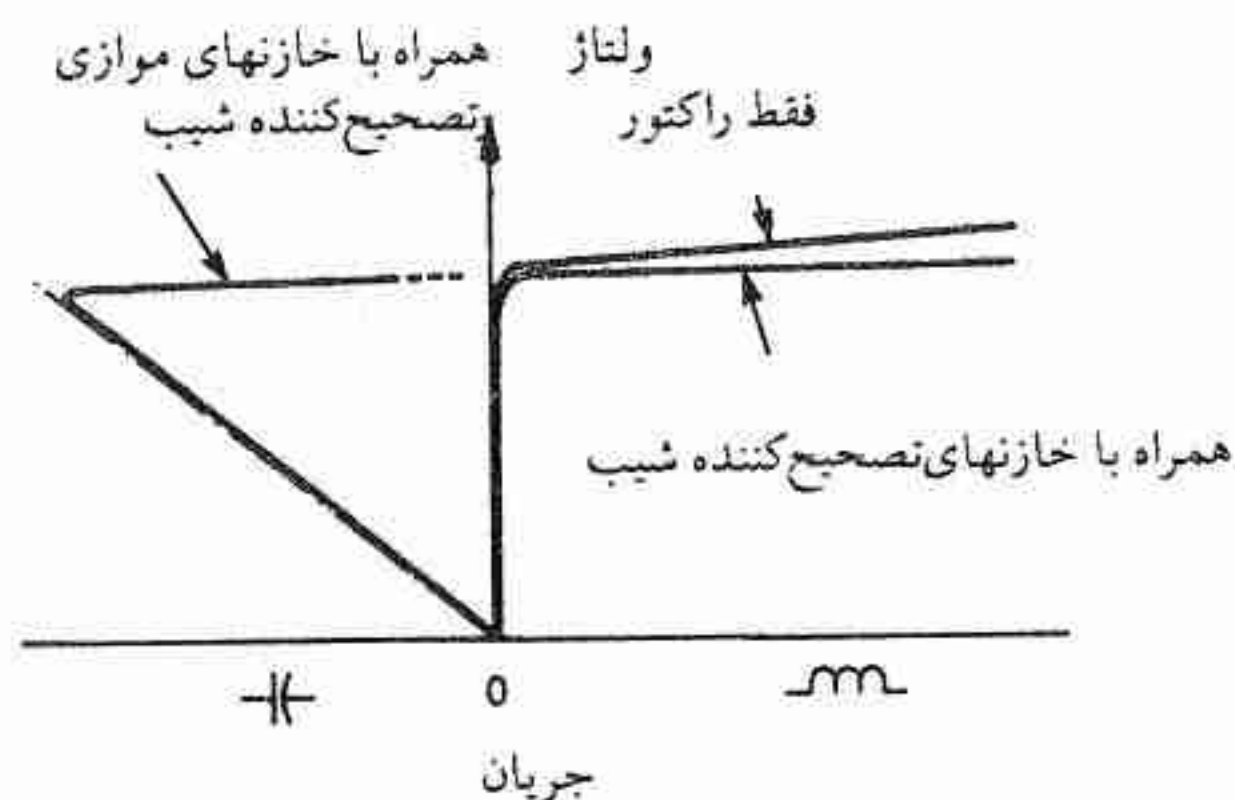
برای اتصال جبران‌کننده به خطوط EHV معمولا از ترانسفورماتور کاهنده استفاده می‌گردد، زیرا برای خطوط ۱۳۲KV و بالاتر اتصال مستقیم آنها یا غیراقتصادی است و یا طراحی آنها عملا غیرممکن است. ترانسفورماتور ممکن است مجهز به تپ - چنجر باشد که به کمک آن می‌توان ولتاژ نقطه - زانو جبران‌کننده را در طرف فشار قوی، به طور موثر تغییر داد. همچنین ممکن است خازن‌ها را به طور سری با ترانسفورماتور (علاوه بر راکتور) قرار داد تا ولتاژ تثبیت شده را در دو باس بار EHV و جبران‌کننده به دست آورد. از نقطه نظرهای دیگر نقش ترانسفورماتور کاهنده مشابه ترانسفورماتوری است که در جبران‌کننده TCR به کار رفته است. یک آرایش کلی در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳۹ - مشخصه ولتاژ / جریان راکتور قابل اشباع چند فازه

خازن‌های تصحیح‌کننده شیب می‌توانند جبران‌کننده راکتور قابل اشباع را نسبت به ایجاد ناپایداری هارمونیک^۱ - به ویژه در سیستم‌های ضعیف^۲ - مساعد نمایند، و در عمل معمولا یک فیلتر مستهلک‌کننده نوسانات^۳ به طور موازی با خازن‌ها قرار می‌دهند. علاوه بر خازن‌ها، چنین فیلترهایی بایستی دارای مقدار نامی ولتاژ سازگار با گذرای سیستم - که در خلال انرژی‌دار کردن سیستم و سایر اغتشاشات سیستم رخ می‌دهد - باشند و همچنین توانایی اضافه بار آنها، توانایی

اضافه بار کل جبران‌کننده راکتور قابل اشباع را محدود می‌نماید مگر اینکه خازن توسط برقگیر فاصله جرقه یا وسایل دیگر اتصال کوتاه گردد. خازن تصحیح‌کننده شیب همچنین پاسخ جبران‌کننده را کند می‌نماید.



شکل ۴۰ - مشخصه ولتاژ / جریان جبران‌کننده راکتور قابل اشباع با حضور خازنهای سری (تصحیح‌کننده شیب) و خازنهای موازی

انرژی‌دار کردن جبران‌کننده با بستن مستقیم کلید قدرت مربوط به جبران‌کننده انجام می‌شود، گرچه ضرورت ندارد که تمامی خازن‌ها به طور همزمان انرژی‌دار گردند. تلفات آنها با آنچه در ترانسفورماتورهای با مقدار نامی مشابه وجود دارد قابل مقایسه است و تغییرات آنها نسبت به جریان با TCR شباهت دارد. به واسطه نیروهای تغییر بعد مغناطیسی فرکانس بالا^۱، سطح نویز^۲ در حوالی راکتور فوق‌العاده بالاست و در بعضی مواقع از محافظ استفاده می‌شود. از نظر قابلیت اعتماد با ترانسفورماتورهای با مقدار نامی مشابه، قابل مقایسه است.

۴-۵ خلاصه

در جدول ۳ امتیازات انواع اصلی جبران‌کننده به یکدیگر به طور خلاصه بیان شده است. توجه اینکه از بعضی انواع جبران‌کننده‌های مخصوص صرف‌نظر شده است. به عنوان مثال، ترانسفورماتور تایریستور کنترل خواص مشترک زیادی با راکتور تایریستور کنترل دارد. مبدل مغناطیسی (ترانسداکتور) dc به واسطه پاسخ‌دهی قابل رقابت با جبران‌کننده‌ها نیست. از خازن‌هایی که توسط

1- High - Frequency magnetosrtictive Force

2- Noise level

کلیدهای قدرت مکانیکی سوئیچ می‌شوند صرف‌نظر شده است. در مقایسه با TSC گرچه تلفات آنها کمتر و کاربردهای بیشتر است لیکن قابلیت انعطاف آنها خیلی کمتر است.

مقایسه‌های انجام شده در جدول ۳ خیلی تند و قاطع نمی‌باشد، زیرا هر نوع جبران‌کننده‌ای می‌تواند در یک رنج وسیعی از خواص طراحی شود. بنابراین یک روش عمومی که بتوان بر اساس آن برتری یکی بر دیگری را تشخیص داد، وجود ندارد. مقایسه واقعی تنها در موارد خاصی و نسبت به معیار عملکرد خاصی قابل انجام است. به عنوان مثال، بی‌معنا خواهد بود اگر بگوئیم تلفات TSC از TCR کمتر است، مگر اینکه توان راکتیوی که در آن تلفات محاسبه گردیده است، مشخص شود. این توان راکتیو بایستی نشان‌دهنده نقطه کار میانگین جبران‌کننده در طول عمر مفیدش باشد.

مجدداً، خاطر نشان می‌شود که کندانسور سنکرون دارای سرعت پاسخ‌گویی است. اما سرعت پاسخ را می‌توان به وسیله افزایش سقف ولتاژ تحریک‌کننده، افزایش داد: چنین عملی در بعضی از کندانسورهای سنکرون انجام گرفته است طوری که سرعت پاسخ کافی در مقایسه با جبران‌کننده‌های استاتیک داشته‌اند. آنگاه سایر معیارها، نظیر قیمت و قابلیت اعتماد معین می‌نمایند که کدام نوع جبران‌کننده بایستی به کار گرفته شود.

از نقطه نظر قابلیت انعطاف در کنترل، با وجود تکنولوژی امروزی، جبران‌کننده TCR بهترین نوع است. ترکیب TSC و TCR منجر به کاهش مشخصه تلفات در ناحیه پس‌فاز می‌گردد و همچنین انعطاف کنترل را افزایش می‌دهد. TCR را می‌توان طوری طراحی کرد که دارای توانایی محدود کردن اضافه ولتاژ مفیدی باشد چنین توانایی در TSC عادی وجود ندارد.

از نقطه نظر حداقل نگهداری، جبران‌کننده راکتور قابل اشباع امتیازاتی دارد، اما انعطافی در کنترل آن وجود ندارد و مستلزم صرف هزینه زیادی برای مدارهای مستهلک‌کننده نوسانات است تا بدین وسیله از امکان تحقق ناپایداری زیر هارمونیک پرهیز شود. دارای توانایی اضافه بار است که در محدود کردن اضافه ولتاژ مفید است، گرچه برای بهره‌برداری کامل از این توانایی بایستی خازن‌های سری تصحیح‌کننده شیب به وسیله برقگیر فاصله جرقه یا وسایل دیگر اتصال کوتاه گردند.

کندانسور سنکرون همچنین دارای توانایی اضافه بار مفید و رفتار هارمونیک خوبی است. به علاوه به واسطه اینرسی‌اش، از نظر پایداری می‌تواند در کاربردهایی مفید واقع شود.

جدول ۳

مقایسه انواع اصلی جبران کننده

نوع	کندانسور سنکرون	TCR (همراه با خازن در صورت لزوم)	TSC (همراه با TCR در صورت لزوم)	راکتور قابل اشباع چند فازه
ساختمان	ماشین گردان	تجهیزات تایریستوری همراه با راکتورها و خازنهای ثابت	تجهیزات تایریستوری همراه با خازنهای ثابت	از نوع ترانسفورماتور همراه با خازنهای موازی
توانایی توان راکتیو کنترل	پس فاز / پیش فاز پیوسته	پیش فاز / پس فاز (غیر مستقیم) پیوسته	پس فاز / پیش فاز (غیر مستقیم) گسسته (پیوسته با TCR)	پیش فاز / پس فاز (غیر مستقیم) پیوسته
زمان پاسخ	کند	سریع، اما وابسته به سیستم	سریع، اما وابسته به سیستم	سریع، اما وابسته به سیستم و بوسیله خازن تصحیح کننده شیب کند می شود
هارمونیک	خیلی خوب	بر حسب شرایط سیستم ممکن است به فیلتر نیاز باشد	خوب، برای TCR به فیلتر نیاز است	تا هارمونیک ۱۷ ام و ۱۸ ام خوب است
تلفات	متوسط	خوب، اما با جریان پس فاز افزایش می یابد	خوب، اما با جریان پیش فاز افزایش می یابد	خوب، با جریان پس فاز افزایش می یابد
قابلیت انعطاف در برنامه ریزی	در محدوده سرعت پاسخ خوب است	عالی	خوب با افزودن TCR ضعیف	عالی است
توانایی متعادل کردن فازها محدود کردن اضافه ولتاژ	محدودیت دارد خوب	خوب متوسط	محدودیت دارد خیر (با TCR خیلی محدود)	محدودیت دارد در فاصله محدودیتهای خازنهای تصحیح کننده شیب خوب است
اینرسی گردان دقت در جبران سازی	بلی خوب	خیر عالی	خیر خوب، با افزودن TCR عالی است	خیر خوب
اتصال مستقیم به EHV	خیر	راکتور-خیر	خیر	راکتور قابل اشباع-خیر
راه اندازی	کند	سریع و با حداقل گذرا	سریع، همراه با مقداری گذرا	سریع، همراه با مقداری گذرا

۴-۶ پیشرفت‌های آتی و نیازمندی‌ها

گرچه تقاضای توان الکتریکی در امریکا به کندی افزایش می‌یابد، روند تولید و انتقال توان در سطح جهانی نشان می‌دهد که جبران توان راکتیو اهمیت زیادتری پیدا خواهد کرد. این موضوع از انتقال گسترده توان ac همراه با عواملی که حداکثر بهره‌برداری از وسایل تولید و انتقال را ایجاب می‌کند، نتیجه می‌شود. به علاوه شواهدی وجود ندارد که از عمومیت بارهای غیرمنظمی نظیر کوره‌های الکتریکی کاسته شود. تا آنجایی که به انتقال توان در مقدار زیاد مربوط می‌شود، با توجه به توسعه دایمی منابع آبی دور دست، نیاز به فراهم کردن جبران‌کننده‌های EHV بایستی ادامه یابد. مسایل قابل رقابت در این زمینه عبارت از تلفات توان و هارمونیک خواهد بود و ابداعاتی که رفتار آنها را در این زمینه بهبود می‌دهد کمال مطلوب ما خواهد بود. رفتار اضافه ولتاژ آنها زمینه دیگری است که بهبود در آنها حائز اهمیت است. اغلب جبران‌کننده‌های استاتیک، منجمله راکتور قابل اشباع چند فازه دارای توانایی محدودی در پایین نگاهداشتن ولتاژ در شرایط اضطراری هستند. پیشرفت خطوط HVDC نیاز به کنترل توان راکتیو را ایجاب می‌کند که جبران‌کننده‌ها می‌توانند در این جهت مفید باشند.



طراحی کنترل‌کننده‌های تایریستوری

R . L . ROFINI

۵-۱ تایریستور

همانطوری که در جدول ۱ نشان داده شده است، در اثر افزایش مقادیر نامی ولتاژ و جریان تایریستورها، کاربرد تکنولوژی نیمه هادی در کنترل توان راکتیو (جبران‌سازی) ممکن گردید. مقرراتی که به کاربرد تایریستورها در کنترل توان راکتیو حاکم است همانی است که بر سوئیچ‌های تایریستوری به کار گرفته شده در خط انتقال ولتاژ بالای dc، حاکم است. (در زمینه HVDC، در تاسیسات جدید سوئیچ‌های تایریستوری کاملاً جایگزین سوئیچ‌های جیوه‌ای گردیده‌اند.)

۵-۲ نقش تایریستور به عنوان سوئیچ؛ مقادیر نامی

در اینجا قصد نداریم که توصیفی عمیق از تایریستور را ارائه نمائیم. چنین توصیف عمیقی در یادداشت‌ها و دفترچه راهنماهایی^۱ که از طرف کارخانجات سازنده تایریستور انتشار می‌یابد، موجود است. مطالب این بخش به این منظور نوشته شده است تا خواننده‌ای را که فاقد اطلاعات مربوط به تایریستور است، قادر سازد که کاربرد تایریستور را در کنترل‌کننده (کنترلر) تایریستوری^۲ درک نماید. همان‌طوری که انتظار آن می‌رود، مهمترین جزء کنترلر تایریستوری، خود تایریستور است. و

که در اواخر سال ۱۹۵۰ تایریستور معرفی گردید، به «یکسوکننده سیلیکونی قابل کنترل»^۱ (SCR) موسوم بود. بعداً نام صحیح این وسیله توسط کمیته‌های صنعتی به صورت «تایریستور تریود مسدود معکوس»^۲ تعیین گردید. اما در کاربردها عموماً به اختصار به آن «تایریستور» گفته می‌شود. تایریستور یک وسیله نیمه هادی با سه ترمینال است که به طور نمادی (سمبلیک) در شکل ۱ نشان داده شده است. این وسیله به تناوب از ۴ لایه نیمه هادی سیلیکون p و n تشکیل یافته و دارای ۳ پیوند p - n می‌باشد. از نظر طرز کار یک سوئیچ یک طرفه است. به طور کلی، وقتی که آند و گیت آن نسبت به کاتد مثبت باشد شروع به هدایت می‌کند (نقش کلید بسته را دارد). هنگامی که تایریستور در حال هدایت است، گیت نقش کنترلی خود را از دست می‌دهد، و هدایت تایریستور فقط هنگامی متوقف می‌گردد که جریان عبوری از مدار خارجی به مقدار صفر تنزل یابد.

جدول ۱

پیشرفت در زمینه مقادیر نامی (ظرفیت) تایریستور

سال	mm	مقدار نامی پیک ولتاژ تکرار شونده V	مقدار نامی جریان میانگین A
1958	14	200	80
1960	24	700	150
1963	28	1300	300
1963	28	1800	225
1965	33	1800	550
1969	40	1800	750
1969	40	2600	600
1973	53	2600	1000
1975	53	2900	1000
1977	77	3800	1600
1980	77	4500	1350
1985	100	6000	—

شکل ۲ مشخصه ولتاژ - جریان تایریستور را در حالتی که ولتاژ گیت - کاتد صفر است، نشان

1- Silicon - Controlled Rectifier

2- Reverse - Blocking Triode Thyristor

می‌دهد. شکل ۲، دو ناحیه از مشخصه ولتاژ - جریان را نشان می‌دهد که در محدوده کار طبیعی آن قرار ندارند. یک ناحیه به منطقه شکست بهمنی معکوس^۱ مربوط می‌شود که در آن حاصل ضرب ولتاژ - جریان (توان اتلافی در تایرستور) فوق‌العاده زیاد است. ناحیه دوم به منطقه ولتاژ عبور حالت قطع^۲ مربوط می‌شود که در آن تایرستور بدون تغذیه جریان گیت، نقش «کلید بسته» را پیدا می‌کند. عملکرد تایرستور در هر یک از این دو ناحیه منجر به خراب شدن تایرستور می‌گردد.



شکل ۱ - علامت اختصاری تایرستور

توانایی ولتاژ مسدودکننده معکوس^۳، اقلاً با حداقل ولتاژ عبور مستقیم^۴ برابر خواهد بود. اندازه ولتاژ نامی تایرستور به پیک ولتاژ مسدودکننده در حالت قطع مربوط می‌شود و مقدار این ولتاژ طوری است که در آن تایرستور بدون دریافت سیگنال آتش، هدایت نخواهد کرد. توانایی ولتاژ مسدودکننده به شرایط مدار آتش، درجه حرارت پیوند و میزان تغییر ولتاژ اعمال شده، ارتباط دارد. این ارتباط به تفصیل در طی مقالاتی بحث شده است. اگر هنگامی که تایرستور در وضعیت خاموش ناحیه مسدود (یعنی در بایاس مستقیم) قرار دارد، با اعمال ولتاژ به گیت آن، وضعیت تایرستور از خاموش به هدایت زیاد تغییر می‌یابد. ولتاژ اعمال شده به گیت، سبب می‌شود که تایرستور از حالت کلید باز به کلید بسته تغییر یابد. در کاربردهای نمونه، ولتاژی که به تایرستور اعمال می‌گردد خیلی کمتر از مقادیر نامی ولتاژ حالت قطع و معکوس آن می‌باشد.

کارخانه‌های سازنده تایرستور ورقه‌های مشخصات مربوط به تایرستورهای موجود را انتشار می‌دهند. در شرایط خاصی ممکن است کارخانه سازنده تایرستور سفارشی را تولید کند که برای کاربردهای کنترلر تایرستوری مناسب است.

از آنجایی که در طی سال‌ها مقادیر نامی (ظرفیت) تایرستورها افزایش یافته است، بنابراین یافتن تایرستوری که نه تنها با مقادیر نامی ولتاژ آن، بلکه با اندازه و پارامترهای ابعاد آن نیز توصیف شده باشد، عمومیت یافته است. یک تعریف یکسانی از این پارامترها وجود ندارد، اما پارامترهای نمونه که توسط کارخانه‌های سازنده به کار می‌رود عبارتند از: (۱) قطر قرص سیلیکون^۵، (۲) قطر محفظه^۶

1- Reverse avalanche area

2- Off - State Breakover Voltage Area

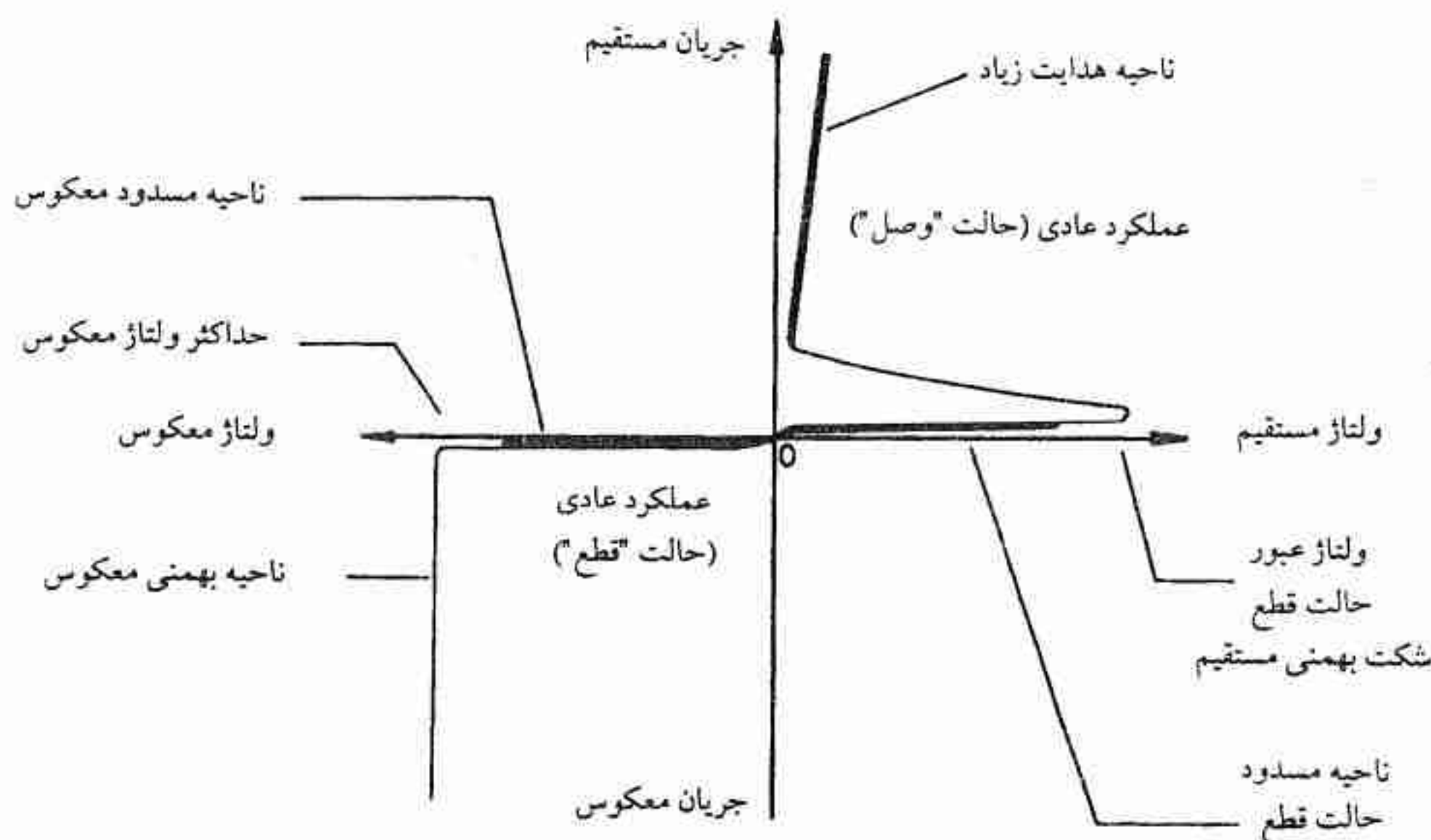
3- Reverse Voltage Blocking

4- Forward Breakover Voltage

5- Silicon Wafer

6- package

تایرستور و (۳) ناحیه هدایتی قرص سیلیکون. ابعاد قرص مقدار جریان نامی آن را تعیین می‌کند و یک رابطه نمونه در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۲ - مشخصه تایرستور بدون اعمال ولتاژ گیت

در شکل ۳ خلاصه‌ای از یک تایرستور نمونه که در کنترلر تایرستوری به کار می‌رود، آمده است. دو سطحی که به «سطوح نصب شده»^۱ موسومند بر روی سطحی که توانایی سرد شدن دارد، در مقابل هم قرار دارند. عنصر تلف‌کننده حرارت در محفظه سرامیکی، قرص سیلیکونی می‌باشد. هر طرف قرص سیلیکون، حرارت را از طریق رشته فلزی به سطوح نصب شده انتشار می‌دهد.

۵-۳ ملاحظات حرارتی

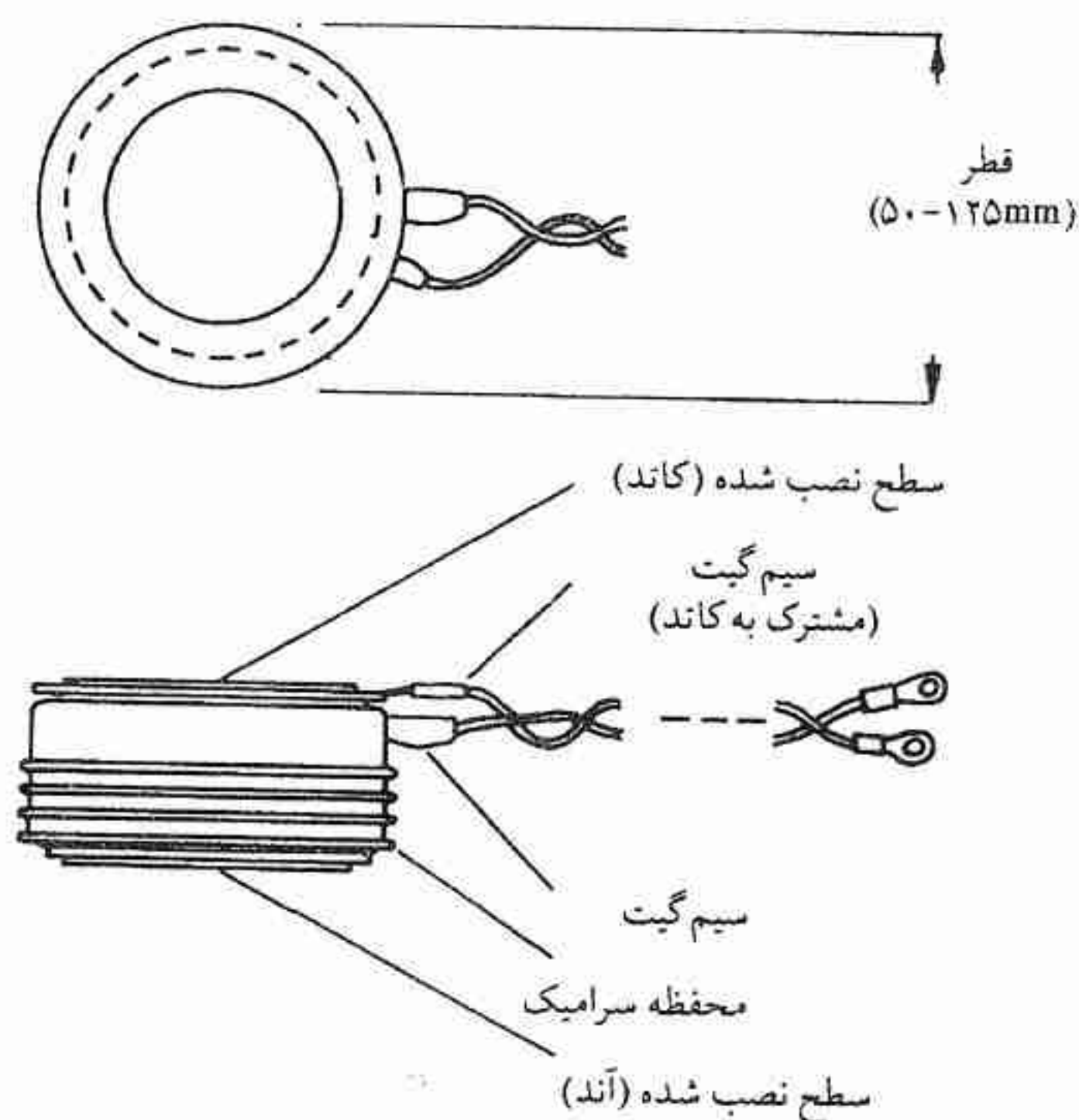
مشخصات تایرستور، مشخصه‌های الکتریکی آن را در درجه حرارت‌های پیوند معینی، تعریف می‌کند. کلمه پیوند^۲ به لایه مرزی در درون قرص سیلیکون اشاره دارد و اصطلاح درجه حرارت پیوند معمولاً برای توصیف درجه حرارت «نقطه داغ»^۳ لایه در درون قرص سیلیکون به کار می‌رود.

شکل ۴ یک مدار معادل حرارتی ساده را نشان می‌دهد که محاسبه درجه حرارت پیوند را ممکن

1 - mounting surfaces

2- junction

3- Hot - spot

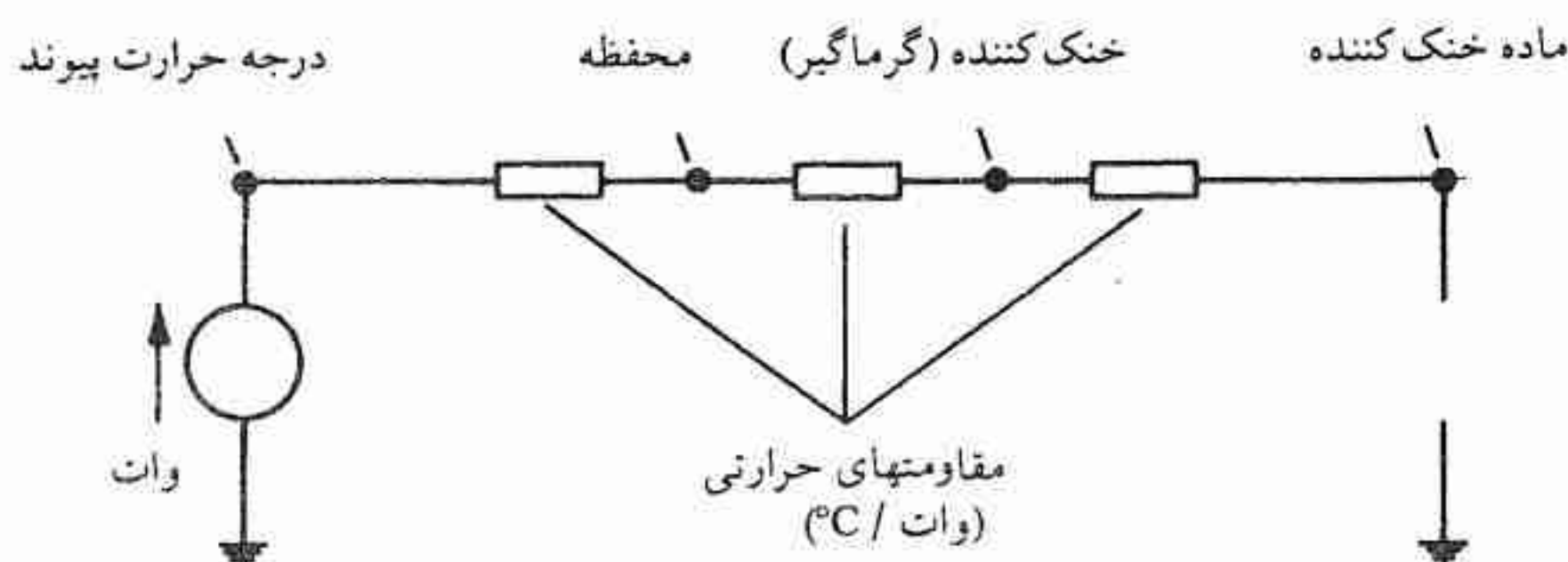


شکل ۳ - خلاصه‌ای از تایریستور نمونه

می‌سازد. و مقدار وات میزان حرارتی است که در درون تایریستور ایجاد می‌شود. حاصلضرب وات و مقاومت‌های حرارتی بر حسب $^{\circ}\text{C}/\text{watt}$ منجر به اختلاف درجه حرارت می‌گردد. با در نظر گرفتن مقاومت‌های حرارتی بین پیوند و محفظه تایریستور، مقاومت حرارتی بین محفظه و خنک کننده (گرماگیر)^۱، مقاومت حرارتی بین خنک کننده و ماده خنک کننده و درجه حرارت ماده خنک کننده، می‌توان درجه حرارت پیوند را در هر شرایط کاری محاسبه کرد.

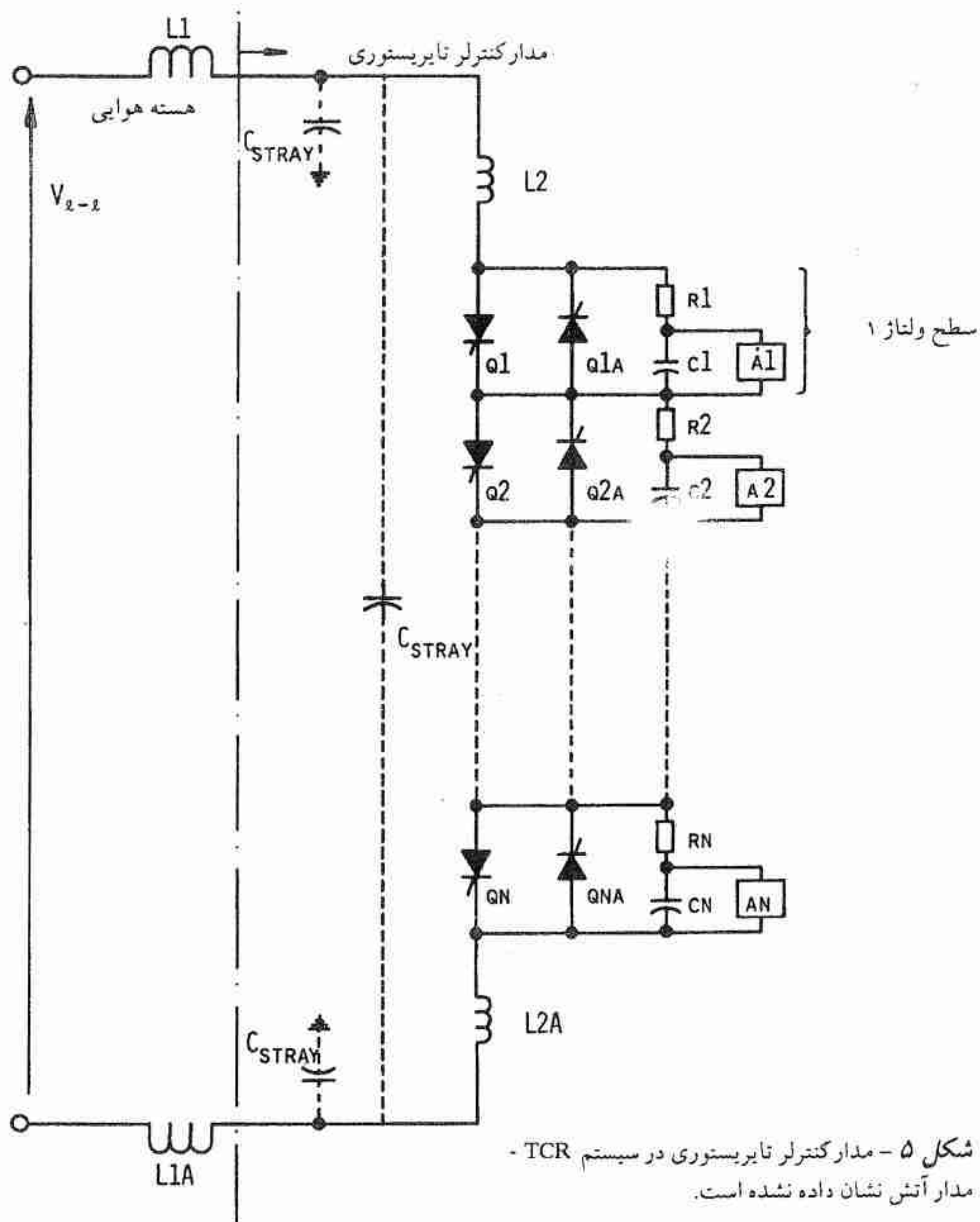
مدار معادل حرارتی شکل ۴ برای شرایط ماندگار^۲ است. ترکیب تایریستور و خنک کننده (گرماگیر) دارای ظرفیت ذخیره حرارتی هستند، به عبارت دیگر، این مجموعه دارای ثابت زمان حرارتی است که عبور جریان اضافه بار کوتاه مدت را مجاز می‌نماید. مقدار نمونه برای ثابت زمان حرارتی تایریستوری که با هوا خنک می‌شود در حدود ۳ دقیقه است. مقدار این ثابت زمانی حرارتی برای تایریستوری که با سیال خنک می‌شود، معمولاً کمتر است، البته ثابت زمانی حرارتی بر حسب

ماده خنک‌کننده تغییر می‌کند. این ثابت زمانی حرارتی به طراح کنترلر تایریستوری اجازه می‌دهد که توانایی اضافه بار را که چندین میلی ثانیه یا حتی چند ثانیه طول می‌کشد (به خصوص در تایریستور با خنک‌کننده هوا)، فراهم نماید. طراح شرایط کار (جریان عبوری از کنترلر تایریستوری) را در معین کردن تلفات توان کنترلر تایریستوری در نظر خواهد گرفت. سیستم خنک‌کننده، مقاومت حرارتی بین خنک‌کننده (گرم‌گیر) و ماده خنک‌کننده را معین میکند. با انتخاب مناسب پارامترهای سیستم خنک‌کننده، درجه حرارت پیوند می‌تواند در شرایط کار نرمال و غیرنرمال در محدوده تعریف شده قرار گیرد.



شکل ۴ - مدار حرارتی تایریستور - شرایط ماندگار

بایستی درجه حرارت پیوند کمتر از ماکزیمم مقداری باشد که از طرف سازنده تایریستور مشخص شده است. به میزانی که درجه حرارت پیوند افزایش می‌یابد توانایی تحمل تایریستور در مقابل ولتاژ معکوس کاهش می‌یابد. این مساله فقط نمونه‌ای از رفتار نامطلوب تایریستور ناشی از افزایش درجه حرارت پیوند است. همچنین افزایش درجه حرارت پیوند، منجر به افزایش تنش حرارتی^۱ در درون مجموعه تایریستور می‌گردد (به واسطه اختلاف انبساط حرارتی مواد درون آن). طراح بایستی درجه حرارت پیوند را به قدر کافی کم انتخاب نماید تا از عملکرد قابل اعتماد تایریستور مطمئن گردد. مقدار ماکزیمم درجه حرارت پیوند برای کنترلر تایریستوری در جریان ماکزیمم و یا درجه حرارت ماکزیمم ماده خنک‌کننده، به طور نمونه می‌تواند تا 120°C یا بیشتر باشد.



۴-۵ توصیف کنترلر تایریستوری

۴-۵-۱ کلیات

مقادیر نامی جریان و ولتاژ مورد لزوم در کنترلر تایریستوری، معمولاً از مقادیر نامی تایریستور تکی -

حتی بزرگترین آن - بیشتر است. به علاوه، برای عملکرد ac لازم است که از زوج تایریستور که در جهت خلاف هم به طور موازی قرار می‌گیرند، استفاده کرد تا هدایت در هر دو جهت صورت گیرد. مقادیر نامی مورد لزوم ولتاژ و جریان به ترتیب از اتصال سری و موازی آنها به دست می‌آید. یک نمونه از مدار کنترل‌کننده تایریستوری که در سیستم TCR به کار می‌رود، در شکل ۵ نشان داده شده است. فقط یک فاز از مثلث سه فاز نشان داده شده است. تایریستورها در چندین «سطح ولتاژ» به طور سری با هم قرار دارند که در هر یک از آنها دو یا چند تایریستور با هم موازی هستند. گاهی به یک فاز کنترلر تایریستوری، یک «کلید تایریستوری»^۱ اطلاق می‌شود.

وظیفه اجزا مختلف به قرار زیر است:

۱- L_۱ و L_{۱A} راکتورهای با هسته هوایی هستند که در خارج از کنترلر تایریستوری قرار دارند. مجموع دو راکتور راکتانس کل یک فاز را تشکیل می‌دهند، و به منظور حفاظت «کلید تایریستوری» در مقابل انواع معینی از اتصال کوتاه الکتریکی به دو قسمت تقسیم شده است.

۲- Q_۱، Q_{۱A}، Q_۲، ... و Q_{NA} معرف تایریستورها هستند. به منظور هدایت دو طرفه، به صورت موازی - معکوس قرار گرفته‌اند. در شکل ۵ برای هر سطح ولتاژی دو تایریستور وجود دارد (یک تایریستور برای هر جهت). جریان عبوری از راکتورهای خارجی L_۱ و L_{۱A} به وسیله کنترل زاویه هدایت تایریستورها، کنترل می‌شود.

۳- L_۲ و L_{۲A} راکتورهای کوچکی هستند و از نظر فیزیکی نزدیک ترمینال «کلید تایریستوری» قرار دارند و نقش آنها این است که در هنگام آتش شدن تایریستورها، در تخلیه کاپاسیتانس‌های پراکندگی^۲ (در مسیر کلید تایریستوری) تاخیر ایجاد می‌نمایند. در نتیجه، جریان اولیه di/dt (میزان افزایش جریان) در تایریستورها محدود می‌گردد.

۴- کاپاسیتانس‌های C_{stray} کاپاسیتانس‌های پراکندگی هستند [(نظیر کاپاسیتانس بین باس بار (شین) و زمین، کاپاسیتانس ایزولاتور (مقره)^۳ و بوشینگ^۴ و کاپاسیتانس بین ترمینال‌ها)]. بر حسب مقدار جریان نامی، ممکن است بیش از یک تایریستور برای حمل جریان در هر جهت به کار گرفته شود. به تعداد هشت تایریستور در هر سطح ولتاژی (که ۴ تایریستور موازی در یک جهت و ۴ تایریستور دیگر در جهت دیگر هدایت می‌کنند) در سیستم TCR جریان زیاد به کار گرفته شده است.

۵- مدارهای متشکل از خازن‌ها و مقاومت‌های سری (R_۱، R_۲، ...، R_N، و C_۱، C_۲، ...، C_N)

1- Thyristor Switch

2- Stray Capacitances

3- Insulator

4- Bushing

که در هر سطح ولتاژی قرار دارند موجب می‌شوند که ولتاژ گذرای که در موقع خاموش شدن تایرستور در دو سر کلید تایرستوری ظاهر می‌شود، محدود گردد. مدار R-C به «مدار ضربه گیر»^۱ موسوم است و یک وجه عمومی مدارهای دیودی و تایرستوری است. به علاوه، در فرکانس تغذیه، مدارهای سری R-C توزیع ولتاژ را بین تایرستورها برابر می‌نمایند.

۶- هنگامی که یک تایرستور از عملکردش باز می‌ماند، آن تایرستور اتصال کوتاه می‌شود. بنابراین لازم است از چنین واقعه‌ای مطلع گردیم. در اثر عمل نکردن یک تایرستور ولتاژ بر روی تایرستورهای باقیمانده افزایش می‌یابد. پارامترهای کنترلر تایرستور طوری محاسبه شده‌اند که می‌توانند تعداد کمی از تایرستورهای اتصال کوتاه شده (معمولاً کمتر از ۱۰٪) را تحمل نمایند. یکی از روش‌های نشان دادن تایرستوری که از عمل بازمانده است (اتصال کوتاه شده است) این است که یک مدار لامپ مشخص کننده وضعیت^۲، به دو سر «سطح ولتاژ» (یا خازن ضربه گیر) متصل گردد. چنین مداری فقط حدود میلی آمپر جریان می‌کشد. از آنجایی که تایرستور اتصال کوتاه شده قادر نیست ولتاژ را تحمل نماید، از کار افتادن آن منجر به خاموش شدن لامپ وضعیت می‌گردد. البته، مدار لامپ وضعیت از نظر ولتاژ در همان سطح ولتاژ (ولتاژ بالا) کلید تایرستوری قرار دارد.

در بعضی موارد، یک نشان دهنده وضعیت راه دور مطلوب ماست. چنین نشان دهنده راه دور را می‌توان به کمک فیبرنوری به دست آورد. فیبرنوری به وسیله بخشی از ولتاژ که در دو سر تایرستور موجود است، انرژی دار می‌شود. فیبرنوری مدار نشان دهنده راه دور را از ولتاژ زیاد کلید تایرستوری، ایزوله می‌کند. یکی از راه‌های به دست آوردن انرژی لازم برای مدار نشان دهنده وضعیت، به کار گرفتن خازن مدار ضربه گیر به عنوان یک منبع ولتاژ است. مدارهای A_1 ، A_2 و ... A_N چنین نقشی را ایفا می‌کنند.

۷- مدارهای کنترل دیگری نیز برای آتش کردن تایرستورها وجود دارد. چنین مدارهایی در شکل ۵ نشان داده نشده است و بعداً مورد بحث قرار خواهند گرفت.

۵-۴-۲ مدار ضربه گیر R-C

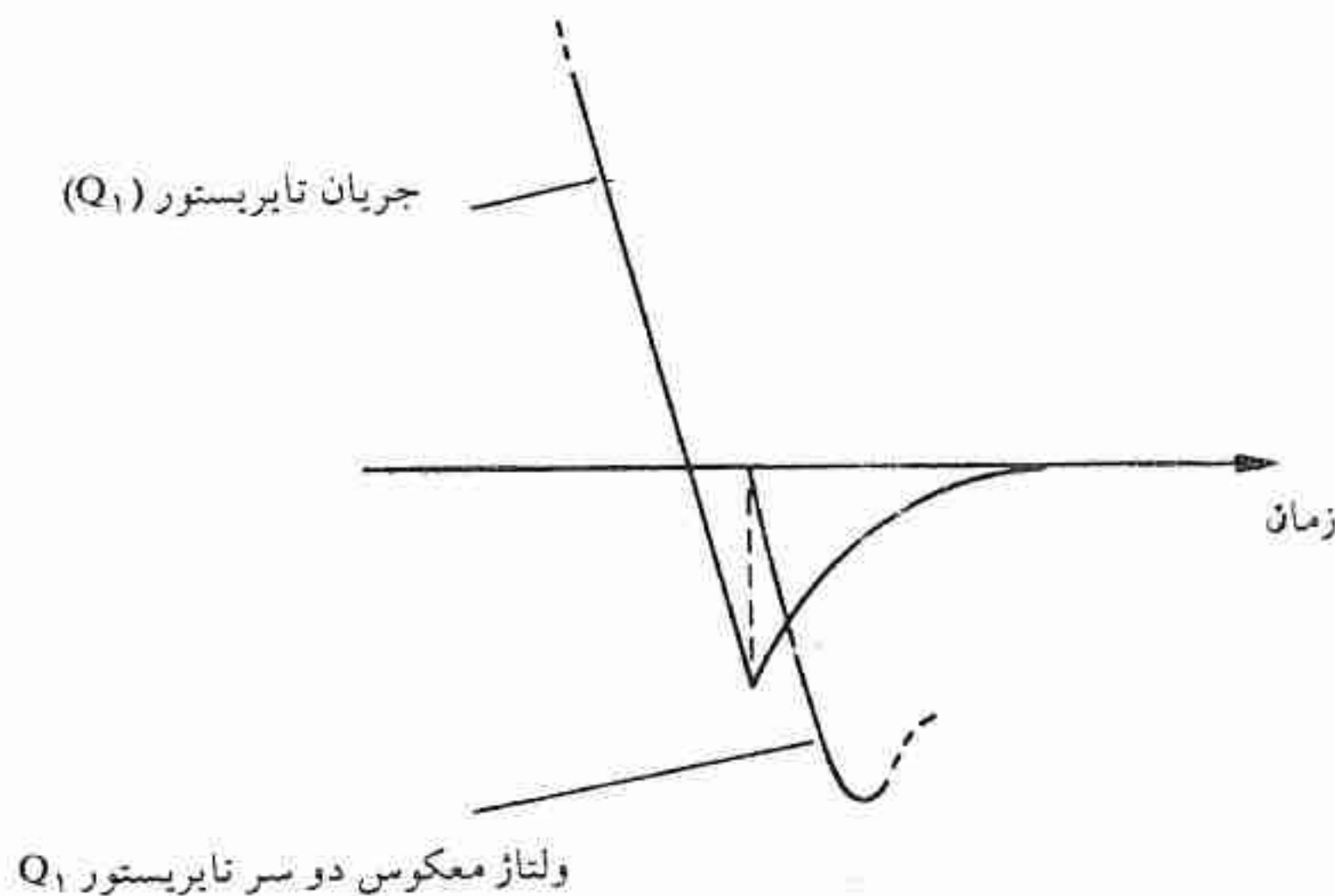
یکی از مشخصه‌های مهم دیودها و تایرستورها جریان برگشتی^۳ (جریان باز یافتی) است. جریان برگشتی در فاصله زمانی که در آن تایرستور نقش خود را از کلید بسته به کلید باز تغییر می‌دهد، به

1- Snubber Circuit

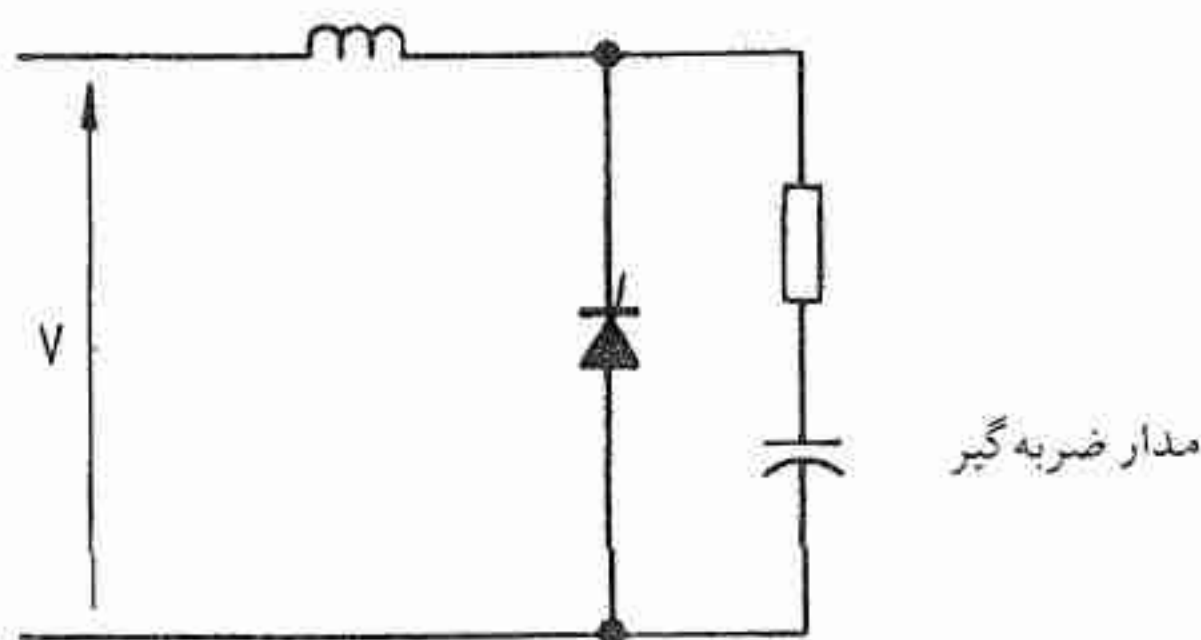
2- Status Lamp Circuit

3- Recovery Current

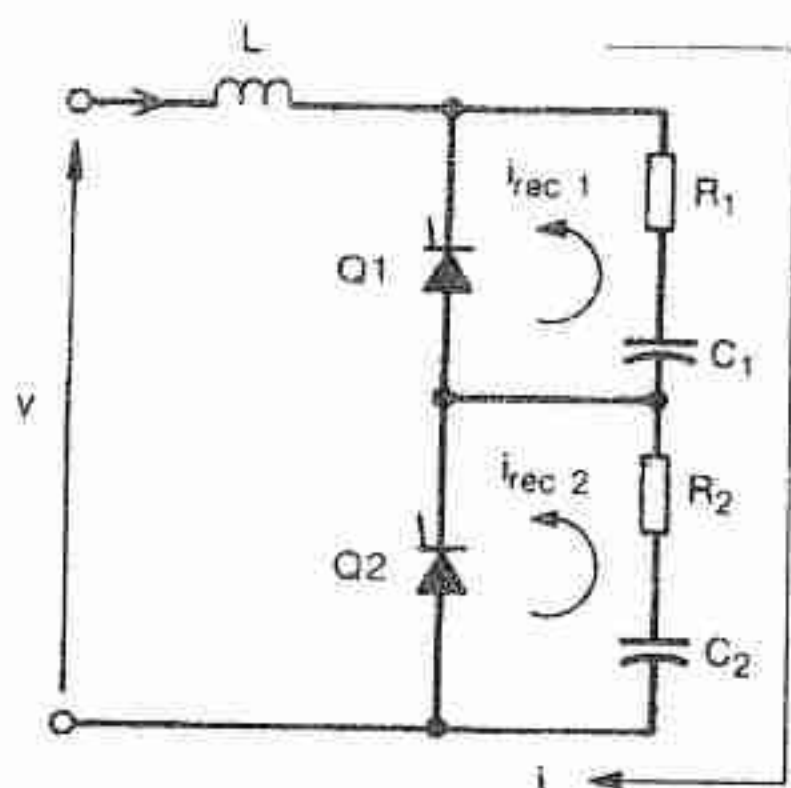
وجود می‌آید. شکل موج جریان و ولتاژ یک تایریستور در خلال این فاصله زمانی عبور، به طور نمونه در شکل ۶ نشان داده شده است. جریان برگشتی یک پدیده گذرا است و می‌توان آن را به حذف کردن حامل‌های بار از تایریستور (وقتی که از وضعیت هدایت به وضعیت قطع در می‌آید) نسبت داد. حاصلضرب اندوکتانس مدار و di/dt (میزان تغییر) جریان برگشتی منجر به ولتاژ گذرا در دو سر کلید تایریستوری می‌گردد. به منظور کنترل دامنه و شکل موج ولتاژ گذرا، ترکیبی از مقاومت و خازن سری را در دو سر سطوح ولتاژ قرار می‌دهند. چنین مدار معادل منتجه‌ای در شکل ۷ نشان داده شده است. انتخاب مقاومت و خازن طوری است که مدار در شرایط میرایی بحرانی باشد که منجر به شکل موج ولتاژی می‌شود که به طور نمونه در شکل ۶ آمده است.



شکل ۶ - ولتاژ معکوس و جریان معکوس دو سر تایریستور



شکل ۷ - مدار معادل ضربه گیر



شکل ۸ - مدار سری تایریستورها برای نشان دادن جریانهای برگشتی (بازیافتی)

مقالات متعددی وجود دارد (به عنوان مثال به مرجع ۴ مراجعه شود) که برای انتخاب مقادیر مقاومت و خازن نوشته شده‌اند. طراح کنترلر تایریستوری بر اساس دامنه پرش^۱، میزان تغییر ولتاژ دو سر تایریستور و با توجه به اینکه داشتن حداقل کاپاسیتانس ضربه گیر مطلوب خواهد بود، مقدار مقاومت و خازن را انتخاب خواهد کرد. دلیل مطلوبیت داشتن حداقل کاپاسیتانس ضربه گیر این است که تلفات توان در مقاومت ضربه گیر به واسطه جریان‌هایی است که خازن را شارژ و تخلیه می‌نمایند. پیک جریان برگشتی در تایریستورهایی که در کنترلر تایریستوری به کار رفته‌اند، متفاوت می‌باشد. این تفاوت منجر به تفاوت ولتاژ بایاس در بین خازن‌های ضربه گیر می‌گردد. این مطلب با در نظر گرفتن حلقه‌های جریان شکل ۸ که در آن دو تایریستور با هم سری شده‌اند، واضح است. جریان i_{rec1} و i_{rec2} معرف جریان‌های برگشتی تایریستورهای $Q1$ و $Q2$ می‌باشند. اختلاف بین دو جریان برگشتی i_{rec1} و i_{rec2} موجب تفاوت ولتاژ دو سر $C1$ و $C2$ گردیده و در نتیجه توزیع ولتاژ بین خازن‌های سری از حالت ایده‌آل منحرف می‌گردد. در عمل سازندگان تایریستور سعی می‌کنند با نزدیک کردن مشخصات تایریستورها به یکدیگر، این تفاوت را به حداقل برسانند. به علاوه، در تعیین حداکثر انحراف از توزیع یکسان ولتاژ بین سطوح ولتاژ (در فرکانس تغذیه)، بایستی حد مجاز تغییرات (تولرانس) کاپاسیتانس خازن‌های مدار ضربه گیر را در نظر گرفت.

۵-۴-۳ انرژی آتش‌کشنده

هدایت کنترلر تایریستور به کمک سیگنال آتش که از مدار آتش - که در پتانسیل زمین قرار دارد -

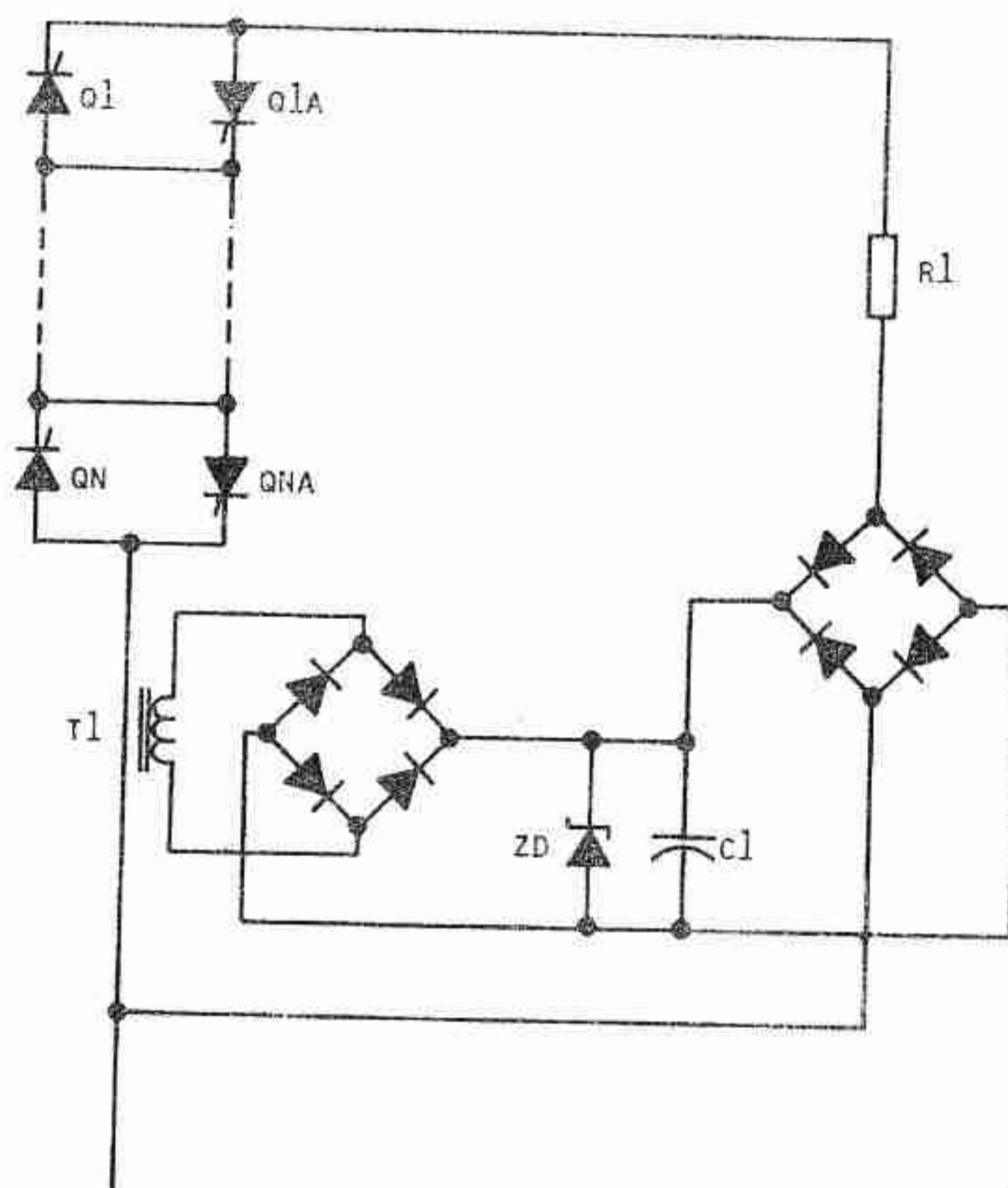
صادر می‌گردد، آغاز می‌شود. معمولاً سیگنال آتش به کمک فیبر نوری از مدار آتش به کنترلر تایریستوری (که معمولاً در ولتاژ $13/8 \text{ kV}$ یا بالاتر قرار دارد) انتقال داده می‌شود. هادی‌های نوری یک امپدانس ایزوله بزرگی را بین کنترلر تایریستوری و پتانسیل زمین فراهم می‌کنند.

تایریستورهایی که در اکثر کنترلرهای تایریستوری به کار می‌روند به سیگنال آتش الکتریکی نیاز دارند. بنابراین اغلب کنترلرهای تایریستوری حاوی مدارهای آتش الکترونیکی ولتاژ پایین هستند که در پاسخ به پالس نوری، سیگنال آتش را برای تایریستورها فراهم می‌نمایند. توان مورد نیاز مدار الکترونیکی ولتاژ پایین از منابع سه‌گانه زیر حاصل می‌شود:

- ۱- ولتاژ دو سر کنترلر تایریستوری وقتی که کنترلر هدایت نمی‌کند.
- ۲- جریان عبوری از کنترلر تایریستوری وقتی که کنترلر هدایت می‌کند.
- ۳- ترانسفورماتورهای کمکی از پتانسیل زمین.

یک نوع چنین مداری در شکل ۹ نشان داده شده است. تایریستورهای Q_1 الی Q_N بخشی از کل مدار تایریستور سری موجود در یک‌فاز را نشان می‌دهند. هنگامی که در دو سر تایریستورهایی که هدایت نمی‌کنند ولتاژ موجود است، خازن C_1 می‌تواند از طریق یک پل تمام موج و مقاومت R_1 شارژ گردد. همچنین، هنگامی که تایریستورها هدایت می‌کنند، خازن C_1 از طریق ترانسفورماتور جریان T_1 شارژ می‌گردد. نقش دیود زبر دو سر خازن C_1 این است که ولتاژ دو سر خازن C_1 را تنظیم می‌نماید. از خازن شارژ شده C_1 به عنوان منبع انرژی ولتاژ - پایین، برای مدارهای آتش استفاده می‌گردد. چنین مدارهایی نقش مدار یدکی^۱ دارند که در آن مدارهای آتش مربوط به مدار سری تایریستورها می‌توانند با یکدیگر ارتباط داشته باشند طوری که اگر بخشی از مدار آتش عمل نکند منجر به از کار افتادن کنترل آتش نمی‌گردد. مدارهای آتش فقط بخش کوچکی از تلفات کل کنترلر تایریستوری، انرژی را تلف می‌کنند.

با پیشرفتی که در زمینه تایریستور ایجاد شده است نیاز به چنین مدارهای آتش از بین رفته است زیرا هر تایریستوری مستقیماً از طریق هادی‌های فیبر نوری و به وسیله پالس‌های نوری آتش می‌شود.



شکل ۹ - مدار آتش تایرستور

۵-۴-۴ حفاظت در مقابل اضافه ولتاژ

ولتاژهای بیش از ولتاژ نامی موجب خرابی (اتصال کوتاه شدن) تایرستور می گردند. گرچه کنترلر تایرستوری طوری طراحی می شود که ولتاژ نرمال اعمال شده به خوبی در محدوده مقادیر نامی قرار گیرد، اما معمول است که مداری به عنوان حفاظت اضافه ولتاژ که جزء لازم کنترلر تایرستوری را تشکیل می دهد، فراهم گردد. هنگامی که ولتاژهای غیرعادی در دو سر کنترلر ظاهر می شود (به واسطه گذرای کلیدزنی و نظیر آن)، مدار حفاظت اضافه ولتاژ عمل می نماید.

توالی عملکرد مدار حفاظتی اضافه ولتاژ، به طور نمونه، مطابق زیر است:

۱- اضافه ولتاژ در دو سر کنترلر تایرستوری رخ می دهد.

۲- دامنه ولتاژ به مقداری می رسد (پایین تر از توانایی ولتاژ تایرستور) که مدار حفاظتی اضافه ولتاژ عمل می کند.

۳- مدار حفاظتی سیگنال آتشی به تایرستورها صادر می‌کند. بنابراین، تایرستورها هدایت خواهند کرد و در نتیجه ولتاژ دو سر تایرستورها به مقدار وضعیت - روشن (حالت - وصل) ۱ یا ۲ ولت، تنزل می‌یابد و از خرابی تایرستورها جلوگیری می‌گردد.

دو روش اجرای مدار حفاظتی وجود دارد. در یکی از روش‌ها ولتاژ دو سر مدار سری تایرستورهای فاز، تحت کنترل قرار می‌گیرد. هرگاه ولتاژ به سطح حفاظتی می‌رسد، سیگنال آتش صادر شده و تایرستورهای مدار سری را وارد مرحله هدایت می‌کند. در روش دیگر، هر تایرستوری به طور مجزا دارای مدار حفاظتی اضافه ولتاژ مستقل است. در روش اول بایستی امکان توزیع ولتاژ نابرابر بین تایرستورهای تکی، به خصوص هنگامی که ولتاژ گذرا در دو سر مدار ظاهر می‌شود، را در نظر گرفت. چه در غیر این صورت ممکن است مقدار ولتاژ دو سر تایرستور تکی از توانایی تایرستور تجاوز نماید و هنوز وسیله حفاظتی دو سر مدار شامل تمام تایرستورها عمل نکرده است.

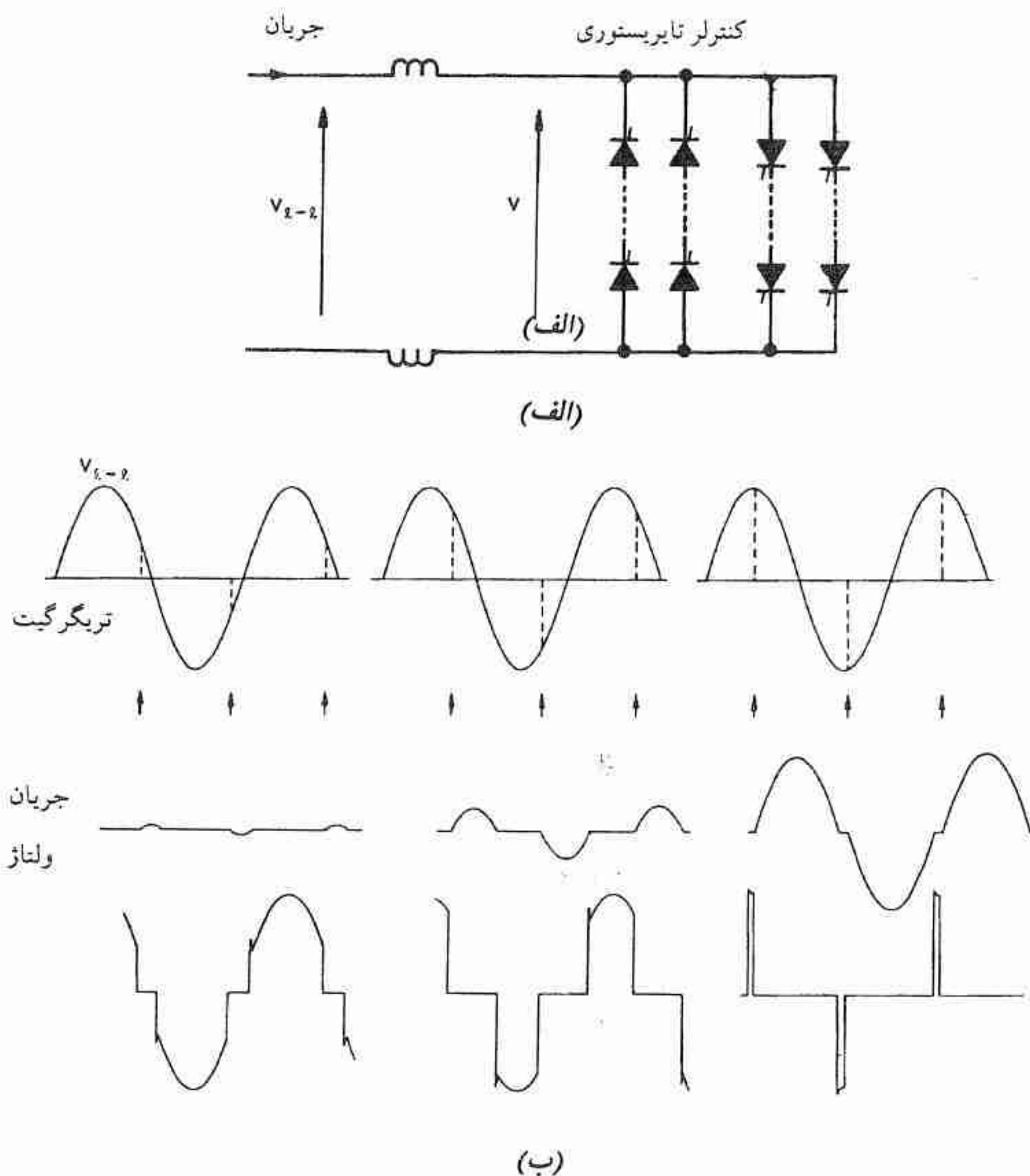
۵-۴-۵ تغییرات تلفات کنترلر تایرستوری در خلال عملکرد آن

شکل موج‌های جریان و ولتاژ یک کنترلر تایرستوری به کار گرفته شده در سیستم TCR، بستگی به مدت هدایت جریان در خلال نیم سیکل دارد. شکل موج‌های نشان داده شده در شکل ۱۰ مربوط به مدت زمان هدایت می‌نیم، ماگزیمم و متوسط می‌باشد.

حداکثر تلفات کنترلر تایرستوری، در خلال هدایت ماگزیمم صورت می‌گیرد. آنگاه، تلفات مدار ضربه گیر نیز در حداکثر مقدار خود قرار دارد، زیرا نوسان ولتاژ خازن‌ها در مقدار حداکثر خود قرار دارد. برای شرایط جریان - می‌نیمم (شکل ۱۰) مقدار تلفات تایرستور و مدار ضربه گیر کاهش می‌یابد. در خلال عملکرد دینامیکی کنترلر تایرستوری، تلفات از نیم سیکل تا نیم سیکل دیگر تغییر می‌یابد. در طراحی پارامترهای کنترلر تایرستوری اغلب (نه همواره) شرایط کار ماندگار که در آن جریان هدایت در حداکثر مقدار است، مشخص می‌گردد.

۵-۵ سیستم خنک‌کننده

نقش سیستم خنک‌کننده کنترلر تایرستوری این است که درجه حرارت تایرستور و سایر اجزا را در محدوده مجاز نگاه دارد. ماده خنک‌کننده می‌تواند هوا یا سیال باشد. برطبق نیازمندی هر کنترلر



شکل ۱۰ - (الف) مدار برای شکل ۱۰ ب شکل موج جریان و ولتاژ کنترلر تایریستوری

خاصی، سیستم خنک کننده می تواند تغییر کند. در صورت امکان هر سیستم خنک کننده بایستی دارای سیستم یدکی (کمکی) باشد، یعنی اینکه، اگر چنانچه بخشی از سیستم خنک کننده از کار باز ماند، به طور خودکار سیستم کمکی وارد عمل شود طوری که کنترلر بتواند به کارش ادامه دهد. در ذیل انواع مختلف سیستم خنک کننده که در کنترلر تایریستوری به کار رفته است، تشریح شده است.

۵-۵-۱ سیستم خنک‌کننده با هوای فیلتر شده

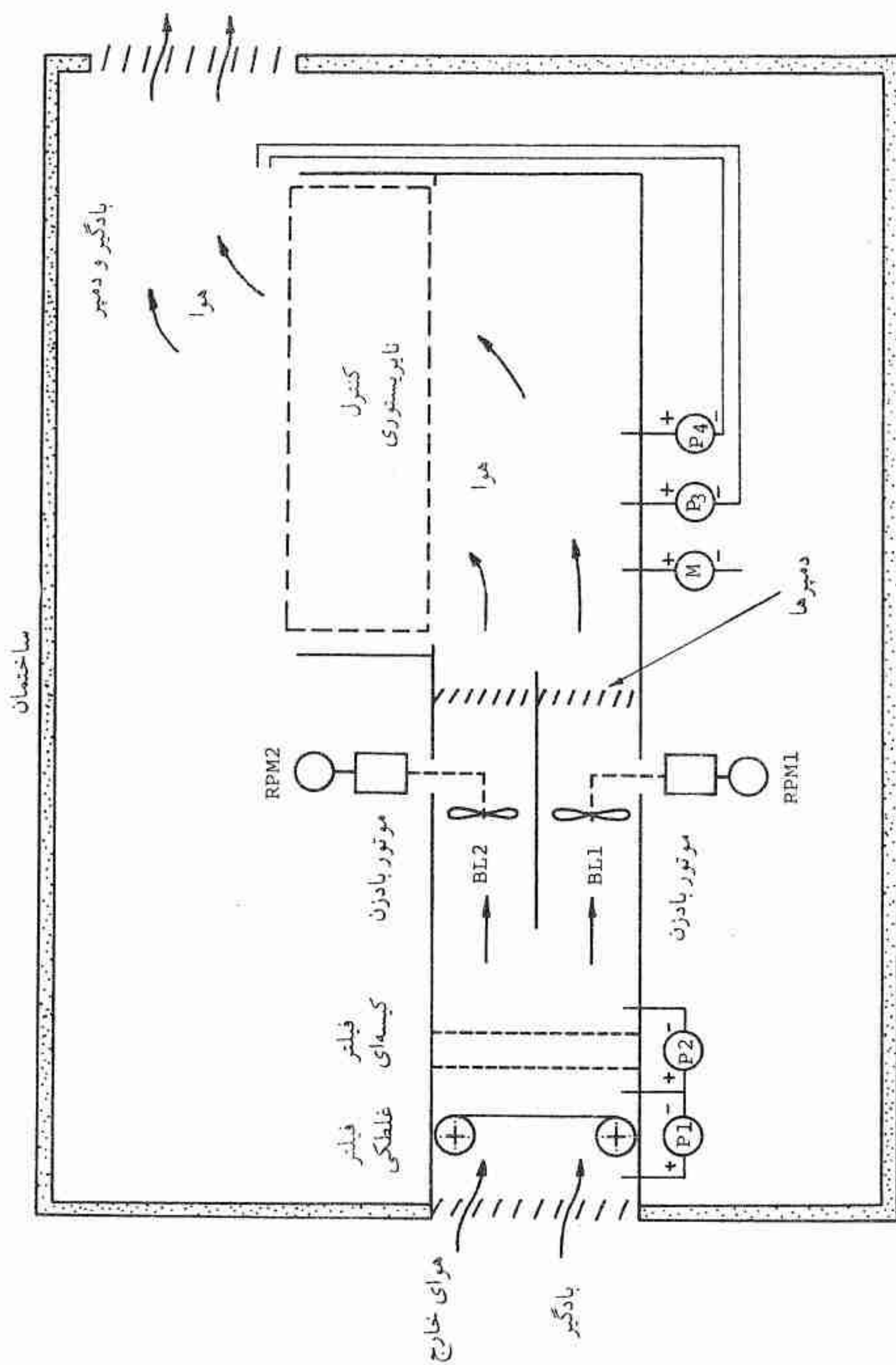
در چنین سیستم خنک‌کننده، هوای خارج پس از عبور از فیلتر وارد کنترلر شده و آنگاه هوای گرم به محیط خارج باز پس داده می‌شود. دیاگرام شماتیک (شکل نمایشی) سیستم خنک‌کننده در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

در ذیل خلاصه‌ای از دیاگرام و نقش اجزاء آن آمده است

- ۱- هوای خارج از طریق شیارها (بادگیر^۱) که در دیواره جانبی تعبیه شده است، به درون محفظه ساختمانی که تاسیسات کنترلر تایریستوری در آن قرار گرفته است، کشیده می‌شود.
- ۲- هوا ابتدا از فیلتر نوع - غطکی^۲ و سپس از فیلتر نوع - کسپه‌ای^۳ (که هر دو نوع فیلتر به طور وسیعی در تاسیسات صنعتی به کار برده می‌شوند) عبور می‌کند.
- ۳- سپس هوا وارد مسیری که در آن یک دستگاه بادزن^۴ (فن) کار می‌کند، می‌گردد. همواره فقط یکی از دو فن موجود کار می‌کند، فن دیگر به عنوان یدکی است.
- ۴- سپس هوا به کمک فن از طریق دمپرها^۵ وارد کنترلر تایریستوری می‌گردد.
- ۵- هوای گرم شده کنترلر را ترک نموده و از طریق دمپر دیگر از محفظه ساختمانی خارج می‌شود.

۵-۵-۲ تغییرات سیستم خنک‌کننده با هوای فیلتر شده

در فصل زمستان وقتی که درجه حرارت محیط کاملاً زیر درجه حرارت یخ بستن قرار دارد، مجموعه‌ای از دمپرها قابل کنترل با درجه حرارت به کار گرفته می‌شود تا اجازه دهد که مقداری از هوای گرم شده درون کنترلر تایریستوری، مجدداً به مسیر بادزن (فن) برگردد. درجه حرارت کنترل‌کننده می‌تواند درجه حرارت اطاق کنترلر تایریستوری و یا درجه حرارت مسیر فن باشد. این تغییرات باعث می‌شود که درجه حرارت اطاق کنترلر در درجه حرارتی که برای پرسنل مناسب است، نگاه داشته شود و همچنین درجه حرارت کنترلر را در حداقل مقدار محدود نماید. البته امکان دارد که به کمک فن و دمپر کوچکی که در جداره اطاق تعبیه می‌گردد، از هوای گرم شده خروجی برای گرم کردن اطاق‌های مجاور استفاده کرد.



شکل ۱۱ - سیستم با هوای فیلتر شده

هنگامی که از روش هوای سیر کوله شده مجدداً، نیز استفاده می‌گردد بایستی انتخابی بر روی وضعیت انرژی دار نشدن دمپرها انجام داد. موتورهای دمپر بایستی با فنر برگشتی مجهز شوند طوری که هنگامی که توان کنترلی موتور از بین می‌رود، دمپرها به طور خودکار به وضعیت انرژی دار نشدن، برگردند. یکی از روش‌های عملی این است که وضعیت انرژی دار نشدن دمپر طوری باشد که برای آن عمل سیرکوله شدن مجدد رخ ندهد. بنابراین، اگر در خلال کار سهواً توان کنترلی قطع گردد، سیستم طوری طراحی می‌شود که تحت هر شرایط کار غیرعادی، درجه حرارت اضافی در اطاق کنترلر تایرستوری رخ نمی‌دهد.

۵-۳-۵ سیستم هوای سیر کوله شده مجدد

کنترلر تایرستوری را می‌توان کاملاً با سیستم هوای سیر کوله شده مجدد بنا کرد. گرمای هوای سیرکوله شده به وسیله کویل‌های آب گرفته می‌شود. اغلب از یک سیستم هوایی تحت فشار استفاده می‌گردد تا فشار هوای اطاق کنترلر تایرستوری را بیش از فشار هوای خارج نمایند تا از نفوذ گرد و خاک اضافی به داخل اطاق جلوگیری کنند.

۵-۵-۴ سیستم خنک‌کننده با سیال

خنک کردن کنترلر تایرستوری را می‌توان به کمک سیال خنک‌کننده انجام داد. تایرستورها و سایر اجزاء تلف‌کننده گرما بر روی خنک‌کننده (گرماگیر^۲) که با سیال خنک می‌شود، نصب می‌گردند. بایستی یک پمپ کمکی^۳ موجود باشد تا در صورتی که پمپ اصلی^۴ دچار اشکال شد، عمل خنک‌کنندگی ادامه یابد. عمل تعویض پمپ اصلی به پمپ کمکی بطور خودکار بوسیله شیرهای بازرسی^۵ انجام می‌گیرد. ماده خنک‌کننده معمولاً آب و فرئون می‌باشد، هنگامیکه از سیال خنک‌کننده استفاده می‌گردد، لازم است که در طراحی کنترلر مساله ایمنی در مقابل حادثه نشتی ماده سردکننده، رعایت گردد. خوشبختانه این تکنولوژی بطور موفقیت آمیزی توسعه یافته است و در آینده روند به سوی کاربرد سیال خنک‌کننده خواهد بود.

1- Recirculated Air

2- Heat - Sink

3- Standby Pump

4- Running Pump

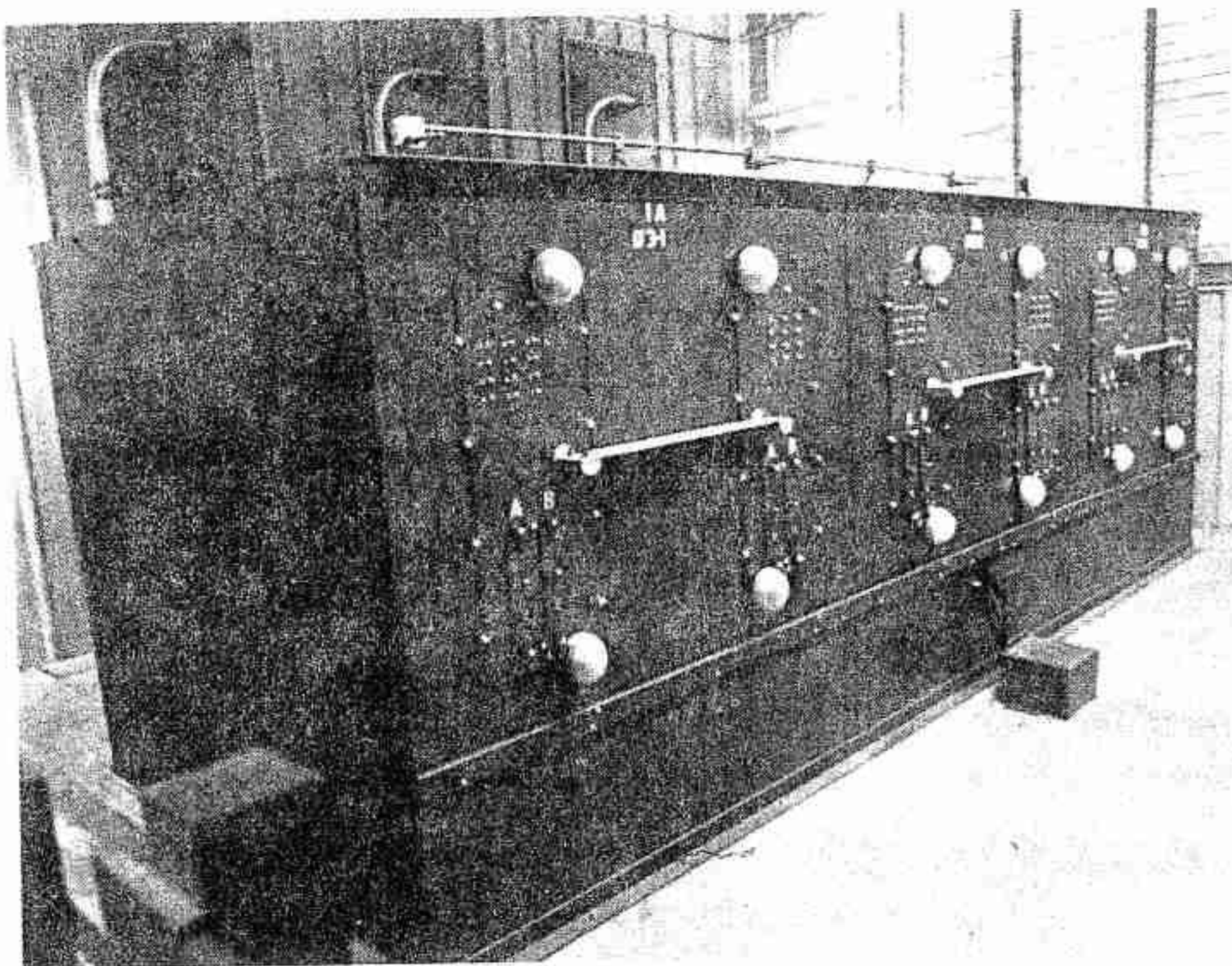
5- Check Valves

۵-۵-۵ نظریات کلی در کاربرد سیستم‌های خنک‌کننده

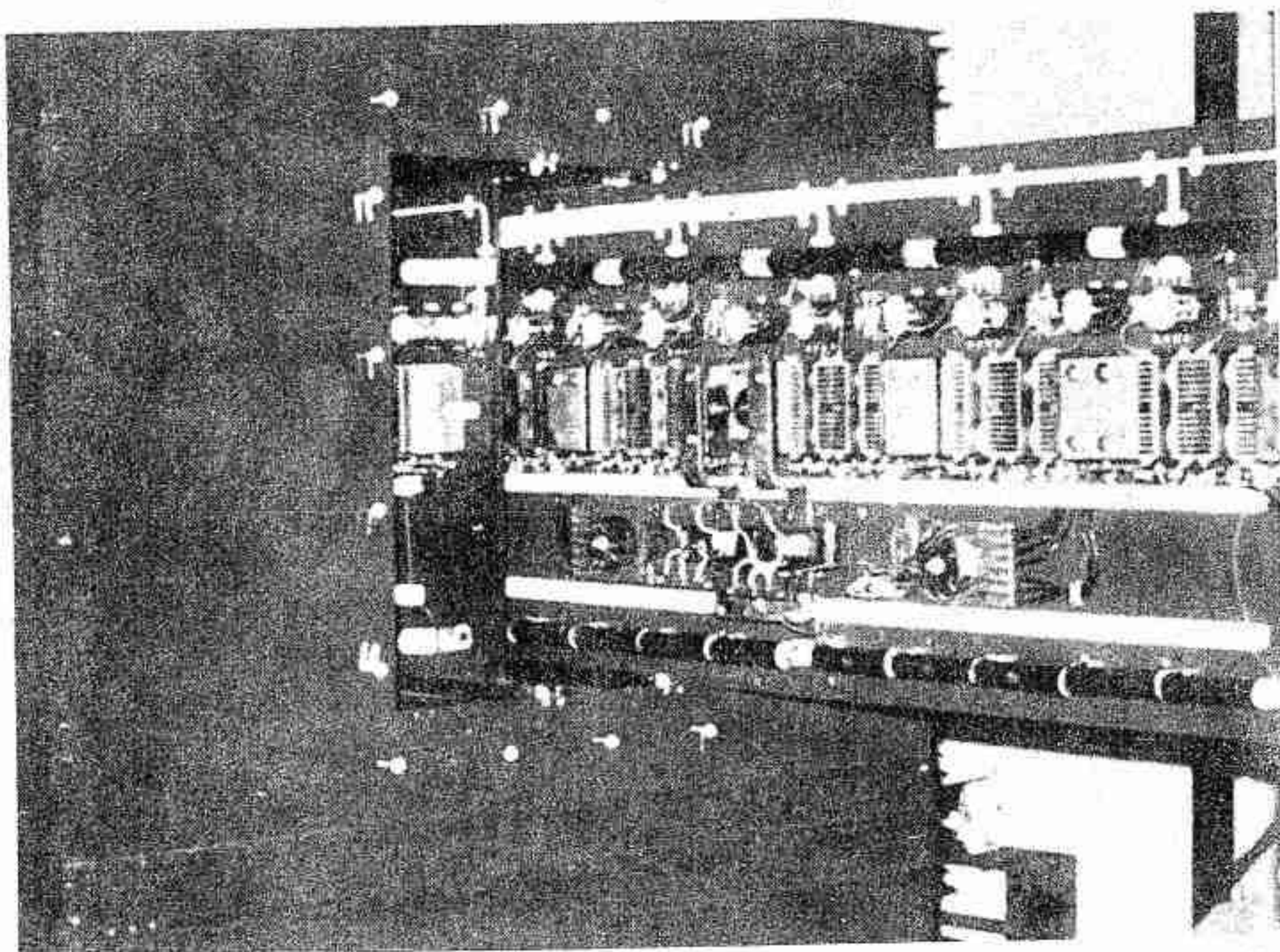
انتخاب نوع سیستم خنک‌کننده به شرایط محیط و خواست مصرف‌کننده بستگی دارد. هنگامی که شرایط هوای محیط طوری است که مستلزم تعویض و یا تمیز کردن زیاد فیلتر است، تبادل کننده حرارتی هوا-به آب^۱ بکار برده میشود. یک کنترلر با سیستم خنک‌کننده سیال در مقایسه با سیستم خنک‌کننده با هوا، دارای تلفات توان خنک‌کنندگی کمتری است. البته لازم است که اثر امکان نشتی سیال در درون کنترلر تایرستور فشار قوی، مد نظر قرار گیرد. سیستم خنک‌کننده با هوا از نظر سادگی در عملکرد و نگهداری دارای امتیاز است.

۵-۶ مثالی از کنترلر تایرستوری

در شکل ۱۲ فتوگراف یک کنترلر تایرستوری که با هوا خنک میشود، نشان داده شده است. هوای سرد از قسمت تحتانی وارد و هوای گرم از قسمت فوقانی آن خارج می‌شود. هوای گرم از طریق دمبرها، که در انتهای اطاق نشان داده شده است، اطاق را ترک می‌کند. شکل ۱۳ فتوگراف کنترلر تایرستوری مشابهی را نشان میدهد، تایرستورهاییکه با هوا خنک میشوند در مرکز آن نشان داده شده است.



شکل ۱۲ - کنترلر تایریستوری با سیستم خنک‌کننده هوا، $۱۳/۸\text{kV}$ ، ۴۰MVar .



شکل ۱۳ - سیستم کنترلر با خنک‌کننده هوایی

مراجع

1. *General Electric SCR Manual*, 6th Ed., General Electric, Auburn, New York, 1979.
2. S. K. Gandhi, *Semiconductor Power Devices*, Wiley, New York, 1977.
3. V. R. Stefanovic, "Thyristor Rectifiers and Synchronous Inverters," IEEE Tutorial *Power Electronics Applications in Power Systems*, Publ. 78EH0135-4-PWR, 1978.
4. W. McMurray, "Optimum Snubbers for Power Semiconductors," *IEEE Trans. Industry Appl.* 8, 593-600, (September/October 1972).
5. S. G. Dewan and A. Straughen, *Power Semiconductor Circuits*, Wiley, New York, 1975.
6. Gentry, et al., *Semiconductor Controlled Rectifiers - Principles and Application of p-n-p-n Devices*, Prentice-Hall, New Jersey, 1964.

مثالی از جبران‌کننده استاتیک جدید

R.W. LYE

۶-۱ مقدمه

در این فصل توصیف کاملی از یک جبران‌کننده استاتیک موسوم به جبران‌کننده Rimouski که به وسیله تایریستور کنترل می‌شود و در شبکه انتقال ۲۳۰ کیلوولت Hydro Quebec نصب شده است، ارائه می‌گردد. این جبران‌کننده نمونه‌ای از انواع متعدد جبران‌کننده است که در سیستم انتقال ولتاژ بالا نصب گردیده است، اما تعداد زیادی از جنبه‌های طراحی آن در جبران‌کننده‌های بار - بخصوص در کوره‌های الکتریکی - به کار رفته است. کنترلر تایریستوری، راکتورها و خازن‌ها اساساً در هر دو مورد به کار رفته است. تفاوت اصلی در شیوه کنترل و ولتاژ سیستم است.

سیستم Hydro - Quebec دارای خطوط متعدد طولانی و ولتاژ بالاست. قبل از ۱۹۷۸ در جبران راکتیو از کندانسورهای سنکرون، استفاده می‌شد. پروژه Baie James که در آن از نیروگاه آبی شمال استان بهره‌برداری شده است، توانی بیش از ۱۱۰۰۰ MW در سطح ولتاژ ۷۳۵ kV در فاصله تقریباً ۱۰۰۰ km انتقال داده می‌شود و در آن جبران‌کننده‌های موازی دینامیک به صورت جبران‌کننده‌های استاتیک در پنج محل نصب گردیده است. مطالعات طراحی که در آن اشکال متعدد جبران‌سازی مورد توجه قرار گرفته است، منجر به نصب دو جبران‌کننده استاتیک - نه در سیستم Baie James - گردیده است. یکی از این جبران‌کننده‌ها در نزدیکی Quebec ، Rimouski در سیستم ۲۳۰ kV ناحیه Gaspé نصب گردیده است. که در سال ۱۹۷۸ شروع به کار کرد و به عنوان

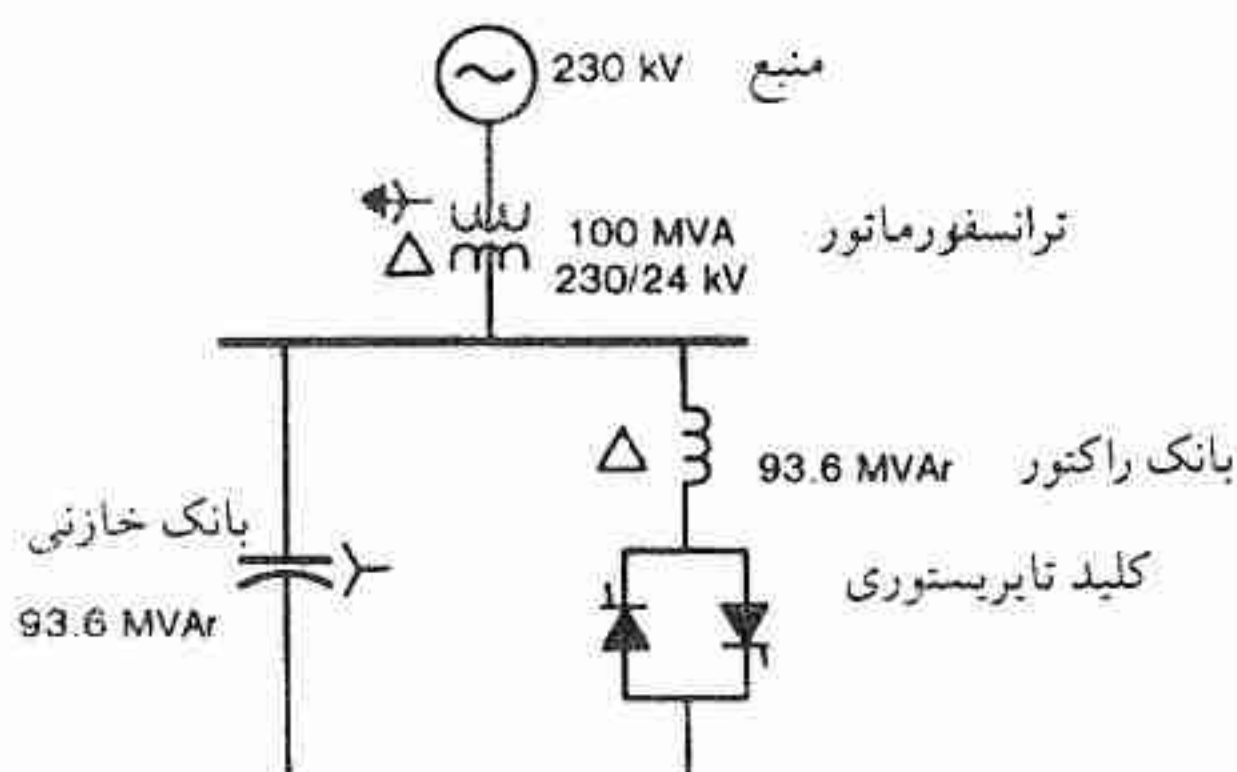
نمونه‌ای از جبران‌کننده سیستم انتقال ایفاء نقش کرد.

۶-۲ آرایش اصلی

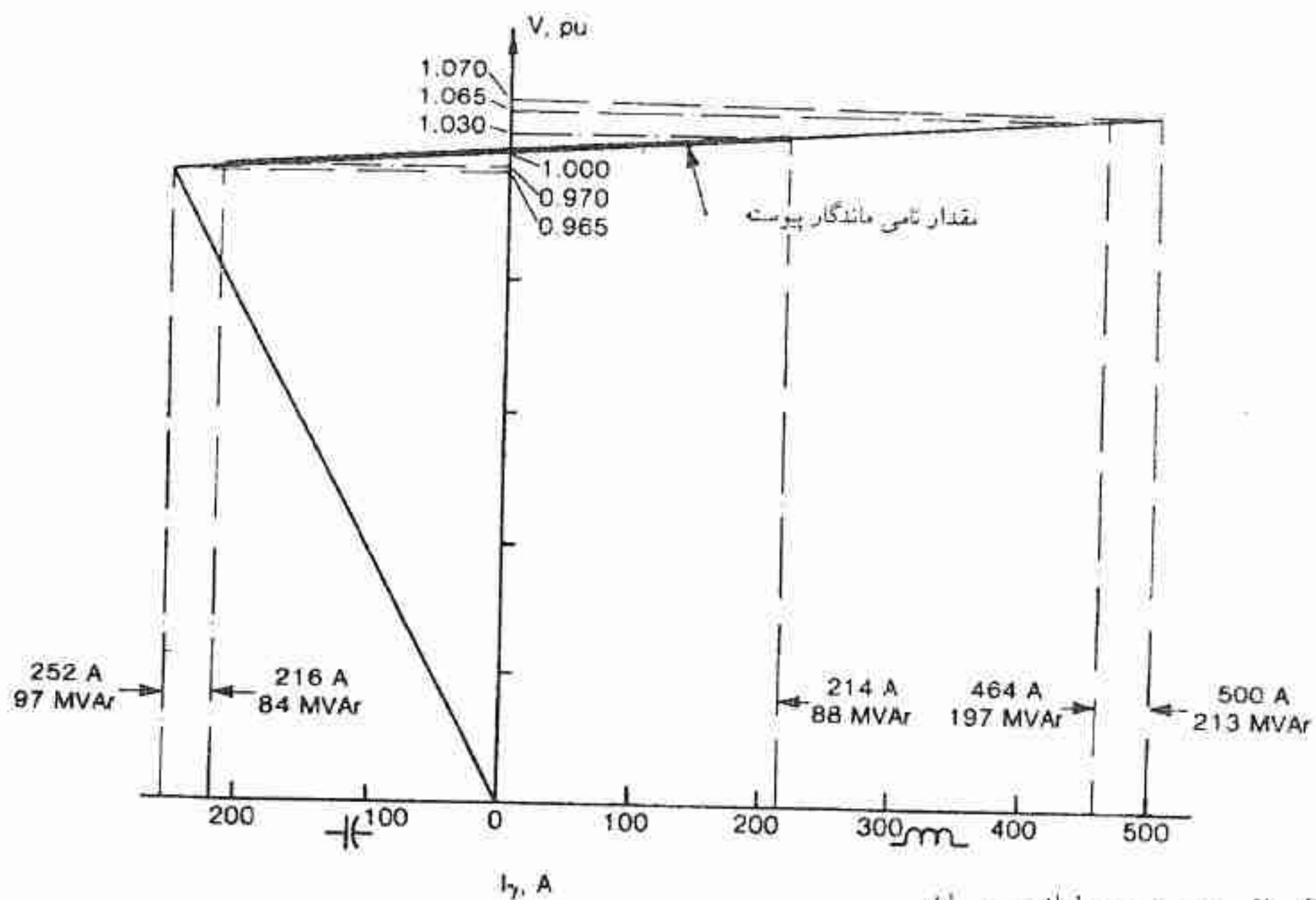
جبران‌کننده از راکتور تایریستور کنترل (TCR) و خازن ثابت تشکیل شده است. دیاگرام تک خطی ساده شده شکل ۱ اجزاء اصلی آن را نشان می‌دهد. جبران‌کننده از طریق یک ترانسفورماتور کاهنده $230/24 \text{ kV}$ ، 100 MVA به سیستم متصل شده است. در ثانویه ترانسفورماتور یک بانک خازنی سه فاز با مقدار نامی 93.6 MVar موازی با TCR با اتصال مثلث قرار دارد. مقدار نامی بانک راکتور نیز 93.6 MVar است.

مشخصه ولتاژ - جریان جبران‌کننده در باس 230 kV در شکل ۲ نشان داده شده است. شیب مشخصه در محدوده کنترل برابر 3% است. مفهوم آن این است که تغییر ولتاژ 3% - توان راکتیو کاپاسیتیو نامی 84 MVar را تولید می‌کند. برای یک مشخصه خطی ولتاژ - جریان، یک تغییر ولتاژ 3% + توان راکتیو اندوکتیو نامی 88 MVar را تولید می‌کند (شکل ۲). این شیب از نتیجه مطالعات سیستم انتخاب شده است.

مقادیر نامی جبران‌کننده در جدول ۱ خلاصه شده است و در شکل ۳ به طور ترسیمی بر حسب سیکل بار فرضی که در آن از ظرفیت کامل جبران‌کننده بهره‌برداری شده است، نشان داده شده است. چنین سیکل باری از مطالعات رفتار سیستم که شامل قطع بار و مطالعات اتصال کوتاه بوده است، به دست آمده است.



شکل ۱ - مدار اصلی جبران‌کننده TCR/FC

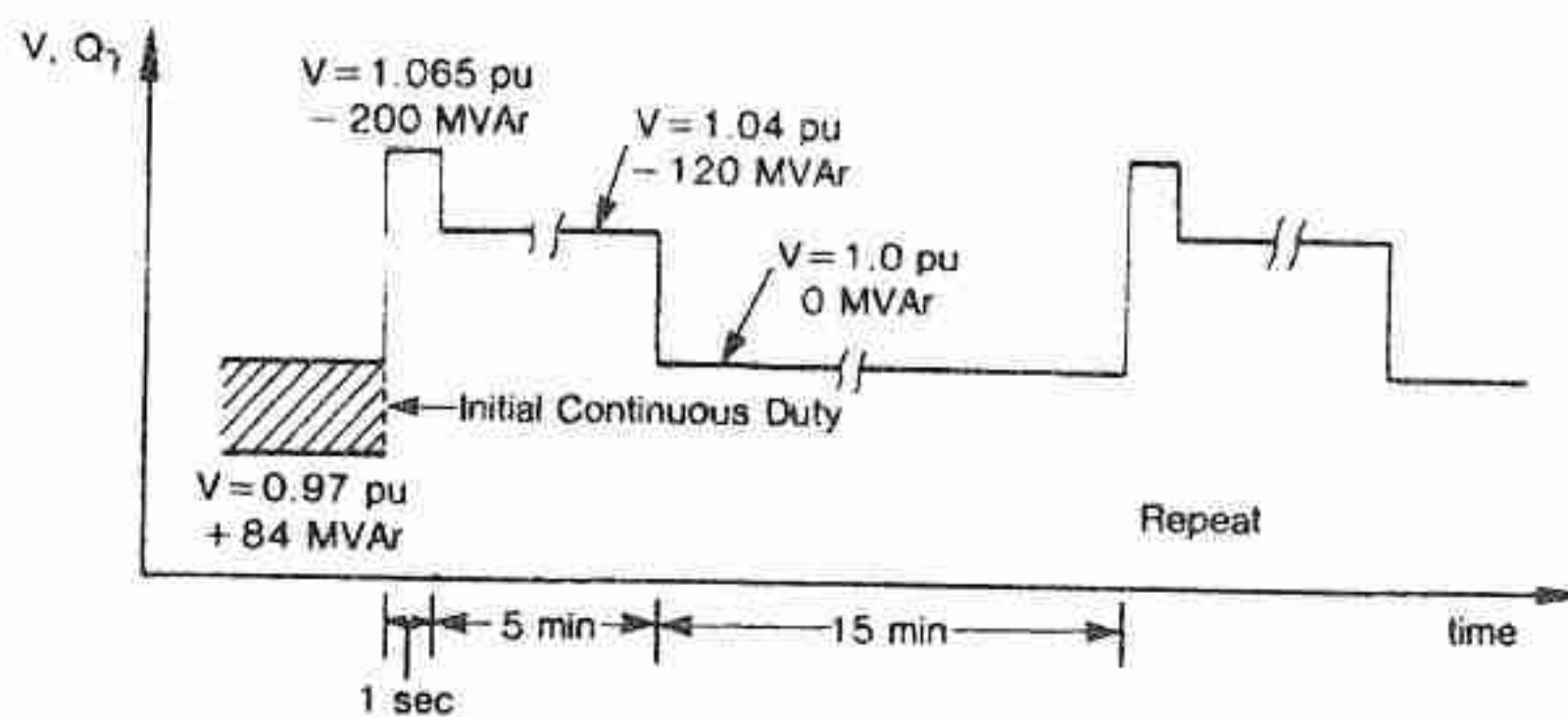


شکل ۲ - مشخصه ولتاژ - جریان

جدول ۱

مقادیر نامی جبران کننده Rimouski

توان راکتیو تولیدی = + جذبی = -	ولتاژ باس ۲۳۰ kV (pu)	فاصله زمانی
+84	0.97	پیوسته
0	1.00	پیوسته
-120	1.04	5 min
-200	1.065	1 sec

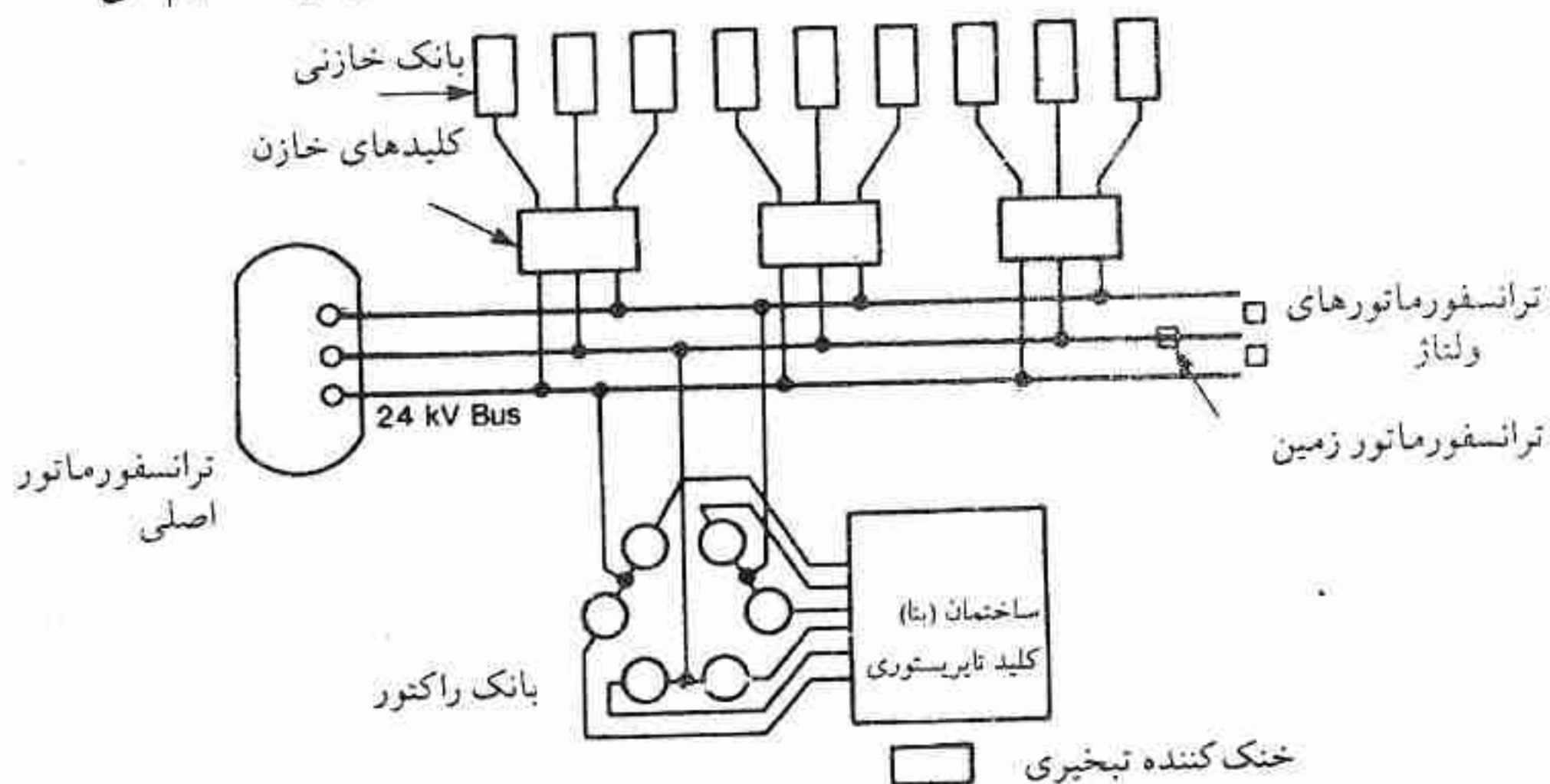


شکل ۳ - سیکل بار نامی جبران کننده

۶-۳ توصیف اجزا اصلی

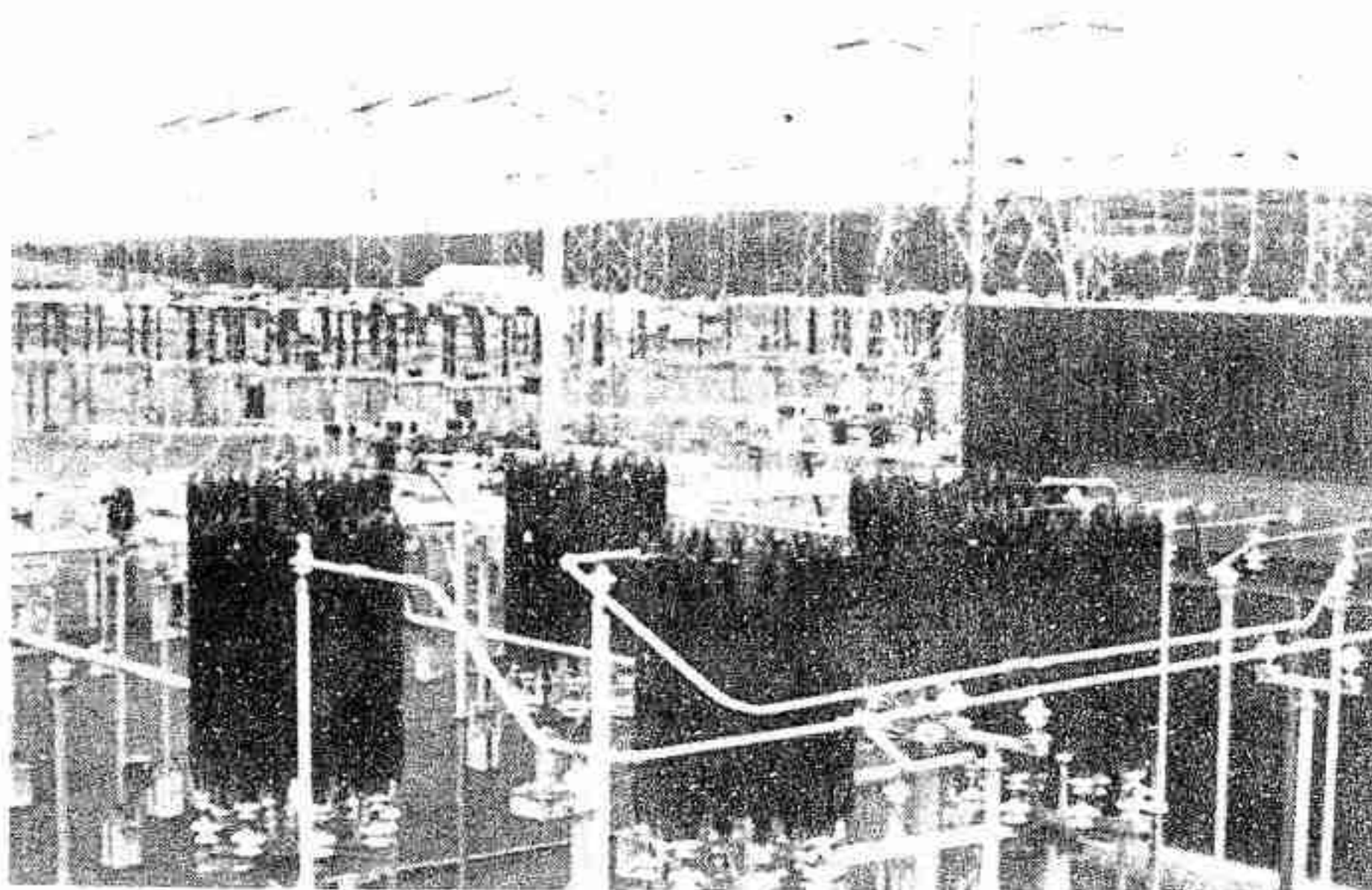
طرح‌بندی پست^۱ جبران‌کننده در شکل ۴ و فتوگراف آن در شکل ۵ نشان داده شده است.

ترانسفورماتور قدرت اصلی - این ترانسفورماتور در مقدار نامی $60/80/100 \text{ MVA}$ با خنک‌سازی $ON\ AN/ON\ AF/ON\ AF$ ، افزایش درجه حرارت 65°C ، اتصال ستاره 230 kV و مثلث 24 kV ، سه‌فاز و 60 Hz می‌باشد. امپدانس آن 11% است. یک تپ چنجر بار^۲ به نول HV متصل شده و به مقدار $\pm 10\%$ تنظیم را در ۳۳ مرحله^۳ فراهم می‌کند. تپ چنجر به طور اتوماتیک ولتاژ باس 24 kV را با پاسخ زمانی حدود ۳ ثانیه (به ازاء هر مرحله تغییر تپ) تنظیم می‌کند.

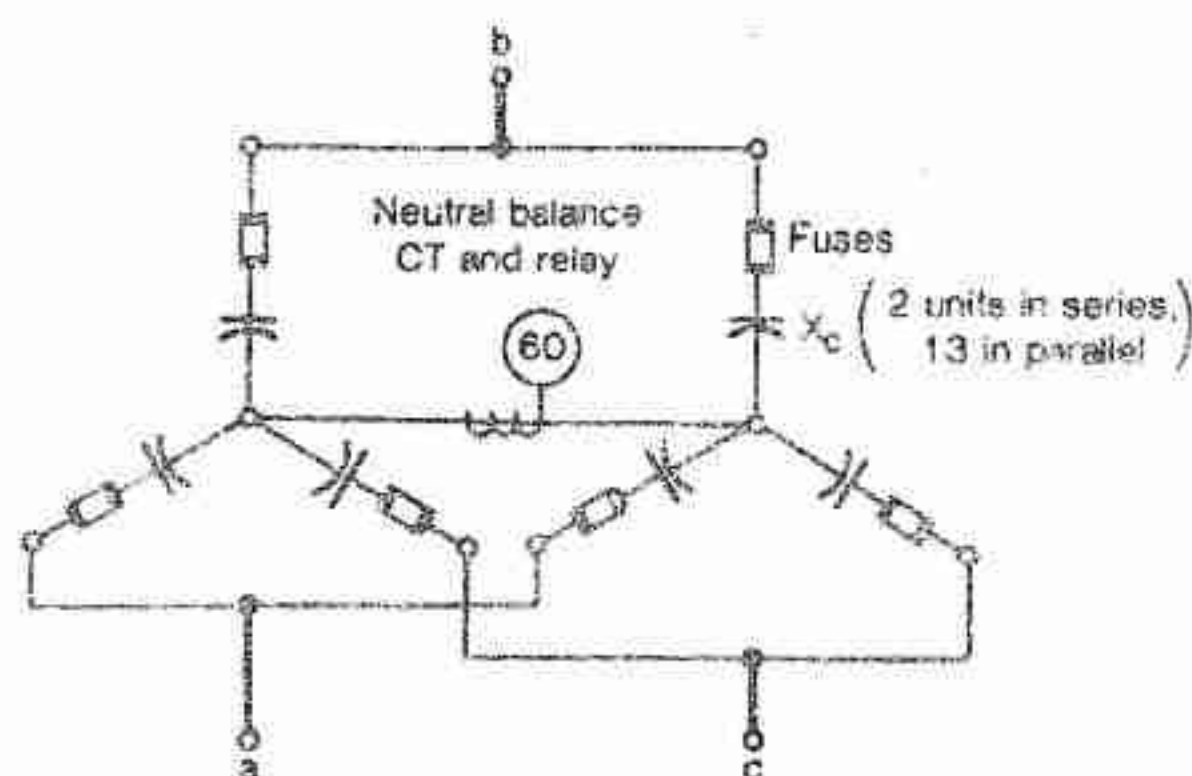


شکل ۴ - طرح‌بندی پست

بانک خازنی - بانک خازنی به مقدار $93/6 \text{ MVAR}$ به سه گروه ۳-فاز، هر یک به مقدار $31/2 \text{ MVAR}$ تقسیم شده است و هر یک از طریق اتصال ستاره دابل زمین نشده، به طور مجزا به باس 24 kV سوئیچ می‌شوند، (شکل ۶). یک CT بین نقاط خنثای دو اتصال ستاره قرار دارد تا اینکه نامتعادلی را تشخیص دهد. در هر یک از اتصال ستاره، در هر فاز ۲۶ واحد خازنی در دو گروه ۱۳ واحدی به طور موازی با هم قرار دارند. هر واحد خازنی دارای مقدار نامی 6930 V ، 200 KVAR می‌باشد.



شکل ۵- پست Rimouski که در آن ساختمان (بنا) جبران کننده استاتیجک در سمت راست قرار دارد و بانک راکتور در قسمت جلو قرار دارد.



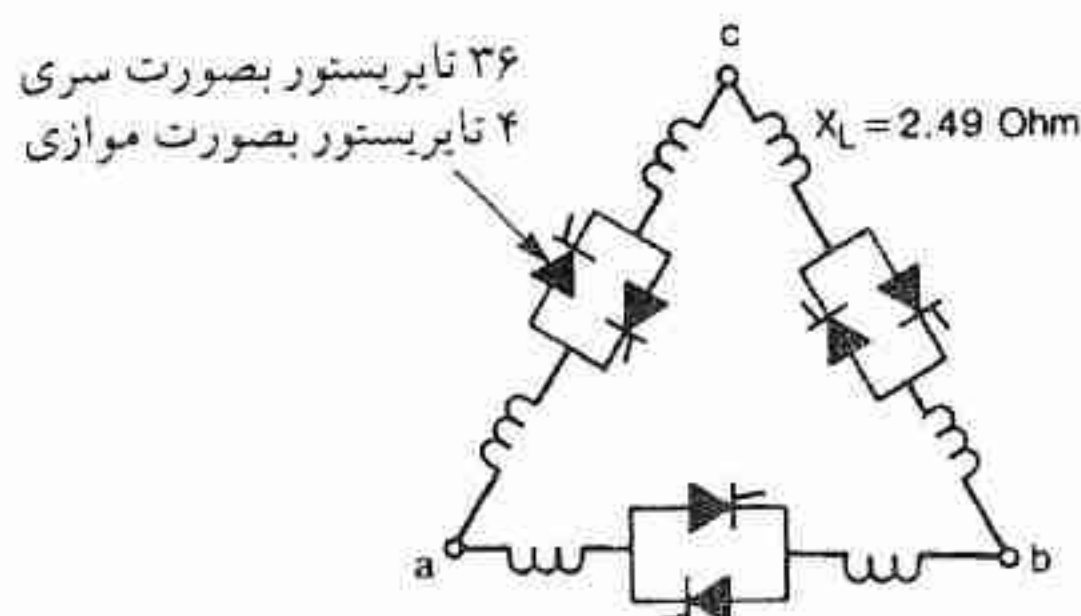
شکل ۶- بانک خازنی ۳۱/۲MVAR

سوئیچ‌های خازن - هر یک از بانک خازنی ستاره به وسیله یک کلید خلا سه فاز ۳۴/۵ kV، ۱۰۰۰ A به مدار متصل می‌گردد. یک راکتور $30 \mu H$ با هر قطب کلید سری شده است تا di/dt را محدود نماید. این کلیدها با دست و یا رله‌های حفاظتی معین عمل می‌کنند اما هیچگاه با رگولاتور

ولتاژ جبران‌کننده (آنچه که در جبران‌کننده ترکیبی مطرح است، به فصل ۴ مراجعه شود) عمل نخواهند کرد.

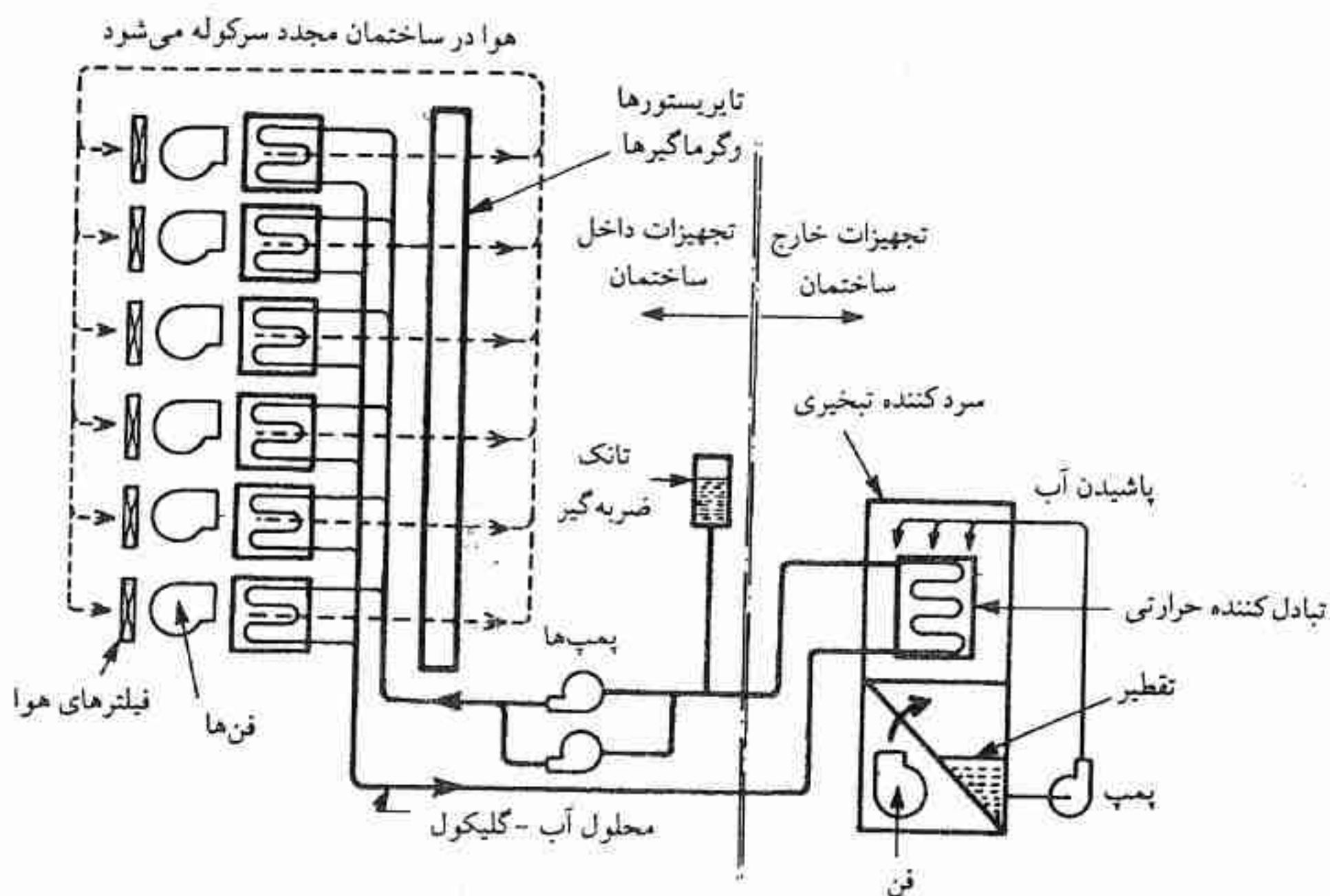
بانک راکتور - بانک راکتور قدرت^۱ اصلی شامل شش راکتور با هسته هوایی است که در شکل ۵ نشان داده شده است و مطابق شکل ۷ به هم متصل گردیده‌اند. آنها در یک صفحه شش ضلعی قرار دارند (مطابق شکل ۴). با چنین آرایشی کوپلاژ مغناطیسی بین راکتورها برابر می‌شود. هر راکتوری دارای راکتانس $2/49$ اهم در فرکانس 60 Hz است و برای جریان پیوسته دارای مقدار نامی 1300 A و برای زمان ۱ ثانیه مقدار 3800 A و برای ۵ دقیقه مقدار 2790 A است. این مقادیر جریان‌هایی است که برای سیکل بار نامی لازم است (شکل ۳). این مقادیر، مقادیر موثر در مولفه پایه است. راکتورها همچنین مولفه‌های هارمونیک سوم، پنجم، هفتم و غیره را از خود عبور می‌دهند. (به فصل ۴ مراجعه شود)

کنترلر تایریستوری - کنترلر تایریستوری از نوعی است که در فصول ۴ و ۵ مورد بحث قرار گرفت (به شکل ۷ مراجعه شود) و مقدار جریان نامی همان جریان بانک راکتور است. هر فاز کنترلر متشکل از ۴ تایریستور موازی برای هر پلاریته و ۳۶ تایریستور سری است. تایریستورها همراه با خنک‌کننده‌ها (گرم‌گیر^۲)، مدارهای مستهلک‌کننده (ضربه‌گیر) و مدارهای آتش بر روی صفحات عایق سوار شده‌اند. ولتاژ دو سر هر سطح ولتاژ سری توسط لامپی نشان داده می‌شود. صفحاتی که تایریستورها بر روی آن سوار شده‌اند، همگی در یک محفظه فولادی که نقش استحکام، محفظه هوا و ایمنی را دارد، قرار دارند.



شکل ۷ - اتصالات بانک راکتور

ساختمان (بنای) کنترلر تایریستوری - کنترلر تایریستوری سه فاز همراه با سیستم کنترل و حفاظت آن و تغذیه سرویس پست و سیستم خنک سازی تایریستور (به استثناء خنک کننده تبخیری که در خارج از ساختمان^۱ قرار دارد) در یک ساختمان و بنا قرار دارند. این ساختمان با پوشش فلزی است و از نظر حرارتی عایق شده است و در موقع لزوم می توان آن را به طور الکتریکی گرم کرد. ابعاد داخلی آن برابر است با $۴۰\text{ft} \times ۳۷\text{ft} \times ۲۵\text{ft}$.



شکل ۸ - شکل نمایشی سیستم خنک کننده

خنک سازی تایریستور - تایریستورها به وسیله هوای تحت فشار^۲ خنک می شوند. سیکل هوای بسته پس از عبور از تبادل کننده های حرارتی^۳ هوا - گلیکول مجدداً به گردش درمی آید. گلیکول به نوبت از مسیر یک خنک کننده تبخیری مجدداً به گردش درمی آید. سیستم خنک ساز به طور شماتیک (نمایشی) در شکل ۸ نشان داده شده است. جریان هوای^۴ مورد لزوم ۱۰۰۰۰۰CFM است که به وسیله ۶ فن که هر یک دارای ظرفیت ۲۰۰۰۰CFM است، فراهم می شود. به منظور قابلیت اعتماد سیستم، یکی از فن ها نقش یدکی را دارد. هر یک از فن ها، تبادل کننده حرارتی هوا، گلیکول

1- Outdoor

2- Forced - Air

3- Heat Exchanger

4- Air - Flow

مربوط به خود را دارد و همچنین یکی از آنها نقش یدکی را دارد. در مواردی که بنا به دلایلی بایستی سیستم خنک‌کننده تبخیری یا سیستم گلیکول از کار انداخته شود، از سیستم اضطراری - که در آن هوای خارج توسط فن‌های دیواری به داخل ساختمان دمیده می‌شود - استفاده می‌شود. این سیستم اضطراری برای هوای خارج با درجه حرارت حداکثر 30°C رضایت‌بخش است.

حفاظت جبران‌کننده (شکل ۹) - باس‌های 230 kV و 24 kV به وسیله رله‌های دیفرانسیل و رله‌های پشتیبان جریان زیاد، حفاظت می‌شوند. در بانک‌های خازنی جریان خنثای ناشی از نامتعادلی تشخیص داده می‌شود تا از ایجاد اضافه ولتاژ در خازن - که به واسطه از کار افتادن اجزاء خازن به وجود می‌آید - جلوگیری گردد. حفاظت در مقابل اتصال کوتاه به وسیله رله‌های جریان زیاد/زمان معکوس^۱ انجام می‌گیرد.

اتصال زمین واقع بر روی سیستم 24 kV ، در نقطه خنثای ترانسفورماتور (زیگزاک)^۲ تشخیص داده می‌شود و اگر چنانچه اتصالی توسط یکی از سیستم‌های دیفرانسیل اولیه رفع نگردد، منجر به از کار افتادن آن از طریق رله‌های جریان زیاد زمین^۳ می‌گردد.

جریان‌های اتصال کوتاه مربوط به راکتورهای قدرت و کنترلر تائریستوری توسط رله‌های جریان زیاد معکوس تشخیص داده می‌شود، و اگر چنانچه کنترلر تائریستور قادر نباشد تائریستور را خاموش و اتصال کوتاه را رفع نماید، جبران‌کننده توسط کلیدهای قدرت 230 kV از خط قطع می‌گردد.

حفاظت کنترلر تائریستوری در مقابل اضافه بار، شامل دیده‌بانی (نظاره کردن)^۴ مداوم درجه حرارت گلیکول و جریان (فلوی) آن، درجه حرارت هوا و جریان (فلوی) آن، و یک رله اضافه بار حرارتی مخصوص است که درجه حرارت پیوند تائریستور را نظارت می‌نماید. این رله با مشخصه‌های حرارتی / خنک‌کنندگی تائریستور برنامه‌ریزی می‌شود و می‌تواند از روی اندازه‌گیری جریان تائریستور، درجه حرارت پیوند را محاسبه نماید.

۴-۶ سیستم کنترل کنترلر تائریستوری

با مراجعه به بلوک دیاگرام^۵ شکل ۱۰، سیستم کنترل اساساً شامل یک رگولاتور ولتاژ^۶، یک حد -

1- Inverse Time / Overcurrent Relay

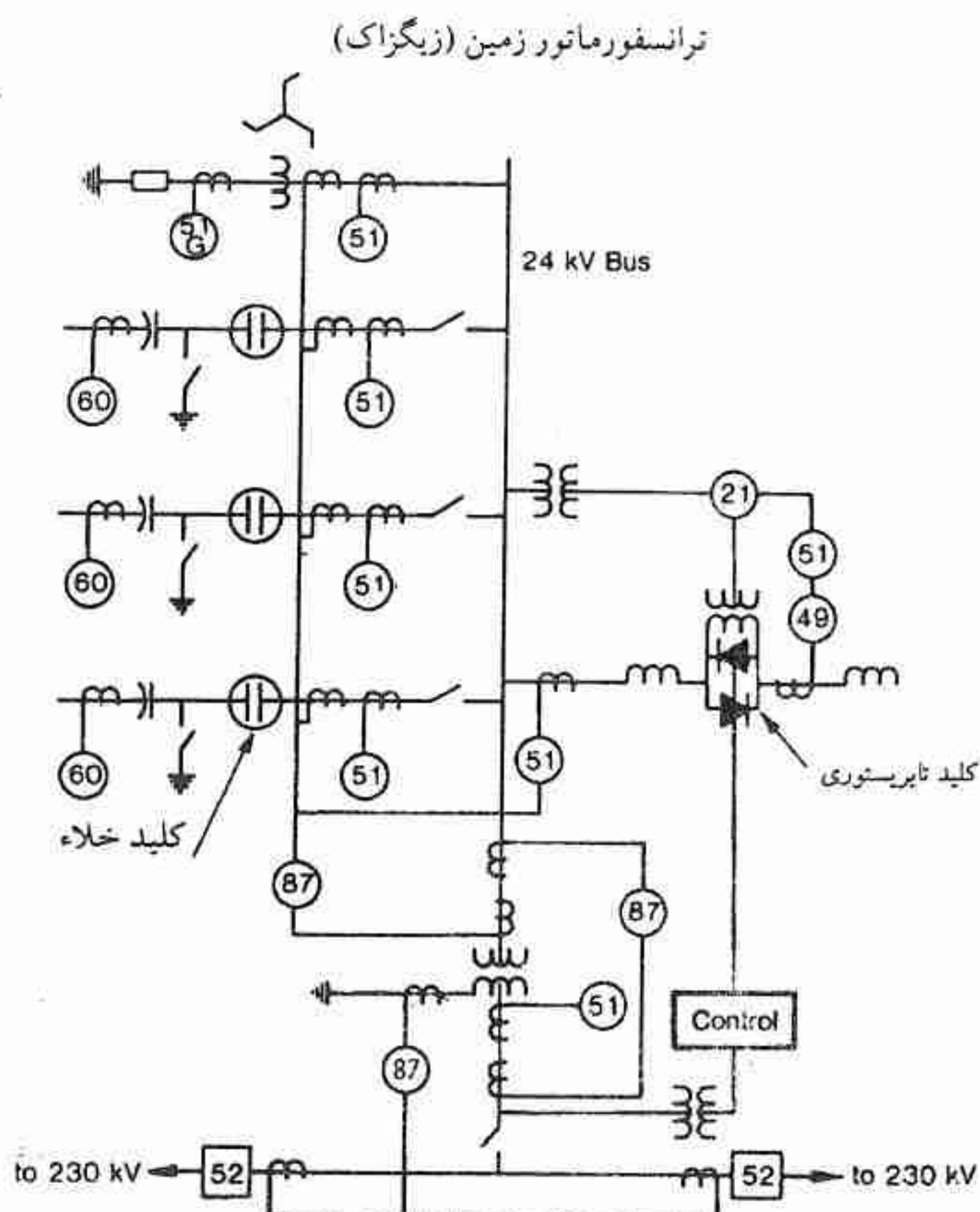
2- Zig - Zag Grounding Transformer

4- Monitoring

5- Block Diagram

3- Ground Overcurrent Relay

6- Voltage Regulator



شکل ۹ - دیاگرام تک خطی که سیستم رله حفاظتی را نشان می دهد. عمل رله های حفاظتی بر طبق استاندارد ANSI شماره گذاری شده است: 21، رله دیستانس است که در صورتیکه امپدانس مدار از مقدار تعیین شده قبلی تجاوز نماید یا کمتر شود، عمل می کند. 49، رله حرارتی است که در صورتیکه درجه حرارت یکسوکننده قدرت از مقدار تضمین شده قبلی تجاوز نماید عمل می کند. 51، رله جریان زیاد ac است. 51G رله جریان زیاد ac است که بر جریان زمین نظارت دارد. 52، کلید قدرت ac است. 60، رله تعادل جریان است، که در صورت وجود اختلاف بین دو جریان عمل می کند. 87، رله حفاظتی دیفرانسیل (تفاضلی) است که بر اساس اختلاف دو جریان یا دو کمیت الکتریکی دیگر عمل می کند.

جریان^۱، و مدار آتش^۲ تایرستور است.

رگولاتور ولتاژ، یک سیستم مدار بسته معمولی (سنتی) است که دارای فیدبک (پس تغذیه) از ترانسفورماتورهای ولتاژ واقع بر باس 230 kV ، است. فیدبک سه فاز ac است که یک سو شده است و بنابراین معرف مقدار میانگین (متوسط) ولتاژ سیستم سه فاز 230 kV است.

مدار حد - جریان همچنین سیستم مدار بسته‌ایست که دارای فیدبک از ترانسفورماتورهای جریان واقع بر مدار راکتورهاست. جریان‌های سه‌فاز با هم جمع شده و یکسو می‌گردد تا معرف جریان متوسط راکتور باشد. مقدار حد - جریان به وسیله مدار کنترل سیکل بار^۱ تنظیم می‌شود. کنترل سیکل بار تضمین می‌کند که مقدار نامی (ظرفیت) جریان - زمان^۲ کنترلر تایریستوری زیاد نگردد. برای انجام این عمل، مدارهای الکترونیکی انتگرال آمپر ثانیه اعمال شده به تایریستورها را دیده‌بانی می‌نمایند. کنترل سیکل بار بایستی مطمئن گردد که درجه حرارت پیوند از حد مجاز تجاوز نمی‌کند. البته، یک رله اضافه بار حرارتی همچنین درجه حرارت پیوند تایریستور را دیده‌بانی می‌کند. اگر چنانچه بواسطه عمل نکردن صحیح کنترل سیکل بار، درجه حرارت پیوند از حد مجاز تجاوز نماید، آنگاه رله اضافه بار جبران‌کننده را از کار می‌اندازد.

مدار آتش تایریستور با سیگنال خطای^۳ رگولاتور ولتاژ - که مشخص کننده لحظه‌ای است که بایستی تایریستورها آتش شوند - شروع به کار می‌کند، و با تحویل پالس‌های جریان به گیت تایریستورها عملش را پایان می‌دهد.

قالب (بلوک) مربوط به کنترل فاز که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، سیگنال خطای ولتاژ را با سیگنال شیب (دندانه اریه‌ای) زمانی^۴ که به وسیله ولتاژ دو سر تایریستورها تولید می‌شود، مقایسه می‌کند. در محل تلاقی سیگنال شیب و سیگنال خطا، سیگنال آتش صادر می‌شود و در نتیجه دیودهای نوری (LED's) انرژی دار شده و نور را از طریق فیبر نوری (هادی‌های نوری) به مدار فرمان گیت^۵ انتقال می‌دهند. هادی‌های نوری، مدارهای کنترل را از تایریستور ایزوله می‌کنند. مدارهای فرمان گیت سیگنال نوری را به پالس جریان گیت تبدیل می‌نمایند. انرژی لازمه برای مدارهای فرمان گیت از ولتاژ دو سر تایریستورها و یا جریان عبوری از تایریستورها - هر کدام که موجود باشد - به دست می‌آید (به فصل ۵ مراجعه شود).

شیب ولتاژ/جریان ۳٪ با تنظیم رابطه مناسب بین سیگنال خطای ولتاژ و لحظات آتش کردن تایریستورها به دست می‌آید. لحظات آتش کردن تایریستور، جریان راکتورها را تعیین می‌کند و در نتیجه جریان راکتیو کل جبران‌کننده را مشخص می‌کند. جریان جبران‌کننده با زاویه آتش رابطه خطی ندارد، بنابراین از مدارهای خطی کننده استفاده می‌شود (به فصل ۴ مراجعه شود). نتیجه نهایی این است که بین تغییر ولتاژ سیستم (خطای ولتاژ) و جریان جبران‌کننده رابطه خطی برقرار است.

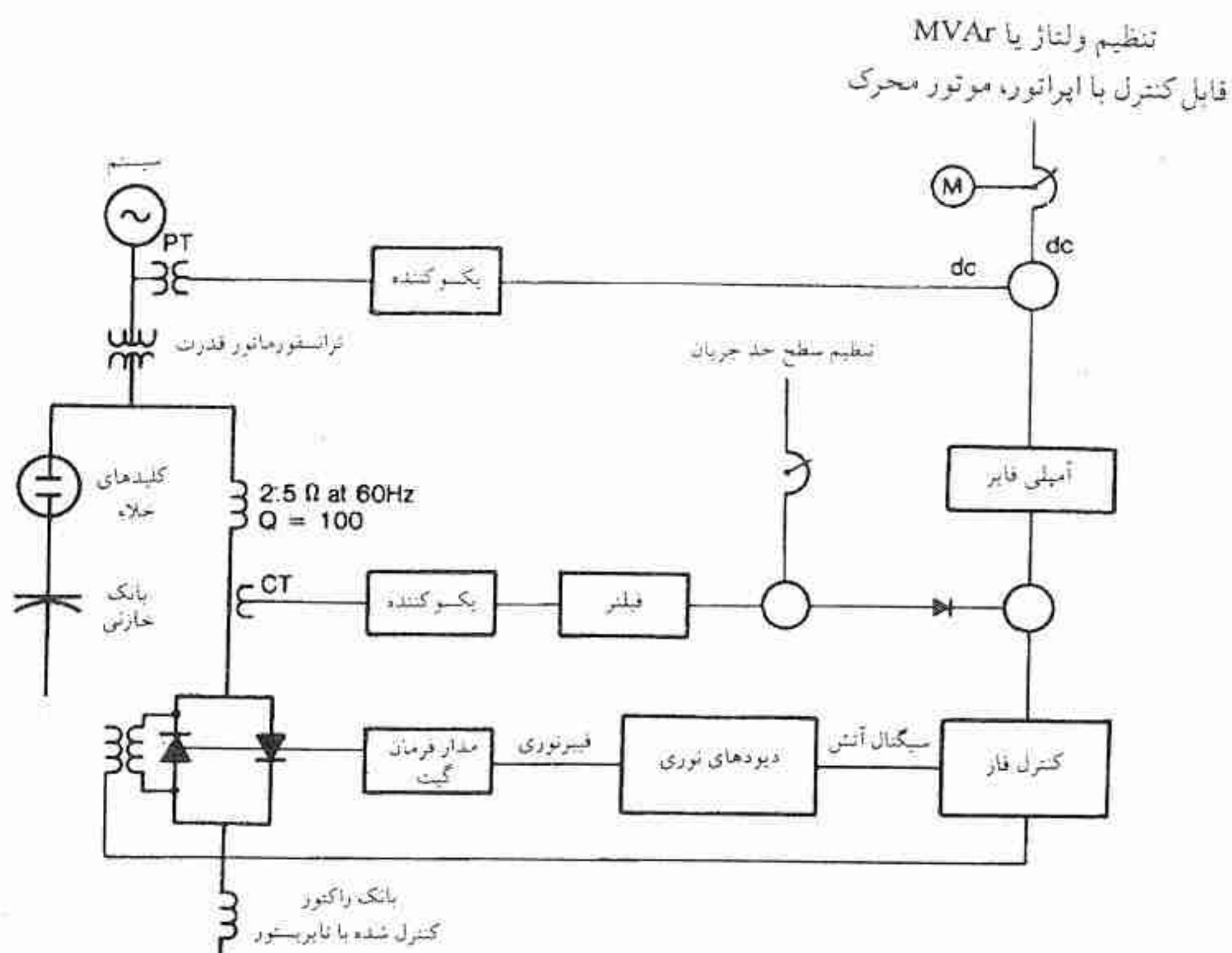
1- Load Cycle Control

2- Time - Current Rating

3- Error Signal

4- Timing Ramp

5- Gate Drives



شکل ۱۰ - بلوک دیاگرام کنترل

کنترل راه اندازی - متوقف ساختن^۱

(a) راه اندازی - جبران کننده می تواند از محل ساختمان (بنا) کنترلر تایریستوری (در محل^۲) یا از اتاق کنترل پست (از دور^۳) راه اندازی شود. در هر دو طریق، راه اندازی به طور خودکار (اتوماتیک) با طی مراحل انجام می گیرد (راه اندازی خودکار). به علاوه می توان تمام اعمال راه اندازی را بطور مجزا بوسیله کلیدهای کنترل واقع در ساختمان کنترلر تایریستوری انجام داد (راه اندازی دستی^۴). راه اندازی طبیعی، راه اندازی خودکار از راه دور است. از راه اندازی خودکار محلی یا راه اندازی دستی تنها در مواقع تعمیر و مواقع اضطراری استفاده می شود.

مراحل راه اندازی خودکار دارای دو بخش اصلی است. در بخش اول کلیه موتورهای کمکی راه اندازی می شوند. موتورهای فن ها و پمپ های مربوط به سیستم خنک سازی تایریستورها را به کار می اندازند. در بخش دوم جبران کننده به باس ۲۳۰ kV متصل می شود، این اتصال طوری انجام

1- Start - Stop Control

2- Local

3- Remote

4- Manual Start

می‌گیرد که حداقل اغتشاش را موجب گردد.

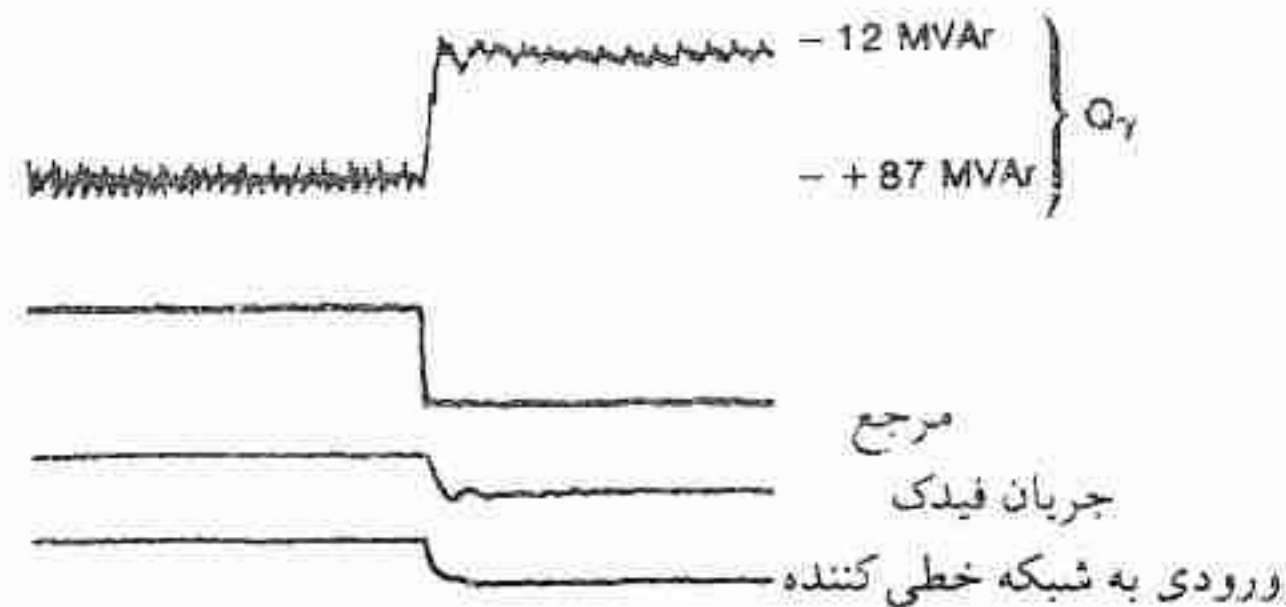
مراحل راه‌اندازی را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

- ۱- موتورهای کمکی راه‌اندازی می‌شوند.
- ۲- کلیدهای قدرت 230 kV بسته می‌شوند.
- ۳- سیگنال بازدارنده آتش از تایریستورها برداشته می‌شود. راکتور انرژی‌دار می‌شود و اگر چنانچه تنظیم اپراتور^۱ برای ولتاژ سیستم انجام گرفته باشد رگولاتور ولتاژ جریان راکتور را در مقدار صفر تنظیم می‌کند.
- ۴- کلیدهای بانک خازنی بسته می‌شوند. عمل سوئیچ کردن سه بخش بانک خازنی به ترتیب انجام می‌گیرد، هرگاه یک بخش انرژی‌دار می‌گردد، رگولاتور ولتاژ به طور خودکار جریان راکتور را طوری تنظیم می‌کند که نتیجه جریان جبران‌کننده در مقدار صفر نگاهداشته شود.
- (b) متوقف ساختن - عمل متوقف ساختن کامل یا از کار انداختن جبران‌کننده را می‌توان به وسیله کنترل اپراتور (در محل یا راه دور) یا رله‌های حفاظتی متعدد انجام داد. هرگاه که عمل متوقف ساختن به طور دستی یا به وسیله رله‌های حفاظتی آغاز می‌شود، موارد زیر به ترتیب سریع‌تر رخ می‌دهد:
 - ۱- کلیدهای قدرت 230 kV باز می‌شوند.
 - ۲- کلیدهای بانک خازنی باز می‌شوند.
 - ۳- از آتش کردن تایریستورها ممانعت می‌شود.
 - ۴- موتورهای سیستم خنک‌سازی متوقف می‌شوند.

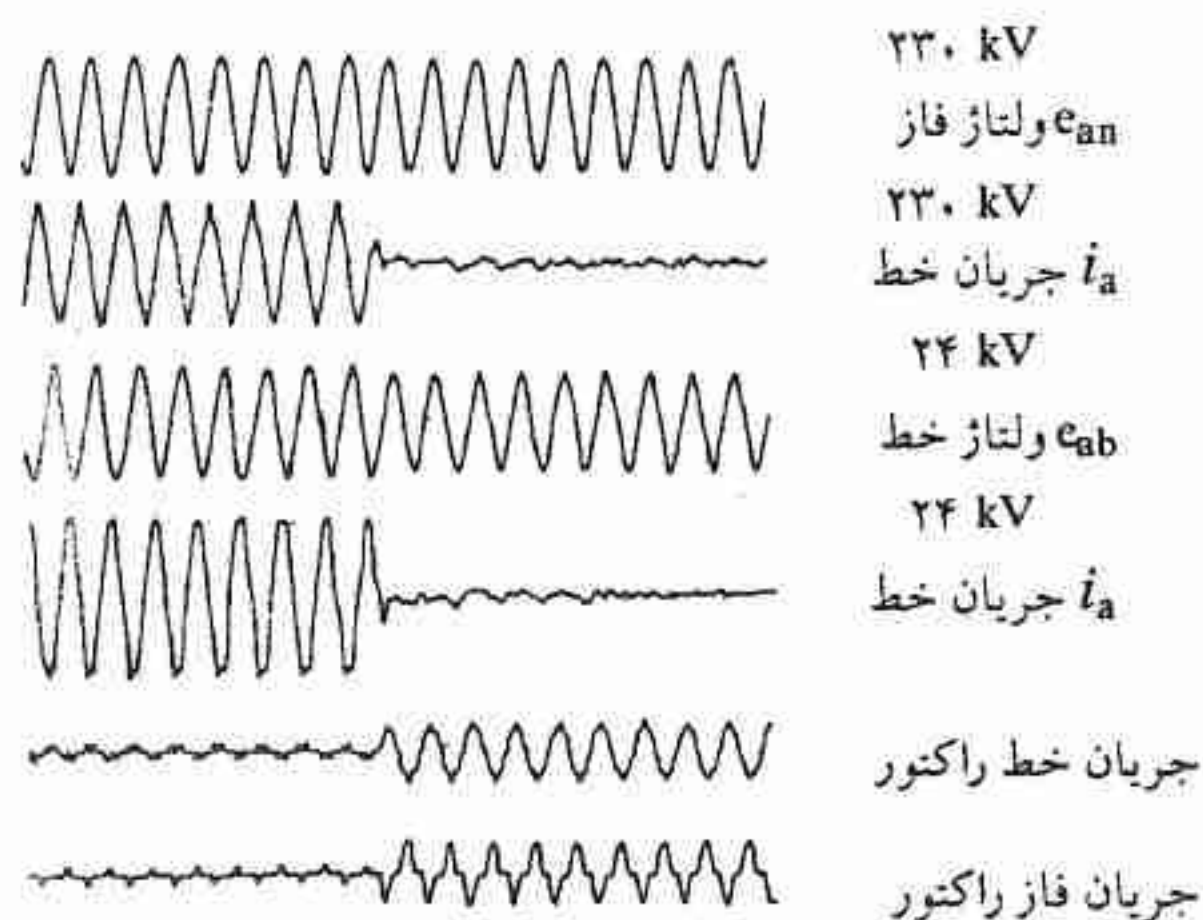
۵-۶ آزمایش رفتار سیستم

در خلال نصب و پس از آن آزمایش‌های متعددی انجام گرفت تا رفتار جبران‌کننده مورد بررسی قرار گیرد. این آزمایشات شامل اندازه‌گیری‌های زیر بوده است:

- توابع انتقال رگولاتور
- دقت در فاصله فاز به فاز آتش کردن تایریستور (که عموماً به «ردگیری»^۲ مشهور است)
- شیب مشخصه‌های V/I و V/Q
- هارمونیک موجود در جریان راکتور، ولتاژهای باس 230 kV و 24 kV ، جریان‌های خط



شکل ۱۱ - رفتار جبران کننده. تغییر ناگهانی -99 MVar در پاسخ به اعمال یک تغییر پله‌ای در سیگنال مرجع.



شکل ۱۲ - رفتار جبران کننده - شکل موج‌های جریان و ولتاژ مربوط به شکل ۱۱

230 kV و 24 kV مربوط به جبران کننده.

اسیلوگرام‌های تعدادی از پاسخ آزمایش که شامل آزمایش‌های زیر بوده است، برداشته شده است:

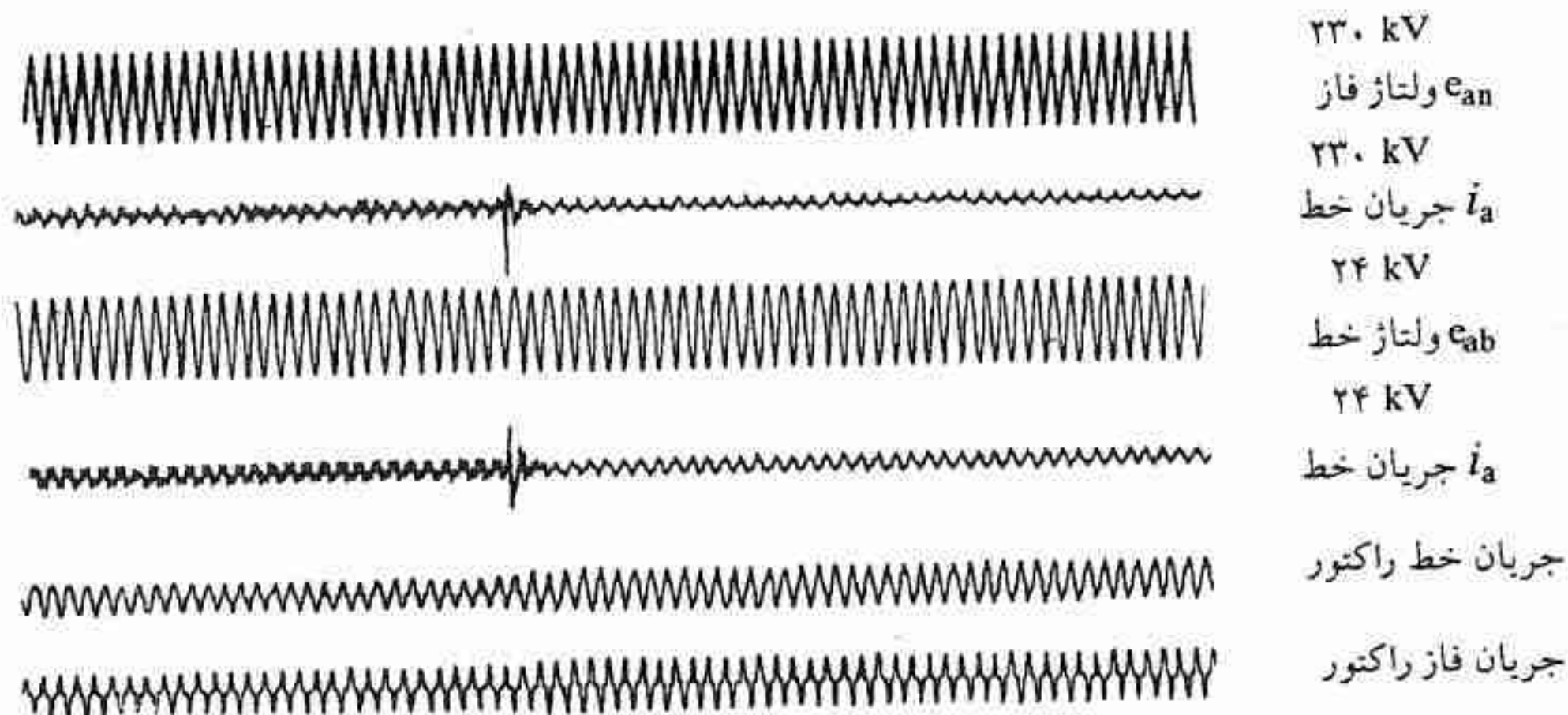
- تزریق سیگنال‌های مرجع سینوسی در فرکانس‌های بین 0.1 Hz تا 10 Hz

- تزریق تغییرات پله‌ای مرجع. این تغییرات شامل دامنه و نقاط شروع مختلف است طوری که

پاسخ جبران کننده به طور کامل آزمایش می‌شود. نمونه مثال‌هایی در اشکال ۱۱ الی ۱۳ نشان

داده شده است. ملاحظه می‌شود که زمان پاسخ جریان راکتور و توان راکتیو جبران کننده در

حدود ۱ سیکل است. همچنین پاسخ به خوبی میراگردیده و به مقدار کمی پرش^۱ دارد. سرانجام سیکل بار شکل ۳ ایجاد گردید. این کار با تزریق یک سیگنال مرجع پیوسته در کنترل - که منجر به سوق دادن جبران‌کننده به حد - جریان^۲ 200 MVAR - می‌گردد - انجام گرفت. کنترل سیکل بار برای ۱ ثانیه این مقدار، سپس برای ۵ دقیقه 120 MVAR - را مجاز می‌نماید، آنگاه حدی را بر جریان نامی پیوسته تحمیل می‌نماید.



شکل ۱۳ - رفتار جبران‌کننده. انرژی دار کردن بانک خازنی شماره ۳؛ یک تغییر ناگهانی $31/2 \text{ MVAR}$ را تولید میکند.

خازن‌های سری

L.E. Bock

۷-۱ مقدمه

احداث خطوط انتقال انرژی از نقطه نظر حریم و هزینه به طور فزاینده مشکل می‌گردد. این مشکلات به انضمام اهمیت منابع انرژی موجود و هزینه آن، موسسات تولیدکننده برق را مجبور ساخته است تا سرحد امکان حداکثر بازده را از خطوط انتقال انرژی به دست آورند.

بانک‌های خازنی سری و موازی ابزاری هستند که در بهبود بازده سیستم و افزایش توانایی انتقال توان خطوط نقش مفیدی دارند. میزان رشد هر دوی آنها به طور قابل ملاحظه‌ای از میزان رشد تولید توان اکتیو بیشتر بوده است. خازن‌های موازی توان راکتیو تولید نموده و سعی می‌کنند مقدار توان راکتیو عبوری از شبکه را کاهش دهند. خازن‌های موازی معمولاً نزدیک بار در یک شبکه نصب می‌گردند تا در کاهش تلفات سیستم و کنترل ولتاژ بیشتر موثر باشند. از خازن‌های سری برای کاهش راکتانس اندوکتیو خط انتقال استفاده می‌گردد. خازن‌های سری معمولاً در محلی دور از بار - مثلاً در نقطه میانی خط انتقال - نصب می‌گردند و دارای فواید زیر می‌باشند:

- ۱- بهبود پایداری ماندگار سیستم.
- ۲- بهبود پایداری گذرای سیستم.
- ۳- تقسیم بهتر بار بر روی خطوط موازی.
- ۴- کاهش افت ولت در نواحی بار در خلال اغتشاشات شدید.

۵- کاهش تلفات سیستم انتقال.

۶- تنظیم بهتر بارگیری خطوط.

تئوری خازنهای سری به عنوان وسیله‌ای برای «جبران طول خط» در فصل ۲ ارائه گردید. در این فصل طراحی، کاربرد و رفتار خازنهای سری را مورد توجه قرار می‌دهیم.

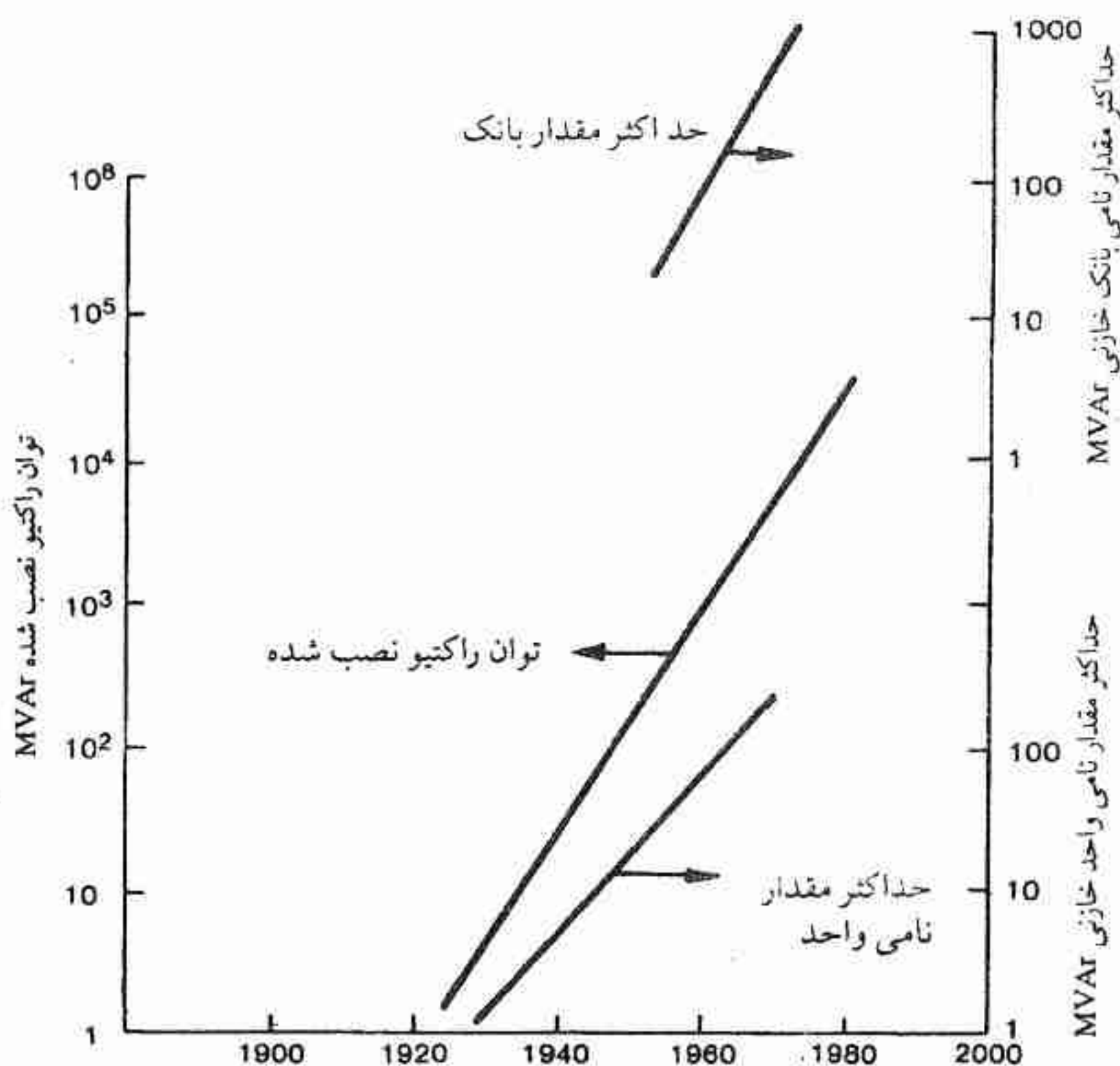
۷-۲ تاریخچه

خازنهای سری اولین بار در سال ۱۹۲۸ در پست Power & Light در Ballston spa، New York نصب گردید. این خازنهای سری یک بانک خازنی ۱/۲۵ MVAR شامل واحدهای خازنی ۱۰ kVAR بود که در مدار ۳۳kV به منظور کنترل تقسیم بار بین مدارهای موازی به کار گرفته شد. از آن زمان به بعد، تاسیسات خازنی موفق‌تری تا ولتاژ خط ۵۵۰kV و مقدار نامی بانک خازنی ۸۰۰ MVAR انجام گرفته است. همینطور مقدار نامی (ظرفیت) واحدهای خازنی افزایش یافته طوری که از نظر مقدار نامی می‌توان آنها را یکسان با آنچه که در کاربردهای موازی است فراهم کرد. شکل ۱ رشد اندازه واحدهای خازنی نصب شده در تاسیسات خازنهای سری را از سال ۱۹۲۰ نشان می‌دهد.

۷-۳ طراحی تجهیزات

۷-۳-۱ واحدهای خازن

در طراحی خازن، مساله اقتصادی هنوز ایجاب می‌کند که در تجهیزات خازنی سری و موازی مقدار نامی توان راکتیو مورد لزوم را از طریق ترکیب سری - موازی واحدهای^۱ خازنی مجزا به دست آورد. شکل ۲ برش یک واحد خازن قدرت نمونه را نشان می‌دهد. گرچه خازن سری و خازن موازی اساساً از نظر ساختمان با هم تفاوت چندانی ندارند، اما در طراحی واحد خازنی که در کاربردهای سری استفاده می‌شود، لازم است که در مقدار نامی آن - نسبت به خازن موازی - محتاطانه عمل کرد. از سال ۱۹۱۴ که اولین خازنهای قدرت تولید شد، تاکنون بهبودهای متعددی در ساختمان آن انجام گرفته است. در اوایل ۱۹۳۰ با معرفی کاغذ سخت^۲ نازک و جایگزینی آن با لایه کتان^۳، و



شکل ۱ - روند خازنهای سری از سال ۱۹۲۰، که نشاندهنده رشد مداوم در ظرفیت نصب، اندازه بانک خازنی و اندازه واحد خازنی است.

جایگزینی روغن با آسکارل^۱ مقدار نامی هر واحد خازنی مجزا به میزان ۱۵kVAR ممکن گردید. در سال ۱۹۶۰ با تصفیه‌های پر هزینه‌ای که در دی‌الکتریک کاغذ/آسکارل انجام گرفت مقدار نامی ۱۰۰kVAR معرفی گردید. در سال ۱۹۶۵ جنرال الکتریک با استفاده از سیستم عایق آسکارل/پلی‌پروپیلن^۲ واحد ۱۵۰kVAR را طراحی کرد. گرچه امروزه مقدار نامی اقتصادی برای هر واحد ۲۰۰-۳۰۰kVAR می‌باشد لیکن با انجام تصفیه‌های بیشتر می‌توان مقدار نامی هر واحد مجزا را به ۶۰۰kVAR رساند. جایگزینی آسکارل با مایعات Non-PCB که در سال ۱۹۷۶ انجام گرفت چندان اثری بر روی اندازه و مقدار نامی واحد خازنی نداشت. واحدهایی که در آنها دی‌الکتریک تماماً از پلی‌پروپیلن تشکیل شده است علاوه بر بهبودی که در اندازه و مقدار نامی حاصل گردیده، در کاهش دادن تلفات و احتمال انفجار محفظه دارای مزیت آشکاری هستند. جدول ۱ اثرات چنین

1- Askarel

2- Askarel / Polypropylene

تغییراتی را بر روی مقدار نامی، حجم، چگالی و قیمت خازن نشان می‌دهد. البته با وجود واحدهای خازنی با ظرفیت بالا، اندازه فیزیکی تجهیزات و نیازمندی‌های پست، به کار گرفتن بانک‌های سری و موازی با ظرفیت بالا را غیرعملی و غیراقتصادی می‌سازد.

۷-۳-۲ حفاظت با فیوز

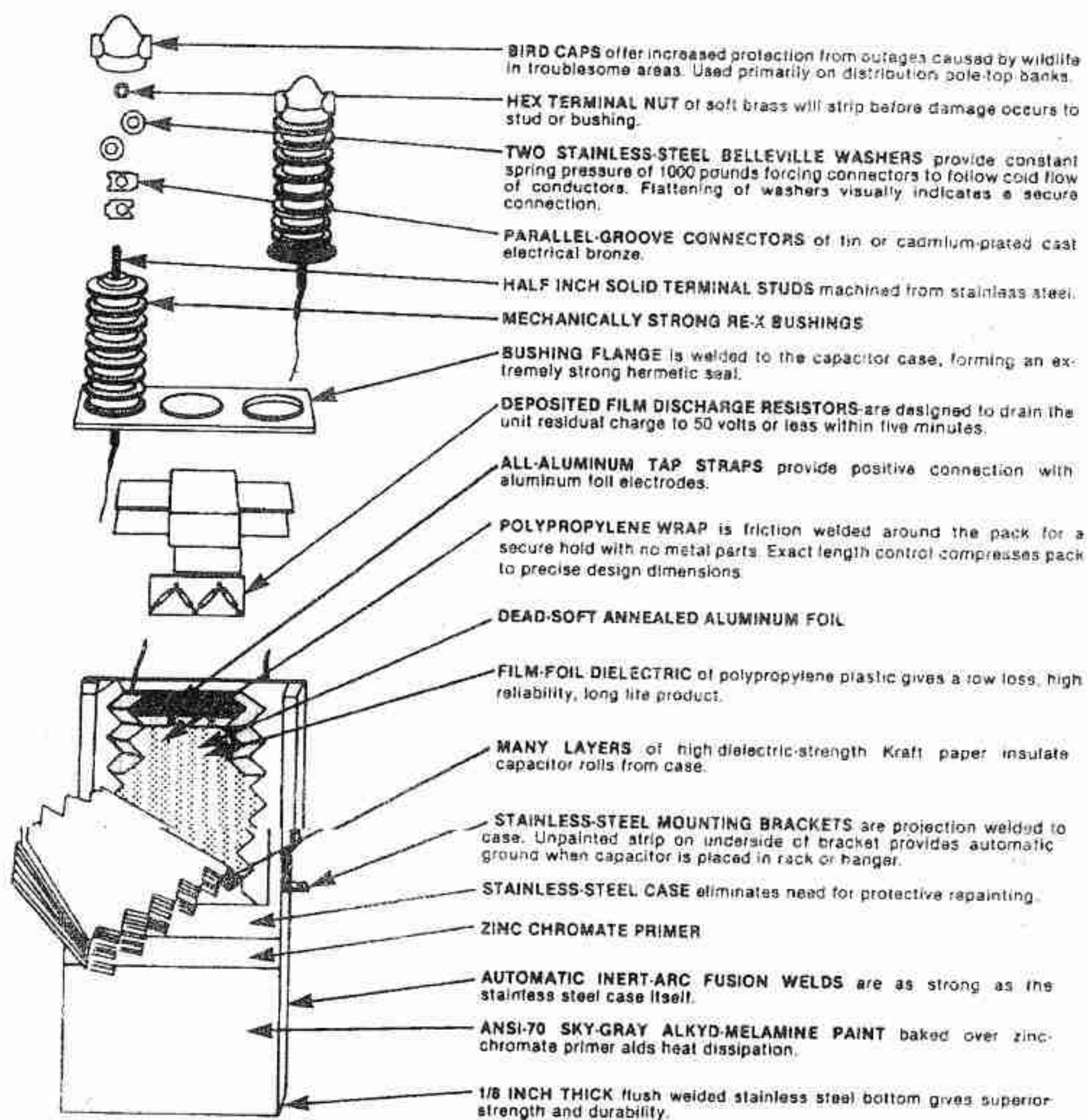
در آمریکا اغلب بانک‌های خازنی، اعم از خازن‌های سری یا موازی بر اساس کاربرد فیوزهای خارجی^۱ (یک فیوز برای هر واحد) طراحی شده‌اند. البته کاربرد فیوزهای خارجی در نقطه مقابل کاربرد متداول فیوزهای داخلی قرار دارد. واحدهایی که توسط فیوز داخلی حفاظت می‌شوند دارای این مزیت هستند که با از کار افتادن عنصری در داخل واحد، منجر به از کار افتادن کل سیستم نمی‌گردد. اما، از آنجایی که در این نوع حفاظت، نشانه مرئی از فیوز سوخته شده وجود ندارد، بازرسی دائمی - که شامل اندازه‌گیری دقیق کاپاسیتانس است - ضروری است. چنین بازرسی معمولاً سالیانه انجام می‌گیرد. کاربرد فیوزهای داخلی همچنین مقدار ولتاژ نامی خازن را محدود می‌نماید، به طور نمونه تا ولتاژ ۵ kV یا کمتر، بنابراین در طراحی بانک خازنی قابلیت انعطاف کمتری وجود دارد. این محدودیت ولتاژ به این دلیل است که بایستی تعداد شاخه‌های موازی در درون هر واحد خازنی، محدود باشد تا در هنگام از کار افتادن عنصر هر شاخه، اضافه ولتاژ بر روی عناصر باقیمانده در حد معقولی پایین باشد. البته، از چندین تاسیسات خازن سری ۵۰۰ kV با حفاظت فیوزهای داخلی در طول ۱۰ سال به طور موفقیت آمیز بهره‌برداری شده است.

فیوزهای محدودکننده - جریان خارجی^۲ با قطع‌کننده فیزیکی که نشانه مرئی از عملکرد فیوز را فراهم می‌کنند، معمولاً مشخص می‌گردند. مقدار نامی مناسب برای این نوع فیوز که در کاربردهای خازن سری استفاده می‌گردد، از اوایل سال ۱۹۷۰ موجود بوده است. این فیوزها بایستی قادر باشند که تا حداکثر ولتاژ جرقه^۳ - که اغلب سه برابر ولتاژ نامی و یا بیشتر است - عمل نمایند و بایستی اندازه آنها طوری باشد که تمامی گذرای ناشی از اضافه بار را تحمل نموده و اعمال تخلیه را بدون آنکه به آنها آسیبی برسد، انجام دهند.

1- External Fuses

2- External Current - Limiting Fuses

3- Sparkover



شکل ۲ - واحد خازن قدرت نمونه، برای کاربردهای سری یا موازی

جدول ۱

اثر بهبودهای طراحی بر مشخصات واحد خازنی

تاریخ	حداکثر مقدار نامی (واحد) (kVAr)	حجم (in ³ /kVAr)	چگالی (lb/kVAr)	قیمت (\$/kVAr)
1929	10	130	8.6	18.70
1930	10	65	4.4	18.20
1931	15	43	3.2	16.00
1959	50	32	2.0	3.30
1962	100	19	1.2	1.50
1965	150	11	0.7	1.70
1977	300	10	0.6	1.70
1980	300	8	0.4	1.80

۷-۳-۳ فاکتورهای جبران سازی

جبران سازی برای خطوط طویل تر از ۲۰۰ mi مقرون به صرفه خواهد بود، گرچه خازنهای سری را می توان در خطوط کوتاه تر نیز یافت. در خطوط طولانی تر بار اقتصادی، باری است که به بار امپدانس ضربه ای خط نزدیک باشد (به فصل ۲ و مرجع ۱ مراجعه شود).

اگر از مقاومت اهمی صرف نظر شود، حداکثر توان انتقالی ac به وسیله معادله زیر به دست می آید:

$$P_{\max} \sim \frac{E_1 E_2}{X_L - X_C} \quad (1)$$

که در آن E_1 و E_2 مقادیر ولتاژهای ترمینال خط می باشند. X_1 راکتانس القایی بین ولتاژهای ترمینال، X_C راکتانس خازنهای جبران کننده است. در خطوط EHV به طور نمونه جبران سازی در محدوده ۷۰-۲۵٪ قرار دارد. البته عوامل دیگری نیز وجود دارند که ممکن است محدودیت هایی بر سطح جبران سازی اعمال نمایند، از آن جمله پایداری زیر هارمونیک، رزونانس زیر سنکرون و گذرای کلیدزنی را می توان نام برد.

۷-۳-۴ آرایش فیزیکی

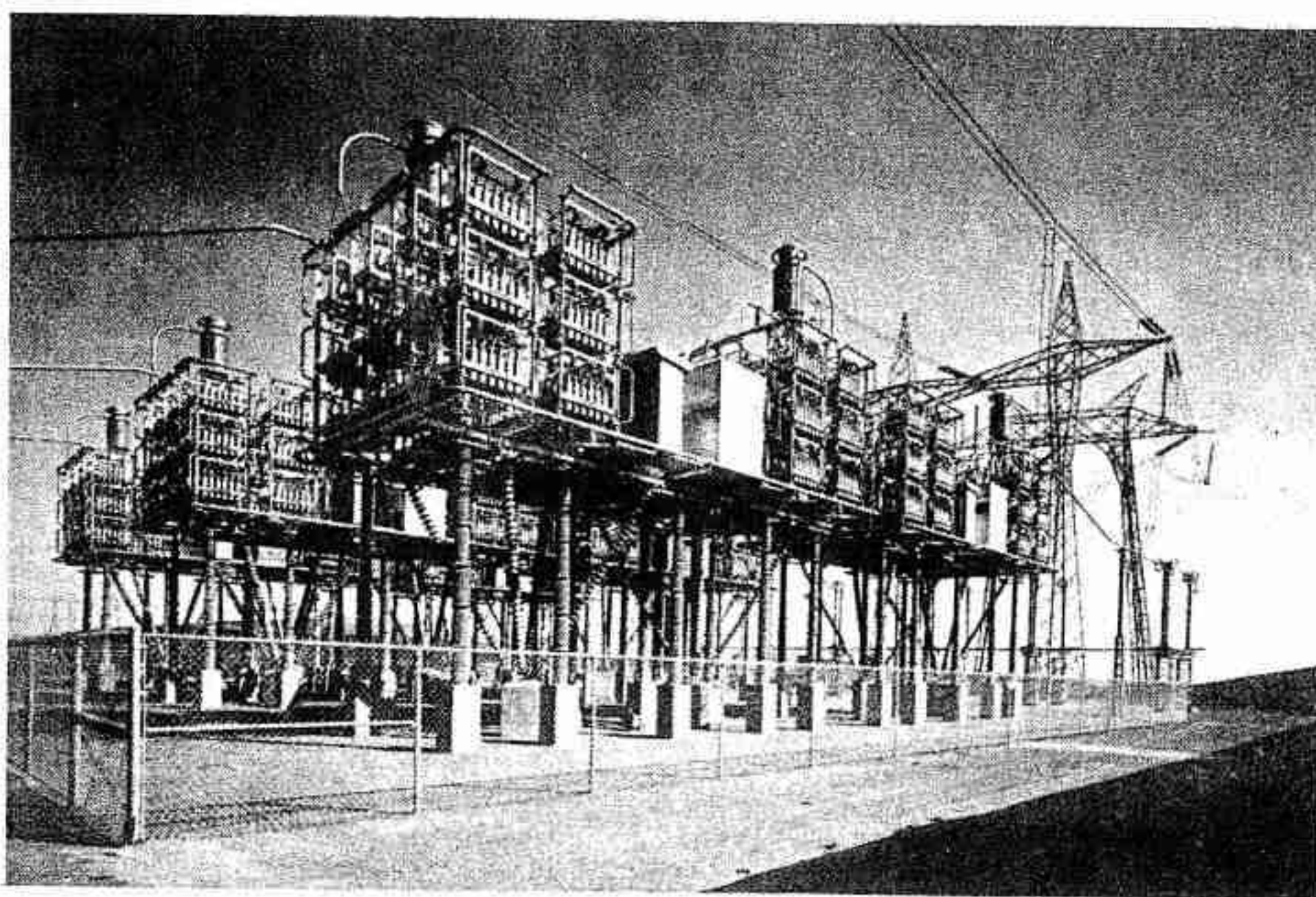
بانک های خازنی سری هر فاز در یک یا چند قسمت^۱ مجزا ساخته شده و هر یک همراه با اجزاء متعدد دیگر بر روی سکویی که از زمین عایق گردیده است، نصب می شوند. بانک های کوچک رده توزیع ممکن است بر روی زمین نصب شوند اما تجهیزات بزرگتر رده انتقال تماماً بر روی سکو نصب می گردند.

شکل ۳ فتوگراف تجهیزات خازن سری خط EHV را نشان می دهد که دارای مقدار نامی تقریبی ۳۱۸ MVAR می باشد. این بانک خازنی در پست Pacific Gas and Electric's Tesla در کالیفرنیا قرار دارد و در ژانویه ۱۹۶۸ انرژی دار گردید. ابعاد بانک خازنی ۴۱ × ۱۲۴ × ۹۵ فوت می باشد. با اعمال بهبودهایی که قبلاً در طراحی خازن و فیوز بیان شد، می توان ظرفیت بانک را با حفظ همین ابعاد به میزان تقریباً دو برابر افزایش داد. هر فاز دارای ۴ قطعه مجزا است و در هر فاز دو سکوی نصب وجود دارد.

تا قبل از زمین لرزه فوریه ۱۹۷۱ که منجر به خسارات قابل ملاحظه به پست Sylmar سازمان آب

و برق لوس آنجلس گردید، تجهیزات خازن سری معمولاً به تحمل استاتیکی^۱ بیش از $0.2g$ نیاز نداشتند. اما از آن زمان به بعد این نیازمندی برای تجهیزاتی که در مناطق زلزله خیز، به خصوص در امریکای غربی، نصب می گردند شدیداً مورد توجه قرار گرفته است.

هم اکنون مشخصات این تجهیزات در برگرنده اسپکتروم (طیف) پاسخ حرکت زمین و تحلیل دینامیکی با شتاب مبنا^۲ $0.5g$ است. تجهیزات EHV عملاً نمی توانند به صورت ساختمان صلبی^۳ و با فرکانس رزونانس طبیعی بالاتر از $25Hz$ طراحی شوند. بنابراین لازم است طراح در بنای ساختمان، فرکانس و میرایی^۴ را در نظر بگیرد. همچنین باید نیازمندی های شتاب قائم را نیز به آن افزود، معمولاً $70-80\%$ مقدار افقی برای آن منظور می شود. در نظر گرفتن چنین مشخصات بیشتری، به طور قابل ملاحظه ای هزینه بنا را افزایش می دهد.



شکل ۳ - خازن سری خط انتقال $500kV$ و $318MVar$.

۴-۷ وسایل حفاظتی

از آنجایی که به طور تقریب هزینه متناسب با مجذور جریان افزایش می یابد، به لحاظ اقتصادی

1- Static Withstand

2- Base Acceleration

3- Rigid Structure

4- Damping

نمی‌توان تجهیزات خازن سری را طوری طراحی کرد که تمامی ولتاژهای غیرعادی ناشی از جریان‌های فوق‌العاده خط و اتصال کوتاه، را تحمل نماید. بنابراین تجهیزات طوری طراحی می‌شوند که بتوانند ولتاژهای غیرعادی معینی که در خلال پاره‌ای از اغتشاشات سیستم تولید می‌شوند - به خصوص وقتی که لازم است در آن زمان خازن‌های سری عمل کنند (مثلاً، وقتی که لازم است پایداری گذرا را حفظ نمایند) - را تحمل نمایند. گرچه استانداردهای صنعتی برای خازن‌های سری وجود دارد (ANSI ۵۵/۲ و IEC - ۱۴۳)، اما کاربردها آنچنان متفاوت است که طراح بایستی در هر مورد پس از مطالعه کامل بر روی تحلیل گر گذرا یا کامپیوتر، آنها را برای کاربرد معین مطابقت دهد.

تجهیزات خازن سری طوری طراحی می‌شوند که هنگامی که ولتاژ از سطح طراحی شده افزایش می‌یابد، قسمت‌هایی^۱ از آنها به طور خودکار و لحظه‌ای بای پاس (کنار گذر) می‌گردند. این مشابه چیزی است که در موقع وقوع اتصال کوتاه خط انجام می‌گیرد. به سبک سنتی^۲ این کار به وسیله جرقه^۳ یا تریگر کردن فاصله الکترودهای^۴ موازی با خازن انجام می‌گرفته است. تکنولوژی واریستور اکسید روی^۵ در حفاظت اضافه ولتاژ، نسبت به روش سنتی، بهبود قابل ملاحظه‌ای را ارائه می‌کند و بعداً مورد بحث قرار خواهد گرفت. پس از رفع اتصال کوتاه، مدارهای کنترل، وارد کردن مجدد خازن به مدار، را آغاز می‌کنند. برای تجهیزاتی که در قسمت‌های غیراتصال قرار دارند، این بدان معناست که وسایل حفاظتی بایستی جریان را قطع نموده و ترکیبی از ولتاژهای ناشی از وارد کردن مجدد بانک خازنی بای پاس شده و اغتشاش سیستم الکترومکانیکی را بدون ایجاد جرقه تحمل نمایند.

در مورد بانک خازنی که اساساً برای بهبود پایداری گذرا نصب گردیده، رفع سریع اتصال کوتاه و وارد کردن سریع خازن‌ها پس از رفع اتصال کوتاه، هر دو در افزایش ظرفیت بارگیری خط ضرورت دارند، همانطوری که در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان داده شده مربوط به دو خط موازی ۵۰۰ kV با ۵۰٪ جبران سری است. همچنین برای حالتی که در آن اتصال کوتاه در ۵ سیکل رفع می‌شود، تأثیر تأخیر ۵ سیکل و ۸ سیکل در وارد کردن مجدد خازن، بر روی توانایی بارگیری خط در شکل نشان داده شده است. [توانایی بارگیری خط در اینجا به معنای ماگزیمم توان انتقالی قبل از اتصال کوتاه است که در آن سیستم در مقابل اتصال کوتاه نشان داده شده در شکل ۴ دارای پایداری گذراست (فصل ۳)].

شکل ۵ به طور نمونه، دیاگرام شماتیک (شکل نمایشی) یک قسمت^۶ از بانک خازن سری را

1- Segments

2- Traditionally

3- Sparkover

4- Gap

5- Zinc Oxide Varistor

6- Segment

نشان می‌دهد. گروه‌های خازن در دو ردیف موازی قرار دارند. در آن یک مدار تشخیص دهنده وجود دارد که جریان‌های دو ردیف خازنی موازی را با هم مقایسه نموده و در نتیجه واحد خازنی از کار افتاده را تشخیص می‌دهد. اغلب دو سطح تحریک^۱ در یک مدار تفاضلی به کار برده می‌شود، یکی از آنها در صورت موجود بودن نامتعادلی کم، زنگ خطری را به صدا در می‌آورد و دیگری در صورت وجود اضافه ولتاژ زیاد بر روی بقیه واحدهای خازنی، کلید بای پاس را می‌بندد. در صورت امکان، برای هر فیوزی که می‌سوزد زنگ خطر به صدا در می‌آید و برای اضافه ولتاژ بیش از ۱۰٪ کلید بای پاس بسته می‌شود. در صورتی که تعداد واحدهای موازی زیاد باشد، مدار تشخیص دهنده نمی‌تواند آنچنان حساس باشد که سوختن یک فیوز تکی را تشخیص دهد، اما همچنین در چنین شرایطی اضافه ولتاژ کمتری ایجاد می‌گردد. تجهیزات رده انتقال به طور نمونه دارای ۸۰-۴۰ واحد خازنی موازی در هر گروه هستند. روش حفاظتی دیگر به کار بردن ترانسفورماتورهای ولتاژ است که در آن به جای مقایسه جریان‌ها در دو ردیف موازی، ولتاژ دو سر خازن‌ها در دو گروه سری با هم مقایسه می‌گردند.

فاصله بین الکترودهای اصلی جرقه^۲ طوری تنظیم می‌شود تا در سطح ولتاژ از قبل تنظیم شده^۳ جرقه بزند تا بدین وسیله خازن‌ها در خلال اتصال کوتاه خط حفاظت گردند. به طور معمول مقادیر حفاظتی ۴-۲/۵ برابر ولتاژ کار عادی است. توالی کنترل به این صورت است که، وجود جریان در مسیر الکترودهای جرقه توسط CT مربوطه تشخیص داده می‌شود، و به طور خودکار سیگنالی جهت بستن کلید بای پاس ارسال می‌گردد. هنگامی که کلید بسته می‌شود جریان از مسیر الکترودها منحرف گردیده و هنگامی که جریان خط - که توسط CT اندازه‌گیری می‌شود - به وضع عادی برمی‌گردد، سیگنالی جهت باز کردن کلید بای پاس ارسال شده و بنابراین خازن مجدداً وارد خط می‌شود. توالی کنترل بالا برای الکترودهای جرقه‌ای که خودبخود جرقه را رفع نمی‌کنند^۴ به کار برده می‌شود. در الکترودهای جرقه با هوای فشرده^۵ جریان خط توسط CT مربوطه نشان داده می‌شود و هنگامی که خطا رفع می‌گردد هوای فشرده برای خاموش کردن جرقه دمیده می‌شود. مدت زمان وارد کردن مجدد خازن پس از رفع اتصال کوتاه، به سرعت عمل کلید، تنظیم زمانی مدار کنترل و غیره نیزه شدن فاصله الکترودها و مدت زمان تحمل ولتاژ برگشت^۶ (بازیافت) بستگی دارد.

در الکترودهای جرقه با هوای فشرده، اگر چنانچه به محض تشخیص جریان عبوری از این مسیر هوای فشرده دمیده شود، عمل وارد کردن مجدد خازن‌ها سریع‌تر انجام می‌گیرد. از معایب این روش

1- Pick Up Level

2- Main Gap

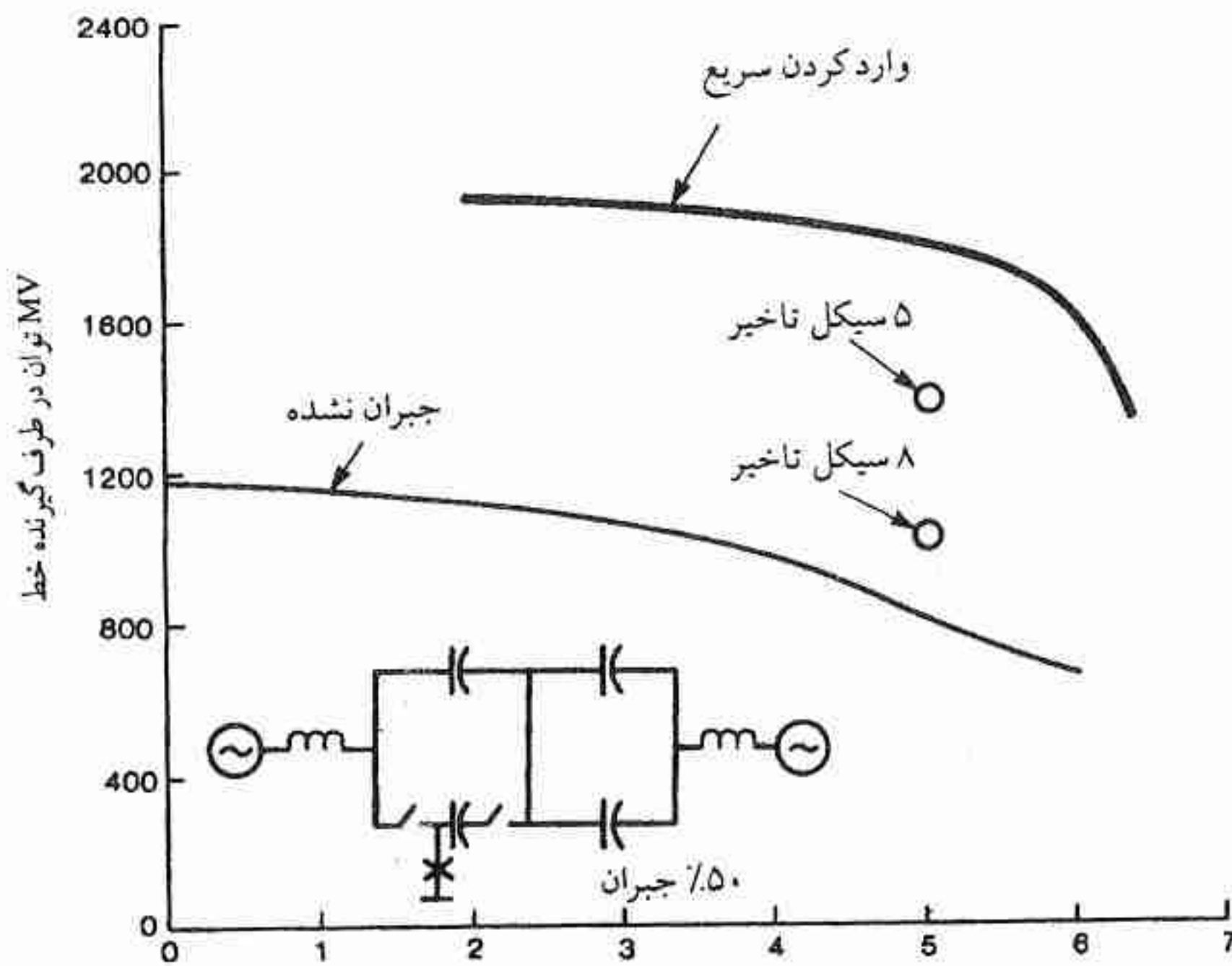
3- Preset

4- Nonself - Clearing Gap

5- Air - Blast Gap

6- Recovery Withstand Time

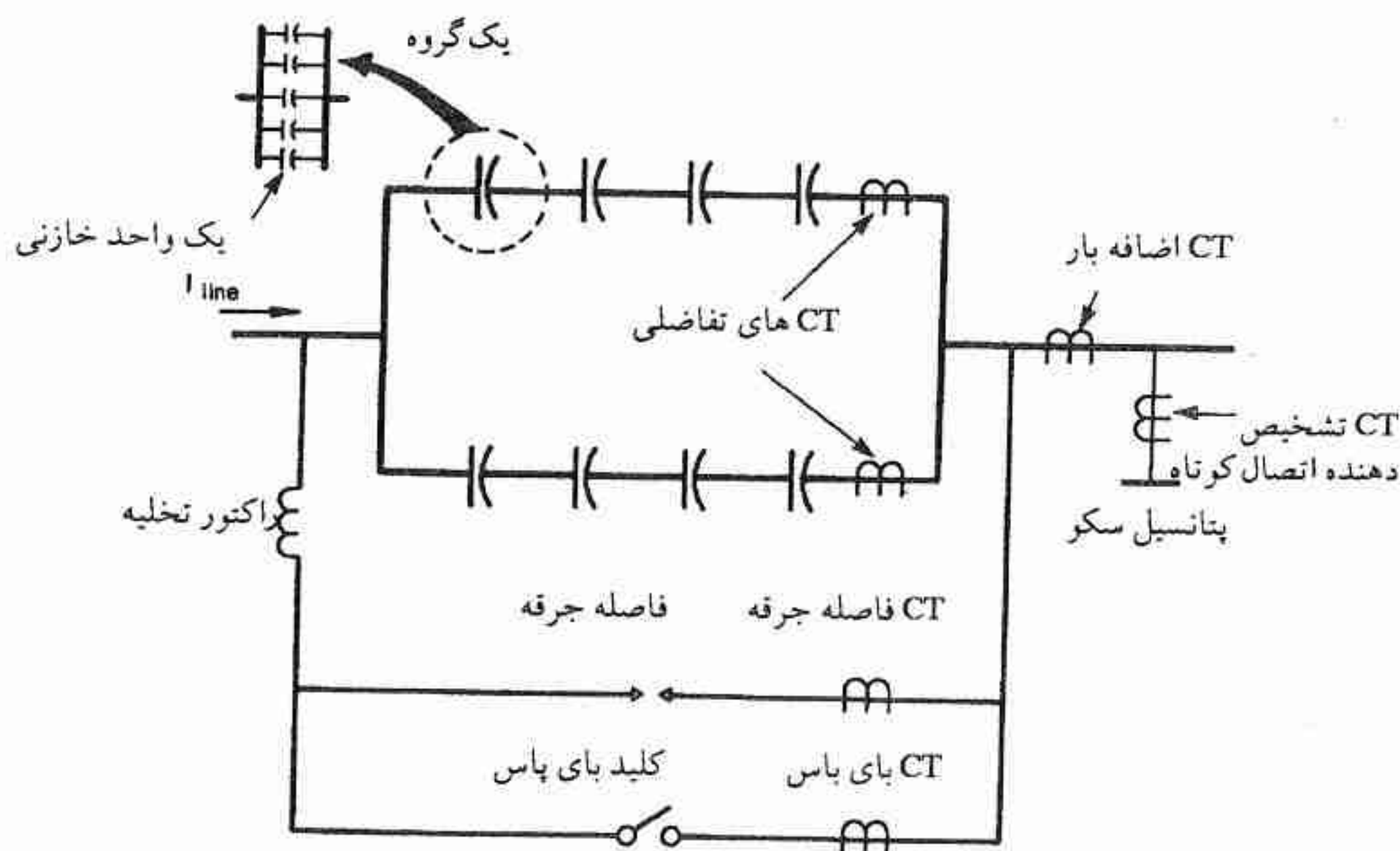
این است که جرقه بین الکترودها در هر نقطه صفر جریان خاموش می شود و به واسطه افزایش فشار هوا در فاصله الکترودها، مجدداً در ولتاژهای بالاتر از ولتاژ جرقه (تنظیم شده)^۱ روشن می شود. این جرقه های مکرر در مقایسه با وارد شدن خازن با تک جرقه، وظیفه سنگین تری را بر خازن اعمال می کند.



زمان سوئیچ کردن بر حسب سیکل

شکل ۴ - افزایش ظرفیت بارگیری خط در اثر وارد کردن مجدد خازنها.

راکتور تخلیه^۲ برای محدود کردن اندازه و فرکانس جریان عبوری از خازن در زمان جرقه زدن الکترودها، ضروری است. این عمل از صدمه دیدن واحدهای خازن و فیوزها جلوگیری نموده، به علاوه عمل الکترودهای جرقه را آسان می نماید. چنین راکتوری در شکل ۵ در مدار بای پاس نشان داده شده است. گاهی راکتور به صورت سری با خازن قرار داده می شود که در این صورت نیز جریان تخلیه را محدود می کند، لیکن لازم نیست که جریان اتصال کوتاه کامل فرکانس پایه را تحمل نماید. حفاظت اضافه بار^۳ معمولاً به منظور حفاظت خازن در مقابل اضافه بار مداوم پایین تر از ولتاژ



شکل ۵ - شکل نمایشی ساده شده یک قسمت از خازن سری.

جرقه (تنظیم شده)^۱، فراهم می شود. غالباً این کار توسط یک CT که دارای چند رله جریان و رله زمانی (تایمر) مناسب برای تخمین زدن توانایی تحمل زمان - جریان خازن است، انجام می گیرد. استانداردهای صنعتی توانایی اضافه بار خازنهای سری را مشخص کرده اند (مقدار آن بیش از واحدهای موازی است)، اما هر کاربردی معمولاً نیازمندیهای مختص به خود را دارد. عملکرد این مدار منجر به بستن کلید بای پاس می شود و خازن را حفاظت می نماید. هنگامی که مدار اضافه بار تشخیص می دهد که جریان به سطح مجاز رسیده است، کلید به طور خودکار باز شده و مجدداً خازن وارد مدار می شود. گاهی علاوه بر حفاظت زمان - کوتاه تر/جریان - زیاد تر تایمرها و رله ها، از یک آنالوگ حرارتی برای شبیه سازی درجه حرارت واحد خازنی استفاده می شود. بنابراین در مقابل اضافه جریانهای^۲ نسبتاً کم (کمتر از ۱۵۰٪)، با در نظر گرفتن درجه حرارت محیط، حفاظت می شود. مدار اضافه بار معمولاً بر روی یک فاز قرار می گیرد، و عملکرد آن منجر به بای پاس بانک خازنی کامل می گردد. فرض بر این است که جریانهای فاز در خلال شرایطی که منجر به اضافه جریانهای ممتد می گردند، متعادل خواهند بود.

یک انتهای هر قسمت مجزای خازنی معمولاً به سکو اتصال دارد. این عمل سکو را از شناوری در ولتاژهای نامشخص حفظ می‌کند و همچنین علاوه بر کاهش دادن BIL یک طرف کلید و الکترودهای جرقه، کاربرد CT های با ولتاژ نامی کمتر را مجاز می‌نماید. یک CT تشخیص دهنده اتصال کوتاه که در محل اتصال با سکو قرار دارد برای تشخیص خرابی عایق یا جرقه ایجاد شده بین هر نقطه تجهیزات و سکو به کار برده می‌شود. عملکرد این مدار موجب بسته شدن کلید بای پاس می‌گردد. عایق بین اجزاء مختلف سکو بایستی به دقت انتخاب گردد طوری که در تمام سطوح ولتاژ گذرا، به خصوص در حداکثر ولتاژ جرقه الکترودها مقاومت نماید. استانداردهای IEC مقادیر نامی BIL کلیه عایق‌ها را به ولتاژ جرقه الکترودها ارتباط می‌دهند، و حال آنکه استانداردهای U.S. فقط مقادیر واحدهای خازنی را مشخص می‌نمایند.

در اغلب عملیاتی که مورد بحث قرار گرفت لازم است که سیگنالی از سکو به مدارهای کنترل (زمین) ارسال شود تا اینکه زنگی را به صدا درآورد یا به رله‌ای فرمان دهد تا کلیدهای بای پاس مربوطه در فازهای دیگر را مسدود نماید تا تعادل سیستم حفظ گردد. مخابره بین سکو و مدارهای کنترل (زمین) معمولاً از طریق ستون سیگنال، که کانال‌های آن می‌تواند میله‌های عایق سولنوئیدی^۱، لوله هوای فشرده کویلی^۲، یا فیبرهای نوری^۳ باشد، انجام می‌گیرد. تجهیزاتی با هر سه نوع سیستم مخابراتی در حال کار موجود است.

همچنین معمولاً وجود یک منبع تغذیه در سکو، برای عملکرد کلید بای پاس و مدارهای کنترل سکو، ضروری است. این منبع می‌تواند هوای فشرده همراه با کمپرسور واقع در سطح زمین باشد و یا باطری همراه با سیستم شارژ نصب شده بر روی سکو باشد که از طریق جریان خط به عنوان منبع اولیه شارژ می‌شود. یک سیستم جدیدی که در آن عمل شارژ شدن باطری از طریق انرژی خورشید انجام می‌گیرد، نیز در حال کار است. روش معمول این است که سطح توان کم سکو را تشخیص داده و کلید بای پاس را بست. البته اغلب سطح توان متوسط نیز تشخیص داده می‌شود تا زنگ خطری (آلارم) به زمین ارسال شود.

شکل ۶ اوسیلوگرافی است که در خلال آزمایش بر روی تجهیزات خازن سری پست Pacific Gas & Electric's Table Mountain در سال ۱۹۷۱ به دست آمده است. در وقوع اتصال کوتاه، جرقه بین الکترودها شروع و بلافاصله هدایت صورت می‌گیرد. شاخص وضعیت کلید، نشان می‌دهد

1- Solenoid - Operated Insulated Rods

2- Coiled Compressed Air Tubing

3- Fiber Optics

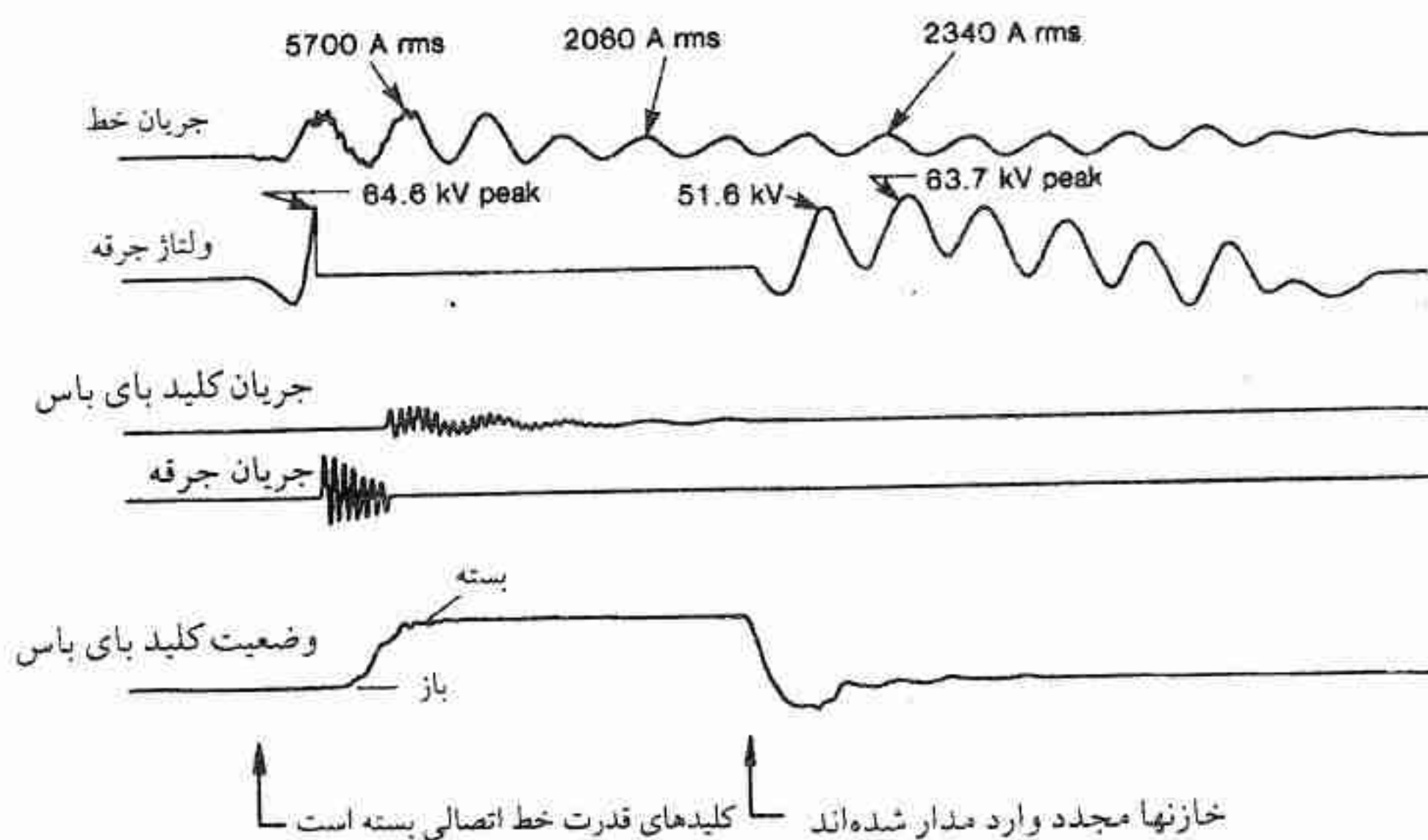
که کلید بای پاس چند میلی ثانیه پس از هدایت الکترودها شروع به بستن می‌کند و در فاصله کمتر از 16 m sec پس از جرقه کلید کاملاً بسته می‌شود. جریان تخلیه با فرکانس بالا، و انتقال آن از فاصله بین الکترودها به کلید قابل توجه است. نمودار جریان کلید همچنین نشان می‌دهد که جریان 60-Hz به جریان تخلیه فرکانس بالا اضافه شده است. پس از آنکه جریان خط از مقدار موثر 5700 A به 2060 A تنزل می‌یابد، مدار کنترل کلید را باز می‌کند تا پس از $2/5$ سیکل خازن را مجدداً وارد مدار نماید. نکته قابل توجه ولتاژ گذرای ناشی از وارد کردن مجدد خازن است که در نقطه‌ای کاملاً جبران شده است. مولفه غیر 60-Hz مربوط به نوسانات زیر هارمونیک خازن‌های سری و سیستم است و مقدارش تقریباً آنقدر زیاد است که منجر به جرقه مجدد می‌گردد، گرچه ولتاژ حالت ماندگار 60 Hz کاملاً پائین‌تر از ولتاژ جرقه الکترودها قرار دارد. برای کاهش قابل ملاحظه این ولتاژ گذرا، می‌توان خازن همراه با مقاومت شنت را به کار برد. همچنین بایستی به افزایش جریان خط از مقدار موثر 2060 A به 2340 A در هنگام وارد کردن مجدد خازن - که به واسطه تغییر امپدانس سیستم مورد آزمایش پیش می‌آید - توجه کرد.

در سیستمی که از دو خط موازی تشکیل شده است - نظیر آنچه که در شکل ۴ نشان داده شده است - در اثر وقوع اتصال کوتاه و بای پاس شدن قسمت‌های بانک خازن، نوسان شدید جریان و ولتاژ، جریان‌های اضافه بار و ولتاژهای گذرای ناشی از وارد شدن مجدد خازن، می‌تواند رخ دهد. با رفع قسمت خط اتصال کوتاه شده، این تجهیزات بایستی جریان نوسانی کامل سیستم را، که پس از وارد شدن مجدد خازن ایجاد می‌شود و بیش از دو برابر جریان عادی خط است، حمل نمایند. جریان اضافه بار مداوم پس از وقوع نوسان، ممکن است در حدود دو برابر جریان بار قبل از اتصال کوتاه باشد. غالباً چنین جریان اضافه باری مقدار نامی جریان پیوسته بانک خازن را مشخص می‌کند. پروفایل یک جریان خط نمونه برای یک بانک خازن سری واقع در قسمتی از خط موازی در یک سیستم متشکل از دو خط موازی، در شکل ۷ نشان داده شده است.

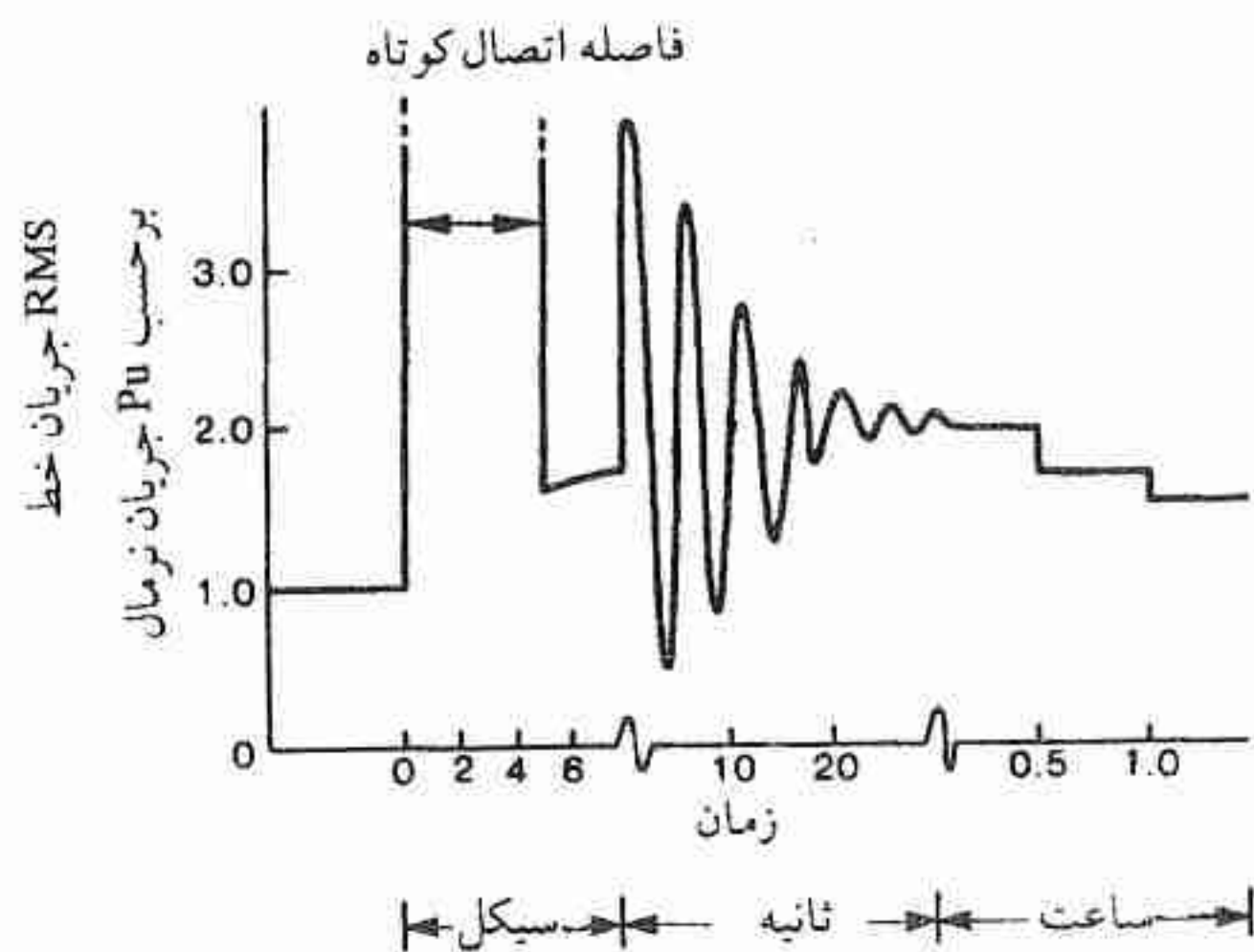
۷-۵ روش‌های وارد کردن مجدد خازن

همانطوری که قبلاً بحث شد، تاخیر زمانی که از لحظه رفع اتصال کوتاه تا وارد کردن مجدد خازن وجود دارد، می‌تواند عامل بحرانی در عملکرد صحیح سیستم باشد. هر قدر این تاخیر زمانی کوتاه‌تر باشد، حد پایداری گذرا بیشتر خواهد بود، همانطوری که در شکل ۴ نشان داده شده است. تاخیر زمانی وارد کردن مجدد خازن به سرعت کنترل عملکرد رله، زمان باز شدن کلید بای پاس، و مشخصه

ولتاژ برگشت (بازیافت) الکترودهای جرقه حفاظتی، بستگی دارد.



شکل ۶ - آزمایش انجام شده بر روی تجهیزات خازن سری. مقدار نامی خازن = 90 Ohm ، 1800 A .



شکل ۷ - نمونه ای از پروفایل جریان اضافه بار در قسمتی از خط موازی، قسمت اتصال کوتاه شده باز است.

در سیستم وارد کردن مجدد خازن با سرعت - کم^۱ معمولاً از الکترودهای جرقه‌ای که خودبخود جرقه را رفع نمی‌کنند، استفاده می‌شود، و وقتی که جرقه رخ می‌دهد کلید بای پاس شروع به مسدود شدن می‌نماید. پس از رفع اتصال کوتاه، تاخیر زمانی کافی برای غیریونیزه کردن فاصله بین الکترودها و برقرار کردن مقاومت دی‌الکتریک فراهم می‌شود، پس از آن کلید مجدداً باز می‌شود. زمان وارد کردن مجدد خازن در سیستم با سرعت کم معمولاً یک ثانیه یا بیشتر است.

سیستم وارد کردن مجدد خازن با سرعت - زیاد، سیستمی است که در آن چند سیکل پس از رفع اتصال کوتاه خازن مجدداً وارد مدار می‌شود. این کار با استفاده از کنترل و کلیدهای سریع و فاصله الکترودهایی که به سرعت مقاومت عایقی خود را باز می‌یابند - نظیر فاصله خلا^۲ یا فاصله الکترودی که خودبخود جرقه را رفع می‌کند^۳ - انجام می‌گیرد. یک فاصله الکترودی که خودبخود جرقه را رفع می‌کند می‌تواند از هوای با فشار زیاد یا کم استفاده نماید که در آن جریان هوا در موقع رفع اتصال کوتاه شروع می‌شود. تاخیر زمانی وارد کردن مجدد خازن در فاصله‌های الکترودی که خودبخود جرقه را رفع می‌کنند تابعی از اندازه جریان اتصال کوتاه و مدت زمان آن است زیرا این پارامترها بر مشخصه‌های بازگشتی^۴ (بازیافتی) تاثیر می‌گذارند.

وارد کردن لحظه‌ای خازن^۵ به وسیله ایجاد جریان هوا در فاصله الکتروود در موقع وقوع جرقه و بازیافتن سریع مقاومت عایقی انجام می‌گیرد. فاصله الکتروود پس از بازیافتن مقاومت عایقی خود سعی می‌کند که در خلال اتصال کوتاه در هر نقطه صفر جریان خازن را وارد مدار نماید تا اینکه ولتاژ خازن کمتر از ولتاژ تحمل فاصله الکتروود گردد. از معایب این روش این است که واحدهای خازنی در معرض پالس‌های مکرر ولتاژ بالا قرار می‌گیرند و ممکن است در حالی که جریان هوا برقرار است، ولتاژ خازن به طور خطرناک بیش از مقدار تنظیم جرقه افزایش یابد.

۷-۶ حفاظت با واریستور

عملکرد رضایتبخش تجهیزات به کمک تمامی انواع وسایل حفاظتی مورد بحث منجمله الکترودهای جرقه‌ای که خودبخود جرقه را رفع نمی‌کنند، الکترودهای جرقه با هوای فشار کم و زیاد، الکترودهای جرقه خلا و انواع متعدد کلید، به دست می‌آید. در هر یک از طراحی‌های جدید نسبت به طراحی‌های قبلی بهبودهایی در مشخصه‌های آن صورت گرفته است.

1- Slow - Speed Reinsertion

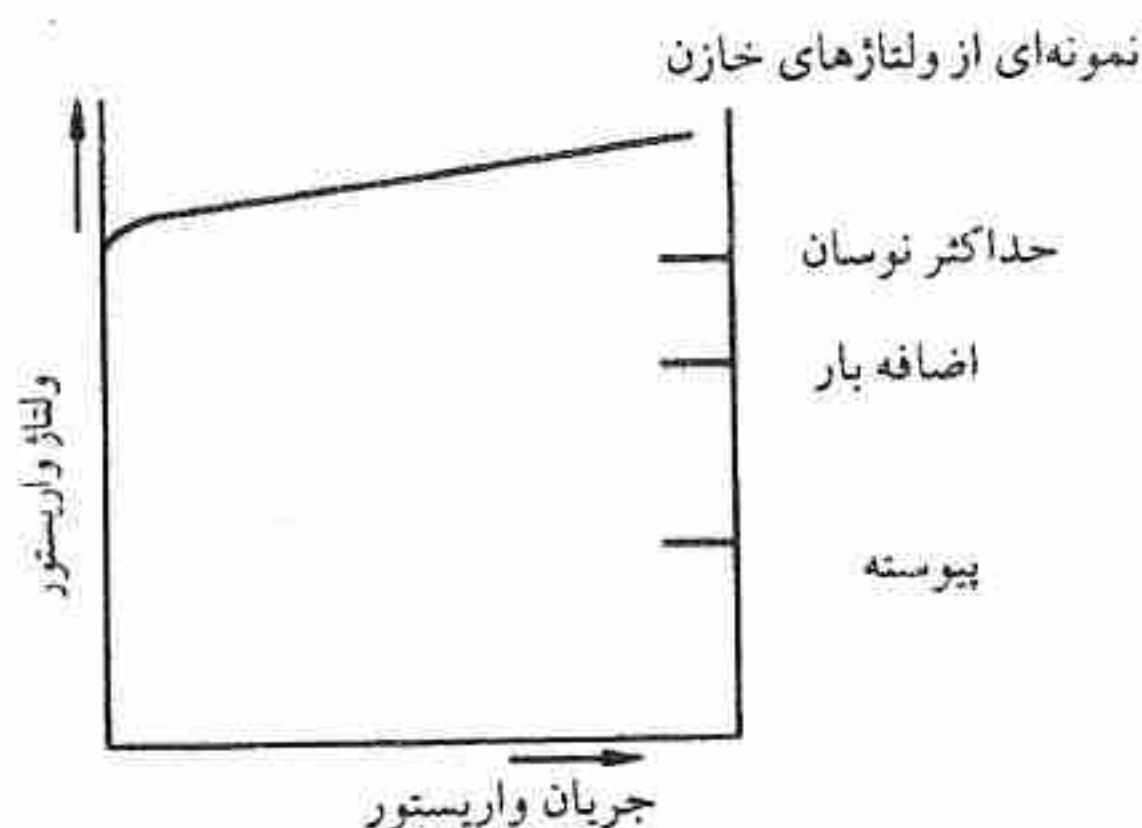
2- Vacuum Gap

3- Self - Clearing Gap

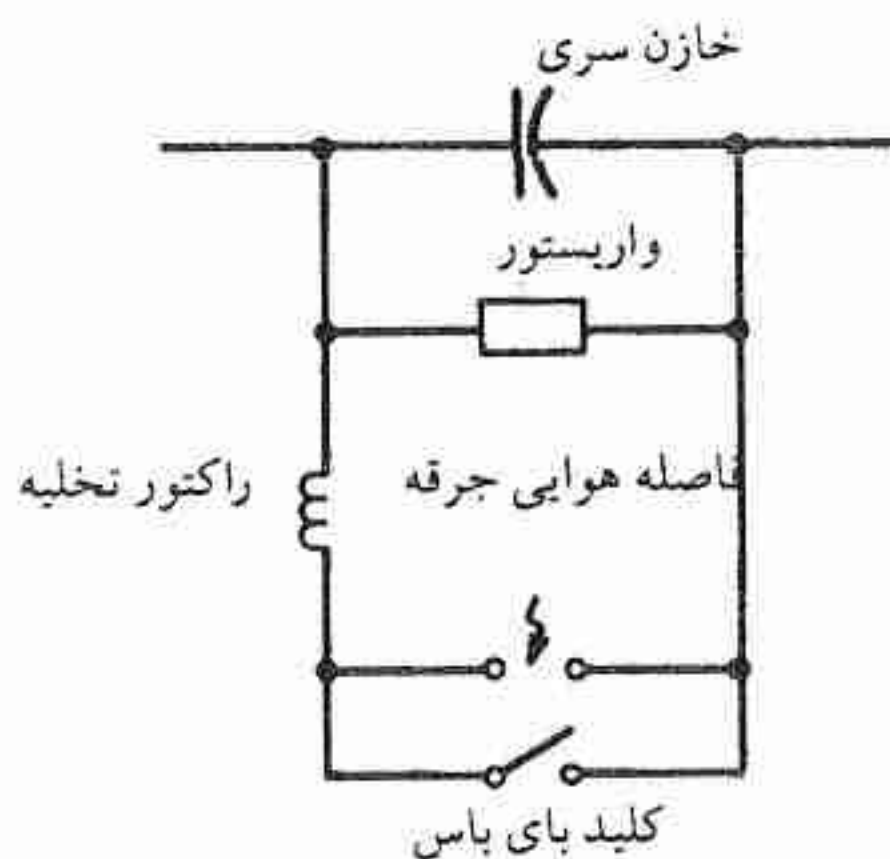
4- Recovery Characteristics

5- Instantaneous Reinsertion

در وسایل حفاظتی پیشرفته خازنهای سری، از واریستورهای اکسید - روی، که شکلی از مقاومت غیرخطی است، استفاده گردیده تا ولتاژ دو سر خازن را محدود کنند. از مشخصه مقاومت غیرخطی واریستور برای محدود کردن ولتاژ خازن استفاده گردیده است و علاوه بر داشتن تمامی مزایای وارد کردن لحظه‌ای خازن، بی‌نیاز از سوئیچ کردن با سرعت بالا و مشخصه‌های بازگشتی سریع فاصله الکترودها می‌باشد. شکل ۸ نمونه‌ای از پروفایل ولتاژ/جریان یک واریستور را نشان می‌دهد. مدار اصلی این نوع وسیله حفاظتی در شکل ۹ نشان داده شده است. واریستور مستقیماً با خازن موازی شده است. پایداری اکسید روی سبب می‌شود که واریستور تا ولتاژ کمتر از ولتاژ زانو بدون خرابی قابل ملاحظه مقاومت نماید و همچنین به واسطه خاصیت غیرخطی آن نیازی به الکترودهای جرقه پیچیده نمی‌باشد.



شکل ۸ - مشخصه ولتاژ / جریان واریستور



شکل ۹ - حفاظت خازن سری با استفاده از واریستور

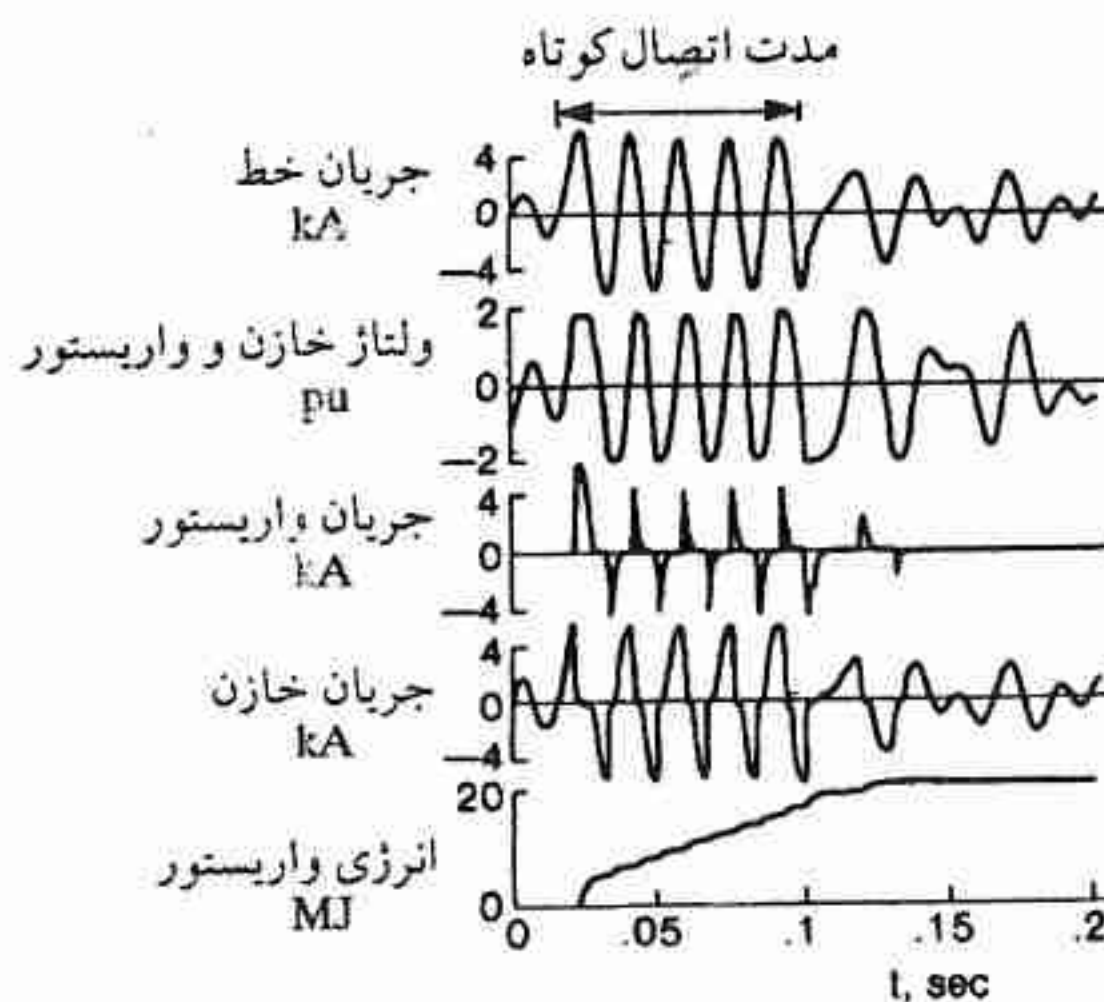
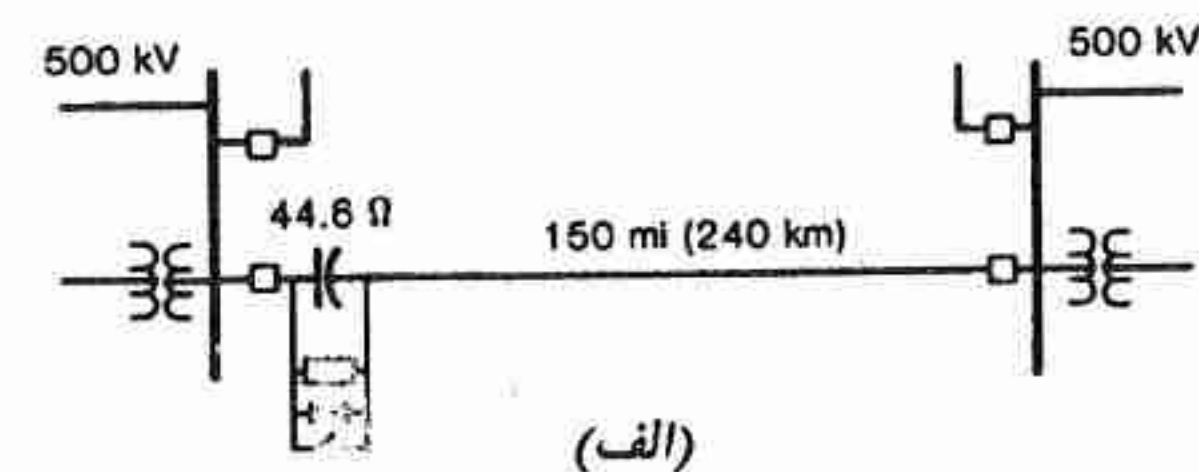
البته فاصله هوایی جرقه‌ای که در شکل نشان داده شده است برای محدود کردن ولتاژ خازن به کار نرفته است بلکه واریستور این نقش را بر عهده دارد. بلکه آتش شدن فاصله هوایی به وسیله کنترل منطقی - که بر انرژی جذب شده توسط واریستور نظارت دارد - شروع می‌شود. بنابراین برای اتصال کوتاه‌های بزرگ که مقدار جریان واریستور و یا مدت زمان آن زیاد می‌شود، فاصله هوایی آتش می‌شود تا واریستور را اتصال کوتاه نموده و آن را حفاظت نماید. در چنین سیستم حفاظتی هنوز به کلید بای پاس نیاز است تا بتوان با کنترل دستی خازن را وارد و یا در مواقع غیرعادی آن را از مدار خارج کرد. وجود راکتور تخلیه نیز ضروری است تا بتوان مقدار و فرکانس جریان خازن را در مواقعی که فاصله هوایی جرقه می‌زند یا کلید بای پاس بسته می‌شود، محدود نمود.

به طور نمونه هدایت واریستور تا سطوح ولتاژ ماکزیمم نوسان سیستم ناچیز است، اما هنوز قادر است ولتاژ را تا مقداری که در محدوده توانایی خازن قرار دارد، محدود نماید. مشخصه واریستور (شکل ۸) به کمک تعداد دیسک اکسید روی و اتصالات سری - موازی آنها تعیین می‌شود. برای یک کاربرد بخصوص، مهمترین ملاحظات در نظر گرفتن مقادیر نامی انرژی و ولتاژ واریستور است. مقدار نامی ولتاژ و مشخصه ولتاژ/جریان مربوطه به وسیله حداکثر ولتاژی که انتظار می‌رود در شرایط غیراتصال کوتاه دو سر خازن ایجاد شود، مشخص می‌گردد.

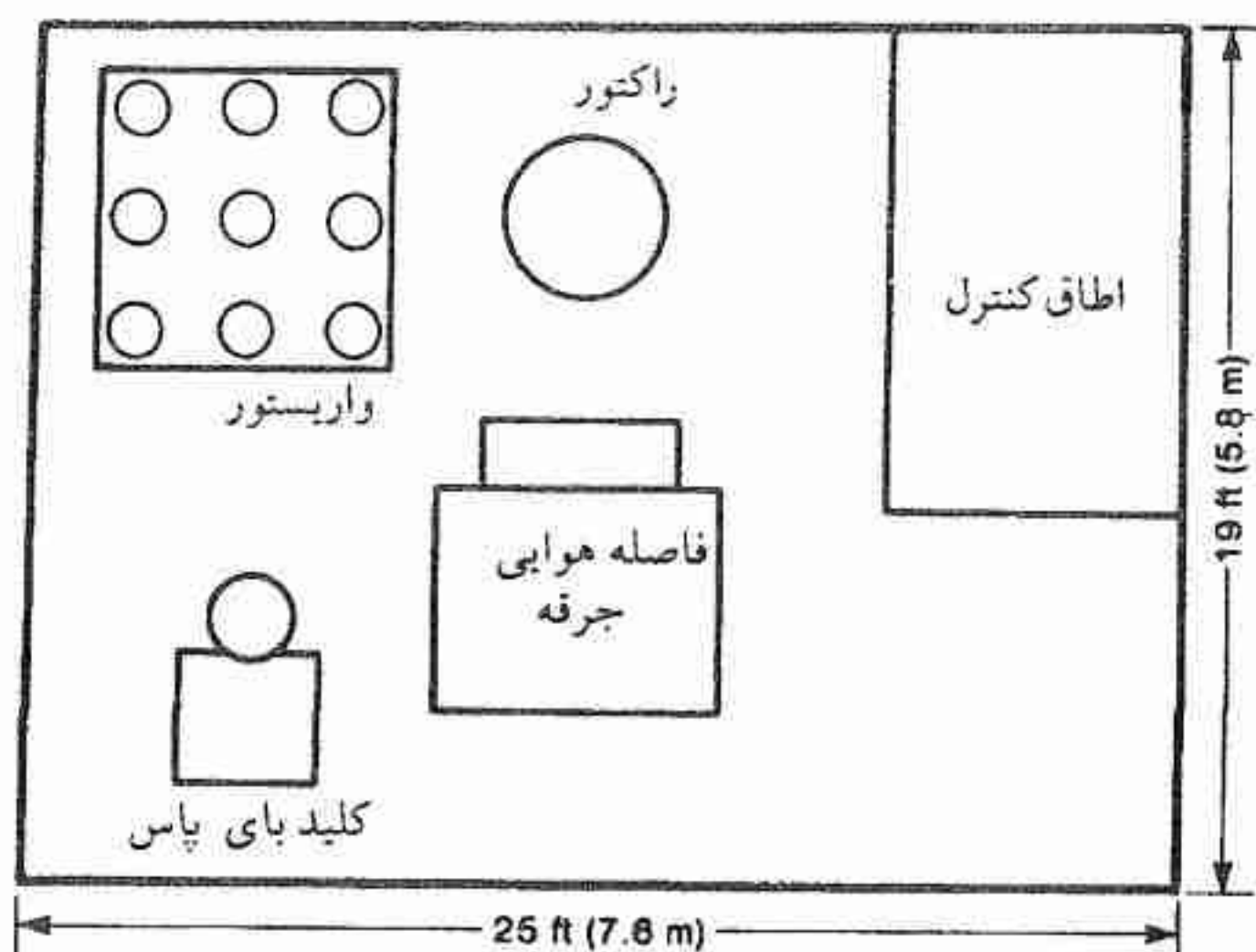
جنبه‌های اساسی سیستم حفاظتی با واریستور اکسید - روی را می‌توان به وسیله شبیه‌سازی عملکرد آن بر روی سیستم ایده‌آل 500 kV ، 60 Hz - که دیاگرام تک خطی آن در شکل ۱۰ الف نشان داده شده است - تشریح کرد. واریستور هر فاز دارای سطح حفاظتی (ماگزیمم) 2 Pu پریونیت ولتاژ نامی خازن در جریان اتصال کوتاه (ماگزیمم) 25 A است. جریان نامی خازن 1600 A فرض شده است. سیستم ابتدا و انتهای خط جبران شده به وسیله راکتانس معادل $16\ \Omega$ نشان داده شده است. در شرایط کار عادی سیستم، جریان خط از خازن‌های سری عبور می‌کند و جریان عبوری از واریستور قابل اغماض است. کلید بای پاس باز است و در فاصله هوایی هدایتی وجود ندارد. این شرایط در سیکل اول شکل موج‌های شکل ۱۰ ب نشان داده شده است.

وقوع اتصال کوتاه جریان و ولتاژ خازن را افزایش می‌دهد. اگر چنانچه ولتاژ خازن به اندازه کافی افزایش یابد، واریستور هدایت کرده و از افزایش بیشتر ولتاژ خازن جلوگیری می‌کند. اگر چنانچه وقوع اتصال کوتاه در خارج از قسمتی از خط که خازن در آن قرار دارد، باشد جریان اتصال کوتاه چندان زیاد نیست، زیرا به وسیله امپدانس کل خط محدود می‌شود. نقش واریستور در چنین شرایطی در شکل ۱۰ ب برای یک اتصال کوتاه سه فاز نشان داده شده است. این شکل موج‌ها بر روی کامپیوتر با

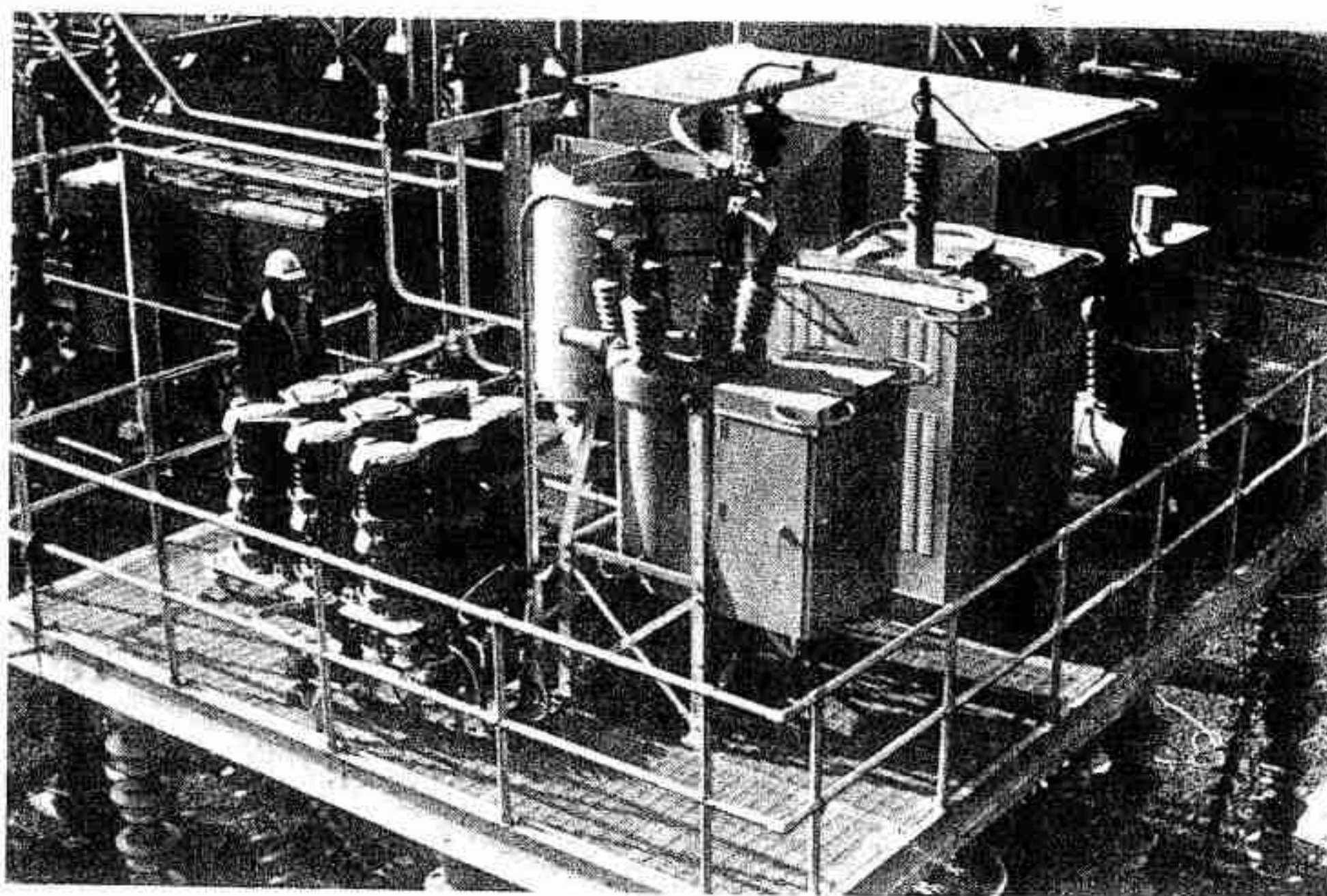
به کار گرفتن برنامه شبیه‌سازی به دست آمده است. همانطوری که مشاهده می‌شود، واریستور ولتاژ را در هر نیم سیکل محدود می‌نماید و جریان بین خازن و واریستور متناوباً برقرار می‌شود. هنگامی که واریستور ولتاژ را محدود می‌کند نسبت dv/dt کاهش می‌یابد که در نتیجه منجر به کاهش جریان خازن تا سطح پائینی می‌گردد. هدایت مشترک خازن / واریستور تا رفع اتصالی - که به وسیله کلیدهای قدرت سیستم (شکل ۱۰ الف) و رله‌های مربوطه انجام می‌گیرد - ادامه می‌یابد. آنگاه جریان خط به مقدار قبل از اتصال کوتاه تنزل می‌یابد و ولتاژ خازن را کاهش داده و باعث می‌شود که واریستور از هدایت بازایستد. بنابراین جریان عبوری از خط کاملاً به جریان خازن سری بازمی‌گردد. این بازگشت و یا وارد شدن مجدد خازن به طور لحظه‌ای و اتوماتیک انجام می‌گیرد و می‌تواند پایداری گذرا و انتقال توان را که قبلاً مورد بحث قرار گرفت، افزایش دهد.



شکل ۱۰ - (الف) خط ۵۰۰ kV که اتصال کوتاه سه فاز در قسمت خط جبران شده رخ داده است. (ب) شکل موجهای جریان و ولتاژ برای مدت زمان ۵ سیکل اتصال کوتاه.



شکل ۱۱ - نمای اصلی سکو حفاظتی



شکل ۱۲ - تاسیسات نمونه نصب شده.

یک نمونه کامل سیستم حفاظتی که در آن از واریستورهای اکسید - روی استفاده گردیده است، بر روی خازنهای سری موجود در پست North Johan Day در سیستم BPA نصب گردیده است. نمای اصلی سکوی حفاظتی و فتوگراف نمونه نصب شده در اشکال ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. آزمایشهای اتصال کوتاه متعددی به طور موفقیت آمیز در April و May ۱۹۷۹ بر روی این تاسیسات نمونه انجام گرفت.

۷-۷ اثرات رزونانس با خازنهای سری

یک خازن سری با اندوکتانس خط انتقال تشکیل یک مدار رزونانس - سری با فرکانس طبیعی زیر می‌دهد،

$$f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = f\sqrt{\frac{X_{Cv}}{X_1}} \quad (2)$$

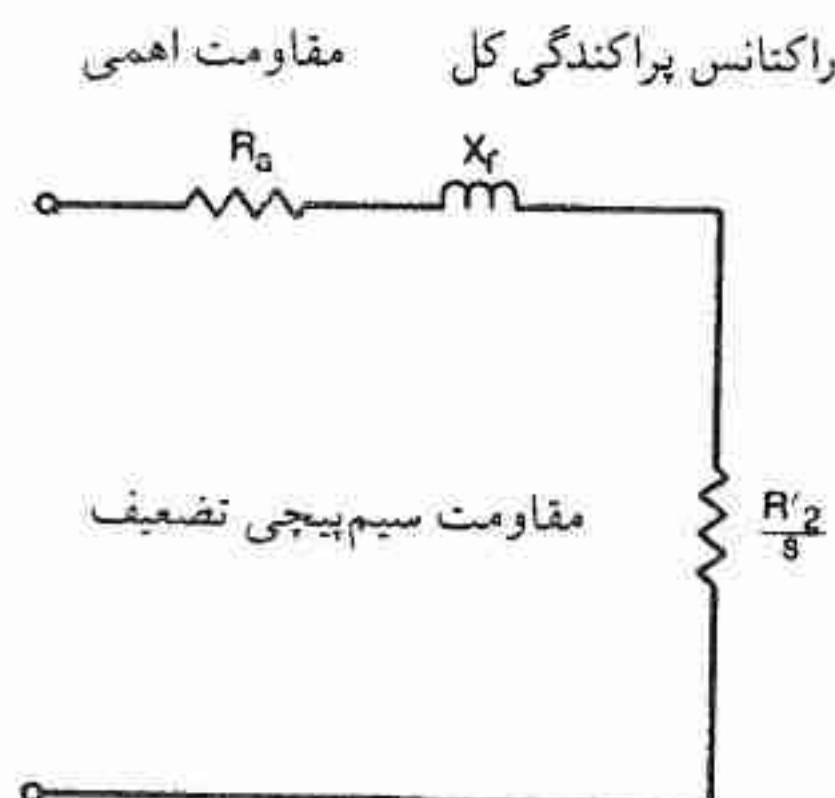
که در آن X_{Cv} راکتانس خازن هر فاز و X_1 راکتانس کل خط در فرکانس پایه است. از آنجایی که درجه جبران‌سازی، X_{Cv} / X_1 معمولاً در محدوده ۷۰-۲۵٪ است، f_e معمولاً کوچکتر از فرکانس پایه است، و ما اینطور بیان می‌کنیم که سیستم دارای رزونانس زیر هارمونیک^۱ یا «مد^۲» است. X_1 بایستی در برگیرنده راکتانس سری ژنراتورها و بارهای متصل شده به ابتدا و انتهای خط باشد. در عمل این اجزا همانند خط دارای مشخصه‌های پاسخ - فرکانس پیچیده‌ای هستند، و برای پیش‌بینی دقیق پدیده رزونانس بایستی از مدل مداری دقیق سیستم قدرت استفاده شود.

اولین اثر رزونانس زیر هارمونیک این است که در خلال هر اغتشاش، جریان‌های گذرا در فرکانس رزونانس زیر هارمونیک f_e تحریک می‌شوند، این جریان‌ها بر روی جریان فرکانس پایه افزوده می‌شوند و معمولاً به واسطه مقاومت خط و مقاومت ژنراتورها و بارهای متصل به آن میرا دهند. مثالی از آن در شکل ۶ نشان داده شده است. در این حالت میرایی سیستم مثبت است و مد زیر هارمونیک^۳ پایدار است. باید توجه داشت که مد زیر هارمونیک یکی از مدهای طبیعی سیستم قدرت است. مدهای طبیعی دیگر دارای فرکانس‌های رزونانس بالاتر از فرکانس پایه هستند و اگر چنانچه در فرکانس‌های هارمونیک مرتبه صحیح و یا نزدیک به آن رخ دهند می‌توانند در مواقعی که منابع جریان‌های هارمونیک (مثلاً یکسوکننده‌های بزرگ) اتصال دارند (به فصل ۱۰ مراجعه شود)، ایجاد مزاحمت نمایند. به طور کلی، هر اغتشاشی به انضمام عمل کلیدزنی تمامی مدهای طبیعی

سیستم را به درجات متفاوت تحریک می‌کنند. عموماً تمامی جریان‌های گذرای ناشی از آن به طور مثبت و به درجات متفاوت میرا می‌گردند.

تحت شرایط معین مد زیرهارمونیک مربوط به خازن‌های سری می‌تواند از ماشین‌های گردان چندفاز ac تاثیر ناپایداری بپذیرد. در بدترین حالت در صورتی که اقدامات تصحیح انجام نگیرد منجر به ناپایداری می‌گردد. تاثیر ناپایداری خود را به صورت مقاومت منفی در مدار معادل ماشین‌های سنکرون و القایی نشان می‌دهد. اگر از برجستگی قطب‌ها صرف‌نظر شود، مدار معادل تکفاز ماشین سنکرون مطابق شکل ۱۳ خواهد بود. در اینجا emf تولیدشده (فرکانس پایه) از مدار حذف گردیده در حالیکه فرکانس زیر هارمونیک را منحصراً در نظر می‌گیریم. همچنین برای سهولت سیم‌پیچی میدان نیز حذف گردیده است. فرض کنید که جریان‌های زیرهارمونیک به طور گذرا به واسطه اغتشاش در سیستم خارجی تحریک شده‌اند. در حالت کلی، این جریان‌ها در سه‌فاز نامتعادل هستند، اما اگر چنانچه آنها را به مؤلفه‌های متقارن تجزیه کنیم، مؤلفه‌های توالی - مثبت با عبور از استاتور ماشین میدان مغناطیسی را ایجاد می‌نمایند که در جهت چرخش روتور اما با سرعت زاویه‌ای $2\pi f_e$ رادیان الکتریکی بر ثانیه می‌چرخد. روتور با سرعت $2\pi f$ رادیان الکتریکی بر ثانیه یعنی سریعتر از میدان زیر هارمونیک می‌چرخد. گفته می‌شود که نسبت به این میدان دارای لغزش است و لغزش s از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$s = \frac{f_e - f}{f_e} \quad (۳)$$



شکل ۱۳ - مدار معادل ساده شده ماشین سنکرون برای توضیح اثرات زیرهارمونیک

چون $f_e < f$ است، لغزش منفی است و روتور رفتاری مشابه موتور القایی ای دارد که در سرعت

بالا تر از سرعت سنکرون کار می‌کند. مقاومت سیم‌پیچ میرایی^۱، یا تضعیف^۱ (یا روتور در مورد ژنراتورهای سنکرون سرعت بالا) انتقال یافته به استاتور - مطابق مدار معادل موتور القایی - برابر است با R'_2/S ، و این کمیت منفی است که وقتی به طور سری با مقاومت سیستم خارجی و مقاومت استاتور قرار می‌گیرد، موجب میرایی منفی^۲ یا «عدم میرایی»^۳ می‌گردد. بنابراین ماشین قادر است که در مد زیرهارمونیک، انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل کند.

اگر δ خیلی کوچک باشد، که این وقتی تحقق می‌یابد که میزان جبران سری زیاد و ω به ω_n نزدیک شود، آنگاه R'_2/S می‌تواند آنقدر زیاد شود که بر مقاومت مثبت سیستم غلبه پیدا کند. آنگاه مد زیرهارمونیک ناپایدار بوده و در مقابل کوچکترین اغتشاش تا سطوح خطرناکی از ولتاژ و جریان رشد می‌نماید. البته در عمل چنین وضعیتی به ندرت رخ می‌دهد، البته در صورت وقوع بایستی اقدامات تصحیح انجام گیرد. این اقدامات می‌تواند شامل هر یک یا تمامی روش‌هایی باشد که برای جلوگیری از رزونانس زیر سنکرون اعمال می‌گردد (که در ذیل آمده است).

مد زیرهارمونیک الکتریکی به ندرت ایجاد مزاحمت می‌کند مگر در جایی که رزونانس زیر سنکرون (SSR) بتواند رخ دهد، از آنجایی که در جهت مخالف روتور و میدان اصلی می‌چرخد، میدان زیرهارمونیک گشتاور متناوبی با فرکانس $f_e - f_r$ بر روتور اعمال می‌نماید. اگر این تفاضل فرکانس بر یکی از رزونانس‌های پیچشی طبیعی^۴ سیستم محور ماشین منطبق گردد، نوسانات^۵ پیچشی تحریک می‌گردد. این شرایط به رزونانس زیر سنکرون موسوم است. SSR ترکیبی از مد طبیعی یا رزونانس الکتریکی/مکانیکی است و مشابه مد زیرهارمونیک الکتریکی خالص، بر اساس میزان میرایی می‌تواند پایدار یا ناپایدار باشد. گرچه مقاومت منفی در ماشین‌های سنکرون می‌تواند تاثیر ناپایداری داشته باشد، ناپایداری مد زیر سنکرون به احتمال زیاد از جابجایی‌های فاز^۶ در مدار خارجی ژنراتوری که محور آن در نوسان است، نتیجه می‌شود. نوسان منجر به تولید مدولاسیون فرکانسی از فرکانس پایه با باندهای جانبی هارمونیک و زیرهارمونیک^۷ می‌گردد و باندهای جانبی زیرهارمونیک ممکن است به وسیله این جابجایی‌های فاز ناپایدار گردند.

ماشین‌های الکتریکی که کاملاً برای وقوع SSR مستعد می‌باشند دارای توربین‌های بخار بزرگ چند مرحله‌ای هستند که به طور نمونه دارای چهار یا پنج مد پیچشی در محدوده فرکانس ۶۰-۱۰۰ Hz.

1- Amortisseur

2- Negative Damping

3- Undamping

4- Natural Torsional Resonance

5- Torsional Oscillations

6- Phase Shifts

7- Subharmonic & Harmonic Sidebands

می‌باشند. کمترین فرکانس پیچشی فرکانس «نوسانی»^۱ است که در آن کل سیستم سیلندرهای توربین و ژنراتور به صورت یک اینرسی واحد در حول سرعت سنکرون نوسان می‌کند. رزونانس‌های پیچشی در فرکانس‌های بالاتر در برگیرنده پیچش محور در مدهای متفاوت است و فرکانس‌های رزونانس می‌توانند تا چند صد هرتز توسعه یابند. میرایی این مدها عموماً بسیار کوچک است.

پی‌آمدهای SSR می‌تواند در کوتاه مدت خطرناک باشد، اگر چنانچه نوسانات ناپایدار باشند و به قدر کافی تقویت شوند منجر به بریدن محور می‌گردد. اما حتی اگر نوسانات نسبتاً میرا شده باشند اغتشاشاتی (نظیر کلیدزنی، رفع اتصال کوتاه و غیره) می‌توانند باعث خستگی محور گردند. این اثر تخریبی کند، «خستگی سیکل - پایین»^۲ نامیده می‌شود و در سال‌های اخیر کوشش قابل ملاحظه‌ای در جهت فهمیدن کمی آن انجام گرفته است.

اقدامات تصحیح SSR عبارتند از:

- ۱- خارج کردن بخش‌هایی از خط، یا بای پاس کردن خازن‌های سری، به کمک رله‌های حفاظتی که به سطوح کوچکی از جریان زیرهارمونیک حساس هستند.
 - ۲- نصب کردن مدارهای فیلتر زیرهارمونیک مخصوص. اینها می‌توانند به شکل فیلترهای مسدودکننده (از نوع رزونانس - موازی) سری با خط انتقال، یا مدارهای میراکننده موازی با خازن‌های سری باشند.
 - ۳- به کار گرفتن کنترل تحریک (مدوله کردن جریان تحریک) در توربین - ژنراتورها طوری که در فرکانس زیرهارمونیک میرایی مثبت فراهم گردد.
 - ۴- به کار گرفتن جبران‌کننده‌های استاتیک و مدوله کردن ولتاژ مرجع طوری که در فرکانس زیرهارمونیک میرایی مثبت فراهم گردد.
- در موارد شدیدتر ترکیبی از روش‌های (۱) الی (۳) همراه با ۴ فیلتر مسدودکننده موازی به منظور میرا کردن هر یک از چهار رزونانس زیر سنکرون در سیستمی که مجهز به خازن‌های سری در نقاط متعددی از سیستم بوده است، به طور موفقیت آمیز به کار رفته است.

۷-۸ خلاصه

خازن‌های سری به عنوان وسایلی اقتصادی برای افزایش راندمان خطوط EHV بوده و خواهند بود.

کاربرد آنها ساده نبوده و برای اطمینان یافتن به عملکرد صحیح آنها مطالعات زیادی لازم است. پیشرفت‌های مداوم در زمینه واحدهای خازنی و طراحی وسایل حفاظتی آنها نقش مهمی در حفظ میزان رشد خازن‌های سری داشته‌اند و تکنیک جبران خط یک عامل کلیدی در خطوط انتقال EHV در آینده خواهد بود.

مراجع

1. L. E. Bock and G. R. Mitchell, "Higher Line Loadings with Series Capacitors," *Transmission*, March 1973.
2. I. S. Benko, S. H. Gold, and W. N. Rothenbuhler; and L. E. Bock, I. B. Johnson, and J. R. Stevenson, "Internal Overvoltages and Protective Devices in EHV Compensated Systems - Series Capacitors and Shunt Reactors," *CIGRE 33-05*, 1976.
3. I. B. Johnson, *Capacitor Banks for Transmission System Compensation*, Missouri Valley Electr. Assoc., April 1973.
4. ©1980 IEEE Reprinted with Permission from "A Zinc Oxide Varistor Protective System for Series Capacitors," by J. R. Hamann, S. A. Miske, Jr., I. B. Johnson, and A. L. Courts, IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting July 13-18, 1980, Minneapolis, Minnesota.
5. D. N. Walker, C. E. J. Bowler, and D. H. Baker, "Torsional Dynamics of Closely Coupled Turbine Generators," *Trans. IEEE, Power Appar. Syst.* 97(4), 1458-1466 (1978).
6. L. A. Kilgore, D. G. Ramey, and M. C. Hall, "Simplified Transmission and Generation System Analysis Procedures for Subsynchronous Resonance Problems," in IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting, 1976.
7. C. E. J. Bowler, "Understanding Subsynchronous Resonance," IEEE Publ. 76CH1066-0-PWR, Symposium on Analysis and Control of Subsynchronous Resonance, 1976.



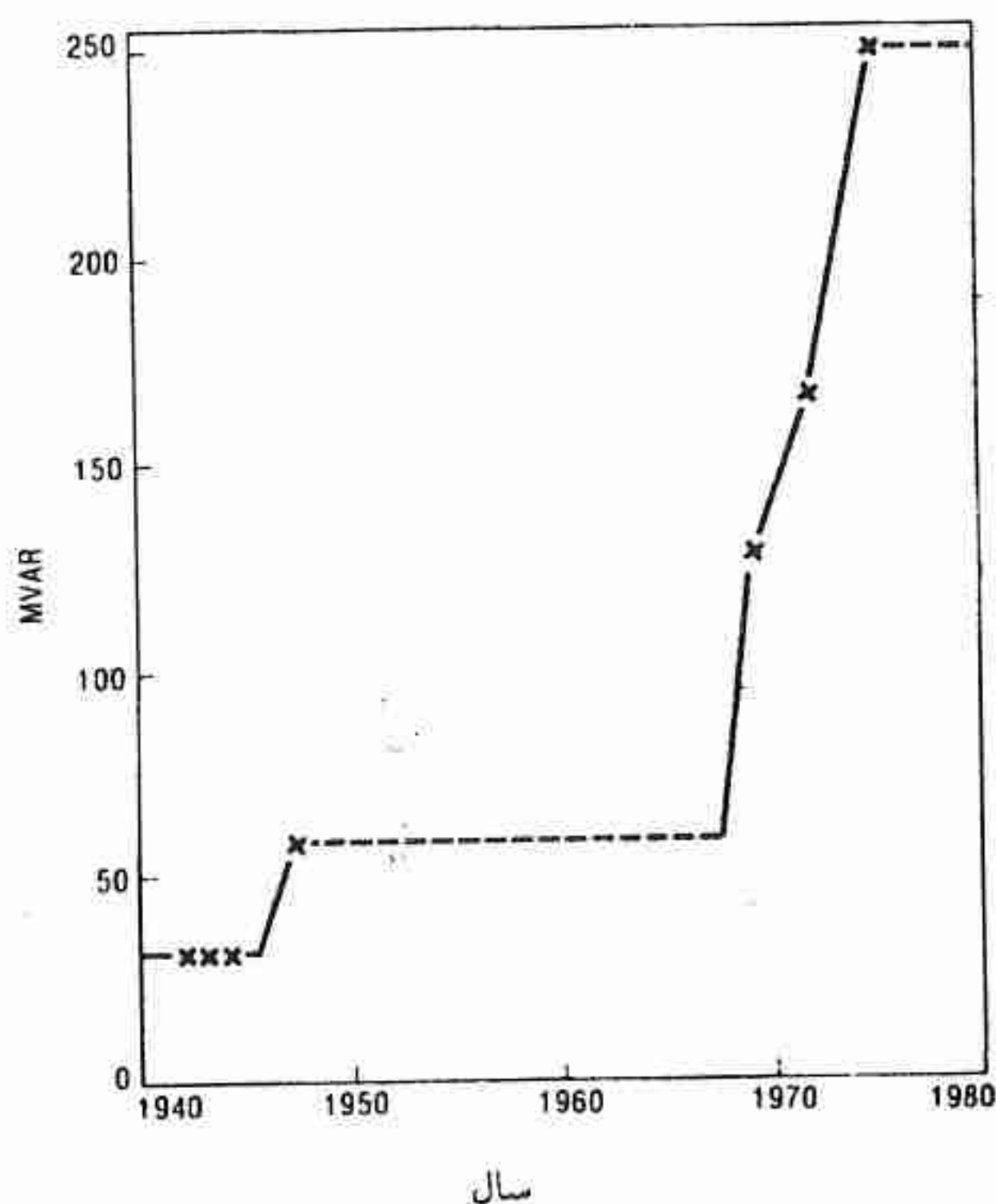
کندانسورهای سنکرون

P.G. BROWN

۸-۱ مقدمه

کندانسورهای سنکرون^۱ در مدت زمان بیش از ۵۰ سال نقش اصلی را در کنترل توان راکتیو عهده‌دار بوده‌اند. کندانسور سنکرون در سطوح ولتاژ انتقال و زیرانتقال - برای بهبود پایداری و نگهداری ولتاژ در محدوده مطلوب در شرایط تغییر بار و در وضعیت‌های اضطراری - به کار رفته است. بنا به دلایل اقتصادی کاربرد آنها در ناحیه زیرانتقال به‌طور وسیع با بانک‌های خازنی موازی جایگزین شده است. کندانسورهای سنکرون در حمایت فوری و اضطراری ولتاژ و نگهداری یا افزایش خروجی آنها در ولتاژ کاهش یافته، نسبت به خازن‌ها دارای مزیت ذاتی هستند. این مزیت سبب شده است که کاربرد آنها در سطوح ولتاژ انتقال که به مقادیر نامی بزرگی نیاز است، ادامه یابد. در خلال دهه گذشته افزایش قابل توجهی در اندازه کندانسور سنکرون، مطابق شکل ۱، رخ داده است. این افزایش به سبب افزایش مداوم در سطوح ولتاژ انتقال و توانایی انتقال توان بالاتر هر مدار، صورت گرفته است. همزمان با این، موسسات تولیدکننده برق با به تعویق انداختن و یا حذف مدارهای انتقال طراحی شده، مواجه بوده‌اند. این موضوع وضعیت‌های بحرانی تر را به وجود آورده است که حمایت فوری و اضطراری مقادیر عظیمی از توان راکتیو را فرا می‌خواند.

کاربرد عمده دیگر کندانسورهای سنکرون در انتقال انرژی ولتاژ بالای dc (HVDC) است، که در آن کندانسورهای سنکرون علاوه بر تامین توان راکتیو مورد نیاز مبدل‌ها، استحکام سیستم را وقتی که ظرفیت اتصال کوتاه سیستم ac پایین است، فراهم می‌نمایند. در این فصل مشخصه‌های اصلی و رفتار کندانسورهای سنکرون مرور می‌شود.



شکل ۱ - روند رشد در ظرفیت (مقدار نامی) کندانسور با سیستم خنک‌کنندگی هیدروژن

۸-۲ جنبه‌های طراحی کندانسور

کندانسور سنکرون اساساً یک ماشین سنکرون است که به آن سرعت داده و با سیستم قدرت سنکرون می‌شود. پس از سنکرون شدن ماشین، جریان تحریک آن کنترل می‌شود تا بر حسب نیاز سیستم قدرت توان راکتیو را تولید و یا جذب نماید. کندانسور سنکرون مطابق آنچه که در فصل ۳ مورد بحث قرار گرفت در طبقه جبران‌کننده‌های موازی اکتیو قرار می‌گیرد.

اکثریت تاسیسات کندانسور سنکرون برای نصب در فضای آزاد طراحی شده‌اند و برای راه‌اندازی، خاموش کردن و نمایش وضعیت کار آن از کنترل‌های اتوماتیک استفاده شده است. از نظر تاریخی

کندانسور سنکرون با سیستم خنک کننده هوا و هیدروژن هر دو به طور وسیع استفاده شده است، البته تقریباً تمامی کندانسورهای بزرگ در امریکا از نوع خنک کننده با هیدروژن است. البته علاوه بر این یک واحد بزرگ با سیستم خنک کننده هوا (۳۴۵ MVA) در حال کار است.

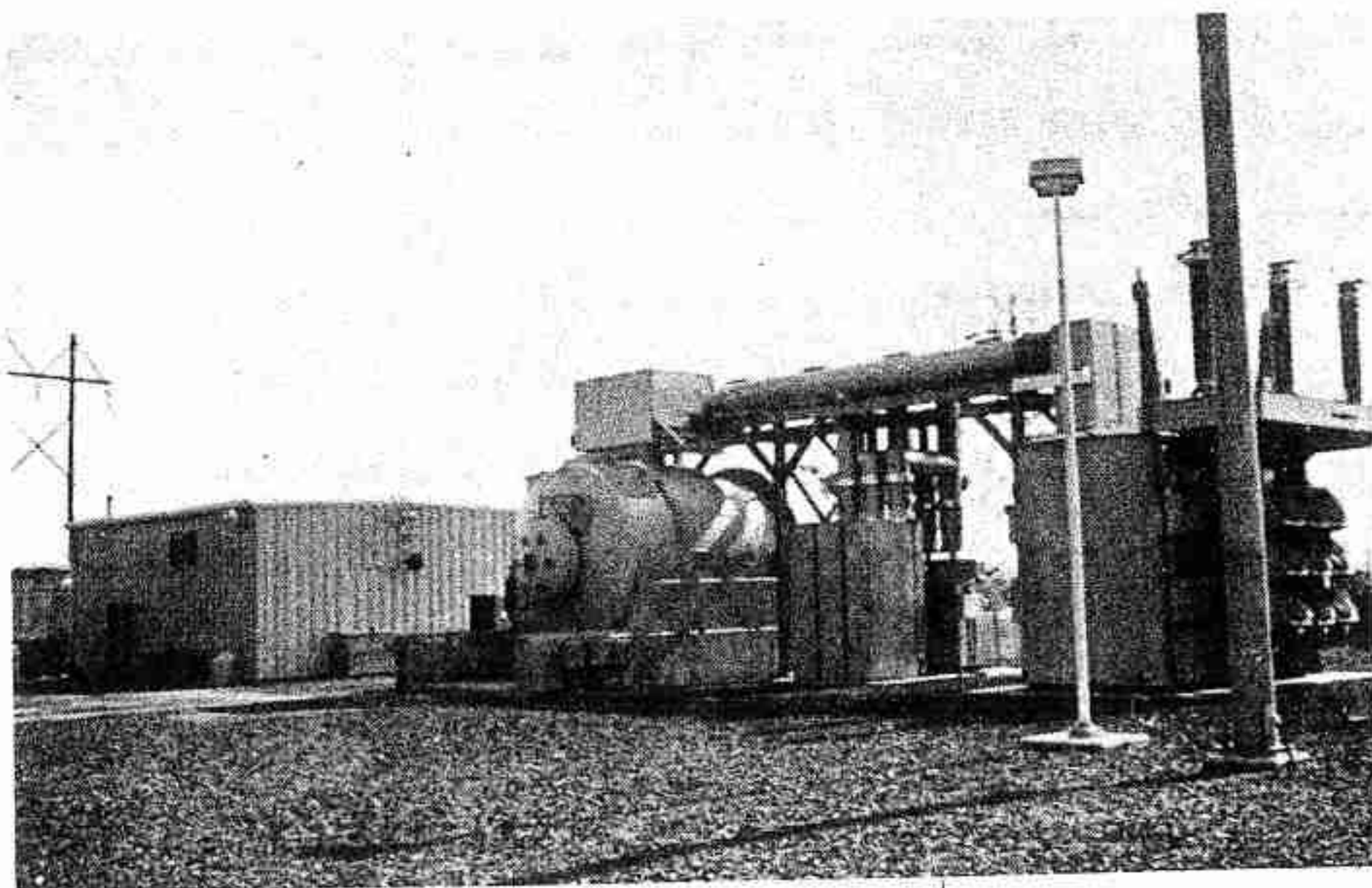
شکل ۲ یک کندانسور سنکرون با خنک کننده هیدروژن ۱۶۷ MVA_r همراه با اجزاء کمکی اصلی را نشان می‌دهد. ساختمان (بنا) مربوط به سیستم کنترل^۱ علاوه بر تجهیزات کنترل اتوماتیک و حفاظت، تجهیزات کنترل تحریک و تجهیزات کنترل موتور را در خود جا داده است.

کندانسور سنکرون در یک محفظه گازی بدون نشتی و آب بندی شده قرار دارد طوری که آن را برای نصب در فضای باز مناسب می‌نماید. تمامی هادی‌های ارتباطی لازم در خارج از محفظه از طریق بوش عایق^۲ مجزا انجام می‌گیرد. حلقه‌های اصطکاکی^۳ مربوط به تحریک و راه‌اندازی موتور در یک محفظه گازی مجزا در داخل محفظه اصلی قرار دارند. طوری که در حالت توقف کندانسور از آن آب بندی شده است. این عمل باعث می‌شود که بتوان جاروبک‌ها را در موقع لزوم - بدون اینکه گاز تمام کندانسور را تخلیه کرد - تعویض نمود.

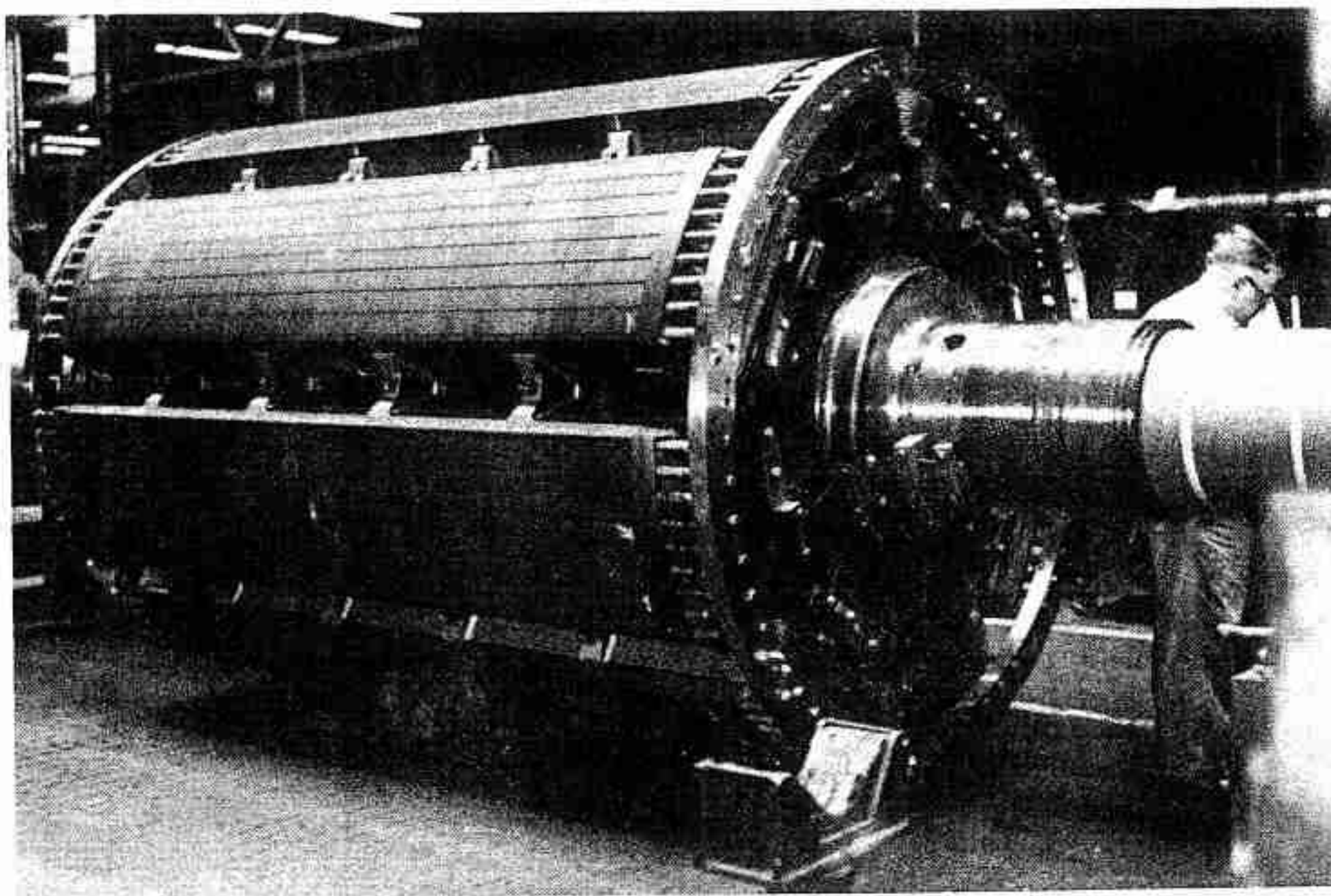
شکل ۳ ساختمان روتور از نوع قطب برجسته که عموماً به کار برده می‌شود، را نشان می‌دهد. میله‌های تضعیف یا میراکننده^۴ علاوه بر میرا کردن نوسانات روتور، در خلال راه‌اندازی موتور - در راه‌اندازی با ولتاژ کاهش یافته - حامل جریان‌های گردشی (سیرکوله) روتور نیز می‌باشند. برای این نوع راه‌اندازی به «تضعیف کننده‌های کامل» با اتصالات بین گروه میله‌های تضعیف کننده مطابق شکل ۳ لازم است.

به موازات افزایش در مقدار نامی و اندازه کندانسور، پیشرفت‌هایی در زمینه طراحی، منجمله سرعت کار بالاتر، فشار هیدروژن بالاتر انجام گرفته است. کندانسورهای بزرگ از نوعی که در شکل ۲ نشان داده شده است به طور نمونه دارای سرعت نامی ۹۰۰ rpm هستند و با فشار هیدروژن ۳۰ psig کار می‌کنند.

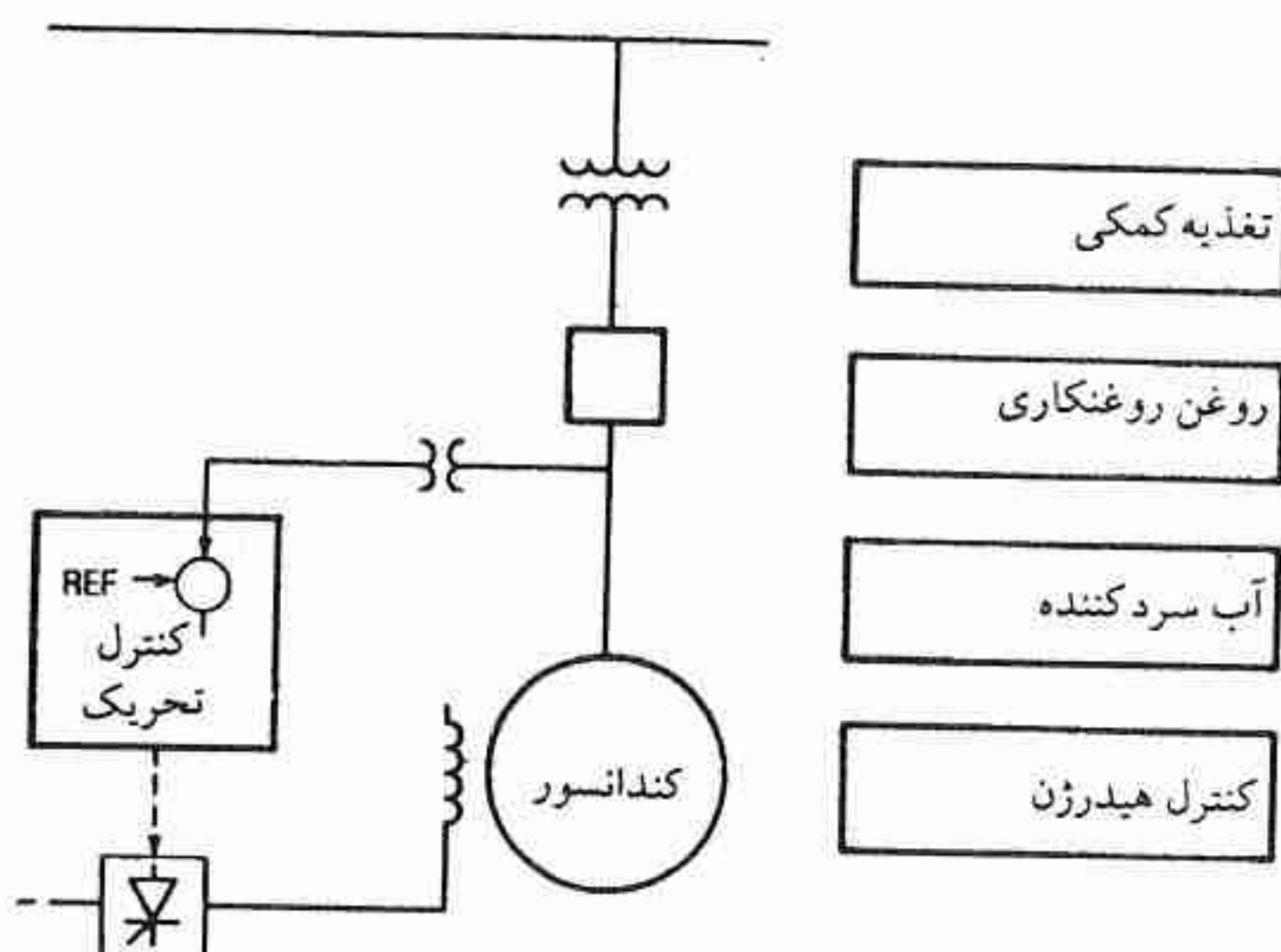
شکل ۴ عناصر اصلی تاسیسات کندانسور را نشان می‌دهد، که در برگیرنده اتصالات سیستم و سیستم‌های کمکی است که بعداً مورد بحث قرار خواهد گرفت. عنصر کلیدی، وسیله کنترل تحریک می‌باشد که تا حدود زیادی رفتار کندانسور را در سیستم قدرت معین می‌کند. این عمل، مشابه سیستم کنترل تحریک اغلب ژنراتور نیروگاه‌ها توسط رگولاتور ولتاژ انجام می‌گیرد. یک اغتشاش بزرگ منجر



شکل ۲ - کندانسور سنکرون با سیستم خنک کننده هیدرژن با مقدار نامی 167 MVA ، 900 rpm



شکل ۳ - روتور کندانسور سنکرون



شکل ۴ - سیستم‌های کمکی اصلی کندانسور

به ولتاژ غیرعادی می‌گردد که کندانسور و کنترل تحریک آن با پاسخ خود آن را تصحیح می‌کنند. همان‌طوری که در شکل نشان داده شده است ولتاژ از محل ترمینال کندانسور و یا از باس سیستم انتقال حس می‌شود. هنگامی که ولتاژ مستقیماً از باس سیستم انتقال حس می‌شود برای عملکرد پایدار لازم است که در مدار کنترل شیب نزولی^۱ وجود داشته باشد. در شکل ۴ این شیب توسط راکتانس ترانسفورماتور افزایشده فراهم می‌گردد و به وسیله کنترل می‌تواند افزایش و یا کاهش یابد.

تلفات تمام بار کندانسور، به انضمام سیستم‌های کمکی آن در حدود ۱٪ مقدار نامی کندانسور است که حدود دو سوم آن تابعی از بار آن است.

۸-۳ مشخصه‌های اصلی الکتریکی

۸-۳-۱ ثابت‌های ماشین

مقادیر نمونه ثابت‌های الکتریکی ماشین در جدول ۱ داده شده است و به منظور مقایسه،

ثابت‌های توربوژنراتور و هیدروژنراتور نیز داده شده است. مقادیر راکتانس‌ها و ثابت‌های زمانی مشابه مقادیری است که برای واحدهای توربوژنراتور ۴ قطبی داده شده است. ثابت اینرسی H کندانسور که مشخصه نسبتاً کم اهمیتی است خیلی کوچکتر است زیرا توربینی به آن متصل نمی‌باشد.

۸-۳-۲ دیاگرام فازوری

دیاگرام فازوری کندانسور خیلی ساده است، زیرا با صرفنظر کردن تلفات آن که خیلی کوچک است، جریان کندانسور بر ولتاژ ترمینال آن در جهت پس‌فاز یا پیش‌فاز عمود است. شکل ۵ دیاگرام فازور کندانسور برای هر دو جهت عبور توان راکتیو را نشان می‌دهد. با افزایش تحریک از شرایط بدون بار (یعنی «فوق تحریک») توان راکتیو را به سیستم تحویل می‌دهد (شکل ۵ الف). همچنین رابطه فازوری مربوطه، مطابق قرارداد معمول برای ژنراتورها، نشان داده شده است. تحویل توان راکتیو در عملکرد فوق تحریک کندانسور، مشابه توان راکتیوی است که به وسیله خازن موازی تولید می‌شود. با کاهش تحریک از شرایط بدون بار (یعنی عملکرد «زیر تحریک») توان راکتیو را از سیستم جذب می‌کند (شکل ۵ ب). جذب توان راکتیو در این حالت مشابه توان راکتیوی است که توسط راکتور موازی جذب می‌گردد.

جدول ۱

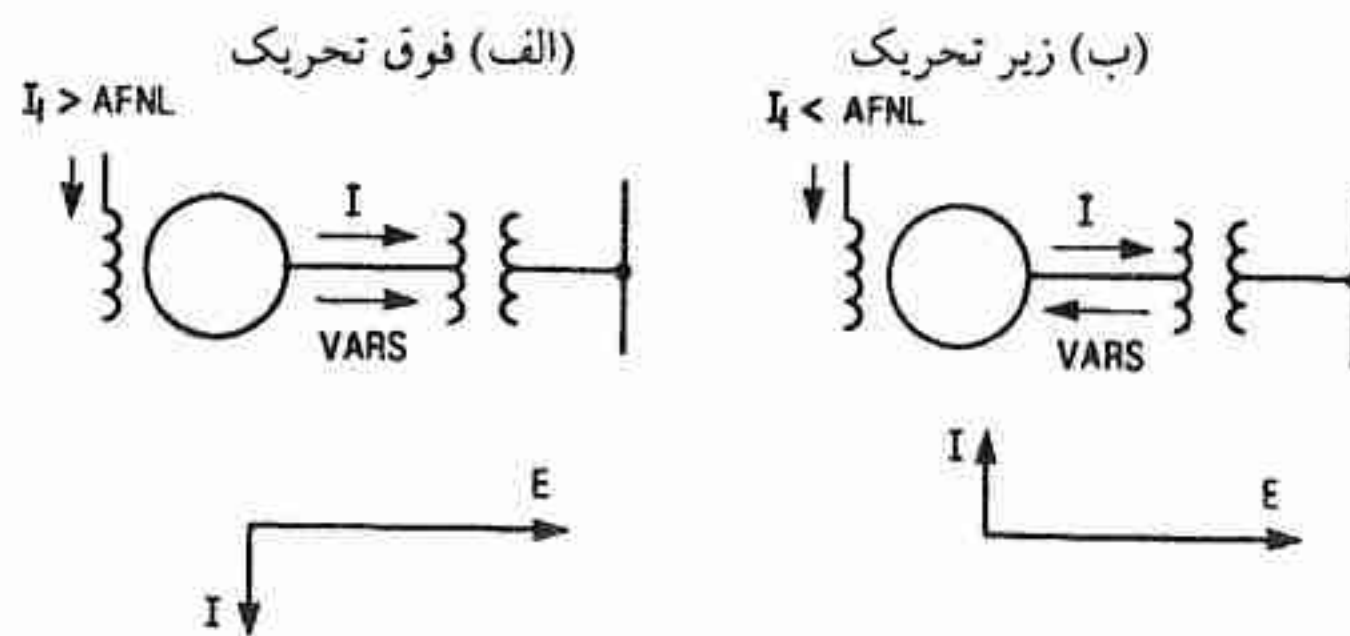
مقادیر نمونه ثابتهای ماشین

ثابتها	توربین - ژنراتور		هیدروژنراتور	کندانسور سنکرون
	2-Pole	4-Pole		
X_d	2.0	2.0	1.0	2.0-2.5 pu
X_d'	0.22	0.33	0.32	0.35-0.45 pu
X_d''	0.16	0.22	0.21	0.25-0.30 pu
T'_{do}	4	9	5-10	9-10 sec
H	2.5	4	3-6	1.2 kW-sec/kVA
X_q	2	2	0.6	1.2-1.6 pu
X_p (راکتانس پوتیه)				0.30-0.40

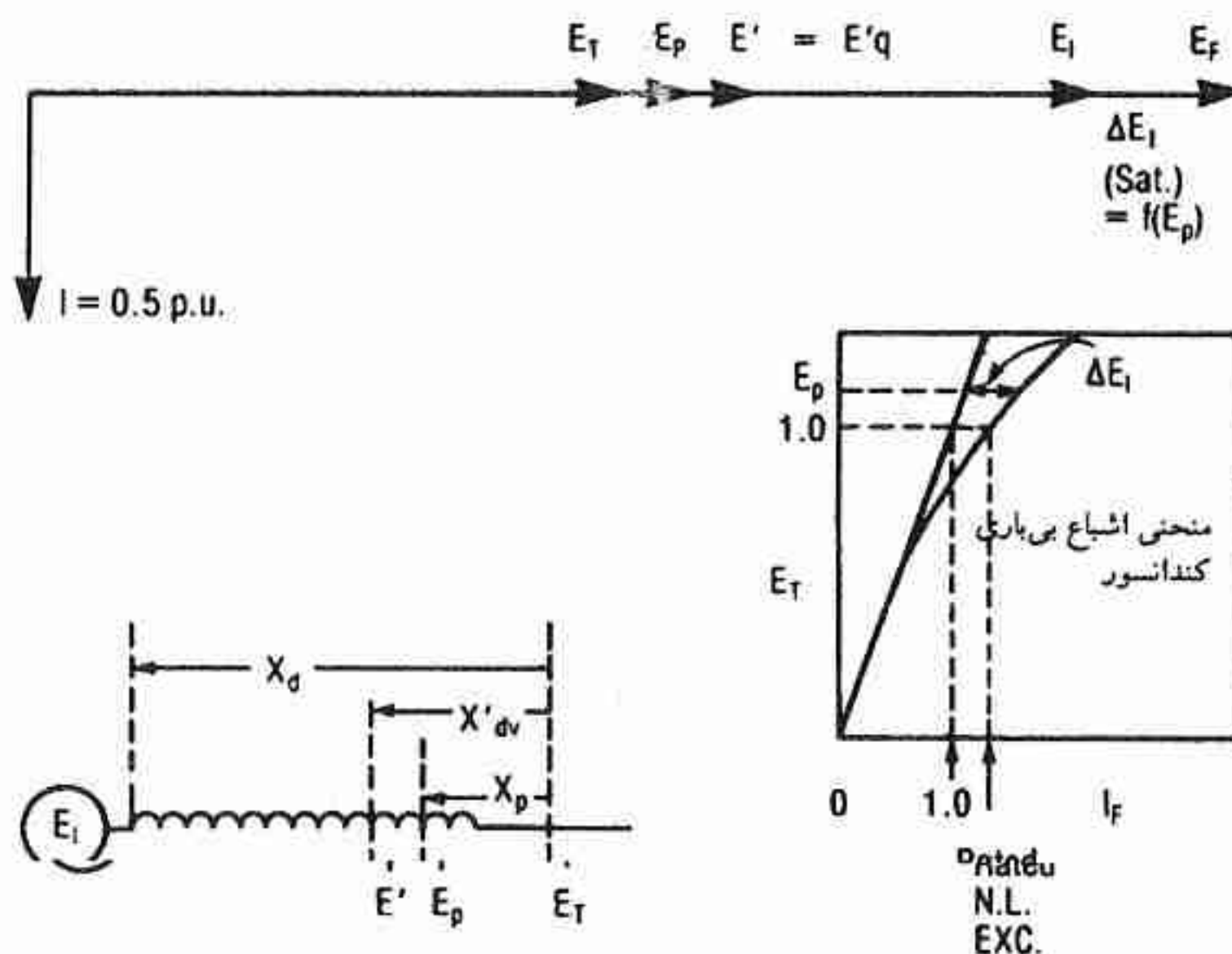
توجه اینکه مقادیر مربوط به راکتانس گذرا و زیر گذرا برای ولتاژ نامی است.

شکل ۶ دیاگرام فازور کاملتری از عملکرد کندانسور در حالت فوق تحریک را نشان می‌دهد. ولتاژ

E_i نمایشگر پریونیت جریان تحریک با صرف‌نظر کردن از اشباع است و E_f جریان تحریک کل است که در شکل نشان داده شده است. از آنجایی که جریان کندانسور فقط راکتیو است منحنی توانایی راکتیو قراردادی ژنراتور را نمی‌توان برای آن به کار برد بلکه از منحنی‌های دیگری نظیر منحنی‌های V برای توصیف عملکرد آن استفاده می‌شود.



شکل ۵ - تعاریف اساسی از تحریک و عبور توان راکتیو ($AFNL$ تحریک بدون بار است)

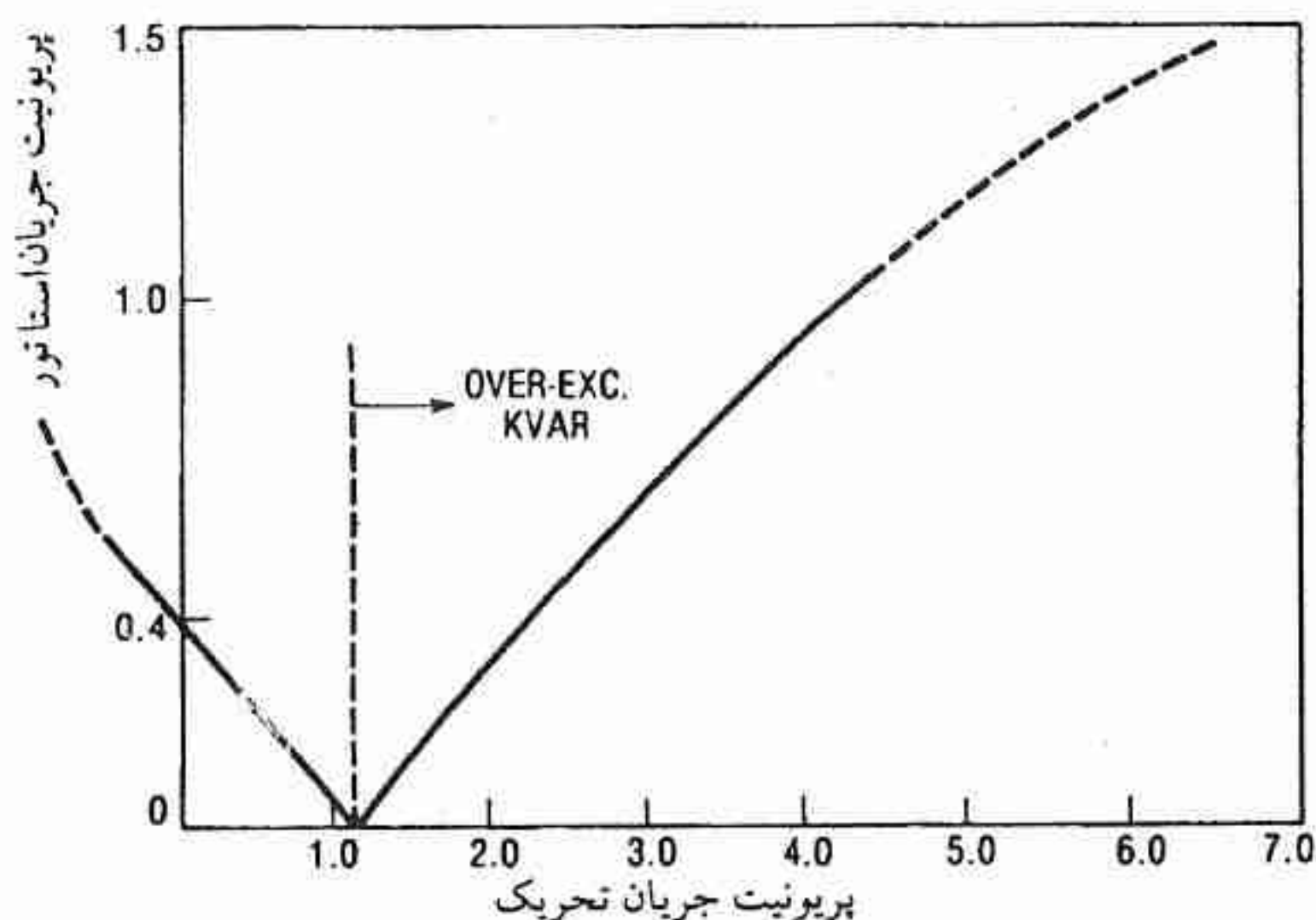


شکل ۶ - دیاگرام فازوری در عملکرد فوق تحریک.

۸-۳-۳ منحنی V

یک کندانسور سنکرون مقدار قابل تنظیم و پیوسته توان راکتیو را در دو ناحیه فوق تحریک و زیر

تحریک فراهم می‌کند. در ناحیه فوق تحریک توانایی «مقدار نامی» و توانایی «اضافه بار کوتاه مدت» وجود دارد. مشخصه‌های کار حالت ماندگار به وسیله منحنی V- مطابق شکل ۷ نشان داده می‌شود. قسمت سمت راست منحنی V- بیانگر عملکرد فوق تحریک، یعنی مشابه بانک خازن موازی است. قسمت سمت چپ منحنی V- بیانگر عملکرد زیر تحریک است که در آن ماشین، مشابه بانک راکتور موازی از سیستم توان راکتیو جذب می‌نماید.



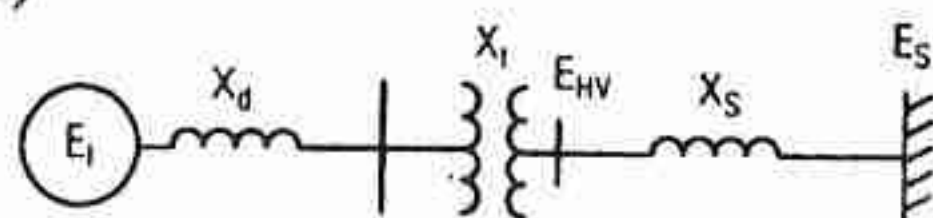
شکل ۷ - منحنی V - کندانسور. مبنای جریان تحریک ۱ پریونیت در شکل ۶ تعریف شده است.

عملکرد عادی ماشین در هر نقطه از منحنی که در قسمت تحتانی جریان $1/0 \text{ pu}$ یا جریان نامی استاتور قرار دارد، امکان‌پذیر است. قسمت خط چین سمت راست بیانگر عملکرد اضافه بار کوتاه مدت است که با افزایش جریان تحریک به دست می‌آید.

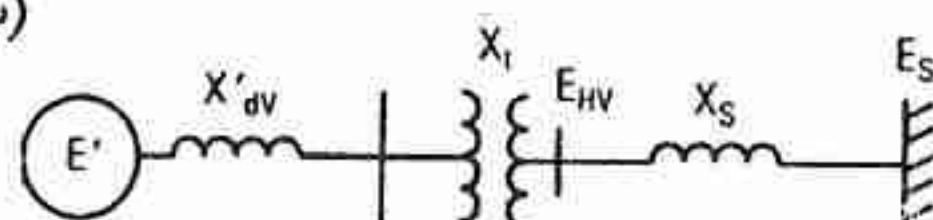
توانایی زیر تحریک کندانسور با عملکرد آن در جریان تحریک کمتر از تحریک بی‌باری به دست می‌آید. همانطوری که در شکل ۷ نشان داده شده است، عملکرد زیر تحریک از نظر تئوری می‌تواند تا جریان تحریک منفی ادامه یابد. عملکرد کندانسور در جریان‌های تحریک منفی (در داخل محدوده مجاز) امکان‌پذیر است، زیرا به واسطه گشتاور مغناطیسی مربوط به ساختمان روتور با قطب برجسته، ماشین از حالت سنکرون خارج نمی‌شود. شرایط حدی که در آن ماشین در عملکرد حالت ماندگار از سنکرون خارج می‌شود، مطابق شکل ۷ در جریان راکتیو زیر تحریک حدود $0/6 \text{ pu}$ که مربوط به E_T/X_q است اتفاق می‌افتد. در تحریک کننده (اکسایتر) از نوع کموتاتوری dc با معکوس

کردن پلاریته می‌توان جریان تحریک منفی را فراهم نمود و اغلب کندانسورهاى نصب شده دارای چنین قابلیت ذاتی هستند. سیستم تحریک استاتیکی سنتی (تایریستور تغذیه شده از ترانسفورماتور) گرچه دارای توانایی معکوس کردن ولتاژ است ولی قادر نیست جریان معکوس را فراهم کند. این نوع سیستم تحریک استاتیکی اجازه می‌دهد که کندانسور تا حداقل ولتاژ تحریک برابر با ۱۰٪ تحریک لازم در بی‌باری کار کند. به طور نمونه، این توانایی عملکرد زیر تحریک همانطوری که در شکل ۷ نشان داده شده است در حدود ۳۵-۴۰٪ مقدار نامی است. یک تحریک کننده استاتیکی با قابلیت جریان منفی را می‌توان با به کار گرفتن پل‌های تایریستوری اضافی و کنترل‌های مربوطه به دست آورد، طوری که توانایی زیر تحریک کندانسور می‌تواند تا حد پایداری^۱ آن افزایش یابد.

(الف)



(ب)



شکل ۸ - مدار معادل ساده شده برای پیش‌بینی رفتار کندانسور (الف) حالت ماندگار (ب) حالت گذرا.

۸-۳-۴ مدار معادل ساده شده

در حالی که منحنی $V-$ به خوبی عملکرد عادی کندانسور را توضیح می‌دهد، برای شرایط عملکرد غیرعادی که در آن در پریودهای زمانی کوتاه ولتاژها غیرعادی هستند، چندان مفید نمی‌باشد. برنامه‌های کامپیوتری پایداری گذرا برای اینگونه مطالعات کاربرد دارند. اما مدار معادل ساده‌ای متشکل از ولتاژ پشت راکتاس ماشین، مطابق شکل ۸، برای درک رفتار ماشین در شرایط اضطراری و بازرسی نتایج کامپیوتری مفید خواهد بود.

به عنوان مثال، وقتی که کندانسور ابتدا مطابق شکل ۷ در نصف خروجی نامی کار می‌کند، وضعیت اضطراری ناگهانی در اثر از دست رفتن خطوط بحرانی یا تولید اتفاق می‌افتد طوری که ولتاژ باس انتقال در محل کندانسور به ۷۰٪ تنزل می‌یابد. با فرض مقادیر کمتر راکتاس در جدول ۱ و مقدار

۱۰٪ راکتانس ترانسفورماتور، پاسخ فوری کندانسور (با صرفنظر کردن چند سیکل اول) منجر به افزایش پله‌ای خروجی جریان راکتیو تا ۱۱۳٪ جریان نامی کندانسور خواهد شد. پاسخ بعدی تابعی از عمل سیستم تحریک است که در بخش بعدی بحث شده است.

برای اغتشاش ولتاژ مشابه، در جریان خروجی خازن‌های موازی تنزل شدیدی ایجاد می‌شود. با در نظر گرفتن موردی مشابه و با ظرفیت نامی یکسان از خازن‌های سوئیچ شده، جریان راکتیو فقط ۸۰٪ مقدار نامی خواهد بود. این نشان می‌دهد که در مقایسه وسایل تامین کننده توان راکتیو اضطراری، در نظر گرفتن مقادیر نامی به دست آمده از مطالعه سیستم - که نشان دهنده بهبود سیستم است - به جای مقادیر نامی ساده آنها قابل اهمیت است.

۸-۴ عملکرد کندانسور

در سال‌های اخیر موارد استعمال اصلی کندانسورهای سنکرون برای مقاصد زیر بوده است:

۱- کنترل ولتاژ سیستم قدرت

(a) کنترل ولتاژ عادی

(b) کنترل ولتاژ اضطراری

۲- کاربردهای HVDC

۸-۴-۱ کنترل ولتاژ سیستم قدرت

عملکرد «عادی» سیستم قدرت به وسیله تغییر پیوسته در میزان بار خط انتقال - بین پریودهای بار کم و بار پیک که در نتیجه تغییر در تقاضا و تغییرات شبکه ناشی از خروج خط برای تعمیرات و غیره ایجاد می‌شود - مشخص می‌گردد. چنین تغییرات باری به تغییرات پیوسته مشابهی در توان راکتیو مورد نیاز سراسر سیستم انتقال می‌یابد. در نواحی توزیع و زیرانتقال تغییرات توان راکتیو مورد نیاز معمولاً توسط بانک‌های خازنی همراه با تپ چنجر ترانسفورماتور و رگولاتورهای ولتاژ واقع بر خطوط توزیع، برآورده می‌شود. در شبکه انتقال تغییرات وسیعی از توان راکتیو مورد نیاز بین دو حالت بار کم (که خطوط مشابه منابع توان راکتیو رفتار می‌کنند) و بار زیاد (که خطوط نقش مصرف کننده توان راکتیو دارند) وجود دارد. نتیجه کلی می‌تواند به این صورت باشد که نتوان سطوح ولتاژها را در مقدار صحیح نگاهداشت یا در حد کفایت تبادل توان راکتیو را با موسسات مجاور انجام داد.

بانک‌های خازنی موازی سوئیچ شونده و بانک‌های راکتور موازی معمولاً برای کنترل ولتاژ انتقال به کار برده می‌شوند و توانایی آنها در انجام چنین نقشی بستگی به اندازه خازن یا راکتوری که در هر مرحله سوئیچ می‌شود، دارد.

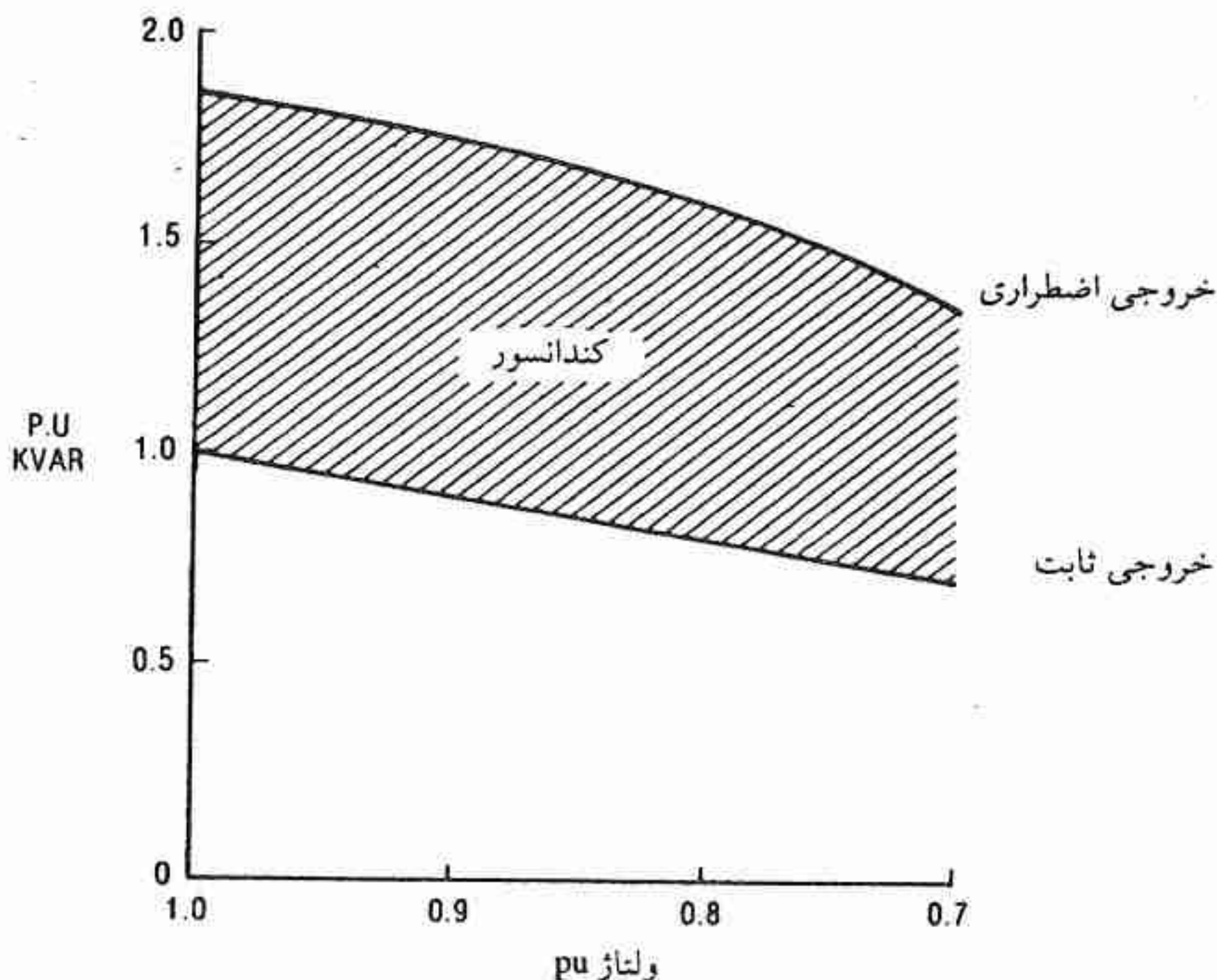
در انجام این نقش، کندانسورهای سنکرون دارای مزایای تکنیکی زیر هستند:

۱- توان راکتیو پیوسته قابل تنظیم را فراهم می‌کند طوری که کنترل ولتاژ سیستم انتقال را میسر می‌نماید.

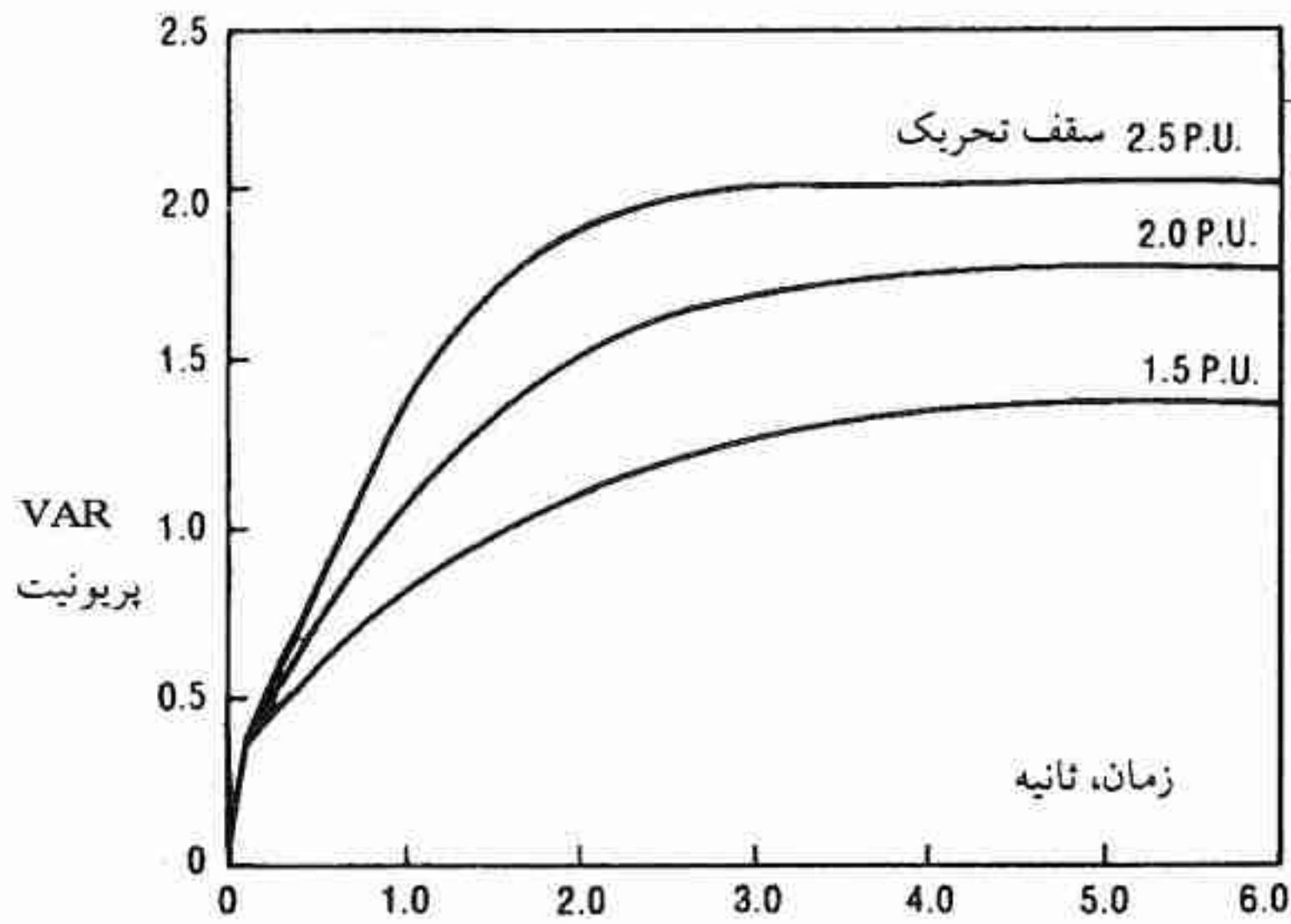
۲- جهت برآورده کردن نیازمندی‌های (۱) دارای توانایی تامین توان راکتیو اندوکتیو و کاپاسیتیو می‌باشد.

۸-۴-۲ تامین توان راکتیو اضطراری

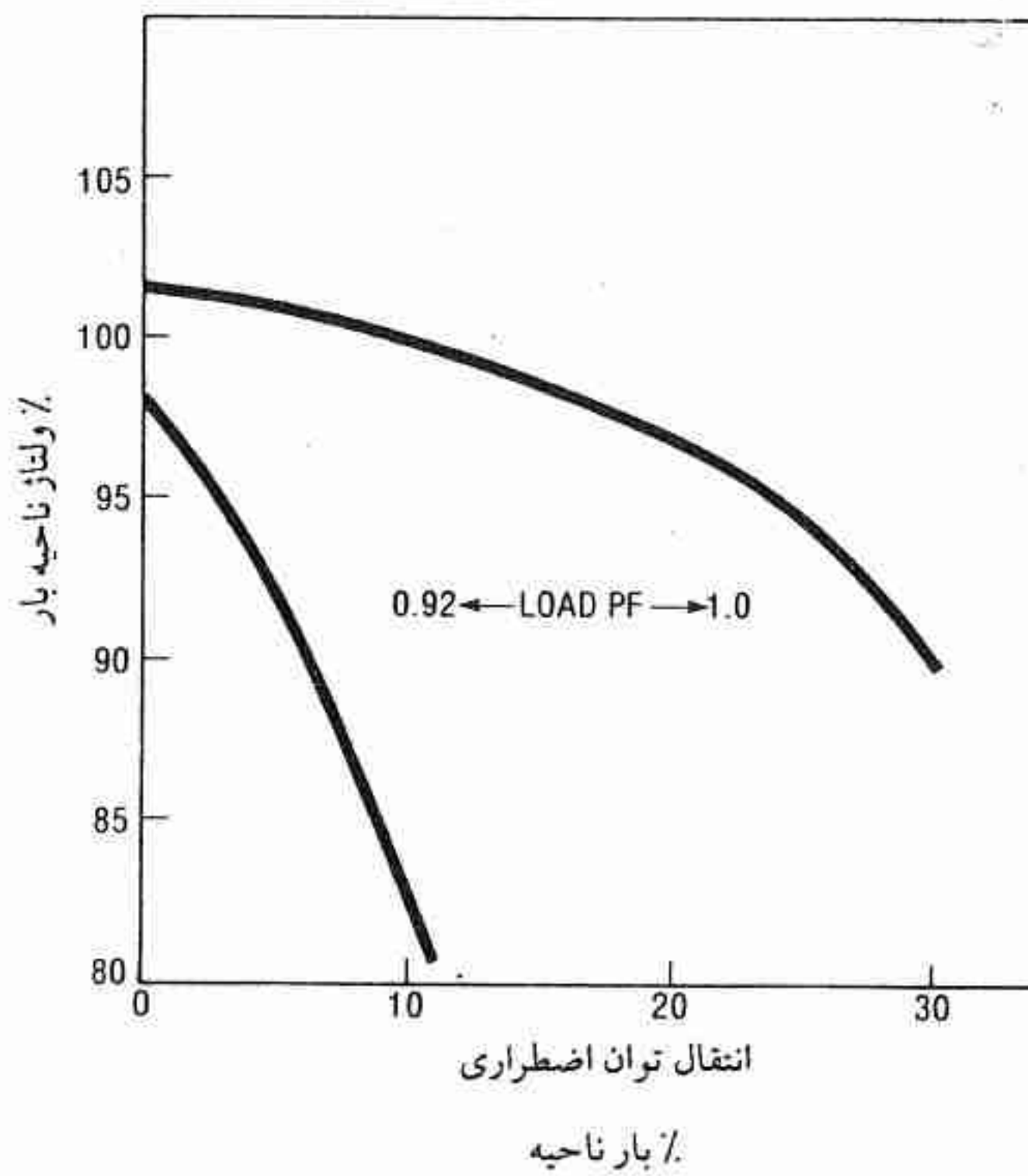
انگیزه اصلی اغلب موسسات برق در به کار گرفتن کندانسور سنکرون، کسب توانایی در کنترل ولتاژ اضطراری در خلال اغتشاشات بزرگ سیستم است. چنین نیازی برای اضطرارهایی نظیر وقوع



شکل ۹ - حمایت توان راکتیو در شرایط اضطراری.



شکل ۱۰ - رفتار گذرای کندانسور. سقف تحریک بر حسب پریونیت ولتاژ نامی تمام بار داده شده است.



شکل ۱۱ - انتقال انرژی به ناحیه بار

اتصال کوتاه و از دست دادن بخش وسیعی از تولید یا انتقال، پیش می‌آید. در بدترین شرایط، منجر به گسیستن سیستم (چند قسمت شدن) یا تشکیل جزیره^۱ می‌گردد.

اختلالات سیستم معمولاً ابتدا به وسیله ایجاد ولتاژهای غیرعادی مشخص می‌شوند. تغییرات ولتاژ ممکن است در هر دو جهت رخ دهد، به ویژه وقتی ناحیه‌ای به جزیره تبدیل می‌گردد. کندانسورهای سنکرون به کمک رگولاتور ولتاژ به طور اتوماتیک خروجی‌شان را در جهتی تغییر می‌دهند تا تغییرات ولتاژ را کاهش دهند. شکل ۹ حمایت توان راکتیو اضطراری کوتاه مدت را، در موقع کاهش ولتاژ در یکی از تاسیسات نشان می‌دهد. همانطوری که مشاهده می‌شود، کندانسورها اضافه بر مقادیر نامی‌شان دارای توانایی کوتاه مدت خوبی هستند. کندانسورها به طور نمونه دارای ظرفیت نامی کوتاه مدت به میزان ۱۵۰٪ جریان نامی در ۱ دقیقه می‌باشند. البته در عملکرد واقعی، خروجی کندانسور به جای اینکه تابعی از مقادیر نامی نسبت داده شده به آنها باشد، تابعی از ولتاژ سیستم و سقف تحریک موجود می‌باشد. در شکل ۱۰ اثر سقف تحریک بر روی پاسخ کندانسور در برابر کاهش ولتاژ سیستم نشان داده شده است. در بدترین شرایط سیستم، خروجی کندانسور به طور اتوماتیک در حداکثر مقدار خواهد بود و بنابراین حفاظت سیم‌پیچی استاتور و سیم‌پیچی روتور در مقابل اضافه بار در یک رنج وسیعی از شرایط سیستم حائز اهمیت است. کاهش جریان میدان به مقدار نامی آن تضمین‌کننده حفاظت سیم‌پیچی استاتور - که ممکن است هنوز به طور قابل ملاحظه‌ای در اضافه بار باشد - نمی‌باشد.

پریود زمانی که در خلال آن توانایی اضافه بار کندانسور در خلال شرایط اضطراری سیستم موجود است، برای بسته شدن مجدد (بازبست)^۲ سیستم انتقال و عملکرد کنترل‌های محرک اولیه کافی است. به عنوان مثال، توربین‌های گازی و تعدادی واحدهای آبی که در وضعیت رزرو چرخشی^۳ قرار دارند می‌توانند تمام ظرفیت خود را در زمان کمتر از یک دقیقه بارگیری نمایند. بسته شدن مجدد اتوماتیک (بازبست اتوماتیک)^۴ معمولاً در فاصله ۲۰-۱۰ ثانیه شروع می‌شود.

اهمیت فراهم کردن حمایت توان راکتیو در منطقه بارو در انتهای سیستم انتقال در شکل ۱۱ نشان داده شده است، که از مرجع ۴ اخذ گردیده است. این شکل اهمیت حمایت توان راکتیو در انتهای خط - که منجر به بهبود توانایی شبکه انتقال در انتقال توان به ناحیه‌ای که کمبود تولید دارد، می‌گردد - را نشان می‌دهد.

1- Islanding

2- Reclosing

3- Spinning Reserve

4- Automatic Reclosing

۸-۴-۳ تقلیل نوسانات گذرا

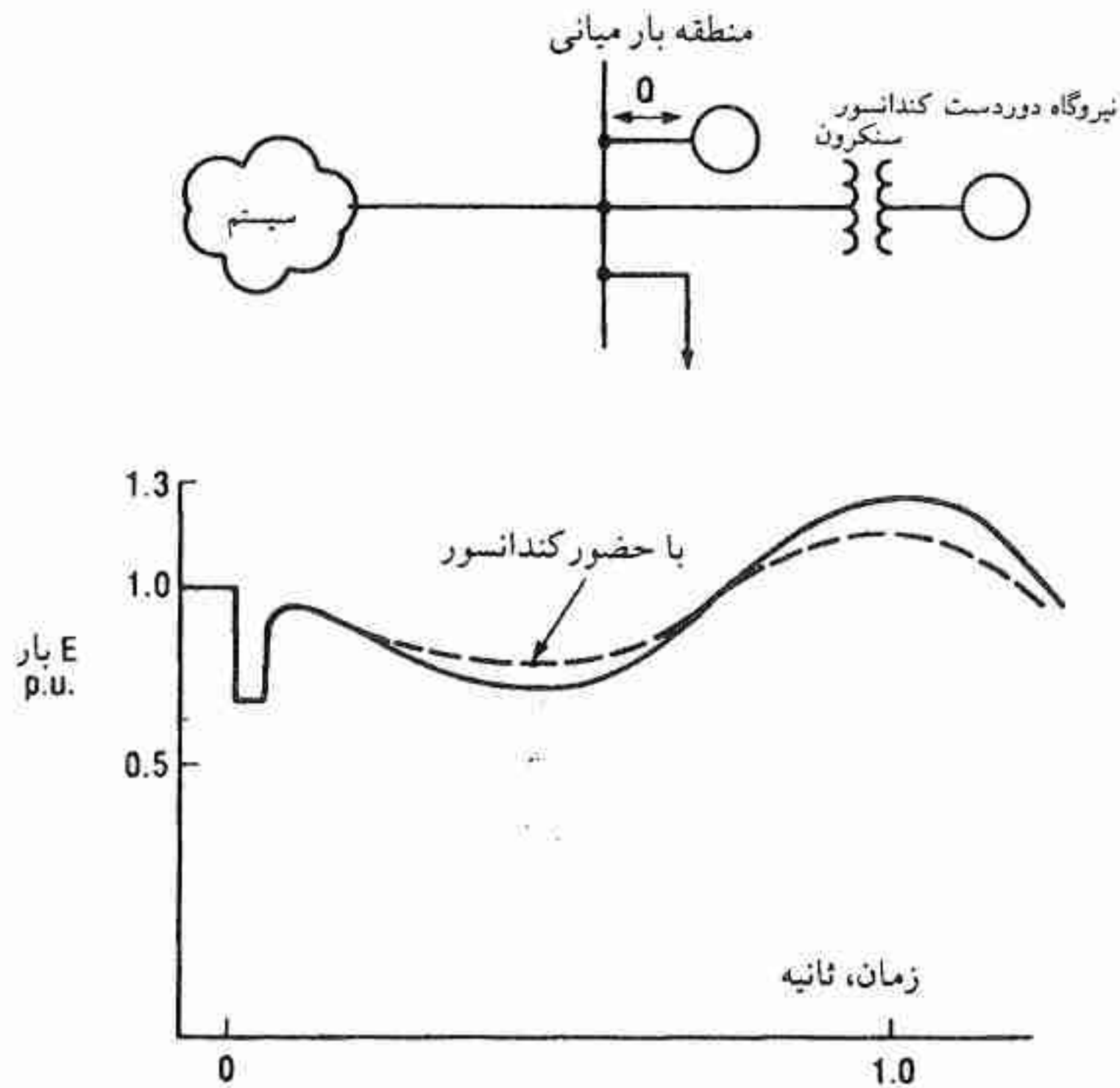
کاربرد جبران راکتیو موازی در پست‌های سوئیچینگ میانی یکی از روش‌های بهبود پایداری گذرای تولید دور دست است (به فصول ۲ و ۳ و مرجع ۵ مراجعه شود). در این موارد کندانسورهای سنکرون و جبران‌کننده‌های استاتیک قابل کنترل می‌توانند در بهبود پایداری سهیم باشند. قطع نظر از شرایط پایداری موضوع ولتاژهای غیرعادی در نواحی بار میانی همراه با نوسانات گذرا خود مساله‌ای دیگر است. وضعیت نمایش داده شده در شکل ۱۲، کاربرد یک کندانسور سنکرون برای کاهش دادن نوسانات پس از اتصال کوتاه، را نشان می‌دهد. کندانسور سنکرون دارای ثابت زمانی میدان بزرگی است، از این رو برای اینکه بتواند در بهبود نوسانات ولتاژ گذرا موثر باشد، بایستی سیستم تحریک با کنترل کمکی که سیگنال متناسب با میزان تغییر ولتاژ را فراهم می‌کند، مجهز گردد.

این تابع، تاخیر فاز ذاتی کندانسور را حذف کرده طوری که خروجی راکتیو هم‌فاز با نیازمندی‌های گذرا می‌گردد. شکل ۱۳ پایدارکننده‌ای را نشان می‌دهد که به نمایش کامپیوتری سیستم تحریک افزوده شده است. شکل ۱۴ تاثیر کنترل کمکی را در بهبود رفتار کندانسور - در کاهش نوسانات ولتاژ - نشان می‌دهد.

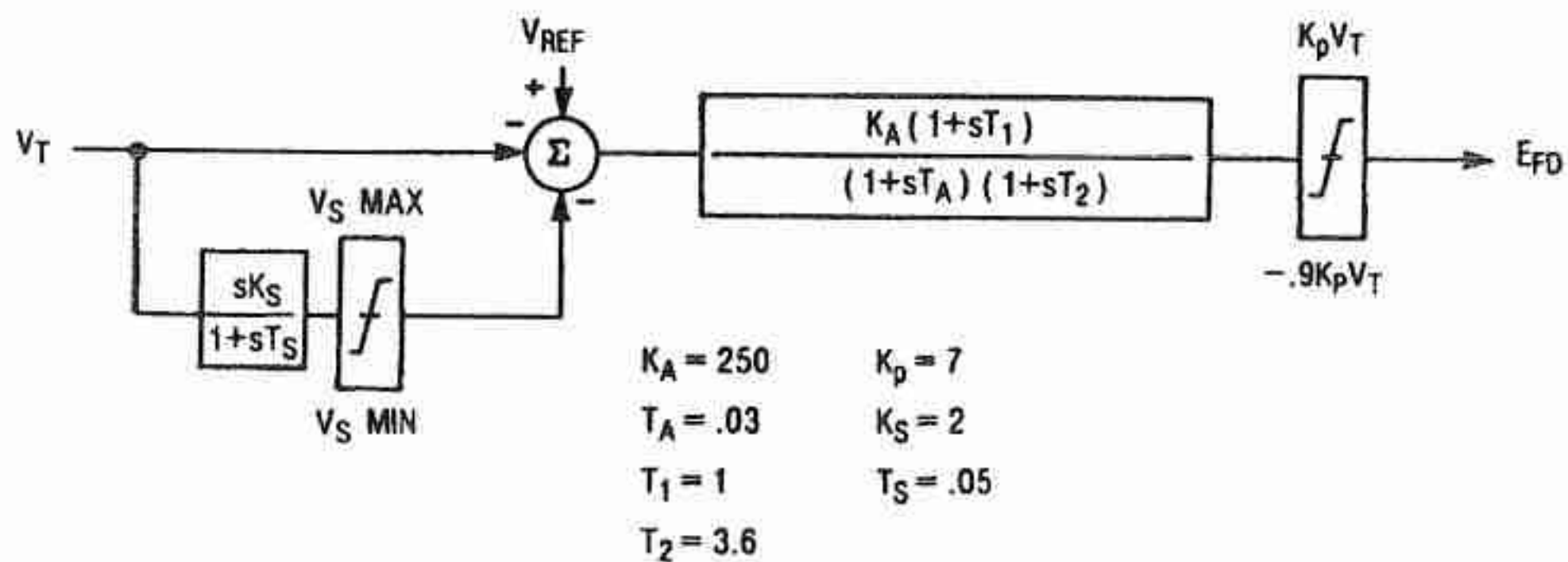
لزوم اعمال کنترل کمکی به رگولاتور ولتاژ - به منظور بدست آوردن حداکثر بهره از کندانسور در خلال نوسانات گذرا - به وسیله مطالعات پایداری یک سیستم بهم پیوسته به نمایش گذاشته می‌شود. نمونه‌ای از نتایج شبیه‌سازی در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود. سیستم مورد بهره‌برداری به وسیله واحدهای تولیدی بزرگ که از ناحیه بار دور هستند مشخص می‌شود. با اشغال محلی در بین ژنراتورها - که با فاصله زیادی از یکدیگر قرار دارند - در خلال نوسانات گذرا، نواحی بار در معرض تغییرات وسیع ولتاژ قرار می‌گیرند. به منظور کنترل کردن ولتاژ و کمک کردن به پایداری گذرا در خلال اغتشاشات از یک کندانسور سنکرون $MVAR$ ۱۴۰ استفاده شده است. مورد به خصوص نشان داده شده مربوط به اتصال کوتاه سه فاز ۳/۵ سیکل واقع بر مدار EHV است که منجر به ناپایداری گذرای سیستم شده است. علی‌رغم به کار گرفتن کندانسور سنکرون با سیستم تحریک استاتیک با سقف تحریک بالا ملاحظه می‌شود که سیستم در غیاب کنترل کمکی ناپایدار است. یکی از دلایل ناپایداری تاخیر موجود در سیستم کنترل رگولاتور ولتاژ است. شکل ۱۵ پ تقدم فاز و افزایش $MVAR$ خروجی که به وسیله کنترل کمکی فراهم شده است را نشان می‌دهد که منجر به حفظ پایداری سیستم

گردیده است.

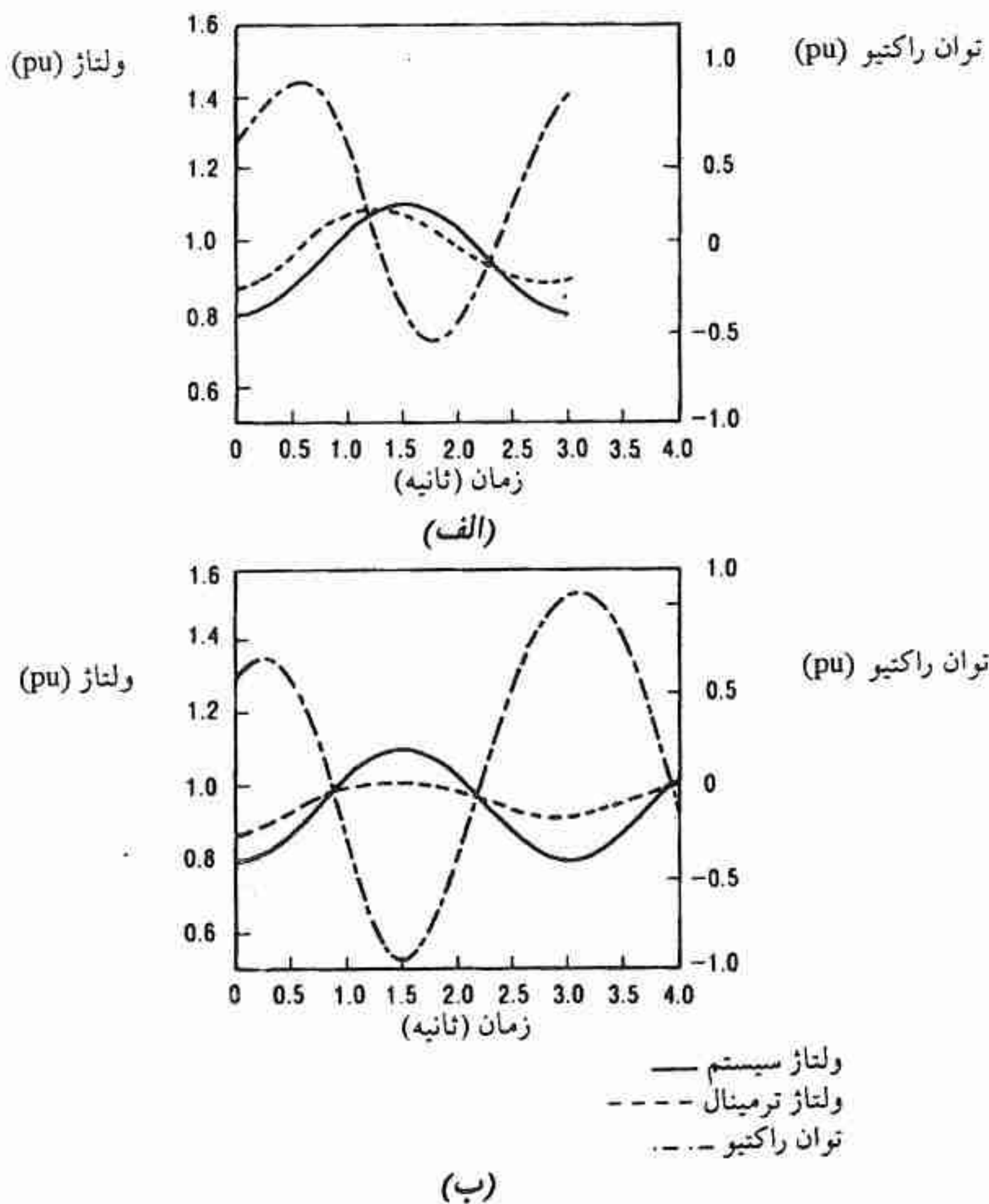
تاکید بر نکته‌ای که قبلاً در ارتباط با توانایی‌های ذاتی ولتاژ - کم کندانسور بیان شد، قابل توجه است که در این مثال عملی علی‌رغم کاهش ولتاژ در محل قرار گرفتن کندانسور (تا حدود ۸۰٪)، MVar خروجی به مقدار قابل ملاحظه‌ای بیشتر از مقدار نامی است.



شکل ۱۲ - نوسانات ولتاژ در ناحیه بار که پس از وقوع اغتشاش ایجاد می‌گردد.



شکل ۱۳ - نمایش کامپیوتری سیستم تحریک

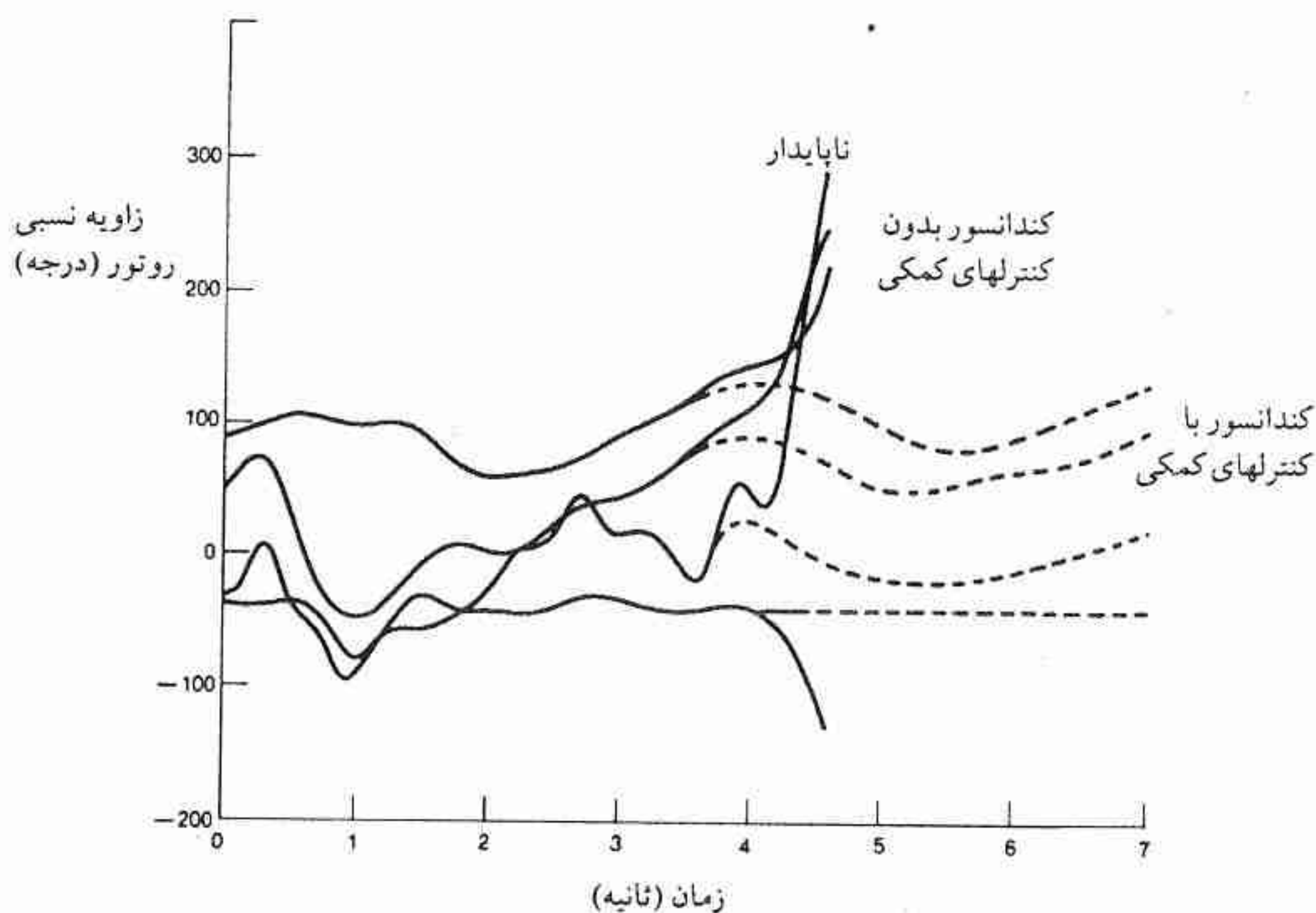


شکل ۱۴ - رفتار کندانسور سنکرون در خلال نوسانات ولتاژ سیستم. (الف) بدون کنترل کمکی (ب) با کنترل کمکی.

۸-۴-۴ کاربردهای HVDC

شکل ۱۶ کاربرد کندانسورهای سنکرون را در انتهای خط HVDC نشان می‌دهد. در این کاربرد کندانسور نیازهای متعددی را برآورده می‌نماید:

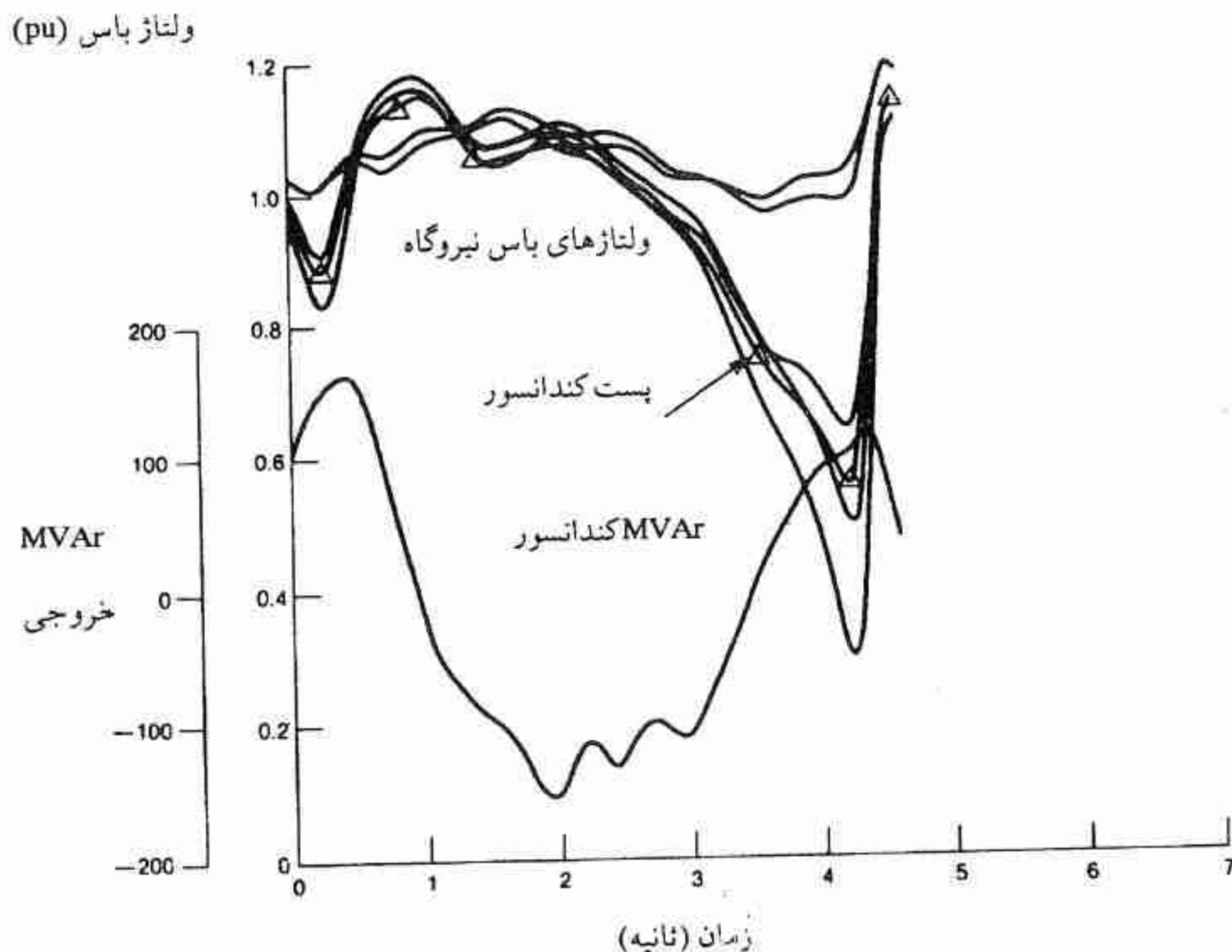
- ۱- کندانسور بخشی از نیازمندی‌های توان راکتیو مبدل را برآورده می‌نماید.
- ۲- کندانسور اجازه می‌دهد که کنترل مبدل dc، ولتاژ ac را - در صورت پایین بودن ظرفیت اتصال کوتاه سیستم انتهای خط - در حد قابل قبول کنترل نماید.
- هنگامی که سیستم انتهای خط نیازمندی‌های اتصال کوتاه را برآورده نمی‌کند، کندانسورهای



(الف) زوایای روتور ژنراتور

شکل ۱۵ - بهبود شرایط گذرای سیستم با استفاده از کندانسور سنکرون مجهز به رگولاتور دارای کنترل‌های کمکی.

سنکرون با ظرفیت اتصال کوتاه‌شان - علاوه بر تامین بخشی از توان راکتیو مورد نیاز مبدل - این نیاز را نیز تامین می‌نمایند. از منابع توان راکتیو موجود، کندانسور دارای توانایی منحصر بفرد در فراهم کردن پایداری ولتاژ کوتاه مدت در رنج زیرگذرا است. یکی از شرایط مورد نیاز، مسدود کردن ناگهانی خط dc به منظور رفع اتصال کوتاه است که منجر به آزاد شدن ناگهانی بار راکتیو مبدل و در نتیجه افزایش لحظه‌ای ولتاژهای سیستم ac می‌گردد. این ملاحظات ظرفیت مورد نیاز کندانسور را برای عملکرد قابل قبول تعیین می‌کند و نیازمندی‌های توان راکتیو در عملکرد نرمال و پس از حالت گذرا با مقرون به صرفه‌ترین شیوه تامین می‌شود. توان راکتیو ثابت از بانک‌های خازنی مربوط به بانک‌های فیلتر تامین می‌شود. توان راکتیو قابل کنترل معمولاً توسط جبران‌کننده قابل کنترل فراهم می‌شود. در سیستم ac با سطح اتصال کوتاه زیاد یا سیستم قوی تمام توان راکتیو متغیر مورد لزوم به وسیله سیستم یا از خازن‌های موازی سوئیچ شونده تامین می‌گردد.



ادامه شکل ۱۵ (ب) رفتار سیستم با کندانسور فاقد کنترل‌های کمکی.

۸-۵ روش‌های راه‌اندازی

روش‌های عملی راه‌اندازی کندانسورهای بزرگ شامل راه‌اندازی با ولتاژ کاهش یافته^۱، راه‌اندازی با موتور^۲، و راه‌اندازی استاتیکی^۳ می‌باشد. معمولاً در راه‌اندازی کندانسورهای بزرگ، به علت مقدار فرورفتگی‌های ولتاژ^۴ سیستم و همچنین شدت کار کندانسور^۵ ولتاژ کامل به آنها اعمال نمی‌شود. معمولاً راه‌اندازی به ندرت انجام می‌گیرد، واحدها فقط در صورت نیاز به تعمیرات از کار انداخته می‌شوند. از این رو معمولاً زمان راه‌اندازی بحرانی نبوده و زمان ۲۰-۱۵ دقیقه قابل قبول است.

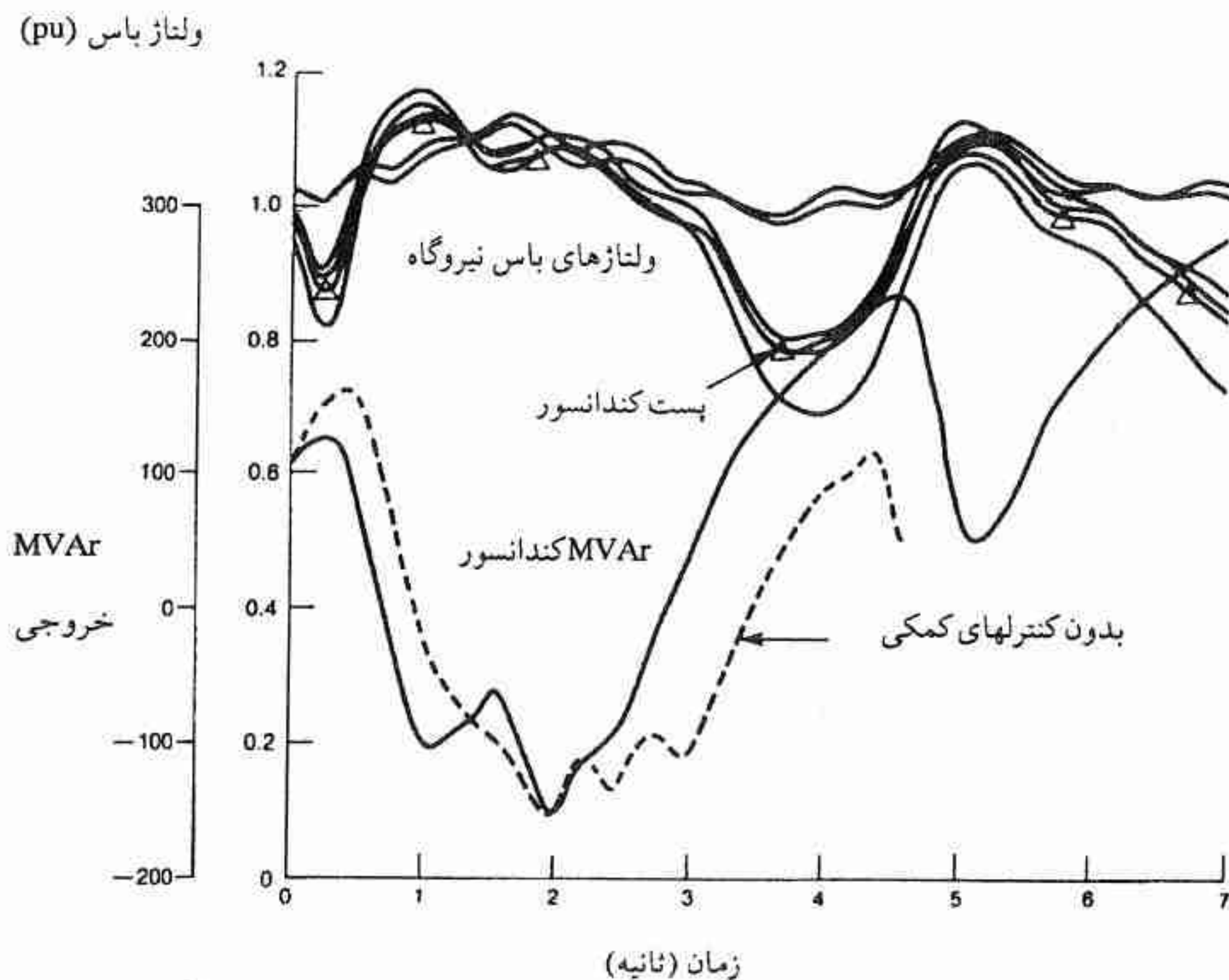
۸-۵-۱ راه‌اندازی با موتور

در این روش راه‌اندازی از یک موتور با روتور سیم‌پیچی شده که تعداد قطب آن یک زوج کمتر از

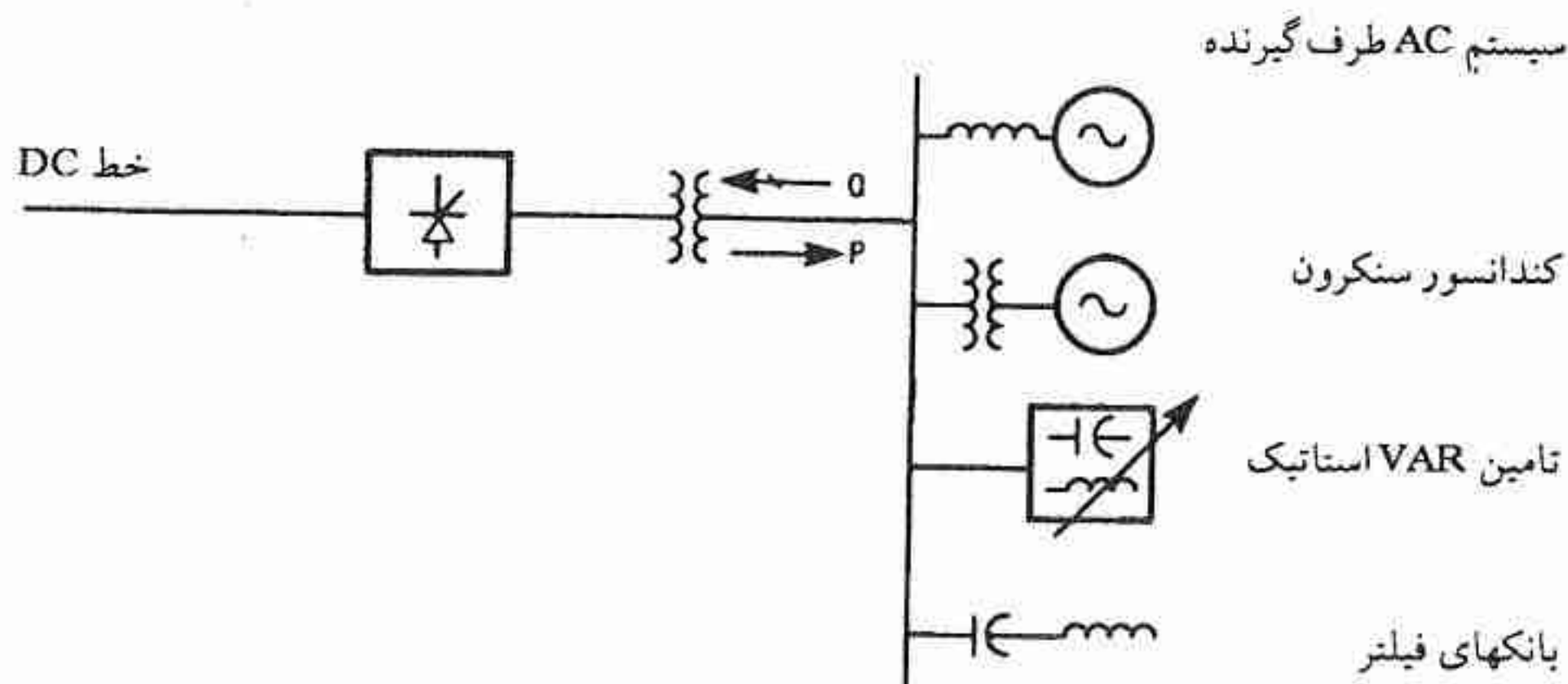
1- Reduced Voltage Starting
4- Voltage Dips

2- Starting Motor
5- Severity Of Condenser Duty

3- Static Starting



ادامه شکل ۱۵ (پ) رفتار سیستم با کندانسور دارای کنترل‌های کمکی.



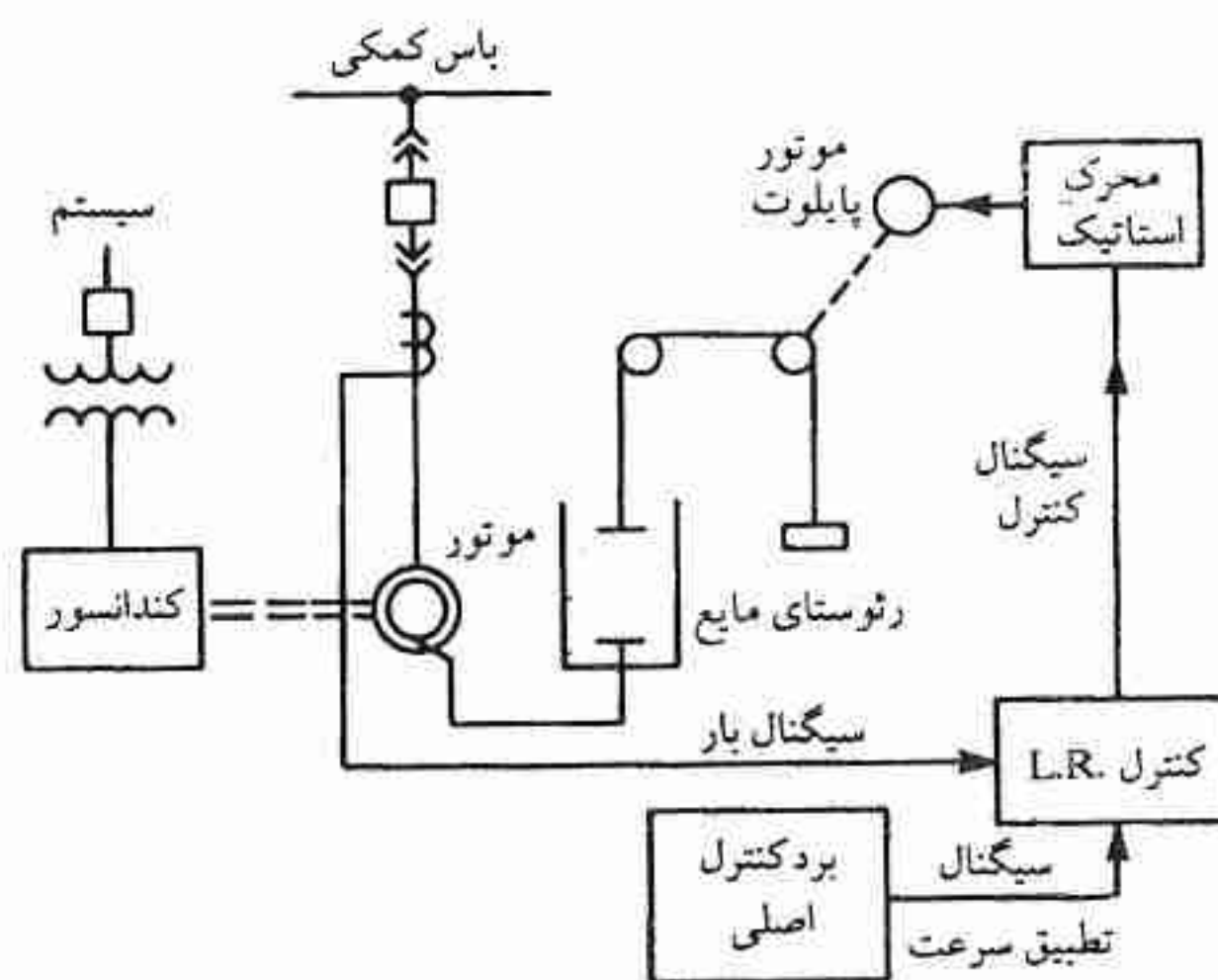
شکل ۱۶ - کاربرد کندانسور سنکرون در HVDC.

کندانسور اصلی است، استفاده گردیده و به کندانسور شتاب داده و پس از رساندن به سرعت نامی آن را با خط سنکرون می‌نماید. این روش دارای این امتیازات است که در خلال راه‌اندازی علاوه بر حذف تنش وارده بر سیم‌پیچی استاتور یا سیم‌پیچی تضعیف (میرایی)، هرگونه فرورفتگی ولتاژ نیز از میان

می‌رود. همچنین تجربه قابل ملاحظه‌ای در رابطه با این روش راه‌اندازی از گذشته وجود دارد که به طور وسیع برای راه‌اندازی کندانسورهای سنکرون و پمپ‌های آب استفاده گردیده است. مقدار نامی موتور راه‌انداز در حدود ۵/۰٪ مقدار نامی کندانسور به کار رفته است.

کنترل گشتاور موتور در خلال راه‌اندازی به وسیله رئوستای مایع قابل کنترل مطابق شماتیک (شکل نمایشی) شکل ۱۷ انجام می‌گیرد. در خلال پریود شتاب سیستم کنترل الکترونها را در وضعیتی قرار می‌دهد که گشتاور ثابت بماند. در سرعت تقریبی ۹۸٪، سیستم کنترل به پالس خروجی رله‌های تطبیق سرعت پاسخ داده تا لغزش را به مقدار خیلی کوچکی رسانده و اجازه دهد که رله اتوماتیک سنکرون کننده کلید قدرت را ببندد.

در جایی که کندانسور دارای تحریک کننده (اکسایتر) dc اتصال - مستقیم است، می‌توان از آن به عنوان موتور محرک برای سرعت دادن کندانسور و سنکرون کردن آن به خط استفاده کرد. دو کندانسور ۲۵۰ MVAR که اخیراً نصب شده‌اند دارای راه‌اندازی تحریک dc هستند. در این حالت در خلال راه‌اندازی کنترل گشتاور از طریق ولتاژ dc قابل کنترل که به تحریک کننده / موتور اعمال می‌شود، انجام می‌گیرد.



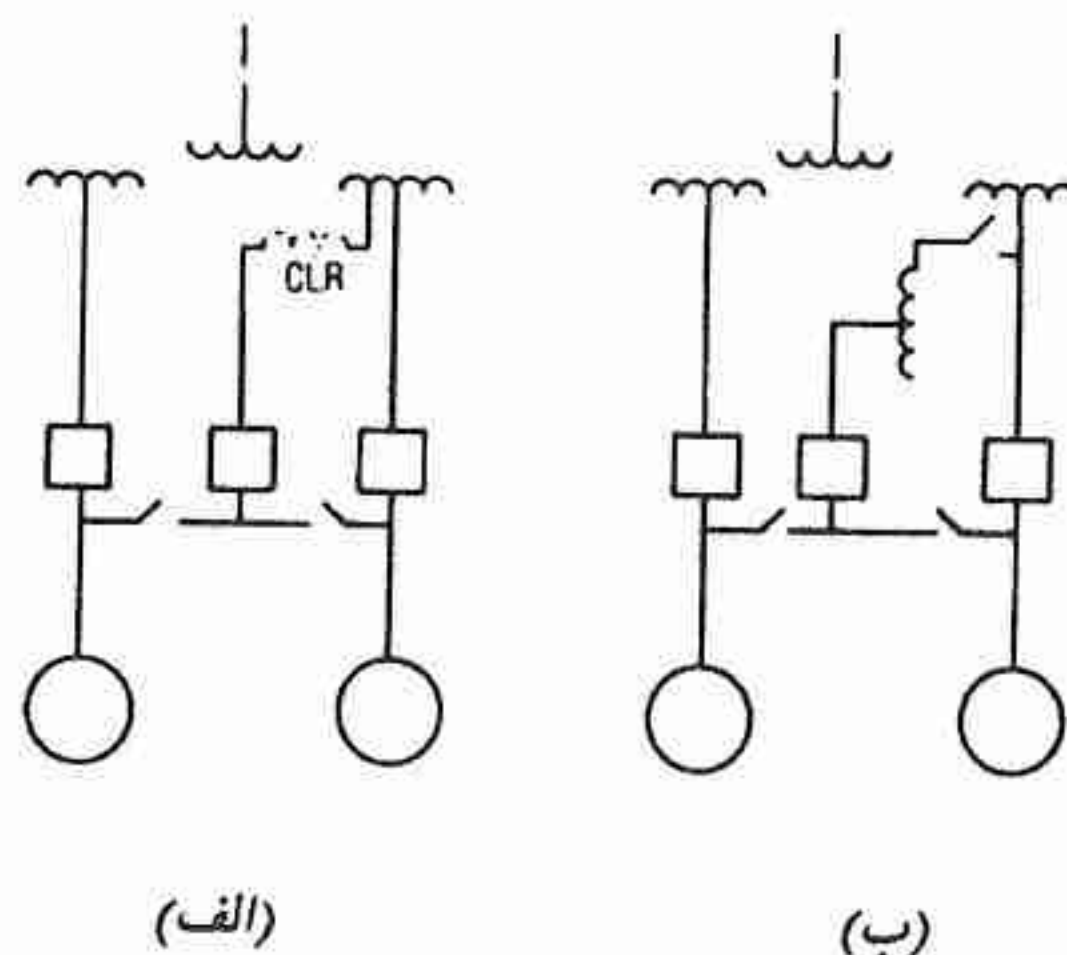
شکل ۱۷ - کنترل موتور راه‌انداز

۸-۵-۲ راه‌اندازی با ولتاژ کاهش یافته

دو آرایش راه‌اندازی با ولتاژ کاهش یافته در اشکال ۱۸ الف و ب نشان داده شده است. با عنایت خاص

به اتوترانسفورماتورهای آرایش‌های مختلف سوئیچینگ به کار رفته است. انتخاب هر نوع صرفاً جنبه اقتصادی دارد و در عمل تفاوتی در رفتار آنها وجود ندارد. این روش شامل اتصالات اتوترانسفورماتور است که با قطع کلید خط نول، در خلال راه‌اندازی، نقش یک راکتور سری با سیم‌پیچی را پیدا می‌کند. این روش گاهی به روش کورندوفر^۱ موسوم است. امپدانس مغناطیس‌کننده اتوترانسفورماتور راه‌انداز معمولی در چنین شرایطی آنقدر زیاد است که رفتار آن در عمل با آرایش انتقال باز شکل ۱۸ چندان تفاوتی ندارد.

انشعاب (تپ) ولتاژ کاهش یافته در ترانسفورماتور مثلث، شکل ۱۸ الف ممکن است یک انشعاب متقارن مرکزی برای نصف ولتاژ یا اتصال مثلث - گوشه‌ای^۲ برای ولتاژ کمتر باشد (۶). انشعاب (تپ) مثلث - گوشه‌ای ایجاد امپدانس‌های نامتعادل می‌کند که منجر به عبور جریان نامتعادل در خلال راه‌اندازی می‌گردد. البته، عبور جریان‌های نامتعادل معمولاً کوچک بوده و این موضوع برای طراح رله - با توجه به حساسیت تنظیم رله زمین^۳ - جالب خواهد بود. طراح ترانسفورماتور بایستی ضرورت اجتناب از نامتعادلی زیاد ولتاژهای انشعاب (تپ) را مورد توجه قرار دهد. جریان اتصال کوتاه در انشعاب تمایل دارد که از جریان تمام سیم‌پیچی بیشتر باشد. آنجا که این جریان از مقدار جریان قطع یا مقدار نامی لحظه‌ای کلید قدرت تجاوز کند ضرورت استفاده از راکتور محدود کننده جریان^۴ (CLR) مطابق شکل ۱۸ الف وجود دارد.



شکل ۱۸ - راه‌انداز با ولتاژ کاهش یافته (الف) تپ ترانسفورماتور (ب) اتوترانسفورماتور

1- Korndorfer Method

2- Corner - Delta Connection 3- Ground Relay

4- Current Limiting Reactor

کندانسور سنکرون با اعمال ولتاژ کاهش یافته مشابه یک موتور القایی شروع به کار می‌کند. هنگامی که به سرعت تمام رسید و واحد سنکرون گردید، تحریک اعمال می‌گردد. به واسطه گشتاور مغناطیسی، ممکن است در ابتدا ماشین در «قطب نادرست» سنکرون گردد از این رو به عنوان بخشی از مراحل راه‌اندازی اتوماتیک جریان میدان تحریک به میزان کافی اعمال می‌شود تا اطمینان حاصل شود که در صورت لزوم لغزش قطب انجام گیرد. البته قبل از ادامه مراحل بعدی، با استفاده از رله توان راکتیو بازرسی انجام می‌گیرد تا اطمینان حاصل گردد که کندانسور در وضعیت قطب صحیح قرار دارد. پس از این مرحله، با قطع کلید راه‌اندازی^۱ و بستن کلید کار^۲ انتقال به ولتاژ کامل انجام می‌گیرد. همزمان با قطع کلید راه‌اندازی، به کمک سیستم تحریک جریان تحریک کامل اعمال می‌شود تا جریان گذرا و فرورفتگی ولتاژ حاصل به حداقل برسد. به طور نمونه ولتاژ انشعاب (تپ) راه‌اندازی ۵۰-۳۵٪ است. در مواردی که از ولتاژ انشعاب کم استفاده می‌گردد، گذرای مرحله انتقال از گذرای اولیه به مراتب بیشتر است مگر اینکه برای کاهش آن از وسایل کنترل استفاده گردد. شکل ۱۹ موردی را نشان می‌دهد که با اعمال تاخیر کوچک در بستن کلید کار، فرورفتگی ولتاژ مرحله دوم به مقدار کمی کاهش یافته است.

در این روش راه‌اندازی به سیم‌پیچی میراکننده قوی - از نوع نشان داده شده در شکل ۳ - نیاز است. با افزایش اندازه واحد، فراهم کردن میله‌های میراکننده با توانایی حرارتی کافی فوق‌العاده مشکل است و بایستی از روش راه‌اندازی دیگر استفاده کرد. کندانسورهای سنکرون با سیستم خنک کننده هیدروژنی و با مقدار نامی بالاتر از حدود ۱۷۰ MVAR معمولاً به راه‌انداز نوع غیر سیم‌پیچ میراکننده نظیر راه‌انداز با موتور نیاز دارند.

۸-۵-۳ راه‌انداز استاتیکی

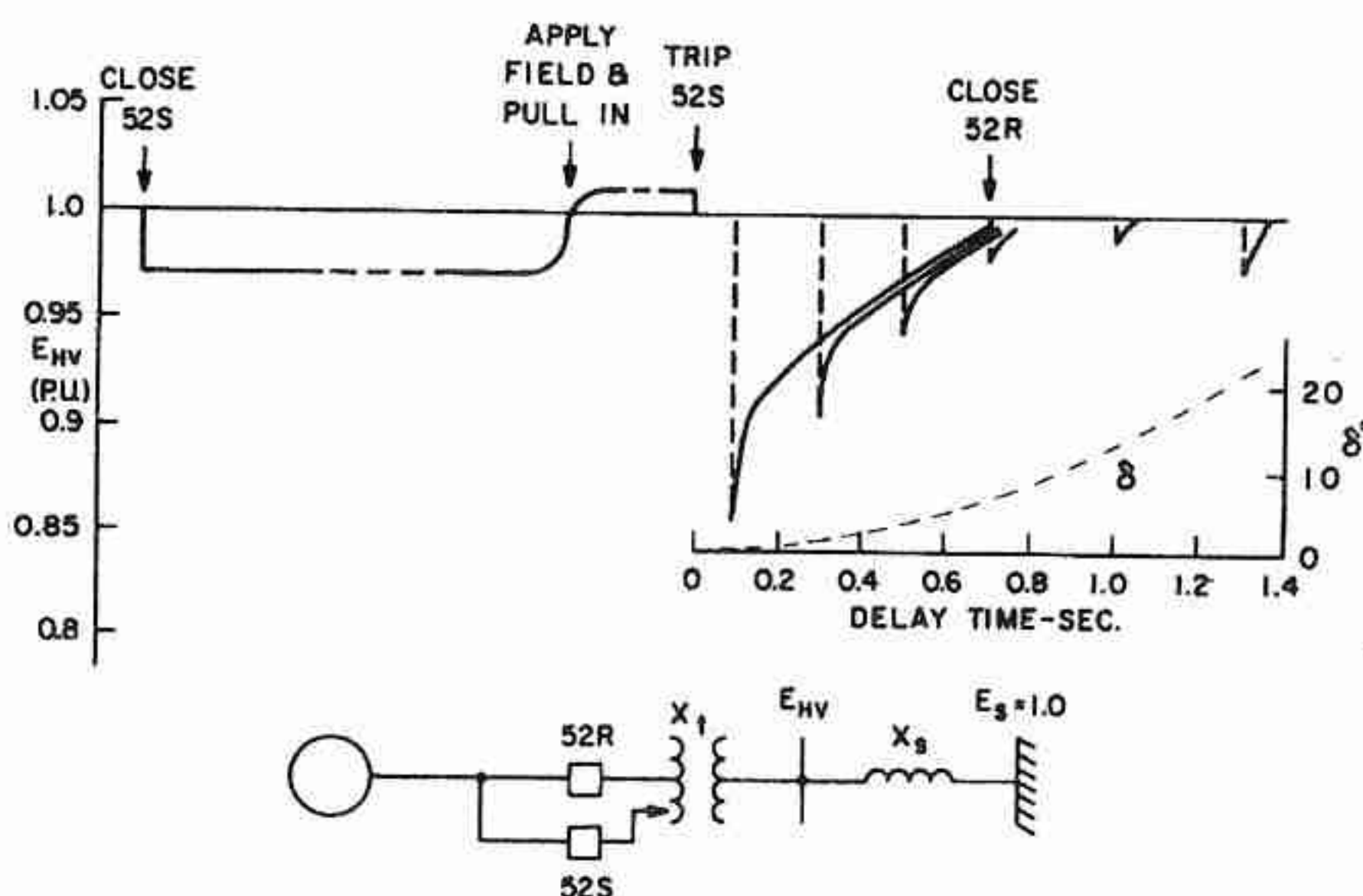
راه‌انداز استاتیکی که شماتیک (شکل نمایی) آن در شکل ۲۰ نشان داده شده است اساساً نوعی راه‌انداز همزمان (سنکرون)^۳ یا «پشت به پشت»^۴ است که در آن کندانسور به طور همزمان (سنکرونیزم) با معادل استاتیکی مولد راه‌انداز تا سرعت نامی شتاب می‌گیرد. راه‌انداز استاتیکی خود مجموعه کاملی از معادل استاتیکی مولد راه‌انداز، سیستم تحریک، تنظیم کننده، سوئیچ‌های آن و کنترل‌های سنکرون کننده است. اجزاء اصلی سیستم راه‌انداز استاتیکی به شرح زیر است:

1- Starting Breaker

2- Running Breaker

3- Synchronous

4- Back - to - Back



شکل ۱۹ - اعمال تاخیر در بستن کلید کار.

- ۱- محفظه‌های راه‌انداز استاتیکی که در برگیرنده تایریستورهای قدرت و مدارهای کنترل مربوط به آن است.
 - ۲- راکتورهای کموتاسیون^۱ و راکتور صافی^۲ که در مجاورت محفظه‌های راه‌انداز قرار دارند.
 - ۳- کلیدهای قدرت^۳ جهت تغذیه راه‌انداز و اتصال دادن واحدی که بایستی راه‌اندازی شود.
- راه‌انداز اساساً مشابه تجهیزات مبدل HVDC است با این تفاوت که «سیستم» دریافت‌کننده توان با فرکانس متغیر است. در خلال راه‌اندازی (شتاب گرفتن) مبدل^۴ طرف خط به صورت یکسوکننده^۵ عمل می‌کند در حالی که مبدل طرف ماشین به صورت معکوس‌کننده^۶ (اینورتر) عمل می‌کند. در سرعت بالاتر از یک حداقل معین (۱۰-۵٪) کندانسور می‌تواند توان راکتیو کموتاسیون لازم برای عملکرد معکوس‌کننده را فراهم نماید. در سرعت پایین‌تر از این لازم است به وسیله سوئیچ کردن متوالی خروجی معکوس‌کننده از فاز به فاز، فلوی دوار استاتور را برقرار کرد.

1- Commutating Reactor

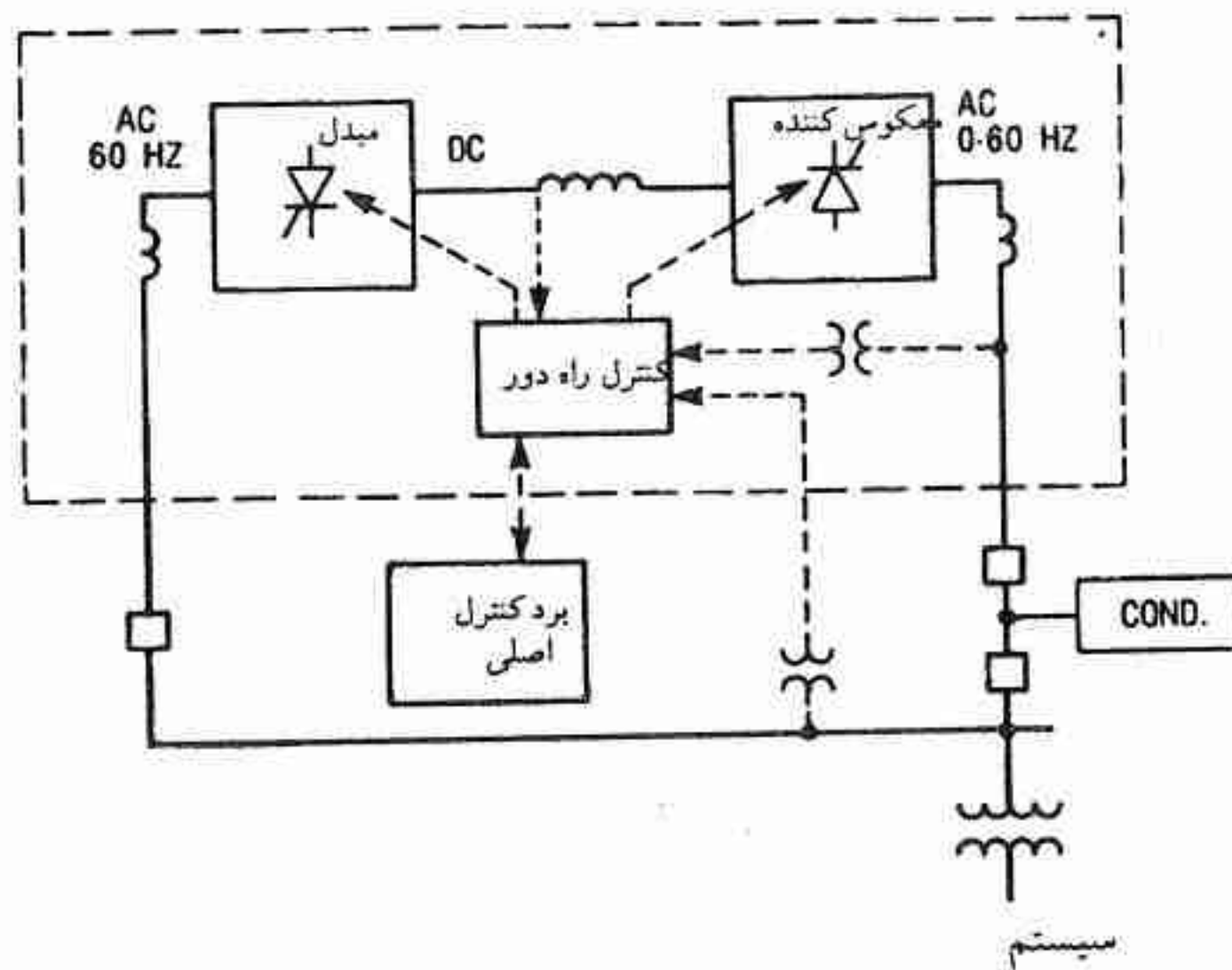
4- Converter

2- Smoothing Reactor

5- Rectifier

3- Power Switchgear

6- Inverter



شکل ۲۰ - آرایش نمایشی سیستم راه انداز استاتیکی.

۸-۶ ملاحظات در طراحی پست

در حالی که بحث تفصیلی راجع به تجهیزات پست خارج از موضوع این فصل است، به تعدادی از ملاحظات مربوط به کندانسور اشاره خواهد شد.

۸-۶-۱ آرایش تک خطی

دیاگرام تک خطی تاسیسات کندانسور بر حسب آرایش مختلف پست و روش راه اندازی به کار گرفته شده، متفاوت خواهد بود. شکل ۲۱ آرایش نمونه‌ای را که در آن از راه اندازی موتور روتور سیم پیچی شده استفاده گردیده است، نشان می‌دهد. در جایی که اتوترانسفورماتورهای رابط^۱ موجود دو سطح ولتاژ انتقال را در پست بهم متصل می‌کنند یک روش مقرون به صرفه اتصال کندانسور به سیستم قدرت می‌تواند مطابق شکل از طریق اتصال مثلث سیم پیچی سوم یک اتوترانسفورماتور رابط انجام گیرد. یا اینکه کندانسور می‌تواند ترانسفورماتور کاهنده مربوط به خود را دارا باشد. در هر دو حالت دو نکته حائز اهمیت امپدانس و نسبت دور ترانسفورماتور است. به طور کلی، امپدانس کمتر که سازگار با وظایف قطع کلید قدرت باشد مطلوب خواهد بود و اجازه می‌دهد که حداکثر

1- Tie - Autotransformer

بهره‌برداری از توانایی کندانسور به عمل آید. امیدانس کم همچنین مساله انتخاب نسبت دور ترانسفورماتور، که با محدوده وسیعی از شرایط مطابقت داشته باشد را آسان می‌کند و اجازه می‌دهد توان راکتیو کندانسور در محدوده قابل انتظار تغییرات سطح ولتاژ انتقال تغییر نماید (بدون آنکه ولتاژ عادی کندانسور از حد $\pm 0.5\%$ تجاوز نماید).

۸-۶-۲ کنترل و حفاظت

تقریباً در تمامی موارد کندانسورها با روشن - خاموش شدن از راه دور و تمهیدات کنترل ولتاژ، کاملاً اتوماتیک (خودکار) عمل می‌کنند. نیازمندی‌های حفاظتی آنها اساساً مشابه یک واحد توربین - ژنراتور است، البته، چند نیازمندی خاصی نیز مطرح است. از آنجایی که جریان تحریک نزدیک به صفر در کندانسور عادی است، رله از دست دادن میدان^۱ متفاوتی به آن اعمال می‌شود. این عمل توسط ترکیب منطقی جریان تحریک و ولتاژ ترمینال فراهم می‌گردد. طوری که جریان تحریک کم همراه با ولتاژ پایین ترمینال به عنوان حالت غیرعادی در نظر گرفته می‌شود.

کندانسورها همچنین به رله زیرفرکانس^۲ مجهز می‌شوند تا در مواردی که در اثر قطع از راه دور از سیستم ایزوله می‌گردند، حفاظت گردند. یکی از اعمال حفاظتی مهم، کنترل اضافه بار روتور و استاتور کندانسور است. از آنجایی که تنها وسیله بی‌بار کردن کندانسور کاهش دادن جریان میدان آن است، این کار به طور طبیعی به عنوان بخشی از سیستم تحریک انجام می‌گیرد.

۸-۶-۳ سیستم‌های کمکی

علاوه بر وسایل راه‌اندازی کندانسور، سیستم‌های کمکی اصلی شامل روغن‌کاری، خنک‌سازی و کنترل هیدروژن است. توان کمکی مورد نیاز یک کندانسور که با خروجی نامی کار می‌کند در حدود یک دهم یک درصد است که اغلب آن به سیستم خنک‌سازی آب مربوط می‌شود.

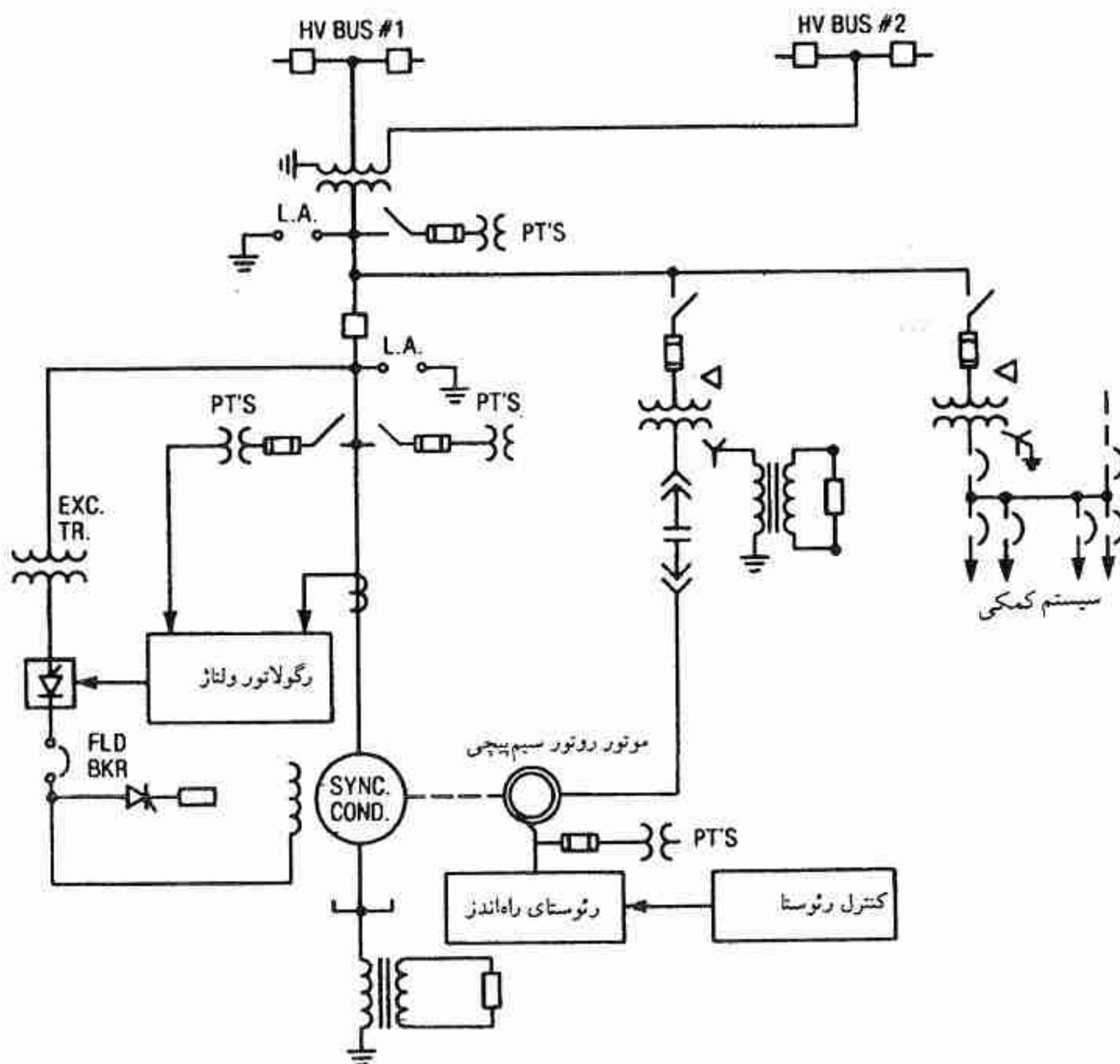
تهویه ماشین شکل^۲ کاملاً در محفظه بسته انجام می‌گیرد که در آن گاز هیدروژن توسط هواکش‌ها (فن) نصب شده بر روی محور، از طریق تبادل کننده‌های حرارتی گاز - به - آب سیرکوله می‌گردد. از آنجایی که آب خنک‌کننده غالباً با ارزش است، معمولاً برج‌های خنک‌کن یا تبادل کننده‌های حرارتی آب - هوا به کار برده می‌شود. در نواحی با درجه حرارت پایین عموماً از سیستم مدار بسته با مخلوط

1- Loss - of - Field Relay

2- Under - Frequency Relay

گلیکول - برای حفاظت از یخ زدن - استفاده می‌گردد. در موارد دیگر کنترل یخ زدن به وسیله طراحی سیستم خنک‌سازی انجام می‌گیرد.

سیستم کنترل هیدروژن، به کمک رگولاتورهای فشار، فشار را در حد نرمال نگاه می‌دارد و از نشتی محفظه جلوگیری می‌کند. سیستم روغن روغن‌کاری معمولاً در محلی در قسمت تحتانی کندانسور قرار دارد. روغن تحت جریان و فشار مناسبی به بلبرینگ‌ها داده می‌شود. همچنین در خلال راه‌اندازی روغن تحت فشار بالا نیز به بلبرینگ‌ها داده می‌شود تا یاتاقان‌ها را بالاتر از سطح تماس قرار داده و اصطکاک راه‌اندازی و ساییدگی را کاهش دهد. یک پمپ روغن پشتیبان dc در موارد اضطراری پمپ روغن عادی ac را پشتیبانی می‌کند.



شکل ۲۱ - نمونه‌ای از آرایش تک خطی تاسیسات کندانسور سنکرون.

۸-۷ خلاصه

در سیستم‌های قدرت، کندانسورهای بزرگ با سیستم خنک‌سازی هیدروژن نقش اساسی را در تامین توان راکتیو مورد نیاز بر عهده دارند. تخصیص تولید توان راکتیو پیوسته و در محدوده فوق تحریک و زیر تحریک آنها را برای کنترل عادی ولتاژ انتقال موثر می‌نماید. البته نقش مهم‌تر از این توانایی آنها در حمایت ولتاژ اضطراری در جایی است که اغتشاشات بزرگ و یا قطع خط انتقال یا تولید، فروپاشی سیستم را تهدید می‌کنند. کندانسورها به طور خودکار - در خلال فاصله‌ای که برای بسته شدن مجدد خط و عمل کردن کنترل‌های گاورنر (ناظم بخار) محرک اولیه لازم است - بیش از مقادیر نامی‌شان توانایی فراهم می‌کنند. اغتشاشات سیستم ممکن است ضرورت فراهم کردن توان راکتیو اندوکتیو یا کاپاسیتیو را ایجاد کنند تا ولتاژ در سطوح قابل قبولی باقی بمانند. مقدار توان راکتیو (MVAr) که می‌تواند در خلال شرایط اضطراری بحرانی فراهم گردد از ملاحظات مهم در هنگام مقایسه روش‌های مختلف تامین توان راکتیو می‌باشد. به طور کلی، برای تعیین نیازمندی‌های بخصوص، مطالعه تفصیلی سیستم با برنامه کامپیوتری پایداری گذرای مناسب ضرورت دارد.

در طول چندین سال سیستم کنترل راه‌اندازی کندانسور و نیازمندی‌های حفاظتی به خوبی توسعه یافته است. اخیراً بهبودهایی در دو زمینه صورت گرفته است و رفتار گذرای موثرتری را موجب گشته است. یکی از آنها کاربرد کنترل‌های کمکی در رگولاتور ولتاژ است که تاثیر کندانسور را در خلال نوسانات گذرا افزایش داده است. زمینه دیگر بهبودی است که در کنترل‌های اضافه بار انجام گرفته و موجب شده است که بتوان از توانایی‌های کوتاه مدت کندانسور حداکثر بهره‌برداری را به عمل آورد.

مراجع

1. C. R. Canady and J. H. Drake, "Operation of Synchronous Condensers on the Southern California Edison Company System," *Trans. AIEE, Power Appar. Syst.* **71**, 1051-1058 (1952).
2. J. A. Oliver et al., "345 MVA Fully Water-Cooled Synchronous Condenser for Dumont Station," *Trans. IEEE, Power Appar. Syst.* **90**, 2758-2777 (Nov/Dec 1971).
3. F. H. Ryder, J. L. Fink, C. M. Stairs, and R. V. Pohl, "System Design Considerations of the Eel River HVDC Converter Station," *CIGRE 10-05*, 1972.
4. P. G. Brown, H. R. Propst, and J. B. Tice, "Unity Power Factor Essential to Emergency kW Transportation," *Gen. Electr. Co., Electr. Forum*, **1**(2), (Fall 1975).
5. E. W. Kimbark, "How to Improve System Stability Without Risking Subsynchronous Resonance," *Trans. IEEE, Power Appar. Syst.* **96**(5), 1608-1619 (Sept/Oct 1977).
6. P. G. Brown and G. W. Otte, "Electrical Design Considerations in Pumped Storage Hydro Plants," *Trans. IEEE 63-1227 Power Appar. Syst., Special Supplement*, 625-641 (1963).
7. P. G. Brown, "Reduced Voltage Starting Performance of Synchronous Condensers and Pumped Hydro Units," *Trans. IEEE Power Appar. Syst.* 505-511, 643-647 (March/April 1976).

جبران راکتیو و کوره الکتریکی

T.J.E.MILLER and A.R.OLTROGGE

۹-۱ مقدمه

به منظور استفاده موثر از توان الکتریکی در کوره‌های کارخانجات فولادسازی، لازم است مجموعه‌ای از مسائل بخصوص مساله تثبیت ولتاژ، اصلاح ضریب توان و فیلتر کردن هارمونیک حل گردد.

تثبیت کردن ولتاژ عملکرد کوره الکتریکی را به طور قابل ملاحظه بهبود می‌بخشد. این بهبود یا با افزایش حداکثر توان و در نتیجه افزایش میزان تولید فولاد صورت می‌گیرد و یا با قادر کردن کوره که در همان توان حداکثر با قوس الکتریکی کوتاه‌تر کار کند که در نتیجه «چشمک زدن» ولتاژ کاهش می‌یابد.

در حالی که تثبیت ولتاژ همواره مطلوب کارخانه فولاد است، برای موسسه تولیدکننده برق نیز به عنوان بهبودی برای اغتشاشات ولتاژ (چشمک زدن) که از تغییرات وسیع و سریع جریان کوره ناشی می‌شود، محسوب می‌گردد. چه در غیر این صورت این اغتشاشات برای مصرف‌کننده‌های مجاور آزار دهنده خواهند بود.

روشهایی که به منظور تثبیت ولتاژ به کار رفته است شامل اتصال دادن کوره به شبکه با ولتاژ

بالا تر، کاربرد کندانسورهای سنکرون با راکتورهای ضربه گیر^۱ و جبران کننده های مدرن سرعت - بالا از نوع راکتور تایریستور کنترل و راکتور قابل اشباع، می باشد. پاسخ سریع جبران کننده های سرعت - بالا در حل تناقض بین رفتار کوره الکتریکی و کاهش چشمک زدن - که با ترکیب کندانسور سنکرون/راکتور ضربه گیر عملی است - مساعدت می نماید. اتصال دادن کوره الکتریکی به شبکه با ولتاژ بالاتر اغلب پرهزینه و گاهی غیرعملی است و در بسیاری از این موارد به کار گرفتن جبران کننده تایریستور کنترل یا راکتور قابل اشباع از نظر اقتصادی و تکنیکی دارای مزیت است.

در اینجا روند بررسی موضوع بر اساس انعکاس اهمیت پایدار کردن ولتاژ بر روی پروسه تولید فولاد استوار شده است. این روند در نقطه مقابل بسیاری از نوشته ها است که تنها جبران کننده استاتیک را به عنوان وسیله ای برای محدود کردن چشمک زدن در سیستم خارجی مد نظر قرار داده اند. اصلاح چشمک زدن در بخش های ۹-۳ الی ۹-۵ مورد بررسی قرار گرفته است.

۹-۲ کوره الکتریکی به عنوان بار الکتریکی

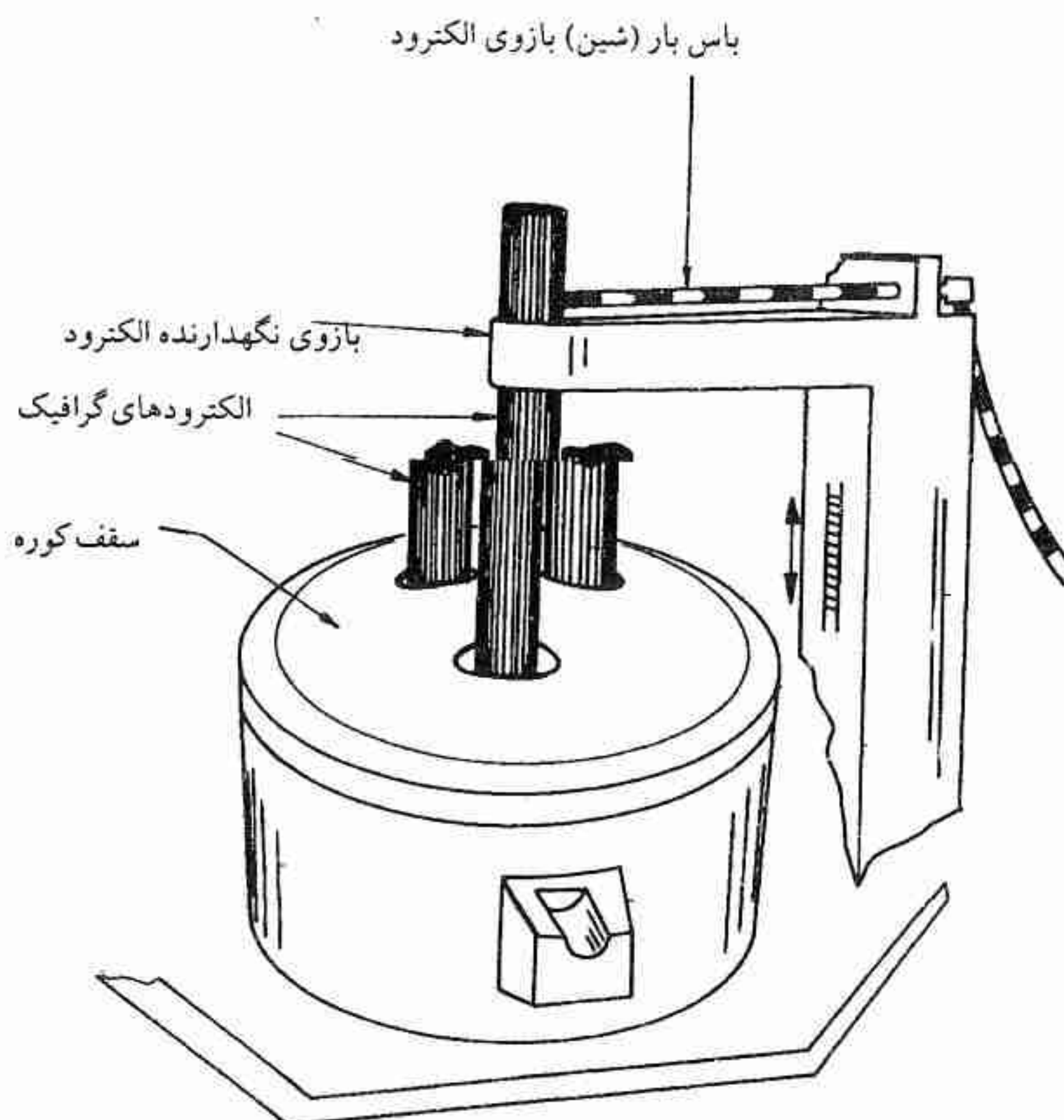
۹-۲-۱ کوره الکتریکی در تولید فولاد

علی رغم کندی در رشد تولید فولاد، امروزه ظرفیت کوره الکتریکی در سطح جهان به طور پیوسته با سرعت قابل ملاحظه ای رو به افزایش است. در امریکا به تنهایی بین ۱۹۷۵ و ۱۹۸۱ با نصب کوره های الکتریکی جدید با ظرفیت حدود ۱۵ میلیون تن، سهم کوره های الکتریکی به یک سوم کل تولید فولاد رسید. در حال حاضر حدود ۸۵۰ کوره الکتریکی با الکترودهای با قطر بیش از ۶ in وجود دارد و محدوده ظرفیت آنها از چند تن تا بیش از ۴۰۰ تن است. در حال حاضر بزرگترین کوره های الکتریکی دارای قطر بیش از ۳۰ ft هستند و نیاز به توان تا میزان ۱۱۰ MW دارند. شکل ۱ نمونه ای از کوره بزرگ را نشان می دهد.

آمار فوق مبین اهمیت کوره الکتریکی به عنوان تولیدکننده فولاد و همچنین به عنوان یک بار الکتریکی در سیستم تغذیه است.

۹-۲-۲ نیازمندی های سیستم تغذیه کوره های الکتریکی

مشخصه های کار کوره - به منظور درک مزایای تثبیت ولتاژ در کوره الکتریکی، لازم است به



شکل ۱ - طرح کلی یک کوره الکتریکی جدید (اتصالات الکتریکی یکفاز نشان داده شده است)

مشخصه‌های کار کوره الکتریکی توجه شود. این مشخصه‌ها را می‌توان به شرح ذیل به دست آورد. قوس الکتریکی را می‌توان به صورت مقاومت متغیر، در مدار معادل تک فاز کوره الکتریکی و سیستم تغذیه آن نمایش داد (به شکل ۲ مراجعه شود). گرچه این مدل بسیار ساده است اما عملکرد دقیق کوره را بر حسب مقادیر متوسط ارائه می‌کند.

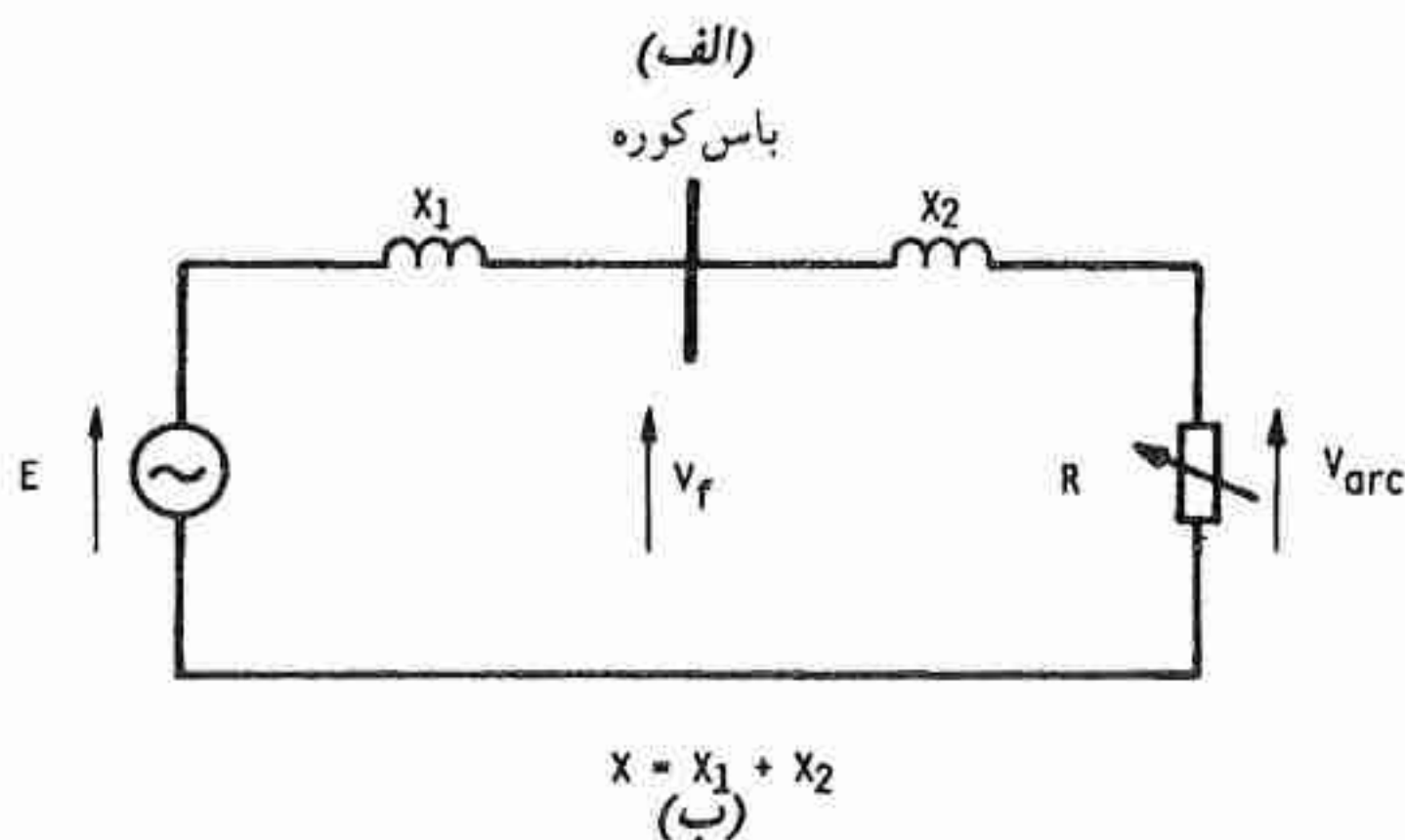
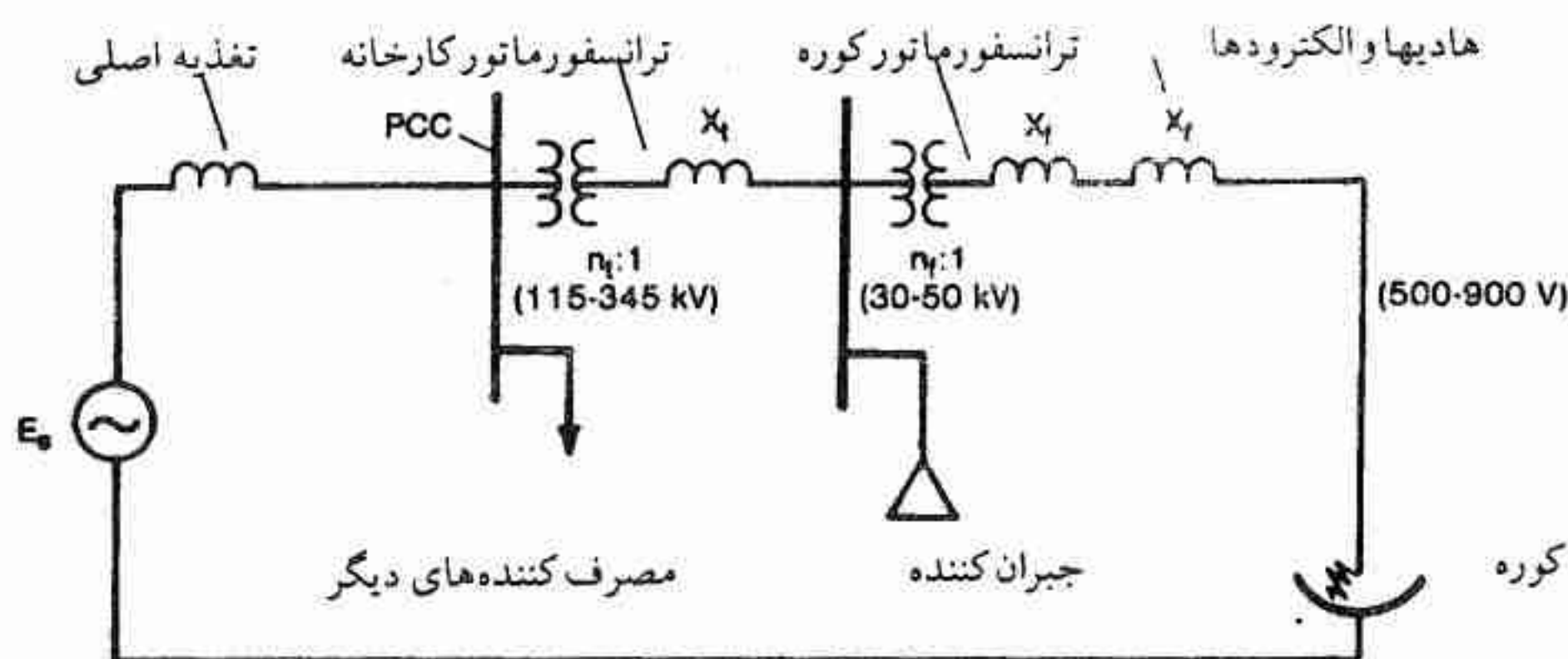
برای سهولت می‌توان از کلیه مقاومت‌ها به استثناء مقاومت قوس صرف‌نظر کرد. راکتانس X مجموع کلیه راکتانس‌های سری شده با قوس است که در برگیرنده راکتانس کابل‌ها و باس بار (شین) بازوی الکترودها، ترانسفورماتور کوره و ترانسفورماتور اصلی کارخانه فولاد، و راکتانس اتصال کوتاه شبکه تغذیه است. تمامی راکتانس‌ها به ثانویه سیم‌پیچی ترانسفورماتور کوره انتقال داده شده‌اند. راکتانس اتصال کوتاه شبکه تغذیه در حدود ۲۰-۱۵٪ کل راکتانس‌ها خواهد بود، در حالی که

کابل‌ها از ترمینال‌های ثانویه ترانسفورماتور کوره تا الکترودهای گرافیت به میزان ۷۰٪ است. نیروی محرکه E ولتاژ مدار باز در ترمینال‌های ثانویه ترانسفورماتور کوره است و همراه با X معرف مدار معادل تونن مدار تغذیه قوس الکتریکی است. عملکرد کوره با این فرض که جریان‌های کوره متعادل و سینوسی هستند توصیف خواهد شد.

کنترل مدار شکل ۲ با حرکت عمودی الکترودهای گرافیت انجام می‌گیرد، که با این عمل طول قوس الکتریکی و در نتیجه ولتاژ آن (بعدا بحث خواهد شد) کنترل می‌شود و با تغییر تپ ترانسفورماتور کوره ولتاژ E تغییر می‌کند. البته با تغییر تپ مقدار X نیز کمی تغییر می‌کند اما می‌توان از اثر آن صرف‌نظر کرد.

کاملاً مشخص است که در مداری نظیر مدار شکل ۲، توان تحویلی به بار (یعنی قوس الکتریکی) در صورت تغییر R - حداکثر به مقدار زیر محدود می‌شود.

$$P_{\max} = E^2 / 2X \quad \text{در هر فاز} \quad (۱)$$



شکل ۲ - مدار معادل تکفاز برای تخمین مشخصه‌های کار کوره الکتریکی

مقدار R در شرایط حداکثر توان برابر است با

$$R_{pmax} = X \quad (2)$$

و جریان مربوط به حداکثر توان برابر است با $I_{pmax} = E / \sqrt{2} X$. بنابراین افت ولت در قوس الکتریکی برابر است با افت ولت در راکتانس X و برابر است با $E / \sqrt{2}$.

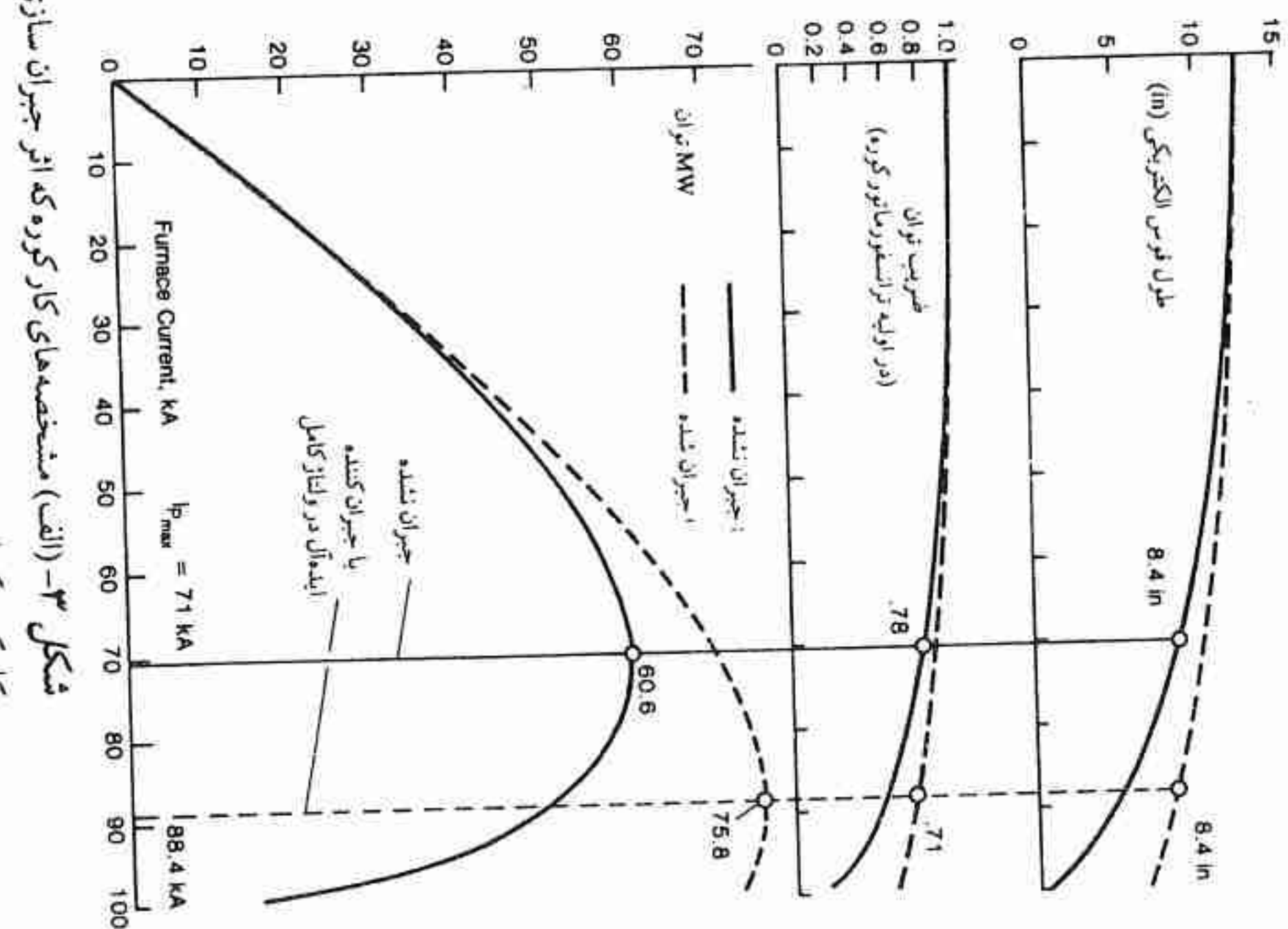
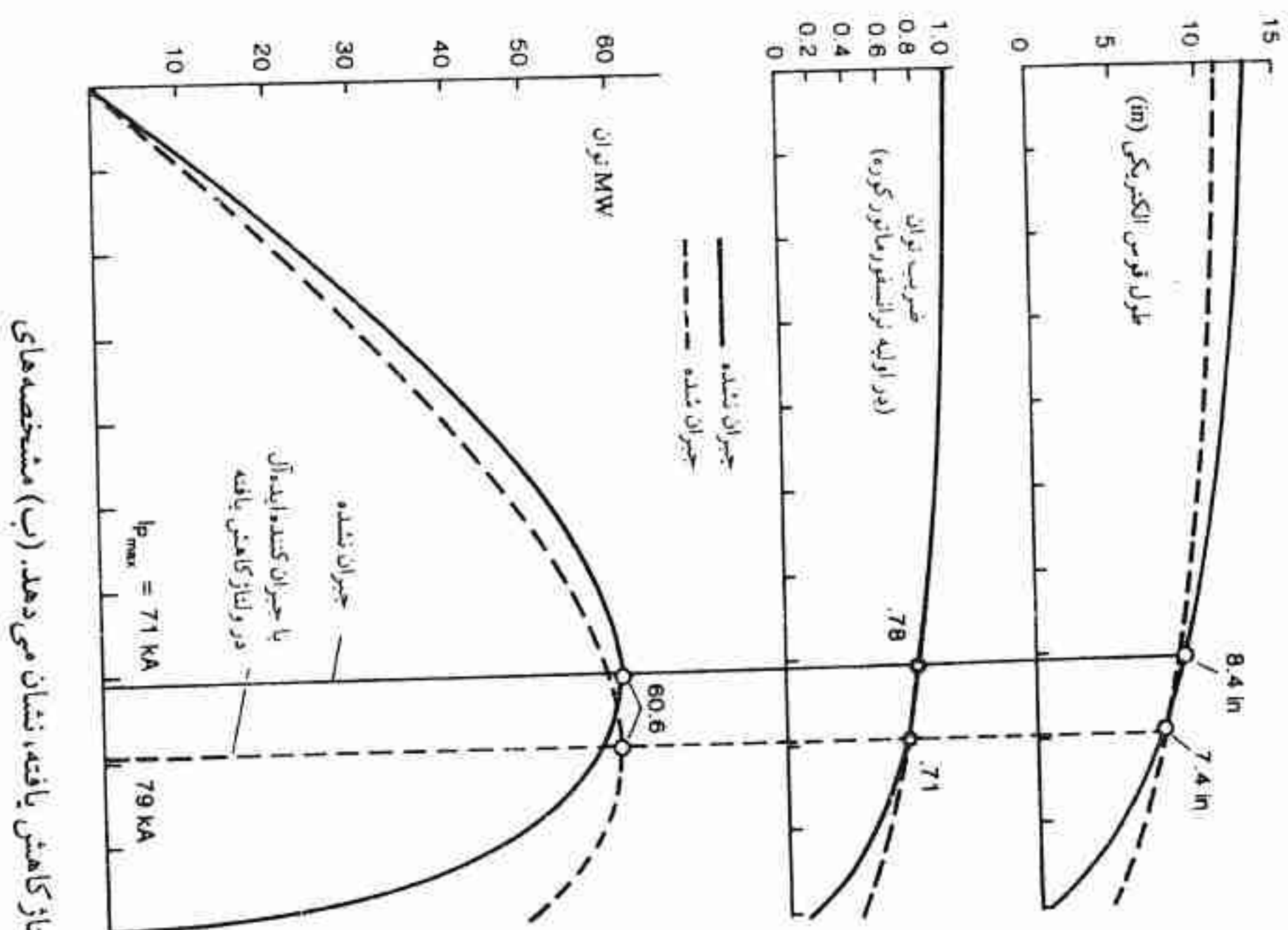
شکل ۳ تغییرات توان کوره الکتریکی و کمیت‌های دیگر را - در صورت تغییر R - نشان می‌دهد. منحنی‌ها بر مبنای جریان قوس رسم شده‌اند و به «مشخصه‌های کار» کوره الکتریکی موسومند. مقدار نامی کوره تقریباً ۶۰ MW است. E برابر $700 V_{rms}$ (خط به خط) است، و X برابر $4/0.4 m\Omega$ است که ۸۰٪ آن مربوط به ورودی اولیه ترانسفورماتور کوره («باس کوره» در شکل ۲) و ۲۰٪ آن مربوط به خروجی است یعنی $X_1 = 0.81 m\Omega$ و $X_2 = 3/23 m\Omega$ است. اولیه ترانسفورماتور کوره عمومی‌ترین نقطه اندازه‌گیری است و ضریب توان نشان داده شده در شکل ۳ ضریب توان در این نقطه است. این نقطه‌ای است که عموماً جبران‌کننده به آن متصل می‌شود.

انتخاب نقطه کار و اهمیت امپدانس تغذیه - واضح است که پایداری قوس الکتریکی در نقطه حداکثر توان حاصل می‌شود. جریان کمتر از I_{pmax} منجر به ضریب توان بزرگتر می‌شود اما توان و پایداری قوس کمتر می‌گردد. از طرف دیگر جریان بیشتر منجر به ضریب توان و توان کمتر می‌شود که دلالت بر بهره‌برداری غیراقتصادی از کوره الکتریکی دارد. این ملاحظات عملکرد مطلوب کوره را در حول نقطه حداکثر توان پیشنهاد می‌کند. البته عملکرد کوره در این نقطه، به وسیله میزان فرسودگی پوشش دیرگداز جداره کوره^۱ محدود می‌شود. هزینه نگهداری و تعمیرات پوشش دیرگداز^۲، بخش قابل ملاحظه‌ای از هزینه تولید فولاد است و اهمیت آن با توجه به روند رو به افزایش توان ورودی در کوره با قطر معین، بیشتر می‌شود. بنابراین درک چگونگی ارتباط میزان فرسودگی با توان کار و نقطه کار حائز اهمیت است.

در سطح توان معین، میزان فرسودگی تقریباً با طول قوس الکتریکی متناسب است. طول قوس الکتریکی تقریباً منحصر به ولتاژ قوس الکتریکی بستگی دارد و تقریباً مستقل از جریان است. به طور تقریبی،

$$V_{arc} = I_{arc} + 40 \text{ volts rms} \quad (3)$$

که در آن $k = 29 \text{ V/in}$ ($11/5 \text{ V/cm}$) است. در نقطه حداکثر توان $V_{arc} = E / \sqrt{2}$ ، که بر طبق



شکل ۳- (الف) مشخصه‌های کار کوره که اثر جبران سازی را در ولتاژ کامل، نشان می‌دهد. کار کوره که اثر جبران سازی را در ولتاژ کامل، نشان می‌دهد.

معادله ۱ نتیجه می شود $V_{arc} = \sqrt{P_{max} X}$. بنابراین برای یک طول قوس حداکثر مفروض (یعنی حداکثر ولتاژ) و توان قوس حداکثر مطلوب P_{max} ، راکتانس X نبایستی از $V_{arc(max)}^2 / P_{max}$ تجاوز نماید. اگر X از این مقدار تجاوز نماید کوره الکتریکی بایستی در جریان بالاتر کار کند، یعنی در سمت راست نقطه حداکثر توان کار کند تا طول قوس را محدود نماید. این کار در عمل روش غیر معمولی نیست، اما توان و ضریب توان هر دو کاهش می یابند. این موضوع در شکل ۳ الف به وسیله منحنی های خط پر توان قوس، طول قوس و ضریب توان نشان داده شده است.

منحنی های خط چین شکل ۳ الف، اثر حذف X_1 - یعنی کاهش دادن X به مقدار ۸۰ درصد مقدار اولیه - را نشان می دهد. مقدار E با ریشه دوم این ضریب کاهش می یابد تا اینکه P_{max} ثابت بماند. حال می توان ملاحظه کرد که با طول قوس کاهش یافته، عملکرد در نقطه حداکثر توان امکان پذیر است و از اینرو فرسودگی کاهش می یابد. کاهش دادن X منجر به کاهش یافتن طول قوس در تمامی سطوح توان - نه فقط در ماگزیمم توان - می گردد.

به طور خلاصه، نقطه کلیدی در ایجاد توان ورودی برابر با حداکثر توان همراه با طول قوس کوتاه قابل قبول، این است که راکتانس کل تا حد امکان کوچک باشد.

کوره های جدید دارای آرایش مخصوصی از کابل ها و باس بار بازوی الکترودها هستند طوری که راکتانس را به حداقل می رسانند. کاهش دادن X به وسیله عوامل اقتصادی و عملی، و به وسیله میزان راکتانس ورودی کارخانه که توسط موسس کوره می تواند کنترل گردد، محدود می شود. در موارد زیادی راکتانس کوچکتر به وسیله تقویت کردن سیستم تغذیه کارخانه فولاد - یعنی با اتصال مستقیم آن به شبکه با ولتاژ بالاتر که دارای سطح اتصال کوتاه بالاتر و راکتانس اتصال کوتاه موثر کمتر است - به دست آمده است. حتی وقتی که این عمل برای کاهش چشمک زدن صورت می گیرد، کوره الکتریکی مزایای فوق را کسب می کند.

مزایای جبران سازی - حال واضح است که یک جبران کننده چگونه قادر است همان مزایای حاصل از کاهش X را فراهم کند. جبران کننده ممکن است در باس بار کوره متصل گردد (به شکل ۲ الف مراجعه شود). اگر جبران کننده قادر باشد ولتاژ را ثابت نگاه دارد، یعنی $V_f = E$ ، آنگاه X_1 به طور موثر حذف می گردد. اگر ولتاژ باس بار کوره V_f در مقدار $E \sqrt{X_2 / (X_1 + X_2)}$ تثبیت گردد، آنگاه مطابق شکل ۳ الف حداکثر توان تغییر نمی کند و حال آنکه طول قوس و فرسودگی هر دو کاهش می یابند.

روش دیگر جبران سازی در شکل ۳ ب نشان داده شده است که در آن ولتاژ باس بار در مقدار E تثبیت می گردد. مجدداً X_1 حذف شده و بر طبق معادله ۱ حداکثر توان با نسبت $(X_1 + X_2) / X_2$ - که می تواند تا $1/3$ باشد - افزایش می یابد. ولتاژ قوس و طول قوس در نقطه حداکثر توان تغییر نمی کنند. این موضوع به صورت خط چین در شکل ۳ ب نشان داده شده است. در مثال $(X_1 + X_2) / X_2 = 1/25$ است و حداکثر توان با این ضریب افزایش می یابد. در این نقطه ضریب توان قدری کاهش پیدا کرده، در حالی که جریان با ضریب $1/25$ افزایش یافته است. در این حالت KVAR لازم برای اصلاح ضریب توان افزایش یافته است. در نقطه حداکثر توان، به عنوان مثال، توان راکتیو با ضریب $(X_1 + X_2) / X_2$ افزایش یافته است.

از میان انواع جبران کننده ها، فقط جبران کننده های راکتیو با خصیصه پاسخ سریع خودشان قادرند ولتاژ را تثبیت نموده و مزایای فوق را تحقق بخشند. این جبران کننده ها شامل جبران کننده راکتور قابل اشباع، راکتور تایریستور کنترل و خازن تایریستور سوئیچ می باشند. پاسخ سریع جبران کننده ضرورت دارد، زیرا جبران کننده اساساً تمامی یا قسمت اعظم جریان راکتیو مورد نیاز کوره الکتریکی را فراهم می کند و همانطوری که ملاحظه کرده ایم این جریان به سرعت تغییر می کند. قبل از توسعه جبران کننده های با سرعت - بالا، کندانسور سنکرون در چندین تاسیسات به کار گرفته شده است. اما به دلیل ضرورت کاربرد راکتورهای ضربه گیر به طور سری با باس بار کوره الکتریکی و ورودی کندانسور، بهبود چشمک زدن به نقطه کوپلاژ مشترک محدود می شود و چشمک زدن در باس بار کوره الکتریکی افزایش می یابد. اگر چنانچه دو کوره الکتریکی به موازات یکدیگر کار کنند این مساله اثرات زیان بخشی را بر رفتار کوره وارد می آورد.

۹-۳ چشمک زدن و اصول جبران سازی آن

۹-۳-۱ ماهیت کلی مساله چشمک زدن

تغییرات سریع جریان تغذیه کوره های الکتریکی (و سایر بارهای بزرگ نظیر، دستگاه های نورد، دستگاه های حفاری) در مواقعی آنقدر زیاد است که منجر به تغییرات ولتاژ سیستم تغذیه گردیده و چشمک زدن لامپ را موجب می گردد. همچنین بر گیرنده های تلویزیون و وسایل الکترونیکی حساس اثرات نامطلوب می گذارد. به منظور به حداقل رساندن این اثرات، لازم است که

تغییرات ولتاژ را در سطحی کمتر از مقدار مورد توافق «آستانه آزار»^۱ نگاه داشت. اصطلاح «چشمک زدن ولتاژ (فلیکر ولتاژ)»^۲ اغلب برای بیان کلیه اثرات نامطلوب تغییرات سریع ولتاژ به کار برده می شود.

توصیف مشخصه چشمک زدن - موسسات تولید کننده برق به روش های متفاوت مساله «آستانه آزار» ناشی از چشمک زدن را توصیف می کنند، اما به طور کلی می توان دو روش اصلی را نام برد، یکی روش SCVD و دیگری روش اندازه گیری چشمک زدن^۳ است. البته بین این دو روش تفاوت اساسی وجود دارد. SCVD = تنزل ولتاژ اتصال کوتاه^۴ است که بعداً بحث می شود. توجه اینکه SCVD در نقطه کوپلاژ مشترک (PCC) از سایر نقاط دورتر سیستم تغذیه که بارهای دیگری به آن متصل است، بدتر است.

(الف) روش SCVD - روش SCVD بر ارتباط بین شکایات رسیده از مشتریان مجاور کارخانه از مساله چشمک زدن، و کاهش ولتاژ اتصال کوتاه در نقطه کوپلاژ مشترک، استوار است. SCVD معمولاً به صورت درصد کاهش ولتاژ در نقطه PCC از حالت مدارباز کوره تا اتصال کوتاه هر سه فاز آن، بیان می شود. ارتباط بین SCVD و شکایات رسیده از چشمک زدن از بررسی های گذشته^۵ معین می شود. سه بررسی شناخته شده در مراجع ۱۸، ۳۰ و ۳۱ توصیف شده است و نتایج بررسی ساده (اما با کاربرد گسترده) UIE/UNIPED و AIEE در شکل ۴ آمده است (همچنین به مرجع ۲ مراجعه شود). به عنوان نمونه، استاندارد و توصیه ای است که در انگلستان به کار رفته است (۱۸) که در آن در سطوح ولتاژ ۱۳۲ kV و کمتر، SCVD به ۲٪ و در ولتاژهای بالاتر به ۱/۶٪ محدود می شود. این اعداد به SCVD ای که با حداقل سطح اتصال کوتاه محاسبه شده است، اعمال می گردند.

بررسی مساله چشمک زدن با روش SCVD دارای مزایای مهم عملی است. به آسانی «آستانه آزار» را به طریقی که مورد قبول مشتریان موسسه برق باشد، تعریف می کند. با این روش می توان در مرحله طراحی پیش بینی کرد که آیا نصب کوره الکتریکی جدید منجر به چشمک زدن غیرقابل قبول می گردد، زیرا با توجه به مقادیر نامی توان اکتیو و راکتیو کوره و امپدانس سیستم تغذیه، قبل از نصب می توان SCVD را محاسبه کرد. تمامی این پارامترها معمولاً در مرحله طراحی موجود است.

(ب) روش اندازه گیری چشمک زدن - یکی از مشکلات روش SCVD این است که در آن

1- Threshold of Irritation

2- Voltage Flicker

3- Flickermeter

4- Short - Circuit Voltage Depression

5- Past Surveys

چشمک زدن تعریف نمی شود، بنابراین این روش قادر نخواهد بود که چگونگی چشمک زدن ولتاژ را از نظر کمی - برای مقاصد اندازه گیری یا پیش بینی - نشان دهد. مساله اندازه گیری در محاسبه چشمک زدن در تاسیسات جبران شده و جبران نشده هر دو حائز اهمیت است همانطوری که مساله پیش بینی در طراحی مدارهای کنترل انواع معینی از جبران کننده دارای اهمیت است.

مشکلات تعیین دقیق چشمک زدن در انواع زیادی از اندازه گیرهای چشمک - که سعی نموده اند از اصول متنوع اندازه گیری استفاده نمایند - مطرح شده است. در بعضی از آنها از فتوسل استفاده شده است که در مقابل نور ناشی از فیلامان تنگستن لامپ پاسخ می دهد، و در انواع دیگر مستقیماً به ولتاژ ورودی حساس هستند. اکثر آنها اساساً مقدار rms تغییرات^۱ ولتاژ را اندازه گیری می کنند، زیرا این یکی از فاکتورهای مهم چشمک زدن است که مورد توجه بسیاری از مصرف کنندگان قرار گرفته است. البته با وجود این تفاوت های زیادی از نقطه نظر پاسخ های فرکانس و تفسیر اندازه گیرهای متفاوت، وجود دارد. عده ای کوشیده اند تا منحنی «حساسیت مرئی» چشم انسان را به دست آورند (۲۲)، در حالی که عده ای دیگر به هیچ وجه پاسخ فرکانسی را به دست نیاورده اند. در بعضی از انواع از فیلترهای هارمونیک استفاده شده است زیرا هارمونیک ها می توانند در قرائت دستگاه اندازه گیر اثر بگذارند بدون آنکه در مقدار rms تغییرات ولتاژ شرکت داشته باشند. اندازه گیرهای چشمک، همچنین از نظر پریود معدل گیری که برای تعیین جذر مربع مقدار به کار می رود، با هم خیلی متفاوت هستند. بعضی از آنها قرائت پیوسته ای را ارائه می کنند، بعضی دیگر در فواصل چند ثانیه یا چند دقیقه نمونه ای را قرائت می کنند، و بعضی دیگر با انتگرال گیری پیوسته، جمع مقدار چشمک زدن را ارائه می کنند.

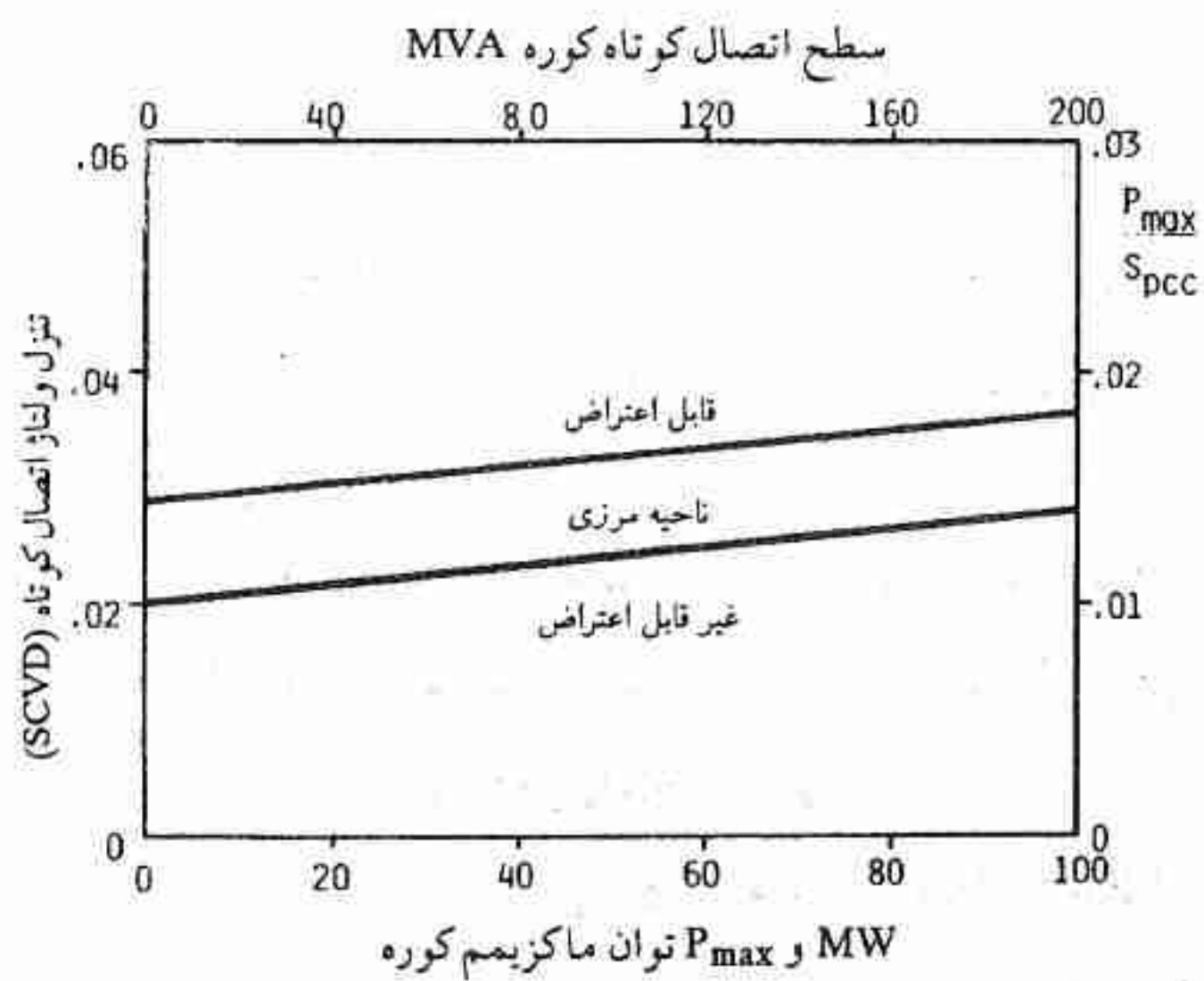
به نظر می رسد که مشخص کردن «آستانه آزار» بر حسب قرائت انجام شده توسط یک دستگاه اندازه گیر چشمک، در موسسات برق عمومیت ندارد. البته با کاربرد روزافزون این وسایل اندازه گیری مساله تغییر کرده است و تعدادی از خریداران جبران کننده ها قبلاً از چنین معیارهایی در مشخصاتشان^۲ استفاده کرده اند.

تاکنون نقش اصلی دستگاه اندازه گیر چشمک، اندازه گیری میزان چشمک زدن در تاسیسات کوره الکتریکی قبل و بعد از نصب جبران کننده بوده است. البته در طراحی تاسیسات کوره الکتریکی جدید و یا طراحی جبران کننده چندان نقشی ندارد، زیرا در حال حاضر نمی توان از روی داده های طراحی^۳ پیش بینی کرد که قرائت دستگاه اندازه گیری چشمک چه خواهد بود (در حضور و یا غیاب جبران کننده).

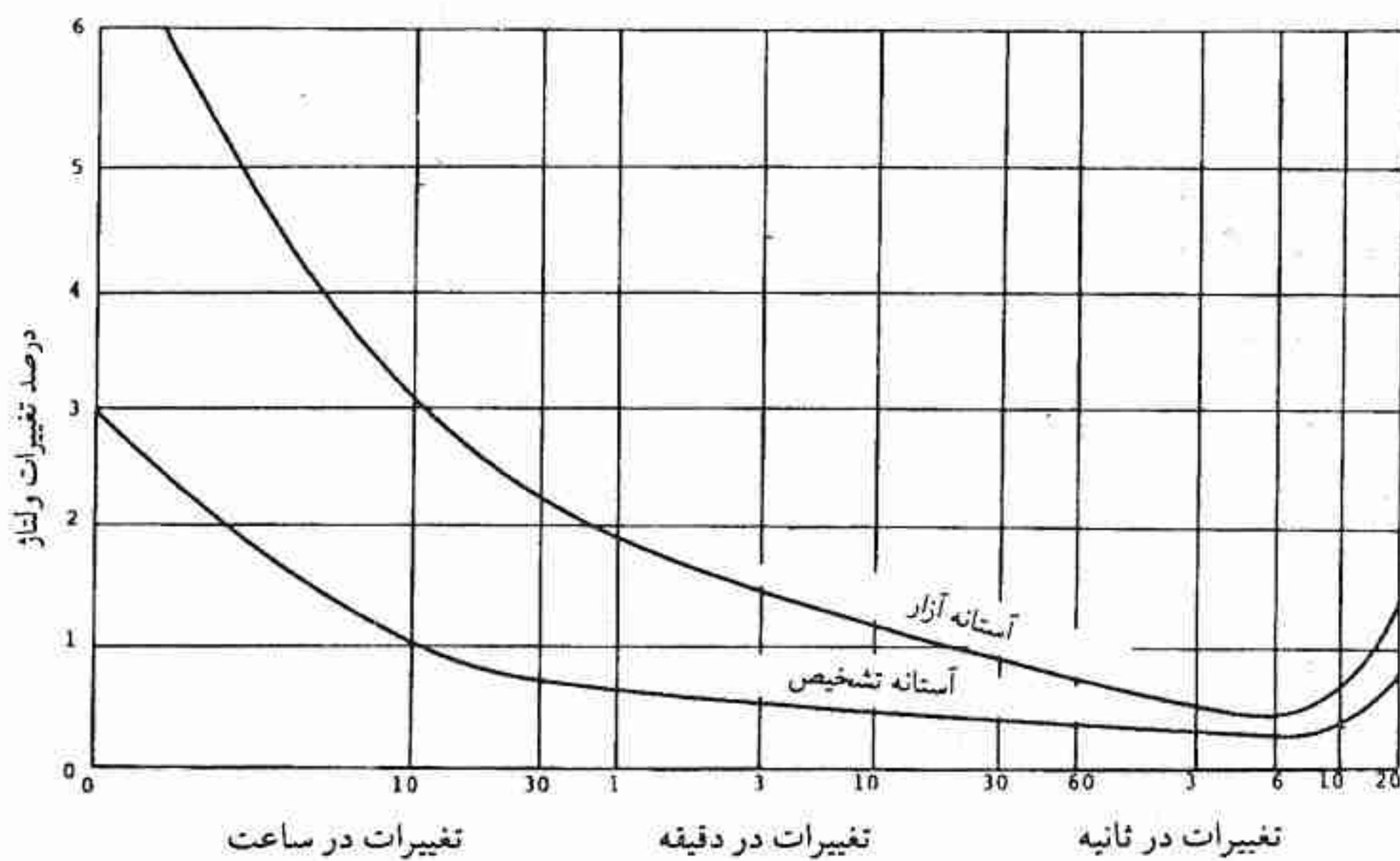
به عنوان مثال، یک منحنی «حساسیت چشم» در شکل ۵ نشان داده شده است. در اینجا منظور توصیف دستگاه اندازه گیر چشمک زدن نیست بلکه برای نشان دادن این مساله است که چشم از طریق روشنایی الکتریکی نسبت به مشخصه طیفی چشمک زدن حساس است و می تواند تغییرات کوچک ولتاژ را تشخیص دهد. «آستانه تشخیص»^۱ برای تغییرات ولتاژ سینوسی پیوسته در فرکانس ۷-۸ Hz حدود مقدار $3/0\%$ می باشد. شکل ۵ نشان می دهد که حداکثر حساسیت تغییرات ولتاژ در فرکانس های حدود ۱۰-۶ Hz قرار دارد، اما تشخیص (رویت) تغییرات شدید که کمتر از نیم - سیکل ادامه دارد، ثبت گردیده است. این موضوع نشان دهنده این است که جبران کننده ای که به منظور کاهش دادن چشمک زدن به کار می رود بایستی دارای پاسخ دقیق و سریع باشد.

توصیه های SCVD یکی از موسسه های برق (U.K. Electricity Council) به مقدار معینی از مقدار rms تغییرات ولتاژ ارتباط دارد. نتایج بررسی های گزارش شده در مرجع ۱۸ نشان می دهد که بر اساس شکایات رسیده «آستانه آزار» را می توان به صورت مقدار rms تغییرات ولتاژ که در ۱٪ از زمان از ۲۵٪ تجاوز نکند، تعریف کرد. این همان تغییرات در نقطه «کوپلاژ مشترک یا نقطه ارزیابی» است.

ماهیت تغییرات جریان کوره الکتریکی - تغییرات ولتاژ از تغییرات وسیع - و در مواردی تغییرات نامنظم - جریان های عبوری از امپدانس ورودی سیستم تا نقطه اندازه گیری، حاصل می شود. نمونه ای از تغییرات توان اکتیو و راکتیو کوره الکتریکی در شکل ۶ نشان داده شده است. به واسطه تاخیر جرقه زدن و مقاومت غیرخطی قوس، جریان کوره الکتریکی غیرمنظم است. همچنین به دلیل اینکه قوس الکتریکی تحت تاثیر نیروهای الکترومغناطیسی، جریان های جابجایی، حرکت الکترودها، جابجایی مواد مذاب (که در اکثر موارد شامل آهن های قراضه است) قرار دارد جریان مسیر نامنظمی خواهد داشت. جریان ها نامتعادل بوده و دارای اعوجاج و تغییرات زیادی - حتی در نیم سیکل های متوالی - هستند. تغییرات و اعوجاج جریان در خلال چند دقیقه اول سیکل ذوب شدن که الکترودهای گرافیت به سمت مواد رانده می شوند، بسیار شدید است. با افزایش مواد مذاب قوس الکتریکی کوتاهتر و پایدارتر می شود و در پریودهای «تصفیه» بعدی جریان ها آرام تر و با اعوجاج کمتر خواهند بود. با تغییر تپ ترانسفورماتور توان کوره در خلال این پریود به کسر کوچکی از توان در حال ذوب تنزل می یابد.



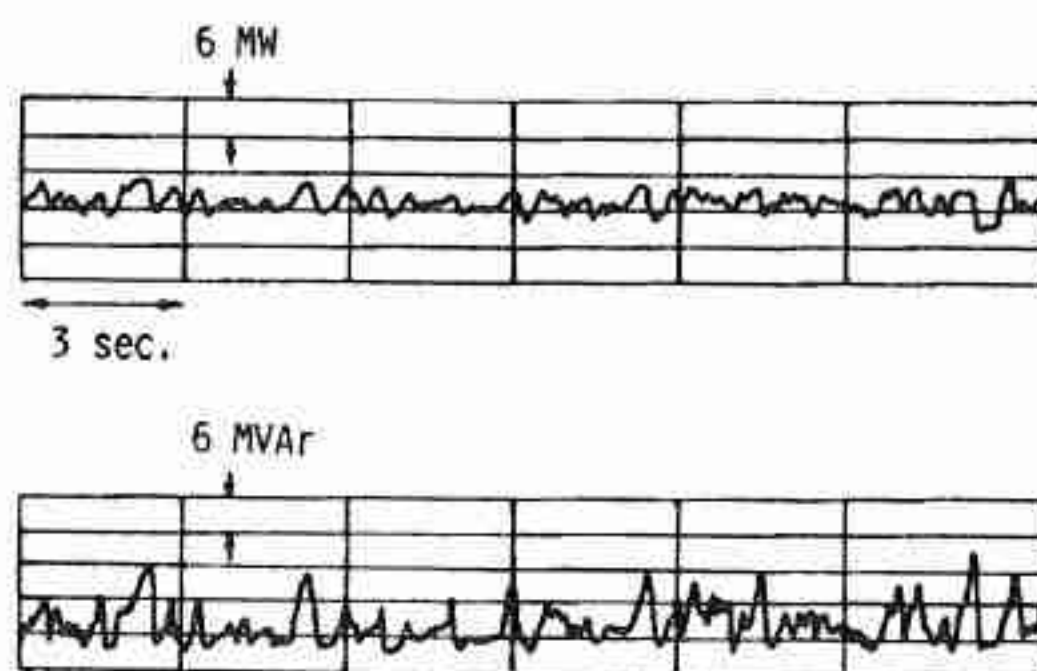
شکل ۴ - رابطه بین SCVD و چشمک زدن.



شکل ۵ - نمونه‌ای از پاسخ مرئی سیستم به چشمک زدن (فلیکر) لامپ روشنایی

با مراجعه به شکل ۶ و مثال بخش ۹-۱ که در آن کوره ۶۰ MW در ولتاژ الکتروود ۷۰۰ V با جریان قوس ۷۰۰۰ A در هر فاز کار می کند، می توان ایده ای از اندازه تغییرات جریان در یک کوره الکتریکی بزرگ را به دست آورد. توان راکتیو میانگین در حدود ۶۰ MVAR است و به منظور اصلاح کامل ضریب توان به بانک خازنی بزرگ احتیاج است.

تحلیل طیفی جریان اعوجاج یافته کوره الکتریکی منجر به مولفه های هارمونیک منفصل مرتبه - صحیح نخواهد شد، بلکه طیف پیوسته ای است (گرچه غیریکنواخت) که دامنه آن با فرکانس نسبت عکس دارد (۱۵ و ۲۴). با وجود این برای تعیین مقادیر نامی فیلترهای مربوط به کوره الکتریکی استخراج دامنه های طیف در مضارب صحیحی از فرکانس پایه اهمیت دارد. این فیلترها معمولاً برای فرکانس های مرتبه (به طور نمونه ۲، ۳، ۴، ۵، ۷) همنا می گردند. در جدول ۱ نتایج تحلیل فوریه دیجیتالی از جریان های کوره - که برای تعیین مقادیر نامی فیلتر به کار می روند - خلاصه شده است (۶).



شکل ۶ - تغییرات توان اکتیو و راکتیو یک کوره الکتریکی نمونه.

جدول ۱

نمایش محتوی هارمونیک جریان کوره الکتریکی
در دو مرحله سیکل ذوب شدن

جریان هارمونیک بر حسب درصد جریان پایه					
شرایط کوره	مرتبه هارمونیک				
	7	5	4	3	2
ذوب شدن اولیه (قوس فعال)	3.1	4.2	2.5	5.8	7.7
تصفیه شدن (قوس پایدار)		2.1		2.0	

۹-۳-۲ روش‌های جبران چشمک زدن

اگر چنانچه SCVD یک تاسیسات کوره الکتریکی طراحی شده، در نواحی مرزی یا قابل اعتراض شکل ۴ قرار گیرد و یا اگر چنانچه از تاسیسات موجود شکایات چشمک زدن رسیده باشد، آنگاه بایستی بین کاهش دادن بار، تقویت کردن سیستم تغذیه یا نصب تجهیزات جبران‌کننده یکی را انتخاب کرد.

سیستم تغذیه را می‌توان با انشعاب گرفتن از سطوح ولتاژ بالاتر و یا نصب خطوط بیشتر و یا هر دو، تقویت کرد. البته چنین راه حلی مستلزم هزینه زیادی است، اما وقتی توسعه آینده کارخانه‌های فولاد یا بارهای مجاور آن در نظر گرفته می‌شود، اغلب این راه حل مورد قبول واقع می‌شود. هنگامی که قرار است از جبران‌کننده استفاده گردد، می‌توان یکی از انواع جبران‌کننده‌ها را انتخاب کرد. مزایا و معایب عملی انواع مختلف جبران‌کننده در جدول ۲ به طور خلاصه آمده است، اصول کار مهمترین انواع جدید در بخش‌های ۹-۳ و ۹-۴ مورد بحث قرار گرفته است.

مفهوم جبران‌کننده - توانایی جبران‌کننده در کاهش چشمک زدن ولتاژ به نسبت جبران^۱ و سرعت پاسخ^۲ بستگی دارد و به شرح زیر تعریف می‌شوند:

(الف) نسبت جبران - نسبت جبران به صورت زیر تعریف می‌شود

$$C = \frac{\text{توان راکتیو بخش قابل کنترل جبران‌کننده}}{\text{تغییرات توان راکتیو کوره الکتریکی}} \quad (۴)$$

قسمت قابل کنترل جبران‌کننده از خازن‌های موازی ثابت که ممکن است نقش بهبود ضریب توان را هم عهده‌دار باشند، مجزا است. داشتن $C > 1$ ، به خصوص وقتی که جبران‌کننده برای تصحیح عدم تعادل به کار می‌رود، چندان غیرعادی نیست. دلیل آن این است که نوسان توان راکتیو جبران‌کننده مورد نیاز هر فاز در هنگام اتصال کوتاه دو فاز دیگر، از نوسان توان راکتیو هر فاز در شرایط متعادل، بیشتر است. در مواقعی جبران‌کننده «فوق مقدار نامی^۳» است (یعنی $C > 1$) تا اینکه افت ولتاژ در ترانسفورماتور تغذیه اصلی را جبران و پایداری ولتاژ را در PCC بهبود بخشد.

جدول ۲

مزایا و معایب انواع مختلف جبران کننده چشمک زدن

معایب	مزایا	وسیله جبران کننده چشمک زدن یا روش جبران
برای اصلاح ضریب توان به خازن موازی نیاز دارد تولید هارمونیک می کند	پاسخ سریع عملکرد مستقل فازها	راکتور تایریستور کنترل
سرعت پاسخ محدود است	بدون تولید هارمونیک بی نیاز از راکتور عملکرد مستقل فازها	خازن تایریستور سوییچ
برای اصلاح ضریب توان به خازن موازی بزرگ نیاز دارد تولید هارمونیک می کند فقط برای یک کوره کاربرد دارد	دارای پاسخ سریع که منجر به کاهش فوق العاده چشمک زدن می شود عملکرد مستقل فازها ساختمانی مشابه ترانسفورماتور	راکتور انشعابی / راکتور قابل اشباع
برای اصلاح ضریب توان به خازن موازی نیاز دارد گذرای ناشی از انرژی دار کردن فازها بطور مستقل کنترل نمی شوند	پاسخ سریع هارمونیک تولید شده قابل اغماض است ساختمانی مشابه ترانسفورماتور	راکتور قابل اشباع جبران شده هارمونیکی
به تعمیر و نگهداری منظم نیاز دارد حتی با حضور راکتور ضربه گیر توانایی کاهش چشمک زدن آن محدود است	—	کندانسور سنکرون
هزینه زیاد	قابلیت اعتماد بالا امکان توسعه تاسیسات کوره در آینده	افزایش سطح اتصال کوتاه سیستم تغذیه

(ب) سرعت پاسخ - تغییرات توان راکتیو $\Delta Q_p(t)$ کوره الکتریکی و پاسخ جبران کننده به این تغییرات، حوادثی لحظه ای نیستند، بلکه هر دو در طول زمان ادامه دارند. به طور کلی پاسخ جبران کننده $Q_p(t)$ و $\Delta Q_p(t)$ شکل یکسانی ندارند و در هر موردی منحصر به فرد نبوده و به تعریف توان راکتیو و روش اندازه گیری آن وابسته اند. در بعضی موارد $Q_p(t)$ شامل فیلترهای هارمونیک می باشد. این عوامل سبب می شوند که به سختی بتوان پاسخ جبران کننده را بر حسب عددی واحد تعریف کرد و در تعبیر اعداد نسبت داده شده به زمان پاسخ یا حتی پاسخ فرکانس باید دقت زیادی نمود.

علی رغم این مشکلات، بررسی اثر تاخیر پاسخ جبران کننده از طریق یک روش عمومی و تحت

شرایطی ایده‌ال - که در آن توان راکتیو کوره الکتریکی به طور سینوسی در فرکانس واحد تغییر می‌کند - سودمند خواهد بود:

$$\Delta Q_p(t) = \Delta \hat{Q}_p \sin \omega_m t \quad (5)$$

فرض می‌شود که پاسخ توان راکتیو جبران‌کننده $Q_p(t)$ نیز سینوسی است و دامنه آن برابر $C\Delta \hat{Q}_p$ و به اندازه γ از آن عقب‌تر است. بنابراین

$$Q_p(t) = C\Delta \hat{Q}_p \sin (\omega_m t - \gamma) \quad (6)$$

به طور کلی C و γ هر دو تابعی از فرکانس تغییرات ω_m و نوع جبران‌کننده هستند. پس از عمل جبران‌سازی، تغییرات توان راکتیو منتهی به برابر است با

$$Q_e = \Delta \hat{Q}_p(t) - Q_p(t) \quad (7)$$

ارتباط بین $Q_e(t)$ ، $Q_p(t)$ و $\Delta Q_p(t)$ در دیاگرام فازوری شکل ۷ نشان داده شده است. از روی این دیاگرام می‌توان نسبت کاهش چشمک زدن، F را به صورت زیر تعریف کرد.

$$F = \left| \frac{\Delta Q_p}{Q_e} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + C^2 - 2C \cos \gamma}} \quad (9)$$

البته نسبت کاهش چشمک زدن F تابعی از فرکانس تغییرات ω_m است. نسبت کاهش چشمک زدن F در شکل ۷ ب به صورت تابعی از زاویه γ برای مقادیر مختلف C رسم شده است. این منحنی‌ها برای تغییرات در یک فرکانس به کار برده می‌شوند. ملاحظه می‌شود که با $C = 100\%$ برای $\gamma = \pi/3$ بهبودی در چشمک زدن حاصل نمی‌شود و برای $\gamma > \pi/3$ ، $F < 1$ است یعنی جبران‌کننده موجب تقویت چشمک زدن می‌گردد. نسبت کاهش چشمک زدن $F = 4$ در فرکانس تغییرات 10 Hz به طور نمونه بیانگر نیاز جبران‌سازی است، و با $C = 100\%$ لازم است که (14°) رادیان $\gamma < 0.08$ باشد. اگر چنانچه تاخیر جبران‌کننده با تاخیر زمانی ثابت T نشان داده شود، آنگاه

$$\gamma = \omega_m T = 2\pi f_m T \quad (9)$$

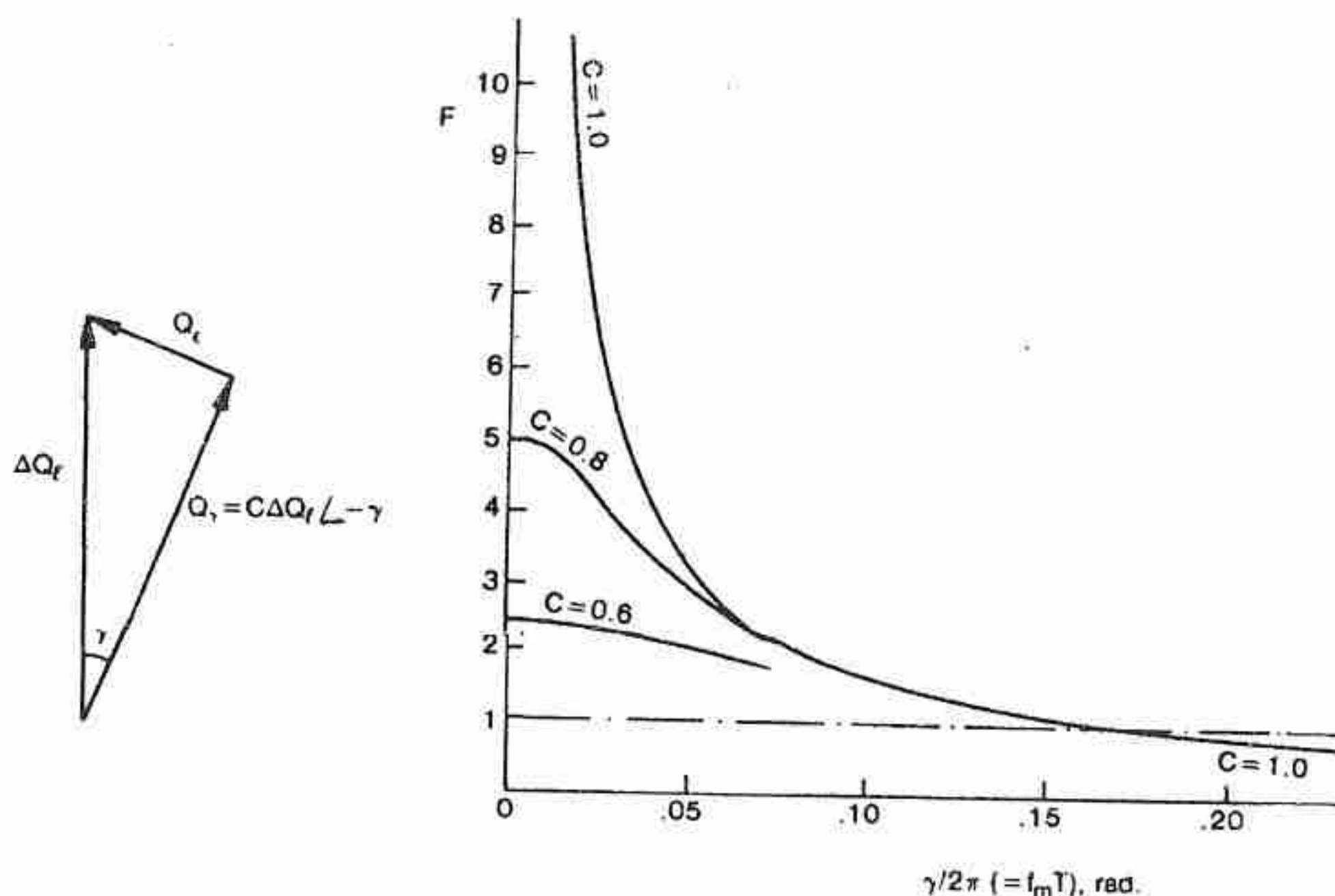
و برای اینکه در فرکانس 10 Hz نسبت کاهش چشمک زدن $F = 4$ باشد لازم است $t < 4 \text{ msec}$ باشد (با $C = 100\%$).

منحنی‌های دیگر در شکل ۷ پ نشان می‌دهند که برای یک ضریب کاهش چشمک زدن معین، بایستی بین اندازه جبران‌کننده (C) و سرعت پاسخ آن مصالحه‌ای صورت گیرد. ممکن است لازم باشد که اندازه یک جبران‌کننده کند را بزرگتر کرد تا بتواند رفتار قابل مقایسه‌ای با جبران‌کننده سریع

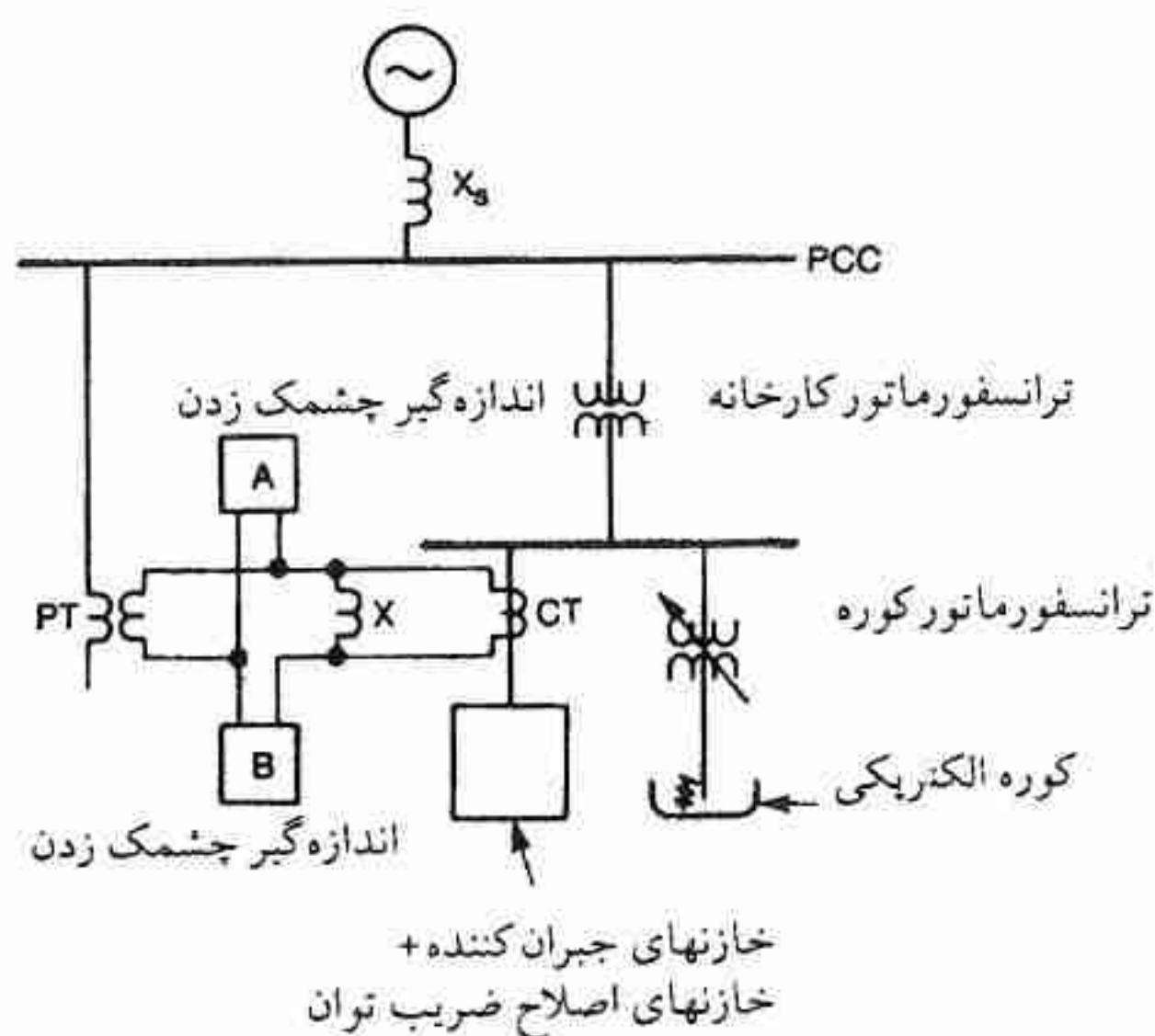
پیدا کند.

تغییرات سریع توان راکتیو یک کوره الکتریکی واقعی را هرگز نمی توان با فرکانس تغییرات تکی (واحد) مشخص کرد و پاسخ جبران کننده کوره الکتریکی را نمی توان کاملاً بر حسب تاخیر پاسخ تکی (واحد) T تعریف کرد. با وجود این ضریب کاهش چشمک زدن، ضریب مفیدی برای ارزیابی رفتار جبران کننده است و در نوشته ها همواره در کنار تعاریف متعدد دیگر - که تعدادی در ارتباط با معیار SCVD است و تعدادی مربوط به کاربرد نوع به خصوصی از وسیله اندازه گیری چشمک زدن است - بیان گردیده است. این مساله با آنچه که در معادله ۸ به عنوان تعریف تئوریک ساده بیان شده است، تفاوت دارد. بیان تعاریف تئوریک بهتری نیز امکان پذیر است.

در تلاش برای از بین بردن کامل مساله چشمک زدن در کوره الکتریکی، با استفاده از مدار شکل ۸ چشمک زدن به طور همزمان در حضور و غیاب جبران کننده اندازه گیری شده است. (به مرجع ۲۲ مراجعه شود). البته در اینجا فرض می شود که جریان های کوره الکتریکی در حضور و غیاب جبران کننده به یک میزان دارای اعوجاج و تغییرات هستند.



شکل ۷ - (الف) اثر نسبت جبران C و تاخیر γ در جبران تغییرات توان راکتیو در یک فرکانس تغییرات تکی (واحد) (ب) نسبت کاهش چشمک زدن F بصورت تابعی از زاویه تاخیر γ با $C=1$



شکل ۸ - مدار اندازه گیری چشمک زدن در حضور و غیاب جبران کننده. راکتانس X واقع در ثانویه ترانسفورماتور ولتاژی را ایجاد می کند که معرف اثر جبران کننده بر ولتاژ PCC می باشد. این ولتاژ از ولتاژ ورودی اندازه گیر چشمک زدن B کم می شود.

۹-۳-۳ انواع جبران کننده

در اینجا دو روش جبران سازی چشمک زدن تشریح خواهد شد. هر دو روش از روش جبران سازی قدیمی نوع کندانسور سنکرون - که در اینجا تشریح نمی شود - بهتر است. (به مراجع ۱۹، ۲۰ و جدول ۲ مراجعه شود).

جبران‌کننده راکتور قابل اشباع از اولین جبران‌کننده‌های سریع جدید بود که به طور وسیع کاربرد پیدا کرد. این جبران‌کننده اولین بار در سال ۱۹۶۴ توسط Friedlander معرفی شد (۸) و به دو شکل مختلف عرضه گردید: یکی آرایش قدیمی تر راکتور انشعابی^۱ و دیگری جبران‌کننده باس بار^۲ است که در آن از راکتور چند فازه قابل اشباع جبران شده از نوع سه برابر کننده سه گانه^۳ یا سه برابر کننده دو گانه^۴ استفاده شده است (۹، ۳۹، ۴۰). آرایش راکتور - انشعابی اساساً یک وسیله تک فاز است و گرچه دارای پاسخ سریع است لیکن به عناصر سری لازم دارد که کاربرد آن را در کوره الکتریکی چند فازه نامناسب می‌نماید. پاسخ سریع آن به بهای یک فیلتر هارمونیک بزرگ حاصل می‌شود.

3- Treble - Tripler

4- Twin - Tripler

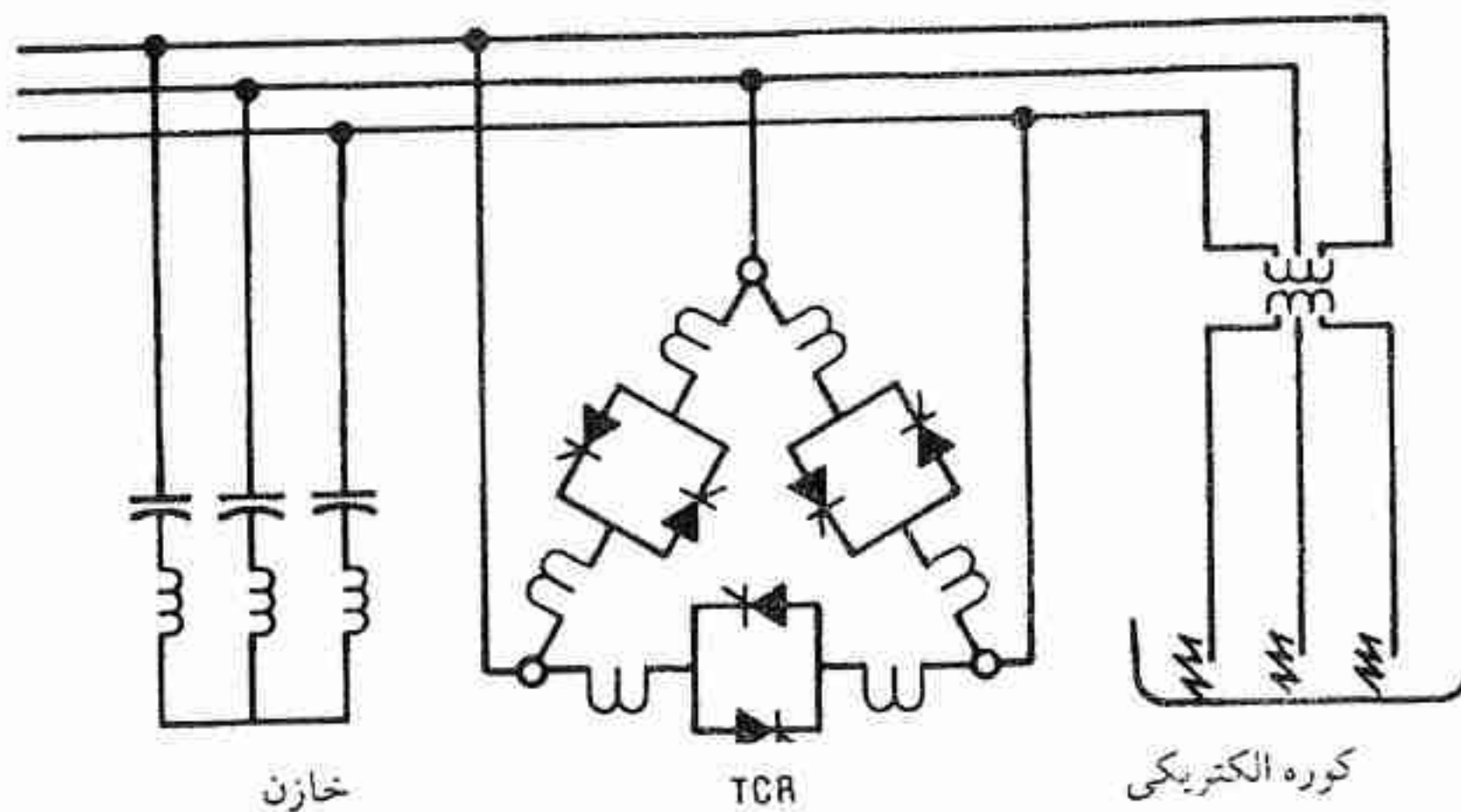
در روش دوم جبران سازی چشمک زدن از جبران کننده راکتورِ تایریستور کنترل (TCR) یا خازن تایریستور سوئیچ (TSC) استفاده می‌گردد. این (جبران کننده‌ها) مشابه کندانسور سنکرون و جبران کننده راکتور قابل اشباع از نوع باس بار، به موازات کوره الکتریکی (یا کوره‌های الکتریکی) در باس بار کوره متصل می‌گردند. به بیان ساده اصول کار به این قرار است که توان راکتیو (یا جریان) کوره الکتریکی با سرعتی که امکان پذیر باشد اندازه گیری شده و جبران کننده به طریقی کنترل می‌شود که مجموع توان راکتیو کوره الکتریکی و توان راکتیو جبران کننده تا سر حد امکان ثابت بماند.

برای حذف هارمونیک‌های کوره الکتریکی اغلب کاربرد فیلترهای هارمونیک ضرورت دارد. در حقیقت جبران کننده فقط نقش جبران توان راکتیو و تثبیت ولتاژ در فرکانس - پایه را بر عهده دارد. علاوه بر هارمونیک‌های تولید شده توسط کوره الکتریکی، جبران کننده‌های از نوع TCR و راکتور قابل اشباع - انشعابی نیز تولید هارمونیک می‌نمایند. بنابراین وظیفه فیلترهای هارمونیک بر حسب نوع جبران کننده تغییر خواهد کرد. همچنین قویا به مشخصه‌های پاسخ - فرکانس سیستم تغذیه بستگی دارد.

روش سوم جبران چشمک زدن بر جبران لحظه‌ای جریان راکتیو - که شامل جریان‌های هارمونیک می‌باشد - استوار می‌باشد (۳۳). یکی از وسایلی که برای این روش پیشنهاد شده است عبارت از کنترلر جریان تفرانس - باند^۱ است که با کنترل آن تمامی مولفه‌های جریان کوره - به استثناء مولفه همفاز با فرکانس پایه که برای تولید توان مفید کوره لازم است - فراهم می‌گردد. گرچه روشی مستقیم به نظر می‌رسد لیکن به تکنولوژی الکترونیک قدرت مناسب همراه با تعداد زیادی سوئیچ‌های تایریستوری نیاز دارد. این روش به طور گسترده استفاده نشده است و در اینجا نیز تشریح نخواهد شد.

۹-۴ جبران کننده‌های تایریستور کنترل

عنصر اصلی تمام جبران کننده‌های تایریستور کنترل، خازن و یا راکتوری است که مطابق شکل ۹ و ۱۰ با تایریستور سری شده است. سوسپتانس موثر فرکانس - پایه به وسیله عمل سوئیچینگ کنترل می‌شود، سیگنال‌های کنترل به فرمان (گیت) تایریستورها اعمال می‌گردند. وقتی این جبران کننده به طور موازی با کوره الکتریکی متصل می‌گردد، سوسپتانس قابل کنترل با تولید و یا جذب توان راکتیو سعی می‌کند که تا سر حد امکان ترکیب توان راکتیو کوره و جبران کننده را ثابت نگاه دارد. در سیستمی



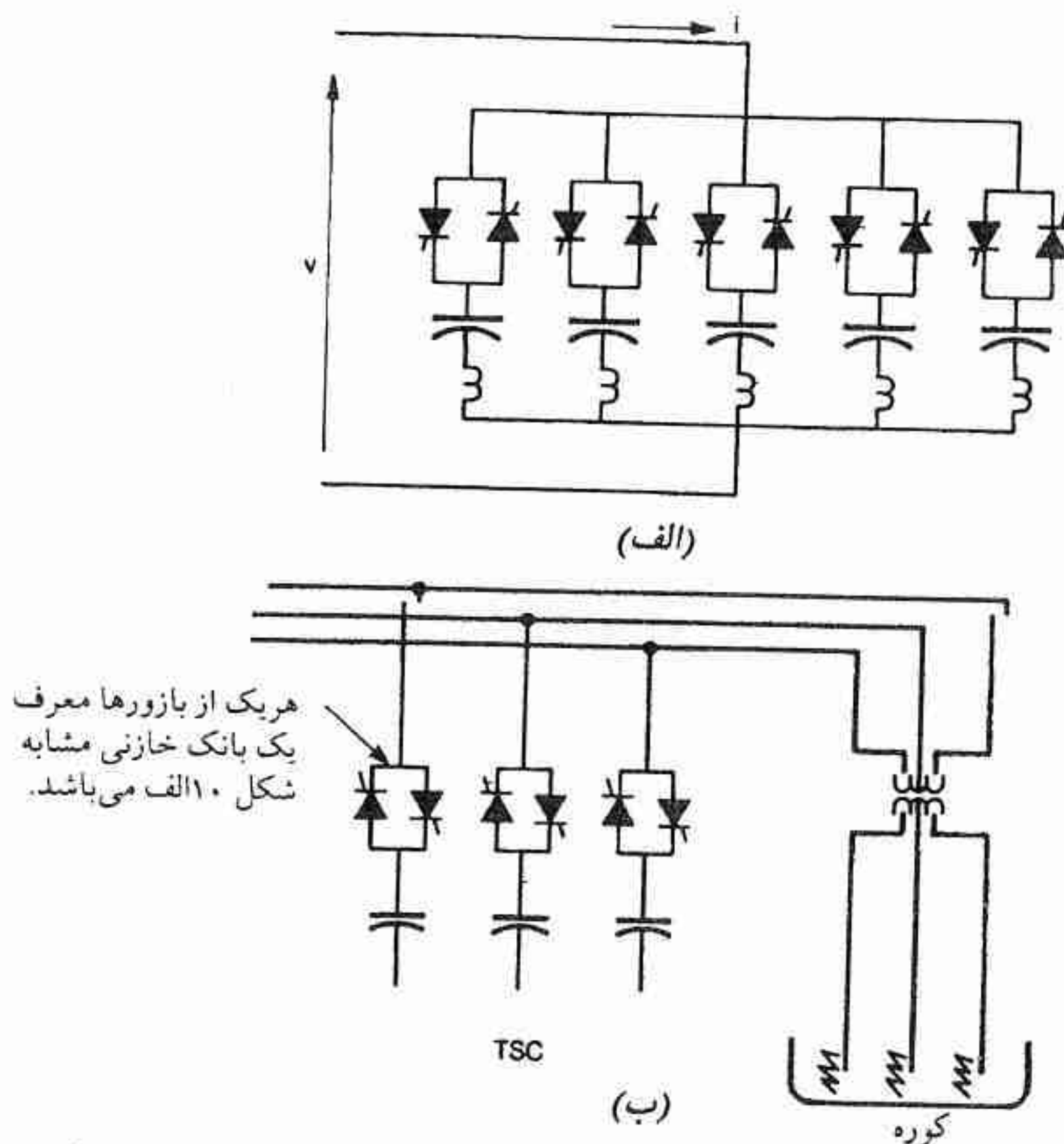
شکل ۹ - آرایش کلی یک جبران کننده راکتور و تایریستور کنترل که به یک کوره الکتریکی اعمال شده است. توجه اینکه راکتورها با خازنهای «موازی تصحیح کننده ضریب توان برای فرکانسهای مرتبه پایین هم‌نوا می‌گردند».

که با TCR جبران شده است معمولاً این مقدار ثابت توان راکتیو با حداکثر پیک‌های تکراری توان راکتیو کوره الکتریکی برابر است و ضریب توان کلی به وسیله خازنهای موازی تصحیح می‌گردد. این روش به روش جبران «غیرمستقیم» معروف است. در سیستمی که با TSC جبران شده است مقدار ثابت توان راکتیو تقریباً صفر است، و TSC مقدار توان راکتیو مصرفی کوره را تأمین می‌کند. با این روش به طور اتوماتیک تغییرات ولتاژ در نقطه اتصال، جبران‌کننده و نقاط قبل از آن کاهش می‌یابد. از خازن‌هایی که به موازات جبران‌کننده قرار دارند می‌توان برای تنظیم ضریب توان میانگین کلی استفاده کرد.

۹-۴-۱ ارتباط بین توان راکتیو جبران‌کننده و زاویه آتش تایریستور

درک اینکه چگونه توان راکتیو جبران‌کننده به وسیله زاویه‌های آتش تایریستورها تعیین می‌گردد، حائز اهمیت است. خازن تایریستور سوئیچ (TSC) در هر فاز خود متشکل از واحدهای خازنی موازی کوچکتر است، که هر واحد خازنی تایریستورهای مختص به خود دارد (شکل ۱۰).

تقاضای توان راکتیو با سوئیچ کردن (یا قطع) تعداد مناسبی از واحدهای خازنی - بر طبق رابطه نشان داده شده در شکل ۲۶ فصل ۴ - حاصل می‌شود. شکل موج جریان و ولتاژ در شرایط سوئیچ کردن ایده‌آل یک واحد خازنی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در حالتی که تایریستور قطع می‌باشد



شکل ۱۰ - (الف) اصول جبران‌کننده TSC (ب) آرایش عمومی یک جبران‌کننده TSC که به کوره الکتریکی اعمال شده است. به راکتورهای قابل تنظیم (همنوابی) توجه شود.

خازن به مقدار پیک ولتاژ مثبت یا منفی شارژ گردیده است زیرا خازن در نقطه صفر جریان از مدار قطع شده است. برای کاهش جریان گذرا بایستی وقتی که ولتاژ ac با مقدار ولتاژ خازن برابر (یا خیلی نزدیک به آن) است، خازن را به مدار سوئیچ کرد. و این حالت فقط یک بار در هر پریود اتفاق می‌افتد، بنابراین مدار کنترل همواره حداقل یک پریود کامل را در اختیار دارد که در طول آن می‌تواند تصمیم‌گیری نماید که آیا یک واحد خازنی را وارد مدار نماید یا خیر. همین‌طور مدار کنترل همواره حداقل یک نیم پریود را در اختیار دارد که در آن می‌تواند تصمیم‌گیری نماید که آیا یک واحد خازنی در حال هدایت را (با قطع پالس‌های گیت تایریستور مربوط به آن) از مدار قطع نماید یا خیر. برای به دست آوردن پاسخ سریع این تصمیمات (که در برگیرنده اندازه‌گیری توان راکتیو مورد نیاز و هماهنگی

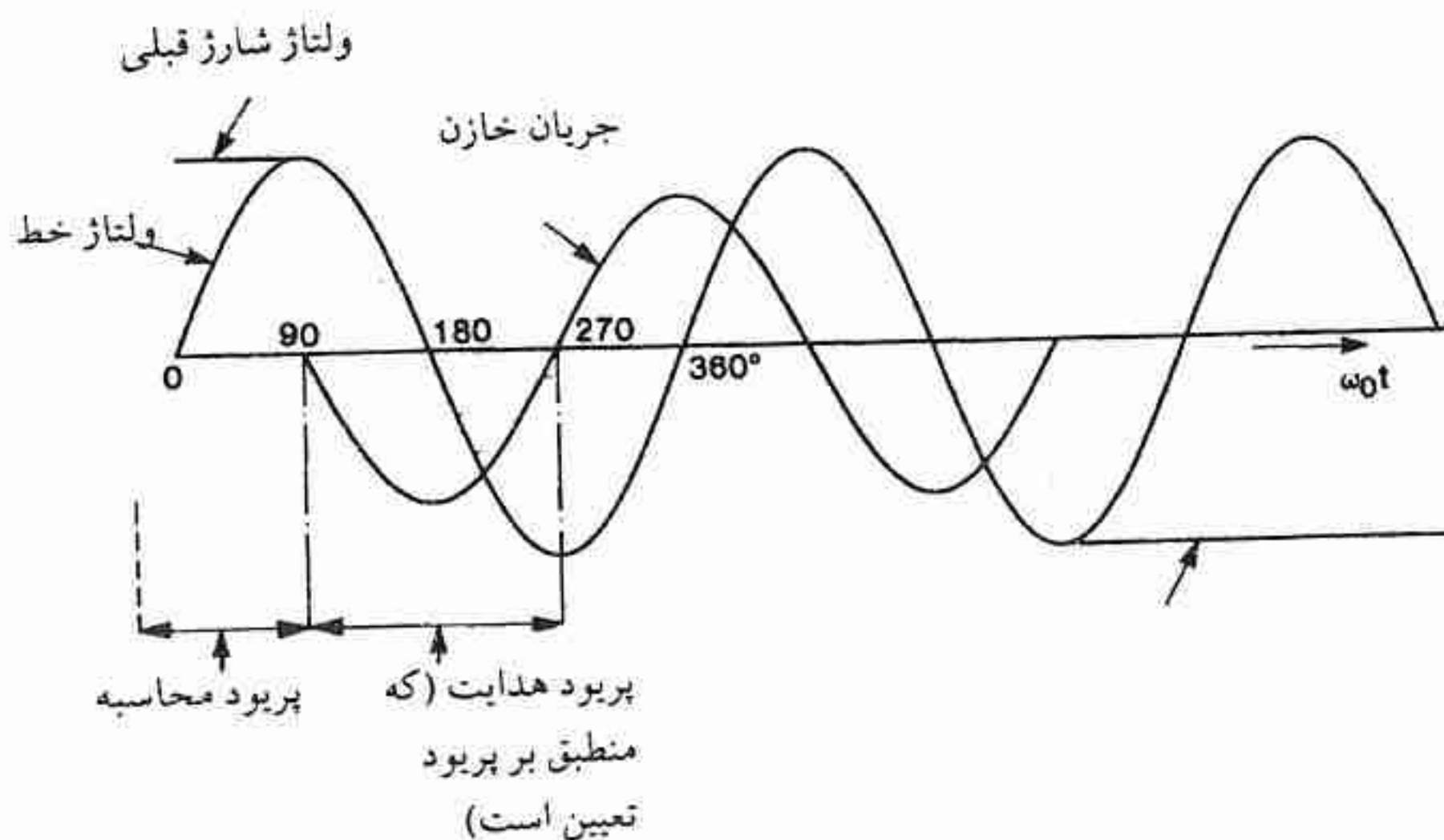
وضعیت تایریستورها و خازن‌ها است) معمولاً در چندین میلی ثانیه آخر زمان انتظار موجود انجام می‌گیرد.

هنگامی که تایریستور آتش می‌گردد هدایت خود را تا نقطه صفر طبیعی بعدی جریان ادامه می‌دهد. اگر در خارج از TSC هارمونیک تولید نگردد پریود هدایت همواره مجموعه‌ای از نیم

پریودهای کامل خواهد بود و TSC خودش تولید هارمونیک نمی‌کند. با اعمال پالس به تایریستور سبب می‌شود که واحد خازنی مربوطه در نیم پریود بعدی هدایت نماید و بنابراین طبق تعریف زیرتوان راکتیو جبران‌کننده تولید می‌کند.

$$q = \frac{1}{T} \int_{T/2} v(t) i_c(t) dt \quad (10)$$

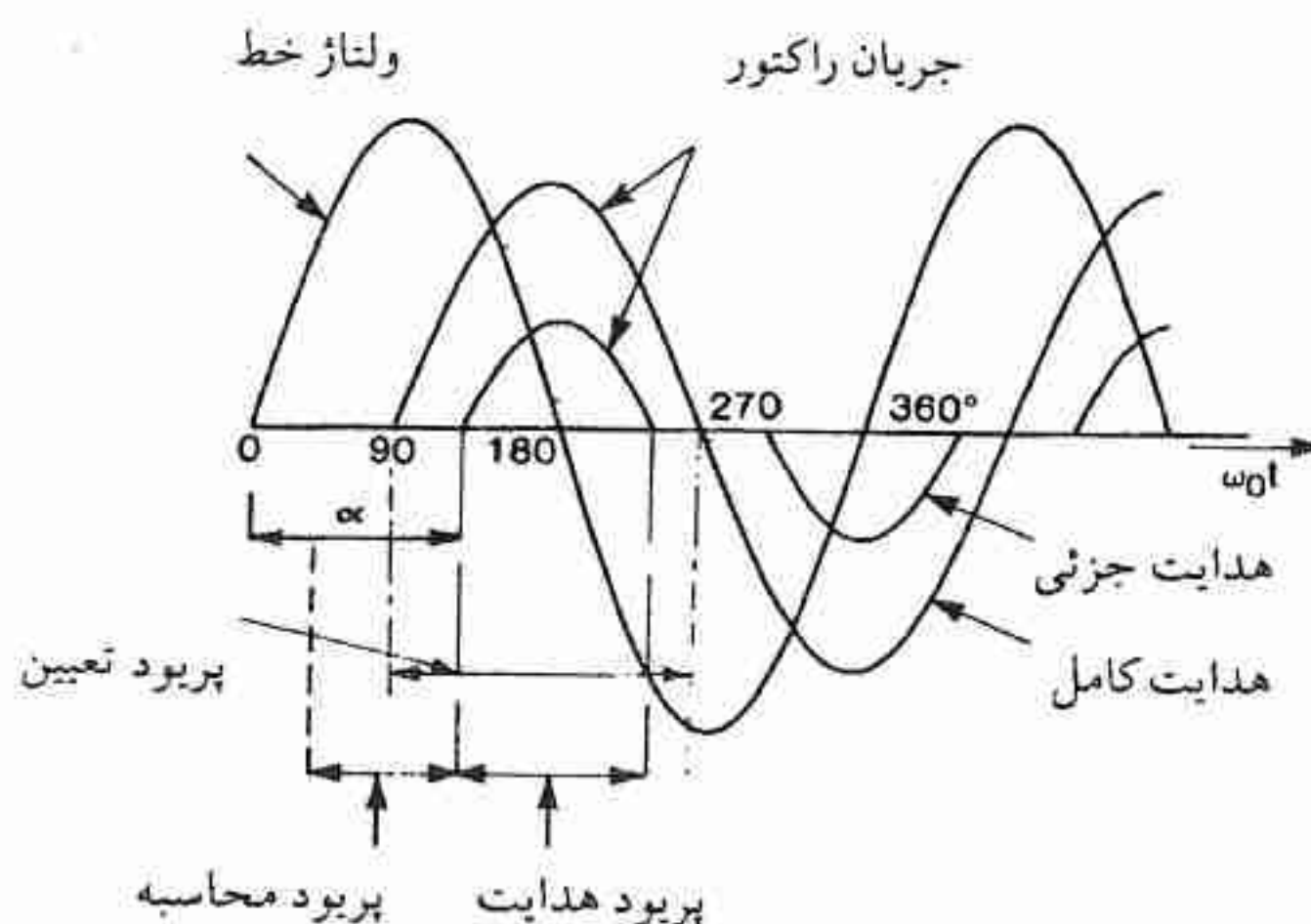
این معادله به این حقیقت تاکید دارد که پاسخ توان راکتیو لحظه‌ای نبوده بلکه بر حسب میانگین که در یک فاصله زمانی به دست می‌آید تعریف می‌شود. به واسطه اینکه پریود انتگرال‌گیری پریود دقیقی نیست هارمونیک موجود در v و i_c این نتیجه را تغییر می‌دهد. اثر کلی هارمونیک بایستی بقدری کوچک باشد که اجازه دهد سیستم کنترل تعداد صحیحی از خازن‌ها را به مدار سوئیچ نماید تا نیازمندی توان راکتیو «پایه» برآورده شود.



شکل ۱۱ - شکل موج جریان و ولتاژ در خازن تایریستور سوچ در شرایط ایده‌آل.

پریود انتگرال‌گیری در معادله ۱۰ را می‌توان به پریود تعیین^۱ توان راکتیو جبران‌کننده نام‌گذاری کرد. تصمیم‌گیری در مورد اعمال پالس آتش نبایستی دیرتر از شروع پریود هدایت^۲ صورت گیرد. در جبران‌کننده TSC پریود هدایت بر پریود تعیین منطبق است. بنابراین پریود «محاسبه^۳» (که در خلال آن توان راکتیو مورد نیاز اندازه‌گیری شده و تصمیم آتش کردن و یا نکردن تایریستور اتخاذ می‌گردد) همواره بایستی با شروع پریود تعیین کامل گردد.

جبران‌کننده راکتور تایریستور کنترل (TCR) در هر فاز شامل راکتوری است که به وسیله یک سوئیچ تایریستوری کنترل می‌شود (شکل ۹). و توان راکتیو مورد نیاز به وسیله کنترل پریود هدایت در هر نیم سیکل (مطابق شکل ۱۲) صورت می‌گیرد. بر حسب اینکه توان راکتیو مورد نیاز کمتر یا بیشتر باشد پالس‌های آتش دیرتر یا زودتر (نسبت به پیک ولتاژ) به تایریستور اعمال می‌گردند. این روش کنترل به کنترل فاز^۴ موسوم است.^۵ مشابه TSC هدایت تایریستور در نقطه صفر طبیعی جریان متوقف می‌گردد. از آنجایی که در لحظه صفر جریان راکتور بدون انرژی ذخیر شده باقی می‌ماند می‌توان آن را مجدداً بدون گذرا وارد مدار نمود. البته برای اینکه بتوان تعادل بین زوج تایریستور معکوس را حفظ نموده و از مولفه جریان dc و هارمونیک‌های زوج اجتناب کرد، لازم است که پالس‌های آتش در پریود ۹۰ درجه (نسبت به پیک ولتاژ) محدود گردند یعنی $90^\circ < \alpha < 180^\circ$.



شکل ۱۲ - شکل موج جریان و ولتاژ در راکتور تایریستور کنترل

1- Determining Interval

2- Conducting Interval

3- Compute Interval

4- Phase Control

۵- سوئیچ کردن خازن‌ها در جبران‌کننده TSC گاهی «کنترل سیکل تمام» یا «کنترل نیم سیکل تمام» نامیده می‌شود.

جریان در مدار کنترل فاز شامل هارمونیک است که بایستی با اتصال موازی فیلترها حذف گردد.

مولفه پایه جریان I_{L1} توسط رابطه زیر به زاویه آتش α ارتباط دارد

$$I_{L1} = \frac{V}{\pi \omega L} (2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha) \quad (11)$$

که در آن L اندوکتانس راکتور و ω فرکانس زاویه‌ای پایه است. این رابطه در شکل ۷ فصل ۴ رسم شده است. I_{L1} جریانی است که مقدار توان راکتیو تحویلی توسط جبران‌کننده از روی آن - طبق رابطه زیر - تعیین می‌گردد.

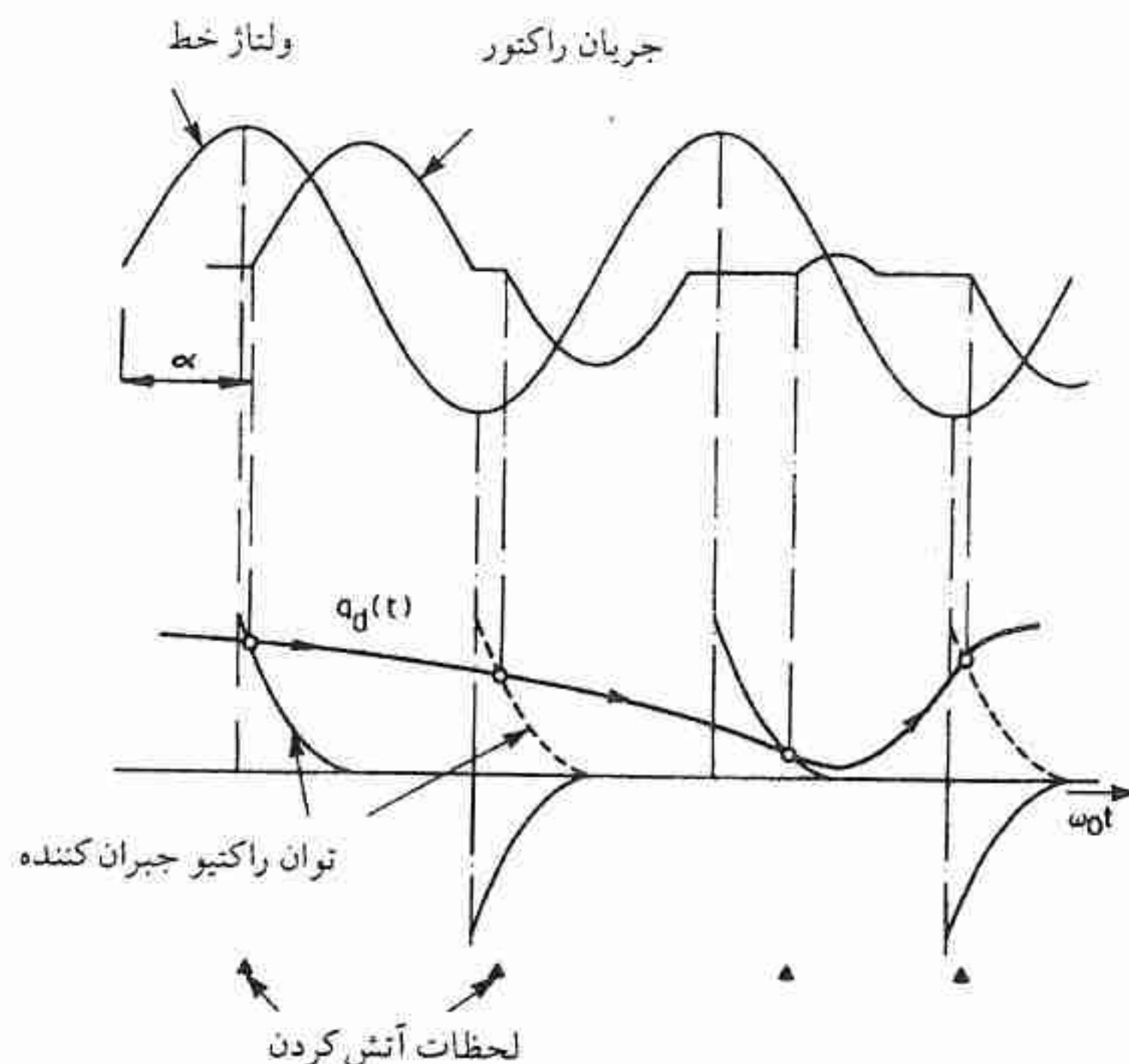
$$q = VI_{L1} \quad (12)$$

بایستی این مقدار مجدداً بر حسب مقدار میانگین در فاصله نیم‌پریود تفسیر شود، زیرا I_{L1} در معادله ۱۱ به وسیله تحلیل فوریه مشخص شده است.

$$I_{L1} = \frac{2}{\pi} \int_{T/2} i_L(\alpha) \sin \omega t \, dt \quad (13)$$

اعمال پالس آتش به سوئیچ تایریستوری در زاویه α موجب هدایت راکتور تا نقطه صفر بعدی جریان می‌گردد و در نتیجه بر طبق معادلات ۱۲ و ۱۳ توان راکتیو جبران تحویل داده می‌شود. پریود انتگرال‌گیری (یعنی، پریود تعیین) در معادله ۱۳ از روی شکل موج ولتاژ بین ۹۰ درجه تا ۱۸۰ درجه است، و در زاویه غیر از $\alpha = 90^\circ$ پریود تعیین قبل از اعمال پالس آتش شروع می‌شود. به عبارت دیگر، پریود هدایت معمولاً از پریود تعیین کوتاه‌تر است و از آنجایی که هر دو پریود در حول نقطه ۱۸۰ درجه موج ولتاژ تقارن دارند، پالس آتش معمولاً پس از شروع پریود تعیین اعمال می‌گردد. این موضوع باعث امکان توسعه پریود «محاسبه» از شروع پریود تعیین تا شروع پریود هدایت گشته و سرعت پاسخ TCR را در مقابل توان راکتیو پایه مورد نیاز بهبود می‌بخشد.

زاویه آتش α را می‌توان به وسیله مدار محاسباتی که مطابق شکل ۱۳ عمل می‌کند، معین کرد. در هر پیک ولتاژ «توان راکتیو جبران‌کننده مورد نیاز» طبق مسیر مشخص شده در شکل شروع می‌شود. این مسیر توسط معادله ۱۱ تعریف می‌شود که در آن α نسبت به زمان به طور خطی افزایش می‌یابد. منحنی‌ای که با $q_d(t)$ مشخص شده است سیگنال پیوسته‌ای است که معرف توان راکتیو محاسبه شده‌ای است که برای جبران بار لازم است (بعداً بحث خواهد شد). لحظه تقاطع دو منحنی به وسیله مقایسه‌کننده تشخیص داده شده و پالس آتش به تایریستور موردنظر اعمال می‌گردد. اینکه در هر سوئیچ الکتریکی بایستی کدامیک از دو تایریستور موازی معکوس آتش گردد، توسط مدار منطقی تعیین می‌شود.



شکل ۱۳ - اصول مدار محاسباتی برای تعیین زاویه آتش تایریستور

۹-۴-۲ تعیین توان راکتیو مورد نیاز

گرچه TCR و TSC از نقطه نظر زمان و روشی که در آن برای اعمال پالس آتش اتخاذ تصمیم می‌گردد، متفاوت هستند، اما هر دو به سیگنالی که دقیقاً معرف جدیدترین مقدار توان راکتیو مورد نیاز «پایه» یا «جابجایی» باشد، نیازمندند. این توان راکتیو برای هر فاز توسط رابطه زیر تعریف می‌شود، که روشی مبتنی بر «میانگین» است.

$$q_p(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t v(t) i(t - T/4) dt \quad (14)$$

می‌توان این رابطه را با یک مدار محاسباتی ایجاد کرد که منجر به سیگنال پیوسته‌ای گردد که معرف توان راکتیو در پریودی که در لحظه t به پایان رسیده است، باشد. (در عمل ممکن است عبارت پیچیده‌تر از آنچه در اینجا نشان داده شده است، باشد به خصوص وقتی که از جبران‌کننده انتظار داشته باشیم که عدم تعادل فازها را نیز تصحیح نماید، به فصل ۱ مراجعه شود). فاصله زمانی انتگرال‌گیری

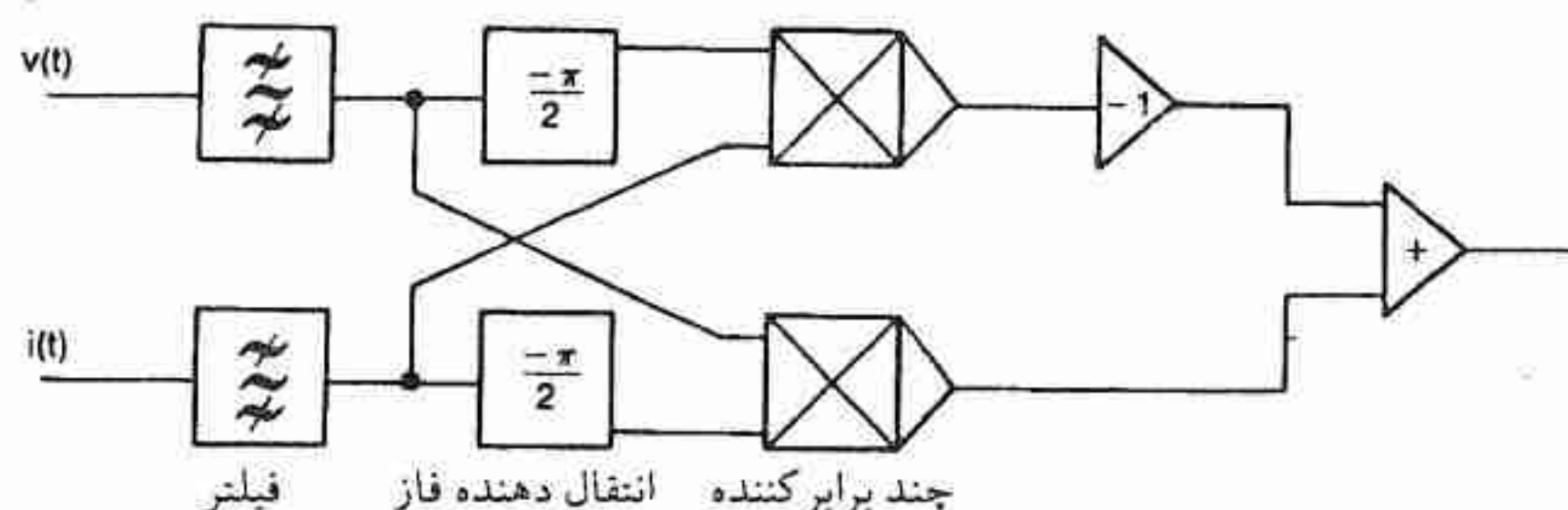
دقیقا یک پریود است. برای فاصله زمانی انتگرال‌گیری غیر از این زمان، $q_p(t)$ توسط مولفه‌های هارمونیک جریان i (هارمونیک‌های ولتاژ قابل اغماض است) خراب شده و $q_p(t)$ مفهوم توان راکتیو «پایه» را از دست می‌دهد. این مطلوب ما نخواهد بود زیرا جبران‌کننده فقط نقش جبران توان راکتیو «پایه» را بر عهده دارد و هارمونیک‌ها یا «توان راکتیو هارمونیک» توسط فیلترهایی که به طور موازی به مدار متصل می‌گردند، جذب می‌شوند. البته در عمل مشخص شده است که فاصله زمانی انتگرال‌گیری یک پریود برای کاهش قابل قبول چشمک زدن بسیار طولانی است و جبران‌کننده‌هایی که بر اساس روش «میانگین» کار می‌کنند بایستی زمان انتگرال‌گیری کوتاهتری را انتخاب نمایند که با تلاش در جهت بهینه کردن توانایی کاهش چشمک زدن، به خاطر سرعت، دقت قربانی می‌شود.

روش دیگری که برای تعیین $q_p(t)$ به کار می‌رود بر رابطه زیر استوار است،

$$\begin{aligned} \hat{v} \hat{i}_p \sin \phi &= -\hat{v} \sin \omega t \cdot \hat{i}_p \sin (\omega t - \phi - \pi/2) \\ &+ \hat{v} \sin (\omega t - \pi/2) \cdot \hat{i}_p \sin (\omega t - \phi) \end{aligned} \quad (15)$$

که عبارت سمت چپ دو برابر توان راکتیو بار در هر فاز در شرایط ماندگار و فرکانس پایه است. می‌توان این رابطه را به وسیله مدار محاسباتی مطابق شکل ۱۴ ایجاد کرد. چنین مداری دارای پاسخ فوق‌العاده سریعی است. به عنوان مثال، اگر چنانچه جریان $\hat{i}_p \sin (\omega t - \phi)$ به طور ناگهانی در لحظه $t = \phi/\omega$ سوئیچ شود، خروجی می‌تواند در فاصله ۲ msec به مقدار ماندگار $\hat{v} \hat{i} \sin \phi$ برسد. البته نتیجه به واسطه مولفه‌های هارمونیک موجود در جریان، خدشه‌دار می‌شود. هارمونیک‌ها را می‌توان مطابق شکل ۱۴ به کمک فیلتر حذف نمود، لیکن فیلتر کردن باعث تاخیر پاسخ بیشتری می‌شود. البته به کمک روش‌های جبران پیش‌فاز^۱ می‌توان تا حدودی مساله را بهبود داد. یک پاسخ زمانی - پله واقعی برای نوعی که در بالا توصیف شد در حدود ۴-۵ msec می‌باشد.

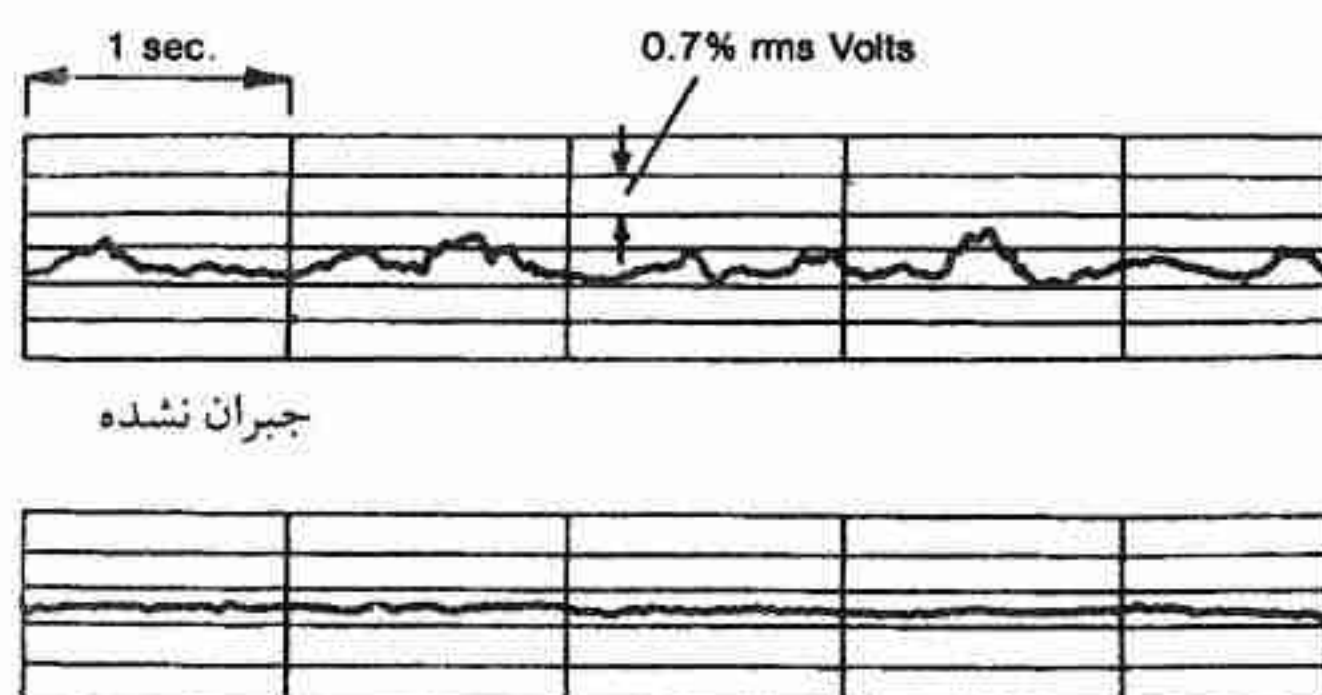
مساله دیگری که ممکن است رخ دهد ناشی از حاصلضرب v و i_p خواهد بود. اگر جریان i_p دارای شکل موج سینوسی فرکانس پایه مدوله شده در فرکانس f_m باشد، آنگاه خروجی مدار اندازه‌گیری می‌تواند دارای مولفه‌های با فرکانس f ، f_m ، $2f - f_m$ ، $2f$ و $2f + f_m$ باشد. البته جبران‌کننده قصد دارد که فقط به مولفه f_m پاسخ دهد، اما ممکن است پاسخ‌های مزاحم در فرکانس‌های بالاتر نیز موجود باشند. احتمال وقوع رزونانس سیستم تغذیه در فرکانس $2f - f_m$ و یا حوالی آن وجود دارد که منجر به تداخل نامطلوب بین این رزونانس و جبران‌کننده خواهد شد.



شکل ۱۴ - مدار محاسباتی برای تعیین توان راکتیو لحظه‌ای $q(t)$.

۹-۴-۳ مثالی از نتایج حاصل از جبران چشمک زدن با استفاده از TCR

شکل ۱۵ تغییرات ولتاژ واقعی را در نقطه کوپلاژ مشترک ۲۳۰ kV در حضور و غیاب جبران‌کننده نشان می‌دهد. در این مثال مقدار نامی جبران‌کننده TCR برابر ۶۰ MVar است و به ولتاژ ۳۴/۵ kV متصل شده است.



جبران شده با TCR

شکل ۱۵ - نمونه‌ای از بهبود ولتاژ rms در نقطه PCC بوسیله جبران‌کننده راکتور تایریستور کنترل.

۹-۵ جبران‌کننده‌های راکتور قابل اشباع

۹-۵-۱ جبران‌کننده راکتور انشعابی/راکتور قابل اشباع

وسیله ایده‌ال برای حذف چشمک زدن، یک جبران‌کننده راکتیو ولتاژ ثابت خواهد بود. راکتور قابل اشباع تقریبی از این وسیله می‌باشد. شکل ۱۶ رابطه بین ولتاژ ترمینال و جریان پایه در یک راکتور

قابل اشباع تک فاز که هسته آهنی مسدود آن دارای یک سیم پیچی است، را نشان می دهد. منحنی $V-I$ با منحنی $B-H$ هسته ارتباط دارد، البته شکل آن متفاوت است زیرا به دلیل غیرخطی بودن وجود جریان های هارمونیک اجتناب ناپذیر است. برای عملکرد در بالاتر از نقطه زانوی منحنی شکل ۱۶، مشخصه $V-I$ را می توان تقریباً با معادله زیر نشان داد.

$$V = V_k + j X_r I_r \quad (16)$$

از آنجایی که توان میانگین در راکتور صفر است، V و V_k همفاز بوده و می توان علامت فازور را حذف کرد. بنابراین معادله ۱۶ مطابق شکل ۱۶ با خط نمایش داده می شود. مشخصه، کاملاً مشخصه ولتاژ - ثابت نیست زیرا دارای شیب راکتانس معین X_r است که به طور نمونه $0.15 - 0.1$ pu می باشد. امیدانس کوره الکتریکی می تواند از مقدار مدار - باز کامل تا اتصال کوتاه کامل تغییر نماید. در باری با چنین تغییرات وسیع، شیب راکتانس X_r راکتور را از کشیدن جریان کافی که با جریان اتصال کوتاه کوره تطبیق نماید، باز می دارد و با راکتور قابل اشباع مسطح فقط جبران جزئی (ناقص) به دست می آید. برای حل این مساله یک راکتور انشعابی^۱ (مطابق شکل ۱۷) معرفی می شود تا اینکه «تاثیر» اعمال شده بر باس بار کوره را (از ناحیه جریان های کوره و راکتور قابل اشباع) توزیع مجدد نماید. همچنین امکان جبران اضافی نیز وجود دارد طوری که می توان ولتاژ تقریباً ثابتی را در نقطه ای قبل از محل اتصال جبران کننده (مثلاً در PCC) به دست آورد.

اصول کار آن را می توان با تحلیل ساده شده زیر - که در آن از تمامی مقاومت های اهمی (به استثناء مقاومت قوس الکتریکی) صرف نظر شده است - نشان داد. (به منابع ۷ و ۸ و ۳۶ مراجعه شود). ولتاژ دو سر هر بخش راکتور انشعابی طبق روابط زیر به دست می آید

$$V_c - V_t = j (I_s + n I_f) X_1 \quad (17)$$

$$V_t - V_f = j n (I_s + n I_f) X_1 \quad (18)$$

و ولتاژ کوره الکتریکی از رابطه زیر به دست می آید

$$V_f = V_c - j (I_s - n I_f)(1 + n) X_1 \quad (19)$$

جریان تغذیه I_s بایستی رابطه زیر را برقرار نماید

$$\begin{aligned} E - V_k &= j X_s I_s + (V_c - V_t) + j X_r I_r \\ &= j (X_s + X_1 + X_r) I_s + j (n X_1 - X_r) I_f \end{aligned} \quad (20)$$

اگر X_1 یعنی راکتانس کل راکتور انشعابی و n یعنی نسبت انشعاب آن طوری انتخاب شود که رابطه

زیر را برقرار نماید

$$n X_l = X_r \quad (21)$$

آنگاه جریان تغذیه I_s مستقل از جریان کوره الکتریکی I_f می‌گردد، آنگاه جریان I_s از معادلات ۲۰ و ۲۱ به دست می‌آید:

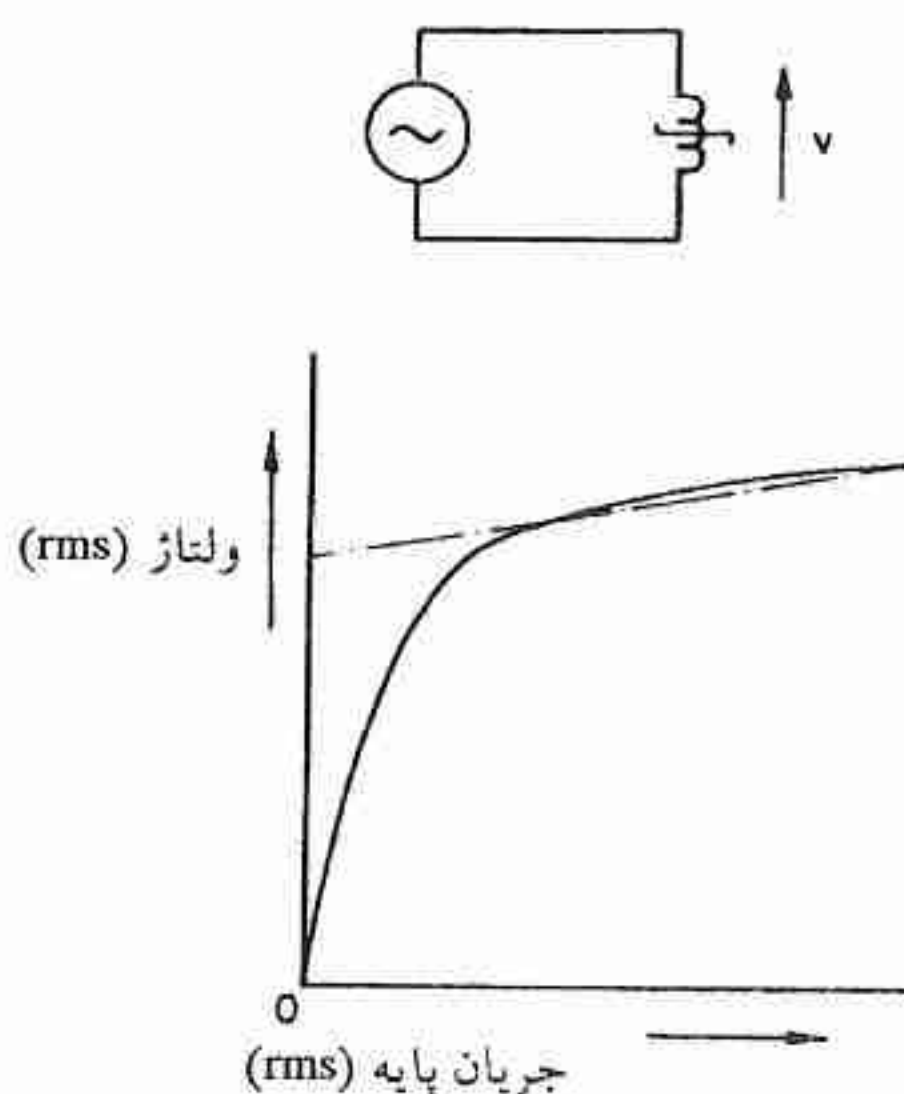
$$E - V_k = j \left(X_s + \frac{1+n}{n} X_r \right) I_s \quad (22)$$

با صرف‌نظر کردن اختلاف فاز موجود بین E و V_k (که در عمل بسیار کوچک است)، جریان تغذیه ثابت خواهد بود. بنابراین ولتاژ در تمام نقاط واقع در قبل از راکتور انشعابی، ثابت و عاری از تغییرات خواهد بود. مخصوصاً، چون $E - j X_s I_s = V_c$ است، ولتاژ در طرف تغذیه راکتور انشعابی ثابت بوده و از رابطه زیر به دست می‌آید

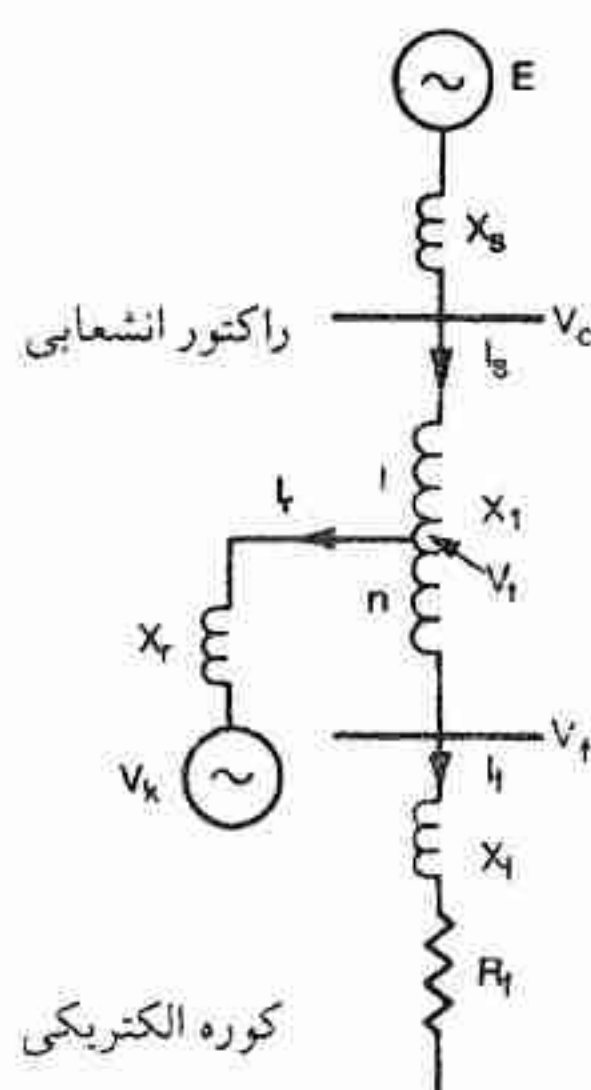
$$V_c = V_k + j \frac{1+n}{n} X_r I_s \quad (23)$$

حال ولتاژی که به اولیه ترانسفورماتور کوره الکتریکی اعمال می‌شود به وسیله معادلات ۱۹ و ۲۱ و ۲۳ به صورت زیر به دست می‌آید

$$V_f = V_k - j (1+n) X_r I_f \quad (24)$$



شکل ۱۶ - رابطه بین ولتاژ و جریان پایه در یک راکتور قابل اشباع یا هسته مسدود تکفاز



شکل ۱۷ - اصول جبران‌کننده راکتور انشعابی/راکتور قابل اشباع

که مستقل از ولتاژ تغذیه E (یا V_c) بوده و منحصرًا توسط جریان کوره الکتریکی و جبران‌کننده معین می‌گردد.

از معایب جبران‌کننده راکتور قابل اشباع / راکتور انشعابی مسطح این است که ولتاژ مدار - باز کوره الکتریکی از مقدار اولیه آن که بین E و V_c قرار داشت (بر حسب بارهای دیگری که به PCC یا نقطه دیگر اتصال دارد) به مقدار V_k تنزل می‌یابد (به معادله ۲۴ مراجعه شود وقتی که $I_f = 0$ است). همچنین همزمان راکتانس اتصال کوتاه از $(X_s + X_f)$ به $(X_s + X_f + X_r(1+n))$ افزایش می‌یابد، هر دو اثر توان کوره را کاهش می‌دهند. برای اینکه تغذیه کوره بتواند شرایطی را که در غیاب جبران‌کننده دارا بوده است باز یابد، می‌توان از سیم‌پیچی تقویت‌کننده ولتاژ - مطابق آنچه که در مرجع ۸ نشان داده شده است - به طور موفقیت‌آمیز استفاده کرد. از روش کاهش k به وسیله خازن سری با راکتور قابل اشباع، استفاده نمی‌گردد زیرا باعث تاخیر در پاسخ جبران‌کننده می‌گردد (۷). همچنین جبران‌کننده راکتور قابل اشباع/راکتور انشعابی ضریب توان را کاهش می‌دهد و معمولاً خازن‌هایی را به طرف تغذیه راکتور انشعابی متصل می‌نمایند. این خازن‌ها معمولاً به بانک‌هایی تقسیم می‌شوند و با راکتورهای خطی با هسته هوایی ترکیب می‌گردند تا ایجاد فیلتر هارمونیک نموده و بدین وسیله جریان‌های هارمونیک کوره الکتریکی و جبران‌کننده را جذب نموده و از وقوع رزونانس جلوگیری نمایند. فیلترهایی تا فرکانس‌های ۱۵ به کار برده شده است.

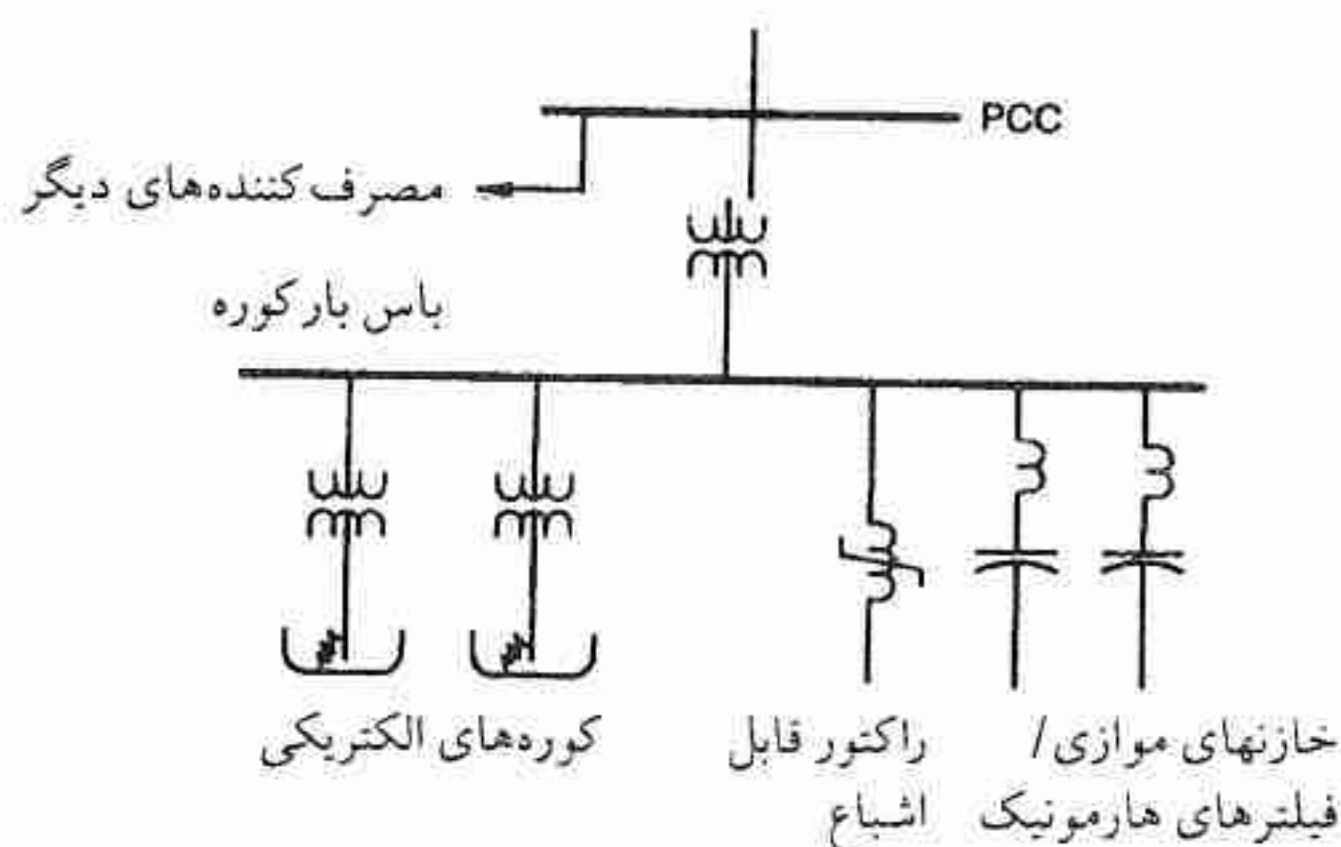
۹-۵-۲ جبران‌کننده راکتور قابل اشباع چند فازه جبران شده هارمونیک

نوع دیگر جبران‌کننده قابل اشباع که کاملاً با نوع راکتور انشعابی که در بخش ۹-۴-۱ تشریح شد، تفاوت دارد جبران‌کننده راکتور قابل اشباع چند فازه جبران شده هارمونیک است. این نوع جبران‌کننده گاهی به جبران‌کننده باس بار موسوم است (زیرا می‌توان آن را مستقیماً به باس بار کوره الکتریکی متصل کرد بدون آنکه نیازی به راکتور سری انشعابی باشد). این جبران‌کننده توسط Friedlander توسعه یافت (به شکل ۳۸ فصل ۵ مراجعه شود). دو نوع آن که عموماً استفاده می‌شود عبارت از راکتورهای سه برابر کننده دوگانه^۱ و راکتورهای سه برابر کننده سه گانه^۲ است.

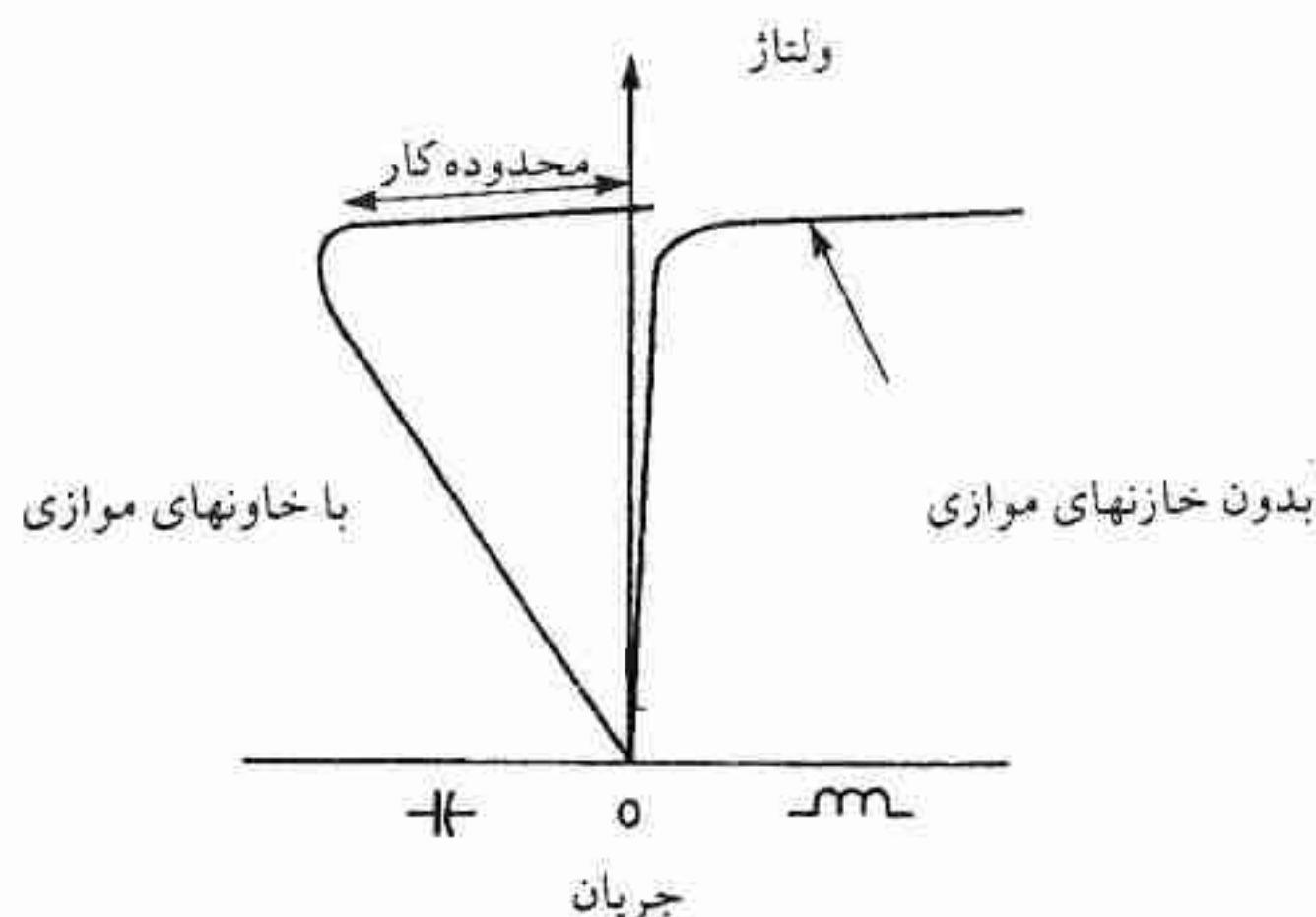
اصول کار آن مشابه نوع راکتور قابل اشباع/راکتور انشعابی است یعنی از مشخصه مسطح $V-I$ راکتور با هسته اشباع شونده برای ایجاد مشخصه راکتیو ولتاژ - ثابت ایده‌آل استفاده می‌شود. در

راکتورهای سه‌برابرکننده دوگانه یا سه‌گانه، سیم‌پیچی‌های سه‌فاز بر روی هسته با بازوی چندگانه در یک آرایش چندبرابرکننده فرکانس قرار دارند طوری که جریان‌های هارمونیک تا مرتبه $2n \pm 1$ را حذف می‌نمایند که در آن n تعداد «فازهای» تولید شده است (نظیر روش چند برابر کردن - پالس که در یکسوکننده‌ها به کار می‌رود). در سه‌برابرکننده دوگانه $n = 6$ ، و پایین‌ترین مرتبه جریان‌های هارمونیک مرتبه ۱۱ و ۱۳ است. در سه‌برابرکننده سه‌گانه $n = 9$ ، و پایین‌ترین مرتبه جریان‌های هارمونیک، مرتبه ۱۷ و ۱۹ است (در شرایط متعادل). اگر چنانچه راکتورهای اصلی با «راکتورهای اتصال چشمه»^۱ که خود دارای سیم‌پیچی اتصال مثلث اتصال کوتاه شده هستند، بارگیری شوند هارمونیک‌های دیگر نیز حذف می‌شوند و در سه‌برابرکننده دوگانه هارمونیک‌های پایین‌تر از ۲۳ و ۲۵ و در سه‌برابرکننده سه‌گانه هارمونیک‌های پایین‌تر از ۳۵ و ۳۷ باقی می‌مانند (در شرایط متعادل) که قابل اغماض می‌باشند (به ترتیب حدود ۱/۵-۱٪ و ۲-۴٪ می‌باشد).

هر دو روش تضعیف هارمونیک همچنین در بهبود خطی بودن و مسطح بودن مشخصه $V-I$ به میزان $\pm 0.3\%$ (در رنج نرمال جریان‌ها یعنی از ۱۰٪ تا ۱۰۰٪ جریان نامی)، نقش دارند (۱۱). البته علاوه بر اندازه هسته آهنی خطی بودن می‌تواند به طور نامطلوب تحت تاثیر قرار گیرد مگر آنکه شیب در مقدار بیش از ۷٪ نگاهداشته شود. در کاربردهای کوره الکتریکی این شیب باقیمانده (پس‌ماند) نسبت جبران^۲ موثر را کاهش می‌دهد. نسبت کاهش (تضعیف) چشمک زدن^۳ حاصل، از آنچه که با جبران‌کننده راکتور قابل اشباع/راکتور انشعابی به دست می‌آید، قدری کوچکتر است.



شکل ۱۸ - آرایش عمومی جبران‌کننده راکتور قابل اشباع از نوع باس بار برای کاهش چشمک زدن.



شکل ۱۹ - مشخصه $V-I$ جبران کننده راکتور قابل اشباع از نوع باس بار با خازنهای موازی و بدون آن. در شرایط نامتعادل حذف داخلی هارمونیک در راکتور قابل اشباع به طور ناقص انجام می گیرد، لیکن جریانهای هارمونیکی ایجاد شده چندان زیاد نخواهند بود. خازنهای موازی معمولاً برای تصحیح ضریب توان کلی فراهم می گردد و ممکن است این خازن ها به صورت فیلترهای هارمونیک - به طور نمونه برای مرتبه ۲، ۳، ۵، ۷ و گاهی مرتبه ۴ و ۶ - و فیلتر بالاگذر تقسیم گردند (شکل ۱۸). خازنهای موازی مطابق شکل ۱۹ مشخصه $V-I$ را تغییر می دهند. جبران کننده های با مقدار نامی حداکثر ۱۱۶ MVar در سطوح ولتاژ حداکثر ۷۰ kV برای جبران کوره های الکتریکی، دستگاه های نورد و سایر بارهای بزرگ متغیر به کار رفته است.

مراجع

1. G. J. McManus, "Electric Furnace Succeeds in Technology and Profit," *Iron Age*, MP-7 to MP-18, February 4, 1980.
2. A. R. Oltrogge, "Arc Furnace Voltage Can be Critical," *Electrical World*, December 1.
3. E. R. Freeman and J. E. Medley, "Efficient Use of Power in Electric Arc Furnaces," *Proc. IEE, Electr. Power Appl.* 1 (1), 17-24, February 1978.
4. H. Frank and K. Pettersson, "Raising the Production of Arc Furnaces by Stabilizing the Voltage with Thyristor-Switched Capacitors," *ASEA J.* 50 (1), 9-16 (1977).
5. Y. Sundberg, "The Arc Furnace as a Load on the Network," *ASEA J.* 49 (4), 75-87.
6. L. E. Bock and A. H. Moore, "Application of Capacitors in Arc Furnace Power Supply Systems," *Industr. Power Syst.* 19 (3), 18-23, September 1976.
7. G. F. L. Dixon, E. Friedlander, R. Seddon, and D. J. Young, "Static Shunt Compensation for Voltage-Flicker Suppression," Paper 7, IEE Symposium on Transient, Fluctuating, and Distorting Loads and their Effect on Power Systems and Communications, February 1963. IEE Conference Report Series No. 8 (1964), "Abnormal Loads on Power Systems."
8. E. Friedlander, A. Telahun, and D. J. Young, "Arc-Furnace Flicker Compensation in Ethiopia," *GEC J. Sci. Tech.* 32 (1), 2-10 (1965).
9. D. H. Berry et al., "Saturated Reactor Compensator Achieves Major Reduction of Flicker Caused by Arc Furnace Installation," presented at CEA Spring Meeting, Toronto, March 22-24, 1976.

10. M. W. Kennedy, J. Loughran, and D. J. Young, "Applications of a Static Suppressor to Reduce Voltage Fluctuations Caused by a Multiple Arc Furnace Installation," *IEE Conf. Publ.* 110, 130-137, April 22-24, 1974.
11. E. Clegg, A. J. Heath, and D. J. Young, "The Static Compensator for the BSC Anchor Project," *IEE Conf. Publ.* 110, 110-116, April 22-24, 1974.
12. Y. H. George and R. Gosselin, "Static Compensators of Simplified Construction as a Remedy to Power System Disturbances," *IEE Conf. Publ.* 110, 117-123, April 22-24.
13. C. G. Cooksley et al., "The Compensation of Voltage Dips and Harmonics at British Steel Corporation's Anchor Development," *IEE Conf. Publ.* 110, 124-129, April 22-24, 1974.
14. C. B. Cooper, E. Friedlander and D. J. Young, "Requirements and Compensation Methods for Scrap Melting Arc Furnaces," *IEE Conf. Publ.* 110, 146-150, April 22-24.
15. R. Coates and G. L. Brewer, "The Measurement and Analysis of Waveform Distortion Caused by a Large Multi-Furnace Arc Furnace Installation," *IEE Conf. Publ.* 110, 135-145, April 22-24, 1974.
16. H. S. Brown, Hunter Memorial Lecture, November 1978, *Proc. IEE, Electr. Power Appl.*, 2 (3), 99-107, June 1979.
17. R. Armstrong, "Predicting the Electrical Performance of Arc Furnaces," *Proc. IEE, Electr. Power Appl.* 1 (3), 86-90, August 1978.
18. G. F. L. Dixon and P. G. Kendall, "Supply to Arc Furnaces: Measurement and Prediction of Supply-Voltage Fluctuation," *Proc. IEE* 119 (4), 456-465 (April 1972).
19. C. Concordia, L. G. Levoy, and C. H. Thomas, "Selection of Buffer Reactors and Synchronous Condensers on Power Systems Supplying Arc-Furnace Loads," *AIEE Trans.* 76, 123-135, July 1957.
20. C. Concordia, "Voltage Dip and Synchronous-Condenser Swings Caused by Arc-Furnace Loads," *AIEE Trans.* 74, 951-956, October 1955.
21. P. M. Black and L. F. Lischer, "The Application of a Series Capacitor to a Synchronous Condenser for Reducing Voltage Flicker," *AIEE Trans.* 70, 145-150 (1951).
22. A. Seki, J. Nishidai, and K. Murotani, "Suppression of Flicker Due to Arc Furnaces by a Thyristor-Controlled VAr Compensator," *Paper A78 590-2, IEEE Summer Meeting*, Los Angeles, July 1978.
23. M. Chanas, "Perturbations on Industrial and Distribution Systems - Their Compensation by Static Means," Pt. 1, *Rev. Gén. Electr.* 87 (12), 925-943, December 1978.
24. M. Lemoine, *Op. cit.*, Pt. 2, 944-962.
25. P. Charles, *Op. cit.*, Pt. 3, *Rev. Gén. Electr.* 88 (1), 49-57, January 1979.
26. M. Boidin and G. Drouin, *Op. cit.*, Pt. 4, 58-72.
27. E. Wanner and W. Herbst, "Static Power Factor Compensators for use with Arc Furnaces," *Brown Boveri Publ. CH-1W 511 790 E*.
28. W. E. Schwabe and R. Kasper, "Flicker Caused by UHP Arc Furnaces Using Scrap and Directly Reduced Materials," paper presented to CNBE-Brazilian National Committee-UIE.
29. W. E. Schwabe and C. G. Robinson, "Report on Ultra-high Power Operation of Electric Steel Furnaces," *J. Metals*, 67-75, April 1967.
30. "Survey of Arc Furnace Installations on Power Systems and Resulting Lamp Flicker," *AIEE Trans.*, 1957.
31. J. Lemmenmeier et al., UIE/UNIPED Survey, International Symposium on Electric Arc Furnaces, Liège 1973.
32. A. Dejoue and P. Gaussens, "Dispositifs Experimentaux pur l'étude du Flicker," *Bull. Soc. Francaise Electr.* 7 (77), 263-272, May 1957.
33. M. Depenbrock, "Compensation of Rapidly Varying Reactive Currents," *ETZ(A)* 98, 408-411, June 1977, (in German).

34. G. Klinger, "Control and Regulation Device of a Self-Guiding Compensation Commutator Connection," *ETZ(A)* **98**, 411-414 (1977).
35. G. Klinger, "Tolerance Band Controlled Single-Phase Inverter Circuits with Optimum Selection of Control Values," *ETZ(A)* **97**, 87-90, February 1976.
36. E. Friedlander, "Voltage-Flicker Compensation with AC Saturated Reactors," *GEC J. Sci. Tech* **29** (2), 107-114 (1962).
37. E. Friedlander, "Flicker Suppression for Single-Phase Resistance-Welding Machines," *GEC J. Sci. Tech.* **32** (2), 79-84 (1965).
38. T. E. Harras and R. W. Lye, "A Static VAR Compensator for Flicker Control on the Saskatchewan Power Corporation System," Presented to Canadian Electrical Association, Montreal, March 27, 1974.
39. E. Friedlander, "Static Network Stabilization: Recent Progress in Reactive Power Control," *GEC J. Sci. Tech.* **33** (2), 58-65 (1966).
40. E. Friedlander, "The Development of Saturated Reactors for Network Stabilization as Applicable to Magnet Power Supplies," Second International Conference on Magnet Technology, 1964.
41. R. J. Moran, "Static VAR Control for the Steel Industry," *Industr. Power Syst.* **21** (1).
42. T. Sjukvist, "Thyristor Switched Capacitors for Reactive Power Compensation," *Iron and Steel Engr.* **54** (4), 40-47, April 1977.
43. R. J. Moran et al., "Solid-State Converters for Power System Voltage Control," *Proc. Amer. Power Conf.* 1041-1047 (1975).
44. L. Gyugyi, "Static Shunt Compensation for Voltage Flicker Reduction and Power Factor Correction," *Proc. Amer. Power Conf.*, 37 1271-1285 (1976).
45. H. Frank and S. Ivner, "TYCAP, Power-Factor Correction Equipment Using Thyristor-Controlled Capacitors for Arc Furnaces," *ASEA J.* **46**, 147-152 (1973).
46. J. W. Motto et al., "The Static VAR Generator and Alternative Approaches to Power Systems VAR Compensation," *Proc. Amer. Power Conf.* **37**, 1032-1040 (1975).
47. O. K. Hill and C. G. Robinson, "Large Arc Furnaces and the Effect of Key Dimensions on the Performance of UHP Furnaces," *Iron and Steel Engr.*, 33-36, July 1979.
48. W. E. Schwabe, "Ultra-High Power Arc Furnances," *Iron and Steel Engr.*, 132-137.
49. B. Bowman, G. R. Jordan, and F. Fitzgerald, "The Physics of High-Current Arcs," *J. Iron and Steel Inst.*, 748-805, June 1969.
50. W. E. Schwabe and C. G. Robinson, "UHP: The Big Power Play in Arc Furnace Steelmaking," *Magazine Metals Prod.* **33**, 61-73, September 1968.
51. W. E. Schwabe and C. G. Robinson, "New Developments in UHP: Theory and Practice," Congr s Internationale Sur le Four Electrique   Arc en Aci re, Cannes, France, June 7-9, 1971.
52. D. A. McCallum and C. B. Cooper, "AC System Network Control Methods—Compensation," IEE Symposium on Power System Dynamics—Control and Compensation, University of Newcastle Upon Tyne, Henderson Hall, September 12, 1974.
53. I. Hosono et al., "Suppression and Measurement of Arc Furnace Flicker with a Large Static VAR Compensator," *Trans. IEEE, Power Appar. Syst.* **98**, 2276-2284 (1979).
54. P. Duveau, "Flickerm tre Num rique," *Rev. G n. Electr.* **80**, 851-853 (1971).
55. D. J. Young, "Static Shunt Compensators—Saturated Reactor Types," *IEE Digest* 1979/52 (1979).
56. J. J. Trageser, "Power Usage and Electrical Circuit Analysis for Electric Arc Furnaces," *Trans. IEEE IA-16*, 277-284 (1980).

هارمونیک

A.H. MOORE

۱۰-۱ مقدمه

پاره‌ای از بارهای الکتریکی در برابر جریان ac امپدانس غیرخطی ارائه می‌نمایند. شکل موج جریان آنها نسبت به شکل موج خالص سینوسی فرکانس پایه اعوجاج پیدا می‌کند. به زبان تحلیل فوریه این جریان‌ها دارای مولفه‌های هارمونیک یا «هارمونیک» می‌باشند. مثالی از بارهای بزرگی که تولید هارمونیک می‌نمایند مبدل‌های قدرت استاتیکی (یکسوکننده‌ها و معکوس کننده‌ها)، منابع تغذیه، کوره‌های الکتریکی و کنترلرهای توان ac تایریستوری می‌باشند. راکتور تابریستور کنترل (TCR) مثال دیگری از اجزاء سیستم قدرت است که تولید هارمونیک می‌نماید.

در این فصل ابتدا هارمونیک‌هایی که به وسیله پاره‌ای از این بارها تولید می‌گردند را بررسی نموده و اثرات نامطلوب آنها را به اختصار بیان می‌کنیم. آنگاه پس از بیان خلاصه‌ای از رزونانس‌های هارمونیک، فیلترها را مورد بحث قرار می‌دهیم. در پایان اثر هارمونیک بر روی ارتباطات تلفنی - که در برگیرنده تعریف متعارف ضریب نفوذ تلفن^۱ و اعوجاج است - تشریح می‌گردد.

۱۰-۲ منابع هارمونیک

مبدل‌های قدرت استاتیکی (یکسوکننده‌ها، معکوس کننده‌ها و سایر وسایل سوئیچینگ) منابع

1- Telephone Influence Factor

عمومی مولد جریان های هارمونیک هستند. اعوجاج شکل موج جریان (یعنی تولید هارمونیک) از سوئیچینگ حاصل می شود. یک یکسوکننده قدرت بالا در شکل ۱ و شکل موج ولتاژ و جریان آن در شکل ۲ نشان داده شده است. این شکل موج ها، شکل موج های تئوری است که بر اساس مفروضات زیر به دست آمده است:

۱- اندوکتانس بار dc به قدری است که جریان dc بدون نوسان (ثابت) تولید می کند.

۲- اندوکتانس کموتاسیون (منبع ac) صفر است.

به کمک تحلیل فوریه شکل موج شکل ۲ پ به مولفه های هارمونیک زیر تجزیه می شود:

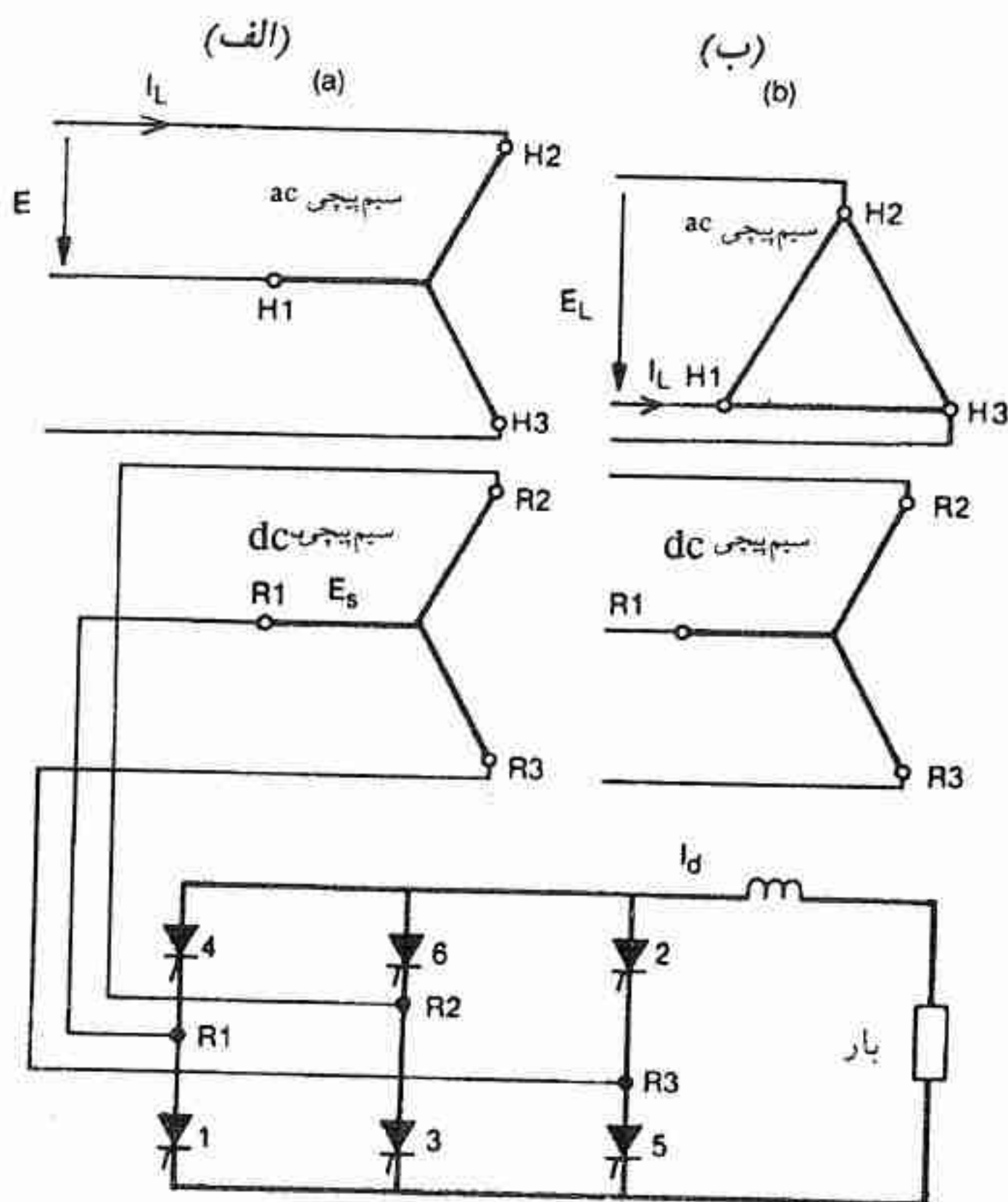
$$i = \sqrt{2} I_1 \left[\sin \omega t - \frac{\sin 5 \omega t}{5} - \frac{\sin 7 \omega t}{7} + \frac{\sin 11 \omega t}{11} + \frac{\sin 13 \omega t}{13} + \dots + \frac{2}{\sqrt{3}} \cos \frac{n\pi}{6} \frac{\sin n \omega t}{n} + \dots \right] \quad (1)$$

که در آن I_1 مقدار rms مولفه پایه جریان ac خط (برابر $6/\pi I_d$) و n مرتبه هارمونیک است. نوع دیگری از اتصال ترانسفورماتور که در آن اولیه به صورت اتصال مثلث است در شکل ۱ ب نشان داده شده است. شکل موج جریان در ثانویه یا سیم پیچی dc نظیر شکل ۲ پ است، اما به واسطه جابجایی فاز ۳۰ درجه که توسط اتصال مثلث - ستاره ایجاد می شود، شکل موج جریان خط شکل ۲ تولید می گردد. تحلیل فوریه شکل موج جریان اولیه مولفه های زیر را به دست می دهد:

$$i = \sqrt{2} I_1 \left[\sin \omega t + \frac{\sin 5 \omega t}{5} + \frac{\sin 7 \omega t}{7} + \frac{\sin 11 \omega t}{11} + \frac{\sin 13 \omega t}{13} \dots \right] \quad (2)$$

معادله ۱ و ۲ طیف هارمونیک یکسانی دارند اما زوج هارمونیک های متناوب (مرتبه ۵، ۷، ۱۷ و ۱۹ و غیره) در معادله ۱ منفی و در معادله ۲ مثبت می باشند. این موضوع پیشنهاد می کند که اگر دو یکسوکننده با جریان های خط مساوی به موازات همدیگر قرار گیرند این زوج هارمونیک های متناوب همدیگر را حذف می کنند.

اگر دو یکسوکننده با مقدار نامی یکسان با یکدیگر ترکیب شوند، در صورتی که ترانسفورماتور یکی از آنها نسبت به دیگری جابجایی فاز ۳۰° درجه داشته باشد گفته می شود که سیستم حاصل در ۱۲- پالس کار می کند و یا تعداد پالس آن ۱۲ می باشد. واحدهای یکسوکننده بیشتر که نسبت به یکدیگر جابجایی فاز یکسان داشته باشند تعداد پالس های دیگری را ایجاد می کنند. اگر سه واحد نسبت بهم جابجایی فاز ۲۰ درجه داشته باشند سیستم ۱۸- پالس را ایجاد می نمایند، چهار واحد با



شکل ۱ - مدارهای یکسوکننده سه فاز (الف) ANSI-24 (ب) ANSI-23.

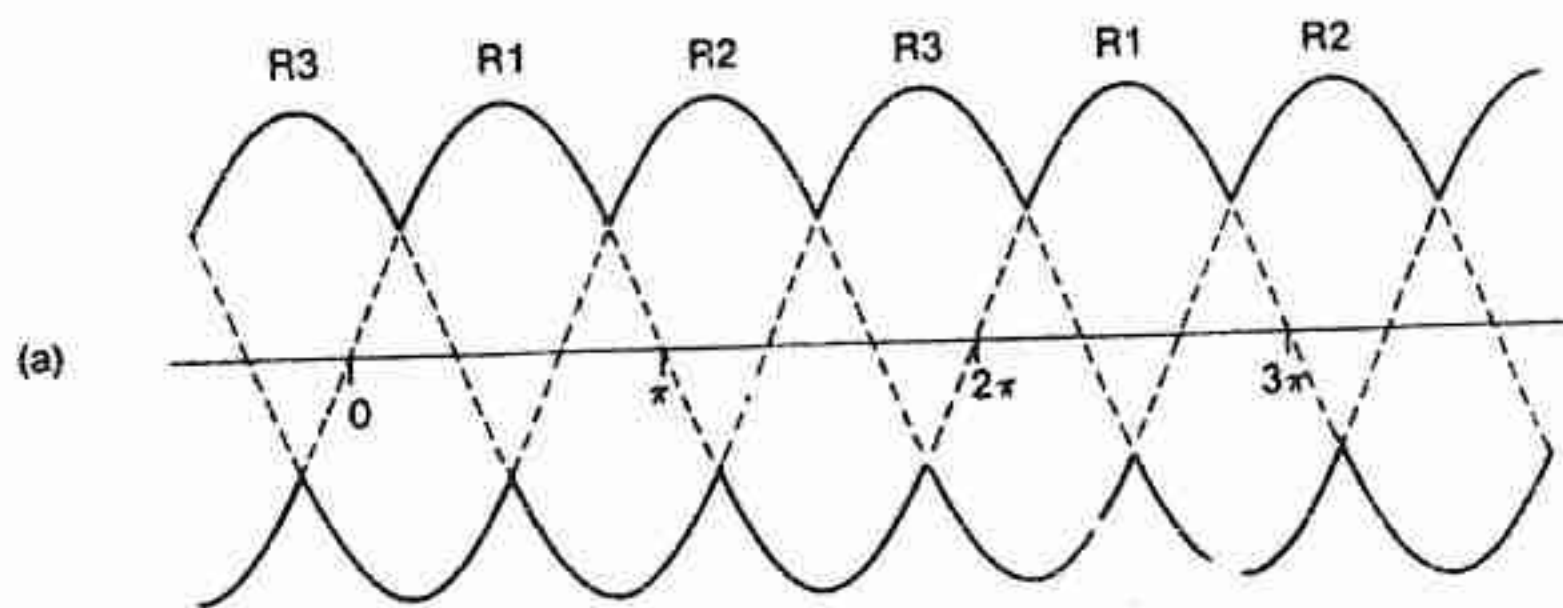
جابجایی فاز ۱۵ درجه منجر به عملکرد ۲۴ پالس می‌گردد. هنگامی که تعداد پالس q در معادله ۴ به کار برده می‌شود، مرتبه هارمونیک‌ها معین می‌گردد. جدول ۱ مرتبه هارمونیک‌ها را برای ۲۴ و ۱۸ و ۱۲ و ۶ نشان می‌دهد. توجه اینکه مقدار جریان هارمونیک برابر است با

$$I_n = \frac{I_1}{n} \quad (3)$$

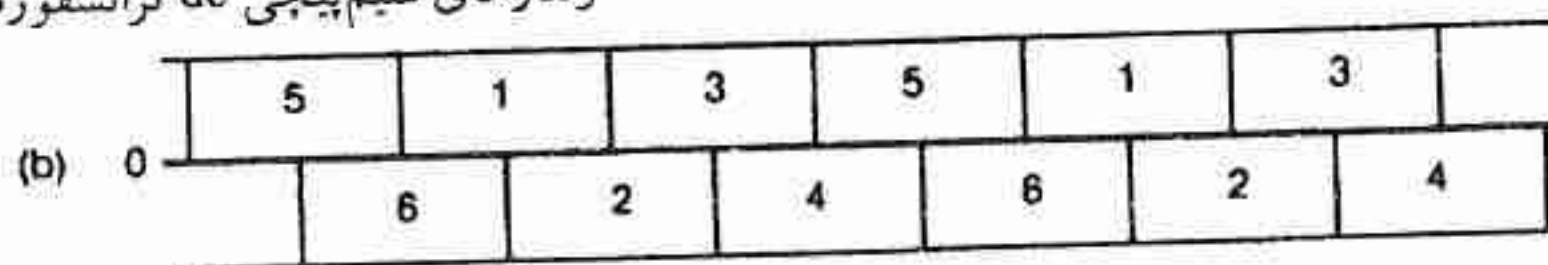
و در شرایط ایده‌آل تنها هارمونیک‌های «مشخص»^۱ زیر ظاهر می‌شوند:

$$n = kq \pm 1 \quad (4)$$

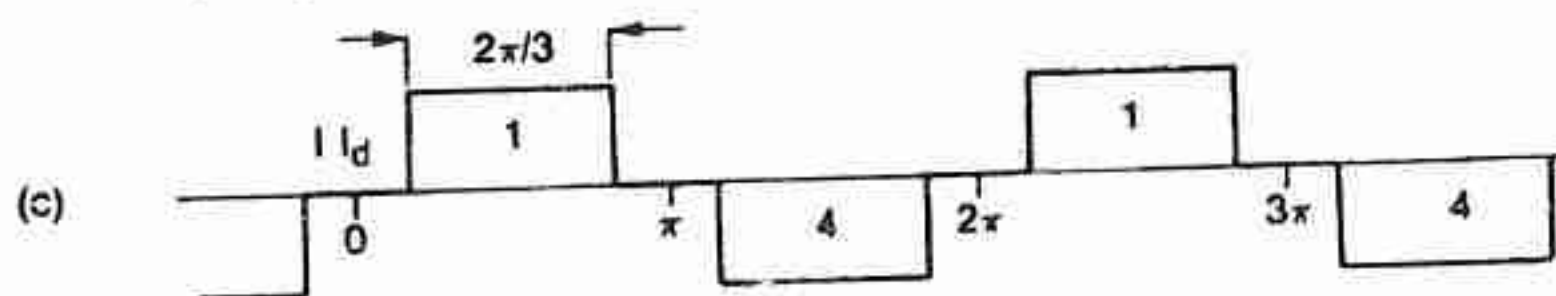
که در اینجا k هر عدد صحیح است، I_1 دامنه مولفه پایه و q تعداد پالس است. موج مربعی شکل ۲ فقط در حالت ایده‌آل با راکتانس کموتاسیون صفر امکان‌پذیر است. شکل



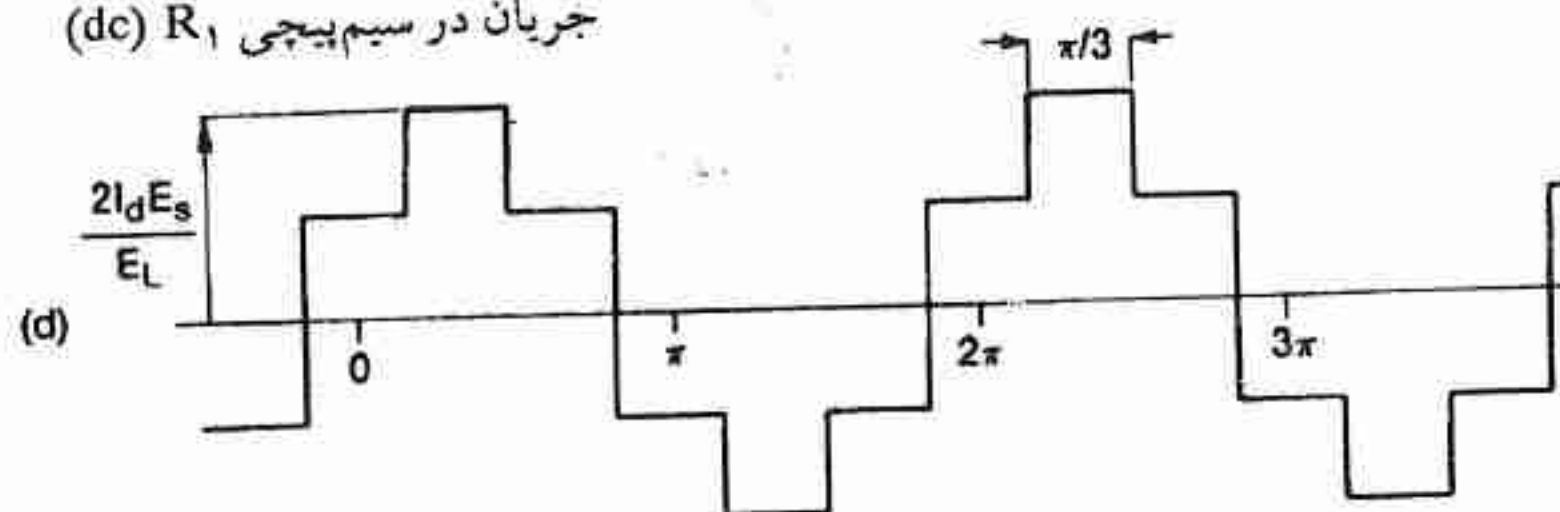
ولتاژهای سیم پیچی dc ترانسفورماتور



جریان در عناصر یکسو کننده



جریان در سیم پیچی R1



جریان خط، شکل ۱ ب

شکل ۲ - شکل موجهای جریان و ولتاژ مربوط به شکل ۱ الف.

موجهای جریان به واسطه مقدار راکتانس کموتاسیون و تاخیر فاز^۱ تغییر می کند. این دو عامل مقدار و زاویه فاز هر هارمونیک را تحت تاثیر قرار می دهند اما در مرتبه هارمونیک اثری ندارد. شکل ۳ الف نشان میدهد که برای مدارهایی نظیر شکل ۱ چگونه راکتانس کموتاسیون معین منجر به زمان صعود^۲ و زمان تنزل^۳ تدریجی می شود که به وسیله زاویه μ نشان داده شده است. با کنترل کردن ولتاژ dc به وسیله کنترل فاز تایریستور موجب تاخیر زمان کموتاسیون به اندازه زاویه α و کاهش زاویه

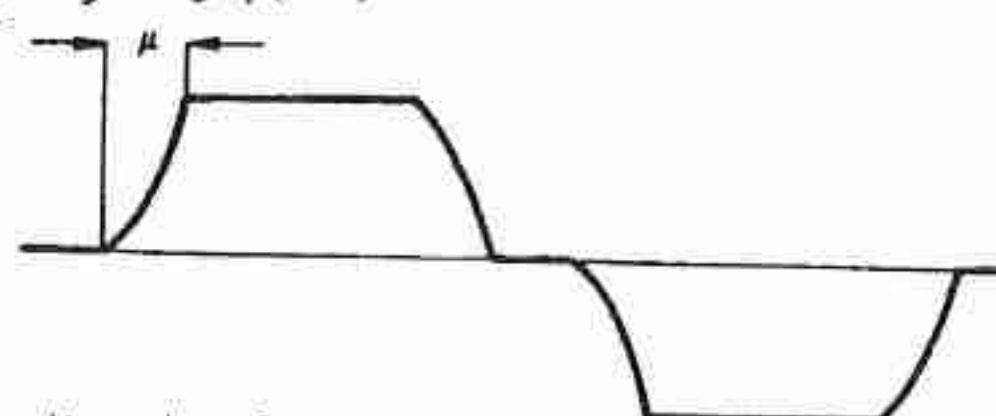
جدول ۱

جریانهای هارمونیک مشخص در خط تغذیه یکسوکننده‌های

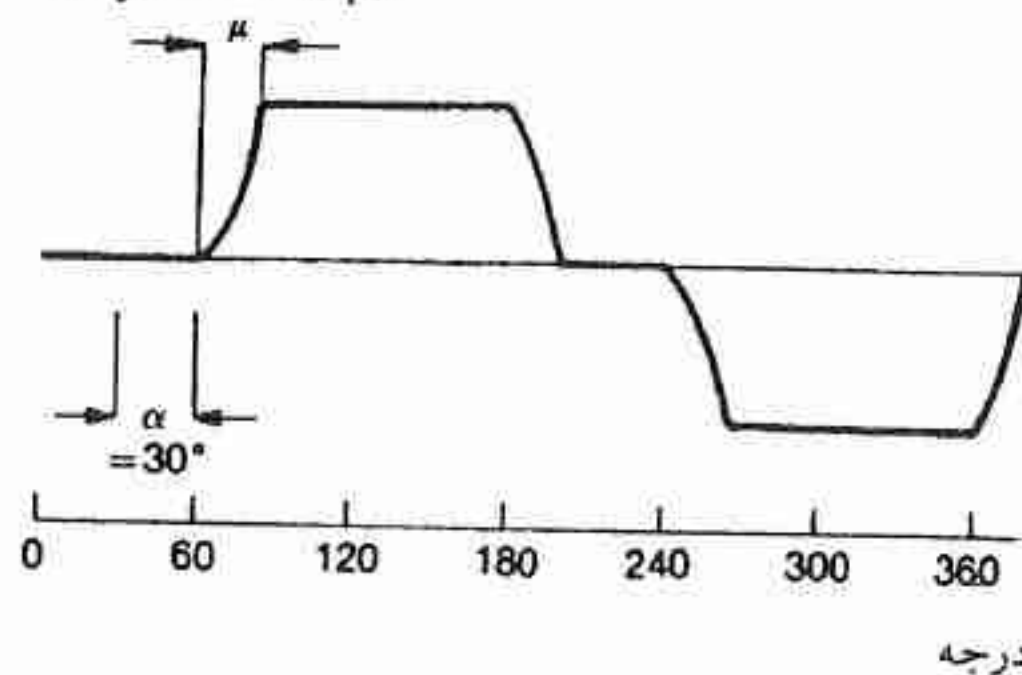
۶، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ پالس

مرتبۀ هارمونیک n	سیستم یکسو کننده شماره پالس، q				فرکانس هارمونیک $\omega = 60$ پایه	یکسو کننده ۶- پالس جریان هارمونیک بر حسب درصد مولفه پایه		
	6	12	18	24		از نظر تئوری	$X_c = 0.15$	$X_c = 0.15^a$
							$\alpha = 0$	$\alpha = 32^\circ$
5	x				300	20	16.2	18.9
7	x				420	14.2	9.3	12.7
11	x	x			660	9.09	3.04	6.70
13	x	x			780	7.69	1.86	4.96
17	x		x		1020	5.88	1.261	2.60
19	x		x		1140	5.26	1.08	1.78
23	x	x		x	1380	4.35	0.66	0.63
25	x	x		x	1500	4.00	0.53	0.28
29	x				1740	3.45	0.43	0.36
31	x				1860	3.23	0.39	0.48
35	x	x	x		2100	2.86	0.28	0.59
37	x	x	x		2220	2.70	0.24	0.59

(الف) بدون کنترل فاز



(ب) 30° تاخیر فاز



شکل ۳ - اثر کنترل فاز و تداخل (رویهم افتادگی)^۱

کمو تاسیون μ می گردد (شکل ۳ ب). کاهش μ دامنه هارمونیک‌ها را بیشتر تغییر می دهد.

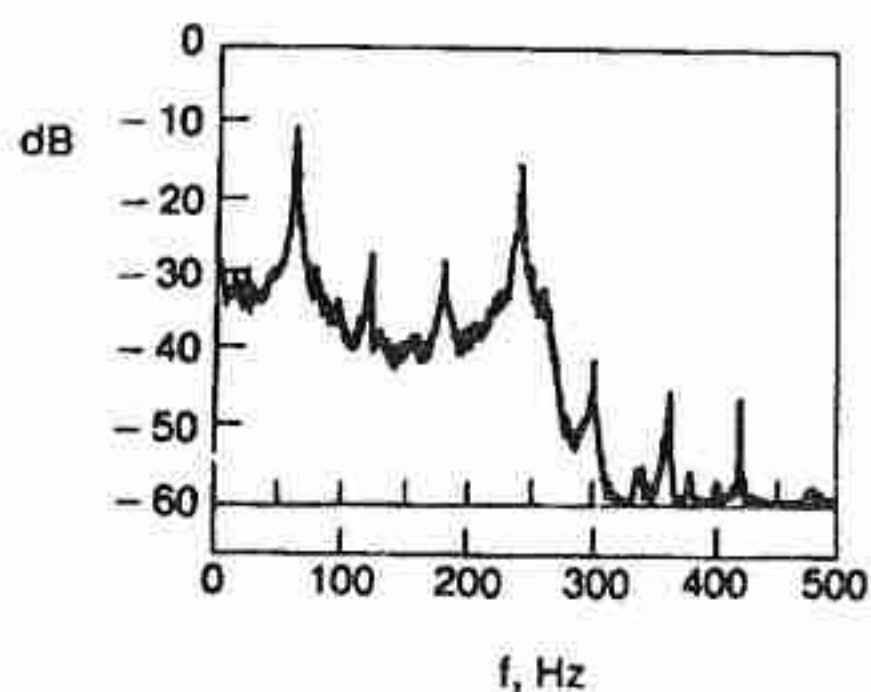
مقادیر جریان هارمونیک بر حسب درصدی از مولفه پایه در جدول ۱ آمده است. مقادیر مندرج در ستون تحت عنوان «از نظر تئوری» از معادله ۳ به دست آمده است. دو ستون دیگر مقادیری است که برای راکتانس کمو تاسیون مفروض X_c برابر 0.15 پریونیت محاسبه شده است - یکی از ستون‌ها برای $\alpha = 0^\circ$ و دیگری برای $\alpha = 32^\circ$ است. اندازه هارمونیک‌ها برای مقادیر مختلف X_c و α را می توان به کمک معادلات کلاسیک تحلیل فوری محاسبه نمود. با مقدار راکتانس کمو تاسیون X_c در «عالم واقعیت» جریان‌های هارمونیک کاهش می یابند. Read منحنی‌هایی را برای دامنه جریان هارمونیک نسبت به X_c در زاویه تاخیر فاز مختلف و برای هارمونیک‌های تا مرتبه ۲۵ام معرفی می نماید. دو ستون آخر جدول ۱ از نتایج محاسبات کامپیوتری که بر معادلات کلاسیک و این کمیت‌ها استوار است، به دست آمده است.

از جدول ۱ نباید این نتیجه گیری را به عمل آورد که هارمونیک‌هایی که بایستی در عملکرد بیش از ۶-پالس حذف شوند، کاملاً حذف می گردند. همواره به واسطه جابجایی فاز ناقص ترانسفورماتور، عدم تقارن امپدانس، یا بارهای نامتقارن یا زاویه‌های تاخیر فاز در یکسوکننده‌ها هارمونیک‌های باقیمانده حضور دارند. در تحت شرایط نسبتاً متعادل، هارمونیک‌های باقیمانده در حدود ۱۰ الی ۲۰٪ هارمونیک‌های موجود در یکسوکننده ۶-پالس و با همان مقدار نامی است. تحت شرایط نامتعادل، مقدار هارمونیک‌های باقیمانده بیشتر خواهد بود. به عنوان مثال، اگر واحدی از سیستم یکسوکننده ۲۴-پالس متعادل ۴ واحدی برای انجام سرویس از سیستم خارج شود، هارمونیک‌های سیستم، شامل هارمونیک‌های یکسوکننده ۱۲-پالس و ۶-پالس خواهد بود. سیستم‌های یکسوکننده^۱ همواره در حالت خروج یکی از واحدها (برای سرویس) توان نامی را تحویل می دهند. بایستی همواره وظیفه هارمونیک‌های بانک‌های خازنی را برای شرایط موردنظر با بیشترین درجه نامتعادلی محاسبه نمود.

علاوه بر وسایل یکسوکننده حالت جامد، وسایل سوئیچ کننده دیگری نیز وجود دارند که توان بارهای متعدد را کنترل می نمایند. کنترلر تایریستوری ac که در فصول ۵ و ۶ تشریح شد برای کنترل حرارت در کوره‌های الکتریکی و انواع دیگر بارهای اهمی به کار می رود. قبلاً در فصل ۵ مثالی از هارمونیک‌های تولید شده توسط راکتور تایریستور کنترل مشاهده نمودیم. مبدل‌های سیکل^۲، مبدل‌های فرکانس و معکوس کننده‌ها مبدل‌های توان حالت جامدی هستند که با عمومیت کمتر و در

اندازه‌های بزرگ‌تر در سیستم‌های قدرت وجود دارند و همگی آنها به میزان‌های متفاوت تولید هارمونیک می‌نمایند.

هارمونیک‌های تولیدشده توسط کوره‌های الکتریکی برخلاف هارمونیک‌های مبدل‌های توان استاتیکی (نظیر یکسوکننده‌ها) که از شکل موج‌های تناوبی محاسبه می‌شوند، غیرقابل پیش‌بینی هستند، زیرا قوس الکتریکی از سیکلی به سیکل دیگر - به خصوص در هنگام وارد شدن (آهن) قراضه‌های جدید - در حال تغییر است. جریان قوس غیرتناوبی بوده و طیف پیوسته‌ای از هارمونیک‌های مرتبه صحیح و غیرصحیح را در برمی‌گیرد. البته اندازه‌گیری هارمونیک نشان داده است که هارمونیک‌های مرتبه صحیح - به خصوص مرتبه سوم و پنجم و هفتم - نسبت به هارمونیک‌های غیرصحیح غالب بوده و دامنه هارمونیک‌ها با افزایش مرتبه، کاهش می‌یابد. تحلیل فوریه بر روی نمونه‌ای از جریان‌های کوره الکتریکی - که توسط نوار مغناطیسی به ثبت رسیده است - مقادیر درصد هارمونیک جدول ۱ در فصل ۹ را به دست می‌دهد. جدول نشان می‌دهد که در فاصله زمانی ۵ سیکل متوالی، هارمونیک‌های مرتبه پایین غالب هستند و همچنین هارمونیک‌های زوج نیز حضور دارند. با گذشت زمان، هنگامی که قوس پایدار شده و مذاب مسطح می‌شود اندازه هارمونیک به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و هارمونیک‌های زوج تماماً ناپدید می‌گردند. شکل ۴ پاسخ طیفی اندازه‌گیری شده توسط تحلیل گر طیفی FFT از جریان کوره الکتریکی در حالت شروع به ذوب کردن (آهن) قراضه‌های جدید (مرحله فعال بودن قوس) را نشان می‌دهد. هارمونیک‌های مرتبه صحیح و غیرصحیح مشاهده می‌شوند. محدوده فرکانس $0 - 500 \text{ Hz}$ است و اندازه آنها که با مقیاس لگاریتمی نشان داده شده است مقدار حداکثری (پیک) است که در فاصله چندین ثانیه معدل‌گیری شده است. گرچه در اغلب موارد مقدار هارمونیک‌های گزارش شده مزاحم نخواهند بود ولی به واسطه امکان وقوع رزونانس با خازن‌های مربوط به اصلاح ضریب توان کم کوره‌های الکتریکی، این مقادیر تقویت می‌گردند.



شکل ۴ - طیف جریان خط کوره الکتریکی در خلال فعال بودن قوس

منبع دیگری که منجر به تولید هارمونیک مزاحم می‌گردد جریان یورشی^۱ ترانسفورماتورها خواهد بود. گرچه این هارمونیک‌ها در زمان کوتاهی دوام دارند (حدود یک ثانیه و یا دو ثانیه برای ترانسفورماتورهای بزرگ) لیکن مقدار آنها خیلی زیاد است. البته بر خلاف هارمونیک‌های تولیدشده توسط یکسوکننده‌ها، به واسطه نامتعادلی، این هارمونیک‌ها در برگیرنده مرتبه زوج نیز می‌باشند. به خصوص مقدار هارمونیک‌های مرتبه چهارم و مرتبه دوم خیلی زیاد بوده و بایستی در موقع طراحی فیلترها به آن توجه کرد.

۱۰-۳ اثر هارمونیک بر تجهیزات الکتریکی

سوختن فیوز خازن‌ها یا از کار افتادن خازن‌ها در بانک‌های خازنی قدرت نشانه‌ای از افزایش سطوح هارمونیک ac در سیستم است. استاندارد ANSI قسمت ۵۵/۱-۱۹۸۰ C و استاندارد NEMA قسمت ۱۹۷۳-۱ CP مربوط به مشخصات خازن‌های قدرت موازی است. در این استانداردها به هارمونیک‌ها توجه قابل ملاحظه‌ای معطوف گردیده و حد مجاز افزایش مقدار ولتاژ جریان ناشی از هارمونیک، معین شده است. عملکرد مداوم خازن‌ها با جریان اضافی ناشی از هارمونیک منجر به افزایش تنش ولتاژ و حرارت در آنها گردیده و عمر مفید آنها کاهش می‌یابد. به عنوان نمونه، افزایش ۱۰٪ در تنش ولتاژ موجب افزایش ۷٪ در درجه حرارت می‌گردد و عمر مفید ۳۰٪ کاهش می‌یابد. در این بررسی (بررسی عمر خازن)، خرابی خازن ناشی از کرونای دی‌الکتریک در نظر گرفته نشده است. خرابی ناشی از کرونا که به واسطه افزایش پیک ولتاژ ایجاد می‌شود به شدت کرونا و مدت زمان آن بستگی دارد. موارد متعددی از خرابی نابهنگام خازن‌ها - در فاصله زمانی ماه به جای سال - در نتیجه فراهم نکردن تمهیدات لازم برای هارمونیک‌های ولتاژ وجود داشته است.

جریان‌های هارمونیکی می‌توانند منجر به افزایش حرارت در ماشین‌های الکتریکی گردان - بخصوص در ژنراتورهای سنکرون با قطب صاف (با قطب - غیر برجسته) - گردند. جریان‌های هارمونیکی، نیروی محرکه مغناطیسی را تولید می‌کنند که منجر به عبور جریان‌هایی در سطح روتور می‌گردد که حرارت را افزایش می‌دهند. هارمونیک‌های توالی - مثبت یکسوکننده [که از معادله $n=kq+1$ تبعیت می‌کنند (مرتبه هفتم، سیزدهم و غیره)] به سمت جلو می‌چرخند و هارمونیک‌های مرتبه ۶ و ۱۲ و غیره را در روتور تولید می‌کنند. هارمونیک‌هایی که از معادله

۱- $n=kq$ تبعیت می‌کنند پنجم، یازدهم و غیره) توالی - منفی بوده و در جهت خلاف چرخش روتور می‌چرخند و مجدداً هارمونیک‌های مرتبه ۶ و ۱۲ و غیره را در روتور ایجاد می‌کنند. میدان مغناطیسی نوسانی حاصل از زوج نیروهای محرکه مغناطیسی که در جهت مخالف هم می‌چرخند، منجر به ایجاد حرارت در روتور می‌گردد که ممکن است نیاز به کاهش مقدار نامی ماشین داشته باشد. کاهش مقدار نامی (ظرفیت) در عملکرد ۶-پالس که در آن هارمونیک‌های پنجم و هفتم غالب است، قابل ملاحظه خواهد بود. کاهش مقدار نامی برای عملکرد یکسوکننده ۱۲-پالس معمولاً ناچیز خواهد بود. وجود سیم‌پیچ تضعیف روتور به میزان زیادی مساله حرارت روتور را کاهش می‌دهد. موتورهای القایی نسبت به ژنراتورهای سنکرون روتور صاف کمتر تحت تاثیر هارمونیک‌ها هستند. البته جریان‌های هارمونیکی زیاد منجر به گرم شدن موتورهای القایی می‌گردد، به خصوص هنگامی که موتورها به سیستمی متصل هستند که در اثر رزونانس خازن‌ها با سیستم یک یا چند هارمونیک تقویت شده‌اند.

جریان‌های هارمونیکی در ترانسفورماتور تلفات بار I^2R را با ضربی بیش از افزایش جریان موثر، سبب می‌گردند. مقدار افزایش تلفات بستگی به بخشی از تلفات I^2R دارد که متناسب با مجذور فرکانس (تلفات جریان گردابی) است و مقداری که متناسب با توان اول فرکانس (تلفات پراکندگی) است. همین مطلب در مورد راکتورهای تنظیم یا محدودکننده^۱ جریان صحیح است. بنابراین طراحان راکتور بایستی از مقدار هارمونیک قابل ملاحظه و مرتبه آن اطلاع داشته باشند طوری که بتوانند ضریب مناسب تلفات I^2R مربوط به مولفه پایه و هر یک از هارمونیک‌ها را در طراحی اعمال نمایند.

۱۰-۴ رزونانس، خازن‌های موازی، و فیلترها

هنگامی که خازن‌های قدرت برای جبران توان راکتیو به سیستم قدرت افزوده می‌گردند، فرکانس یا فرکانس‌هایی وجود دارد که در آن خازن‌ها در رزونانس موازی با اندوکتانس سیستم خواهند بود. هارمونیک‌های «تزریقی» به سیستم در فرکانس‌های تطابق تقویت می‌گردند.

به منظور تشریح اصول عبور جریان هارمونیک و رزونانس به شبکه شکل ۵ الف مراجعه می‌کنیم. به عنوان نمونه فرض می‌شود که منبع هارمونیک یک مولد جریان هارمونیک ثابت I_n باشد

که هر یک از آنها به وسیله تحلیل فوریه محاسبه شده و یا توسط آزمایش معین می گردند. در این حالت می توان دیاگرام تک خطی شکل ۵ الف را بر مبنای تک فاز در شکل ۵ ب ترسیم نمود. جریان هارمونیک i_n بر طبق معادله زیر بین خازن و سیستم تغذیه تقسیم می گردد.

$$i_n = i_{sn} + i_{fn} \quad (5)$$

امپدانس شاخه خازن در هر فرکانس از رابطه زیر به دست می آید

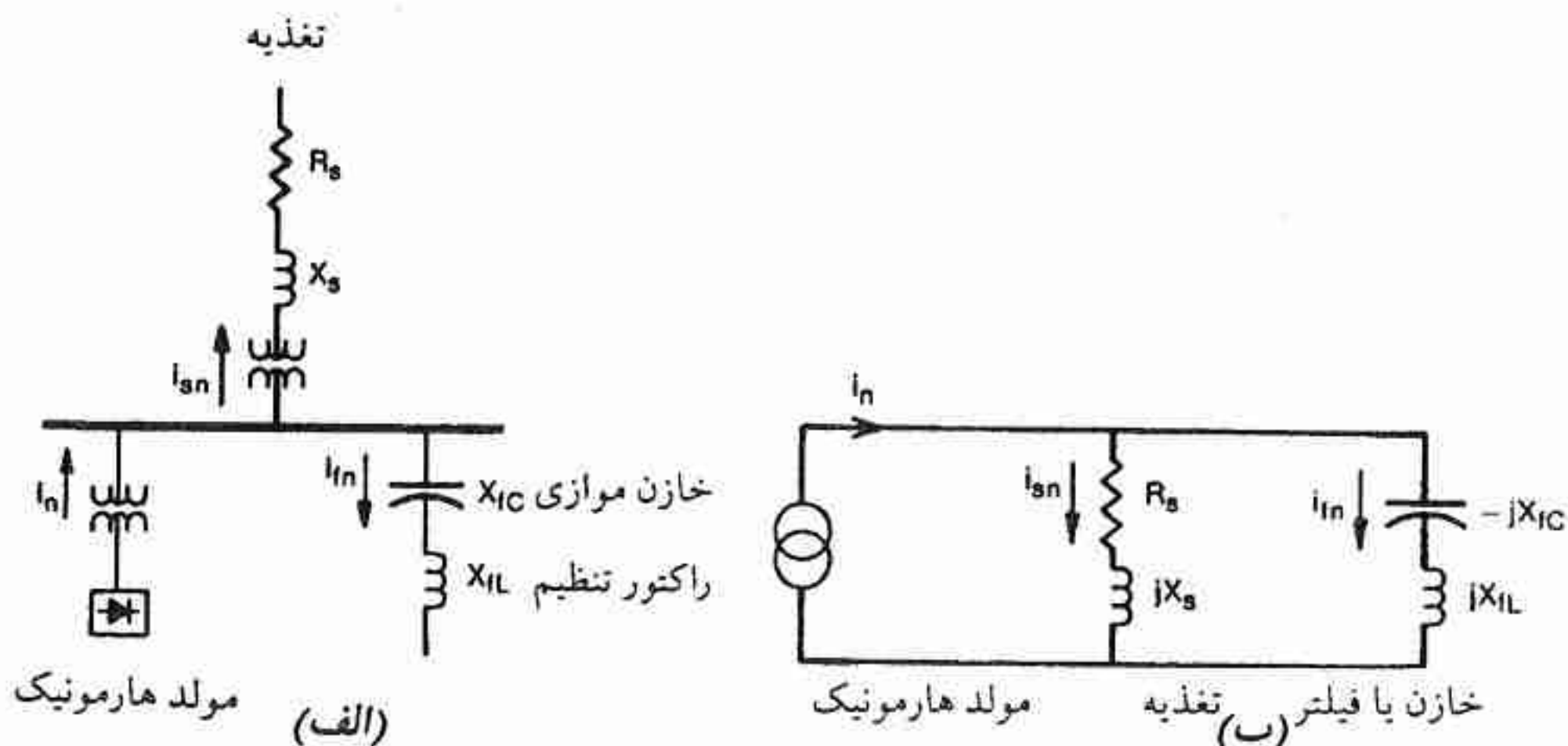
$$Z_f = Z_{fc} + Z_{fl} \quad (6)$$

که در آن Z_{fc} امپدانس خازن و Z_{fl} امپدانس راکتور تنظیم است در صورتی که موجود باشد (بعدا بحث خواهد شد). اندیس f به نقش فیلتری شاخه خازنی اشاره دارد. جریان هارمونیک i_n به نسبت ادمیتانس شاخه های موازی بین خازن و سیستم تغذیه تقسیم می شود. اگر امپدانس معادل تغذیه (به انضمام ترانسفورماتور تغذیه شکل ۵ الف) برابر Z_s باشد، آنگاه

$$i_{fn} = \frac{Z_s}{Z_f + Z_s} i_n = \rho_f i_n \quad (7)$$

و

$$i_{sn} = \frac{Z_f}{Z_f + Z_s} i_n = \rho_s i_n \quad (8)$$



شکل ۵ - (الف) دیاگرام تک خطی سیستم همراه با مولد هارمونیک. (ب) مدار معادل تکفاز سیستم.

اگر چنانچه ضریب توزیع ρ_s در یک فرکانس هارمونیک به خصوص که با یکی از هارمونیک های

تولید شده تطابق دارد، بزرگ باشد، آنگاه تقویت جریان هارمونیک رخ داده و جریان خازن و سیستم تغذیه فوق‌العاده زیاد می‌شود. در حالت خاص اگر چنانچه در فرکانس هارمونیک به خصوص $Z_f + Z_s \rightarrow 0$ ، آنگاه سیستم در آن فرکانس رزونانس می‌نماید. بنابراین بایستی از تحقق چنین شرایطی در فرکانس‌های هارمونیک نزدیک به فرکانس‌هایی که توسط منبع هارمونیک تحریک می‌شوند، جلوگیری کرد. به عبارت دیگر بایستی مقدار ρ_s را در این فرکانس‌ها پایین نگاهداشت. نقش راکتور تنظیم سری شده با خازن در شکل ۵ الف این است که یک شاخه رزونانس سری یا فیلتر را تشکیل دهد طوری که در فرکانس رزونانس (مثلاً هارمونیک پنجم) $Z_f \rightarrow 0$ گردد. در نتیجه $\rho_s \rightarrow 0$ طوری که جریان هارمونیک شاخه تغذیه کاهش یافته و یا از بین می‌رود درحالی که $\rho_f \rightarrow 1$ طوری که $i_{fn} = i_n$ ، یعنی تمامی جریان هارمونیک تولید شده وارد فیلتر می‌گردد. مثال عددی زیر نشان می‌دهد که چگونه می‌توان از این روابط برای بررسی رفتار فیلتر خازنی قابل تنظیم و غیرقابل تنظیم استفاده کرد. فرض می‌شود که امپدانس ترانسفورماتور کاهنده خیلی بیشتر از امپدانس منبع است طوری که بتوان برای یک رنج فرکانس باریک، تقریباً ثابت $X_s / R_s =$ را به کار برد. پارامترها به قرار زیرند:

$$13/8 \text{ kV} = \text{ولتاژ باس}$$

$$476 \text{ MVA} = \text{اتصال کوتاه}$$

$$19/0.4 \text{ MVar} = \text{توان راکتیو خازن}$$

$$\frac{X_s}{R_s} = 10$$

چون راکتانس اندوکتیو متناسب با فرکانس است و راکتانس کاپاسیتیو با فرکانس نسبت معکوس دارد، بنابراین داریم

$$X_s = \frac{n(13/8)^2}{476} = 0.4n$$

$$X_{fc} = \frac{(13/8)^2}{19/0.4n} = \frac{10}{n}$$

$$R_s = \frac{X_s}{10} = 0.04n$$

و

$$\rho_f = \frac{0.04 + j0.4}{0.04 + j(0.4 - 10/n^2)} \quad (9)$$

در شکل ۶ الف، ρ_s و ρ_f نسبت به مرتبه هارمونیک n ترسیم شده‌اند. ملاحظه می‌شود که در هارمونیک پنجم یک رزونانس موازی بین خازن و تغذیه وجود دارد، توجه اینکه $\rho_s \cong \rho_f$ است. اگر چنانچه یک راکتور تنظیم X_{fl} به خازن اضافه گردد تا تشکیل یک فیلتر سری هارمونیک پنجم دهد و مقاومت اهمی راکتور در مقایسه با مقاومت اهمی سیستم قابل اغماض باشد، آنگاه در فرکانس ۶۰ Hz داریم

$$X_{fl} = \frac{X_{fc}}{(\Delta)^2} = \frac{10}{25} = 0.4 \text{ ohm}$$

و معادله ρ_f چنین می‌شود

$$\rho_f = \frac{R_s + jX_s}{R_s + j(X_s + X_{fl} - X_{fc})} \quad (10)$$

شکل ۶ ب پاسخ را بر حسب ρ_s و ρ_f با وجود راکتور تنظیم نشان می‌دهد. توجه اینکه در هارمونیک پنجم $\rho_f = 1$ است ($\rho_s = 0$) و در هارمونیک‌های مرتبه پایین‌تر، ρ_f حداکثر مقدار را دارد (رزونانس موازی) و در حدود ۳/۵۴ است.

از شکل ۶ مشاهده می‌شود که در فرکانس‌های بالا، راکتور تنظیم نسبت ρ_f / ρ_s را (در مقایسه با مقدار این نسبت وقتی راکتور وجود ندارد) کاهش می‌دهد. به همین دلیل، لازم است که یک فیلتر بالا-گذرا به موازات فیلتر هارمونیک پنجم قرار گیرد (به بخش ۱۰-۵ مراجعه شود).

سیستم‌های پیچیده‌تر را می‌توان به کمک برنامه کامپیوتری «پخش بار هارمونیکی»^۱ بررسی کرد. شکل ۷ یک واحد صنعتی فرضی را با دو باس (شین) اصلی ۱ و ۲ نشان می‌دهد. منبع جریان‌های هارمونیک در باس ۱ نشان داده شده است. در هر فرکانس هارمونیک نسبت جریان هارمونیک عبوری از خازن را می‌توان به وسیله ضرایب ρ_{f1} و ρ_{f2} تعیین کرد. به همین ترتیب جریان عبوری از سیستم به وسیله ρ_s تعیین می‌شود. در شکل ۸ ρ_{f1} و ρ_{f2} که به کمک برنامه پخش بار - هارمونیکی محاسبه گردیده است نشان داده شده است. پیک‌های رزونانس مضاعف یا مزدوج^۲ به وسیله دو مدار L-C موجود حاصل شده است. برای خازن C۱ پیک‌ها در فرکانس ۲۶۸ Hz و ۳۵۰ Hz می‌باشند. اگر کلید قدرت ترانسفورماتور T۲ باز شود، یک پیک رزونانس منفرد در فرکانس زیر خواهد بود

$$f = 60 \sqrt{\frac{3/333}{0.1 + 0.333}} = 300 \text{ Hz}$$

این موضوع نشان می‌دهد که چگونه تغییر آرایش سیستم - حتی در باس دیگر - بر روی

رزونانس موازی تاثیر می‌گذارد. وجود خازن C۲ در باس ۲ امپدانس هارمونیک سیستم قبل از ترانسفورماتور T۱ را تغییر می‌دهد.

در عمل به دلیل بهم پیوسته بودن سیستم، اغلب پاسخ فرکانس پیچیده‌تر از مثال‌هایی است که تشریح شد. بدون اینکه وارد جزئیات یک شبکه گسترده شویم مثالی از پاسخ فرکانس نسبتاً پیچیده‌ای را بر حسب خط انتقال طویل مطرح می‌کنیم. به واسطه ماهیت گسترده بودن پارامترهای خط طویل، خط طویل به مثابه یک شبکه نردبانی - که شامل تعداد زیادی از راکتانس‌های اندوکتیو و کاپاسیتیو است - رفتار می‌کند، اما معادلات اصلی به قدر کافی ساده هستند که بتوانند به شکل فشرده بیان شوند. شکل ۹ مثالی از یک بخش ۱۰۰ مایلی خط انتقال ۵۰۰ kV را نشان می‌دهد، مشابه آنچه که قبلاً مورد مطالعه قرار گرفت (به جدول ۳ فصل ۲ مراجعه شود). به کمک معادله ۲ فصل ۲ با در نظر گرفتن راکتانس خط، می‌توان نشان داد که امپدانس نقطه - شروع (تحریک) ۱ هر فاز در ابتدای خط برابر است با

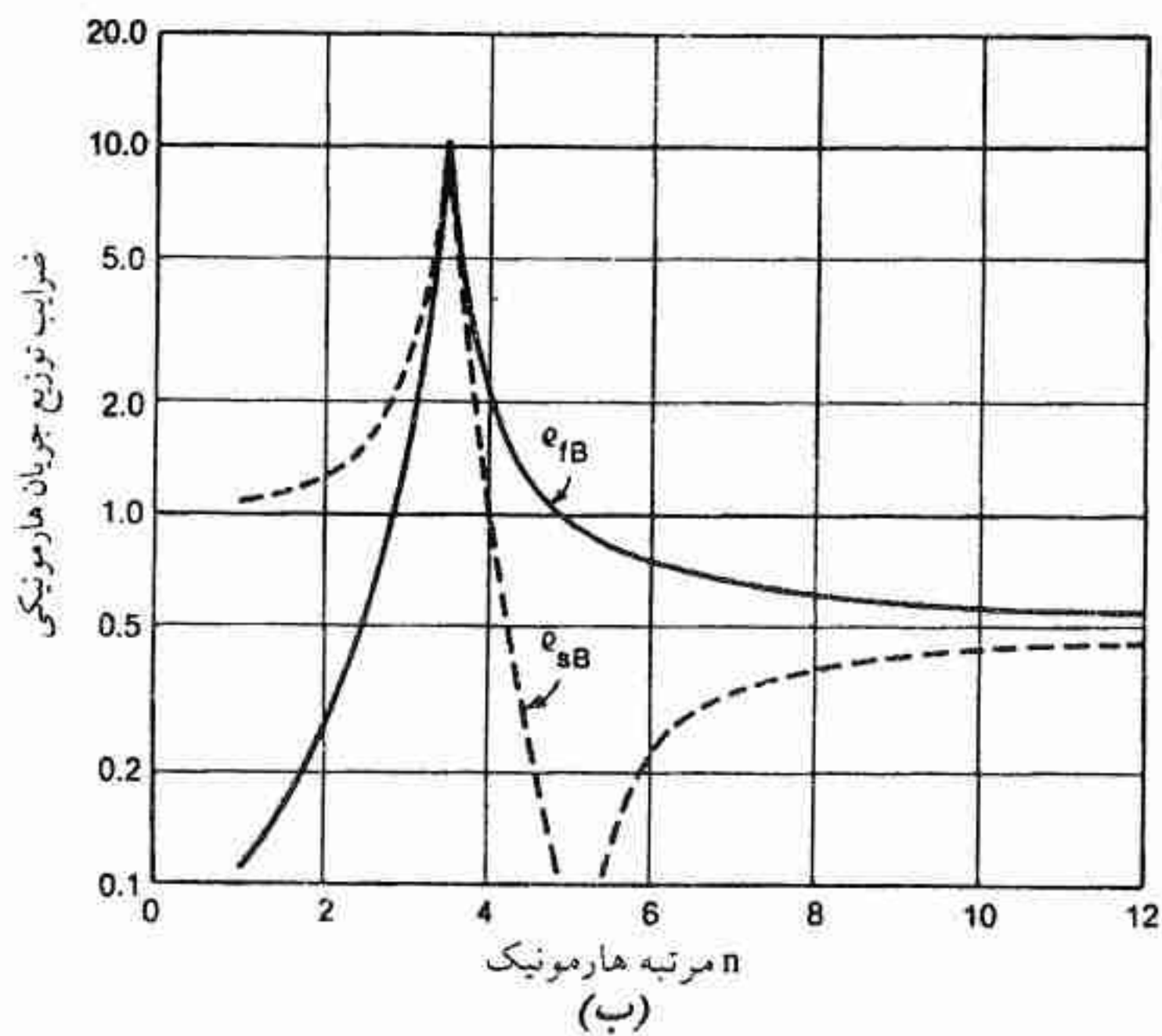
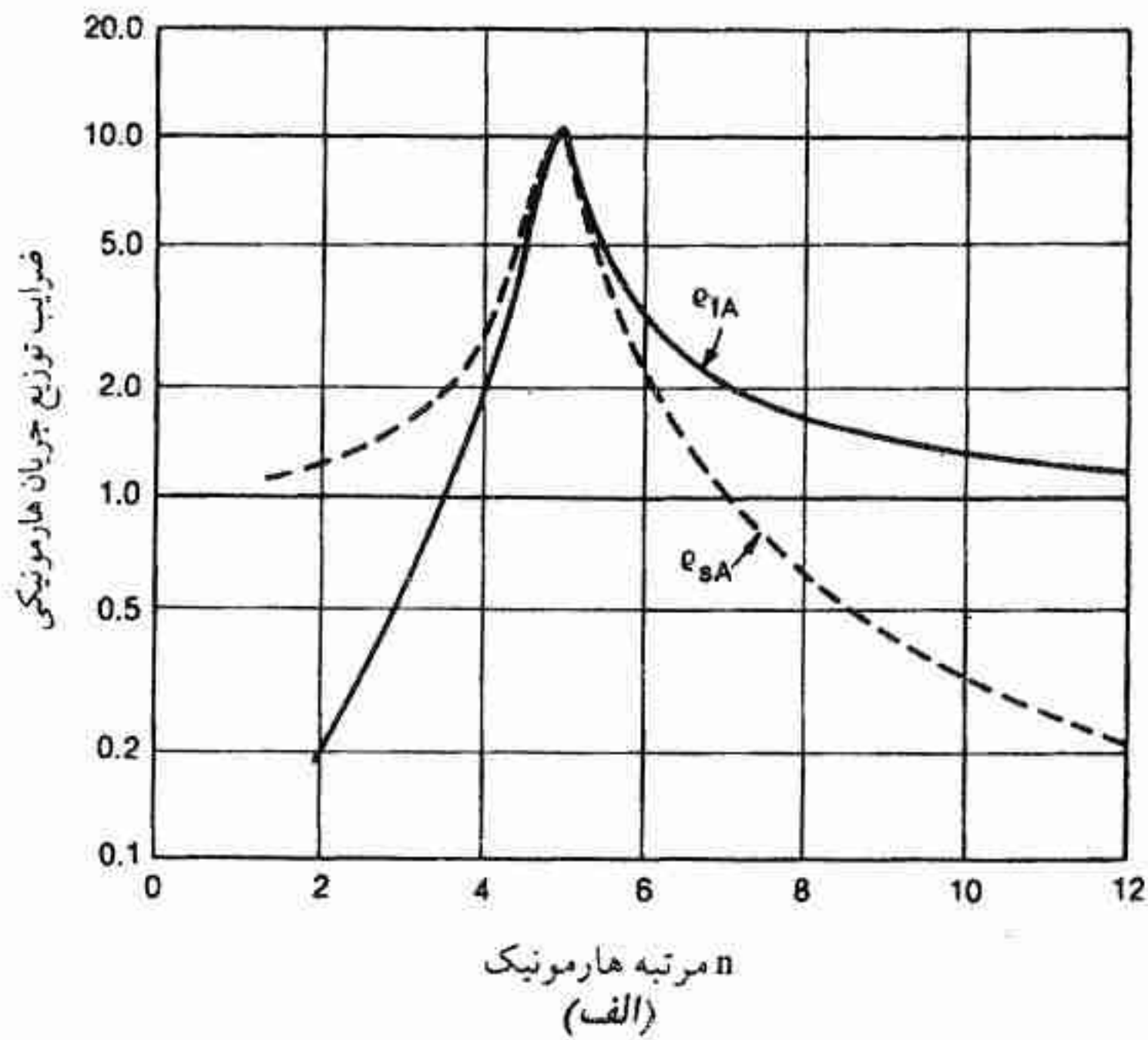
$$Z_s = \frac{V_s}{I_s} = \frac{Z_r \cosh \Gamma a + Z_o \sinh \Gamma a}{(Z_r/Z_o) \sinh \Gamma a + \cosh \Gamma a} + Z_{ts} \quad (11)$$

که در آن $Z_o = [(r + j\omega l)(g + j\omega c)]^{1/2}$ امپدانس مشخصه در فرکانس هارمونیک ω است، Γ توسط معادله ۱ فصل ۲ تعریف شده است، و Z_r امپدانس هر فاز در انتهای خط است. Z_{ts} امپدانس ترانسفورماتور در ابتدای خط است. علائم دیگر مشابه علائم فصل ۲ می‌باشد.

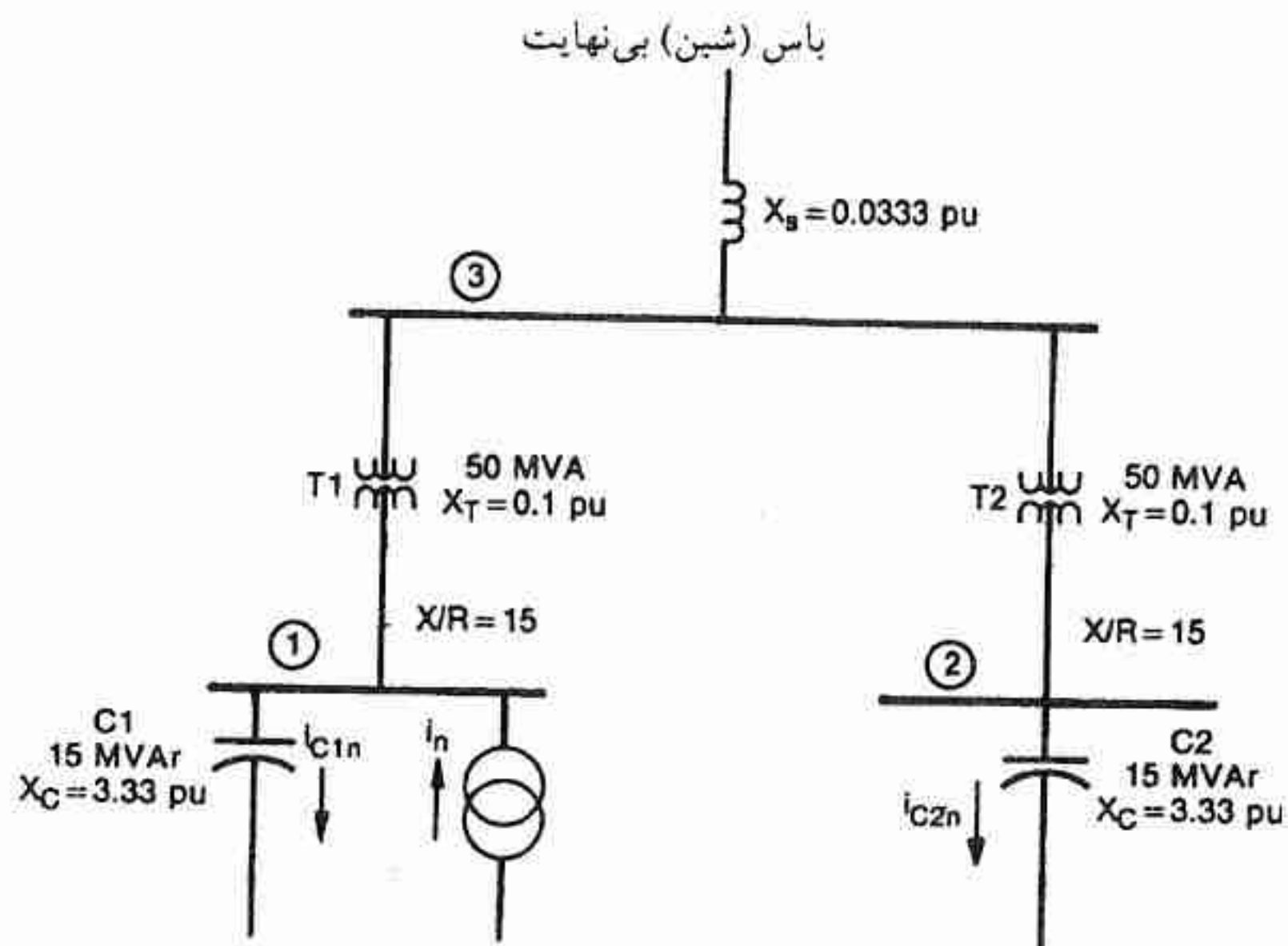
اشکال ۱۰ الف و ۱۰ ب اندازه Z_s را به صورت تابعی از فرکانس، با حضور و غیاب ترانسفورماتور طرف فرستنده^۲ نشان می‌دهند. وقتی فرکانس افزایش می‌یابد یک مجموعه‌ای از قطب‌ها و صفرهای متفاوت دیده می‌شود. قطب‌ها معرف رزونانس‌های موازی هستند که در آنها جریان‌های گردشی (سیرکوله) امواج سیار خط را تشکیل می‌دهند. این شرایطی است که باید از آن اجتناب کرد و مطالعه مشخصات هارمونیک چنین سیستمی در موقع اعمال جبران راکتیو حائز اهمیت است.

۱۰-۵ سیستم فیلتر

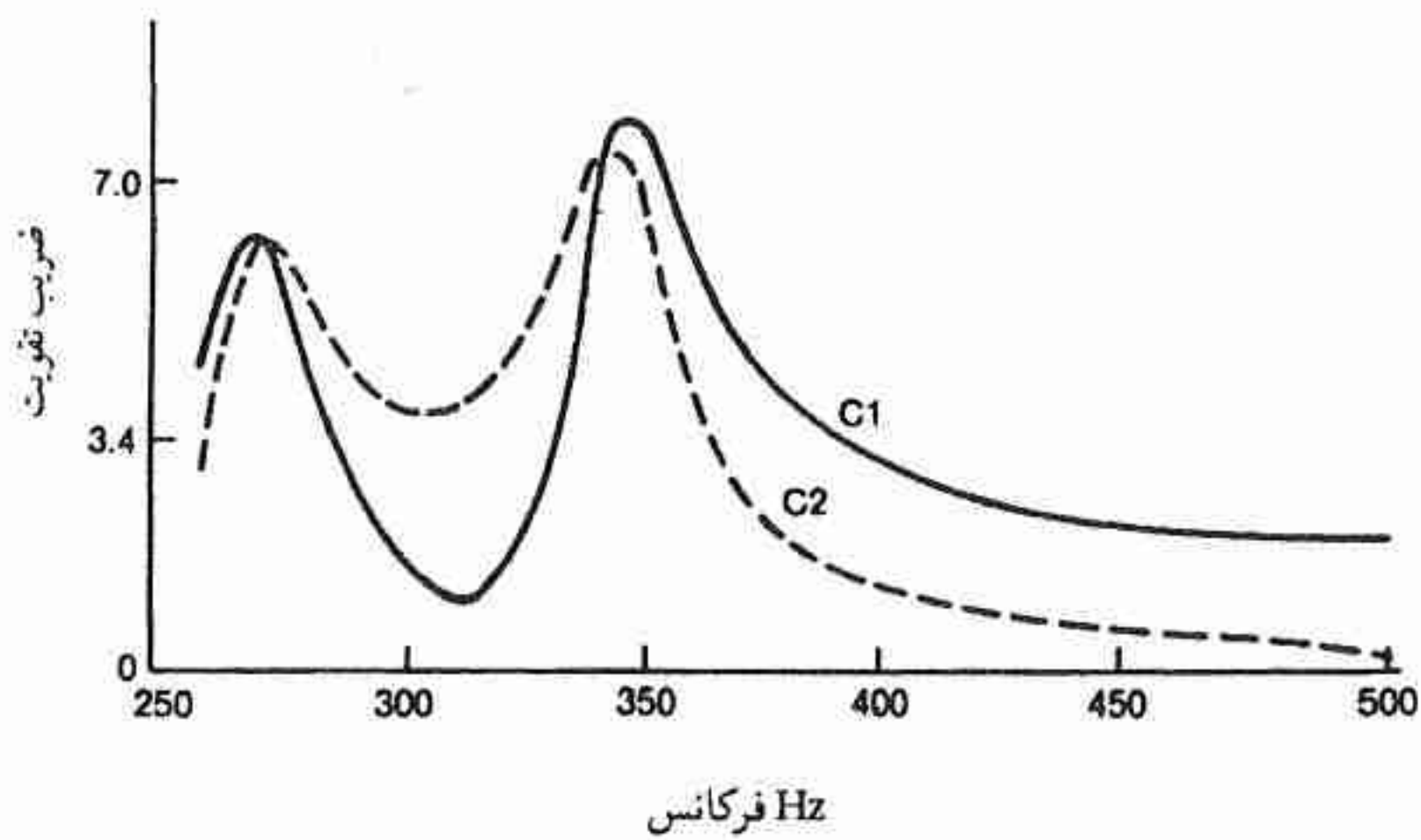
در مواردی که خازن‌های موازی برای بهبود ضریب توان سیستم‌هایی که دارای تعداد زیادی بار



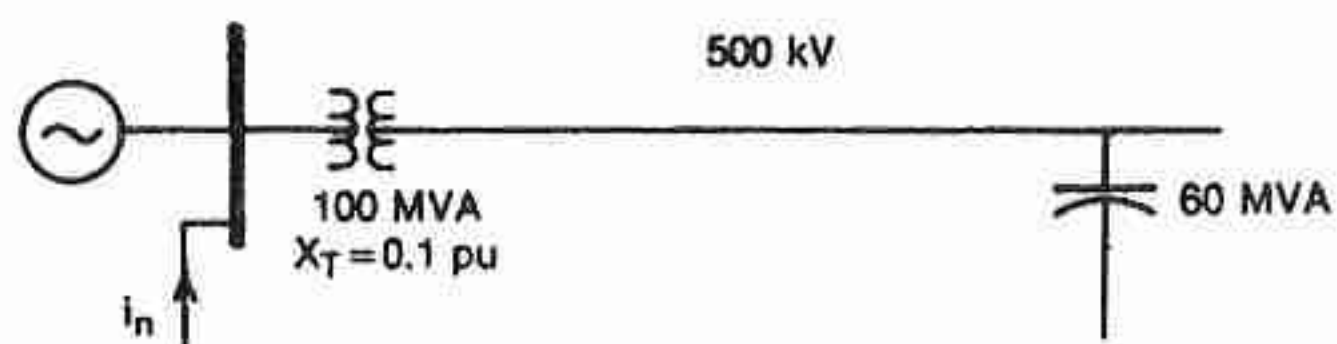
شکل ۶ - ضرایب توزیع جریان هارمونیک نسبت به مرتبه هارمونیک. (الف) بانک خازنی بدون راکتور تنظیم (ب) بانک خازنی همراه با راکتور تنظیم



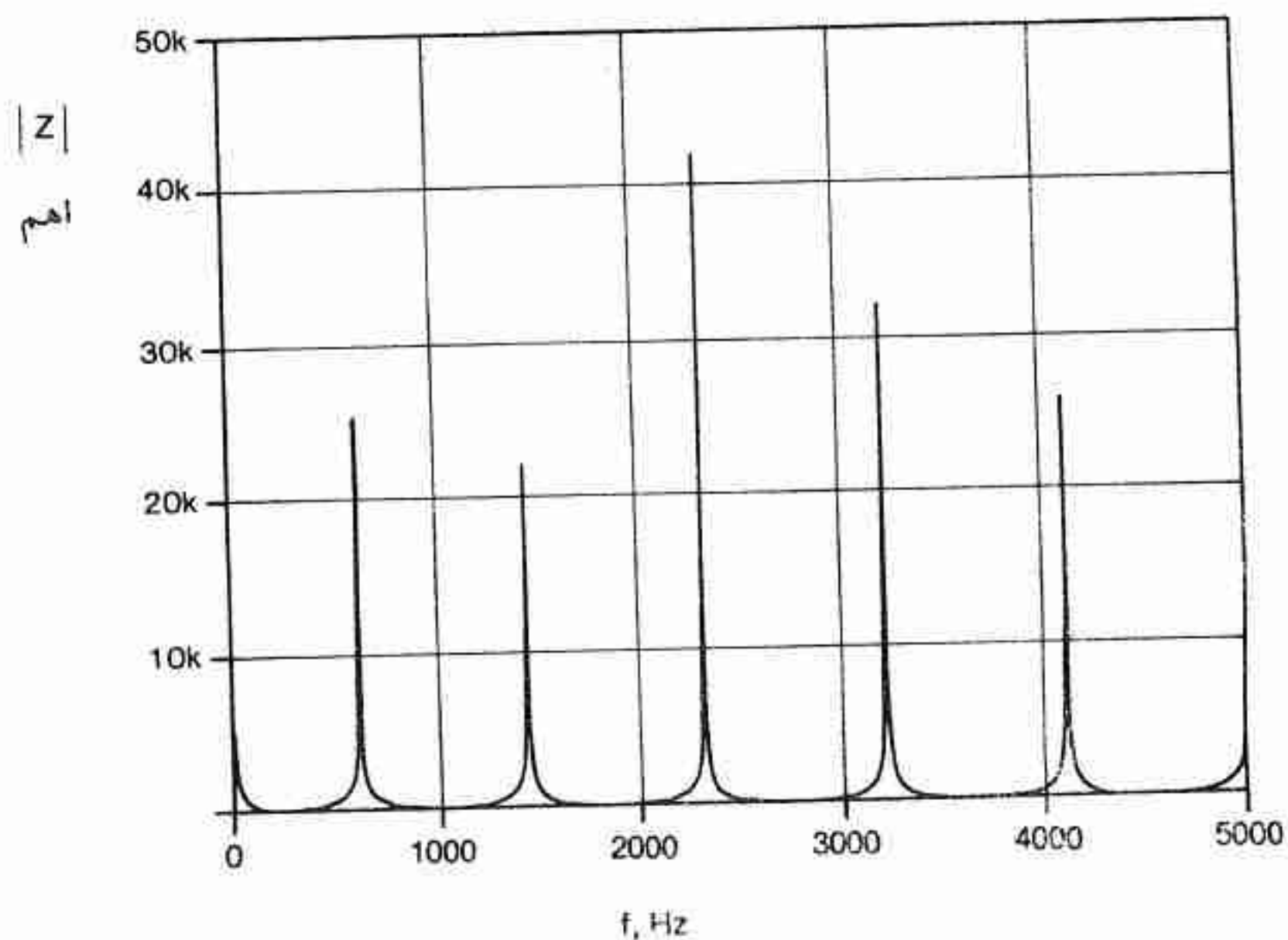
شکل ۷ - واحد صنعتی الکتروشیمیایی فرضی برای نشان دادن کاربرد برنامه پخش بار هارمونیک. یکسو کننده واقع در باس ۱ جریان هارمونیک i_n را تولید می کند.



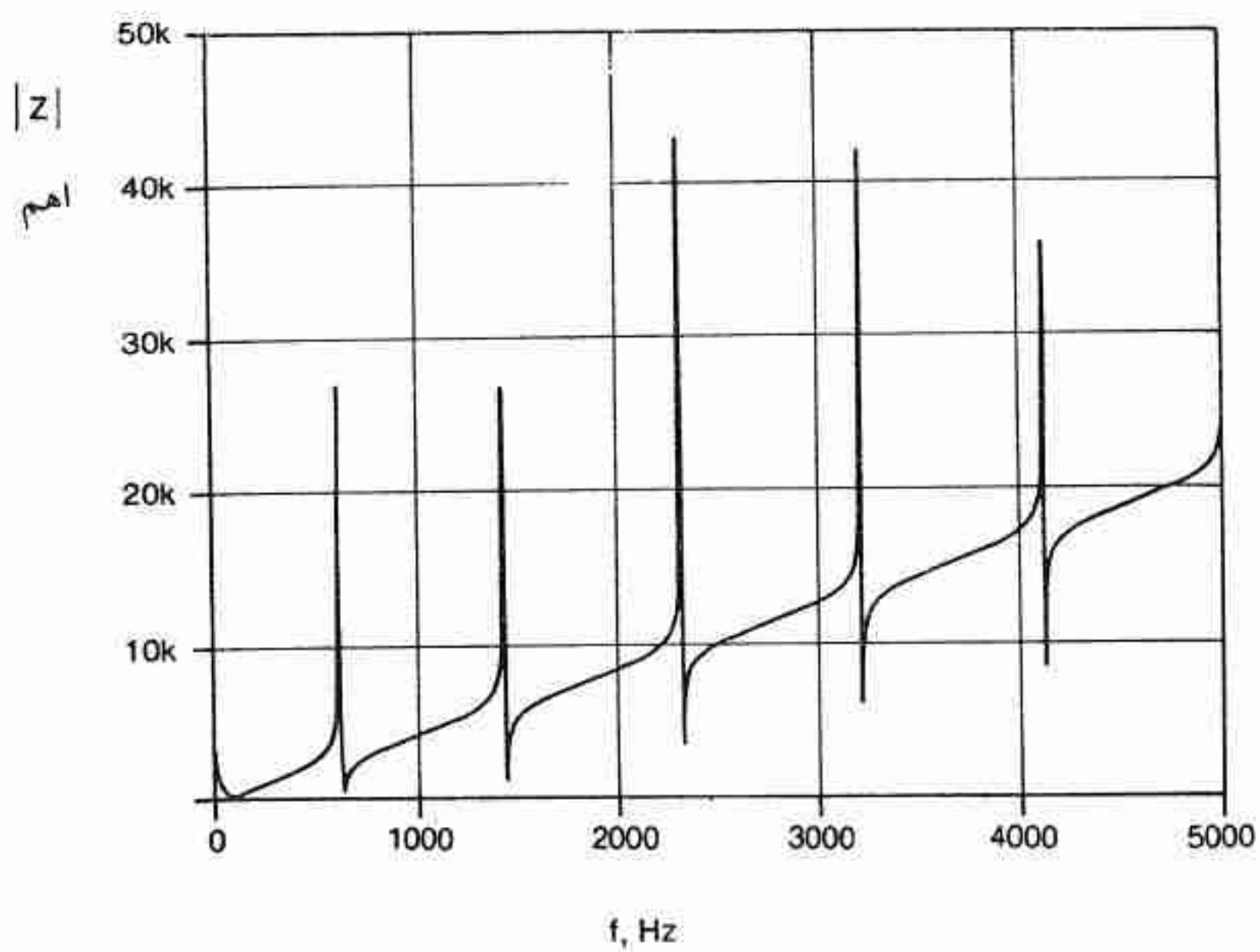
شکل ۸ - پخش بار هارمونیک برای شکل ۷.



شکل ۹ - اثر هارمونیک بر روی خط انتقال.



(الف)



(ب)

شکل ۱۰ - امپدانس نقطه شروع خط انتقال نسبت به فرکانس (الف) بدون ترانسفورماتور (ب) با حضور ترانسفورماتور

مولد هارمونیک هستند به کار می‌روند، اغلب بسیار مشکل است که از رزونانس یا نزدیک به رزونانس در فرکانس‌های هارمونیک غالب اجتناب کرد. در این حالت غالباً راه حل اعمال سیستم فیلتری است که شامل یک یا چند بانک خازنی همراه با راکتورهای قابل تنظیم سری است. همچنین اگر جریان هارمونیک بدون اثر تقویتی رزونانس بیش از اندازه باشد، کاربرد فیلتر ضرورت دارد. در شکل ۱۱ الف مثال ساده‌ای از فیلتر تک فرکانسی را نشان می‌دهد که در فرکانس هم‌نوایی خودش دارای ادمیتانس بزرگی است. شکل ۱۱ ب سیستم مرکب از چند فیلتر را نشان می‌دهد که در فرکانس‌های متفاوت هم‌نوا می‌گردند.

پاسخ یک سیستم فیلتر نمونه به عنوان مثال در شکل ۱۲ نشان داده شده است. این پاسخ فیلتری است که شامل ترکیب موازی دو فیلتر است که برای هارمونیک‌های پنجم و هفتم هم‌نوا گردیده است. مکان هندسی امپدانس مختلط در فرکانس‌های هم‌نوایی 300 Hz و 420 Hz از صفر عبور می‌کند، انحراف کوچک از صفر (آفیت) عمدتاً به واسطه مقاومت اهمی راکتورهای تنظیم است. پاسخ فیلتر را می‌توان به روش دیگری نیز نشان داد، به عنوان مثال، می‌توان بر حسب مقدار و فاز ادمیتانس یا امپدانس، نسبت به فرکانس به صورت منحنی یا جدول نشان داد. همچنین می‌توان از ضرایب توزیع ρ_s و ρ_f استفاده کرد. اغلب از برنامه‌های کامپیوتری «پخش بار هارمونیک» برای مدل کردن پاسخ کل شبکه شامل منابع مولد هارمونیک و فیلترها، استفاده می‌شود. در این محاسبات، تغییرات امپدانس سیستم نسبت به فرکانس در نظر گرفته می‌شود.

فیلتر تک فرکانسی به طور موفقیت آمیز در بسیاری از واحدهای صنعتی به کار رفته است، از آن جمله به طور قابل ملاحظه در تاسیسات الکتروشیمیایی نظیر واحدهای ذوب آلومینیوم و واحدهای شیمیایی کلرسوزآور که در آنها برای الکترولیز محصولات سیستم‌های یکسوکننده بزرگ به کار گرفته شده است، مورد استعمال دارد. در این واحدهای صنعتی معمولاً از مزایای یکسوکننده چندفاز - که در آنها به وسیله جابجایی فاز واحدهای یکسوکننده ۶-پالس، تعداد پالس ۲۴ و یا بیشتر ایجاد می‌کنند - استفاده می‌گردد. با هم‌نوا کردن بانک خازنی برای هارمونیک پنجم و یا نزدیک به آن (هارمونیک پنجم کوچکترین هارمونیک مشخص در یکسوکننده ۶ پالس است)، می‌توان از رزونانس موازی سیستم در هر هارمونیکی اجتناب کرد زیرا برای تمامی فرکانس‌های بیشتر از فرکانس هم‌نوایی، ρ_s کوچکتر از واحد خواهد بود. این مساله حائز اهمیت است که نتیجه رزونانس موازی فیلتر با راکتانس سیستم، در فرکانس هارمونیکی ای نباشد که سیستم در خلال عملکردش با آن مواجه

می‌گردد. به عنوان مثال، اگر رزونانس در هارمونیک چهارم یا خیلی نزدیک آن باشد، هارمونیک چهارم موجود در جریان یورشی ترانسفورماتور بزرگ واقع در باس، می‌تواند ولتاژهای هارمونیک چهارم را با پیک زیاد تحریک نماید.

قبلا در ارتباط با شکل ۶ خاطرنشان کردیم که در مواردی که فیلتر تک فرکانس نمی‌تواند برای فرکانس‌های بالاتر از فرکانس همنوایی خود، فیلتر کردن کافی را فراهم نماید، کاربرد فیلترهای چندگانه^۱ نظیر شکل ۹ ب ضرورت دارد. به منظور نشان دادن رفتار این نوع فیلتر مفروضات زیر را در نظر می‌گیریم:

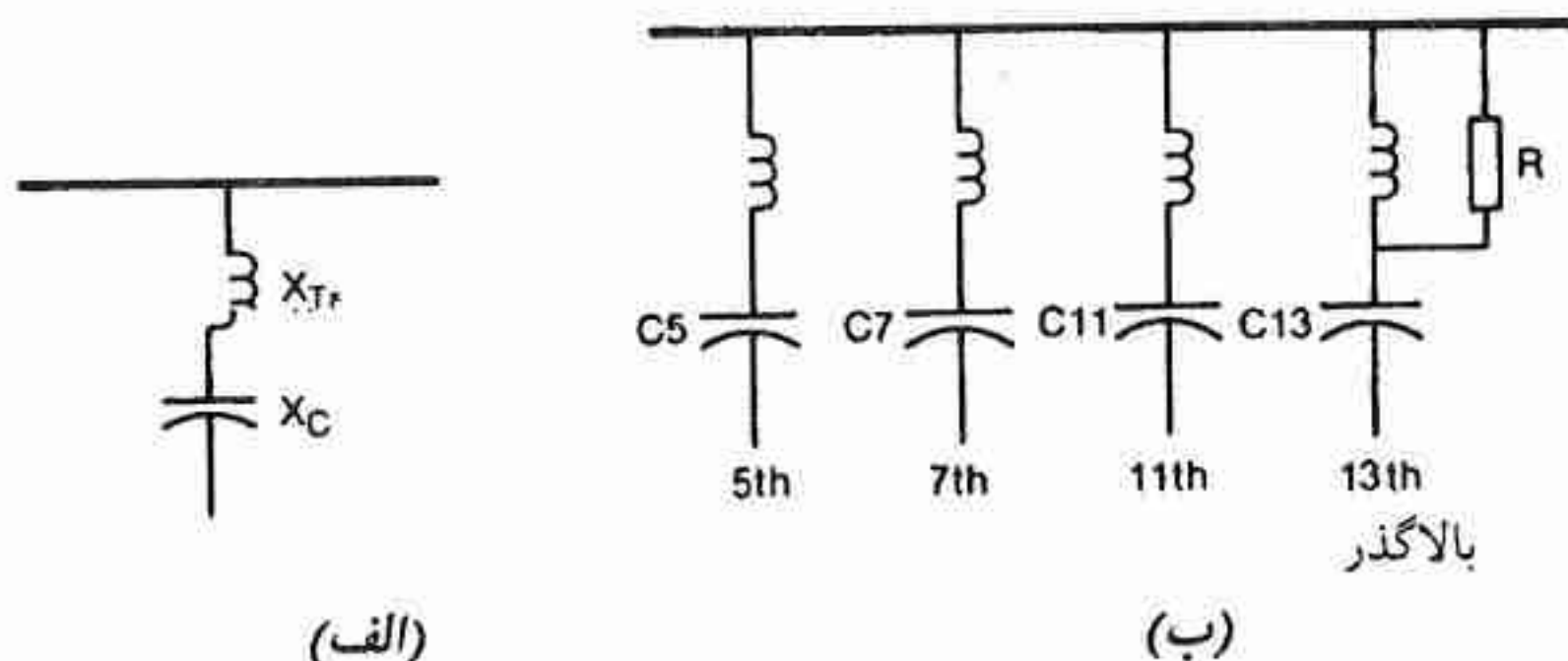
۱- فیلتر هارمونیک ۱۳ام حذف می‌شود و فیلتر هارمونیک ۱۱ام - با موازی کردن مقاومت اهمی با راکتور - به فیلتر بالا - گذر^۲ مبدل می‌گردد.

۲- توان راکتیو فرکانس پایه برای بانک خازنی هارمونیک ۱۵ام ۴۰٪ بیشتر از فیلتر هارمونیک ۱۱ام یا هارمونیک ۱۱ است.

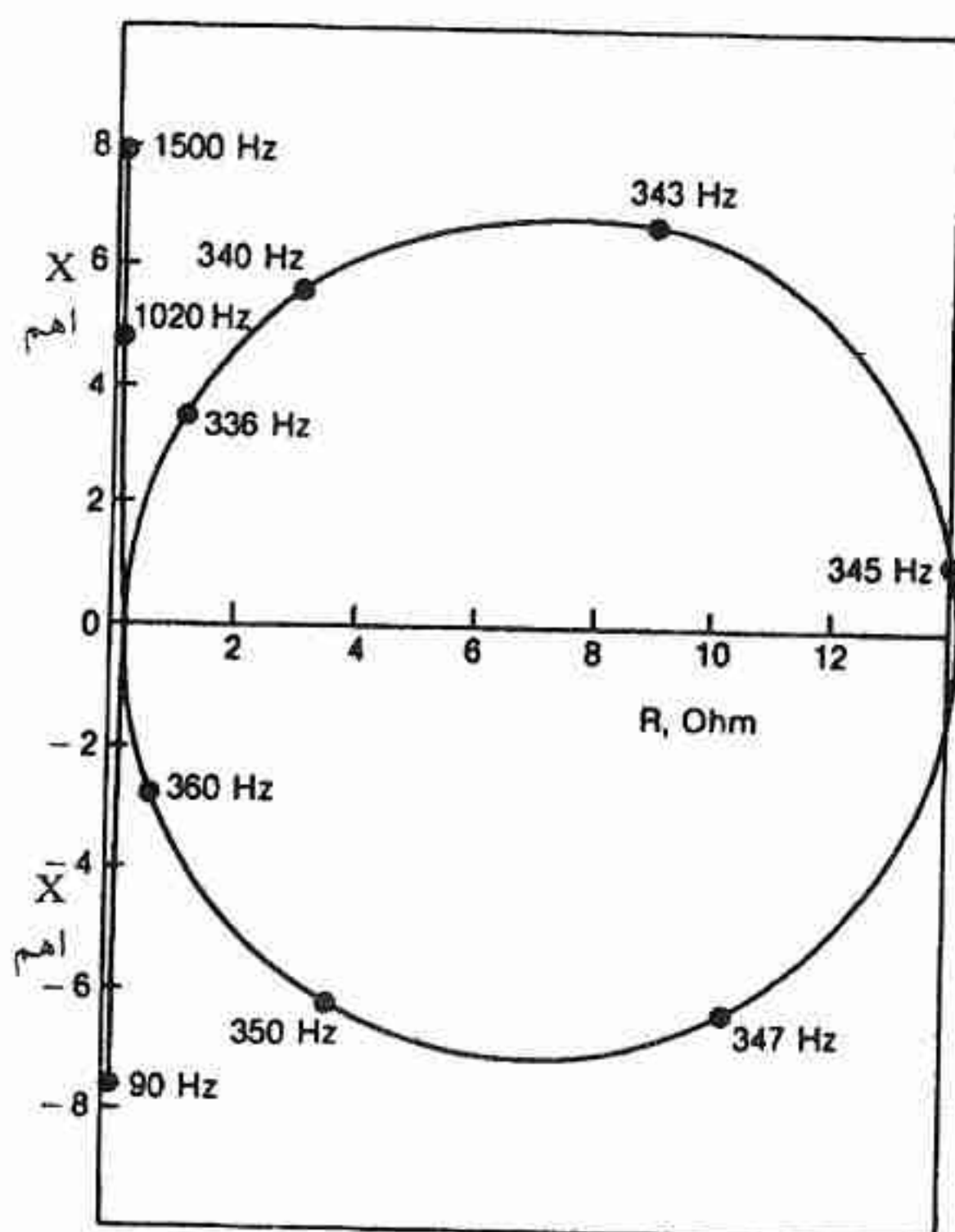
چهار مقدار مختلف مقاومت مورد بررسی قرار گرفته است:

- A. $R = X_o$
- B. $R = 2X_o$
- C. $R = \frac{X_o}{2}$
- D. $R = \infty$ (مقاومت موازی حذف می‌شود)

که در آن $X_o = \sqrt{L_{11} / C_{11}}$ است.



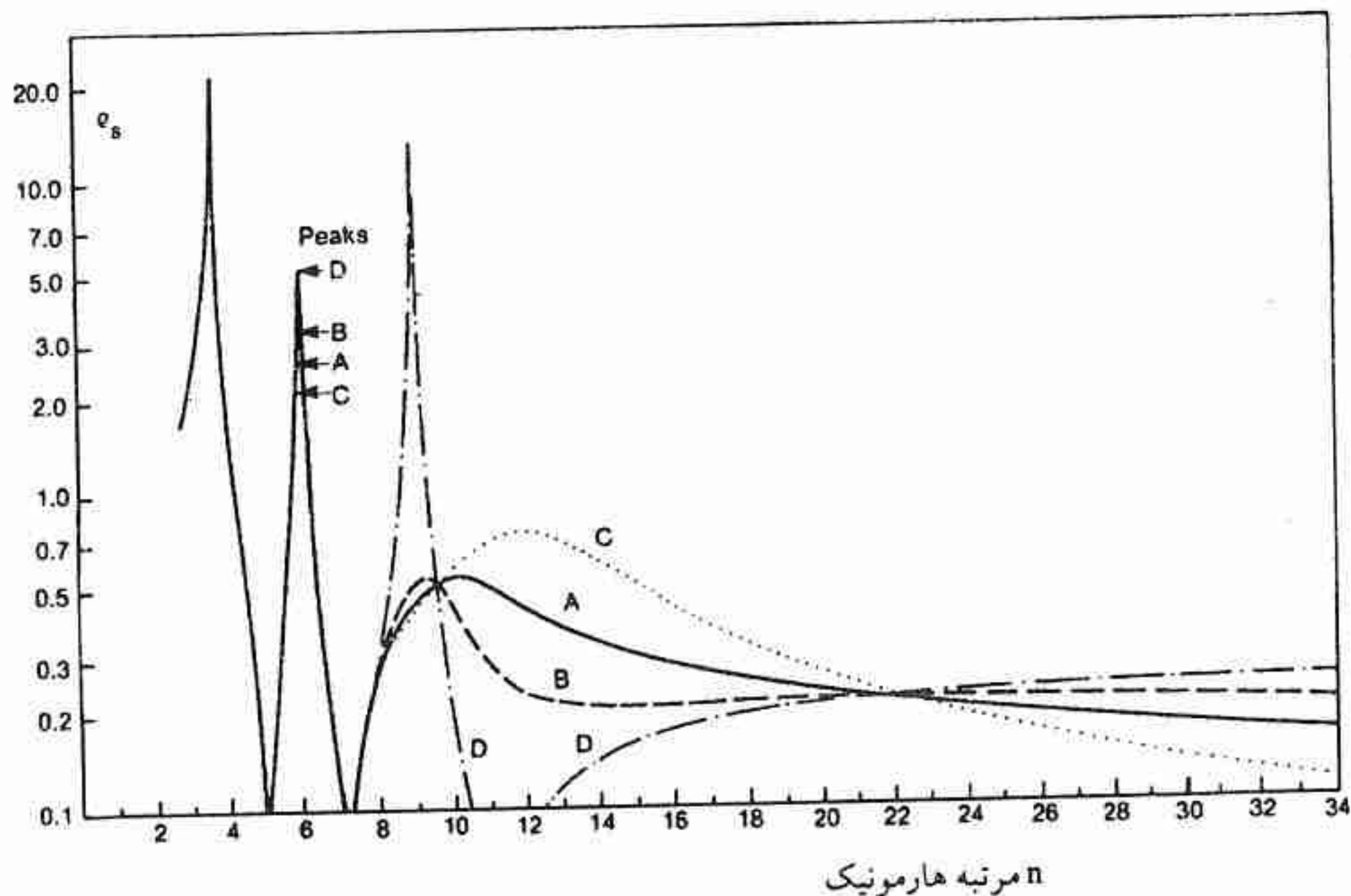
شکل ۱۱ - نمونه‌ای از فیلتر موازی (الف) فیلتر همنوا (ب) توده فیلترهای همنوا همراه با فیلتر بالاگذر.



شکل ۱۲ - امپدانس فیلتر بصورت تابعی از فرکانس.

یک برنامه کامپیوتری پخش بار - هارمونیک به کار گرفته شد تا جریان هارمونیک سیستم بر حسب مقدار p_s برای رنج هارمونیک از مرتبه سوم تا ۳۴ام - محاسبه گردد. نتایج محاسبه در شکل ۱۳ نشان داده شده است. هارمونیک ۱۱ام در حالت D به خوبی فیلتر می شود اما برای هارمونیک های مرتبه بالاتر p_s به مقدار زیاد ۲۵٪ می رسد. فیلتر شدن هارمونیک های مرتبه بالاتر در حالت C به خوبی انجام می گیرد که در آن $R = X_0 / 2$ است اما به بهای اینکه هارمونیک های مرتبه ۱۱ الی ۲۳ به خوبی فیلتر نمی شوند برای حالت های A و B به ترتیب با $R = X_0$ و $R = 2X_0$ ، عمل فیلتر شدن بین دو حد فوق قرار دارد. در موارد عملی مقدار مقاومت موازی با راکتور تنظیم در این محدوده انتخاب می گردد که بهترین مصالحه را بین هارمونیک های مرتبه بالا و مرتبه پایین فراهم می کند.

اعوجاج در ولتاژ هارمونیک - با عبور جریان های هارمونیک از سیستم، ولتاژهای هارمونیک تولید خواهند شد که هر یک از آنها از رابطه زیر تبعیت می نمایند.



شکل ۱۳ - ضریب توزیع هارمونیک ρ_s برای فیلتر هارمونیک ۵ام / ۷ام / ۱۱ام / بالاگذر.

$$V_n = Z_n I_n \quad (12)$$

که در آن I_n جریان هارمونیک عبوری از سیستم و Z_n امپدانس هارمونیک نقطه تحریک سیستم است. با محاسبه ضریب اعوجاج ولتاژ - طبق معادله زیر - می توان معیاری برای انحراف موج ولتاژ سینوسی به دست آورد:

$$DF = \left[\frac{\sum_{n=2}^N V_n^2}{V_1^2} \right]^{1/2} \times \%100 \quad (13)$$

استاندارد IEEE ۵۱۹-۱۹۸۱ حدود بالای مجاز را برای ضریب اعوجاج ولتاژ پیشنهاد می کند. اما باید خاطرنشان کرد که این حدود، مقادیر مطلقی نبوده و یک سیستم قدرت به خصوص به هارمونیک مشخص یا محدوده ای از هارمونیک حساس خواهد بود. در تعدادی از سیستم ها ممکن است تداخل تلفنی قابل تشخیص باشد گرچه ضریب اعوجاج ولتاژ از حد بالای مجاز آن کمتر است.

۱۰-۶ تداخل تلفنی^۱

نوینر حاصل از جریان‌ها و ولتاژهای هارمونیک در سیستم‌های قدرت می‌تواند از طریق میدان‌های مغناطیسی و الکترواستاتیکی با خطوط مخابراتی پیوندد. ضرایب سنجشی تعریف شده است تا بتوان تاثیر نسبی فرکانس‌های مختلف را در تداخل با مکالمات تلفنی مقایسه کرد. پاسخ گیرنده تلفن، پیوستگی بین خطوط سیستم قدرت و خطوط تلفن و همچنین حساسیت گوش انسان به فرکانس‌های مختلف، عوامل موثر در ضرایب سنجش هستند.

در ایالات متحده امریکا، زیر کمیته مشترک توسعه و تحقیق، موسسه برق ادیسون و سیستم تلفن بل ضرایب سنجشی موسوم به ضریب نفوذ تلفنی^۲ TIF بنا نهادند. سهم هر یک از جریان‌ها یا ولتاژهای هارمونیک یک سیستم قدرت ایجادکننده اغتشاش، عبارت از حاصلضرت جریان یا ولتاژ و ضریب سنجش برای آن فرکانس خواهد بود. برای جریان، ضریب $I.T.$ و برای ولتاژ ضریب $KV.T.$ به آن اختصاص داده شده است. نفوذ یک موج جریان کامل برابر است با جذر مجموع مربعات (RSS) تمام فرکانس‌های تکی در حاصلضرب‌های $I.T.$ به انضمام فرکانس پایه. به همین ترتیب نفوذ یک موج ولتاژ کامل برابر است با RSS تمامی فرکانس‌های تکی در حاصلضرب‌های $KV.T.$ در ضرایب TIF موارد زیر منظور می‌گردد:

- ۱- اثر موضوعی نسبی فرکانس f در مدار پیام‌آندوری که در تلفن شنیده می‌شود.
- ۲- کوپلاژ بین خطوط تلفن و خطوط قدرت که فرض می‌شود مستقیماً با فرکانس f متناسب است.

مورد اول که موسوم است به سنجش پیام - C برای آخرین دستگاه تلفن‌های BTS (نوع ۵۰۰)، عبارت است از اثر تداخل فرکانس f نسبت به فرکانس ۱۰۰۰ Hz که به وسیله آزمایش‌های موضوعی معین می‌گردد.

$$TIF_f = 5 P_f f \quad (14)$$

که در آن P_f اثر تداخل نسبی در f است و در ۱۰۰۰ Hz P_f برابر ۱ است. بنابراین

$$TIF_{1000} = 5 \times 1 \times 1000 = 5000$$

شکل ۱۴ آخرین ضرایب TIF (۱۹۶۰) را به شکل گرافیکی نشان می‌دهد. به دلیل اینکه سنجش پیام - C به طور وسیعی به وسیله مشخصات شنونده‌ها کنترل می‌شود، انتظار نمی‌رود که در آینده

محاسبه مجدد TIF ضرورت پیدا کند.

اندازه گیری جریان یا ولتاژ TIF را می توان به روش های متعدد انجام داد. وسایل معینی را می توان برای اندازه گیری مستقیم TIF به کار گرفت. به عنوان مثال، با اتصال واحد کوپلاژ جریان A ۱۰۶ Western Electric به دستگاه اندازه گیری نویز، $3A$ Western Electric، مستقیماً TIF اندازه گیری می شود. دستگاه A ۳ شامل مدار سنجش پیام C است در حالی که واحد کوپلاژ معرف چند برابرکننده فرکانس f است. همچنین با جایگزین کردن واحد کوپلاژ ولتاژ به جای کوپلاژ جریان می توان TIF ولتاژ را اندازه گیری کرد.

در روش دیگر اندازه گیری می توان جریان و یا ولتاژ هارمونیک را به وسیله تحلیل گرهای هارمونیک متعدد موجود اندازه گیری کرده و مقدار به دست آمده برای هر هارمونیک را در ضریب TIF فرکانس های تکی مربوطه ضرب نمود (به شکل ۱۴ مراجعه شود). به کمک این مقادیر $I.T$ یا $KV.T$ موج کامل جریان یا ولتاژ به شرح زیر محاسبه می گردد،

$$I.T = \left[\sum_{f=60Hz}^{5000} (I_f \cdot T_f)^2 \right]^{1/2} \quad (15)$$

یا

$$KV.T = \left[\sum_{f=60Hz}^{5000} (KV_f \cdot T_f)^2 \right]^{1/2} \quad (16)$$

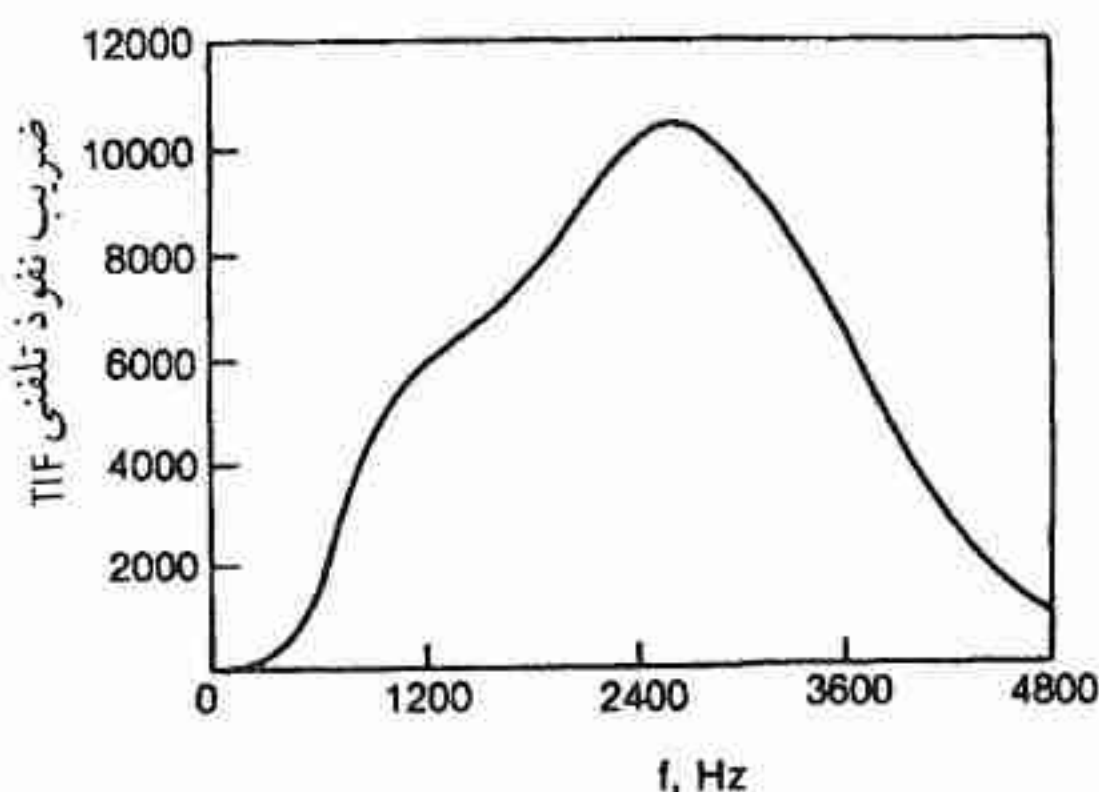
که در آن

$I_f T_f$ = حاصلضرب $I.T$ تک فرکانس.

$KV_f T_f$ = حاصلضرب $KV.T$ تک فرکانس.

T_f = ضریب TIF تک فرکانس مربوطه که از شکل ۱۴ یا از جدول مربوط به این ضرایب به دست می آید.

اینکه آیا یک مقدار معینی از حاصلضرب $I.T$ یا $KV.T$ با سیستم مخابرات صوتی تداخل می کند به عوامل متعددی بستگی دارد که این عوامل به تاثیر متقابل فیزیکی سیستم قدرت و سیستم ارتباطات مربوط می شود.



شکل ۱۴ - منحنی سنجش ضریب نفوذ تلفنی

بحث کامل «هماهنگی اندوکتیو» بین سیستم قدرت و سیستم مخابرات صدا خارج از بحث این فصل می باشد اما در مراجع انتهایی فصل آمده است. البته بیان چند اظهارنظر قابل ارزش است.

۱- به استثناء مواردی که مدارها خیلی به هم نزدیک هستند نظیر کاربرد دکل های مشترک، ولتاژهای القا شده توسط جریان TIF از میدان الکتریکی القایی حاصل از ولتاژ TIF دارای اهمیت بیشتری است.

۲- ولتاژ القا شده اساساً القاء طولی است و عمدتاً به واسطه جریان باقیمانده (توالی - صفر) در خط قدرت است. اگر چنانچه جریان های هارمونیک توالی مثبت یا توالی منفی می بودند، مشابه آنچه که در واحدهای یکسوکننده ۶ پالسی است و مدار قدرت کاملاً متعادل می بود، جریان هارمونیک باقیمانده وجود نداشت و ضریب TIF حداقل می بود.

۳- امپدانس های نامتعادل خطوط ac بخشی از هارمونیک های متعادل را به توالی صفر تبدیل می نمایند که برای مدار مخابراتی صوت جریان های باقیمانده تلقی می شوند.

۴- ممکن است شبکه انتقال ولتاژ - بالا توسط ترانسفورماتور قدرت به شبکه زیرانتقال ولتاژ - پایین تبدیل گردد. نویز پیوسته با شبکه ولتاژ - پایین ممکن است برای مدار مخابراتی که با شبکه زیرانتقال دارای دکل مشترک هستند، ایجاد مزاحمت نماید.

۵- به واسطه این عوامل و سایر عوامل متغیر نسبت دادن حدود معین به حاصلضرب های $I.T$ و $kV.T$ مشکل است.

مراجع

1. E. W. Kimbark, *Direct Current Transmission*. Vol. I, Chap. 8, Wiley, New York, 1971.
2. J. C. Read, "The Calculation of Rectifier and Inverter Performance Characteristics," *J. IEE*, 92, pt. 2, 495-509, (1945).
3. J. H. Galloway, "Harmonic Line Currents in Large Thyristor Six-Pulse Converters," *IEEE Industry App. Soc. 8th Annu. Mtg. Record*, 753-759 (Oct. 1973).
4. H. A. Gauper, "Regulating and Industrial Aspects of Power Conversion Interference," *IEEE Industr. Static Power Conversion Conf. Rec.*, Cat. No. 34C20, pp. 109-111 (1965).
5. W. C. Ball and C. K. Poarch, "Telephone Influence Factor (TIF) and its Measurement," *AIEE Trans.* 79, pt. II, 659-664 (Jan. 1961).
6. *Limits for Harmonics in the United Kingdom Electricity Supply System*, System Design and Development Committee, The Electricity Council (Britain), Recommendation G5/3, Sept. 1976.
7. W. G. Sherman, "Summation of Harmonics with Random Phase Angles," *Proc. IEE* 119, 1643-1648 (Nov. 1972).
8. N. B. Rowe, "The Summations of Randomly-Varying Phasors or Vectors with Particular Reference to Harmonic Levels," *IEE Conf. Publ.* 110, 177-181 (April 1974).
9. R. D. Evans, "Harmonics and Load Balance of Multiphase Rectifiers," *Trans. AIEE* 62, 182-187 (1943).
10. G. L. Brewer, "A Simple Method for Estimating Harmonic Filter Performance," *IEE Conf. Publ.* 110, 162-167 (April 1974).
11. D. E. Steeper and R. P. Stratford, "Reactive Compensation and Harmonic Suppression for Industrial Power Systems Using Thyristor Converters," *IEEE Trans.* IA-12, 232-255 (May 1976).
12. A. H. Moore, "Application of Power Capacitors to Electrochemical Rectifier Systems," *IEEE Trans.* IA-13(5), 399-406 (Sept./Oct. 1977).
13. *IEEE Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation of Power Converters*, IEEE Standard 519-1981.
14. Engineering Reports of the Joint Subcommittee on Development and Research of the Edison Electric Institute and the Bell Telephone System, 5 Volumes, July 1926 to January 1943.
15. *Report on Harmonic Distortion caused by Converter Equipment*, British Electricity Boards A.C.E. Report No. 15, 1970.
16. W. L. Kidd and K. J. Duke, "Harmonic Voltage Distortion and Harmonic Currents in the British Distribution Network, Their Effects and Limitation," *IEE Conf. Publ.* 110, 228-234 (April 1974).
17. G. Deloux, "International Standardization and Electric Power Supply Network Disturbances," *IEE Conf. Publ.* 110, 223-227 (April 1974).
18. C. G. Amato, "A Simple and Speedy Method for Determining the Fourier Coefficients of Power Converter Waveforms," *IEEE Industry Gen. Appl. 4th Annu. Mtg. Rec.*, 477-483, (Oct. 1969). Reprinted in *Power Semiconductor Applications II*, 44-50, IEEE Press, New York, 1972.
19. J. H. Galloway, "Line Current Waveforms and Harmonics for a Large Multiphase Converter System," *IEEE Trans.* IA-13, 394-399 (Sept. 1977).
20. R. P. Stratford, "Analysis and Control of Harmonic Currents in Systems with Static Power Converters," *IEEE Trans.* IA-17, 71-81 (Jan. 1981).

هماهنگی توان راکتیو^۱

K.A. WIRGAU

۱-۱۱ مقدمه

در سال‌های اخیر توجه فزاینده‌ای به بهبود عملکرد سیستم قدرت از طریق کاهش مصرف مواد سوختی و بهره‌برداری بهتر از وسایل و تجهیزات موجود و در نتیجه اجتناب از خرید تجهیزات جدید، معطوف گشته است (۱-۱۳). عوامل دیگری که موسسات از آن متأثر هستند عبارت از تورم، کمبود مواد سوختی و افزایش قیمت و مضیقه قرض گرفتن پول کمتر خواهد بود. یکی از روش‌هایی که این موضوع را مورد توجه قرار می‌دهد مدیریت توان راکتیو^۲ می‌باشد.

به طور طبیعی، دو نوع عبور توان راکتیو در سیستم قدرت وجود دارد:

۱- توان راکتیوی که توسط بارها مصرف می‌شود.

۲- توان راکتیوی که در داخل شبکه مصرف می‌شود.

اجزایی که توان راکتیو مصرف می‌کنند شامل ژنراتورها و کندانسورهای سنکرون که با زاویه پیش‌فاز کار می‌کنند، راکتورهای موازی، اندوکتانس خطوط و ترانسفورماتور، جبران‌کننده‌های راکتیو استاتیک و بارها می‌باشند. ژنراتورها و کندانسورهای سنکرون با عملکرد پس‌فاز، خازن‌های استاتیک، جبران‌کننده‌های استاتیک و کاپاسیتانس کابل‌ها و خطوط، تولیدکننده توان راکتیو

1- Reactive Power Coordination

2- Reactive Power Management

می‌باشند. با توجه به تمامی اعمال متقابل بین اجزاء سیستم اعمال روش هماهنگی لازم است که طی آن ولتاژ و پخش توان راکتیو به گونه‌ای کنترل شود تا تلفات سیستم مینیمم گردد. برای نیل به این هدف برنامه‌های کامپیوتری بهینه‌سازی کمک کننده است.

مدیریت توان راکتیو را می‌توان به صورت کنترل ولتاژ ژنراتورها، تنظیم تپ ترانسفورماتورها، جبران‌سازی و بانک‌های راکتور و خازنی موازی قابل سوئیچ (به اضافه نصب بانک‌های خازنی یا راکتور جدید) تعریف کرد به گونه‌ای که بهترین کنترل ولتاژها و کمترین تلفات سیستم را فراهم نماید. مدیریت توان راکتیو از دیدگاه موسسات تولیدکننده برق در شرایط ماندگار و دینامیک سیستم می‌تواند به طبقه‌بندی زیر تقسیم گردد:

۱- طرح ریزی توان راکتیو^۱

۲- طرح ریزی بهره‌برداری سیستم^۲

۳- کنترل و پخش توان راکتیو^۳

طرح ریزی توان راکتیو به نصب کردن یا برداشتن تجهیزات توان راکتیو در سیستم قدرت ارتباط دارد. این طرح ریزی به طور نمونه برای شرایط سیستم در چندین ماه تا چندین سال در آینده انجام می‌شود.

طرح ریزی بهره‌برداری سیستم به بهبود بهره‌برداری از تجهیزات توان راکتیو موجود مربوط می‌شود. این طرح ریزی برای شرایط سیستمی که انتظار می‌رود که در چند روز تا یک سال آینده اتفاق بیفتد، انجام می‌شود.

کنترل و پخش توان راکتیو بهره‌برداری واقعی تجهیزات را معین می‌کند. تجزیه و تحلیل مربوطه برای چندین ثانیه تا چندین ساعت قبل از اجرا، انجام می‌شود.

اصطلاح تجهیزات^۴ علاوه بر وسایل جبران‌کننده توان راکتیو، بر وسایل مخابراتی، کنترل و نظاره کردن (دیده‌بانی^۵) - که برای انجام پخش بار زمان واقعی^۶ لازم است - اطلاق می‌شود.

تجهیزات جبران‌کننده توان راکتیو که ممکن است نصب گردد و یا از سیستم برداشته شود یا کنترل گردد شامل: خازن‌های موازی قابل سوئیچ، راکتورهای موازی، خازن‌های سری، جبران‌کننده‌های استاتیک، کندانسورهای سنکرون، ژنراتورها و ترانسفورماتورهای با تپ چنجر زیر بار^۷ می‌باشد.

1- Reactive Power Planning 2- System Operations Planning

3- Reactive Power Dispatch and Control

4- Equipment

5- Monitoring

6- Real - Time

7- Load Tap Changing Transformer

تجهیزات فرعی شامل: وسایل اندازه‌گیری توان راکتیو، رله‌ها، کنترل‌های اتوماتیک، سوئیچ‌ها و کلیدهای قدرت و وسایل مخابراتی (مثلا حامل خط انتقال PLC) می‌باشد.

۱۱-۲ مدیریت توان راکتیو

طرح‌ریزی توان راکتیو عمل جامع مدیریت توان راکتیو می‌باشد. مساله طرح‌ریزی از نظر ریاضی مساله بزرگی است (با در نظر گرفتن مساله اقتصادی و ایمنی) و تا امروزه برای سیستم‌های بزرگ (نظیر، ۵۰۰ باس و ۱۰۰ اضطرار^۱) به طور موفقیت‌آمیز حل نشده است. در حال حاضر تحقیقات در زمینه حل مساله اندازه^۲ ادامه دارد و در این فصل تشریح می‌گردد.

در بخش طرح‌ریزی توان راکتیو هدف این است که هزینه تجهیزات توان راکتیو مورد نیاز را می‌نیمم نموده و سیستم قدرت را قادر سازد تا در هنگام وقوع شرایط اضطراری، به شکلی قابل قبول به کار خود ادامه دهد. این موضوع شامل تعیین بهینه نصب تجهیزات توان راکتیو - که همزمان هر اضطراری را ارضاء می‌کند - و پخش توان راکتیو می‌باشد. هدف از فراهم کردن توان راکتیو اضافی جدید کنترل کردن تغییرات ولتاژ پس از وقوع اضطرار است.

با مشاهده روابط بین معادلات شبکه سیستم قدرت قبل و بعد از وقوع حادثه (مثلا، شرایط اضطراری یا قطع خط) روشی جهت به دست آوردن ضرایب خلوت (تنگ^۳) از صدها باس و صدها شرایط اضطراری - تنها با در نظر گرفتن ضرایب خلوت (تنگ) سیستم قدرت مبنا - توسعه یافته است. مجموعه ضرایب تنگ از نتایج حل پخش توان است.

نوع ویژه‌ای از برنامه‌ریزی خطی مبتنی بر الگوریتم سیمپلکس توسعه یافته است که این فرموله کردن جدید را در خود جا داده است. الگوریتم جدید از ساختار نظری مساله و همچنین از ویژگی‌های مخصوص فرایند حل مساله بهره‌برداری نموده است. این فرموله کردن به طور موفقیت‌آمیز به سیستم دارای ۶۰۰ باس و ۲۸۵ حالت اضطراری اعمال شده است.

عناوین زیر یک شمای کلی از مدیریت توان راکتیو در بهره‌برداری را معرفی می‌نماید.

۱۱-۲-۱ اهداف موسسه برق

اهداف موسسه برق در مدیریت هر یک از طبقه‌بندی‌های فوق شامل دو مورد زیر است:

۱- ایمنی^۱۲- اقتصادی بودن^۲

در گذشته مساله ایمنی موجب عکس العمل موسسات در مقابل مساله توان راکتیو و مساله کنترل ولتاژ می گردیده است. وقتی گفته می شود که سیستم قدرتی در وضعیت ایمن قرار دارد که بتواند اغتشاشی را تحمل نماید بدون اینکه در بار آن و محدوده عملکرد آن تخلفی رخ دهد. در عمل، میزان ایمنی سیستم که در طرح ریزی در نظر گرفته می شود با ملاحظات اقتصادی محدود می گردد. طرح ریزی و بهره برداری هر دو بایستی سیستم را ایمن نگاهدارند در حالی که هزینه را افزایش می دهند. مساله اقتصادی شامل محاسبات راه حل های مختلف بر اساس مقایسه سود کل به هزینه کل است. مدیریت توان راکتیو در هر دو قسمت طرح ریزی و بهره برداری، اقتصادی بودن و ایمن بودن را تقویت می کند.

۱۱-۲-۲ اقدامات موسسه

برنامه های شبیه سازی اصلی که موسسات در طرح ریزی (توان راکتیو و بهره برداری سیستم) به کار می برند شامل برنامه های پخش توان و پایداری گذراست. در حال حاضر، به میزان قابل توجهی قضاوت های مهندسی و سعی و خطا لازم است تا سیستم قدرتی را برای توزیع رضایتبخش توان راکتیو و پروفایل ولتاژ طرح ریزی کرد.

از اقدامات موسسات این است که ولتاژ را در نقاط کلیدی سیستم مورد نظاره (دیده بانی) قرار دهند. این اطلاعات به انضمام تحلیل غیرفعال^۳ سیستم منجر به فراهم شدن خطوط راهنمایی برای اپراتورها می گردد تا بتوانند ولتاژ و پخش توان راکتیو را کنترل نمایند.

به طور کلی، مدیریت توان راکتیو به واسطه فقدان موارد زیر دچار اشکال شده است:

۱- دانش و درک صنعت

۲- در دسترس بودن برنامه کامپیوتری

۳- داده های زمان - واقعی

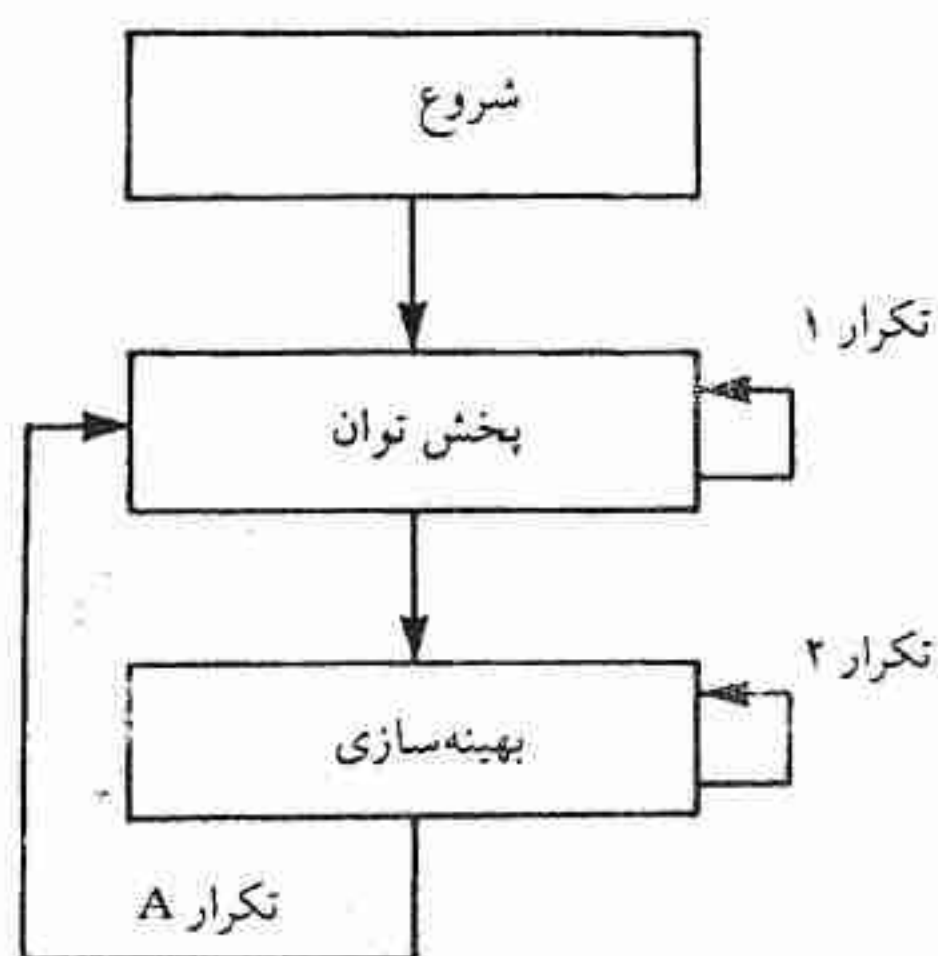
۴- انگیزه های اقتصادی

اما در حال حاضر به واسطه قیمت بالاتر سوخت و مشکلات مالی احداث تاسیسات جدید، توجه

بیشتری به مدیریت توان راکتیو معطوف گشته است.

۱۱-۲-۳ مدل ریاضی

مهمترین ابزاری که در بخش اقتصادی توان راکتیو به کار برده می‌شود یک برنامه بخش توان بهینه است. تئوری بخش توان بهینه برای سیستم قدرت ابتدا در سال ۱۹۶۲ فرموله شد (۱۴) و از آن زمان تا کنون به میزان قابل ملاحظه‌ای تکمیل شده است. شکل ۱ فلوچارتی از الگوریتم بخش توان بهینه را نشان می‌دهد.



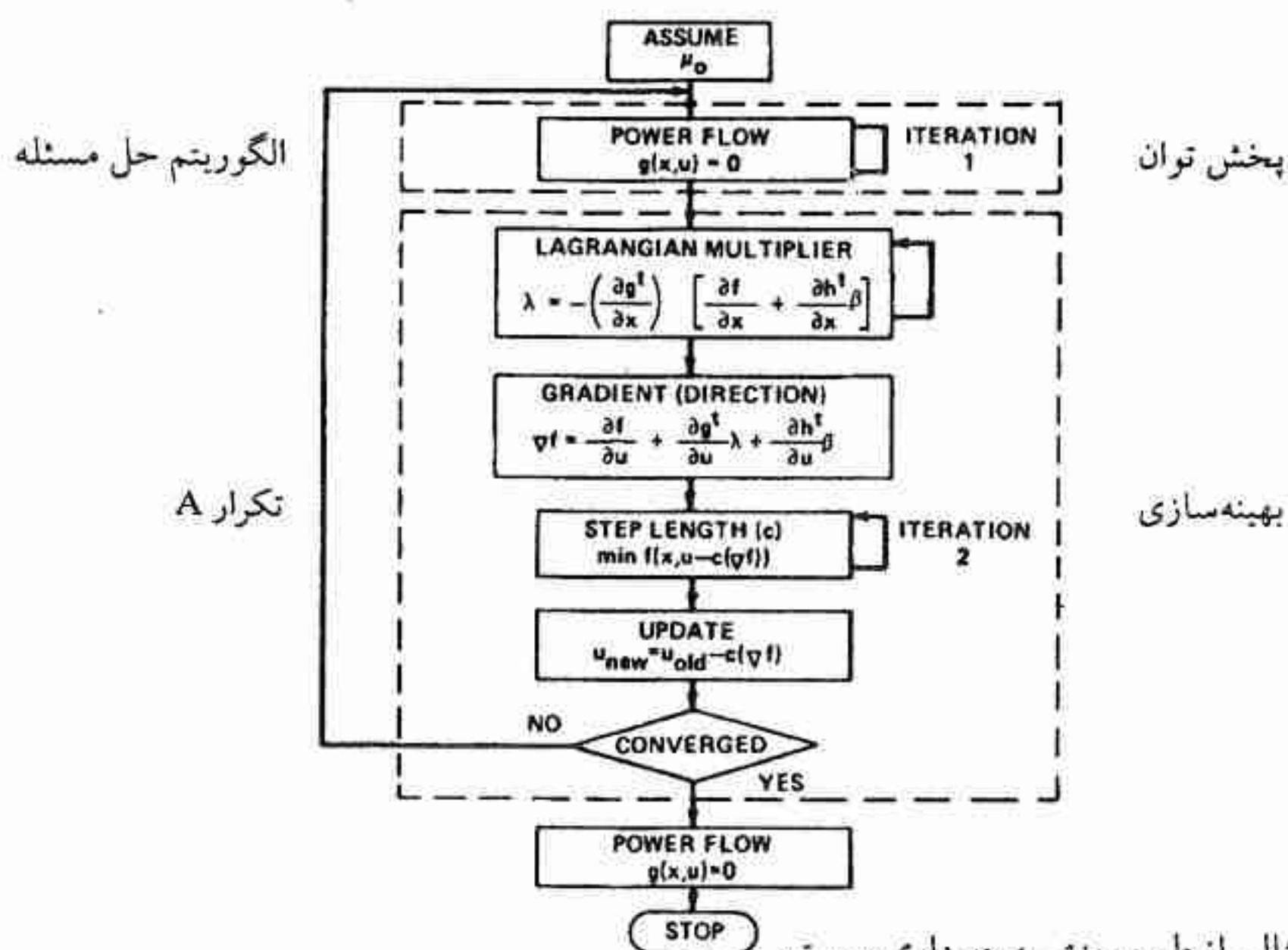
شکل ۱ - الگوریتم بخش بهینه توان

تکنیک‌های متعددی برای انجام محاسبات بلوک‌های نشان داده شده در شکل ۱ وجود دارد. به عنوان مثال برای بخش توان عادی می‌توان از تکنیک فست دیکاپل^۱ (دو زوجی سریع) و برای بهینه سازی از تکنیک استی پست دیسن/ردیوس گرادیان^۲ استفاده کرد. هدف می‌نیم کردن تعدادی تابع هدف غیرخطی (نظیر تلفات سیستم انتقال) است که در معرض محدودیت‌ها یا قیود مساوی یا نامساوی قرار دارند. در یک کاربرد به خصوص، می‌توان با تنظیم ولتاژها و تپ ترانسفورماتورها (LTC) تلفات سیستم را می‌نیم کرد. ماهیت غیرخطی مساله فرایند تکراری را ضروری می‌نماید و دقت «تنظیمی» را تقاضا می‌کند تا بتوان به شیوه‌ای کارآمد به مقدار بهینه رسید.

به منظور درک شکل ۱، از یک سیستم نمونه ۳ باس استفاده شده است تا مراحل محاسباتی

تشریح گردد (به شکل ۲ و ۳ مراجعه شود). در روش پخش بار از تکرار استفاده شده است تا معادلات توان را متعادل نماید (تکرار ۱ در شکل ۱). در انتهای روش پخش بار یک روش بهینه کردن نیز اضافه شده است. در روش بهینه سازی مقادیر جدیدی برای متغیرهای کنترل (به عنوان مثال، ولتاژ ترمینال ژنراتورها) به دست می آیند و فرایند تا می نیمم شدن تابع هدف f تکرار می گردد.

در خلال بهینه سازی، ضرایب لاگرانژ λ معلوم می شوند تا در محاسبه سمت یا جهت گرادیان مساعدت نمایند. بر حسب اینکه از چه تکنیک پخش توان استفاده شده است ضرایب لاگرانژ یا مستقیماً محاسبه می شوند (مثلاً در روش پخش توان نیوتن) یا به روش تکرار به دست می آیند (مثلاً در روش پخش توان فست - دیکاپل). وقتی که جهت گرادیان ∇f معلوم می شود، بایستی طول گام^۱ (اندازه گام) معلوم شود تا به متغیرهای کنترل مقادیر جدید تخصیص داده شود. ابتدا مقدار C_{max} معین می شود، آنگاه جستجو بین ۰ و C_{max} انجام می گیرد تا حداقل مقدار تابع هدف در امتداد گرادیان مشخص شود. آنگاه متغیرهای کنترل تغییر داده می شوند و همگرایی آزمایش می شود. اگر تابع هدف بیش از این کاهش نیابد، گرادیان کوچک بوده و تمامی محدودیت ها (قیود) برآورده شده و پخش توان محاسبه می شود و فرایند به پایان می رسد. هرگاه هر یک از موارد قبل برآورده نشود فرایند دوباره تکرار می شود.



شکل ۲ - مثالی از طرح ریزی بهره برداری سیستم

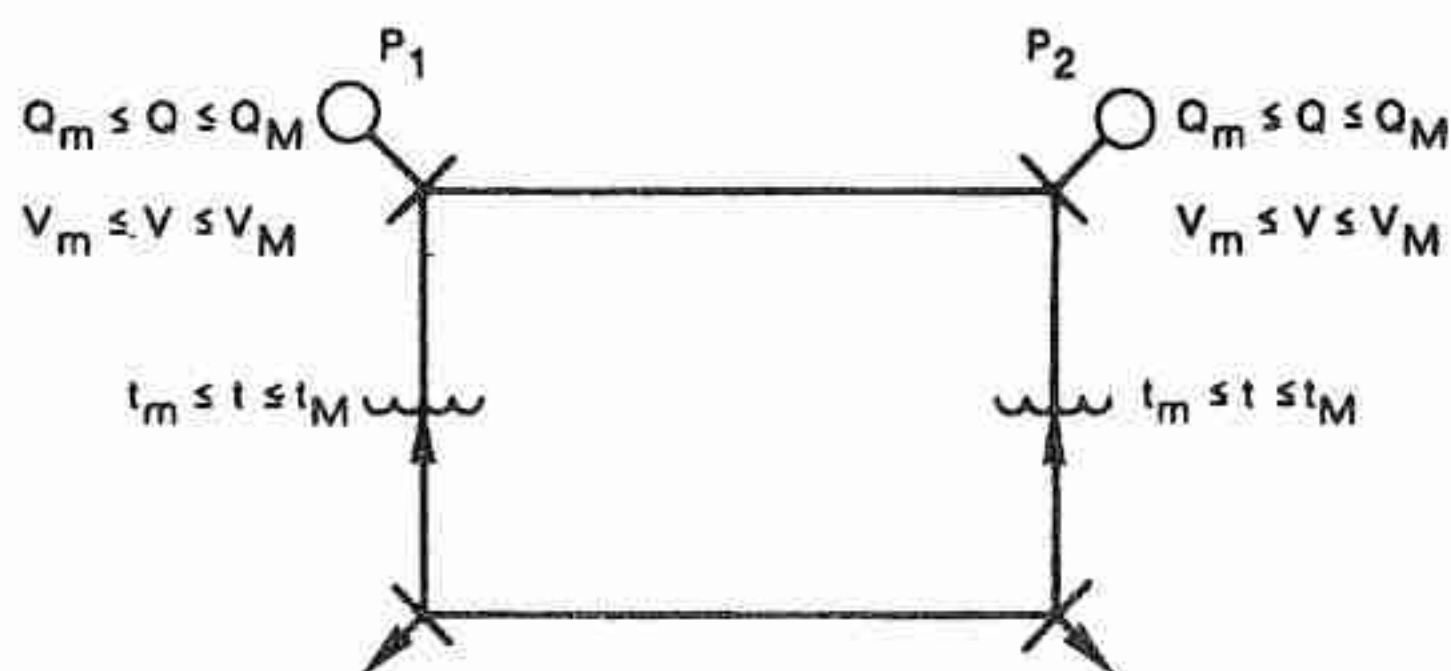
پخش اقتصادی توان راکتیو در طرح ریزی بهره برداری سیستم عبارت از توانایی می نیمم کردن تلفات کلی سیستم قدرت به کمک تنظیم پارامترهای سیستم قدرت خواهد بود مشروط به اینکه در داخل محدودیت های تجهیزات سیستم باقی بمانیم (به شکل ۳ مراجعه شود). در پخش اقتصادی توان راکتیو فرض می شود که پخش اقتصادی توان واقعی صورت پذیرفته و در خلال فرایند بهینه سازی ثابت خواهد ماند. توجه اینکه توان واقعی باس مادر (مرجع^۱) به واسطه کاهش تلفات کل سیستم کاهش می یابد.

اخیرا الگوریتم جدیدی برای حل مساله پخش توان بهینه نوشته شده است. الگوریتم از نوع لاگرانژین بوده و در برگیرنده توالی از اسپارس^۲، قیود خطی مسائل فرعی^۳ است که توابع هدف آنها شامل یک عبارت لاگرانژین تغییر یافته و تابع جریمه درجه دوم تغییر یافته است. این برنامه به طور موفقیت آمیز برای سیستم قدرت بزرگ (۶۰۰ باس) اجرا شده است.

استعمال برنامه پخش توان بهینه برای کنترل و پخش اقتصادی توان راکتیو در زمان واقعی در مراحل اولیه پیشرفت خود می باشد. برنامه پخش بهینه با قیود ایمنی که در کمتر از ۵ دقیقه محاسبه را انجام دهد ضروری است. در حال حاضر محققین تلاش می کنند که این مساله را حل کنند. برای مطالعه بیشتر در زمینه بهینه سازی در سیستم قدرت به منظور مدیریت توان راکتیو مراجع ۱۷-۲۱ توصیه می گردد.

۱۱-۲-۴ فواید انتقال

کاربرد استراتژی پخش اقتصادی توان راکتیو برای بهبود عملکرد سیستم قدرت فواید مشخصی را عاید موسسه تولیدکننده برق می کند. تعدادی از این فواید در ذیل مورد بحث قرار می گیرد.



شکل ۳ - مدل سیستم قدرت

(الف) کاهش هزینه به واسطه کاهش تلفات سیستم - کاهش تلفات کل سیستم دارای مزیت پایین آمدن هزینه سوخت می باشد. از آنجایی که توان واقعی ژنراتورها بایستی تامین کننده بارهای موجود در سیستم و تلفات گردد، کاهش تلفات سیستم موجب کاهش هزینه سوخت می گردد.

(ب) بهبود پروفایل ولتاژ - با مسطح شدن و افزایش یافتن مقدار ولتاژ نرمال، پروفایل ولتاژ کلی سیستم بهبود می یابد. این موضوع حائز اهمیت است زیرا پروفایل ولتاژ معیاری برای توان راکتیو در یک سیستم قدرت است. ولتاژ می تواند به میزان قابل ملاحظه ای از سحلی به محل دیگر تغییر نماید. (گرچه پروفایل ولتاژ یک نشان دهنده با ارزشی از شرایط سیستم است لیکن به تنهایی نشان دهنده توان های راکتیو ذخیره ای (رزرو) که در زمان وقوع اتصال کوتاه در دسترس است، نمی باشد).

(ج) کنترل بهتر ولتاژ - کنترل بهتر ولتاژ بر اساس کنترل ولتاژ در سراسر سیستم امکان پذیر است. استراتژی کنترل ولتاژ که تمامی سیستم را شامل شود - در مقایسه با استراتژی کنترل ولتاژ محلی که در حال حاضر انجام می گیرد - به کار می رود. جهت رسیدن به این مزیت سرمایه گذاری در زمینه وسایل ارتباطات و اندازه گیری ضروری است.

(د) بهبود ایمنی سیستم - با بهره برداری بهتر از منابع توان راکتیو ایمنی سیستم قدرت بهبود می یابد، بنابراین برای شرایط سیستمی که تقاضای ناگهانی توان راکتیو افزایش می یابد، توان راکتیو ذخیره (رزرو) بیشتری در دسترس خواهد بود. گرچه شرایط متفاوتی منجر به افزایش ناگهانی تقاضای توان راکتیو سیستم می گردد، لیکن در اثر قطع یک خط EHV و افزایش قابل ملاحظه در بار خطوط EHV دیگر که قبلاً تحت بار سنگینی بوده اند، منجر به افزایش زیاد تقاضای توان راکتیو سیستم می گردد. با پخش هماهنگ توان راکتیو این شرایط بهبود می یابد.

(ه) بهبود ظرفیت توان انتقالی مبادله شده - با کاهش پخش توان راکتیو، بارگیری تجهیزات سیستم قدرت کاهش می یابد و در نتیجه ظرفیت توان واقعی افزایش یافته و ظرفیت انتقالی مبادله شده را افزایش می دهد. عملیات مربوط به توان انتقالی، برای موسسات برق یک تجارت بزرگی محسوب می شود، بنابراین پخش بهینه توان راکتیو به عنوان ابزاری که این عملیات را آسان می کند - مخصوصاً وقتی که بتوانند بدون خرید تجهیزات زیادی انجام گیرند - حائز اهمیت است.

(و) بهبود بهره برداری سیستم - مسئولیت عمده اپراتورهای سیستم نظارت بر تولید توان واقعی و پخش توان اکتیو و راکتیو سیستم با عنایت به حفظ صحیح سطوح ولتاژ است. اپراتورها در مواردی تمایل دارند که رزور توان راکتیو را بالا نگاهدارند، که می تواند منجر به عملکرد غیراقتصادی سیستم گردد. به عنوان مثال، وقتی که اپراتورها مارجین ها را نزدیک به حد جریان روتور یا استاتور نگاه

می‌دارند تا از اضافه بار ناشی از تغییرات ولتاژ پیشگیری نمایند، از ظرفیت تولید توان راکتیو کاملاً بهره‌برداری نمی‌شود. همچنین به واسطه حفظ مارجین به دلایل پایداری یا اجتناب از گرم شدن انتهای هسته استاتور ژنراتور، از ظرفیت جذب توان راکتیو کاملاً بهره‌برداری نمی‌شود. همچنین، تپ تعداد زیادی از ترانسفورماتورها تنظیم می‌گردد یا تعداد کمی از تنظیم تپ رخ می‌دهد که منجر به پخش غیراقتصادی توان راکتیو می‌گردد.

استراتژی پخش بهینه توان راکتیو خطوط راهنمایی را در زمینه پخش توان راکتیو، سطح رزرو و کنترل ولتاژ در اختیار اپراتور قرار می‌دهند. این فرایند می‌تواند به طور اتوماتیک انجام گیرد و با روش‌های پخش توان که در حال حاضر در مراکز دیسپاچینگ به کار می‌رود همراه گردد.

۱۱-۲-۵ تجربه در زمینه پخش توان راکتیو

کارهایی که تا به امروز در زمینه اعمال تئوری پخش بهینه توان راکتیو در مسایل سیستم قدرت انجام گرفته است نسبتاً محدود می‌باشد. جنرال الکتریک با یک موسسه تولید کننده برق از سال ۱۹۷۷ در تعیین صرفه جویی که با بهینه کردن پارامترهای کنترل حاصل می‌شود کار کرده است. ابتدا یک مطالعه کامپیوتری برای سیستم در شرایط پیک بار انجام گرفت تا صرفه جویی قابل حصول تخمین زده شود. ملاحظه شد که اگر چنانچه ولتاژ ترمینال ژنراتورهای حرارتی تنظیم گردد یک کاهش ۲/۴٪ در تلفات کل سیستم (یعنی ۴/۴ MW از ۱۸۵ MW) قابل حصول است و اگر چنانچه هماهنگی بین تنظیم تپ ترانسفورماتور LTC و ولتاژ ترمینال ژنراتورهای حرارتی انجام گیرد یک کاهش ۴/۵٪ در تلفات کل سیستم (یعنی ۸/۳ MW از ۱۸۵ MW) تخمین زده می‌شود. کاهش ۸/۳ MW در تلفات کل سیستم معرف ۰/۱۱٪ کاهش در توان واقعی تولیدی است. کاهش هزینه بهره‌برداری می‌تواند به میزان ۰/۳٪ باشد.

۱۱-۲-۶ تاثیر بر روی تجهیزات

پخش بهینه توان راکتیو نیازمند تنظیم کردن تنظیم‌های کنترل^۱ در تعدادی از تجهیزات سیستم قدرت و نظاره کردن^۲ آنها در سراسر سیستم است تا وضعیت پارامترهای بحرانی معین شوند. دو سوال زیر را باید مورد توجه قرار داد:

۱- چگونه پخش توان راکتیو بر روی تجهیزات موجود اثر می‌گذارد؟

۲- پخش توان راکتیو چه اثری در آینده بر روی تجهیزات موجود می‌گذارد، یا چه تجهیزات جدیدی لازم خواهد شد؟

(الف) تاثیر بر روی تجهیزات موجود - پارامترهای کنترل برای پخش توان راکتیو عبارتند از: ولتاژ ترمینال ژنراتورها، تنظیم کنترل جبران‌کننده استاتیک، خازن قابل سوئیچ و بانک‌های راکتور و تنظیم تپ ترانسفورماتورهای LTC. برای اینکه عمل تنظیم از مرکز کنترل دوردست انجام گیرد همراه با تجهیزات یک سیستم مخابراتی لازم است تا ولتاژ ترمینال ژنراتورها را اندازه‌گیری نماید. اپراتور سیستم می‌تواند وضعیت جاری را مشاهده کند و تغییرات لازم را اعمال نماید.

امکان دارد که از همین سیستم مخابراتی برای نشان دادن وضعیت پارامترها و تنظیم آنها استفاده کرد. روش تغییر - تپ جریان ترانسفورماتورها شامل ساعت زمانی^۱ یا مدار اتوماتیکی است که ولتاژ باس بار در مجاورت ترانسفورماتور را ثابت نگاه می‌دارد.

همچنین ممکن است اپراتور سیستم نیز در حلقه کنترلی قرار بگیرد. اگر تپ‌ها برای بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گیرند، بایستی سیستم اتوماتیک غیرفعال گردد و سیستم ساعت زمانی که در بالا تشریح شد مورد استفاده قرار گیرد که در برگیرنده اپراتور در حلقه کنترلی خواهد بود.

اندازه‌گیری داده‌های سیستم قدرت (مثلاً، ولتاژ ترمینال در باس‌های کلیدی متعدد، مولفه‌های حقیقی و موهومی بار و غیره) جنبه‌های دیگر مساله است که باید در نظر گرفته شود. این عمل برای بناکردن مدل دیجیتالی فعال^۲ سیستم قدرت لازم است. نقاط اندازه‌گیری اضافه‌تری نیز ممکن است لازم باشد تا سیستم قدرت را برای پخش توان راکتیو شبیه‌سازی کرد. بنابراین ممکن است لازم باشد وسایل اندازه‌گیری اضافه‌تری خریداری گردد و به سیستم مخابراتی افزوده شود.

بنابراین تاثیر عمده بر روی تجهیزات موجود، اندازه‌گیری اضافی و سیستم مخابراتی کمکی یا اضافی برای کار کردن با داده‌های اندازه‌گیری شده است.

(ب) تاثیر بر روی تجهیزات آینده و سخت‌افزار جدید - به منظور بهبود در تنظیم ولتاژ بایستی سیستم تحریک ژنراتورهای حرارتی مورد بررسی قرار گیرد. یک مکانیزم عوض کردن سریع تپ ترانسفورماتورها لازم است تا کنترل ولتاژ را در سطوح ولتاژ بالا مساعدت نماید. در صورتی که یک مکانیزم عوض کردن سریع تپ مورد نیاز باشد مواد جدیدی برای اتصالات لازم است که بایستی توسعه یابد تا بتواند وظیفه سنگین‌تر عوض کردن تپ را انجام دهد. لازم است وسایل اندازه‌گیری

برای نشان دادن پارامترهای متعدد (مثلا ولتاژ) با دقت بیشتر طراحی شود.

۱۱-۳ نتیجه‌گیری

موسسات تولیدکننده برق به طور فزاینده‌ای علاقمند به بهره‌برداری حداکثر از تجهیزات سیستم انتقال موجود هستند. پخش بهینه توان راکتیو این امکان را برای موسسات فراهم می‌نماید که گامی در این جهت بردارند. مطالعات اولیه نشان داده است که علاوه بر بهبود در رزرو توان راکتیو هزینه سوخت نیز کاهش می‌یابد.

مراجع

Reactive Power Planning.

1. H. H. Happ and K. A. Wirgau, "Minimization of VAR Allocation for System Planning," IEEE Milwaukee Symposium on Automatic Computations and Control, 33-36, April 1976.
2. H. H. Happ and K. A. Wirgau, "VAR Allocation in Power System Planning," IEEE Can. Commun. Power Conf., 261-264, October 1976.
3. H. H. Happ and K. A. Wirgau, "Static and Dynamic VAR Compensation in System Planning," IEEE Trans. Power Appar. Syst. 97, 1564-1578 (September/October 1978).
4. H. H. Happ and K. A. Wirgau, "Minimization of VARs in System Planning," Proc. Amer. Power Conf. 39, 1019-1025 (April 1977).

System Operations Planning.

5. R. A. Fernandes, H. H. Happ, and K. A. Wirgau, "System Loss Reduction by Coordinated Tap and Generator Voltage Adjustment," Proc. Amer. Power Conf. 40, 1390-1393 (1978).
6. R. A. Fernandes, H. H. Happ, and K. A. Wirgau, "The Application of Optimal Power Flow for Improved System Operations," Proc. Sixth Power Syst. Comput. Conf. (PSCC) 1, 465-472 (August 1978).
7. R. A. Fernandes, H. H. Happ, and K. A. Wirgau, "Optimal Reactive Power Flow: Loss Reduction for Improved System Operation," IEEE Can. Commun. Power Conf., 324-327, October 1978.
8. K. A. Wirgau, "Reactive Power Dispatching," Electr. Forum 5 (1), 6-9 (1979).
9. J. F. Aldrich, R. A. Fernandes, L. W. Vicks, H. H. Happ, and K. A. Wirgau, "Benefits of Voltage Scheduling in Power Systems," IEEE Trans. Power Appar. Syst. 99, 1701-1712 (September/October 1980).
10. R. A. Fernandes, H. H. Happ, and K. A. Wirgau, "Optimal Reactive Power Flow for Improved System Operations," Intern. J. Electr. Power Energy Syst. 2, 133-139 (1980).
11. R. A. Fernandes, H. H. Happ, and K. A. Wirgau, "Voltage Scheduling," IEEE Can. Commun. Power Conf. 102-105 (October 1980).

12. J. F. Aldrich, R. A. Fernandes, H. H. Happ, and K. A. Wirgau, "The Benefits of Voltage Scheduling in System Operations," (article of a Current Operating Practices Working Group Report on EHV Operating Problems Associated with Reactive Control), *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* **100**, 1376-1381 (March 1981).

Reactive Power Dispatch and Control.

13. H. H. Happ and K. A. Wirgau, "Optimal Dispatch and Voltage Scheduling in Power Systems," *IEEE Intern. Symp. Circuits Syst.*, Chicago, Illinois, April 1981.
14. J. Carpentier, Contribution a l'Etude du Dispatching Economique, Bulletin de la Societe Francaise des Electriciens, Serial No. 8, Volume 3, August, 1962.
15. R. C. Burchett, H. H. Happ, D. R. Vierath, and K. A. Wirgau, "Advanced Optimal Power Flow Methodology," *IEEE Can. Commun. Power Conf. Proc.*, 160-172 (October 1980).
16. R. C. Burchett, H. H. Happ, D. R. Vierath, and K. A. Wirgau, "Developments in Optimal Power Dispatch," *IEEE Power Industry Comput. Appl. Conf.*, Philadelphia, Pennsylvania, May 1981.

Optimization Summaries.

17. A. M. Sasson and H. M. Merrill, "Some Applications of Optimization Techniques to Power System Problems," *Proc. IEEE* **62**, 949-972 (July 1974).
18. H. H. Happ, "Optimal Power Dispatch — A Comprehensive Survey," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* **96**, 841-854 (May/June 1977).
19. J. W. Carpentier, "Optimal Power Flows," *Electr. Power Energy Syst.* **1**, 3-15 (April 1979).
20. B. Stott, O. Alsac, and J. L. Marinho, "The Optimal Power Flow Problem," presented at SIAM Int. Conference on Electrical Power Problems: The Mathematical Challenge, Seattle, Washington, March 1980.
21. H. H. Happ, K. A. Wirgau, "A Review of the Optimal Power Flow," *J. Franklin Inst.* **311**, 231-264 (1981).

مراجع برگزیده

REACTIVE POWER COMPENSATORS

Thyristor-Controlled Reactors and Transformers

1. Hauth, R. L. and Moran, R. J., "Introduction to Static Var Systems for Voltage and Var Control," IEEE Tutorial Text, 78EH0135-4-PWR, 44-85, 1978.
2. Hauth, R. L. and Moran, R. J., "The Performance of Thyristor-Controlled Static Var Systems in HVAC Applications. Part I: Fundamental Relationships," IEEE Tutorial Text, 78EH0135-4-PWR, 1978.
3. Hauth, R. L. and Moran, R. J., "The Performance of Thyristor-Controlled Static Var Systems in HVAC Applications. Part II: Performance Modeling Concepts," IEEE Tutorial Text, 78EH0135-4-PWR, 1978.
4. Ellert, F. J. and Moran, R. J., "HVDC and Static Var Control Applications of Thyristors," IEEE/IAS International Semiconductor Power Converter Conference, Lake Buena Vista, Florida, March 1977.
5. Newall, R. J. et al., "Staged Field Testing of the Victory Hill Static Var Control," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* **99**(2), 426-433 (1980).
6. Hauth, R. L. et al., "Application of a Static Var System to Regulate System Voltage in Western Nebraska," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, Paper F78-097-8 (1978).
7. McMurray, W., "A Comparative Study of Symmetrical 3-Phase Circuits for Phase-Controlled A.C. Motor Drives," *IEEE Trans., Industry Applications* **IA-10**(3), 403-411 (1974).
8. deMello F. P., "Thyristor-Controlled Reactors: Analysis of Fundamental Frequency and Harmonic Effects," IEEE Paper A78 106-7, Winter Power Meeting, New York, 1978.
9. L. Gyugyi et al., "Principles and Applications of Static, Thyristor-Controlled Shunt Compensators," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* **97**(5), 1935-1945 (1978).
10. Kaufhold, W. et al., "Static Compensator Performance in Long-Distance Transmission Systems," *Siemens Forsch.-u. Entwickl. Ber.*, **Bd. 6**(5), 286-292 (1977).
11. Reichert, K. et al., "Reactor Transformer for Controllable Static Compensators," *CIGRE 12-05* (1978).
12. Hammad, A. E. and Mathur, R. M., "A New Generalized Concept for the Design of Thyristor Phase-Controlled Var Compensators. Part I: Steady State Performance," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* **98**(1), 219-226 (1979).

13. Hammad, A. E. and Mathur, R. M., "A New Generalized Concept for the Design of Thyristor Phase-Controlled Var Compensators. Part II: Transient Performance," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* **98**(1), 227-231 (1979).
14. Boidin, M. and Drouin, G., "Performance Dynamiques des Compensateurs Statiques à Thyristors et Principes de Regulation," *Rev. Gen. Electricité* **88**(1), 58-73 (1979).
15. Schweickardt, H. E. et al., "Closed Loop Control of Static Var Sources on EHV Transmission Lines," IEEE Paper A78 135-6, Winter Power Meeting, 1978.
16. Schweickardt, H. E. and Romegialli, G., "The Static Var Source in EHV Transmission Systems and its Control," Brown Boveri Co., Publication No. CH-E 2.0336.OE, 1977.
17. Schweickardt, H. E., "Static Var Sources, Their Alternatives and Use in Transmission Systems," EPRI Seminar, Duluth, Minn., Oct. 24/25, 1978.
18. Reichert, K. et al., "Controllable Reactor Compensator for More Extensive Utilization of High Voltage Transmission Systems," *CIGRE 31-04* (1974).
19. Hochstetter, W., "Properties of Static Compensators for Power Supply Systems," *Siemens Review*, **XLIV**(8) 356-360 (1977).
20. Cronin, J. H. et al., "Transmission Voltage Support with Static Var Generators," IEEE Paper A78 108-3, Winter Meeting, Jan. 1978.
21. Barnes, H. C., "Modeling of Static Shunt Var Systems (SVS) for System Analysis," CIGRE Working Group 31-01, *Electra*, No. 51 (1979).
22. Kapoor, S. C., "Dynamic Stability of Long Transmission Systems with Static Compensators and Synchronous Machines," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* **98**(1), 124-134 (1979).

Thyristor-Switched Capacitors and Hybrids

23. Frank, H. and Petersson, T., "Thyristor-Switched Shunt Capacitors and Their Modeling for Transmission Applications," IEEE Paper A78 105-9, Winter Power Meeting, New York, 1978.
24. Engberg, K. and Ivner, S., "Static Var Systems for Voltage Control During Steady-State and Transient Conditions," EPRI/Hydro-Québec Symposium, Varennes, Sept. 1979.
25. Olwegard, A. et al., "Thyristor-Controlled Shunt Capacitors for Improving System Stability," *CIGRE 32-20* (1976).
26. Gyugyi, L. and Taylor, E., "Characteristics of Static Thyristor-Controlled Compensators for Power Transmission System Applications," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* **99**(5), 1795-1804 (1980).
27. Engberg, K. et al., "Reactors and Capacitors Controlled by Thyristors for Optimum Power System Var Control," EPRI Seminar, Duluth, Oct. 1978.
28. Gyugyi, L., "Static Var Compensator with Continuously Variable Output and Minimum No-Load Losses," EPRI Seminar, Duluth, Oct. 1978.

Synchronous Condensers, Saturated Reactors, and Other Types of Compensator

29. McMurray, W., "Magnetic Frequency Multipliers and Their Rating. Part I: Frequency Triplers," *AIEE Trans.*, 384-390, Sept. 1956.
30. Banks, R. et al., "Applications to EHV Transmission of Static Compensators Using Saturated Reactors," IEEE Canada Conference on Communication and EHV Transmission, Montreal, Nov. 1972.

31. Kusko, A., "Polyphase Closed-Core Reactors," *IEEE Trans.*, 57-64, Jan. 1965.
32. Friedlander, E., "The Development of Saturated Reactors for Network Stabilization as Applicable to Magnet Power Supplies," Second International Conference on Magnet Technology, 1964.
33. Friedlander, E., "Static Network Stabilization — Recent Progress in Reactive Power Control," *GEC J. Science Technol.* 33(2), 58-65 (1966).
34. George, Y. et al., "Analytical and Numerical Modelling of Saturable Reactors," *ACEC Rev.*, 1-2, 27-43 (1978).
35. Schirman, A., "Static Reactive Energy Compensators," *ACEC Rev.*, 1, 3-11 (1972).
36. Becker, H. et al., "Three-Phase Shunt Reactors with Continuously Controlled Reactive Current," *CIGRE 31-33* (1974).
37. George, Y., "Static Compensators of Reactive Energy for Rolling Mill Systems," *ACEC Rev.*, 1-2, 23-33 (1976).
38. Walshe, K. A. and Cooper, C. B., "Slope Reactance Effects in Single-Phase Saturated Reactors," *Proceedings IEE* 126(8), 771-776 (1979).
39. Cooper, C. B. and Young, D. J., "Saturated Reactor Compensator for Stabilizing Voltage at Load and Generation Points," *IEE Conference Publication CP107* (1973).
40. Ainsworth, J. D. et al., "Recent Developments Towards Long Distance AC Transmission Using Saturated Reactors," *IEE Conference Publication CP107*, 242-247 (1973).
41. Friedlander, E., "Transient Reactance Effects in Static Shunt Reactive Compensators for Long AC Lines," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* 98, 1669-1680 (1976).
42. Friedlander, E. and Jones, K. M., "Saturated Reactors for Long Distance Bulk Power Lines," *Electrical Review*, 940-943, June 1969.
43. Thanawala, H. L., Kelham, W. O., and Williams, W. P., "The Application of Static Shunt Reactive Compensators in Conjunction with Line Series Capacitors to Increase the Transmission Capabilities of Long AC Lines," *CIGRE 31-09* (1976).
44. Ainsworth, J. D. et al., "Long Distance AC Transmission Using Static Voltage Stabilizers and Switched Linear Reactors," *CIGRE 31-01* (1974).
45. Gyugyi, L., "Reactive Power Generation and Control by Thyristor Circuits" *IEEE Trans.*, IA-15(5), 521-531 (1980).
46. Laithwaite, E. R. and Kuznetsov, S. B., "The Asynchronous Condenser: a Brushless, Adjustable Power Factor Induction Machine," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, Paper F80-273-3 (1980).
47. Finlayson, P. T. and Washburn, D. C., "Cycloconverter-Controlled Synchronous Machines for Load Compensation on AC Power Systems," *IEEE Trans. on Industry Applications* IA-10, 806-813 (1974).

THE ... OF TRANSMISSION SYSTEMS ... REACTIVE POWER CONTROL

48. Kimbark, E. W., "How to Improve System Stability Without Risking Subsynchronous Resonance," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* 96(5), 1608-1619 (1977).
49. Barthold, L. O. et al., "Static Shunt Devices for Reactive Power Control," *CIGRE 31-08* (1978).
50. Illiceto, F. and Cinieri, E., "Comparative Analysis of Series and Shunt Compensation Schemes for AC Transmission Systems," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* 96(6), 1819-1830 (1977).

51. Boyajian, A., "The Physics of Long Transmission Lines," *General Electric Review*, 15-22, July 1949.
52. Baum, F. G., "Voltage Regulation and Insulation for Large Power Long Distance Transmission Systems," *Journal AIEE* **40**, 1017-1032 (1921).
53. Friedlander, E., "Long-Distance Power Transmission by Alternating Current," *Engineering*, Jan. 2, 1942; Jan. 9, 1942; Jan. 16, 1942.
54. Wagner, C. F. and Evans, R. D., "Static Stability Limits and the Intermediate Condenser Station," *AIEE Trans.*, 94-123 (1927).
55. Fortescue, C. L. and Wagner, C. F., "Some Theoretical Considerations of Power Transmission," *Journal AIEE* **43**, 106-113 (1924).

DYNAMIC SHUNT COMPENSATION

56. Grund, C. E., Breuer, G. D., and Petersson, R. P., "AC/DC System Dynamic Performance — Transient Stability Augmentation with Dynamic Reactive Power Compensation," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* **99**(4), 1493-1502 (1980).
57. Elsliger, R. et al., "Transmission of 16000 MW Over a Distance of 1200 km From James Bay to Hydro-Québec's Load Centers," *CIGRE* 32-07 (1974).
58. Friedlander, E., "Transient Reactance Effects in Static Shunt Compensators For Long AC Lines," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* **95**, 1669-1680 (1976).
59. Woodford, D. A. and Tarnawecky, M. Z., "Compensation of Long-Distance A.C. Transmission Lines by Shunt Connected Reactance Controllers," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, **94**, 655-664 (1975).
60. Elsliger, R. et al., "Optimization of Hydro-Québec's 735-kV Dynamic-Shunt-Compensated System Using Static Compensators," IEEE Paper A78 107-5, Winter Power Meeting, New York (1978).

SERIES CAPACITORS

61. Hamann, J. R., Miske, S. A., Johnson, I. B., and Courts, A. L., "A Zinc Oxide Varistor Protective System for Series Capacitors," IEEE Paper 80SM694-0, Summer Power Meeting, Minneapolis, 1980.
62. Breuer, G. D., Rustebakke, H. M., and Gibley, R. A., "The Use of Series Capacitors to Obtain Maximum EHV Transmission Capability," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* **83**, 1090-1102 (1964).
63. Miske, S. A., "A New Technology for Series-Capacitor Protection," *Electric Forum* **5**(1), 18-20 (1979).
64. Jancke, G., Fahlén, N., and Nerf, O., "Series Capacitors in Power Systems," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* **94**, 912-925 (1975).

REACTIVE POWER CONTROL IN ELECTRIC SYSTEM

T. J. E. MILLER

Translated by:
Dr. R. GHAZEE

1993