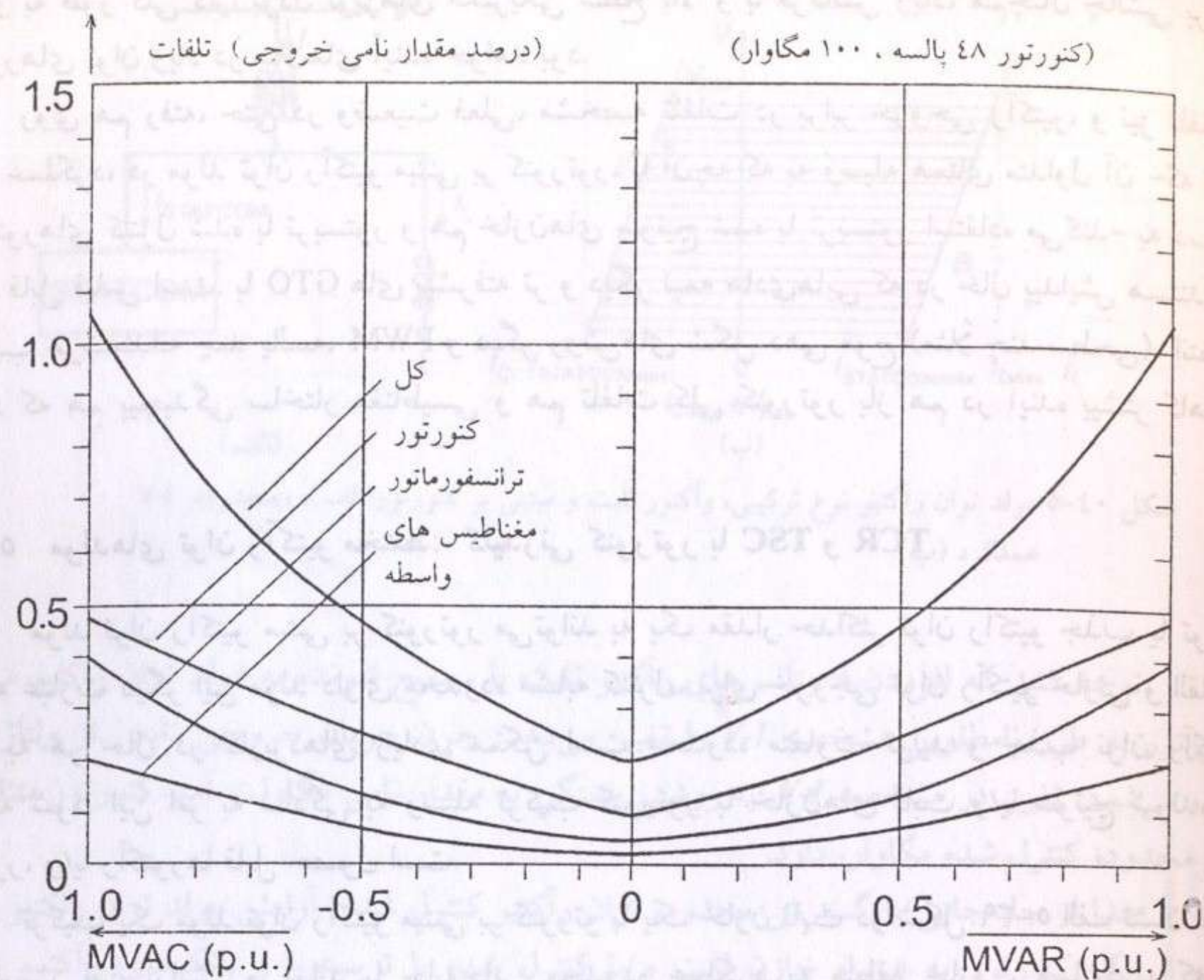
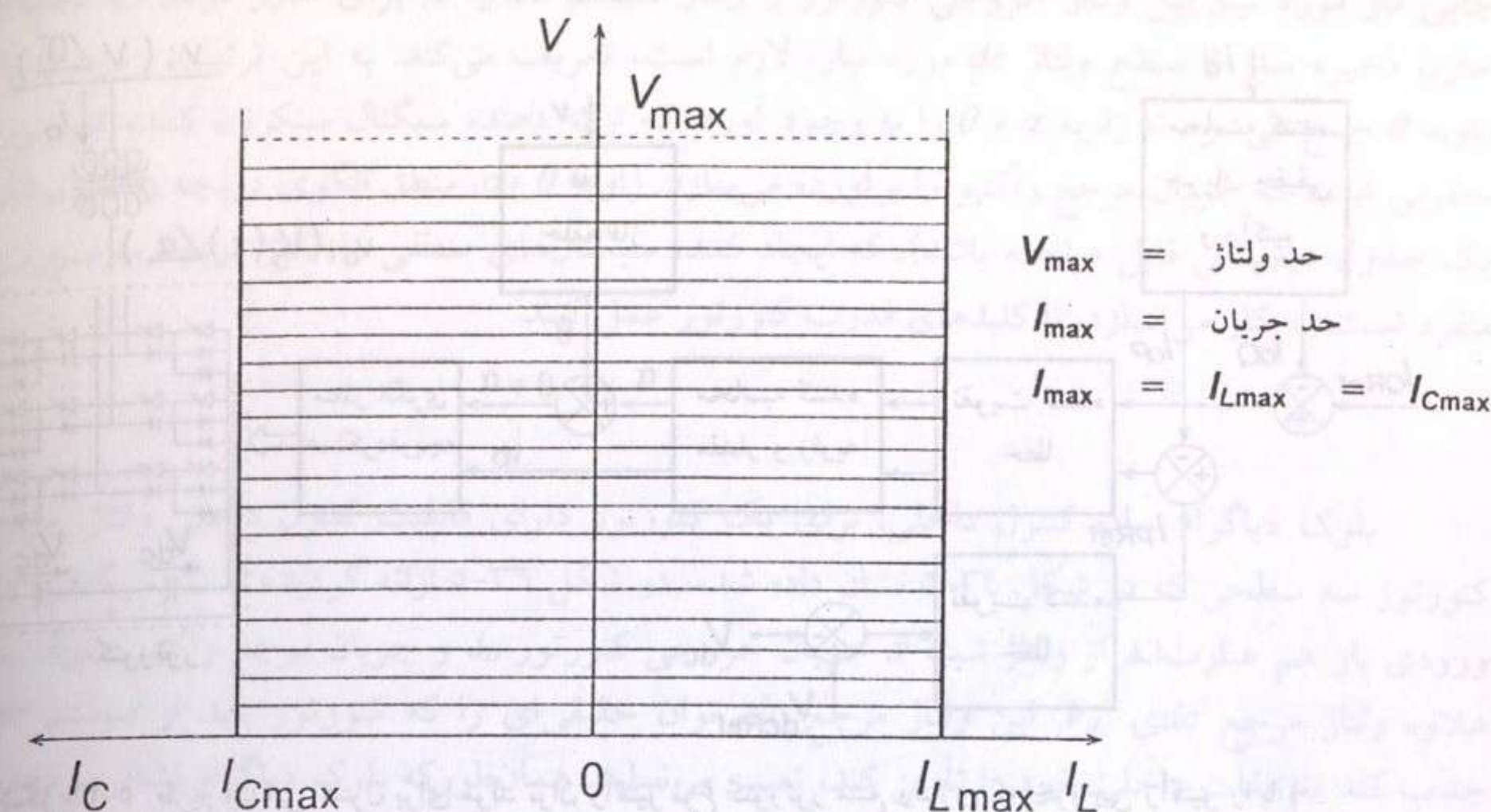




شکل ۵-۳۸ مشخصه تلفات در برابر خروجی توان رآکتیو در یک مولد توان رآکتیو نوع کنورتور منبع ولتاژی ۴۸ پالسه با قدرت $Mvar \pm 100$.

موج خواهد داشت. بنابراین، به عنوان مثال، حذف پنجمین و هفتمین هارمونیک، نرخ کلیدزنی نیمه هادی های قدرت را با ضریب سه افزایش خواهد داد. این نکته به معنای آن است که در کنورتور مفروض ۱۰۰ مگاوات آمپری که قبلاً به آن اشاره شد، تلفات (بدون تلفات مغناطیسی) در حدود ۶۵ درصد افزایش خواهد یافت (با افزایش نیاز به خنک کردن) و کل تلفات تأسیسات در حدود ۳۰ درصد افزایش خواهد داشت. تلاش های فزاینده ای برای اصلاح مشخصه های کلیدزنی ترستورهای GTO در جریان است و این که روشی آسان و قابل اعتماد به وجود آید تا انرژی ذخیره شده در خازن کاهنده (اسنابر) در هر قطع را (به داخل خازن dc ذخیره ساز انرژی) باز گرداند. نتیجه این تلاش ها کاربرد محدود روش های PWM را، که فرکانس های کم برای کلیدزنی لازم دارد و هدف آن حذف هارمونیک های معینی (مثل پنجم و هفتم) از موج ولتاژ خروجی است، ممکن خواهد ساخت. همان گونه که در فصل دوم اشاره شد، تلاش های همزمان عمده ای نیز صرف توسعه نوع جدیدی از دستگاه های کلیدزنی نیمه هادی می شود، که عاری از محدودیت های کلیدزنی ترستور GTO باشند. چنین دستگاه هایی نسل جدیدی از ترستورهای دارای قطع MOS (MTO ها)، ترستورهای دارای قطع امیتر (ETO ها)، ترستورهای یکپارچه جابه جایی دریچه (IGCT ها)، ترانزیستورهای دو قطبی با دریچه عایق بندی شده (IGBT ها)، و ترستورهای کنترل شده با MOS (MCT ها)، هستند. این دستگاه ها در اصل اجازه افزایش در فرکانس کلیدزنی، و احتمالاً حذف هارمونیک ها از موج خروجی حداقل تا سیزدهمین هارمونیک - را بدون هیچ گونه موارد بازبانی انرژی، می دهند. به هر حال PWM با فرکانس زیاد کلیدزنی، به دلایلی چون: مسائل مرتبط با انرژی به دام افتاده در اندوکتانس نشی ساختار کنورتور، ولتاژگذاری ظاهر شده در دو سر کلیدهای نیمه هادی، فیلتر کردن فرکانس زیاد و مؤلفه حامل انرژی



شکل ۵-۳۷ محدوده عملکرد $V-I$ در یک مولد توان رآکتیو نوع کنورتور منبع ولتاژی.

مشخصه تلفات در برابر جریان رآکتیو خروجی یک کنورتور منبع ولتاژی واقعی ۱۰۰ مگاوات آمپر ۴۸ پالسه، که به صورت STATCOM کار می کند، در شکل ۵-۳۸ نشان داده شده است. تلفات کلی عبارت است از جمع تلفات مصرف شده در هشت کنورتور دو سطحی ۶ پالسه که تشکیل دهنده آرایش چند پالسه هستند، به علاوه تلفات ترانسفورماتورهای اصلی کوپله کننده، به علاوه واسطه های مغناطیسی مورد استفاده برای ترکیب ولتاژهای خروجی کنورتورهای متشکله.

تلفات کنورتور، ناشی از هدایت نیمه هادی و تلفات کلیدزنی و نیز تلفات مدار کاهنده (اسنابر^۱) است (که در مدارهای محدود کننده توسط dv/dt و di/dt مصرف می شود). این تلفات به مقدار زیادی بستگی به مشخصات نیمه هادی های قدرت مورد استفاده در کنورتور، و تعداد کلیدزنی هایی که آن ها باید در یک سیکل اصلی انجام دهند، دارد. مشخصه تلفات نشان داده شده، برای یک کنورتور مبتنی بر GTO است که در آن دستگاه هایی با مقدار نامی ولتاژ ۴/۵ کیلوولت و قابلیت قطع جریان پیک ۴ کیلوآمپری به کار رفته است و در فرکانس کلیدزنی ۶۰ هرتز با خازن کاهنده ۶ میکرو فاراد کار می کنند. به دلیل فرکانس کم کلیدزنی، فقط حدود یک سوم تلفات به دلیل تلفات کلیدزنی (نیمه هادی + مدار کاهنده) می باشد و دو سوم دیگر ناشی از تلفات هدایت است.

کل تلفات مغناطیسی ناشی از کوپلاژ ترانسفورماتور اصلی و واسطه های مغناطیسی است. البته تلفات ترانسفورماتور اصلی، در کاربردهای فشار قوی قابل پرهیز نیست. تلفات واسطه های مغناطیسی بستگی به ساختار کلی کنورتور و نحوه بهره برداری به کار گرفته شده دارد.

مشخصات تلفات به صورت فوق نشان دهنده محدودیت هایی است که بر طراحی کنورتورهای توان زیاد تحمیل می شود. به کارگیری PWM برخی ساده سازی ها را در واسطه های مغناطیسی باعث خواهد شد. به هر حال، غیر عملی بودن استفاده از مدولاسیون عرض باند برای اصلاح طیف فرکانس کنورتور پایه با نیمه هادی هایی که فعلاً در دسترس هستند، از داده های فوق آشکار است. همان گونه که در فصل ۳ توضیح داده شد، حذف هر هارمونیک از شکل موج خروجی، نیاز به یک نقطه قعر در شکل

^۱ Snubber

زیاد، و به طور کلی دارا بودن نویزهای الکتریکی سطح بالا و با فرکانس زیاد، هم‌چنان چالشی برای کنورتورهای توان زیاد در سال‌های آینده خواهد بود.

روی هم رفته، حتی در وضعیت فعلی، مشخصه تلفات در برابر خروجی راکتیو، و نیز تلفات واقعی عملکرد، در مولد توان راکتیو مبتنی بر کنورتور، با آنچه که به وسیله هم‌تای متداول آن - که هم از راکتورهای کنترل شده با ترستور و هم خازن‌های سوئیچ شده با ترستور استفاده می‌کند - به دست می‌آید قابل قیاس است. یا GTO های پیشرفته تر و دیگر نیمه هادی‌هایی که در حال پیدایش هستند، و با ترکیب هوشمندانه چند پالس، PWM و دیگر روش‌های شکل دهی موج (مثلاً چند سطحی)، انتظار می‌رود که هم پیچیدگی ساختار مغناطیسی و هم تلفات کلی کنورتور باز هم در آینده بیشتر کاهش یابد.

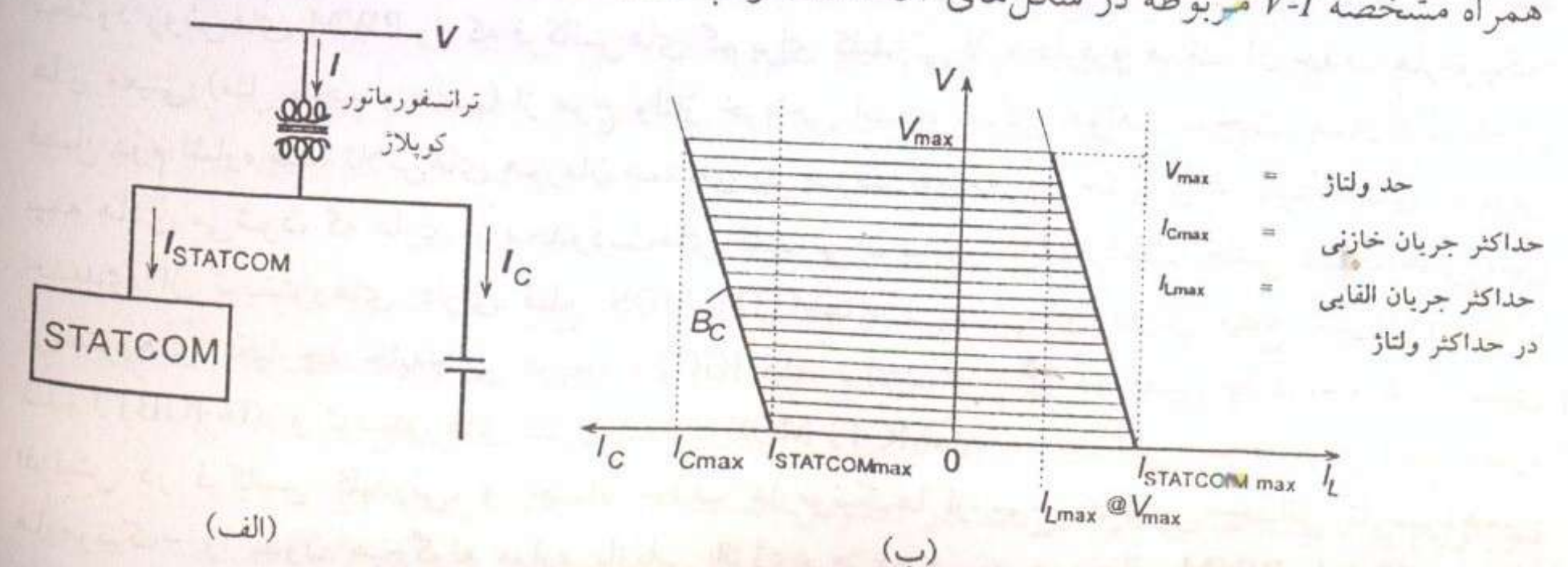
۵-۲-۳ مولدهای توان راکتیو مختلط: کلیدزنی کنورتور با TSC و TCR

مولد توان راکتیو مبتنی بر کنورتور می‌تواند به یک مقدار حداکثر توان راکتیو جذب یا تولید کند؛ به عبارت دیگر این مولد دارای محدوده مشابه کنترل، برای خروجی توان راکتیو خازنی و القایی است. به هر حال در کاربردهای زیادی ممکن است محدوده متفاوت تولید و جذب توان راکتیو خواسته شود. این امر به سادگی به وسیله ترکیب کنورتور با خازن‌های ثابت و/یا سوئیچ شونده با ترستور، و/یا راکتورها قابل حصول است.

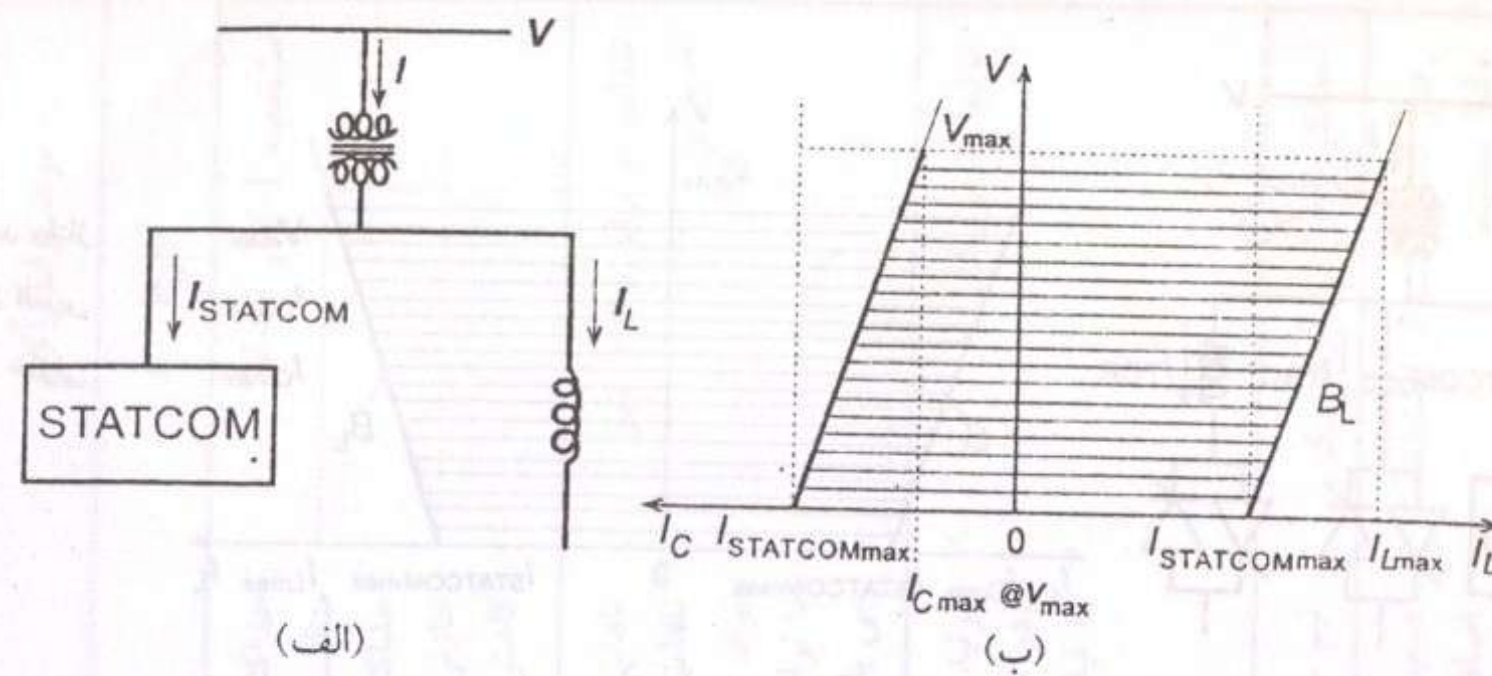
ترکیب یک مولد توان راکتیو مبتنی بر کنورتور با یک خازن ثابت در شکل ۵-۳۹ الف نشان داده شده است. این آرایش می‌تواند با جابه‌جایی محدوده عملکرد به منطقه خازنی، همان‌گونه که با مشخصه $V-I$ مربوطه در شکل ۵-۳۹ ب نشان داده شده، بیش از مقدار نامی کنورتور توان راکتیو تولید کند.

البته، ممکن است که مشخصه عملیاتی یک مولد استاتیکی توان راکتیو را به وسیله ترکیب کنورتور با راکتور شنت همان‌طور که با مدار شکل ۵-۴۰ الف نشان داده شده، بیشتر به طرف منطقه جذب جابجا کرد. مشخصه $V-I$ این آرایش در شکل ۵-۴۰ ب نشان داده شده است.

در حالی که، خازن‌های ثابت یا راکتورها محدوده عملیاتی مولد توان راکتیو را بیشتر به طرف منطقه خازنی یا القایی جابجا می‌کنند، بدون آن‌که تغییری در مقدار مگاوار قابل کنترل پدید آورند، خازن‌ها و راکتورهای سوئیچ شونده با ترستور در واقع کل محدوده کنترلی خروجی توان راکتیو را افزایش می‌دهند. یک مولد توان راکتیو مبتنی بر کنورتور که با یک TSC و یک TCR ترکیب شده، به همراه مشخصه $V-I$ مربوطه در شکل‌های ۵-۴۱ الف و ب نشان داده شده است.



شکل ۵-۳۹ مولد توان راکتیو نوع ترکیبی، خازن ثابت و مبتنی بر کنورتور (الف)، و محدوده $V-I$ عملکرد (ب).



شکل ۵-۴۰ مولد توان راکتیو نوع ترکیبی، راکتور ثابت و مبتنی بر کنورتور (الف)، و محدوده $V-I$ عملکرد (ب).

توجه کنید که افزودن ادمیتانس‌های راکتیو ثابت یا سوئیچ شونده به مولد توان راکتیو مبتنی بر کنورتور به طرز نامطلوبی مشخصه $V-I$ را تغییر می‌دهد؛ چون جریان خروجی تابعی از ولتاژ اعمال شده می‌شود. تغییر در مشخصه $V-I$ ، به روشنی بستگی به مقدار نامی مگاوارت آمپر کنورتور متناسب با کل محدوده کنترل شده مگاوار، دارد.

جدا از جابه‌جایی یا گسترش محدوده توان راکتیو کنترل شده، آرایش مولد توان راکتیو مختلط - که از یک کنورتور به همراه خازن ثابت و/یا کنترل شده با ترستور و بانک‌های راکتور استفاده می‌کند - می‌تواند به منظور تأمین یک مشخصه بهینه تلفات در مقابل توان راکتیو خروجی، برای کاربرد خاصی به کار رود.

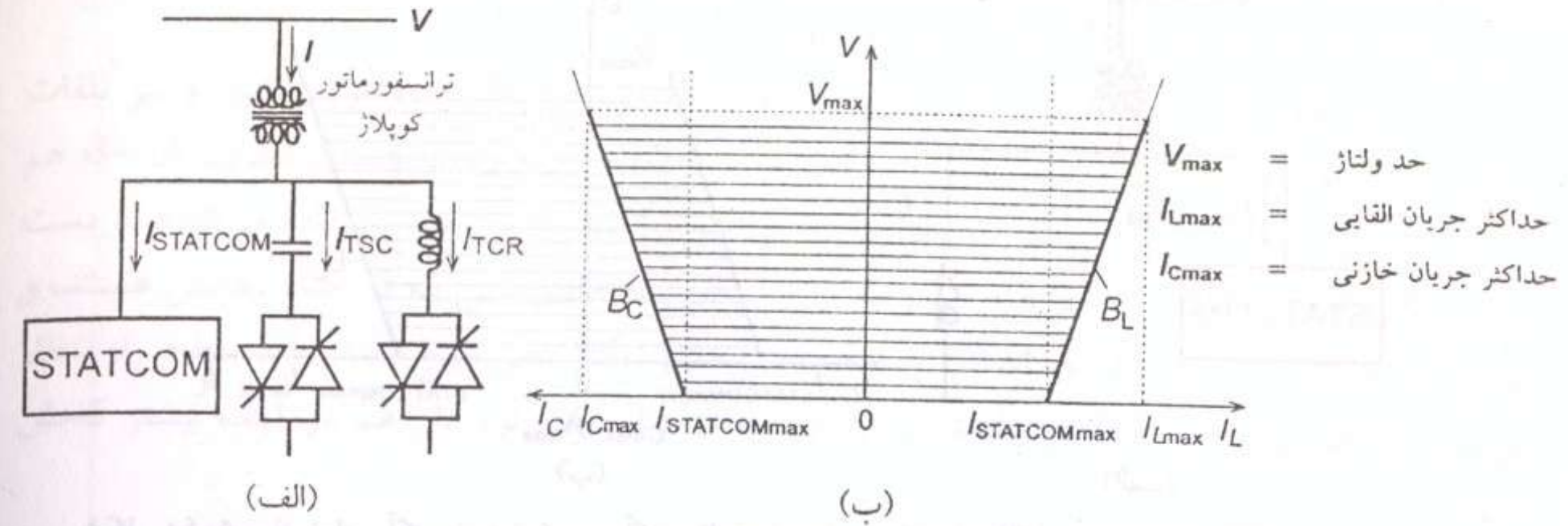
طرح عمومی مولد توان راکتیو مختلط، با استفاده از یک کنورتور سوئیچ شونده با TCR ها یا TSC ها، و احتمالاً خازن‌های ثابت یا با سوئیچ مکانیکی، امکان مفیدی را برای طراحی به وجود می‌آورد تا جبران ساز را از نظر محدوده تعریف شده توان راکتیو، مشخصه تلفات در برابر راکتیو خروجی، نحوه عملکرد و هزینه، بهینه کند.

۵-۲-۴ جمع بندی مولدهای استاتیکی توان راکتیو

اساسی انواع اصلی مولد استاتیکی توان راکتیو، در جدول ۵-۱ جمع بندی شده‌اند. هم‌چنین نمونه‌هایی از منحنی‌های مشخصه تلفات در برابر توان راکتیو خروجی در شکل ۵-۴۲ نمایش داده شده‌اند.

۵-۳ جبران سازه‌های استاتیکی توان راکتیو: SVC و STATCOM

جبران ساز استاتیکی توان راکتیو (SVC) و جبران ساز استاتیکی سنکرون (STATCOM) مولدهای استاتیکی توان راکتیو هستند، که در آن‌ها خروجی به صورتی تغییر کرده‌است که پارامترهای مشخصی در سیستم‌های قدرت الکتریکی، حفظ یا کنترل گردد. در بخش‌های قبلی بحث شد که یک مولد استاتیکی توان راکتیو ممکن است از نوع امپدانس راکتیو کنترل شده با بهره‌گیری از راکتورها و خازن‌های کنترل و سوئیچ شده با ترستور - یا از نوع منبع ولتاژ - با استفاده از کنورتور قدرت قابل سوئیچ شدن - یا از نوع مختلط - که ترکیبی از این اجزاء را استفاده می‌کند - باشد. اگرچه اصول عملکرد این مولدهای توان راکتیو بسیار متفاوت هستند و مشخصه



شکل ۵-۴۱ مولد توان راکتیو ترکیبی TSC-TCR و مبتنی بر کنورتور (الف)، و محدوده V-I عملکرد (ب).

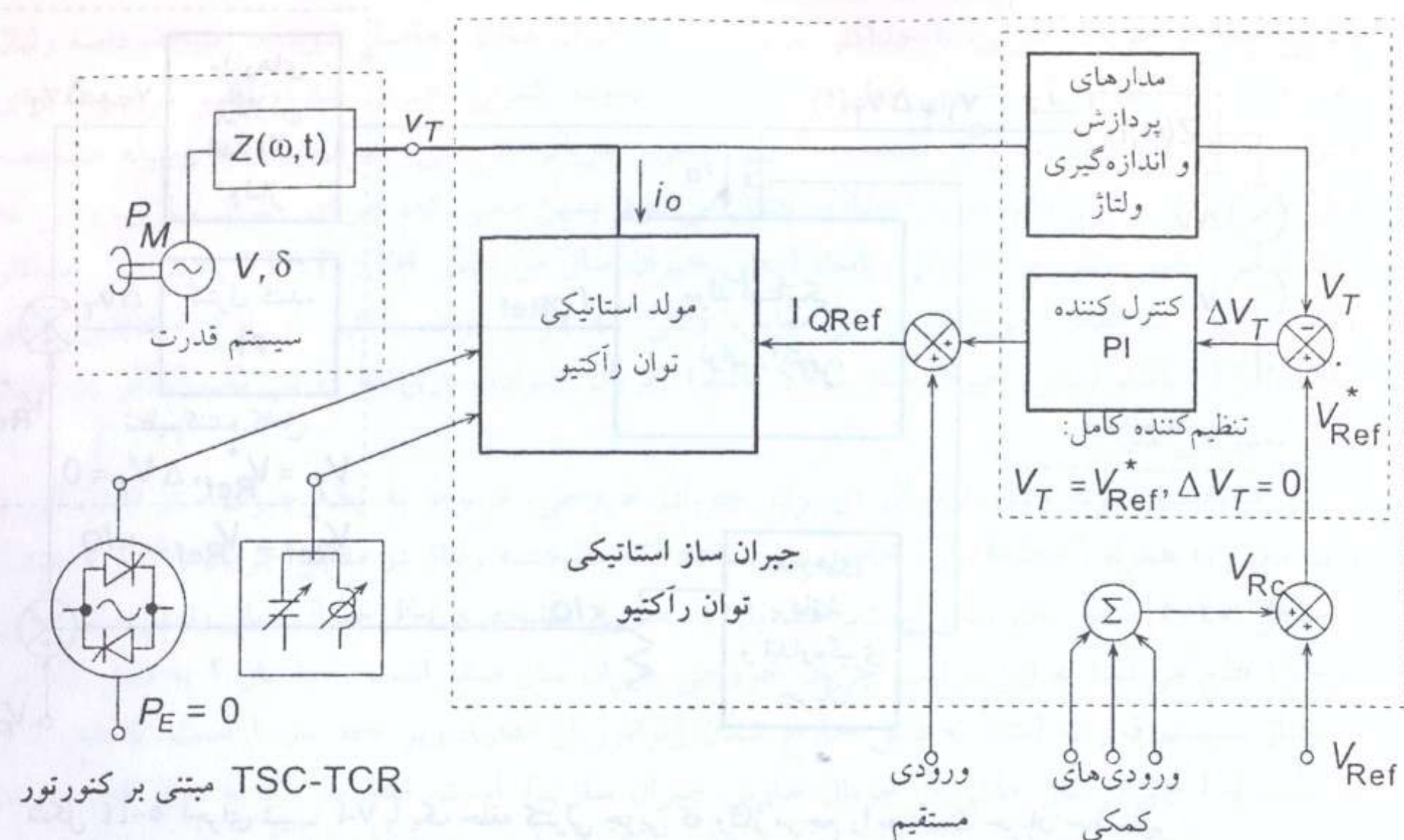
$V-I$ و تلفات در برابر توان راکتیو خروجی آنها و همچنین سرعت پاسخ و عرض باند فرکانس قابل حصول آنها کاملاً اختلاف دارند، همه آنها می‌توانند به طور کلی جبران سازی راکتیو شنت قابل کنترل را، با قابلیت‌های عملیاتی مشابه، در محدوده کاری خطی خود به نمایش گذارند. معنی این امر آن است که ساختار اساسی کنترل بیرونی که کارکرد عملیاتی جبران ساز را تعریف می‌کند، و در نتیجه ورودی‌های مرجع را برای مولد توان راکتیو به دست می‌دهد، اساساً مستقل از نوع مولد توان راکتیو مورد استفاده، یکسان است. (توجه کنید که مولد توان راکتیو مبتنی بر کنورتور می‌تواند به یک ذخیره ساز انرژی مناسب مجهز شود تا جبران سازی آکتیو و راکتیو را ایجاد نماید؛ که در این صورت کنترل جبران ساز بایستی با حلقه‌های اضافی کنترل، جهت مدیریت تبادل توان حقیقی بین سیستم ac و کنورتور، تکمیل شود.)

هدف اولیه کاربرد جبران ساز استاتیکی (این اصطلاح یا اصطلاح کوتاه‌تر جبران ساز به طور عمومی برای ارجاع به یک SVC و نیز یک STATCOM به کار خواهد رفت) در یک سیستم قدرت، افزایش قابلیت انتقال توان در یک شبکه انتقال مفروض، از نیروگاه تا بار است. از آنجا که جبران سازهای استاتیکی نمی‌توانند توان حقیقی تولید یا جذب کنند (صرف‌نظر از تلفات داخلی نسبتاً کم SVC و با فرض عدم ذخیره سازی انرژی برای STATCOM)، انتقال توان سیستم به صورت غیر مستقیم از کنترل ولتاژ تأثیر می‌پذیرد. این مطلب بدین معنی است که توان راکتیو خروجی (خازنی یا القایی) جبران ساز برای کنترل ولتاژ، در ترمینال‌های معین شبکه انتقال تغییر داده می‌شود، تا سیلان توان مطلوب در اعوجاج‌ها و شرایط اضطراری احتمالی سیستم حفظ شود.

الزامات کنترلی برای جبران ساز (که طریقه تغییر خروجی مولد توان راکتیو برای افزایش سیلان توان و پایداری پارامترهای مشخص سیستم قدرت را در مقابله با شرایط اضطراری و اعوجاج‌های دینامیکی، تعریف می‌کند) از ملاحظات جبران سازی کاربردی در بخش ۱-۵ این فصل منتج شده است. همان‌گونه که در آنجا نشان داده شده، ضرورت جبران سازی اولیه معمولاً لازم است که در یکی از دو مقوله اصلی واقع شود: (۱) پشتیبانی مستقیم ولتاژ (برای حفظ ولتاژ خط در حد کفایت جهت تسهیل سیلان توان افزایش یافته در بارهای سنگین، و برای جلوگیری از عدم تعادل ولتاژ) و (۲) اصلاح پایداری گذرا و دینامیکی (برای افزایش حاشیه پایداری اولین

جدول ۱ - ۵ مقایسه مولدهای استاتیکی توان راکتیو

مولد توان راکتیو	TCR-FC	TSC-(TSR)	TCR-TSC	مبتنی بر کنورتور
نوع	امپدانس کنترل شده	امپدانس کنترل شده	امپدانس کنترل شده	منبع ولتاژ سنکرون
مشخصه V-I و V-Q	حداکثر جریان جبران سازی متناسب با ولتاژ سیستم. حداکثر توان راکتیو خروجی خازنی با مجذور کاهش ولتاژ کاهش می‌یابد.	حداکثر جریان جبران سازی متناسب با ولتاژ سیستم. حداکثر توان راکتیو خروجی خازنی با مجذور کاهش ولتاژ کاهش می‌یابد.	حداکثر جریان جبران سازی متناسب با ولتاژ سیستم. حداکثر توان راکتیو خروجی خازنی با مجذور کاهش ولتاژ کاهش می‌یابد.	حداکثر جریان جبران سازی مستقل از ولتاژ سیستم حفظ می‌شود. حداکثر توان راکتیو خروجی با کاهش ولتاژ به صورت خطی کاهش می‌یابد.
تلفات در برابر توان راکتیو خروجی	تلفات زیاد در خروجی صفر. تلفات به صورت یکپارچه با توان خروجی خازنی کاهش می‌یابد.	تلفات کم در خروجی صفر. تلفات به صورت پله‌ای با توان خروجی خازنی افزایش می‌یابد.	تلفات کم در خروجی صفر. تلفات به صورت پله‌ای با توان خروجی خازنی، و به صورت یکپارچه با توان خروجی القایی افزایش می‌یابد.	تلفات کم در خروجی صفر. تلفات به صورت یکپارچه با توان خروجی القایی و هم با توان خروجی خازنی افزایش می‌یابد.
تولید هارمونیک	تولید داخلی هارمونیک زیاد (در TCR با $p.u.$ زیاد). نیاز به فیلتر کردن قابل توجه دارد.	تلفات کم در خروجی صفر. تلفات به صورت پله‌ای با توان خروجی خازنی افزایش می‌یابد.	تولید داخلی هارمونیک کم. (در TCR با $p.u.$ کم). به فیلتر کردن نیاز دارد.	تولید داخلی هارمونیک می‌تواند بسیار کم باشد (کنورتورهای چند پالسه، چند سطحه). ممکن است نیاز به فیلتر کردن نداشته باشد.
حداکثر تأخیر از نظر تئوری	نیم سیکل	یک سیکل	یک سیکل	قابل صرف‌نظر کردن
رفتار گذرا تحت اثر اغتشاشات ولتاژ سیستم	ضعیف. (خازن ثابت FC باعث اضافه ولتاژهای گذرا در پاسخ به اغتشاشات مرحله‌ای می‌شود)	می‌تواند خنثی باشد. (خازن‌ها را می‌توان به بیرون مدار سوئیچ کرد تا اضافه ولتاژهای گذرا حداقل شود.)	می‌تواند خنثی باشد. (خازن‌ها را می‌توان به بیرون مدار سوئیچ کرد تا اضافه ولتاژهای گذرا حداقل شود.)	در حال پیشرفت به سمت کاهش گذراها. (منبع ولتاژ با امپدانس کم).



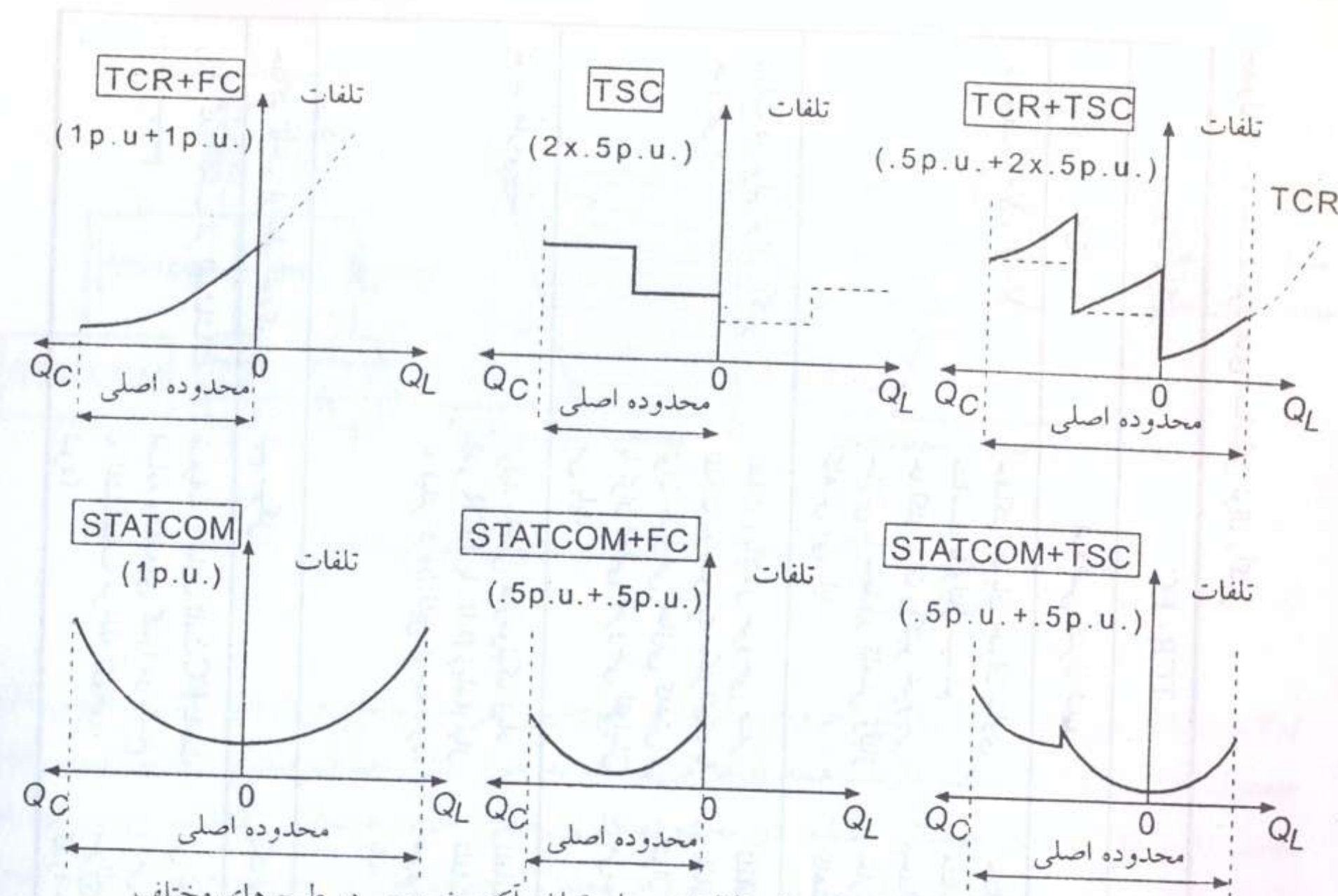
شکل ۵-۴۳ طرح کلی کنترل در یک مولد استاتیکی توان رآکتیو.

رآکتیو تأمین کند. به عبارت دیگر، I_o از طریق I_{QRef} به صورت حلقه بسته کنترل می‌شود، به صورتی که V_T دقیقاً در سطح ولتاژ مرجع V_{Ref} ، در برابر سیستم قدرت و تغییرات بار، حفظ شود. اگر جبران سازی مناسب سیستم توان ac ، تغییرات خاصی را در دامنه ولتاژ ترمینال به نسبت زمان یا متغیر دیگری، لازم داشته باشد، آن‌گاه یک سیگنال تصحیح کننده متناسب V_{Rc} ، که از ورودی‌های فرعی گرفته می‌شود، با ولتاژ مرجع ثابت V_{Ref} جمع می‌شود، تا سیگنال مرجع مؤثر مطلوب V_{Ref}^* را که در یک حلقه بسته ولتاژ ترمینال V_T را کنترل می‌کند، به دست آید. در بخش‌های بعدی، برخی حلقه‌های کنترلی جنبی کاربردی و مشخصه‌های مربوط به جبران ساز استاتیکی شرح داده شده‌اند.

۵-۳-۱ شیب تنظیم [ولتاژ]

در بسیاری از کاربردها، جبران ساز استاتیکی به عنوان یک تنظیم کننده کامل ولتاژ ترمینال به کار نمی‌رود، بلکه این ولتاژ تا اندازه‌ای مجاز به تغییر، متناسب با جریان جبران سازی می‌باشد. دلایل متعددی برای این موضوع وجود دارد:

- ۱- محدوده عملکرد خطی یک جبران ساز که دارای حداکثر مقدار نامی خازنی و القایی داده شده است، در صورتی که "افت" تنظیم [ولتاژ] مجاز شمرده شود، قابل گسترش است. "افت" تنظیم به معنای آن است که ولتاژ ترمینال اجازه دارد که در وضعیت جبران سازی خازنی کامل، کمتر از مقدار نامی ولتاژ در حالت بدون بار باشد، و برعکس، مجاز است که در وضعیت جبران سازی القایی کامل، بیش از مقدار نامی شود.
- ۲- تنظیم کامل (افت یا شیب صفر تنظیم)، اگر امپدانس سیستم دارای ناحیه "مسطح" (امپدانس کم) در محدوده فرکانس عملیاتی موردنظر باشد، می‌تواند به تعریف نقطه کار ضعیف، و تمایل به



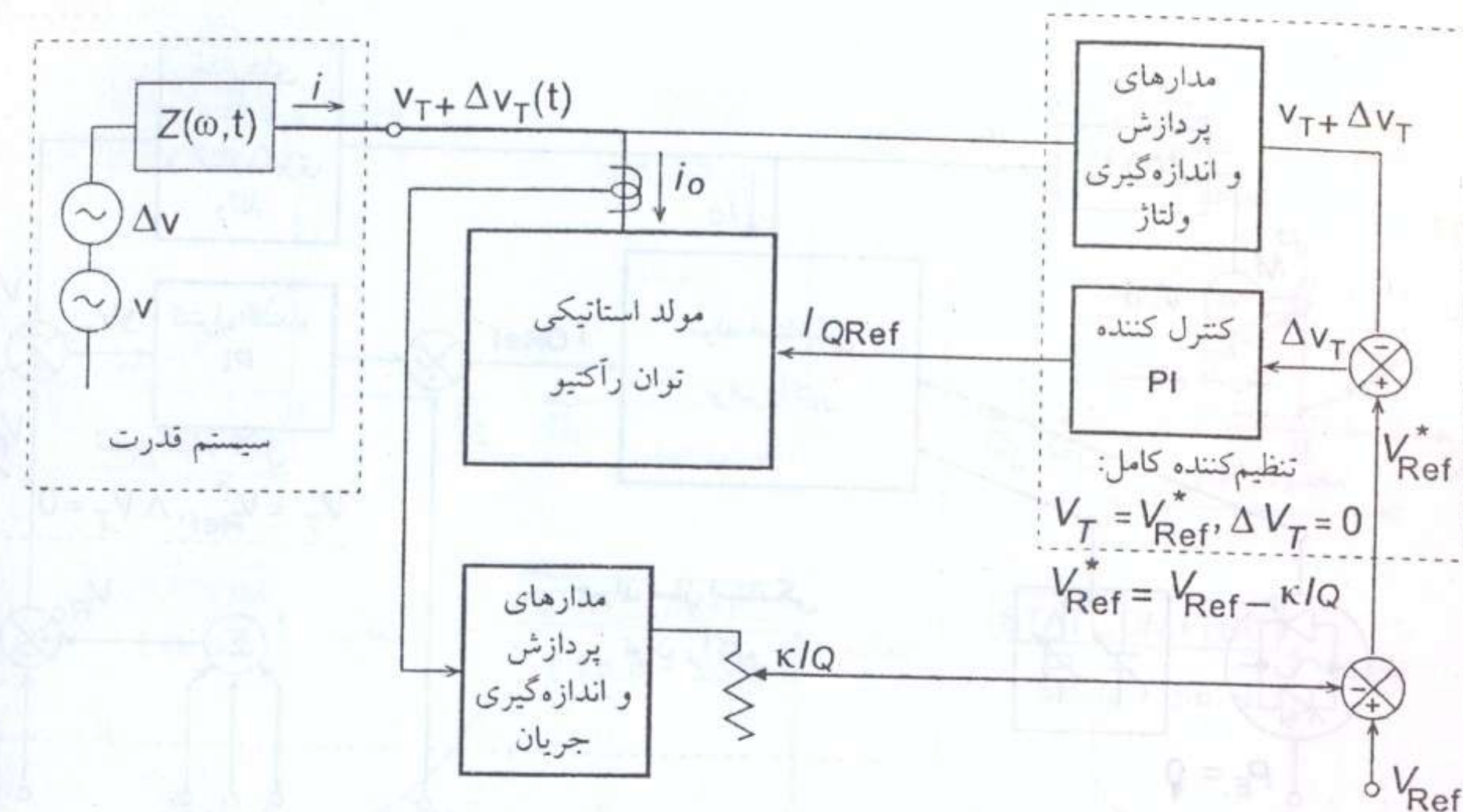
شکل ۵-۴۲ جمع بندی مشخصه های تلفات در برابر توان رآکتیو خروجی در طرح های مختلف مولد های استاتیکی توان رآکتیو.

نوسان و ایجاد میرایی نوسان توان). در آن بخش نشان داده شد که کنترل ولتاژ ترمینال می‌تواند قابلیت انتقال توان سیستم قدرت را تا حد چشمگیری افزایش دهد. به طور اخص، تنظیم ولتاژ در نقاط میانی معین و ترمینال‌های بار برگزیده‌ای در سیستم انتقال، تغییرات ولتاژ را محدود می‌کند، از ناپایداری ولتاژ (سقوط ولتاژ) جلوگیری به عمل می‌آورد، و محدوده پایداری گذرا (نوسان اول) را افزایش می‌دهد، در حالی که تغییر مناسب ولتاژ ترمینال می‌تواند پایداری گذرا را بیشتر افزایش دهد و میرایی نوسان توان (پایداری دینامیکی) مؤثری ایجاد نماید.

به منظور برآورده کردن الزامات عمومی جبران سازی سیستم قدرت، خروجی مولد استاتیکی توان رآکتیو باید کنترل شود تا ولتاژ در نقطه اتصال با سیستم انتقال حفظ شود یا تغییر کند. یک شمای عمومی کنترل، که مولد استاتیکی توان رآکتیو (از نوع امپدانس کنترل شده یا نوع مبتنی بر کنورتور) را به جبران ساز خط انتقال مبدل می‌کند، در شکل ۵-۴۳ نشان داده شده است.

سیستم قدرت، در ترمینال جبران ساز به صورت یک مولد نشان داده شده که دارای زاویه روتور عموماً متغیر δ ، ولتاژ داخلی V ، و امپدانس منبع Z (شامل امپدانس مولد و خط انتقال) است؛ که Z تابعی از فرکانس زاویه‌ای ω و زمان t است. (تغییر امپدانس در زمان، به علت خطاها، کلیدزنی خط و غیره است). ولتاژ ترمینال V_T سیستم قدرت را می‌توان با یک دامنه معمولاً متغیر V_T ، و فرکانس زاویه‌ای ω مشخص کرد.

خروجی مولد استاتیکی توان رآکتیو به صورتی کنترل می‌شود که دامنه I_o جریان رآکتیو i_o که از سیستم قدرت کشیده می‌شود، از جریان مرجع I_{QRef} تبعیت کند. با کنترل جبران ساز استاتیکی اصلی، مولد توان رآکتیو به صورت یک تنظیم کننده "بی نقص" ولتاژ ترمینال عمل می‌کند: دامنه V_T ولتاژ ترمینال V_T اندازه‌گیری می‌شود و با ولتاژ مرجع V_{Ref} مقایسه می‌شود؛ خطای ΔV_T پردازش شده و به وسیله یک کنترل کننده PI (تناسبی انتگرالی) تقویت می‌شود تا جریانی مرجع I_{QRef} را برای مولد توان



شکل ۵-۴۴ اجرای شیب $V-I$ با یک حلقه کنترلی جزیی که ولتاژ مرجع را به نسبت جریان خط تغییر می دهد.

بروز نوسان منجر شود.

۳- افت یا شیب تنظیم، گرایش به تقویت تقسیم خودکار بار بین جبران سازه‌های استاتیکی و سایر تنظیم کننده‌های ولتاژ - که معمولاً برای کنترل ولتاژ انتقال به کار می‌روند - دارد.

مشخصه ولتاژ ترمینال مطلوب در برابر جریان خروجی جبران ساز، می‌تواند با یک حلقه کنترلی مختصر که از ورودی جانبی تعریف شده قبلی استفاده می‌کند - همان‌گونه که به صورت شماتیک در شکل ۵-۴۴ نشان داده شده - انجام شود. یک سیگنال متناسب با دامنه جریان جبران سازی κI_Q با پلاریته معین (جریان خازنی منفی و جریان القایی مثبت است) مشتق شده و با ولتاژ مرجع V_{Ref} جمع می‌شود. مرجع مؤثر V_{Ref}^* که ولتاژ ترمینال را کنترل می‌کند به این ترتیب عبارت خواهد بود از:

$$V_{Ref}^* = V_{Ref} + \kappa I_Q \quad (5-14)$$

در رابطه (۵-۱۴)، κ ، شیب تنظیم است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\kappa = \frac{\Delta V_{Cmax}}{I_{Cmax}} = \frac{\Delta V_{Lmax}}{I_{Lmax}} \quad (5-15)$$

که ΔV_{Cmax} عبارت است از انحراف (کاهش) ولتاژ ترمینال از مقدار نامی خود در حداکثر جریان خروجی خازنی ($I_{Qmax} = I_{Cmax}$)؛ عبارت است از انحراف (افزایش) ولتاژ ترمینال از مقدار نامی خود در حداکثر جریان خروجی القایی ($I_{Qmax} = I_{Lmax}$)؛ عبارت است از حداکثر جریان خازنی جبران سازی؛ و I_{Lmax} عبارت است از حداکثر جریان القایی جبران سازی.

رابطه (۵-۱۴) نشان می‌دهد که V_{Ref}^* با افزایش جریان جبران سازی (که با شیب انتخابی κ تعیین می‌شود) به صورتی کنترل می‌شود که از مقدار نامی ولتاژ (جبران سازی نشده) کم تر شود، و برعکس به صورتی کنترل می‌شود که با افزایش جریان القایی جبران سازی، افزایش یابد، تا این‌که به

ترتیب، حداکثر جریان خازنی، یا حداکثر جریان القایی جبران سازی حاصل شود. در نتیجه، دامنه ولتاژ ترمینال V_T ، در طول یک شیب خطی معین، در محدوده کنترلی جبران ساز، تنظیم می‌شود. برای تغییرات ولتاژ ترمینال خارج از محدوده کنترل خطی، جریان خروجی جبران ساز به وسیله مشخصه اصلی $V-I$ مولد توان رآکتیو مورد استفاده، تعیین می‌شود. بدین معنی که، جریان جبران سازی، وقتی که مولد توان رآکتیو مبتنی بر کنورتور باشد (یعنی جبران ساز موردنظر STATCOM باشد) در حداکثر مقدار خازنی یا القایی می‌ماند، و در مقابل، وقتی که مولد توان رآکتیو از نوع امپدانس متغیر (TCR/TSC) باشد (یعنی جبران ساز SVC باشد) جریان جبران سازی به روش یک القاگر یا خازن ثابت، تغییر می‌کند.

مشخصه نمونه ولتاژ ترمینال در برابر جریان خروجی، مربوط به یک جبران ساز استاتیکی با شیب معین به همراه "خطوط بار" خاص سیستم ac (که مشخصه ولتاژ در مقابل جریان رآکتیو هستند)، در شکل ۵-۴۵ نشان داده شده است. خط بار ۱، منحنی مشخصه $V-I$ جبران ساز را در ولتاژ نامی (مرجع) قطع می‌کند؛ به این ترتیب جریان خروجی جبران ساز صفر است. خط بار ۲ به دلیل کاهشی در ولتاژ سیستم قدرت (مثلاً به دلیل خارج شدن ژنراتور از مدار)، زیر خط بار ۱ است. تقاطع آن با مشخصه $V-I$ جبران ساز حاکی از جریان خازنی جبران ساز I_{C2} است. خط بار ۳، به دلیل افزایشی در ولتاژ سیستم قدرت (مثلاً از دست رفتن بار) بالای خط بار ۱ است. تقاطع آن با مشخصه $V-I$ معرف جریان القایی جبران سازی I_{L3} است. نقاط تقاطع خطوط بار ۲ و ۳ با محور عمودی (ولتاژ) تغییرات ولتاژ ترمینال را بدون هیچ‌گونه جبران سازی تعریف می‌نمایند. تغییرات ولتاژ ترمینال با جبران سازی، در محدوده عملکرد خطی، تحت شرایط ماندگار و با تغییرات ملایم سیستم، مستقل از نوع مولد توان رآکتیو مورد استفاده، به طور کامل با شیب تنظیم تعیین می‌شود. این مطلب در شکل ۵-۴۵ قابل مشاهده است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده، STATCOM و SVC خارج از محدوده عملکرد خطی به صورت متفاوتی عمل می‌کنند. کارکرد دینامیکی دو نوع جبران ساز نیز متفاوت است.

۵-۳-۲ تابع تبدیل و عملکرد دینامیکی

مشخصه $V-I$ جبران ساز استاتیکی که در شکل ۵-۴۵ نشان داده شده، نمایش‌گر رابطه حالت ماندگار است. رفتار دینامیکی جبران ساز در محدوده عادی جبران سازی، می‌تواند با بلوک دیاگرام ابتدایی نشان داده شده در شکل ۵-۴۶، مشخص شود. این بلوک دیاگرام مستقیماً از طرح اولیه کنترل که در شکل ۵-۴۴ نشان داده شده و تابع تبدیلی که برای مولدهای توان رآکتیو نوع امپدانس متغیر (TSC-TCR و FC-TCR) و مبتنی بر کنورتور - به ترتیب در بخش‌های ۵-۲-۱ و ۵-۲-۲ - تعیین گردیده، مشتق شده است.

در محدوده عملکرد خطی جبران ساز، ولتاژ ترمینال V_T می‌تواند برحسب ولتاژ داخلی V و ولتاژ مرجع V_{Ref} ، از شکل ۵-۴۶، به صورت زیر بیان شود:

$$V_T = V \frac{1}{1 + G_1 G_V H X} + V_{Ref} \frac{G_1 G_V X}{1 + G_1 G_V H X} \quad (5-16)$$

از آن‌جا که هدف، تعیین میزان مناسب بودن تنظیم ولتاژ ترمینال در برابر ولتاژ سیستم (متغیر) است، تنها تغییرات کوچک را در نظر گرفته و فرض نمایید که $V_{Ref} = 0$ است. آن‌گاه تغییرات دامنه ولتاژ ترمینال ΔV_T در برابر تغییرات دامنه ولتاژ سیستم قدرت ΔV می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\frac{\Delta V_T}{\Delta V} = \frac{1}{1 + G_1 G_V H X} = \frac{1}{1 + G H X} \quad (5-17)$$

و $T_i =$ ثابت زمانی اصلی کنترل کننده PI (نوعاً حدود ۱۰ تا ۵۰ میلی ثانیه بسته به تأخیر انتقال مولد توان رآکتیو)، $T_r =$ ثابت زمانی مدار اندازه‌گیری دامنه (نوعاً حدود ۸ تا ۱۰ میلی ثانیه)، $T_d =$ تأخیر انتقال مولد توان رآکتیو (نوعاً ۲/۵ میلی ثانیه برای TCR، ۵ میلی ثانیه برای TSC و ۰/۲ تا ۰/۳ میلی ثانیه برای کنورتور)، $X = I_m Z$ (بخش رآکتیو امپدانس سیستم)، $\kappa =$ شیب تنظیم (نوعاً ۱ تا ۵ درصد) که از رابطه (۵-۱۵) به دست می‌آید، و s عملگر لاپلاس می‌باشد.

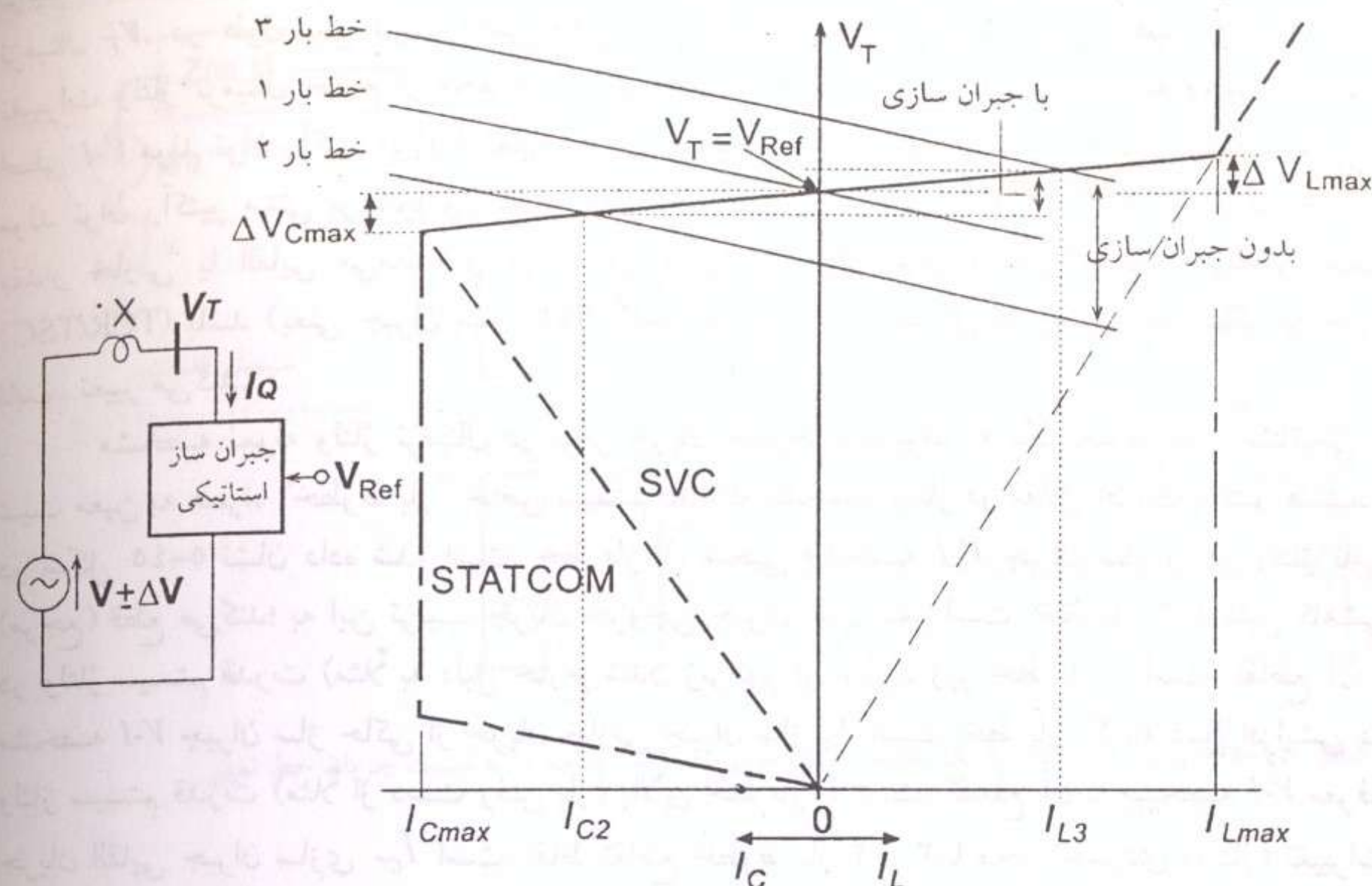
بایستی اشاره شود که کنترل‌های عملی جبران ساز اغلب در مدار پردازش سیگنال از فیلتر استفاده می‌کنند، که ممکن است ثابت زمانی‌های اضافی در تابع تبدیل‌های تحت تأثیر خود، ایجاد نمایند. گاهی اوقات مدارهای تصحیح فاز (تقدم/تأخر) مورد استفاده قرار می‌گیرند. تحت شرایط حالت ماندگار ($s \rightarrow 0$) رابطه (۵-۱۷) تبدیل می‌شود به:

$$\frac{\Delta V_T}{\Delta V} = \frac{1}{1 + \frac{X}{\kappa}} \quad (5-22)$$

رابطه (۵-۲۲) تأیید می‌کند که هرچه شیب کوچکتر می‌شود ($\kappa \rightarrow 0$)، ولتاژ ترمینال، مستقل از تغییرات ولتاژ سیستم ($\Delta V_T / \Delta V \rightarrow 0$)، ثابت می‌ماند. به طور مشابه، با افزایش شیب ($\kappa \gg X$) ولتاژ ترمینال تنظیم نشده باقی می‌ماند ($\Delta V_T / \Delta V \rightarrow 1$).

هم‌چنین بایستی توجه داشت، رابطه (۵-۱۷) که رفتار دینامیکی جبران ساز را تعریف می‌کند، تابعی از امپدانس سیستم قدرت است؛ یعنی این که امپدانس سیستم یک بخش غیرقابل تفکیک از حلقه باز خورد است. معنی این سخن آن است که زمان پاسخ، و لذا پایداری کنترل، بستگی به امپدانس سیستم دارد. به همین دلیل، کنترل معمولاً برای حداکثر امپدانس سیستم مورد انتظار (حداقل ظرفیت اتصال کوتاه) بهینه می‌شود. این البته به مفهوم آن است که اگر امپدانس سیستم کاهش یابد (ظرفیت اتصال کوتاه اضافه شود) زمان پاسخ سیستم، مقداری طولانی‌تر خواهد شد. در جبران‌سازهای استاتیکی کاربردی، زمان پاسخ در بدترین حالت نوعاً در محدوده ۳۰ تا ۷۰ میلی ثانیه است (۲ تا ۴ سیکل در فرکانس سیستم قدرت). مقدار رواداری^۱ در تغییرات امپدانس سیستم و بدترین حالت زمان پاسخ قابل حصول، به مقدار زیادی بستگی به عرض باند فرکانس قابل دست‌یابی جبران ساز دارد، که نهایتاً با تأخیر انتقال مولد توان رآکتیو مورد استفاده محدود می‌شود.

به منظور تخمین عرض باند قابل حصول و پایداری حلقه بسته تنظیم ولتاژ در دو نوع جبران ساز استاتیکی (STATCOM و SVC)، عبارت کلی داده شده در رابطه (۵-۱۷) را در نظر بگیرید. این رابطه، به استثنای ثابت زمانی تأخیر انتقال T_d در تابع تبدیل G_r ، که در STATCOM چند مرتبه کوچکتر از SVC است، هر دو نوع را به صورت یکسان توصیف می‌کند. با تشخیص این که مشخصه فازی $e^{-T_d s}$ بسیار نامطلوب است، بهبودی را که STATCOM ارائه می‌کند، از دیدگاه عرض باند فرکانسی قابل حصول، بسیار حائز اهمیت است. به شکل ۵-۴۷ مراجعه کنید که در آن مشخصه زاویه فازی در جمله $e^{-T_d s}$ (با $s = j\omega$) در مقابل فرکانس، برای زمان تأخیر انتقال‌های پیش گفته: $T_d = 0/5 \text{ ms}$ (TSC)، $T_d = 2/77 \text{ ms}$ (TCR)، و $T_d = 0/5 \text{ ms}$ (کنورتور)، ترسیم شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، فرکانسی که در آن جابه‌جایی فاز به ۱۸۰ درجه می‌رسد (و بهره حلقه بسته تنظیم کننده ولتاژ به منظور پایداری باید کمتر از واحد باشد) نوعاً برای مولد توان رآکتیو مبتنی بر کنورتور نوع STATCOM، بیش از ده برابر بزرگتر از مولد توان رآکتیو مبتنی بر TCR و SVC است.



شکل ۵-۴۵ مشخصه $V-I$ مربوط به STATCOM و SVC

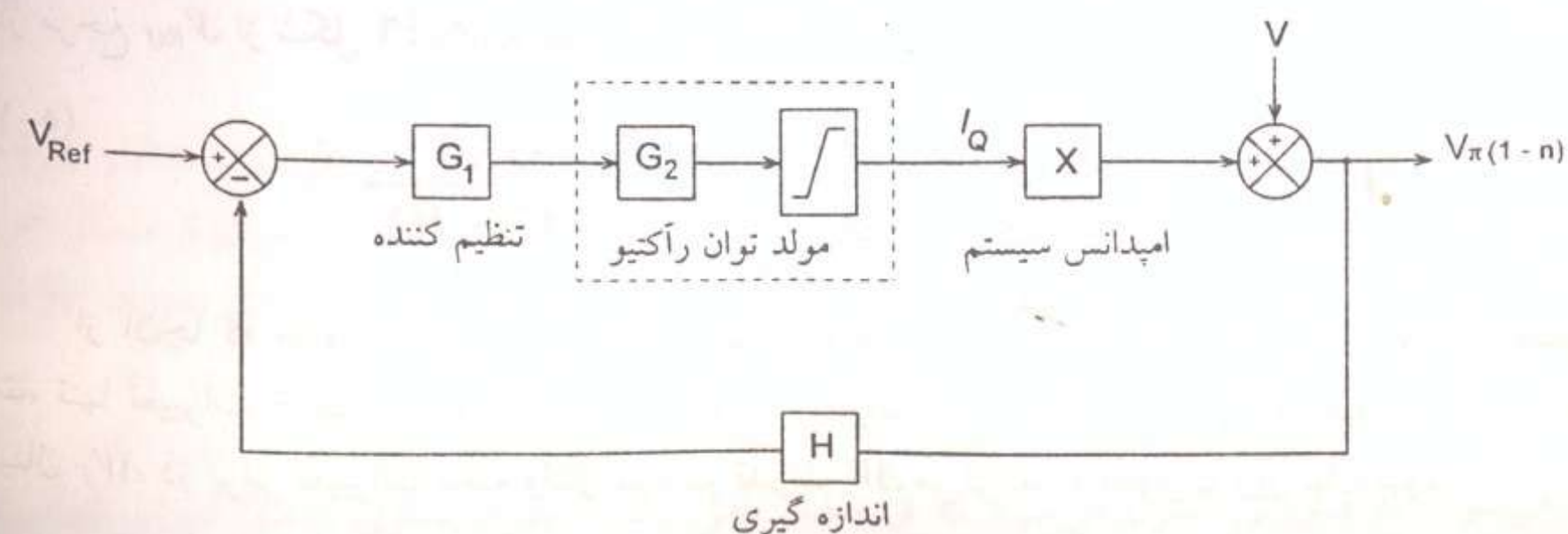
که در آن

$$G_1 = \frac{1/\kappa}{1 + T_1 s} \quad (5-18)$$

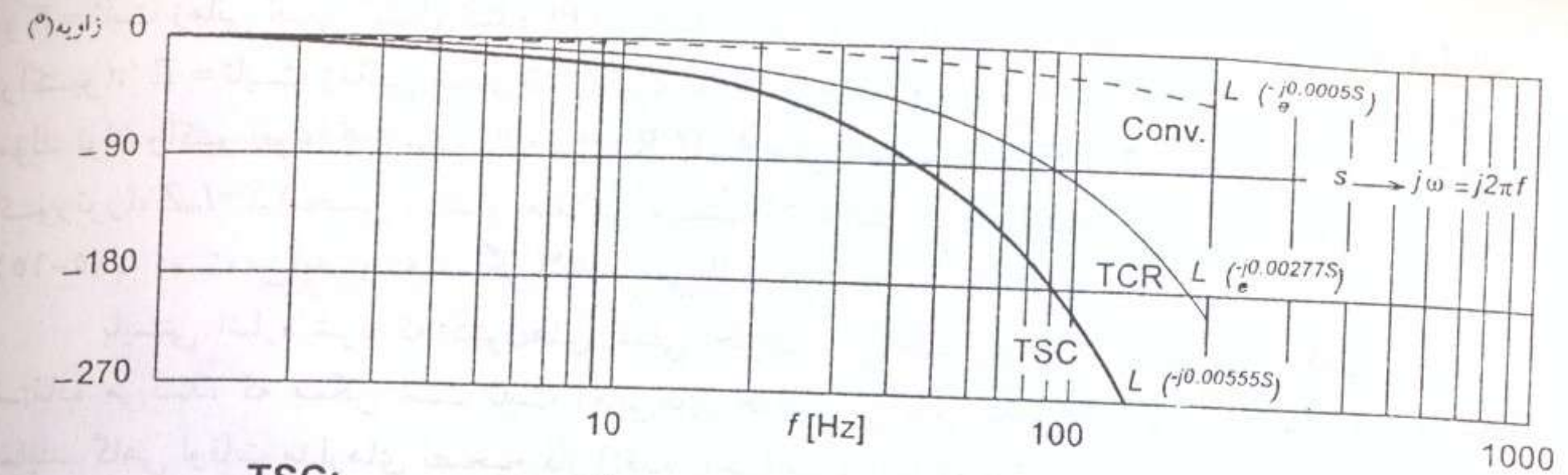
$$G_r = e^{-T_d s} \quad (5-19)$$

$$G = G_1 G_r = \frac{1/\kappa}{1 + T_1 s} e^{-T_d s} \quad (5-20)$$

$$H = \frac{1}{1 + T_r s} \quad (5-21)$$



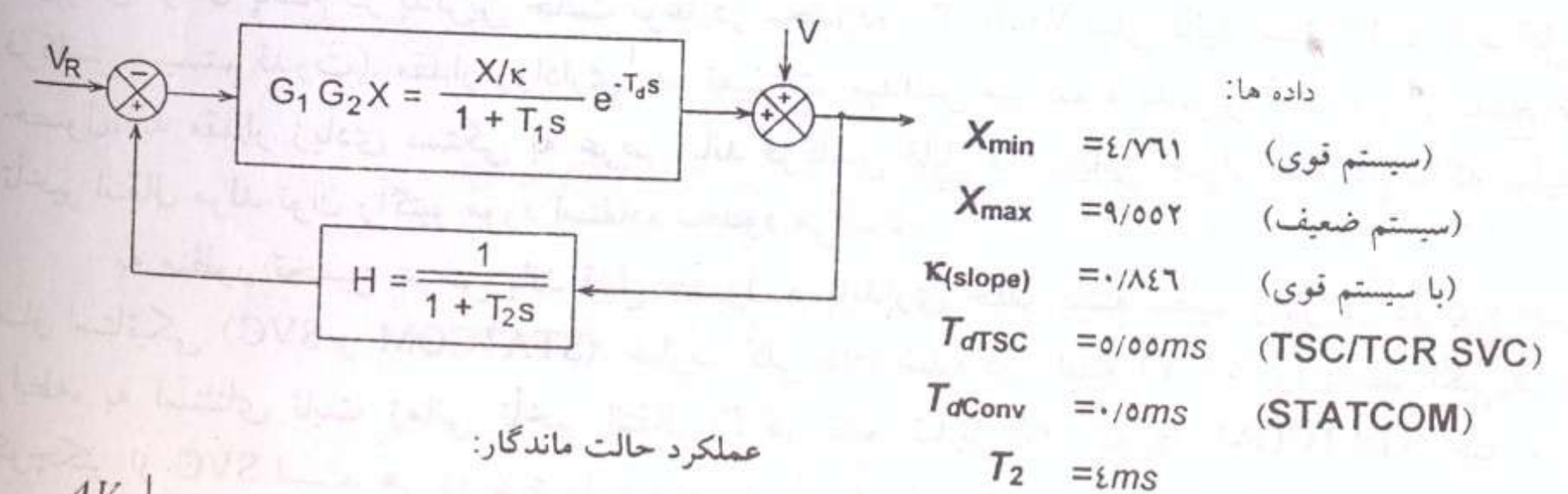
شکل ۵-۴۶ بلوک دیاگرام تابع تبدیل اصلی جبران ساز استاتیکی توان رآکتیو.



TSC: خازن سوئیچ شونده با ترستور
TCR: راکتور قابل کنترل با ترستور
Conv.: کنورتور منبع ولتاژی، چند پالسه

شکل ۵-۴۷ نمایش منحنی Bode برای "تاخیر انتقال" که مشخصه اجزاء کنترل شده یک مولد استاتیکی توان راکتیو: TCR, TSC و کنورتور است.

از رابطه (۵-۱۷) استنباط می‌شود که، اگر امیدانس سیستم تغییر کند (همان طور که در عمل به دلیل کلیدزنی خط، خارج شدن ژنراتور از مدار، و غیره معمولاً اتفاق می‌افتد)، جبران ساز فقط وقتی پایدار می‌ماند که بهره کلی حلقه در برابر فرکانس - که با حاصل ضرب $G_1 G_2 H X$ تعیین می‌شود، زمانی که امیدانس سیستم حداکثر است (ضعیف ترین سیستم) و قبل از این که زاویه $G_1 G_2 H X$ در برابر فرکانس به 180° درجه برسد، کمتر از یک باشد. این امر معمولاً با تنظیم ثابت زمانی آمپلی فایر خطای اصلی در یک مقدار نسبتاً بزرگ، حاصل می‌شود. برای نشان دادن این امر، تنظیم کننده ولتاژ مبتنی بر جبران ساز را که در شکل ۵-۴۳ نشان داده شده، در نظر بگیرید؛ در حالی که تابع تبدیل و داده‌های مربوطه در شکل ۵-۴۸ تعریف شده‌اند. اگر جبران ساز یک



$$\left. \frac{\Delta V_T}{\Delta V} \right|_{s=0} = \frac{1}{1 + G_1 G_2 H X} = \frac{1}{1 + \frac{4/761}{0/846}} = 0/15$$

تعیین کنید: حداکثر عرض باند را برای عملکرد پایدار در هر دو سیستم قوی و ضعیف، یعنی حداکثر T_{1Conv} برای STATCOM و T_{dTSC} برای SVC از نوع TSC/TCR

شکل ۵-۴۸ مثال جبران سازی برای نشان دادن تأثیر "تاخیر انتقال" بر پایداری تنظیم ولتاژ در برابر امیدانس سیستم متغیر.

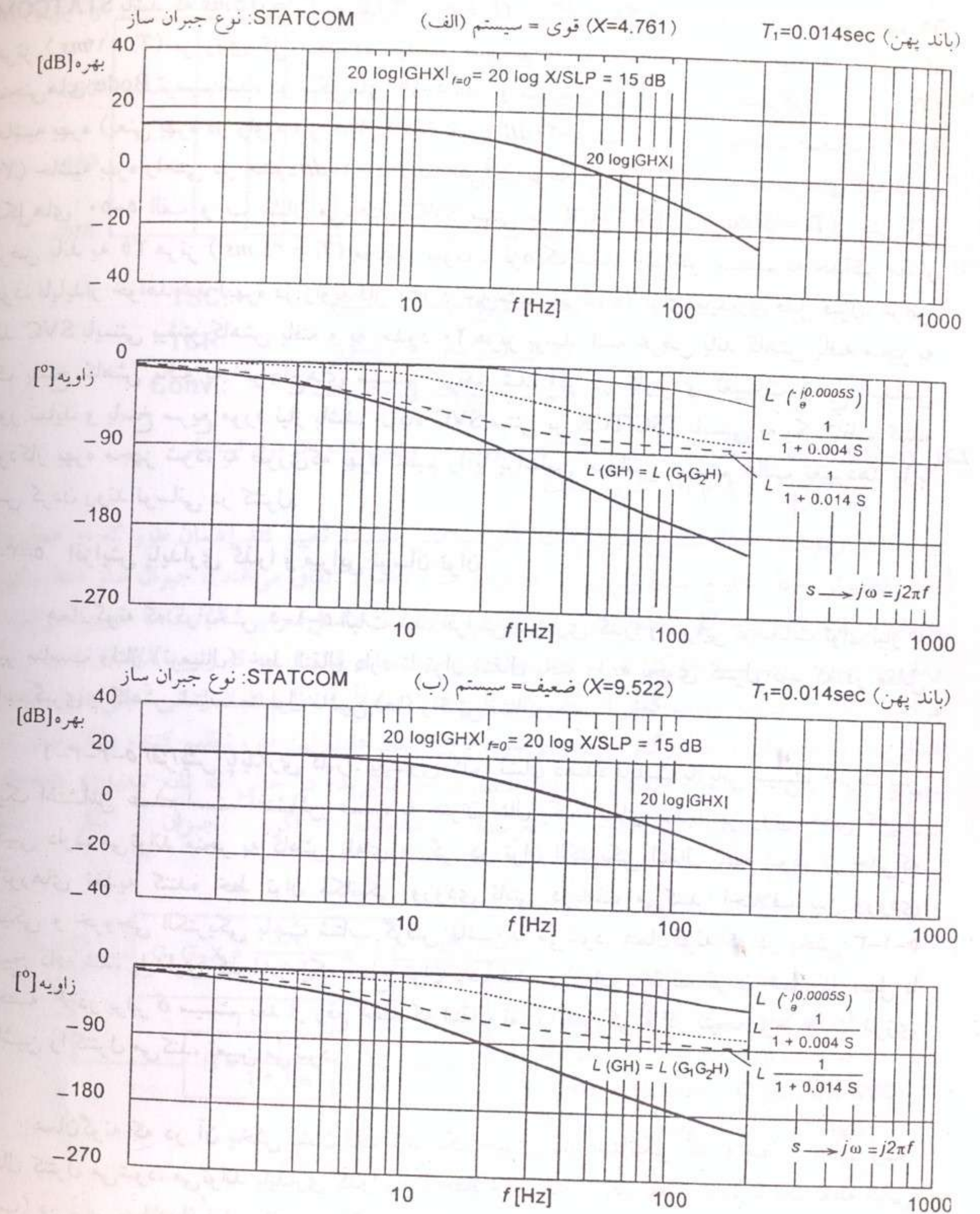
STATCOM باشد که $T_d = 0/5ms$ و لذا $G_T = e^{-0/005s}$ ، آن گاه عملکرد پایدار، با عرض باند تنظیم 65 هرتز ($T_1 = 1ms$) بر روی کل محدوده امیدانس سیستم دو به یک به دست می‌آید. همان گونه که منحنی‌های Bode ترسیم شده در شکل‌های ۵-۴۹ الف و ب نشان می‌دهند، با سیستم قوی ($X = 4/761$) حاشیه بهره (یعنی بهره در زاویه فاز 180° درجه) تقریباً $-20dB$ است و حتی با سیستم ضعیف ($X = 9/552$) حاشیه بهره راحتی در حدود $-10dB$ به دست می‌آید. برعکس، همان گونه که منحنی‌های Bode در شکل‌های ۵-۵۰ الف و ب نشان می‌دهند، SVC مبتنی بر TSC/TCR ($T_1 = 5/55ms$)، حتی اگر عرض باند به 35 هرتز ($T_1 = 35ms$) محدود شود، با نزدیک شدن امیدانس سیستم به حداکثر مقدار خود، ناپایدار خواهد شد (بهره در زاویه فاز 180° درجه مثبت می‌شود). برای پایداری قابل قبول، عرض باند SVC بایستی بیشتر کاهش یافته و به حدود 20 هرتز برسد. البته عرض باند کاهش یافته منجر به یک پاسخ کاهش یافته به اعوجاج‌های سیستم خواهد شد. اگر در کاربردی تغییرات وسیع امیدانس بروز نماید و پاسخ سریع مورد نیاز باشد، آن گاه SVC مبتنی بر TSC/TCR بایستی به یک تنظیم کننده خودکار بهره مجهز شود، به طوری که بهره تنظیم را یا براساس امیدانس سیستم غالب تغییر دهد یا با حس کردن روند نوسانی در کنترل.

۵-۳-۳ افزایش پایداری گذرا و میرایی نوسان توان

همان گونه که در بخش ۵-۱-۵ اثبات شد، افزایش پایداری گذرا و میرایی نوسانات توان نیاز به تغییر مناسب ولتاژ (ترمینال) خط انتقال دارد تا توان انتقال یافته را به نحوی کنترل کند که در مقابل شتاب گیری یا کاهش شتاب متداول ماشین (ها) واکنش نشان دهد.

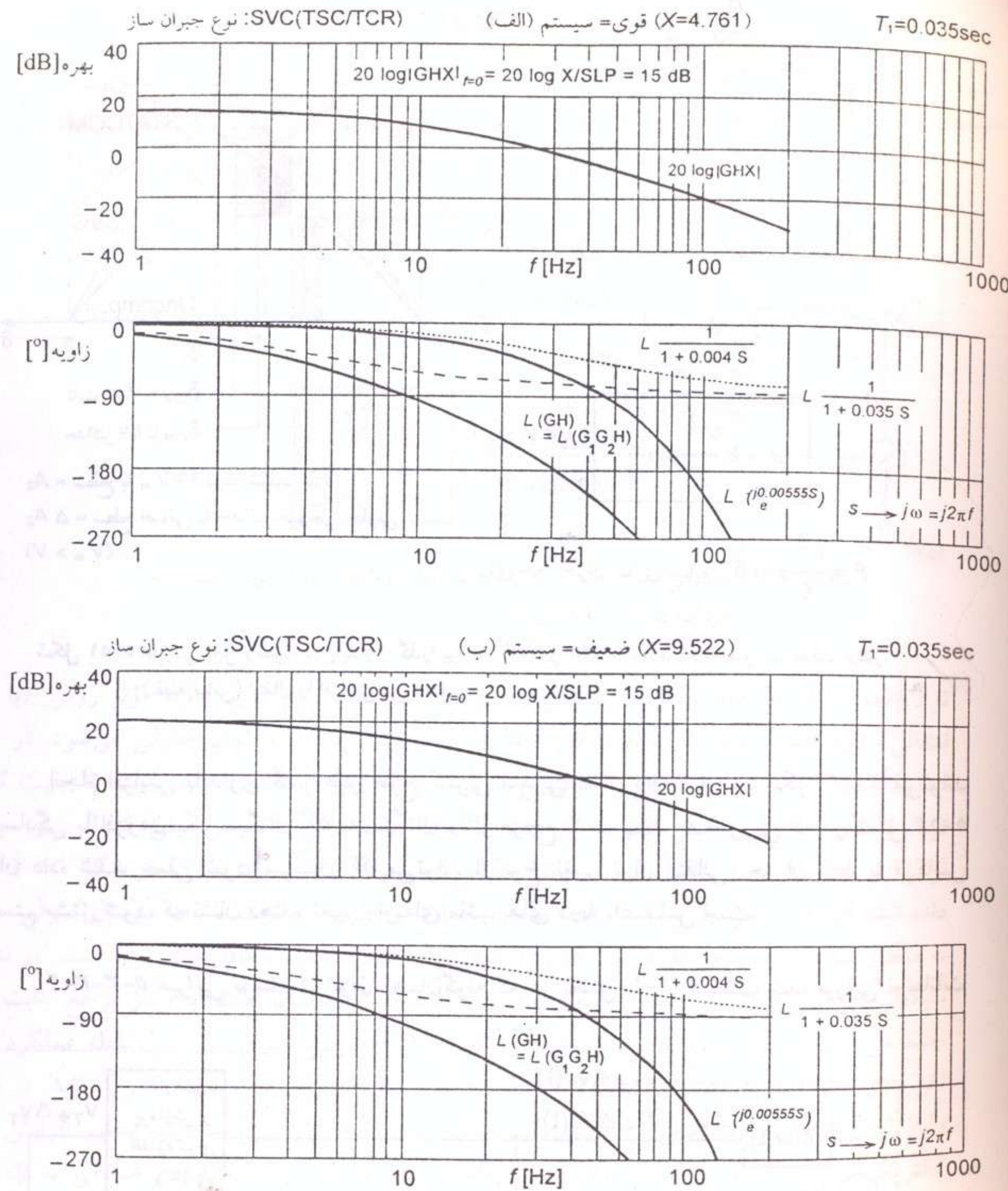
۵-۳-۳-۱ افزایش پایداری گذرا. پایداری گذرا نشان دهنده قابلیت بازیابی سیستم قدرت پس از یک اغتشاش عمده است. اغتشاش عمده، به عنوان مثال یک خطای شدید بر روی خطی که بار سنگینی دارد، می‌تواند منجر به کاهش پله‌ای بزرگی در توان الکتریکی انتقال یافته شود، در حالی که ژنراتورهای تغذیه کننده خط توان مکانیکی ورودی ثابتی دریافت می‌کنند. اختلاف بین ورودی مکانیکی و خروجی الکتریکی باعث شتاب گرفتن ماشین‌ها می‌شود. همان گونه که در بخش ۵-۱-۳ توضیح داده شد، پایداری گذرا در یک سطح توان داده شده و زمان برطرف کردن خطا، در اصل با مشخصه P در برابر δ سیستم بعد از رفع خطا، که انتقال توان الکتریکی و در نتیجه نرخ جذب انرژی از ماشین را کنترل می‌کند، تعیین می‌شود.

همان گونه که در آن بخش نشان داده شد، یک جبران ساز استاتیکی که به منظور تنظیم ولتاژ ترمینال کنترل می‌شود، می‌تواند پایداری گذرا را، با حفظ ولتاژ انتقال (در نقطه وسط یا یک نقطه میانی مناسب) در برابر سیلان افزایش یافته توان که بلافاصله پس از رفع خطا، به وجود می‌آید، افزایش دهد. در هر حال، پایداری گذرا می‌تواند با ارتقاء موقت ولتاژ به بالاتر از مرجع تنظیم، در دوره اولین شتاب گیری ماشین، بیشتر افزایش یابد. ولتاژ ارتقاء یافته به بیشتر از مقدار نامی خود، توان الکتریکی انتقال یافته را اضافه می‌کند و به این ترتیب کاهش یافتن شتاب ماشین نیز بیشتر می‌شود. این موضوع در شکل ۵-۵۱ نشان داده شده است، که در آن منحنی‌های P در برابر δ یک سیستم دو ماشین با جبران سازی نقاط میانی متفاوت، ارائه شده‌اند. منحنی‌ای که با $V_m = V$ علامت گذاری شده نمایش گر منحنی P در برابر δ به دست آمده برای یک جبران ساز ایده‌آل است که ولتاژ نقطه میانی را ثابت نگه می‌دارد (به شکل ۵-۱ نگاه کنید). منحنی‌هایی که با STATCOM و SVC نشان گذاری شده‌اند، نمایش گر این جبران سازها با مقدار نامی غیر کافی برای ثابت نگه داشتن ولتاژ نقطه میانی در کل محدوده δ هستند.



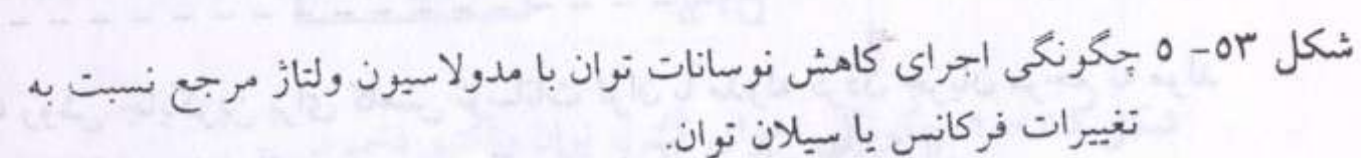
شکل ۵-۴۹ منحنی‌های Bode بهره و زاویه در برابر فرکانس که نشان دهنده تنظیم ولتاژ یک سیستم قوی - امپدانس کم (الف) و یک سیستم ضعیف - امپدانس زیاد (ب) توسط STATCOM است.

بنابراین، این منحنی‌های P در برابر δ ، تا یک مقدار معین δ ($\delta = \delta_i$) مشابه منحنی یک جبران‌ساز ایده‌آل هستند، که در آن مقدار δ ، SVC تبدیل به خازن ثابت و STATCOM تبدیل به یک منبع جریان ثابت می‌شوند. در فاصله بین δ_i و π ، منحنی‌های P در برابر δ مربوط به یک خازن ثابت نقطه میانی و یک منبع جریان راکتیو ثابت هستند. ادامه این منحنی‌ها در فاصله δ_i تا صفر نشان دهنده مشخصه P در برابر δ یک سیستم دو ماشین، با حداکثر ادمیتانس خازنی SVC و حداکثر جریان خروجی خازنی

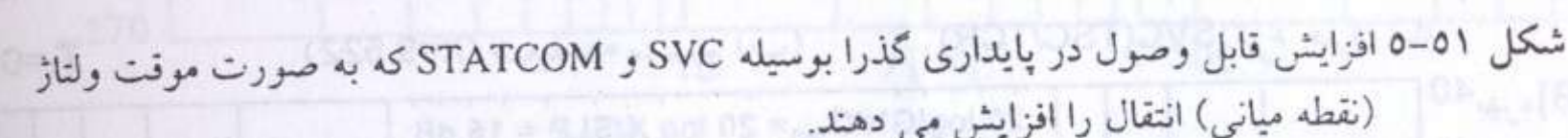


شکل ۵-۵۰ منحنی‌های Bode بهره و زاویه در برابر فرکانس که نشان دهنده تنظیم ولتاژ یک سیستم قوی - امپدانس کم (الف) و یک سیستم ضعیف - امپدانس زیاد (ب) توسط SVC است.

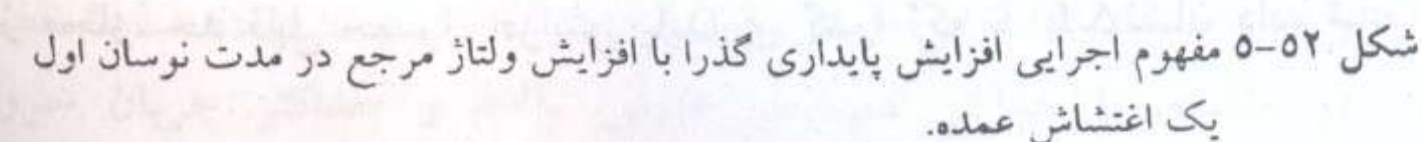
STATCOM است. یعنی این‌که در زوایای کوچکتر از δ_i ، خط انتقال به صورت اضافه جبران‌سازی شده است (و البته برای زوایای بزرگتر کمتر جبران‌سازی شده است). این قابلیت اضافه جبران‌سازی جبران‌ساز می‌تواند، با افزایش توان راکتیو خروجی به حداکثر مقدار پس از رفع خطا و به دنبال آن انطباق سطح انرژی شتاب دهنده (A_1) با سطح انرژی کاهنده شتاب (A_2) به وسیله یک کوچکتر، همان‌گونه که در شکل نشان داده شده، مورد استفاده قرار گیرد. بسته به اندازه نامی جبران‌ساز، و افزایش ولتاژ مجاز، حد قابل حصول افزایش پایداری گذرا (که با ΔA_1 نشان داده شده) می‌تواند قابل توجه باشد.

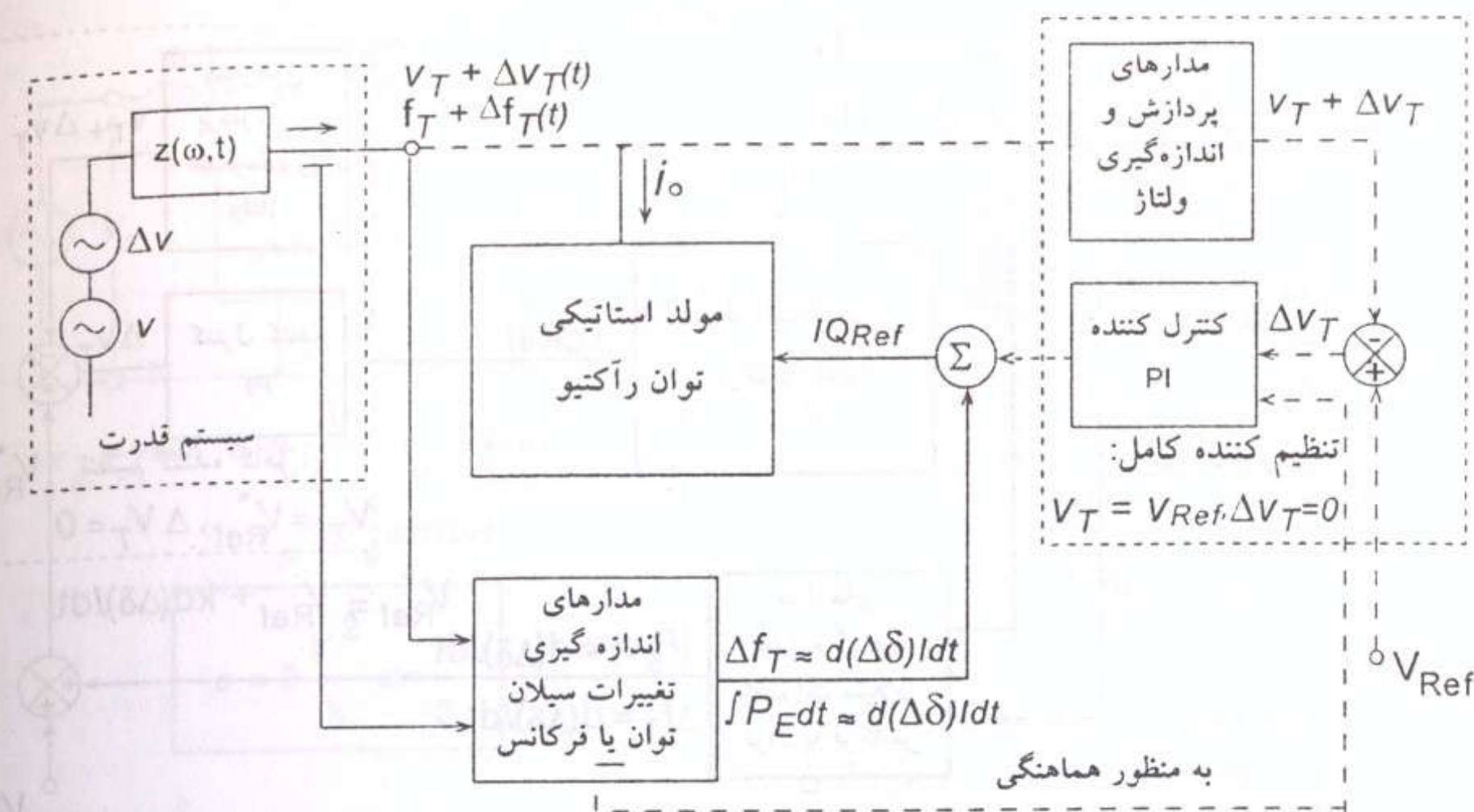


طرح کنترلی نشان داده شده در شکل ۵۴-۵، می‌تواند به صورت موفقیت آمیزی به منظور میرانمودن نوسانات زیرسنگرون - که در خطوط انتقال دارای جبران سازی خازنی، اتفاق می‌افتد -



۲-۳-۵- میرایی نوسانات توان. همان‌گونه که در بخش ۴-۱-۵ بحث شد، میرایی نوسانات





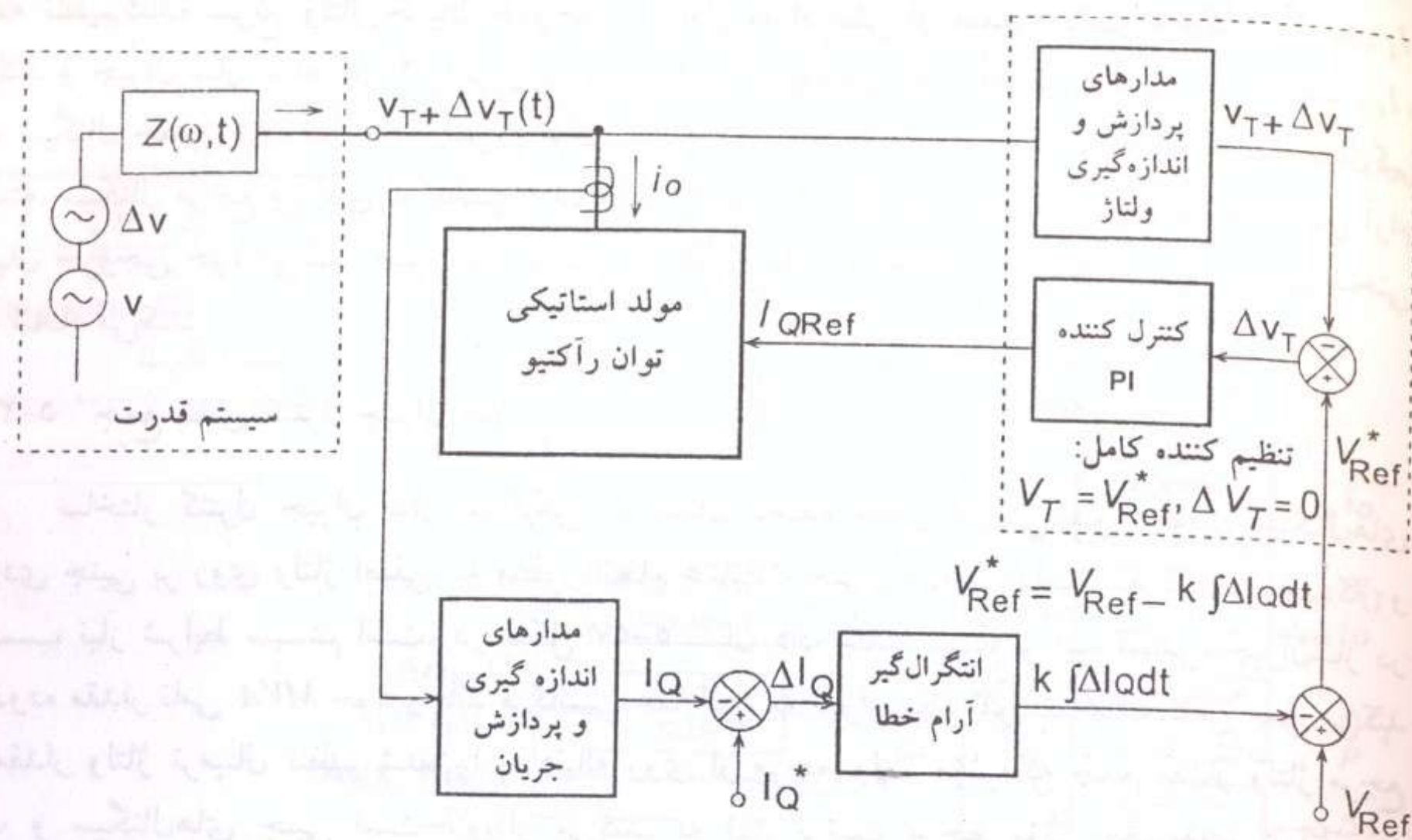
شکل ۵-۵۴ روش جایگزین برای کاهش نوسانات توان با مدوله کردن جریان مرجع به مولد استاتیکی توان رآکتیو، برحسب تغییرات فرکانس یا سیلان توان.

نیز به کار رود. فرکانس نوسانات زیر سنکرون به طور معمول به میزان چشمگیری بیشتر از فرکانس نوسانات عادی توان است. برای میرایی نوسانات زیر سنکرون، معمولاً سرعت زاویه‌ای ژنراتور، مستقیماً، با استفاده از مثلاً یک مبدل مغناطیسی چرخ دندانه‌دار که در محور روتور مستقر شده، اندازه‌گیری می‌شود.

۵-۳-۴ کنترل توان رآکتیو ذخیره (نقطه کار)

همان‌طور که از بخش‌های پیشین آشکار است، جبران ساز استاتیکی قابلیت عملی اداره کردن شرایط دینامیکی سیستم، مثل پایداری گذرا و میرایی نوسانات توان را به علاوه تأمین تنظیم ولتاژ، دارد. حتی در محدوده تنظیم ولتاژ، جبران ساز استاتیکی در درجه اول به عنوان یک منبع توان رآکتیو سریع برای مقابله با اغوجاج‌های تند و غیر منتظره ولتاژ در اثر خطاها، کلیدزنی خط و بار، خروج از مدار ژنراتور و غیره، نگریسته می‌شود. به منظور برآورده کردن نیازهای این کاربردها لازم است که، از کافی بودن ظرفیت توان رآکتیو جبران ساز برای اداره کردن اغتشاش‌های دینامیکی غیر قابل پیش بینی، اطمینان حاصل شود. این کار اغلب با یک کنترل خودکار که ذخیره از پیش تعیین شده توان رآکتیو را از طریق تنظیم "نقطه کار" جبران ساز حفظ می‌کند، به انجام می‌رسد.

هدف این کنترل محدود کردن خروجی توان رآکتیو حالت ماندگار جبران ساز در یک مقدار مرجع داده شده است. مفهوم اساسی این کار، اجازه دادن به جبران ساز برای تغییر سریع خروجی خود است تا در برابر اغتشاشات گذرا عکس العمل نشان دهد. به این ترتیب، هنگامی که یک اغتشاش منجر به یک نقطه کار جدید با یک خروجی توان رآکتیو ماندگار می‌شود، کنترل توان رآکتیو ذخیره، ولتاژ مرجع را به صورت مؤثری تغییر می‌دهد تا توان رآکتیو خروجی را به آرامی به مقدار مرجع از پیش تعیین شده برگرداند، و به این طریق منابع توان رآکتیو "آرام" (مثلاً خازن‌هایی که به صورت مکانیکی کلیدزنی می‌شوند) و دیگر وسایل جبران سازی (مثلاً تحریک ژنراتور) را فعال نماید تا بار توان رآکتیو حالت ماندگار را بردارند. زمان پاسخ این حلقه کنترلی آهسته است تا با تنظیم ولتاژ سریع یا هرگونه

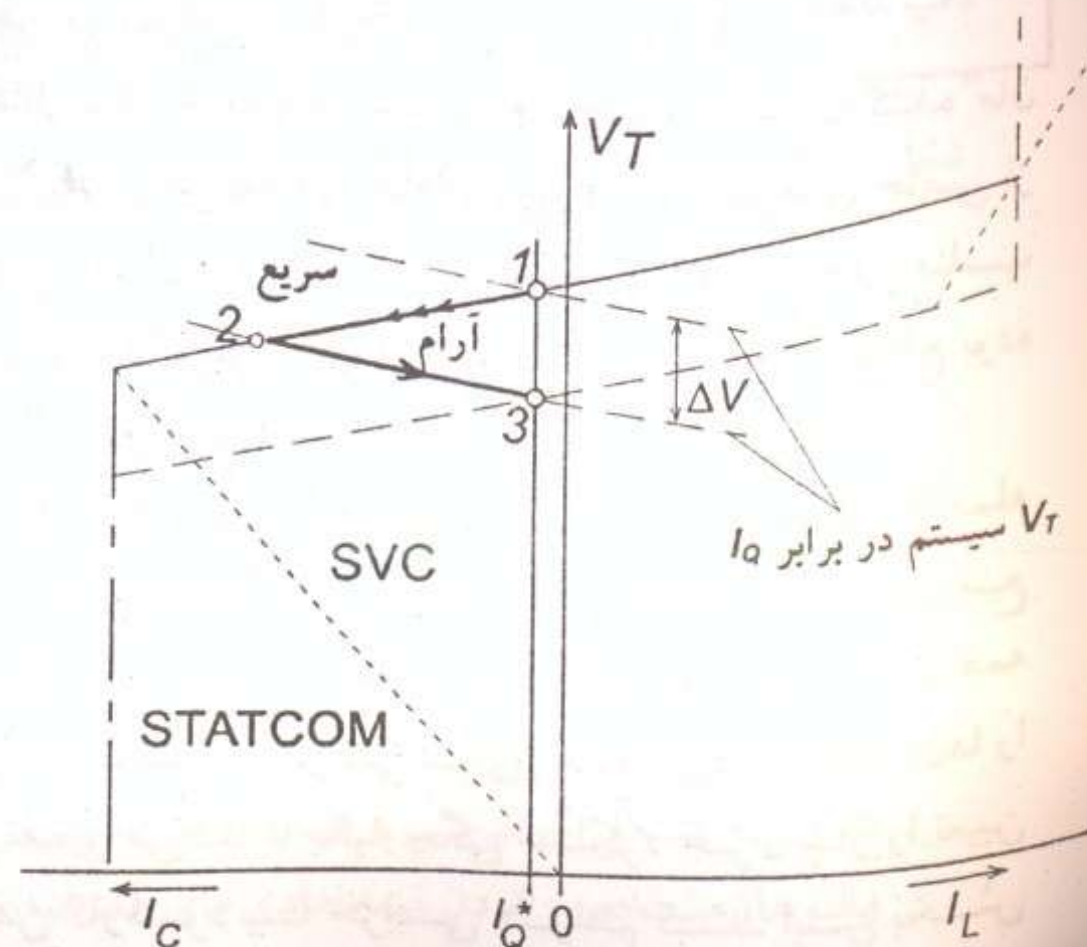


شکل ۵-۵۵ چگونگی اجرای کنترل توان رآکتیو ذخیره.

پایدارسازی سریع یا عملیات جنبی که ممکن است در کنترل توان رآکتیو خروجی وجود داشته باشد، تداخل نکند.

یک طرح مناسب برای اجرای اساسی کنترل توان رآکتیو ذخیره، در شکل ۵-۵۵ نشان داده شده است. مقدار جریان خروجی جبران ساز، اندازه‌گیری شده و با مرجع I_Q^* مقایسه می‌شود. سیگنال خطای ΔI_Q به وسیله یک مدار انتگرال گیر که ثابت زمانی بزرگی دارد پردازش شده و با ولتاژ مرجع ثابت V_{Ref} جمع می‌شود. سیگنال ورودی، تنظیم کننده ولتاژ را به تغییر وادی دارد تا این که اختلاف بین جریان خروجی واقعی جبران ساز و جریان خروجی حالت ماندگار مرجع I_Q^* مساوی شوند.

عملکرد کنترل کننده ساده توان رآکتیو ذخیره‌ای که شرح داده شد، در شکل ۵-۵۶ نشان داده شده است. فرض کنید که جبران ساز در نقطه $(I_Q = I_C)$ بر روی منحنی $V-I$ در حال کار باشد که، یک اغتشاش به صورت افت ناگهانی ΔV_T در دامنه ولتاژ ترمینال اتفاق بیفتد. تغییر ولتاژ ΔV_T از طریق



شکل ۵-۵۶ دیاگرام نمایش مفهوم کنترل ذخیره توان رآکتیو.

حلقه تنظیم‌کننده سریع ولتاژ جریان خروجی را وادار به افزایش از مقدار حالت ماندگار I_Q^* به I_{Cr} می‌کند و جبران‌ساز نقطه کار ۲ را بر روی منحنی $V-I$ اتخاذ می‌نماید. به این ترتیب، چون $I_{Cr} > I_Q^*$ یک سیگنال خطای ΔI_Q در حلقه کنترلی توان راکتیو ذخیره تولید می‌شود، که از طریق مدار انتگرال‌گیر آهسته، سیگنال مرجع ورودی به تنظیم‌کننده ولتاژ را تغییر می‌دهد و جبران‌ساز را وادار به کاهش آرام جریان خروجی خود می‌کند. جبران‌ساز نهایتاً یک حالت ماندگار جدید را در نقطه کار ۳ بر روی منحنی $V-I$ اتخاذ می‌کند.

۵-۳-۵ جمع بندی کنترل جبران ساز

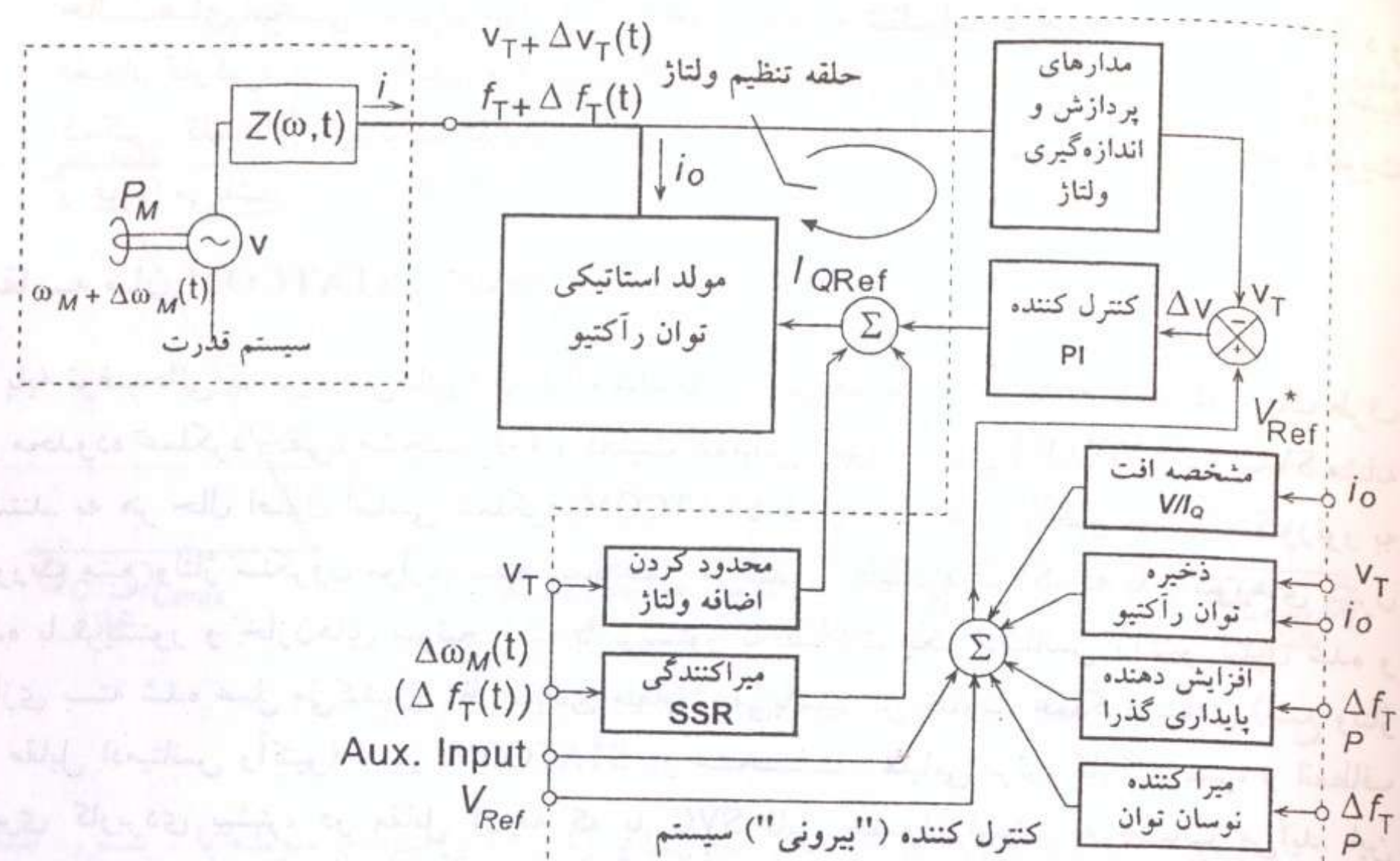
ساختار کنترل جبران‌ساز استاتیکی که نشان دهنده مبنای اساسی سوار کردن سیگنال‌های ورودی جنبی بر روی ولتاژ اصلی، به منظور انجام عملیات جبران‌سازی خاصی به صورت خودکار و برحسب نیاز شرایط سیستم است، در شکل ۵-۵۷ نشان داده شده است. بر این اساس، جبران‌ساز در محدوده مقدار نامی MVA خود و باند فرکانسی عملیاتی، به عنوان یک تقویت‌کننده کامل عمل می‌کند که مقدار ولتاژ ترمینال تنظیم شده را به دنباله روی از مرجع ولتاژ مؤثر-که جمع مقدار ولتاژ مرجع ثابت و سیگنال‌های جنبی است- وادار می‌کند. به این ترتیب مرجع مؤثر حالت‌های عملیاتی و مشخصه‌ها (مثل تنظیم ولتاژ و نقطه کار حالت ماندگار مربوطه و شیب تنظیم) و نیز عملکردهای مطلوب در برابر تغییرات دینامیکی متتجبی از متغیرهای سیستم (مثل افزایش پایداری گذرا و میرایی نوسانات) را تعریف می‌کند.

جدا از عملکرد کنترلی "زمان واقعی" که در شکل ۵-۵۷ نشان داده شده است، کل سیستم کنترل یک جبران‌ساز استاتیکی مدرن بسیاری ارکان دیگر برای مدیریت صحیح و ایمن تجهیزات با قابلیت اطمینان زیاد و دسترس پذیری و نیز فراهم کردن واسطه‌های صحیح با اپراتورهای محلی و دور را، به صورتی که در شکل ۵-۵۸ با واژه‌ها نشان داده شده، در اختیار دارد. ارکان اصلی این سیستم کنترلی یکپارچه جبران‌ساز شامل موارد زیر است:

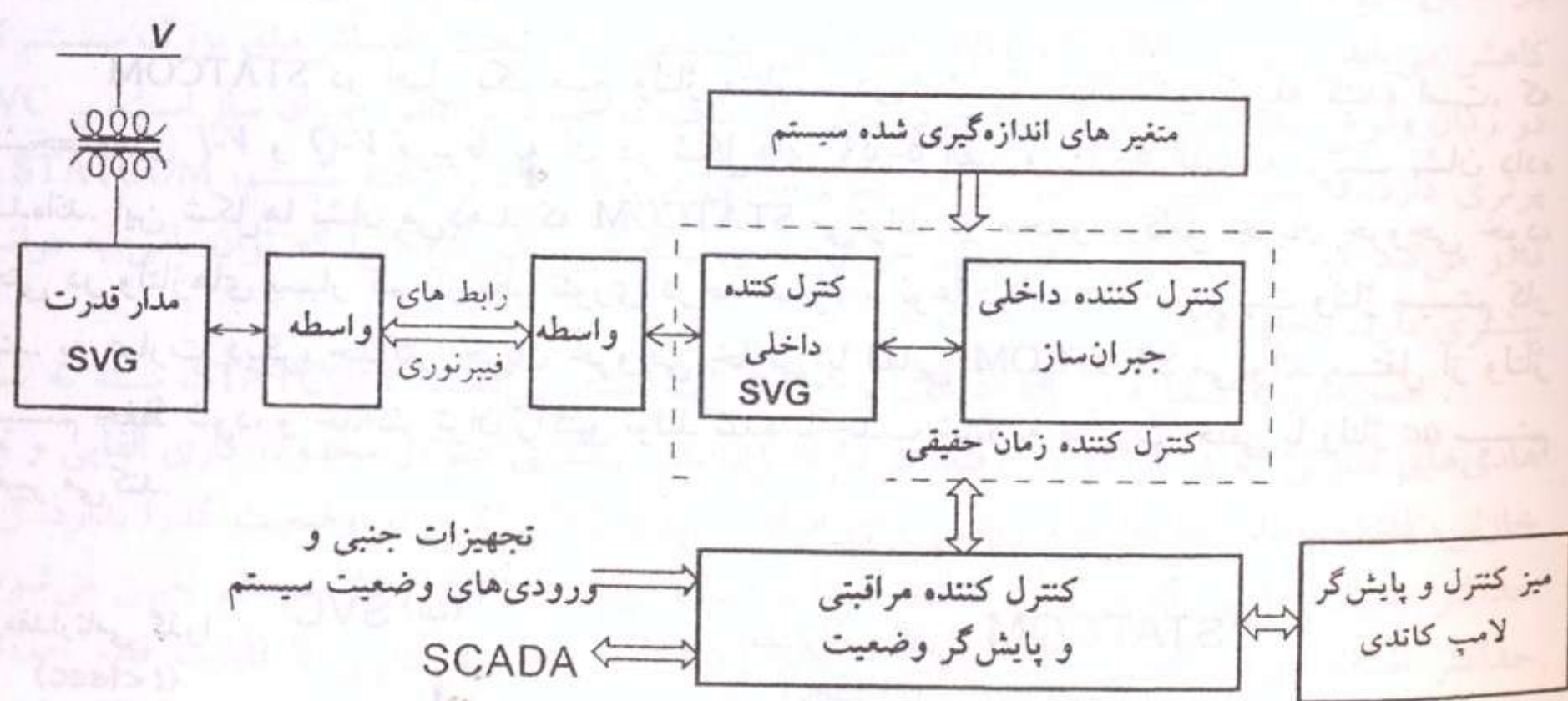
۱- واسطه بین والوهای نیمه هادی توان زیاد-ولتاژ زیاد در کنورتور کلیدزنی یکپارچه و/یا ساختار TSC و TCR، با کنترل‌کننده "زمان واقعی" بسیار پیچیده مورد نیاز جهت عملکرد داخلی مولد توان راکتیو و برای عملیات مطلوب جبران‌سازی سیستم. این واسطه، که فرامین عملکرد دریاچه‌ای را از کنترل‌کننده به والوها و اطلاعات وضعیت را از والوها به کنترل‌کننده انتقال می‌دهد، معمولاً با رابط‌های فیبر نوری اجرا می‌شود.

۲- مدارهای پردازش و اندازه‌گیری سیگنال برای متغیرهای سیستم و تجهیزات. کنترل‌کننده "زمان واقعی" و رله‌های حفاظتی (و نمایش‌گرهای اپراتور) به عنوان ورودی به متغیرهای خاصی از سیستم، مثل ولتاژ ترمینال، جریان خروجی جبران‌ساز و نیز جریان‌ها و ولتاژهای داخلی مناسب تجهیزات نیاز دارند، که از آن‌ها مقدار، فاز، فرکانس و دیگر اطلاعات مرتبط قابل استنتاج بوده تا در شرایط عملکرد سیستم "زمان واقعی" و تجهیزات پایش مورد استفاده قرار گیرند.

۳- بخش کنترل نظارتی و پایش وضعیت که دارای واسطه با تمام قسمت‌های جبران‌ساز، از جمله همه تجهیزات اساسی جبران‌ساز اصلی و تجهیزات پشتیبان (مثل، سیستم خنک‌کن، منبع تغذیه‌های توان، کلیدهای اتوماتیک، کلیدها، همبندها و غیره) است. اطلاعات وضعیت را از همه قسمت‌های سیستم، معمولاً از طریق پیوندهای مخابراتی سری، جمع‌آوری می‌کند؛ آن‌ها را سازماندهی کرده و داده‌های وضعیت را تفسیر می‌کند تا یکپارچگی عملکرد جبران‌ساز را تعیین و امکان تشخیص را در موارد نقص کارکرد یا خرابی فراهم کند. این بخش



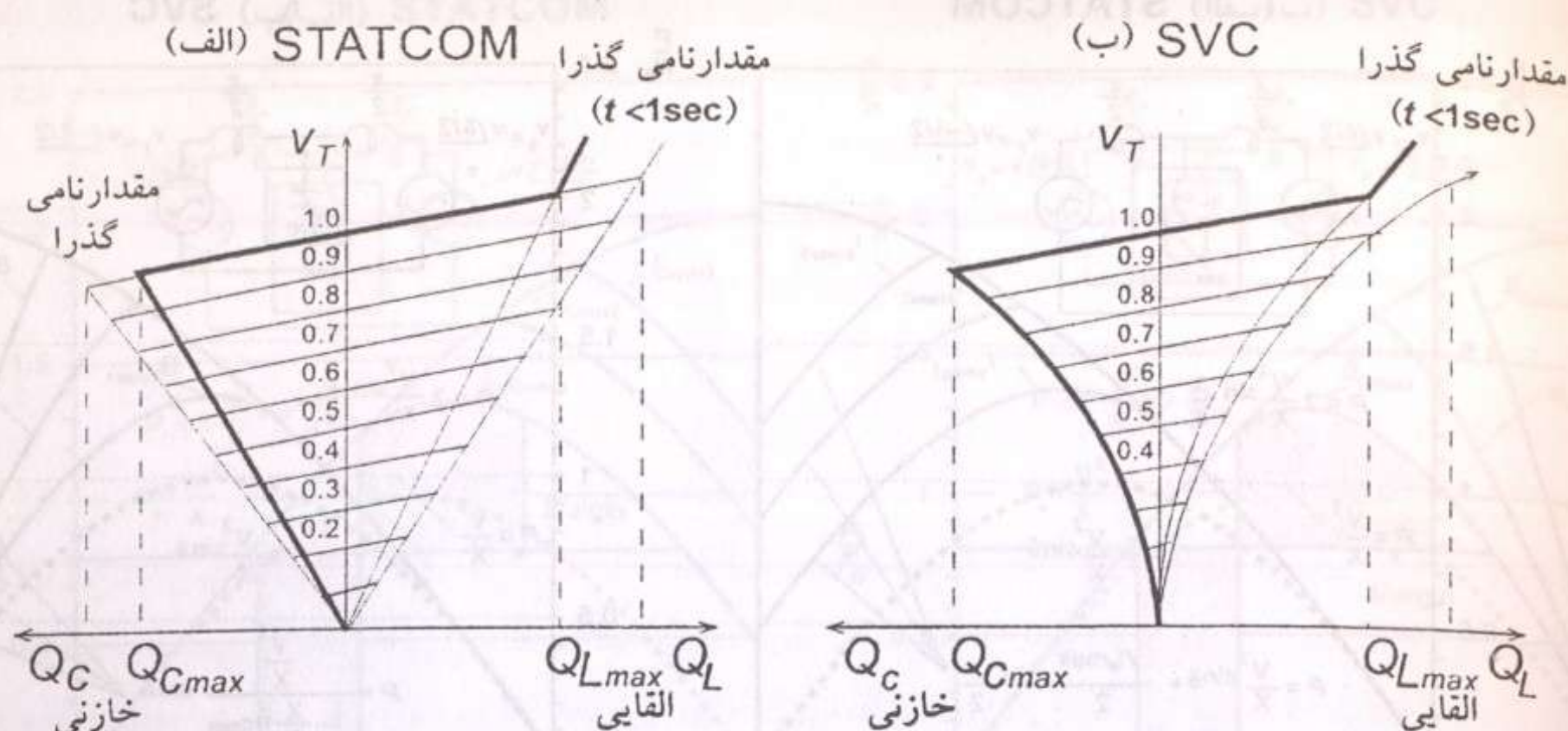
شکل ۵-۵۷ ساختار اساسی کنترل جبران‌ساز، در یک جبران‌ساز چند منظوره سیستم قدرت.



شکل ۵-۵۸ اجزای اصلی در یک سیستم کنترلی کامل که در یک جبران‌ساز استاتیکی کار می‌کند.

هم‌چنین توالی راه‌اندازی و قطع و سایر امور عملیاتی جبران‌ساز را عهده‌دار است و پیوندهای مخابراتی مناسب را برای اپراتورهای محلی و دور فراهم می‌کند.

۴- واسطه کاربر با نمایش‌گر CRT گرافیکی که معمولاً توسط یک کامپیوتر منفرد با مونیتر CRT مناسب، صفحه کلید، و دستگاه اشاره‌گر برای ورود اطلاعات، تأمین می‌شود. این کامپیوتر معمولاً دارای یک پیوند سری با پردازشگر وضعیت است و یک نرم افزار کنترلی با نمایش‌گر گرافیکی را اجرا می‌کند. از طریق واسطه حجم زیادی از اطلاعات برای مقاصد عملیات، تشخیص، و نگه‌داری به شکل گرافیکی و عددی در دسترس است. این اطلاعات شامل: اطلاعات وضعیت والوها، مشخص کردن نیمه هادی‌های قدرت خراب شده و دیگر تجهیزات و مدارهای مربوطه؛



شکل ۵-۶-۵ مشخصه $V-Q$ یک STATCOM (الف) و یک SVC (ب).

برعکس STATCOM، SVC که از خازن‌ها و راکتورهای سوئیچ شونده با ترستور، تشکیل شده، در خروجی کامل تبدیل به یک ادمیتانس خازنی ثابت می‌شود. بنابراین حداکثر جریان جبران سازی قابل حصول SVC به صورت خطی با ولتاژ ac سیستم کاهش می‌یابد، و همان‌گونه که به ترتیب در شکل‌های ۵-۵۹ ب و ۵-۶۰ ب نشان داده شده، حداکثر توان راکتور خروجی با مجذور این ولتاژ کاهش می‌یابد. بنابراین، STATCOM از نظر تأمین پشتیبانی ولتاژ تحت اغتشاش‌های بزرگ سیستم که در زمان وقوع آن‌ها تغییرات ولتاژ به خوبی خارج از محدوده عملکرد خطی جبران ساز است، بر SVC برتری دارد. قابلیت تأمین حداکثر جریان جبران سازی در ولتاژ کاهش یافته سیستم، STATCOM را قادر می‌کند که در انواع کاربردها همان جبران سازی دینامیکی یک SVC را که توان نامی به مراتب بیشتری دارد، انجام دهد.

همان‌طور که شکل‌های ۵-۵۹ الف و ۵-۶۰ الف نشان می‌دهند، STATCOM، بسته به نیمه هادی‌های قدرتی که در آن به کار رفته، می‌تواند توان نامی بیشتری هم در محدوده کاری القایی و هم خازنی، داشته باشد. (SVC هیچ روشی برای افزایش تولید توان راکتور در وضعیت گذرا ندارد، زیرا حداکثر جریان خازنی که می‌تواند بکشد دقیقاً با اندازه خازن و مقدار ولتاژ سیستم تعیین می‌شود). حداکثر اضافه جریان گذرای قابل حصول STATCOM در محدوده خازنی با قابلیت قطع حداکثر جریان نیمه هادی‌های قدرت (مثلاً ترستورهای GTO) مورد استفاده، تعیین می‌شود. همان‌گونه که در فصل ۳ نشان داده شد، در محدوده عملکرد القایی، نیمه هادی‌های قدرت یک کنورتور اولیه - که در فرکانس اصلی کلیدزنی شده - به طور طبیعی جابه‌جا می‌شوند. معنی این امر آن است که مقدار نامی جریان گذرای STATCOM در محدوده القایی، از نظر تئوری، فقط با حداکثر حرارت مجاز اتصال GTO محدود می‌شود، که در اصل اجازه می‌دهد تا مقدار نامی گذرای بالاتری در این محدوده، نسبت به آنچه که در محدوده خازنی قابل حصول است، به دست آید. به هر حال، بایستی اشاره شود که این امکان، هنگامی که هدایت جریان بین والوهای بالایی و پایینی در مدت هر نیم سیکل اصلی چندین بار جابجا می‌شود، در صورتی که کنورتور برای تولید موج مدوله شده عرض باند استفاده شود، معمولاً وجود نخواهد داشت. حتی در کنورتورهای غیر PWM (مدولاسیون عرض باند)، شرایط غیرعادی بایستی هنگام وقوع حالت‌های گذرا، در مقادیری بیش از قابلیت قطع پیک جریان نیمه هادی‌های

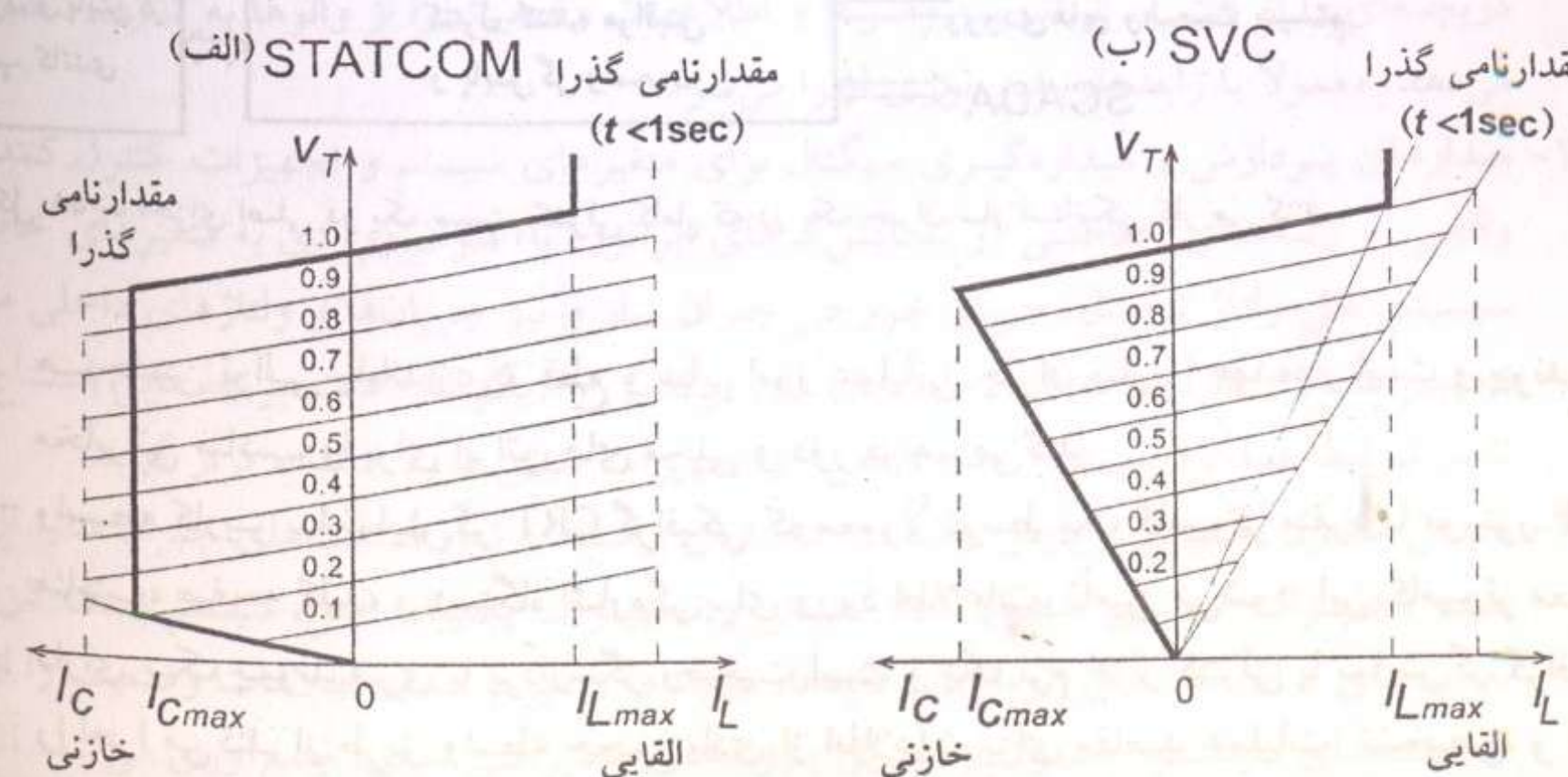
حالت‌های انتخابی جبران ساز و کنترل‌های ذریبط و تنظیمات پارامترهای عملیاتی؛ کارکرد و فقدان کارکرد کنترل کننده؛ و وضعیت تجهیزات پشتیبانی مثل سیستم خنک کننده، منابع تغذیه کمکی، کلیدهای اتوماتیک، کلیدها، و غیره، و وضعیت آب و هوایی ساختمان (حرارت، رطوبت و غیره) می‌باشد.

۵-۴-۱ مقایسه میان SVC و STATCOM

بر پایه توضیحاتی که در بخش‌های قبلی ارائه شد، بایستی بر خواننده روشن شده باشد که از یک طرف در محدوده عملکرد خطی، مشخصه $V-I$ و قابلیت عملیاتی جبران سازی STATCOM و SVC مشابه هستند. به هر حال اصول اساسی عملکرد STATCOM که با مولد توان راکتور مبتنی بر کنورتور به صورت منبع ولتاژ سنکرون موازی بسته شده عمل می‌کند، با عملکرد SVC، که با راکتورهای کنترل شده با ترستور و خازن‌های سوئیچ شده با ترستور به صورت یک ادمیتانس راکتور کنترل شده موازی بسته شده عمل می‌کند، از نظر بنیادی متفاوت می‌باشد. این تفاوت عملکرد بنیادی (منبع ولتاژ در مقابل ادمیتانس راکتور) امتیاز STATCOM در مشخصات عملیاتی برتر، کارکرد بهتر، و انعطاف پذیری کاربردی بیشتر، در مقابل آنچه که با SVC قابل حصول است، به حساب می‌آید. این مشخصه‌های عملیاتی و کارکردی با تأکید بر دلایل فیزیکی پشت سر آن‌ها، و مزایای کاربردی مربوطه، در این جا جمع بندی شده‌اند.

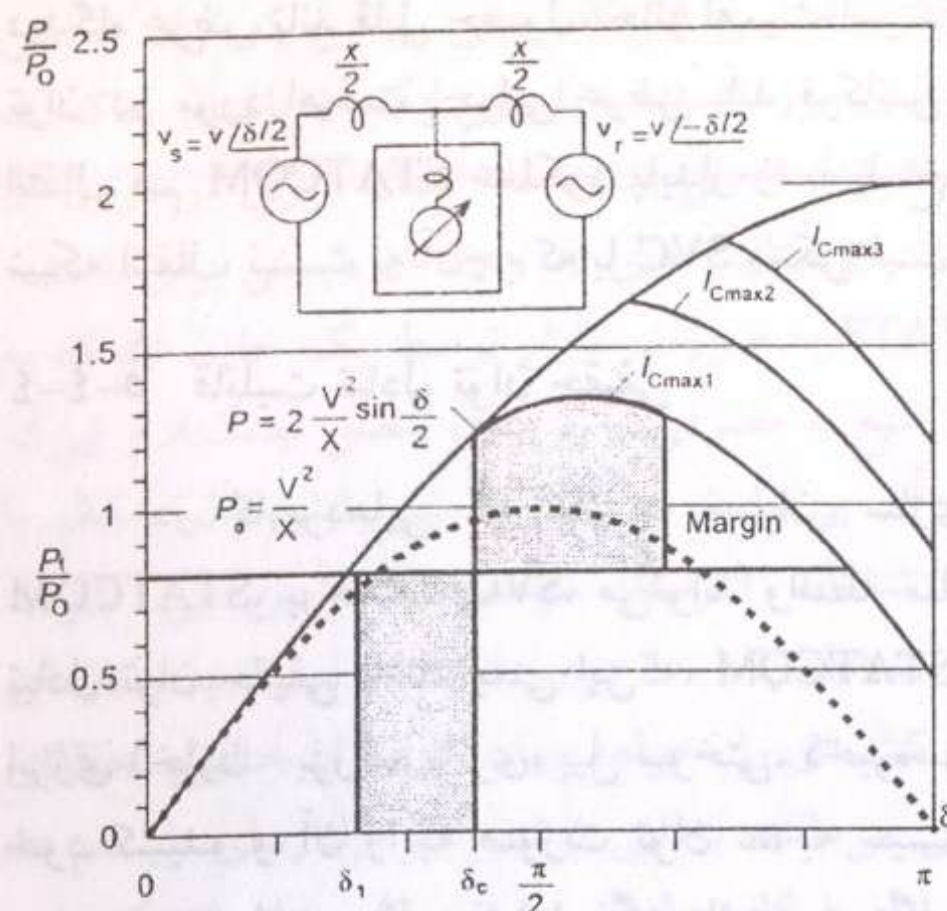
۵-۴-۱-۱ مشخصه‌های $V-I$ و $V-Q$

STATCOM در اصل یک منبع ولتاژ متناوب در پشت یک راکتانس کوپله کننده است، که مشخصه‌های $V-I$ و $V-Q$ مربوط به آن در شکل‌های ۵-۵۹ الف و ۵-۶۰ الف به ترتیب نشان داده شده‌اند. این شکل‌ها نشان می‌دهند که STATCOM می‌تواند در محدوده کامل جریان خروجی خود، حتی در ولتاژهای بسیار کم (از نظر تئوری در حد صفر) و نوعاً در حد 0.2 پریونیت ولتاژ سیستم کار کند. به عبارت دیگر، حداکثر جریان خروجی خازنی یا القایی STATCOM می‌تواند مستقل از ولتاژ سیستم حفظ شود، و حداکثر توان راکتور تولید شده یا جذب شده به صورت خطی با ولتاژ ac سیستم تغییر می‌کند.

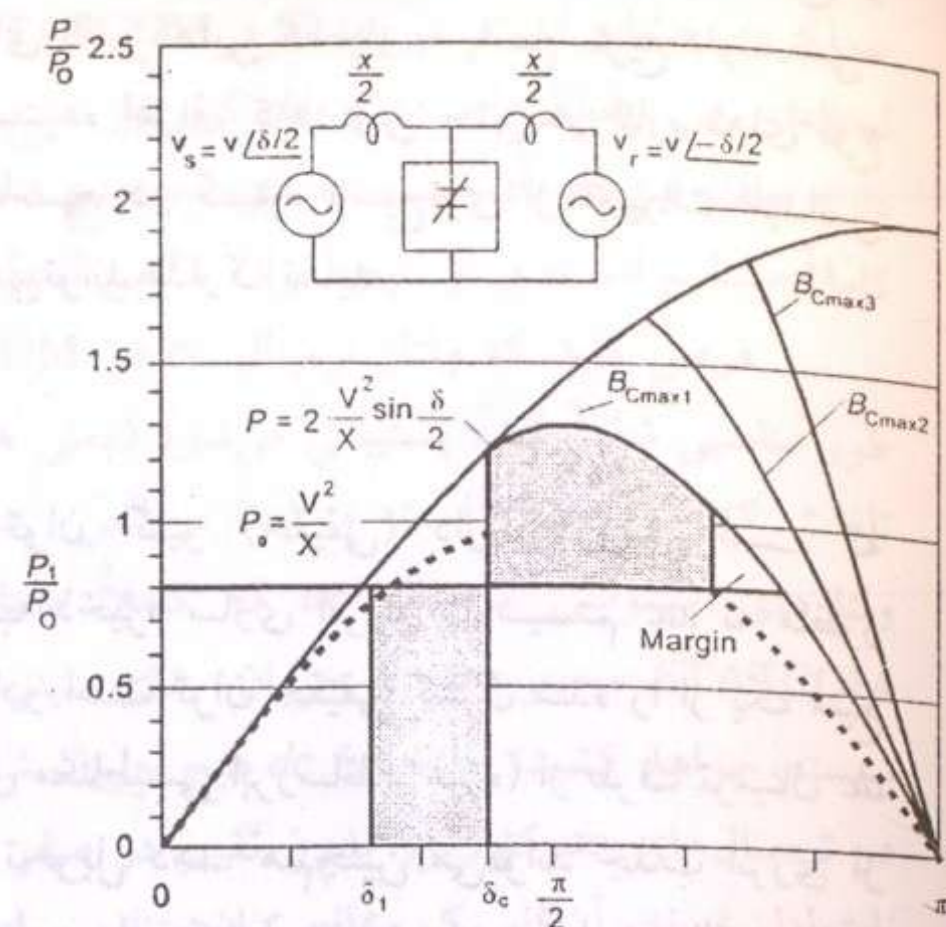


شکل ۵-۵۹-۵ مشخصه $V-I$ یک STATCOM (الف) و یک SVC (ب).

STATCOM (الف)



SVC (ب)



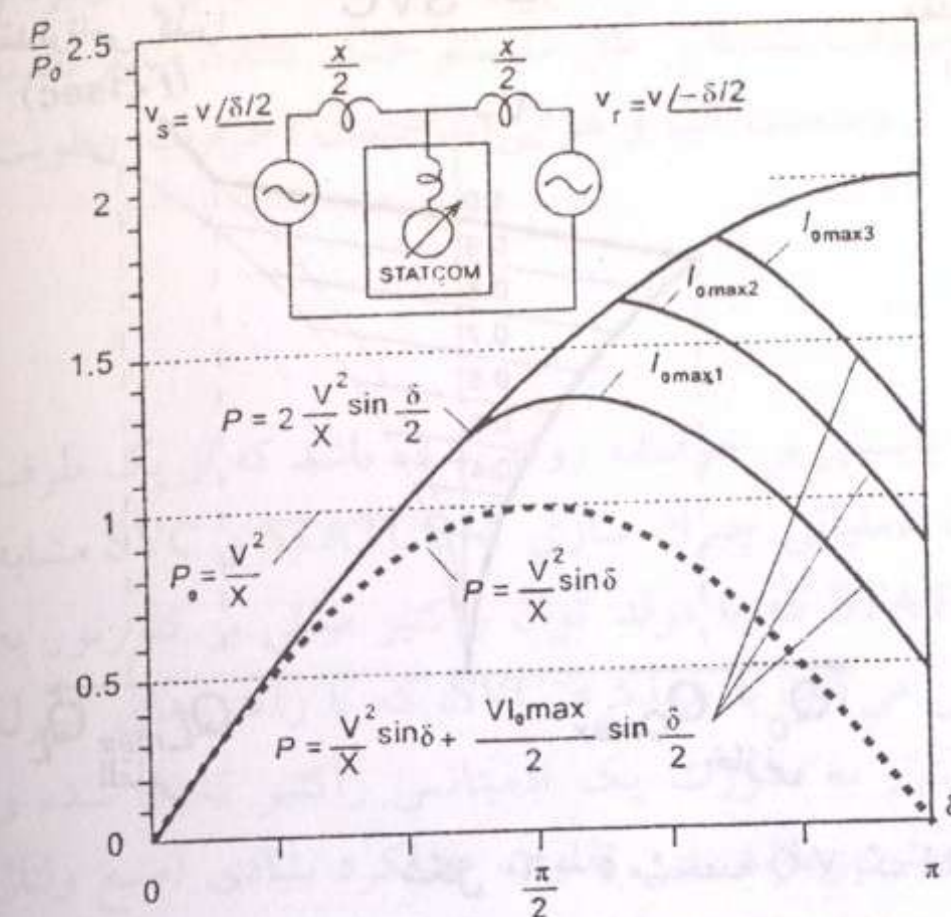
شکل ۵-۶۲ اصلاح پایداری گذرا که با استفاده از یک STATCOM (الف) و یا یک SVC (ب) در نقطه میانی و در یک مقدار توان راکتیو نامی داده شده به دست آمده است.

سیستم در حالی که توان الکتریکی حالت ماندگار P_1 را با زاویه δ_1 منتقل می‌کند، در معرض خطایی قرار می‌گیرد که در طول مدت آن P_1 به صفر می‌رسد. در طول دوره خطا، ماشین طرف تولیدکننده شتاب می‌گیرد (به دلیل توان ورودی مکانیکی ثابت)، و انرژی جنبشی - که با سطح سایه‌دار زیر خط ثابت P_1 نشان داده شده است - را جذب می‌کند، و δ_1 به δ_c افزایش می‌یابد ($\delta_c > \delta_1$). به این ترتیب هنگامی که سیستم اصلی پس از برطرف شدن خطا بازبازی می‌شود، توان انتقال یافته، به دلیل زاویه انتقال بزرگتر δ_c ، بسیار بیشتر از P_1 می‌شود. در نتیجه، ماشین طرف تولیدکننده شروع به کاهش شتاب می‌کند، اما δ بیشتر افزایش می‌یابد تا این که ماشین تمام انرژی جنبشی جذب کرده در مدت خطا را از دست بدهد. انرژی جنبشی باز یافتی، با سطح سایه دار بین منحنی P در برابر δ و خط ثابت توان P_1 نشان داده شده است. باقیمانده سطح غیر سایه دار زیر منحنی P در برابر δ و بالای خط ثابت توان P_1 ، تأمین کننده حد پایداری گذرا است. همان‌گونه که می‌توان مشاهده کرد، حد پایداری گذرای حاصل شده توسط STATCOM، به دلیل پشتیبانی بهتر از ولتاژ نقطه میانی، به میزان قابل توجهی بزرگتر از آن حدی است که با یک SVC دارای همان مقدار نامی توان راکتیو، قابل حصول است. البته مفهوم این امر آن است که توان قابل انتقال، اگر جبران سازی موازی با STATCOM انجام شود، بیشتر از وقتی است که SVC مورد استفاده قرار گیرد، یا در یک حد پایداری مشابه، توان نامی STATCOM می‌تواند کمتر از SVC باشد.

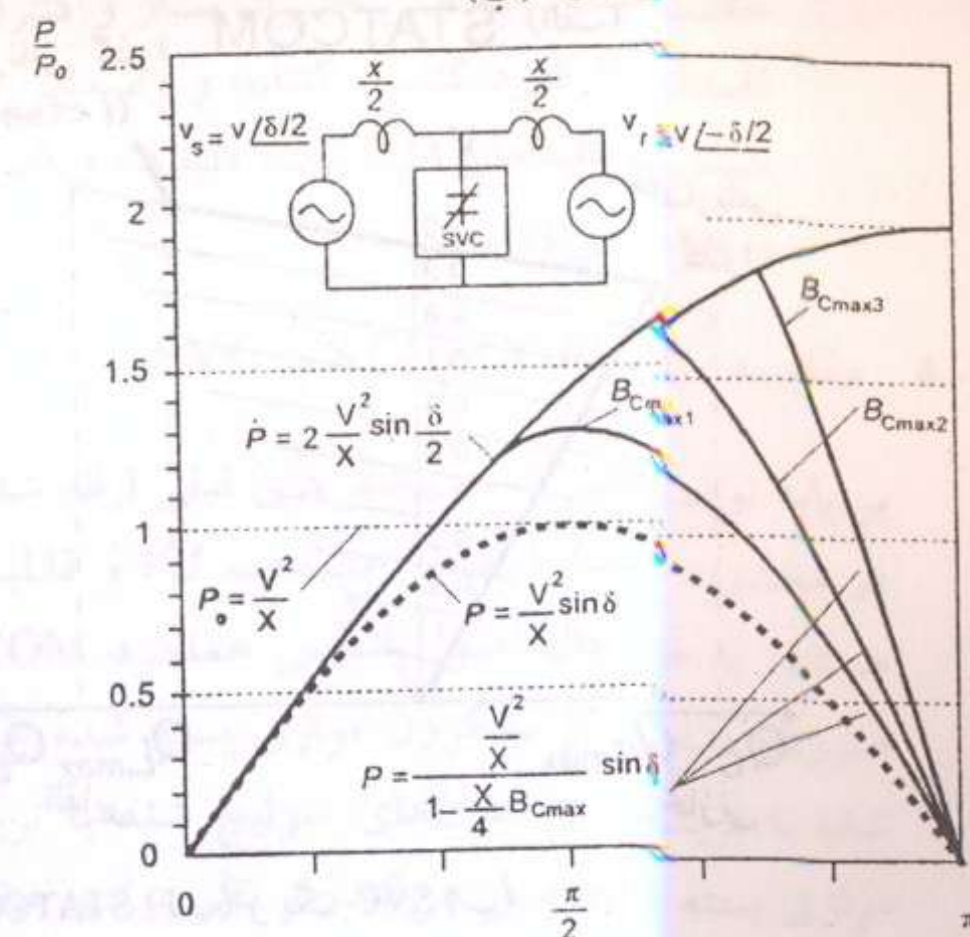
۵-۴-۳ زمان پاسخ

همان‌گونه که در بخش ۵-۳-۲ نشان داده شد، زمان پاسخ قابل حصول و عرض باند حلقه بسته تنظیم ولتاژ STATCOM نیز به میزان چشمگیری بهتر از مشخصه های SVC است. اگر چه حلقه بسته تنظیم ولتاژ هر دو جبران ساز می‌تواند با فرمول داده شده در رابطه (۵-۱۷) بیان شود: $\Delta V_T / \Delta V = 1 / (1 + G_T G_H X)$ (که شاخص ذاتی "تأخیر انتقال" در مدارهای قدرت STATCOM و SVC است) برای STATCOM تا چند برابر کمتر از SVC است؛ یعنی مقدار آن نوعاً کمتر از ۲۰۰ تا ۳۵۰ میکروثانیه برای STATCOM و بین ۲/۵ تا ۵ میلی ثانیه برای SVC

STATCOM (الف)



SVC (ب)



شکل ۵-۶۱ توان انتقال یافته در برابر زاویه انتقال یک سیستم دو ماشینه با نقطه میانی مجهز به STATCOM (الف) و SVC (ب) که در توان های نامی متفاوتی به دست آمده اند.

استفاده شده، به دقت مورد توجه قرار گیرد؛ زیرا اگر به هر دلیل یک جابه‌جایی طبیعی مورد انتظار از دست برود، احتمال از کار انداختن اجباری کنورتور دچار نقص شده وجود خواهد داشت.

۵-۴-۲ پایداری گذرا

توانایی STATCOM در حفظ جریان خروجی کامل خازنی در ولتاژهای کم سیستم نیز، آن را ثمر بخش تر از SVC در اصلاح پایداری گذرا (نوسان اول) می‌نماید. مؤثر بودن STATCOM در افزایش توان قابل انتقال در شکل ۵-۶۱ الف نشان داده شده، که در آن توان انتقال یافته P در برابر زاویه انتقال δ برای مدل معمول دو ماشینه، در مقادیر نامی خازنی مختلف، که با حداکثر جریان خروجی خازنی I_{Cmax} مشخص شده، آمده است. رابطه معادل P در برابر δ برای SVC، به منظور مقایسه در شکل ۵-۶۱ ب نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که STATCOM، درست مانند SVC، تا رسیدن به حداکثر جریان خروجی خازن I_{Cmax} شبیه به یک جبران ساز موازی نقطه میانی ایده آل با رابطه P در برابر δ همانند رابطه (۵-۲): $P = (2V^2 / X) \sin(\delta/2)$ ، رفتار می‌کند. از این نقطه به بعد، STATCOM مستقل از افزایش بیشتر زاویه δ و تغییر ولتاژ نقطه میانی ناشی از آن، (برخلاف SVC که به صورت ادمیتانس خازنی ثابت عمل می‌کند) به تأمین این جریان خروجی خازنی حداکثر ادامه می‌دهد. در نتیجه، از کاهش سریع توان انتقال یافته P در ناحیه $\pi/2 < \delta < \pi$ ، که مشخصه انتقال توان سیستم جبران‌سازی SVC است، اجتناب شده و محدوده قابل حصول $\int P d\delta$ که نمایانگر اصلاح در حد پایداری است، به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.

افزایش حد پایداری قابل حصول در STATCOM نسبت به یک SVC که دارای همان مقدار نامی باشد، به روشنی با استفاده از معیارهای "سطح معادل" (بخش ۵-۱-۳)، در شکل‌های ۵-۶۲ الف و ب نشان داده شده است. سیستم ساده دو ماشینه‌ای که در بررسی اصول اولیه جبران سازی موازی (شکل ۵-۱ الف) مورد بحث قرار گرفت، در نقطه وسط توسط یک STATCOM و یک SVC با مقادیر نامی توان راکتیو یکسان، جبران سازی شده است. به منظور شفافیت، فرض شده است که

است. با در نظر گرفتن مشخصه تغییرات سریع زاویه در برابر فرکانس در عبارت $e^{-T_d s}$ ، این اصلاح از دیدگاه عرض باند قابل حصول، حائز اهمیت است. برای کاربردهایی که نیاز به پاسخ سریع دارند نمی‌توان در مورد اهمیت اجرایی عرض باند فرکانس گسترده اغراق کرد؛ ولی حتی در کاربردهای نوع انتقال هم STATCOM عملکرد پایدار را با پاسخ مناسب، در گستره وسیع‌تری از تغییرات امپدانس شبکه انتقال، نسبت به آنچه که با SVC ممکن است، می‌تواند تدارک نماید.

۵-۴-۴ قابلیت تبادل توان حقیقی

در کاربردهایی که نیاز به جبران سازی توان اکتیو (حقیقی) دارند، روشن است که STATCOM، برخلاف SVC، می‌تواند واسطه مناسب ذخیره سازی انرژی با سیستم ac ، به منظور تبادل توان حقیقی باشد. یعنی این‌که، STATCOM قادر است توان حقیقی کنترل شده را از یک منبع انرژی (خازن بزرگ، باتری، پیل سوختی، ذخیره‌سازی مغناطیسی ابرسانا و غیره) از طرف ترمینال dc خود کشیده و آن را به صورت توان ac به سیستم تحویل دهد. هم‌چنین می‌تواند جذب انرژی از سیستم ac را به منظور شارژ نگه داشتن دستگاه ذخیره‌ساز، کنترل نماید. این قابلیت بالقوه، ابزار جدیدی را برای بهبود جبران‌سازی دینامیکی، اصلاح بازدهی سیستم قدرت و عملاً جلوگیری از قطع توان، فراهم می‌کند.

تبادل توان حقیقی و راکتیو بین STATCOM و سیستم ac می‌تواند مستقل از یکدیگر کنترل شود، و هر ترکیبی از تولید و جذب توان حقیقی و تولید و جذب توان راکتیو قابل وصول است. بنابراین، با تجهیز STATCOM به یک دستگاه ذخیره ساز انرژی با ظرفیت مناسب، راهبردهای فوق‌العاده مؤثر کنترلی برای مدولاسیون توان خروجی حقیقی و راکتیو، به منظور اصلاح پایداری گذرا و میرایی نوسان توان، می‌تواند به مورد اجرا گذاشته شود. باید توجه کرد که برای اغتشاش‌های دینامیکی کوتاه مدت، یک دستگاه مصرف کننده انرژی (مثل یک مقاومت سوئیچ شونده) می‌تواند به صورت مؤثرتری به جای دستگاه گران‌قیمت‌تر ذخیره‌ساز انرژی، همراه با STATCOM به منظور جذب توان از سیستم ac به کار رود. با این طرح ساده، STATCOM انرژی را از سیستم ac به ترمینال‌های dc منتقل خواهد کرد و در آن‌جا، هر گاه مقدار انرژی اضافه شناسایی شود (مثلاً با افزایش ولتاژ dc) توسط دستگاه مصرف کننده انرژی که به داخل مدار سوئیچ می‌شود، تلف خواهد شد.

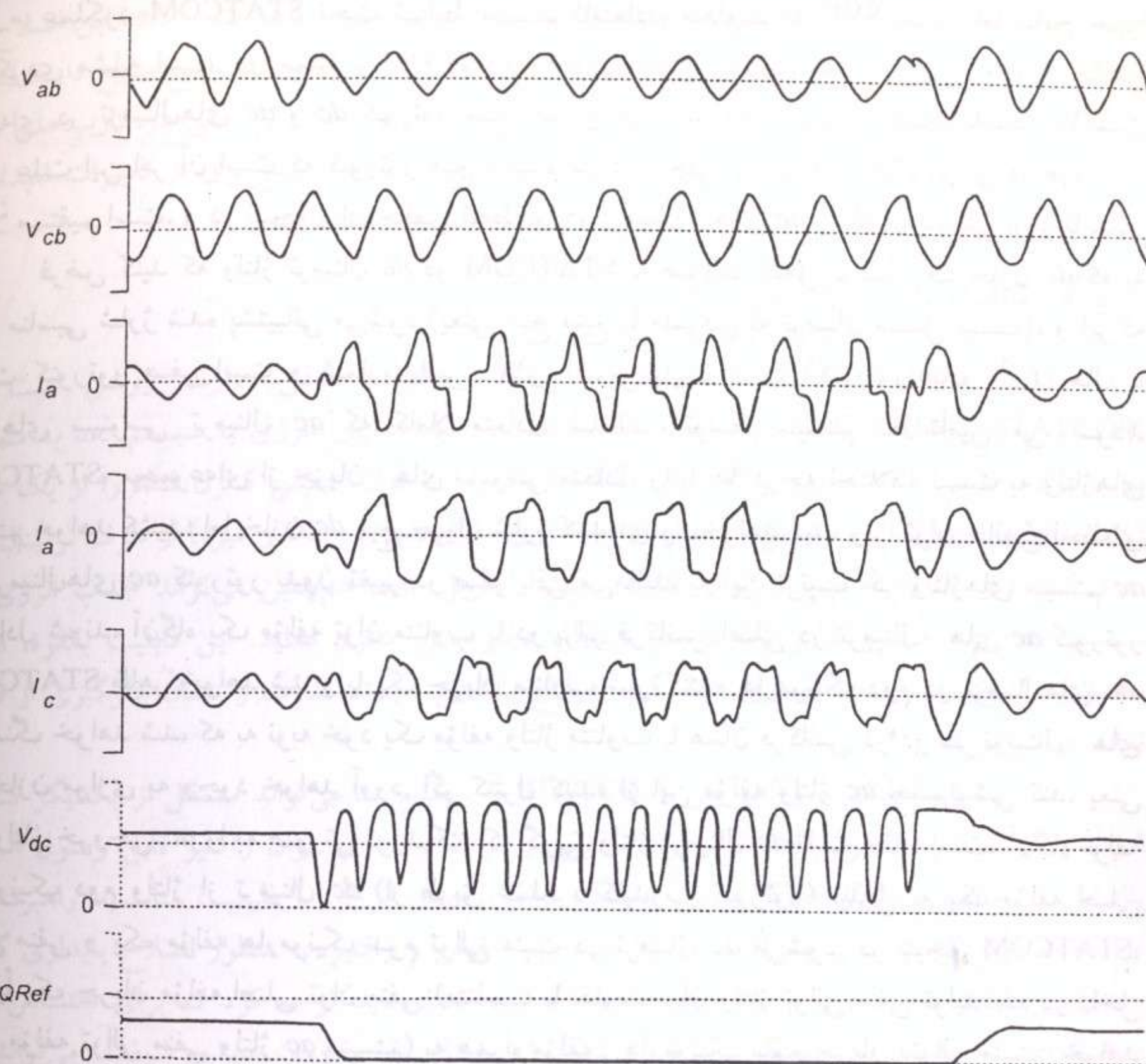
۵-۴-۵ کار با سیستم ac نامتعادل

ولتاژهای سیستم ac به طور معمول متعادل هستند (حداکثر عدم تعادل معمولاً از ۱ درصد تجاوز نمی‌کند) بنابراین جبران‌سازها در شرایط عادی هر سه فاز را، از نظر جریان خروجی، یکجا کنترل می‌کنند. برای SVC معنی این سخن آن است که کنترل کننده آن سه ادیمیتانس موازی مشابه برای سه فاز ایجاد می‌کند. در نتیجه، با ولتاژهای نامتعادل سیستم، جریان‌های جبران سازی در هر فاز متفاوت خواهد بود. می‌توان سه ادیمیتانس جبران‌سازی را با تنظیم زاویه تأخیر TCRها به صورت منفرد کنترل کرد، به صورتی که سه جریان جبران‌سازی یکسان شوند. به این ترتیب، در چنین حالتی محتوای هارمونیک ضریب n در هر فاز متفاوت خواهد بود و حذف عادی آن‌ها از طریق اتصال مثلث صورت نخواهد گرفت. این حالت عملکرد، بنابراین نصب فیلترهای هارمونیک‌های سوم را که معمولاً ضرورتی ندارند، الزامی خواهد کرد. به این دلیل، کنترل فاز SVC ها به صورت منفرد در جبران‌سازی خطوط انتقال به ندرت مورد استفاده قرار می‌گیرد.

عملکرد STATCOM تحت شرایط سیستم نامتعادل متفاوت با SVC است، اما نتایج چنین عملکردی مشابه است. در عملکرد STATCOM قانون اساسی فیزیک، مبنی بر این که توان خالص لحظه‌ای در ترمینال‌های ac و dc کنورتور منبع ولتاژی مورد استفاده بایستی یکسان باشند، حاکمیت دارد. علت این امر آن است که کنورتور هیچ ذخیره انرژی داخلی ندارد، لذا انتقال انرژی در درون آن کاملاً مستقیم است، و در نتیجه توان خالص لحظه‌ای در ترمینال های ac و dc آن بایستی برابر باشند. فرض کنید که ولتاژ ترمینال dc در STATCOM به صورت کامل توسط یک خازن dc که به طور مناسبی شارژ شده پشتیبانی می‌شود (یعنی هیچ منبع یا مصرفی به ترمینال متصل نیست)، و این‌که تلفات کنورتور صفر است و شماره پالس های آن بی‌نهایت است (کنورتور ایده آل). حال با ولتاژهای سینوسی ترمینال ac که کاملاً متعادل شده‌اند (توسط سیستم ac تأمین می‌شود)، STATCOM مجموعه‌ای از جریان های سینوسی متعادل را با ۹۰ درجه اختلاف نسبت به ولتاژهای سیستم خواهد کشید؛ اما خازن dc هیچ جریان شارژ کننده‌ای را نخواهد دید، زیرا توان خالص لحظه‌ای در ترمینال‌های ac کنورتور بدون تغییر در صفر باقی می‌ماند. به این ترتیب اگر ولتاژهای سیستم ac نامتعادل شوند، آن‌گاه یک مؤلفه توان متناوب با دو برابر فرکانس اصلی در ترمینال های ac کنورتور STATCOM ظاهر خواهد شد و با یک جریان متناوب شارژکننده هارمونیک دوم در ترمینال‌های dc ، هماهنگ خواهد شد، که به نوبه خود یک مؤلفه ولتاژ متناوب با همان فرکانس در دو سر ترمینال های dc خازن موازی به وجود خواهد آورد. اگر کنترل کننده از این مؤلفه ولتاژ ac چشم‌پوشی کند، یعنی اگر ولتاژ خروجی ac را به صورتی تولید کند که گویی ولتاژ ترمینال dc ثابت مانده است، آن‌گاه مؤلفه هارمونیک دوم ولتاژ از ترمینال dc (از طریق عملکرد کلیدزنی کنورتور) تبدیل به یک مؤلفه اصلی توالی منفی و یک مؤلفه هارمونیک سوم توالی مثبت در ترمینال ac می‌شود. در نتیجه، STATCOM، عموماً یک جریان مؤلفه اصلی توان منفی (متناسب با تفاوت میان ولتاژ توالی منفی تولیدشده در داخل آن و مؤلفه توالی منفی ولتاژ ac سیستم) به همراه مؤلفه هارمونیک سوم جریان (توالی مثبت) خواهد کشید.

از میان دو مؤلفه ولتاژ تولید شده در خروجی STATCOM، که ناشی از نامتعادلی سیستم است، هارمونیک سوم آشکارا "ناخواسته" است. هنگامی که مؤلفه ولتاژ توالی منفی، که به صورت "طبیعی" به وسیله کنورتور و با انتخاب خازن مناسب dc تولید می‌شود، به میزان چشمگیری جریان توالی منفی را کاهش می‌دهد، یعنی جریانی را که در غیر این صورت به وسیله ولتاژ توالی منفی سیستم، (که در خطاهای تک فاز می‌تواند بسیار بزرگ باشد) به سیلان وادار می‌شد، هارمونیک سوم به روشنی هیچ کارکرد مفیدی ندارد.

رفتار "طبیعی" STATCOM در شکل ۶۳-۵ نشان داده شده، و در آن، شکل موج‌های ولتاژ و جریان ثبت شده یک سیستم قدرت از یک تحلیل‌گر حالات گذرای شبکه (TNA) که در آن یک STATCOM چهار و هشت پالسه مدل شده و در معرض یک خطای شدید فاز به زمین قرار گرفته، آورده شده است. بررسی‌های انجام شده در شکل (از بالا به پایین) موارد زیر را نشان می‌دهد: ولتاژهای فاز به فاز v_{ab} و v_{cb} (فاز a دچار خطای فاز به زمین شده)؛ سه جریان i_a و i_b و i_c که به وسیله STATCOM کشیده می‌شوند؛ ولتاژ خازن dc ، v_{dc} ؛ و جریان راکتیو مرجع I_{QRef} (به ۲ واحد محدود شده). STATCOM در حالت ماندگار، هنگامی که برای حدوداً پنج سیکل در معرض یک خطای فاز به زمین قرار می‌گیرد، $p.u.$ جریان خازنی تولید می‌کند. می‌توان مشاهده کرد که، به دلیل ولتاژ توالی منفی تولید شده در داخل کنورتور (که به میزان زیادی با ولتاژ توالی منفی سیستم نامتعادل هماهنگی دارد)، STATCOM در دوره خطا، به میزان قابل توجهی جریان‌های جبران سازی متعادل خازنی با



شکل ۶۳ - ۵ شکل موج های نشان دهنده عملکرد STATCOM (بدون کنترل ولتاژ فاز جداگانه) در طول مدت و پس از یک خطای فاز به زمین در شینه تنظیم شده.

حداکثر مقدار $2p.u.$ تولید می‌کند، اما این جریان حاوی مقدار معتنابهی اعوجاج‌های هارمونیک سوم است. به این ترتیب، هارمونیک‌ها که فقط در دوره پنج سیکل خطا حضور دارند، فاقد نتایج قابل بحث مهمی هستند (زیرا، احتمالاً در این شرایط اعوجاج‌های مهم‌تری، توسط اجزاء استاتیکی و چرخان الکترومغناطیسی موجود دیگر، در سیستم تولید شده است). از طرف دیگر، STATCOM، به شهادت جبران سازی خازنی به دست آمده در شکل، می‌تواند سیستم پشتیبانی مستحکمی در دوره خطا، تأمین کند. این امر، به همراه پاسخ سریع STATCOM در برطرف کردن خطا، می‌تواند سهم مهمی در پایداری سیستم داشته باشد. (بایستی توجه شود که، بنابر دلایل اقتصادی، حد اضافه جریان STATCOM در عمل معمولاً پایین تر از دو پریونیتی تنظیم می‌شود که در این شکل مثال زده شد).

رفتار طبیعی STATCOM که در بالا توصیف شد، مربوط به حالت کارکردی است که در آن سه ولتاژ خروجی با هم کنترل می‌شوند؛ یعنی این‌که، کنترل تک فاز ولتاژ مورد استفاده قرار نگرفته است. این حالت کارکرد، بهترین بهره‌برداری V_A از کنورتور و معمولاً کمترین تولید هارمونیک قابل وصول در سیستم عادی با یک روش ترکیب موج داده شده را، ایجاد می‌کند. به این ترتیب، در کاربردهای خاص که نامتعادلی قابل توجه سیستم وجود دارد، یا جایی که بارهای بزرگ نامتعادل وجود دارند که بایستی جبران سازی صورت پذیرد، کنورتور STATCOM با ساختار قطب و روش ترکیب

موج مناسب، می‌تواند به منظور کنترل هر یک از فازهای خروجی به صورت منفرد عمل کند؛ بدین معنی که جریان‌های جبران سازی توالی مثبت و منفی، مستقلاً کنترل شوند. به هر حال، این نوع عملکرد معمولاً با مقداری نوسانات توان ac همراه است، لذا نیاز به خازن dc بزرگتری، نسبت به آنچه که معمولاً در STATCOM سیستم انتقال مورد استفاده قرار می‌گیرد دارد، تا با جریان ریبیل هارمونیک دوم حاصل شده در ترمینال‌های dc ، سازگار شود.

۵-۴-۶ مشخصه تلفات در برابر توان راکتیو خروجی

همان‌گونه که در شکل‌های ۵-۳۸ و ۵-۲۷ نشان داده شده، مشخصه تلفات کلی در برابر خروجی راکتیو، و نیز تلفات حقیقی عملکرد در STATCOM با SVC که از راکتورهای قابل کنترل با ترستور و خازن‌های سوئیچ شونده با ترستور استفاده می‌کند، قابل مقایسه هستند. هر دو نوع جبران سازها، در برابر توان خروجی صفر و محدوده آن، تلفات نسبتاً کمی (حدود ۰/۱ تا ۰/۲ درصد) دارند. تلفات در هر دو حالت، به طور متوسط با افزایش توان راکتیو خروجی افزایش می‌یابد و به حدود یک درصد در مقدار نامی خروجی می‌رسد. این نوع مشخصه تلفات در برابر خروجی، عموماً برای کاربردهای انتقال-که در آن‌ها متوسط تقاضا برای توان راکتیو خروجی معمولاً کم است، و جبران ساز در اساس برای کنترل کردن حوادث دینامیکی، اتفاقات سیستم، و احتمالاً هماهنگی در کنترل کلی توان راکتیو منطقه به کار می‌رود-مطلوب شمرده می‌شود.

سهم تلفات نیمه هادی‌های قدرت و اجزاء وابسته در تلفات کلی جبران ساز، برای STATCOM بیشتر از SVC است. علت آن است که دستگاه‌های نیمه هادی قدرت که امروزه در دسترس هستند، تلفات هدایت بالاتری نسبت به ترستورهای متداول دارند. هم‌چنین تلفات کلیدزنی با قطع اجباری جریان، مستلزم تلفات بیشتری نسبت به جابه‌جایی طبیعی است. به هر حال توقعی منطقی است که توسعه تاریخی سریع نیمه هادی‌ها، تلفات دستگاه را در سال‌های آینده کاهش دهد، در حالی که به نظر نمی‌رسد تلفات اجزاء متداول قدرت، مثل راکتورها تغییری چشمگیر کنند. لذا پیشرفت‌های فن‌آوری، احتمالاً به کاهش تلفات کلی STATCOM، بیش از SV کمک خواهد کرد.

۵-۴-۷ ابعاد فیزیکی و نصب

از دیدگاه نصب فیزیکی، چون STATCOM نه تنها توان راکتیو خروجی (خازنی و القایی) را کنترل می‌کند، بلکه آن را در درون خود تولید می‌کند؛ به خازن بزرگ و بانک‌های راکتور به همراه کلیه افزار مربوطه، و حفاظت‌هایی که در SVC های کنترل شده با ترستورهای متداول به کار می‌روند، احتیاج ندارد. نتیجه این امر کاهش چشمگیر در ابعاد کلی (در حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد) و نیز نیروی انسانی و هزینه‌ها می‌باشد. ابعاد فیزیکی کوچک STATCOM آن را به مقدار زیادی برای نصب در مناطقی که هزینه زمین دارای اهمیت اول است، و برای کاربردهایی که تغییرات پیش‌بینی شده سیستم ممکن است جابه‌جایی تأسیسات را الزام‌آور کند، مناسب می‌سازد.

۵-۴-۸ ارزش‌های جبران ساز مختلط

از مشخصه $V-I$ مولدهای توان راکتیو، که در آن‌ها کنورتور قدرت قابل کلیدزنی به همراه خازن‌های سوئیچ شونده با ترستور و راکتورهای کنترل شونده با ترستور، به کار می‌روند، و در شکل-های ۵-۳۹ تا ۵-۴۰ نشان داده شده‌اند، به روشنی می‌توان استنتاج کرد که به طور کلی مزایای عملیاتی و کاربردی قابل حصول با STATCOM، با یک جبران ساز مختلط نیز، متناسب با توان نامی

STATCOM به نسبت کل محدوده توان راکتیو قابل کنترل توسط جبران ساز مختلط، قابل حصول است.

با توجه به طرح‌های جبران ساز مختلط، به خصوص یک مورد مناسب را می‌توان از طریق جایگزین کردن TCR با مولد توان راکتیو مبتنی بر کنورتور در آرایش جبران سازه‌های TCR-TSC که امروزه به کار می‌روند، به وجود آورد. این جایگزینی منجر به برخی مزیت‌های مهم عملیاتی و کاربردی خواهد شد، از جمله:

- ۱- پاسخ سریع‌تر، از آن جهت که کنورتور می‌تواند بلافاصله و قبل از این که TSC ها بتوانند به داخل مدار کلیدزنی شوند، خروجی خازنی تأمین کند. TCR فقط می‌تواند توان راکتیو جذب کند.
- ۲- کاهش در تولید هارمونیک و امکان حذف فیلترها، از آن جهت که کنورتور می‌تواند طوری طراحی شود که هارمونیک بسیار کمی تولید کند. TCR در SVC منبع هارمونیک است.
- ۳- انعطاف پذیری بیشتر در بهینه سازی از نظر ملاک‌های ارزش تلفات، از آن جهت که کنورتور می‌تواند توان راکتیو را تولید و جذب کند، و به این ترتیب کلیدزنی خازن‌ها را با خروجی توان راکتیو خالص اضافی با نقصانی که کنورتور برای جذب یا تولید نیاز دارد، ممکن می‌سازد. TCR فقط می‌تواند توان راکتیو را جذب کند، لذا ضروری است که خازن با توان راکتیو کلیدزنی شود. به عنوان مثال، حتی در تقاضای بسیار کم توان راکتیو خروجی، اولین TSC بایستی به مدار سوئیچ شود، که این امر TCR را وادار به جذب توان راکتیو خازنی بسیار زیادی می‌کند، و باعث تلفات داخلی چشمگیری در نقطه کار جبران ساز می‌شود.

هم‌چنین باید توجه کرد که، برخلاف آرایش TCR و خازن با کلیدزنی مکانیکی (MSC)، ترکیب STATCOM با MSC ها می‌تواند راه‌حلی مناسب و اقتصادی در بسیار از کاربردها باشد. علت آن است که STATCOM قادر به تأمین توان راکتیو خروجی بلافاصله در هنگام تقاضا خواهد بود و فقط خروجی خازنی اضافی تا عملکرد MSC به تأخیر می‌افتد. بر خلاف آن که در آرایش TCR-MSC، هیچ جبران سازی قبل از کلیدزنی اولین MSC انجام نمی‌شود.

۵-۵ سیستم‌های استاتیکی توان راکتیو

براساس تعریف CIGRE/IEEE، سیستم استاتیکی توان راکتیو ترکیبی از جبران سازه‌های استاتیکی و خازن‌های با کلیدزنی مکانیکی و راکتورها است که عملکرد آن‌ها هماهنگ شده است. سیستم استاتیکی توان راکتیو به این ترتیب یک آرایش جبران سازی به خوبی تعریف شده نیست، زیرا مشخصه $V-I$ یکنواختی نداشته و زمان کلی پاسخ آن به مقدار زیادی بستگی به دستگاه های مکانیکی کلیدزنی مورد استفاده دارد.

در سیستم استاتیکی توان راکتیو تأکید بر هماهنگی است. هدف عمده معمولاً کسب اطمینان از این نکته است که جبران ساز استاتیکی با مشخصه $V-I$ به خوبی تعریف شده و سرعت زیاد پاسخ، برای جبران سازی دینامیکی در دسترس است و اجزاء دیگر سیستم کلی توان راکتیو تقاضاهای توان راکتیو را در حالت ماندگار عهده دار هستند. دلیل دیگر هماهنگی به حداقل رساندن تلفات حالت ماندگار در جبران ساز و کل سیستم قدرت است.

هماهنگی توان راکتیو خروجی می‌تواند راهبردهای متفاوتی را دنبال کند. در ساده ترین شکل، می‌تواند چیزی بیش از آن‌چه که به عنوان کنترل توان راکتیو ذخیره شرح داده شد نباشد، که خروجی جبران ساز استاتیکی را وادار به برگشت به اندازه یک مرجع توان راکتیو مشخص (یا قابل تنظیم)، پس

از هر تغییر تقاضای مهم توان راکتیو در سیستم قدرت می‌کند. با این آرایش، دسترس پذیری مقدار معینی از ظرفیت جبران سازی سریع، با عملکرد کنترل خودکار به کار گرفته می‌شود، اما تقاضای توان راکتیو ماندگار، بر عهده "عوامل" نامشخص دیگر در سیستم قدرت (که می‌تواند شامل تنظیم کننده های ولتاژ ژنراتور، جبران سازه‌های سنکرون (کندانسورها)، و بانک‌های خازنی و راکتورهای دارای کلید مکانیکی که با رله‌های کاهش و اضافه ولتاژ عمل می‌کنند، باشد) باقی می‌ماند.

یک روش ساده دیگر که از نظر فلسفه عملکرد عکس روش فوق است، آن است که اجازه دهند جبران ساز استاتیکی، جبران سازی راکتیو را برحسب لزوم انجام دهد، اما یک سیگنال هشدار دهنده برای اپراتور سیستم، برای مواقعی که توان راکتیو خروجی از حد معینی تجاوز می‌کند، تعبیه شود. لذا بر عهده اپراتور است که تعیین کند که آیا جبران ساز باید به جبران سازی توان راکتیو ادامه دهد یا وسایل دیگری باید به کار گرفته شود.

در یک طرح هماهنگی سخت تر، جبران ساز تعدادی بانک‌های خازنی و راکتوری اختصاصی را در درون مجموعه سیستم استاتیکی توان راکتیو، کنترل می‌کند. یعنی این‌که، اگر خروجی خازنی جبران ساز از یک سطح تنظیم شده قبلی در یک دوره زمانی معین، تجاوز کند، آن‌گاه کنترل جبران ساز، در یک توالی از پیش تعیین شده، بانک‌های خازنی دارای کلید مکانیکی را فعال خواهد کرد، تا این‌که خروجی جبران ساز به پایین تر از سطح تعیین شده، کاهش یابد. به همین صورت، مازاد توان راکتیو خروجی القایی، جداسازی سیستماتیک بانک‌های خازنی را موجب خواهد شد، و اگر لازم بود تعداد مناسبی از بانک‌های راکتوری با کلید مکانیکی را فعال خواهد کرد.

در ایجاد هماهنگی خودکار، باید به قابلیت‌های کلیدهای مکانیکی از نظر بسامد عملکرد و نیز محدودیت جریان ضربه احتمالی، توجه کافی شود. معمولاً راحت ترین وسیله برای پایش وضعیت کلید، یک کنترل مبتنی بر میکروپروسسور است، که تاریخچه کلیدزنی‌ها را ذخیره کرده و هماهنگی کلی را براساس اولویت‌های برقرار شده و سیاست‌های جبران سازی، موجب می‌شود.

مراجع

- Bergmann, K., et al., "Application of GTO-Based SVCs for Improved Use of the Rejsby Hede Windfarm," Ninth National Power System Conference, Kanpur NPSC'96, vol. 2, pp. 391-395.
- Edwards, C. W., et al., "Advanced Static Var Generator Employing GTO Thyristors," *IEEE PES Winter Power Meeting*, Paper No. 38WM109-1, 1988.
- Erinmez, I. A., ed., "Static Var Compensators," Working Group 38-01, Task Force No. 2 on SVC, CIGRE, 1986.
- Erinmez, I. A., and Foss, A. M., eds., "Static Synchronous Compensator (STATCOM)," Working Group 14.19, CIGRE Study Committee 14, Document No. 144, August 1999.
- Gyugyi, L., "Power Electronics in Electric Utilities: Static Var Compensators," *Proceeding of IEEE*, vol. 76, no. 4, April 1988.
- Gyugyi, L., "Reactive Power Generation and Control by Thyristor Circuits," Paper SPCC 7729 presented at Power Electronics Specialist Conference, Cleveland, OH, June 8-10, 1976. Reprinted in the *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-15, no. 5, September/October 1979.
- Gyugyi, L., et al., "Advanced Static Var Compensator Using Gate Turn-off Thyristors for Utility Applications," *CIGRE paper* 23-203, 1990.
- Gyugyi, L., "Dynamic Compensation of AC Transmission Lines by Solid-State Synchronous Voltage Sources," *IEEE PES Summer Meeting*, Paper No. 93SM431-1PWRD, 1993.
- Gyugyi, L., and Taylor, E. R., "Characteristics of Static Thyristor Controlled Shunt Compensators for Power Transmission System Applications," *IEEE Trans. PAS*, vol. PAS-99, no. 5, pp. 1795-1804, September/October 1980.
- Gyugyi, L., et al., "Principles and Applications of Static, Thyristor-Controlled Shunt Compensators," *IEEE Trans. PAS*, vol. PAS-97, no. 5, September/October 1978.

$A_{smargin}$ نشان داده شده‌اند.

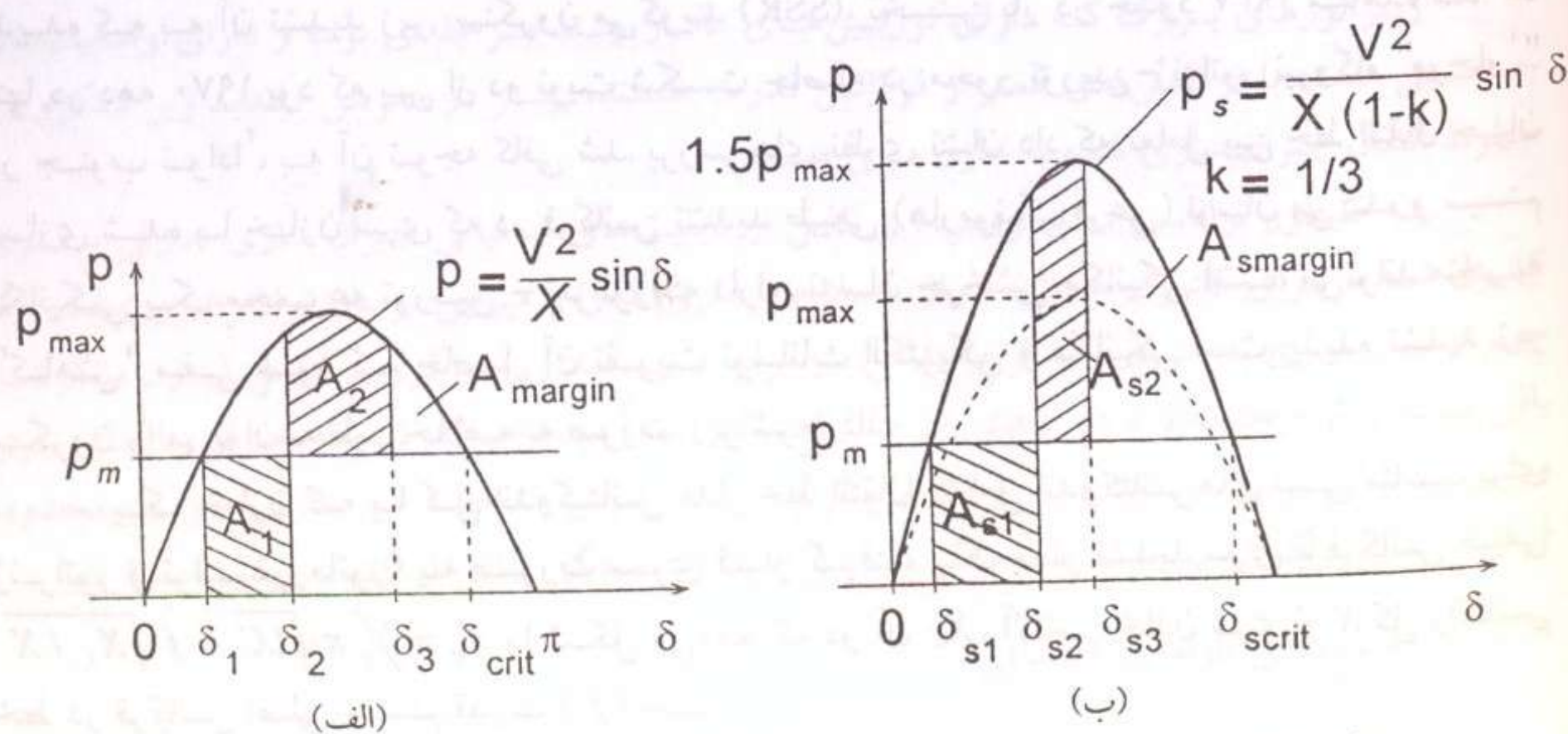
مقایسه شکل‌های ۶-۳ الف و ۶-۳ ب به روشنی نشان می‌دهد که جبران‌سازی خازنی سری با حذف بخشی از امپدانس سری خط انتقال می‌تواند افزایشی اساسی در حاشیه پایداری گذرا ایجاد کند. افزایش حاشیه پایداری گذرا متناسب با "درجه جبران‌سازی سری" است.

این افزایش، از جنبه نظری، برای یک خط راکتیو ایده‌آل با نزدیک شدن جبران‌سازی به ۱۰۰ درصد، نامحدود می‌شود. در هر صورت، جبران‌سازی خازنی سری، بنا به دلایلی از جمله تعادل بار با مسیرهای موازی، جریان اتصال کوتاه زیاد، و مشکلات احتمالی در کنترل سیلان توان، در عمل معمولاً از ۷۵ درصد تجاوز نمی‌کند. اغلب بنابر ملاحظات زیر سنکرون، جبران‌سازی به کمتر از ۳۰ درصد محدود می‌شود.

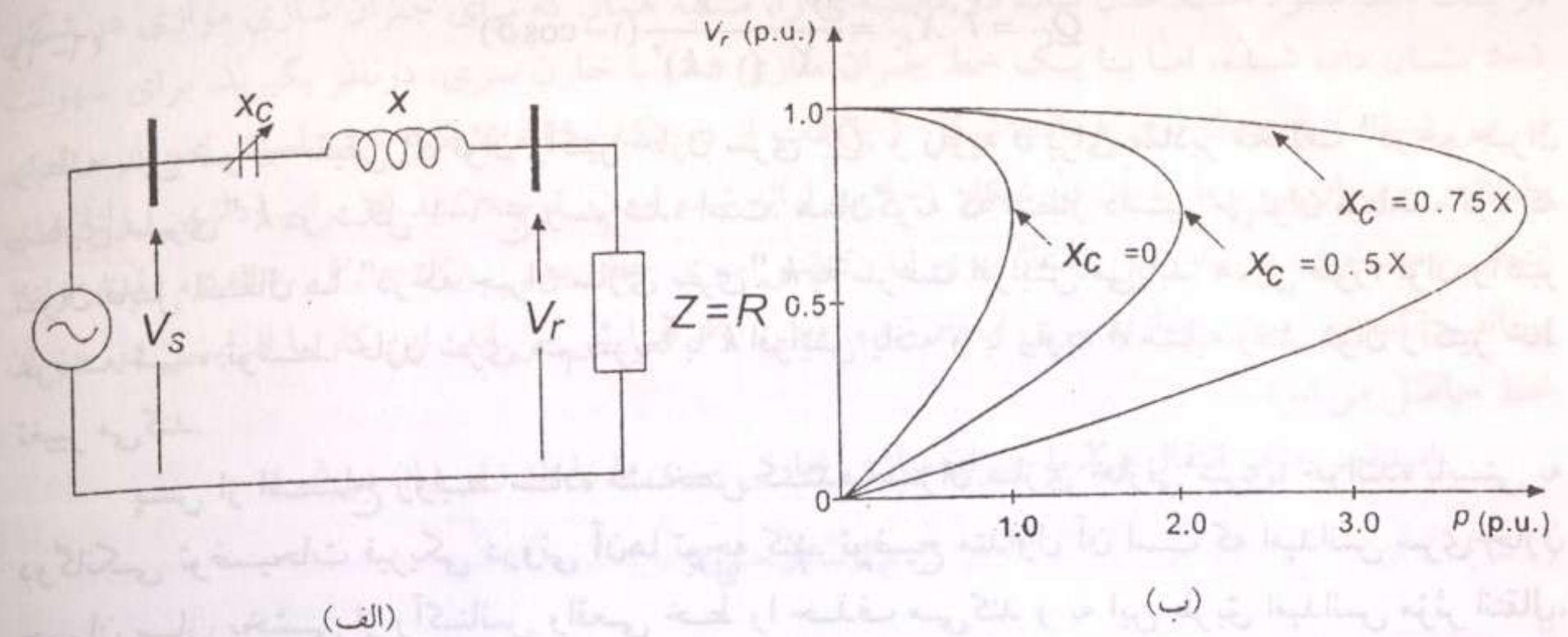
در این‌جا مجدداً تأکید می‌شود که در سناریوهای عملی خطا، سیستم‌های "پیش از وقوع خطا" و "پس از وقوع خطا" معمولاً متفاوت هستند. از دیدگاه پایداری گذرا و ایمنی کلی سیستم، آنچه که حائز اهمیت است "سیستم پس از وقوع خطا" است. به این معنی که، سیستم‌های قدرت معمولاً طوری طراحی می‌شوند که با سناریوهای احتمالی پیش از وقوع خطا و کوچک شدن سیستم پس از وقوع خطا، در مواقعی که سیستم با یک اغتشاش عمده مواجه می‌شود، از نظر گذرا پایدار باشند. به این دلیل، در اغلب سیستم‌های کاربردی، ظرفیت واقعی شبکه انتقال به میزان قابل توجهی بالاتر از آنچه که معمولاً به کار می‌آید، است. قابلیت توانمند جبران‌سازی سری، با کنترل‌های سریع کافی، برای اداره کردن اغتشاش‌های دینامیکی و افزایش قابلیت انتقال در سیستم "پس از وقوع خطا" یا سیستم "کوچک شده"، می‌تواند به صورت مؤثری ظرفیت‌های غیر قابل بهره‌برداری ناشی از طراحی را در بسیاری از سیستم‌های قدرت کاهش دهد.

۶-۱-۴ میرایی نوسانات توان

جبران‌سازی سری به صورت کنترل شده می‌تواند به صورت مؤثری برای میراسازی نوسانات ولتاژ به کار گرفته شود. همان‌طور که در فصل ۵ توضیح داده شد، برای میرا نمودن نوسان توان لازم است که جبران‌سازی اعمال شده را به صورتی تغییر داد که به شتاب‌گیری و کاهش



شکل ۶-۳ معیار سطح مساوی برای نشان دادن حاشیه پایداری گذرا برای سیستم ساده دو ماشینه، (الف) بدون جبران‌سازی، و (ب) با یک خازن سری.



شکل ۶-۲ توان قابل انتقال و حد پایداری ولتاژ در یک خط انتقال شعاعی به عنوان تابعی از جبران‌سازی خازنی سری.

۶-۱-۳ اصلاح پایداری گذرا

همان‌گونه که در فصل ۵ نشان داده شد، اصلاح پایداری گذرا با جبران‌سازی موازی کنترل شده، با افزایش انتقال توان از طریق افزایش (یا حفظ) ولتاژ (نقطه میانی) خط انتقال در خلال نوسان شتاب دهنده ماشین‌های) دچار اغتشاش، به دست می‌آید. قابلیت توانمند جبران‌سازی سری خط برای کنترل توان انتقال یافته می‌تواند به صورت بسیار مؤثرتری برای افزایش حد پایداری گذرا و تأمین میرایی نوسانات توان، به کار گرفته شود. معیار "سطح معادل"، که در فصل ۵ برای بررسی قابلیت جبران‌سازی موازی ایده‌آل در اصلاح پایداری گذرا معرفی شد، مجدداً در این‌جا برای ارزیابی افزایش نسبی حد پایداری گذرای که با جبران‌سازی خازنی سری قابل حصول است، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

سیستم ساده‌ای را با خط جبران‌سازی شده به صورت سری که در شکل ۶-۱ الف نشان داده شده، در نظر بگیرید. همانند سیستم جبران‌سازی شده موازی در شکل ۶-۱ ب، در این‌جا هم برای سهولت فرض شده که در سیستم جبران‌سازی شده سری، سیستم در حالت قبل از وقوع خطا و بعد از وقوع خطا، یکسان باقی می‌ماند. فرض کنید که سیستم شکل ۶-۱ الف با جبران‌سازی خازنی سری و بدون آن، توان یکسان P_m را منتقل می‌کند. فرض کنید که هر دو سیستم جبران‌سازی نشده و جبران‌سازی شده به صورت سری در معرض خطای مشابهی برای مدت زمان یکسان قرار می‌گیرند. رفتار دینامیکی این سیستم‌ها در شکل‌های ۶-۳ الف و ۶-۳ ب نشان داده شده‌است. همان‌گونه که دیده می‌شود، قبل از خطا هر دو آن‌ها توان P_m را به ترتیب با زاویه δ_1 و δ_2 منتقل می‌کنند. در طول مدت خطا، توان الکتریکی انتقال یافته به صفر می‌رسد، در حالی که توان مکانیکی ورودی به ژنراتورها در مقدار ثابت P_m باقی می‌ماند. بنابراین ژنراتور طرف تولید کننده شتاب گرفته و هنگامی که خطا برطرف می‌شود از زاویه‌های حالت ماندگار δ_1 و δ_2 به ترتیب به زوایای δ_{s1} و δ_{s2} می‌رسد. انرژی‌های شتاب دهنده با سطوح A_1 و A_{s1} نمایش داده شده‌اند. پس از برطرف شدن خطا، توان الکتریکی انتقال یافته از توان مکانیکی ورودی تجاوز کرده و لذا ماشین طرف تولید کننده شتاب از دست می‌دهد. به این ترتیب، انرژی جنبشی انباشته شده بیشتر افزایش می‌یابد تا آن‌که در حداکثر نوسان‌های زاویه‌ای δ_{s3} و δ_{crit} تعادلی میان انرژی‌های شتاب دهنده و کاهنده شتاب که به ترتیب با سطوح A_1 ، A_{s1} ، A_2 و A_{s2} نشان داده شده‌اند، برقرار شود. سطوح بین منحنی " P در برابر δ " و "خط ثابت P_m " در فواصل تعریف شده با $\delta_{crit} - \delta_{s3}$ و $\delta_{s2} - \delta_{crit}$ تعیین کننده حاشیه پایداری گذرا هستند که به ترتیب با سطوح A_{margin} و

جبران‌سازهای استاتیکی سری:

GCSC, TCSC, TSSC و SSSC

۶-۱ اهداف جبران سازی سری

در فصل ۵ نشان داده شد که جبران سازی راکتیو موازی هم در حفظ پروفیل مطلوب ولتاژ در طول خط انتقالی که دو شینه سیستم ac را به یکدیگر متصل می‌کند و هم در تأمین پشتیبانی برای ولتاژ انتهای خط در خطوط شعاعی در حالت‌هایی که تقاضای توان افزایش می‌یابد، بسیار مؤثر است. بنابراین، هنگامی که جبران سازی راکتیو موازی در فواصلی که به مقدار کافی به هم نزدیک هستند، در طول خط به کار گرفته شود، در صورتی که زاویه بزرگی بین دو ولتاژ انتهایی قابل برقرار کردن باشد، از نظر تئوری می‌توان توان را تا حد حرارتی خط، انتقال داد. در هر حال، جبران سازی موازی، در کنترل توان واقعی انتقال یافته که در یک ولتاژ انتقال معین، نهایتاً با امپدانس سری خط در زاویه بین دو ولتاژ انتهایی تعیین می‌شود، مؤثر نمی‌باشد.

همواره بدیهی بوده است که انتقال توان ac در خطوط طولانی در درجه اول با امپدانس راکتیو سری خط محدود می‌شود. جبران سازی خازنی سری، چندین دهه قبل برای حذف بخشی از امپدانس راکتیو خط و در نتیجه افزایش توان قابل انتقال، عرضه شده بود. سپس، از طریق نوآوری FACTS، نشان داده شد که جبران سازی سری متغیر، هم در کنترل سیلان توان در خط و هم در بهبود پایداری به شدت مؤثر است.

جبران سازی قابل کنترل خط به صورت سری، شالوده فن آوری FACTS است. این نوع جبران‌سازی را می‌توان برای بهره‌برداری کامل از تأسیسات انتقال، از طریق کنترل سیلان توان در خطوط، جلوگیری از سیلان‌های حلقوی، و با استفاده از کنترل‌های سریع برای به حداقل رساندن تأثیر اغتشاشات سیستم و در نتیجه کاهش حاشیه پایداری مرسوم، به کار گرفت.

در این بخش رویکرد اصلی جبران سازی راکتیو سری مورد بررسی قرار خواهد گرفت تا مبنای لازم برای به‌کارگیری جبران سازهای مبتنی بر الکترونیک قدرت فراهم شود. هم‌چنین تأثیر جبران سازی سری بر عوامل اساسی تعیین‌کننده حداکثر انتقال توان قابل وصول، حد انتقال توان در حالت ماندگار، پایداری ولتاژ و میرایی نوسانات توان، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۶-۱-۱ مفهوم جبران‌سازی خازنی به صورت سری

نظریه اساسی در پس جبران سازی خازنی سری، کاهش کل امپدانس مؤثر سری انتقال از طرف تولیدکننده به طرف مصرف‌کننده است، یعنی X در رابطه $P = (V^2/X) \sin \delta$ که شاخص انتقال توان

- Hauth, R. L., and Moran, R. J., "Basics of Applying Static Var Systems on HVAC Power Networks," EPRI Seminar on Transmission Static Var Systems, Duluth, MN, October 24, 1978.
- Kimbark, E. W., "How to Improve System Stability without Risking Subsynchronous Resonance," *IEEE Trans. PAS-96*, no. 5, September/October 1977.
- Larsen E., et al., "Benefits of GTO-Based Compensation Systems for Electric Utility Applications," *IEEEIPES Summer Power Meeting*, Paper No. 91 SM 397-0 TWRD, 1991.
- Mathur, R. M., ed., *Static Compensators for Reactive Power Control*, The Committee on Static Compensation, Canadian Electrical Association (CEA), 1984.
- Miller, T. J. E., ed., *Reactive Power Control in Electric Systems*, John Wiley & Sons, New York, 1982.
- Mori, S., et al., "Development of Large Static Var Generator Using Self-Commutated Converters for Improving Power System Stability," *IEEEIPES Winter Power Meeting*, Paper No. 92WM165-1, 1992.
- Povh, D., and Weinhold, M., "Efficient Computer Simulation of STATCON," International Conference on Power System Transients, Lisbon, pp. 397-402, September 1995.
- Schauder, C. D., et al., "Development of a ± 100 MVAR Static Condenser for Voltage Control of Transmission Systems," *IEEEIPES Summer Meeting*, Paper No. 94SM479-6 PWRD, 1994.
- Schauder, C. D., and Mehta, H., "Vector Analysis and Control of Advanced Static Var Compensators," *IEE Fifth International Conference on AC and DC Transmission, Conference Publication No. 345*, pp. 266-272, 1991.
- Schauder, C. D., et al., "Operation of ± 100 MVAR TVA STATCON," *IEEEIPES Winter Meeting*, Paper No. PE-509-PWRD-O-01-1997.
- Schweickardt, H. W., et al., "Closed Loop Control of Static Var Sources (SVC) on EHV Transmission Lines," *IEEEIPES Winter Meeting*, Paper A 78 135-6, 1978.
- Sen, K. K., "STATCOM-STATIC synchronous COMPensator: Theory, Modeling, and Applications," 99WM706, *Proceedings of IEEEIPES Winter Meeting*, New York, 1999.
- Sumi, Y., et al., "New Static Var Control Using Force-Commutated Converters," *IEEEIPES Winter Power Meeting*, Paper No. 81WM228-6, 1981.

در یک خط منفرد است. مدل ساده دو ماشینیه‌ای را، مشابه همان که برای جبران سازی موازی در شکل ۵-۱ نشان داده شده، اما با یک خط جبران سازی شده با خازن سری، در نظر بگیرید. برای سهولت فرض شده که مدل فوق همانند شکل ۶-۱ الف از دو تکه مشابه تشکیل شده است. نمودار برداری ولتاژ و جریان مربوط به آن در شکل ۶-۱ ب ارائه شده است. توجه کنید که برای [داشتن] ولتاژهای انتهایی مساوی، مقدار کل ولتاژ روی اندوکتانس سری خط، یعنی $V_x = 2V_{x/2}$ ، به اندازه مقدار ولتاژ مخالفی که بر روی خازن سری ایجاد شده، یعنی V_C ، افزایش می‌یابد؛ این کار با افزایشی در جریان خط حاصل می‌شود.

امپدانس مؤثر انتقال X_{eff} با جبران سازی خازنی سری با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$X_{eff} = X - X_C \quad (6-1)$$

یا

$$X_{eff} = (1-k)X \quad (6-2)$$

که k "درجه جبران سازی سری" است، یعنی،

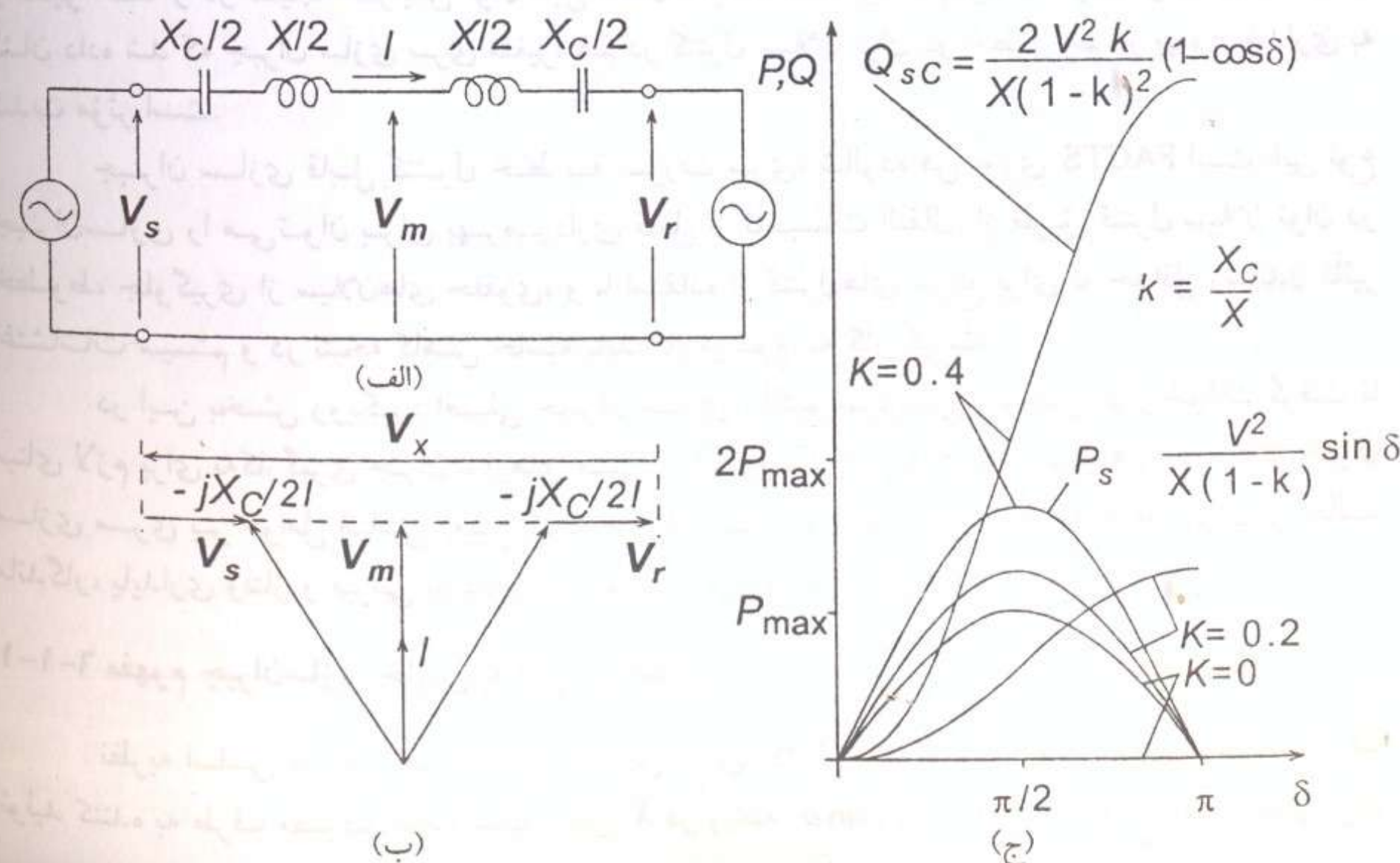
$$k = X_C / X \leq k < 1 \quad (6-3)$$

با فرض $V_s = V_r = V$ در شکل ۶-۱ ب، جریان در خط جبران سازی شده، و توان حقیقی انتقال یافته مربوط به آن می‌تواند از روابط زیر به دست آیند:

$$I = \frac{2V}{(1-k)X} \sin \frac{\delta}{2} \quad (6-4)$$

$$P = V_m I = \frac{V^2}{(1-k)X} \sin \delta \quad (6-5)$$

توان راکتیو عرضه شده توسط خازن سری را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:



شکل ۶-۱ سیستم قدرت دو ماشینیه با جبران سازی سری خازنی (الف)، دیاگرام فازوری مربوطه (ب)، مشخصه توان حقیقی و توان راکتیو سری خازنی در برابر زاویه (ج).

$$Q_C = I^2 X_C = \frac{2V^2}{X} \frac{k}{(1-k)^2} (1 - \cos \delta) \quad (6-6)$$

رابطه بین توان حقیقی P ، توان راکتیو خازن سری Q_C ، و زاویه δ برای مقادیر مختلف "درجه جبران سازی سری" k در شکل ۶-۱ ج رسم شده است. همان گونه که انتظار داشتیم می‌توان مشاهده کرد که توان فابل انتقال با "درجه جبران سازی سری" k به سرعت افزایش می‌یابد. همین طور، توان راکتیو عرضه شده توسط خازن سری هم سریعاً با k افزایش یافته و با زاویه δ مشابه رفتار توان راکتیو خط تغییر می‌کند.

پس از استنتاج روابط ساده مشخص کننده جبران سازی خازنی سری، خواننده بایستی به دوگانگی توضیحات فیزیکی درونی آن‌ها توجه کند. توضیح متداول آن است که امپدانس سری خازن جبران ساز، بخشی از راکتانس واقعی خط را حذف می‌کند و به این طریق امپدانس مؤثر انتقال، برحسب رابطه (۶-۱)، کاهش می‌یابد؛ مثل این که خط به صورت فیزیکی کوتاه شده است. توضیح معتبر فیزیکی دیگری نیز که به درک کنترل کننده‌های سیلان توان مبتنی بر کنورتور کمک می‌کند، آن است که به منظور افزایش جریان در امپدانس سری داده شده خط فیزیکی واقعی (و به این طریق توان انتقال یافته ذریبط)، ولتاژ روی این امپدانس بایستی افزایش یابد. این کار می‌تواند با یک قطعه سری مناسب در مدار، مثل یک خازن انجام شود، که امپدانس آن ولتاژی مخالف ولتاژ غالب در روی راکتانس سری خط تولید می‌کند و، همان طور که دیاگرام برداری شکل ۶-۱ ج نشان می‌دهد، به این صورت باعث کاهش ولتاژ اخیر می‌شود. به سادگی می‌توان دریافت که در توضیح دوم، طبیعت فیزیکی قطعه مداری سری، جز این که ولتاژ جبران سازی مطلوب را تولید کند، ارتباط دیگری ندارد. بنابراین، قطعه مداری جبران سازی کننده جایگزین را می‌توان به صورت یک منبع ولتاژ ac تجسم نمود که ولتاژ مطلوب جبران سازی را مستقیماً به صورت سری در خط تزریق می‌کند. همان گونه که بعداً خواهیم دید، کنورتور کلیدزنی قدرت مورد استفاده در STATCOM که به صورت موازی بسته شده و به عنوان یک منبع ولتاژ سری در خط به کار می‌رود، قابلیت‌های کارکردی جبران سازی خازنی سری را برآورده کرده و امکانات اضافی برای کنترل سیلان توان را نیز فراهم می‌کند.

۶-۱-۲ پایداری ولتاژ

جبران سازی خازنی سری می‌تواند برای کاهش امپدانس راکتیو سری نیز به کار رفته و تغییرات ولتاژ طرف مصرف کننده و امکان فروپاشی ولتاژ را به حداقل برساند. یک سیستم شعاعی ساده با راکتانس فیدر خط X ، راکتانس جبران سازی سری X_C و امپدانس بار Z در شکل ۶-۲ الف نشان داده شده است. منحنی‌های ولتاژ ترمینال نرمال شده V_r در برابر توان P ، با ضریب قدرت واحد در جبران سازی خازنی صفر، ۵۰ و ۷۵ درصد، در شکل ۶-۲ ب نشان داده شده‌اند. "نقطه دماغه" در هر منحنی که برای سطح مشخصی از جبران سازی ارائه شده، نشان دهنده ناپایداری ولتاژ مربوطه است. توجه کنید که شکل ۶-۲ معادل شکل ۵-۳، همان سیستم شعاعی را با یک جبران ساز راکتیو موازی که پشتیبانی ولتاژ انتهایی را برعهده دارد، نشان می‌دهد. به طور وضوح، هر دو جبران سازی خازنی سری و موازی، می‌توانند حد پایداری ولتاژ را به طرز مؤثری افزایش دهند. جبران سازی موازی، این کار را با تأمین تقاضای بار راکتیو و تنظیم ولتاژ ترمینال انجام می‌دهد. جبران سازی خازنی سری این کار را با حذف بخشی از راکتانس خط و از این طریق در واقع ایجاد یک منبع ولتاژ "مستحکم" برای بار، انجام می‌دهد. برای افزایش حد پایداری ولتاژ در انتقال هوایی، جبران سازی سری، بسیار مؤثرتر از جبران سازی موازی با همان مقدار نامی MVA است.

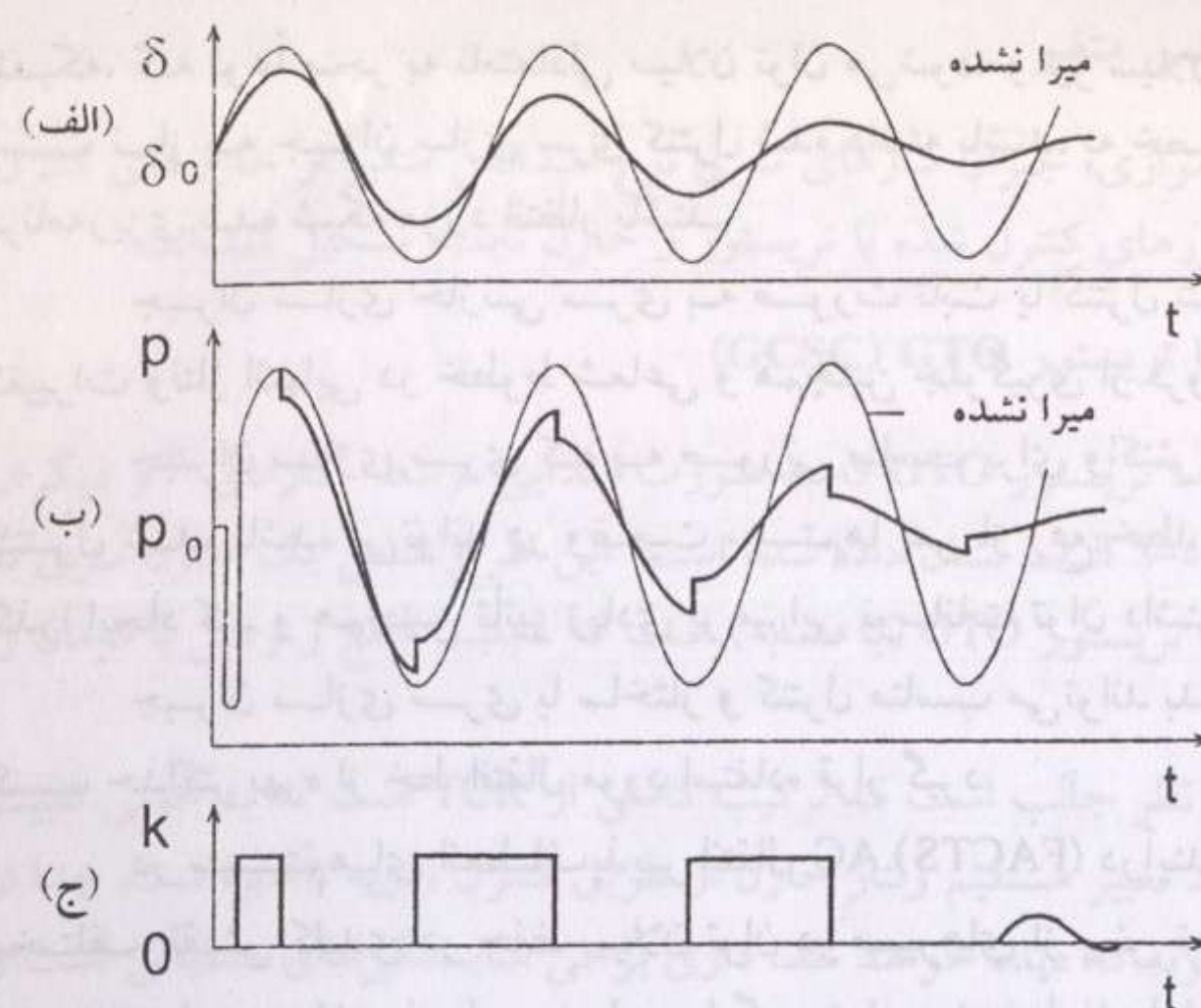
شتاب در نوسان ماشین (هایسی) که دچار اغتشاش شده‌اند، واکنش نشان دهد. بدین معنی که، هرگاه ژنراتور با نوسان چرخشی شتاب گیرد و زاویه افزایش یابد ($d\delta/dt > 0$)، توان الکتریکی انتقال یافته باید افزایش یابد تا توان مکانیکی ورودی اضافی را جبران کند. برعکس، هنگامی که ژنراتور شتاب از دست می‌دهد و زاویه δ کاهش می‌یابد ($d\delta/dt < 0$)، توان الکتریکی باید کاهش یابد تا با توان مکانیکی ورودی ناکافی، برابری کند.

تغییرات مورد نیاز در "درجه جبران سازی سری"، به همراه تغییرات مرتبط در زاویه انتقال δ و توان انتقالی P در برابر زمان، در یک سیستم توان کننده با کاهش ضعیف، برای یک مورد فرضی نمادین در شکل ۶-۴ نشان داده شده است. شکل موج‌های شکل ۶-۴ الف، نوسانات کاهش نیافته و کاهش یافته زاویه δ را حول مقدار حالت ماندگار δ نشان می‌دهند. شکل موج‌های شکل ۶-۴ ب، نوسانات کاهش نیافته و کاهش یافته مربوط به توان الکتریکی P را حول مقدار حالت ماندگار P نشان می‌دهند که، به دنبال یک خطای فرضی (افت ناگهانی در P) که عامل شروع نوسانات است، ایجاد شده‌اند. شکل موج ۶-۴ ج، تغییرات اعمال شده در "درجه جبران سازی خازنی سری" k را نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود، هنگامی که $d\delta/dt > 0$ ، حداکثر k حداکثر و هنگامی که $d\delta/dt < 0$ مقدار k صفر است. وقتی k حداکثر است، امیدانس مؤثر خط حداقل بوده (به عبارت دیگر، ولتاژ دو سر امیدانس واقعی خط حداکثر است) و در نتیجه توان الکتریکی منتقل شده در خط حداکثر است. هنگامی که k صفر است، امیدانس مؤثر خط حداکثر بوده (به عبارت دیگر، ولتاژ دو سر امیدانس واقعی خط حداقل است) و توان انتقال یافته حداقل است. شکل نشان می‌دهد که k به روش "حداکثری-حداقلی" کنترل می‌شود (خروجی جبران ساز سری بین مقادیر حداقل و حداکثر تغییر می‌کند). در واقع این نوع کنترل مؤثرترین نوع برای میرایی نوسانات بزرگ است. به هر حال برای میرایی نوسانات نسبتاً کوچک توان، به خصوص با یک جبران ساز سری نسبتاً بزرگ، تغییرات یکنواخت k هم‌نواخت با زاویه ژنراتور یا توان، می‌تواند جایگزین بهتری باشد.

۶-۱-۵ میرایی نوسانات زیرسنکرون

جبران سازی خازنی سری می‌تواند باعث نوسانات مستمر زیر فرکانس اصلی سیستم شود. این پدیده که به آن تشدید زیر سنکرون می‌گویند (SR)، نخستین بار در حدود ۱۹۳۷ مشاهده شد؛ اما تنها در دهه ۱۹۷۰ بود که پس از دو نوبت شکست حمله در محور توربین ژنراتور نیروگاه "موجاوی" در جنوب نوادا^۱، به آن توجه کافی شد. بررسی‌های نظری نشان داد که تعامل بین خط انتقال جبران سازی شده با خازن سری که در فرکانس تشدیدایی (هارمونیک فرعی) نوسان می‌کند، و سیستم مکانیکی یک مجموعه توربین - ژنراتور که دارای نوسان چرخشی مکانیکی است، می‌تواند منجر به "کاهش" منفی شود که حاصل آن تقویت نوسانات الکتریکی و مکانیکی است. پدیده تشدید زیر سنکرون را می‌توان به طور خلاصه به صورت زیر شرح داد:

یک خازن که با کل اندوکتانس مدار خط انتقال (شامل اندوکتانس‌های ناشی مناسب برای ژنراتور و ترانسفورماتور) به صورت سری قرار گرفته، یک مدار تشدید سری با فرکانس طبیعی $f_e = \frac{1}{\sqrt{LC}} = f \sqrt{X_C/X}$ را شکل می‌دهد که در آن X_C راکتانس خازن سری و X کل راکتانس خط در فرکانس اصلی سیستم قدرت (f) است.



شکل ۶-۴ شکل موج‌های نشان‌دهنده میرا شدن نوسانات به وسیله جبران سازی سری قابل کنترل: (الف) زاویه ژنراتور، (ب) توان انتقال یافته، و (ج) درجه جبران سازی سری.

از آن جا که درجه جبران سازی سری $k = X_C/X$ معمولاً در محدوده ۲۵ تا ۷۵ درصد است، فرکانس تشدید الکتریکی f_e کمتر از فرکانس قدرت f است، یعنی این که $f_e < f$ فرکانس هارمونیک فرعی است. (خواننده باید توجه کند که اصطلاح هارمونیک فرعی به صورتی که در این جا به کار می‌رود به معنای وجود رابطه‌ای کامل بین دو فرکانس نیست، بلکه فقط به معنای آن است که f_e کمتر از f است). اگر مدار الکتریکی (با برخی اغتشاشات شبکه‌ای) به حالت نوسان در آید، آن‌گاه مؤلفه هارمونیک فرعی جریان خط، منجر به یک هارمونیک فرعی میدان مربوط به آن در ماشین می‌شود که، با گردش به سمت عقب به نسبت میدان اصلی (چون $f_e < f$)، یک گشتاور متناوب با فرکانس اختلاف $f - f_e$ در روتور تولید می‌کند. اگر این فرکانس اختلاف با یکی از تشدیدهای چرخشی مجموعه توربین - ژنراتور انطباق پیدا کند، نوسان چرخشی مکانیکی تحریک می‌شود، که به نوبه خود تشدید الکتریکی را بیشتر تحریک می‌کند. این شرایط را تشدید زیر سنکرون می‌گویند. (البته، این فرایند می‌تواند در جهت عکس هم شروع شود: یک شوک می‌تواند آغاز کننده نوسان چرخشی شود که، تحت شرایط تشدید زیر سنکرون، با پاسخ شبکه الکتریکی تقویت خواهد شد).

ژنراتورهای بزرگ که دارای توربین‌های بخار چند مرحله‌ای بوده و دارای وضعیت‌های چرخشی متعدد با فرکانس‌های کمتر از فرکانس قدرت هستند، بیشتر در معرض تشدید زیر سنکرون با خطوط انتقال جبران سازی شده با خازن سری هستند.

به منظور توانایی در بهره‌برداری کامل از قابلیت‌های عملیاتی جبران سازی خازنی سری کنترل شده، برای کنترل سیلان توان، اصلاح پایداری گذرا و میرایی نوسان توان، ضروری است که جبران ساز سری به عنوان یک الزام حداقل، در برابر تشدید زیر سنکرون، منفعل (بدون مشارکت) باقی بماند یا ترجیحاً فعالانه در کاهش آن مشارکت کند. بعداً دیده خواهد شد که جبران سازهای سری مبتنی بر الکترونیک قدرت می‌توانند این الزام را، یا از طریق مشخصه غیر خازنی خود در محدوده فرکانس هارمونیک فرعی مورد نظر، یا از راه عمل فعالانه کاهندگی ناشی از کنترل، برآورده سازند.

۶-۱-۶ جمع‌بندی الزامات عملیاتی

جبران سازی سری در اصل برای حل مسائل سیلان توان به کار می‌رود. این مسائل می‌تواند مربوط به طول خط یا ساختار شبکه انتقال باشد. طول الکتریکی خط می‌تواند به منظور برآورده کردن الزامات انتقال توان، از طریق جبران سازی ثابت (درصدی) خط، کوتاه شود. مسائل مرتبط با ساختار

^۱ Mojave

^۲ Nevada

شبکه، که نوعاً منجر به نامتعادلی سیلان توان می‌شود، و نیز سیلان‌های موازی و حلقوی توان، ممکن است نیاز به جبران سازی سری کنترل شده داشته باشند، به خصوص اگر تغییرات پیش‌بینی نشده یا برنامه‌ریزی شده شبکه مورد انتظار باشند.

جبران سازی خازنی سری به صورت ثابت یا کنترل شده می‌تواند برای به حداقل رساندن تغییرات ولتاژ انتهایی در خطوط شعاعی و همچنین جلوگیری از فروپاشی ولتاژ به کار رود.

جبران سازی سری که به صورتی مناسب برای واکنش در برابر نوسان‌های متداول ماشین، کنترل شده باشد، می‌تواند در وضعیت سیستم‌ها پس از رفع خطا، اصلاحات مهمی را از نظر پایداری گذرا ایجاد کند و همچنین تأثیر زیادی بر میرایی نوسانات توان داشته باشد.

جبران سازی سری با ساختار و کنترل مناسب می‌تواند بدون خطر تشدید زیر سنکرون، برای کسب حداکثر بهره از خط انتقال مورد استفاده قرار گیرد.

در سیستم‌های انعطاف‌پذیر انتقال AC (FACTS) در آینده، جبران‌سازهای سری کنترل شده مختلف، نقش کلیدی در حفظ سیلان توان در مسیرهای از پیش تعریف شده خواهند داشت. همچنین این نوع از جبران‌سازها مسیرهای جایگزین را در شرایط اضطراری ایجاد نموده، بارگیری خطوط را مدیریت کرده، و به طور کلی استفاده بهینه از شبکه انتقال را تضمین خواهند کرد. خواهیم دید که، مشابه جبران سازی موازی، جبران سازی سری کنترل شده نیز می‌تواند الزامات عملیاتی فوق را هم با استفاده از جبران‌سازهای نوع امپدانس کنترل شده با ترستور و هم با استفاده از جبران‌سازهای نوع منبع ولتاژی مبتنی بر کنورتور، برآورده نماید. به هر جهت، مشخصات عملیاتی و عملکردی این دو نوع جبران ساز سری تا حد قابل توجهی متفاوت هستند.

۶-۱-۷ رویکردهایی به جبران سازی سری قابل کنترل

همان‌گونه که در فصل ۵ شرح داده شد، دو رویکرد اصلی به جبران‌سازهای موازی مدرن مبتنی بر الکترونیک قدرت وجود دارد: یکی که از خازن‌های سوئیچ شونده با ترستور و راکتورهای کنترل شونده با ترستور استفاده می‌کند تا یک ادمیتانس راکتیو متغیر را تحقق بخشد، و دیگری که از یک کنورتور قدرت کلیدزنی بهره می‌برد تا به یک منبع ولتاژ سنکرون قابل کنترل شکل دهد. جبران‌ساز سری، معکوس جبران ساز موازی می‌باشد. جبران ساز موازی در عمل یک منبع جریان راکتیو کنترل شده است که برای کنترل ولتاژ خط انتقال به صورت موازی به آن متصل شده است. جبران‌ساز سری در عمل یک منبع ولتاژ کنترل شده است که برای کنترل جریان خط انتقال به صورت سری به آن متصل شده است. این معکوس بودن نشانه آن است که هر دو جبران ساز موازی نوع ادمیتانسی و نوع منبع ولتاژی، یک جبران ساز سری نظیر دارند. در واقع، همان طور که قبلاً تأکید شد، جبران ساز سری می‌تواند یا به صورت امپدانس راکتیو متغیر یا به صورت منبع ولتاژ کنترل شده، به صورت سری با خط اجرا شود. به دلیل این همزادی بین جبران‌سازهای موازی و سری، بسیاری از مفاهیم، مدار و رویکردهای کنترلی که در فصل ۵ مورد بحث قرار گرفتند، در بحث حاضر نیز با یک دیدگاه تکمیلی قابل اعمال هستند. یعنی این‌که در جبران سازی موازی پارامتر اصلی مرجع، ولتاژ انتقال است و در جبران سازی سری این پارامتر جریان خط است. بنابراین، عملکرد جبران‌ساز موازی از منظر ولتاژ انتقال و عملکرد جبران‌ساز سری از منظر جریان خط ملاحظه می‌شود. این رابطه تکمیلی در فصل حاضر از آن نظر مورد استفاده قرار می‌گیرد که اصول تثبیت شده در فصل ۵ برای جبران‌سازی موازی را بر این اساس ساخته، و آن‌ها را به جبران‌سازی سری گسترش دهیم، به طوری که یک درک کلی و دیدگاهی واحد برای نقش و کاربرد جبران سازی راکتیو قابل کنترل در انتقال توان الکتریکی ایجاد شود.

۶-۲ جبران‌سازهای سری نوع امپدانس متغیر

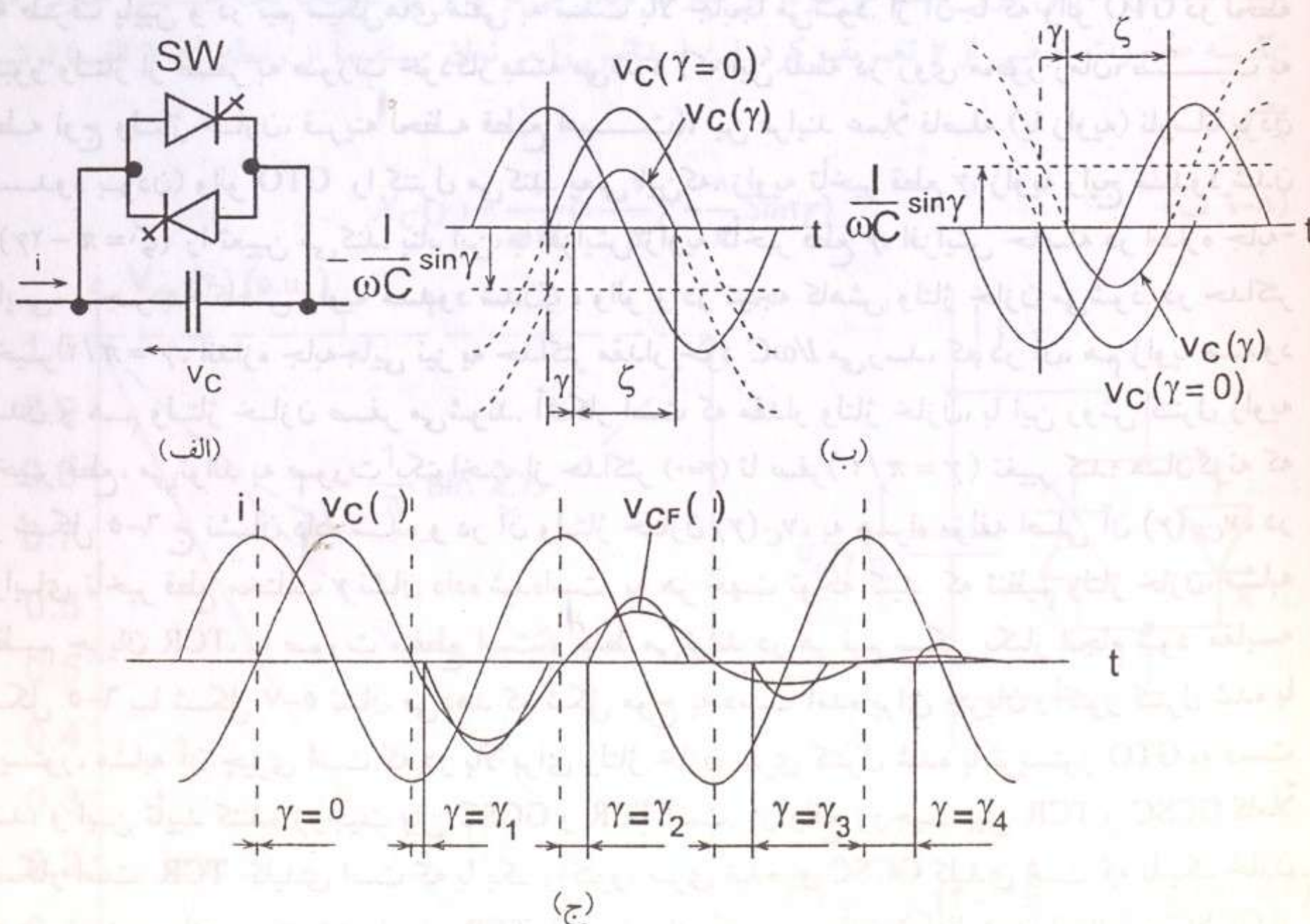
درست همانند جبران سازی راکتیو موازی، جبران‌سازهای سری نوع امپدانس متغیر از خازن‌های کنترل شده/سوئیچ شده با ترستور یا راکتورهای کنترل شده با ترستور و خازن ثابت، تشکیل شده‌اند.

۶-۲-۱ خازن سری کنترل شده با ترستور (GCSC)

یک خازن سری کنترل شده با ترستور GTO که به صورت ابتدایی توسط "کارادی"^۱ و دیگران در ۱۹۹۲ پیشنهاد شد، در شکل ۶-۵ الف نشان داده شده است. این طرح شامل یک خازن سری به صورت موازی با یک والو (یا کلید) ترستور GTO (یا مشابه) است که قابلیت قطع و وصل با فرمان را داراست.

طرح این جبران‌ساز از این نظر جالب است که ترکیب کاملی از TCR است که به خوبی تثبیت شده و دارای قابلیت منحصر به فرد تغییر مستقیم ولتاژ خازن از طریق کنترل زاویه تأخیر است. جدا از جذابیت نظری، این تکنیک، آن‌گونه که دیده خواهد شد، دارای برخی شایستگی‌های عملیاتی است و می‌تواند در بعضی از طرح‌های جبران‌ساز سری در آینده به کار گرفته شود، به خصوص هنگامی که ترستورهای GTO بزرگتر در دسترس قرار گیرند.

هدف طرح GCSC که در شکل ۶-۵ الف نشان داده شده، کنترل ولتاژ متناوب روی خازن v_c ، در جریان مفروض خط i است. بدیهی است که وقتی والو GTO ($s\omega$) بسته باشد، ولتاژ روی خازن صفر است، و هنگامی که والو باز است مقدار آن حداکثر است. برای کنترل کردن ولتاژ خازن، بستن و



شکل ۶-۵ شکل ابتدایی خازن سری کنترل شده با GTO (الف)، اصول زاویه تأخیر قطع (ب)، و شکل موج ولتاژ قابل حصول برای جبران سازی (ج).

باز کردن و الو در هر نیم سیکل، در هماهنگی با فرکانس سیستم ac ، انجام می‌شود. والو GTO (از طریق کنترل متناسب) دارای این قید است که هر گاه ولتاژ خازن به صفر برسد، به صورت خودکار بسته شود. بنابراین، لحظه قطع والو در هر نیم سیکل با یک زاویه تأخیر (قطع) γ ($0 \leq \gamma \leq \pi/2$) نسبت به اوج جریان خط، کنترل می‌شود. به شکل ۶-۵ ب مراجعه کنید که در آن، جریان خط i و ولتاژ خازن $v_c(\gamma)$ در $\gamma=0$ (والو باز) و در یک زاویه تأخیر قطع دلخواه γ ، در نیم سیکل مثبت و نیم سیکل منفی، نشان داده شده‌اند. هنگامی که والو sw در اوج جریان (ثابت) خط باز می‌شود ($\gamma=0$)، ولتاژ خازن v_c حاصله همان خواهد بود که در حالت ماندگار با یک کلید همیشه باز، به دست می‌آید. هنگامی که باز شدن والو به اندازه زاویه γ نسبت به اوج جریان خط، به تأخیر افتد، ولتاژ خازن می‌تواند با یک جریان خط تعریف شده $i(t) = I \cos \omega t$ به صورت زیر بیان شود:

$$v_c(t) = \frac{1}{C} \int_{\delta}^{\omega t} i(t) dt = \frac{1}{\omega C} (\sin \omega t - \sin \gamma) \quad (6-7)$$

از آن‌جا که والو در γ باز می‌شود و قرار است که در اولین صفر شدن ولتاژ بسته شود، رابطه (۶-۷) در فاصله $\gamma - \pi \leq t\omega \leq \gamma$ ، اعتبار دارد. در فاصله نیم سیکل‌های مثبت بعدی همان رابطه اعتبار دارد. در نیم سیکل‌های منفی بعدی، علامت جملات در رابطه (۶-۷) معکوس می‌شوند.

مقایسه رابطه (۶-۷) با رابطه (۵-۴) که برای جریان TCR به دست آمد، نشان دهنده آن است که دو رابطه در ظاهر مشابه هستند و می‌توانند به یک صورت تفسیر شوند.

در رابطه (۶-۷) عبارت $(I/\omega C) \sin \gamma$ صرفاً یک ثابت وابسته به γ است که به اندازه آن، ولتاژ سینوسی به دست آمده در $\gamma=0$ ، همان‌گونه که در شکل ۶-۵ ب نشان داده شده، در نیم سیکل‌های مثبت به طرف پایین و در نیم سیکل‌های منفی به سمت بالا جابجا می‌شود. از آن‌جا که والو GTO در لحظه عبور ولتاژ از صفر به صورت خودکار بسته می‌شود (که این نقطه در روی محور زمان، نسبت به نقطه اوج ولتاژ خازن، قرینه لحظه قطع است)، این فرایند عملاً فاصله (یا زاویه) نارسا بودن (مسدود بودن) والو GTO را کنترل می‌کند. یعنی این‌که، زاویه تأخیر قطع γ ، زاویه رایج مسدود شدن ζ ($\zeta = \pi - 2\gamma$) را تعیین می‌کند. بنابراین، با افزایش زاویه تأخیر قطع γ ، افزایش حاصله در اندازه جابه‌جایی، منجر به کاهش زاویه مسدود شدن ζ ، والو و در نتیجه کاهش ولتاژ خازن می‌شود. در حداکثر تأخیر $\gamma = \pi/2$ ، اندازه جابه‌جایی نیز به حداکثر مقدار خود $I/\omega C$ می‌رسد، که در آن، هم زاویه مسدود شدن و هم ولتاژ خازن صفر می‌شوند. آشکار است که مقدار ولتاژ خازن، با این روش کنترل زاویه تأخیر قطع، می‌تواند به صورت یکنواخت از حداکثر ($\gamma=0$) تا صفر ($\gamma = \pi/2$) تغییر کند؛ همان‌گونه که در شکل ۶-۵ ج نشان داده شده و در آن ولتاژ خازن $v_c(\gamma)$ ، به همراه مؤلفه اصلی آن $V_{CF}(\gamma)$ ، در زوایای تأخیر قطع مختلف γ نشان داده شده‌است. به هر جهت توجه کنید که تنظیم ولتاژ خازن، مشابه تنظیم جریان TCR، به صورت منقطع است و فقط می‌تواند در هر نیم سیکل یکبار انجام شود. مقایسه شکل ۶-۵ با شکل ۵-۷ نشان می‌دهد که شکل موج به دست آمده برای جریان راکتور کنترل شده با ترستور، مشابه آن چیزی است که در بالا برای ولتاژ خازن سری کنترل شده با ترستور GTO به دست آمد، و این تأیید کننده زوجیت بین GCSC و TCR است. در واقع زوجیت بین GCSC و TCR کاملاً آشکار است. TCR کلیدی است که با یک راکتور، سری شده، و GCSC کلیدی است که با یک خازن به صورت موازی بسته شده است. TCR با استفاده از یک منبع ولتاژ (ولتاژ شینه انتقال) و GCSC از طریق یک منبع جریان (جریان خط انتقال) تغذیه می‌شوند. عملکرد والو TCR به این صورت است که در جریان صفر بسته می‌شود؛ این عملکرد در مورد GCSC در ولتاژ صفر صورت می‌گیرد. TCR با یک تأخیر وصل نسبت به اوج ولتاژ اعمال شده، که فاصله هدایت والو را تعریف می‌کند، کنترل می‌شود.

GCSC با یک تأخیر قطع نسبت به پیک جریان خط، که فاصله مسدود بودن والو را تعریف می‌کند، کنترل می‌شود. TCR جریان ناشی از یک منبع ولتاژ ثابت را در یک القاگر ثابت کنترل می‌کند؛ بنابراین نقش یک ادمیتانس راکتیو متغیر را به عنوان بار برای این منبع ایفا می‌کند. GCSC ولتاژ ایجاد شده توسط یک منبع جریان ثابت بر روی یک خازن ثابت را کنترل می‌کند؛ بنابراین نقش یک امپدانس راکتیو متغیر را برای این منبع ایفا می‌کند.

زوجیتی که در بالا به اثبات رسید، استفاده از نتایج تحلیلی ارائه شده در روابط (۵-۵ الف)، (۵-۵ ب) و (۵-۶) و گسترش جنبه‌های ساختاری و عملیاتی به کار رفته برای TCR در فصل ۵ را، برای GCSC و اجزاء خازنی سری آن، ممکن می‌سازد. بنابراین، بر اساس رابطه (۵-۵ الف) دامنه $V_{CF}(\gamma)$ مربوط به مؤلفه اصلی ولتاژ خازن $v_{CF}(\gamma)$ می‌تواند به عنوان تابعی از زاویه γ بیان شود:

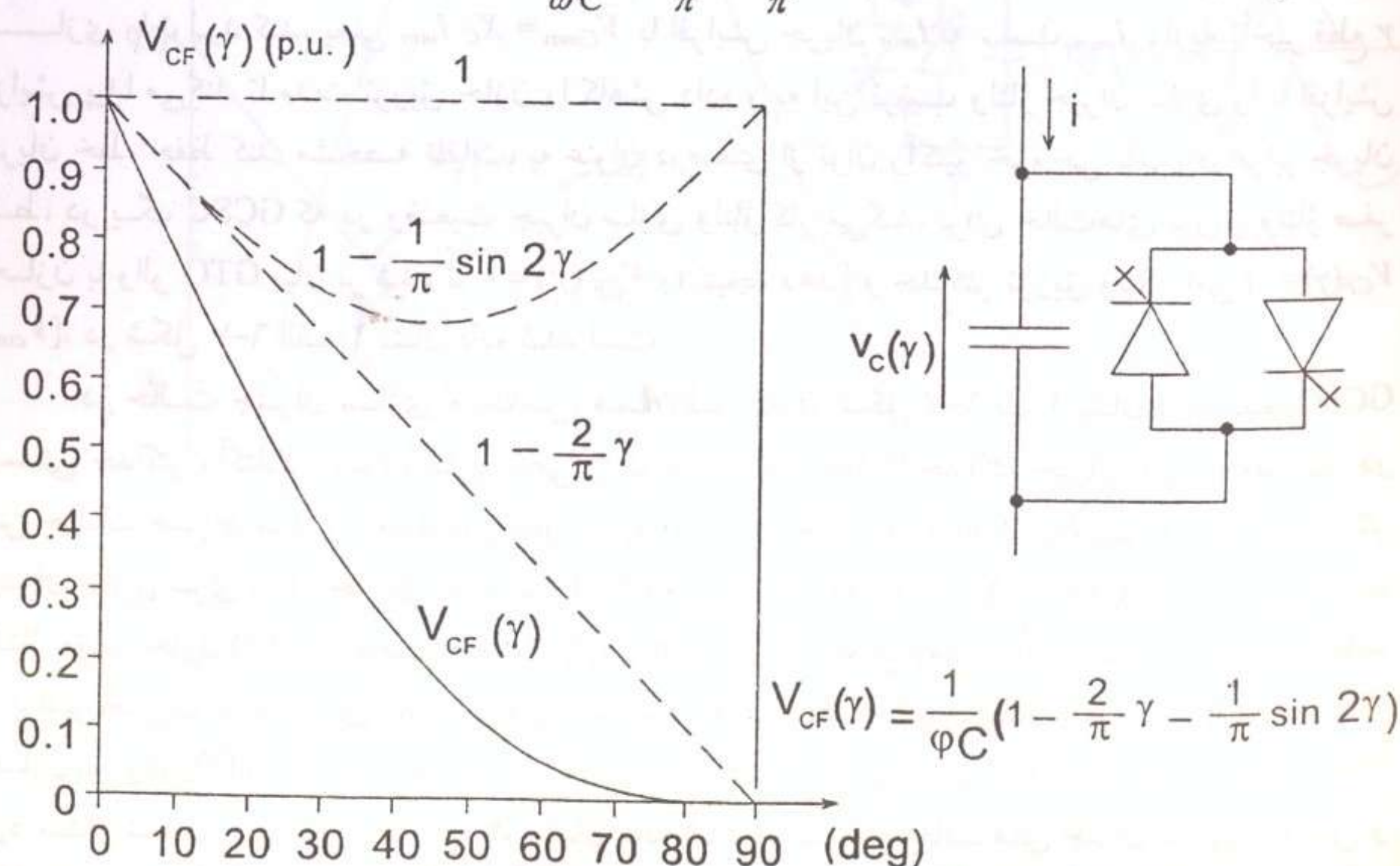
$$V_{CF}(\gamma) = \frac{I}{\omega C} \left(1 - \frac{2}{\pi} \gamma - \frac{1}{\pi} \sin 2\gamma \right) \quad (6-8 \text{ الف})$$

که در آن I دامنه جریان خط، C ظرفیت خازن کنترل شده با ترستور GTO، و ω فرکانس زاویه‌ای سیستم ac است.

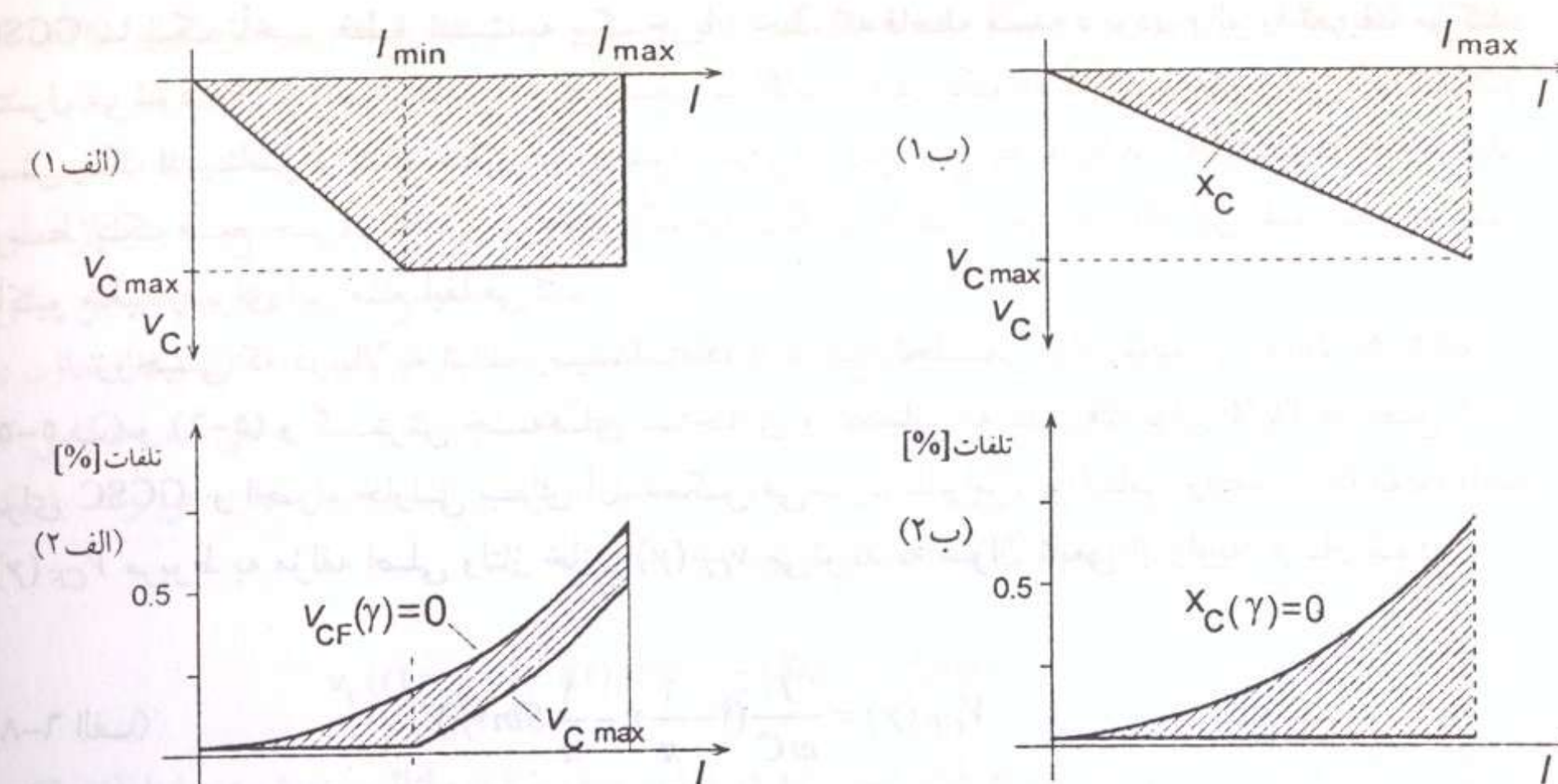
تغییرات دامنه $V_{CF}(\gamma)$ ، که نسبت به حداکثر ولتاژ $V_{CFmax} = I/\omega C$ نرمال شده، در شکل ۶-۶ بر حسب زاویه تأخیر γ رسم شده است.

بر اساس شکل ۶-۶، با تغییر مؤلفه اصلی ولتاژ خازن در یک جریان خط ثابت، GCSC می‌تواند به عنوان یک امپدانس خازنی متغیر در نظر گرفته شود. در واقع، برای یک مقدار معلوم زاویه γ ، یک امپدانس خازنی مؤثر یافت می‌شود؛ به عبارت دیگر می‌توان برای GCSC یک امپدانس خازنی مؤثر X_C به صورت تابعی از γ تعریف کرد. این امپدانس را می‌توان مستقیماً از رابطه (۶-۸ الف) نوشت، یعنی:

$$X_C(\gamma) = \frac{1}{\omega C} \left(1 - \frac{2}{\pi} \gamma - \frac{1}{\pi} \sin 2\gamma \right) \quad (6-8 \text{ ب})$$



شکل ۶-۶ مؤلفه اصلی ولتاژ خازن سری در برابر زاویه تأخیر قطع γ



شکل ۶-۷ مشخصه قابل حصول $V-I$ (ولتاژ جبران سازی در برابر جریان خط) در GCSC هنگام کار در وضعیت کنترل ولتاژ (الف) و کنترل راکتانس (ب)، و مشخصه های تلفات در برابر جریان خط مربوطه (به ترتیب الف ۲ و ب ۲).

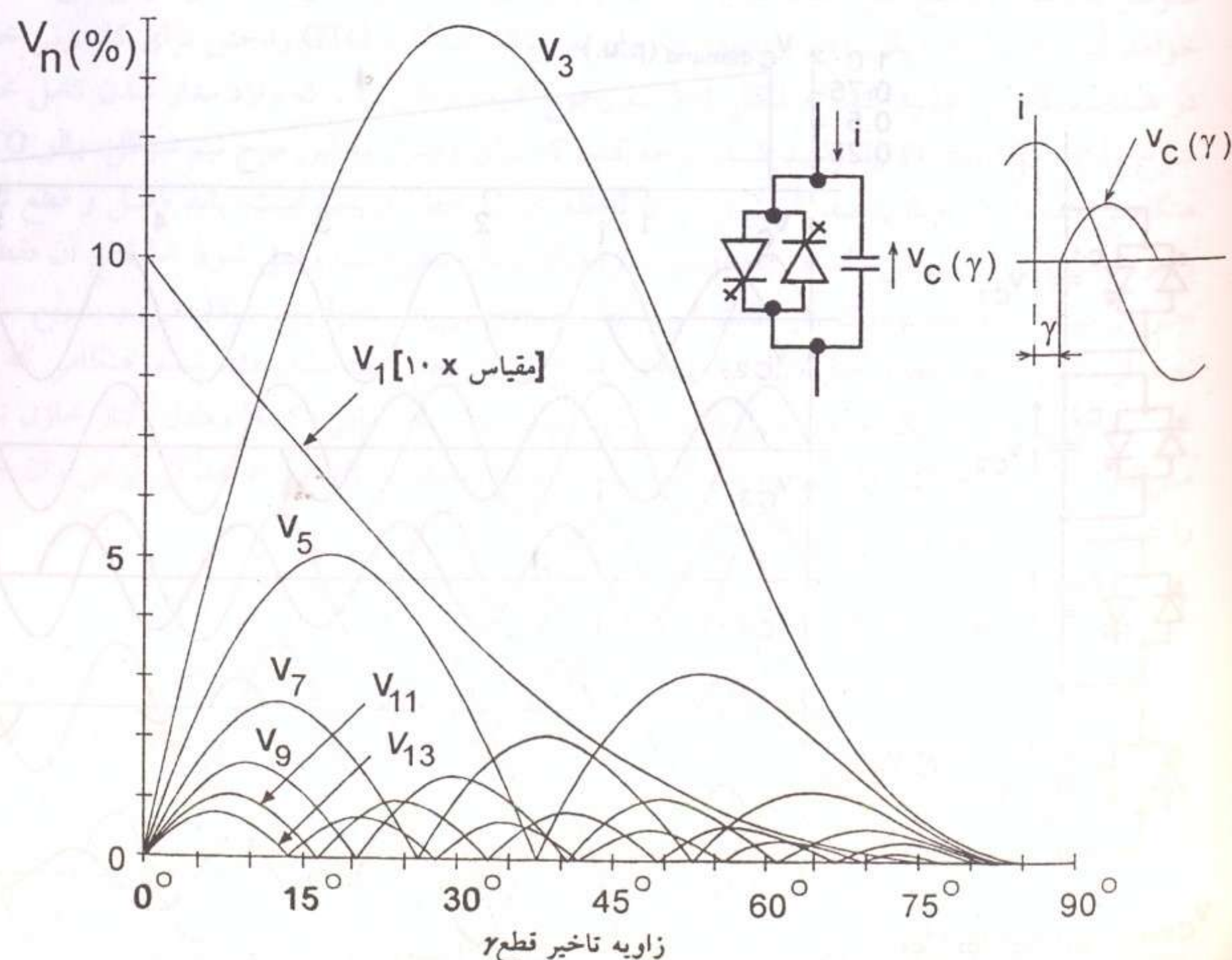
آشکار است که، ادمیتانس $X_C(\gamma)$ مطابق همان روش مؤلفه اصلی ولتاژ خازن $V_{CF}(\gamma)$ بر حسب γ تغییر می‌کند.

در کاربرد عملی GCSC می‌تواند یا برای کنترل ولتاژ جبران سازی $V_{CF}(\gamma)$ یا برای کنترل راکتانس جبران سازی $X_C(\gamma)$ مورد استفاده قرار گیرد. در حالت مربوط به ولتاژ جبران سازی، GCSC باید مقدار نامی ولتاژ جبران سازی را در برابر کاهش جریان خط، در یک فاصله تعریف شده $I_{min} \leq I \leq I_{max}$ همان‌طور که در شکل ۶-۷ الف ۱ نشان داده شده، حفظ کند. در این وضعیت جبران سازی راکتانس خازنی X_C طوری انتخاب شده است که با جریان I_{min} مقدار نامی ولتاژ جبران سازی را تولید کند، یعنی $V_{Cmax} = X_C I_{min}$. با افزایش جریان I_{min} به سمت I_{max} زاویه تأخیر قطع γ افزایش پیدا می‌کند تا مدت تزریق خازن را کاهش داده و به این ترتیب ولتاژ جبران سازی را با افزایش جریان خط، حفظ کند. مشخصه تلفات، به عنوان درصدی از توان راکتیو خروجی نامی، در برابر جریان خط، در یک GCSC که در وضعیت جبران سازی ولتاژ کار می‌کند، برای حالت‌های تزریق ولتاژ صفر [خازن با والو GTO میان بر شده تا $V_{CF}(\gamma) = 0$ را نتیجه دهد] و حداکثر تزریق ولتاژ نامی $V_{CF}(\gamma) = V_{Cmax}$ ، در شکل ۶-۷ الف ۲ نشان داده شده است.

در حالت جبران سازی امپدانس، همان‌طور که در شکل ۶-۷ ب ۱ نشان داده شده، GCSC بایستی حداکثر راکتانس جبران سازی نامی را در هر جریان خط تا حداکثر جریان نامی، حفظ کند. در این حالت جبران سازی، امپدانس خازنی به صورتی انتخاب می‌شود ($X_C = V_{Cmax}/I_{max}$) که حداکثر جبران سازی سری را در جریان نامی - که GCSC می‌تواند در محدوده $0 \leq X_C(\gamma) \leq X_C$ ، با کنترل کردن ولتاژ مؤثر خازن $V_{CF}(\gamma)$ تحت رابطه $X_C(\gamma) = V_{CF}(\gamma)/I$ تغییر دهد- تأمین نماید. مشخصه تلفات در برابر جریان خط برای این وضعیت عملکرد GCSC، در حالت‌های امپدانس جبران سازی صفر (خازن با والو GTO میان بر شده) و حداکثر امپدانس جبران سازی (والو GTO باز است و خازن کاملاً وارد مدار شده)، در شکل ۶-۷ ب ۲، نشان داده شده است. البته حالت‌های جبران سازی امپدانس و ولتاژ، به وسیله عملکرد کنترلی، در محدوده مقدار نامی خازن سری کنترل شده، قابل جابه‌جایی هستند.

باید توجه داشت، برای آن‌که محدوده‌های عملکرد $V-I$ که از نظر تئوری تعریف شده و در شکل ۶-۷ الف ۱ و ۶-۷ الف ۲ نشان داده شده‌اند به واقعیت به پیوندند، قطعات قدرتی به کار رفته در GCSC (والو GTO و خازن) بایستی مقدار نامی ولتاژ و جریان متناسب را دارا باشند. در کاربردهای عملی، اغلب لازم است که جبران‌سازهای سری مقادیر نامی بیشتری در کوتاه مدت داشته باشند، تا بتوانند در معرض جریان‌های به مراتب بیشتری نسبت به حداکثر جریان نامی کوتاه مدت خط، در زمان وقوع خطا و سایر اغتشاش‌ها قرار گیرند. چنین جریان‌های خطایی معمولاً بسیار بزرگتر از جریان‌هایی هستند که والو GTO می‌تواند عبور دهد. به هر حال اگر به عنوان یک عامل حفاظتی والو قطع شود، آن‌گاه ولتاژ روی خازن GCSC می‌تواند هم برای خازن و هم برای والوی که موازی بسته شده بیش از حد شود. لذا، در عمل معمولاً لازم است که GCSC از خارج، یا به وسیله یک برق-گیر ولتاژ MOV یا دستگاه‌های دیگر محدود کننده ولتاژ، یا به وسیله یک کلید میان بر مناسب (به همراه یک کلید اتوماتیک میان بر کننده پشتیبان)، حفاظت شود، تا به این وسیله اطمینان حاصل شود که از مقدار نامی تعریف شده برای ولتاژ و جریان GCSC، تحت هر شرایط کاری تجاوز نخواهد شد. خواننده بایستی توجه داشته باشد که این الزام حفاظتی منحصر به GCSC نیست. در واقع عملاً همه جبران‌سازهایی که به صورت سری بسته می‌شوند، به علاوه خازن‌های سری متداول که دارای کنترل نیستند، نیاز به ترتیبات حفاظتی مشابه دارند.

کنترل زاویه تأخیر قطع GCSC، درست مثل کنترل زاویه تأخیر وصل TCR، هارمونیک تولید می‌کند. در نیم سیکل‌های مشابه مثبت و منفی، فقط هارمونیک‌های فرد تولید می‌شوند. دامنه این هارمونیک‌ها تابعی از زاویه γ هستند و براساس رابطه (۶-۵)، می‌توانند به صورت زیر بیان شوند:



شکل ۶-۸ دامنه هارمونیک‌های ولتاژ، بر حسب درصد‌های حداکثر ولتاژ اصلی خازن در برابر زاویه تأخیر قطع γ .

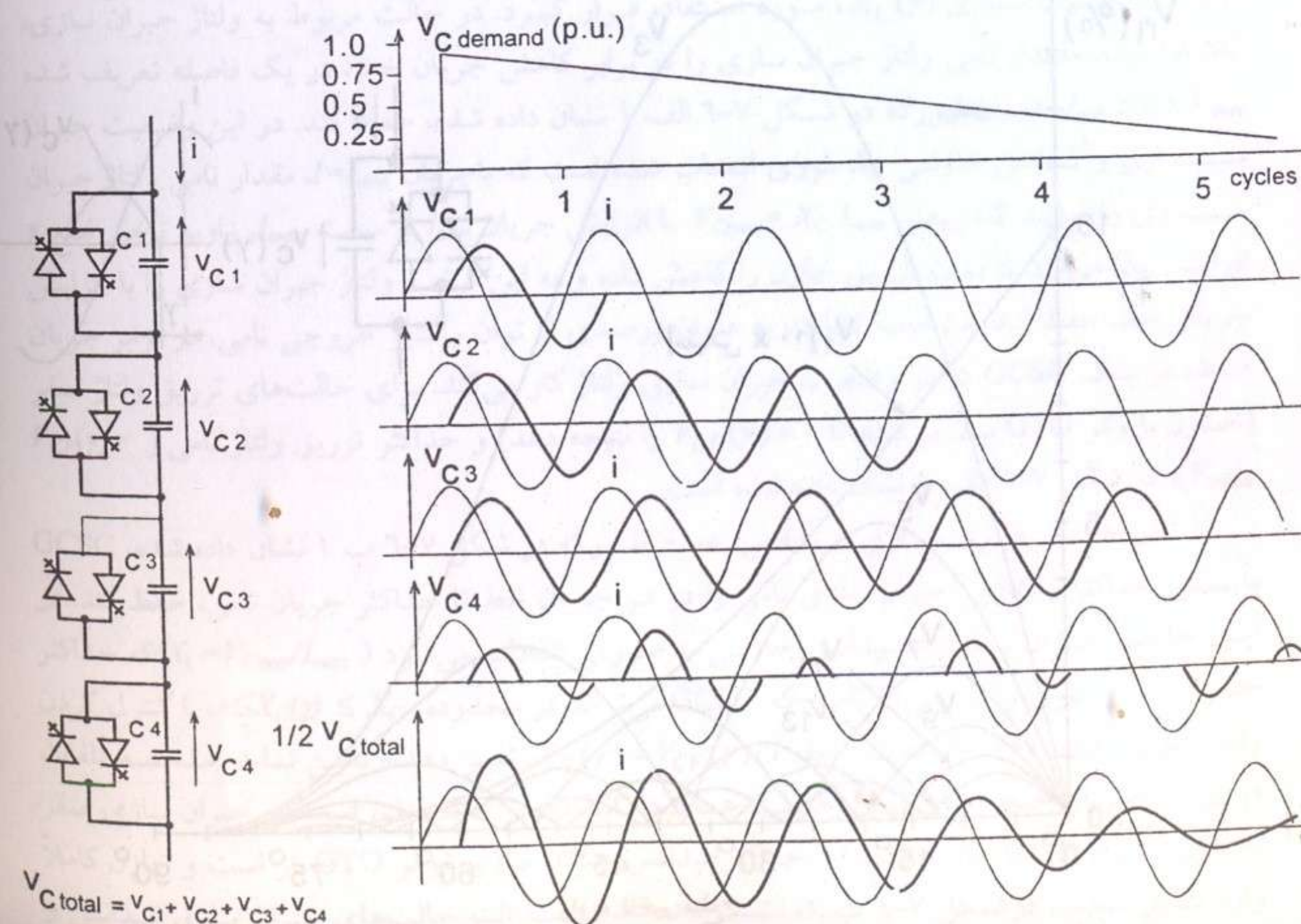
$$V_{cn}(\gamma) = \frac{I}{\omega C \pi} \left\{ \frac{\sin \gamma \cos(n\gamma) - n \cos \gamma \sin(n\gamma)}{n(n^2 - 1)} \right\} \quad (6-9)$$

که در آن $n = 2k + 1$ و $k = 1, 2, 3, \dots$

تغییر دامنه هارمونیک‌ها، که به عنوان درصدی از حداکثر مؤلفه ولتاژ خازن بیان شده، در شکل ۶-۸، در برابر γ رسم شده است.

حذف هارمونیک‌های ضریب ۳ و دیگر خانواده هارمونیک‌ها از ولتاژ خازن با روش‌های معمولی عملکرد سه فاز و ساختارهای مداری چند پالسه احتمالاً برای GCSC عملی نیست؛ زیرا آن رویکردها معمولاً نیاز به استفاده از ترانسفورماتور دارد. GCSC مثل دیگر خازن‌های سری جبران ساز، اگر در یک زمینه فشار قوی با سطح عایقی کافی به کار گرفته شود، معمولاً به صورت مستقیم، بدون هرگونه کوپلینگ مغناطیسی، به صورت سری با خط قرار می‌گیرد. اثر این هارمونیک‌ها، به خصوص اگر امپدانس خط انتقال در فرکانس هارمونیک‌های موردنظر نسبتاً بزرگ باشد، می‌تواند نسبتاً کم باشد. به هر حال، در صورت لزوم، مقدار هارمونیک‌های تولید شده به وسیله GCSC، می‌تواند به صورت مؤثری، با کاربرد تکمیلی روش "کنترل مرحله‌ای" که برای کاهش هارمونیک‌های تولید شده توسط TCR در بخش ۱-۲-۵ معرفی شده، کاهش یابد.

یادآوری می‌شود که سابقاً این روش با استفاده از m ($m \geq 2$) TCR موازی بسته شده، که هر کدام دارای $1/m$ مقدار نامی کلی مورد نیاز هستند، انجام می‌شد. راکتورها به صورت "مرحله‌ای" کنترل می‌شوند؛ یعنی فقط یکی از m راکتور از نظر زاویه تأخیر کنترل می‌شود، و هر یک از $m-1$ راکتور باقی مانده یا کاملاً "وصل" یا کاملاً "قطع" هستند.



شکل ۶-۹ شکل موج‌های نشان دهنده روش کنترل "متوالی" چهار بانک GCSC متصل شده به صورت سری برای کسب کاهش هارمونیک.

روش کنترل مرحله‌ای به طور چشمگیری مناسب GCSC است. از زوجیت آن با TCR نتیجه می‌شود که نیاز به استفاده از m ($m \geq 2$) GCSC سری بسته شده دارد، که هر کدام $1/m$ کل مقدار نامی (ولتاژ) مورد نیاز را، دارا هستند. همان‌گونه که در شکل ۶-۹ نشان داده شده، همه m خازن به جزء یکی به صورت "مرحله‌ای" کنترل می‌شوند تا در مدار قرار گیرند (والو قطع باشد) یا میان بر شوند (والو وصل باشد). یک خازن از نظر زاویه تأخیر قطع، کنترل می‌شود تا کنترل ولتاژ را برای کل GCSC در همه محدوده کاری، تسهیل نماید. با چنین ترتیبی، دامنه هر هارمونیک تولید شده آشکارا با یک ضریب m نسبت به حداکثر کل مؤلفه اصلی ولتاژ جبران سازی، کاهش می‌یابد.

توجه کنید که برخلاف وضعیت TCR، که در آن به دلایل اقتصادی فقط تعداد نسبتاً کمی (معمولاً حداکثر ۲) شاخه موازی به کار برده می‌شد، در به وجود آوردن یک GCSC عملی با استفاده از تقسیم نمودن یک والو تکی فشار قوی به چهار یا تعداد بیشتری قسمت سری، هیچ‌گونه زیان اقتصادی مهمی وجود نداشته و حتی می‌تواند یک ترجیح فنی به حساب آید.

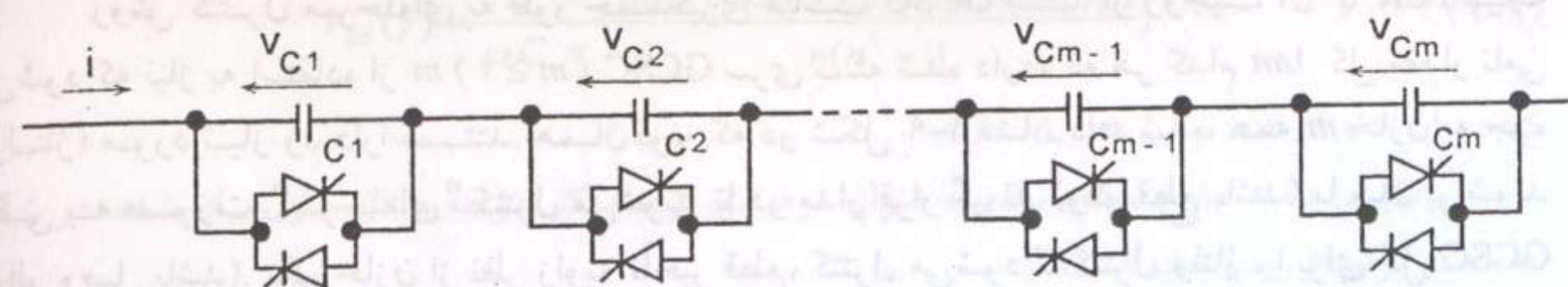
تلفات GCSC که به صورت مرحله‌ای کنترل شده باشد، نسبت عکس با توان راکتیو خروجی $I_{rated}^2 \times X_{GCSC}$ دارد. هنگامی که همه خازن‌های GCSC کنترل شده به صورت مرحله‌ای، میان بر شده باشند (والوهای GTO کاملاً وصل باشند) تلفات حداکثر است (حدود ۰/۷ درصد توان راکتیو نامی خروجی)، و هنگامی که همه خازن‌ها کاملاً در مدار باشند (همه والوهای GTO قطع باشند)، تلفات قابل صرف‌نظر کردن است.

با توجه به عمل "قطع و وصل" همه m بخش GCSC به جز یکی، طبیعتاً این سوال پیش می‌آید که: چرا والوهای GTO را در $m-1$ بخش با ترستورهای متداول که ارزان قیمت‌تر هستند عوض نکنیم؟ پاسخ این است که با استفاده از والوهای ترستور متداول، عملکرد والو کلی متفاوت خواهد شد. به عبارت دیگر، والو ترستور متداول نمی‌تواند عملکرد GTO را حتی برای کلیدزنی خازن در هدایت کامل، تقلید کند. به شکل ۶-۵ ب رجوع کنید. فرض کنید که وارد مدار شدن کامل خازن موج ولتاژ V_C ($\gamma = 0$) را تولید کند. توجه کنید که برای وصول به این موج نیم سیکل، والو GTO، هنگامی که ولتاژ خازن صفر است و در آن لحظه جریان خط در پیک است، باید وصل و قطع شود. والو ترستور متداول می‌تواند در لحظه مورد لزوم که ولتاژ صفر است وصل شود، اما قطع آن فقط در جریان صفر خواهد بود، که در حالت اخیر، قطع صحیح می‌بایست یا ربع سیکل قبل و یا ربع سیکل بعد از ولتاژ صفر اتفاق می‌افتد. به علاوه آن‌چنان‌که در بخش بعد نشان داده شده، هنگامی که والو ترستور متداول در یک جریان صفر قطع می‌شود، یک ولتاژ dc اضافی، کاملاً معادل ولتاژ خازن تولید می‌کند، که فشار حداکثر ولتاژ بر روی والو و تأخیر زمانی ایجاد شده‌ای را که بعد از آن می‌توان خازن را دوباره میان برکرد، دو برابر می‌کند.

۶-۲-۲ خازن سری سوئیچ شده با ترستور (TSSC)

آرایش اساسی مدار خازن سری سوئیچ شونده با ترستور، در شکل ۶-۱۰ نشان داده شده است. این آرایش شامل تعدادی خازن سری است که هر کدام با یک والو دارای مقدار نامی مناسب، موازی شده و این والوهای میان برکننده نیز از رشته‌ای از ترستورهای موازی که به صورت معکوس نسبت به هم بسته شده‌اند تشکیل شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، این ساختار مشابه ساختار مداری GCSC با عملکرد مرحله‌ای است که در شکل ۶-۹ نشان داده شده، اما عملکرد آن، به دلیل محدودیت‌هایی که کلیدزنی والوهای دارای ترستور متداول اعمال می‌کند، متفاوت است.

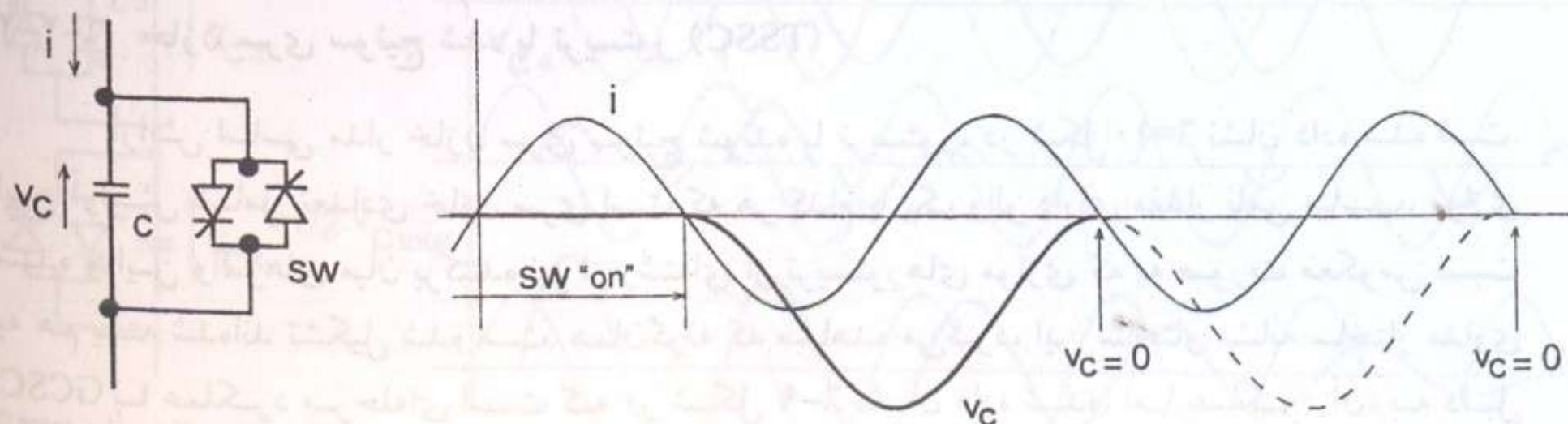
اساس عملکرد TSSC ساده است: درجه جبران سازی سری با روشی پله‌ای، با افزایش یا کاهش تعداد خازن‌های سری که در مدار قرار می‌گیرند، کنترل می‌شود. هر خازن با قطع والو



شکل ۶-۱۰ طرح ابتدایی خازن سری سوییچ شده با تریستور

تریستوری مربوطه وارد و با وصل آن، میان بر شده و از مدار خارج می‌شود. والو تریستور به صورت "طبیعی" جابه‌جایی انجام می‌دهد؛ یعنی این‌که وقتی جریان صفر می‌شود، والو قطع می‌گردد. بنابراین، خازن فقط در زمان صفر شدن جریان خط می‌تواند توسط والو تریستور وارد مدار شود. از آن‌جا که وارد شدن خازن در جریان خط صفر انجام می‌شود، نیم سیکل کامل جریان خط، خازن را از صفر تا حداکثر شارژ می‌کند و نیم سیکل بعدی با پلاریته مخالف جریان خط، آن را از حداکثر تا صفر تخلیه خواهد کرد. این مطلب در شکل ۶-۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، وارد شدن خازن در جریان خط صفر، که در اثر محدودیت‌های کلیدزنی والو تریستور صورت گرفته، منجر به یک ولتاژ dc اضافی می‌شود که برابر دامنه ولتاژ ac خازن است. به منظور به حداقل رساندن جریان ضربه اولیه در والو و حالت‌های گذرای مربوطه در مدار، والو تریستور بایستی برای میان بردن، فقط هنگامی که ولتاژ خازن صفر است وصل شود. با ولتاژ dc اضافی، این الزام می‌تواند موجب تأخیری تا یک نیم سیکل کامل شود، که ایجاد کننده محدودیت نظری برای زمان پاسخ قابل وصول TSSC است.

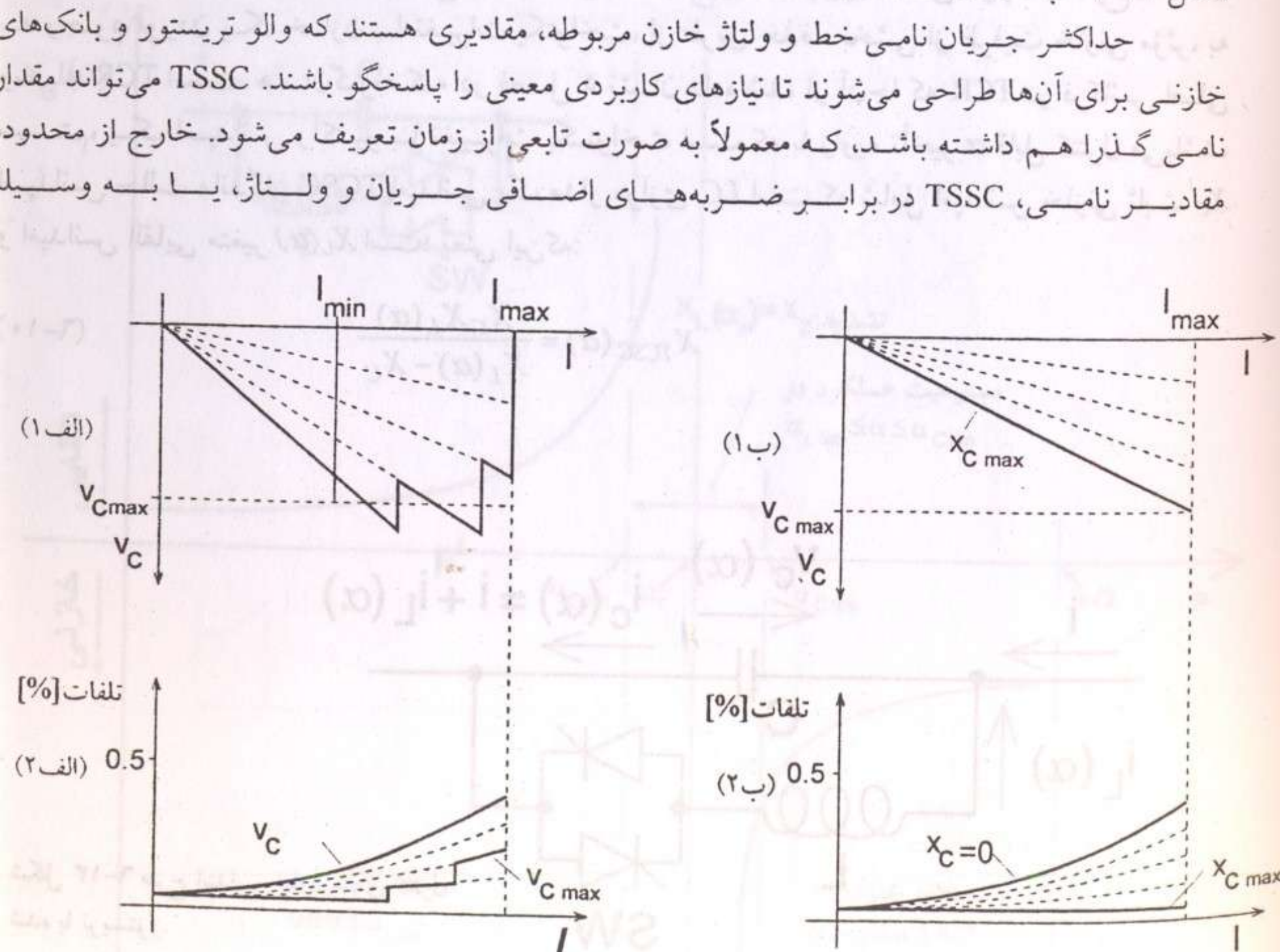
TSSC می‌تواند درجه جبران سازی سری را با وارد کردن یا میان بردن خازن‌های سری، کنترل کند، اما نمی‌تواند مشخصه طبیعی خط جبران سازی شده با خازن سری را عوض کند. معنی این سخن آن است که درجه تا حد کافی زیادی از جبران سازی TSSC می‌تواند، درست مثل خازن معمولی، باعث تشدید زیر سنکرون شود. در اصل، کلیدزنی TSSC می‌تواند به منظور مقابله با نوسانات زیر سنکرون تنظیم شود. به هر حال، با در نظر گرفتن تأخیرات نسبتاً طولانی که کلیدزنی با آن مواجه است، این تنظیم، اگر اثر عکس ندهد، جز در انتهای پایین باند فرکانس زیر سنکرون، به نظر فاقد تأثیر می‌رسد. بنابراین، طرح ساده TSSC که در شکل ۶-۱۰ نشان داده شده، در کاربردهای حساس که در آن‌ها درجه زیاد جبران سازی مورد نیاز است و خطر تشدید زیر سنکرون وجود دارد، استفاده نخواهد شد. با این حال، TSSC می‌تواند برای کنترل سیلان توان و میراسازی نوسانات توان که در آن‌ها سرعت پاسخ مورد نیاز متوسط است، به کار رود.

SW اجازه می‌یابد که در $V_c=0$ وصل شود

شکل ۶-۱۱ نمایش افزایش ولتاژ خازن ناشی از محدودیت ورود در جریان صفر خط.

مشخصه اصلی $V-I$ یک TSSC با چهار قطعه جبران سازی، که به صورت سری متصل شده‌اند و برای کنترل ولتاژ جبران سازی استفاده می‌شوند در شکل ۶-۱۲ الف ۱ نشان داده شده است. برای این حالت جبران سازی، راکتانس بانک خازنی طوری انتخاب شده که به طور متوسط، مقدار نامی ولتاژ جبران سازی، $V_{Cmax} = 4X_C I_{min}$ ، را در برابر جریان خط کاهش یابنده در فاصله تعریف شده $I_{min} \leq I \leq I_{max}$ ، تولید کند. با افزایش جریان I_{min} به سمت I_{max} بانک‌های خازنی به تدریج با والوهای تریستور مربوطه میان بر می‌شوند، تا راکتانس خازنی کلی به صورت پله‌ای کاهش یابد و به این طریق ولتاژ جبران سازی با افزایش جریان خط، حفظ شود. مشخصه تلفات به عنوان درصدی از توان راکتیو نامی خروجی، در برابر جریان خط، برای وقتی که TSSC در حالت جبران سازی ولتاژ کار می‌کند، در حالت تزریق ولتاژ صفر (همه خازن‌ها میان بر شده‌اند) و حالت تزریق ولتاژ برای حفظ حداکثر ولتاژ نامی (خازن‌ها به تدریج میان بر شده‌اند)، در شکل ۶-۱۲ الف ۲ نشان داده شده است.

در حالت جبران سازی امپدانس، TSSC برای حفظ حداکثر مقدار نامی راکتانس جبران سازی در هر جریان خط تا حداکثر آن، همان‌گونه که در شکل ۶-۱۲ ب ۱ نیز نشان داده شده، به کار می‌رود. در این حالت جبران سازی، امپدانس خازنی طوری انتخاب می‌شود که حداکثر جبران سازی سری را، در مقدار جریان نامی $X_C = V_{Cmax} / I_{max}$ ، که TSSC می‌تواند به صورت پله‌ای با میان بردن یک یا چند بانک خازنی تغییر دهد، تأمین نماید. مشخصه تلفات در برابر جریان خط برای این حالت جبران سازی، در جبران سازی امپدانس صفر (که همه بانک‌های خازنی با والوهای تریستور میان بر شده‌اند) و جبران سازی امپدانس حداکثر (همه والوهای تریستور قطع هستند و همه خازن‌ها وارد شده‌اند)، در شکل ۶-۱۲ ب ۲ نشان داده شده است.



شکل ۶-۱۲ مشخصه قابل حصول $V-I$ (ولتاژ جبران سازی در برابر جریان خط) در TSSC هنگام کار در وضعیت کنترل ولتاژ (الف ۱) و کنترل راکتانس (ب ۱)، و مشخصه های تلفات در برابر جریان خط مربوطه (به ترتیب الف ۲ و ب ۲).

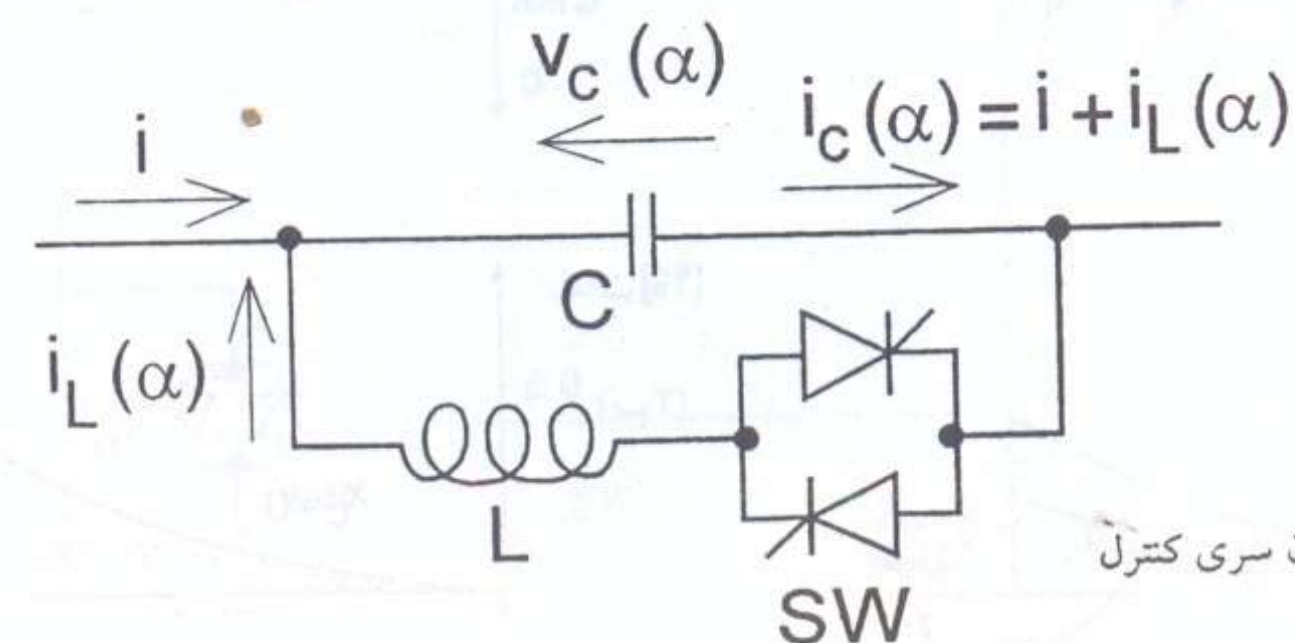
حفاظت بیرونی روی خازن و والو موازی آن و یا با افزایش مقدار نامی در خود والو در عمل میان برسازی، حفاظت می‌شود.

محدودیت‌های اعمال شده ناشی از ضعف‌های فیزیکی دستگاه در شرایط وصل ترستورها (مثل di/dt و مقدار جریان ضربه)، استفاده از راکتور محدوده کننده جریان به صورت سری با والو TSSC را در عمل ضروری می‌کند، تا بتوان عمل میان برسازی، یا راه اندازی اشتباه را، که می‌تواند والو را بر روی یک خازن دارای شارژ کامل با ولتاژی بیش از $2p.u.$ وصل کند، اداره نمود. به هر حال اگر در ساختار TSSC، یک راکتور به صورت سری با والو قرار گیرد، آن‌گاه به صورتی که در بخش بعدی توضیح داده شده، مدار قدرت به دست آمده، انتخاب‌های کنترلی جدیدی را عرضه می‌کند که می‌تواند عملکرد و مشخصات کارکردی جبران ساز سری را به نحو چشمگیری بهبود بخشد.

۶-۲-۳ خازن سری کنترل شده با ترستور (TCSC)

طرح اصلی خازن سری کنترل شده با ترستور، که در سال ۱۹۸۶ به وسیله "ویتایاتیل" و دیگران، به عنوان روش "تنظیم سریع امپدانس شبکه" پیشنهاد شد، در شکل ۶-۱۳ نشان داده شده است. این طرح شامل خازن جبران ساز سری است که با راکتور کنترل شده با ترستور موازی شده است. در اجرای عملی TCSC، چندین جبران ساز از این نوع می‌توانند به صورت سری به هم متصل شوند تا ولتاژ نامی و مشخصات عملکردی مطلوب به دست آید. این آرایش از نظر ساختار، مشابه TSSC است و اگر امپدانس راکتور آن، X_L به اندازه کافی کوچکتر از امپدانس خازن، X_C باشد، می‌تواند مثل TSSC، به صورت قطع/وصل عمل کند. به هر حال، نظریه اصلی در پشت طرح TCSC، به وجود آوردن یک خازن با تغییرات یکنواخت، از طریق حذف بخشی از ظرفیت خازنی مؤثر، به وسیله TCR است. همان‌گونه که در فصل ۵ نشان داده شد، از آن‌جا که TCR در فرکانس اصلی سیستم، یک امپدانس راکتیو با تغییرات یکنواخت است که با زاویه تأخیر α قابل کنترل می‌باشد، امپدانس حالت ماندگار TCSC امپدانس یک مدار موازی LC است که شامل امپدانس خازنی ثابت X_C و امپدانس القایی متغیر $X_L(\alpha)$ است؛ یعنی این‌که:

$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{X_C X_L(\alpha)}{X_L(\alpha) - X_C} \quad (6-10)$$



شکل ۶-۱۳ طرح ابتدایی خازن سری کنترل شده با ترستور.

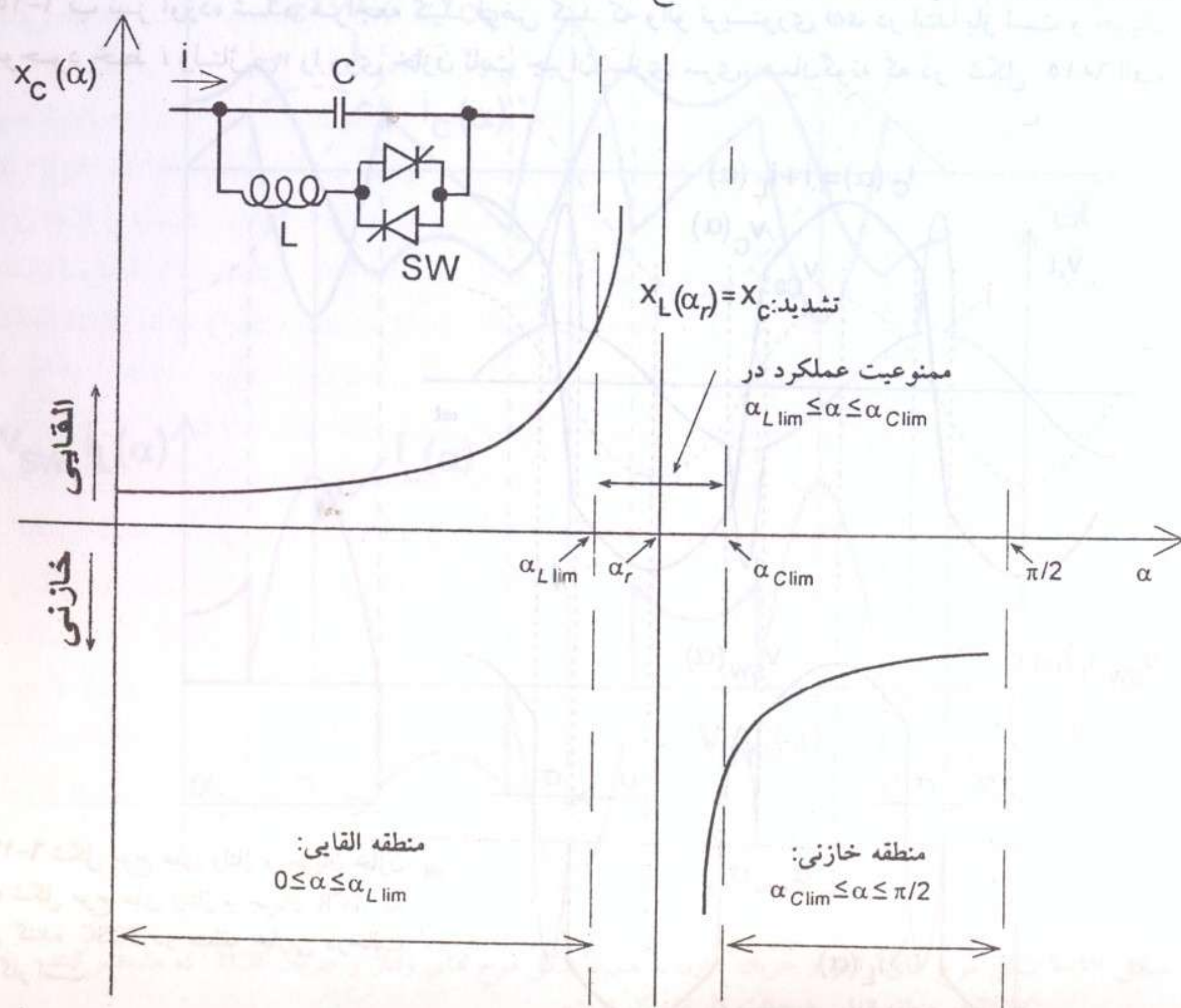
که از رابطه (۵-۵) ب):

$$X_L(\alpha) = X_L \frac{\pi}{\pi - 2\alpha - \sin \alpha}, \quad X_L \leq X_L(\alpha) \leq \infty \quad (6-11)$$

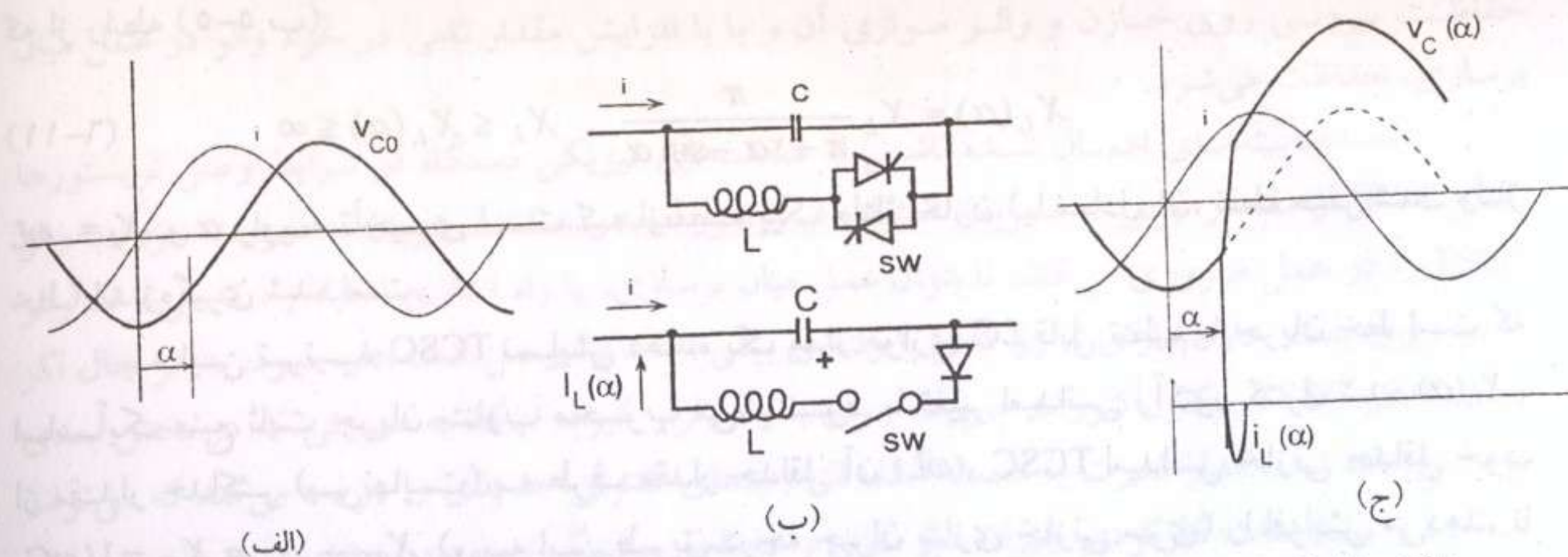
$X_L = \omega L$ و α زاویه تأخیری است که از نقطه پیک ولتاژ خازن (یا معادل آن، نقطه صفر شدن ولتاژ خط) اندازه‌گیری شده است.

به این ترتیب، TCSC نمایش دهنده یک مدار موازی LC قابل تنظیم با جریان خط است که اساساً یک منبع ثابت جریان متناوب محسوب می‌شود. با تغییر امپدانس راکتور کنترل شده $X_L(\alpha)$ ، از مقدار حداکثر (بی‌نهایت) به طرف مقدار حداقل آن (ωL)، TCSC امپدانس خازنی حداقل خود، $X_{TCSC, \min} = X_C = 1/\omega C$ (و به این طریق درجه جبران سازی خازنی سری) را افزایش می‌دهد، تا حالت تشدید موازی در $X_C = X_L(\alpha)$ به وجود آید و $X_{TCSC, \max}$ از نظر تئوری بی‌نهایت شود. با کاهش بیشتر $X_L(\alpha)$ ، امپدانس TCSR یعنی $X_{TCSC}(\alpha)$ القایی می‌شود و در $\alpha = 0$ به حداقل مقدار خود $X_L X_C / (X_L - X_C)$ می‌رسد، که در آن‌جا در واقع خازن به وسیله TCR میان بر می‌شود. بنابراین، با آرایش متداول TCSC که در آن، امپدانس راکتور TCR یا X_L کوچکتر از امپدانس خازنی X_C است، TCSC دارای دو محدوده عملکرد حول نقطه تشدید مدار داخلی خود است: یک محدوده $0 \leq \alpha \leq \alpha_{C \lim}$ است که در آن $X_{TCSC}(\alpha)$ خازنی است، و دیگری $\alpha_{L \lim} \leq \alpha \leq \pi/2$ است که در آن $X_{TCSC}(\alpha)$ القایی است. این مطلب در شکل ۶-۱۴ نشان داده شده است.

مدل حالت ماندگار TCSC که در بالا شرح داده شد مبتنی بر مشخصه TCR در یک محیط SVC است، که در آن، TCR از یک منبع ولتاژ ثابت تغذیه می‌شود. این مدل برای به دست آوردن



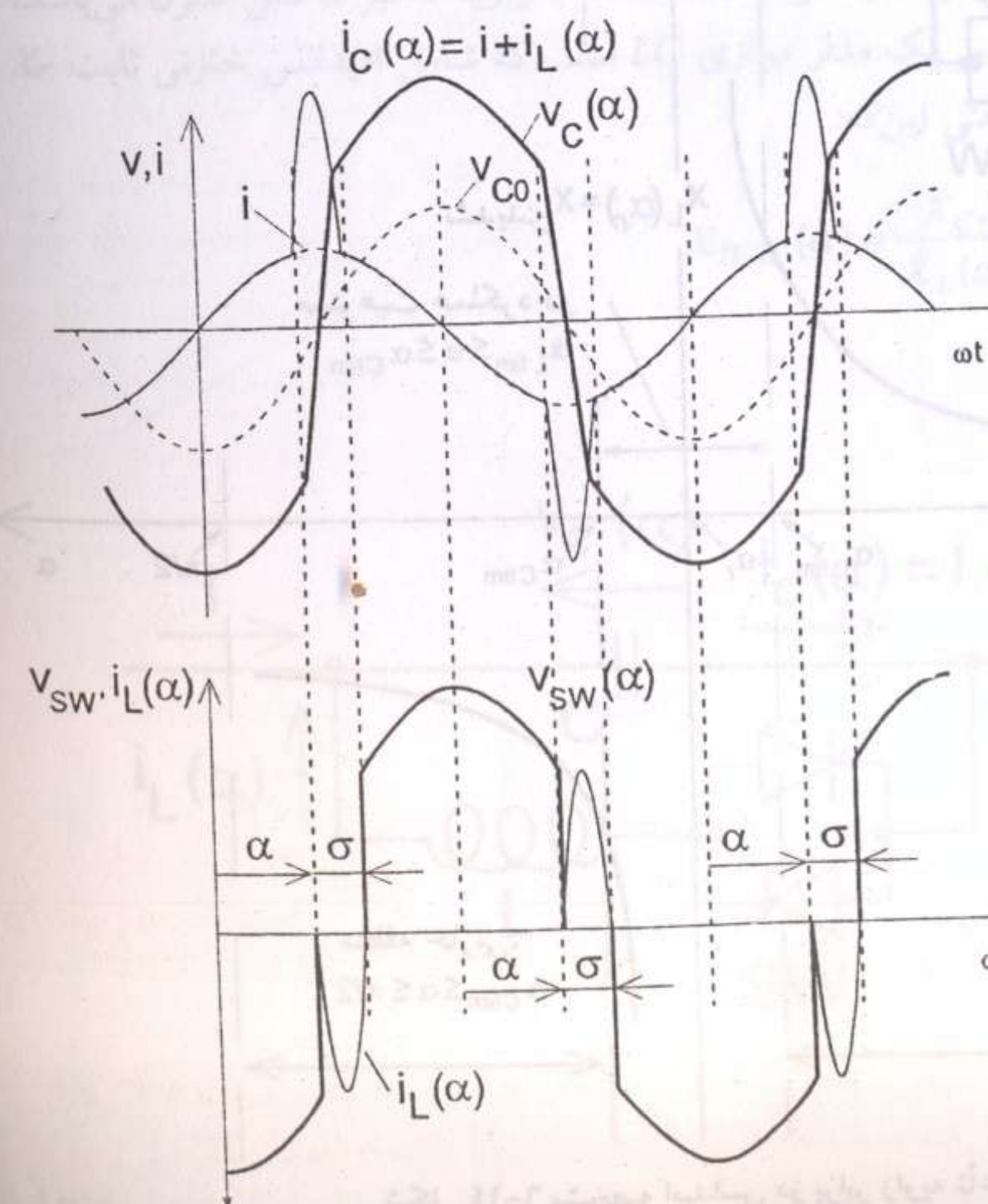
شکل ۶-۱۴ مشخصه امپدانس در برابر زاویه تأخیر α در TCSC.



شکل ۶-۱۵ نمایش معکوس شدن ولتاژ خازن به وسیله TCR: (الف) جریان خط و ولتاژ خازن مربوطه، (ب) مدار معادل در لحظه آتش α ، و (ج) ولتاژ خازن حاصله و جریان TCR ذریبط.

درک کلی از رفتار عملی TCSC مفید است. به هر حال در طرح TCR، TCSC به صورت موازی با یک خازن، به جای یک منبع ولتاژ ثابت، بسته می‌شود. تعامل دینامیکی بین خازن و القاگر، ولتاژ عمل کننده را از حالت اصلی موج سینوسی که با جریان ثابت خط برقرار شده است، خارج می‌کند. نگاهی عمیق‌تر به این تعامل، برای درک عملکرد فیزیکی واقعی و رفتار دینامیکی TCSC، به خصوص از نظر مشخصات امپدانس آن در فرکانس‌های زیر سنکرون، ضرورت دارد.

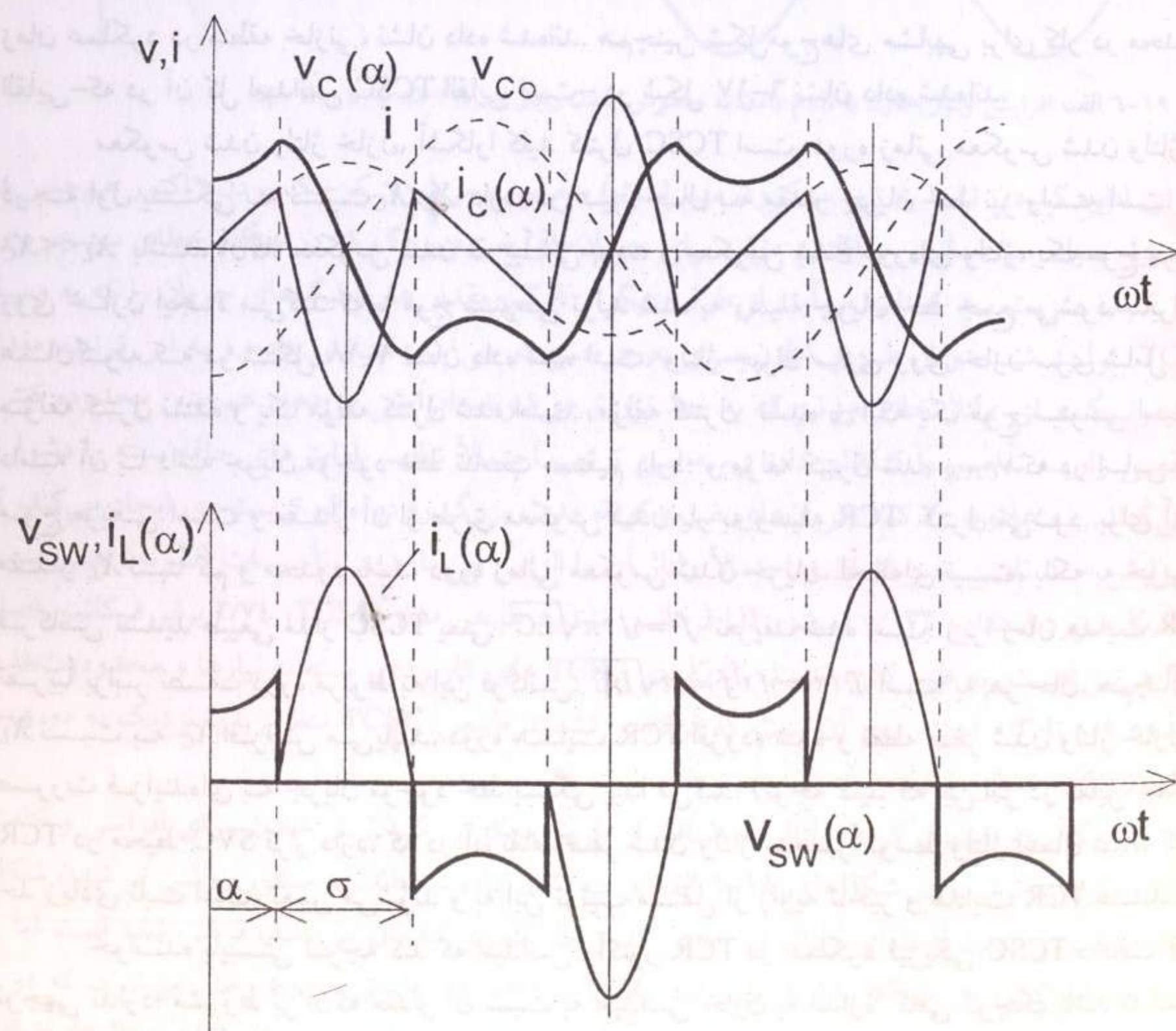
به شکل ۶-۱۳ که در آن مدار اصلی TCSC نشان داده شده و برای سهولت در بالای شکل ۶-۱۵ ب نیز آورده شده، مراجعه کنید. فرض کنید که والو تریستوری ω در ابتدا باز است و جریان موجود خط i ولتاژ v_{C0} را روی خازن ثابت جبران سازی سری، همان‌گونه که در شکل ۶-۱۵ الف



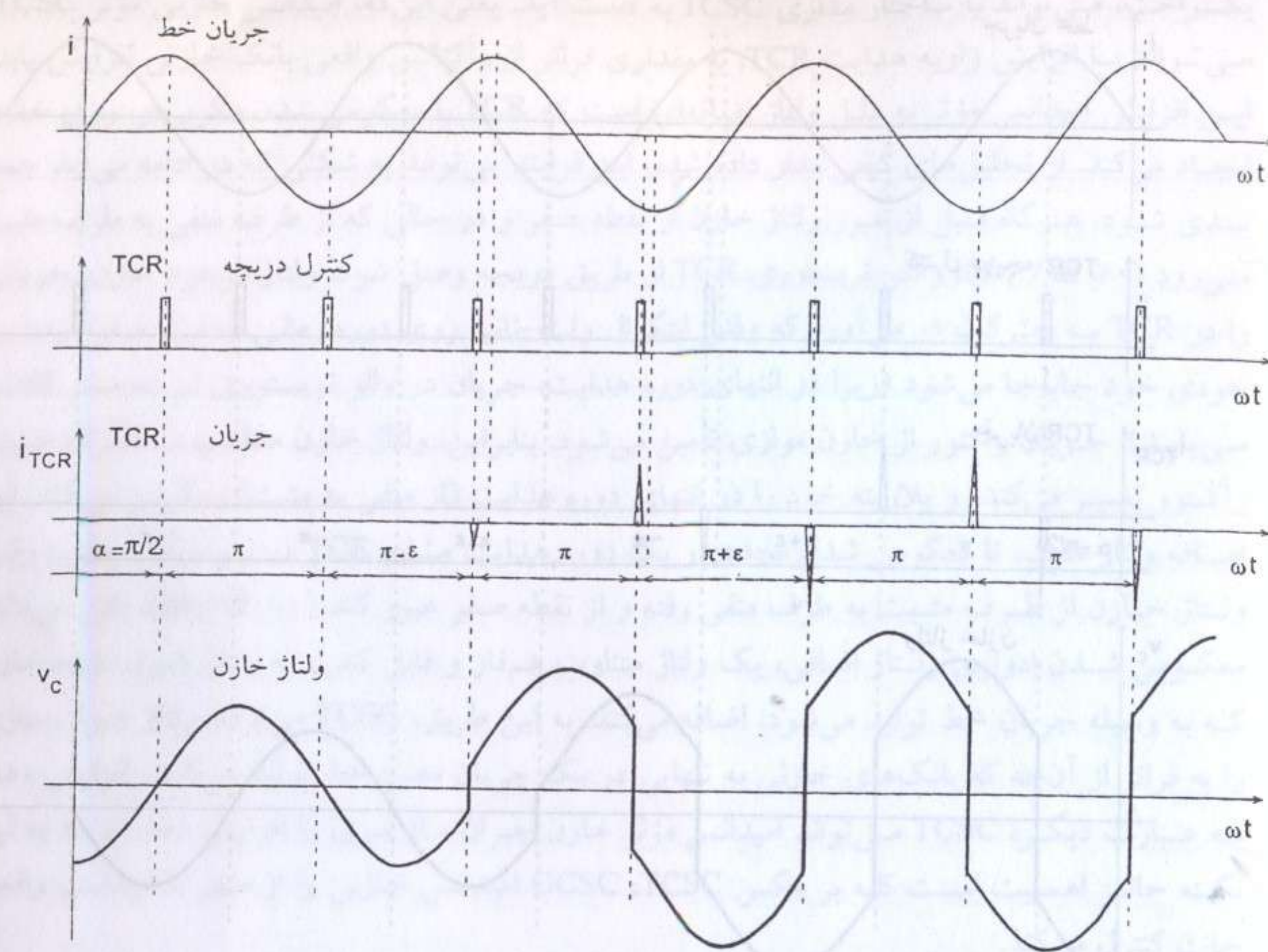
شکل ۶-۱۶ شکل موج های ولتاژ و جریان خازن به همراه شکل موج های ولتاژ و جریان TCR که مشخص کننده TCSC در منطقه خازنی در حالت کار ماندگار است.

نشان داده شده، تولید می‌کند. فرض کنید که TCR باید در زمان α که از اوج منفی ولتاژ خازن اندازه‌گیری شده، وصل شود. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در این لحظه وصل، ولتاژ خازن منفی و جریان خط مثبت است و به این ترتیب خازن در جهت مثبت شارژ می‌شود. در مدت این نیم سیکل اول عملکرد TCR (و تمام نیم سیکل‌های بعدی مشابه)، والو تریستوری را می‌توان همان‌گونه که در پایین شکل ۶-۱۵ ب نشان داده شده به صورت یک کلید ایده‌آل دید که به صورت سری با یک دیود که پلاریته مناسب دارد قرار گرفته و با بسته شدن در نقطه α ، هدایت را در لحظه عبور جریان از صفر، متوقف می‌کند.

در لحظه بسته شدن کلید ω دو اتفاق اساساً متفاوت رخ خواهد داد: یکی این که جریان خط که یک منبع جریان ثابت است به شارژ (یا تخلیه) خازن ادامه می‌دهد؛ و دیگر این که بار خازن، در مدت نیم سیکل تشدید مدار LC که با بستن کلید ایجاد شده، معکوس خواهد شد. (این اتفاق دوم همان‌گونه که ذکر شد، با فرض آن است که $X_L < X_C$) همان‌طور که در شکل ۶-۱۵ ج نشان داده شده، معکوس شدن بار تشدید باعث ایجاد افزایشی به صورت ولتاژ dc در نیم سیکل (مثبت) بعدی ولتاژ خازن می‌شود. در نیم سیکل (منفی) بعدی، این افزایش dc می‌تواند با حفظ همان α معکوس شود؛ و به این ترتیب می‌توان یک موج ولتاژ قرینه نسبت به محور صفر تولید نمود. این مطلب در شکل ۶-۱۶ آورده شده، که در آن شکل موج‌های جریان و ولتاژ TCSC در



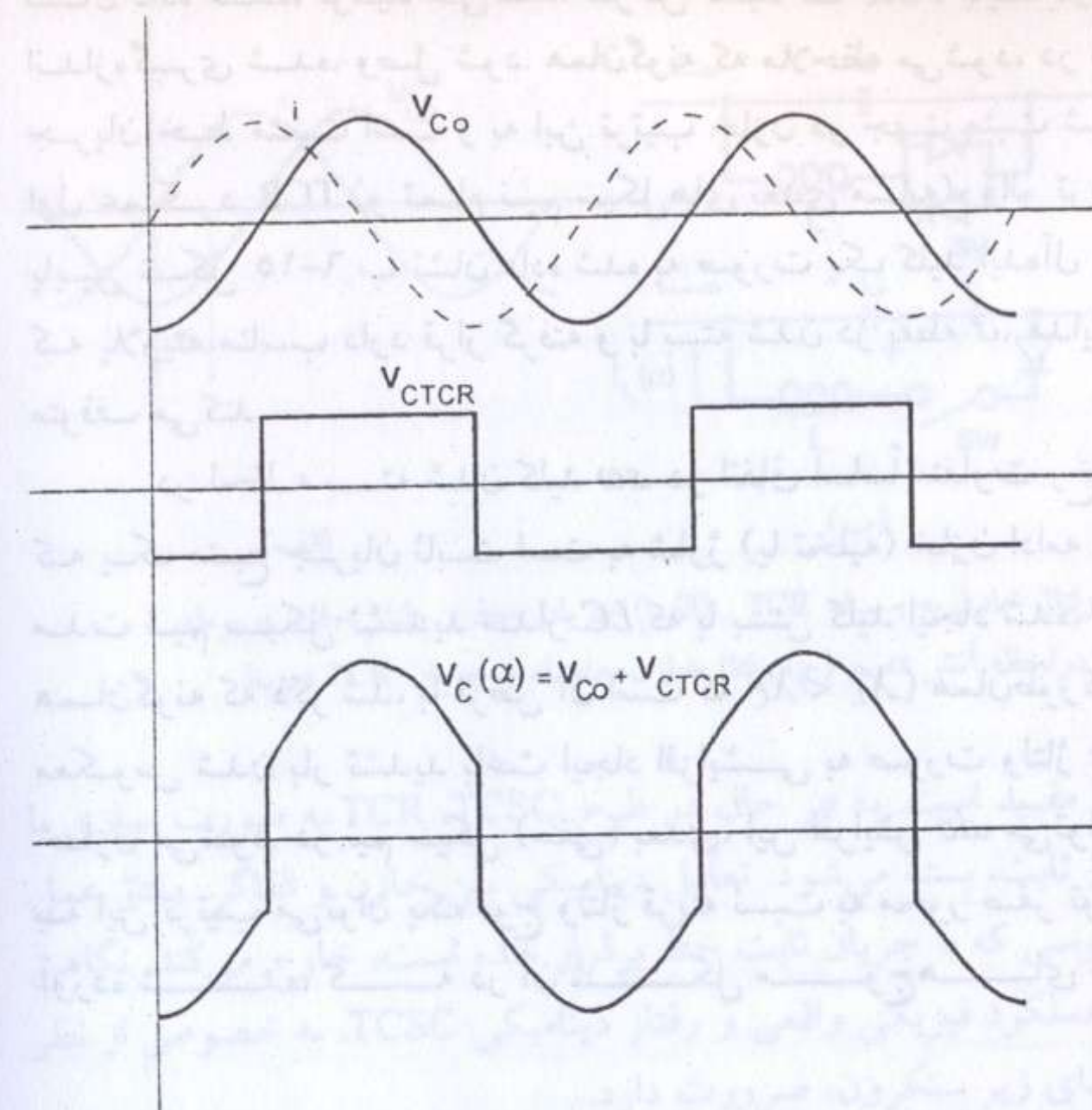
شکل ۶-۱۷ شکل موج های ولتاژ و جریان خازن به همراه شکل موج های ولتاژ و جریان TCR که مشخص کننده TCSC در منطقه القایی در حالت کار ماندگار است.



شکل ۶-۱۹ الف افزایش ولتاژ خازن با تقدم دادن به معکوس شدن ولتاژ از $\alpha = \pi$ به $\alpha = \pi - \varepsilon$.

برای اداره کردن تشدید زیر سنکرون مهم است) محسوب می‌شود. کوچک بودن راکتور هم‌چنین در تسهیل میان بر سازی حفاظتی مؤثر، برای جریان‌های ضربه بزرگ که در هنگام خطای سیستم بروز می‌کند، مزیت به حساب می‌آید. از طرف دیگر، X_L کم، مقدار هارمونیک‌های جریان را که به وسیله TCR تولید شده و از طریق خازن سری به چرخش در می‌آیند، افزایش داده، و به این ترتیب مقدار هارمونیک‌های ولتاژ خازن را نیز که به خط تزریق می‌شوند، افزایش می‌دهد. هم‌چنین محدوده کنترل واقعی زاویه تأخیر را کاهش داده و به این ترتیب احتمالاً تنظیم پارامترهای حلقه بسته را دشوارتر می‌کند. به علاوه، X_L کم، جریان‌های ضربه کوتاه مدت بزرگ را در والو تریستوری ایجاد می‌کند، که افزایش حد نامی جریان آن و احتمالاً ولتاژ آن را الزامی می‌سازد. در تأسیسات (نمونه) فعلی نسبت X_L/X_C مورد استفاده ۰/۱۳۳ است و لذا فرکانس تشدید طبیعی مدار TCSC، $2/74$ برابر فرکانس اصلی ۶۰ هرتز است. به طور کلی، نسبت X_L/X_C در TCSC های کاربردی، بسته به نیازها و محدودیت‌ها در حدود ۰/۱ تا ۰/۳ است. مهم آن است که فرکانس تشدید طبیعی TCSC منطبق با یا نزدیک به دو و سه برابر فرکانس اصلی نباشد.

مکانیزم کنترل کردن ولتاژ dc اضافی از طریق معکوس کردن بار خازن، برای افزایش و کاهش ولتاژ خازن به ترتیب در شکل‌های ۶-۱۹ الف و ب نشان داده شده‌اند. به منظور روشن تر شدن شکل-ها، معکوس شدن لحظه‌ای ولتاژ، در حالتی که از نظر تئوری ایده‌آل می‌باشد، فرض شده است (با X_L فوق‌العاده کم). در شکل ۶-۱۹ الف، ابتدا TCR در $\alpha = \pi/2$ از طریق دریچه وصل می‌شود، که در آن لحظه جریان TCR صفر است و ولتاژ خازن کلاً ناشی از جریان خط است. برای تولید ولتاژ dc اضافی، عملکرد دریچه که به صورت دوره‌ای تکرار می‌شود، در سیکل دوم به اندازه یک زاویه کوچک ε جلو انداخته می‌شود؛ یعنی این‌که نیم دوره موجود به اندازه ε کاهش یافته و به $\pi - \varepsilon$ می‌رسد. این عمل یک



شکل ۶-۱۸ ترکیب ایده آل شکل موج ولتاژ جبران سازی TCSC از ولتاژ خازنی (سینوسی) تولید شده بوسیله جریان خط و موج مربعی ولتاژ حاصل از معکوس شدن ولتاژ خازن.

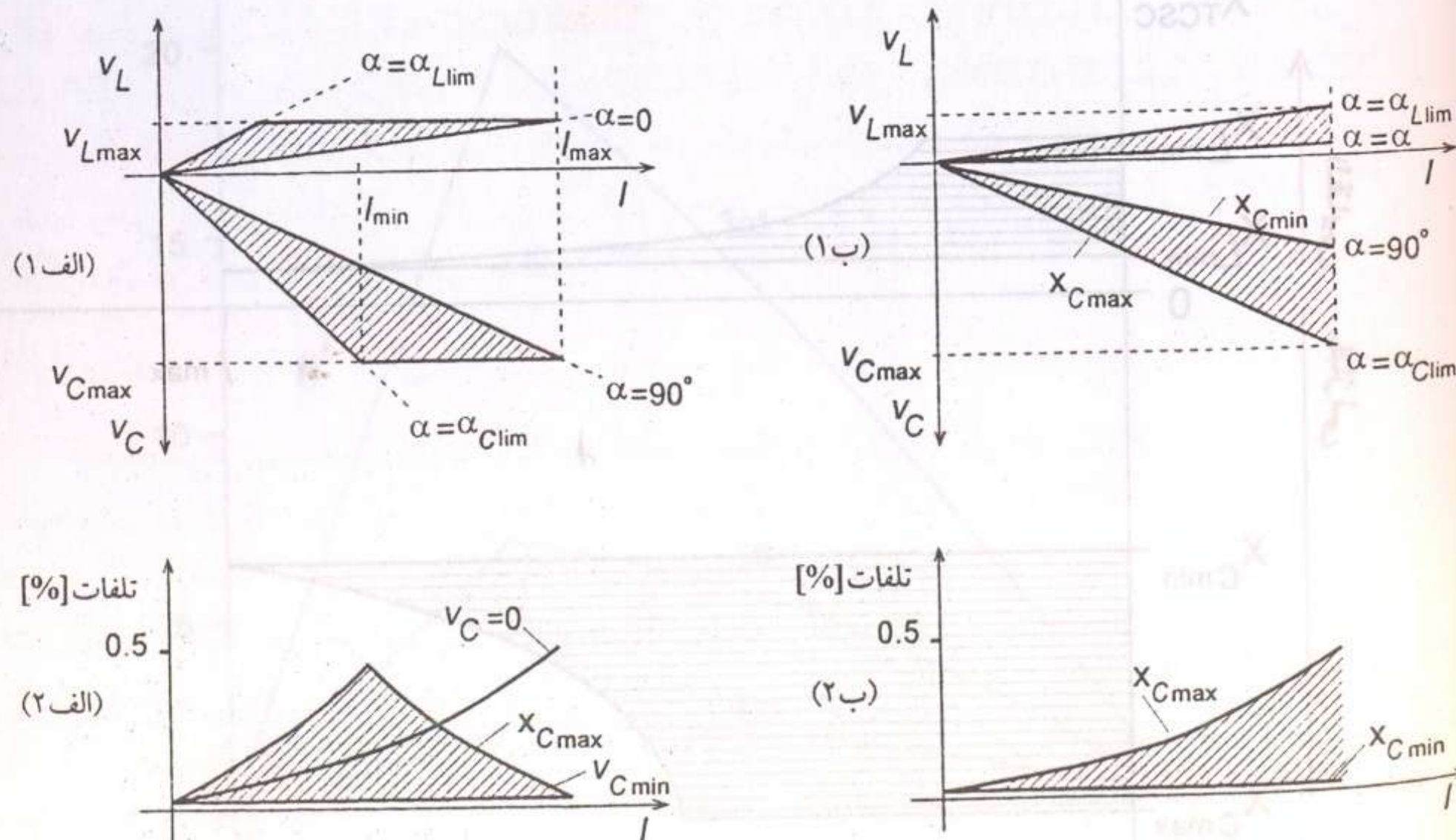
زمان عملکرد در منطقه خازنی، نشان داده شده‌اند. هم‌چنین شکل موج‌های مشابهی برای کار در محدوده القایی-که در آن کل امپدانس TCSC القایی است- در شکل ۶-۱۷ نشان داده شده‌اند.

معکوس شدن ولتاژ خازن، آشکارا کلید کنترل TCSC است. دوره زمانی معکوس شدن ولتاژ در درجه اول بستگی به نسبت X_L/X_C دارد؛ در عین حال به مقدار جریان خط نیز وابسته است. اگر $X_L < X_C$ باشد، آن‌گاه معکوس شدن تقریباً آنی بوده، و معکوس شدن دوره‌ای ولتاژ، یک موج مربعی روی خازن ایجاد می‌کند که با موج سینوسی تولید شده به وسیله جریان خط جمع می‌شود. بنابراین، همان‌گونه که در شکل ۶-۱۸ نشان داده شده است، ولتاژ جبران سازی روی خازن سری شامل یک مؤلفه کنترل نشده و یک مؤلفه کنترل شده است: مؤلفه کنترل نشده V_{C0} که یک موج سینوسی است و دامنه آن با دامنه جریان موجود خط تناسب مستقیم دارد؛ و مؤلفه کنترل شده V_{CTCR} که در اساس یک موج مربعی است و مقدار آن از طریق معکوس شدن بار به وسیله TCR کنترل می‌شود. برای آن‌که مقدار X_L نسبتاً کم و محدود باشد، دوره زمانی معکوس شدن جریان، لحظه‌ای نیست، بلکه به خوبی با فرکانس تشدید طبیعی مدار TCSC یعنی $f = 1/\sqrt{2\pi LC}$ تعریف شده است؛ زیرا زمان هدایت TCR تقریباً برابر نصف دوره مربوط به این فرکانس: $T/2 = 1/2f = \pi\sqrt{LC}$ است. به هر حال، هم‌چنان‌که X_L نسبت به X_C افزایش می‌یابد، دوره هدایت TCR افزوده شده و نقطه صفر شدن ولتاژ خازن به صورت فزاینده‌ای به جریان موجود خط بستگی پیدا می‌کند. (توجه کنید که این امر در مقابل عملکرد TCR در محیط SVC قرار دارد، که در آن نقاط صفر شدن ولتاژ منحصراً توسط ولتاژ اعمال شده، که تا حد زیادی ثابت است، تعیین می‌شوند و به این ترتیب مستقل از زاویه تأخیر و هدایت TCR هستند.)

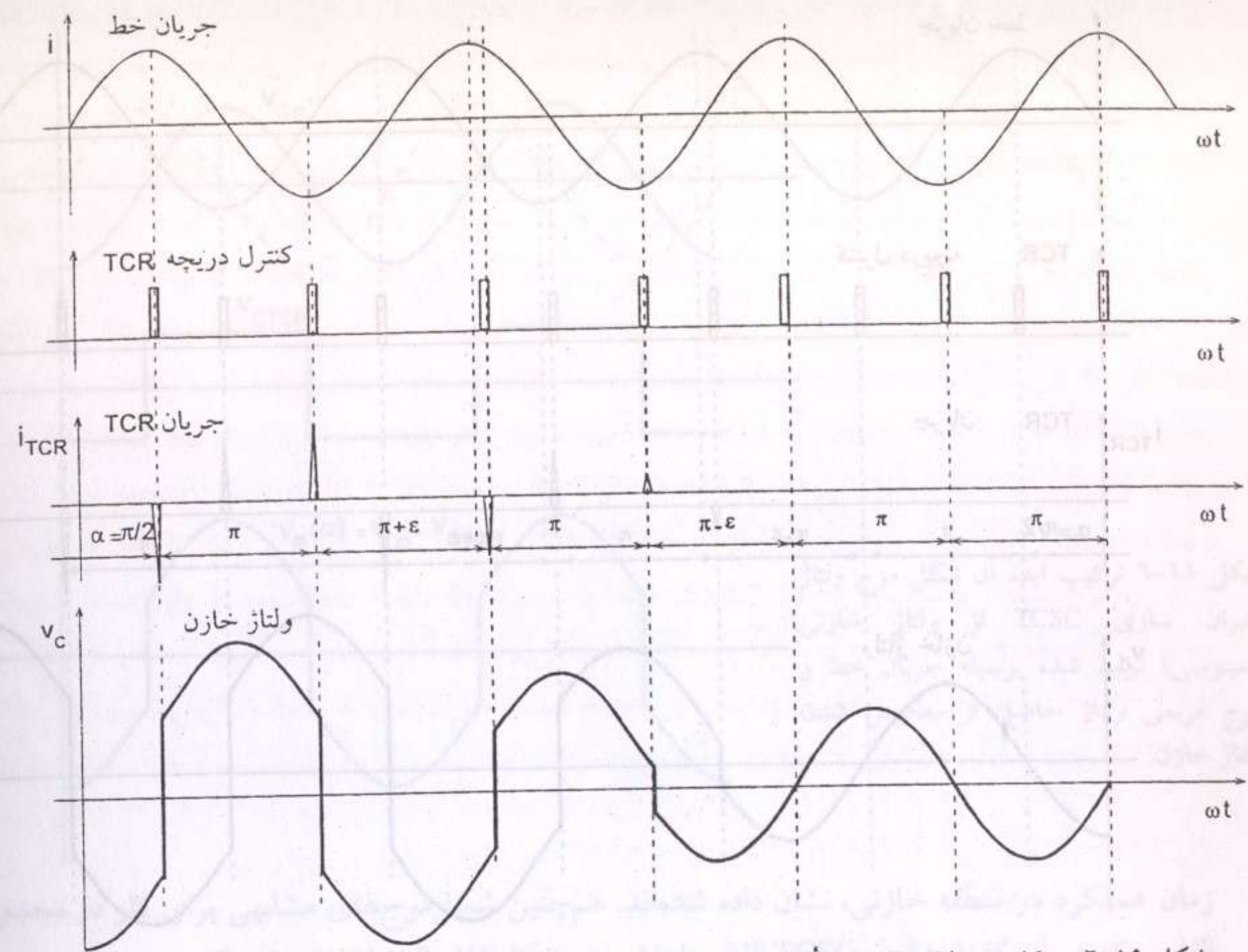
خواننده بایستی توجه کند که امپدانس راکتور TCR در عملکرد فیزیکی TCSC دخالت قابل توجهی ندارد؛ مشروط بر آن‌که مقدار آن نسبت به امپدانس خازن به اندازه کافی کوچک باشد تا کنترل مورد نیاز جبران سازی سری را تسهیل نماید. با این ترتیب، طراحی راکتور برای یک جبران ساز واقعی نیاز به ملاحظات دقیق دارد تا شرایط متناقض را با هم تطبیق دهد. از یک طرف مقدار کوچک X_L مزیتی در معکوس شدن صحیح بار و کنترل دوره زمانی ولتاژ جبران سازی (که آن‌طور که خواهیم دید

یکنواخت، می‌تواند با ساختار مداری TCSC به دست آید. یعنی این‌که، امپدانس خازنی مؤثر TCSC، می‌تواند با افزایش زاویه هدایت TCR، به مقداری فراتر از راکتانس واقعی بانک خازنی افزایش یابد. این افزایش امپدانس مؤثر به دلیل ولتاژ اضافه‌ای است که TCR با معکوس شدن مکرر بار، روی خازن ایجاد می‌کند. از تحلیل‌های کیفی مدار داده شده، این فرایند می‌تواند به شکلی که در ادامه می‌آید جمع بندی شود. هرگاه قبل از عبور ولتاژ خازن از نقطه صفر و در حالی که از طرف منفی به طرف مثبت می‌رود ($dv_c/dt > 0$)، والو تریستوری TCR از طریق دریچه وصل شود، ولتاژ موجود خازن، جریانی را در TCR به حرکت در می‌آورد که وقتی انتگرال ولت-ثانیه روی دوره زمانی هدایت صفر گردد، به خودی خود جابه‌جا می‌شود (زیرا در انتهای دوره هدایت، جریان در والو تریستوری نیز به صفر کاهش می‌یابد). جریان راکتور از خازن موازی تأمین می‌شود. بنابراین، ولتاژ خازن متناسب با انتگرال جریان راکتور تغییر می‌کند، و پلاریته خود را در انتهای دوره هدایت (از منفی به مثبت) معکوس می‌کند. این اضافه ولتاژ مثبت، تا معکوس شدن مجدد در یک دوره هدایت مشابه TCR در نیم سیکل بعدی، وقتی ولتاژ خازن از طرف مثبت به طرف منفی رفته و از نقطه صفر عبور کند ($dv_c/dt < 0$)، باقی می‌ماند. معکوس شدن ادواری ولتاژ اضافی، یک ولتاژ متناوب هم‌فاز و قابل کنترل به ولتاژ کنترل نشده خازن که به وسیله جریان خط تولید می‌شود، اضافه می‌کند. به این طریق، TCSC می‌تواند ولتاژ جبران سازی را به فراتر از آنچه که بانک‌های خازنی به تنهایی در یک جریان معین خط تولید می‌کنند، افزایش دهد. به عبارت دیگر، TCSC می‌تواند امپدانس مؤثر خازن جبران ساز سری را افزایش دهد. توجه به این نکته حائز اهمیت است که بر عکس TCSC، GCSC امپدانس خازنی را از صفر تا امپدانس واقعی خازن کنترل می‌کند.

مشخصه ولتاژ جبران سازی در برابر جریان خط (V-I) یک TCSC ساده در شکل ۶-۲۰ الف ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در منطقه خازنی، حداقل زاویه تأخیر α_{lim} ، حد مربوط به حداکثر ولتاژ جبران سازی را تا مقداری از جریان خط (I_{min}) تعیین می‌کند، و از آن‌جا



شکل ۶-۲۰ مشخصه قابل حصول V-I (ولتاژ جبران سازی در برابر جریان خط) در TCSC هنگام کار در وضعیت کنترل ولتاژ (الف) و کنترل راکتانس (ب)، و مشخصه های تلفات در برابر جریان خط مربوطه (به ترتیب الف و ب).



شکل ۶-۱۹ ب کاهش ولتاژ خازن با تأخیر دادن به معکوس شدن ولتاژ از $\alpha = \pi$ به $\alpha = \pi + \epsilon$

تقدم فاز در ولتاژ خازن نسبت به جریان خط ایجاد می‌کند و، در نتیجه خازن انرژی از خط جذب کرده و تا ولتاژ بالاتری شارژ می‌شود. (توجه کنید که با تقدم فاز، I_{idt} در تکه مثبت جریان، بزرگتر از تکه منفی در نیم دوره موردنظر می‌شود، و اختلاف بین این دو انتگرال یک بار اضافه مثبت خالص برای خازن ایجاد می‌کند). همان‌طور که در نیم سیکل بعدی در شکل نشان داده شده، اگر این تقدم فاز حفظ شود، آن‌گاه بار اضافی خازن در هر نیم سیکل، بدون محدودیت نظری به افزایش خود ادامه خواهد داد. به این ترتیب، اگر تقدم فاز ϵ ، وقتی که ولتاژ خازن به سطح کافی ولتاژ اضافه برسد، منتفی شود، آن‌گاه به همان صورتی که در نیم سیکل‌های متوالی در شکل ۶-۱۹ الف نشان داده شده، ولتاژ خازن می‌تواند (برای مدار بدون تلفات مفروض) با تداوم عملکرد دریچه به صورت دوره‌ای در نقاط صفر جریان خط ($\alpha = 0$)، حفظ شود.

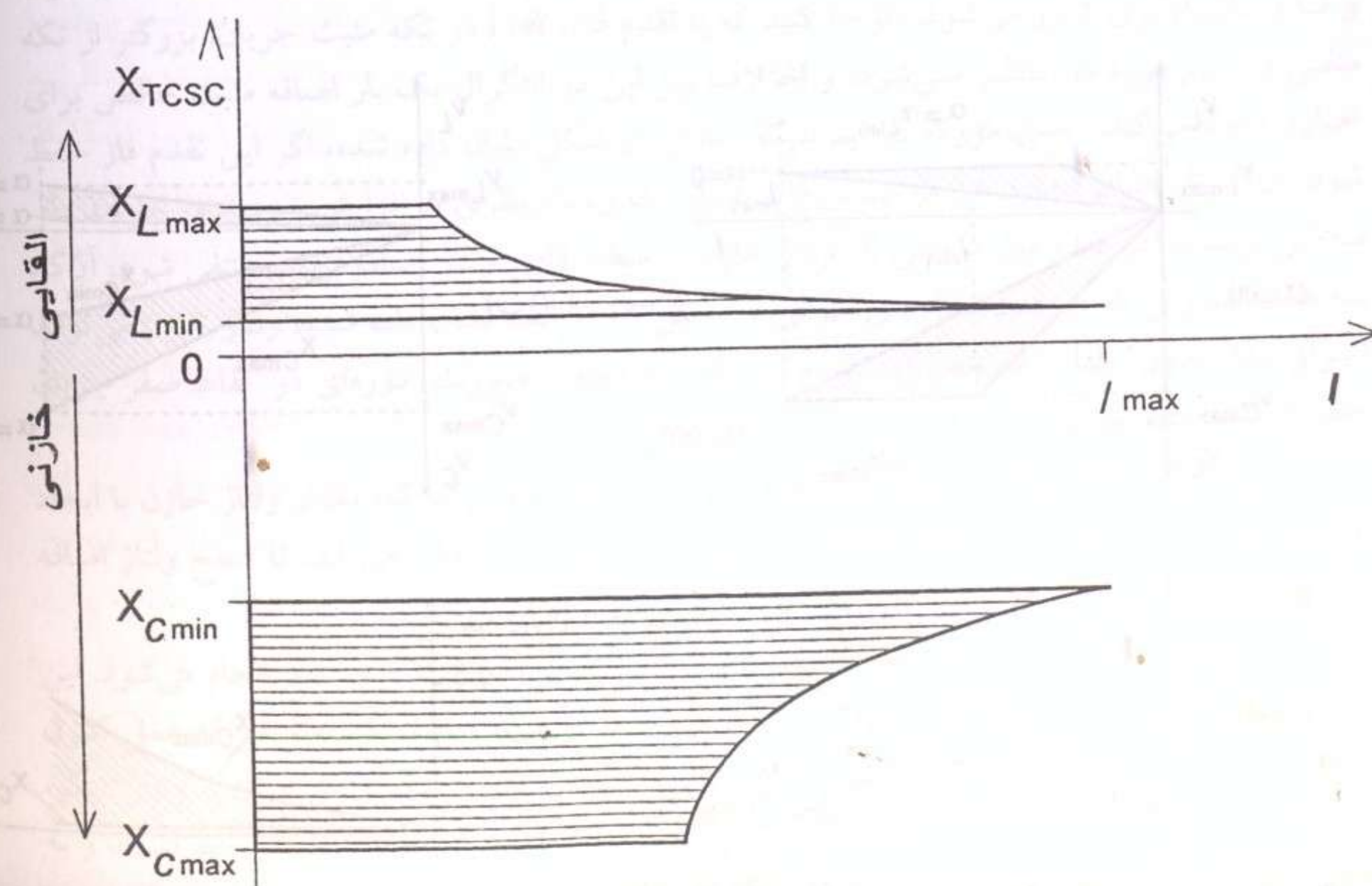
در شکل ۶-۱۹ ب فرایند معکوس نشان داده شده است؛ یعنی این‌که، مقدار ولتاژ خازن با ایجاد تأخیر در عملکرد ادواری دریچه نسبت به نقاط صفر جریان، کاهش می‌یابد، تا سطح ولتاژ اضافه مطلوب به دست آید.

در یک TCR واقعی، معکوس شدن ولتاژ در یک دوره هدایت محدود (σ) انجام می‌شود. این دوره با تقدم یا تأخر فاز اعمال شده تغییر می‌کند و مدار طوری رفتار می‌کند مثل این‌که عمل کنترل زاویه تأخیر به صورت معمولی انجام شده است. بنابراین فرایند انتقال از یک ولتاژ خازن به ولتاژ دیگر، پیچیده تر از آن مورد تئوری نشان داده شده است: این انتقال تابعی از جریان موجود خط است، و به طور کلی قبل از رسیدن به حالت ماندگار، یک دوره انتقالی وجود خواهد داشت. به هر حال، نتیجه نهایی اصولاً یکسان خواهد بود.

در بالا نشان داده شده است که هدف اصلی از تأمین جبران سازی خازنی سری با تغییرات

حداکثر ولتاژ نامی V_{Cmax} ، عملکرد را محدود می‌سازد تا این‌که حداکثر جریان نامی I_{max} تولید شود. در منطقه القایی، حداکثر زاویه تأخیر α_{clim} ، ولتاژ را در جریان‌های کم خط محدود می‌سازد، و این ولتاژ خود به وسیله حداکثر جریان نامی تریستور در جریان‌های زیاد خط محدود می‌شود. تلفات، به صورت درصدی از توان راکتیو نامی خروجی، در برابر جریان خط، برای حالت جبران سازی ولتاژ در منطقه عملکرد خازنی، برای حداکثر و حداقل ولتاژ جبران سازی، و نیز برای حالت میان بر (والو تریستوری کاملاً وصل باشد)، در شکل ۶-۲۰ الف ۲ نشان داده شده است. تلفات تقریباً به تمامی ناشی از TCR است، که شامل تلفات هدایت و کلیدزنی والو تریستوری و تلفات I^2R راکتور است. توجه کنید که مشخصه تلفات TCSC که در شکل ۶-۲۰ الف ۲ نشان داده شده، با مشخصه جبران سازی ولتاژ آن که در شکل ۶-۲۰ الف ۱ آورده شده، ارتباط دارد. این امر بدین معنی است که در حداکثر مقدار ثابت زاویه هدایت TCR که با حداقل زاویه تأخیر α_{clim} به دست آمده، تلفاتی که متناسب با جریان خط است افزایش یافته، و سپس با کاهش مداوم زاویه هدایت که با افزایش α ($\alpha_{clim} < \alpha < \pi/2$) حاصل می‌شود، این تلفات کاهش می‌یابد تا ولتاژ خازن، زیر سقف حداکثر ولتاژ، ثابت نگه داشته شود.

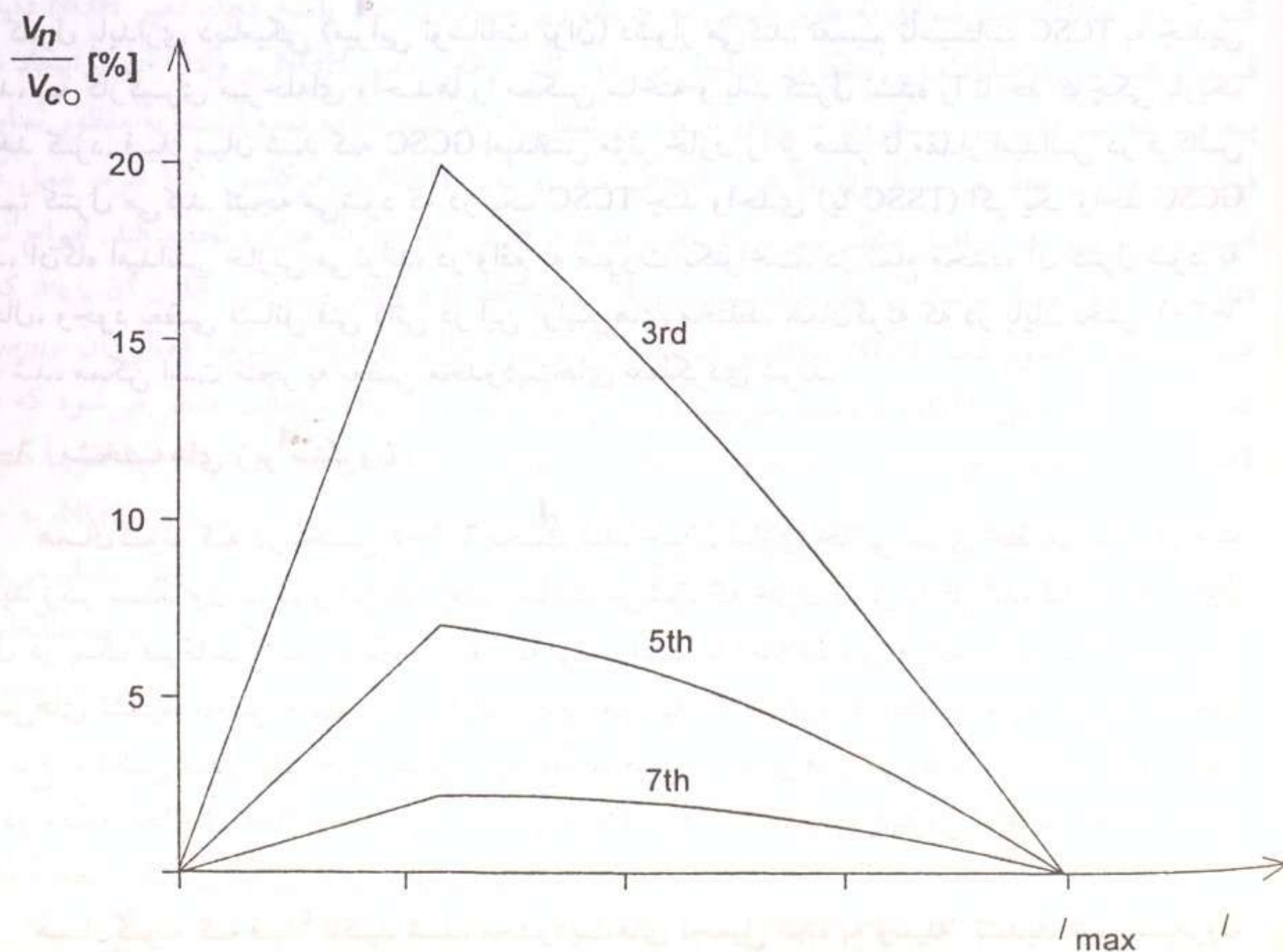
در وضعیت جبران سازی امپدانس، TCSC به منظور حفظ حداکثر راکتانس نامی جبران سازی، در هر مقدار جریان خط تا حداکثر مقدار نامی آن، به کار می‌رود. در این حالت کاری، خازن و راکتور کنترل شده با تریستور در TCSC طوری انتخاب می‌شوند که در α_{clim} ، حداکثر راکتانس خازنی در حداکثر جریان نامی خط و زیر آن قابل حفظ کردن باشد؛ این مطلب در شکل ۶-۲۰ ب ۱ نشان داده شده است. حداقل امپدانس خازنی جبران سازی که TCSC می‌تواند تأمین کند، همان امپدانس خازن است که از نظر تئوری در $\alpha = 90^\circ$ به دست می‌آید (در حالی که والو تریستور غیر هادی است). مشخصه تلفات در برابر جریان خط برای این حالت کاری در حداکثر و حداقل راکتانس خازنی جبران سازی، در شکل ۶-۲۰ ب ۲ نشان داده شده است. مجدداً به خواننده یادآوری می‌شود که حالت‌های



شکل ۶-۲۱ مشخصه راکتانس جبران سازی قابل حصول در برابر جریان خط در TCSC مربوط به مشخصه $V-I$ در وضعیت کنترل ولتاژ که در شکل ۶-۲۰ (الف ۱) نشان داده شده.

جبران سازی ولتاژ و امپدانس از طریق عملکرد کنترلی قابل جابه‌جایی هستند؛ با این وجود، محدودیت‌های تحمیل شده در اثر مقدار نامی اجزاء می‌تواند محدوده عملکرد مطلوب را در هر حالت محدود کند. به عنوان مثال، مشخصه ولتاژ جبران سازی در برابر جریان خط که در شکل ۶-۲۰ الف ۱ نشان داده شده، می‌تواند به مشخصه راکتانس جبران سازی در برابر جریان خط که در شکل ۶-۲۱ نشان داده شده، تبدیل شود. در این شکل‌ها می‌توان مشاهده کرد که ولتاژ جبران سازی ثابت لزوماً منجر به امپدانس جبران سازی متغیر می‌شود، و برعکس، امپدانس ثابت با تغییر جریان خط، ولتاژ جبران سازی متغیر تولید می‌کند.

مقادیر طراحی شده، بیشترین حد ولتاژ و جریان هستند، و مقادیر نامی والو تریستوری، راکتور و بانک‌های خازنی، برای برآورده کردن نیازهای کاربردی، در آن مقادیر تعیین شده‌اند. TCSC، همانند هم‌تای کلید زننده خود یعنی TSSC، ضرورتاً باید مقادیر نامی ولتاژ و جریان گذرا، برای دوره‌های زمانی تعریف شده داشته باشد. طراحی TCSC به دلیل این واقعیت که هارمونیک‌های تولید شده داخلی آن شرایط حادی را دشوارتر می‌کنند، پیچیده‌تر است. جریان‌های هارمونیک‌های باعث تلفات اضافی شده و حرارت ناشی از آن، هم در والو تریستوری و هم در راکتور افزایش می‌یابد. ولتاژهای هارمونیک‌های که این جریان‌ها بر روی خازن تولید می‌کنند باعث افزایش حداکثر ولتاژ شده و بر روی اجزاء قدرتی TCSC فشار وارد می‌آورند. تأثیرات هارمونیک‌ها بایستی در بدترین شرایط کارکرد برای تعیین حداکثر ولتاژ و جریان نامی مورد نیاز اجزاء اصلی TCSC در نظر گرفته شوند تا شرایط کاری تعیین شده را برآورده کنند. خارج از این حدود کاری تعریف شده، TCSC در برابر ضربه‌های ولتاژ و جریان اضافی، یا با یک حفاظت بیرونی که به صورت موازی متصل شده (مثلاً برق‌گیرهای MOV، جرقه‌گیر با فاصله هوایی، کلید اتوماتیک میان بر کننده) حفاظت می‌شود و یا به وسیله خود TCR (به همراه یک کلید اتوماتیک پشتیبان) در عملکرد میان بر سازی.



شکل ۶-۲۲ ولتاژهای غالب هارمونیک‌های تولید شده توسط TCSC در حالی که نسبت X_L/X_C برابر ۰/۱۳۳ است.

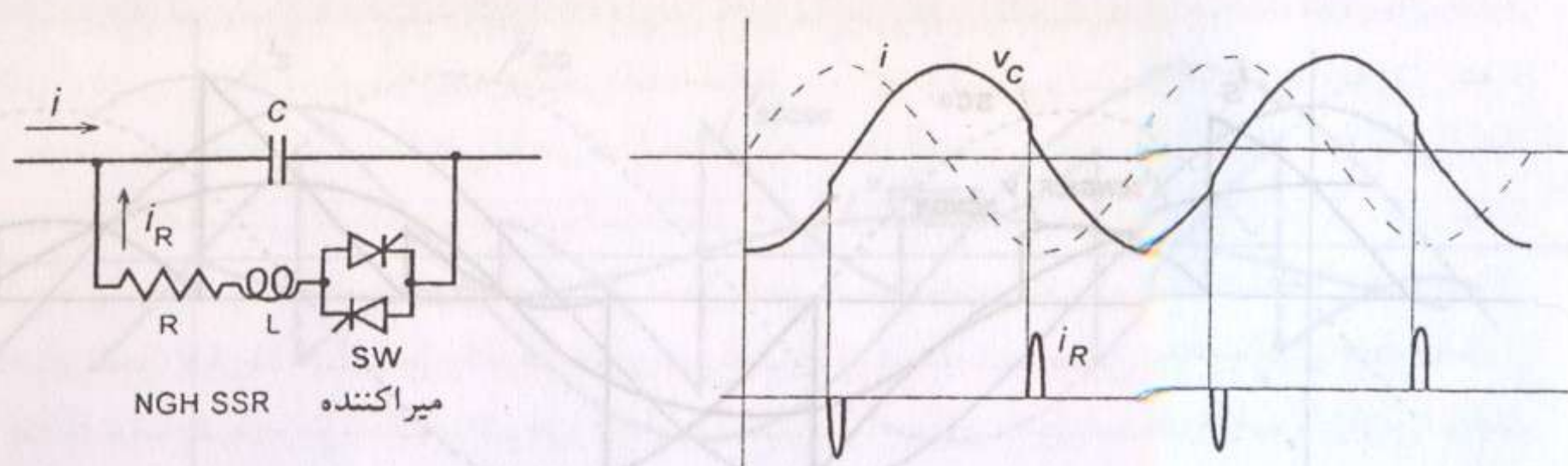
TCSC، در زمان هدایت جزئی TCR ولتاژهای هارمونیک به خط تزریق می‌کند. این ولتاژهای هارمونیک به دلیل جریان‌های هارمونیک TCR که داخل خازن جبران سازی سری گردش می‌کنند، تولید می‌شود. TCR همان‌گونه که در فصل ۵ بیان شد، همه هارمونیک‌های فردی را که مقدار آن‌ها تابعی از زاویه تأخیر α است، تولید می‌کند (شکل ۵-۱۰ را ببینید). ولتاژهای هارمونیک ناشی از این جریان‌ها در یک TCSC به طور وضوح بستگی به نسبت امپدانس راکتور TCR به خازن (X_L/X_C) دارند. در شکل ۶-۲۲، مهم‌ترین ولتاژهای هارمونیک، یعنی سومین، پنجمین و هفتمین ولتاژ که به ازاء $X_L/X_C = 0.133$ (که در تأسیسات موجود TCSC به کار می‌رود) در منطقه عملکرد خازنی تولید شده‌اند، بر حسب درصدی از ولتاژ اصلی خازن، V_{Co} ، در حالی که TCR در جریان نامی قطع است، در مقابل جریان خط (I) ترسیم شده‌اند. در منحنی‌های رسم شده فرض شده است که TCSC ولتاژ نامی جبران سازی را، در مقابل تغییرات جریان خط که در مشخصه $V-I$ شکل ۶-۲۰ الف ۱ نشان داده شده، حفظ می‌کند. می‌توان مشاهده کرد که مقدار ولتاژهای هارمونیک به سرعت با فرکانس کاهش می‌یابند، و هارمونیک‌های بالاتر از هفتم کلاً قابل صرف‌نظر کردن هستند. هارمونیک‌های از درجه کمتر، اگرچه به نظر می‌رسد که مقادیر نسبتاً زیادی دارند، ولی نمی‌توانند به طور چشم‌گیری در هارمونیک‌های موجود جریان خط مشارکت کنند. علت آن است که این هارمونیک‌ها اساساً منبع ولتاژ هستند و TCSC معمولاً در خطوط طولانی با امپدانس زیاد به کار می‌رود؛ که در آن‌ها هارمونیک‌های تولید شده جریان خط نسبتاً کم هستند. (در تأسیسات موجود، هارمونیک‌های جریان خط که در اثر TCSC به وجود می‌آیند به میزانی کمتر از هارمونیک‌های ناشی از سیستم جانبی اندازه‌گیری شده‌اند).

شکل ۶-۲۱ به روشنی نشان می‌دهد که TCSC زیر X_{Cmin} (امپدانس خازن در فرکانس سیستم) تا X_{Lmin} (امپدانس القاگر در فرکانس سیستم)، کنترل ندارد. اگر TCSC یک واحد بزرگ منفرد باشد، باند خازنی کنترل نشده می‌تواند کاملاً بزرگ باشد. یک باند بزرگ کنترل نشده، استفاده از TCSC را برای کنترل پایداری دینامیکی (میرایی نوسانات توان) دشوار می‌کند. تقسیم تأسیسات TCSC به چندین واحد، به کارگیری مرحله‌ای واحدها را ممکن ساخته و باند کنترل نشده را تا حد کوچکی باریک خواهد کرد. قبلاً بیان شد که GCSC امپدانس مؤثر خازن را از صفر تا مقدار امپدانس در فرکانس سیستم، کنترل می‌کند. نتیجه می‌شود که در یک TCSC چند واحدی (یا TSSC) اگر یک واحد GCSC باشد، آن‌گاه امپدانس خازنی می‌تواند، در واقع به صورت یکنواخت، در تمام محدوده آن کنترل شود. به هر حال، وجود بعضی مسائل فنی ذاتی در این آرایش‌های مختلط، همان‌گونه که در پایان بخش ۶-۲-۱ بحث شد، ممکن است منجر به بعضی محدودیت‌های عملکردی شوند.

۶-۲-۴ مشخصه‌های زیر سنکرون

همان‌گونه که در بخش ۶-۱-۵ بحث شد، جبران سازی خازنی سری خط می‌تواند موجب تشدید زیر سنکرون شود، و این امر زمانی حادث می‌شود که خازن سری با کل اندوکتانس مدار انتقال در یک فرکانس زیر سنکرون f_c که برابر است با اختلاف بین فرکانس قدرت f و یکی از فرکانس‌های تشدید مجموعه توربین - ژنراتور، f_m یعنی $f_c = f - f_m$ دچار تشدید شود. جبران سازه‌های سری نوع امپدانس متغیر یک خازن سری را با خط به صورت سری قرار می‌دهند و به این ترتیب رفتار آن‌ها در شبکه انتقال در فرکانس‌های زیر سنکرون، به دلیل قابلیت کاربرد عمومی آن‌ها در جبران سازی نامحدود خط و کنترل سیلان توان، بحرانی می‌باشد.

همان‌گونه که قبلاً تأکید شد، محدودیت‌های تحمیل شده به وسیله تشدید زیر سنکرون (SSR) بر کاربری خازن‌های سری، تلاش‌های قابل توجهی را برای یافتن روش مؤثری در جهت میراسازی نوسانات زیر سنکرون به وجود آورد. در سال ۱۹۸۱ هینگورانی یک طرح کاهش با کنترل

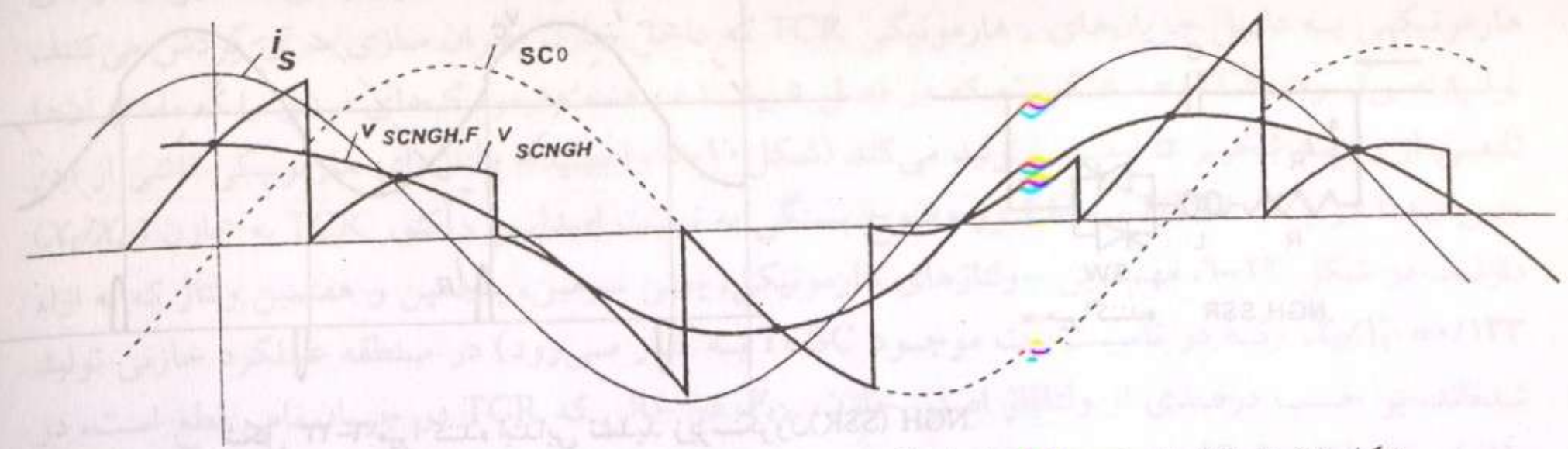


شکل ۶-۲۳: میراکننده ابتدایی تشدید زیر سنکرون (NGH SSR).

تریستوری برای خازن‌های سری پیشنهاد کرد (فصل ۹ را برای دمپ‌های NGH ببینید)، که در ایجاد تعدیل مؤثر در SSR، نقش مثبتی داشت. اگرچه این طرح می‌توانست برای تکمیل جبران سازه‌های خازنی سری مورد بحث در این فصل به کار رود، تلاش‌های تحقیقاتی بعدی آشکار کرد که اصل کاهندگی NGH می‌تواند به ساختار مداری اصلی TCSC تعمیم یابد تا آن را اساساً در برابر تشدید زیر سنکرون مصون سازد.

اصل اولیه دمپ NGH، وادار ساختن ولتاژ خازن سری به صفر شدن در انتهای هر نیم دوره است، در صورتی که مقدار آن از مقدار مربوط به مؤلفه اصلی ولتاژ در فرکانس قدرت سنکرون، تجاوز نماید. بنابراین، دمپ NGH یک مقاومت تخلیه کنترل شده با تریستور (به صورت سری با یک راکتور محدود کننده di/dt) است، که به صورت سنکرون با فرکانس سیستم قدرت، در محدوده نزدیک به انتهای نیم سیکل ولتاژ خازن عمل می‌کند، همان‌گونه که در شکل ۶-۲۳ نشان داده شده است. از آنجا که ولتاژ خازن نمی‌تواند به طور طبیعی به جریان زیر سنکرون خط پاسخ دهد، دمپ NGH دقیقاً با فرایند افزایش نوسانات زیر سنکرون تداخل می‌یابد. تأثیر واقعی دمپ NGH بر ولتاژ خازن ایجاد شده به وسیله مؤلفه زیر سنکرون جریان خط، در شکل ۶-۲۴ نشان داده شده است. به منظور نمایش، فرکانس جریان خط زیر سنکرون ۲۴ هرتز انتخاب شده و دمپ NGH در فرکانس ۱۲۰ هرتز عمل کرده است تا خازن را در فواصل منظم نیم سیکل، مربوط به فرکانس قدرت ۶۰ هرتز، تخلیه کند. امواج نشان داده در شکل عبارت‌اند از: جریان سینوسی ۲۴ هرتز خط i_s و ولتاژ سینوسی خازن آن V_{SCo} ، که در صورت عدم حضور دمپ NGH ایجاد می‌شوند، ولتاژ واقعی خازن V_{SCNGH} و مؤلفه اصلی آن $V_{SCNGH,F}$ ، که با فعال شدن دمپ NGH به دست می‌آیند. بررسی شکل به این مشاهده جالب منجر می‌شود که دمپ NGH، ولتاژ خازن با فرکانس زیر سنکرون ۲۴ هرتز را طوری جابجا می‌کند که هم‌فاز (یا تقریباً هم‌فاز) با جریان خط زیر سنکرون نظیر خود شود. به عبارت دیگر، خازن سری همراه با دمپ NGH، به جای مشخصه امپدانس خازنی در فرکانس زیر سنکرون ۲۴ هرتز، مشخصه مقاومتی از خود نشان می‌دهد. اگرچه این مشاهده در یک مثال نمایشی ارائه شده و به صورت عمومی و دقیق اثبات نشده، مطالعات و اندازه‌گیری‌های میدانی اثباتاً نشان می‌دهند، که رفتار واقعی مدار نیز با این خاصیت امپدانس مقاومتی مشاهده شده، مطابقت دارد.

خواننده احتمالاً اکنون مشابَهت چشمگیر میان دمپ NGH و مدار TCSC را ملاحظه کرده است - که اولی از مقاومت کنترل شونده با تریستور تشکیل یافته و دومی از راکتور کنترل شونده با راکتور، و هر دو به صورت موازی با خازن جبران سازی سری قرار می‌گیرند. اگرچه ترکیب مدار TCSC در ابتدا برای به وجود آوردن یک خازن سری متغیر طراحی شد، مشابَهت مدار امکان استفاده از آن را برای اجرای ضوابط کاهش تشدید زیر سنکرون (SSR) در NGH، مطرح کرد.

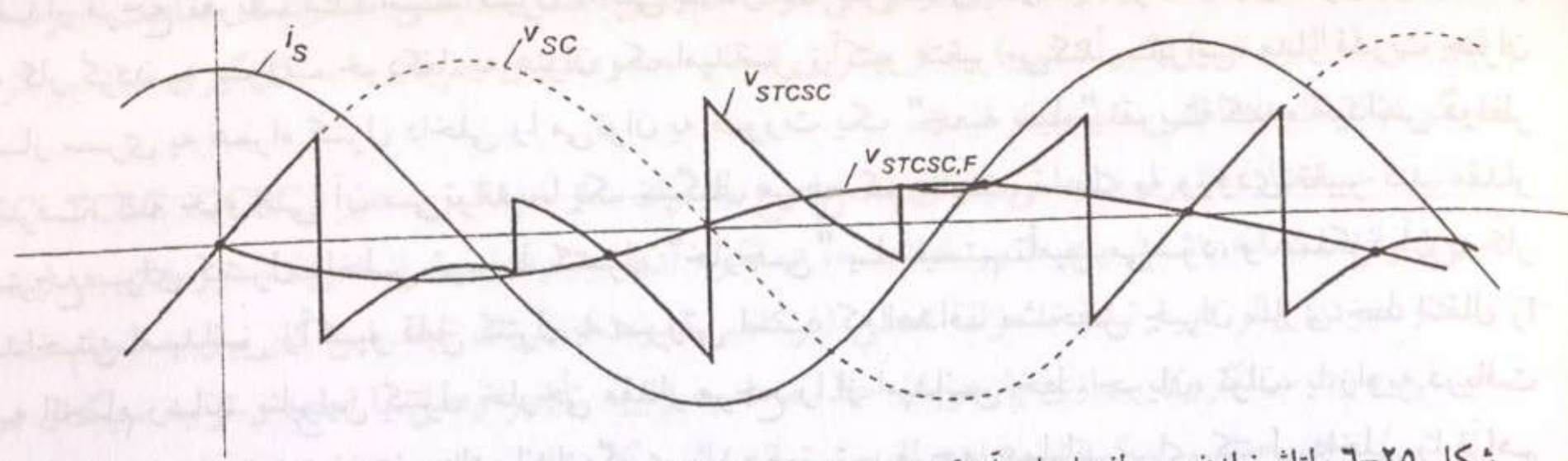


شکل ۶-۲۴ ولتاژ خازن و مؤلفه اصلی آن که به وسیله یک جریان ۲۴ هرتز زیرسنکرون تحت محدودیت اعمال شده توسط میراکنده NGH تولید شده است.

این مطلب سابقاً مورد بحث قرار گرفت که راکتور کنترل شده با تریستور هرگاه در TCSC برای افزایش امپدانس مؤثر خازنی به کار گرفته شود، ولتاژ خازن را در منطقه نزدیک به انتهای هر نیم سیکل مربوط به فرکانس قدرت، معکوس می‌کند. بنابراین، می‌توان انتظار داشت که این معکوس شدن سنکرون بار خازن، درست مثل تخلیه سنکرون خازن در طرح NGH، با پاسخ عادی خازن به یک جریان تحریک زیر سنکرون به گونه‌ای تداخل خواهد کرد که از افزایش نوسانات زیر سنکرون جلوگیری کند یا آن را متوقف نماید. هم‌چنین آشکار است که معکوس شدن بار، برعکس عمل تخلیه سنکرون دمپر NGH، منجر به از میان رفتن انرژی (صرف‌نظر از تلفات مدار) نمی‌شود و بنابراین تعدیل تشدید زیر سنکرون (SSR) به وسیله کاهش واقعی از طریق جذب و از بین رفتن انرژی از مدار تشدید LC نمی‌تواند صورت پذیرد.

برای ترسیم وجه تشابه میان عملکرد TCSC و مدار NGH، شکل موج ولتاژ به دست آمده روی خازن سری، برای جریان تحریک زیر سنکرون ۲۴ هرتز پیش گفته، با معکوس شدن ولتاژ خازن در هر نیم سیکل (۶۰ هرتز) به صورت منظم، که مشخصه عملکرد TCSC در منطقه خازنی است، در شکل ۶-۲۵ نشان داده شده است. شکل ۶-۲۵ همانند شکل ۶-۲۴ نشان دهنده شکل موج‌های: جریان خط ۲۴ هرتز i_s و ولتاژ خازنی v_{sc0} ، که بدون معکوس شدن بار در اثر عمل TCR حاصل می‌شوند، و ولتاژ واقعی خازن v_{scTCSC} و مؤلفه اصلی آن $v_{scTCSC,F}$ که با تکرار دوره‌ای معکوس شدن بار به دست می‌آیند، می‌باشد. بررسی این شکل آشکار می‌کند که معکوس شدن بار، مؤلفه اصلی ولتاژ ۲۴ هرتز را به صورتی جابجا می‌کند که نسبت به جریان خط ۲۴ هرتز مربوطه به اندازه ۹۰ درجه تقدم فاز پیدا می‌کند. به عبارت دیگر، مدار TCSC مشخصه امپدانس یک القاگر را در فرکانس‌های زیر سنکرون به نمایش می‌گذارد. بنابراین، اگر دمپر NGH با از میان بردن واقعی انرژی، یک مشخصه مقاومتی را برای خازن سری به وجود می‌آورد، معکوس شدن بار از طریق عمل TCR، امپدانس خازن سری را در باند فرکانس زیر سنکرون به امپدانس یک القاگر تبدیل می‌کند. این ملاحظه بدون تردید حائز اهمیت است، زیرا نشان می‌دهد که خط جبران سازی شده با TCSC نمی‌تواند باعث تشدید زیر سنکرون شده یا در آن مشارکت کند.

صحت کلی ملاحظه فوق تاکنون به طور مطمئن به اثبات نرسیده و روابط قابل اعمال برای مشخصه امپدانس در برابر فرکانس در TCSC، برحسب پارامترهای مدار مربوطه و کنترل (مثلاً X_C , X_L و α یا σ) به صورت روابط ریاضی در دسترس نیستند. به هر حال، مطالعات گسترده، شبیه‌سازی‌های کامپیوتری و آزمایشات واقعی در تأسیسات نمونه این طور نشان می‌دهد که TCSC اساساً در برابر



شکل ۶-۲۵ ولتاژ خازن و مؤلفه اصلی آن که به وسیله یک جریان ۲۴ هرتز زیرسنکرون تحت محدودیت های اعمال شده از طریق معکوس سازی ولتاژخازن توسط TCR تولید شده است.

تشدید زیر سنکرون خنثی است و نوسانات زیر سنکرون را وخیم تر نمی‌کند. تنها شرط برای این خاصیت مهم مدار آن است که معکوس شدن بار بایستی در فواصل نیم سیکلی مساوی مربوط به فرکانس اصلی سیستم انجام پذیرد. با زوایای تأخیر و هدایت متغیر TCR، این شرط در واقع تصریح می‌کند که مرکز زوایای هدایت متفاوت، مستقل از زاویه تأخیر موجود، نسبت به فواصل نیم سیکلی متواتر ثابت می‌ماند. به عبارت دیگر، زاویه هدایت در کل محدوده عملکرد، بایستی به طور قرینه در حول نقاط صفر شدن ولتاژ خازن قرار گیرد. آشکارا، رعایت این شرط با کاهش زوایای تأخیر به طور فزاینده‌ای دشوار می‌شود؛ زیرا با افزایش هدایت TCR، مکان‌های صفر شدن ولتاژ خازن، همان‌طور که قبلاً شرح داده شد، به صورت فزاینده‌ای از جریان خط تأثیر می‌پذیرند.

همان‌گونه که در بالا نشان داده شد، آرایش مدار TCSC، می‌تواند با کنترل صحیح عملکرد دریچه، در مقابل تشدید زیر سنکرون ایمن شود. البته این روش می‌تواند به TSSC گسترش یابد، که در این حالت هدایت TCR در حداقل نگاه داشته خواهد شد و منحصراً برای خنثی سازی تشدید زیر سنکرون (SSR) به کار خواهد رفت. (خواننده بایستی به یاد آورد که والو تریستوری، حتی در مدار "کلاسیک" TSSC، باید یک راکتور به صورت سری داشته باشد تا نرخ افزایش جریان را محدود کند.) در واقع، در یک جبران ساز خازنی سری بزرگ احتمالاً چندین مدار ابتدایی TCSC به صورت سری متصل خواهند شد، و اغلب آن‌ها به صورتی عمل می‌کنند که TCR کاملاً وصل (میان بر) یا کاملاً قطع (خازن در مدار) باشد تا هارمونیک‌ها و تلفات عملیاتی را به حداقل رسانند.

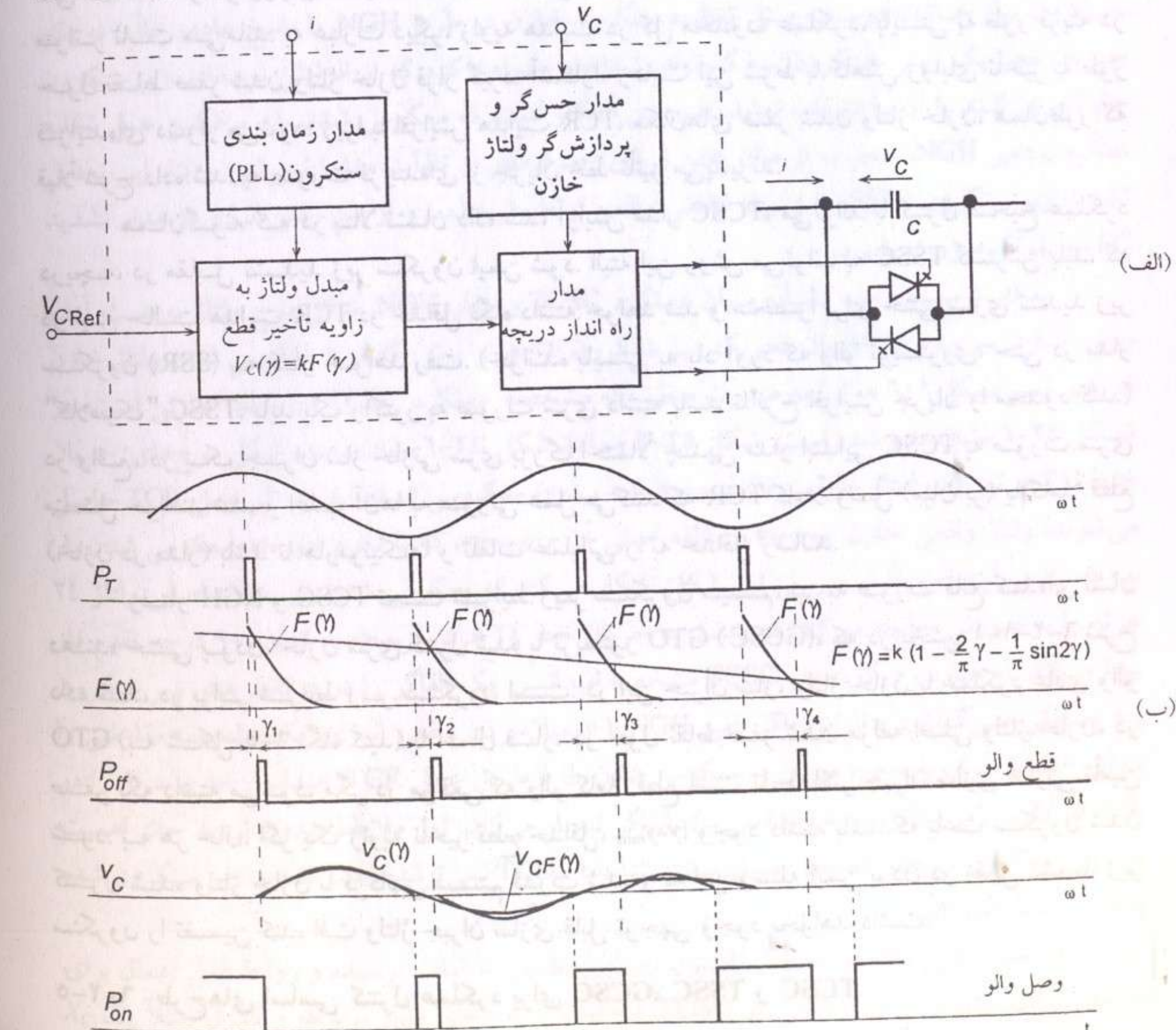
رفتار NGH و TCSC تحت شرایط زیر سنکرون سیستم، نیز به صورت قانع کننده‌ای نشان دهنده خنثی بودن، خازن سری کنترل شده با تریستور GTO (GCSC)، که در بخش ۶-۲-۱-۱ شرح داده شد، در برابر شرایط زیر سنکرون است. در این جبران ساز، ولتاژ خازن با عملکرد عادی والو GTO (به شکل ۶-۵ نگاه کنید) با اعمال فشار، در حول نقاط صفر شدن مؤلفه اصلی ولتاژ خازن، در صفر نگه داشته می‌شود، مگر در مواقعی که والو کاملاً قطع است تا حداکثر جبران سازی خازنی تأمین شود. به هر حال، اگر یک زاویه تأخیر قطع حداقل، $\gamma = \gamma_{min}$ ، وجود داشته باشد که باعث سنکرون شدن کنترل شده ولتاژ خازن با فرکانس سیستم قدرت شده و به این وسیله ایمن بودن در مقابل تشدید زیر سنکرون را تضمین کند، افت ولتاژ جبران سازی قابل توجهی وجود نخواهد داشت.

۶-۲-۵ طرح‌های اساسی کنترل عملکرد برای GCSC, TSSC و TCSC

کارکرد عملیاتی یا کنترل "داخلی" جبران سازه‌های نوع امپدانس متغیر، فراهم کردن راه‌انداز مناسب دریچه برای والو تریستوری به منظور تولید ولتاژ یا امپدانس جبران سازی است، که توسط یک

مقدار مرجع تعریف شده است. کنترل داخلی با کار انداختن مدار قدرت جبران سازی سری آن را قادر به کار کردن به صورت خودکفا، به عنوان یک امپدانس راکتیو متغیر می‌کند. بنابراین، مدار قدرت جبران ساز سری به همراه کنترل داخلی را می‌توان به صورت یک "جعبه سیاه" تقویت کننده امپدانس در نظر گرفت، که خروجی آن می‌تواند، با یک سیگنال مرجع کم قدرت، نسبت به ورودی تغییر کند. مقدار مرجع برای کنترل داخلی توسط کنترل "خارجی" یا سیستم تأمین می‌شود، و عملکرد آن به کار انداختن امپدانس راکتیو قابل کنترل به صورتی است، که اهداف مشخص جبران سازی خط انتقال را به انجام رساند. بنابراین کنترل خارجی مقدار مرجع را از امپدانس خط، جریان، توان، یا زاویه دریافت می‌کند و در محدوده متغیرهای اندازه‌گیری شده سیستم، مرجع عملیاتی برای کنترل داخلی را فراهم می‌کند.

همان‌گونه که ملاحظه شد، مدار قدرت جبران سازه‌های سری با هدایت جریان سنکرون مطمئن و کنترل مسدود سازی به صورتی عمل می‌کنند که نه تنها امپدانس مؤثر آن‌ها را در فرکانس قدرت تعریف می‌کنند بلکه می‌توانند مشخصه امپدانس آن‌ها را در باند فرکانس بحرانی زیر سنکرون نیز تعیین نمایند. لذا این کارکرد سنکرون سازی زیر بنای یک کنترل داخلی کارآمد است. کارکردهای اضافی دیگر شامل تبدیل مرجع ورودی به زمان‌های مناسب کلیدزنی است که منجر به دوره‌های



شکل ۶-۲۶ طرح عملیاتی کنترل داخلی برای GCSC (الف)، و شکل موج های مربوطه که اصول بنیادی عملکرد را نشان می‌دهند (ب).

مطلوب هدایت یا مسدودسازی والو می‌شود. همچنین، کنترل داخلی مسئولیت حفاظت اجزاء اصلی قدرتی (والو، خازن، راکتور) را، از طریق انجام محدودسازی جریان یا به کارگیری میان بر کردن یا دیگر امکانات حفاظتی، عهده‌دار است.

ساختار کنترل داخلی برای سه نوع جبران ساز امپدانس متغیر (TSSC, TCSC, GCSC) می‌تواند مشابه باشد. به طور خلاصه، عملکرد آن‌ها عبارت‌است از تعریف دوره‌های هدایت و/یا مسدود بودن والو در ارتباط با مؤلفه اصلی (فرکانس قدرت) جریان خط. این کار نیاز به انجام سه عمل اصلی دارد: سنکرون سازی با جریان خط، محاسبه زاویه تأخیر وصل یا قطع، و تولید سیگنال درجه (آتش). واضح است که این اعمال می‌تواند با رویکردهای مداری متفاوتی انجام شود، که مزایا و اشکالات متفاوتی دارند. در ادامه، سه طرح کنترل داخلی از نظر کارکردی مورد بحث قرار می‌گیرند: یک طرح برای GCSC و دو طرح دیگر برای آرایش مدارهای قدرتی TCSC. هر یک از طرح‌های مربوط به TCSC می‌تواند برای TSSC، اگر که تشدید زیر سنکرون در کارکرد آن مورد توجه باشد، به کار گرفته شود.

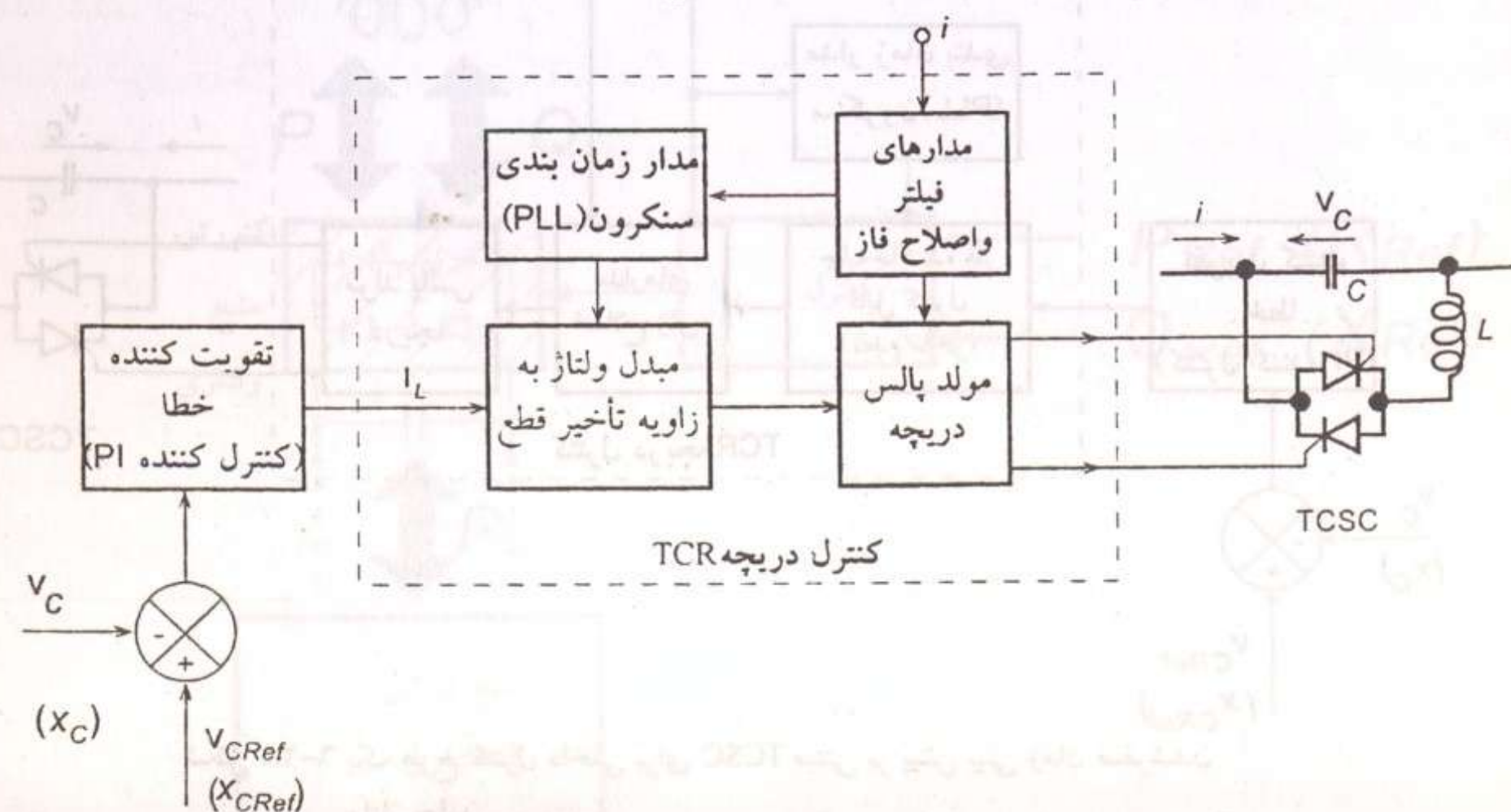
یک طرح کنترل داخلی، برای خازن سری کنترل شده با GTO که در شکل ۶-۵ نشان داده شده بود، در شکل ۶-۲۶ الف آورده شده است. به دلیل تناظر بین آرایش‌های GCSC با اتصال موازی و TCR با اتصال سری، این طرح کنترلی، مشابه همان طرحی است که در شکل ۵-۱۹ الف برای TCR نشان داده شده بود. این طرح دارای چهار کارکرد اصلی است.

"اولین کارکرد" زمان بندی سنکرون است که توسط یک مدار حلقوی قفل باز، که با جریان خط به صورت سنکرون کار می‌کند، تأمین می‌شود.

"دومین کارکرد" تبدیل ولتاژ راکتیو یا امپدانس به زاویه تأخیر قطع، به ترتیب براساس روابط داده شده در (۶-۸ الف) یا (۶-۸ ب) است.

"سومین کارکرد" تعیین لحظه وصل والو در هنگام صفر شدن ولتاژ خازن است. (این کارکرد می‌تواند شامل حفظ یک حداقل زمان در هنگام صفر شدن ولتاژ باشد، تا از ایمنی در برابر تشدید زیر سنکرون اطمینان حاصل شود).

"چهارمین کارکرد" تولید پالس‌های مناسب قطع و وصل برای والو GTO است.

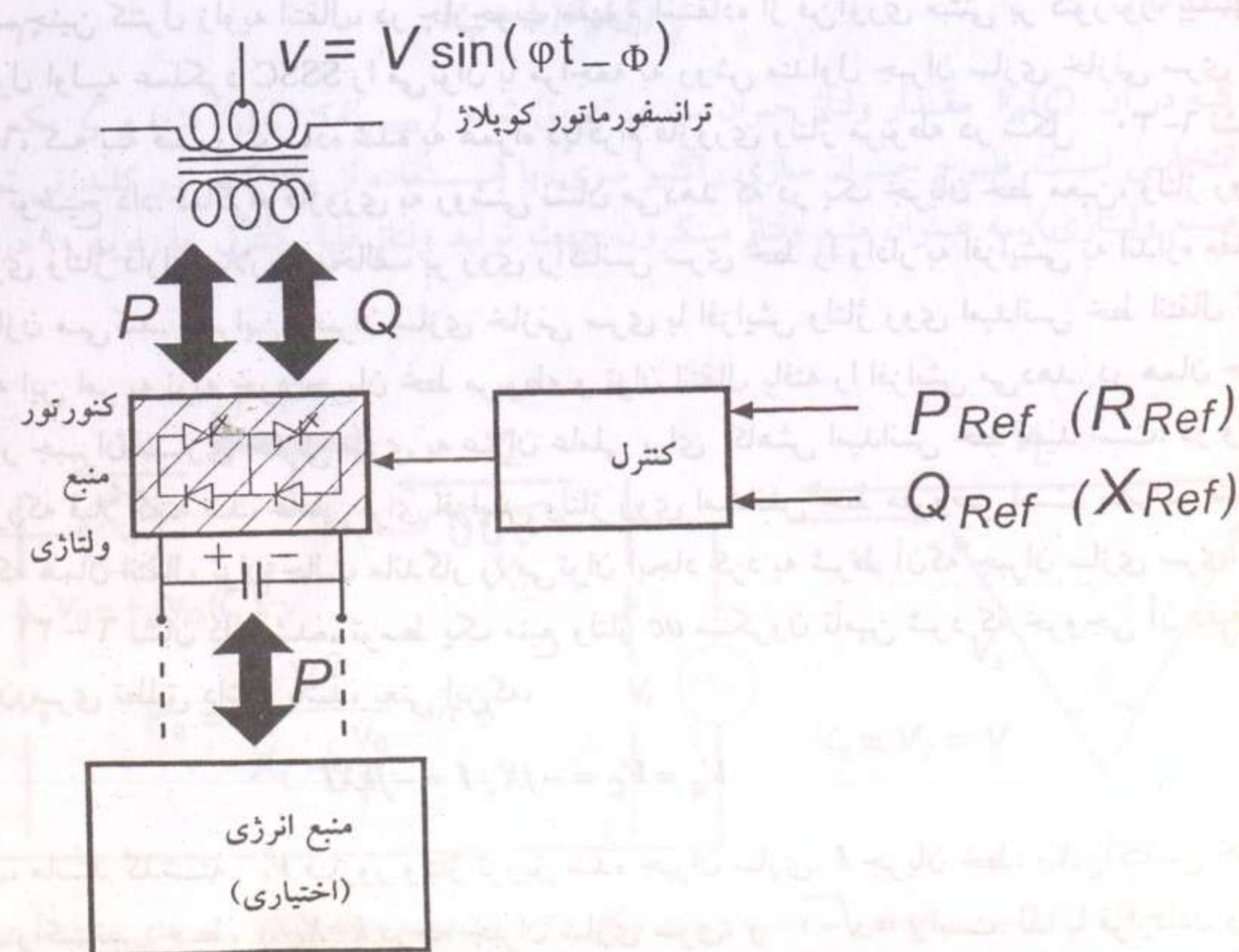


شکل ۶-۲۷ یک طرح کنترل داخلی برای TCSC مبتنی بر سنکرون سازی با مؤلفه اصلی جریان خط.

اگرچه عملکردهای مدار کنترل معمولاً به شدت به اجرای واقعی بستگی دارند، به نظر می‌رسد که رویکرد دوم از نظر ثنوری پاسخ سریع‌تری، برای آن نوع کاربردها که چنین پاسخی را می‌طلبند، تأمین می‌کند.

۳-۶ جبران سازهای سری، نوع کنورتور سوئیچ شونده

در فصل ۵ مشخص شد (بخش ۲-۲-۵ را ببینید) که کنورتور منبع ولتاژی با کنترل داخلی آن می‌تواند یک منبع ولتاژ سنکرون (SV) در نظر گرفته شود که معادل یک مولد ایده‌آل الکترومغناطیسی است: یعنی این که می‌تواند مجموعه‌ای از (سه) ولتاژهای، تا حد زیادی، سینوسی در مؤلفه اصلی فرکانس با دامنه و زاویه فاز قابل کنترل تولید کند، توان رآکتیو را تولید یا جذب کند، و توان حقیقی (آکتیو) را وقتی که، برمینال‌های dc آن به یک منبع مناسب انرژی الکتریکی dc یا ذخیره، متصل شده باشند، با سیستم ac مبادله کند. بنابراین، SVS می‌تواند به شکلی خودکفا، با یک خازن ذخیره dc نسبتاً کوچک عمل کند و

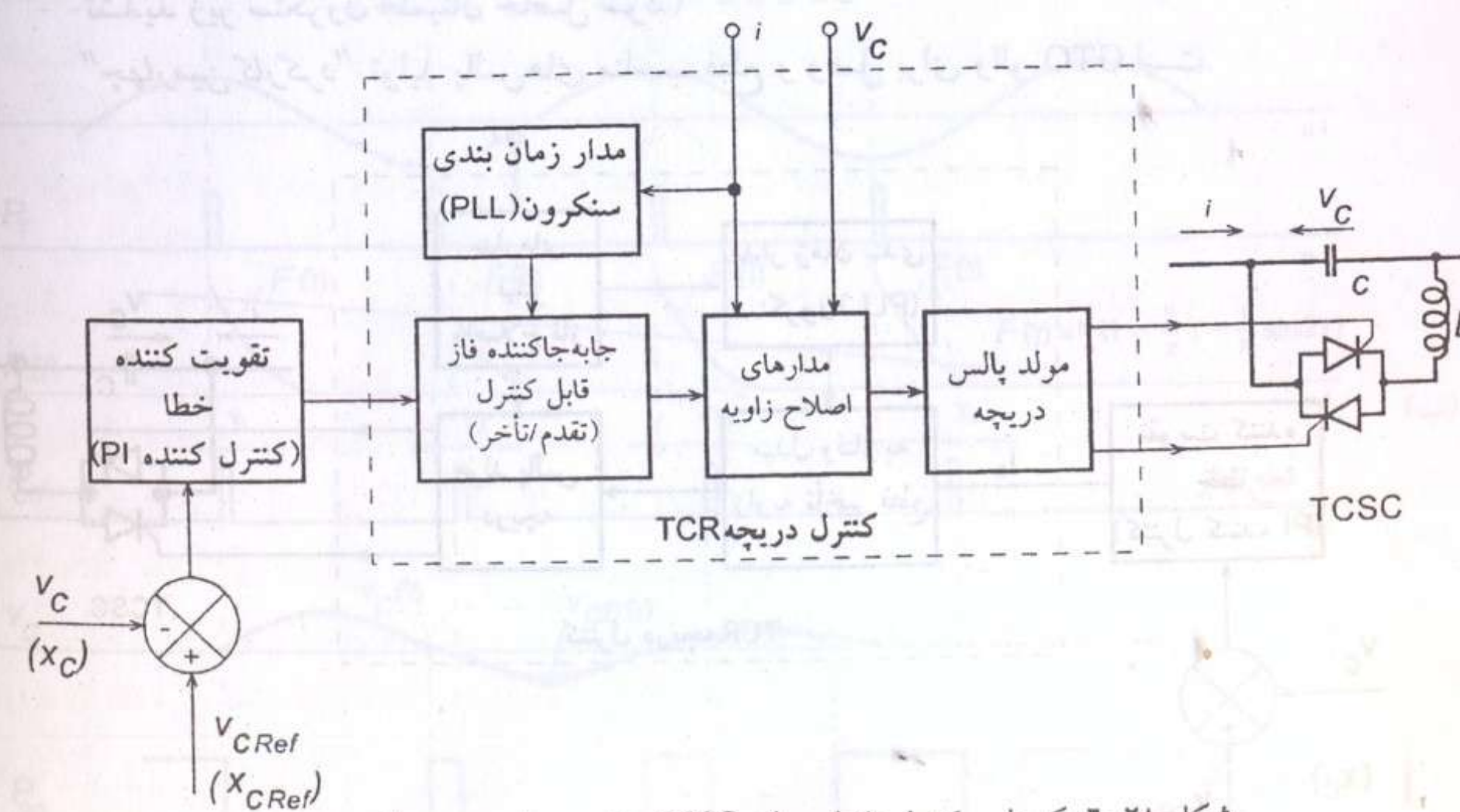


شکل ۲۹-۶ نمایش عملیاتی منبع ولتاژ سنکرون مبتنی بر یک کنورتور منبع ولتاژی.

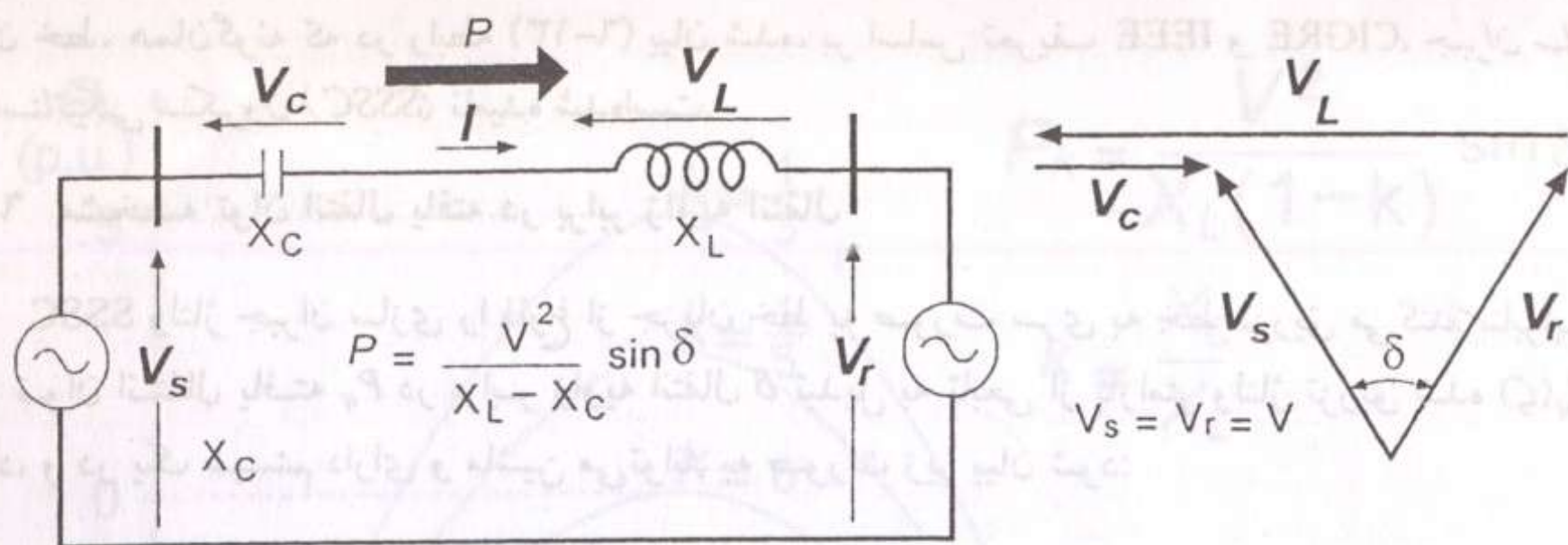
عملکرد مدار قدرت GCSC و کنترل داخلی به صورت شکل موج، در شکل ۲۶-۶ ب، نشان داده شده. بررسی این شکل موج‌ها نشان می‌دهد که، از دیدگاه یک "جعبه سیاه"، GCSC اصلی (مدار قدرت به علاوه کنترل داخلی) می‌تواند به صورت یک خازن سری قابل کنترل در نظر گرفته شود که در پاسخ به جریان خط انتقال، (در یک باند فرکانسی داده شده و مقدار نامی معین) امپدانس (یا ولتاژ) جبران سازی تعریف شده توسط مرجع ورودی را تولید می‌کند. کارکرد دینامیکی GCSC مشابه TCR بوده به صورتی که هر دو دارای یک حداکثر تأخیر انتقال برابر نیم سیکل هستند.

ملاحظه اصلی در ساختار کنترل داخلی در مدار قدرتی TCSC، حصول اطمینان از ایمنی در برابر تشدید زیر سنکرون است. رویکرد حاضر دو فلسفه اساسی کنترل را دنبال می‌کند. رویکرد اول، عملکرد حلقه قفل باز (PLL) توسط مؤلفه اصلی جریان خط است. برای حصول به این امر، لازم است که فیلتر کردن به طور اساسی انجام شود تا مؤلفه‌های فوق سنکرون و به خصوص زیر سنکرون از جریان خط زوده شوند، و در همان زمان، رابطه صحیح فازی برای سنکرون کردن مناسب، حفظ شود. یک طرح عملی برای این نوع کنترل داخلی در شکل ۲۷-۶ نشان داده شده است. در این آرایش، تکنیک متداول تبدیل جریان مورد نیاز TCR به زاویه تأخیر مربوطه، که از نقطه اوج (یا با ۹۰ درجه جابه‌جایی ثابت از نقطه صفر شدن)، مؤلفه اصلی جریان خط اندازه‌گیری شده، به کار می‌رود. مرجع برای جریان مورد نیاز TCR، همان‌طور که در شکل ۲۷-۶ نشان داده شده، معمولاً توسط یک حلقه تنظیم کننده کنترل بیرونی تأمین می‌شود، که امیدانس خازنی واقعی یا ولتاژ جبران سازی را با مرجع داده شده، برای عملکرد مطلوب سیستم، مقایسه می‌کند.

دومین رویکرد نیز از یک PLL استفاده می‌کند، که برای تولید مرجع اصلی زمان‌بندی، با جریان خط، سنکرون شده است. در این روش، نقطه صفر شدن واقعی ولتاژ خازن، توسط یک مدار تصحیح زاویه، از روی ولتاژ موجود خازن و جریان خط، تخمین زده می‌شود. آن‌گاه زاویه تأخیر از روی زاویه مطلوب و زاویه تصحیح تخمین زده شده، تعیین می‌شود، به صورتی که هدایت TCR نسبت به نقطه



شکل ۲۸-۶ یک طرح کنترل داخلی برای TCSC مبتنی بر پیش بینی زمان صفرشدن ولتاژ خازن.



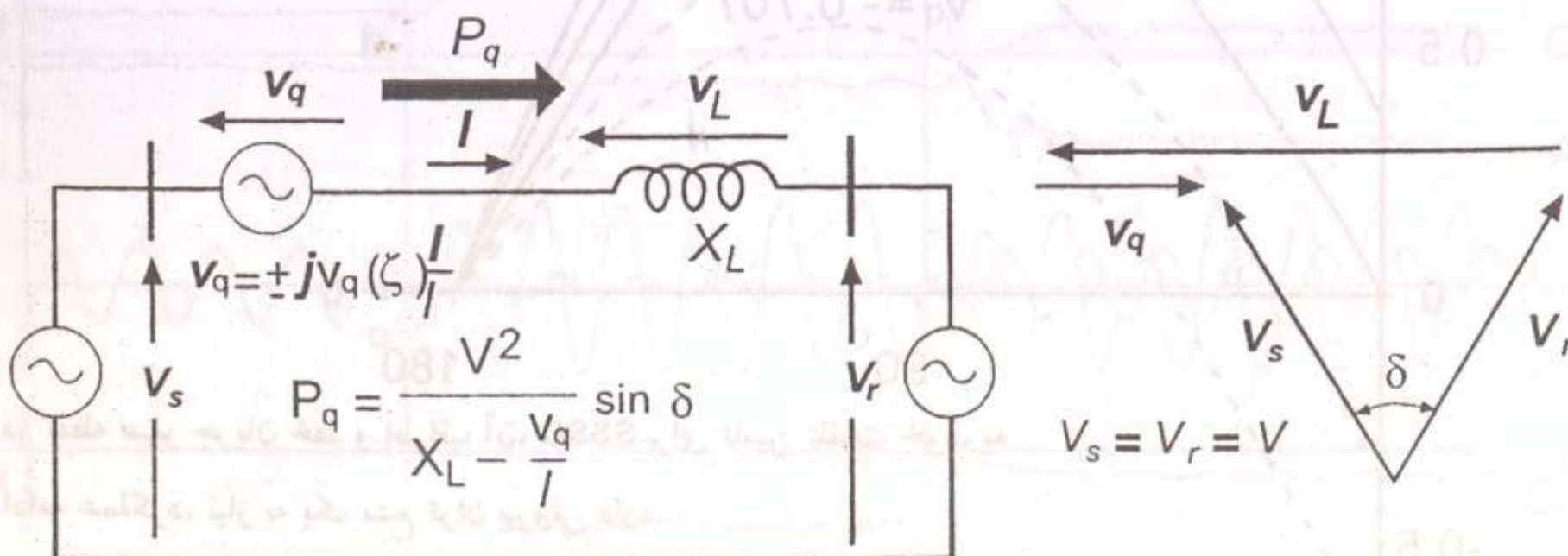
شکل ۶-۳۰ سیستم ابتدایی دو ماشینه با یک خط جبران سازی شده با خازن سری و دیاگرام فازوری مربوطه.

هر حال، برخلاف خازن سری واقعی، SVS می‌تواند ولتاژ جبران سازی ثابتی را در حضور جریان متغیر خط حفظ کند، یا مقدار ولتاژ جبران سازی تزریق شده را مستقل از دامنه جریان خط، کنترل نماید. برای جبران سازی خازنی عادی، ولتاژ خروجی ۹۰ درجه عقب تر از جریان خط است. برای SVS، ولتاژ خروجی می‌تواند با عمل کنترلی ساده‌ای معکوس شود تا آن را ۹۰ درجه نسبت به جریان خط عقب‌تر یا جلوتر قرار دهد. در این حالت، ولتاژ تزریق شده، ولتاژ روی امپدانس القایی خط را کاهش می‌دهد و به این ترتیب، جبران سازی سری همان اثری را دارد که گویی امپدانس راکتیو خط افزایش یافته است.

با ملاحظات فوق، یک رابطه عمومی برای ولتاژ تزریق شده V_q ، به سادگی می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$V_q = \pm j V_q(\zeta) \frac{I}{I} \quad (6-13)$$

که در آن $V_q(\zeta)$ مقدار ولتاژ جبران سازی تزریق شده ($0 \leq V_q(\zeta) \leq V_{q\max}$) و ζ یک پارامتر کنترل انتخابی است. طرح جبران سازی راکتیو سری، با استفاده از یک کنورتور کلیدزنی توان (کنورتور منبع ولتاژی) به عنوان منبع ولتاژ سنکرون جهت تولید ولتاژ قابل کنترل با زاویه ۹۰ درجه نسبت به



شکل ۶-۳۱ سیستم ابتدایی دو ماشینه همانند شکل ۶-۳۰ اما با منبع ولتاژ سنکرون به جای خازن سری.

مثل یک مولد استاتیکی توان راکتیو، توان راکتیو را با سیستم ac مبادله کند، یا به همراه یک تأمین کننده بیرونی توان dc مثل یک مولد استاتیکی، یا یک وسیله ذخیره سازی انرژی، نیز به صورت مستقل به مبادله توان حقیقی قابل کنترل، با سیستم بپردازد. نمایش عملیاتی SVS در شکل ۶-۲۹ نشان داده شده است. مقادیر مرجع P_{Ref} و Q_{Ref} (یا دیگر پارامترهای مرتبط، مثل امپدانس راکتیو جبران سازی مطلوب X_{Ref} و مقاومت R_{Ref}) دامنه ولتاژ V و زاویه فاز ψ ولتاژ خروجی تولید شده مورد نیاز، برای مبادله توان راکتیو و آکتیو مطلوب در خروجی ac ، را تعریف می‌کنند. اگر SVS صرفاً برای مبادله توان راکتیو به کار رود، P_{Ref} (یا R_{Ref}) در مقدار صفر تنظیم می‌شود.

مفهوم استفاده از منبع ولتاژ سنکرون (SVS) برای جبران سازی سری بر این واقعیت قرار دارد که مشخصه امپدانس در برابر فرکانس خازن سری، بر خلاف کاربردهای فیلتر، نقشی در انجام جبران سازی مورد نیاز یک خط انتقال، انجام نمی‌دهد. (در مقابل، همان‌طور که در بخش‌های گذشته بحث شد، تکنیک‌های کنترلی خاصی در خازن‌های سری کنترل شده با ترستور به کار می‌رود تا مشخصه امپدانس در برابر فرکانس آن‌ها را در باند فرکانسی زیر سنکرون به صورتی تغییر دهد که آن‌ها را در مقابل تشدید زیر سنکرون ایمن سازد.) عملکرد خازن سری، به سادگی، تولید یک ولتاژ مناسب در مؤلفه اصلی فرکانس سیستم ac ، با نود درجه اختلاف فاز با جریان خط انتقال است، به صورتی که ولتاژ روی امپدانس القایی خط را افزایش داده و به این طریق جریان خط و توان انتقال یافته افزایش پیدا کند. مشخصه‌های منبع ولتاژ سنکرون به روشنی خبر از یک قابلیت جبران سازی قابل توجه برای خط می‌دهند.

۶-۳-۱ جبران ساز استاتیکی سنکرون (SSSC)

جبران ساز سری منبع ولتاژی مبتنی بر کنورتور، که به آن جبران ساز استاتیکی سنکرون (SSSC) می‌گویند، در سال ۱۹۸۹ به وسیله "گایوگی" به صورت یکسان برای جبران سازی موازی و سری، و همچنین کنترل زاویه انتقال، در چارچوب مفهوم استفاده از فن‌آوری مبتنی بر کنورتور، پیشنهاد شد. اصول اولیه عملکرد SSSC را می‌توان با مراجعه به روش متداول جبران سازی خازنی سری در شکل ۶-۱، که به صورت ساده شده به همراه دیاگرام فازوری ولتاژ مربوطه در شکل ۶-۳۰ نشان داده شده، توضیح داد. دیاگرام فازوری به روشنی نشان می‌دهد که در یک جریان خط معین، ولتاژ روی خازن سری ولتاژ دارای پلاریته مخالف بر روی راکتانس سری خط را وادار به افزایشی به اندازه مقدار ولتاژ خازن می‌کند. بنابراین، جبران سازی خازنی سری با افزایش ولتاژ روی امپدانس خط انتقال کار می‌کند، که این امر به نوبه خود جریان خط مربوطه و توان انتقال یافته را افزایش می‌دهد. در همان حال که تصور جبران سازی خازنی سری به عنوان عاملی برای کاهش امپدانس خط مفید است، در واقع همان‌طور که قبلاً گفته شد، عاملی برای افزایش ولتاژ روی امپدانس خط مفروض است. بنابراین نتیجه می‌شود که همان انتقال توان حالت ماندگار را می‌توان ایجاد کرد به شرط آن‌که جبران سازی سری، که در شکل ۶-۳۱ نشان داده شده، توسط یک منبع ولتاژ ac سنکرون تأمین شود که خروجی آن دقیقاً با ولتاژ خازن سری تطابق داشته باشد، یعنی این‌که،

$$V_q = V_c = -j X_c I = -j k X I \quad (6-12)$$

که در آن، مانند گذشته V_c فازور ولتاژ تزریق شده جبران سازی، I جریان خط، X_c راکتانس خازن سری، X راکتانس خط، $k = X_c / X$ درجه جبران سازی سری، و $z = \sqrt{-1}$ است. لذا با قراردادن ولتاژ خروجی منبع ولتاژ سنکرون به عنوان تابعی از جریان خط، همان‌طور که در رابطه (۶-۱۲) مشخص شده، همان جبران سازی تأمین شده توسط خازن سری انجام می‌شود. به

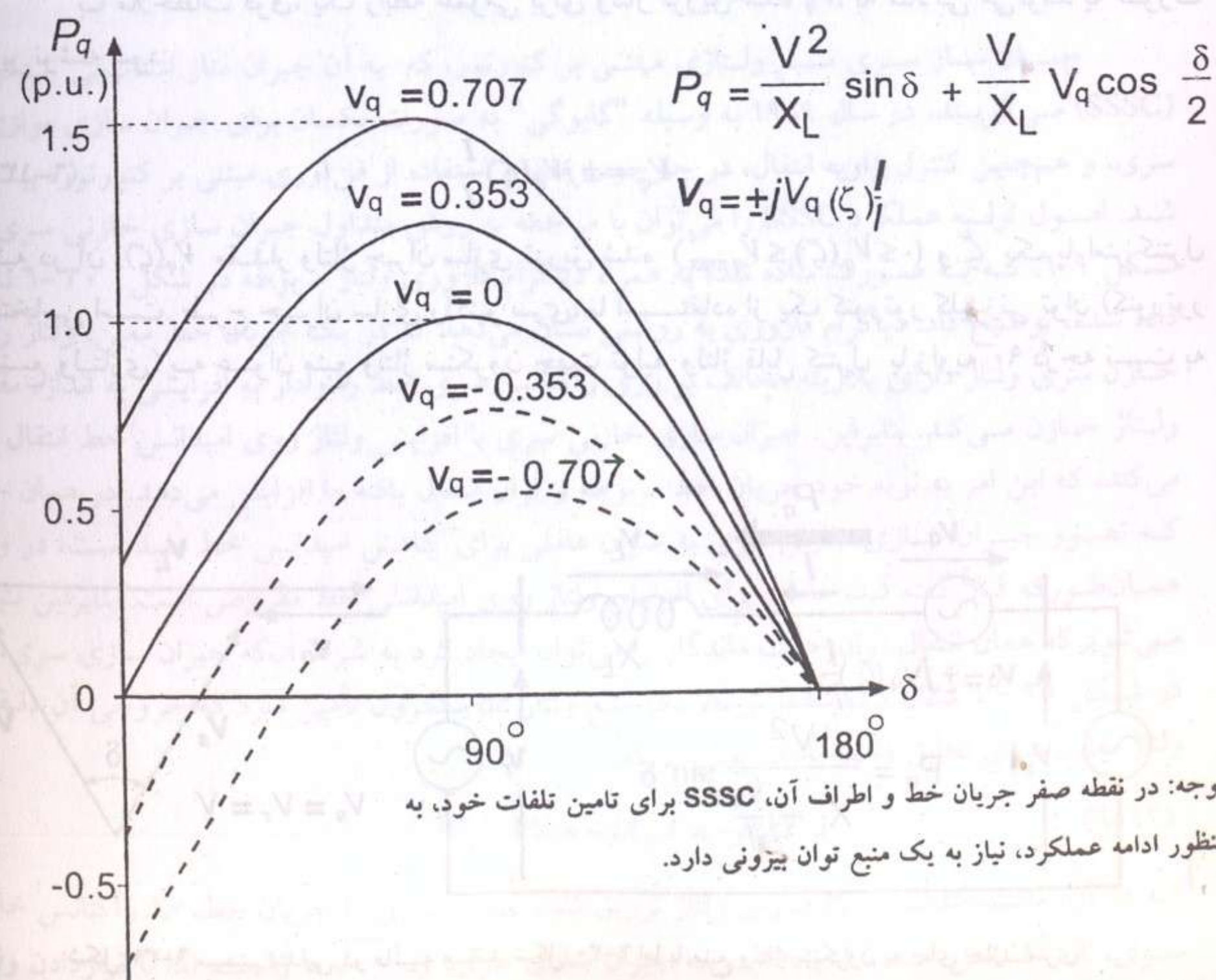
جریان خط، همان‌گونه که در رابطه (۶-۱۳) بیان شده، بر اساس تعریف IEEE و CIGRE، جبران‌ساز سری استاتیکی سنکرون (SSSC) نامیده شده است.

۶-۳-۲ مشخصه توان انتقال یافته در برابر زاویه انتقال

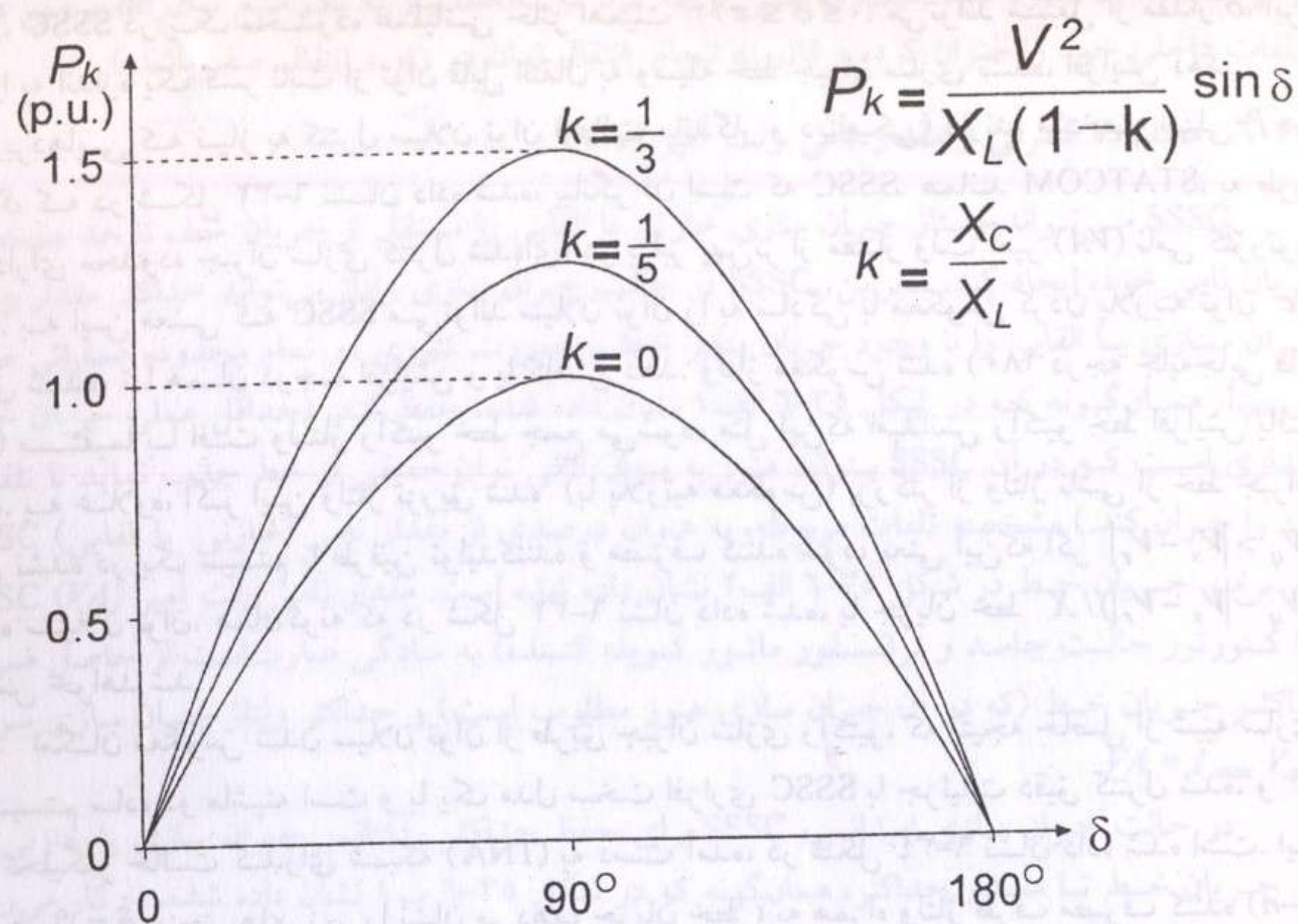
SSSC ولتاژ جبران‌سازی را فارغ از جریان خط به صورت سری به خط تزریق می‌کند. بنابراین رابطه توان انتقال یافته P_q در برابر زاویه انتقال δ تبدیل به تابعی از پارامتر ولتاژ تزریق شده $V_q(\zeta)$ می‌شود، و در یک سیستم دارای ماشین می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$P = \frac{V^2}{X} \sin \delta + \frac{V}{X} V_q \cos \frac{\delta}{2} \quad (6-14)$$

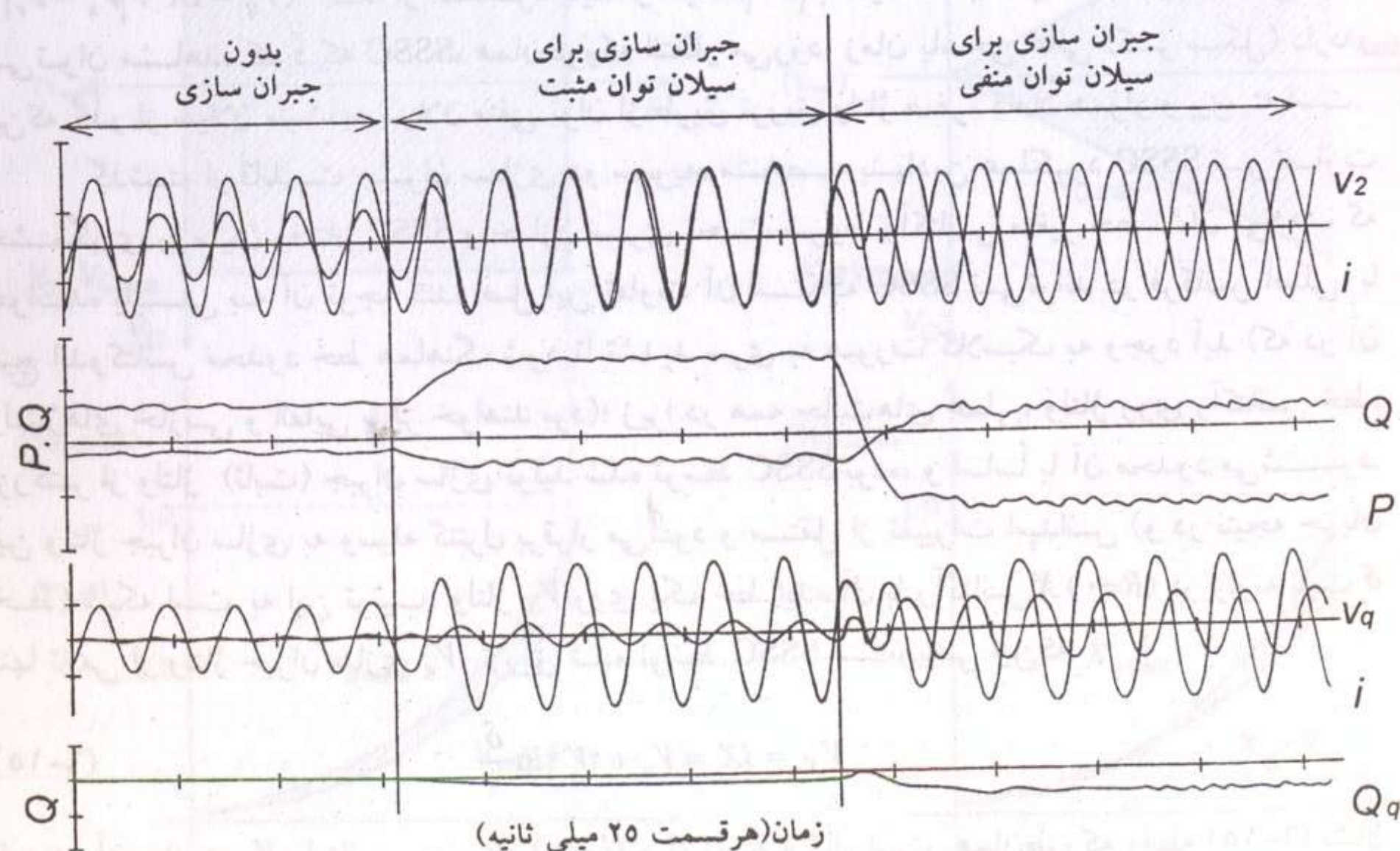
منحنی‌های توان نرمال شده P در برابر زاویه δ به صورت تابعی از V_q به ازاء V_q مساوی صفر، ± 0.353 و ± 0.707 در شکل ۶-۳۲ نشان داده شده‌اند به منظور مقایسه، منحنی‌های توان نرمال شده P در برابر زاویه δ در یک سیستم دو ماشینه که با خازن سری جبران شده، به صورت تابعی از درجه جبران‌سازی سری، k ، در شکل ۶-۳۳ نشان داده شده‌اند. برای این مقایسه، k طوری انتخاب شده است که همان مقدار حداکثر توان را بدهد که SSSC با V_q مربوطه می‌دهد. یعنی این‌که در $\delta = 90^\circ$ ، $k = \frac{1}{5}$ وقتی که $V_q = 0.353$ و $k = \frac{1}{3}$ وقتی $V_q = 0.707$ باشد. مقایسه منحنی‌های نظیر در شکل‌های ۶-۳۲ و ۶-۳۳ به روشنی نشان می‌دهد که خازن سری توان انتقال یافته را در یک δ مشخص، به اندازه درصد ثابتی نسبت به توان انتقال در خط جبران‌سازی نشده افزایش می‌دهد، و در



شکل ۶-۳۲ توان انتقال یافته در برابر زاویه انتقال، ایجاد شده به وسیله SSSC، بر حسب ولتاژ جبران‌سازی سری به عنوان متغیر.



شکل ۶-۳۳ توان انتقال یافته در برابر زاویه انتقال قابل حصول از طریق جبران‌سازی سری بر حسب درجه جبران‌سازی سری به عنوان متغیر.



شکل ۶-۳۴ اسیلوگرام‌های به دست آمده از شبیه‌سازی در تحلیل گرجات گذرای شبکه که نشان دهنده قابلیت SSSC در کنترل و نیز معکوس‌سازی سیلان توان حقیقی است.

مقابل، SSSC در یک محدوده عملیاتی حائز اهمیت $0 \leq \delta \leq \pi/2$ می‌تواند مستقل از مقدار δ ، این توان را به اندازه یک کسر ثابت از توان قابل انتقال به وسیله خط جبران سازی نشده، افزایش دهد. در کاربردهایی که نیاز به کنترل سیلان توان (حالت ماندگار و دینامیکی) دارند، مشخصه اصلی P در برابر δ که در شکل ۶-۳۲ نشان داده شده، بیانگر آن است که SSSC، همانند STATCOM، به طور ذاتی دارای محدوده جبران سازی کنترل شده‌ای، دو برابر پهن‌تر از مقدار ولت آمپر (VA) نامی کنورتور است. به این معنی که SSSC می‌تواند سیلان توان را به سادگی با معکوس کردن پلاریته توان ac تزریق شده، تا همان درجه افزایش و یا کاهش دهد. ولتاژ معکوس شده (180° درجه جابه‌جایی فاز شده) مستقیماً با افت ولتاژ راکتیو خط جمع می‌شود، مثل این‌که امپدانس راکتیو خط افزایش یافته است. به علاوه، اگر این ولتاژ تزریق شده (با پلاریته معکوس) بزرگتر از ولتاژ ناشی از خط جبران سازی نشده در یک سیستم با طرفین تولیدکننده و مصرف کننده شود، یعنی این‌که اگر $V_q > |V_s - V_r|$ ، آن‌گاه سیلان توان، همان‌گونه که در شکل ۶-۳۲ نشان داده شده، با جریان خط $(V_q - |V_s - V_r|)/X$ معکوس خواهد شد.

امکان معکوس شدن سیلان توان از طریق جبران سازی راکتیو، که نتیجه حاصل از شبیه سازی یک سیستم ساده دو ماشین است و با یک مدل سخت افزاری SSSC با جزئیات دقیق کنترل شده، و از یک تحلیلگر حالت گذرای شبکه (TNA) به دست آمده، در شکل ۶-۳۴ نشان داده شده است. این شکل در $\delta = 1^\circ$ منحنی‌های زیر را نشان می‌دهد، جریان خط i به همراه ولتاژ طرف مصرف کننده $(l-n)$ در فاز A ، $v_r = v_s$ ، توان انتقال یافته P به همراه توان راکتیو Q که از طرف مصرف کننده تأمین شده، همان جریان خط i به همراه ولتاژ V_q که به وسیله SSSC در فاز A تزریق شده، و توان راکتیوی که SSSC در حالت غیر جبران سازی ($V_q = 0$) با سیستم ac مبادله کرده، جبران سازی راکتیو خالص برای سیلان مثبت توان $(V_q = LX - |V_s - V_r|)$ و جبران سازی راکتیو خالص برای سیلان منفی توان $(V_q = LX + |V_s - V_r|)$. جدا از عملکرد پایدار سیستم هم با سیلان مثبت و هم با سیلان منفی توان، می‌توان مشاهده کرد که SSSC، همان‌طور که انتظار می‌رود، زمان پاسخی عالی (کسر سیکل) دارد و این‌که گذر از سیلان مثبت به سیلان منفی توان از طریق تزریق ولتاژ صفر، کاملاً هموار و پیوسته است. گذشته از قابلیت جبران سازی دو سویه، مشخصه بنیادین عملکرد SSSC نیز تفاوت چشمگیری را میان رفتار SSSC و خازن سری تحت شرایط راکتانس متغیر خط نشان می‌دهد، که خواننده بایستی به آن توجه کند. اصل این تفاوت آن است که SSSC نمی‌تواند در فرکانس اصلی، با هیچ اندوکتانس محدود خط هماهنگ شود تا تشدید سری به صورت کلاسیک به وجود آید (که در آن ولتاژهای خازنی و القایی برابر خواهند بود)؛ زیرا در همه حالت‌های عملی، ولتاژ روی راکتانس خط، بزرگتر از ولتاژ (ثابت) جبران سازی تولید شده توسط SSSC بوده، و اساساً با آن محدود می‌شود. این ولتاژ جبران سازی به وسیله کنترل برقرار می‌شود و مستقل از تغییرات امپدانس (و در نتیجه جریان خط) شبکه است. به این ترتیب، ولتاژ V_X روی یک خط ایده آل با راکتانس X ($R=0$) در زاویه ثابت δ تنها تابعی از ولتاژ جبران سازی V_q تزریق شده توسط SSSC است، یعنی این‌که

$$V_X = LX = V_q + 2V \sin \frac{\delta}{2} \quad (6-15)$$

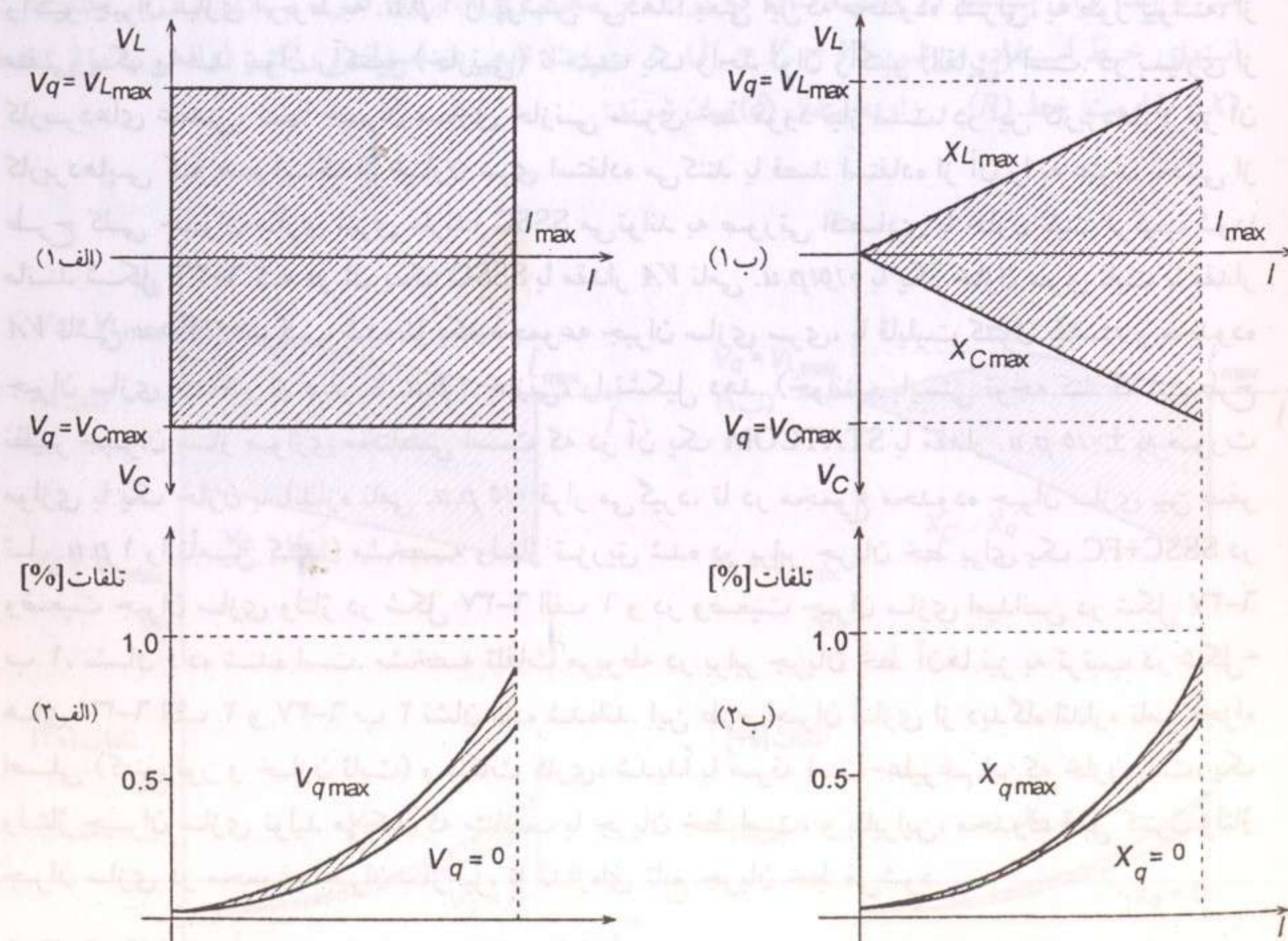
که در آن باز هم V ولتاژ سیستم ac ($l-n$) و δ زاویه انتقال است. همان‌طور که رابطه (۶-۱۵) نشان می‌دهد، V_X تنها در صورتی می‌تواند با V_q برابر شود که $\delta = 0$ باشد؛ در این حالت انتقال کلاً به وسیله SSSC کنترل خواهد شد، مثل این‌که SSSC یک ژنراتور بوده و جریان خط به محدوده عملکردی

$0 \leq I \leq V_q/X$ محدود شده است. (بایستی توجه کرد که SSSC نیاز به یک منبع توان dc بیرونی دارد تا تلفات داخلی خود را جبران کرده و قادر به انجام انتقال توان در زاویه انتقال صفر باشد.)

۶-۳-۳ محدوده کنترلی و مقدار نامی ولت آمپر (VA)

SSSC می‌تواند ولتاژ جبران سازی خازنی یا القایی را مستقل از جریان خط، تا حد مشخص جریان نامی خود، ایجاد کند. بنابراین، SSSC در حالت جبران سازی ولتاژ می‌تواند حداکثر مقدار ولتاژ جبران سازی یا القایی را با وجود جریان متغیر خط به صورت تئوری در تمام محدوده عملیاتی صفر تا I_{qmax} ، همان‌گونه که در شکل ۶-۳۵ الف نشان داده شده، حفظ کند. (حداقل عملی جریان خط، مقداری است که در آن SSSC بتواند هنوز به میزان کافی توان حقیقی از خط جذب نماید تا تلفات خود را جبران کند.) مشخصه تلفات مربوطه، به عنوان درصدی از مقدار نامی (خازنی یا القایی) SSSC، در برابر جریان خط در شکل ۶-۳۵ ب نشان داده شده است. مقدار نامی ولت آمپر (VA) SSSC (با کنورتور حالت جامد و ترانسفور ماتور کوپله کننده) به سادگی عبارت است از حاصل ضرب حداکثر جریان خط (که در آن جبران سازی هنوز مطلوب است) و حداکثر ولتاژ جبران سازی سری: $VA = I_{max} V_{qmax}$

در حالت جبران سازی امپدانس، SSSC برای حفظ حداکثر راکتانس جبران سازی یا خازنی در هر جریان خط تا مقدار حداکثر، همان‌گونه که در شکل ۶-۳۵ ب نشان داده شده، به کار می‌رود. مشخصه مربوط به تلفات در برابر جریان خط در شکل ۶-۳۵ ب آورده شده است.

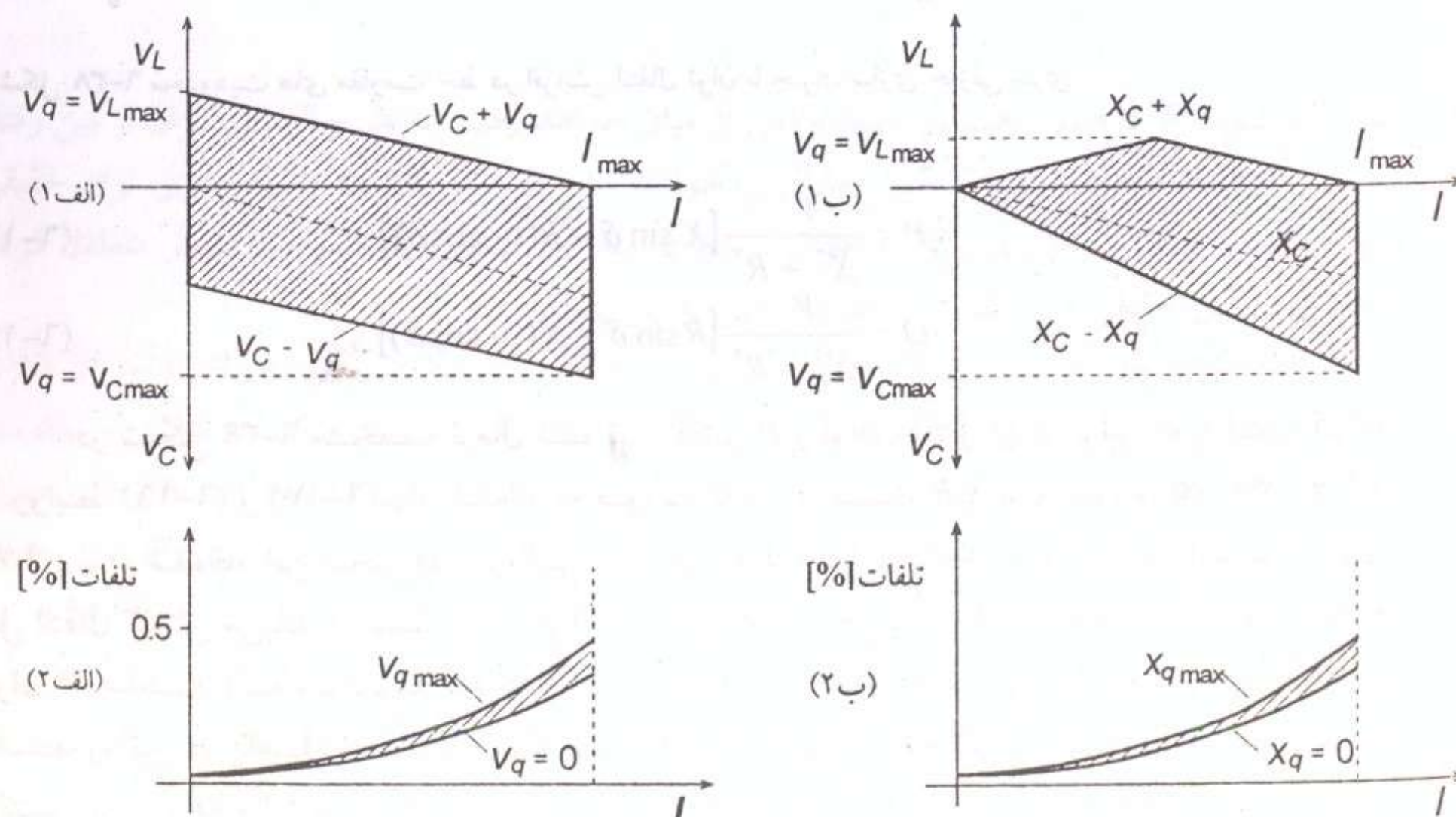


شکل ۶-۳۵ مشخصه قابل حصول $V-I$ (ولتاژ جبران سازی در برابر جریان خط) در SSSC هنگام کار در وضعیت کنترل ولتاژ (الف) و کنترل راکتانس (ب)، و مشخصه های تلفات در برابر جریان خط مربوطه (به ترتیب الف و ب).

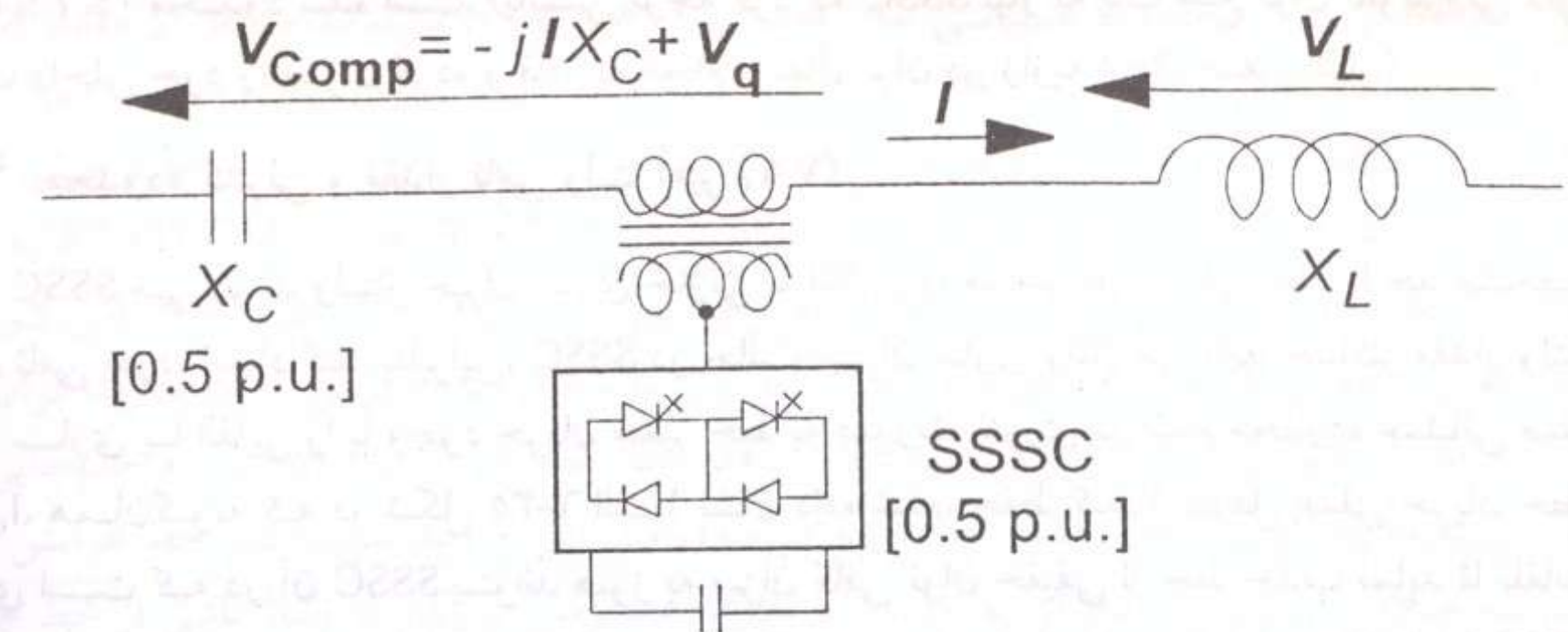
سادگی با کنترل وضعیت زاویه‌ای ولتاژ تزریق شده نسبت به جریان خط، با سیستم ac مبادله کند. به هر حال همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، مبادله توان اکتیو نیاز به آن دارد که ترمینال dc کنورتور SSSC با یک منبع/حفره انرژی یا ذخیره مناسب انرژی، کویله شود.

قابلیت SSSC برای مبادله توان اکتیو اهمیت کاربردی بالقوه زیادی دارد. یک کاربرد مهم آن جبران سازی هم‌زمان هر دو جزء القایی و مقاومتی امپدانس سری خط است، تا نسبت X/R بالا نگه داشته شود. در بسیاری از کاربردها، به خصوص در سطح ولتاژ انتقال ۱۱۵، ۲۳۰ و حتی ۳۴۰ کیلوولت، که در آن‌ها نسبت X/R به طور معمول نسبتاً کم است (در حدود ۳ تا ۱۰)، درجه بالای جبران سازی خازنی سری می‌تواند نسبت مؤثر جزء القایی به مقاومتی در امپدانس خط را به اندازه‌ای کاهش دهد که در آن نیاز به تدریج فزاینده خط به توان راکتیو، و تلفات مرتبط در خط و افت احتمالی ولتاژ، شروع به محدود کردن توان اکتیو قابل انتقال نمایند. این وضعیت با یک دیاگرام فازوری برای خطی که با زاویه عادی کنترل شده و نسبت X/R جبران سازی نشده آن $7/4$ است، در شکل ۶-۳۸ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با استفاده از جبران سازی خازنی سری فزاینده (مثلاً ۵۰ و ۷۵ درصد)، نسبت مؤثر $X_{eff}/R = (X_L - X_C)/R$ کاهش می‌یابد (به ترتیب به $3/7$ و $1/85$). در نتیجه، نسبت به مقادیری که با یک خط راکتیو ایده‌آل ($R=0$) به دست می‌آیند، جزء راکتیو جریان خط، $I \sin(\delta/2 + \phi)$ ، که از طرف سیستم مصرف‌کننده تأمین می‌شود به تدریج افزایش یافته و جزء حقیقی، $I \cos(\delta/2 + \phi)$ ، که به طرف مصرف‌کننده منتقل می‌شود به تدریج کاهش می‌یابد.

توان اکتیو قابل انتقال P و توان راکتیو Q که توسط شینه طرف مصرف‌کننده عرضه می‌شوند می‌توانند، برای سیستم دو ماشین ساده که در آن از تنظیم زاویه، برای کنترل سیلان توان در ولتاژ ثابت انتهای خط استفاده می‌شود ($V_s = V_r = V$)، به صورت تابعی از امپدانس راکتیو (واقعی یا مؤثر) خط (X)، مقاومت خط (R)، و زاویه انتقال (δ) بیان شوند:



شکل ۶-۳۷ مشخصه قابل حصول $V-I$ (ولتاژ جبران سازی در برابر جریان خط) در جبران سلسری مخلوط شکل ۶-۳۶ هنگام کار در وضعیت کنترل ولتاژ (الف) و کنترل راکتانس (ب)، و مشخصه های تلفات در برابر جریان خط مربوطه (به ترتیب الف و ب).



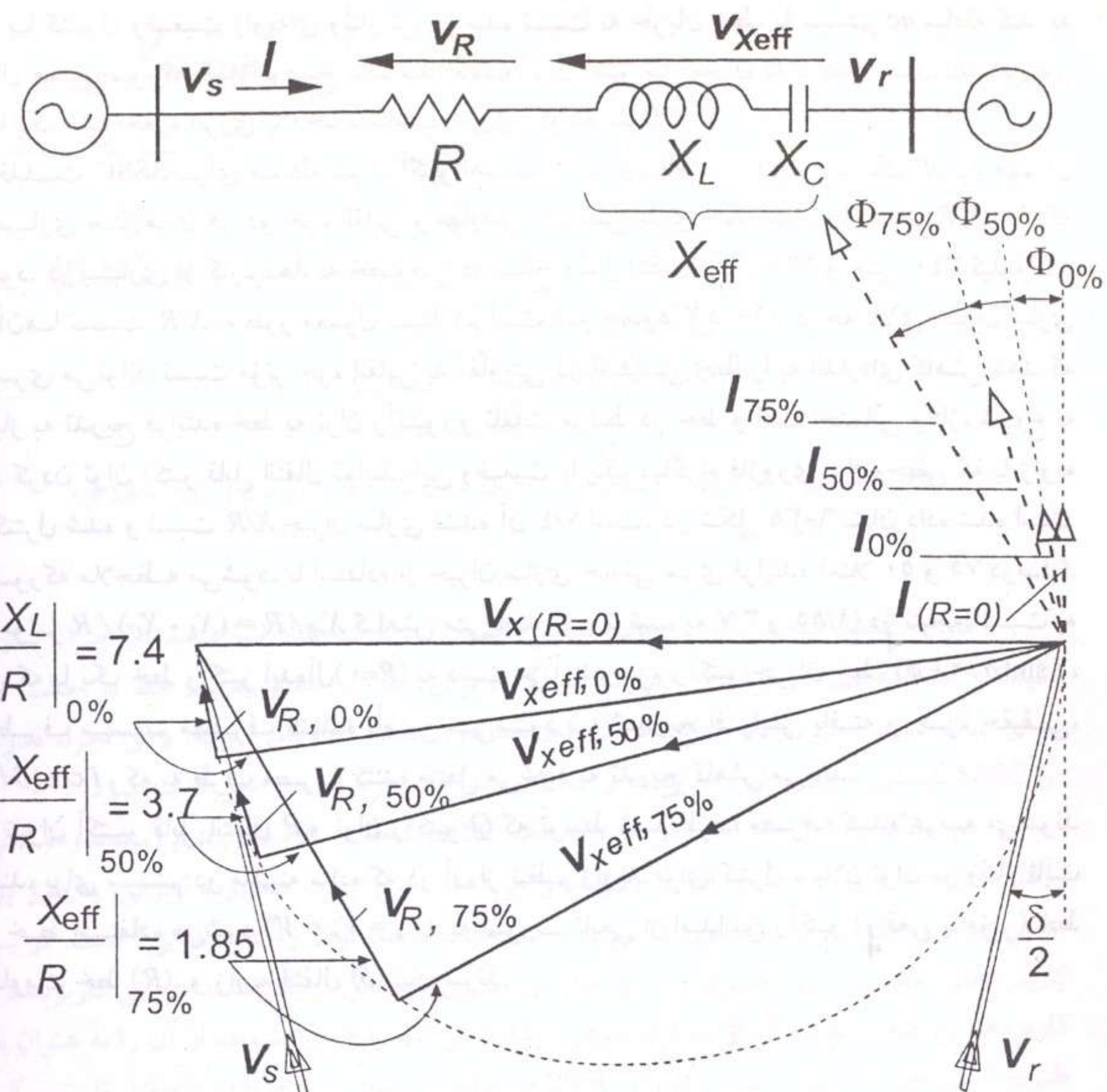
شکل ۶-۳۶ طرح جبران سازی مخلوط شامل یک خازن ثابت ۰/۵ پریونیت و یک SSSC ۰/۵ پریونیت.

توجه کنید که در کاربردهای عملی، همان‌گونه که قبلاً اشاره شد در جبران‌سازهای نوع امپدانس متغیر، I_{max} می‌تواند به صورت جداگانه، برای حداکثر مقدار جریان خط در حالت ماندگار و برای یک دوره معین کوتاه اضافه جریان، تعریف شود. مقدار VA نامی اولیه، برای اجزاء قدرتی عمده در SSSC بایستی متناسب این جریان‌ها و حداکثر ولتاژهای مربوطه، در نظر گرفته شود.

در شکل ۶-۳۵ مشاهده می‌شود که یک SSSC با مقدار VA نامی $1 p.u.$ ، محدوده کنترلی توان راکتیو جبران سازی مربوط به $2 p.u.$ را پوشش می‌دهد؛ یعنی این که محدوده کنترلی، به طور پیوسته، از منفی یک واحد توان راکتیو (خازنی) تا مثبت یک واحد توان راکتیو (القایی) است. در بسیاری از کاربردهای عملی، تنها جبران سازی خازنی سری خط مورد نیاز است. در این کاربردها، و نیز آن کاربردهایی که هم اینک از خازن سری استفاده می‌کنند یا قصد استفاده از آن را به عنوان بخشی از طرح کلی جبران سازی سری دارند، SSSC می‌تواند به صورتی اقتصادی با خازن ثابت ترکیب شود؛ مانند شکل ۶-۳۶ که در آن یک SSSC با مقدار VA نامی $0.5 p.u.$ با یک خازن سری ثابت با مقدار VA نامی $0.5 p.u.$ ترکیب شده تا یک مجموعه جبران سازی سری، با قابلیت کنترل پیوسته و محدوده جبران سازی حداکثر از صفر تا $1 p.u.$ خازنی، را تشکیل دهد. (خواننده بایستی توجه کند که این طرح نظیر جبران ساز موازی مختلطی است که در آن یک STATCOM با مقدار $\pm 0.5 p.u.$ به صورت موازی با یک خازن به اندازه نامی $0.5 p.u.$ قرار می‌گیرد، تا در مجموع محدوده جبران سازی بین صفر تا $1 p.u.$ را تأمین کند.) مشخصه ولتاژ تزریق شده در برابر جریان خط برای یک SSSC+FC در وضعیت جبران سازی ولتاژ در شکل ۶-۳۷ الف ۱ و در وضعیت جبران سازی امپدانس در شکل ۶-۳۷ ب ۱، نشان داده شده است. مشخصه تلفات مربوطه در برابر جریان خط آن‌ها نیز به ترتیب در شکل‌های ۶-۳۷ الف ۲ و ۶-۳۷ ب ۲ نشان داده شده‌اند. این طرح جبران سازی از دیدگاه اندازه نامی اجزاء اصلی (کنورتور و خازن ثابت) و تلفات کاری، شدیداً با صرفه است علیرغم این که خازن ثابت، یک ولتاژ جبران سازی تولید می‌کند که متناسب با جریان خط است، و بنابراین، محدوده قابل کنترل ولتاژ جبران سازی در مجموعه جبران ساز نیز، تا اندازه‌ای تابع جریان خط می‌شود.

۶-۳-۴ قابلیت تأمین جبران سازی توان حقیقی

بر خلاف خازن سری، که در مدار انتقال به صورت یک امپدانس راکتیو عمل می‌کند، و به همین دلیل هم فقط قادر به مبادله توان راکتیو است، SSSC می‌تواند هر دو توان راکتیو و اکتیو را، به

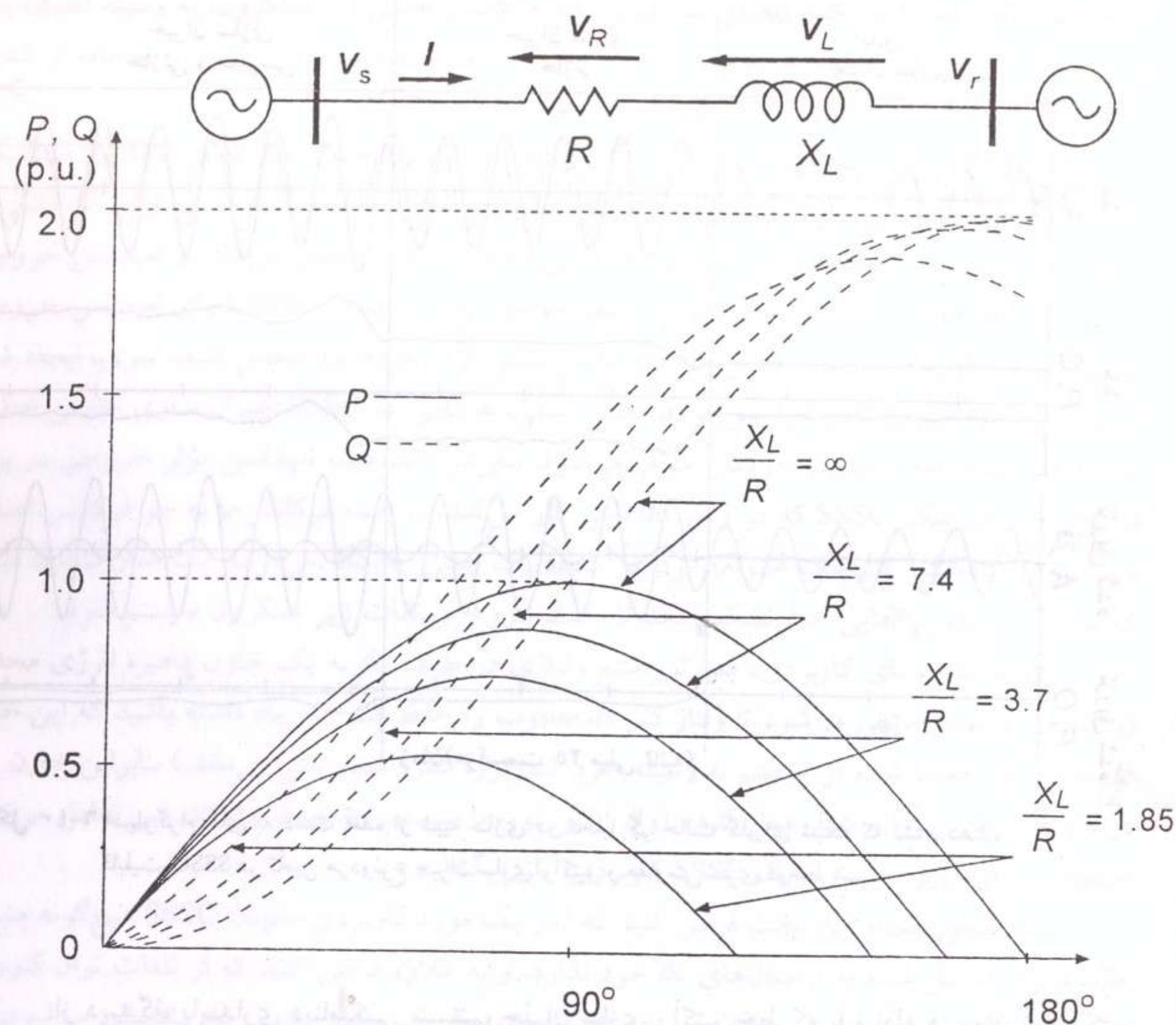


شکل ۶-۳۸ محدودیت‌های مقاومت خط در افزایش انتقال توان با جبران‌سازی خازنی سری.

$$P = \frac{V^2}{X^2 + R^2} [X \sin \delta - R(1 - \cos \delta)] \quad (6-16)$$

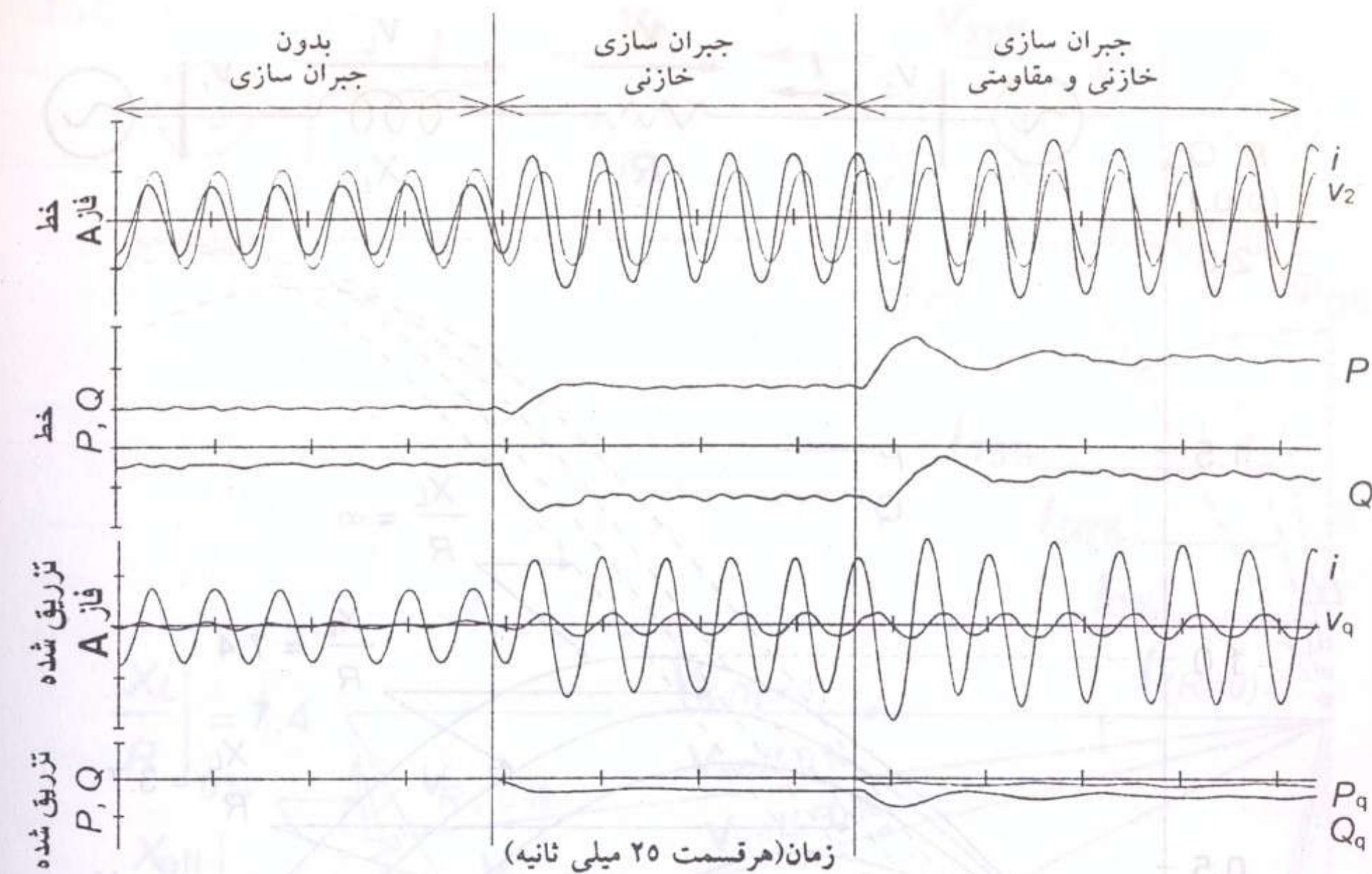
$$Q = \frac{V^2}{X^2 + R^2} [R \sin \delta + X(1 - \cos \delta)] \quad (6-17)$$

در شکل ۶-۳۹ مشخصه نرمال شده توان آکتیو P و توان راکتیو Q در برابر زاویه انتقال δ ، که با روابط (۶-۱۶) و (۶-۱۷) بیان شده‌اند به صورت تابعی از نسبت X/R برای مقادیر ∞ ، $7/4$ ، $3/2$ و $1/80$ رسم شده‌اند. این منحنی‌ها به روشنی نشان می‌دهند که با کاهش نسبت X/R ، حداکثر توان آکتیو قابل انتقال کاهش می‌یابد و نسبت توان آکتیو به راکتیو افزایش می‌یابد. SSSC به همراه یک منبع تغذیه توان dc مناسب (که می‌تواند به سادگی از یک شینه قابل دسترسی یا از سیم پیچ سوم یک ترانسفورماتور در فاصله مناسب تغذیه شود) قادر خواهد بود تا علاوه بر تزریق ولتاژ جبران‌سازی راکتیو، یک مؤلفه ولتاژ نیز در فاز مخالف با ولتاژی که روی مقاومت خط ایجاد شده، تزریق کند، تا با اثر افت ولتاژ مقاومتی در انتقال توان، مقابله کند. به این طریق، با ایجاد هم‌زمان جبران‌سازی دو امپدانس حقیقی و راکتیو خط که به صورت مستقل قابل کنترل هستند، در واقع می‌توان یک خط ایده‌آل راکتیو برای انتقال حداکثر توان ایجاد کرد. البته بایستی توجه

شکل ۶-۳۹ توان انتقال یافته حقیقی P و راکتیو Q در برابر زاویه انتقال δ بر حسب نسبت X/R خط به عنوان متغیر.

کرد که توان I^2R هنوز هم در خط واقعی از میان خواهد رفت. به هر حال، این توان از بین رفته، توسط SSSC از منبع تغذیه کمکی جایگزین خواهد شد. هم‌چنین قابلیت جبران‌سازی توان حقیقی می‌تواند به صورت مؤثری برای به حداقل رساندن سیلان توان‌های چرخشی، از طریق متعادل کردن سیلان توان‌های حقیقی و راکتیو در خطوط موازی به کار رود.

اطلاعات ضبط شده حاصل از شبیه‌سازی در TNA برای یک سیستم دو ماشین جبران‌سازی شده با SSSC که دارای منبع تغذیه dc است، در شکل ۶-۴۰، جبران‌سازی مرکب راکتانس و مقاومت خط را نشان می‌دهد. منحنی‌های نشان داده شده در شکل عبارت‌اند از: جریان خط i در فاز A به همراه ولتاژ مربوطه در طرف مصرف‌کننده $V_r = V_f$ ، توان انتقال یافته P به همراه توان راکتیو Q که از طرف مصرف‌کننده تأمین شده، جریان خط i مجدداً در فاز A به همراه ولتاژ V_q که توسط SSSC تزریق شده، و توان آکتیو و راکتیو که SSSC از طریق تزریق ولتاژ سری برای جبران‌سازی صفر ($V_q = 0$)، یعنی جبران‌سازی راکتیو خالص و جبران‌سازی راکتیو به علاوه جبران‌سازی مقاومتی، با سیستم ac مبادله کرده. (سیستم در $\delta = 20^\circ$ با $X/R = 6$ عمل کرده است.) می‌توان مشاهده کرد که جبران‌سازی مقاومتی اضافه، توان انتقال یافته را به طرز چشمگیری افزایش می‌دهد، در حالی که درخواست توان راکتیو در طرف مصرف‌کننده را نیز کاهش می‌دهد.



شکل ۶-۴۰ اسیلوگرام‌های به دست آمده از شبیه سازی در تحلیل گر حالت گذرای شبکه که نشان دهنده قابلیت SSSC در تأمین هردونوع جبران سازی راکتیو و مقاومتی سری در خط است.

از دیدگاه پایداری دینامیکی سیستم، جبران سازی راکتیو خط که با مبادله هم‌زمان توان آکتیو ترکیب شده، می‌تواند میرایی نوسانات توان را نیز تقویت کند. به عنوان مثال، در دوره‌های شتاب‌گیری زاویه‌ای، SSSC به همراه یک ذخیره انرژی مناسب می‌تواند حداکثر جبران سازی خازنی را ایجاد کند تا توان آکتیو انتقال یافته را افزایش داده و هم‌زمان توان آکتیو را جذب نماید تا اثر یک مقاومت کاهنده را به صورت سری با خط ایجاد کند. در دوره‌های کاهش شتاب، SSSC می‌تواند عملکرد جبران سازی مخالف را انجام دهد؛ یعنی این‌که حداکثر جبران سازی القایی را ایجاد کند تا توان آکتیو انتقال یافته را کاهش دهد و هم‌زمان اثر یک مقاومت منفی (مثلاً یک ژنراتور) را ایجاد کند تا توان آکتیو اضافی را برای خط به وجود آورد (کاهندگی منفی). (اگرچه یک ذخیره انرژی لازم است تا با تزریق متناوب مقاومت کاهنده به صورت مثبت و منفی، کاهندگی ایده‌آل به وجود آید، یک کاهندگی اقتصادی تر و مؤثر می‌تواند صرفاً با یک حفره انرژی- به عنوان مثال، یک مقاومت پر انرژی که به ترمینال‌های SSSC بسته شده- به وجود آید. با این آرایش، SSSC قادر خواهد بود تا در طول دوره‌های شتاب‌گیری، توان آکتیو جذب نماید؛ که این توان پس از آن توسط حفره انرژی از میان خواهد رفت.)

۶-۳-۵ ایمنی در برابر تشدید زیر سنکرون

کارکرد مطلوب خازن سری، تأمین ولتاژ جبران سازی در مخالفت با ولتاژی است که روی امپدانس راکتیو خط در فرکانس اصلی سیستم به وجود می‌آید، تا بدین ترتیب توان انتقال یافته افزایش یابد. به هر حال، امپدانس خازن سری تابعی از فرکانس است و به این لحاظ می‌تواند در فرکانس‌های زیر سنکرون مختلف، باعث بروز تشدید با امپدانس‌های راکتیو دیگر که در شبکه وجود دارند، بشود. همان‌گونه که در بخش‌های قبلی بحث شد، در سال‌های اخیر پیشرفت‌های چشمگیری در اصلاح

مشخصه ذاتی فرکانس خازن‌های سری در باند فرکانسی اصلی زیر سنکرون، به وسیله اتصال یک راکتور کنترل شده با تریستور به صورت موازی به آن حاصل شده است؛ این راکتور با استفاده از کنترل الکترونیک، در برابر تشدید زیر سنکرون ایمن می‌شود.

برخلاف خازن سری و جبران ساز سری نوع امپدانسی، جبران ساز سری سنکرون استاتیکی (SSSC) منبع ولتاژی مبتنی بر کنورتور در اصل یک منبع ولتاژ ac است که، با یک ولتاژ dc دائمی و ورودی‌های کنترلی ثابت، تنها در فرکانس خروجی (اصلی) منتخب عمل می‌کند، و امپدانس خروجی آن در فرکانس‌های دیگر از نظر تئوری صفر خواهد بود. در عمل، SSSC دارای امپدانس خروجی القایی نسبتاً کوچکی است که توسط اندوکتانس نشی ترانسفورماتور متصل کننده سری، ایجاد شده است. افت ولتاژ روی این امپدانس در فرکانس اصلی، هنگامی که SSSC جبران سازی خازنی خط را ایجاد می‌کند، به صورت خودکار جبران می‌شود. بنابراین، مشخصه امپدانس مؤثر خروجی در برابر فرکانس برای یک SSSC که در ولتاژ dc ثابتی کار می‌کند، در همه فرکانس‌ها به جز فرکانس اصلی، همانند یک القاگر کوچک خواهد بود. در نتیجه یک چنین SSSC نمی‌تواند یک مدار تشدید سری کلاسیک با امپدانس القایی خط تشکیل دهد تا باعث شروع نوسانات زیر سنکرون سیستم شود.

در SSSC‌های کاربردی، کنورتور منبع ولتاژی در طرف dc به یک خازن ذخیره انرژی محدود (و نسبتاً کوچک) منتهی می‌شود تا ولتاژ کار dc مطلوب را حفظ کند. (به یاد داشته باشید که این خازن dc با انرژی جذب شده از سیستم به وسیله خود کنورتور، شارژ شده باقی می‌ماند.) بنابراین خازن dc در واقع از طریق آرایه کلید عمل کننده (والو) کنورتور، با سیستم ac تعامل می‌کند. این تعامل می‌تواند احتمالاً بر رفتار زیر سنکرون یک SSSC کاربردی، تأثیر بگذارد.

به منظور انجام این بحث فرض کنید که (در یک مورد کاربردی نمونه) SSSC هیچ‌گونه منبع یا حفره توان متصل شده به ترمینال‌های dc خود ندارد، و به علاوه فرض کنید که از تلفات توان کنورتور صرف‌نظر می‌شود. بنابراین ولتاژ ترمینال dc تماماً توسط یک بانک خازنی dc پشتیبانی می‌شود. اگر جریان‌های سینوسی خط کاملاً متعادل باشند، کنورتور (با مقدار نسبتاً زیاد تعداد پالس) ولتاژهای سینوسی متعادل، با ۹۰ درجه اختلاف نسبت به جریان خط تولید خواهد کرد، و بانک خازنی dc از آن جایی که هیچ توان حقیقی در ترمینال‌های ac کنورتور مبادله نشده است، هیچ گونه جریان شارژ کننده‌ای را نخواهد دید. اگر کنورتور برای تولید این ولتاژهای همسان کنترل شود در حالی که مؤلفه‌های فوق سنکرون و زیر سنکرون در جریان خط ایجاد می‌شوند، آن گاه مؤلفه‌های متناوب توان در ترمینال‌های ac کنورتور ظاهر خواهند شد و این مؤلفه‌ها با جریان‌های متناوب شارژ کننده در خازن dc تطابق یافته، و به نوبه خود مؤلفه ولتاژ متناوب مرتبط با خود را در خازن تولید می‌کنند. علت این امر آن است که انتقال انرژی درون کنورتور کاملاً مستقیم است، و بنابراین، توان خالص لحظه‌ای در ترمینال‌های ورودی بایستی همواره برابر با توان خالص لحظه‌ای در ترمینال‌های خروجی باشد. به عنوان مثال، اگر جریان خط علاوه بر مؤلفه سنکرون فرکانس f_o شامل مؤلفه‌های فوق و زیر سنکرون به ترتیب برابر $f_{sub} = f_o - f_m$ و $f_{sup} = f_o + f_m$ هم باشد، به دلیل شکل‌گیری فرایند مدولاسیون در فرکانس مکانیکی سیستم f_m در زمان تشدید زیر سنکرون در این مثال، یک مؤلفه جریان ac با فرکانس f_m از طریق ترمینال‌های dc سیلان خواهد یافت تا توان متغیری را که در ترمینال‌های ac ظاهر می‌شود، متعادل کند. در نتیجه، ولتاژ ترمینال dc کنورتور SSSC (که فقط با یک خازن محدود کنترل می‌شود) یک مؤلفه اضافی ac با فرکانس f_m خواهد داشت. اگر کنترل کنورتور از این مؤلفه ac چشم‌پوشی کند، یعنی اگر به صورتی عمل کند که گویی ولتاژ ترمینال dc ثابت بوده است و ولتاژ ac خروجی را تولید کند، آن گاه SSSC در خروجی خود مؤلفه ولتاژ فوق و زیر سنکرون با همان فرکانس‌های

$f_{sup} = f_o + f_m$ و $f_{sub} = f_o - f_m$ خواهد داشت. به هر حال، بایستی اذعان کرد که تغییرات ولتاژ در اتصال dc به طور ذاتی بر قابلیت کنورتور در تولید ولتاژهای خروجی معین شده تأثیری ندارد، مگر این‌که ولتاژ dc برای عملکرد مطمئن والوهای کنورتور، بسیار کم یا بسیار زیاد شود. یعنی این‌که، با کنترل مناسب مقدار (لحظه‌ای) ولتاژ خروجی کنورتور، می‌توان ولتاژهای سینوسی مشخصی را در یک فرکانس سنکرون خواسته شده، تولید کرد. به این طریق، کنورتور می‌تواند مشخصه ترمینال ایده‌آل را حفظ کند: جریان‌های سنکرون توالی مثبت از درون والوهای کنورتور عبور کرده، ترمینال‌های dc را در میان بر می‌کنند (در حالی که کنورتور، توان رآکتیو را در فرکانس سنکرون با خط مبادله می‌کند)، و مؤلفه‌های زیر و فوق سنکرون جریان خط درون والوهای کنورتور و خازن dc چرخش می‌کنند، مثل این‌که ترمینال‌های ac به وسیله منابع ایده‌آل ولتاژی با فرکانس اصلی، موازی شده باشند. بنابراین، علیرغم ولتاژ ترمینال dc مدوله شده، سیستم قدرت، SSSC را به صورت یک منبع ولتاژ سنکرون کامل خواهد "دید" که در فرکانس‌های غیر سنکرون به شکل یک اتصال کوتاه عمل می‌کند. به عبارت دیگر، از منظر سیستم قدرت، این SSSC مشخصه‌ای مشابه یک کنورتور ایده‌آل که ولتاژ ترمینال dc آن توسط یک منبع نامحدود با امپدانس صفر تأمین شده، به نمایش می‌گذارد.

برای کنورتورهایی که قابلیت مناسب کنترل خروجی ندارند، یک رویکرد واضح برای محدود ساختن انحرافات ولتاژ شینه dc، و تأثیرات مربوطه بر روی ولتاژ خروجی ac، افزایش مقدار خازنی dc است. با مقدار خازنی مناسب در شینه dc، SSSC می‌تواند صرف‌نظر از ترکیب جریان خط، ولتاژهای خروجی ایده‌آل تولید کند و کاملاً در برابر SSR خشی باقی بماند.

بدون افزایش اندازه خازن dc یا برقراری قابلیت کنترل ولتاژ داخلی در کنورتور، روش دیگری برای عملکرد ایمن SSSC در حضور مؤلفه‌های زیر سنکرون جریان خط، وجود دارد. این رویکرد، از قابلیت ذاتی کنورتور برای تغییر بسیار سریع زاویه فاز ولتاژهای خروجی خود، استفاده می‌کند. این روش با استفاده از بردارهای لحظه‌ای برای نمایش مجموعه ولتاژ سه فاز و جریان به بهترین نحو توضیح داده می‌شود. در این روش، هر مجموعه سه فاز (به جز مؤلفه‌های توالی صفر) به طور کامل، در هر لحظه زمانی، با یک بردار دو بعدی منفرد نشان داده می‌شود. (خوانندگانی که با نمایش بردار لحظه‌ای آشنا نیستند بایستی آن را صرفاً گسترش نمایش عادی فازوری در نظر بگیرند. تفاوت عمده آن است که فازور، نمایش دهنده یک مؤلفه ولتاژ یا جریان منفرد معمولاً مؤلفه اصلی - است، در حالی که بردار، نمایش دهنده همه مؤلفه‌هایی به جز مؤلفه صفر - است که در مجموعه ولتاژ یا جریان سه فاز حضور دارند. قواعد اساسی برای تبادل توان که در بحث حاضر حائز اهمیت‌اند در هر دو مورد یکسان می‌باشند: در تبادل توان حقیقی خالص، بردارهای ولتاژ و جریان درست مثل فازورهای ولتاژ و جریان بایستی هم‌فاز باشند. در تبادل توان رآکتیو خالص، این بردارها، مثل فازورهای مربوطه، بایستی دارای ۹۰ درجه اختلاف فاز باشند.) بردار نمایش دهنده ولتاژهای ترمینال کنورتور می‌تواند از نظر مقدار کنترل شود (مثلاً ثابت بماند) و همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، می‌تواند تقریباً به صورت لحظه‌ای هر زاویه‌ای را اخذ کند. با رویکرد ساده حفظ اختلاف فاز ۹۰ درجه ولتاژ کنورتور، به صورت مداوم و لحظه‌ای، نسبت به بردار جریان خط، توان ترمینال ac در SSSC می‌تواند مطلقاً فارغ از طبیعت جریان خط، دقیقاً در مقدار صفر حفظ شود. به این ترتیب خازن dc در شرایط غیر عادی خط هیچ‌گونه جریان شارژ کننده‌ای را نمی‌بیند و ولتاژ dc، ثابت باقی می‌ماند.

حال با توجه به نتیجه‌گیری‌های عمومی بالا، پی‌آمد روش کنترلی شرح داده شده را بر روی خط، در حضور SSSC در نظر بگیرید. در این حالت نیز، مقدار بردار ولتاژ که نشان دهنده ولتاژهای خروجی SSSC است، به راحتی بر حسب نیازهای جبران سازی خط کنترل می‌شود، اما زاویه آن دقیقاً

در ۹۰ درجه اختلاف نسبت به بردارهای نمایش دهنده سه جریان خط، که اینک با نوسانات پیچشی ماشین مدوله شده‌اند، نگه داشته می‌شود. بنابراین، برحسب تعریف، کل توان لحظه‌ای در ترمینال‌های SSSC در حدود صفر باقی خواهد ماند. به این ترتیب SSSC به عنوان یک دستگاه "انرژی - خشی" به صورت سری با خط ظاهر می‌شود؛ زیرا در هیچ لحظه‌ای از زمان هیچ‌گونه انرژی به شبکه تحویل نمی‌دهد و هیچ‌گونه انرژی نیز از آن جذب نمی‌کند. آشکار است که یک دستگاه "انرژی - خشی" نمی‌تواند به هیچ طریقی در وقوع تشدید زیر سنکرون مشارکت نماید؛ زیرا SSR گذشته از هر چیز عبارت است از نوسان توان بین یک مولد و اجزاء گوناگون ذخیره کننده انرژی.

از بحث فوق، می‌توان نتیجه گرفت که، بنابر قوانین اساسی فیزیک، یک شرط کافی برای SSSC برای خشی ماندن SSSC در تشدیدهای زیر سنکرون، مستقل از شرایط سیستم، حفظ بردار ولتاژ خروجی لحظه‌ای آن (که نشان دهنده ولتاژهای خروجی کنورتور است) در ۹۰ درجه اختلاف فاز با بردار لحظه‌ای جریان خط است.

در حالی که عمومیت اصل شرطی کافی بالا از پشتیبانی قوانین اساسی فیزیکی برخوردار است، بایستی تشخیص داد که روش‌های دیگر (مثلاً روش کنترل ولتاژ شرح داده شده قبلی) نیز می‌تواند از مشارکت فعال SSSC در نوسان زیر سنکرون جلوگیری کند. هم‌چنین، اگر SSSC به یک منبع تغذیه dc مجهز شود، تا مثلاً تبادل توان حقیقی را برای جبران سازی خط مقاومتی تسهیل کند، آن‌گاه این منبع تغذیه می‌تواند برای تنظیم ولتاژ ترمینال dc در حضور مؤلفه‌های زیر سنکرون (یا دیگر مؤلفه‌های) خط نیز مورد استفاده قرار گیرد. با این ترتیب، کنورتور به طور طبیعی فقط مؤلفه اصلی و مطلوب ولتاژ را تولید خواهد کرد و در برابر تشدید زیر سنکرون خشی خواهد بود. اگرچه هنوز به اثبات نرسیده، اما بسیار متحمل است که SSSC، به دلیل پاسخ سریع و تقریباً لحظه‌ای کنورتور منبع ولتاژی، بتواند به صورتی کنترل شود که، در کاهش جدی نوسانات زیر سنکرون موجود که در جبران سازی متداول با خازن سری بروز می‌کند، به شدت مؤثر واقع شود.

در بحث تعامل دینامیکی، یک مسئله هم آن است که SSSC، همانند وسیله‌ای که فعالانه کنترل شده، می‌تواند تحت شرایط غیر عادی، اگر مثلاً، بهره حلقه بسته آن که کنترل خودکار سیلان توان را تأمین می‌کند غلط باشد، یا سایر مؤلفه‌های کارکردی آن، به طور نامناسب تنظیم شده باشند، یا اگر خود کنترل الکترونیکی اشتباه عمل کند، از خود ناپایداری یا تعامل نوسانی با سیستم ac بروز دهد. به هر حال این مسائل در تمام سیستم‌های دارای کنترل فعال مشابه‌اند، و همه با تکنیک‌های مناسب مقاوم کردن کنترل، اضافه کردن کنترل و حفاظت که موضوع این کتاب نیستند، قابل حل هستند.

۶-۳-۶ کنترل داخلی

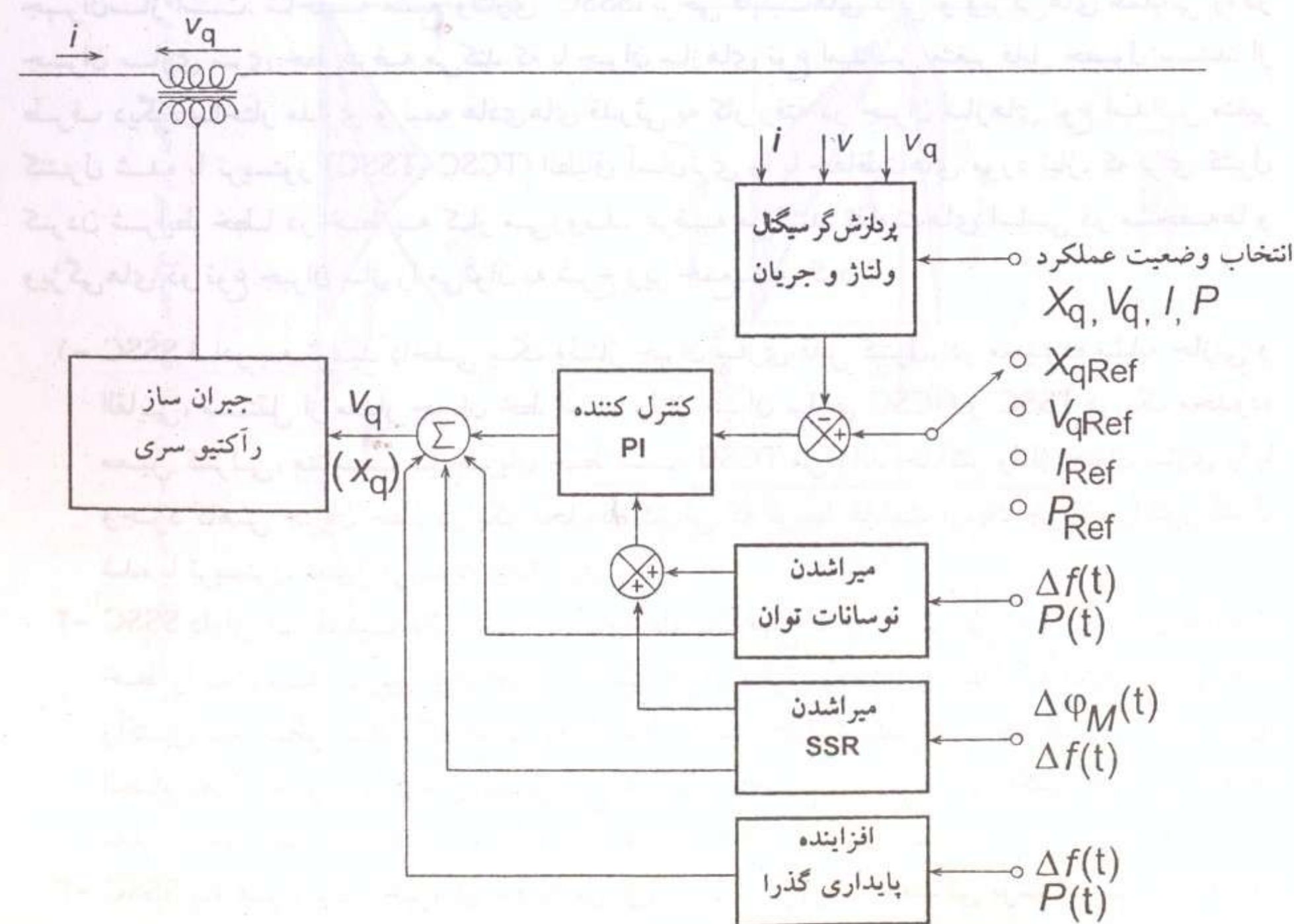
بحث تشدید زیر سنکرون در بخش قبلی نشان می‌دهد که پیاده سازی برخی از راهبردهای ایمن سازی در برابر تشدید زیر سنکرون (SSR) نیاز به قابلیت کنترل کامل (مقدار و زاویه) ولتاژ جبران سازی تولید شده توسط SSSC دارد. همان‌طور که توضیح داده شد، SSSC بر مفهوم منبع ولتاژ سنکرون مبتنی است، که توسط یک کنورتور منبع ولتاژی پیاده می‌شود. رویکرد اساسی به این پیاده سازی، از جایگاه مدار قدرت کنورتور و کنترل‌های داخلی مربوطه، به صورت مفصل در فصل ۵ بخش ۲-۲-۵ مورد بحث قرار گرفته‌اند. این رویکردها در این جا، با تغییرات مناسب در کنترل‌های داخلی مربوطه که برای جبران سازی سری ضرورت دارد، جمع بندی شده‌اند.

از نقطه نظر کنترل ولتاژ خروجی، کنورتورها را می‌توان به صورت کنترل "مستقیم" و "غیرمستقیم" دسته‌بندی کرد. در کنورتورهای کنترل مستقیم، هم وضعیت زاویه‌ای و هم مقدار ولتاژ خروجی با عملکرد مناسب در پیچه والو (قطع یا وصل) قابل کنترل هستند. شکل ۳۴-۵ مثالی از این

زمانی اندازه‌گیری شده یا تعیین شده برای اولین نوسان-که در طول آن ژنراتورهای درگیر یک اغتشاش عمده، شتاب می‌گیرند (حدود ۰/۲ تا ۲۰ ثانیه)- طلب می‌کند.

نوسانات توان نوعاً در محدوده فرکانسی ۰/۲ تا ۲ هرتز اتفاق می‌افتند. برای کاهش مؤثر این نوسانات، کنترل بیرونی باید یک مرجع متغیر ارائه کند که خروجی جبران ساز سری را به صورتی مدوله کند که توان انتقال یافته روی خط را، وقتی ژنراتورهای درگیر شتاب می‌گیرند، افزایش داده و وقتی شتاب از دست می‌دهند، کاهش دهد.

علاوه بر خشی بودن جبران ساز سری کنترل شده در برابر تشدید زیر سنکرون (SSR)، اگر خط (انتقال) مقدار معتدله‌ی جبران سازی خازنی سری کنترل نشده داشته باشد، میراسازی نوسانات زیر سنکرون می‌تواند ضرورت داشته باشد. برای کاهش تشدید زیر سنکرون (SSR) کنترل بیرونی بایستی یک مرجع متغیر تولید کند که وابسته به تغییر سرعت چرخشی ژنراتور (های) درگیر باشد و خروجی جبران ساز سری را به صورتی مدوله کند که با این تغییر چرخشی مخالفت کند. این مرجع متغیر می‌تواند مستقیماً از تغییر سرعت زاویه‌ای-اگر قابل دسترس باشد- گرفته شود، و یا از تغییرات ولتاژ و جریان خط یا فرکانس سیستم اخذ گردد. جبران ساز سری برای تأثیر داشتن بر کاهش تشدید زیر سنکرون، نیاز به باند فرکانسی نسبتاً پهنی دارد، که بسته به نوع مجموعه توربین ژنراتور تا ۴۵ هرتز است. هنوز ثابت نشده است که جبران سازه‌های سری مورد بحث در میرایی نوسانات زیر سنکرون، در همه محدوده محتمل تشدید زیر سنکرون، مؤثر باشند. به هر حال، بر مبنای مشخصه تأخیر انتقال ذاتی جبران سازه‌های مبتنی بر کنورتور و کنترل شونده با ترستور (همان‌طور که به صورت مشروح تر در فصل ۵ بحث شد)، به نظر می‌رسد که جبران ساز نوع اخیر از عرض باند مورد نیاز برای این منظور برخوردار باشد.



شکل ۶-۴۳ طرح عملکرد کنترل بیرونی (سیستم) برای SSSC.

را تعریف می‌کند؛ و V_{dcRef} ، که ولتاژ کار خازن dc را تعریف می‌کند. مرجع ولتاژ راکتیو V_{qQRef} ، که به همراه جریان خط، مبادله توان راکتیو را برای جبران سازی سری تعیین می‌کند) و مرجع کلی ولتاژ حقیقی $V_{qQRef} + V_{dcRef}$ (که به همراه جریان خط، مبادله توان حقیقی را برای جبران سازی اختیاری توان حقیقی در خط و حفظ شارژ خازن dc تا سطح ولتاژ کار آن، تعیین می‌کند) با مؤلفه‌های مرتبط در ولتاژ جبران سازی اندازه‌گیری شده v_q مقایسه می‌شوند. از سیگنال‌های حاصله، مقدار v_q و زاویه آن ϕ نسبت به θ (که مشخص کننده قله جریان خط است) مشتق می‌شوند. مقدار V_q و $\theta + \phi$ سپس برای تولید سیگنال‌های راه‌اندازی درجه کنورتور، مورد استفاده قرار می‌گیرند. با عرض باند کافی حلقه بسته و پردازش مناسب مبتنی بر بردار لحظه‌ای سیگنال، این نوع کنترل قادر به حفظ ولتاژ سینوسی جبران سازی در فرکانس سیستم و در حضور مؤلفه‌های زیر سنکرون جریان و مدولاسیون ولتاژ خازن dc ناشی از آن، می‌باشد. (خواننده باید توجه نماید که اگر جبران سازی مقاومتی خط به کار نرود، یعنی $V_{qQRef} = 0$ ، زاویه ϕ در حالت ماندگار همان عملکرد $\Delta\alpha$ را خواهد داشت، یعنی یک زاویه کوچک و اساساً ثابت برای اطمینان از جذب انرژی از سیستم ac برای جبران تلفات کنورتور).

۶-۴ (سیستم) کنترل بیرونی برای جبران سازه‌های راکتیو سری

در بخش‌های قبلی، جبران سازه‌های نوع امپدانس متغیر و نوع منبع ولتاژ سنکرون، شامل مدار قدرت و کنترل داخلی مربوطه، شرح داده شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده شد، این جبران سازه‌ها اصول عملکردی متفاوت دارند و مشخصه‌های جبران سازی و کارکردی متفاوت از خود نشان می‌دهند. به هر حال، همه آن‌ها می‌توانند جبران سازی راکتیو سری را انجام دهند و به صورت خودکفا، تنها از طریق یک ورودی مرجع که ولتاژ یا راکتانس مطلوب جبران سازی را تعریف می‌کند، عمل کنند. معنی آن این است که کنترل بیرونی که کارکرد جبران ساز را تعریف نموده و ورودی مرجع را برای آن ایجاد می‌کند، می‌تواند از نظر اصولی برای همه انواع جبران سازه‌های سری مورد بحث، یکسان باشد. (خواننده بایستی به خاطر داشته باشد که همین نتیجه‌گیری برای کنترل بیرونی همه جبران سازه‌های موازی در فصل ۵ به عمل آمده بود).

کارکرد اساسی یک جبران ساز راکتیو سری، کنترل سیلان توان است. این امر می‌تواند یا با کنترل مستقیم (تنظیم) جریان خط I یا توان انتقالی P صورت پذیرد، یا به جای آن، با کنترل غیر مستقیم هر یک از دو عامل: امپدانس جبران سازی $X_q = X_C$ یا ولتاژ جبران سازی $V_q = V_C$ ، انجام شود. کنترل مستقیم سیلان توان دارای این مزیت است که توان انتقال یافته را در وضعیت حلقه بسته در مقداری که توسط مرجع داده شده، تعریف می‌شود، حفظ می‌کند. به هر حال، تحت بعضی شرایط اضطراری حفظ سیلان ثابت توان، ممکن است غیر عملی یا غیر مطلوب باشد. به این دلیل، در بعضی از کاربردها، کنترل امپدانس (یا ولتاژ) که مشخصه امپدانس خط را حفظ می‌کند می‌تواند، از دیدگاه عملی، ترجیح داده شود. مستقل از متغیری که کنترل می‌شود، حلقه‌های کنترل سیلان توان معمولاً با زمان پاسخ نسبتاً کمتری (در حدود چند ثانیه) عمل می‌کنند تا از تغییرات سریع توان و پاسخ، معمولاً نوسانی مربوطه، یا دیگر فشارهای ناپایدار کننده بر سیستم ac ، اجتناب شود.

کارکردهای اضافی، برای اصلاح حالت گذرا (نوسان اول) و پایداری دینامیکی (میرایی نوسانات توان) و در بعضی موارد، برای میرایی نوسانات زیر سنکرون را می‌توان به کنترل بیرونی جبران ساز سری اضافه کرد.

افزایش پایداری گذرا می‌تواند در پاسخ به یک اغتشاش عمده به کار رود. مرجع کنترل داخلی، یک سیگنال است که حداکثر جبران سازی خازنی سری را (برای کسب حداکثر توان انتقالی) در دوره

یک ساختار عملی برای کنترل بیرونی در شکل ۶-۴۳ نشان داده شده است. کنترل اصلی سیلان توان به وسیله یک حلقه بسته (کم سرعت) انجام می‌شود، که با یکی از مرجع‌های قابل انتخاب X_{qref} یا V_{qref} یا I_{ref} یا P_{ref} عمل می‌کند. متغیر مربوط به شبکه (X_q یا V_q یا I یا P) به وسیله پردازشگر ولتاژ و جریان استخراج شده و با مرجع انتخابی مقایسه می‌شود. خطای تقویت شده در خروجی کنترل کننده PI ، مرجع X_q یا V_q را برای کنترل داخلی تأمین می‌کند.

سیگنال‌های اضافی کنترل برای اصلاح پایداری گذرا و دینامیکی و میرا نمودن نوسانات زیر سنکرون، از متغیرهای ذیربط سیستم، مثل تغییرات فرکانس سیستم، تغییرات سیلان توان، یا برای میرایی نوسانات زیر سنکرون، از تغییرات سرعت زاویه‌ای - اگر در دسترس باشد - اخذ می‌شوند، یا به صورت ساختگی از ولتاژها و جریان‌هایی که در محل قابل اندازه‌گیری باشند، با استفاده از مدارهای کنترل کمکی "میراساز نوسانات توان"، "افزایش دهنده پایداری گذرا" و "میراساز نوسانات زیر سنکرون" ایجاد شده و مستقیماً به عنوان مرجع به کنترل کننده داخلی داده می‌شوند. این مدارهای کنترل کمکی می‌توانند عملکرد حلقه اصلی تنظیم سیلان توان را نیز کنترل یا متوقف کنند تا از بروز تقاضا برای مراجع متضاد اجتناب شود و یک نقطه کار مناسب در شرایط اضطراری سیستم باقی بماند.

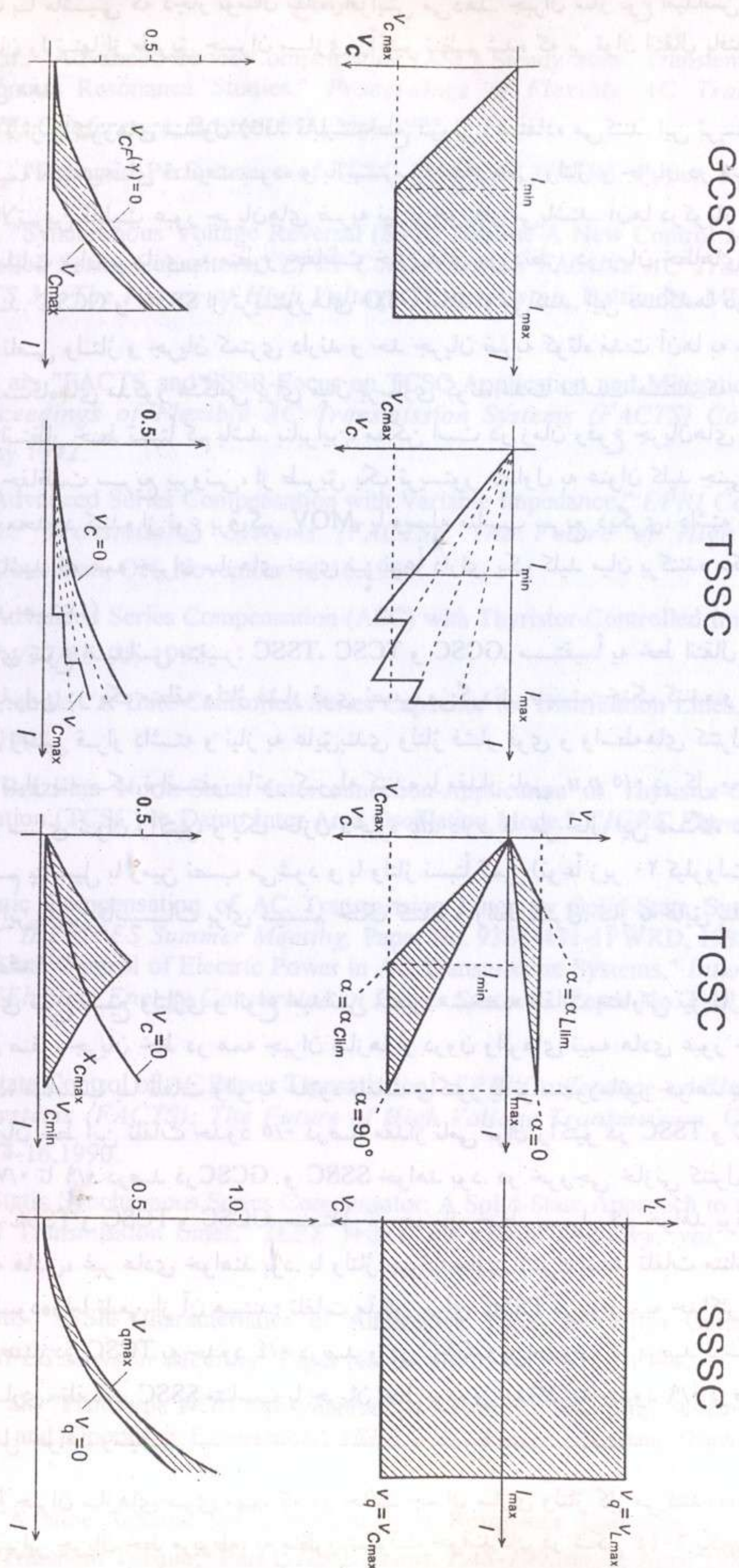
۶-۵ جمع‌بندی مشخصه‌ها و ویژگی‌ها

SSSC یک جبران‌ساز سری نوع منبع ولتاژی است و TCSC، TSSC و GCSC جبران‌سازهای سری نوع امپدانس متغیر هستند. اگرچه هر دو نوع جبران‌ساز می‌توانند کنترل سیلان توان را به صورت بسیار مؤثری تأمین کنند، مشخصه عملیاتی آن‌ها و ویژگی‌های جبران‌سازی هر یک متفاوت بوده یا می‌تواند متفاوت باشد. تفاوت‌های محتمل آن‌ها وابسته به ویژگی‌های ذاتی مدار قدرتی مربوط به نوع جبران‌ساز است. شاخصه منبع ولتاژی SSSC، برخی قابلیت‌های ذاتی و ویژگی‌های عملیاتی را در جبران‌سازی سری خط عرضه می‌کند که با جبران‌سازهای نوع امپدانس متغیر قابل حصول نیستند. از طرف دیگر، ساختار مداری و نیمه هادی‌های قدرتی به کار رفته در جبران‌سازهای نوع امپدانس متغیر کنترل شده با تریستور (TCSC، TSSC) انطباق آسان‌تری را با حفاظت‌های مورد نیاز، که برای کنترل کردن شرایط خطا در خط به کار می‌روند، عرضه می‌کنند. تفاوت‌های اساسی در مشخصه‌ها و ویژگی‌های دو نوع جبران‌ساز را می‌توان به شرح زیر جمع‌بندی کرد:

۱- SSSC قادر به تولید داخلی یک ولتاژ جبران‌سازی قابل کنترل، در محدوده مشابه خازنی و القایی، مستقل از مقدار جریان خط است. ولتاژ جبران‌سازی GCSC و TSSC در یک محدوده معین کنترلی، متناسب با جریان خط است. TCSC می‌تواند حداکثر ولتاژ جبران‌سازی را با وجود کاهش جریان خط، در یک محدوده کنترلی که توسط قابلیت ازدیاد جریان، راکتور کنترل شده با تریستور، تعیین می‌شود، حفظ کند.

۲- SSSC دارای این قابلیت ذاتی است که با واسطه یک منبع توان dc بیرونی، جبران‌سازی مقاومت خط را به وسیله تزریق توان حقیقی، و نیز جبران‌سازی راکتانس خط را به وسیله تزریق توان راکتیو، به منظور بالا نگه داشتن مقدار مؤثر نسبت X/R ، مستقل از درجه جبران‌سازی سری، انجام دهد. جبران‌سازهای سری نوع امپدانس متغیر نمی‌توانند توان راکتیو (جز برای تلفات مدار) با خط انتقال مبادله کنند و فقط قادر به جبران‌سازی راکتیو هستند.

۳- SSSC به همراه یک ذخیره (یا حفره) انرژی، میزان مؤثر بودن کاهندگی نوسانات توان را، هم از طریق تنظیم کردن جبران‌سازی سری راکتیو برای افزایش یا کاهش توان انتقال یافته، و هم از طریق تزریق هم‌زمان امپدانس حقیقی متناوب مثبت و منفی برای جذب و تأمین توان حقیقی از



شکل ۶-۴۴ جمع‌بندی جبران‌سازی ولتاژ قابل حصول در برابر جریان خط، و مشخصه‌های تلفات در برابر جریان خط مربوطه در طرح‌های اصلی جبران‌سازی سری.

مراجع

- Agrawal, B. L., et al., "Advanced Series Compensation (ASC) Steady-State, Transient Stability, and Subsynchronous Resonance Studies," *Proceedings of Flexible AC Transmission Systems (FACTS) Conference*, Boston, MA, May 1992.
- Angquist, L., et al., "Dynamic Performance of TCSC Schemes," *CIGRE Paper No. 14-302*, 1996.
- Angquist, L., et al., "Synchronous Voltage Reversal (SVR) Scheme-A New Control Method for Thyristor-Controlled Series Capacitors," *EPRI Conference on Flexible AC Transmission Systems (FACTS 3): The Future of High Voltage Transmission*, Baltimore, MD, October 5-7, 1994.
- Bowler, C. E. J., et al., "FACTS and SSSR-Focus on TCSC Application and Mitigation of SSR Problems," *Proceedings of Flexible AC Transmission Systems (FACTS) Conference*, Boston, MA, May 1992.
- Christl, N., et al., "Advanced Series Compensation with Variable Impedance," *EPRI Conference on Flexible AC Transmission Systems (FACTS): The Future of High Voltage Transmission*, Cincinnati, OH, November 14-16, 1990.
- Christl, N., et al., "Advanced Series Compensation (ASC) with Thyristor-Controlled Impedance," *CIGRE Paper 14/37/38-05*, 1992.
- De Souza, L. F. W., et al., "A Gate-Controlled Series Capacitor for Distribution Lines," *CIGRE Paper 14-201*, 1998.
- Gribel, J., et al., "Brazilian North-South Interconnection-Application of Thyristor-Controlled Series Compensation (TCSC) to Damp Inter Area Oscillation Mode," *CIGRE Paper No. 14-101*, 1998.
- Gyugyi, L., "Dynamic Compensation of AC Transmission Lines by Solid-State Synchronous Voltage Sources," *IEEE/PES Summer Meeting*, Paper No. 93SM431-1PWRD, 1993.
- Gyugyi, L., "Solid-State Control of Electric Power in AC Transmission Systems," *International Symposium on 'Electric Energy Conversion in Power Systems'*, Paper No. T-IP. 4, Capri, Italy, 1989.
- Gyugyi, L., "Solid-State Control of AC Power Transmission," *EPRI Conference on Flexible AC Transmission Systems (FACTS): The Future of High Voltage Transmission*, Cincinnati, OH, November 14-16, 1990.
- Gyugyi, L., et al., "Static Synchronous Series Compensator: A Solid-State Approach to the Series Compensation of Transmission Lines," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 12, no. 1, January 1997.
- Hedin, R. A., et al., "SSSR Characteristics of Alternative Types of Series Compensation Schemes," *IEEE/PES Summer Meeting*, Paper No. 94 SM 534-8 PWRs, 1994.
- Hingorani, N. G., et al., "Prototype NGH Subsynchronous Resonance Damping Scheme. Part 1, Field Installation and Operating Experience," *IEEE/PES Winter Meeting*, New Orleans, 1987.
- Hingorani, N. G., "A New Scheme for Subsynchronous Resonance Damping of Torsional Oscillations and Transient Torque," Part I, *IEEE Trans. PAS-100*, no. 4, April 1981.

خط، هماهنگ با ماشینی که دچار نوسان شده، افزایش می‌دهد. جبران ساز نوع امپدانس متغیر می‌تواند نوسان را تنها از طریق جبران سازی رآکتیو تنظیم شده که بر توان انتقال یافته تأثیر می‌گذارد، کاهش دهد.

۴- TSSC و TCSC از رآکتورهای متداول (فاقد قابلیت قطع درونی) استفاده می‌کنند. این تریستورها مقاوم‌ترین نیمه هادی‌های قدرت بوده و با بیشترین مقدار نامی ولتاژ و جریان در دسترس هستند، و از بالاترین قابلیت عبور جریان‌های ضربه نیز برخوردار می‌باشند. آن‌ها در کوتاه مدت، برای تأمین عملیات میان برسازی به منظور حفاظت خازن‌های موردنظر، در زمان خطاهای خط، مناسب می‌باشند. GCSC و SSSC از تریستورهای GTO استفاده می‌کنند. این دستگاه‌ها در حال حاضر مقدار نامی ولتاژ و جریان کمتری دارند و حد جریان ضربه کوتاه مدت آن‌ها به مراتب کمتر است. دستگاه‌های مذکور هنگامی برای میان برسازی کوتاه مدت مناسب هستند که جریان خطای مورد انتظار خط نسبتاً کم باشد. بنابراین، ممکن است در زمان وقوع جریان‌های شدید خطا نیاز به حفاظت سریع بیرونی، از طریق یک تریستور متداول به عنوان کلید جنبی میان برکننده، یا یک محدود کننده از نوع برق‌گیر MOV، یا وسیله مناسب سریع دیگری، داشته باشند. (توجه داشته باشید که همه جبران سازهای سری نیز نوعاً دارای یک کلید میان برکننده مکانیکی به عنوان پشتیبان هستند.)

۵- جبران سازهای نوع امپدانس متغیر: TSSC، TCSC و GCSC، مستقیماً به خط انتقال کوپله می‌شوند و بنابراین در یک منطقه ولتاژ فشار قوی نصب می‌گردند. سیستم خنک کننده و کنترل آن‌ها بر روی زمین قرار داشته و نیاز به عایق‌بندی ولتاژ فشار قوی و واسطه‌های کنترل‌کننده دارند. SSSC نیاز به یک ترانسفورماتور کوپله کننده با مقدار نامی $0.5 p.u.$ در کل محدوده جبران سازی سری توان رآکتیو، و یک خازن ذخیره dc دارد. به هر حال این دستگاه در یک ساختمان و هم پتانسیل با زمین نصب می‌شود و با ولتاژ نسبتاً کمی (نوعاً زیر ۲۰ کیلوولت) کار می‌کند. بنابراین، این تأسیسات برای سیستم خنک کننده و رابط کنترل، نیاز به عایق‌بندی در ولتاژ نسبتاً کمتری دارد.

۶- جبران سازهای نوع منبع ولتاژی و انواع امپدانس متغیر، مشخصه تلفات متفاوتی نیز دارند. در جبران سازی صفر، جریان خط در همه جبران سازها از درون والوهای نیمه هادی عبور خواهد کرد، و تلفات، متناسب با تلفات والو به علاوه تلفات رآکتور یا ترانسفورماتور خواهد بود. در مقدار نامی جریان خط این تلفات حدود 0.5% درصد مقدار نامی توان رآکتیو در TSSC و TCSC بوده و حدود 0.7% تا 0.9% درصد در GCSC و SSSC خواهد بود. در خروجی خازنی کنترل نشده کامل، تلفات TSSC و TCSC و GCSC، مستقل از جریان خط، بسیار کم خواهد بود، زیرا والوهای نیمه هادی، غیر هادی خواهند بود. با ولتاژ جبران سازی کنترل شده، تلفات متناسب با جریان خط نبوده، اما تابعی از آن هستند؛ تلفات مذکور برای TSSC می‌تواند به حداکثر مقدار حدود 0.3% درصد، در TCSC به حدود 0.4% درصد و در GCSC به حدود 0.6% درصد برسند. در این حالت کاری، تلفات SSSC متناسب با جریان خط بوده و حداکثر به حدود 0.9% درصد در جریان خط کامل خواهد رسید.

مشخصه $V-I$ جبران سازهای سری مهم، که در حالت جبران سازی ولتاژ کار می‌کنند، به همراه مشخصه تلفات در برابر جریان خط مربوطه، به منظور سهولت خوانندگان در شکل ۶-۴۴ یکجا نشان داده شده است.

تنظیم‌کننده‌های استاتیکی ولتاژ و زاویه فاز:

TCPAR و TCVR

۷-۱ اهداف تنظیم‌کننده‌های ولتاژ و زاویه فاز

روابط ابتدایی (۵-۳) و (۵-۴) که در فصل ۵ برای تعیین توان حقیقی انتقال یافته P و توان راکتیو خط Q به دست آمدند، نشان دهنده آن‌اند که آن‌ها، تابعی از امپدانس خط انتقال، مقدار ولتاژ در طرف‌های تولید و مصرف‌کننده، و زاویه فاز بین این ولتاژها هستند. بحث‌های انجام شده نشان می‌دهند که افزایش توان حقیقی انتقال یافته، به طرز اجتناب‌ناپذیری منجر به افزایش تقاضای توان راکتیو در شینه ولتاژ انتهایی (ژنراتورها) و افزایش تغییرات ولتاژ در طول خط انتقال خواهد شد.

فصل ۵ بر کنترل ولتاژ انتقال، از طریق یورش به عامل ریشه‌ای تغییرات آن، یعنی توان راکتیو متغیر خط، تمرکز دارد. ذکر شد که جبران‌سازی راکتیو موازی کنترل شده، در حفظ پروفیل مطلوب ولتاژ در طول خط انتقال، علیرغم تغییر در تقاضای توان حقیقی، بسیار مؤثر است. به هر حال، جبران‌سازی راکتیو موازی کنترل شده در سیستم‌های بزرگ انتقال، برای حفظ سطح ولتاژ معین برای بارها، در انتهای سیستم فوق توزیع یا توزیع، اغلب موضوعیت ندارد. مثلاً اتصال یک خط انتقال با ولتاژ زیاد به یک خط با ولتاژ پایین‌تر، به منظور افزایش انتقال توان، معمولاً به وسیله یک تپ چنجر تحت بار انجام می‌شود تا سیستم دارای ولتاژ کم‌تر را از تغییرات زیاد ولتاژ در خط با ولتاژ زیاد، که در اثر تغییرات بار فصلی یا روزانه به وجود می‌آید، جدا کند. به طور مشابه، تپ چنجرهای تحت بار در تنظیم‌کننده‌های ولتاژ، از اولین روزهایی که انتقال ac برای حفظ ولتاژ مطلوب مصرف‌کننده در مواجهه با تغییرات بار و ولتاژ انتقال به کار می‌رفت، استفاده می‌شده‌اند. علاوه بر تنظیم ولتاژ، تپ چنجرها می‌توانند، به طور کلی، برای کنترل سیلان توان راکتیو در خط مورد استفاده قرار گیرند. از آن‌جا که امپدانس‌های خط انتقال عمدتاً راکتیو هستند، ورود یک مؤلفه ولتاژ هم فاز به مدار انتقال، به میزان قابل توجهی باعث سیلان جریان راکتیو می‌شود، که با کنترل مناسب پلاریته و مقدار، می‌تواند برای بهبود سیلان توان راکتیو استفاده شود.

اگرچه به نظر می‌رسد که جبران‌سازی راکتیو و تنظیم ولتاژ توسط تپ چنجرهای تحت بار کنترل انتقال را به شکل مشابه انجام می‌دهند، تفاوت عملکردی قابل توجهی بین آن‌ها وجود دارد. در حالی که جبران‌ساز راکتیو، توان راکتیو را برای تغییر سیلان توان راکتیو موجود و به این طریق کنترل غیر مستقیم ولتاژ خط انتقال، از سیستم ac جذب یا به آن وارد می‌کند، تنظیم‌کننده ولتاژ مبتنی بر تپ چنجر نمی‌تواند توان راکتیو را تأمین یا جذب کند. این وسیله به طور مستقیم ولتاژ انتقال را در یک طرف تنظیم می‌کند و تأمین توان راکتیو لازم برای حفظ آن ولتاژ را بر عهده سیستم قدرت می‌گذارد.

Jalali, S. G., et al., "A Stability Model for Advanced Series Compensator (ASC)," *IEEEIPES Summer Meeting*, Paper No. 95 SM 404-4 PWRD, 1995.

Karady, G. G., et al., "Continuously Regulated Series Capacitor," *IEEEIPES Summer Meeting*, Paper No. 92 SM 492-9 PWRD, 1992.

Larsen, E. V., et al., "Characteristics and Rating Considerations of Thyristor Controlled Series Compensation," *IEEEIPES Summer Meeting*, Paper No. 93 SM 433-3 PWRD, 1993.

Nyati, S., et al., "Effectiveness of Thyristor-Controlled Series Capacitor in Enhancing Power System Dynamics: An Analog Simulation Study," *IEEEIPES Summer Meeting*, Paper No. 93 SM 432-5 PWRD, 1993.

Paserba, J. J., et al., "Thyristor-Controlled Series Compensation Prototype Installation at the Slatt 500 kV Substation," *IEEEIPES Summer Meeting*, Paper No. 94 SM 476-2 PWRD, 1994.

Piwko, R. J., et al., "The Slatt Thyristor-Controlled Capacitor Project-Design, Installation, Commissioning and System Testing," *CIGRE Paper 14-104*, 1994.

Sen, K. K., "SSSC-Static Synchronous Series Compensator: Theory, Modeling, and Applications," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 13, no. 1, January 1998.

Torgerson, D. R. (Convenor), "Thyristor-Controlled Series Capacitor," *Working Group 14.18, CIGRE*, 1997.

Urbanek, J., et al., "Thyristor-Controlled Series Compensation Prototype Installation at the Slatt 500 kV Substation," *IEEEIPES Summer Meeting*, Paper No. 92 SM 467-1 PWRD, 1992.

Vithayathil, J. J., "Case Studies of Conventional and Novel Methods of Reactive Power Control on an AC Transmission System," *CIGRE Paper 38-02*, 1986.

رویکردهای مبتنی بر الکترونیک قدرت فراهم شود. تأثیر کنترل زاویه فاز بر فاکتورهای اساسی تعیین‌کننده حداکثر توان قابل انتقال (حد انتقال توان در حالت ماندگار، پایداری گذرا، و میرایی نوسانات توان) نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۷-۱-۱ تنظیم ولتاژ و زاویه فاز

مفهوم اولیه تنظیم ولتاژ و زاویه فاز، افزودن یک مؤلفه هم فاز یا با 90° درجه اختلاف فاز به ولتاژ موجود ترمینال (شینه) است تا مقدار آن را تغییر دهد (اضافه یا کم کند)، و یا زاویه آن را تغییر دهد و به مقدار مشخص (یا مطلوب) برساند. بنابراین از جنبه تئوری، همان‌گونه که در شکل ۷-۱ الف نشان داده شده، تنظیم ولتاژ می‌تواند با یک منبع ولتاژ هم فاز سنکرون با دامنه قابل کنترل $\pm \Delta V$ ، که به صورت سری با سیستم ac قرار گرفته و ولتاژ ترمینال‌های آن تنظیم شده، به دست آید. یک اجرای متداول از این مفهوم به صورت شماتیک در شکل ۷-۱ ب نشان داده شده است. در این اجرا، ولتاژ قابل تنظیم به وسیله تپ چنجر از یک (اتو) ترانسفورماتور (که معمولاً به آن ترانسفورماتور تنظیم‌کننده یا تحریک می‌گویند) برای اولیه یک ترانسفورماتور سری داخل خط تأمین می‌شود، که با تزریق آن به خط تنظیم ولتاژ مورد نیاز به دست می‌آید. از شکل نشان داده شده آشکار است که ولتاژهای تزریق شده $\pm \Delta V_a$ ، $\pm \Delta V_b$ ، $\pm \Delta V_c$ به ترتیب با ولتاژهای فاز به زمین V_a ، V_b و V_c هم فاز هستند. این مطلب در دیاگرام فازوری شکل ۷-۱ ج نشان داده شده است. در ترانسفورماتورهای دو سیم پیچه، تپ چنجرهای تحت بار در طرف سیم پیچ‌های ستاره نصب می‌شوند.

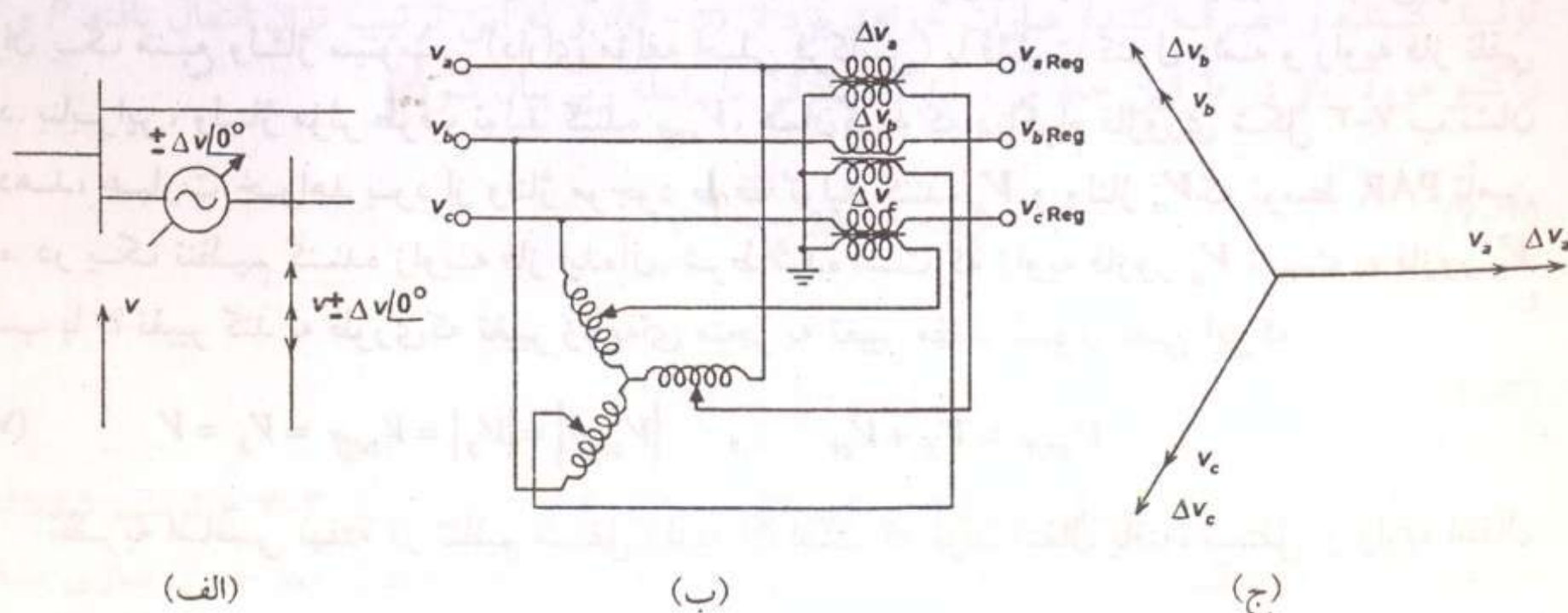
به همین ترتیب، ساختار شکل ۷-۱ الف را می‌توان به سادگی، با قید این‌که ولتاژ تزریق شده ΔV اختلاف فاز $\pm 90^\circ$ نسبت به ولتاژ سیستم V داشته باشد، برای کنترل فاز به کار برد - همان‌گونه که در شکل ۷-۲ الف نشان داده شده است. با این قید، ولتاژ تزریق شده، زاویه فاز موجود ولتاژ سیستم را تغییر خواهد داد. یک ساختار ممکن برای کنترل زاویه فاز به صورت شماتیک در شکل ۷-۲ ب آورده شده و دیاگرام فازوری مربوطه نیز در شکل ۷-۲ ج نشان داده شده است. در تنظیم‌های زاویه‌ای نسبتاً کوچک، تغییر زاویه‌ای منته‌جه تقریباً متناسب با ولتاژ تزریق شده است، در حالی که مقدار ولتاژ تقریباً ثابت باقی می‌ماند. با توجه به این‌که در تنظیم‌های زاویه‌ای بزرگ، مقدار ولتاژ سیستم به میزان قابل

اگر سیستم قدرت قادر به تأمین درخواست توان راکتیو نباشد، سقوط کلی ولتاژ می‌تواند در سیستم اتفاق بیفتد. مشارکت تپ چنجرهای تحت بار، در سقوط ولتاژ تحت شرایط معین، به خوبی شناخته شده است. مثلاً، هنگامی که تپ چنجرها نسبت تبدیل را برای حداقل کردن افت ولتاژ تحت بارهای عمده‌تأ موتوری در یک سیستم انتقال اضافه بار شده، افزایش می‌دهند، خط انتقال نیاز به افزایش جریان بار دارد در حالی که ضریب قدرت بار کاهش می‌یابد. البته این امر ولتاژ انتقال را بیشتر کاهش داده و به نوبه خود جریان را افزایش می‌دهد تا این‌که ولتاژ سقوط کند و رله‌های حفاظتی بار را قطع کنند. به هر حال، تپ چنجر تحت بار و هم‌تای الکترونیکی آن که در این فصل و فصل بعدی مورد بحث قرار خواهند گرفت، نقش مهمی در کنترل سیلان توان انتقالی از طریق عمل مهم تنظیم ولتاژ و مدیریت توان راکتیو بازی می‌کنند.

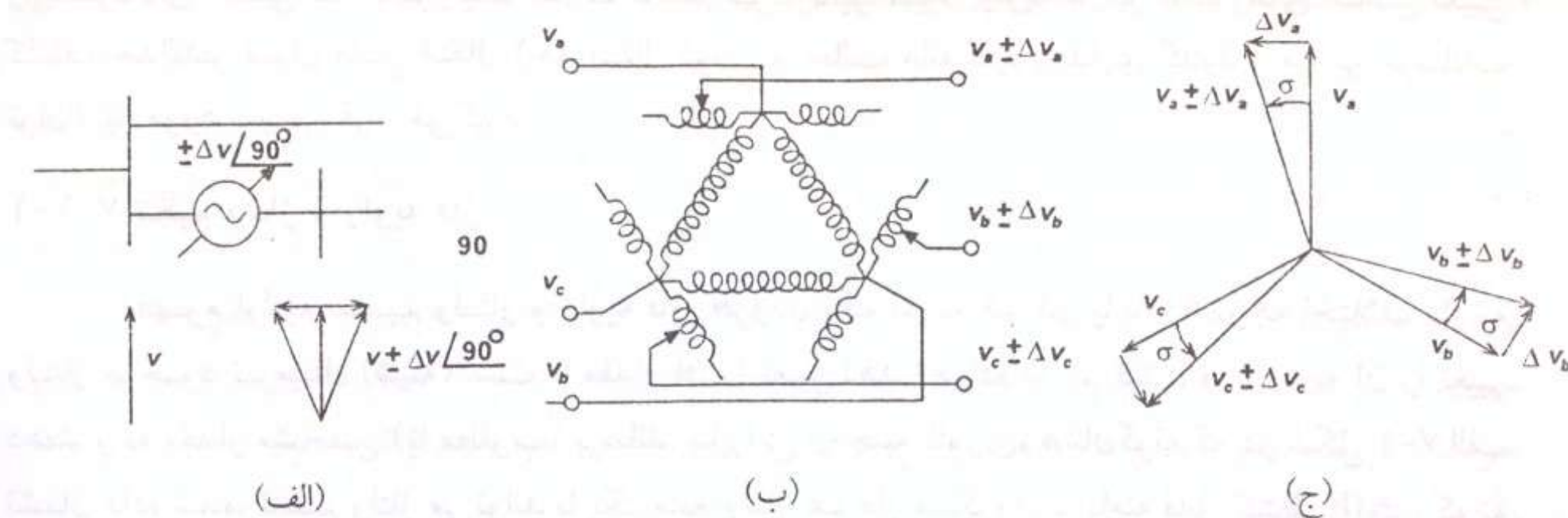
فصل ۶ بر کنترل توان انتقال یافته توسط جبران سازی راکتیو سری تمرکز دارد، که می‌تواند عامل بسیار مهمی در کنترل سیلان توان در خط و نیز بهبود رفتار دینامیکی سیستم قدرت باشد. با این ترتیب، در حالی که جبران سازی راکتیو سری عموماً برای کنترل سیلان توان بسیار مؤثر است، کاربرد آن در برخی مشکلات انتقال می‌تواند غیر عملی، موجب پیچیدگی غیر ضروری و یا از نظر اقتصادی غیر کارآمد باشد. این مشکلات با زاویه انتقال مرتبط هستند. برای مثال، زاویه موجود انتقال می‌تواند با نیازهای خط موردنظر سازگار نباشد یا ممکن است با بارهای روزانه یا فصلی سیستم در یک محدوده بسیار بزرگ تغییر کند تا بتواند سیلان توان قابل قبول را در بعضی خطوط تأثیر یافته از تغییرات بار، حفظ کند. مشکلات دیگر شامل کنترل سیلان توان‌های حقیقی و راکتیو در حلقه‌های یک شبکه درهم پیچیده است. حل این نوع مسائل معمولاً نیاز به کنترل زاویه مؤثری [سومین متغیر در روابط اساسی انتقال که در معادلات (۵-۳) و (۵-۴) داده شده] دارد که خط انتقال مربوطه یا شبکه با آن مواجه است. تنظیم‌کننده‌های مکانیکی زاویه فاز (PAR) یا ترانسفورماتورهای جابجا کننده فاز (PST)ها، که از تپ چنجرهای تحت بار و تزریق ولتاژ با 90° درجه اختلاف فاز، استفاده می‌کنند، در دهه ۱۹۳۰، برای حل مشکلات سیلان توان و افزایش بهره‌برداری خطوط انتقال، ارائه شدند. در حالی که تپ چنجرهای تحت بار با تزریق ولتاژ هم فاز، توان راکتیو را از طریق تنظیم مقدار ولتاژ کنترل می‌کنند، آن‌ها که ولتاژ با 90° درجه اختلاف فاز را تزریق می‌کنند توان حقیقی را از طریق تنظیم فاز کنترل می‌کنند. استفاده ترکیبی از این دو، کنترل هر دو سیلان توان راکتیو و حقیقی را ممکن می‌سازد. در نتیجه، PARها از گذشته برای تغییر جهت سیلان جریان و کاهش سیلان‌های حلقوی در سیستم‌های به هم پیوسته به کار می‌رفته‌اند، و به این ترتیب بارگیری خطوط انتقال به هم پیوسته را بهبود بخشیده و متعادل می‌کرده‌اند.

جدا از کنترل ولتاژ حالت ماندگار و سیلان توان، نقش تنظیم‌کننده‌های مدرن زاویه فاز ولتاژ، که دارای کنترل‌های سریع الکترونیکی هستند می‌تواند به مدیریت حوادث دینامیکی سیستم نیز گسترش یابد. زمینه‌های بالقوه کاربرد آن‌ها عبارت است از: بهبود پایداری حالت گذرا، میرایی نوسان توان، و به حداقل رساندن اضافه بارهای پس از اغتشاش و کاهش ولتاژهای مربوطه. همان‌طور که با جبران‌سازهای راکتیو مقایسه شد، تنظیم‌کننده‌های ولتاژ و زاویه فاز عامل جدیدی را در کنترل اتفاقات دینامیکی وارد می‌کنند که عبارت است از قابلیت مبادله توان حقیقی. در همین حال، تنظیم‌کننده‌های ولتاژ و زاویه که مبتنی بر آرایش کلاسیک ترانسفورماتورهای دارای تپ چنجر باشند، فاقد توانایی جبران سازهای راکتیو برای تأمین یا جذب توان راکتیو هستند، و لذا ادای این وظیفه بر عهده سیستم قدرت گذاشته شده است.

در بخش بعدی، تکنیک‌های اصلی تنظیم ولتاژ و زاویه مرور می‌شود تا زمینه لازم برای بررسی



شکل ۷-۱ مفهوم و اجرای ابتدایی یک تنظیم‌کننده ولتاژ.



شکل ۷-۲ مفهوم و اجرای ابتدایی یک تنظیم‌کننده زاویه فاز.

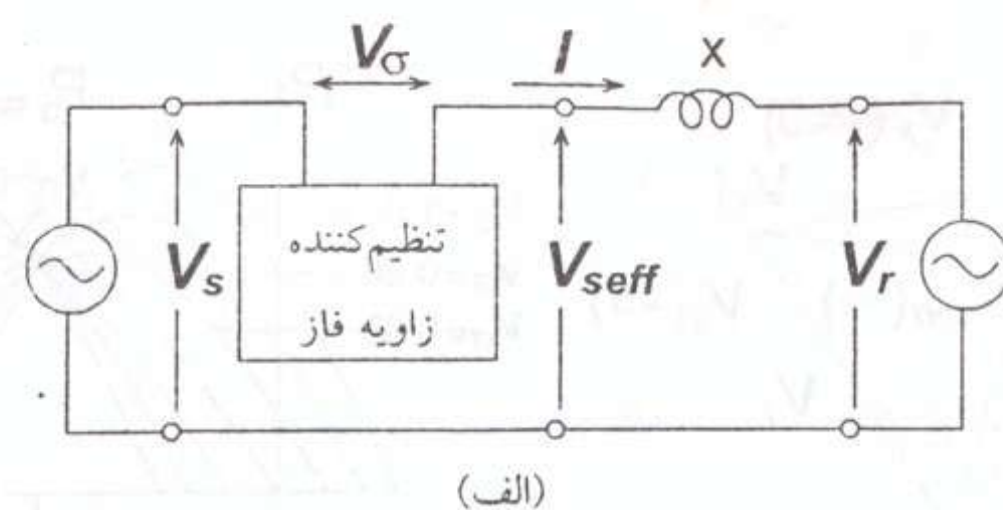
توجهی افزایش خواهد یافت، به این ساختار اغلب ترانسفورماتور بوستر^۱ (۹۰°) درجه (QBT) می‌گویند. مقدار ولتاژ می‌تواند مستقل از تنظیم زاویه‌ای، به وسیله یک ساختار پیچیده‌تر سیم پیچی، حفظ شود. به هر حال، به دلیل سادگی نسبی ساختار QBT، این ساختار نوعاً در کاربردهای متداول جابه‌جایی فاز مورد استفاده قرار گرفته است.

۷-۱-۲ کنترل سیلان توان توسط تنظیم‌کننده‌های زاویه فاز

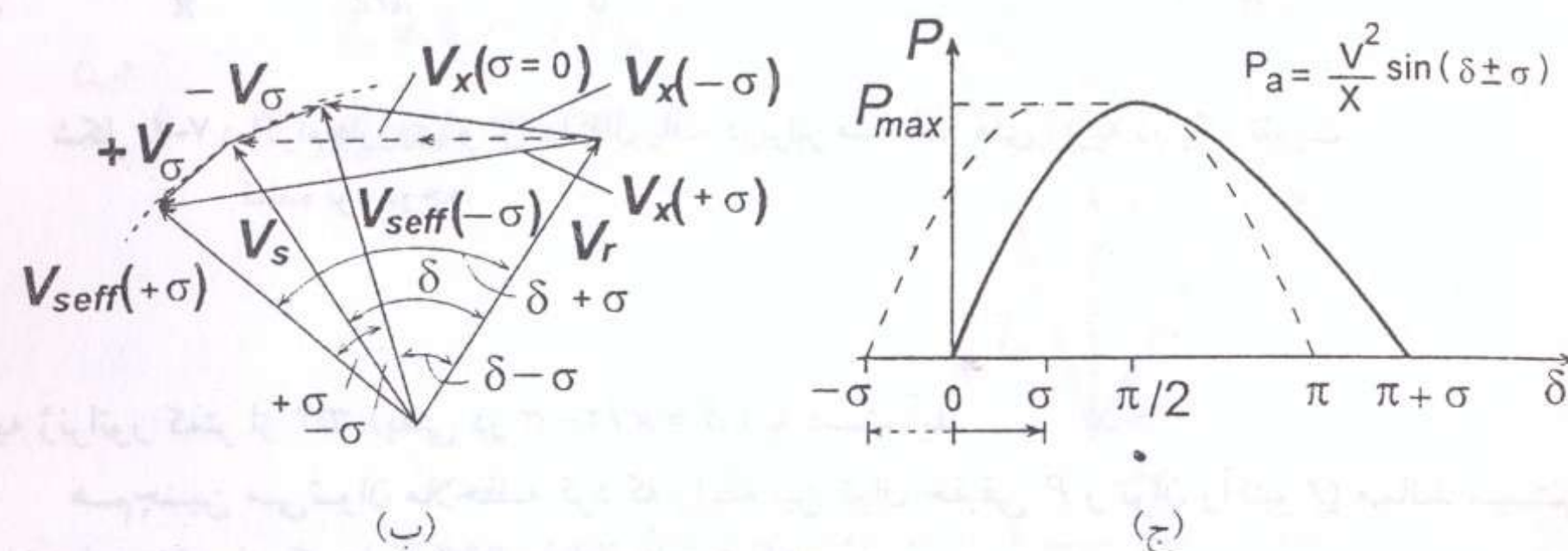
همان‌طور که در بالا اشاره شد، بارگیری بهینه خطوط انتقال در شبکه‌های قدرت عملی همیشه نمی‌تواند در زاویه انتقال موجود به دست آید. به عنوان مثال، چنین مواردی هنگامی اتفاق می‌افتد که توان بین دو شینه از طریق خطوط موازی با طول‌های الکتریکی متفاوت منتقل می‌شود، یا هنگامی که دو شینه درگیر در انتقال توان دارای اختلاف زاویه‌ای هستند که برای برقراری سیلان توان مطلوب کافی نیست. در چنین حالاتی اغلب یک تنظیم‌کننده زاویه فاز (PAR) مورد استفاده قرار می‌گیرد. مفهوم اساسی کنترل سیلان توان از طریق تنظیم ولتاژ، که در شکل ۷-۳ الف نشان داده شده، براساس مدل همیشگی دو ماشین اراشه شده که در آن یک تنظیم‌کننده زاویه فاز بین ژنراتور (شینه) طرف تولید کننده و خط انتقال قرار گرفته است. از لحاظ نظری، تنظیم‌کننده زاویه-فاز می‌تواند به عنوان یک منبع ولتاژ سینوسی (دارای مؤلفه اصلی فرکانس) با قابلیت کنترل دامنه و زاویه فاز تلقی شود. بنابراین، ولتاژ مؤثر طرف تولید کننده V_{seff} ، همان‌گونه که دیاگرام فازوری شکل ۷-۳ ب نشان می‌دهد، عبارت خواهد بود از ولتاژ موجود طرف تولید کننده V_s و ولتاژ V_σ که توسط PAR تأمین شده. در یک تنظیم‌کننده زاویه فاز ایده‌آل، شرط شده است که زاویه فازور V_σ نسبت به فازور V_s متناسب با σ تغییر کند به طوری که تغییر زاویه‌ای منجر به تغییر مقدار نشود، یعنی این که

$$V_{seff} = V_s + V_\sigma \quad \text{و} \quad |V_{seff}| = |V_s| = V_{seff} = V_s = V \quad (7-1)$$

نظریه اساسی نهفته در تنظیم مستقل زاویه آن است که توان انتقال یافته، مستقل از زاویه انتقال



(الف)



(ب)

(ج)

شکل ۷-۳ سیستم قدرت دو ماشین با یک تنظیم‌کننده زاویه فاز (الف)، دیاگرام فازوری مربوطه (ب)، و توان انتقال یافته در برابر مشخصه‌های زاویه (ج).

موجود δ ، در یک محدوده از قبل تعیین شده، در سطح مطلوب حفظ شود. بنابراین، به عنوان مثال، با کنترل دامنه ولتاژ ۹۰° درجه، V_σ ، به صورتی که زاویه مؤثر فاز $(\delta - \sigma)$ بین ولتاژهای طرف تولید کننده و مصرف کننده در $\pi/2$ واقع شود، می‌توان پس از تجاوز زاویه δ از $\pi/2$ (زاویه اوج توان) مقدار توان را در مقدار اوج حفظ کرد. به این طریق، توان انتقال یافته واقعی، حتی اگر تنظیم‌کننده زاویه فاز مستقیماً حد انتقالی توان حالت ماندگار را افزایش ندهد، می‌تواند افزایش یابد.

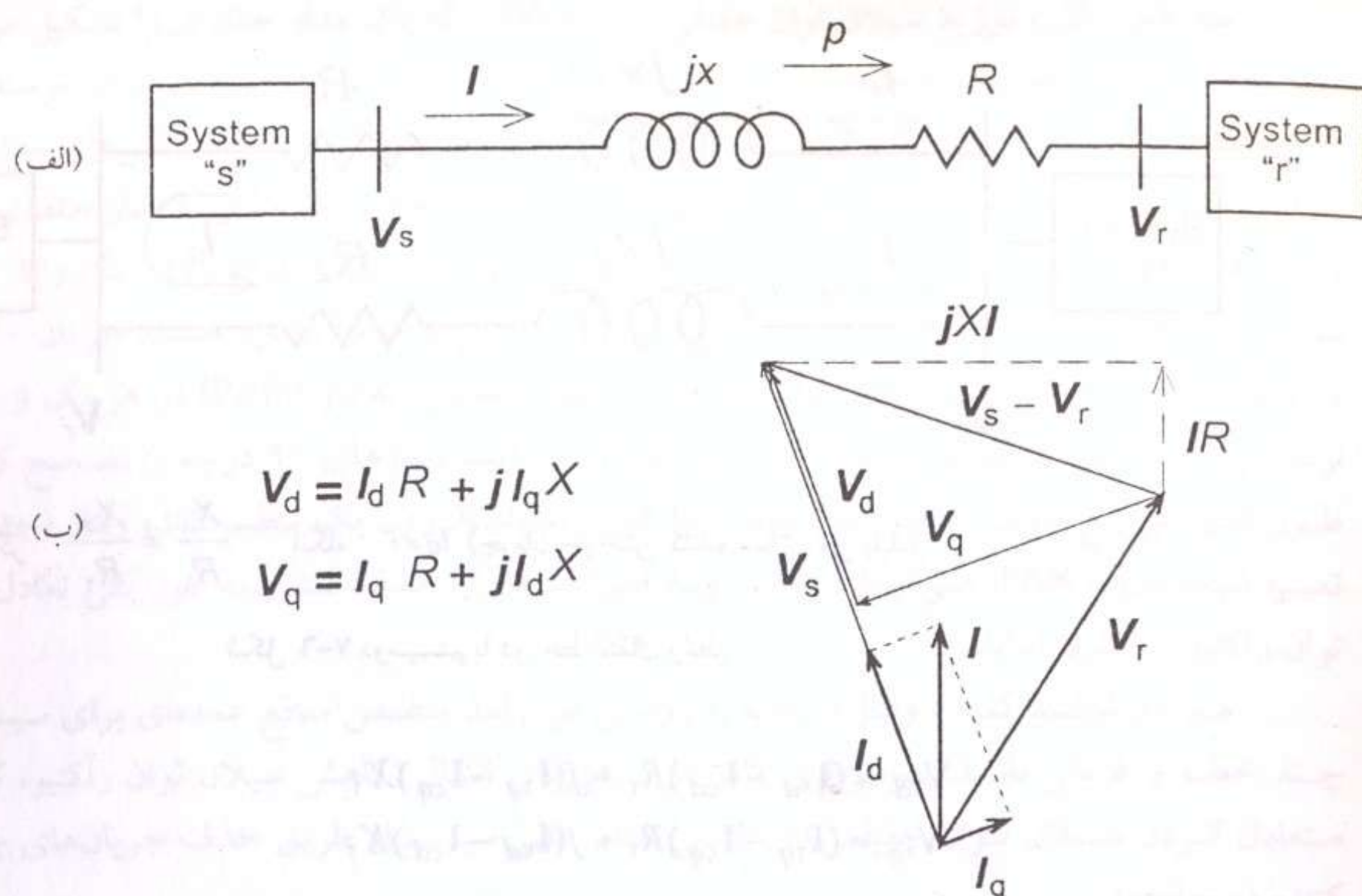
از طریق آرایش کنترل زاویه فاز بیان شده در رابطه (۷-۱)، زاویه فاز مؤثر بین ولتاژهای طرف تولید کننده و مصرف کننده عبارت خواهد بود از $(\delta - \sigma)$ ، و به این ترتیب توان انتقال یافته P و توان راکتیو مورد نیاز در طرفین خط می‌تواند به سادگی با رابطه زیر بیان شود:

$$P = \frac{V^2}{X} \sin(\delta - \sigma) \quad (7-2)$$

و

$$Q = \frac{V^2}{X} \{1 - \cos(\delta - \sigma)\} \quad (7-3)$$

رابطه بین توان حقیقی P ، توان راکتیو Q و زوایای δ و σ ، در شکل ۷-۳ ج ترسیم شده است. می‌توان مشاهده کرد که، اگرچه تنظیم‌کننده زاویه فاز، توان قابل انتقال خط جبران سازی نشده را افزایش نمی‌دهد، اما از نظر تئوری، حفظ توان را در حداکثر مقدار خود در هر زاویه δ در محدوده $\pi/2 + \sigma < \delta < \pi/2 - \sigma$ ممکن می‌سازد؛ در واقع منحنی P در برابر δ را به سمت راست جابه‌جا می‌کند. باید توجه داشت که منحنی P در برابر δ می‌تواند، با جایگزین کردن ولتاژ تنظیم‌کننده زاویه با پلاریته معکوس، به سمت چپ جابه‌جا شود. به این ترتیب، انتقال توان می‌تواند افزایش یابد و حداکثر توان در

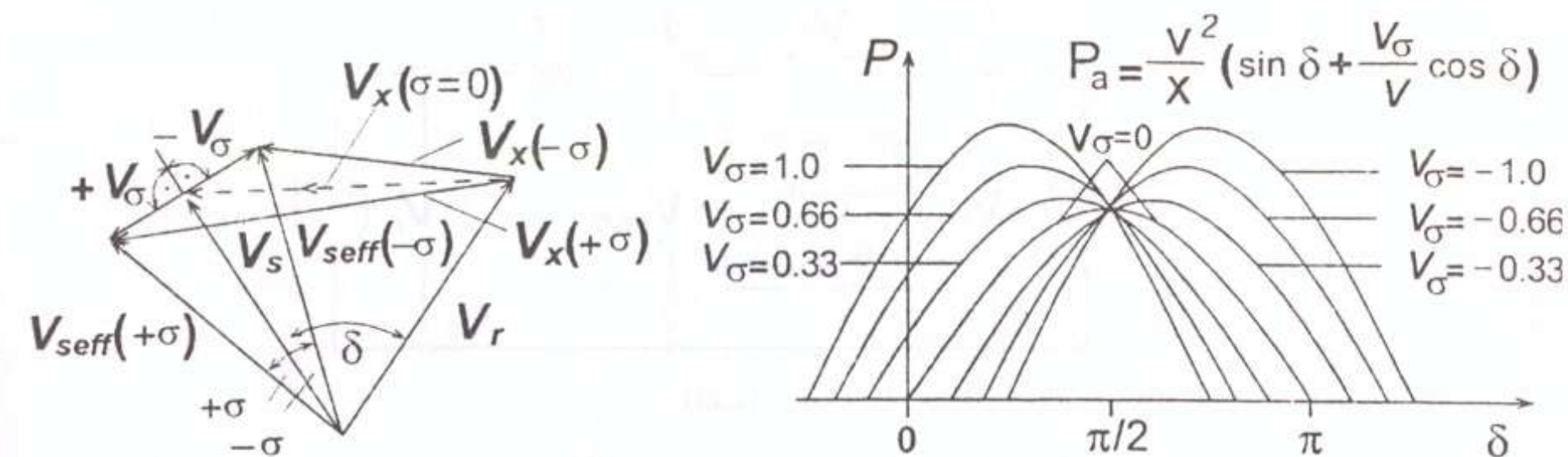


شکل ۷-۵ دو سیستم با یک خط انتقال رابط و دیاگرام فازوری مربوطه.

R به هم متصل شده‌اند، در نظر بگیرید. انتقال توان P از "s" به "r" منجر به بروز اختلاف مقدار بین ولتاژهای ترمینال V_s و V_r و نیز یک جابه جایی در زاویه فاز، می‌شود. این مطلب در شکل ۷-۵ ب نشان داده شده است. اختلاف برداری ولتاژ $V_l = V_s - V_r$ ، بر روی امپدانس خط $Z = R + jX$ ظاهر شده و جریان خط I را نتیجه می‌دهد. فازور V_l همان‌گونه که ذکر شد، به طور معمول از افت ولتاژهای مقاومتی و القایی، به ترتیب IR و jIX ، تشکیل شده است. به هر حال، فعلاً به منظور بررسی چرخه سیلان توان، تفکیک V_l به دو مؤلفه هم فاز و 90° درجه با بردار ولتاژ طرف تولید کننده V_s ، همان‌گونه که در شکل ۷-۵ ب نشان داده شده، بامعنی‌تر است. این مؤلفه‌های ولتاژ، همان‌گونه که خواننده به یاد دارد، توان‌های راکتیو و حقیقی تأمین شده از طرف تولید کننده سیستم را تعیین می‌کنند. در عمل، سیستم‌های قدرت معمولاً با دو یا چند مسیر خط انتقال موازی به یکدیگر متصل می‌شوند، که نتیجه آن وجود یک یا چند مدار حلقوی با قابلیت چرخش سیلان جریان در آن‌ها است. سیستمی را که قبلاً تعریف کردیم با دو خط انتقال موازی، به صورتی که در شکل ۷-۶ نشان داده شده، در نظر بگیرید. ملاحظات اولیه مدار نشان دهنده آن است که اگر نسبت X/R در دو خط انتقال مساوی نباشند، یعنی این که $X_1/R_1 \neq X_2/R_2$ ، آن‌گاه یک جریان چرخش کننده، درون دو خط سیلان خواهد یافت. با فرض وجود چنین نابرابری در دو نسبت X/R و با تجزیه جریان‌های دو خط یعنی I_1 و I_2 به دو مؤلفه هم فاز و 90° درجه نسبت به ولتاژ طرف تولید کننده V_s ، به صورتی که قبلاً در شکل ۷-۵ ب نشان داده شده بود، آن‌گاه مؤلفه‌های ولتاژ هم فاز و 90° درجه مربوطه برای خطوط، یعنی V_{1d} و V_{1q} ، می‌توانند بر حسب مقاومت‌ها و راکتانس‌های مدار R_1, X_1 و R_2, X_2 و نیز مؤلفه‌های جریان I_{1d}, I_{1q} و I_{2d}, I_{2q} و همچنین مؤلفه‌های مشابه برای جریان چرخش کننده، I_{cd} و I_{cq} به صورت زیر بیان شوند:

$$V_{1d} = (I_{1d} + I_{cd})R_1 + j(I_{1q} + I_{cq})X_1 \quad (7-7)$$

$$V_{1q} = (I_{1q} + I_{cq})R_1 + j(I_{1d} + I_{cd})X_1 \quad (7-8)$$



شکل ۷-۶ دیاگرام فازوری و توان انتقال یافته در برابر مشخصه‌های زاویه در یک تقویت کننده نود درجه.

زاویه ژنراتور کمتر از $\pi/2$ (یعنی در $\delta = \pi/2 - \sigma$) به دست آید. هم‌چنین می‌توان ملاحظه کرد که رابطه بین توان حقیقی P و توان راکتیو Q همانند سیستم جبران سازی نشده‌ای که زاویه انتقال معادل دارد خواهد بود. اگر زاویه فازور V_σ نسبت به فازور V_s در مقدار $\pm 90^\circ$ ثابت باشد تنظیم کننده زاویه فاز تبدیل به یک تقویت کننده 90° درجه (QB) با رابطه زیر می‌شود:

$$V_{seff} = V_s + V_\sigma \quad \text{و} \quad |V_{seff}| = V_{seff} = \sqrt{V_s^2 + V_\sigma^2} \quad (7-4)$$

برای یک تنظیم کننده زاویه از نوع تقویت کننده 90° درجه، توان انتقال یافته P می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$P = \frac{V^2}{X} (\sin \delta + \frac{V_\sigma}{V} \cos \delta) \quad (7-5)$$

توان انتقال یافته P بر حسب زاویه δ به عنوان متغیری که تابع ولتاژ تزریق شده 90° درجه V_σ است، به همراه دیاگرام فازوری مشخصه تقویت کننده 90° درجه، در شکل ۷-۶ نشان داده شده است. می‌توان ملاحظه کرد که حداکثر توان قابل انتقال با ولتاژ تزریق شده V_σ افزایش می‌یابد؛ زیرا برعکس تنظیم کننده زاویه فاز کامل، تقویت کننده 90° درجه مقدار ولتاژ مؤثر طرف تولید کننده را افزایش می‌دهد. برخلاف طرح‌های جبران سازی راکتیو موازی و سری که قبلاً بررسی شدند، تنظیم کننده‌های زاویه فاز عموماً بایستی با هر دو توان حقیقی و راکتیو سر و کار داشته باشند. کل توان عملیاتی VA تنظیم کننده زاویه (به عنوان یک منبع ولتاژ) عبارت است از:

$$VA = |V_{seff} - V_s| |I| = |V_\sigma| |I| = V_\sigma I \quad (7-6)$$

به این ترتیب اندازه تنظیم کننده زاویه، از حاصل ضرب حداکثر ولتاژ تزریق شده در حداکثر جریان مداوم خط تعیین می‌شود.

۷-۱-۳ کنترل چرخه سیلان توان حقیقی و راکتیو

دو سیستم قدرت "s" و "r" را در شکل ۷-۵ الف، که با یک خط انتقال بارآکتانس X و مقاومت