

جبرانسازهای استاتیک

دفتر فنی شرکت فراکوه

نویسندگان:

امیرحسین لرستانی

علیرضا اندرزا

بهار ۱۴۰۴



نام و لوگوی انتشارات

سرشناسه
عنوان قراردادی
عنوان و نام پدیدآور
مشخصات نشر
مشخصات ظاهری
شابک
وضعیت فهرست نویسی
یادداشت
موضوع
موضوع
رده بندی کنگره
رده بندی دیویی
شماره کتاب شناسی ملی

نام کتاب

نویسنده: نام نویسنده

مترجمین: نام مترجمین

ناشر: انتشارات

شمارگان: نسخه

نوبت چاپ: اول، ۱۳۹۷

قیمت: تومان

شابک: - - - ۹۷۸-۶۰۰-

شناسنامه کتاب در این صفحه می آید.

سخن ناشر

این فایل یک قالب آماده صفحه‌آرایی کتاب با قطع وزیری است که با Word 2003 و با فرمت doc ساخته شده و در تمام نسخه‌های نرم افزار Word قابل استفاده است.

در فصل اول همین قالب توضیحاتی در مورد نحوه استفاده از این قالب آمده است.

سرآغاز

مدیران شرکت فراکوه همیشه بر این باور بوده اند که در کنار انتقال دانش فنی و کار تولید، مستند سازی و انتقال این دانش و آگاهی‌های مربوطه به آن به نسل‌های آینده را نباید از نظر دور نگاه داشت؛ به همین جهت از آنجا که جای یک کتاب کاربردی در زمینه جبرانسازهای استاتیک و اصول طراحی آن همیشه خالی بوده؛ برای اولین بار در صنعت برق ایران دست به انتشار «دانشنامه جبرانسازهای استاتیک» زده و این کتاب به عنوان یک مرجع جامع و کاربردی انتشار یافته است تا شاید بتواند بسیاری از نیازهای فنی، محاسباتی و طراحی متخصصان نیازمند در این صنعت را برآورده و مرتفع سازد. شرکت فراکوه علاوه بر اینکه در اجرای سیستم‌های جبرانساز اصلاح ضریب توان و بهبود کیفیت توان در پروژه‌های صنعتی کشوری جایگاه ویژه‌ای داراست، با توجه به چاپ پنجمین جلد از کتب فنی نیز از فعالین تحقیقاتی در زمینه کیفیت توان شناخته میشود. نظر به اینکه تهیه مطالب در این مقیاس همواره دارای اشتباهاتی است. از این روی شرکت فراکوه با افتخار پذیرای یادآوریه‌ها و تذکرات شما در خصوص برخی اشتباهات احتمالی خواهد بود تا تلاش خود را در تصحیح آن در چاپ‌های بعدی به کار بندد.

با سپاس

شرکت فراکوه

پیش‌گفتار

اکنون که پنجمین کتاب از سری کتاب‌های فنی و تخصصی شرکت فراکوه به همت همکاران گرامی آقایان مهندس امیرحسین لرستانی و علیرضا اندرزا تهیه و در دست چاپ قرار می‌گیرد، خدا را شاکریم که توانسته‌ایم در جهت کمک به ارتقای سطح علمی برق کشور در کنار وظیفه اصلی خود نیز گامی هرچند کوچک برداریم. موضوع توان راکتیو و جبران‌سازی آن از معضلات قدیمی تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان است. در گذشته این موضوع، مطلبی غیرضروری در صنعت برق به شمار می‌آمد؛ ولی حال که ضرورت استفاده از آن به حد بالایی رسیده است و با عنایت به رشد مصرف، یکپارچگی شبکه‌ها در کشور و حتی توسعه این یکپارچگی در سطح کشورهای همجوار، افزایش جریان‌های راکتیو و به ویژه جریان‌های راکتیو حاوی هارمونیک‌ها به دلیل استفاده از تجهیزات جدید و صدها پدیده دیگر ناشی از آن‌ها، نحوه محاسبه و طراحی و کاربری جبران‌سازها موضوع مهمی برای تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان به شمار می‌آید. در این کتاب مفهوم جبران‌سازهای استاتیک و نحوه طراحی آن، محاسبات و فرمولهای لازم در حد توان، تشریح و راه‌حل‌های مربوطه جهت استفاده‌کنندگان ارائه شده است. شرکت فراکوه وظیفه خود می‌داند که از کلیه کسانی که در تهیه و تدوین و چاپ این کتاب ما را یاری نموده‌اند، تشکر و قدردانی کند. از جناب مهندس حسین شهابی برای ایده پروری و اهتمام در تولید این کتاب و از آقایان مهندس امیرحسین لرستانی و

مهندس علیرضا اندرزا برای پژوهش و نگارش آن سپاسگزاری میشود.
جای بسی امیدواری است که این کتاب پژوهشی و تلاش شرکت فراکوه
مورد استفاده متخصصان صنعت برق کشور قرار بگیرد؛ دانشجویان رشته
مهندسی برق و دانش پژوهان حرفه ای این حوزه از صنعت نیز از آن
بهره مند شوند.

با احترام؛ محمد مهدی فنائی

رییس هیئت مدیره شرکت فراکوه (سهامی خاص)

بهبود کیفیت توان و حفظ پایداری ولتاژ در سیستم‌های قدرت یکی از مهم‌ترین گام‌ها در کاهش تلفات و افزایش بهره‌وری انرژی است. جبرانسازهای استاتیک با واکنش سریع و قابلیت تنظیم لحظه‌ای ولتاژ، نقش کلیدی در بهینه‌سازی شبکه‌های فشار ضعیف و متوسط دارند و در مدت کوتاهی می‌توانند سرمایه‌گذاری انجام شده را بازگردانند. پیشرفت‌های علمی و تحقیقاتی در سال‌های اخیر، فناوری و قابلیت اطمینان جبرانسازهای استاتیک را به میزان قابل توجهی افزایش داده و نصب و بهره‌برداری از این تجهیزات را برای مهندسان و بهره‌برداران ساده‌تر کرده است.

با گسترش استفاده از منابع تغذیه غیرخطی مانند اینورترها، موتورهای الکتریکی و بارهای الکترونیکی، شبکه‌های برق با هارمونیک‌های پیچیده‌ای مواجه شده‌اند که می‌تواند عملکرد جبرانسازها را تحت تأثیر قرار دهد. از این رو، طراحی بهینه و انتخاب صحیح جبرانسازهای استاتیک نیازمند مطالعات دقیق و تحلیل‌های جامع در سطوح مختلف شبکه است تا از بروز مشکلات بعدی جلوگیری شود.

در طول حدود ۳۰ سال، متخصصان شرکت فراکوه تجربه گسترده‌ای در تحلیل و بهره‌برداری از سیستم‌های جبرانسازی جمع‌آوری کرده‌اند و مقالات متعددی در این زمینه منتشر شده است. این کتاب با هدف جمع‌بندی این تجربیات و ارائه اطلاعات کامل در زمینه طراحی، عملکرد و کاربرد جبرانسازهای استاتیک، به صورت یک مرجع یکپارچه تهیه شده است تا مهندسان و پژوهشگران بتوانند به راحتی از آن بهره‌مند شوند.

شرکت فراکوه برخورد لازم میداند حال که با همت همکاران گرامی جناب آقای مهندس امیرحسین لرستانی و جناب آقای مهندس علیرضا اندرزا این کتاب تهیه و در دست چاپ قرار می‌گیرد، ضمن قدردانی از این همکاران، از جناب آقای دکتر علی کشاورزیان پژوهشگر حاذق جهاد دانشگاهی، بابت بازنگری کتاب و از کلیه کسانی که در تهیه، تدوین و چاپ این کتاب مارا یاری نموده اند تشکر و قدردانی نماید. شرکت فراکوه امیدوار است این کتاب، مرجع جدا نشدنی متخصصان باشد.

با احترام ؛ حسین شهابی

مدیرعامل شرکت فراکوه (سهامی خاص)

این کتاب را به نوبه خود و به عنوان هدیه‌ای ناقابل به تمامی عاشقان سیستم‌های قدرت و علاقه‌مندان به یادگیری و رشد و بالندگی تقدیم می‌کنم. باشد که سبب گردد گامی هرچند کوچک در جهت اعتلای صنعت برق کشورمان برداریم.

و تقدیم به تو که همواره هستی.

امیرحسین لرستانی

این کتاب بعنوان پیشکشی کوچک به دوستان عرصه‌ی مهندسی برق تقدیم میشود. بدین امید که آموزنده، راهگشا و مثمر ثمر واقع شود.

و تقدیم به همسری مهربان و فداکار که با صبر و بردباری همواره امیدبخش زندگی‌ام بوده است.

علیرضا اندرزا

فهرست مطالب

فصل اول: لزوم جبرانسازی بار ۱۵

- ۱-۱ مقدمه ۱۵
- ۲-۱ اهداف جبرانسازی بار ۱۷
- ۳-۱ جبرانساز ایده‌آل ۲۱
- ۴-۱ ملاحظات عملی ۲۳
- ۴-۱-۱ بارهای نیازمند جبرانسازی ۲۳
- ۴-۱-۲ استانداردهای قابل قبول برای کیفیت تغذیه ۲۶
- ۴-۱-۳ مشخصات یک جبرانساز بار ۲۸

فصل دوم: اصول جبرانسازی بار ۳۱

- ۲-۱ تئوری بنیادی جبرانسازی: تصحیح ضریب توان و تنظیم ولتاژ در سیستمهای تکفاز ۳۱
- ۲-۱-۱ ضریب توان و اصلاح آن ۳۲
- ۲-۱-۲ تنظیم ولتاژ ۳۸
- ۲-۲ مشخصه تقریبی توان راکتیو ۴۵
- ۲-۲-۱ تنظیم ولتاژ بار با جبرانساز القایی متغیر ۴۵
- ۲-۲-۲ بهبود ضریب توان ۵۱
- ۲-۲-۳ بایاس کردن توان راکتیو ۵۴

۵۶.....	۳-۲ مثال کاربردی.....
۵۷.....	۳-۳-۱ جبرانسازی برای ولتاژ ثابت.....
۶۱.....	۳-۳-۲ جبرانسازی برای ضریب توان واحد.....
۶۱.....	۴-۲ جبرانسازی بار به صورت تنظیمکننده ولتاژ.....
۶۷.....	۵-۲ نتیجهگیری.....

فصل سوم: تاثیر جبرانسازی بر پایداری

۷۰.....	۳-۱-مقدمه.....
۷۱.....	۳-۲-مثال کاربردی.....

فصل چهارم: ادوات FACTS؛ جبرانسازهای استاتیک

۸۲.....	۴-۱ مرور کلی.....
۸۸.....	۴-۲ الکترونیک قدرت.....
۸۹.....	۴-۲-۱ نیمههادیها.....
۹۴.....	۴-۲-۲ مبدل‌های قدرت.....
۱۰۱.....	۴-۳ پیکربندی ادوات FACTS.....
۱۰۱.....	۴-۳-۱ دستگاههای موازی.....
۱۰۳.....	۴-۳-۱-۱ SVC.....
۱۰۶.....	۴-۳-۱-۲ STATCOM.....
۱۱۰.....	۴-۳-۲ دستگاههای سری.....
۱۱۰.....	۴-۳-۲-۱ جبرانسازی سری.....
۱۱۳.....	۴-۳-۲-۲ TCSC.....
۱۱۵.....	۳-۲-۳-۴ SSSC.....
۱۱۷.....	۴-۳-۲-۳ SCCL.....
۱۱۹.....	۴-۳-۳ دستگاههای سری - موازی.....

۱۲۰.....	۴-۳-۱ کنترل کننده دینامیک سیلان توان
۱۲۵.....	۴-۳-۲ کنترل کننده سیلان توان یکپارچه (UPFC)
۱۲۶.....	۴-۳-۳ کنترل کننده سیلان توان بین خطی
۱۲۸.....	۴-۳-۴ کنترل کننده سیلان توان جامع تعمیم یافته (GUPFC)

۱۳۱ فصل پنجم: نمونه کاربردی از یک جبران‌ساز استاتیک

۱۳۱.....	۵-۱-۱ مقدمه
۱۳۲.....	۵-۲-۱ آرایش اصلی
۱۳۵.....	۵-۳-۱ توصیف اجزای اصلی
۱۴۳.....	۵-۴-۱ سیستم کنترلی کنترلر تایریستور
۱۴۷.....	۵-۶-۱ آزمایش رفتار سیستم

۱۵۱ فصل ششم: جبران‌سازی راکتیو کوره الکتریکی

۱۵۲.....	۶-۱-۱ مقدمه
۱۵۳.....	۶-۲-۱ کوره قوس الکتریکی به عنوان یک بار الکتریکی
۱۵۳.....	۶-۲-۱-۱ کوره قوس در تولید فولاد
۱۵۴.....	۶-۲-۲-۱ نیازهای تامین برق برای کوره‌های قوس
۱۶۳.....	۶-۳-۱ فلیکر و روش‌های جبران‌سازی آن
۱۶۳.....	۶-۳-۱-۱ ماهیت مسئله سوسو زدن (فلیکر)
۱۷۳.....	۶-۳-۲-۱ روش‌های جبران‌سازی فلیکر
۱۷۸.....	۶-۳-۳-۱ انواع جبران‌ساز
۱۸۱.....	۶-۴-۱ جبران‌سازهای کنترل شونده با تایریستور
۱۸۴.....	۶-۴-۱-۱ رابطه بین جبران‌ساز توان راکتیو و زاویه آتش گیت تایریستور

۱۹۰.....	۶-۴-۲ تعیین تقاضای توان راکتیو
----------	--------------------------------

- ۶-۵-جبرانسازهای راکتور اشباع شده۱۹۳
- ۶-۵-۱- جبرانساز با راکتور تپ دار/جبرانساز با راکتور اشباع شده..۱۹۳
- ۶-۵-۲- جبرانساز راکتور خوداشباع/ جبرانساز هارمونیکي چندفاز..۱۹۷

فصل اول: لزوم جبرانسازی بار

۱-۱ مقدمه

در یک سیستم قدرت ایده‌آل، بایستی ولتاژ و فرکانس در تمامی نقاط تغذیه^۱ ثابت بوده، همچنین سیستم عاری از هارمونیک و ضریب توان نیز یک باشد. علاوه بر این، پارامترهای ذکر شده باید مستقل از اندازه و مشخصه^۲ بارهای مصرف کنندگان باشند. در یک سیستم ایده‌آل به جای اینکه بارها صرفاً برای گستره‌ی غیر قابل پیش‌بینی‌ای از تغییرات ولتاژ طراحی شوند، برای یک کارایی بهینه در ولتاژ تغذیه معین شده طراحی می‌گردند. همچنین هیچ تداخلی میان بارهای مختلف، که ناشی از تغییرات جریان‌های آن‌ها باشد وجود ندارد.

برای ملموس‌تر شدن بحث "کیفیت تغذیه"^۳، معیاری را ارائه می‌کنیم. این معیار بر حسب اینکه ولتاژ و فرکانس در نقطه تغذیه چقدر ثابت هستند و ضریب توان چقدر به ضریب توان واحد نزدیک است تعریف می‌شود. در

^۱ Supply Point

^۲ Characteristic

^۳ Quality Of Supply

سیستم‌های سه فاز، متعادل بودن ولتاژ و جریان‌های سه فاز نیز باید جزو معیار ارزیابی ذکر شده قرار گیرد. یک تعریف برای کیفیت تغذیه در بحث‌های عددی، شامل حداکثر نوسانات (تغییرات) مقدار موثر ولتاژ میانگین منبع تغذیه در یک دوره زمانی معین است. به طور ویژه وقتی این معیار با روش‌های آماری ترکیب می‌شود می‌تواند از دقت بیشتری برخوردار باشد و این کمک شایانی به تحلیل مسائلی که در آن‌ها نوسان ولتاژ با سرعت بالایی رخ می‌دهد خواهد کرد. کوره-های قوس از جمله تجهیزاتی هستند که سبب نوسان‌های سریع در ولتاژ می-شوند. در فصل‌های آینده در این باره بیشتر صحبت خواهیم کرد.

در این فصل قصد داریم که برخی از مشخصه‌های سیستم قدرت و بارهای آن را معرفی کنیم که سبب تضعیف کیفیت تغذیه خواهند شد و از این میان تمرکز خود را بر روی آن‌هایی قرار می‌دهیم که قابلیت اصلاح شدن به وسیله جبرانسازی توان راکتیو را دارند و این جبرانسازی بسته به شرایط می‌تواند به صورت تزریق و یا جذب توان راکتیو به مقدار مناسب و مورد نیاز باشد. از اینجا به بعد هروقت صحبت از جبرانسازی به میان می‌آید، مقصود جبرانسازی توان راکتیو است که به اختصار آن را جبرانسازی می‌گوییم. در بخش ۱-۴ بارهایی که نیازمند جبرانسازی هستند را معرفی می‌کنیم. مطالعه اینکه چنین بارهایی چگونه کیفیت تغذیه را کاهش می‌دهند ما را به سمت تعریف جبرانسازهای ایده‌آل^۴ می‌برد که در آینده تشریح می‌گردند.

⁴ Ideal Compensator

۲-۱ اهداف جبرانسازی بار

جبرانسازی عبارت است از مدیریت توان راکتیو به جهت افزایش کیفیت تغذیه در یک سیستم قدرت جریان متناوب. عبارت جبرانسازی بار وقتی مورد استفاده قرار می‌گیرد که هدف، مدیریت توان راکتیو یک بار و یا دسته‌ای از بارها باشد. وسیله‌ای که جبرانسازی توسط آن صورت می‌گیرد عموماً به صورت موازی با شبکه و در مکانی نزدیک به بار نصب می‌گردد. همچنین باید توجه داشت که برخی از روش‌ها و درواقع اهداف جبرانسازی بار با جبرانسازی در شبکه‌های تغذیه با ابعاد گسترده (جبرانسازی خط انتقال) متفاوت است.

در جبرانسازی بار سه هدف اصلی زیر دنبال می‌شود:

۱. تصحیح ضریب توان

۲. بهبود تنظیم ولتاژ^۵

۳. متعادل سازی بارها

باید به این نکته توجه کرد که تصحیح ضریب توان و متعادل سازی بارها بسیار مطلوب و لازم می‌باشند. حتی در شرایطی که ولتاژ بسیار مستحکم^۶ باشد. منظور از استحکام ولتاژ، ثابت بودن ولتاژ و عدم وابستگی آن به بار است. تصحیح ضریب توان عمده‌تاً به معنی آن است که به جای آنکه توان راکتیو مورد نیاز بار از منبع تغذیه‌ای که در فاصله دوری از بار قرار دارد تأمین شود، در محلی که تا حد امکان به آن نزدیک است، تولید شده و به بار تزریق گردد.

⁵ Voltage Regulation

⁶ Stiff

عمده‌ی بارهای صنعتی دارای ضریب توان پسفاز هستند و توان راکتیو جذب می‌کنند. در این بارها زاویه بردار جریان عقب‌تر از زاویه بردار ولتاژ قرار دارد. چون توان راکتیو این بارها از شبکه تامین می‌شود، به ناچار جریانی که از منبع به طرف بار می‌آید بزرگ‌تر از جریانی است که برای تأمین توان اکتیو بار مورد نیاز است. واضح است که تنها توان اکتیو قادر به انجام کار است و توان راکتیو در تبدیل انرژی نقشی ندارد. لذا بخش اضافی جریان (بخش راکتیو آن) تنها سبب اشغال ظرفیت خط انتقال و افزایش تلفات اهمی در خط انتقال خواهد شد. در نتیجه به ناچار بایستی سطح مقطع هادی‌ها و کابل‌ها را افزایش دهیم (توجه شود که در تلفات خط انتقال اندازه جریان خط مهم است و نه اکتیو یا راکتیو بودن آن). این اشغال شدن ظرفیت خط و افزایش تلفات سبب می‌شود که شرکت‌های توزیع، مصرف‌کنندگان با ضریب توان نامطلوب را جریمه کنند. درواقع همین تعرفه‌های برق و جریمه‌ها یکی از انگیزه‌های ارتقاء سیستم‌های جبرانسازی بار در گذر زمان بوده است. از دیگر معایب ضریب توان پایین آن است که ژنراتورهای شبکه را وادار به کار در ضریب توان نامطلوبی می‌کند و این خود سبب می‌شود که ژنراتورها و همچنین شبکه‌های توزیع از بازدهی پایین‌تری برخوردار بوده و تنظیم ولتاژ سخت‌تر باشد.

تنظیم ولتاژ در حضور بارهایی که تقاضای توان راکتیو آن‌ها متغیر است، به مسئله مهم و گاهی بحرانی تبدیل می‌شود. همه بارها تقاضای توان راکتیو خود را تغییر می‌دهند اگرچه دامنه و نرخ تغییر آن‌ها به طور گسترده‌ای متفاوت است. در همه موارد، تغییرات در تقاضای توان راکتیو باعث تغییر (یا تنظیم) ولتاژ در

نقطه تغذیه می‌شود که می‌تواند مانع بهره‌برداری کارآمد از کلیه وسایل متصل به آن نقطه شده و یا باعث ایجاد تداخل بین بارهای مصرف‌کنندگان مختلف شود. برای جلوگیری از این مشکل، معمولاً استانداردها، سیستم تأمین برق را ملزم می‌کند که ولتاژهای تغذیه را در محدوده‌های تعریف شده نگه دارند. این محدوده‌ها ممکن است به طور معمول $\pm 5\%$ در یک دوره چند دقیقه‌ای یا چند ساعتی متغیر باشند و یا شامل محدودیت‌های بسیار سخت‌تری برای محدود کردن آن بارهای بزرگی که به سرعت تغییر می‌کنند و می‌توانند افت ولتاژ خطرناکی برای تجهیزات حفاظتی ایجاد کنند باشد. این افت ولتاژهای سریع می‌تواند منجر به سوسو زدن (فلیکر) هایی که چشم را اذیت می‌کند شود. دستگاه‌های جبرانساز نقش حیاتی در نگه داشتن ولتاژهای تغذیه در محدوده‌های مورد نظر دارند.

بدیهی‌ترین راه برای بهبود تنظیم ولتاژ این است که سیستم قدرت را با افزایش اندازه و تعداد واحدهای تولیدی و متراکم‌تر کردن شبکه "تقویت" کنیم. این رویکرد به طور کلی غیراقتصادی است و مشکلاتی مرتبط با سطح اتصال کوتاه‌های بالا و لزوم افزایش سائز کلیدهای قدرت را به بار می‌آورد. بسیار عملی‌تر و اقتصادی‌تر است که سیستم قدرت را براساس حداکثر تقاضای توان حقیقی طراحی کنیم و توان راکتیو را توسط جبرانسازها و تجهیزات دیگر مدیریت کنیم که می‌توانند با انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به واحدهای تولیدی به کار گرفته شوند و نقشی در افزایش سطوح اتصال کوتاه ندارند.

سومین مسئله اصلی در جبران بار، توازن بار است. اکثر سیستم‌های جریان متناوب سه فاز هستند و برای بهره‌برداری متوازن طراحی شده‌اند. بهره‌برداری نامتوازن باعث ایجاد مولفه‌های جریان در توالی فاز اشتباه (یعنی مولفه‌های توالی منفی و صفر) می‌شود. این مولفه‌ها می‌توانند اثرات نامطلوبی داشته باشند، از جمله تلفات اضافی در موتورها و واحدهای تولیدی، گشتاور نوسانی در ماشین‌های ac، افزایش ریپل در یکسوکننده‌ها، اختلال در عملکرد چند نوع از تجهیزات، اشباع ترانسفورماتورها و جریان‌های نوترال بیش از حد. انواع خاصی از تجهیزات (شامل چند نوع از جبرانسازها) به بهره‌برداری متوازن برای از بین بردن هارمونیک‌های مضرب سه می‌پردازند. در شرایط نامتوازن، این هارمونیک‌ها در سیستم قدرت ظاهر می‌شوند.

محتوای هارمونیک در شکل موج تغذیه، پارامتر مهمی در کیفیت تغذیه است، اما این مسئله به دلیل اینکه طیف نوسانات کاملاً بالاتر از فرکانس پایه (۵۰ هرتز) است، خاص می‌شود. هارمونیک‌ها معمولاً توسط فیلترها حذف می‌شوند که اصول طراحی این فیلترها با جبرانسازهای مطرح شده در این فصل و فصل آینده متفاوت است. با این حال، مشکلات هارمونیکی اغلب همراه با مشکلات جبرانسازی به وجود می‌آیند و اغلب به هارمونیک‌ها و فیلتر کردن آن‌ها اشاره می‌گردد. علاوه بر این، بسیاری از انواع جبرانسازها به طور ذاتی هارمونیک‌هایی تولید می‌کنند که باید به طور داخلی یا خارجی فیلتر گردند.

۳-۱ جبران‌ساز ایده‌آل

پس از تشریح اهداف اصلی در جبرانسازی بار، حال نوبت آن است که جبران‌سازهای ایده‌آل را معرفی کنیم. این جبران‌ساز تجهیزاتی است که می‌تواند به نقطه تغذیه (به صورت موازی با بار) متصل شود و سه وظیفه اصلی زیر را انجام دهد:

۱. تصحیح ضریب توان به ضریب توان واحد

۲. حذف (یا کاهش تا سطح قابل قبول) تنظیم ولتاژ

۳. متعادل‌سازی جریان‌های بار یا ولتاژهای فاز

نباید انتظار داشت که جبران‌ساز ایده‌آل بتواند اعوجاج هارمونیک موجود در جریان بار یا ولتاژ تغذیه را حذف کند (این وظیفه به فیلترهای هارمونیک مناسب اختصاص داده شده است)؛ اما جبران‌ساز ایده‌آل خود نباید هیچ هارمونیک اضافی تولید کند. ویژگی دیگر جبران‌ساز ایده‌آل توانایی پاسخ‌دهی فوری در انجام سه وظیفه اصلی آن است. مشخصاً، مفهوم پاسخ‌دهی فوری نیازمند تعریف ضریب توان لحظه‌ای و عدم تعادل فاز لحظه‌ای است. جبران‌ساز ایده‌آل همچنین نباید هیچ توان اکتیو متوسطی مصرف کند؛ یعنی، بایستی بدون اتلاف باشد.

سه وظیفه اصلی جبران‌ساز ایده‌آل به یکدیگر وابسته هستند. به طور خاص، تصحیح ضریب توان و متعادل‌سازی بار به بهبود تنظیم ولتاژ کمک می‌کنند. در واقع، در برخی موارد، به‌ویژه آنجا که نوسانات بار کند یا نادر هستند، جبران‌ساز

طراحی شده برای اصلاح ضریب توان یا متعادل سازی بار نیازی به عملکرد خاصی برای تنظیم ولتاژی ندارد. جبران ساز ایده آل را می توان به طور دقیق تر با بیان این نکته مشخص کرد که باید توانایی انجام این سه عمل را داشته باشد:

۱. فراهم کردن یک مقدار قابل کنترل و متغیر توان راکتیو دقیقاً مطابق با نیازهای بار و بدون تأخیر
۲. ارائه یک مشخصه ولتاژ ثابت در ترمینال های خود
۳. توانایی عملکرد مستقل در هر سه فاز

مسئولیت انجام جبرانسازی، بین تأمین کننده و مصرف کننده تقسیم می شود و این تقسیم بندی به چندین عامل بستگی دارد که شامل اندازه و نوع بار، هر گونه توسعه احتمالی در آینده برای آن، استانداردهای بین المللی، رویه های محلی، و میزان تأثیرگذاری بر دیگر مصرف کنندگان است. اغلب اینطور است که مصرف کننده مسئولیت اصلاح ضریب توان و متعادل سازی جریان های بار را بر عهده می گیرد؛ در واقع، اکثر تعرفه های تأمین برق، مصرف کنندگان را ملزم به انجام این کار می کنند. تنظیم ولتاژ، از سوی دیگر، بیشتر به عهده ی تأمین کننده برق است.

۱-۴ ملاحظات عملی

۱-۴-۱ بارهای نیازمند جبرانسازی

این که آیا یک بار معین نیاز به اصلاح ضریب توان در حالت پایدار دارد یا نه، یک سوال اقتصادی است که پاسخ آن به چندین عامل بستگی دارد، از جمله تعرفه تأمین برق، اندازه بار، و ضریب توان جبران نشده آن. معمولاً برای بارهای صنعتی بزرگ، اصلاح ضریب توان وقتی اقتصادی است که ضریب توان جبران نشده کمتر از ۰٫۸ باشد.

بارهایی که باعث نوسان در ولتاژ تغذیه می‌شوند، ممکن است نیاز به جبرانسازی برای ضریب توان و همچنین برای تنظیم ولتاژ داشته باشند. میزان تغییر ولتاژ در "نقطه اندازه‌گیری" یا "نقطه اتصال مشترک" (PCC) ارزیابی می‌شود که معمولاً نقطه‌ای در شبکه است که در آن حوزه‌های مسئولیت مشتری و تأمین‌کننده به هم می‌رسند؛ برای مثال، سمت فشار قوی ترانسفورماتور توزیع که تأمین‌کننده‌ی کارخانه‌ی خاصی است.

از جمله بارهای نیازمند جبرانسازی می‌توان به کوره‌های قوس الکتریکی، کوره‌های القایی، دستگاه‌های جوش القایی، دستگاه‌های نورد فولاد، سیم‌پیچی‌های معدنی، موتورهای با توان بزرگ (به‌ویژه آن‌هایی که به‌طور مکرر روشن و خاموش می‌شوند)، حفاری‌های باز معدنی، تجهیزات چوب بری، و

آزمایش‌های فیزیک با انرژی بالا (مثل سینکروترون‌ها) که نیاز به منابع تغذیه‌ای با توان بالای پالسی دارند، اشاره کرد. این بارها را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: آن‌هایی که ذاتاً غیرخطی هستند و آن‌هایی که با روشن و خاموش شدن خود باعث اختلال می‌شوند. بارهای غیرخطی معمولاً باعث تولید هارمونیک‌های فرکانس بالا و نوسانات در فرکانس پایه می‌شوند. برای مثال کوره‌های قوس الکتریکی، معمولاً شامل مقدار بالایی هارمونیک هستند و معمولاً فیلترهایی برای آن‌ها قرار می‌دهند که هارمونیک‌های ۳ و ۵ و ۷ و همین‌طور ۲ و ۴ و ۱۱ و ۱۳ آن‌ها را فیلتر کند.

در صورتی که بخشی از موتورهای به کار رفته در محل صنعتی مورد نظر از نوع سنکرون (و نه آسنکرون) باشد، جبران‌سازی ضریب توان و تنظیم ولتاژ مقداری بهبود پیدا می‌کنند، زیرا موتور سنکرون قادر به تولید یا مصرف مقداری توان راکتیو به صورت کنترل پذیر می‌باشد. با چرخش این جرم دوار، موتور سنکرون همواره انرژی جنبشی ذخیره می‌کند که به جبران افزایش ناگهانی بار کمک می‌کند. همچنین در بسیاری از موارد، می‌توان به وسیله راه‌اندازهای نرم از افت ولتاژهای ناشی شده از راه‌اندازی موتورهای جلوگیری کرد. این راه-اندازهای نرم از طریق یک ترانسفورماتور قابل تنظیم و یا یک درایو الکترونیکی سبب راه‌اندازی موتور به شکل تدریجی می‌شوند.

روند رشد یافته استفاده از درایوهای بزرگ جریان مستقیم (DC) که در حالت "روشن-خاموش" به کار می‌روند، استفاده از کنترل‌های بر پایه ترستور است که این مسئله خود باعث تشدید مشکل جبران‌سازی می‌شود. دلیل آن این است که این روش کنترل، هارمونیک تولید می‌کند. همچنین این مبدل‌ها برای

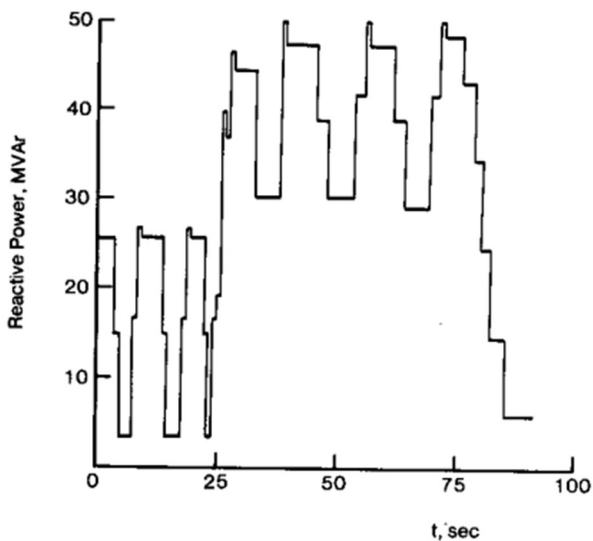
کمو تاسیون به توان راکتیو نیاز دارند و هیچگونه اینرسی چرخشی ندارند. شکل ۱-۱ نوع معمول تغییرات در نیاز به توان راکتیو در یک کارخانه نورد فولاد را نشان می‌دهد. نه تنها تغییرات توان راکتیو زیاد (حدود 50 MVar) است، بلکه این تغییرات ناگهانی هستند، بنابراین جبران‌کننده باید بتواند به سرعت واکنش نشان دهد.

برای به دست آوردن یک ایده اولیه از نیاز بار به جبران‌سازی، می‌توان بار را بر اساس سرفصل‌های زیر دسته بندی کرد:

۱. نوع درایو (جریان مستقیم یا جریان متناوب؛ تغذیه‌شده با ترستور یا ترانسفورماتور).
۲. چرخه وظیفه^۹ از نظر نیازهای توان اکتیو و راکتیو (مثلاً، شکل ۱-۱).
۳. نرخ تغییر توان اکتیو و راکتیو (یا زمانی که برای تغییر توان اکتیو یا راکتیو از حداکثر به حداقل نیاز است).
۴. تولید هارمونیک‌ها (بارهای مولد هارمونیک دارای برخی هارمونیک‌های ذاتی هستند که به آن هارمونیک مشخصه گویند).

⁹ Duty Cycle

۵. همزمانی نیازهای حداکثر توان اکتیو و راکتیو در کارخانه‌های چند باری.



شکل ۱-۱: نمونه تغییرات توان راکتیو یک دستگاه نورد فولاد

۱-۴-۲ استانداردهای قابل قبول برای کیفیت تغذیه

اولین اثر نامطلوب تغییرات ولتاژ تغذیه در سیستم توزیع، اختلال در سطح روشنایی تولید شده توسط لامپ‌های روشنایی است. میزان پذیرش تغییرات نه تنها به شدت تغییر نور بلکه به فرکانس یا نرخ تغییر آن نیز بستگی دارد، زیرا حساسیت سیستم بینایی انسان نیز به این تغییرات وابسته است. تغییرات بسیار آهسته تا ۳٪ ممکن است تحمل‌پذیر باشد، در حالی که تغییرات سریع ناشی از

کوره‌های قوس یا دستگاه‌های جوشکاری ممکن است با بیشترین حساسیت بصری (بین ۱ تا ۲۵ هرتز) همزمان شده و باید از نظر شدت به ۰,۲۵٪ یا کمتر محدود شود.

انواع دیگری از بارها نیز به تغییرات ولتاژ حساس هستند. به ویژه رایانه‌ها، برخی از انواع رله‌ها که در طرح‌های کنترلی و حفاظتی استفاده می‌شوند، موتورهای القایی و لامپ‌های تخلیه و فلورسنت.

بسیاری اوقات، تغییرات ولتاژ در منبع تغذیه به عملکرد بار که باعث این تغییرات می‌شود، آسیب می‌رساند. بنابراین، جبرانسازی می‌تواند به منظور بهبود این عملکرد اعمال شود و همچنین به نفع سایر مصرف‌کنندگان باشد.

جدول ۱-۱ نمونه‌ای از انواع استانداردهایی است که ممکن است برای عملکرد یک سیستم با بار مزاحم تجویز شود. در مورد دستگاه جوشکاری، تغییرات ولتاژ مجاز با حساسیت سیستم بینایی انسان به نوسانات نور به عنوان تابعی از فرکانس، نسبت معکوس دارد.

جدول ۱-۱: استانداردهای نوسان ولتاژ

نوع بار	حد مجاز برای تغییرات ولتاژ
راه اندازی موتورهای بزرگ	۱-۳٪ بر حسب فرکانس
دستگاه‌های حفاری معدن	۱-۳٪ در ولتاژهای توزیع
کارخانه‌های نورد فولاد	۰,۵-۱,۵٪ در ولتاژهای انتقال
محرکه‌های dc تغذیه با تریستور	
دستگاه‌های جوش	۲-۰,۲۵٪ بر حسب فرکانس
کوره القایی	تا ۱٪ بسته به زمان بین روشن کردن

فصل ۶	کوره الکتریکی
-------	---------------

۱-۴-۳ مشخصات یک جبرانساز بار

پارامترها و عواملی که باید در تعیین مشخصات یک جبرانساز بار در نظر گرفته شوند، به شرح زیر است. این فهرست کامل نیست، اما می‌تواند ایده‌ای از ملاحظات عملی مهم را ارائه دهد:

۱. حداکثر توان راکتیو پیوسته مورد نیاز که باید تامین شود،
۲. مقدارنامی اضافه بار و مدت آن،
۳. ولتاژهای اسمی و محدوده‌های ولتاژی که توان‌های راکتیو نباید از آن تجاوز کنند،
۴. فرکانس و تغییرات آن،
۵. دقت مورد نیاز در تنظیم ولتاژ،
۶. زمان لازم برای پاسخ‌دهی جبرانساز به یک اختلال مشخص،
۷. نیازمندی‌های کنترل ویژه،
۸. ترتیبات حفاظتی برای جبرانساز و هماهنگی با دیگر سیستم‌های حفاظتی با در نظر گرفتن محدودیت‌های توان راکتیو در صورت لزوم،
۹. حداکثر میزان اعوجاج هارمونیک با جبرانساز در حال سروی،.
۱۰. روش‌ها و احتیاط‌های لازم برای برق‌دار کردن جبرانساز،
۱۱. نیازهای نگهداری و قطعات یدکی؛ پیش‌بینی برای گسترش یا بازآرایی آتی نیروگاه،

۱۲. عوامل محیطی: عوامل محیطی مانند سطح نويز، نصب داخلی یا خارجی، دما، رطوبت، آلودگی، باد و عوامل لرزه‌ای؛ نشتی از ترانسفورماتورها، خازن‌ها، و سیستم‌های خنک‌کننده،
۱۳. عملکرد جبرانساز با ولتاژهای تغذیه نامتعادل و یا با بار نامتعادل،
۱۴. نیازهای کابل‌کشی و چیدمان آن؛ دسترسی، محفظه، زمین‌کردن و...
۱۵. اطمینان از عملکرد قطعات و داشتن قطعات پشتیبان.

در مورد جبرانسازی کوره قوس، "نسبت بهبود" یا "نسبت کاهش نوسانات (فلیکر)" ممکن است به عنوان یکی از معیارهای اصلی عملکرد جبرانساز مشخص شود.

فصل دوم: اصول جبرانسازی بار

اولین هدف از بیان تئوری جبران، توضیح روابط بین سیستم تغذیه، بار و جبران‌ساز است. در بخش ۱-۱-۲ با اصول تصحیح ضریب توان آغاز می‌کنیم، که در ساده‌ترین شکل خود می‌تواند بدون اشاره به سیستم تامین (تغذیه) مطالعه شود. در بخش‌های بعدی، تنظیم ولتاژ را بررسی کرده و یک مفهوم کمی از جبران‌کننده ایده‌آل را ایجاد می‌کنیم.

۱-۲ تئوری بنیادی جبرانسازی: تصحیح ضریب توان و تنظیم ولتاژ در سیستم‌های تکفاز

سیستم تغذیه، بار، و جبران‌ساز می‌توانند به روش‌های مختلفی شناسایی یا مدل‌سازی شوند. بنابراین، سیستم تغذیه می‌تواند به صورت یک مدار معادل تونن با یک ولتاژ مدار باز و یک امپدانس سری و جریان آن و یا نیازهای توان حقیقی و راکتیو (یا ضریب توان) مدل‌سازی شود. جبران‌ساز می‌تواند به صورت یک امپدانس متغیر، یا به صورت یک منبع جریان راکتیو متغیر، یا

به صورت یک منبع (یا مصرف کننده) توان راکتیو مدل سازی شود. انتخاب مدل مورد استفاده برای هر عنصر می تواند بر اساس نیازها متفاوت باشد و در بخش های بعدی مدل ها به روش های مختلف ترکیب خواهند شد تا بینش فیزیکی بیشتری به دست آید و همچنین معادلاتی با کاربرد عملی تدوین شود. مدل های مختلف برای هر عنصر اساساً معادل هم هستند و می توانند به یکدیگر تبدیل شوند.

تئوری جبران برای شرایط پایدار یا تقریباً پایدار تدوین شده است، که دلالت بر این دارد که بارها و مشخصات سیستم به اندازه کافی آرام هستند تا بتوان فرض کرد که ثابت می باشند. این به آن معناست که میتوان معادلات را در فضای فازوری دنبال کرد. در اکثر موارد عملی، تقریب های ساده سازی شده برای تعیین ویژگی های جبران ساز کافی هستند. گفتنی است که ممکن است برای بارهایی که تغییرات سریع دارند (نظیر کوره های القایی یا کوره های قوس)، تجزیه و تحلیل پیچیده تری نیاز باشد.

۱-۱-۲ ضریب توان و اصلاح آن

شکل ۱-۲ الف یک بار تکفاز با ادمیتانس $Y_l = G_l + jB_l$ را نشان می دهد که در ولتاژ V تغذیه می شود. جریان بار عبارت است از:

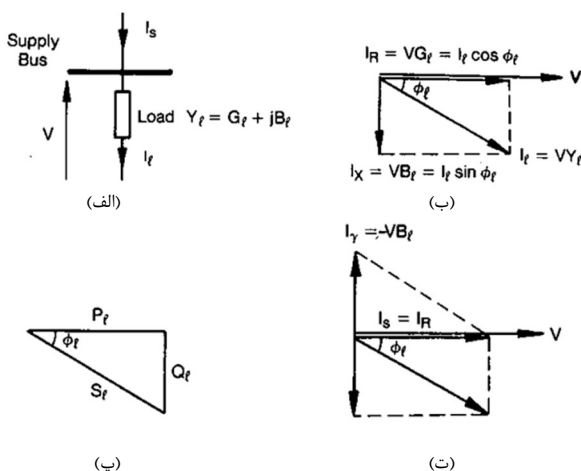
$$I_l = V(G_l + jB_l) = VG_l + jVB_l = I_R + jI_X \quad (۱)$$

I و V هر دو فازور هستند و همانگونه که مشخص است، معادله (۱) در حوزه فازور نوشته شده است. دیاگرام برداری این معادله در شکل ۱-۲-

ب کشیده شده است. در این شکل بردار V به عنوان فاز مبنا انتخاب شده است. جریان بار یک مؤلفه مقاومتی دارد که همفاز با بردار V بوده و آن را I_R گوییم. این جریان همچنین یک مؤلفه راکتیو دارد که عمود بر بردار V است و آن را I_X میگوییم. در مثال نشان داده شده، I_X منفی بوده و I_l پسفاز و این بار اندوکتیو است. عمده بارهای موجود در سیستم قدرت از این نوع هستند. زاویه میان V و I_l برابر ϕ بوده و توان ظاهری عبارت است از:

$$S_l = VI_l^* = V^2 G_l - jV^2 B_l = P_l + jQ_l \quad (۲)$$

توجه: باید توجه کرد که P_l ، Q_l و S_l فازور نیستند.



شکل ۲-۱ الف الی ت: اصلاح ضریب توان

توان ظاهری دارای یک مؤلفه حقیقی P_l (یعنی توانی که به طور مؤثر به گرما، کار مکانیکی، نور یا سایر اشکال انرژی تبدیل می‌شود) و یک

مؤلفه راکتیو Q_l است. (توان راکتیو نمی‌تواند به اشکال مفید انرژی تبدیل شود اما وجود آن به هر حال یک نیاز ذاتی برای بار است. در حقیقت قانون پایستگی انرژی ایجاب می‌کند که چنین توانی نیز وجود داشته باشد گرچه امکان تبدیل آن به انرژی مفید را نداشته باشیم!). به عنوان مثال، در یک موتور القایی، Q_l نشان‌دهنده توان مغناطیسی‌سازی است. رابطه بین S_l ، P_l و Q_l در شکل ۲-۱ پ نشان داده شده است. برای بارهای پس‌ساز (القایی) بر اساس قراردادی که بین مهندسين برق برقرار است، B_l منفی و Q_l مثبت است.

جریان $I_s = I_l$ که توسط منبع تغذیه تامین می‌شود، بزرگ‌تر از مقداری است که برای تأمین توان حقیقی (اکتیو) بار لازم است، که این امر به علت وجود فاکتور زیر است:

$$I_l/I_R = 1/\cos \varphi_l \quad (۳)$$

اینجا، $\cos \varphi_l$ ضریب توان است. دلیل نام‌گذاری ضریب عبارت است از:

$$\cos \varphi_l = P_l/S_l \quad (۴)$$

یعنی $\cos \varphi_l$ آن بخشی از توان ظاهری است که می‌تواند به طور مؤثر به اشکال دیگر انرژی تبدیل شود.

تلفات اهمی در کابل‌های تغذیه با فاکتور $\frac{1}{\cos^2 \varphi_l}$ افزایش می‌یابد. در نتیجه سائز کابل‌ها باید به طور متناسب افزایش یابد، و هزینه این تلفات

باید توسط مصرف کننده پرداخت شود. این ها بخشی از معایب ضریب توان پایین است.

جبران سازی توان راکتیو برای بار بر مبنای یک اصل اساسی بنا نهاده شده است و آن این است که توان راکتیو مورد نیاز بار در محل مصرف آن تامین شود. تامین این توان مورد نیاز بار می تواند به وسیله موازی شدن بار با یک جبران ساز که یک ادمیتانس راکتیو خالص $(-jB_l)$ است انجام شود. این جبران ساز نوعی جبران ساز ایده آل است. در این حالت جریانی که توسط منبع تغذیه تامین می شود بین ترکیب نصب شده ی بار و جبران ساز ایده آل پخش می گردد. این جریان را می توان به صورت زیر نوشت:

$$I_S = I_l + I_y$$

$$I_S = V(G_l + jB_l) - V(jB_l) = VG_l = I_R \quad (5)$$

این جریان با V هم فاز است و باعث می شود که ضریب توان کلی واحد شود. شکل ۱-۲ روابط فازورها را نشان می دهد. جریان تأمین کننده I_S اکنون کوچک ترین مقدار ممکن برای تأمین کل توان حقیقی P_l در ولتاژ V را دارد، و همه توان راکتیو مورد نیاز برای تامین بار توسط جبران ساز تأمین می شود. لذا می توان گفت بار به طور کامل جبران شده است. همچنین سیستم تغذیه که از نیازهای راکتیو بار رها شده است، اکنون ظرفیت اضافی برای تأمین بارهای دیگر دارد.

جریان جبران کننده توسط رابطه (۶) تعیین می گردد:

$$I_y = VY_y = -jVB_l \quad (6)$$

توان ظاهری مبادله شده با منبع تغذیه عبارت است از:

$$S_y = P_y + jQ_y$$

$$\begin{aligned} S_y &= VI_y^* \\ &= jV^2 B_l \end{aligned} \quad (۷)$$

لذا می‌توان نتیجه‌گیری کرد که توان اکتیو در یک جبرانساز ایده‌آل برابر صفر بوده و توان راکتیو یک جبرانساز ایده‌آل قرینه توان راکتیو مصرفی در بار است ($Q_y = V^2 B_l = -Q_l$). پس یک جبرانساز ایده‌آل نیازی به توان مکانیکی ورودی ندارد و چون عمده بارهای موجود در شبکه پسفاز هستند، جبرانساز ایده‌آل اغلب ماهیت پیشفاز دارد.

از شکل ۲-۱ پ می‌توان مشاهده کرد که برای جبرانسازی کامل نیازمند توان راکتیو هستیم و مقدار این نیازمندی با اندازه توان اکتیو ارتباط مستقیم دارد. رابطه (۸) بیانگر ارتباط میان توان راکتیو مورد نیاز برای جبرانسازی و توان اکتیو مصرفی بار است.

$$|Q_l| = P_l \tan \varphi = |Q_y| \quad (۸)$$

این توان راکتیو به وسیله رابطه زیر با توان ظاهری ارتباط پیدا می‌کند:

$$Q_y = -S_l \sin \varphi = -P_l \frac{\sqrt{1-\cos^2 \varphi}}{\cos \varphi} = -S_l \sqrt{1-\cos^2 \varphi} \quad (۹)$$

جدول ۱-۲ مقدار توان راکتیو مورد نیاز برای جبرانسازی را به ازای ضریب توان‌های متفاوت نمایش می‌دهد. مقادیر توان راکتیو بر حسب S_l (بار نامی) پیرونیت شده‌اند. جریان نامی جبرانساز از رابطه Q_l/V بدست می‌آید که این جریان از لحاظ اندازه برابر با بخش موهومی جریان بار و از لحاظ فاز، قرینه آن است.

گاهی ممکن است جبرانسازی کامل (رساندن ضریب توان به یک) صورت نگیرد و تنها بتوانیم مقداری ضریب توان را بهتر کنیم. به این حالت جبرانسازی جزئی^۱ گوییم. در جبرانسازی جزئی توان راکتیو جبران‌ساز کوچکتر از توان راکتیو بار و در نتیجه ادمیتانس جبران‌ساز نیز کوچکتر از ادمیتانس بار است ($|B_L| < |B_Y|$ و $|Q_Y| < |Q_L|$). مقدار جبرانسازی در یک مصالحه اقتصادی میان هزینه‌های ناشی از جبرانسازی (که بستگی به مقدار توان راکتیو نامی دارد) و هزینه‌های مربوط به تامین توان راکتیو از منبع تغذیه در یک دوره زمانی مشخص تعیین می‌گردد.

توان راکتیو جبران‌ساز (پریونیت شده بر حسب توان ظاهری)	ضریب توان بار $\cos\phi_L$
0	1.0
0.312	0.95
0.436	0.90
0.600	0.80
0.800	0.60
0.917	0.40
1	0

جدول ۲-۱ توان راکتیو مورد نیاز برای جبرانسازی کامل به ازای ضریب توان‌های مختلف

جبرانسازی که تاکنون توسعه داده شده، یک ادمیتانس (یا سوسپتانس) ثابت است که قادر به دنبال کردن تغییرات نیازمندی‌های توان راکتیو بار

^۱Partial Compensation

نمی‌باشد. در عمل، جبرانساز مانند یک بانک خازن (یا راکتور) می‌تواند به بخش‌های موازی تقسیم شود که هر کدام جداگانه سوئیچ می‌شوند، به طوری که تغییرات گسسته در توان راکتیو جبرانی می‌تواند بر اساس نیازهای بار انجام شود. جبرانسازهای پیچیده‌تر (مانند جبران‌کننده‌های استاتیک) قادر به تغییر پیوسته توان راکتیو خود هستند. ما این موارد را در فصل‌های بعد بررسی خواهیم کرد.

تحلیل فوق تأثیر تغییرات ولتاژ تغذیه بر کارایی جبرانساز در حفظ ضریب توان واحد را در نظر نگرفته است. به طور کلی، توان راکتیو یک جبرانساز با راکتانس ثابت، همگام با توان راکتیو بار تغییر نخواهد کرد و با تغییر ولتاژ تغذیه، یک "خطای جبران" رخ خواهد داد. در بخش بعدی، اثرات تغییرات ولتاژ بررسی می‌شود و خواهیم دید که جبران‌کننده ایده‌آل باید چه ویژگی‌های اضافی داشته باشد تا به طور رضایت‌بخش عمل کند. آن هم در زمانی که هم پارامترهای بار و هم سیستم تغذیه می‌توانند تغییر کنند. همچنین می‌بینیم که بهبود ضریب توان خود به خود منجر به بهبود تنظیم ولتاژ می‌شود.

۲-۱-۲ تنظیم ولتاژ

ما این بخش را با تعیین تنظیم ولتاژی که بدون جبرانساز به دست می‌آید آغاز می‌کنیم و مهم‌ترین پارامترهای بار و سیستم تأمین را شناسایی می‌کنیم. سپس مفهوم یک جبران‌کننده ایده‌آل را معرفی می‌کنیم که ولتاژ نقطه تغذیه را با ثابت نگه داشتن توان راکتیو سیستم تغذیه، تقریباً ثابت نگه می‌دارد.

ویژگی‌های جبران‌کننده هم به صورت گرافیکی و هم به صورت ریاضی ارائه خواهند شد.

تنظیم ولتاژ می‌تواند به عنوان تغییر نسبی (یا پریونیت) در اندازه ولتاژ تغذیه که با تغییر معین در جریان بار مرتبط است تعریف شود (مثلاً از بی باری تا بار کامل). این ناشی از افت ولتاژ در امپدانس تغذیه است که جریان بار را تحمل می‌کند. اگر سیستم تغذیه با مدار معادل تک‌فاز تونن نشان داده شود (شکل ۲-۲-a)، تنظیم ولتاژ با رابطه $\frac{|E|-|V|}{|V|} = \frac{|E|-V}{V}$ معین می‌شود که در آن V فازور مرجع است.

در غیاب جبرانساز، ولتاژ تغذیه بخاطر شارش یافتن جریان I_l تغییر می‌کند. این تغییر در رابطه (۱۰) و در شکل ۲-۲-b نشان داده شده است.

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

از طرفی می‌دانیم که $Z_S = R_S + jX_S$ و همچنین از رابطه (۲) خواهیم داشت:

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

پس میتوان گفت:

$$\left. \begin{aligned} I_s = I_l \Rightarrow \Delta V &= I_l(R_S + jX_S) \\ S_l = V \cdot I_l^* \xrightarrow{V \angle 0} S^* &= V \cdot I_l \Rightarrow I_l = \frac{P_l - jQ_l}{V} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \Delta V = (R_S + jX_S) \cdot \frac{P_l - jQ_l}{V}$$

$$\Delta V = \underbrace{\frac{R_S P_l + X_S Q_l}{V}}_{\Delta V_R} + j \underbrace{\frac{X_S P_l - R_S Q_l}{V}}_{\Delta V_X} \quad (12)$$

تغییرات ولتاژ یک مولفه هم‌فاز با V به نام ΔV_R و یک مولفه عمود بر V به نام ΔV_X دارد. این دو مولفه در شکل ۲-۲-b نمایش داده شده‌اند.

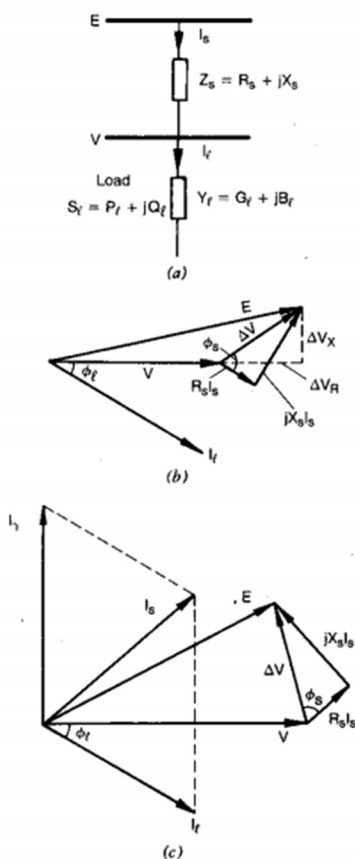
واضح است که هم تغییرات اندازه ولتاژ و هم تغییرات فاز V نسبت به ولتاژ تغذیه E ، تابعی است از اندازه و فاز جریان بار. به بیان دیگر تغییرات ولتاژ هم به توان اکتیو و هم به توان راکتیو بار وابسته می‌باشد.

با اضافه کردن یک جبرانساز به صورت موازی با بار می‌توان حالتی ایجاد کرد که در آن $|E| = |V|$ باشد. یعنی می‌توان تنظیم ولتاژ را به صفر رساند و با وجود تغذیه بار، اندازه ولتاژ ثابت و برابر E نگاه داشته می‌شود. این حالت در شکل ۲-۲-۵ برای یک جبرانساز راکتیو خالص نشان داده شده است. توان راکتیو Q_L در رابطه (۱۲) باید با مقدار $Q_S = Q_Y + Q_L$ جایگزین شود که در آن Q_Y توان راکتیو تزریق شده توسط جبرانساز است و این توان به گونه‌ای است که فازور ΔV را به گونه‌ای بچرخاند که $|E| = |V|$ شود. از رابطه (۱۰) و (۱۲) داریم:

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

مقدار مورد نیاز توان راکتیو Q_Y از طریق حل کردن رابطه مربوط به Q_S به ازای $|E| = |V|$ به دست می‌آید. برای این منظور پس از محاسبه Q_S از رابطه $Q_Y = Q_S - Q_L$ استفاده می‌کنیم. در یک جبرانساز واقعی که در مد بهره‌برداری تنظیم ولتاژ باشد، مقدار توان راکتیو مورد نیاز به طور اتوماتیک و به واسطه یک حلقه کنترلی تعیین می‌گردد. نکته مهم این است که همواره و برای هر مقداری از توان اکتیو، میتوان مقدار توان راکتیوی را تعیین کرد که در آن تثبیت ولتاژ صورت پذیرد. این نکته مارا به نتیجه مهم زیر می‌رساند:

"یک جبرانساز راکتیو خالص قادر خواهد بود که تغییرات ولتاژ تغذیه را که ناشی از توان اکتیو و راکتیو بار است از بین ببرد."



شکل ۲-۲: **a**: مدار معادل بار و سیستم تغذیه ؛ **b**: دیاگرام برداری بخش الف (جبران نشده) ؛ **c**: دیاگرام برداری بخش الف (جبران شده برای ولتاژ ثابت).

اگر توان راکتیو جبرانساز بتواند به طور پیوسته و در یک محدوده کافی (به طور کلی در هر دو جهت پیشفاز و پسفاز) و با نرخ مناسب کنترل شود،

در این حالت جبرانساز می‌تواند به عنوان یک تنظیم کننده ولتاژ ایده‌آل عمل نماید. البته باید توجه داشت که تنها اندازه ولتاژ قابل کنترل است و فاز آن با جریان بار به‌طور پیوسته تغییر می‌کند.

این اصل از دیدگاه دیگری نیز قابل بررسی است؛ ما قبلاً در بخش ۲-۱ دیدیم که چگونه جبرانساز می‌تواند توان راکتیو تامین شده توسط سیستم را به صفر کاهش دهد. یعنی به جای اینکه یک تنظیم کننده ولتاژ باشد، به صورت تصحیح کننده ضریب توان عمل کند. اگر جبرانساز طوری طراحی شده باشد که این عمل را انجام دهد، می‌توانیم Q_L را در رابطه (۱۲) با $Q_S = Q_L + Q_Y$ که مقدارش صفر است جایگزین کنیم. آنگاه فازور تغییرات ولتاژ برابر خواهد بود با:

$$\Delta V = \frac{R_S P_L}{V} + j \frac{X_S P_L}{V} = \frac{P_L (R_S + jX_S)}{V} \quad (14)$$

که این تغییرات ولتاژ مستقل از توان راکتیو است و لذا خارج از کنترل جبرانساز می‌باشد. میتوان نتیجه گرفت:

" جبرانساز خالص راکتیو نمی‌تواند به طور همزمان هم ولتاژ را ثابت نگه دارد و هم ضریب توان را تا مقدار واحد اصلاح کند."

تنها استثنا برای این قاعده زمانی خواهد بود که توان حقیقی نیز صفر باشد، یعنی $P_L = 0$ که این حالت از نظر عملی مورد توجه نیست. توجه به این اصل که به ضریب توان لحظه‌ای اشاره دارد حائز اهمیت است: یک جبرانساز خالص راکتیو می‌تواند ولتاژ را تثبیت و ضریب توان میانگین را در مقدار واحد حفظ کند. (بخش ۲-۲)

فرمول تقریبی برای تنظیم ولتاژ: عبارت‌های ΔV_R و ΔV_X در رابطه (۱۲)، گاهی به صورت مفیدتری و به شکلی که در ادامه خواهیم دید بیان می‌شود. اگر سیستم در باس بار تغذیه کننده بار مورد نظر اتصال کوتاه گردد، توان ظاهری اتصال کوتاه عبارت خواهد بود از:

$$S_{sc} = P_{sc} + jQ_{sc} = EI_{sc}^* = \frac{E^2}{Z_{sc}^*} \quad (۱۵)$$

که در آن $Z_{sc} = R_S + jX_S$ امپدانس اتصال کوتاه و I_{sc} جریان اتصال کوتاه است. همچنین میدانیم که $|Z_{sc}| = |Z_{sc}^*|$ لذا خواهیم داشت:

$$R_S = |Z_{sc}| \cos \varphi_{sc} = \frac{E^2}{S_{sc}} \cos \varphi_{sc} \quad (۱۶)$$

و

$$X_S = |Z_{sc}| \sin \varphi_{sc} = \frac{E^2}{S_{sc}} \sin \varphi_{sc} \quad (۱۷)$$

و همچنین:

$$\tan \varphi_{sc} = \frac{X_S}{R_S} \quad (۱۸)$$

که این همان نسبت X/R سیستم تغذیه است. حال با جایگزین کردن مقادیر R_{sc} و X_{sc} در رابطه (۱۲) و نرمالایز کردن ΔV_X و ΔV_R به V و همچنین فرض اینکه $E/V \approx 1$ خواهیم داشت:

$$\frac{\Delta V_R}{V} = \frac{1}{S_{sc}} [P_l \cos \varphi_s + Q_l \sin \varphi_s] \quad (۱۹)$$

و همچنین

$$\frac{\Delta V_X}{V} = \frac{1}{S_{sc}} [P_l \sin \varphi_s - Q_l \cos \varphi_s] \quad (۲۰)$$

اغلب از ΔV_X به دلیل اینکه تنها در فاز ولتاژ تغذیه (نسبت به E) تغییر به وجود می‌آورد صرف نظر می‌شود و عمده تغییرات ایجاد شده در ولتاژ به دلیل رابطه (۱۹) است. لذا عمدتاً تنها رابطه (۱۹) در نوشته‌ها دیده می‌شود

و گرچه رابطه تقریبی است اما بسیار کاربردی می باشد چرا که این رابطه برحسب کمیت های سطح اتصال کوتاه، توان اکتیو و راکتیو و نسبت X/R نوشته شده است. برای دستیابی به دقت بالاتری در نتایج، عبارت های نوشته شده در رابطه (۱۹) و (۲۰) باید در E^2/V^2 ضرب شوند.

روابطی که تا کنون برای ΔV ارائه شدند، به ازای تغییرات کامل بار از صفر تا P_l یا از صفر تا Q_l معتبر هستند. روابط (۱۲)، (۱۹) و (۲۰) همچنین برای تغییرات کوچک در P_l و Q_l قابل قبول می باشند. به عنوان مثال برای تغییرات کوچک داریم:

$$\frac{\Delta V_R}{V} = \frac{1}{S_{sc}} [\Delta P_l \cos \varphi_s + \Delta Q_l \sin \varphi_s] \quad (21)$$

اگر مقاومت مسیر تغذیه خیلی کوچک تر از راکتانس آن باشد، یعنی $R_s \ll X_s$ می توان از تغییرات ولتاژ ناشی از تغییر در توان اکتیو (ΔP_l) صرف نظر کرد. لذا تنظیم ولتاژ از رابطه زیر بدست میاید.

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta V_R}{V} = \frac{\Delta Q_l}{S_{sc}} \sin \varphi_{sc} \approx \frac{\Delta Q_l}{S_{sc}} \quad (22)$$

در حقیقت رابطه (۲۲) بیان می کند که تغییرات پریونیتی ولتاژ یا همان سویینگ برابر است با تغییرات توان راکتیو بار (سویینگ توان راکتیو) تقسیم بر سطح اتصال کوتاه سیستم تغذیه. این رابطه می تواند به شکل گرافیکی نیز نمایش داده شود. این نمایش گرافیکی در شکل ۲-۳ قابل مشاهده است. شکل ۲-۳ مشخصه ولتاژ^۲ سیستم تغذیه (یا خط بار^۳ سیستم) را نمایش

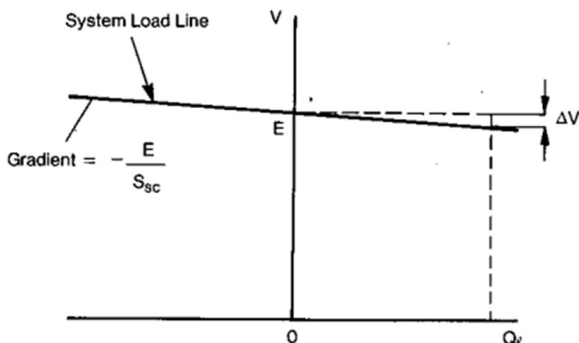
¹ Voltage Characteristic 2

¹ Load Line 3

می‌دهد که به طور تقریبی خطی است. فرم دیگر نمایش آن به صورت زیر است:

$$V \approx \frac{E}{1 + \frac{Q_l}{S_{sc}}} \approx E \left(1 - \frac{Q_l}{S_{sc}} \right) \quad (23)$$

به شرطی که: $Q_l \ll S_{sc}$



شکل ۲-۳: مشخصه تقریبی ولتاژ - توان راکتیو سیستم تغذیه

گرچه مشخصه ذکر شده تقریبی است ولی بسیار پر کاربرد است. خصوصاً به این جهت که دید خوبی از عملکرد یک جبرانساز ارائه می‌دهد.

۲-۲ مشخصه تقریبی توان راکتیو

۲-۲-۱ تنظیم ولتاژ بار با جبرانساز القایی متغیر

در این بخش قصد داریم که ویژگی‌های یک جبرانساز ایده‌آل که قصد بهبود تنظیم ولتاژ در یک بار القایی متغیر دارد را استنتاج کنیم. باری که

مورد مطالعه قرار می‌دهیم را سه فاز و متعادل در نظر می‌گیریم. همچنین فرض می‌کنیم که تغییرات این بار به گونه‌ای آرام پیش می‌رود که می‌توان مدل تکفاز (PPM) و فازوری آن را مورد مطالعه قرار داد. همچنین تغییرات بار آنقدر کوچک فرض می‌شود که $V \ll \Delta V$ و همچنین $R_S \ll X_S$ می‌باشد. به واسطه این فرض‌ها روابط (۲۲) و (۲۳) کماکان برقرار هستند. شکل ۲-۴-۲ آرایش سیستم، جبرانساز و بار را نشان می‌دهد. مشخصه سیستم در شکل ۲-۴-۲ آورده شده است.

این مشخصه دچار افتی می‌شود که این به معنی افزایش توان راکتیو Q_S تامین شده از طریق سیستم تغذیه می‌باشد. این افزایش سبب کاهش ولتاژ در نقطه تغذیه می‌شود. با جایگزین کردن Q_I با $Q_S (= Q_I + Q_Y)$ خواهیم داشت:

$$V \approx E \left(1 - \frac{Q_S}{S_{SC}} \right) \quad (24)$$

یا

$$\frac{\Delta V}{V} \approx \frac{Q_S}{S_{SC}} \quad (25)$$

توان راکتیو Q_S که توسط سیستم داده می‌شود از رابطه زیر تبعیت می‌کند:

$$Q_S = Q_I + Q_Y \quad (26)$$

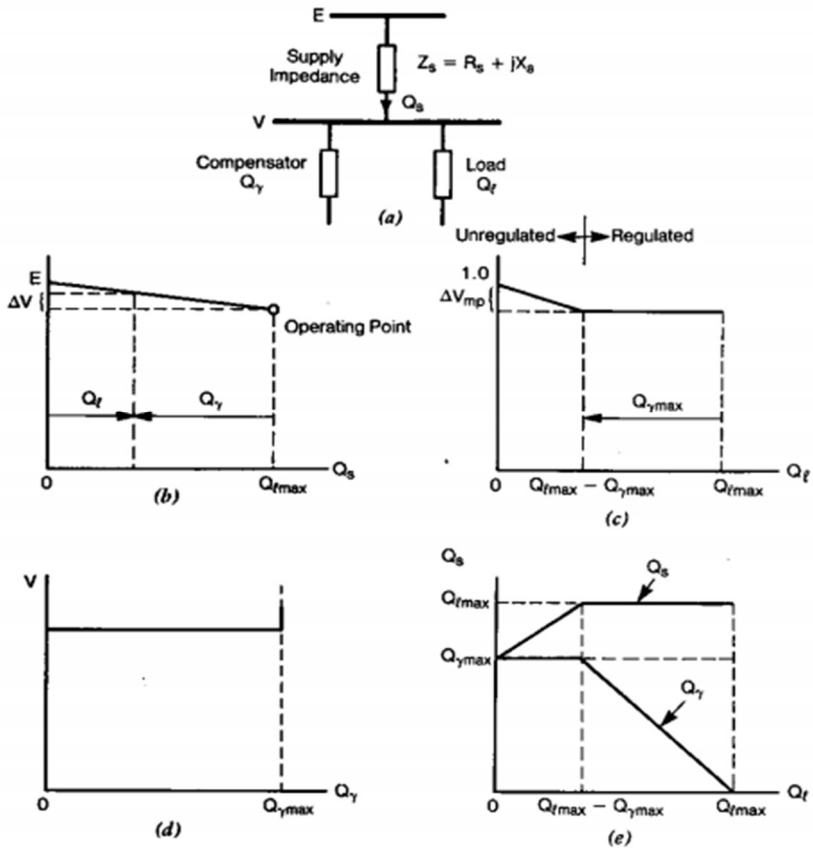
واضح است که اگر توان راکتیو جبرانساز Q_Y بتواند به گونه‌ای که تغییر کند که Q_S ثابت بماند، ولتاژ تغذیه نیز ثابت خواهند ماند. در حالت خاص اگر:

$$Q_S = Q_{l,max} = constant \quad (27)$$

آنگاه V ثابت خواهد بود و مقدار آن $E(1 - \frac{Q_{l,max}}{S_{sc}})$ خواهد بود. این امر در شکل ۲-۴-۲ نشان داده شده است.

وقتی توان راکتیو بار (Q_l) افزایش پیدا می‌کند، از توان راکتیو جذب شده توسط جبرانساز کاسته می‌شود. این کاستن به نحوی است که همواره مجموع توان راکتیو بار و جبرانساز ثابت باشد. وقتی که $Q_l = 0$ است جبرانساز به طور کامل در مدار بوده و $Q_{l,max}$ را جذب می‌کند. همچنین وقتی $Q_l = Q_{l,max}$ باشد، جبرانساز به طور کامل خاموش بوده و هیچ توان راکتیوی را جذب نمی‌کند. توجه داریم که جبرانساز القایی خالص بوده و ولتاژ را برای بار القایی ثابت نگه می‌دارد.

به جبرانسازی نشان داده در شکل ۲-۴-۲ b جبرانسازی کامل گفته می‌شود. چرا که در گستره تغییرات بار، کماکان ولتاژ ثابت باقی می‌ماند.



شکل ۲-۴: (a) مدار معادل تکفاز بار جبران شده. (b) مشخصه تقریبی ولتاژ-توان راکتیو سیستم (c) مشخصه تقریبی ولتاژ-توان راکتیو سیستم به طور جزئی جبران شده. (d) مشخصه تقریبی ولتاژ-توان راکتیو جبرانساز ایده‌آل. (e) دیاگرام تعادل توان راکتیو (تغییرات از Q_S و Q_Y نسبت به Q_L).

تنظیم ولتاژ $\Delta V/V$ فقط تا وقتی می‌تواند صفر باقی بماند که مقدار نامی توان راکتیو جبران‌ساز، برابر و یا بیشتر از توان راکتیو نامی بار ($Q_{l,max}$) باشد. اگر توان راکتیو نامی جبران‌ساز به مقدار $Q_{y,max}$ محدود شود و این مقدار کوچکتر از مقدار $Q_{l,max}$ باشد، آنگاه وقتی $Q_l = 0$ گردد، جبران‌ساز تنها قادر به مصرف $Q_{y,max}$ خواهد بود و این یعنی نمی‌تواند تمام توان راکتیو مورد نیاز را مصرف کند. در این شرایط تنظیم ولتاژ مطابق زیر خواهد بود:

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

این وضعیت در شکل ۲-۴-۲ نشان داده شده است. به این جبران‌سازی، جبران جزئی (ناقص) می‌گوییم. این رابطه مقدار تاثیر جبران‌ساز بر ولتاژ سیستم را به نمایش می‌گذارد که ماکسیمم این تغییر $\Delta V/V$ است که می‌تواند ناشی از تغییر توان راکتیو بار از صفر تا ماکسیمم مقدار آن باشد و از رابطه $-Q_{y,max}/S_{sc}$ به دست بیاید. به عنوان مثال در یک باس بار 10kV که سطح اتصال کوتاه آن 250MVA است، کوچکترین جبران‌سازی که قادر به ایجاد ۱٪ تغییر در ولتاژ است باید توان نامی برابر $0.01 \times 250 = 2.5\text{MVA}$ داشته باشد. حداقل مقدار نامی جبران‌ساز را می‌توان طوری انتخاب کرد که $-Q_{y,max}/S_{sc}$ با حداکثر مقدار مجاز تغییرات ولتاژ مطابقت داشته باشد. بنابراین:

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

مفید و آموزنده است که نمودار شکل ۲-۴-b را به دو نمودار مجزا تقسیم بندی کنیم که در شکل های ۲-۴-c و ۲-۴-d آورده شده اند. این کار می تواند به وسیله نمودار تعادل توان راکتیو که در شکل ۲-۴-e آورده شده است صورت پذیرد. شکل ۲-۴-c تغییرات ولتاژ نقطه تغذیه در اثر تغییر Q_l را نمایش می دهد: این شکل مشخصه ولتاژ-توان راکتیو سیستم جبران شده را نمایش می دهد و باید با سیستم جبران نشده که در شکل ۲-b آورده شده است مقایسه گردد. توان راکتیو نامی جبرانساز برابر $Q_{y\max}$ بوده و $Q_{y\max} < Q_{l\max}$ می باشد و این جبرانساز به نحوی عمل می کند که توان راکتیو سیستم (Q_s) را ثابت نگه دارد اما همانطور که گفته شد مقدار توان راکتیو نامی آن کوچکتر از این مقدار در بار است و طبق رابطه (۲۷)، جبرانساز نمی تواند به عنوان یک تثبیت ولتاژ کننده ایده آل عمل کند.

شکل ۲-۴-c نشان می دهد که نیاز نیست ظرفیت توان راکتیو جبرانساز بیشتر از تغییرات توان راکتیو بار باشد تا بتواند ولتاژ ثابت تامین را به هنگام تغییرات بار حفظ کند. این امر صرفه جویی قابل توجهی در ظرفیت جبرانساز فراهم می آورد، چرا که توان راکتیو بار بین حداکثر و مقداری کسری، به عنوان مثال 0.05 pu متغیر است. مشروط بر اینکه جبرانساز بر اساس رابطه (۲۹) تنظیم شود، در این صورت تغییرات ولتاژ تغذیه نباید از ΔV_{mp} تجاوز کند.

دو بخش شکل ۲-۴-c را می توان به عنوان یک محدوده تنظیم نشده برای $0 < Q_l < (Q_{l\max} - Q_{y\max})$ و یک محدوده تنظیم شده برای $(Q_{l\max} - Q_{y\max}) < Q_l < Q_{l\max}$ شناسایی کرد. در محدوده تنظیم

نشده، جبرانساز $Q_{y\max}$ را جذب کرده و افزایش ولتاژ را تا حداکثر مقدار مجاز ΔV_{mp} محدود می‌کند. در محدوده تنظیم شده، جبرانساز Q_s را ثابت نگه می‌دارد و $\Delta V = 0$ است.

مشخصه کنترلی جبرانساز در شکل ۲-۴-d نشان داده شده است. از آنجا که هیچ تغییری در ولتاژ برای $0 < Q_l < Q_{y\max}$ وجود ندارد، و مشخصه در محدوده تنظیم شده ثابت است؛ اگر مقدار Q_l به کمتر از محدوده تنظیم شده برسد، جبران‌کننده بدون توجه به ولتاژ، صرفاً $Q_{y\max}$ را جذب می‌کند.

۲-۲-۲ بهبود ضریب توان

میانگین ضریب توان بار القایی که به صورت القایی جبران‌شده است، به طور قابل توجهی بدتر از حالت جبران نشده آن است. اگر، برای مثال، میانگین توان راکتیو بار $\bar{Q}_l$ برابر با نصف مقدار حداکثر آن باشد، در این صورت میانگین توان راکتیو تامین‌شده توسط سیستم برای بار جبران‌شده برابر با $2\bar{Q}_l$ خواهد بود، یعنی دو برابر مقدار اولیه.

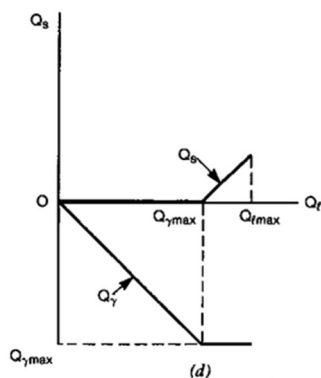
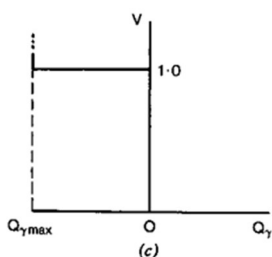
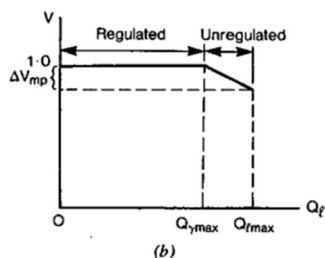
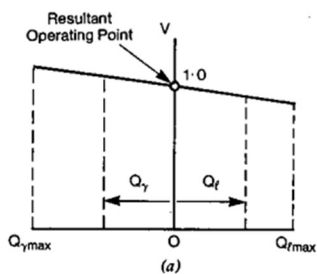
واضح است که برای دستیابی به تنظیم کننده ولتاژ ایده‌آل در کنار ضریب توان میانگین واحد، به یک جبرانساز خازنی نیازمندیم. در اینجا به جای $Q_s = \text{constant} = Q_{l\max}$ که در رابطه (۲۷) نیز آمده بود، جبرانساز باید به گونه‌ای عمل کند که:

$$Q_s = \text{constant} = 0 \quad (۳۰)$$

بدون توجه به تغییرات توان بار، با روشی مشابه بخش ۲-۲-۱ مشخصه ولتاژ-توان راکتیو این جبرانساز ایده‌آل به دست می‌آید. شکل ۲-۲-۵ a تا d-۵-۲ این روش را نشان می‌دهد. شکل ۲-۵-۵ c مشخصه جبرانساز ایده‌آل را نمایش می‌دهد. حداقل توان نامی کاپاستیو جبرانساز از رابطه (۲۹) به دست می‌آید، و خارج از محدوده تنظیم آن، فرض می‌شود که جبرانساز توان راکتیو ثابت $Q_{y\max}$ تولید می‌کند. ولتاژ واحد اکنون به گونه‌ای تعریف شده است که با شرایط کاملاً جبران‌شده مطابق با رابطه (۳۰) مطابقت دارد و نقطه کار^۱ میانگین در $V = 1.0 \text{ pu}$ با $Q_S = 0$ تنظیم شده است.

به جای جذب فقط توان راکتیو کافی برای جبران مجموع $Q_l + Q_y$ اکنون جبرانساز می‌تواند هر آنچه که بار جذب می‌کند را تولید کند؛ در این صورت جبرانساز به طور کامل خازنی است. اگر جبرانساز به عنوان یک تنظیم‌کننده ولتاژ ایده‌آل طراحی شده باشد، در این صورت Q_S به دلیل تغییرات توان بار کاملاً صفر نیست. به طور کلی این اثر کوچک خواهد بود. (به مثال کار شده در بخش ۲-۳ مراجعه کنید.)

¹ Operation Point



شکل ۲-۵: (a) مشخصه تقریبی ولتاژ-توان راکتیو برای یک سیستم جبران نشده. (b) مشخصه تقریبی ولتاژ-توان راکتیو برای یک سیستم جبران شده. (c) مشخصه ولتاژ-توان راکتیو یک جبرانساز ایده آل (به صورت تقریبی). (d) نمودار تعادل توان راکتیو (تغییرات Q_s و Q_y نسبت به Q_l).

۲-۳-۲ بایاس^۱ کردن توان راکتیو

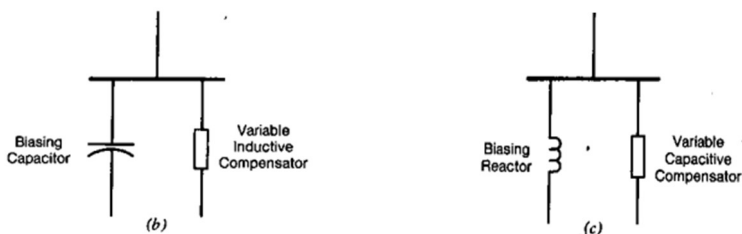
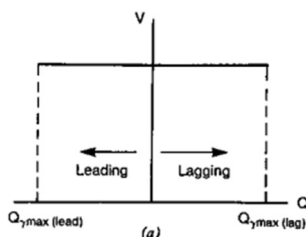
اگر توان راکتیو بار بتواند از پیشفاز تا پسفاز تغییر کند، در این صورت نیاز به جبرانسازی است که مشخصه تنظیم شده $V-Q$ آن به هر دو ربع گسترش یابد، همانطور که در شکل ۲-۶-الف نشان داده شده است. مشخصه جبرانساز القایی در شکل ۲-۴-۲ می‌تواند به این روش توسط یک خازن موازی (سنت) ثابت بایاس شود، این امر در شکل ۲-۶-ب نشان داده شده است. به همین روش، جبرانساز کاپاستیو می‌تواند به وسیله یک راکتور سنت به ربع پسفاز بایاس شود. این مسئله در شکل ۲-۶-۲ نشان داده شده است. اگر خازن سنت شکل ۲-۶-ب به اندازه کافی بزرگ باشد، جبرانساز القایی می‌تواند به طوری بایاس شود که مشخصه آن به طور کامل در ربع پیشفاز باشد. درواقع وقتی جبرانساز اندوکتیو با یک خازن سنت ترکیب شود، جبرانساز قادر به حفظ ولتاژ ثابت و ضریب توان میانگین واحد برای یک بار القایی است.

تمایز بین جبرانساز القایی و خازنی ممکن است کمی مصنوعی به نظر برسد، اما از دیدگاه عملی مهم است زیرا عمده جبرانسازهای واقعی، همزمان با کنترل جریان‌ها در یک بانک خازنی یا در یک ترتیب اندوکتانس کار می‌کنند. به عنوان مثال جبرانساز راکتور اشباع شده، معمولاً توسط خازن‌های موازی حداقل تا حدودی به ربع پیشفاز بایاس می‌شود. یک راکتانس سنت ثابت ارزان‌تر از یک جبرانساز متغیر با همان ظرفیت توان

¹ Bias

راکتیو است، و گاهی اقتصادی تر است که جبران ساز فقط با تغییرات در توان راکتیو بار منطبق باشد، در حالی که آن را با یک راکتانس شنت ثابت بایاس می‌کنید تا ضریب توان میانگین مطلوب را به دست آورید.

در شکل‌های ۲-۴، ۲-۵ و ۲-۶ مشخصه‌های ولتاژ-توان راکتیو جبران ساز و سیستم تغذیه به طور کامل خطی نیستند بلکه کمی انحنادار (درجه دوم) هستند. آنها به عنوان خطوط مستقیم نشان داده شده‌اند به شرطی که V انحراف قابل توجهی از 1.0PU نداشته باشد. برای محاسبات دقیق‌تر نیاز به اشکال دقیق معادلات ۱۲ یا ۱۳ است. همچنین، جبران سازی می‌تواند به جای توان‌های راکتیو بر اساس جریان‌های راکتیو انجام شود.



شکل ۲-۶: (a) مشخصه تقریبی ولتاژ-توان راکتیو یک جبران ساز ایده‌آل که توانایی عملکرد در هر دو ربع پیشفاز و پسفاز را دارد. (b) جبران ساز اندوکتیو متغیر با بایاس خازنی. (c) جبران ساز کاپاستیو متغیر با بایاس القاوی.

۲-۳ مثال کاربردی

یک سیستم تغذیه با ولتاژ فاز به زمین 10 kV را در نظر بگیرید که سطح اتصال کوتاه آن 250 MVA و نسبت X_S/R_S در آن برابر 5 است. این منبع باری پسفاز با اتصال ستاره را تغذیه می‌کند. این بار توان اکتیوی برابر با 25 MW و توان راکتیوی بین صفر تا 50 MVar مصرف می‌کند. (تمامی مقادیر به ازای یک فاز بیان شده‌اند).

با توجه به رابطه امپدانس تونن، امپدانس تونن سیستم تغذیه عبارت است از: $Z_S = E_S^2 / S_{SC} = (10kV)^2 / 250MVA = 0.4 \frac{\Omega}{phase}$ که در آن $\tan \varphi_{sc} = 5$ پس می‌توان گفت $\varphi_{sc} = 78.69^\circ$ و در نتیجه داریم: $X_S = Z_S \sin \varphi_{sc} = 0.3922 \Omega$ و $R_S = 0.0784 \Omega$. از محاسبات پخش بار و یا از رسم دیاگرام فازوری و با گرفتن ولتاژ فاز به عنوان مبنا $E = 1.0 pu = 10 kV$ خواهیم داشت:

$$V = 6.782 kV$$

و

$$\Delta V = 3.1806 + j0.8678 kV.$$

حال جریان بار برابر

$$I = \frac{P_L - jQ_L}{V} = 3.686 - j7.372 = 8.24 \angle -63.44^\circ kA$$

در بار کامل خواهد بود. در این حالت ضریب توان 0.447 پسفاز است. دیگرام فازوری در شکل ۲-۷-a کشیده شده است. اندازه ولتاژ نیز به مقدار $10 - 6.782 = 3.218 \text{ kV}$ کاهش می‌یابد. در این محاسبات روابط دقیق ۱۹ و ۲۰ مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

۲-۳-۱ جبرانسازی برای ولتاژ ثابت

با مرتب کردن رابطه (۱۳) می‌توان نوشت:

$$aQ_S^2 + bQ_S + c = 0$$

که در آن

$$a = R_S^2 + X_S^2$$

$$b = 2V^2X_S$$

$$c = (V^2 + R_S P_l)^2 + X_S^2 P_l^2 - E^2 V^2$$

حال به ازای $V = 10 \text{ kV}$ مقادیر زیر به دست می‌یابند.

$$a = 0.0784^2 + 0.3922^2 = 0.160$$

$$b = 2 \times 10^2 \times 0.3922 = 78.44$$

$$c = (10^2 + 0.0784 \times 25)^2 + (0.3922 \times 25)^2 - 10^2 \times 10^2 = 491.98$$

از حل معادله بالا برای توان راکتیو داریم:

$$Q_S = \frac{-78.44 \pm \sqrt{78.44^2 - 4 \times 0.160 \times 491.98}}{2 \times 0.160}$$

$$= -6.35 \text{ or } -484 \text{ MVar}$$

فقط مقدار اولی در رابطه (۱۳) منجر به مقدار $E = 10 \text{ kV}$ می شود. پس می توان گفت:

$$\Delta V_R = \frac{R_S P_l + X_S Q_S}{V} = \frac{0.0784 \times 25 + 0.3922 \times (-6.35)}{10}$$

$$= -0.0532 \text{ kV}$$

$$\Delta V_X = \frac{X_S P_l - R_S Q_S}{V} = \frac{0.3922 \times 25 - 0.0784 \times (-6.35)}{10}$$

$$= 1.030 \text{ kV}$$

جریان کل بار در خطوط تغذیه برابر

$$(P_l - jQ_l)/V = 2.50 + j0.635 \text{ kA}$$

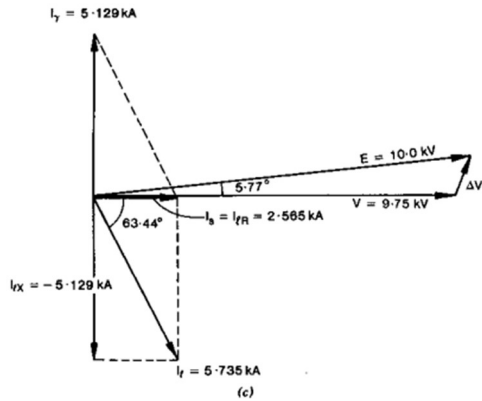
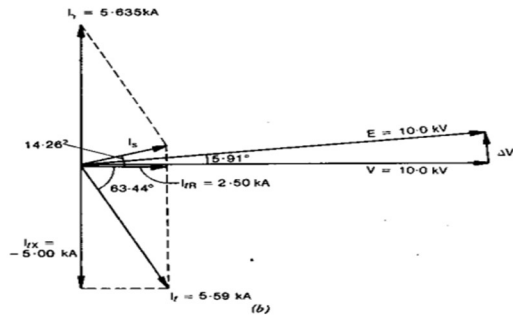
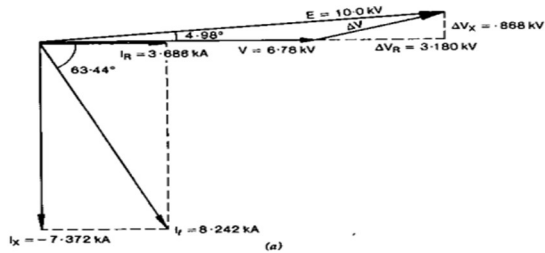
و جریان جبرانساز از رابطه زیر بدست میاید که در آن $Q_y = -56.35 \text{ MVar}$ است:

$$\frac{-jQ_y}{V} = +j5.635 \text{ kA}$$

دیagram برداری در شکل ۲-۷-b نمایش داده شده است و نکات جالبی را بیان می کند. اندازه ولتاژ دقیقاً برابر 1 pu نگاه داشته می شود. در این حالت

مجاز نیستیم که ΔV را به عنوان ΔV_R در نظر بگیریم و از ΔV_X صرف نظر کنیم. درواقع باید محاسبات با حضور هردوی آنها انجام شود تا دقت کافی را داشته باشد.

توان راکتیو جبران‌ساز دقیقاً برابر با توان راکتیو بار نیست. درواقع این توان راکتیو 6.35 MVA_r از توان راکتیو بار بیشتر است که این امر نتیجه‌ی جبران‌سازی در حالت تثبیت ولتاژ به سبب توان اکتیو P_l می‌باشد. در نتیجه ضریب توان سیستم برابر یک نبوده و مقدار آن $\frac{25}{\sqrt{25^2 + 6.35^2}} = 0.969$ و پیش‌فاز است. این حالت در دیاگرام برداری نیز قابل مشاهده است و واضح است که جریان I_s به مقدار $\cos^{-1}(0.969) = 14.3^\circ$ نسبت به ولتاژ پیش‌فاز است.



شکل ۷-۲: (a) بار جبران نشده ($25+j50 \text{ MVA}$). (b) بار جبران شده برای ولتاژ ثابت. (c) بار جبران شده برای ضریب توان واحد

۲-۳-۲ جبرانسازی برای ضریب توان واحد

با $Q_y = Q_l$ که در دیاگرام شکل ۲-۷-۲ نمایش داده شده است، جریان جبرانساز $I_y = j5.129 \text{ kA} = -I_{lx}$ و $Q_s = 0$ در نتیجه ضریب توان واحد خواهد بود. به کمک رابطه (۱۲) و (۱۳) و حل یک معادله درجه دو بر حسب V^2 می‌توان گفت که $V = 9.748 \text{ kV}$ و از طرفی نیز داریم $\Delta V_R = 0.201 \text{ kV}$ و همچنین $\Delta V_X = 1.006 \text{ kV}$ می‌باشد. در نتیجه افت ولتاژ برابر با $9.748 - 10.0 = -0.252 \text{ kV}$ یا به تقریب ۲,۵٪ خواهد بود. بنابراین مشخص می‌شود که تصحیح ضریب توان می‌تواند تنظیم ولتاژ را تا حد خوبی بهبود دهد. در بسیاری از موارد چنین بهبودی به تنهایی کافی می‌باشد و می‌توان جبرانساز را به عنوان تامین کننده توان راکتیو مورد نیاز بار - و نه جبرانساز ایده‌آل تثبیت کننده ولتاژ- طراحی کرد.

۲-۴ جبرانسازی بار به صورت تنظیم کننده ولتاژ

مشخصه کنترلی که در شکل ۲-۴-۲ d و ۲-۵-۲ c نشان داده شده است، می‌تواند به کمک سه عدد تعیین گردد:

۱. ولتاژ نقطه زانویی (V_k)
۲. مقدار ماکسیمم یا مقدار نامی توان راکتیو ($Q_{y \max}$)
۳. ضریب بهره^۷ (K_y)

ضریب بهره می‌تواند به صورت تقسیم تغییرات توان راکتیو Q_y تقسیم بر تغییرات ولتاژ V تعریف گردد. در نتیجه داریم:

$$K_y = \frac{dQ_y}{dV} \quad (31)$$

و اگر مشخصه کنترلی خطی باشد، آنگاه به ازای $Q_y < Q_{y\max}$ معادله زیر برقرار است:

$$V = V_k + Q_y/K_y \quad (32)$$

در شکل‌های ۲-۴-d و ۲-۵-c ضریب بهره K_y بی‌نهایت است. جبرانساز دقیقاً مقدار توان راکتیوی را جذب یا مصرف می‌کند که ولتاژ نقطه تغذیه ثابت باقی بماند هرچند که بار تغییر کند.

اکنون خواص تنظیم‌کنندگی ولتاژ یک جبرانساز که ضریب بهره آن محدود و برابر K_y است و در سیستم تغذیه‌ای با سطح اتصال کوتاه محدود S_{sc} کار می‌کند را تعیین می‌کنیم. همانطور که پیش‌تر مطرح شد، سوال اصلی این است که اندازه ولتاژ نقطه تغذیه به چه صورت با تغییرات بار تغییر می‌کند. به طور ویژه‌تر تمرکز ما روی تغییرات ولتاژ با تغییر توان راکتیو بار خواهد بود.

پیش از این ذکر کردیم که جبرانساز ایده‌آل در حالت تنظیم ولتاژ، ضریب بهره‌ی K_y بی‌نهایت خواهد داشت. اما در عمل مقادیر خیلی زیاد K_y به ندرت وجود دارند. این مقادیر تمایل دارند پایداری عملکرد جبرانساز را کاهش دهند و در برخی از انواع جبرانساز، طراحی برای داشتن بهره بالا K_y گران قیمت است. بنابراین عملکرد جبرانساز با بهره محدود K_y اهمیت می‌یابد.

ما همچنان به بررسی بر پایه هر فاز^۱ (مانند حالت تکفاز) ادامه می‌دهیم و فرض می‌کنیم شرایط متعادل است. نسبت X_S/R_S سیستم تغذیه بزرگ فرض می‌شود و نوسانات بار نادیده گرفته می‌شوند. سیستم همان‌طور که در شکل ۲-۴-a نشان داده شده است می‌باشد. توان راکتیو بار به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Q_l + Q_y = Q_s \quad (۳۳)$$

مشخصه ولتاژ سیستم یا خط بار آن توسط رابطه (۲۴) و به صورت تقریبی ارائه می‌شود:

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

(شکل ۲-۸-a را مشاهده کنید). شیب خط بار حساسیت ذاتی^۹ ولتاژ تغذیه به تغییرات توان راکتیو Q_s را نمایش می‌دهد. در نتیجه:

$$\frac{dV}{dQ_s} = - \frac{E}{S_{sc}} \quad (۳۴)$$

سطح اتصال کوتاه بالا می‌تواند حساسیت ذکر شده را کاهش دهد و خط بار را صاف‌تر کند. در این حالت سیستم را "مستحکم" گوئیم.

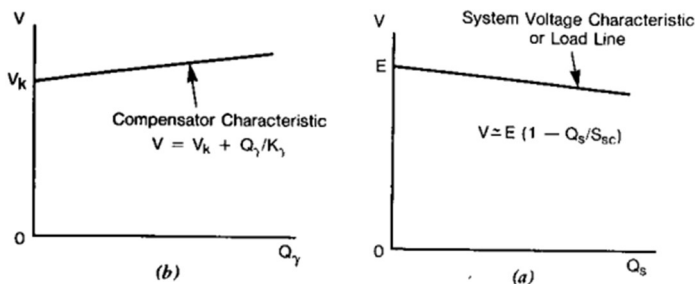
در یک نمونه جبران نشده که $Q_s = Q_l$ و $Q_y = 0$ است، حساسیت ولتاژ به توان راکتیو بار Q_l با حساسیت ذاتی آن یعنی $-E/S_{sc}$ یکسان می‌باشد. در حضور جبرانساز، از روابط (۲۴) و (۳۳) داریم:

$$V \approx E \left(1 - \frac{Q_l + Q_y}{S_{sc}} \right) \quad (۳۵)$$

¹ Per Phase Model 8

¹ Intrinsic Sensitivity 9

و چون چون توان راکتیو Q_y تابعی از ولتاژ V است لذا حساسیت تغییر خواهد کرد.



شکل ۸-۲: (a) مشخصه تقریبی ولتاژ-توان راکتیو سیستم تغذیه. (b) مشخصه ولتاژ-توان راکتیو جبران‌ساز ایده‌آل

توان راکتیو جبران‌ساز Q_y توسط اختلاف ولتاژ $V - V_k$ مطابق با رابطه (۳۲) تعیین می‌شود. (به شکل ۸-۲-ب نگاه کنید). به‌طوری‌که:

$$Q_y = K_y (V - V_k) \quad (۳۶)$$

ما قبلاً دیده‌ایم که یک ضریب بهره جبران‌ساز بالا K_y به معنای مشخصه ثابت ولتاژ-توان راکتیو V/Q است؛ به این معنی که مشخصه ولتاژ ثابت "مستحکم" است. در واحدهای پریونیت (pu)، یک ضریب بهره، مثلاً 40 pu، به این معنی است که توان راکتیو جبران‌ساز از صفر به 1 pu برای تغییر در ولتاژ $V - V_k$ یا V برابر با 1/40 یا 0.025 pu تغییر می‌کند. در ادامه، استفاده از سیستم بر اساس واحد پریونیت که در آن $Q_{y \max}$ توان راکتیو مبنا و E ولتاژ پایه است، مناسب خواهد بود.

تأثیر جبران ساز با جایگزینی Q_y از رابطه (۳۶) در رابطه (۳۵) و بازآرایی آن مشخص می شود، به طوری که:

$$V = E \left[\frac{1+K_y V_k / S_{sc}}{1+K_y E / S_{sc}} - \frac{Q_l / S_{sc}}{1+K_y E / S_{sc}} \right] \quad (۳۷)$$

این معادله نشان می دهد که چگونه ولتاژ نقطه تغذیه V با توان راکتیو بار Q_l در حضور جبران ساز و با شرط $Q_y < Q_{y \max}$ تغییر می کند. اگرچه به صورت تقریبی، اما این مستقیماً تأثیر تمامی پارامترهای اصلی یعنی توان راکتیو خود بار، مشخصه V_k و K_y جبران ساز، و مشخصات سیستم یعنی E و S_{sc} را نمایش می دهد.

اگر بار جبران نشده باشد، داریم $K_y = Q_y = 0$ و رابطه (۳۷) به رابطه (۲۴) کاهش می یابد.

جبران ساز دو اثر دارد که از رابطه (۳۷) مشهود است: ولتاژ نقطه تغذیه در حالت بدون بار را تغییر می دهد و حساسیت ولتاژ نقطه تغذیه به توان راکتیو بار را تعدیل می کند. اگر بهره جبران ساز K_y مثبت باشد، آنگاه حساسیت ولتاژ کاهش می یابد:

$$dV/dQ_l = - \frac{E/S_{sc}}{1+K_y E/S_{sc}} \quad (۳۸)$$

برای مثال، فرض کنید $E=1.00 \text{ pu}$ و $S_{sc} = 25 \text{ pu}$ (بر اساس $Q_{y \max}$)، آنگاه حساسیت ولتاژ بدون جبران سازی نسبت به تغییرات توان راکتیو بار (از رابطه ۳۴) برابر با -0.04 pu است. یک جبران ساز با بهره $K_y = 100 \text{ pu}$ این حساسیت را به مقدار زیر کاهش می دهد:

$$\frac{-0.04}{1+100 \times 0.04} = \frac{-0.04}{5} = -0.008 \text{ pu} \quad (۳۹)$$

ولتاژ نقطه تغذیه در حالت بی‌باری توسط عبارت اول سمت راست رابطه (۳۷) بیان می‌شود. می‌توان مقدار آن را با ولتاژ نقطه تغذیه در حالت بدون بار و جبران‌نشده E به کمک برقرار کردن $V_k = E$ برابر نمود. مفید است که گرادیان $-E/S_{sc}$ را به فرم مشابهی با K_y بیان کنیم. اگر بنویسیم:

$$\frac{1}{K_s} = -\frac{E}{S_{sc}} \quad (۴۰)$$

آنگاه K_s نمایانگر "ضریب بهره" سیستم است؛ به این معنی که نرخ جذب توان راکتیو از سیستم برای بالا بردن یا پایین آوردن ولتاژ سیستم تا مقدار واحد را نشان می‌دهد. بنابراین K_s سیستم مشابه K_y برای جبران‌ساز است. و نقشی که جبران‌ساز در تعیین حساسیت کلی ولتاژ نقطه تغذیه نسبت به توان راکتیو بار دارد، به وضوح یک تابع از نسبت K_y/K_s است، مشروط بر اینکه: $Q_y < Q_{y \max}$.

توان راکتیو جبران‌ساز متناظر با مقدار Q_l است و می‌توان آن را از روابط (۳۶) و (۳۷) به این صورت تعیین کرد:

$$Q_y = \frac{K_y}{1+K_y E/S_{sc}} \left[E \left(1 - \frac{Q_l}{S_{sc}} \right) - V_k \right] \quad (۴۱)$$

و اگر $E = V_k$ باشد:

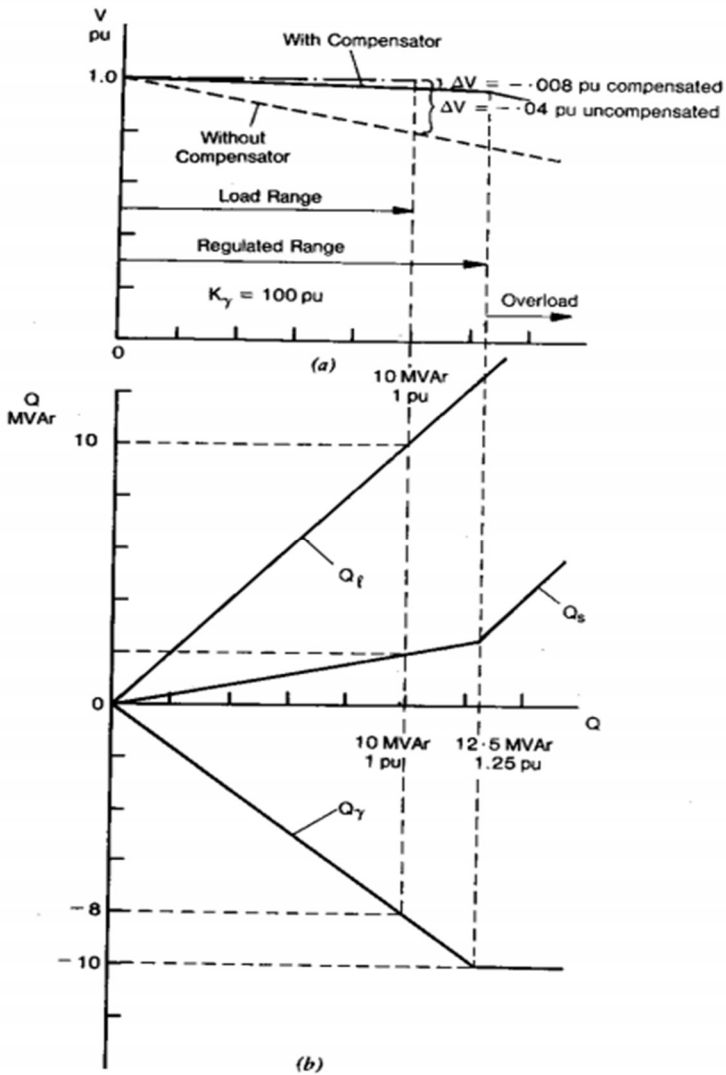
$$Q_y = -\frac{K_y E/S_{sc}}{1+K_y E/S_{sc}} Q_l \quad (۴۲)$$

شکل ۲-۹ ارتباط بین این مشخصه‌ها را با کمک مثال که در آن سطح اتصال کوتاه $S_{sc} = 250 \text{ MVA}$ است و با فرض توان راکتیو بیشینه بار و جبران‌ساز برابر $Q_{l \max} = 10 \text{ MVar} = -Q_{y \max}$ است نشان می‌دهد.

این به معنی کاپاستیو بودن جبران‌ساز است. به دلیل محدود بودن ضریب بهره، جبران‌سازی توان راکتیو ناقص خواهد بود و Q_s از صفر تا 2 MVar یا همان 0.2 pu تغییر می‌کند. این در حالی است که تغییرات Q_l از صفر تا 10MVar خواهد بود. توان راکتیو جبران‌ساز از صفر تا 8 MVar تغییر می‌کند و در این محدوده تنظیم ولتاژ ثابت و برابر 0.008 pu نگاه داشته می‌شود (شکل ۲-۹-ا). وقتی که توان راکتیو بار برابر توان راکتیو نامی جبران‌ساز است، جبران‌ساز هنوز 2 MVar یا 20% در اختیار دارد. طوری که محدوده تنظیم در این مثال به سمت محدوده اضافه بار تا توان راکتیو بار (1.25 pu) 12.5 MVar توسعه می‌یابد.

۲-۵ نتیجه‌گیری

برای اینکه بتوان در یک روش عملی با عملکردهای اصلی اصلاح ضریب قدرت و تنظیم ولتاژ مقابله کرد، تئوری جبران‌سازی بار فرموله شده است. نشان داده شد که منبعی از توان راکتیو به عنوان یک دستگاه تنظیم ولتاژ و به عنوان شبکه‌ای از سوسپتانس‌های دلخواه مشخص می‌شود. این دستگاه می‌تواند هر دو عملکرد اصلی اصلاح ضریب قدرت و تنظیم ولتاژ را تحقق بخشد. همچنین مشخصات ضروری جبران‌ساز برای دستیابی به این عملکردها استخراج شد. همچنین دیدیم که سیستم جبران‌ساز راکتیو نمی‌تواند ضریب توان یکنواخت را به طور دائمی حفظ کند، بلکه می‌تواند به گونه‌ای تنظیم شود که ضریب توان میانگین واحد را بدست آورد.



شکل ۲-۰: (a) مشخصه ولتاژ-توان راکتیو سیستم جبران شده. (b) دیاگرام تعادل توان راکتیو

فصل سوم: تاثیر جبرانسازی بر پایداری

۳-۱- مقدمه

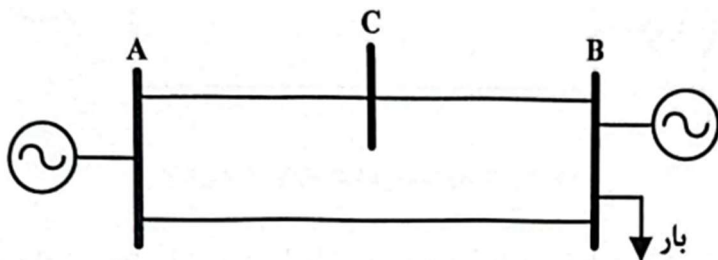
در عصر فناوری‌های نوین، بهره‌وری و پایداری سیستم‌های قدرت از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. فصل حاضر به بررسی تأثیر همزمان توان اکتیو و راکتیو بر عملکرد و پایداری ولتاژ شبکه‌های قدرت می‌پردازد. در این بخش، یک مثال کاربردی از یک سیستم قدرت کوچک شامل ۳ شین ارائه شده است که خطوط انتقال آن با استفاده از مدل معادل π تحلیل شده‌اند. این مثال کاربردی به کمک برنامه پخش بار، رابطه بین توان اکتیو انتقالی (برحسب MW) و نیاز سیستم به توان راکتیو تزریق شده (بر حسب MVar) را در شرایط عادی و در مواجهه با رویدادهای ناگهانی مانند خروج یک خط از سیستم بررسی می‌کند.

در این مثال، نگهداری ولتاژ شین B در مقدار نامی 1 PU تحت شرایط مختلف، از جمله بار با ضریب توان یک و ۰.۹ پس‌فاز، به تفصیل بیان خواهد شد. نمودارهای ارائه شده نشان می‌دهند که افزایش توان اکتیو انتقالی در شرایط بحرانی نیاز به توان راکتیو را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. این پدیده به‌ویژه زمانی که ضریب توان بار کاهش یافته و یا منابع توان راکتیو در نقاط غیر بهینه‌ای از شبکه قرار دارند نمود بیشتری خواهد داشت. تحلیل دقیق اثر موقعیت‌یابی منابع توان راکتیو و تأثیر آن بر ظرفیت انتقال، ضمن ارائه بینشی جامع از چالش‌های پایداری ولتاژ، فرصتی را برای بهبود تصمیمات مهندسی و اقتصادی در حوزه بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت فراهم می‌کند.

هدف این فصل ارائه راهکارهایی جامع جهت مدیریت بهینه توان راکتیو، افزایش ظرفیت انتقال و تضمین امنیت شبکه است؛ موضوعاتی که در شبکه‌های قدرت مدرن امری ضروری به شمار می‌آیند. از طریق این مطالعه، نه تنها جنبه‌های تئوری مسئله مطرح می‌شود، بلکه کاربردهای عملی و اقتصادی در بهره‌برداری پایدار نیز مورد توجه قرار می‌گیرند. این امر، مبنایی قوی برای آشنایی پژوهشگران و متخصصان برق با چالش‌های واقعی شبکه‌های قدرت فراهم کرده و افق‌های نوینی در طراحی و بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت ایجاد می‌کند.

۳-۲- مثال کاربردی

سیستم قدرت کوچک نشان داده شده در شکل ۳-۱ را در نظر می‌گیریم. هرکدام از خطوط انتقال این سیستم با مدار معال π مدل می‌شوند. پارامترهای هر کدام از این خطوط انتقال در جدول ۳-۱ آورده شده است.



شکل ۳-۱: یک سیستم قدرت کوچک و ساده

در ادامه با استفاده از برنامه پخش بار، مقدار توان راکتیو مورد نیاز را به صورت تابعی از مقدار توان انتقالی بین شین‌های A و B در هر دو حالت بهره‌برداری عادی و غیرعادی (یعنی جلوگیری از وقوع فروپاشی ولتاژ^۲ پس از خروج ناگهانی یک خط) مطالعه خواهیم کرد. بار شین B را در دو حالت ضریب ضریب قدرت واحد و ۰,۹ پس‌فاز در نظر می‌گیریم. همچنین مزایا و معایب قرارگیری منبع توان راکتیو در شین C را تحلیل خواهیم کرد.

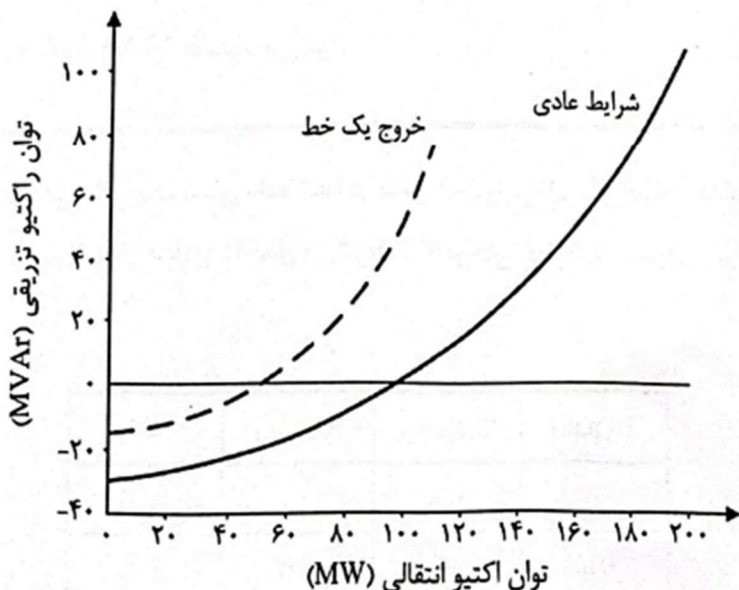
خط	R (pu)	X (pu)	B (pu)
A-B	۰,۰۸	۰,۸	۰,۳
A-C	۰,۰۴	۰,۴	۰,۱۵
C-B	۰,۰۴	۰,۴	۰,۱۵

جدول ۱-۳: پارامترهای خطوط انتقال شبکه قدرت شکل ۱-۳

شکل ۲-۳ توان راکتیو مورد نیاز برای ثابت نگه داشتن ولتاژ باس B در 1 pu را به صورت تابعی توان اکتیو انتقالی نشان می‌دهد. این شکل به ازای بار با ضریب توان واحد رسم شده است. برای توان انتقالی کمتر از 96 MW منبع توان راکتیو موجود در باس B باید بخشی از توان راکتیو تولید شده توسط خازن موازی خطوط انتقال را جذب کند. به ازای توان انتقالی 96 MW منبع توان راکتیو موجود در شین B نیازی به تولید یا مصرف توان راکتیو ندارد. و به ازای توان انتقالی بیش از 96 MW این منبع باید توان راکتیو تولید و به شبکه تزریق کند. اگر وضعیت خروج یک خط انتقال در نظر گرفته شود، توان راکتیو مورد نیاز به صورت خط چین در

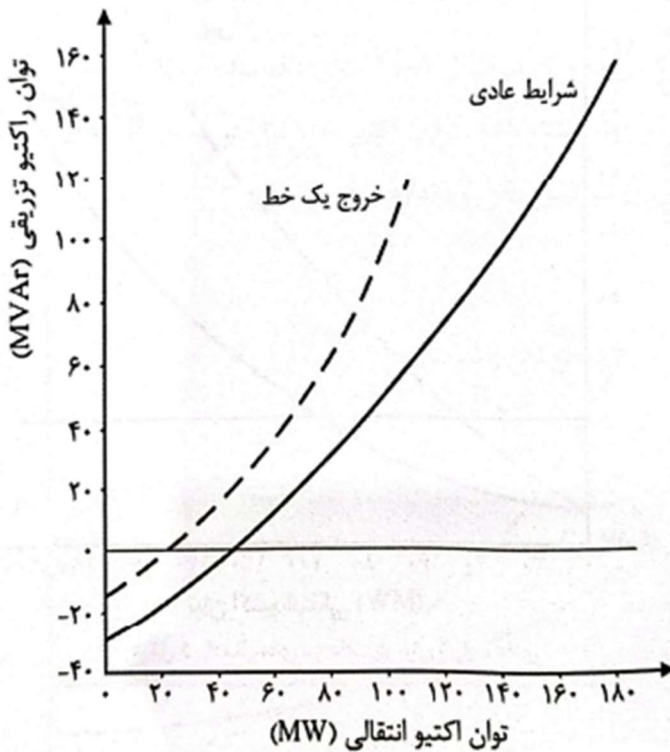
^۲Voltage Collapse

شکل ۲-۳ خواهد بود. همانطور که از شکل ۲-۳ قابل مشاهده است، در این وضعیت نیاز به توان راکتیو به شدت افزایش می‌یابد. به بیان دیگر در این شرایط به ازای یک ظرفیت توان راکتیو مشخص، توان اکتیو کمتری از A به باس B می‌توان انتقال داد.



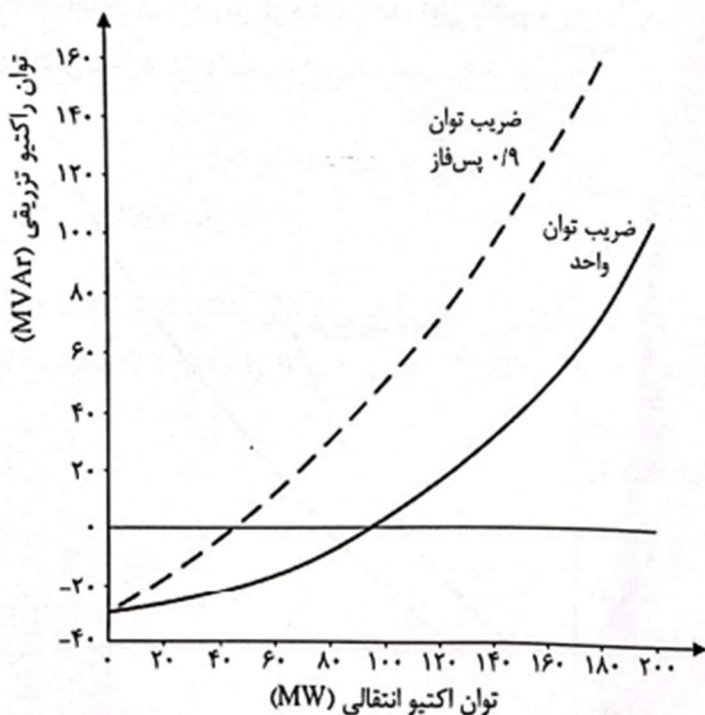
شکل ۲-۳: توان راکتیو مورد نیاز بر حسب توان اکتیو انتقالی برای بار با ضریب توان واحد

حال اگر ضریب توان بار موجود در شین B برابر ۰,۹ پس فاز باشد، توان راکتیو مورد نیاز بر حسب تابعی از توان اکتیو انتقالی به صورت شکل ۳-۳ خواهد بود.



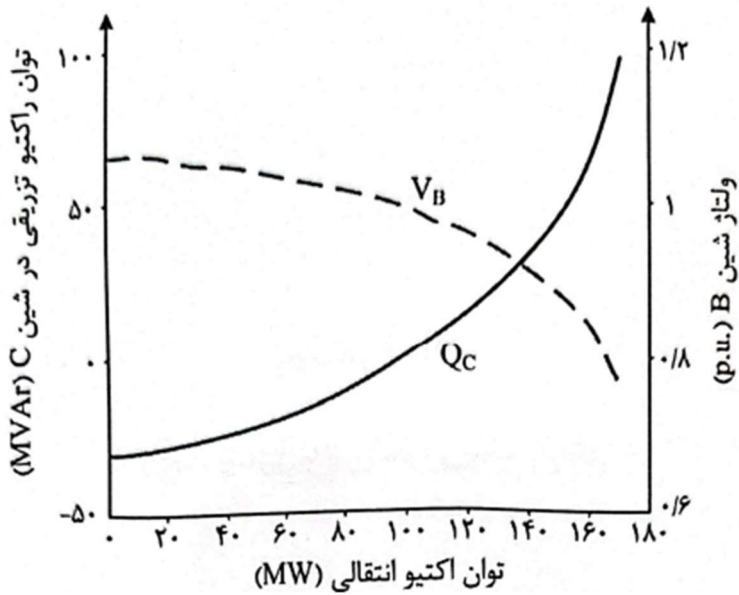
شکل ۳-۳: توان راکتیو مورد نیاز بر حسب توان اکتیو انتقالی برای بار با ضریب توان ۰,۹ پس فاز

شکل ۳-۴ مقایسه توان راکتیو مورد نیاز برای دو حالت پیشین را نشان می‌دهد. بدیهی است که بار با ضریب توان پس فاز، به طور قابل ملاحظه‌ای توان راکتیو بیشتری نسبت به بار با ضریب توان واحد نیاز دارد.



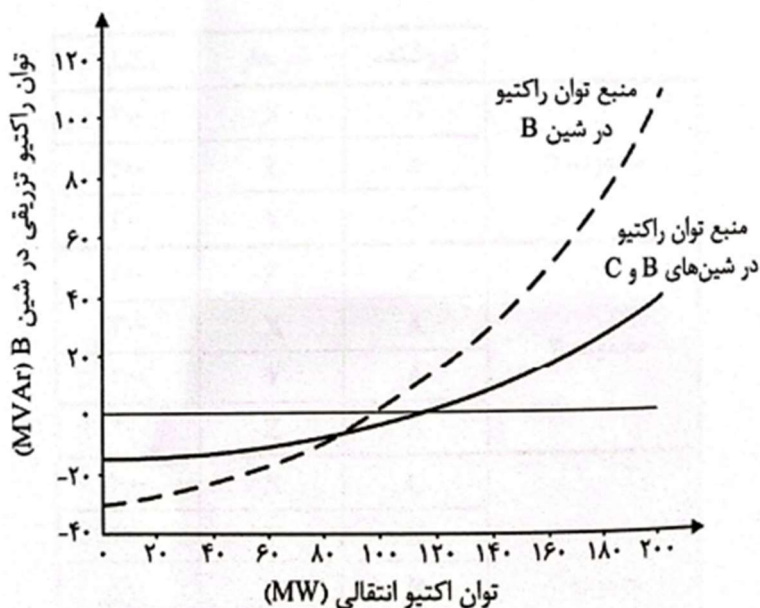
شکل ۳-۴: مقایسه توان راکتیو مورد نیاز در دو حالت قبلی

اگر منبع توان راکتیو به جای شین B در شین C قرار داشته باشد، هیچ راه مستقیمی برای کنترل و تثبیت ولتاژ شین B وجود ندارد. این وضعیت در شکل ۳-۵ نشان داده شده است. شایان ذکر است که وجود این منبع توان راکتیو در شین C امکان انتقال توان اکتیو بیشتری از A به B نسبت به زمانی که هیچ منبع توان راکتیوی وجود ندارد، فراهم می‌کند.



شکل ۳-۵: توان راکتیو مورد نیاز در شین C و ولتاژ شین B

از طرف دیگر اگر به صورت همزمان در هر دو شین B و C منبع توان راکتیو وجود داشته باشد، می‌توان مشاهده کرد که نیاز به توان راکتیو در شین B کاهش می‌یابد. این نتیجه در شکل ۳-۶ قابل مشاهده است.



شکل ۳-۶: وجود منبع جبرانساز توان راکتیو در هر شین

در پایان می‌توان گفت که این مطالعه روشن می‌سازد که مدیریت دقیق منابع توان راکتیو، عامل تعیین‌کننده‌ای در تضمین پایداری ولتاژ و افزایش ظرفیت انتقال در شبکه‌های قدرت است. تحلیل ارائه‌شده نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن عوامل مختلفی از جمله ضریب توان بار و موقعیت‌یابی منابع توان راکتیو، می‌توان پاسخ سیستم را در برابر رویدادهای ناگهانی بهبود بخشید و از فروپاشی ولتاژ جلوگیری کرد. به عبارت دیگر، تدوین

راهکارهای بهینه از منظر توان راکتیو می‌تواند زمینه‌ساز بهره‌برداری اقتصادی و ایمن‌تر شبکه‌های قدرت مدرن باشد.

همچنین توجه به این نکته که جبرانسازی توان راکتیو در این شرایط باید پیوسته و بسیار سریع باشد، قابل توجه است. جبرانسازهای سنتی چنین قابلیت‌هایی را ندارند و بدین منظور حتماً باید از جبرانسازهایی با قابلیت کنترل پیوسته توان راکتیو و سرعت پاسخ‌دهی بالا استفاده کرد. در فصل آینده با چنین جبرانسازهایی آشنا خواهیم شد.

فصل چهارم: ادوات FACTS²

جبرانسازهای استاتیک

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف‌پذیر که به نام FACTS شناخته می‌شوند، در سال‌های اخیر به عنوان یک اصطلاح شناخته‌شده برای افزایش کنترل‌پذیری در سیستم‌های قدرت به وسیله دستگاه‌های الکترونیک قدرت مطرح شده‌اند. چندین دستگاه FACTS برای کاربردهای مختلف در سراسر جهان معرفی شده‌اند. حتی مفاهیم بیشتری از پیکربندی‌های دستگاه‌های FACTS در پژوهش‌ها و مقاله‌ها مورد بحث قرار گرفته‌اند.

در بسیاری از کاربردهای سیستم قدرت، افزایش کنترل‌پذیری شبکه کمک می‌کند تا نیاز به توسعه‌های پرهزینه یا جاگیر، مانند احداث یا ارتقای پست‌ها و خطوط انتقال جدید، کاهش یابد. به جای این توسعه‌ها، استفاده از ادوات FACTS این امکان را فراهم می‌کند که شبکه به شکل

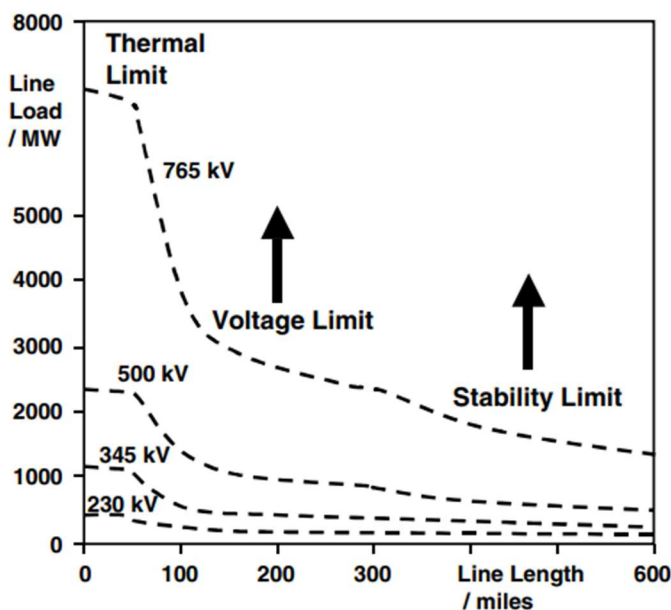
² Flexible AC Transmission System

انعطاف‌پذیرتری با شرایط عملیاتی متغیر سازگار شود و در نتیجه از تجهیزات و تأسیسات موجود بهره‌برداری بهتری صورت گیرد. کاربردهای اساسی ادوات FACTS عبارتند از:

- کنترل سیلان توان^{۲۲}،
- افزایش قابلیت انتقال،
- کنترل ولتاژ،
- جبرانسازی توان راکتیو،
- بهبود پایداری،
- بهبود کیفیت توان،
- تنظیم توان،
- کاهش فلیکر (نوسانات ولتاژ)،
- اتصال تولیدات و ذخیره‌سازهای تجدیدپذیر و توزیع شده.

در تمامی کاربردها، الزامات عملی، نیازها و مزایا باید به دقت بررسی شوند تا سرمایه‌گذاری در یک دستگاه جدید و پیچیده توجیه شود. شکل ۴-۱ ایده اساسی FACTS برای سیستم‌های انتقال را نشان می‌دهد. استفاده از خطوط برای انتقال توان اکتیو، در حالت ایده‌آل باید برابر با حد حرارتی

باشد اما در عمل محدودیت‌هایی نظیر افت ولتاژ و پایداری گذرا مانع از بهره‌برداری از سیستم در حد حرارتی می‌شود. محدودیت‌های ولتاژ و پایداری باید با استفاده از دستگاه‌های مختلف FACTS جابجا شده و کاهش یابند. می‌توان دید که با افزایش طول خط، فرصت برای دستگاه‌های FACTS بیشتر و بیشتر می‌شود.



شکل ۳-۱: محدودیت‌های بهره‌برداری از خطوط انتقال با سطح ولتاژهای مختلف

تأثیر دستگاه‌های FACTS از طریق سوئیچ کردن و یا کنترل کردن جبرانسازهای موازی، جبرانسازهای سری یا کنترل شیف فاز به دست

می‌آید. این دستگاه‌ها از نظر الکتریکی به عنوان کنترل‌کننده‌های سریع جریان، ولتاژ یا امپدانس عمل می‌کنند. الکترونیک قدرت زمان واکنش بسیار کوتاه و به مراتب زیر یک ثانیه را فراهم می‌کند. در ادامه یک نمای کلی ساختاری از ادوات FACTS ارائه شده است. این دستگاه‌ها بسته به زمینه‌های کاربردی مختلف خود نگاشت داده شده‌اند.

۴-۱ مرور کلی

توسعه دستگاه‌های FACTS با رشد قابلیت‌های اجزای الکترونیک قدرت آغاز شده است. دستگاه‌هایی برای سطوح توان بالا در مبدل‌ها و برای سطوح ولتاژ بالا و حتی بسیار بالا در دسترس قرار گرفته‌اند. نقاط شروع کلی، عناصر شبکه‌ای هستند که بر توان راکتیو یا امپدانس بخشی از سیستم قدرت تأثیر می‌گذارند. شکل ۴-۲ تعدادی از دستگاه‌های پایه را نشان می‌دهد که به دو دسته دستگاه‌های مرسوم^۳ و ادوات FACTS تقسیم می‌شوند.

در مورد ادوات FACTS، طبقه‌بندی به صورت 'دینامیک' و 'استاتیک' نیاز به توضیح دارد. اصطلاح 'دینامیک' برای بیان کنترل‌پذیری سریع دستگاه‌های FACTS توسط الکترونیک قدرت استفاده می‌شود. این یکی از عوامل اصلی تمایز از دستگاه‌های متعارف است. اصطلاح 'استاتیک' به این معنی است که دستگاه‌ها قطعات متحرک مانند کلیدهای مکانیکی برای

انجام کنترل‌پذیری دینامیک ندارند. بنابراین بیشتر ادوات FACTS می‌توانند هم استاتیک و هم دینامیک باشند.

ستون سمت چپ در شکل ۴-۱ شامل دستگاه‌های مرسوم ساخته شده از اجزای ثابت یا مکانیکی سوئیچ‌پذیر مانند مقاومت، سلف یا خازن همراه با ترانسفورماتورها است. ادوات FACTS نیز این عناصر را دارند اما از دریاچه‌های الکترونیک قدرت یا مبدل‌های اضافی برای سوئیچ کردن عناصر در مراحل کوچکتر یا با الگوهای سوئیچ کردن در یک چرخه جریان متناوب استفاده می‌کنند. ستون سمت چپ دستگاه‌های FACTS از دریاچه‌های تریستور یا مبدل‌ها استفاده می‌کند. این دریاچه‌ها یا مبدل‌ها از چندین سال پیش به خوبی شناخته شده‌اند. آنها تلفات کمی دارند زیرا فرکانس سوئیچ کردن آنها یک بار در هر چرخه (سیکل) است. ستون سمت راست دستگاه‌های FACTS شامل فناوری پیشرفته‌تری از مبدل‌های منبع ولتاژ است که امروزه عمدتاً بر اساس ترانزیستورهای دوقطبی با گیت عایق‌شده^{۲۵} (IGBT) یا تریستورهای گموتاسیونی گیت عایق‌بندی شده^{۲۶} (IGCT) می‌باشد. مبدل‌های منبع ولتاژ به دلیل مدولاسیون پهنای پالس^{۲۷} IGBTها یا IGCTها، ولتاژ قابل‌کنترلی را در اندازه و فاز دلخواه فراهم می‌کنند. فرکانس‌های مدولاسیون بالا امکان دستیابی به هارمونیک‌های کم در سیگنال خروجی و حتی جبران اختلالات شبکه را فراهم می‌کند. نقطه ضعف این فناوری این است که با افزایش فرکانس سوئیچینگ، تلفات نیز

² Valve

4

² Insulated Gate Bipolar Transistor

² Insulated Gate Commutated⁶ Thyristor

² Pulse Width Modulation ⁷

افزایش می‌یابد. بنابراین، طراحی‌های ویژه‌ای برای مبدل‌ها لازم است تا این مسئله را جبران کنند.

در هر ستون، عناصر می‌توانند بر اساس اتصال‌شان به سیستم قدرت ساختاربندی شوند. تجهیزات موازی عمده‌تاً برای جبران توان راکتیو و در نتیجه کنترل ولتاژ هستند. در مقایسه با جبران مکانیکی سوئیچ‌شده، SVC^8 (جبران‌ساز توان راکتیو استاتیک) کنترل نرم‌تر و دقیق‌تری را ارائه می‌دهد. این دستگاه پایداری شبکه را بهبود می‌بخشد و می‌تواند به سرعت با شرایط جدید سازگار شود.⁹ STATCOM (جبران‌ساز استاتیک) یک گام فراتر می‌رود و قادر است کیفیت توان را در مقابل افت‌ها و نوسانات ولتاژ بهبود بخشد.

دستگاه‌های سری برای جبران توان راکتیو استفاده می‌شوند. با تأثیرگذاری بر امپدانس موثر خط، آن‌ها بر پایداری و سیلان توان تأثیر می‌گذارند. این دستگاه‌ها بر روی سکوهایی¹⁰ به صورت سری با خط نصب می‌شوند. بیشتر تولیدکنندگان جبران‌ساز سری را که معمولاً در یک پیکربندی ثابت استفاده می‌شود، به عنوان یک دستگاه FACTS در نظر می‌گیرند. دلیل این امر این است که بیشتر قطعات و تنظیمات سیستم نیازمند دانش مشابه با سایر ادوات FACTS هستند. در برخی موارد، جبران‌ساز سری با یک پل تریستوری محافظت می‌شود. کاربرد اصلی¹¹ TCSC

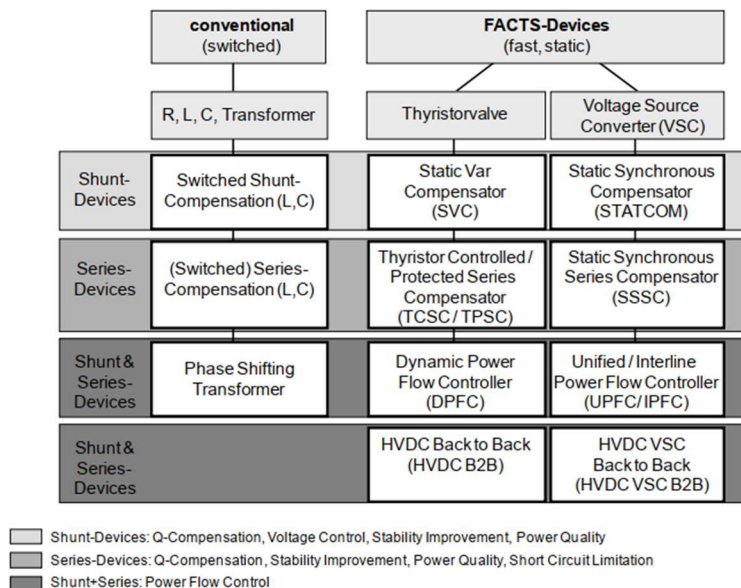
² Static VAr Compensator 8

² Static Compensator 9

³ Platform 0

³ Thyristor Controlled Series Compensator

(جبرانساز سری کنترل شده با تریستور) برای کاهش نوسانات بین منطقه‌ای و در نتیجه بهبود پایداری است، اما همچنین تأثیری بر سیلان توان دارد.



شکل ۴-۲: ادوات FACTS در یک نگاه کلی

^۱ SSSC (جبرانساز سری سنکرون استاتیک) در سطح انتقال کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد زیرا جبرانساز سری و TCSC تمامی نیازهای امروز را با هزینه کمتری برآورده می‌کنند. اما کاربردهای سری مبدل‌های

¹ Static Synchronous Series Compensator

منبع ولتاژ برای کاربردهای کیفیت توان در سطح توزیع پیاده‌سازی شده‌اند، مثلاً برای محافظت از فیدرهای ورودی کارخانه‌ها در برابر افت و نوسانات ولتاژ. این دستگاه‌ها به عنوان جبران‌ساز ولتاژ دینامیک (DVR) یا جبران‌ساز ولتاژ استاتیک (SVR) شناخته می‌شوند.

اهمیت ادوات FACTS در پیکربندی شنت و سری به طور فزاینده‌ای رو به رشد است. این دستگاه‌ها برای کنترل‌پذیری سیلان توان استفاده می‌شوند. نوسانات بیشتر سیلان توان به دلیل فعالیت‌های بازار انرژی، نیاز به استفاده انعطاف‌پذیرتری از ظرفیت انتقال دارد. دستگاه‌های کنترل سیلان توان، سیلان‌های توان را از بخش‌های پر بار سیستم قدرت به مناطق با ظرفیت انتقال آزاد منتقل می‌کنند.

ترانسفورماتورهای شیف‌ت فاز (PST) رایج‌ترین دستگاه در این بخش هستند. محدودیت آن‌ها سرعت کنترل پایین به همراه سایدگی و نگهداری بالا در عملیات مکرر است. به عنوان جایگزینی با کنترل‌پذیری کامل و سریع، کنترل‌کننده سیلان توان یکپارچه (UPFC) از چندین سال پیش بیشتر در مقاله‌های علمی و همچنین در برخی نصب‌های آزمایشی شناخته شده است. UPFC کنترل سیلان توان به همراه کنترل مستقل ولتاژ را فراهم می‌کند. عیب اصلی این دستگاه هزینه بالای آن به دلیل پیچیدگی سیستم است. این دستگاه به ویژه برای مطالعات و تحقیقات برای مشخص

^۱Dynamic Voltage Restorer

^۲Static Voltage Restorer

^۳Phase Shifting Transformer

^۴Unified Power Flow Controller

کردن نیازها و مزایای نصب FACTS جدید اهمیت دارد. تمامی دستگاه‌های ساده‌تر اگر توانایی آن‌ها برای یک وضعیت خاص کافی باشد می‌توانند از UPFC مشتق شوند. دستگاه‌های پیچیده‌تری مانند کنترل‌کننده سیلان توان بین‌خطی (IPFC) و کنترل‌کننده سیلان توان یکپارچه عمومی (GUPFC) از UPFC مشتق شده‌اند که کنترل‌پذیری سیلان توان را در بیش از یک خط از یک پست پیاده می‌کنند.

بین UPFC و PST، یک شکاف برای دستگاهی با قابلیت سیلان توان دینامیک اما با تنظیمات ساده‌تر از UPFC وجود داشت. کنترل‌کننده سیلان توان دینامیک (DPFC) به تازگی برای پر کردن این شکاف معرفی شده است. ترکیب یک PST کوچک با خازن‌ها و سلف‌های سوئیچ‌شده با ترستور، کنترل‌پذیری دینامیک را در بخشی از محدوده کنترل فراهم می‌کند. الزامات عملی به اندازه کافی برآورده می‌شوند تا سیلان توان را در شرایط بازار و همچنین در حین اضطرار جابجا کنند.

دستگاه‌های FACTS معمولاً به عنوان فناوری جدید تلقی می‌شوند، اما صدها نصب در سراسر جهان، به ویژه از SVC که از اوایل دهه ۱۹۷۰ تا سال ۲۰۰۵ توان نصب شده کل آن بیش از 90000MVA است، نشان‌دهنده پذیرش این نوع فناوری هستند. جدول ۴-۱ تعداد تخمینی دستگاه‌های FACTS نصب شده در سراسر جهان تا سال ۲۰۰۵ و توان نصب شده کل تخمینی را نشان می‌دهد. حتی توسعه‌های جدیدتر مانند

¹ Interline Power Flow Controller

² Generalized Unified Power Flow Controller

STATCOM یا TCSC نیز نشان‌دهنده نرخ رشد سریع در مناطق کاربردی خاص خود هستند.

جدول ۴-۱: تخمین تعداد ادوات FACTS نصب شده در سراسر جهان و مقدار توان آن‌ها

Type	Number	Total Installed Power in MVA
SVC	600	90.000
STATCOM	20	3.000
Series Compensation	700	350.000
TCSC	10	2.000
HVDC B2B	45	18.000
HVDC VSC B2B	1 + (12 with cable)	2250
UPFC	2-3	250

۴-۲ الکترونیک قدرت

الکترونیک قدرت دارای طیف گسترده‌ای از کاربردها از دریاهای ماشین‌های الکتریکی تا سیستم‌های تحریک، یکسوسازهای جریان بالا برای کارخانه‌های ذوب فلز، کنترل‌کننده‌های فرکانس یا قطارهای الکتریکی است. ادوات FACTS تنها یکی از کاربردهای این تکنولوژی‌ها در کنار سایر کاربردها است، اما از همان روندهای فناوری استفاده می‌کند. این روند با اولین یکسوسازهای ترستوری در سال ۱۹۶۵ آغاز شده و به مبدل‌های منبع ولتاژ مدولار IGBT یا IGCT امروزی رسیده است.

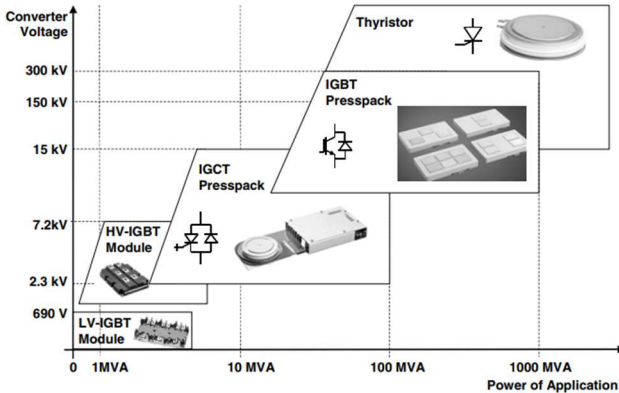
بدون تکرار مباحث نیمه‌هادی‌ها یا مبدل‌ها، بخش‌های زیر برخی اطلاعات پایه را فراهم می‌کنند.

۴-۲-۱ نیمه‌هادی‌ها

از زمان توسعه اولین ترისტور توسط جنرال الکتریک^۱ در سال ۱۹۵۷، اهداف برای نیمه‌هادی‌های قدرت شامل کاهش تلفات سوئیچینگ برای نرخ‌های بالای فرکانس سوئیچینگ و حداقل کردن تلفات هدایتی بوده است. نوآوری در حوزه ادوات FACTS عمدتاً توسط این پیشرفت‌ها هدایت می‌شود. امروزه تکنولوژی‌های ترისტور و ترانزیستور در دسترس هستند. شکل ۴-۳ محدوده‌های توان و ولتاژ برای کاربردهای نیمه‌هادی‌های خاص را نشان می‌دهد.

ترისტور یک دستگاه است که می‌تواند با دریافت یک پالس در گیت فعال شده و تا عبور از صفر بعدی جریان در حالت روشن باقی بماند. بنابراین، تنها یک سوئیچینگ در هر نیم سیکل ممکن است که این موضوع قابلیت کنترل را محدود می‌سازد.

^۱General Electric



شکل ۴-۳: محدوده ولتاژ و توان مبدل‌ها و کاربرد نیمه‌هادی‌های قدرت

تریستورها دارای بالاترین جریان و ولتاژ مسدود کننده هستند. این به این معناست که تعداد کمتری نیمه‌هادی برای یک کاربرد نیاز است. تریستورها به عنوان سوئیچ برای خازن‌ها یا سلف‌ها، در مبدل‌ها برای جبرانسازهای توان راکتیو یا به عنوان سوئیچ‌های حفاظتی برای مبدل‌های توان با استقامت کمتر استفاده می‌شوند.

تریستورها همچنان دستگاه‌های مورد استفاده برای کاربردهای بالاترین سطح ولتاژ و توان هستند. آنها بخشی از تجهیزات حیاتی ادوات FACTS پرکاربرد تا بزرگترین پروژه‌های HVDC با سطح ولتاژ بالای ۵۰۰ کیلوولت و توان بالای ۳۰۰۰ مگاوات آمپر می‌باشند.

برای افزایش قابلیت کنترل، تریستورهای GTO^۲ توسعه یافته‌اند که می‌توانند با یک پیک ولتاژ در گیت خاموش شوند. این دستگاه‌ها امروزه توسط تریستورهای گموتاسیونی گیت عایق‌بندی شده (IGCT) جایگزین

^۲High Voltage DC

^۳ Gate Turn Off

شده‌اند که مزیت ترستور، یعنی تلفات کم در حالت روشن، را با تلفات سوئیچینگ پایین ترکیب می‌کند. این نیمه‌هادی‌ها در ادوات FACTS کوچکتر و کاربردهای درایو استفاده می‌شوند.

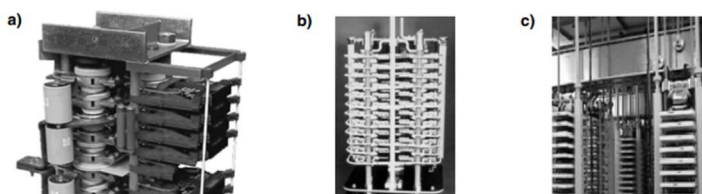
رفته رفته ترانزیستور دوقطبی گیت عایق‌بندی شده (IGBT) در حوزه ادوات FACTS اهمیت بیشتری پیدا کرده است. یک IGBT می‌تواند با یک ولتاژ مثبت روشن و با یک ولتاژ صفر خاموش شود. این امکان یک واحد کنترل گیت بسیار ساده را برای کنترل IGBT فراهم می‌کند. سطح ولتاژ و توان کاربردها در حال افزایش است و برای HVDC با مبدل‌های منبع ولتاژ، تا ۳۰۰ کیلوولت و ۱۰۰۰ مگاوات آمپر رشد کرده است. قابلیت IGBT امروزه کل طیف کاربردهای سیستم قدرت را پوشش می‌دهد.

یک موضوع مهم برای نیمه‌هادی‌های قدرت بسته‌بندی آنهاست تا اتصال قابل اطمینانی به واحد کنترل گیت فراهم شود. این مدار الکترونیکی علاوه بر کنترل نیمه‌هادی، نظارت و حفاظت آن را نیز تضمین می‌کند. توسعه‌ای در حوزه ترستورها تلاش می‌کند تا ترستور را با یک سیگنال نوری از طریق فیبر نوری تحریک کند. این امر اجازه می‌دهد تا نیمه‌هادی و واحد کنترل گیت از یکدیگر جدا شوند. مزیت این روش این است که مدار الکترونیکی می‌تواند از میدان الکترومغناطیسی بالای نزدیک به ترستور دور شود. عیب این روش این است که حفاظت از ترستور باید در خود ترستور پیاده‌سازی شود که منجر به یک قطعه بسیار پیچیده می‌شود. در این حالت، نظارت بر ترستور توسط واحد کنترل گیت نیز امکان‌پذیر نیست که منجر به معایبی برای کل مبدل می‌شود.

موضوع دوم برای بسته‌بندی، روی هم قرار دادن (پشته سازی) ادوات نیمه‌هادی است. برای دستیابی به سطح ولتاژ مورد نیاز برای کاربردهای سیستم قدرت، تعداد زیادی از دستگاه‌ها باید روی هم قرار گیرند و با اتصال سری تشکیل پشته بدهند.

بسته‌بندی مکانیکی پایدار باید توزیع جریان یکنواخت در نیمه‌هادی را تضمین کند. شکل ۴-۴ سه نمونه از IGCT ها، تریستورها و IGBT های روی هم قرار گرفته را نشان می‌دهد.

به عنوان مثال، بسته‌بندی IGBT به تفصیل توضیح داده خواهد شد. در شکل ۴-۵، یک IGBT پرس‌پک^۵ نشان داده شده است. هر زیرماژول حاوی نه پین^۶ است که شش عدد از آنها چیپ‌های IGBT و سه عدد چیپ‌های دیود هستند. بین دو تا شش زیرماژول می‌توانند در یک فریم یکپارچه شوند. پین‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که چیپ را با یک فنر بر روی یک صفحه آلومینیومی فشار دهند. هنگامی که کل ماژول روی هم



شکل ۴-۴: پشته‌های نیمه‌هادی‌ها. (a) توپولوژی سه سطحی IGCT فشار متوسط و 9MVA (b) SVC با دریچه‌های تریستوری (c) پشته فشار قوی IGBT برای STATCOM (منبع: ABB).

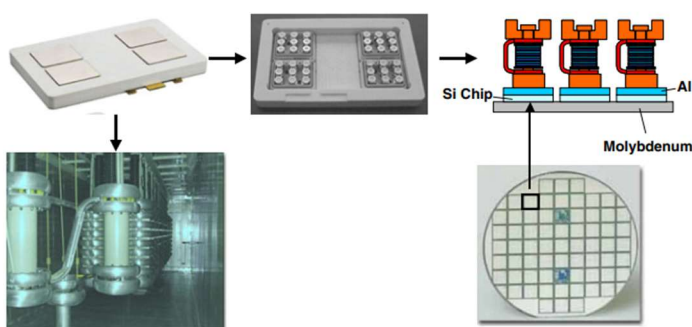
⁴ Stacking

⁵ Presspack

⁶ Pin

قرار می‌گیرد، زیرماژول‌ها با پین‌ها در فریم فشرده می‌شوند تا فریم‌ها به طور محکم روی یکدیگر قرار گیرند. با این روش، فشار به‌خوبی در تمام چیپ‌ها به‌طور یکنواخت توزیع می‌شود.

به دلیل تعداد زیاد چیپ‌ها در مبدل‌های سیستم قدرت، خرابی یک چیپ نباید منجر به اختلال در کل دستگاه FACTS شود. در صورت اتصال کوتاه یک چیپ، این چیپ با صفحه آلومینیومی ذوب شده و یک اتصال کوتاه پایدار بلندمدت برای ماژول فراهم می‌کند. مبدل به گونه‌ای طراحی شده است که تعداد بیشتری ماژول نسبت به نیاز روی هم قرار گیرد، به طوری که در فواصل تعمیر و نگهداری تعداد معینی بتوانند خراب شوند. همه این توسعه‌ها در حوزه نیمه‌هادی‌های قدرت و بسته‌بندی آنها منجر به تنظیمات سیستم قابل اطمینان امروزی شده است.



شکل ۴-۵: ماژول IGBT (یک کیلو آمپر و ۲,۵ کیلوولت) با چهار زیرماژول برای مبدل منبع ولتاژ (300MVA, $\pm 150\text{kV}_{\text{DC}}$) (منبع ABB)

۴-۲-۲ مبدل‌های قدرت

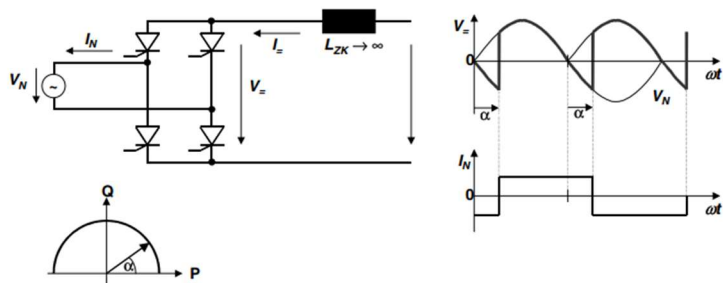
با شروع از ترისტور، می‌توان از آن به سادگی به عنوان یک سوئیچ استفاده کرد. کاربردهای ممکن شامل سلف‌ها یا خازن‌های سوئیچ شده با ترისტور است. قدم بعدی مبدل ترিসستوری است که در ساده‌ترین پیکربندی در شکل ۴-۶ نشان داده شده است. در این نیم‌پل، تایریستورها می‌توانند یک بار در هر نیم سیکل تریگر^۷ شوند. عبور از صفر بعدی جریان، ترისტور را مسدود می‌کند. در حالت ایده‌آل، جایی که سلف تغذیه در سمت DC بی‌نهایت است، جریان خروجی AC به صورت مستطیلی است که به معنای داشتن محتوای هارمونیک بسیار شدید است. اما به دلیل تعداد کم سوئیچینگ‌ها، تلفات سوئیچینگ پایین است. نمودار عملیاتی^۸ یک نیم سیکل بوده که به معنای کنترل جریان توان اکتیو است، اما توان راکتیو با نسبت مشخصی ثابت است.

برای رفع این محدودیت‌ها در کاربردهای FACTS، به‌ویژه زمانی که کنترل توان راکتیو نیز مدنظر است، باید از کلیدهای نیمه‌هادی استفاده شود که امکان خاموش و روشن شدن توسط سیگنال کنترلی را دارند. شکل ۴-۷ (سمت چپ) یک مدار نیم‌پل مبتنی بر IGBT را نشان می‌دهد. همین

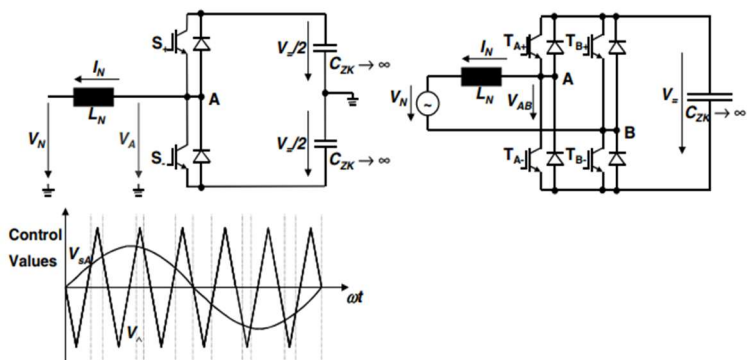
^۷Trigger

^۸Operational Diagram

آرایش را می‌توان با نیمه‌هادی‌های دیگری مثل GTO یا IGCT هم پیاده‌سازی کرد.



شکل ۴-۶: مبدل ترستوری نیم‌پل و نمودار عملیاتی آن



شکل ۴-۷: مبدل ولتاژ دو سطحی با مدولاسیون پهنای پالس. سمت چپ: نیم‌پل و سمت راست: تمام پل

برای قابلیت روشن و خاموش شدن باید الگوی سوئیچینگ مناسبی تعریف شود. ساده‌ترین راه‌حل، ترکیب یک ولتاژ مثلثی با یک ولتاژ مرجع به‌عنوان مقادیر کنترلی است. تغییر علامت اختلاف این دو سیگنال به‌طور متناوب باعث تحریک (تریگر) IGBT ها می‌شود. ولتاژ خروجی بین دو مقدار حداکثری جهش می‌کند. با افزایش تعداد سوئیچینگ‌ها، محتوای هارمونیک کاهش می‌یابد.

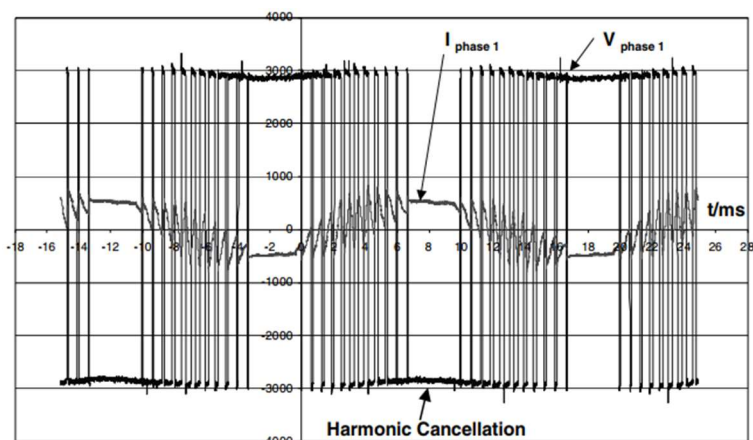
در سمت راست، یک مبدل تمام‌پل از دو پل IGBT استفاده می‌کند. خروجی، ولتاژ بین نقاط میانی ساق‌ها است. اکنون سه سطح مثبت، منفی و صفر، قابل تولید است و هارمونیک‌ها را بیشتر کاهش می‌دهد. این الگو همچنین می‌تواند با یک مبدل سه سطحی که در آن چهار IGBT و شش دیود در پل ساده استفاده می‌شوند، به دست آید.

در حالی که افزایش تعداد سوئیچینگ‌ها هارمونیک‌ها را کاهش می‌دهد، تلفات سوئیچینگ افزایش می‌یابد. برای کاربردهای عملی، باید بین هارمونیک‌ها، که به معنای فیلترینگ خروجی است، و تلفات مصالحه‌ای یافت. الگوی سوئیچینگ یک مبدل دو سطحی IGBT در شکل ۴-۸ نشان داده شده است. یک طرح سوئیچینگ خاص به نام لغو هارمونیک^۹ در اینجا به کار رفته است. در برخی از بازه‌های زمانی به جهت کاهش هارمونیک‌ها، سوئیچینگ متوقف می‌شود.

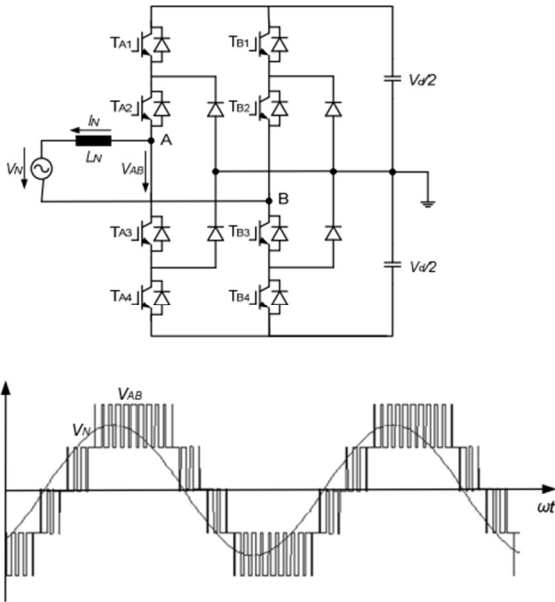
شکل ۴-۹ مبدل منبع ولتاژ سه‌سطحی با تکنولوژی مدولاسیون پهنای پالس (PWM) و شکل موج ولتاژ خط خروجی را نشان می‌دهد. برخلاف

^۹Harmonic Cancellation

مبدل منبع ولتاژ دوسطحی، این مبدل در هر فاز دارای ۴ IGBT است. برای مثال، در فاز A چهار IGBT به نام‌های TA1، TA2، TA3 و TA4 وجود دارد و دو دیود کلمپی بین TA1 و TA2، و بین TA3 و TA4 به ترتیب متصل شده‌اند. علاوه بر این، نقطه نول به نقطه‌ای که بین خازن‌های DC قرار دارد، متصل شده است. قانون سوئیچینگ برای مبدل سه‌سطحی این است که تنها دو IGBT کنار هم می‌توانند هم‌زمان روشن شوند، مانند TA1 و TA2، TA2 و TA3، یا TA3 و TA4. در این حالت، شکل موج ولتاژ خط خروجی V_{AB} در سه سطح قرار می‌گیرد که این امر نسبت به مبدل دوسطحی باعث کاهش هارمونیک‌ها می‌شود.



شکل ۴-۸: جریان و ولتاژ خروجی مبدل منبع ولتاژ دو سطحی با مدولاسیون PWM و لغو هارمونیک. فرکانس مدولاسیون $21 f(V_N)$

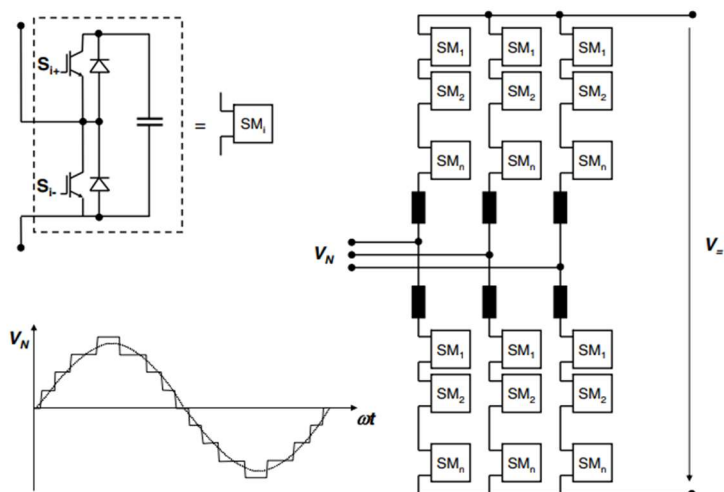


شکل ۹-۴: مبدل منبع ولتاژ سه سطحی با مدولاسیون پهنای پالس (PWM)

نوعی مبدل منبع ولتاژ که به تازگی برای کاربردهای FACTS و HVDC معرفی شده، مبدل چندسطحی مدولار^۱ (MMC) است. در این مبدل، ولتاژ AC با افزایش‌های کوچکتری نسبت به مبدل‌های دو یا سه سطحی ساخته می‌شود. این امر اندازه پله‌های ولتاژ و گرادیان‌های ولتاژ مرتبط را کاهش می‌دهد. با افزایش دقت در سطوح ولتاژ تولیدی، سطح هارمونیک‌ها کاهش می‌یابد. تلفات مبدل نیز به دلیل فرکانس سوئیچینگ

^۱ Modular Multilevel Converter

پایین تر نیمه‌رساناها کاهش می‌یابد. توپولوژی‌های چندسطحی مختلفی در مقاله‌های علمی معرفی شده‌اند. شکل ۴-۱۰ چندمان اصولی یک مبدل معرفی شده در [۸] را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۰: پیکربندی یک مبدل چند سطحی مدولار

این مبدل شامل شش شاخه است که هر شاخه حاوی تعدادی زیرمدول^۱ (SM_i) است که به صورت سری به هم متصل شده‌اند. هر زیرمدول شامل یک نیم پل IGBT و یک خازن DC است. سه حالت برای عملکرد مبدل مهم هستند:

- هر دو IGBT خاموش هستند: این حالت مبدل را بلوکه می‌کند.

^۱Sub Module

- IGBT Si⁺ روشن و IGBT Si⁻ خاموش است:

در این حالت، ولتاژ خازن برابر با ولتاژ دو سر زیرمدول است. بسته به جهت جریان، خازن شارژ یا دشارژ می‌شود.

- IGBT Si⁺ خاموش و IGBT Si⁻ روشن است:

در این حالت، جریان یا از طریق IGBT Si⁻ یا دیود مربوطه عبور می‌کند و ولتاژ دو سر زیرمدول صفر است. ولتاژ خازن بدون تغییر باقی می‌ماند.

بنابراین، هر زیرمدول می‌تواند به صورت مجزا کنترل شود و دو شاخه هر فاز، یک منبع ولتاژ قابل کنترل را تشکیل می‌دهند. با تنظیم نسبت ولتاژ شاخه مبدل، می‌توان ولتاژ سینوسی در پایانه‌های AC را کنترل کرد. قسمت پایین سمت چپ شکل ۴-۱۰ نشان می‌دهد که ولتاژ خروجی دارای هارمونیک‌های کم است.

مبدل‌های حتی پیچیده‌تری نیز در مقالات علمی پیشنهاد شده‌اند، اما افزایش تعداد عناصر نیمه‌رسانا هزینه را بیشتر از آنچه که کاهش تلفات یا هارمونیک‌ها توجیه کند، افزایش می‌دهد.

۴-۳ پیکربندی ادوات FACTS

۴-۳-۱ دستگاه‌های موازی

رایج‌ترین دستگاه FACTS، جبرانساز SVC یا نسخه‌ای از آن با مبدل منبع ولتاژ به نام STATCOM است. این دستگاه‌های موازی به عنوان جبرانسازهای توان راکتیو عمل می‌کنند. کاربردهای اصلی آنها در شبکه‌های انتقال، توزیع و صنعتی شامل موارد زیر است:

- کاهش جریان‌های ناخواسته توان راکتیو و در نتیجه کاهش تلفات شبکه
- حفظ تبادل توان قراردادی با توان راکتیو متعادل
- جبران‌سازی مصرف‌کنندگان و بهبود کیفیت توان به ویژه در صورت نوسانات زیاد دیماند مانند ماشین‌آلات صنعتی، کارخانه‌های ذوب فلزات، سیستم‌های راه‌آهن یا مترو،
- جبران‌سازی مبدل‌های تریستوری، به عنوان مثال در خطوط HVDC مرسوم
- بهبود پایداری استاتیک یا گذرا.

تقریباً نیمی از SVC ها و بیش از نیمی از STATCOM ها برای کاربردهای صنعتی استفاده می‌شوند. صنعت، همچنین گروه‌های تجاری و خانگی نیاز به کیفیت توان دارند. دیگر لامپ‌های پریپر کننده قابل قبول

نیستند، و همچنین وقفه در فرآیندهای صنعتی به دلیل کیفیت توان ناکافی قابل قبول نیست. به عنوان مثال، نیاز به افزایش تولید فولاد و قوانین مربوط به اختلالات شبکه، همراه با افزایش هزینه انرژی، جبرانسازی توان راکتیو را در صنعت فولاد ضروری کرده است. اخیراً توجه ویژه‌ای به اتصالات شبکه ضعیف با مشکلات شدید تثبیت ولتاژ شده است.

فرآیند ذوب فولاد نیاز به تثبیت ولتاژ پایدار و ثابت برای کوره قوس الکتریکی دارد. با جبرانسازی دینامیک توان راکتیو، نوسانات تصادفی ولتاژ که با یک کوره قوس مشخص می‌شود، به حداقل می‌رسد. این کاهش نوسانات ولتاژ با جبران مداوم مصرف توان راکتیو از کوره قوس حاصل می‌شود. نتیجه این کار بهبود کلی عملکرد کوره است که منجر به بهبود فرآیند و اقتصاد تولید می‌شود.

سیستم‌های راه‌آهن یا مترو با نوسانات بار زیاد نیاز به SVC ها یا STATCOM های مشابه با کاربرد فوق دارند. SVC یا STATCOM برای الزامات سخت‌تر کیفیت توان در دیگر فرآیندهای حیاتی کارخانه، مانند تولیدات الکترونیکی یا نیمه‌رساناها، نیز استفاده می‌شود.

یکی از حوزه‌های در حال رشد کاربرد ادوات FACTS، بخش انرژی‌های تجدیدپذیر یا توزیع شده^۱ است. به ویژه مزارع بادی دریایی با نوسانات تولید باید یک سطح توان راکتیو متعادل ارائه دهند و

^۱Distributed Energy Resources

محدودیت‌های ولتاژ را هم در داخل مزرعه بادی و هم در نقطه اتصال با شبکه اصلی حفظ کنند. بسیاری از دستگاه‌های تولید توزیع شده از طریق یک مبدل منبع ولتاژ مشابه STATCOM به شبکه متصل می‌شوند و تمام الزامات مربوط به عملکرد پایدار شبکه را برآورده می‌کنند.

SVC ۱-۱-۳-۴

بارهای الکتریکی می‌توانند توان راکتیو را تولید یا مصرف کنند. از آنجا که بار انتقالی به طور قابل توجهی از یک ساعت به ساعت دیگر تغییر می‌کند، تقاضای توان راکتیو در شبکه نیز تغییر می‌کند. نتیجه این تغییرات می‌تواند نوسانات غیرقابل قبول در دامنه ولتاژ یا حتی افت ولتاژ باشد و در بدترین حالت ممکن است منجر به فروپاشی ولتاژ شود. یک جبران‌ساز استاتیک توان راکتیو (SVC) که به سرعت عمل می‌کند، می‌تواند به طور مداوم توان راکتیو مورد نیاز برای کنترل نوسانات دینامیکی ولتاژ را تحت شرایط مختلف سیستم فراهم کند و بدین وسیله پایداری سیستم انتقال و توزیع را بهبود بخشد. نصب یک SVC در یک یا چند نقطه مناسب در شبکه می‌تواند ظرفیت انتقال را افزایش دهد و تلفات را کاهش دهد، در حالی که پروفایل ولتاژ را تحت شرایط مختلف شبکه به صورت یکنواخت حفظ می‌کند. علاوه بر این، یک SVC می‌تواند نوسانات توان اکتیو را از طریق مدولاسیون دامنه ولتاژ کاهش دهد.

تاسیسات SVC از چندین بلوک سازنده تشکیل شده است. مهمترین آنها، دریچه تریستوری^۳ است؛ یعنی مجموعه‌های پشته‌ای از تریستورهای متصل به صورت سری و موازی معکوس که امکان کنترل‌پذیری را فراهم می‌کنند. راکتورهای هسته‌هوایی و خازن‌های ولتاژ بالای AC به عنوان عناصر توان راکتیو به همراه دریچه‌های تریستوری استفاده می‌شوند. اتصال این تجهیزات به ولتاژ انتقال از طریق یک ترانسفورماتور قدرت حاصل می‌شود. دریچه‌های تریستوری به همراه سیستم‌های کمکی در داخل یک ساختمان SVC قرار دارند، در حالی که راکتورهای هسته‌هوایی و خازن‌ها به همراه ترانسفورماتور قدرت در فضای باز نصب می‌شوند.

به طور اصولی، SVC شامل خازن‌های سوئیچ شده با تریستور^۴ (TSC) و راکتورهای سوئیچ شده با تریستور^۵ یا راکتورهای کنترل شده با تریستور^۶ (TSR / TCR) است. کنترل هماهنگ ترکیبی از این شاخه‌ها توان راکتیو را به گونه‌ای که در شکل ۴-۱۱ نشان داده شده است، تغییر می‌دهد.

اولین SVC تجاری در سال ۱۹۷۲ برای یک کوره قوس الکتریکی نصب شد. اولین SVC در سطح انتقال در سال ۱۹۷۹ مورد استفاده قرار گرفت. از آن زمان به بعد، این دستگاه به طور گسترده استفاده شده و به

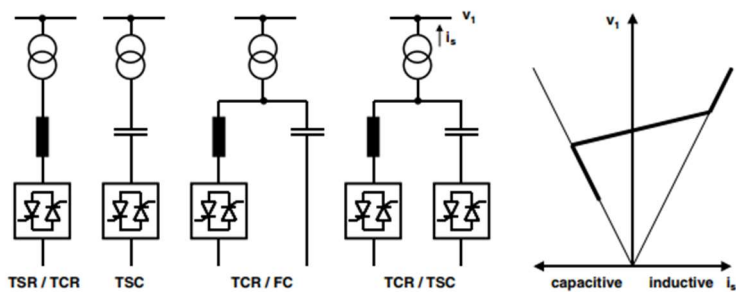
^۱ Thyristor Valve 3

^۲ Thyristor Switched Capacitor

^۳ Thyristor Switched Reactors

^۴ Thyristor Controlled Reactors

عنوان مقبول‌ترین دستگاه FACTS شناخته می‌شود. یک نصب اخیر از SVC در شکل ۴-۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۱: انواع SVC و مشخصه ولتاژ-جریان



شکل ۴-۱۲: یک نمونه SVC واقعی (منبع ABB)

STATCOM ۲-۱-۳-۴

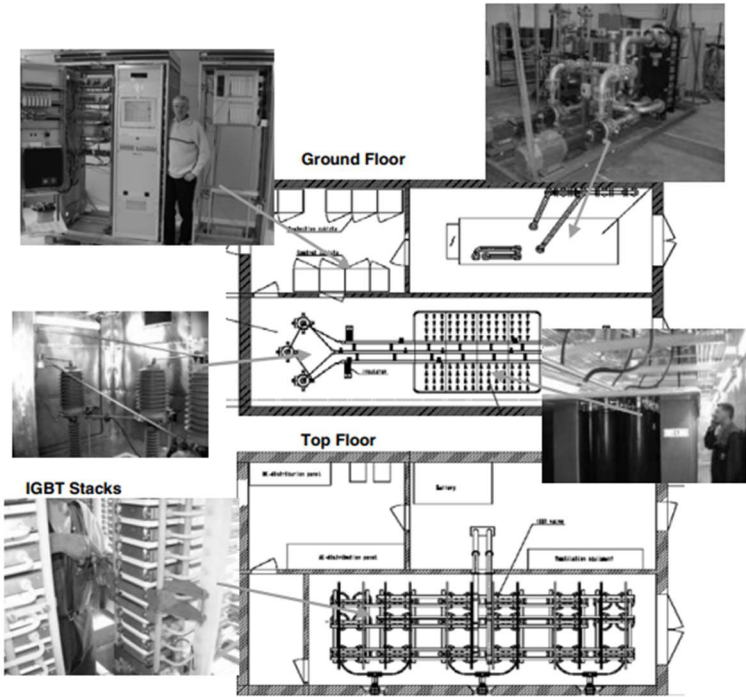
در سال ۱۹۹۹ اولین SVC با مبدل منبع ولتاژ که STATCOM نام گرفت به بهره‌برداری رسید. نام این محصول ترکیب دو کلمه STATic و COMPensator است. STATCOM مشخصه‌ای شبیه به کندانسور سنکرون^۷ دارد اما به جای آنکه یک تجهیز مکانیکی باشد، یک تجهیز الکترونیکی است و اینرسی هم ندارد. STATCOM از چندین جهت بر

^۷Synchronous Condenser

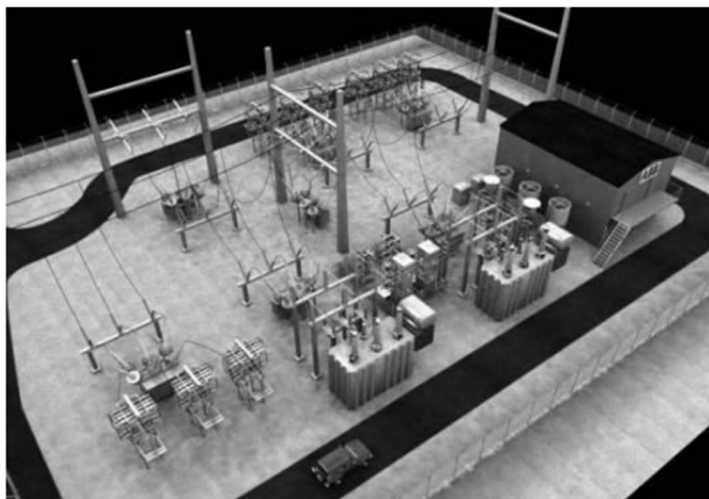
کندانسور سنکرون برتری دارد، از جمله دینامیک بهتر و هزینه تعمیر و نگهداری کمتر.

یک STATCOM با استفاده از تریستورهای با قابلیت خاموشی مانند GTO یا امروزه IGCT و به طور فزاینده‌ای با IGBT ها ساخته می‌شود. ساختار و ویژگی‌های عملیاتی آن در شکل ۴-۱۳ نشان داده شده است. خط استاتیک بین محدودیت‌های جریان دارای شیب معینی است که ویژگی‌های کنترل ولتاژ را تعیین می‌کند. مزیت یک STATCOM این است که تأمین توان راکتیو به ولتاژ واقعی باس در نقطه اتصال وابسته نیست. این را می‌توان در نمودار برای حداکثر جریان‌ها مشاهده کرد که نسبت به ولتاژ مستقل است، در مقایسه با SVC در شکل ۴-۱۱ این بدان معناست که حتی در شدیدترین شرایط اضطراری، STATCOM قابلیت کامل خود را حفظ می‌کند.

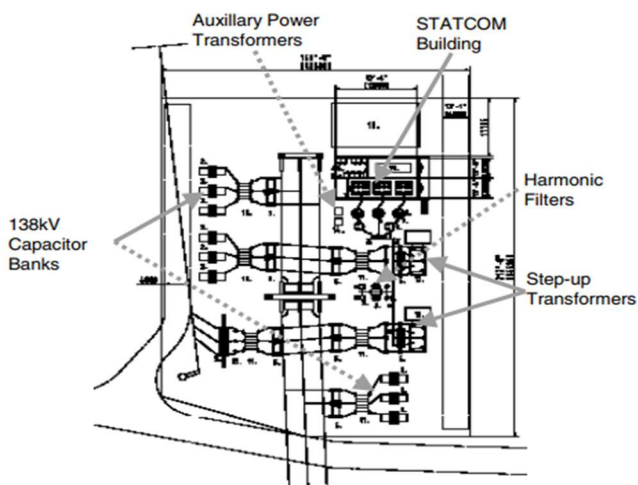
در منابع انرژی پراکنده، استفاده از مبدل منبع ولتاژ برای اتصال به شبکه به یک روش معمول تبدیل شده است. گام بعدی در توسعه STATCOM، ترکیب آن با ذخیره‌سازهای انرژی در سمت DC است. عملکرد برای افزایش کیفیت توان و بهره‌برداری متعادل شبکه می‌تواند با ترکیب توان اکتیو و راکتیو بهبود یابد. شکل‌های ۴-۱۴ تا ۴-۱۶ یک نمای کلی از STATCOM در سطح انتقال به عنوان بخشی از یک پست انتقال را نشان می‌دهند.



شکل ۴-۱۴: آرایش نوعی یک STATCOM (منبع ABB)



شکل ۴-۱۵: پستی که STATCOM در آن نصب شده است



شکل ۴-۱۶: آرایش یک پست نوعی به همراه STATCOM

۴-۳-۲ دستگاه‌های سری

دستگاه‌های سری از جبران‌سازی‌های ثابت یا مکانیکی به جبران‌سازی سری کنترل‌شده با تریستور^۱ (TCSC) یا حتی دستگاه‌های مبتنی بر مبدل منبع ولتاژ (VSC) توسعه یافته‌اند. کاربردهای اصلی آنها عبارتند از:

- کاهش افت اندازه و زاویه ولتاژ سری روی یک خط انتقال
- کاهش نوسانات ولتاژ در محدوده‌های تعریف‌شده در حین تغییرات انتقال توان
- بهبود میرایی سیستم یا میرایی نوسانات
- محدود کردن جریان‌های کوتاه‌مدت در شبکه‌های قدرت یا پست‌ها
- جلوگیری از جریان‌های حلقه‌ای یا تنظیم جریان‌های قدرت.

۴-۳-۱ جبران‌سازی سری

اولین جبران‌سازی سری در سطح انتقال که امروزه توسط تولیدکنندگان به عنوان دستگاه FACTS شمرده می‌شود، در سال ۱۹۵۰ به بهره‌برداری رسید. جبران‌سازی سری به منظور کاهش راکتانس خط انتقال در فرکانس نامی استفاده می‌شود. نصب خازن سری، توان راکتیو تولید می‌کند که به

¹ Thyristor Controlled Series Compensation

صورت خودتنظیم بخشی از راکتانس خط را متعادل می‌کند. نتیجه این کار این است که خط به صورت الکتریکی کوتاه‌تر می‌شود که بهبود پایداری زاویه‌ای، پایداری ولتاژ و تقسیم توان بین خطوط موازی را به همراه دارد. خازن‌های سری همانطور که از نامشان پیداست به صورت سری با یک خط انتقال نصب می‌شوند، نتیجه این که تمام تجهیزات باید بر روی یک سکوی^۹ کاملاً عایق نصب شوند. در این سکو، خازن اصلی به همراه مدارهای حفاظت در برابر اضافه ولتاژ قرار دارد. حفاظت اضافه ولتاژ یک عامل طراحی کلیدی است، زیرا بانک خازنی باید بتواند جریان خطا را حتی در صورت وقوع خطای شدید در نزدیکی آن تحمل کند. حفاظت اولیه اضافه ولتاژ معمولاً شامل ورستورهای غیرخطی از نوع اکسید فلزی، یک شکاف جرقه^{۱۰} و یک کلید بای‌پس سریع است. حفاظت ثانویه با استفاده از الکترونیک‌های نصب‌شده بر روی زمین که به سیگنال‌های حسگرهای نوری جریان در مدار ولتاژ بالا پاسخ می‌دهند، به دست می‌آید. اگرچه این دستگاه چندین سال است که شناخته شده است، توسعه و بهبود آن همچنان ادامه دارد. یکی از پیشرفت‌های اخیر استفاده از خازن‌های خشک با چگالی انرژی بالاتر و سازگاری بیشتر با محیط زیست است. به عنوان حفاظت اولیه، می‌توان از کلیدهای تریستوری استفاده کرد، اما گزینه‌های ارزان‌تری که تقریباً همان قابلیت را با استفاده از شکاف‌های

^۹Platform

^۲ Over Voltage Protection 0

^۲ Spark Gap 1

جرقه‌ای تحریک‌شده و مدارشکن‌های خاص بدون الکترونیک قدرت دارند، اخیراً توسعه یافته‌اند.

یک کاربرد ویژه از جبران‌سازی سری می‌تواند با ترکیب آن با یک راکتانس سری برای ایجاد محدودکننده جریان خطا حاصل شود. هر دو مؤلفه در حالت عادی یکدیگر را خنثی می‌کنند. در صورت وقوع خطا، جبران‌سازی سری با یک دستگاه حفاظتی سریع یا یک پل تریستوری پل شده و از مدار خارج می‌شود. راکتانس باقی‌مانده، جریان خطا را محدود می‌کند. نصب‌های آزمایشی از این پیکربندی سیستم در حال حاضر مورد استفاده قرار گرفته‌اند.



شکل ۴-۱۷: جبران‌سازی سری با خازن سری (منبع ABB)

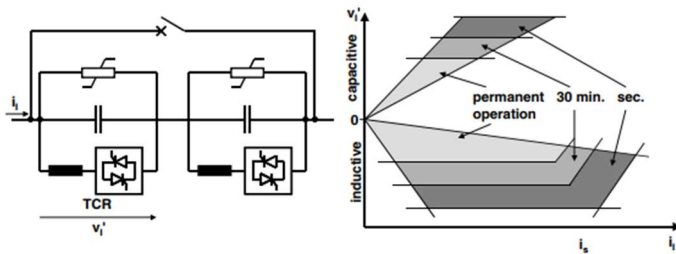
TCSC ۲-۲-۳-۴

خازن‌های سری کنترل‌شده با تریستور (TCSC) به مشکلات دینامیکی خاص در سیستم‌های انتقال می‌پردازند. اولاً، این دستگاه‌ها میرایی سیستم را هنگامی که سیستم‌های الکتریکی بزرگ به هم متصل می‌شوند، افزایش می‌دهند. ثانیاً، می‌توانند مشکل رزونانس‌های زیر سنکرون (SSR)^۲، پدیده‌ای که شامل تعامل بین واحدهای تولید حرارتی بزرگ و سیستم‌های انتقال جبرانسازی شده سری است، را برطرف کنند. قابلیت سوئیچینگ سریع TCSC مکانیزمی برای کنترل سیلان توان خط فراهم می‌آورد که این امکان را برای بارگذاری بیشتر خطوط انتقال موجود فراهم می‌کند و اجازه می‌دهد تا سیلان توان خط به سرعت در پاسخ به شرایط اضطراری مختلف تنظیم شود. TCSC همچنین می‌تواند سیلان توان پایدار را در محدوده‌های مجاز خود تنظیم کند.

از نظر تکنولوژی اصلی، TCSC به خازن سری معمولی شباهت دارد. تمام تجهیزات قدرت بر روی یک سکو از جنس فولاد عایق شده قرار دارند، از جمله دريچه تریستوری که برای کنترل رفتار بانک خازن اصلی استفاده می‌شود. همچنین سیستم کنترل و حفاظت بر روی پتانسیل زمین به همراه سایر سیستم‌های کمکی قرار دارند. شکل ۴-۱۸ ساختار اصلی

^۲Sub Synchronous Resonance

یک TCSC و نمودار عملیاتی آن را نشان می‌دهد. زاویه آتش و محدودیت‌های حرارتی ترستورها مرزهای نمودار عملیاتی را تعیین می‌کنند.



شکل ۴-۱۸: ساختار اصلی و نمودار عملیاتی یک TCSC



شکل ۴-۱۹: یک TCSC واقعی (منبع ABB)

اصول اصلی مفهوم TCSC دو مورد است؛ اولاً، فراهم آوردن میرایی الکترومکانیکی بین سیستم‌های الکتریکی بزرگ از طریق تغییر راکتانس یک خط اتصال خاص، یعنی TCSC راکتانس خازنی متغیری را فراهم می‌کند. ثانیاً، TCSC باید امیدانس ظاهری خود (به عنوانی که از دید جریان خط مشاهده می‌شود) را برای فرکانس‌های زیر سنکرون تغییر دهد تا از بروز رزونانس زیر سنکرون جلوگیری کند. هر دو هدف به وسیله یک TCSC با استفاده از الگوریتم‌های کنترلی که به طور همزمان عمل می‌کنند تحقق می‌یابد. این کنترل‌ها بر روی مدار ترستور به طور موازی با بانک خازن اصلی عمل خواهند کرد به طوری که بارهای کنترل‌شده به خازن اصلی اضافه می‌شود و آن را در فرکانس پایه به یک خازن متغیر و در فرکانس‌های زیرسنکرون به یک "القاگر مجازی"^۳ تبدیل می‌کند. شکل ۴-۱۹ یک TCSC در سطح انتقال را نشان می‌دهد. اولین TCSC در سال ۱۹۹۶ به بهره‌برداری رسید.

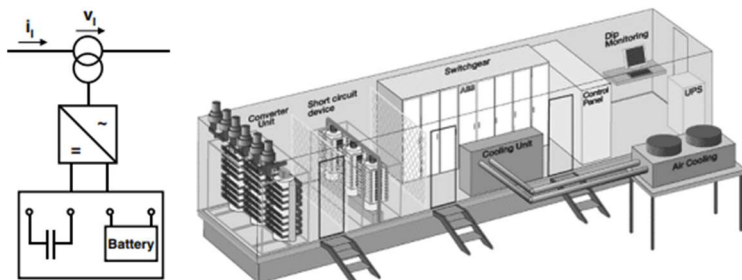
۴-۳-۲-۳-۴ SSSC

در حالی که TCSC می‌تواند به عنوان یک راکتانس سری مدل‌سازی شود، SSSC یک منبع ولتاژ سری است. پیکربندی اصلی آن در شکل ۴-۲۰ نشان داده شده است که اساساً شبیه به STATCOM به نظر می‌رسد. اما در واقع، این دستگاه به دلیل نصب بر روی سکو و حفاظت پیچیده‌تر است.

حفاظت تریستور به شدت ضروری است، به دلیل ظرفیت پایین اضافه بار نیمه‌هادی‌ها، به ویژه زمانی که از IGBT ها استفاده می‌شود. مبدل منبع ولتاژ به همراه حفاظت تریستور هزینه دستگاه را بسیار بیشتر می‌کند، در حالی که عملکرد بهتر آن نمی‌تواند در سطح انتقال مورد استفاده قرار گیرد. اما اگر به کاربردهای کیفیت توان نگاه کنیم، قضیه کاملاً متفاوت است. این دستگاه سپس به نام بازیاب ولتاژ دینامیک^۴ (DVR) شناخته می‌شود. DVR برای حفظ سطح ولتاژ ثابت، به عنوان مثال در تغذیه یک کارخانه، استفاده می‌شود. به کمک این تجهیزات افت‌های ولتاژ و فلیکر می‌توانند کاهش یابند. مدت زمان عملکرد بسته به انرژی ذخیره‌شده در خازن DC، محدود است. با مکانیزم شارژ یا باتری در سمت DC، دستگاه می‌تواند به عنوان یک منبع تغذیه بی‌وقفه^۵ عمل کند. تصویری از یک نصب مدولار با 22 MVA در سمت راست شکل ۴-۲۰ نشان داده شده است.

^۴Dynamic Voltage Restorer

^۵Uninterruptible Power supply



شکل ۴-۲۰: ساختار اصلی SSSC و پیاده‌سازی آن به عنوان DVR برای کاربردهای کیفیت توان

SCCL^{۲۴}-۲-۳-۴

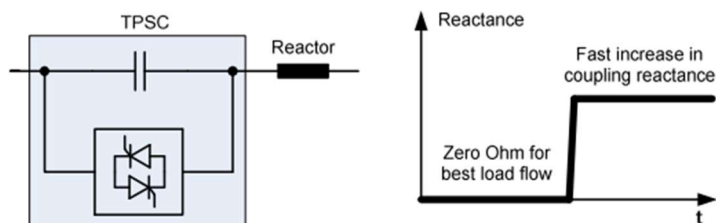
به عنوان یک نوع دستگاه محدودکننده جریان اتصال کوتاه دینامیکی با عنصر FACTS، خازن سری محافظت‌شده با تریستور^{۲۵} (TPSC) در کنار یک راکتانس سری می‌تواند جریان اتصال کوتاه را در عرض چند میلی‌ثانیه با افزایش سریع راکتانس کوپلینگ در پاسخ به یک اتصال کوتاه ناگهانی محدود کند. شکل ۴-۲۱ پیکربندی اصلی SCCL و نمودار عملیاتی آن را نشان می‌دهد.

در شرایط عادی و پایدار، با تطابق امپدانس بین TPSC و راکتور خارجی، امپدانس ترکیبی رفتار خازنی یا خشی نشان می‌دهد که مشابه جبرانسازی سری مانند TCSC است. در این حالت، SCCL می‌تواند برای

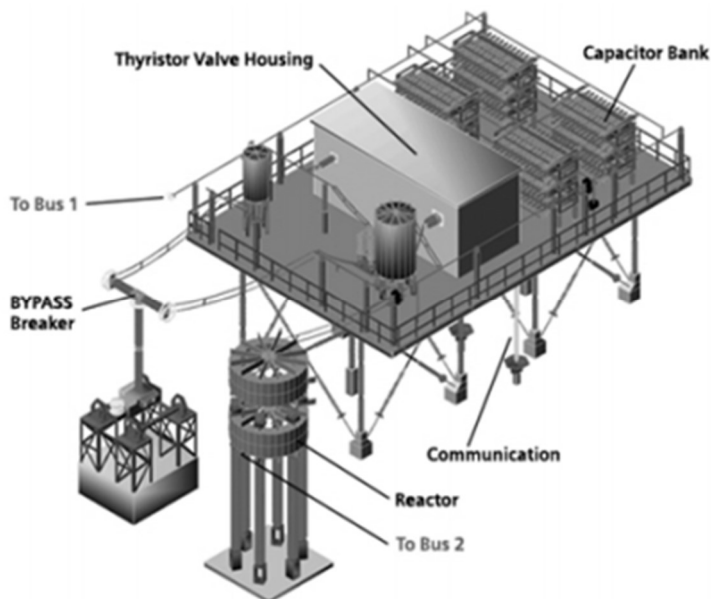
^{۲۴}Short Circuit Current Limiter

^{۲۵}Thyristor-Protected Series Capacitor

جبران امپدانس خط انتقال و بهبود پایداری سیستم استفاده شود. به محض وقوع یک اتصال کوتاه، TPSC به وسیله ترستور اتصال کوتاه می‌شود و راکتور جریان اتصال کوتاه را محدود می‌کند. شکل ۴-۲۲ یک نمای نوعی از SCCL را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۱: پیکربندی اصلی SCCL و نمودار عملیاتی آن



شکل ۴-۲۲: یک نمای نوعی از SCCL (منبع SIEMENS)

۴-۳-۳ دستگاه‌های سری - موازی

ظرفیت انتقال توان با توجه به محدودیت‌های رو به افزایش برای خطوط انتقال جدید و نوسانات بیشتر سیلان توان ناشی از فعالیت‌های بازار انرژی، اهمیت بیشتری پیدا کرده است.

۴-۳-۱ کنترل کننده دینامیک سیلان توان^{۲۸}

یک دستگاه جدید در زمینه کنترل سیلان توان، کنترل کننده دینامیک سیلان توان (DPFC) است. DPFC یک دستگاه ترکیبی بین ترانسفورماتور جابجایی فاز (PST) و جبرانساز سری با کلیدزنی است. یک دیگرام تک خطی عملکردی از کنترل کننده دینامیک جریان توان در شکل ۴-۲۳ نشان داده شده است. کنترل کننده دینامیک سیلان توان از اجزای زیر تشکیل شده است:

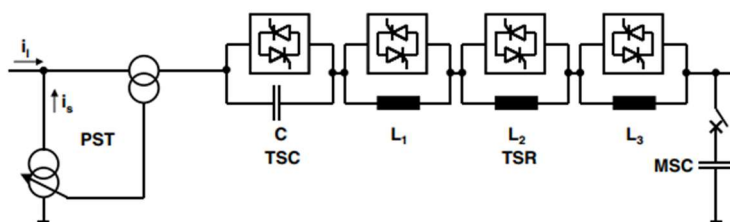
- یک ترانسفورماتور جابجایی فاز استاندارد با تعویض کننده تپ (PST)
 - خازن ها و راکتورهای سری با کلیدزنی تریستوری (TSC/TSR)
 - یک خازن موازی با کلیدزنی مکانیکی (MSC). (این مورد بر اساس نیازهای توان راکتیو سیستم به صورت اختیاری است).
- بر اساس نیازهای سیستم، یک DPFC ممکن است شامل تعدادی خازن های سری با کلیدزنی تریستوری (TSC) یا راکتورهای سری با کلیدزنی تریستوری (TSR) باشد. خازن موازی با کلیدزنی مکانیکی (MSC) در صورت بروز اضافه بار و شرایط دیگر، تثبیت ولتاژ را فراهم می کند. به طور معمول، راکتانس های راکتورها و خازن ها بر اساس مبنای باینری انتخاب می شوند تا منجر به تغییرات پله ای مطلوب در راکتانس

² Dymanic Power Flow Contròller

² Mechanically Switched Capâcitor

شود. اگر به دقت بالاتری در سیلان توان نیاز باشد، یک راکتانس معادل نصف کوچکترین مقدار ممکن می‌تواند اضافه شود.

کلیدزنی راکتورهای سری در جریان صفر انجام می‌شود تا از ایجاد هارمونیک‌ها جلوگیری شود. با این حال، به طور کلی، اصل کنترل زاویه



شکل ۴-۲۳: پیکربندی DPFC

فاز که در جبرانساز سری با کلیدزنی تریستوری (TCSC) استفاده می‌شود، می‌تواند برای کنترل پیوسته نیز به کار رود. عملکرد DPFC بر اساس قوانین زیر است:

- TSC/TSR زمانی که نیاز به پاسخ سریع است، سوئیچ می‌شوند.
- برطرف کردن اضافه‌بار و عملکرد در شرایط پرفشار توسط TSC/TSR انجام می‌شود.
- کلیدزنی تعویض‌کننده تپ PST باید به خصوص برای جریان‌های بالاتر از بار معمولی به حداقل برسد.

- مصرف توان راکتیو کل دستگاه می‌تواند با عملکرد MSC ، تعویض‌کننده تپ و خازن‌ها و راکتورهای کلیدزنی بهینه شود.

برای تجسم محدوده عملکردی حالت پایدار DPFC ، فرض می‌کنیم یک اندوکتانس به صورت موازی نمایانگر مسیرهای انتقال موازی است. هدف کلی کنترل در حالت پایدار، کنترل توزیع جریان بار بین شاخه‌ای که DPFC دارد و مسیر موازی است. این کنترل با کنترل ولتاژ سری تزریقی انجام می‌شود.

PST (با فرض استفاده از یک بوستر متعامد) ولتاژی را در حالت متعامد با ولتاژ گره تزریق می‌کند. راکتانس قابل کنترل، ولتاژی را در حالت متعامد با جریان عبوری تزریق می‌کند. با فرض اینکه جریان بار دارای ضریب بار نزدیک به یک است، دو بخش ولتاژ سری تقریباً هم‌فاز خواهند بود. با این حال، از نظر سرعت کنترل، تأثیر بر توازن توان راکتیو و کارایی در بارگذاری‌های بالا/پایین، دو بخش ولتاژ سری ویژگی‌های متفاوتی دارند.

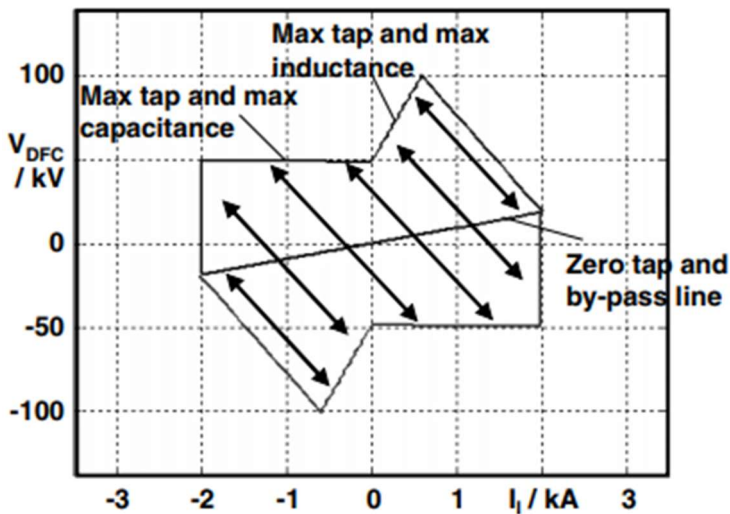
محدوده کنترل حالت پایدار برای بارگذاری‌ها تا جریان نامی در شکل ۴-۲۴ نشان داده شده است، که محور X نشان‌دهنده جریان عبوری و محور Y نشان‌دهنده ولتاژ سری تزریقی است.

عملکرد در ربع اول و سوم معادل کاهش توان عبوری از DPFC است، در حالی که عملکرد در ربع دوم و چهارم معادل افزایش جریان توان از طریق DPFC است. شیب خطی که از مبدأ می‌گذرد (در حالتی که تپ صفر است و TSC/TSR دور زده شده‌اند) به راکتانس اتصال کوتاه PST بستگی دارد.

با شروع از جریان نامی (۲ کیلوآمپر)، راکتانس اتصال کوتاه به تنهایی یک ولتاژ تزریقی فراهم می‌کند (تقریباً ۲۰ کیلوولت در این حالت). اگر اندوکتانس بیشتری سوئیچ شود ویا تپ افزایش یابد، ولتاژ سری افزایش می‌یابد و جریان عبوری از DPFC کاهش می‌یابد (و جریان در شاخه‌های موازی افزایش می‌یابد). نقطه عملکرد در امتداد خطوط موازی با پیکان‌ها در شکل حرکت می‌کند. شیب این پیکان‌ها به اندازه راکتانس موازی بستگی دارد.

حداکثر ولتاژ سری در ربع اول زمانی حاصل می‌شود که تمامی پله‌های القایی وارد مدار شده و تپ ترانسفورماتور در حداکثر خود قرار دارد. حال با فرض حداکثر تپ و اندوکتانس، اگر جریان عبوری کاهش یابد (مثلاً به دلیل تغییر در بار سیستم)، ولتاژ سری کاهش خواهد یافت. در جریان صفر، حضور یا عدم حضور پله‌های TSC/TSR اهمیتی نخواهد داشت و آن‌ها به ولتاژ سری کمکی نمی‌کنند. در نتیجه، ولتاژ سری در جریان صفر معادل ولتاژ سری نامی PST خواهد بود.

سپس، با حرکت به ربع دوم، محدوده عملکرد توسط خطی که متناظر با حداکثر تپ و پله خازنی وارد شده (و پله‌های القایی دور زده شده) است، محدود می‌شود. در این حالت، پله خازنی تقریباً به اندازه راکتانس اتصال کوتاه PST است، که منجر به ولتاژی تقریباً ثابت در ربع دوم می‌شود.



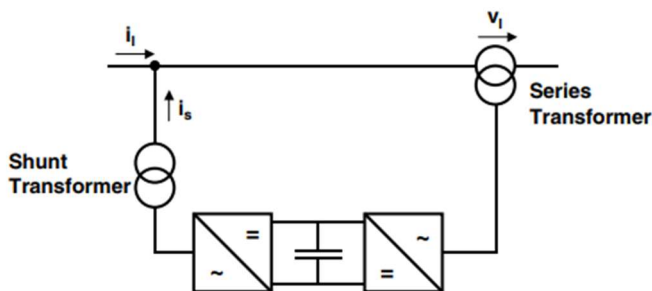
شکل ۴-۲۴: نمودار عملیاتی DPFC

۴-۳-۲ کنترل کننده سیلان توان یکپارچه (UPFC)

UPFC ترکیبی از یک جبرانساز استاتیک (STATCOM) و جبرانساز سری استاتیک (SSSC) است. این دستگاه به طور همزمان به عنوان جبرانساز موازی و دستگاه تغییر فاز عمل می کند.

UPFC شامل یک ترانسفورماتور موازی و یک ترانسفورماتور سری است که از طریق دو مبدل منبع ولتاژ با یک خازن DC مشترک به یکدیگر متصل می شوند. مدار DC امکان تبادل توان اکتیو بین ترانسفورماتور موازی و سری را فراهم می کند تا تغییر فاز ولتاژ سری را کنترل کند. این چیدمان، همان طور که در شکل ۴-۲۵ نشان داده شده است، کنترل کامل ولتاژ و سیلان توان را فراهم می کند.

مبدل سری باید با یک پل تریستوری محافظت شود. به دلیل هزینه های بالای مبدل های منبع ولتاژ و نیاز به حفاظت، UPFC هزینه بر است که این موضوع کاربردهای عملی آن را در مواردی که به کنترل همزمان ولتاژ و جریان توان نیاز است، محدود می کند.



شکل ۴-۲۵: پیکربندی UPFC

۴-۳-۳-۳ کنترل کننده سیلان توان بین خطی^{۳۱}

یکی از جدیدترین ادوات FACTS با نام جبرانساز استاتیک قابل تبدیل^{۳۲} (CSC) شناخته می شود و اخیراً به عنوان یک پروژه آزمایشی توسط سازمان برق نیویورک (NYPA) نصب شده است. هدف پروژه CSC افزایش ظرفیت انتقال توان و حداکثر استفاده از شبکه انتقال موجود است. در چارچوب مفهومی کلی CSC، دو دستگاه FACTS چند مبدله، یعنی کنترل کننده سیلان توان بین خطی (IPFC) و کنترل کننده یکپارچه جریان توان تعمیم یافته^{۳۳} (GUPFC)، از جمله پیکربندی های ممکن هستند. هدف این دستگاه ها کنترل سیلان توان در چندین خط یا یک زیر شبکه است، نه اینکه فقط سیلان توان یک خط واحد را، مانند DPFC یا UPFC، کنترل کنند.

IPFC ترکیبی از دو یا چند مبدل سری و GUPFC ترکیبی از یک مبدل موازی و دو یا چند مبدل سری است. نصب فعلی CSC توسط NYPA شامل دو مبدل است و می تواند به عنوان یک IPFC عمل کند اما به عنوان GUPFC قابل استفاده نیست.

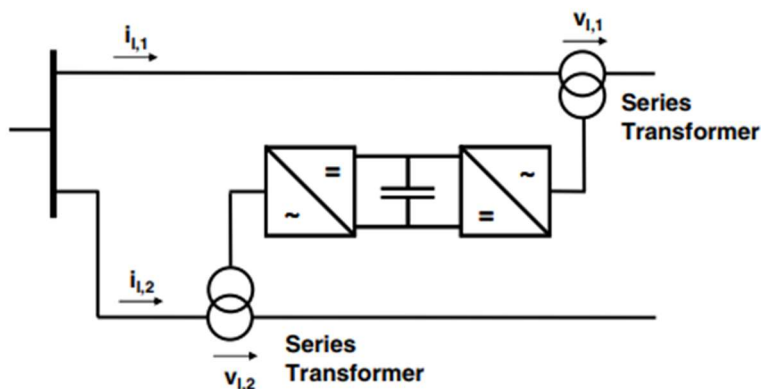
زمانی که سیلان توان دو خط که از یک پست شروع می شوند نیاز به کنترل داشته باشد، می توان از کنترل کننده سیلان توان بین خطی (IPFC) استفاده کرد. IPFC از دو مبدل منبع ولتاژ سری (VSC) تشکیل شده است

³ Interline Power Flow Controller

³ Convertible Static Compensator

³ Generalized Unified Power Flow Controller

که خازن‌های DC آن‌ها به هم متصل شده‌اند. این اتصال اجازه می‌دهد تا توان اکتیو بین مبدل‌ها جریان پیدا کند. شکل ۴-۲۶ پیکربندی اصلی یک IPFC را نشان می‌دهد. با این پیکربندی، می‌توان دو خط را به‌طور همزمان کنترل کرد تا بهره‌وری شبکه بهینه شود. به طور کلی، به دلیل پیچیدگی این پیکربندی، باید موارد کاربرد خاصی شناسایی شوند که سرمایه‌گذاری را



شکل ۴-۲۶: پیکربندی IPFC

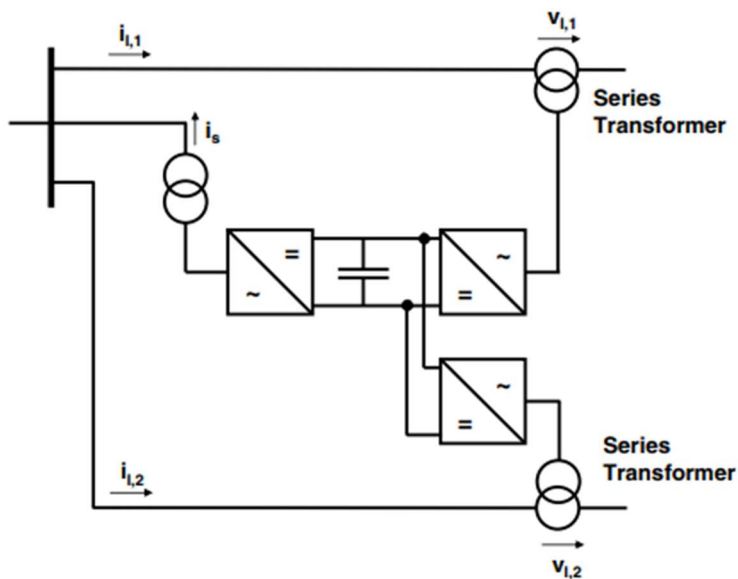
توجیه کنند.

۴-۳-۳-۴ کنترل کننده سیلان توان جامع تعمیم یافته (GUPFC)

GUPFC ترکیبی از سه یا تعداد بیشتری از مبدل‌های موازی و سری است. این دستگاه مفهوم کنترل ولتاژ و سیلان توان را فراتر از آنچه با UPFC دو مبدل شناخته شده امکان‌پذیر است، گسترش می‌دهد. ساده‌ترین GUPFC از سه مبدل تشکیل شده است: یکی به صورت موازی اتصال یافته و دو مبدل دیگر به صورت سری با دو خط انتقال در یک پست متصل می‌شوند. شکل ۴-۲۷ پیکربندی اصلی آن را نشان می‌دهد. GUPFC پایه می‌تواند پنج کمیت مختلف در سیستم قدرت را کنترل کند، مانند ولتاژ باس و جریان‌های توان اکتیو و راکتیو مستقل در دو خط.

مفهوم GUPFC در صورت لزوم می‌تواند برای کنترل تعداد بیشتری از خطوط گسترش یابد. این دستگاه ممکن است در برخی پست‌های مرکزی نصب شود تا سیلان توان چندین خط یا گروهی از خطوط را مدیریت کرده و همچنین تثبیت ولتاژ را فراهم کند. با استفاده از دستگاه‌های GUPFC، ظرفیت انتقال خطوط انتقال می‌تواند به‌طور قابل توجهی افزایش یابد. علاوه بر این، با استفاده از قابلیت مدیریت چندخطی GUPFC، جریان‌های توان اکتیو بر روی خطوط نه تنها می‌تواند افزایش یابد، بلکه با توجه به الزامات عملیاتی و معاملات بازار نیز می‌تواند کاهش یابد. به‌طور کلی، GUPFC می‌تواند برای افزایش ظرفیت انتقال و

کاهش تراکم به صورت انعطاف پذیر مورد استفاده قرار گیرد. در عین حال پیچیدگی پیکربندی و طرح کنترلی آن نیازمند موارد کاربرد خاصی است.



شکل ۴-۲۷: پیکربندی GUPFC

فصل پنجم: نمونه کاربردی از یک جبران‌ساز استاتیک

۵-۱- مقدمه

این فصل یک جبران‌ساز استاتیک تایریستور کنترل‌شده مدرن را شرح می‌دهد. جبران‌ساز ریموسکی^۳ گه در شبکه انتقال برق Hydro Québec با ولتاژ ۲۳۰ کیلوولت نصب شده است، نمایانگر نمونه‌ای معمول از چنین تجهیزاتی در سیستم‌های انتقال با ولتاژ بالا می‌باشد. طراحی آن مشابه جبران‌سازهای بار، به ویژه در منبع تغذیه کوره‌های قوس الکتریکی، است. کنترل‌کننده‌های تایریستوری، راکتورها و خازن‌ها در هر دو مورد به‌طور کلی مشابه هستند، ولی تفاوت‌های آنها در استراتژی کنترل و ولتاژ سیستم نهفته است.

سیستم Hydro Québec شامل خطوط انتقال با ولتاژ بالا و فواصل طولانی است. قبل از سال ۱۹۷۸، برای جبران‌سازی توان راکتیو از

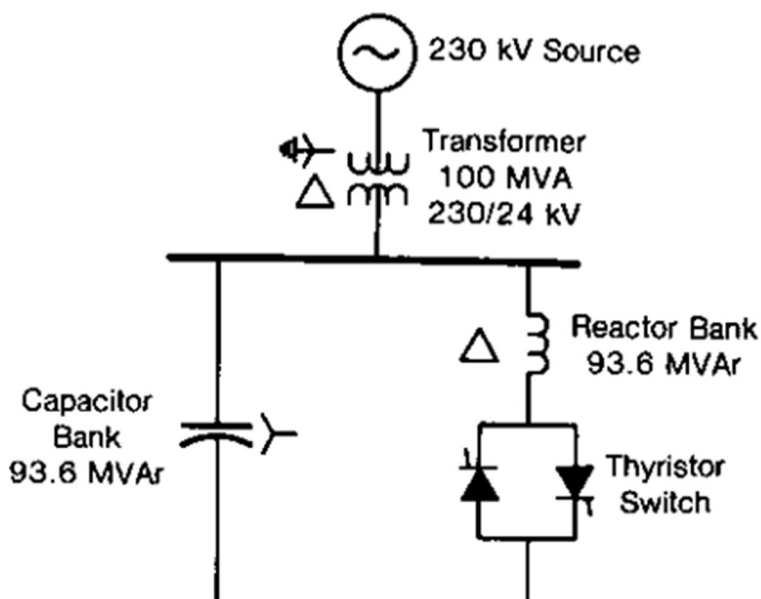
^۳Rimouski

کندانسورهای سنکرون استفاده می‌شد. پروژه Baie James، یک توسعه بزرگ از منابع آبی در شمال استان را بهره‌برداری می‌کند، نیازمند انتقال بیش از ۱۱۰۰۰ مگاوات توان در سطح ولتاژ ۷۳۵ کیلوولت و به فاصله حدود ۱۰۰۰ کیلومتر است. در این پروژه از جبرانسازهای استاتیک دینامیک در پنج نقطه به عنوان جبرانسازی شنت استفاده می‌شود. در نتیجه مطالعات و برنامه‌ریزی، تصمیم بر نصب دو جبرانساز استاتیک برای ارزیابی عملکرد آنها گرفته شد که در نقاطی خارج از سیستم Baie James قرار داشتند. یکی از این جبرانسازها در نزدیکی Rimouski، Quebec روی سیستم ۲۳۰ کیلوولت منطقه Gaspé نصب شد. این جبرانساز که در سال ۱۹۷۸ به بهره‌برداری رسید، به عنوان نمونه‌ای عملی از جبرانسازهای سیستم انتقال برق به شمار می‌رود.

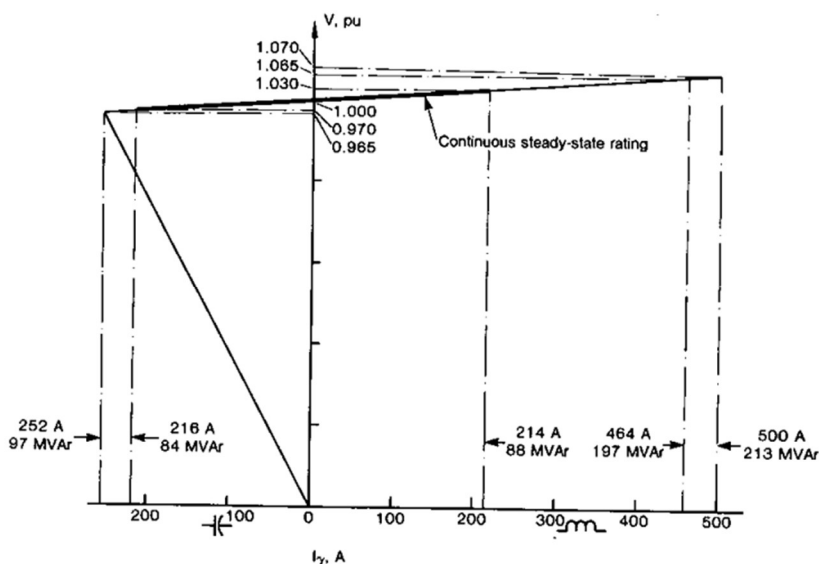
۵-۲-آرایش اصلی

این جبرانساز از یک راکتور کنترل شده با تایریستور (TCR) به همراه خازن ثابت تشکیل شده است. شکل ۵-۱ دیاگرام تک خطی ساده‌ای از اجزای اصلی این جبرانساز را نمایش می‌دهد. این جبرانساز از طریق یک ترانسفورماتور کاهنده ۱۰۰ مگاواولت آمپری 230/24-kV به شبکه وصل شده است. در طرف ثانویه ترانسفورماتور یک بانک خازنی سه فاز با اتصال ستاره و ظرفیت 93.6 MVar با یک TCR به آرایش مثلث موازی شده است. ظرفیت این بانک راکتوری نیز 93.6 MVar است.

مشخصه ولتاژ-جریان جبران‌ساز در باس 230 kV در شکل ۵-۲ نشان داده شده است. شیب این مشخصه در محدوده کنترلی برابر ۳٪ است. این به این معنی است که یک تغییر ۳٪- در ولتاژ باعث ارائه توان راکتیو خازنی نامی (84 MVar) خواهد شد. برای داشتن یک مشخصه ولتاژ-جریان خطی، یک تغییر ۳٪+ در ولتاژ باعث کشیده شدن توان راکتیوی به مقدار (88 MVar) خواهد شد. (شکل ۵-۲). دلیل انتخاب این مقادیر، نتایج حاصل از مطالعات سیستم بوده است.



شکل ۵-۱: دیاگرام تک خطی جبران‌ساز TCR/FC



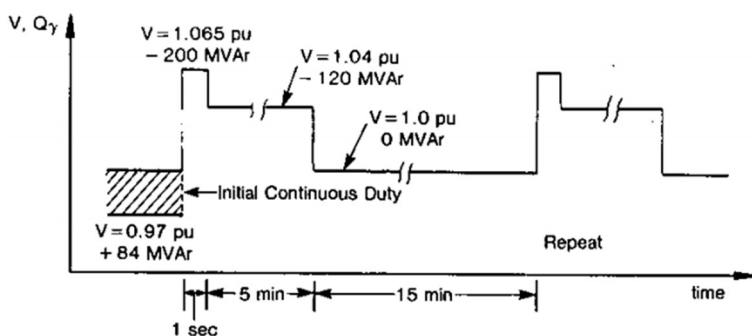
شکل ۵-۲: مشخصه ولتاژ-جریان

مقادیر نامی جبرانساز به طور خلاصه در جدول ۵-۱ ذکر شده‌اند. همچنین این مقادیر به صورت گرافیکی در شکل ۵-۳ قابل مشاهده هستند.

Reactive Power + = Generation - = Absorption	230-kV Bus Voltage (pu)	Duration
+84	0.97	Continuous
0	1.00	Continuous
-120	1.04	5 min
-200	1.065	1 sec

جدول ۵-۱: مشخصات نامی جبرانساز

این جدول بر حسب سیکل بار فرضی که در آن جبران‌ساز با ظرفیت نامی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد رسم شده است. این سیکل بار نشئت گرفته از مطالعات رفتار سیستم شامل قطع بار و مطالعات اتصال کوتاه است.



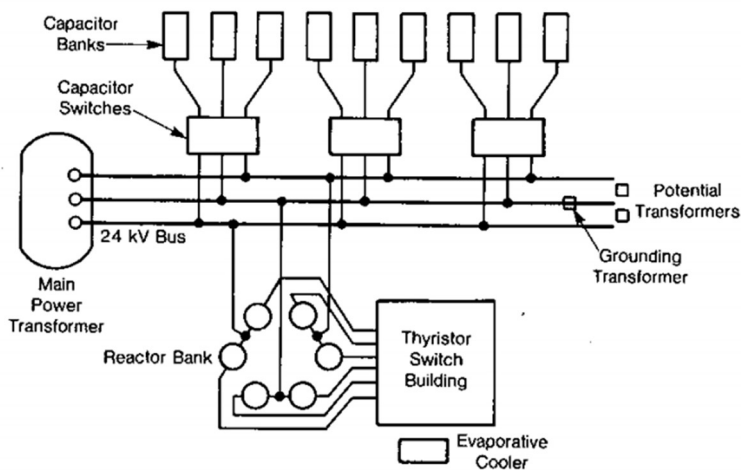
شکل ۳-۵: سیکل نامی جبران‌ساز

۳-۵- توصیف اجزای اصلی

طرح بندی^۵ جبران‌ساز در پست انتقال در شکل ۳-۵ آورده شده است. در ادامه به تفکیک به تشریح اجزای اصلی این سیستم خواهیم پرداخت.

ترانسفورماتور قدرت اصلی: این ترانسفورماتور دارای قدرت نامی 60/80/100 MVA و خنک‌سازی ONAN/ONAF/OFAF، افزایش درجه حرارت تا 65°C ، اتصال ستاره در سمت ۲۳۰ کیلوولت و اتصال مثلث در سمت ۲۴ کیلوولت، سه فاز و ۶۰ هرتز است. امپدانس درصد این

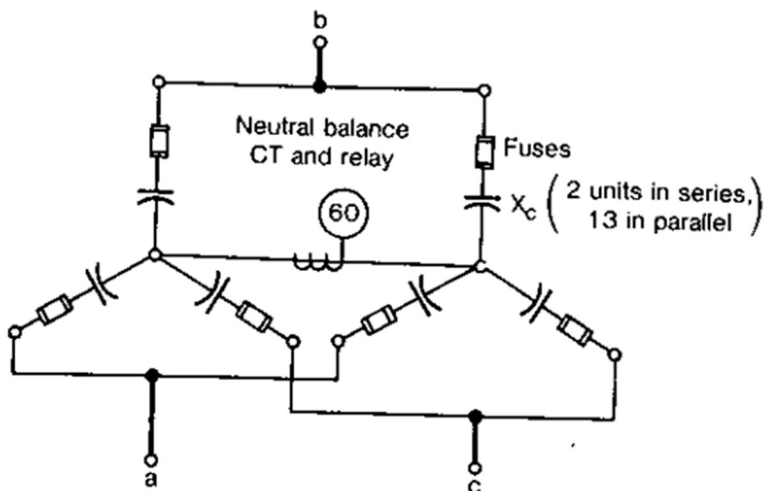
ترانس ۱۱٪ است. همچنین یک تپ چنجر در نوترال سمت فشار قوی گنجانده شده است که توانایی ایجاد $\pm 10\%$ تغییرات ولتاژ در ۳۳ پله را دارد. این تپ چنجر به صورت اتوماتیک ولتاژ باس ۲۴ کیلوولت را با پاسخ زمانی ۳ ثانیه به ازای هر پله، تنظیم می‌کند.



شکل ۵-۴: طرح‌بندی پست

بانک خازنی: بانک خازنی با ظرفیت 93.6 MVar یک بانک خازنی سه فاز است که هر فاز آن توان نامی 31.2 MVar داشته و به صورت مجزا کلیدزنی می‌شود. این بانک خازنی با آرایش ستاره دابل به باس ۲۴ کیلوولت متصل می‌شود (شکل ۵-۵). یک CT بین نوترال این دو ستاره قرار گرفته تا نامتعادلی جریان که ناشی از وقوع یک خطا در یکی از فازها خواهد بود را تشخیص دهد. هر فاز هر ستاره شامل ۲۶ یونیت خازنی است که در دو گروه سری قرار گرفته و هر گروه شامل ۱۳ خازن موازی

است. هر یونیت خازنی دارای ولتاژ نامی 6930 V و توان نامی 200 kVar می‌باشد.



شکل ۵-۵: بانک خازنی

سوئیچ‌های خازن: هر کدام از ستاره‌های بانک خازنی با یک کلید خلا^{۳۶} سه فاز ۱۰۰۰ آمپری، ۳۴٫۵ کیلوولت کلیدزنی می‌شود. همچنین به منظور محدود کردن جریان ضربه‌ای ناشی از $\frac{dV_c}{dt}$ با هر قطب کلید یک راکتور 30 μH سری شده است. فرمان کلید می‌تواند به صورت دستی یا از طریق رله‌های حفاظتی صادر شود اما می‌توان مطمئن بود که هرگز این فرمان از طرف رگولاتور بانک خازنی نخواهد بود.

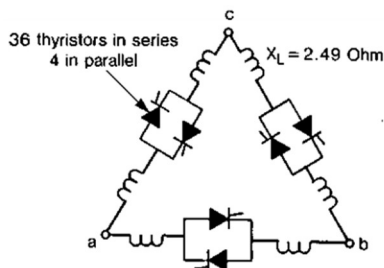
^{۳۶}Vacuum

بانک راکتوری: بانک راکتور قدرت^{۳۷} این پروژه شامل ۶ راکتور هسته هوا می باشد که اتصال این راکتورها در شکل ۵-۶ نشان داده شده است. مطابق شکل ۵-۴ آن ها در یک صفحه شش ضلعی قرار دارند. این آرایش به جهت برابر شدن کوپلاژ مغناطیسی میان راکتورها انتخاب شده است. هر راکتور راکتانسی برابر با 2.49Ω در فرکانس ۶۰ هرتز دارد. هر راکتور توانایی تحمل ۱۳۰۰ آمپر به صورت پیوسته، ۳۸۰۰ آمپر برای یک ثانیه و ۲۷۹۰ آمپر برای ۵ دقیقه را دارد. این جریان هایی است که برای چرخه بار معرفی شده در شکل ۵-۳ مناسب هستند. مقادیر ذکر شده بر حسب مقدار موثر و برای مولفه پایه هستند. این راکتورها همچنین هارمونیک های سوم، پنجم، هفتم و.. را از خود عبور می دهند.

کنترلر تایریستوری: کنترل کننده تایریستور در شکل ۵-۶ نشان داده شده است و ظرفیت جریان آن همانند بانک راکتور می باشد. هر فاز از کنترل کننده شامل چهار تایریستور موازی برای هر قطب و ۳۶ تایریستور سری است. تایریستورها همراه با گرماگیر^{۳۸}، مدارهای دمپر مقاومت-خازن (اسنابرها) و مدارهای درایو گیت بر روی صفحات عایق نصب شده اند. یک چراغ ولتاژ هر سطح ولتاژ سری را پایش می کند. تمامی پنل های تایریستور در یک محفظه فولادی نصب شده اند که نقش استحکام، محفظه جریان هوا و هم سد ایمنی زمینی را دارد.

^{۳۷}Reactor Power

^{۳۸}Heat Sink

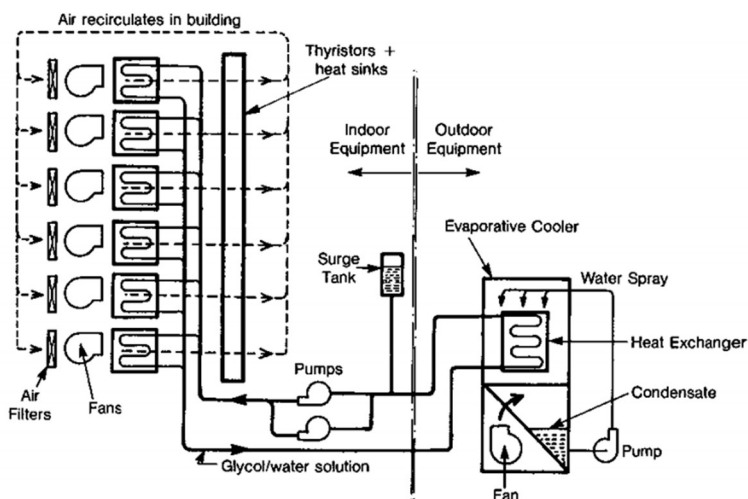


شکل ۵-۶: اتصال بانک راکتور

ساختمان کنترل‌کننده تایریستور: این ساختمان شامل کنترل‌کننده تایریستور سه‌فاز به همراه سیستم کنترل و حفاظت مربوطه، تغذیه سرویس پست و سیستم خنک‌کننده تایریستور می‌باشد (به استثنای خنک‌کننده تبخیری که در فضای بیرونی نصب شده است). این ساختمان دارای پوشش فلزی، عایق حرارتی و امکان گرمایش الکتریکی در مواقع ضروری است. ابعاد داخلی آن برابر با ۴۰ فوت در ۳۷ فوت با ارتفاع ۲۵ فوت می‌باشد.

خنک سازی تایریستور: تایریستورها به وسیله هوای تحت فشار خنک می‌شوند. هوا در چرخه بسته پس از عبور از مبدل‌های حرارتی هوا-گلیکول مجدداً گردش می‌کند؛ گلیکول نیز به نوبه خود از طریق خنک‌کننده تبخیری دوباره گردش می‌یابد. شکل ۵-۷ نموداری شماتیک از سیستم خنک‌کننده ارائه می‌دهد. دبی کل هوا مورد نیاز برابر با ۱۰۰,۰۰۰ فوت مکعب بر دقیقه است که توسط شش فن تأمین می‌شود، هر کدام با ظرفیت ۲۰,۰۰۰ فوت مکعب بر دقیقه؛ یکی از این شش فن به عنوان یدکی جهت

افزایش قابلیت اطمینان به کار رفته است. هر فن دارای مبدل حرارتی هوا-گلیکول مربوط به خود می‌باشد. در صورتیکه سامانه گلیکول یا سامانه خنک‌سازی تبخیری به هر دلیلی نیاز به خاموش شدن داشته باشند، سامانه اضطراری فراهم شده است که در آن هوا توسط فن‌های دیواری از بیرون به داخل ساختمان پخش می‌شود. این سامانه اضطراری برای دماهای هوای خارجی تا حدود ۳۰ درجه سانتی‌گراد مناسب می‌باشد.



شکل ۵-۷: شماتیک سیستم خنک کننده

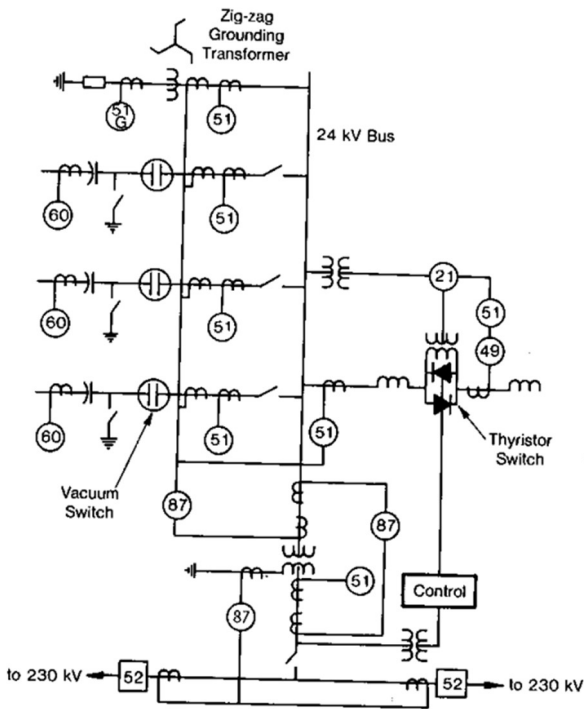
حفاظت جبرانساز (شکل ۵-۸): مکانیسم‌های حفاظت باس‌های ۲۳۰ کیلوولت و ۲۴ کیلوولت، حفاظت دیفرانسیل با پشتیبانی حفاظت جریان زیاد است. در بانک‌های خازنی، جریان خشی ناشی از نامتعادلی تشخیص داده شده و حفاظت عمل می‌کند تا از ایجاد اضافه ولتاژ روی خازن - که ناشی از خرابی در یکی از واحدهای خازنی است - جلوگیری شود.

همچنین در برابر جریان‌های خطا از طریق رله‌های جریان زیاد زمان معکوس استفاده می‌شود.

خطاهای زمین در کل سیستم ۲۴ کیلوولت در نقطه نول ترانسفورماتور زمین‌گیری زیگزاگ شناسایی می‌شوند و اگر توسط یکی از سیستم‌های دیفرانسیل اولیه رفع نشوند، از طریق رله‌های اضافه جریان زمین باعث خاموشی می‌شوند.

جریان‌های خطا مرتبط با راکتورهای قدرت و کنترل‌کننده تایریستور توسط رله‌های اضافه جریان زمان معکوس شناسایی می‌شوند و اگر کنترل‌کننده تایریستور نتواند خود را خاموش کرده و خطا را برطرف کند، جبرانساز از طریق کلیدهای مدار ۲۳۰ کیلوولت از مدار خارج می‌شود.

حفاظت اضافه بار برای کنترل‌کننده تایریستور شامل پایش مداوم دمای گلیکول و جریان آن، دمای هوا و جریان آن، و یک رله حرارتی اضافه بار ویژه است که دمای اتصال تایریستور را پایش می‌کند. این رله با استفاده از مشخصات گرمایش/خنک‌کنندگی تایریستور برنامه‌ریزی شده و می‌تواند دمای اتصال را از طریق اندازه‌گیری جریان تایریستور محاسبه کند.



شکل ۵-۸: نمودار تک‌خطی سیستم رله حفاظتی ۲۱: رله دیستانس. در صورتی که امپدانس مدار از محدوده از پیش تعیین شده افزایش یا کاهش یابد عمل می‌کند. ۴۹: رله حرارتی. در صورتی که دمای یکسوکننده قدرت از مقداری از پیش تعیین شده فراتر رود عمل می‌کند. ۵۱: رله اضافه جریان زمان‌دار جریان متناوب. ۵۱: رله اضافه جریان زمان‌دار جریان متناوب با نظارت بر جریان زمین. ۵۲: قطع‌کننده مدار جریان متناوب. ۶۰: رله تعادل جریان. در صورت بروز اختلاف معین جریان بین دو مدار عمل می‌کند. ۸۷: رله حفاظتی تفاضلی. بر اساس اختلاف دو جریان یا دیگر کمیت‌های الکتریکی عمل می‌کند.

۵-۴- سیستم کنترلی کنترلر تایریستور

با ارجاع به نمودار بلوکی در شکل ۵-۹، سیستم کنترلی اساساً شامل یک تنظیم‌کننده (رگولاتور) ولتاژ، محدودکننده جریان، و مدار آتش^{۳۹} ترایستور است.

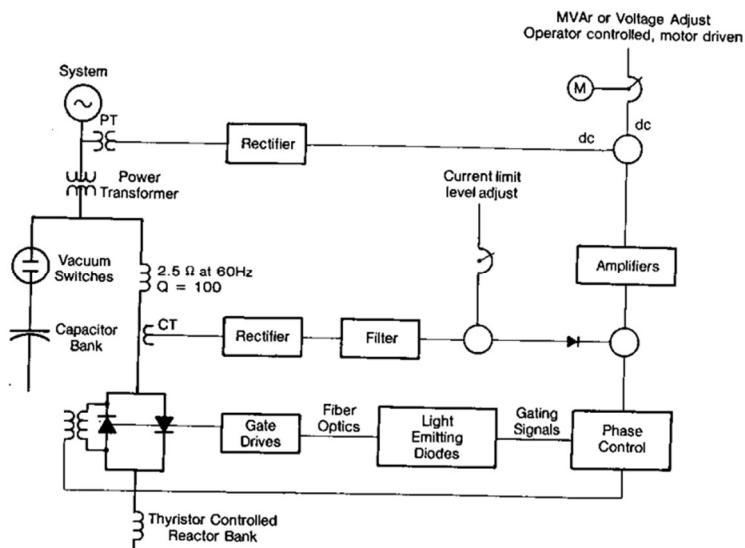
تنظیم‌کننده ولتاژ یک سیستم حلقه بسته متداول است که فیدبک آن از ترانسفورماتورهای ولتاژ (PT) در باس ۲۳۰ کیلوولت تامین می‌شود. فیدبک به صورت سه‌فاز AC است که یکسو شده و بنابراین میانگین ولتاژ سیستم سه‌فاز ۲۳۰ کیلوولت را نمایش می‌دهد.

مدار محدودکننده جریان نیز یک سیستم حلقه بسته است که فیدبک آن از ترانسفورماتورهای جریان در مدارهای راکتور تامین می‌شود. جریان‌های سه‌فاز جمع شده و یکسو می‌شوند تا میانگین جریان راکتور را نمایش دهند. مقدار محدودیت جریان توسط مدار کنترل سیکل بار تنظیم می‌شود. کنترل سیکل بار تضمین می‌کند که رتبه زمان-جریان کنترل‌کننده تایریستور از حد مجاز تجاوز نکند. برای انجام این وظیفه، مدارهای الکترونیکی انتگرال‌های آمپر-ثانیه اعمال‌شده به تایریستورها را نظارت می‌کنند. کنترل سیکل بار باید اطمینان حاصل کند که دمای اتصال تایریستورها از حد مجاز تجاوز نمی‌کند. با این حال، یک رله اضافه‌بار حرارتی نیز دمای اتصال تایریستورها را نظارت می‌کند. در صورتی که خرابی در کنترل سیکل بار باعث شود دمای اتصال از مقدار مجاز تجاوز کند، رله اضافه‌بار باعث خاموش شدن جبرانساز خواهد شد.

^{۳۹}Gating Circuit

مدار آتش تایریستور با یک سیگنال خطا از تنظیم‌کننده ولتاژ شروع می‌شود، که مشخص می‌کند تایریستورها در چه زمانی تحریک شوند و با ارسال پالس‌های جریان به گیت‌های تایریستور پایان می‌یابد.

بلوک کنترل فاز نشان داده شده در شکل ۵-۹ سیگنال خطای ولتاژ را با رمپ‌های زمان تولیدشده توسط ولتاژ روی تریستورها مقایسه می‌کند. در نقطه تقاطع رمپ و سیگنال خطا، یک سیگنال تحریک تولید می‌شود. این سیگنال دیودهای نوری (LED) را انرژی می‌بخشد که نور را از طریق فیبر نوری به درایوهای گیت منتقل می‌کنند. راهنماهای نور، جداسازی بین مدارهای کنترلی و تایریستورها را تشکیل می‌دهند. درایوهای گیت سیگنال نوری را به پالس جریان گیت تبدیل می‌کنند. انرژی برای درایوهای گیت از طریق ولتاژ روی تریستورها یا جریان در آن‌ها تامین می‌شود، بسته به اینکه در زمان معین کدام یک در دسترس است. با تنظیم رابطه مناسب بین سیگنال خطای ولتاژ و زمان‌بندی تحریک تایریستورها، زاویه تحریک حداکثر ۳٪ حاصل می‌شود. با تحریک در زمان‌های دقیق تعیین شده توسط سیگنال خطا، جریان در مدار راکتور به روش متداول کنترل می‌شود. سیستم کنترلی در شکل ۵-۹ نمایش داده شده است. نتیجه نهایی اینکه بین تغییر ولتاژ سیستم و جریان جبرانساز برقرار است.



شکل ۵-۹: بلوک دیاگرام کنترلر

کنترل راه‌اندازی-متوقف ساختن^۴:

(الف) راه‌اندازی: جبران‌ساز می‌تواند یا از ساختمان کنترل تایریستور (محلی) یا از اتاق کنترل پست (راه دور) راه‌اندازی شود. قابلیت راه‌اندازی خودکار و طی مراحل برای راه‌اندازی از هر دو مکان فراهم شده است (راه‌اندازی خودکار). علاوه بر این، تمام عملکردهای راه‌اندازی به‌صورت مجزا توسط کلیدهای کنترلی در ساختمان کنترل تایریستور قابل اجرا هستند (راه‌اندازی دستی). حالت راه‌اندازی نرمال، راه‌اندازی خودکار از راه دور

^۴Start-Stop Control

است. حالت‌های راه‌اندازی خودکار محلی یا راه‌اندازی دستی محلی تنها برای اقدامات نگهداری یا در مواقع اضطراری استفاده می‌شوند.

توالی راه‌اندازی خودکار دارای دو بخش اصلی است. بخش اول، تمام موتورهای کمکی را در یک توالی زمانی منظم راه‌اندازی می‌کند. این موتورها، فن‌ها و پمپ‌های مربوط به سیستم خنک‌کننده تائریستور را به کار می‌اندازند. بخش دوم، جبرانساز را به باس ۲۳۰ کیلوولت به گونه‌ای متصل می‌کند که کمترین اختلال را در سیستم ایجاد نماید. توالی راه‌اندازی را می‌توان به مراحل زیر خلاصه نمود:

۱. موتورهای کمکی راه‌اندازی شوند.
۲. کلیدهای ۲۳۰ کیلوولت بسته شوند.
۳. سیگنال بازدارنده آتش از تائریستورها حذف شود. راکتور انرژی‌دار خواهد شد و اگر تنظیمات اپراتور برای ولتاژ موجود سیستم تعیین شده باشد، تنظیم‌کننده ولتاژ برای راکتور جریان صفر در نظر می‌گیرد.
۴. کلیدهای بانک خازنی بسته شوند. به منظور سوییچینگ، سه بخش بانک خازنی به ترتیب انرژی‌دار می‌شوند. به ازای هر بخشی که انرژی‌دار می‌شود، تنظیم‌کننده ولتاژ به‌طور خودکار جریان راکتور را تنظیم می‌کند تا جریان خالص جبرانساز صفر باقی بماند.

. (ب) توقف: توقف کامل سیستم (خاموش کردن) که می‌تواند به صورت محلی یا از راه دور، یا توسط رله‌های حفاظتی کنترل شود، به ترتیب زیر انجام می‌شود:

۱. قطع مدارشکن های ۲۳۰ کیلوولت.
۲. قطع تمامی کلیدهای خلاء بانک های خازنی.
۳. حذف سیگنال آتش تایریستورها.
۴. توقف موتورهای سیستم خنک کننده.

۵-۶- آزمایش رفتار اُیستم

آزمایش های گسترده ای در طول و پس از شروع به کار برای ارزیابی عملکرد جبران کننده انجام شد. این آزمایش ها شامل اندازه گیری های زیر بود:

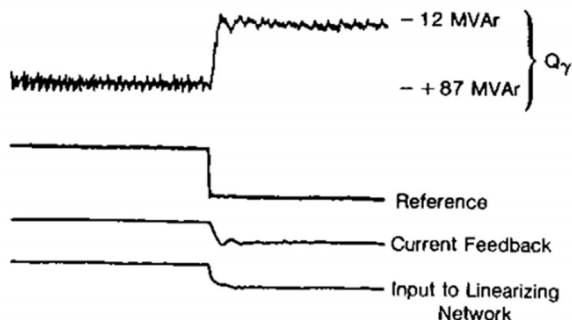
- توابع انتقال رگولاتور.
- دقت در فاصله فاز به فاز برای کلیدزنی تریستور (که معمولاً به عنوان "ردیابی" شناخته می شود).
- شیب های مشخصه های ولتاژ/جریان (V/I) و ولتاژ/توان واکنشی (V/Q).
- محتوای هارمونیکی در جریان راکتور، ولتاژها در باس های ۲۳۰ کیلوولت و ۲۴ کیلوولت، جریان های خط در اتصال های ۲۳۰ کیلوولت و ۲۴ کیلوولت مربوط به جبران کننده.

از پاسخ‌های تست‌های مختلف نوسان‌نگاری گرفته شده، که شامل موارد زیر بوده است:

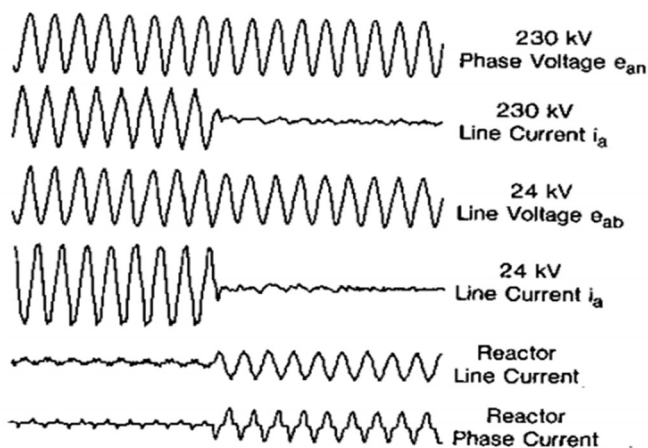
- تزریق سیگنال‌های مرجع سینوسی در فرکانس‌هایی از ۰٫۱ تا ۱۰ هرتز.

- تزریق تغییرات پله‌ای در مرجع، با مقادیر متفاوت و نقاط شروع مختلف برای آزمایش پاسخ جبران‌کننده. نمونه‌های نماینده در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ نشان داده شده‌اند. مشخص است که پاسخ‌های جریان راکتور و توان واکنشی جبران‌کننده دارای زمان پاسخ حدود یک سیکل هستند. این پاسخ‌ها همچنین با حداقل فراجش همراه بوده و به خوبی میرا شده‌اند.

در نهایت، سیکل بار شکل ۳ اجرا شد. این چرخه با تزریق یک سیگنال مرجع به سیستم کنترلی انجام شد که باعث شد جبران‌ساز به حد جریانی برابر با 200 MVar- برسد. کنترل چرخه بارگذاری برای ۱ ثانیه این مقدار بود، سپس مقدار 120 MVar- را برای ۵ دقیقه مجاز دانسته، و در ادامه، محدودیتی بر جریان نامی پیوسته اعمال کرد.

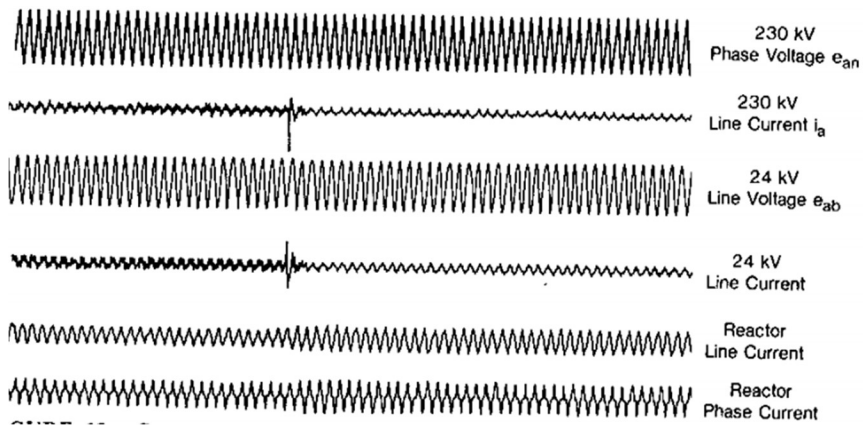


شکل ۵-۱۰: رفتار جبران‌ساز. تغییر ناگهانی ۹۹- مگاوار در پاسخ به یک تغییر پله‌ای در سیگنال مرجع



شکل ۵-۱۱: رفتار جبران‌ساز. شکل موج ولتاژ و جریان در پاسخ به

شکل ۵-۱۰



شکل ۵-۱۲: رفتار جبرانساز. انرژی‌دار کردن بانک خازنی شماره ۳. یک تغییر ناگهانی ۳۱,۲ مگاواری را ایجاد می‌کند.

فصل ششم: جبرانسازی راکتیو کوره الکتریکی

۶-۱- مقدمه

برای استفاده بهینه از توان الکتریکی در کوره قوس الکتریکی فولادسازی، مجموعه‌ای منحصربه‌فرد از مسائل به‌ویژه در زمینه تثبیت ولتاژ، تصحیح ضریب توان و فیلتر کردن هارمونیک‌ها باید حل شوند.

تثبیت ولتاژ می‌تواند عملکرد کوره را به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشد. این بهبود یا از طریق افزایش توان بیشینه و در نتیجه سرعت تولید فولاد و یا با امکان‌پذیر ساختن عملکرد کوره در همان توان بیشینه اما با قوس کوتاه‌تر که موجب کاهش فرسایش و کمک به محدود کردن "فلیکر" ولتاژ می‌شود خواهد بود.

در حالی که تثبیت ولتاژ همواره برای فولادساز مفید است، ممکن است برای شرکت تأمین‌کننده برق به‌عنوان راهکاری جهت رفع اختلالات ولتاژ (فلیکر) ناشی از تغییرات سریع، بزرگ و نامنظم جریان کوره ضروری باشد. این‌گونه اختلالات می‌تواند برای مصرف‌کنندگان همجوار نیز مشکل‌ساز شود.

روش‌هایی که برای تثبیت ولتاژ به کار گرفته شده‌اند شامل اتصال کوره به شبکه با سطح ولتاژ بالاتر، کندانسورهای سنکرون با راکتورهای ضربه‌گیر^۱ و جبرانسازهای مدرن کنترل‌شده با تایریستور و راکتور اشباع‌شده با سرعت بالا هستند. واکنش سریع جبرانسازهای پرسرعت به

^۱Buffer Reactor

حل تضاد میان عملکرد کوره و کاهش فلیکر که در ترکیب کندانسور سنکرون/راکتور ضربه گیر دیده می شود، کمک می کند. اتصال کوره به شبکه با سطح ولتاژ بالاتر اغلب پرهزینه و گاه غیرعملی است، و در بسیاری از چنین موارد، جبرانسازهای کنترل شده با تایریستور یا راکتور اشباع شده از نظر اقتصادی و فنی گزینه های مناسب تری محسوب می شوند.

ترتیب ارائه مطالب در این فصل به گونه ای تنظیم شده است که اهمیت تثبیت ولتاژ در فرآیند فولادسازی را منعکس کند. این رویکرد در تضاد با بسیاری از منابع منتشر شده است که تنها به جبرانساز استاتیکی به عنوان ابزاری برای محدود کردن فلیکر در سیستم بیرونی می پردازند. اصلاح فلیکر در بخش های ۶-۳ تا ۶-۵ مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۶-۲- کوره قوس الکتریکی به عنوان یک بار الکتریکی

۶-۲-۱- کوره قوس در تولید فولاد

ظرفیت جهانی کوره قوس الکتریکی امروزه همچنان در حال افزایش است، با وجود کندی کلی در نرخ رشد تولید فولاد. فقط در ایالات متحده، بین سال های ۱۹۷۵ تا ۱۹۸۱، حدود ۱۵ میلیون تن ظرفیت جدید نصب شده برای کوره های قوس الکتریکی باعث شد که سهم این کوره ها به حدود یک سوم از کل تولید فولاد برسد.

در حال حاضر تعداد بسیار زیادی کوره الکتریکی وجود دارد که الکترودهای آن‌ها قطری بیش از ۶ اینچ دارند و ظرفیتشان از چند تن تا بیش از ۴۰۰ تن متغیر است. بزرگ‌ترین این کوره‌ها قطری بیش از ۳۰ فوت دارند و به ۱۱۰ مگاوات توان الکتریکی نیاز دارند. شکل ۶-۱ یک کوره بزرگ معمولی را نشان می‌دهد.

این آمار اهمیت کوره قوس الکتریکی را هم به‌عنوان یک تولیدکننده فولاد و هم به‌عنوان یک بار در سیستم تأمین برق نشان می‌دهد.

۶-۲-۲- نیازهای تامین برق برای کوره‌های قوس

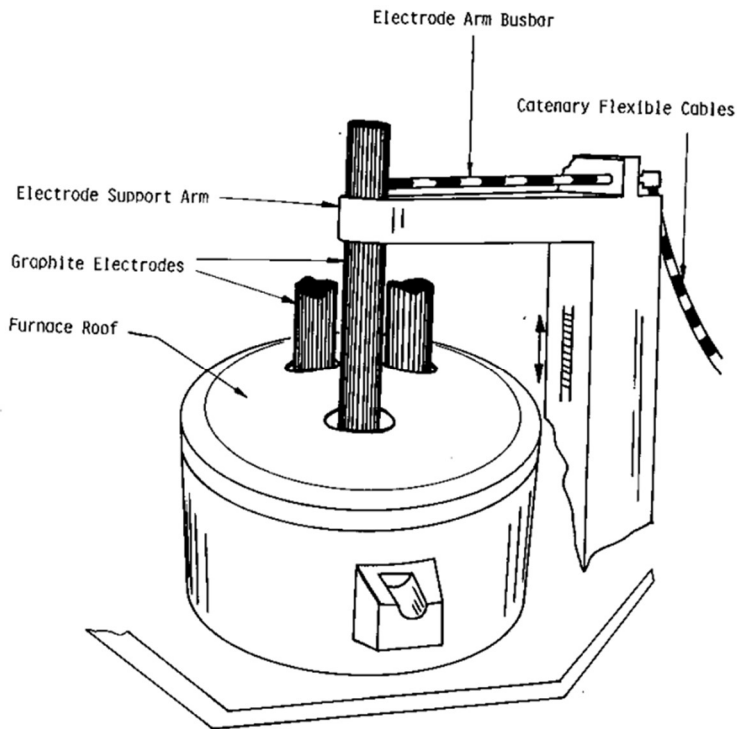
ویژگی‌های عملکردی کوره: برای درک مزایای تثبیت ولتاژ برای کوره، باید با ویژگی‌های عملکردی آن آشنا شد. این ویژگی‌ها را می‌توان به شرح زیر استخراج کرد:

قوس الکتریکی (arc) را می‌توان به‌عنوان یک مقاومت متغیر در یک مدار معادل تک‌فاز ساده شامل کوره و سیستم تأمین آن در نظر گرفت (شکل ۶-۲ را ببینید). اگرچه این مدل ساده‌سازی گسترده‌ای از یک کوره واقعی است، اما تصویر دقیقی از عملکرد کوره را در قالب مقادیر متوسط ارائه می‌دهد.

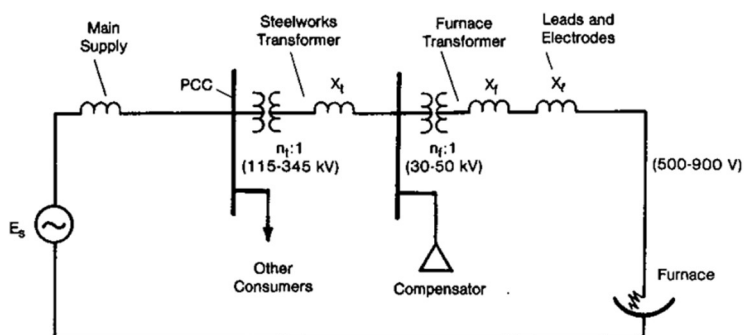
در این مدل، همه مقاومت‌ها جز مقاومت خود قوس نادیده گرفته می‌شود. راکتانس X برابر است با مجموع تمام راکتانس‌هایی که به‌صورت سری با قوس قرار دارند. این راکتانس‌ها شامل موارد زیر هستند:

- راکتانس کابل‌های انعطاف‌پذیر،
- بازوی باس‌بار الکترو،

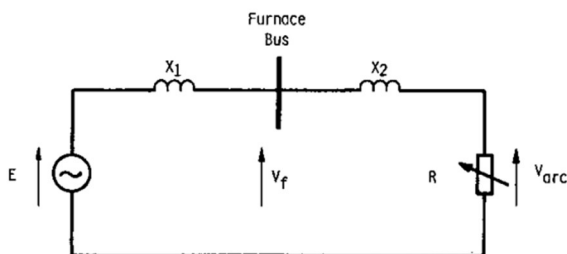
- الکترودها،
 - ترانسفورماتور کوره،
 - ترانسفورماتور کارخانه فولاد،
 - راکتانس اتصال کوتاه شبکه تغذیه.
- تمام این راکتانس‌ها به سیم‌پیچ ثانویه ترانسفورماتور کوره ارجاع داده می‌شوند. راکتانس اتصال کوتاه شبکه تغذیه ممکن است حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد از کل راکتانس باشد، در حالی که کابل‌هایی که ترمینال‌های ثانویه ترانسفورماتور کوره را به الکترودهای گرافیتی وصل می‌کنند می‌توانند تا ۷۰ درصد از کل را شامل شوند.
- نیروی محرکه الکتریکی E همان ولتاژ مدار باز در ترمینال‌های ثانویه ترانسفورماتور کوره است، و در کنار X ، مدار معادل تونن را برای تغذیه کوره تعریف می‌کند. عملکرد کوره طوری توصیف خواهد شد که گویی جریان‌های کوره متعادل و سینوسی هستند.



شکل ۶-۱: نمای کلی از کوره‌های قوس الکتریکی جدید (اتصالات الکتریکی تنها برای یک فاز نشان داده شده‌اند)



(a)



$$X = X_1 + X_2$$

(b)

شکل ۶-۲: مدار معادل تکفاز برای تخمین پارامترهای کوره قوس الکتریکی

کنترل مدار شکل ۶-۲ از طریق حرکت عمودی الکترودهای گرافیتی انجام می‌شود که طول قوس و بنابراین ولتاژ آن را کنترل می‌کند (در ادامه توضیحات تکمیلی ارائه می‌شود). همچنین با تغییر تپ ترانسفورماتور کوره، مقدار E تغییر می‌کند. تغییر تپ باعث تغییر جزئی در X نیز می‌شود، اما این اثر نادیده گرفته خواهد شد.

همانطور که از تئوری مدارهای الکتریکی واضح است، در مداری با ساختار شکل ۶-۲، توان قابل تحویل به بار (یعنی قوس) با تغییر R به بیشینه مقدار زیر به ازای هر فاز محدود می‌شود:

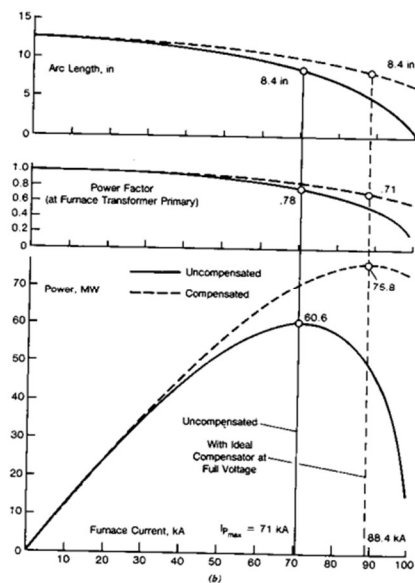
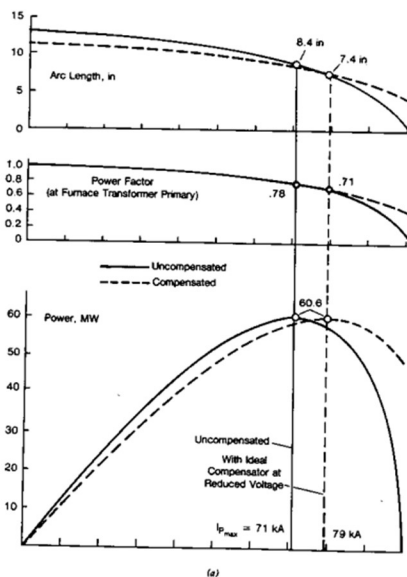
$$P_{max} = E^2 / 2X \quad (۱)$$

مقدار R در شرایط ماکسیمم توان برابر است با:

$$R_{Pmax} = X \quad (۲)$$

و جریان متناظر با ماکسیمم توان عبارت است از $I_{Pmax} = E / \sqrt{2}X$. بنابراین افت ولتاژ در قوس الکتریکی برابر با افت ولتاژ در X است که هر دو برابر $E / \sqrt{2}$ هستند.

شکل ۶-۳ تغییرات توان کوره و تغییر سایر کمیت‌ها در صورت تغییر R را نشان می‌دهد. منحنی‌ها بر مبنای جریان قوس رسم شده‌اند و آن‌ها را "مشخصه کار" کوره می‌نامند. مقدار نامی کوره تقریباً 60MW است. مقدار E برابر 700Vrms (خط به خط)، و $X = 4.04 \text{ mOhm}$ است که ۸۰٪ آن مربوط به ورودی اولیه ترانسفورماتور کوره (باس کوره در شکل ۶-۲) و ۲۰٪ آن مربوط به بالادست است. یعنی $X_1 = 0.81 \text{ mOhm}$ و $X_2 = 3.23 \text{ mOhm}$ است. اولیه ترانسفورماتور کوره عمدتاً محل اندازه‌گیری می‌باشد و ضریب توان رسم شده در شکل ۶-۳ از دید این نقطه است. اغلب جبرانساز به این نقطه وصل می‌شود.



شکل ۳-۶: (a) مشخصه کار کوره که تاثیر جبرانسازی در ولتاژ کاهش

یافته را نمایش میدهد. (b) مشخصه کار کوره که تاثیر جبرانسازی در ولتاژ کامل

را نمایش میدهد.

انتخاب نقطه کار و اهمیت راکتانس تغذیه: واضح است که پایداری

قوس در نقطه حداکثر توان حاصل می‌شود. جریان‌های کوچکتر از I_{pmax} منجر به ضریب توان بالاتر می‌شوند اما پایداری قوس و همچنین توان را کم می‌کنند. جریان‌های بزرگتر از سوی دیگر باعث ضریب توان و همچنین توان پایین‌تر می‌شوند که باعث می‌شود کوره در شرایط غیر اقتصادی کار کند. این ملاحظات عملکرد کوره قوس را حول نقطه بیشینه توان پیشنهاد می‌دهد. البته عملکرد کوره در این نقطه به وسیله میزان فرسودگی پوشش دیرگداز جداره کوره^۳ محدود می‌شود. هزینه نگهداری و تعمیرات پوشش دیرگداز، بخش قابل توجهی از هزینه‌های صنعت فولادسازی است و اهمیت آن با توجه به فزونی گرفتن روند توان ورودی در کوره با قطر معین بیشتر می‌شود. لذا درک چگونگی ارتباط میزان فرسودگی با توان و نقطه کار حائز اهمیت است.

در سطح توان معین، میزان فرسودگی تقریباً با طول قوس الکتریکی متناسب است. طول قوس الکتریکی تقریباً منحصر به ولتاژ قوس الکتریکی بستگی دارد و تقریباً مستقل از جریان است. به طور تقریبی:

$$V_{arc} = kl_{arc} + 40 \text{ V rms} \quad (۳)$$

که در آن $k = 29 \text{ V/in} = 11.5 \text{ V/cm}$ است. در نقطه بیشینه توان $V_{arc} = E/\sqrt{2}$ بوده و از رابطه (۱) می‌توان نوشت $V_{arc} = \sqrt{P_{max}X}$. در نتیجه به ازای یک طول قوس بیشینه و یک توان قوس بیشینه P_{max} راکتانس نباید از V_{arcmax}^2 / P_{max} بیشتر باشد. اگر راکتانس از این مقدار

^۳Refractory Wear Rate

بیشتر شود، کوره باید در جریانی بالاتر کار کند. یعنی در سمت راست نقطه حداکثر توان کار کند تا طول قوس را محدود نماید. این کار در عمل روش غیر معمولی نیست، اما توان و ضریب توان هر دو کاهش می‌یابند. این موضوع در شکل ۶-۳-a به وسیله منحنی‌های خط پر توان قوس و ضریب توان نشان داده شده است.

منحنی‌های نقطه‌چین در شکل ۶-۳-a اثر حذف X_1 را نشان می‌دهند، به این معنا که مقدار X به ۸۰ درصد از مقدار اولیه کاهش یافته است. مقدار E با ریشه دوم این ضریب کاهش می‌یابد تا P_{max} ثابت باقی بماند. حال مشاهده می‌شود که حتی با طول قوس کاهش یافته، عملکرد در نقطه بیشینه توان امکان‌پذیر است و از اینرو فرسودگی کاهش می‌یابد. کاهش یافتن X منجر به کاهش یافتن طول قوس در تمامی سطوح توان - نه فقط در بیشینه توان - می‌گردد.

به طور خلاصه، نقطه کلیدی در ایجاد توان ورودی برابر با حداکثر توان همراه با طول قوس کوتاه قابل قبول این است که راکتانس تا حد امکان کوچک باشد.

کوره‌های جدید دارای آرایش مخصوصی از کابل‌ها و باس بار بازوی الکترودها هستند طوری که راکتانس را به حداقل می‌رساند. کاهش دادن X به وسیله عوامل اقتصادی و عملی، و به وسیله میزان راکتانس ورودی کارخانه که توسط موسس کوره می‌تواند کنترل گردد، محدود می‌شود. در موارد زیادی راکتانس کوچکتر به وسیله تقویت کردن سیستم تغذیه کارخانه فولاد - یعنی با اتصال مستقیم آن به شبکه با ولتاژ بالاتر که دارای سطح اتصال کوتاه بالاتر و راکتانس اتصال کوتاه موثر کمتر است - به دست

آمده است. حتی وقتی که این عمل برای کاهش سوسو زدن صورت می گیرد، کوره الکتریکی مزایای فوق را کسب می کند.

مزایای جبرانسازی: حال واضح است که یک جبرانساز چگونه قادر

است همان مزایای حاصل از کاهش راکتانس را فراهم کند. جبرانساز ممکن است در باس بار کوره متصل گردد (به شکل ۶-۲ مراجعه شود). اگر جبرانساز قادر باشد ولتاژ را ثابت نگاه دارد، یعنی $V_f = E$ ، آنگاه X_1 به طور موثر حذف می گردد. اگر ولتاژ باس بار کوره V_f در مقداری برابر با $E\sqrt{X_2/(X_1 + X_2)}$ تثبیت گردد، آنگاه مطابق شکل ۶-۳-a حداکثر توان تغییر نمی کند و حال آنکه طول قوس و فرسودگی هردو کاهش می یابند.

روش دیگر جبرانسازی در شکل ۶-۳-b نشان داده شده است که در آن ولتاژ باس بار در مقدار E تثبیت می گردد. مجدداً X_1 حذف شده و بر طبق معادله (۱) حداکثر توان با نسبت $(X_1 + X_2)/X_2$ که میتواند تا $1/3$ باشد افزایش می یابد. ولتاژ و طول قوس در نقطه بیشینه توان تغییر نمی کنند. این موضوع به صورت خط چین در شکل ۶-۳-b نشان داده شده است. در مثال $(X_1 + X_2)/X_2 = 1.25$ است و حداکثر توان با این ضریب افزایش می یابد. در این نقطه ضریب توان قدری کاهش پیدا کرده، درحالی که جریان با ضریب $1/25$ افزایش یافته است. در این حالت $kVar$ لازم برای اصلاح ضریب توان افزایش یافته است. در نقطه حداکثر توان، به عنوان مثال، توان راکتیو با ضریب $(X_1 + X_2)/X_2$ افزایش یافته است.

از میان انواع جبرانسازها، فقط جبرانسازهای راکتیو با خصیصه پاسخ سریع خودشان قادرند ولتاژ را تثبیت نموده و مزایای فوق را تحقق بخشند. این جبران کننده ها شامل جبران کننده راکتور قابل اشباع، راکتور تایریستور

کنترل و خازن تایریستور سوئیچ می‌باشند. پاسخ سریع برای سیستم جبرانساز ضروری است، زیرا جبرانساز اساساً تمامی یا بخش اعظم جریان راکتیو مورد نیاز کوره قوس الکتریکی را فراهم می‌کند و همان‌طوری که ملاحظه کرده‌ایم این جریان به سرعت تغییر می‌کند. قبل از توسعه جبرانسازهای با سرعت بالا، کندانسور سنکرون در در چندین تاسیسات به کار گرفته شده است. اما به دلیل ضرورت کاربرد راکتورهای ضربه‌گیر، به طور سری با باس بار کوره قوس الکتریکی و ورودی کندانسور و بهبود سوسو زدن به نقطه کوپلاژ مشترک محدود می‌شود و سوسو زدن در باس بار کوره قوس الکتریکی افزایش می‌یابد. اگر چنانچه دو کوره قوس الکتریکی به موازات یکدیگر کار کنند، این مسئله اثرات زیان‌بخشی را بر رفتار کوره وارد می‌آورد.

۶-۳- فلیکر و روش‌های جبرانسازی آن

۶-۳-۱- ماهیت مسئله سوسو زدن (فلیکر)

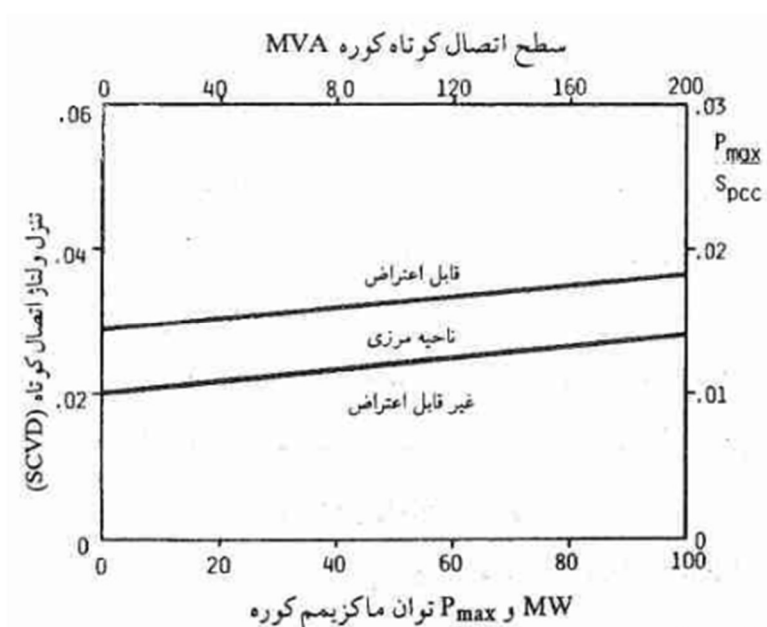
نوسانات سریع در جریان‌های تغذیه کوره‌های قوس الکتریکی (و دیگر بارهای بزرگ مانند نورد فولاد و دستگاه‌های حفاری) گاهی آن‌قدر زیاد هستند که موجب نوسانات ولتاژ در سیستم قدرت می‌شوند که در نتیجه‌ی آن، پدیده‌ی فلیکر در لامپ‌ها مشاهده می‌گردد. گیرنده‌های تلویزیونی و تجهیزات الکترونیکی حساس نیز می‌توانند به‌طور نامطلوبی تحت تأثیر قرار

گیرند. برای به حداقل رساندن این اثرات، نوسانات ولتاژ باید زیر سطحی معین از «آستانه‌ی تحریک‌پذیری» باقی بماند. اصطلاح «فلیکر ولتاژ» اغلب برای اشاره به همه‌ی اثرات نامطلوب ناشی از نوسانات سریع ولتاژ به‌کار می‌رود.

مشخصه‌یابی مسئله‌ی فلیکر: شرکت‌های برق در روش‌هایی که برای مشخص کردن «آستانه‌ی تحریک‌پذیری» ناشی از فلیکر به‌کار می‌برند، با یکدیگر تفاوت دارند. اما به‌طور کلی، دو رویکرد اصلی وجود دارد: روش SCVD و روش فلیکر متر. بین این دو روش تفاوت‌های بنیادی وجود دارد SCVD. مخفف کاهش ولتاژ اتصال کوتاه (Short-Circuit Voltage Depression) است که در ادامه توضیح داده می‌شود. توجه داشته باشید که مقدار SCVD در نقطه‌ی اتصال مشترک (PCC) بیشتر از نقاط دیگر سیستم تغذیه که از مرکز بار دورترند و بارهای دیگری به آن متصل است خواهد بود.

(الف) روش SCVD : روش SCVD بر پایه‌ی همبستگی بین وقوع شکایات از فلیکر توسط دیگر مصرف‌کنندگان، مانند کارخانه‌های فولاد، و افت ولتاژ اتصال کوتاه در نقطه‌ی اتصال مشترک (PCC) استوار است. SCVD معمولاً به صورت درصد کاهش ولتاژ در نقطه‌ی اتصال مشترک در حالتی که کوره از وضعیت مدار باز به مدار اتصال کوتاه در هر سه فاز تغییر وضعیت می‌دهد، بیان می‌شود. همبستگی بین مقدار SCVD و تعداد شکایات فلیکر بر اساس بررسی‌های گذشته تعیین می‌گردد. سه بررسی

شناخته شده در مراجع ۵، ۶ و ۷ ذکر شده است. همچنین، نتایج یک بررسی ساده شده (اما پرکاربرد) از سوی UIE/UNIPED و AIEE در شکل ۴-۶ ارائه شده است. به عنوان نمونه یکی از استانداردها و توصیه‌های معمول که در بریتانیا به کار می‌رود (منبع ۵) بدین صورت است: SCVD باید در ولتاژهایی برابر یا کمتر از ۱۳۲ کیلوولت، حداکثر ۲.۰٪ و در ولتاژهای بالاتر از آن، ۱.۶٪ باشد. این مقادیر برای روشی هستند که در آن SCVD با حداقل سطح اتصال کوتاه محاسبه می‌شود.



شکل ۴-۶: رابطه بین SCVD و توان پیشنهادی کوره

روش SCVD برای بررسی مسئله‌ی فلیکر، مزایای عملی مهمی دارد. این روش ساده است و «آستانه‌ی تحریک‌پذیری» را به‌گونه‌ای تعریف می‌کند که برای مشترکین شرکت برق به صورت خودکار قابل قبول باشد. با استفاده از این روش، می‌توان در **مرحله‌ی طراحی** پیش‌بینی کرد که آیا نصب یک کوره‌ی جدید ممکن است موجب بروز فلیکر آزاردهنده شود یا خیر، زیرا SCVD را می‌توان از پیش و با توجه به توان اکتیو و راکتیو کوره و امپدانس سیستم تغذیه محاسبه کرد. همه‌ی این پارامترها معمولاً در مرحله‌ی طراحی در دسترس هستند.

(ب) روش فلیکرمتر: یکی از ضعف‌های روش SCVD این است که فلیکر را تعریف نمی‌کند؛ بنابراین، مشخص نمی‌سازد که فلیکر واقعی ولتاژ به چه صورت باید برای اهداف اندازه‌گیری یا پیش‌بینی، کمی‌سازی شود. اندازه‌گیری در ارزیابی فلیکر در هر دو حالت — نصب‌شده با جبران‌ساز و بدون جبران‌ساز — اهمیت دارد. همچنین، پیش‌بینی برای طراحی مدارهای کنترلی در برخی انواع جبران‌ساز نیز مهم است.

مشکل اصلی در تعریف دقیق فلیکر، در تنوع زیاد فلیکرمترهایی که تا کنون آزموده شده‌اند، بازتاب می‌یابد. این فلیکرمترها بر پایه‌ی اصول اندازه‌گیری متفاوتی کار می‌کنند. برخی از آن‌ها از **سلول نوری (فتوسل)** استفاده می‌کنند که به نور لامپ رشته‌ای تنگستن پاسخ می‌دهد، در حالی که برخی دیگر مستقیماً به ولتاژ ورودی حساس هستند. اکثر آن‌ها مقدار مؤثر (RMS) نوسانات یا مدولاسیون ولتاژ را اندازه می‌گیرند، چرا که این

پارامتر، مهم‌ترین عامل مشترک در درک فلیکر توسط تعداد زیادی از مصرف‌کنندگان است.

با این حال، بین فلیکرمترهای مختلف، تفاوت‌های زیادی در پاسخ فرکانسی و تفسیر نتایج وجود دارد. برخی از آن‌ها تلاش می‌کنند منحنی «حساسیت بصری» چشم انسان را بازسازی کنند، در حالی که برخی دیگر هیچ نوع وزن‌دهی به پاسخ فرکانسی ندارند. برخی از انواع فلیکرمترها، فیلترهای هارمونیک را در خود جای داده‌اند، چرا که هارمونیک‌ها ممکن است بر خوانش دستگاه تأثیر بگذارند، بدون آن‌که تأثیر زیادی بر مقدار RMS نوسانات داشته باشند.

فلیکرمترها همچنین در دوره‌ی میانگین‌گیری برای محاسبه‌ی مقدار RMS نیز تنوع زیادی دارند. برخی مقادیر پیوسته ارائه می‌دهند؛ برخی دیگر در فواصل چند ثانیه یا چند دقیقه‌ای نمونه‌ای را قرائت می‌کنند و بعضی دیگر با انتگرال‌گیری پیوسته، مجموع مقدار سوسو زدن را ارائه می‌کنند.

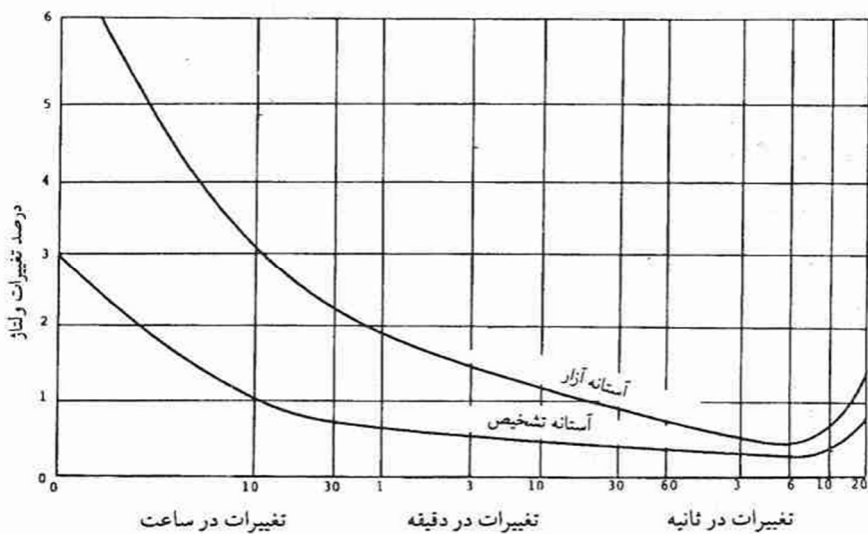
به نظر می‌رسد که شرکت‌های برق به‌طور نسبی کمتر تمایل دارند تا «آستانه‌ی تحریک‌پذیری» را بر اساس قرائت یک فلیکرمتر خاص مشخص کنند؛ هرچند استفاده‌ی روزافزون از این ابزارها ممکن است این روند را تغییر دهد. همچنین برخی از خریداران تجهیزات جبرانساز، از پیش چنین معیاری را در مشخصات خود گنجانده‌اند.

ارزش اصلی فلیکرمتر تا این‌جا بیشتر در اندازه‌گیری مقدار فلیکر «قبل و بعد» از افزودن یک جبرانساز به یک کوره‌ی موجود بوده است. با این حال، فلیکرمتر کمک چندانی به برنامه‌ریزی برای نصب یک کوره‌ی جدید

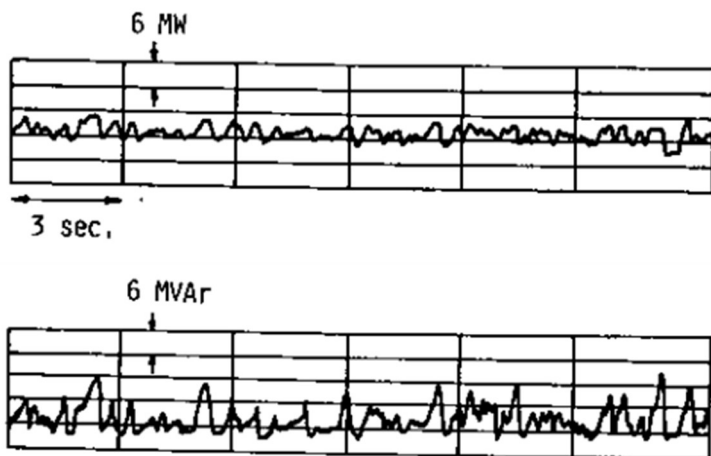
یا طراحی یک جبرانساز نمی‌کند، چرا که در حال حاضر نمی‌توان از داده‌های طراحی پیش‌بینی کرد که قرائت فلیکرمتر چگونه خواهد بود (چه با وجود جبرانساز و چه بدون آن).

مثالی از منحنی «حساسیت بصری» در شکل ۵-۶ نشان داده شده که هدف آن توصیف عملکرد فلیکرمتر خاصی نیست، بلکه صرفاً برای نشان دادن این است که چشم انسان — از طریق نور الکتریکی — به ویژگی‌های طیفی فلیکر حساس است و می‌تواند حتی نوسانات بسیار کوچک ولتاژ را تشخیص دهد. **آستانه‌ی تشخیص** برای مدولاسیون پیوسته‌ی ولتاژ سینوسی در فرکانس ۷ تا ۸ هرتز در حدود **۰٫۳٪ مقدار RMS** برآورد شده است. شکل ۵-۶ همچنین حداکثر حساسیت چشم به نوسانات ولتاژ در محدوده‌ی فرکانسی ۶ تا ۱۰ هرتز را نشان می‌دهد، اما گزارش‌هایی از تشخیص تغییرات تند که کمتر از نیم‌سیکل طول می‌کشند نیز وجود دارد. این موضوع نشان می‌دهد که هر **جبرانسازی** که برای کاهش فلیکر در نظر گرفته می‌شود، باید دارای **پاسخ دقیق و سریع** باشد.

توصیه‌های مربوط به SCVD که از سوی یکی از شرکت‌های برق (شورای برق انگلستان) ارائه شده، با یک مقدار خاص از مقدار RMS نوسان ولتاژ ارتباط دارند. نتایج بررسی‌های گزارش‌شده در مرجع ۵ نشان داد که، بر پایه‌ی شکایات، می‌توان «آستانه‌ی تحریک‌پذیری» را به صورت نوسان RMS بیش از **۰٫۲۵٪ به مدت ۱٪ از زمان** تعریف کرد. به این حالت، نوسان **نقطه‌مرجع (gauge-point)** گفته می‌شود.



شکل ۵-۶: نمونه‌ای از پاسخ مرئی سیستم به سوسو زدن (فلیکر) لامپ روشنایی



شکل ۶-۶: تغییرات توان اکتیو و راکتیو یک کوره نمونه

ماهیت تغییرات جریان در کوره قوس الکتریکی: نوسانات ولتاژ

ناشی از تغییرات بزرگ و گاهی غیرقابل پیش‌بینی جریان هستند که از طریق امپدانس مشترک منبع تغذیه، در بالادست نقطه اندازه‌گیری، عبور می‌کنند. نموداری از توان اکتیو و راکتیو نمونه‌ای از یک کوره در شکل ۶-۶ نشان داده شده است. جریان به دلیل تأخیر در اشتعال و مقاومت غیرخطی قوس، معمولاً نامنظم است؛ همچنین، قوس الکتریکی به دلیل ترکیب تأثیرات نیروهای الکترومغناطیسی، جریان‌های همرفت، حرکت الکترودها و فروریزش و لغزش مواد ذوب‌شونده (که عمدتاً شامل قراضه فلز است) به شکل نامنظم جابه‌جا می‌شود. جریان‌ها نامتعادل، اعوجاج‌یافته و حتی بین نیم‌سیکل‌های متوالی نیز دارای نوسانات شدید هستند. این تغییرپذیری و اعوجاج معمولاً در دقایق ابتدایی چرخه ذوب شدیدتر است، زمانی که الکترودهای گرافیتی به داخل بار فشار داده می‌شوند («مرحله‌ی فروبردن» یا bore-down). با افزایش حجم فلز مذاب، قوس کوتاه‌تر و پایدارتر می‌شود و دوره‌ی بعدی یعنی «تصفیه» (refining) با جریان‌هایی بسیار یکنواخت‌تر و با اعوجاج نسبتاً کم مشخص می‌شود. در این دوره، توان کوره ممکن است با استفاده از تغییر تپ در ترانسفورماتور کوره، به کسری کوچک از مقدار آن در مرحله‌ی bore-down کاهش یابد.

برای درک اندازه تغییرات جریان در یک کوره بزرگ، می‌توان به شکل ۶-۶ و مثال بخش ۶-۱ مراجعه کرد که در آن یک کوره با توان ۶۰ مگاوات و ولتاژ الکتروود ۷۰۰ ولت، جریانی بیش از ۷۰٬۰۰۰ آمپر در هر فاز دارد. توان راکتیو متوسط حدود ۶۰ مگاوات‌آمپر راکتیو (MVar) است که نیازمند یک بانک خازنی بسیار بزرگ برای اصلاح کامل ضریب توان است.

تحلیل طیفی جریان اعوجاج یافته کوره، منجر به مؤلفه‌های هارمونیک گسسته با مرتبه صحیح نمی‌شود، بلکه طیفی پیوسته (اگرچه نامنظم) را تولید می‌کند که دامنه آن به‌طور کلی به‌صورت معکوس با فرکانس نسبت دارد.

با این وجود، استخراج دامنه‌های طیفی در مضارب پایین فرکانس پایه برای هدف درجه‌بندی فیلترهای هارمونیکی که به کوره متصل‌اند، بسیار اهمیت دارد. این فیلترها معمولاً برای هارمونیک‌هایی با ترتیب‌های مشخص (عموماً ۲، ۳، ۴، ۵ و ۷) طراحی می‌شوند. جدول ۶-۱ نتایج تحلیل فوری دیجیتال جریان‌های کوره را که برای تعیین درجه‌بندی فیلتر استفاده می‌شوند، خلاصه می‌کند.

Furnace Condition	Harmonic Order:	Harmonic Current % of Fundamental				
		2	3	4	5	7
Initial melting (active arc)		7.7	5.8	2.5	4.2	3.1
Refining (stable arc)			2.0		2.1	

جدول ۶-۱: نمایش محتوای هارمونیکی جریان کوره قوس الکتریکی در دو مرحله سیکل ذوب شدن

۶-۳-۲- روش‌های جبرانسازی فلیکر

اگر SCVD محاسبه شده برای یک کوره در دست احداث در مناطق "مرزی" یا "غیرقابل قبول" شکل ۶-۴ قرار گیرد، یا اگر شکایات مربوط به فلیکر قبلاً توسط یک تأسیسات موجود مطرح شده باشد، آنگاه باید بین کاهش بار کوره، تقویت شبکه تغذیه، یا نصب تجهیزات جبرانساز، یکی را انتخاب کرد.

شبکه تغذیه را می‌توان با اتصال به سطح ولتاژ بالاتر، یا با نصب خطوط اضافی، یا هر دو تقویت کرد. این گزینه ممکن است پرهزینه باشد، اما اغلب زمانی که توسعه آتی فولادسازی یا بارهای همسایه پیش‌بینی می‌شود، انتخاب آن منطقی به نظر می‌رسد.

هنگامی که قرار است از جبرانسازی استفاده شود، می‌توان از بین چندین نوع مختلف جبرانساز انتخاب کرد. برخی از مزایا و معایب عملی انواع مختلف در جدول ۶-۲ خلاصه شده‌اند و اصول عملکرد مهم‌ترین انواع مدرن در بخش‌های ۶-۳ و ۶-۴ مورد بحث قرار گرفته‌اند.

وسيله جبران کننده چشمک زدن یا روش جبران	مزایا	معایب
راکتور تایریستور کنترل	پاسخ سریع عملکرد مستقل فازها	برای اصلاح ضریب توان به خازن موازی نیاز دارد تولید هارمونیک می کند
خازن تایریستور سوچ	بدون تولید هارمونیک بی نیاز از راکتور عملکرد مستقل فازها	سرعت پاسخ محدود است
راکتور انشعابی / راکتور قابل اشباع	دارای پاسخ سریع که منجر به کاهش فوق العاده چشمک زدن می شود عملکرد مستقل فازها	برای اصلاح ضریب توان به خازن موازی بزرگ نیاز دارد تولید هارمونیک می کند فقط برای یک کوره کاربرد دارد
راکتور قابل اشباع جبران شده هارمونیک	پاسخ سریع هارمونیک تولید شده قابل اغماض است ساختمانی مشابه ترانسفورماتور	برای اصلاح ضریب توان به خازن موازی نیاز دارد گذرای ناشی از انرژی دار کردن فازها بطور مستقل کنترل نمی شوند
کندانسور ششگونی	—	به تعمیر و نگهداری منظم نیاز دارد حتی با حضور راکتور ضربه گیر توانایی کاهش چشمک زدن آن محدود است
افزایش سطح اتصال کوتاه سیستم تغذیه	قابلیت اعتماد بالا امکان توسعه تاسیسات کوره در آینده	هزینه زیاد

جدول ۶-۲: مزایا و معایب انواع جبرانساز فلیکر

مفاهیم پایه ای عملکرد جبرانساز. توانایی یک جبرانساز در کاهش فلیکر ولتاژ، به طور کلی به نسبت جبران و سرعت پاسخ بستگی دارد که به صورت زیر تعریف می شوند:

الف) نسبت جبران: این نسبت به صورت زیر تعریف می شود:

$$C = \frac{\text{توان راکتیو قابل کنترل جبرانساز}}{\text{تغییرات توان راکتیو کوره}}$$

بخش قابل کنترل یک جبرانساز با خازن های ثابت شنت که ممکن است برای بهبود ضریب توان کلی استفاده شوند، تفاوت دارد. داشتن $C < 1$ غیر

معقول نیست. به ویژه زمانی که جبرانساز برای اصلاح نامتعادلی استفاده می‌شود. دلیل این امر آن است که نوسان توان راکتیو لازم در یک فاز، زمانی که دو فاز دیگر اتصال کوتاه شده‌اند، از نوسان توان راکتیو هر فاز در شرایط متعادل بیشتر است. گاهی جبرانساز به صورت "بیش از اندازه" طراحی می‌شود (یعنی $C > 1$) تا افت ولتاژ در ترانسفورماتور اصلی تغذیه را جبران کرده و پایداری ولتاژ در نقطه اتصال مشترک (PCC) را بهبود بخشد.

(ب) **سرعت پاسخ.** نوسانات توان راکتیو $\Delta Q_p(t)$ در کوره و پاسخ جبرانساز به آن‌ها آنی نیستند، بلکه در طول زمان گسترش می‌یابند. پاسخ جبرانساز $Q_y(t)$ معمولاً فرم مشابهی با $\Delta Q_p(t)$ ندارد، و در هر صورت، هر دو تابع $\Delta Q_p(t)$ و $Q_y(t)$ منحصر به فرد نبوده و به تعریف توان راکتیو و روش اندازه‌گیری آن بستگی دارند. $Q_y(t)$ در برخی موارد شامل فیلترهای هارمونیک نیز می‌شود. این عوامل موجب می‌شوند که تعریف پاسخ جبرانساز به صورت یک عدد واحد دشوار باشد و باید در تفسیر مقادیر ادعا شده به عنوان زمان پاسخ یا حتی پاسخ فرکانسی، دقت زیادی به خرج داد.

با وجود این دشواری‌ها، بررسی تأثیر تأخیر در پاسخ جبرانساز در شرایط ایده‌آل، که در آن توان راکتیو کوره به صورت سینوسی با یک فرکانس مشخص مدوله شده است، مفید خواهد بود:

$$\Delta Q_p(t) = \Delta \hat{Q}_p \sin \omega_m t \quad (5)$$

فرض کنید پاسخ توان راکتیو جبرانساز $Q_y(t)$ نیز سینوسی با دامنه $C\Delta \hat{Q}_p$ و تاخیر فاز γ باشد. بنابراین

$$Q_y(t) = C\Delta \hat{Q}_p \sin(\omega_m t - \gamma) \quad (6)$$

به طور کلی C و γ هر دو تابعی از فرکانس مدولاسیون ω_m و نوع جبران‌ساز هستند. نوسان باقی مانده توان راکتیو پس از جبران‌سازی به صورت زیر است:

$$Q_\varepsilon(t) = \Delta \hat{Q}_\rho(t) - Q_y(t) \quad (7)$$

رابطه بین $\Delta Q_\rho(t)$ ، $Q_y(t)$ و $Q_\varepsilon(t)$ در شکل ۶-۷ نشان داده شده است. از این دیگرام می‌توان یک نسبت تضعیف فلیکر^۴ تعریف کرد که آن را با نماد F نشان می‌دهیم:

$$F = \left| \frac{\Delta Q_\rho}{Q_\varepsilon} \right| = \frac{1}{\sqrt{1+C^2-2C \cos \gamma}} \quad (8)$$

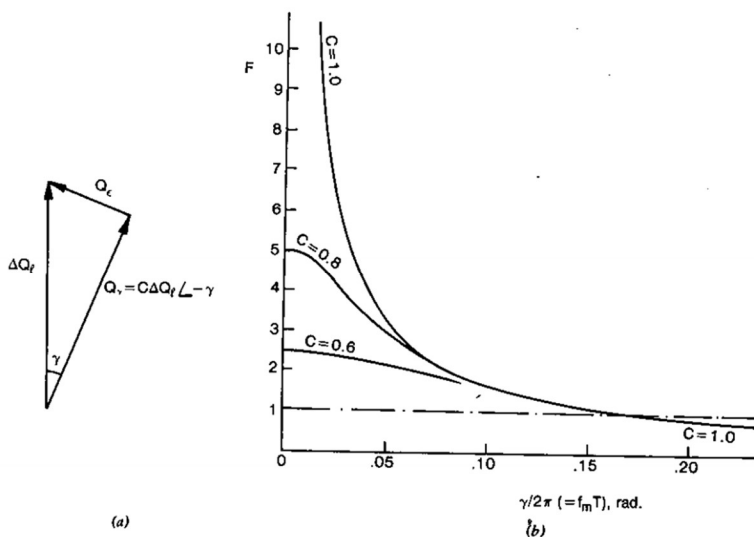
نسبت تضعیف فلیکر F به طور طبیعی تابعی از فرکانس نوسان ω_m است. نمودار F به صورت تابعی از زاویه تاخیر γ برای مقادیر مختلف C در شکل ۶-۷ ب ترسیم شده است. این منحنی‌ها برای نوسانات در یک فرکانس منفرد در نظر گرفته شده‌اند.

می‌توان مشاهده کرد که اگر $C=100\%$ و $\gamma = \frac{\pi}{3}$ باشد، بهبودی در فلیکر حاصل نمی‌شود و اگر $\gamma > \frac{\pi}{3}$ و $F < 1$ باشد، فلیکر توسط جبران‌ساز تقویت می‌شود. به عنوان نمونه نسبت تضعیف فلیکر $F=4$ در فرکانس نوسانات ۱۰ هرتز، نشان دهنده یک نیاز جبران‌سازی است. در این حالت اگر $C=100\%$ باشد، آنگاه باید $\gamma < 0.08$ رادیان (۱۴ درجه) باشد. اگر چنانچه تاخیر جبران‌ساز با تاخیر زمانی ثابت T نشان داده شود، آنگاه

$$\gamma = \omega_m T = 2\pi f_m T \quad (9)$$

^۴Flicker Suppretn Ratio

و برای اینکه در فرکانس ۱۰ هرتز نسبت کاهش فلیکر $F=4$ باشد، لازم است $t < 4ms$ باشد (با $C=100\%$).



شکل ۶-۷: الف) اثر نسبت جبران C و تاخیر γ در جبران تغییرات توان راکتیو در یک فرکانس تغییرات واحد - ب) نسبت کاهش چشمک زدن F به صورت تابعی از زاویه تاخیر γ با $C=1$

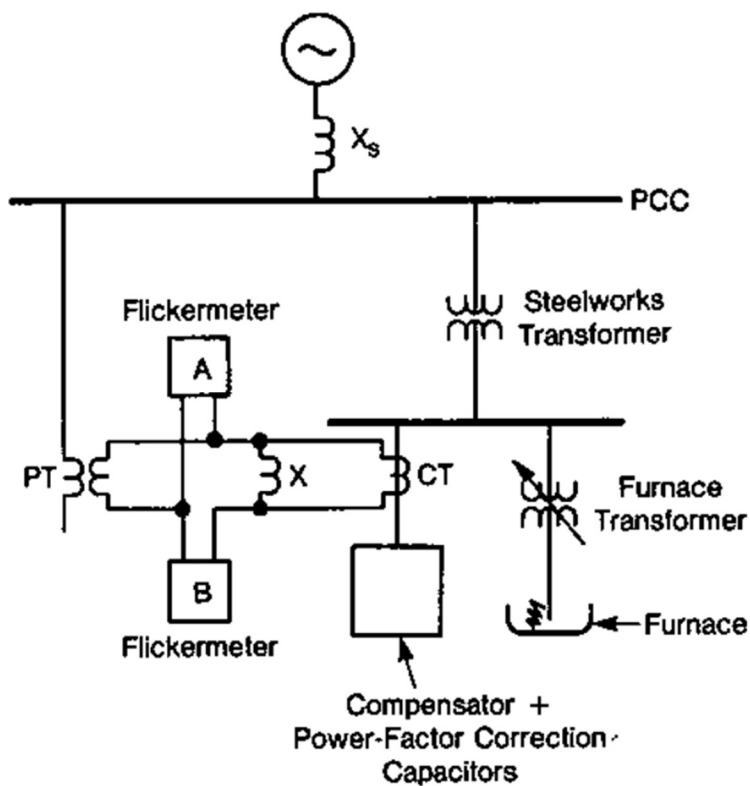
منحنی‌های دیگر در شکل ۶-۷-ب نشان می‌دهند که برای یک ضریب تضعیف فلیکر معین، بین اندازه‌ی جبرانساز C و سرعت پاسخ‌دهی آن یک مصالحه وجود دارد. یک جبرانساز کندتر ممکن است نیاز به بزرگ‌سازی داشته باشد تا عملکردی قابل مقایسه با نوع سریع‌تر ارائه دهد.

نوسانات توان راکتیو ناشی از یک کوره‌ی واقعی را نمی‌توان تنها با یک فرکانس مدولاسیون توصیف کرد، و پاسخ یک نوع خاص از جبرانساز به یک کوره‌ی واقعی را نمی‌توان به‌طور کامل با تنها یک تأخیر زمانی پاسخ T تعریف کرد. با این حال، ضریب تضعیف فلیکر معیاری مفید برای سنجش عملکرد یک جبرانساز است. این ضریب اغلب در متون علمی ذکر می‌شود، هرچند تعاریف متفاوتی برای آن ارائه شده‌اند؛ برخی مبتنی بر معیار SCVD هستند و برخی دیگر بر اندازه‌گیری‌های میدانی با استفاده از نوع خاصی از فلیکرمتر تعریف می‌شوند. این مسئله با رابطه (۸) که ساده‌ترین تعریف نظری را ارائه می‌دهد، در تضاد است. بنابراین تعریف روش‌های نظری بهتری نیز امکان پذیر است.

در تلاش برای از بین بردن فلیکر کوره، فلیکر با و بدون جبرانساز به‌صورت هم‌زمان با استفاده از مدار شبیه‌ساز نشان داده‌شده در شکل ۸ اندازه‌گیری شده است. این روش فرض می‌کند که جریان‌های کوره در حضور و بدون حضور جبرانساز به یک اندازه دارای اعوجاج و تغییرات هستند.

۶-۳-۳- انواع جبرانساز

در این بخش دو رویکرد برای جبرانسازی فلیکر توصیف خواهد شد. هر دو این‌ها از نظر عملکرد کلی از روش جبرانسازی قدیمی نوع کندانسور سنکرون هستند- که در اینجا مورد بحث قرار نگرفته است- برتر هستند.



شکل ۶-۸: مدار اندازه‌گیری فلیکر در حضور و غیاب جبران‌ساز. راکتانس X واقع در ثانویه ترانسفورماتور ولتاژی را ایجاد می‌کند که معرف اثر جبران‌ساز بر ولتاژ PCC است. این ولتاژ از ولتاژ ورودی اندازه‌گیر فلیکر B کم می‌شود.

جبرانساز راکتور اشباع‌شونده نخستین جبرانساز سریع‌پاسخ مدرن بود که به طور گسترده به کار گرفته شد. این نوع جبرانساز نخستین بار توسط فریدلندر در سال ۱۹۶۴ معرفی شد. این جبرانساز در دو نوع اصلی ظاهر شد: آرایش راکتور ضربه‌ای (tapped-reactor) و جبرانساز باس‌بار، که از نوع دوگانه یا سه‌گانه‌ی سه‌برابرکننده راکتور خوداشباع‌شونده‌ی چندفاز با جبران هارمونیک استفاده می‌کند. طرح راکتور ضربه‌ای در اصل یک تجهیز تک‌فاز است و اگرچه پاسخ سریعی دارد، اما به علت نیاز به عنصر سری، برای نصب در کوره‌های چندگانه مناسب نیست. پاسخ سریع آن به بهای نیاز زیاد به فیلتر هارمونیک به دست می‌آید.

رویکرد دوم برای جبران‌سازی فلیکر، استفاده از راکتور کنترل‌شده با تایریستور (TCR) یا خازن کلیدزنی‌شده با تایریستور (TSC) است. مانند جبرانساز سنکرون و نوع باس‌بار جبرانساز راکتور اشباع‌شونده، این جبرانسازها به صورت موازی با کوره (یا کوره‌ها) در باس‌بار کوره متصل می‌شوند. به زبان ساده، اصل کار به این صورت است که توان (یا جریان) راکتیو کوره در سریع‌ترین زمان ممکن اندازه‌گیری شده و کنترل جبرانساز به گونه‌ای انجام می‌گیرد که مجموع توان راکتیو کوره و جبرانساز تا حد امکان ثابت بماند.

اغلب لازم است فیلترهای هارمونیک برای جذب هارمونیک‌های تولیدی کوره به کار گرفته شوند. از نظر مفهومی، جبرانساز تنها برای پایدارسازی و جبران توان راکتیو در فرکانس اصلی سیستم طراحی شده است. TCR و راکتورهای ضربه‌ای خود نیز جریان‌های هارمونیک تولید

می‌کند که به جریان‌های هارمونیک کوره افزوده می‌شوند. وظیفه فیلترهای هارمونیک بسته به نوع جبرانساز مورد استفاده متفاوت خواهد بود و به مشخصات پاسخ فرکانسی سیستم تغذیه نیز بستگی دارد.

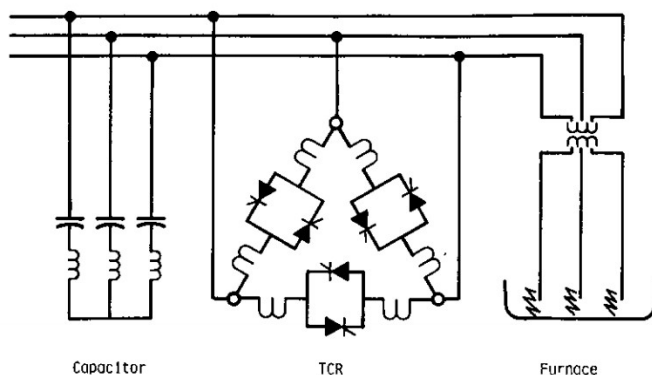
رویکرد سوم برای جبران‌سازی فلیکر، تلاش مستقیمی برای دستیابی به جبران‌سازی آنی جریان راکتیو شامل جریان‌های هارمونیک است. یکی از تجهیزاتی که برای این منظور پیشنهاد شده، کنترلر جریان باند تلرانسی^۴ است که به گونه‌ای کنترل می‌شود تا همه اجزای جریان کوره را به جز مؤلفه اصلی فرکانس پایه (که برای تولید توان مفید کوره ضروری است) تأمین کند. اگرچه این روش از نظر مفهومی مستقیم‌ترین روش است، اما به فناوری الکترونیک قدرت پیشرفته با تعداد زیادی کلید تایریستوری نیاز دارد.

۶-۴- جبرانسازهای کنترل شونده با تایریستور

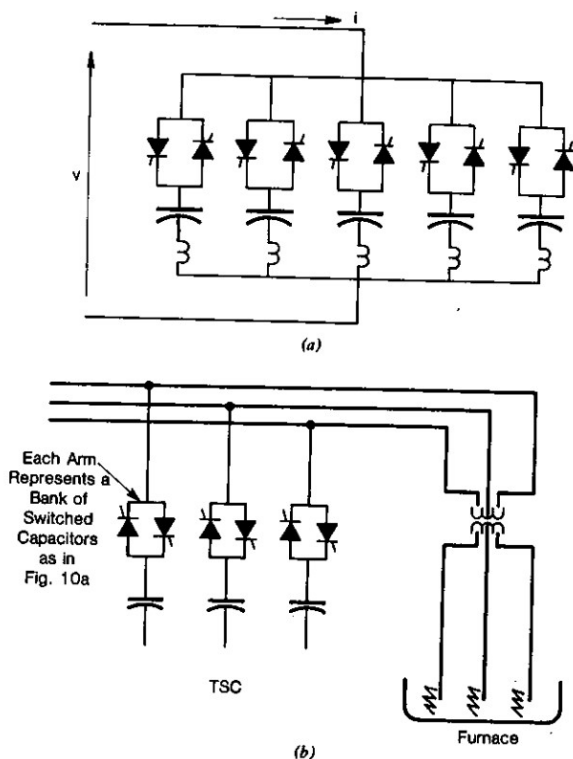
عنصر پایه‌ای همه‌ی جبرانسازهای کنترل‌شونده با تایریستور، همانطور که در اشکال ۶-۹ و ۶-۱۰ نشان داده شده است، یک خازن یا راکتور سری شده با یک سوئیچ تایریستوری جریان متناوب است. سوسپتانس موثر در فرکانس پایه توسط عملیات کلیدزنی‌ای که سیگنال‌های کنترلی آن به گیت-های تایریستور اعمال می‌شوند، کنترل می‌شود. سوسپتانس کنترل‌شونده‌ی موازی شده با کوره‌ی قوس، طوری توان راکتیور را تزریق یا جذب می‌کند که توان راکتیو مرکب از کوره و جبرانساز تا حد امکان تقریباً ثابت بماند.

^۴Tolerance – Band Current Controller

در سیستم‌های جبرانساز TCR، این توان راکتیو ثابت معمولاً برابر است با اوج توان راکتیوی که بیشتر مواقع در کوره تکرار شده است، و ضریب توان کل توسط خازن‌های موازی تصحیح می‌شوند. این روش جبرانسازی غیرمستقیم نامیده می‌شود. در سیستم‌های جبرانساز TSC، این توان راکتیو ثابت نزدیک صفر بوده و کوره چیزی که TSC تولید کرده است را جذب می‌کند. این روش جبرانسازی مستقیم نامیده می‌شود. این استراتژی نوسانات ولتاژ را در بالا دست نقطه‌ی اتصال جبرانساز، بطور اتوماتیک کاهش می‌دهد. خازن‌های ثابت می‌توانند به صورت موازی با جبرانساز، برای تنظیم ضریب توان میانگین استفاده شوند.



شکل ۶-۹: آرایش عمومی یک جبرانساز راکتوری کنترل شونده با تایریستور، اعمال شده به یک کوره‌ی قوس. به راکتورهایی که با خازن‌های اصلاح ضریب توان به فرکانس‌های مضرب صحیح هارمونیک‌ی مرتبه پایین تنظیم شده‌اند، دقت کنید.

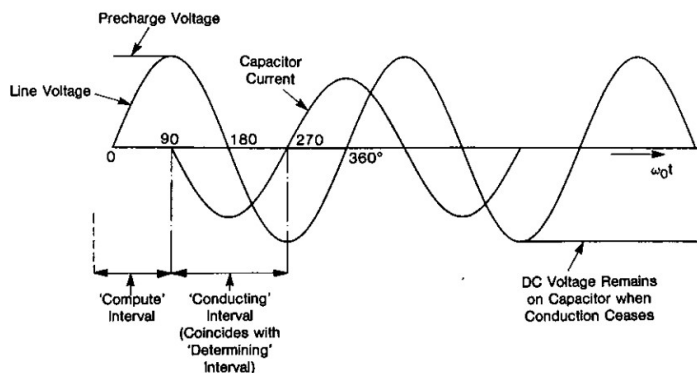


شکل ۶-۱۰-۶ (a) اصول جبرانساز TSC. (b) آرایش عمومی یک TSC اعمال شده به یک کوره قوس. به راکتورهای تنظیم فرکانسی دقت کنید.

۶-۴-۱- رابطه بین جبرانساز توان راکتیو و زاویه آتش گیت تایریستور

فهم اینکه چگونه توان راکتیو جبرانساز توسط زاویه آتش‌های گیت سوئیچ‌های تایریستوری تعیین می‌شود، اهمیت دارد.

خازن سوئیچ شونده با تایریستور (TSC) از چندین واحد خازنی کوچکتر موازی که هریک دارای سوئیچ تایریستوری مختص به خودشان هستند، تشکیل شده است (شکل ۶-۱۰). تقاضا برای توان راکتیو به واسطه ورود (یا خروج) تعداد مناسبی از واحدهای خازنی صورت می‌گیرد. شکل- موج‌های ایده‌آل سوئیچینگ ولتاژ و جریان برای یک واحد خازنی در شکل ۶-۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۶-۱۱- شکل موج‌های سوئیچینگ ولتاژ و جریان در خازن سوئیچ شونده با تایریستور (حالت ایده‌آل)

در حالت خاموش، خازن ولتاژ پیش‌شارژی برابر با پیک مثبت یا منفی ولتاژ متناوب دارد، که آن را از جریان صفری که آخرین بار خاموش شده

است، در خود نگه داشته است. به منظور به حداقل رساندن جریان‌های گذرا، خازن تنها زمانی روشن می‌شود که ولتاژ متناوب اعمال شده به آن مساوی (یا خیلی نزدیک به) ولتاژ پیش-شارژ خازن باشد. این امر در هر دوره‌ی تناوب فقط یکبار اتفاق می‌افتد، بنابراین مدار کنترلی همواره حداقل یک دوره‌ی تناوب کامل زمان دارد تا «تصمیم بگیرد» که آیا یک واحد خازنی در حال انتظار را روشن کند یا خیر. به طور مشابه مدار کنترلی همواره حداقل نصف دوره‌ی تناوب زمان دارد تا «تصمیم بگیرد» که آیا یک واحد خازنی مشخص در حال هدایت را خاموش کند یا خیر (با برقرار نگه داشتن پالس تحریک گیت برای هدایت تایریستور در حال جریان-صفر بعدی). به منظور پاسخ‌دهی سریع، معمولاً این تصمیمات کنترلی (که شامل اندازه‌گیری توان راکتیو مورد نیاز و هماهنگی حالات همه‌ی تایریستورها و خازن‌هاست) به چند میلی‌ثانیه‌ی آخر زمان در دسترس موکول می‌شوند. وقتی گیت یک تایریستور تحریک می‌شود، هدایت آن تا زمانی که جریان بطور طبیعی (یعنی با تعیین مدار) به صفر برسد، ادامه می‌یابد. در غیاب هارمونیک‌ها با منشأ خارج از TSC، دوره‌های تناوب همواره دقیقاً مضارب صحیحی از یک نیم سیکل خواهد بود، و TSC خودش هیچ هارمونیکی تولید نمی‌کند. صدور فرمان پالس به گیت تایریستور منجر به هدایت واحد خازنی مربوطه در نیم‌سیکل بعدی می‌شود و بنابراین توان راکتیو جبران‌کننده را برطبق تعریف:

$$q = \frac{2}{T} \int_0^T v(t) i_c(t) dt \quad (10)$$

تحویل می‌دهد.

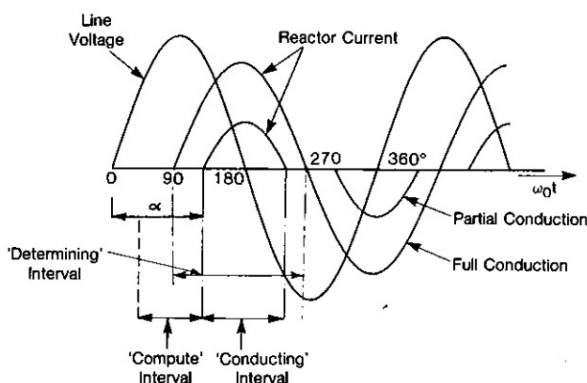
این رابطه بر این حقیقت تأکید می‌کند که پاسخ توان راکتیو یک رخداد لحظه‌ای نیست، بلکه بر حسب میانگین گرفته شده بر روی بازه‌ای از زمان است. چون بازه‌ی انتگرالگیری، دقیقاً یک دوره‌ی تناوب کامل نیست، لذا هارمونیک‌های ۷ یا ۱۱ می‌توانند موجب اعوجاج این نتایج شوند.

تأثیر کلی هارمونیک‌ها بایستی به حد کافی کوچک باشد تا به سیستم کنترلی این اجازه را بدهد که تعداد درستی از خازن‌ها را برای تزریق توان راکتیو مورد نیاز «در فرکانس پایه» وارد مدار کند.

بازه‌ی انتگرالگیری در معادله‌ی ۱۰ بازه‌ی تعیین‌کننده برای توان راکتیو جبرانساز نامیده شود. فرمان تحریک پالس نمی‌تواند در هیچ بازه‌ی زمانی دیرتری از شروع بازه‌ی هدایت صادر شود. در سیستم TSC بازه‌ی هدایت با بازه‌ی تعیین‌کننده تلاقی می‌کند. بنابراین «محاسبه‌ی» بازه (که در طول آن تقاضای توان راکتیو اندازه‌گیری می‌شود و تصمیم برای اینکه فرمان تایریستور صادر بشود یا خیر اتخاذ می‌شود) بایستی همیشه در شروع بازه‌ی تعیین‌کننده انجام شود.

راکتور کنترل شونده با تایریستور (TCR) فقط از یک راکتور در هر فاز تشکیل یافته و توسط سوئیچ تایریستوری کنترل می‌شود (شکل ۶-۹). برآورده کردن تقاضای توان راکتیو از طریق کنترل طول بازه‌ی هدایت در هر نیم سیکل بصورت نشان داده شده در شکل ۶-۱۲، با صدور فرمان پالس‌ها به گیت تایریستورها در پیش یا پس از زمان پیک ولتاژ، به میزانی بیشتر یا کمتر از توان راکتیو مورد تقاضا، انجام می‌شود. این فرآیند کنترل فاز نامیده می‌شود. همانند TSC، هدایت در حالت جریان-صفر طبیعی متوقف می‌شود. از آنجایی که ذخیره‌ی انرژی در راکتور در حالت جریان-

صفر، صفر باقی می ماند، متعاقباً می تواند دوباره بدون حالات گذرا در هر نقطه از سیکل ولتاژ وارد مدار شود. با این وجود به منظور حفظ تعادل بین تایریستورها با قطب های مخالف در هنگام سوئیچ، و جلوگیری از جریان های DC و جریان های هارمونیک های مرتبه ی زوج، پالس های تحریک گیت به بازه ی $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ محدود می شوند.



شکل ۶-۱۲: شکل موج های کلیدزنی ولتاژ و جریان در راکتور کنترل شده با تایریستور

جریان های کنترل شده با فاز، شامل جریان های هارمونیک هستند که بایستی توسط فیلترهای موازی جذب شوند. مولفه ی اصلی جریان I_{L1} از طریق معادله ی زیر به زاویه ی تحریک گیت α مربوط می شود:

$$I_{L1} = \frac{V}{\pi \omega L} (2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha) \quad (11)$$

که در آن L اندوکتانس راکتور و ω فرکانس زاویه‌ای اصلی است. برطبق تعریف زیر، توان راکتیو تحویل داده شده توسط جبران‌کننده از طریق I_{L1} تعیین می‌شود:

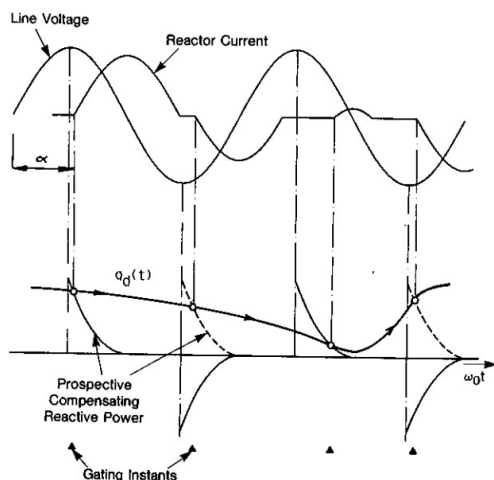
$$q = VI_{L1} \quad (12)$$

این رابطه بایستی برحسب میانگین گرفته شده بر روی یک نیم سیکل تفسیر شود، زیرا I_{L1} در معادله (۱۱) توسط آنالیز فوریه بصورت زیر تعیین شده است:

$$I_{L1} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{T}{2}} i_L(\alpha) \sin \omega t \, dt \quad (13)$$

صدور فرمان تحریک پالس به سوئیچ تایریستوری در یک زاویه آتش α منجر به هدایت راکتور مربوطه تا جریان-صفر بعدی شده و بنابراین توان راکتیو جبرانساز را بر طبق تعریف در معادلات (۱۲) و (۱۳) تحویل می‌دهد. بازه‌ی انتگرال‌گیری (یعنی بازه‌ی تعیین‌کننده) در معادله‌ی (۱۳) از زاویه‌ی 90° تا 270° بر روی شکل موج ولتاژ می‌باشد، و بجز در حالت $\alpha=90^\circ$ ، آن بازه پیش از صدور فرمان پالس شروع می‌شود. به عبارت دیگر، بازه‌ی هدایت عموماً کوتاه‌تر از بازه‌ی تعیین‌کننده است، و از آنجائیکه این دو بازه حول نقطه‌ی 180° شکل موج ولتاژ متقارن هستند، فرمان پالس تحریک گیت عموماً بعد از شروع بازه‌ی تعیین‌کننده صادر می‌شود. این امر منجر به احتمال گسترش بازه‌ی «محاسبه» فراتر از شروع بازه‌ی تعیین‌کننده، درست پیش از شیرواع بازه‌ی هدایت شده، که موجب بهبود سرعت پاسخ‌دهی TCR به تقاضای معین توان راکتیو در فرکانس پایه می‌شود.

زاویه‌ی اعمال پالس به گیت α می‌تواند توسط مدار عملیاتی الگوریتمی مطابق شکل ۶-۱۳ تعیین شود. در هر پیک ولتاژ مسیر پیش رو به صورت توان راکتیو جبران ساز مورد انتظار برچسب زده شده است، آغاز می‌شود. این مسیر با استفاده از معادله‌ی (۱۳)، با مقدار α ای که به صورت خطی در زمان در حال افزایش است، تعریف می‌شود. منحنی‌ای که با $q_d(t)$ برچسب زده شده است، یک سیگنال پیوسته نشانگر توان راکتیو مورد نیاز برای جبران سازی بار می‌باشد. یک جبران ساز لحظه‌ای را که دو منحنی با هم تلاقی می‌کنند را آشکار کرده، و با عث صدور فرمان تحریک گیت به تایریستور مناسب می‌شود. مدار منطقی تعیین می‌کند که گیت کدام یک از تایریستورهایی که در هر سوئیچ در قطب مخالف قرار دارند، بایستی تحریک شوند.



شکل ۶-۱۳: اصول مدار الگوریتمی برای تعیین زاویه‌ی پالس گیت تایریستور

۶-۴-۲- تعیین تقاضای توان راکتیو

اگرچه TCR و TSC از نظر زمان و نحوه‌ی تصمیم‌گیری تحریک پالس متفاوت هستند، هردوی آن‌ها نیازمند سیگنالی هستند که بطور دقیقی بروزترین مقدار توان راکتیو در فرکانس پایه یا جابجایی کوره را نشان دهند. این توان راکتیو می‌تواند بصورت در فاز تعریف شود:

$$q_l = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t v(t) i(t - \frac{T}{4}) dt \quad (14)$$

یعنی به صورت «میانگین در حال اجر». این رابطه می‌تواند در یک مدار الگوریتمی‌ای که یک سیگنال نشانگر توان راکتیو بار که دقیقاً در زمان t به پایان رسیده است، پیاده‌سازی شود. (اگر از جبرانساز انتظار تصحیح عدم تعادل فاز داشته باشیم، در عمل انتگرال‌گیری ممکن است پیچیده‌تر از چیزی باشد که در اینجا نشان داده شده است). بازه‌ی انتگرال‌گیری‌ای که در اینجا نشان داده شده است، دقیقاً یک دوره‌ی تناوب است. با هر مقدار دیگری از بازه‌ی انتگرال‌گیری، $q_l(t)$ به واسطه‌ی مولفه‌های هارمونیک‌ی جریان i خراب می‌شود (مولفه‌های هارمونیک‌ی ولتاژ ناچیز هستند)، و $q_l(t)$ به معنای توان راکتیو در «فرکانس پایه» نخواهد بود. این امر درواقع نامطلوب است، چراکه جبرانساز درصدد است تا صرفاً توان راکتیو در فرکانس پایه را جبران کند، در حالی که هارمونیک یا هارمونیک‌ها توسط فیلترهایی که موازی نصب شده‌اند، جذب می‌شوند. در عمل مشخص شده است که بازه‌ی انتگرال‌گیری یک دوره‌ی تناوبی برای حذف قابل قبول فلیکر خیلی طولانی است، و جبرانسازهایی که از روش «میانگین در حال اجرا» استفاده

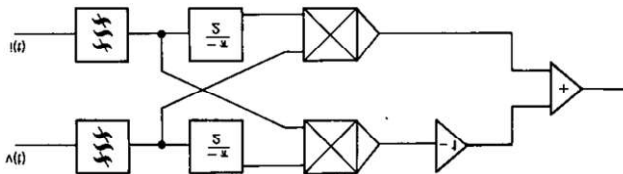
می‌کنند، می‌توانند یک بازه‌ی انتگرال‌گیری کوتاه‌تری را به‌کار بگیرند، و در تلاش برای بهینه کردن قابلیت حذف فلیکر، دقت را فدای سرعت می‌کنند. دیگر روش مورد استفاده برای تعیین $qi(t)$ بر مبنای رابطه‌ی زیر است:

$$v \hat{i}_l \sin \phi = -v \sin \omega t \cdot \hat{i}_l \sin(\omega t - \phi - \quad (۱۵)$$

$$\pi/2) + v \sin(\omega t - \pi/2) \cdot \hat{i}_l \sin(\omega t - \phi)$$

سمت چپ معادله برابر با دوبرابر توان راکتیو بار در هر فاز -تحت شرایط مانا- در فرکانس پایه است. این رابطه می‌تواند توسط مدار الگوریتمی نشان داده شده در شکل ۶-۱۴ پیاده‌سازی شود. یک چنین مداری می‌تواند به‌حد نهایت سریع در پاسخ‌دهی باشد. برای مثال، اگر جریان وارد مدار شود، $t = \phi/\omega$ بطور ناگهانی در زمان $\hat{i}_l \sin(\omega t - \phi)$ $v \hat{i}_l \sin \phi$ خروجی می‌تواند ظرف مدت ۲ میلی ثانیه به یک مقدار مانای برسد. با این وجود، نتیجه به واسطه‌ی مؤلفه‌های هارمونیک موجود در جریان خراب می‌شود. این‌ها می‌توانند به صورتی که در شکل ۶-۱۴ نشان داده شده است توسط فیلترینگ حذف شوند، اما فیلتر کردن یک تأخیر مضاعفی را در پاسخ سیستم وارد می‌کند. برخی از این موارد را می‌توان با استفاده از تکنیک‌های جبران فاز-پیش‌فاز بازیابی کرد. بنابراین، زمان پاسخ پله واقعی از نوع شرح داده شده در بالا در حدود ۴-۵ میلی ثانیه است. یک مشکل اضافی ممکن است در نتیجه ضرب v و $\hat{i}_l$ ظهور کند. اگر i_l به شکل یک موج سینوسی با فرکانس اصلی مدوله شده در فرکانس f_m باشد، خروجی مدار اندازه‌گیری ممکن است دارای مؤلفه‌هایی در فرکانس‌های $f_m, f, 2f-f_m, 2f, 2f+f_m$ باشد. جبران‌کننده، البته، طوری طراحی

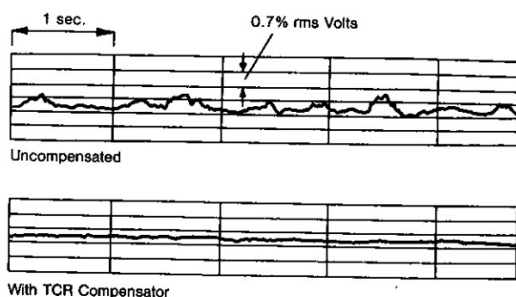
شده است که فقط به مؤلفه f_m پاسخ دهد، اما ممکن است در فرکانس‌های بالاتر مقداری پاسخ باقی مانده وجود داشته باشد. در صورت وجود رزونانس سیستم تغذیه در فرکانس $2f-f_m$ یا نزدیک به آن، می‌تواند تداخل نامطلوبی بین این رزونانس و جبرانساز ایجاد شود. می‌توان با کاهش کافی پاسخ فرکانسی جبران‌کننده در فرکانس‌های بالاتر، از این امر اجتناب کرد. چندین مدار الگوریتمی دیگر برای تعیین توان راکتیو بار در مقالات شرح داده شده است. الزامات جبران‌سازی توان راکتیو و متعادل‌سازی فاز با جزئیات بیشتر در فصل ۱ مورد بحث قرار گرفته است.



شکل ۶-۱۴: مدار الگوریتمی برای تعیین توان راکتیو لحظه‌ای $q_1(t)$. سیگنال خروجی $q_1(t)$ است.

۶-۴-۳- مثالی از نتایج جبران‌سازی فلیکر با یک جبرانساز TCR

شکل ۶-۱۵ یک ثبت واقعی از نوسانات ولتاژ جبران شده و جبران نشده را در نقطه‌ی کوپلینگ مشترک ۲۳۰ کیلوولت نشان می‌دهد. جبرانساز TCR در این مثال ۶۰ مگاوار در ولتاژ ۳۴,۵ کیلوولت است.



شکل ۶-۱۵: ثبت واقعی از نوسانات

۶-۵- جبرانسازهای راکتور اشباع شده

۶-۵-۱- جبرانساز با راکتور تپ دار/جبرانساز با راکتور اشباع شده

دستگاه ایده‌آل برای حذف فلیکر، جبرانساز راکتیو ولتاژ-ثابت است. تقریب چنین دستگاهی، راکتور خوداشباع است. شکل ۶-۱۶ رابطه بین ولتاژ ترمینال و جریان اصلی را برای یک راکتور اشباع تک فاز با تنها یک سیم‌پیچ روی یک هسته آهنی بسته نشان می‌دهد. منحنی $V-I$ مربوط به منحنی $B-H$ فولاد هسته است، اما به دلیل جریان‌های هارمونیکی که با چنین مقدار غیرخطی بودن اجتناب‌ناپذیر هستند، از نظر شکل با آن متفاوت است. برای عملکرد بالاتر از نقطه زانویی ac در شکل ۶-۱۶، مشخصه اساسی $V-I$ را می‌توان تقریباً با معادله (۱۶) نشان داد.

$$V = V_k + jX_r I_r \quad (16)$$

از آنجایی که میانگین توان در راکتور صفر است، V و V_k هم فاز هستند و می‌توان نماد فازور را حذف کرد. معادله ۱۶ سپس توسط خط مستقیم در شکل ۱۶ نشان داده شده است. مشخصه به دلیل راکتانس با شیب محدود X که معمولاً $0/1$ تا $0/15$ پریونیت است، کاملاً ولتاژ-ثابت نیست. امپدانس کوره می‌تواند از مدار باز کامل تا اتصال کوتاه کامل تغییر کند. با چنین بار بسیار متغیری، راکتانس با شیب محدود X مانع از کشیدن جریان کافی توسط راکتور برای مطابقت با جریان اتصال کوتاه کوره می‌شود و تنها جبران جزئی با راکتور اشباع ساده حاصل می‌شود. برای غلبه بر این، یک راکتور با انشعاب (شکل ۶-۱۷) معرفی می‌شود که "اهرم" راکتور اشباع و جریان‌های کوره را بر روی ولتاژ کوره-باسبار توزیع مجدد می‌کند. حتی می‌توان بیش از حد جبران کرد به طوری که ولتاژ تقریباً ثابت در نقطه‌های بالادست اتصال جبرانساز (به عنوان مثال، در نقطه‌ی اتصال مشترک PCC) حاصل شود.

اصل طرح با تحلیل ساده شده زیر نشان داده شده است، که در آن از همه مقاومت‌ها (به جز مقاومت قوس) صرف نظر می‌شود. ولتاژ طبق روابط زیر در دو بخش راکتور با انشعاب تقسیم می‌شود:

$$V_c - V_t = j(I_s + nI_f)X_1 \quad (17)$$

$$V_t - V_f = jn(I_s + nI_f)X_1 \quad (18)$$

و ولتاژ کوره با استفاده از فرمول زیر داده می‌شود:

$$V_f = V_c - j(I_s + nI_f)(1 + n)X_1 \quad (19)$$

جریان تغذیه I_s بایستی معادله زیر را برآورده کند:

$$E - V_k = jX_s I_s + (V_c - V_t) + jX_r I_r \quad (20)$$

$$= j(X_s + X_1 + X_r)I_s + j(nX_1 - X_r)I_f$$

اگر X_1 ، راکتانس کلی راکتور با تپ و n ، نسبت تپ باشد، برای ارضا

کردن معادله‌ی

$$nX_1 = X_r \quad (21)$$

انتخاب شوند، آنگاه جریان تغذیه‌ی I_s مستقل از جریان کوره I_f بوده و آنگاه

I_s به واسطه‌ی معادلات (۲۰) و (۲۱) داده می‌شود:

$$E - V_k = j(X_s + \frac{n+1}{n}X_r)I_s \quad (22)$$

با صرف‌نظر از هرگونه تغییر فاز بین E و V_k (که در عمل به هر حال

کوچک است)، جریان تغذیه ثابت است. بنابراین ولتاژ در تمام نقاط

بالادست راکتور دارای تپ، ثابت و عاری از نوسانات است. به طور خاص،

از آنجایی که $E - jX_s I_s = V_c$ ولتاژ در انتهای تغذیه راکتور دارای انشعاب

ثابت است و با رابطه زیر داده می‌شود:

$$V_c = V_k + j\frac{n+1}{n}X_r I_s \quad (23)$$

ولتاژ تغذیه شده به اولیه ترانسفورماتور کوره اکنون با معادلات ۱۹ ، ۲۰

و ۲۱ به صورت:

$$V_f = V_k - j(1 + n)X_f I_f \quad (24)$$

داده می‌شود که مستقل از ولتاژ تغذیه E (یا V_c) است و منحصرأً توسط

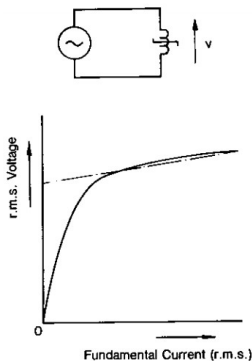
جبران‌کننده و جریان کوره تعیین می‌شود. یکی از معایب آرایش راکتور با

تپ ساده/راکتور اشباع که تاکنون توضیح داده شده است این است که ولتاژ

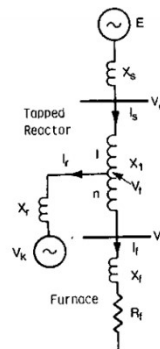
مدار باز کوره از سطح اولیه خود که بین E و V_c بود (بسته به سایر بارهای

متصل در PCC و جاهای دیگر) به V_k کاهش می‌یابد (به معادله (۲۴) با $I_f=0$ مراجعه کنید). همزمان، راکتانس اتصال کوتاه از (X_s+X_f) به $X_s+X_f+(1+n)X_r$ افزایش می‌یابد. هر دوی این اثرات، توان کوره را کاهش می‌دهند. به منظور بازگرداندن تغذیه کوره به حالتی که بدون جبرانساز داشت، از سیم‌پیچ تقویت‌کننده ولتاژ استفاده شده است.

جایگزین کردن کاهش k به وسیله یک خازن سری با راکتور اشباع استفاده نمی‌شود زیرا پاسخ جبرانساز را به تأخیر می‌اندازد. ضریب توان نیز توسط جبران‌کننده راکتور تپ دار/راکتور اشباع کاهش می‌یابد و خازن‌ها معمولاً در انتهای تغذیه راکتور تپ دار متصل می‌شوند. این‌ها معمولاً به بانک‌هایی تقسیم می‌شوند و با راکتورهای هسته هوایی خطی ترکیب می‌شوند تا فیلترهای هارمونیکی برای جذب جریان‌های هارمونیکی از کوره و همچنین از جبران‌کننده و جلوگیری از رزونانس سیستم ایجاد کنند. فیلترهایی برای فرکانس‌های تا پانزدهم به کار گرفته شده‌اند.



شکل ۶-۱۶- رابطه بین مولفه‌های اصلی ولتاژ و جریان برای یک راکتور تکفاز هسته اشباع-بسته



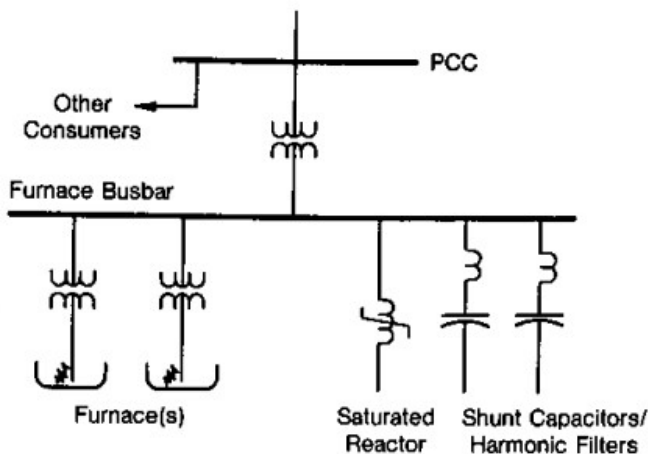
شکل ۶-۱۷- اصول جبرانساز تپ دار /راکتور اشباع

۶-۵-۲- جبران‌ساز راکتور خوداشباع / جبران‌ساز هارمونیکی

چند فاز

نوع دوم جبران‌ساز راکتور اشباع، که کاملاً متفاوت از آرایش راکتور تپ دار است که در بخش ۶-۴-۱ توضیح داده شده است، راکتور جبران‌ساز هارمونیکی چند فاز است. این جبران‌کننده که گاهی اوقات جبران‌کننده باسبار نامیده می‌شود (زیرا می‌تواند مستقیماً به باسبار کوره بدون نیاز به یک راکتور سری انشعاب‌دار متصل شود)، توسط شرکت فریدلندر توسعه داده شده است. دو نوع اصلی معمولاً استفاده می‌شوند: راکتورهای دو سه‌گانه و سه‌گانه. اصل اساسی همان طرح راکتور تپ دار/راکتور اشباع، یعنی استفاده از مشخصه مسطح V-I یک راکتور اشباع شده هسته آهنی برای تقریب زدن یک مشخصه‌ی راکتیو ولتاژ-ثابت ایده‌آل است. با این حال، در راکتورهای دوقلو و سه‌گانه، سه فاز به صورت متقابل روی یک هسته چند شاخه‌ای در یک آرایش ضرب کننده‌ی فاز و فرکانس کوپل شده‌اند که منجر به حذف جریان‌های هارمونیکی تا مرتبه‌ی $2n \pm 1$ می‌شود، که در آن n تعداد "فازهای" تولید شده است (به تکنیک‌های ضرب پالس مورد استفاده در یکسوکننده‌ها مراجعه کنید). در راکتور دوقلو $n=6$ و جریان‌های هارمونیکی با کمترین مرتبه، یازدهمین و سیزدهمین هستند. در راکتور سه‌گانه $n=9$ و جریان‌های هارمونیکی با کمترین مرتبه، هفدهمین و نوزدهمین در شرایط متعادل هستند. با بارگذاری یک «راکتور تنظیم مش» در راکتور اصلی که خود با یک سیم‌پیچ اتصال کوتاه دلتا بارگذاری شده است، می‌توان هارمونیک‌های مرتبه پایین را بیشتر حذف کرد و

هارمونیک‌های باقی مانده ناچیزی را زیر مرتبه‌ی ۲۳ و ۲۵ در سه گانه دوتایی و ۳۵ و ۳۷ در سه گانه سه گانه در شرایط متعادل (به ترتیب ۱ تا ۱/۵ درصد و ۲ الی ۴ درصد) باقی گذاشت.

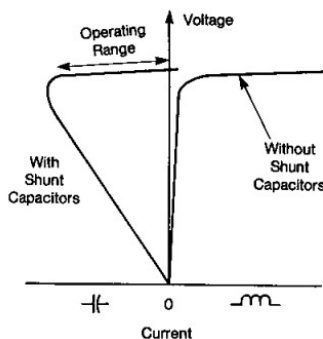


شکل ۶-۱۸: آرایش کلی برای جبرانسازی فلیکری با جبرانساز راکتوری اشباع شده نوع باسباری

هر دوی این تکنیک‌های حذف هارمونیک، اثر اضافی بهبود خطی بودن و مسطح بودن مشخصه $V-I$ را تا حدود ۰/۰۳ درصد در محدوده طبیعی جریان‌ها (یعنی از حدود ۱۰ درصد تا ۱۰۰ درصد جریان نامی) دارند. با این حال، خطی بودن و همچنین اندازه هسته آهنی می‌تواند به طور نامطلوبی تحت تأثیر قرار گیرد، مگر اینکه شیب بالاتر از حدود ۷٪ نگه داشته شود. در کاربردهای کوره قوس، این شیب باقیمانده نسبت جبران مؤثر را کاهش می‌دهد. نسبت حذف فلیکر قابل دستیابی تا حدودی کمتر از مقداری است که با جبرانساز راکتور تپ دار/راکتور اشباع قابل دستیابی

است. حذف هارمونیک داخلی در راکتور اشباع در شرایط نامتعادل ناقص است، اما جریان‌های هارمونیکی که ظاهر می‌شوند معمولاً در حضور هارمونیک‌های جریان از کوره قوس الکتریکی بیش از حد نیستند.

خازن‌های شنت معمولاً برای اصلاح کلی ضریب توان نصب می‌شوند و می‌توانند به فیلترهای هارمونیکی، معمولاً برای مرتبه‌های ۲، ۳، ۵، ۷ و گاهی اوقات برای ۴ و ۶ و یک شاخه «بالاگذر» (شکل ۶-۱۸) تقسیم شوند. خازن‌های شنت، مشخصه $V-I$ حاصل را همانطور که در شکل ۶-۱۹ نشان داده شده است، اصلاح می‌کنند. جبرانسازهای با توان نامی تا ۱۱۷ مگاوار در ولتاژهای تا ۷۰ کیلوولت، برای کارخانه‌های نورد و سایر بارهای بزرگ به شدت متغیر و همچنین برای کوره‌های قوس الکتریکی اعمال شده‌اند.



شکل ۶-۱۹: مشخصه ولتاژ-جریان یک جبرانساز راکتور اشباع شده‌ی نوع باسبار با و بدون خازن‌های موازی

منابع و مأخذ

[1]: R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, "Electrical Power Systems Quality", 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2012.

[2]: T. J. E. Miller, "Reactive Power Control in Electric Systems". New York: Wiley, 1982.

[3]: X.-P. Zhang, C. Rehtanz, and B. Pal, "Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control", 2nd ed. Berlin, Germany: Springer, 2012.

[4]: D. S. Kirschen and G. Strbac, "Fundamentals of Power System Economics", 2nd ed. Chichester, UK: Wiley, 2018.

[5]: G. F. L. Dixon and P. G. Kendall, "Supply to Arc Furnance: Measurement and Prediction of Supply Voltage Fluctuation", Proc. IEE 119 (4), 456-465 (April 1972)

[6]: "Survey of Arc Furnace Installations on Power Systems and Resulting Lamp Flicker," "AIEE Transactions", 1957.

[7]: J. Lemmenmeier *et al.*, "UIE/UNIPED Survey," "International Symposium on Electric Arc Furnaces", Liège, 1973.

[8]: Retzmann, D.: HVDC Plus - Basics and Principle of Operation. Siemens PTD, Germany (2008)