بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

کنترل کننده‌های FACTS با معرفی تکنولوژی جدید ترانسفورماتور SEN

تئوری، مدل‌سازی و کاربردها

مترجمین:

علی‌اکبر مطیع بیرجندی

عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

محمدصادق کرم بیگی

محمدعلی اشرف

سرشناسه	:	سن، کایلان کی. Sen, Kalyan K.
عنوان و نام پدیدآور	:	کنترل‌کننده‌های FACTS با معرفی تکنولوژی جدید ترانسفورماتور SNE: تئوری، مدل‌سازی و کاربردها/ مولفان کالیان‌کی سن، می‌لینک سن؛ ترجمه علی‌اکبر مطیع‌بیرجندی، محمد علی اشرف، محمدصادق کرم‌بیگی؛ ویراستار ادبی یداله بهمنی.
مشخصات نشر	:	تهران: دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، ۱۴۰۱.
مشخصات ظاهری	:	۴۹۲ص.: مصور، جدول، نمودار.
شابک	:	۹۷۸-۶۲۲-۶۵۸۹-۴۳-۷
وضعیت فهرست نویسی	:	فیپا
یادداشت	:	عنوان اصلی:.Introduction to FACTS controllers : theory, modeling, and applications, c2009
یادداشت	:	واژه‌نامه.
یادداشت	:	کتابنامه: ص. ۴۶۱ - ۴۷۲.
یادداشت	:	نمایه.
موضوع	:	سیستم‌های انتقال انعطاف‌پذیر ا. سی. Flexible AC transmission systems
شناسه افزوده	:	سن، می لینگ
شناسه افزوده	:	Sen, Mey Ling
شناسه افزوده	:	مطیع بیرجندی، علی‌اکبر، ۱۳۴۴ - ، مترجم
شناسه افزوده	:	اشرف، محمدعلی، ۱۳۶۶-، مترجم
شناسه افزوده	:	کرم‌بیگی، محمدصادق، ۱۳۶۵-، مترجم
شناسه افزوده	:	دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی
شناسه افزوده	:	Shahid Rajaee Teacher Training University
رده بندی کنگره	:	TK۳۱۴۸
رده بندی دیویی	:	۳۱۹۱۳/۶۲۱
شماره کتابشناسی ملی	:	۹۰۸۸۴۳۹
اطلاعات رکورد کتابشناسی	:	فیپا

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

عنوان	:	کنترل کننده‌های FACTS با معرفی تکنولوژی جدید ترانسفورماتور SEN تئوری، مدل‌سازی و کاربردها
ترجمه	:	علی‌اکبر مطیع بیرجندی، عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی/ محمدصادق کرم بیگی/ محمدعلی اشرف
ویراستار علمی	:	دکتر محمودرضا حقی فام
ویراستار ادبی	:	دکتر یداله بهمنی
نوبت چاپ	:	اول- پاییز ۱۴۰۲
انتشارات	:	دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی
لیتوگرافی، چاپ	:	نشر شریف
طراح جلد	:	دکتر سجاد دادفر
ناظر چاپ	:	محمد معتمدی‌نژاد
کارشناسان	:	نیره فیروزی، طاهره کیاء
شمارگان	:	۱۰۰ جلد
قیمت	:	۴۲۰.۰۰۰ تومان
شابک	:	۹۷۸-۶۲۲-۶۵۸۹-۴۳-۷ ISBN: 978-622-6589-43-7

کلیهٔ حقوق این اثر برای مترجمین و دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجائی محفوظ است.

نشانی: تهران، لویزان – کد پستی ۱۵۸۱۱-۱۶۷۸۸ – صندوق پستی ۱۶۳ – ۱۶۷۸۵ – تلفن: (۲۶۳۲) ۹ – ۲۲۹۷۰۰۶۰، ۲۲۹۷۰۰۷۰،
تلفکس: ۲۲۹۷۰۰۴۲، پست الکترونیکی: publish@sru.ac.ir، وب سایت: http://publish.sru.ac.ir

تقدیم به همه آن‌هایی که می‌خواهند بیشتر بدانند...

پیش‌گفتار

این کتاب حاصل دو دهه تجربه مهندسی نویسندگانش در زمینهٔ طراحی سیستم‌های انتقال قدرت جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS) است. امروزه بیش از هر زمان دیگری ما با مشکلات پرتراکم بودن شبکه و محدودیت‌های پخش بار در سیستم‌های انتقال قدرت مواجه هستیم. به‌عنوان بخشی جدایی ناپذیر از مبحث نوسازی و بروز نمودن شبکه، تمام گزینه‌هایی که به نوعی در جهت افزایش ظرفیت جریان توان مطرح می‌شوند، در حال بررسی هستند. ادوات FACTS آخرین و یکی از مهمترین دستاوردهای فن‌آوری در این راستا، در سال‌های اخیر است. این رشته‌ی در حال ظهور، در آینده‌ای نزدیک نیاز به تحقیقات قابل توجه و پیشرفت‌های زیادی دارد. من معتقدم که کنترل کننده‌های FACTS در سیستم‌های فشار قوی نفوذ خواهد نمود و همچنین کاربرد آن‌ها در شبکه‌های توزیع فشار متوسط نیز گسترش می‌یابد.

فهرست مطالب

پیش‌گفتار ت

مقدمه نویسندگان ذ

مقدمه مترجمان ر

۱ کاربردهای کنترل‌کننده‌های FACTS ۱

۲ مفاهیم کنترل شارش توان ۱۵

۱.۲ بررسی و کنترل ۱۹

۱.۱.۲ جبران‌ساز ولتاژ سری ۲۰

۲.۱.۲ جبران‌کننده موازی ولتاژ ۴۷

۳.۱.۲ مقایسه بین جبران‌سازی موازی و سری ولتاژ ۴۹

۲.۲ به کارگیری مفاهیم کنترل شارش توان ۵۲

۱.۲.۲ تنظیم ولتاژ ۵۲

۲.۲.۲ تنظیم زاویهٔ فاز ۵۹

۳.۲.۲ تنظیم‌کننده راکتانس سری ۶۰

۴.۲.۲ کنترل مستقل شارش توان اکتیو و راکتیو ۶۲

۳.۲ مفهوم شارش توان بین خطوط انتقال ۷۰

۱.۳.۲ جبران‌کنندهٔ سنکرون استاتیکی سری پشت‌به‌پشت (BTB-SSSC) . . . ۷۱

۲.۳.۲ ترانسفورماتور سن چند خطی (MST) ۷۴

۳.۳.۲ جبران‌ساز سنکرون استاتیکی پشت‌به‌پشت (BTB-STATCOM) . . . ۷۹

۴.۳.۲ کنترل‌کننده تعمیم یافته شارش توان (GPFC) ۸۲

۳ قوانین مدل‌سازی ۸۵

۱.۳ مدل‌سازی در EMTP ۸۵
۱.۱.۳ مدل شبکه ۸۷
۲.۳ سیستم کنترل فاز حلقه بسته برداری (VPLL) ۹۴
۳.۳ محاسبه‌کنندهٔ مقاومت خط انتقال در حالت پایدار[1] ۹۶
۴.۳ شبیه‌سازی یک کنترل‌کنندهٔ پخش بار (PFC) مستقل در یک سیستم تک خطی . . ۹۷

۴ کنترل‌کننده‌های FACTS برپایه ترانسفورماتورها ۱۰۳
۱.۴ ترانسفورماتور تنظیم‌کننده ولتاژ (VRT) ۱۰۳
۱.۱.۴ اتوترانسفورماتور ۱۰۴
۲.۱.۴ ترانسفورماتور دو سیم‌پیچه ۱۰۸
۲.۴ تنظیم‌کنندهٔ زاویهٔ فاز (PAR) ۱۰۸

۵ ادوات FACTS با مکانیسم قطع و وصل مکانیکی ۱۱۳
۱.۵ جبران‌سازی موازی ۱۱۳
۱.۱.۵ خازن با مکانیزم قطع و وصل مکانیکی (MSC) ۱۱۳
۲.۱.۵ راکتور دارای مکانیزم قطع و وصل مکانیکی (MSR) ۱۱۶
۲.۵ جبران‌سازی سری ۱۱۸
۱.۲.۵ راکتور با مکانیزم قطع و وصل مکانیکی (MSR) ۱۱۹
۲.۲.۵ خازن با مکانیزم قطع و وصل مکانیکی (MSC) همراه با یک راکتور . . ۱۲۱

۶ مبدل منبع ولتاژ ۱۲۳
۱.۶ مدل‌سازی یک VSC ایده‌آل ۱۲۴
۲.۶ مبدل منبع ولتاژی موج DC به AC ۱۲۴
۱.۲.۶ تولید ولتاژ موج‌مربعی با یک قطب دو سطحی ۱۲۵
۲.۲.۶ VSC شش پالسه با قطب دو سطحی ۱۲۸
۳.۲.۶ HN-VSC دو سطحی ۱۲ پالسه ۱۳۶
۴.۲.۶ HN-VSC ۲۴ پالسه با قطب ۲ سطحی ۱۴۳
۵.۲.۶ QHN-VSC ۲۴ پالسه با قطب‌های دوسطحی ۱۵۳
۶.۲.۶ QHN-VSC ، ۴۸ پالسه با قطب‌های دو سطحی ۱۶۰
۷.۲.۶ تولید ولتاژ موج نیمه‌مربعی با یک قطب سه سطحی ۱۷۰

[1] Steady state

۸.۲.۶ VSC شش پالسه با قطب‌های سه سطحی ۱۷۲
۹.۲.۶ HN-VSC ۱۲ پالسه با قطب‌های سه سطحی ۱۷۸
۱۰.۲.۶ QHN-VSC ۲۴ پالسه با قطب‌های سه سطحی ۱۷۹
۱۱.۲.۶ ساختار جای‌گزین برای کانورتر QHN ۱۸۳
۱۲.۲.۶ مدارات قطب تحقق‌پذیر ۱۸۸
۱۳.۲.۶ بررسی یک HN-VSC ۱۹۰
۱۴.۲.۶ VSC مبدل DC به AC با تکنیک PWM ۱۹۰
۳.۶ بحث ۱۹۱

۷ طراحی پل (قطب) دو سطحی ۱۹۳
۱.۷ مبدل منبع ولتاژ سه فاز، شش پالسه با پل‌های دو سطحی ۱۹۴
۲.۷ بررسی یک پل از مبدل منبع ولتاژ شش پالسه ۱۹۶
۱.۲.۷ مشخصه های تجهیز ۱۹۷
۲.۲.۷ مدل مکانیکی ۲۰۱
۳.۲.۷ تجزیه و تحلیل مدل ۲۰۳
۴.۲.۷ نتایج ۲۲۰

۸ کنترلرهای منبع ولتاژی ادوات FACTS ۲۲۳
۱.۸ جبران‌سازی موازی ۲۲۸
۱.۱.۸ تزریق جریان راکتیو موازی ۲۲۸
۲.۱.۸ منبع ولتاژ جبران‌ساز با اتصال موازی پشت یک امپدانس ۲۳۰
۳.۱.۸ ولتاژ جبران‌سازی با اتصال موازی پشت یک ترانسفورماتورکوپلینگ . ۲۳۱
۴.۱.۸ جبران‌سازی سنکرون استاتیک (STATCOM) ۲۳۳
۵.۱.۸ مدل‌سازی STATCOM در EMTP و نتایج شبیه‌سازی ۲۳۶
۲.۸ جبران‌سازی سری ۲۴۱
۱.۲.۸ جبران‌کنندهٔ سری سنکرون استاتیک ۲۴۸
۲.۲.۸ کنترل SSSC ۲۴۸
۳.۲.۸ مدل‌سازی SSSC در EMTP و نتایج شبیه‌سازی ۲۵۰
۴.۲.۸ واژگون‌سازی پایدار شارش توان ۲۵۳
۳.۸ جبران‌سازی سری — موازی با استفاده از یک کنترل‌کنندهٔ شارش توان یکپارچه . ۲۶۶
۱.۳.۸ کنترل UPFC ۲۶۸

۲.۳.۸ مدل‌سازی UPFC در EMTP و نتایج شبیه‌سازی ۲۶۹
۳.۳.۸ نتایج آزمایش ۲۷۳
۴.۳.۸ حفاظت UPFC ۲۷۸

۹ ترانسفورماتور SEN ۲۸۱
۱.۹ راه‌حل‌های موجود ۲۸۳
۱.۱.۹ تنظیم ولتاژ ۲۸۳
۲.۱.۹ تنظیم‌کنندهٔ زاویه فاز ۲۸۴
۲.۹ راه‌حل مطلوب ۲۸۵
۱.۲.۹ ST یک تنظیم‌کننده ولتاژ جدید ۲۸۸
۲.۲.۹ ST به‌عنوان یک PFC (کنترل‌کننده شارش توان) مستقل ۲۹۰
۳.۲.۹ کنترل ST ۲۹۱
۴.۲.۹ نتایج شبیه‌سازی ۲۹۶
۵.۲.۹ عملکرد زاویه محدود ST ۲۹۸
۶.۲.۹ استفاده از ST به همراه LTC های جریان پایین ۳۰۴
۷.۲.۹ استفاده از ST با ولتاژ پایین تر و جریان نامی ۳۰۵
۳.۹ مقایسه بین ST، UPFC، PAR، VRT ۳۰۶
۱.۳.۹ تقویت شارش توان ۳۰۷
۲.۳.۹ سرعت عملکرد ۳۰۸
۳.۳.۹ تلفات ۳۱۰
۴.۳.۹ ارزیابی سوئیچ ها ۳۱۰
۵.۳.۹ طراحی مدار مغناطیسی ۳۱۰
۶.۳.۹ بهینه کردن توان ترانسفورمر ۳۱۱
۷.۳.۹ تزریق هارمونیک به شبکهٔ سیستم قدرت ۳۱۲
۸.۳.۹ عملکرد در طول خطاهای خط ۳۱۲
۴.۹ ST متصل به چند خط انتقال ۳۱۴
۱.۴.۹ تفاوت اساسی مابین BTB-SSSC ، MST ۳۱۷
۵.۹ ST با ولتاژهای جبران‌سازی اتصال موازی ۳۱۹
۶.۹ عملکرد زاویهٔ محدود ST با ولتاژ جبران‌سازی اتصال موازی ۳۲۰
۷.۹ MST با ولتاژ جبران‌سازی اتصال موازی ۳۲۳

۸.۹ ST رایج ۳۲۵

آ ضمیمه A **۳۲۹**

آ.۱ مؤلفه‌های متقارن ۳۳۳
آ.۲ متغیرهای ترکیبی توالی مثبت و منفی و صفر ۳۳۸
آ.۳ جریان و ولتاژ و توان در سیستم سه فاز نامتعادل ۳۴۱
آ.۴ تبدیل d-q ۳۴۶
آ.۵ تبدیل متغیرهایی که شامل سه مؤلفه مثبت، منفی و صفر هستند به فریم d-q . . ۳۵۰
آ.۶ محاسبه توان لحظه‌ای در فریم d-q ۳۵۴
آ.۷ محاسبه توان لحظه‌ای برای یک سیستم سه‌فاز سه‌سیمه در فریم d-q ۳۵۴
آ.۸ بررسی ۳۶۰
آ.۹ آنالیز فوریه ۳۶۲
آ.۱۰ فرمول انتگرال عددی ADAMS-BASHFORTH ۳۶۶

ب روابط کنترلی شارش توان در خطوط انتقال دارای تلفات **۳۶۹**

ب.۱ معادلات شارش توان در شین ارسالی خط انتقال جبران‌نشده ۳۷۱
ب.۲ معادلات شارش توان در شین دریافتی خط انتقال جبران‌نشده ۳۷۴
ب.۳ راستی‌آزمایی معادلات شارش توان در شین ارسال و دریافت خط انتقال جبران‌نشده ۳۷۷
ب.۴ معادلات شارش توان طبیعی در خط انتقال جبران نشده ۳۷۸
ب.۵ پارامترهای مهم در کنترل شارش توان ۳۸۴
ب.۵.۱ اصلاح ولتاژ خط انتقال با ولتاژ جبران‌سازی موازی ۳۸۷
ب.۵.۲ اصلاح ولتاژ خط انتقال با ولتاژ جبران‌سازی سری ۳۸۷
ب.۶ شارش توان در شین ارسال ۳۹۲
ب.۷ شارش توان در شین دریافت ۳۹۵
ب.۸ شارش توان در شین ارسالی اصلاح شده ۳۹۸
ب.۹ توان مبادله شده ناشی از استفاده جبران‌سازی ولتاژ ۴۰۲

پ کدهای نرم افزار EMTP **۴۰۷**

واژه نامه انگلیسی به فارسی **۴۷۳**

واژه نامه انگلیسی به فارسی **۴۷۴**

مقدمه نویسندگان

هر دو نویسنده از سال ۱۹۹۰ بر روی کنترل کننده‌های ادوات FACTS کار می‌کنند.کالیان سن در شرکت وستینگهاووس بر روی این ادوات کار می‌کند. همچنین او مقالاتی در زمینهٔ مدل‌سازی UPFC دارد. می سن کارهایی بر روی کنترل کننده‌های کانورتری ادوات FACTS که از نظر اقتصادی به‌صرفه است انجام داده است. این تلاش‌ها منجر به ساخت ترانسفورماتور SEN شد. او تمام ادوات FACTS را با تمام جزییات مدل‌سازی کرده است. از سال ۲۰۰۲ کالیان سن به‌عنوان کارشناس IEEE در بیش از ۲۰ نقطهٔ جهان سخنرانی کرده است. موضوع اصلی سخنرانی‌های او ادوات FACTS و کنترل کننده‌های کانورتری منبع ولتاژی و ترانسفورماتور SEN بوده است. تأکید اصلی او بر مدل‌سازی در دنیای واقعی است. کتاب حاضر شامل مدل‌سازی کنترل کننده‌های ادوات FACTS در نرم افزار EMTP است. این کتاب شامل ۹ فصل است. فصل ۱ اصول ابتدایی کنترل کننده‌های FACTS را توضیح می‌دهد. فصل ۲ برای کسی است که قصد دارد این کتاب را به‌عنوان مرجع خود انتخاب کند. این فصل عناوین مختلف را به زبان مهندسی ساده بیان می‌کند و برای آن‌ها مدل ریاضی ارائه می‌کند. فصل ۳ جزییات شبیه‌سازی در نرم افزار EMTP را ارائه می‌کند و اختلافات مدل‌سازی بین انواع مختلف ادوات FACTS را نشان می‌دهد. فصل ۴ در مورد کنترل کننده‌های FACTS بر پایهٔ ترانسفورماتور است و فرق آن را با کنترل کننده‌های بر پایهٔ الکترونیک قدرت نشان می‌دهد. فصل ۵ در مورد کنترل کننده‌هایی که از سوییچ مکانیکی استفاده می‌کنند، می‌باشد. فصل ۶ در مورد کانورترهای منبع ولتاژ و تکنیک HN است. فصل ۷ به کانورتر منبع ولتاژی دو سطحی اختصاص دارد. فصل ۸ نیز در مورد سه تا از ادوات FACTS که با کنترل کننده کانورتری کار می‌کنند، می‌باشد. این فصل در مورد SSSC, STATCOME, UPFC است. فصل ۹ نیز به ترانسفورماتور SEN و چگونگی مدل‌سازی آن می‌پردازد.

نویسندگان – Kalyan K. Sen ،Mey Ling Sen

مقدمه مترجمان

یکی از دلایلی که ما را برآن داشت تا دست به ترجمهٔ کتاب پیشرو بزنیم نوآوری و معرفی تجهیز جدیدی به نام ترانسفورماتور SEN و روش‌های کنترل آن بود. زیرا تاقبل از آن وسایل پیشرفته کنترل‌کننده توان در شبکه به صورت الکترونیکی کار می‌کردند و اغلب در حوزهٔ کارهای آکادمیک به دلایل پیچیدگی‌های فنی و به‌صرفه نبودن اقتصادی متوقف شده بودند. اما ترانسفورماتور SEN به صورت مکانیکی سیم‌پیچ‌های خود را وارد مدار یا از مدار خارج می‌کند و از نظر اقتصادی هم کاملاً به‌صرفه است. یکی از ویژگی‌های برجسته این کتاب استفاده از نمودارهای مختلف و دقیقی است که توسط نرم افزار قدرتمند تحلیل حالت گذرا EMTP به دست آمده است و خواننده را در هرچه بهتر درک کردن مطالب یاری می‌دهد. ویژگی دیگری که این کتاب را منحصر به فرد کرده است تحلیل ریاضی و دقیق عملکرد کلیه ادوات FACTS در کنترل توان است که می‌توان از آن به‌عنوان مرجع درسی در مقاطع کارشناسی ارشد استفاده کرد. ویژگی دیگر این کتاب که آن را از دیگر کتب مشابه متمایز می‌کند ارائه کدهای برنامه‌نویسی نرم افزار EMTP است به نحوی که توسط آن‌ها می‌توان ادوات FACTS را شبیه‌سازی و تحلیل کرد. اما مهمترین نکته‌ای که می‌توان در این کتاب به آن اشاره کرد معرفی ترانسفورماتور SEN است. نویسندگان که تجربه عملی بسیاری در شرکت‌های معتبر آمریکایی دارند و حتی برای سخنرانی به ۲۵ نقطه از جهان دعوت شده‌اند به معرفی آن بسنده نکرده‌اند و روش‌های کنترل سوییچ‌های مکانیکی آن را هم به طور دقیق بیان کرده‌اند. سپس با انجام عمل شبیه‌سازی نقاط قوت و ضعف آن را نسبت به قوی‌ترین تجهیز ادوات FACTS یعنی UPFC بیان نموده‌اند. این کتاب در آینده می‌تواند به‌عنوان مرجعی کاملاً عملی در اختیار مهندسان برق قدرت قرار بگیرد هر چند برای بازخوانی و ویرایش متن ترجمه کتاب در طول این مدت، زمان زیادی صرف شده است، اما از خوانندگان گرامی و علی الخصوص دانشجویان عزیز، خواهشمندیم هرگونه اصلاح یا پیشنهاد خود را جهت بهتر شدن چاپ‌های بعدی کتاب برای مترجمان اثر ارسال نمایند. جا دارد از زحمات آقای مهندس **محمد رستمی** که در تحریر و ویرایش کتاب زحمات زیادی را متقبل شدند، تشکر و قدردانی ویژه داشته باشیم. در پایان از حوزهٔ انتشارات معاونت پژوهشی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی به خاطر حمایت ها و فراهم نمودن امکان چاپ ترجمهٔ این کتاب، نهایت تشکر و سپاس

را داریم.

علی اکبر مطیع بیرجندی(دانشیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی)
motiebirjandi@sru.ac.ir

صادق کرم بیگی (هنرآموز رشته برق هنرستان حضرت علی (ع) همدان)
sadeghkarambeigi2020@gmail.com

محمدعلی اشرف (کارشناس ارشد برق شرکت فولاد مبارکه اصفهان)
maa698@gmail.com

فصل ۱

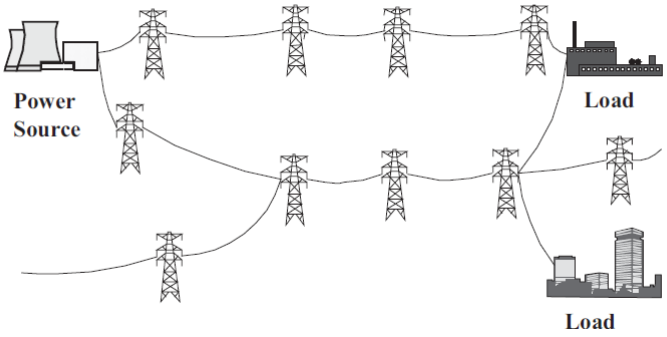
کاربردهای کنترل‌کننده‌های FACTS

انتخاب مکان برای تولید توان الکتریکی نیاز به بررسی پارامترهای مختلفی دارد. بدین منظور باید ابتدا وجود منابع انرژی را بررسی نمود و سپس پارامترهای دیگر از قبیل وجود زمین برای احداث نیروگاه‌های جدید و یا پیاده‌سازی پست‌های فشار قوی، میزان نیاز به انرژی در منطقه مورد نظر و وجود شبکهٔ انتقال مورد نیاز را تحلیل کرد. انرژی الکتریکی از نقطهٔ تولید به نقطهٔ مصرف از طریق خط‌های انتقال توان همانند شکل ۱.۱ انتقال داده می‌شود. جریان الکتریکی از مسیری عبور می‌کند که دارای کمترین امپدانس است و این جریان طبیعی توان می‌تواند در خط خاصی از سیستم انتقال، باعث ایجاد برخی اضافه بارها و یا افت بارها شود. جریان الکتریکی می‌تواند در یک خط ویژه از یک سیستم انتقال با استفاده از کنترل‌کننده شارش توان[۱] (PFC[2]) همانند شکل ۲.۱ کنترل شود.

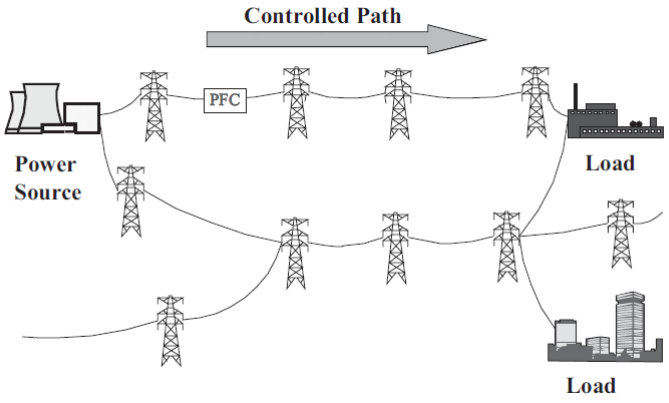
تقاضا برای مصرف انرژی الکتریکی در سراسر جهان به‌طور مداوم در حال افزایش است. نیاز دائمی و فزایندهٔ انتقال جریان الکتریکی بیشتر، می‌تواند با نصب خطوط انتقال جدید و یا با استفاده از خطوط موجود به کمک روش‌های پربازده‌تر انتقال توان[۳] حاصل گردد. به دلایل متعددی همچون روش‌های سخت کنترل [۴] و تنظیم بار، مسائل محیطی، سیاست‌های عمومی و هزینه برداشت آن، نصب و تجهیز خطوط انتقال جدید بسیار دشوار و پرهزینه است. جریان آزاد توان الکتریکی از یک نقطه خاص به نقطه‌ای دیگر همیشه کوتاه‌ترین راه را اتخاذ نمی‌کند. هر مسیر ناخواسته‌ای در مسیر باعث هدردهی زیاد توان و جریان حلقوی انرژی می‌شود. همچنین می‌تواند با افزایش ولتاژ[۵] در خط، کاهش پایداری را به‌دنبال داشته باشد. در وضعیت کنونی جهان، صنعت انرژی به‌طور همیشگی به‌دنبال پیدا کردن روش‌های اقتصادی‌تر انتقال انرژی در طی مسیر مطلوب است. قبل از اینکه به ایجاد خطوط انتقال جدید به‌عنوان یک راه‌حل توجه شود، بهتر است سایر روش‌ها را برای افزایش کارآیی خطوط انتقال موجود از طریق افزایش شارش توان جاری در آن‌ها را بررسی نمود.

---

[1] Power flow [2] Power Flow Controller [3] power [4] Hard control [5] voltage



شکل ۱.۱: بخشی از سیستم وسیع انتقال به هم پیوسته[b] تأمین‌کنندهٔ توان الکتریکی از نقطهٔ تولید به نقطهٔ مصرف



شکل ۲.۱: شارش توان در طول یک مسیر کنترل‌شده

توان الکتریکی شامل دو بخش است: توان اکتیو[۶] و توان راکتیو . یک خط انتقال شامل هادی‌های الکتریکی بوده که دارای مقاومت، اندوکتانس و کاپاسیتانس هستند. مقداری از توان اکتیو در مقاومت این هادی‌ها هدر می‌رود و البته بخش اعظم آن، به‌وسیلهٔ این خطوط انتقال می‌یابد. این توان می‌تواند به نور، گرما، نیروی حرکتی در موتورهای الکتریکی و غیره تبدیل شود و ایجاد درآمد کند. راکتیو بودن راکتانس‌های خازنی و سلفی خط انتقال، باعث تولید یا جذب توان راکتیو می‌شود. انتقال توان راکتیو باعث هدردهی بیشتر توان اکتیو در مقاومت هادی می‌شود.

به‌طور معمول شارش طبیعی یا جبران[۷] نشده توان از طریق خط انتقال در شبکهٔ قدرت از نظر اقتصادی مطلوب نیست. رابطه توان اکتیو و راکتیو (P_{rn} و Q_{rn}) در باس دریافت، از فرمول‌های زیر به‌دست می آیند:

[6] active power [7] compensate

$$P_{rn} = \frac{V_s V_r}{X} sin(\delta_s - \delta_r) \quad (۱.۱)$$

و

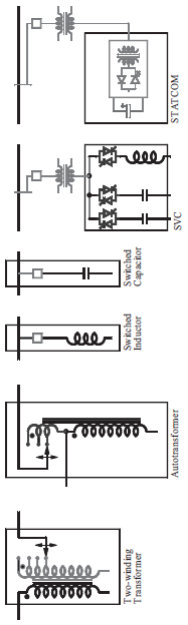
$$\mathrm{Q}_{rn} = \frac{V_s V_r}{X}\left(cos(\delta_s - \delta_r) - \frac{V_r}{V_s}\right) \quad (۲.۱)$$

در این معادلات، اندازهٔ ولتاژها در باس ارسال و دریافت به ترتیب V_s و V_r بوده، زوایای آن‌ها δ_s و δ_r و X راکتانس خط می‌باشد. پارامترهای کنترل انتقال توان شامل اندازهٔ ولتاژها، زوایای آن‌ها و راکتانس خط است. هر کدام از این پارامترها را می‌توان با استفاده از تجهیزات[۸] متداول کنونی زیر کنترل کرد:

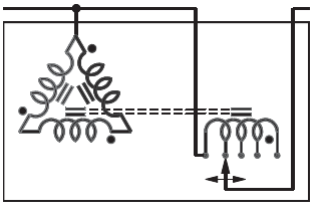
- ترانسفورماتور تنظیم‌کننده ولتاژ (VRT[9]) جبران‌ساز استاتیکی توان راکتیو (SVC[10]) یا جبران‌ساز استاتیکی سنکرون (STATCOM[11]) برای تنظیم ولتاژ همان‌طور که در شکل ۳.۱ نشان داده شده است.
- تنظیم‌کننده زاویهٔ فاز (PAR[12]) یا ترانسفورماتور انتقال دهنده فاز (PST[13]) برای تنظیم زاویهٔ فاز که در شکل ۴.۱ نشان داده شده است.
- خازن سری کنترل‌شده با تریستور[۱۴] (TCSC[15]) برای تنظیم راکتانس سری همان‌گونه که در شکل ۵.۱ نشان داده شده است.

برای بیش از یک قرن ولتاژ خطوط انتقالی به کمک ترانسفورماتورها و تپ چنجرها تنظیم می‌شد. این تجهیزات در این کتاب به‌عنوان ترانسفورماتور تنظیم‌کننده ولتاژ (VRT [16]) به فرم یک ترانسفورماتور دو سیم‌پیچه با سیم‌پیچ‌های ایزوله‌شده و یا یک اتوترانسفورماتور با ارتباط الکتریکی بین سیم‌پیچ‌ها مطرح شده است. در هر دو ترانسفورماتور، ولتاژ خط بر روی سیم‌پیچ‌های اولیه ترانسفورماتور قرار می‌گیرد. در ترانسفورماتورهای دو سیم‌پیچه ولتاژ کامل خط در سیم‌پیچ ثانویه القا می‌شود، این در حالی است که در اتوترانسفورماتورها فقط قسمتی از ولتاژ خط در سیم‌پیچ ثانویه‌ایی که به سیم‌پیچ‌های اولیه متصلند جهت تولید ولتاژ کامل خط القا می‌شود. در هر دو مورد، اندازه ولتاژ خط تنظیم می‌شود. ولتاژ ثانویه با استفاده از تپ چنجرهایی که قابلیت تغییر تپ در زیر بار را دارند (LTCs [17])، تغییر پیدا می‌کند. یک تپ چنجر می‌تواند ولتاژ را بدون ایجاد وقفه در جریان بار افزایش و یا کاهش بدهد. در ترانسفورماتورهای دو سیم‌پیچه هر دو سیم‌پیچ یعنی سیم‌پیچ اولیه و

[8] devices [9] Voltage Regulating Transformer [10] Static Var Compensator [11] Static Synchronous Compensator [12] Phase Angle Regulator [13] Phase Shifting Transformer [14] thyristor [15] Thyristor-Controlled Series Capacitor [16] Voltage Regulating Transformer [17] Load Tap Changers



شکل ۳.۱: تنظیم‌کننده‌های ولتاژ خط انتقال



شکل ۴.۱: تنظیم‌کنندهٔ زاویهٔ فاز ولتاژ خط انتقال

ثانویه به‌طور کامل انتقال توان برعهده دارند. اما در اتوترانسفورماتور، سیم‌پیچ اولیه و ثانویه هر کدام در بخشی از کل توان انتقالی مشارکت دارند. روش غیرمستقیم برای تنظیم ولتاژ خط، اتصال یک سلف یا خازن به‌صورت موازی با خط انتقال است. یک سلف موازی، توان راکتیو را از خط جذب می‌کند و ولتاژ خط را کاهش می‌دهد. در حالی‌که یک خازن موازی ولتاژ خط را با تولید و تزریق توان راکتیو افزایش می‌دهد. جبران کنندهٔ استاتیکی توان راکتیو (SVC) خازن‌های ثابتی را به‌صورت پله‌ای و براساس یک رژیم خاص به‌وسیله سوئیچ‌های تریستوری به‌صورت موازی به خط وارد می‌کند. همچنین می‌تواند سلف موازی با خط را نیز به کمک سوئیچ‌های تریستوری براساس تغییر در سیکل اتصال آن‌ها به‌طوری که عملکردشان را همانند یک سلف متغیر می‌شود به خط انتقال وارد یا از آن خارج کند.

روش غیرمستقیم دیگر، استفاده از سلف و خازن موازی به کمک مبدل منبع ولتاژ (VSC) یا توسط جبران‌کنندهٔ سنکرون استاتیکی توان راکتیو (STATCOM) است، که بدین وسیله ولتاژ سینوسی توسط