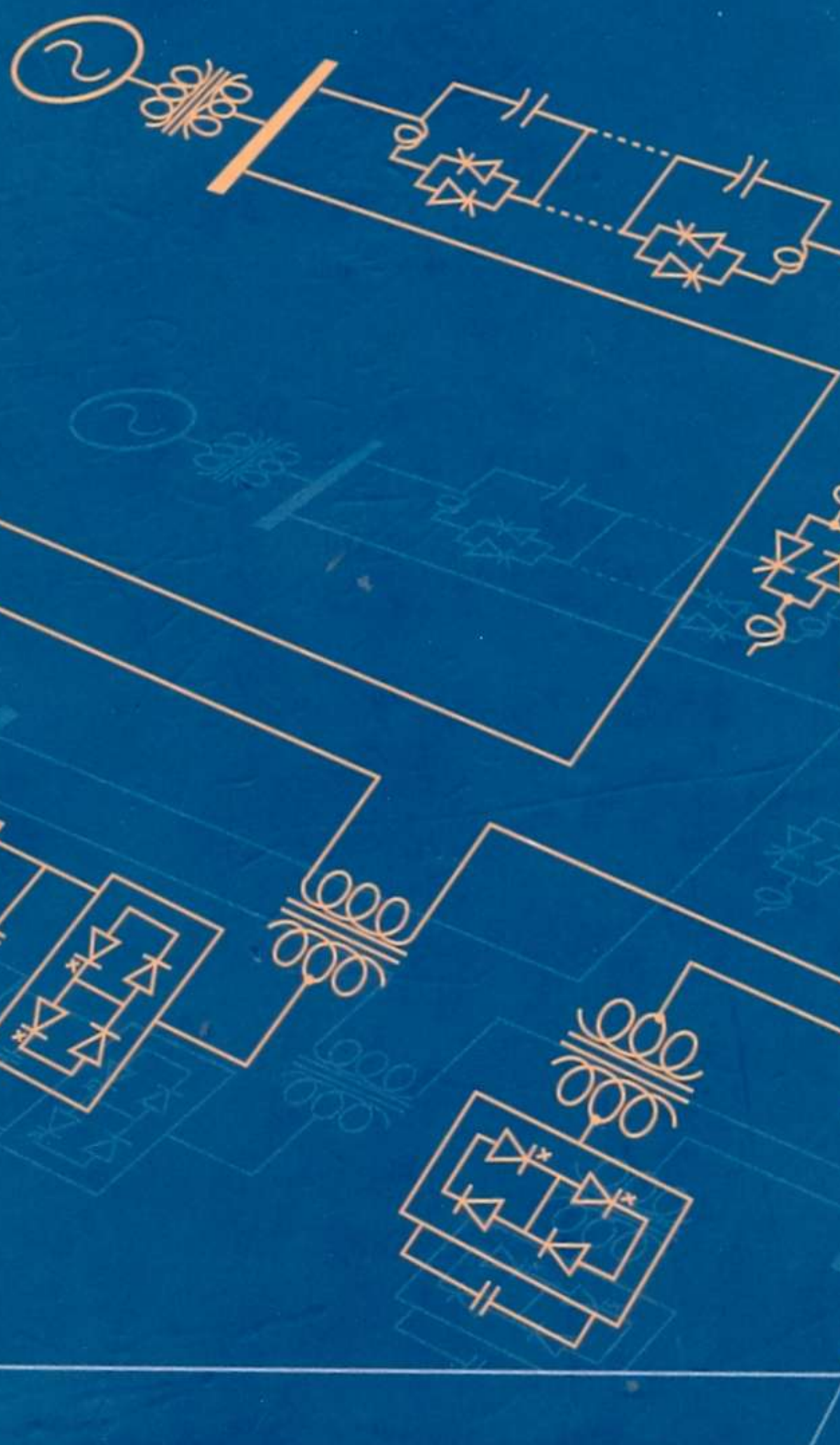
آشنایی با FACTS

مفاهیم و فن آوری

شبکه های انتقال نیروی انعطاف پذیر

نویسندگان:
نارین جی. هینگورانی
لازلو گایوگی

مترجم:
احمد فریدون درافشان



شرکت بهره برداری نفت و گاز گچساران
تاریخ ۸۵/۲/۲۳
شماره ثبت ۷۵۹۷
کتابخانه مرکزی - دبیرخانه

آشنایی با
FACTS

مفاهیم و فن‌آوری
شبکه‌های انتقال نیروی انعطاف‌پذیر

نویسندگان

نارین جی. هینگورانی

لازلو گایوگی

مترجم

احمد فریدون درافشان

ناشر

مهندسین مشاور قدس نیرو

بهار ۱۳۸٤

کتابخانه مرکزی دبیرخانه
شرکت بهره برداری نفت و گاز گچساران

Hingorani, Narain G.
نارین
FACTS: مفاهیم و فن‌آوری شبکه‌های انتقال نیروی انعطاف‌پذیر/نویسندگان: نارین جی. هینگورانی، لازلو گایوگی؛
حمد فریدون درافشان.—تهران: مهندسین مشاور قدس نیرو، ۱۳۸٤.
ی.: مصور، جدول، نمودار.
Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible
ی:
AC Transmission Systems, c2000.
ی بر اساس اطلاعات فیپا.
شبکه‌های انتقال نیروی انعطاف‌پذیر ای.سی. الف. گایوگی، لازلو، Gyugyi, Laszlo. ب. درافشان، احمد فریدون، ۱۳۳۰-.
ین مشاور قدس نیرو. د. عنوان: مفاهیم و فن‌آوری شبکه‌های انتقال نیروی انعطاف‌پذیر.
۱۳۸٤ ٦۲۱/۳۱۹۱۳ TK ۳
لی ایران ۸٤-۲۲۱۹م

دسین مشاور قدس نیرو

صلی کتاب: Understanding FACTS-Concepts and Technology of Flexible Transmission Systems
تاب: آشنایی با FACTS- مفاهیم و فن‌آوری شبکه‌های انتقال نیروی انعطاف‌پذیر
گان: نارین جی. هینگورانی، لازلو گایوگی
احمد فریدون درافشان
ر: هادی امیری
صفحه‌آرا: شهاب بینش ۸٤۰۰٦۹۸، ۸٤٥۲۳۸۰ (۰۲۱)
روی ۳۱۱۰۸۳٤ (۰۲۱)
سال چاپ: اول، ۱۳۸٤
ن: ۲۰۰۰
٦۰،۰۰۰ ریال
۵-٦٤۷۱-۰٦-۹٦٤
پ برای مترجم محفوظ است.

آدرس: تهران، خیابان شهید مطهری، شماره ۹۸ تلفن: (۱٦ خط) ۸٤۰۳٦۱۳، ۸٤۱٦۳٤٤ دورنگار: ۸٤۱۱۷۰٤
آدرس پست الکترونیکی: info@ghods-niroo.com آدرس وب سایت: www.ghods-niroo.com.

فهرست مطالب

مقدمه ناشر viii

مقدمه مترجم ix

فصل اول مفهوم FACTS و ملاحظات کلی در سیستم ۱

۱-۱ انتقال نیروی به هم پیوسته ۱
۱-۱-۱ چرا به شبکه‌های انتقال به هم پیوسته نیاز داریم ۱
۱-۱-۲ فرصت‌های فراروی FACTS ۲
۱-۲ سیلان توان در یک سیستم AC ٤
۱-۲-۱ عبور توان در مسیرهای موازی ٤
۱-۲-۲ عبور توان در یک سیستم شبکه‌ای ۵
۱-۳ چه چیزی قابلیت باربری را در انتقال توان محدود می‌کند ؟ ۸
۱-٤ ملاحظات سیلان توان و پایداری دینامیکی در یک شبکه انتقال ۱۰
۱-۵ اهمیت نسبی پارامترهای قابل کنترل ۱۳
۱-٦ انواع اصلی کنترل کننده‌های FACTS ۱٤
۱-٦-۱ اهمیت نسبی انواع مختلف کنترل کننده‌ها ۱۵
۱-۷ شرح مختصر و تعاریف کنترل کننده‌های FACTS ۱۸
۱-۷-۱ کنترل‌کننده‌های موازی ۲۰
۱-۷-۲ کنترل‌کننده‌های متصل شده به صورت سری ۲۲
۱-۷-۳ کنترل کننده‌های ترکیبی موازی و سری ۲۵
۱-۷-٤ کنترل کننده‌های دیگر ۲٦
۱-۸ لیست منافع محتمل از فن آوری FACTS ۲٦
۱-۹ یک چشم انداز: HVDC یا FACTS ۲۹

فصل دوم ادوات نیمه هادی قدرت ۳۹

۲-۱ چشم اندازی از ادوات قدرت ۳۹
۲-۱-۱ انواع دستگاه‌های تریستور توان زیاد ٤۲
۲-۲ مشخصه‌های اساسی و نیازمندی‌های دستگاه توان زیاد ٤٤
۲-۲-۱ مقدار مجاز ولتاژ و جریان ٤٤
۲-۲-۲ تلفات و سرعت کلیدزنی ٤۵
۲-۲-۳ تعامل میان پارامترهای دستگاه‌ها ٤۷
۲-۳ مواد سازنده دستگاه قدرت ٤۸
۲-٤ دیود (پیوند pn) ۵۰
۲-۵ ترانزیستور ۵۲
۲-۵-۱ MOSFET ۵۵
۲-٦ تریستور (بدون قابلیت قطع) ۵٦
۲-۷ تریستور با دریچه قطع (GTO) ۵۹
۲-۷-۱ فرآیند وصل و قطع ٦۱
۲-۸ تریستور با قطع MOS (MTO) ٦۲
۲-۹ تریستور با قطع امیتر (ETO) ٦۵

۲-۱۰ تریستور یکپارچه با جابه‌جایی دریچه (GCT و IGCT) ٦٦
۲-۱۱ ترانزیستور دوقطبی با دریچه عایق شده (IGBT) ٦٨
۲-۱۲ تریستور با کنترل MOS (MCT) ۷۰

فصل سوم کنورتورهای منبع ولتاژی ۷۳

۳-۱ مفهوم اساسی کنورتور منبع ولتاژی ۷۳
۳-۲ عملکرد کنوتور تک فاز پل تمام موج ۷٦
۳-۳ عملکرد تک پایه تک قطبی ۷۸
۳-٤ هارمونیک‌های ولتاژ موج مربعی، برای یک پل تک فاز ۸۰
۳-۵ پل کنورتور سه فاز تمام موج ۸۱
۳-۵-۱ عملکرد کنورتور ۸۱
۳-۵-۲ مؤلفه اصلی و هارمونیک‌ها برای یک پل کنورتور سه فاز ۸٤
۳-٦ فرایند توالی هدایت والو در هر پایه فاز ۸٦
۳-۷ اتصالات ترانسفورماتور برای عملکرد ۱۲ پالسه ۹۰
۳-۸ علمکرد ۲٤ و ٤۸ پالسه ۹۲
۳-۹ کنورتورهای منبع ولتاژی سه سطحی ۹٤
۳-۹-۱ عملکرد کنورتور سه سطحی ۹٤
۳-۹-۲ ولتاژهای اصلی و هارمونیک در یک کنورتور سه سطحی ۹۵
۳-۹-۳ کنورتور سه سطحی با پایه‌های موازی ۹۸
۳-۱۰ کنورتور مدولاسیون عرض باند (PWM) ۹۸
۳-۱۱ روش جامع حذف هارمونیک و کنترل ولتاژ ۱۰۲
۳-۱۲ مقادیر نامی کنورتور- نظرات کلی ۱۰۵

فصل چهارم کنورتورهای منبع جریانی خود- جابه‌جایی و خط- جابه‌جایی ۱۰۹

٤-۱ مفهوم اساسی کنورتورهای منبع جریانی ۱۰۹
٤-۲ یکسوساز دیودی سه فاز تمام موج ۱۱۲
٤-۳ کنورتور مبتنی بر تریستور (با وصل دریچه اما بدون قطع دریچه) ۱۱۷
٤-۳-۱ عملکرد یکسوساز ۱۱۷
٤-۳-۲ عملکرد متناوب ساز ۱۲۰
٤-۳-۳ ولتاژ والو ۱۲۳
٤-۳-٤ خطاهای جابه‌جایی ۱۲٤
٤-۳-۵ هارمونیک‌های جریان AC ۱۲٦
٤-۳-٦ هارمونیک‌های ولتاژ DC ۱۲۸
٤-٤ کنورتور منبع جریانی با دستگاه‌های قطع (کنورتور جریان پایدار) ۱۳۳
٤-۵ کنورتورهای منبع جریانی در برابر منبع ولتاژی ۱۳۹

فصل پنجم جبران سازهای استاتیکی موازی SVC و STATCOM ۱٤۳

۵-۱ جبران‌سازی موازی ۱٤۳
۵-۱-۱ تنظیم ولتاژ در نقطه میانی برای تقطیع خط ۱٤۳

۵-۱-۲ پشتیبانی ولتاژ در انتهای خط برای جلوگیری از ناپایداری ولتاژ ۱٤٦
۵-۱-۳ اصلاح پایداری حالت گذرا ۱٤۷
۵-۱-٤ میرایی نوسانات توان ۱۵۰
۵-۱-۵ خلاصه الزامات جبران ساز ۱۵۱
۵-۲ روش‌های تولید توان رآکتیو قابل کنترل ۱۵۲
۵-۲-۱ مولدهای استاتیکی توان رآکتیو با امپدانس متغیر ۱۵۳
۵-۲-۲ مولدهای توان رآکتیو نوع کنورتور سوئیچ شونده ۱۷٤
۵-۲-۳ مولدهای توان رآکتیو مختلط: کلیدزنی کنورتور با TSC و TCR ۱۸۸
۵-۲-٤ جمع بندی مولدهای استاتیکی توان رآکتیو ۱۸۹
۵-۳ جبران سازهای استاتیکی توان رآکتیو : SVC و STATCOM ۱۸۹
۵-۳-۱ شیب تنظیم [ولتاژ] ۱۹۳
۵-۳-۲ تابع تبدیل و عملکرد دینامیکی ۱۹۵
۵-۳-۳ افزایش پایداری گذرا و میرایی نوسان توان ۱۹۹
۵-۳-٤ کنترل توان رآکتیو ذخیره (نقطه کار) ۲۰٤
۵-۳-۵ جمع بندی کنترل جبران ساز ۲۰٦
۵-٤ مقایسه میان STATCOM و SVC ۲۰۸
۵-٤-۱ مشخصه‌های *V-I* و *V-Q* ۲۰۸
۵-٤-۲ پایداری گذرا ۲۱۰
۵-٤-۳ زمان پاسخ ۲۱۱
۵-٤-٤ قابلیت تبادل توان حقیقی ۲۱۲
۵-٤-۵ کار با سیستم *ac* نامتعادل ۲۱۲
۵-٤-٦ مشخصه تلفات در برابر توان رآکتیو خروجی ۲۱۵
۵-٤-۷ ابعاد فیزیکی و نصب ۲۱۵
۵-٤-۸ ارزش های جبران ساز مختلط ۲۱۵
۵-۵ سیستم‌های استاتیکی توان رآکتیو ۲۱٦

فصل ششم جبران سازهای استاتیکی سری:GCSC،TSSC،TCSC و SSSC ۲۱۹

٦-۱ اهداف جبران سازی سری ۲۱۹
٦-۱-۱ مفهوم جبران‌سازی خازنی به صورت سری ۲۱۹
٦-۱-۲ پایداری ولتاژ ۲۲۱
٦-۱-۳ اصلاح پایداری گذرا ۲۲۲
٦-۱-٤ میرایی نوسانات توان ۲۲۳
٦-۱-۵ میرایی نوسانات زیرسنکرون ۲۲٤
٦-۱-٦ جمع‌بندی الزامات عملیاتی ۲۲۵
٦-۱-۷ رویکردهایی به جبران سازی سری قابل کنترل ۲۲٦
٦-۲ جبران سازهای سری نوع امپدانس متغیر ۲۲۷
٦-۲-۱ خازن سری کنترل شده با تریستور GTO (GCSC) ۲۲۷
٦-۲-۲ خازن سری سوئیچ شده با تریستور (TSSC) ۲۳۳
٦-۲-۳ خازن سری کنترل شده با تریستور (TCSC) ۲۳٦
٦-۲-٤ مشخصه‌های زیر سنکرون ۲٤٦
٦-۲-۵ طرح‌های اساسی کنترل عملکرد برای GCSC، TSSC و TCSC ۲٤۹

۶-۳ جبران سازهای سری، نوع کنورتور سوئیچ شونده ۲۵۳
۶-۳-۱ جبران ساز استاتیکی سنکرون (SSSC) ۲۵۴
۶-۳-۲ مشخصه توان انتقال یافته در برابر زاویه انتقال ۲۵۶
۶-۳-۳ محدوده کنترلی و مقدار نامی ولت آمپر (VA) ۲۵۹
۶-۳-۴ قابلیت تأمین جبران سازی توان حقیقی ۲۶۰
۶-۳-۵ ایمنی در برابر تشدید زیر سنکرون ۲۶۴
۶-۳-۶ کنترل داخلی ۲۶۷
۶-۴ (سیستم) کنترل بیرونی برای جبران سازهای رآکتیو سری ۲۷۰
۶-۵ جمع بندی مشخصه‌ها و ویژگی‌ها ۲۷۲

فصل هفتم تنظیم کننده‌های استاتیکی ولتاژ و زاویه فاز: TCVR و TCPAR ۲۷۷

۷-۱ اهداف تنظیم کننده‌های ولتاژ و زاویه فاز ۲۷۷
۷-۱-۱ تنظیم ولتاژ و زاویه فاز ۲۷۹
۷-۱-۲ کنترل سیلان توان توسط تنظیم کننده‌های زاویه فاز ۲۸۰
۷-۱-۳ کنترل چرخه سیلان توان حقیقی و رآکتیو ۲۸۲
۷-۱-۴ اصلاح پایداری حالت گذرا با تنظیم کننده‌های زاویه فاز ۲۸۵
۷-۱-۵ میرایی نوسان توان با تنظیم کننده‌های زاویه فاز ۲۸۶
۷-۱-۶ جمع بندی الزامات عملکردی ۲۸۷
۷-۲ رویکردهایی به تنظیم‌کننده‌های ولتاژ و زاویه فاز با کنترل تریستوری (TCPARها و TCVRها) ۲۸۸
۷-۲-۱ تغییردهنده‌های تپ تریستوری با قابلیت کنترل پیوسته ۲۹۱
۷-۲-۲ تپ چنجر تریستوری با کنترل سطح مجزا ۲۹۷
۷-۲-۳ ملاحظات مربوط به اندازه نامی والو در تپ چنجر تریستوری ۳۰۰
۷-۳ تنظیم‌کننده‌های ولتاژ و زاویه فاز مبتنی بر کنورتورهای سوئیچ شونده ۳۰۲
۷-۴ تنظیم کننده‌های زاویه فاز مختلط ۳۰۴

فصل هشتم جبران‌سازهای ترکیبی: کنترل‌کننده یکپارچه سیلان توان UPFC و کنترل‌کننده میان خط سیلان توان IPFC ۳۰۷

۸-۱ معرفی ۳۰۷
۸-۲ کنترل کننده یکپارچه سیلان توان ۳۱۰
۸-۲-۱ اصول اساسی عملکرد ۳۱۰
۸-۲-۲ قابلیت‌های کنترل انتقال متداول ۳۱۲
۸-۲-۳ کنترل مستقل سیلان توان حقیقی و رآکتیو ۳۱۶
۸-۲-۴ مقایسه UPFC با جبران‌سازهای سری و تنظیم‌کننده‌های زاویه فاز ۳۱۹
۸-۲-۵ ساختار کنترل ۳۲۶
۸-۲-۶ سیستم کنترل پایه، برای کنترل P و Q ۳۳۰
۸-۲-۷ عملکرد دینامیکی ۳۳۳
۸-۲-۸ آرایش مختلط: UPFC با ترانسفورماتور جابجا کننده فاز ۳۴۲
۸-۳ کنترل کننده سیلان توان میان خط (IPFC) ۳۴۵
۸-۳-۱ اصول اساسی عملکرد و مشخصه‌ها ۳۴۶
۸-۳-۲ ساختار کنترلی ۳۵۶

۸-۳-۳ شبیه سازی رایانه‌ای ۳۵۷
۸-۳-۴ ملاحظات عملی و کاربردی ۳۶۰
۸-۴ کنترل کننده‌های عمومی و چند کارکردی FACTS ۳۶۱

فصل نهم کنترل کننده‌های FACTS با کاربری خاص: طرح کاهنده NGH-SSR و مقاومت ترمزی کنترل شده با تریستور ۳۶۷

۹-۱ تشدید زیرسنکرون ۳۶۷
۹-۲ طرح کاهنده NGH-SSR ۳۷۳
۹-۲-۱ مفهوم اساسی ۳۷۳
۹-۲-۲ جنبه‌های طراحی و عملکردی ۳۷۶
۹-۳ مقاومت ترمزی کنترل شده با تریستور (TCBR) ۳۷۷
۹-۳-۱ مفهوم اساسی ۳۷۷
۹-۳-۲ جنبه‌های طراحی و عملکردی ۳۸۰

فصل دهم مثال‌های کاربردی ۳۸۹

۱۰-۱ خازن سری پیشرفته (ASC) در پست کاینتا متعلق به WAPA ۳۸۹
۱۰-۱-۱ معرفی و جنبه‌های طرح ریزی ۳۸۹
۱۰-۱-۲ مشخصات کارکردی ۳۹۲
۱۰-۱-۳ جنبه‌های طراحی و عملیاتی ۳۹۳
۱۰-۱-۴ نتایج پروژه ۳۹۷
۱۰-۲ خازن سری کنترل شده با تریستور (TCSC) در پست "اسلات" BPA ۳۹۹
۱۰-۲-۱ معرفی و جنبه‌های طرح ۳۹۹
۱۰-۲-۲ مشخصات عملکردی ۴۰۲
۱۰-۲-۳ جنبه‌های طراحی و عملکرد ۴۰۵
۱۰-۲-۴ نتایج پروژه ۴۱۰
۱۰-۳ جبران ساز استاتیکی سنکرون در پست "سولیوان" متعلق به TVA ۴۱۲
۱۰-۳-۱ معرفی و جنبه‌های برنامه‌ریزی ۴۱۲
۱۰-۳-۲ جمع بندی طراحی STATCOM ۴۱۵
۱۰-۳-۳ عملکرد حالت ماندگار ۴۱۹
۱۰-۳-۴ عملکرد دینامیکی ۴۲۰
۱۰-۳-۵ نتیجه پروژه ۴۲۶
۱۰-۴ کنترل کننده یکپارچه سیلان توان (UPFC) در پست "اینز" متعلق به AEP ۴۲۶
۱۰-۴-۱ معرفی و جنبه‌های برنامه‌ریزی ۴۲۶
۱۰-۴-۲ شرح UPFC ۴۳۱
۱۰-۴-۳ اجرای عملیات ۴۳۴
۱۰-۴-۴ نتایج پروژه ۴۴۳

واژه‌نامه فارسی– انگلیسی ۴۴۵

واژه‌نامه انگلیسی– فارسی ۴۵۲

مقدمه ناشر

گسترش روز افزون علم و فن‌آوری در جهان امروز بقای هر سازمان علمی را در گرو ارتقاء سطح آموزشی و تحکیم پایه‌های علمی و فنی خود قرار داده است.

شرکت مهندسین مشاور قدس نیرو در سرلوحه برنامه‌های آموزشی و پژوهشی، مصمم است تا با بهره‌گیری از متخصصین با تجربه خود، نشر و انتقال آخرین دست‌آوردهای صاحب نظران صنعت برق را در سطحی ملی و جهانی به انجام رساند. در این راستا، کتاب حاضر که تا به امروز ازجمله مهم‌ترین و کامل‌ترین کتاب‌ها در حوزه مفاهیم FACTS، و حاصل تلاش‌های برجسته‌ترین محققان این زمینه علمی است، انتخاب و کار ترجمه آن توسط جناب آقای مهندس **احمد فریدون درافشان**- معاونت شبکه‌های انتقال و توزیع نیروی این شرکت در نهایت صبر و حوصله به اتمام رسید. انتخاب و معرفی کتاب به شرکت قدس نیرو از سوی جناب آقای دکتر **سیدمحمدتقی بطحایی**- استاد گرانقدر دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی و از متخصصین FACTS در کشور- و پیگیری‌ها و تشویق‌های مکرر ایشان مبنی بر ترجمه اثر حاضر جای بسی قدردانی و سپاسگزاری دارد. بی شک بدون حضور و همراهی ایشان این مهم به انجام نرسیده و راه به جایی نمی برد.

امید است نشر این کتاب که در جهت ارتقاء سطح علمی و عملی مفاهیم FACTS و در راستای تحکیم و تقویت بنیان‌های علمی صنعت برق کشور صورت پذیرفته، گامی باشد در راه تداوم تلاش‌های علمی و انتقال تجربیات و نمودی باشد از تعهد، پژوهش و پشتکار سازمانی که رویه‌هایی از این دست را در ثبات دورنمای علمی کشور بسیار ضروری می‌داند.

احمد شکوری راد
مدیر عامل
مهندسین مشاور قدس نیرو

مقدمه مترجم

شبکه‌های انتقال نیروی انعطاف پذیر (FACTS)، یکی از جنبه های انقلاب الکترونیک است که در همه زمینه‌های انرژی الکتریکی در حال وقوع می‌باشد. گستره ادوات قدرتمند نیمه هادی علاوه بر مزایای کلید زنی سریع و قابل اطمینان، با تکیه بر مفاهیم جدیدی از مدارها فرصت‌هایی را برای ارزشمند نمودن انرژی الکتریکی فراهم می‌کند. در حالی که فن‌آوری‌هایی همچون ترانزیستور و میکرو الکترونیک بسیاری از جنبه‌های زندگی ما را دچار تحول کرده‌اند، تأثیر حائز اهمیت ادوات الکترونیک قدرت در زمینه‌های انرژی و به دنبال آن بر مسائل روزمره زندگی را نیز بی‌تردید نمی‌توان نادیده انگاشت. بدیهی است که انقلاب الکترونیک قدرت در حال وقوع است، و کاربرد الکترونیک قدرت به گسترش خود ادامه خواهد داد. در زمینه تولید انرژی، کاربرد بالقوهٔ الکترونیک قدرت عمدتاً به انرژی‌های تجدیدپذیر معطوف می‌شود. تولید فتو ولتایی و پیل‌های سوختی نیاز به تبدیل جریان مستقیم به جریان متناوب دارند. اقتصادی بودن استفاده از انرژی باد و مولدهای آبی کوچک به تولید انرژی الکتریکی در سرعت‌های متفاوت نیازمند است. این دو نوع تولید انرژی الکتریکی هم‌چنین به تبدیل فرکانس متغیر جریان متناوب به فرکانس سیستم قدرت نیاز دارند. چنین کاربردهایی از الکترونیک قدرت در زمینه تولید انرژی‌های تجدیدپذیر عموماً به کنورتورهایی در اندازه‌های چند کیلووات تا چند مگاوات نیاز خواهد داشت. پیشرفت بیشتر معلوم خواهد کرد که این فن‌آوری‌ها چه تأثیری در تولید انرژی الکتریکی خواهند داشت. به هر صورت، این موارد، به دلیل پرهزینه بودن گسترش شبکه‌های عمومی، در خدمت تأمین نیاز بارهای کوچک و منفرد خواهند بود. در نیروگاه‌های حرارتی، با استفاده از موتورهای دور متغیر برای پمپ‌ها و کمپرسورها صرفه‌جویی قابل توجهی به وجود می‌آید. در دهه های آینده، ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در سیستم‌های قدرت به صورت گسترده، با فن‌آوری خازن، باطری و مغناطیس‌های فوق هادی قابل تصور است. هم اکنون نیز باطری‌ها به عنوان منبع توان اضطراری به صورت گسترده‌ای به کار می‌روند؛ و نیاز به کنورتورهای ac/dc/ac در اندازه‌های چندکیلووات تا چند ده مگاوات دارند. از طرف دیگر، ذخیره‌گاه‌های هیدرولیکی دور متغیر نیاز به کنورتورهایی تا چند صد مگاوات دارند.

در زمینه توزیع نیرو، استفاده از این فن آوری امکان تحویل انرژی مناسب به مشترکین صنعتی و تجاری، بدون اعوجاج ولتاژ را فراهم کرده است. امروزه دیگر آشکار است که کاهش بیش از ۱۵ تا ۲۰ درصد ولتاژ در مدت زمانی بیش از چند سیکل، به تلفات گسترده در صنایعی که بیش از پیش به سوی فرایند های اتوماسیون می روند، منجر خواهد شد.

در زمینه انتقال نیرو، کاربرد الکترونیک قدرت شامل انتقال قدرت جریان مستقیم(HVDC) و FACTS است. فن آوری HVDC به خوبی جاافتاده است و برای اتصال دو سیستم قدرت که در فاصله معتنابهی از یکدیگر قرارگرفته اند (بیش از ۵۰ کیلومتر در انتقال زیر دریایی و ۱۰۰۰ کیلومتر در انتقال هوایی) و از فرکانس های متفاوتی استفاده می کنند ویا کنترل فرکانس آن‌ها با یکدیگر سازگار نیست، به کار می رود. انتقال HVDC عبارت است از تبدیل ac به dc در یک طرف خط و تبدیل معکوس آن

FACTS، باعث ایجاد تحرک و هیجان در مهندسان نسل جوان‌تر شده است، چون با تفکردوباره شبکه‌های قدرت را در همه جهان بازسازی خواهند کرد.

مناسب است اشاره شود که در اجرای فن‌آوری FACTS، ما با یک فن‌آوری پایه سروکار داریم که کارآیی آن از طریق HVDC و موتورهای صنعتی توان زیاد به اثبات رسیده است. به این ترتیب، با تداوم اصلاح در ادوات نیمه هادی قدرت، به خصوص دستگاه‌هایی که قابلیت"قطع کردن" داشته باشند، و با تداوم پیشرفت در مفاهیم کنترل کننده‌های FACTS، قیمت این کنترل کننده‌ها دائماً کاهش می‌یابد. کاربرد وسیع فن آوری FACTS یک سناریوی حتمی است.

۱-۲ سیلان توان در یک سیستم AC

در حال حاضر بسیاری از امکانات انتقال علاوه بر آن‌که قادر به هدایت توان در جهت دلخواه نیستند، با یک یا چند پارامتر محدود کننده شبکه مواجه هستند.

در سیستم‌های قدرت *ac*، اگر ذخیره تولید قابل توجهی وجود نداشته باشد، تولید و مصرف برق بایستی در تمام مدت دارای تعادل باشند. تا حدودی، سیستم‌های الکتریکی حالت "خود-تنظیم" دارند. اگر تولید کمتر از بار مصرفی باشد، ولتاژ و فرکانس کاهش می‌یابند، و در نتیجه بار تا حد برابر شدن با تولید، منهای تلفات انتقال، کاسته می‌شود. با این وجود، برای چنین "خود-تنظیم" کنندگی فقط درصد مختصری حاشیه تغییرات وجود دارد. اگر ولتاژ با حمایت توان رآکتیو پابرجا بماند، مقدار بار افزایش خواهد یافت و در نتیجه فرکانس به کاهش خود ادامه خواهد داد و نهایتاً سیستم ساقط خواهد شد. بر همین منوال اگر بار رآکتیو نامناسب باشد، سیستم دچار فروپاشی ولتاژ خواهد شد.

اگر مقدار تولید متناسب باشد، مقداری توان آکتیو از مناطقی که مازاد تولید دارند به مناطقی که کمبود دارند جریان می‌یابد، و این جریان از همه مسیرهای موازی و در دسترس که شامل خطوطی در همه سطوح ولتاژ از متوسط تا زیاد است، عبور می‌نماید. اغلب خطوط طولانی در مسیر خود از نیروگاه‌ها و مناطق بار متعددی گذر می‌کنند. یکی از مثال‌هایی که اغلب نقل می‌شود، آن است که بیشتر توان انتقالی از انتاریو هایدرو[1] در کانادا به شمال شرقی ایالات متحده، از طریق سیستم PJM و در یک حلقه طولانی سیلان می‌یابد، که این امر ناشی از وجود چندین خط قدرتمند با امپدانس کم در این حلقه است. در واقع تعدادی حلقه‌های اصلی و تعداد زیادتری حلقه‌های فرعی در مسیر قرار دارند و مقدار نامعینی از توان در هر یک از این سیستم‌های انتقال جاری می‌شود.

۱-۲-۱ عبور توان در مسیرهای موازی

یک حالت بسیار ساده از سیلان توان (شکل ۱-۱ الف)، از طریق دو مسیر موازی (احتمالاً کریدوری از خطوط متعدد) است و از یک منطقه دارای مازاد تولید که با یک ژنراتور در سمت چپ شکل معادل شده، به یک منطقه دارای کمبود تولید در سمت راست می رود. بدون هیچ‌گونه کنترل، سیلان توان به نسبت عکس امپدانس خطوط مختلف می‌باشد. جدا از مسائل قراردادی و مالکیتی که میزان توان عبوری هر خط را تعریف می‌کنند، خطی که امپدانس کمتری دارد ممکن است دچار اضافه بار شده و در نتیجه بارگیری هر دو خط را دچار محدودیت نماید، هرچند خط دیگر که امپدانس بیشتری دارد به طور کامل بارگیری نکرده باشد. محرکی برای افزایش ظرفیت جریان عبوری از خط اضافه بار شده وجود نخواهد داشت، زیرا موجب کاهش بیشتر امپدانس خط می‌شود و این

[1] Ontario Hydro

سرمایه‌گذاری محکوم به شکست است به خصوص اگر خط با امپدانس بالاتر هنوز ظرفیت اضافی داشته باشد.

شکل ۱-۱ ب همان دو مسیر را نشان می‌دهد، اما این بار یکی از مسیرها انتقال را به صورت HVDC انجام می‌دهد. با HVDC، توان براساس فرمان اپراتور جریان می‌یابد؛ زیرا در مبدل‌های الکترونیک قدرت که در سیستم HVDC به کار می‌روند، توان به صورت الکترونیکی کنترل می‌شود. به همین دلیل چون توان به صورت الکترونیکی کنترل می‌شود، اگر ظرفیت مبدل به صورت مناسب اختیار شده باشد، خط HVDC می‌تواند تا حد حرارتی خود مورد بهره‌برداری قرار گیرد. به علاوه، خط HVDC به دلیل دارا بودن کنترل سریع الکترونیکی می‌تواند به خط *ac* موازی خود در کسب پایداری کمک کند. با این وصف، HVDC برای کاربرد عمومی گران است و معمولاً در مواقعی که فواصل طولانی موردنظر است به کار گرفته می‌شود؛ مثل ارتباطات DC پاسیفیک[1] که در آن عبور توان با فرمان اپراتور صورت می‌گیرد.

به عنوان نمونه‌های دیگر کنترل کننده‌های FACTS، شکل‌های ۱-۱ ج و ۱-۱ د خطوطی هستند که با انواع دیگر کنترل کننده‌های سری از نوع FACTS نشان داده شده‌اند. با کنترل کردن امپدانس (شکل ۱-۱ ج) یا زاویه فاز (شکل ۱-۱ د) یا تزریق ولتاژ مناسب به صورت سری (نشان داده نشده)، کنترل کننده FACTS می‌تواند سیلان توان را براساس نیاز کنترل نماید. درصورتی‌که وظیفه این خط، انتقال توان بیشتر در زمان قطع خط موازی آن باشد، در واقع حداکثر عبور توان می‌تواند محدود به حد نهایی خط تحت شرایط اضطراری شود.

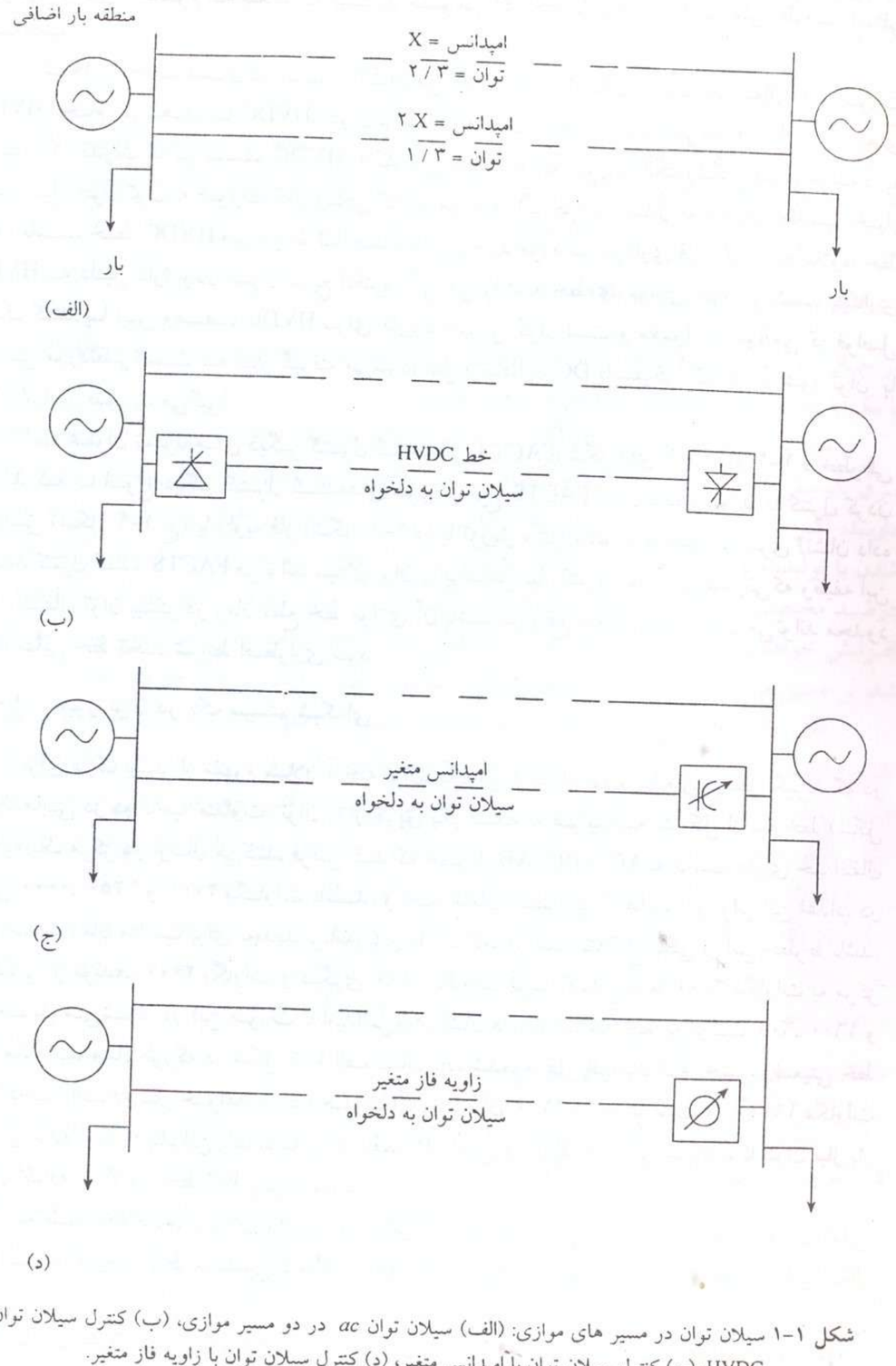
۱-۲-۲ عبور توان در یک سیستم شبکه‌ای

برای درک بیشتر از مفهوم سیلان آزادنه توان، یک مورد بسیار ساده شده را درنظر بگیرید که در آن مولدهایی در دو ناحیه متفاوت، توان را از طریق یک شبکه به هم پیوسته متشکل از سه خط (شکل ۲-۱) به یک مرکز بار ارسال می‌کنند. فرض کنید که خطوط AB، BC و AC به ترتیب دارای حد انتقال دائمی ۱۰۰۰، ۱۲۵۰ و ۲۰۰۰ مگاوات باشند، و حد انتقال اضطراری آن‌ها نیز دو برابر این اعداد، در طول مدت زمان مناسب برای تجدید برنامه‌ریزی بار شبکه، در صورت قطع یکی از این خطوط باشد. اگر یکی از مولدها ۲۰۰۰ مگاوات و دیگری ۱۰۰۰ مگاوات تولید کنند، جمعاً ۳۰۰۰ مگاوات به مرکز بار تحویل می‌شود. در این صورت با امپدانس‌های نشان داده شده، سه خط به ترتیب ۶۰۰، ۱۶۰۰ و ۱۴۰۰ مگاوات، همان‌طورکه در شکل ۲-۱ الف نشان داده شده، منتقل خواهند کرد. چنین وضعیتی خط BC را دچار اضافه بار خواهد کرد (حد انتقال دائمی آن ۱۲۵۰ مگاوات است و با ۱۶۰۰ مگاوات بارگیری شده است)؛ بنابراین باید تولید را در نقطه B کاهش و در نقطه A افزایش داد، تا بتوان نیاز بار را بدون اضافه بار کردن خط BC برآورد نمود.

به طور خلاصه، سیلان توان برحسب امپدانس سری خط (که ۹۰ درصد مواقع حالت القایی دارد) است و هیچ ارتباط مستقیمی با مالکیت خط انتقال، قراردادها، حد حرارتی خط یا تلفات انتقال ندارد.

به هر حال اگر یک خازن که رآکتانس آن ۵- اهم در فرکانس خط است، در یکی از خطوط(شکل ۲-۱ ب) قرار داده شود، امپدانس خط را از ۱۰ اهم به ۵ اهم کاهش می‌دهد، به طوری که عبور توان از خطوط AB، BC و AC به ترتیب ۲۵۰، ۱۲۵۰ و ۱۷۵۰ مگاوات خواهد بود. روشن

[1] Pacific DC Intertie

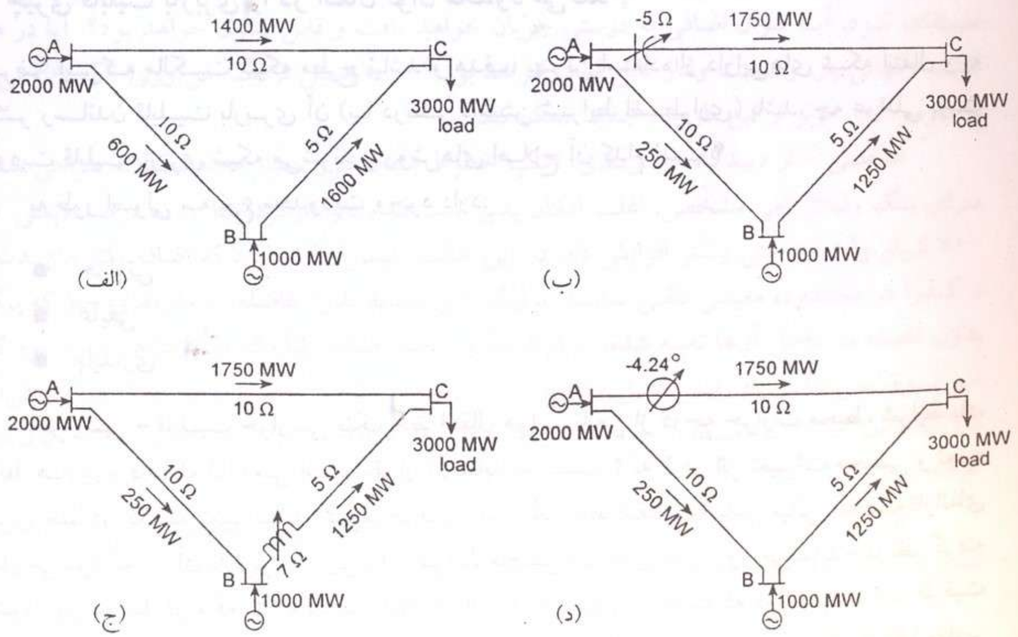


شکل ۱-۱ سیلان توان در مسیر های موازی: (الف) سیلان توان *ac* در دو مسیر موازی، (ب) کنترل سیلان توان با HVDC، (ج) کنترل سیلان توان با امپدانس متغیر، (د) کنترل سیلان توان با زاویه فاز متغیر.

است که اگر خازن سری قابل تنظیم باشد مقادیر دیگری از عبور توان براساس مالکیت، خطوط، قراردادها، حد حرارتی، تلفات انتقال قابل حصول خواهد بود و طیف وسیعی از برنامه‌های تولید و مصرف وجود خواهد داشت. اگرچه این خازن می‌تواند به شکل مدولار باشد و به صورت مکانیکی قطع و وصل شود، تعداد دفعات عملیات کلیدزنی به شدت محدود به فرسایش اجزاء مکانیکی خواهد بود؛ زیرا بار خط به طور مستمر با شرایط بار، برنامه تولید، و خروجی‌های خط تغییر می‌کند.

در صورت کنترل خازن سری به شکل مکانیکی، پیچیدگی‌های دیگری نیز بروز خواهد کرد. یک خازن سری در یک خط ممکن است باعث بروز حالت تشدید زیر سنکرون شود (به عنوان مثال در سیستم‌های ۶۰ هرتز در فرکانس‌های ۱۰ تا ۵۰ هرتز). این تشدید هنگامی رخ می‌دهد که یکی از فرکانس‌های تشدید مکانیکی محور واحد توربین-ژنراتور برابر با فرکانس ۶۰ هرتز شبکه منهای فرکانس تشدید الکتریکی خازنی که دارای امپدانس القایی خط است، شود. اگر این تشدید تداوم یابد، در مدت کوتاهی منجر به خسارت دیدن محور خواهد شد. هم‌چنین هنگامی که خروج یک خط، خطوط دیگر را وادار به کار در حد ظرفیت اضطراری و انتقال توان بالاتر می‌کند، نوسانات سیلان توان در فرکانس کم (به طور نمونه ۰/۳ تا ۳ هرتز) ممکن است باعث خروج ژنراتورها از حالت سنکرون شود و شاید سقوط سیستم را تسریع نماید.

اگر تمام یا بخشی از خازن سری یا تریستور کنترل شود، می‌توان مقدار آن را هرچند بار که مورد نیاز باشد، تغییر داد. می‌توان آن را طوری تنظیم کرد که به سرعت هر حالت تشدید زیر سنکرون را میرا نموده و نیز نوسانات کم فرکانس سیلان توان را هم میرا کند. این امر اجازه می‌دهد که سیستم انتقال بدون خطر آسیب دیدن محور ژنراتور از یک حالت پایدار به حالت پایدار دیگر برود، ضمن



شکل ۲-۱ سیلان توان در سیستم شبکه ای: (الف) دیاگرام سیستم، (ب) دیاگرام سیستم با خازن سری قابل کنترل با تریستور در خط AC، (ج) دیاگرام سیستم با رآکتور سری قابل کنترل با تریستوردر خطBC، (د) دیاگرام سیستم با تنظیم کننده زاویه فاز قابل کنترل با تریستور در خط AC.

این‌که به کاهش خطر فروپاشی سیستم هم کمک می‌کند. به عبارت دیگر، یک خازن سری با کنترل تریستوری، می‌تواند تا حد زیادی پایداری شبکه را افزایش دهد. گاهی اوقات، عملی‌تر است که بخشی از جبران سازی سری به صورت مکانیکی و بخشی با تریستور کنترل شود، تا به این ترتیب محدودیت‌های حداقل نگه‌داشتن هزینه سیستم نیز لحاظ شود.

نتایج مشابهی را می‌توان با افزایش امپدانس یکی از خطوط در همان آرایش شبکه به دست آورد، به این صورت که یک رآکتور (القاگر) ۷ اهمی را به صورت سری در خط AB قرار دهند (شکل ۲-۱ ج). باز هم، یک القاگر سری که بخشی به صورت مکانیکی و بخشی با تریستور کنترل شود، می‌تواند برای تنظیم سیلان توان در حالت پایدار و نیز میرا نمودن نوسانات ناخواسته، به کار رود.

به عنوان انتخاب دیگر، می‌توان یک تنظیم کننده زاویه فاز را که با تریستور کنترل می‌شود، به جای خازن سری یا رآکتور سری در هر یک از سه خط شبکه مفروض قبلی قرار داد تا همان مقاصد را تأمین کند. در شکل ۲-۱ د، تنظیم کننده در خط سوم قرار گرفته تا کل اختلاف زاویه فاز را در خط از ۸/۵ درجه به ٤/٢٦ درجه کاهش دهد. باز هم مثل گذشته ترکیبی از کنترل مکانیکی و تریستوری تنظیم کننده زاویه فاز می‌تواند منجر به حداقل شدن قیمت شود.

همین نتایج می‌تواند با تزریق یک ولتاژ متغیر در یکی از خطوط به دست آید. توجه نمایید که متعادل کردن سیلان توان در مدار مفروض قبلی به بیش از یکی از ادوات کنترل کننده FACTS نیاز نداشت و در واقع انتخاب‌های متعددی میان کنترل کننده‌های مختلف و خطوط مختلف وجود داشت.

اگر شبکه انتقال تنها یک مالک داشته باشد، می‌توان تصمیم را فقط براساس اقتصادی بودن کل شبکه اتخاذ کرد. از طرف دیگر، اگر مالکین متعددی درگیر باشند، در آن صورت وجود یک مکانیزم تصمیم‌گیری برای سرمایه‌گذاری و مالکیت ضرورت خواهد داشت.

۱-۳ چه چیزی قابلیت باربری را در انتقال توان محدود می‌کند ؟

با فرض این‌که مالکیت شبکه مطرح نباشد و هدف، بهترین استفاده از دارایی‌های شبکه انتقال و به حداکثر رساندن قابلیت باربری آن (با درنظر داشتن شرایط اضطراری) باشد، چه عواملی باعث محدودیت قابلیت باربری شبکه می‌شوند و روش‌های اصلاح آن کدام است ؟

به طور اصولی سه نوع محدودیت وجود دارد:

- حرارتی
- عایقی
- پایداری

حرارتی - قابلیت حرارتی یک خط انتقال هوایی تابعی از درجه حرارت محیط، شرایط باد، شرایط هادی و فاصله تا زمین است. مقدار آن شاید به نسبت ۲ به ۱ در اثر تغییرات محیطی و نحوه بارگیری خط در گذشته تغییر نماید. عموماً ظرفیت نامی یک خط انتقال براساس مبانی محافظه‌کارانه‌ای اختیار می‌شود که در آن بدترین سناریو برای شرایط محیطی -که طبق آمار بروز می‌نماید- درنظر گرفته می‌شود. این شرایط در واقعیت به ندرت اتفاق می‌افتد و به معنای آن است که در اغلب موارد، ظرفیت لحظه‌ای زیادتری نسبت به آن‌چه که فرض می‌شود در خط وجود دارد. بعضی شرکت‌ها مقادیر زمستانی و تابستانی برای حد انتقال شبکه خود درنظر می‌گیرند اما باز هم حاشیه قابل توجهی برای بازی کردن باقی می‌ماند. برنامه‌های کامپیوتری غیر هم‌زمانی هم وجود دارندکه می‌توانند ظرفیت باربری خط را براساس شرایط محیطی قابل حصول و تاریخچه بارگیری کوتاه مدت محاسبه کنند. در مقابل،

تجهیزات پایش[1] هم‌زمان هم وجود دارند که می‌توانند مبنایی برای تعیین ظرفیت باربری لحظه‌ای باشند. این روش‌ها در طول چندین سال تکامل یافته‌اند. با درنظر گرفتن سن فن‌آوری اتوماسیون (که شاخص آن سیستم‌های GPS و سرویس‌های مخابراتی پیچیده ولی ارزان هستند)، مطمئناً کسب اطلاعات روزانه یا ساعتی یا لحظه‌ای در مورد ظرفیت باربری انتقال، منطقی خواهد بود. گاهی اوقات شرایط محیطی می‌تواند در عمل بدتر از آنی باشد که فرض شده است و لذا داشتن ابزاری برای تعیین ظرفیت واقعی خط می‌تواند مفید باشد.

در مراحل برنامه‌ریزی و طراحی، غالباً ظرفیت باربری خط برای کار در حالت عادی بر مبنای ارزش گذاری مقدار تلفات و با مفروضاتی که بنا به دلایل متفاوت ممکن است عوض شوند، تعیین می‌شود؛ با این حال مقدار تلفات می‌تواند در تعیین ظرفیت اضافی باربری خط به صورت هم‌زمان، به حساب آورده شود.

البته، افزایش ظرفیت یک مدار انتقال شامل ملاحظات مربوط به ظرفیت لحظه‌ای ترانسفورماتورها و سایر تجهیزات نیز می‌شود، به طوری که احتمالاً بعضی از آن‌ها بایستی تغییر یابند تا ظرفیت بارگیری خط افزایش یابد. ظرفیت بارگیری لحظه‌ای ترانسفورماتورها نیز تابعی از درجه حرارت محیط، عمر ترانسفورماتور و سابقه بارگیری اخیر آن می‌باشد. هم‌چنین ظرفیت بارگیری لحظه‌ای ترانسفورماتورها را می‌توان با استفاده از پایش‌گرهای هم‌زمان یا غیر هم‌زمان تعیین نمود. ضمناً ظرفیت ترانسفورماتور با خنک‌تر شدن بیشتر، افزایش می‌یابد.

امکان دیگر برای ارتقاء ظرفیت باربری خط انتقال، تعویض هادی آن با هادی دیگری است که مقدار جریان نامی آن بیشتر است، و این امر به نوبه خود ممکن است نیاز به افزایش استحکام سازه‌های خط داشته باشد. در نهایت احتمال دارد که یک خط تک مداره به یک خط دو مداره تبدیل شود. هنگامی که قابلیت انتقال جریان بیشتر فراهم شود، آن‌گاه این سئوال ایجاد می‌شود که چگونه باید از آن استفاده کرد. آیا توان اضافی به درستی جریان خواهد یافت و قابل کنترل خواهد بود؟ آیا در هنگام افت ناگهانی بار، وضعیت ولتاژ قابل قبول خواهد بود ؟ و به همین ترتیب. فن‌آوری FACTS می‌تواند به بهره‌برداری مؤثر از این ظرفیت جدید کمک کند.

عایقی - از دیدگاه عایق‌بندی، اغلب خطوط انتقال نیرو بسیار محافظه‌کارانه طراحی شده‌اند. برای یک ولتاژ نامی مشخص، اغلب امکان پذیر است که ولتاژ کارکرد خط را ده درصد (یعنی ۵۵۰-۵۰۰ کیلو ولت) و حتی بیشتر افزایش داد. در این حالت بایستی دقت شود که اضافه ولتاژهای دینامیک و گذرا در محدوده معینی باقی بمانند. برق‌گیرهای جدید بدون فاصله، یا مقره‌های خط که برق‌گیر بدون فاصله در داخل آن‌ها تعبیه شده، یا بازدارنده قدرتمند اضافه ولتاژ که در پست‌ها با تریستور کنترل می‌شود، می‌توانند افزایش قابل ملاحظه‌ای در سطح ولتاژی خط و پست ایجاد نمایند. فن‌آوری FACTS می‌تواند به منظور حصول اطمینان از شرایط اضافه ولتاژی و سیلان توان قابل قبول به کار گرفته شود.

پایداری - برخی از مطالب مربوط به پایداری، ظرفیت انتقال را محدود می‌کنند. این مطالب شامل موارد زیر هستند:

- پایداری در حالت‌های گذرا
- پایداری در حالت‌های دینامیکی
- پایداری در حالت‌های کار عادی

---

[1] Monitoring

- فروپاشی فرکانس
- فروپاشی ولتاژ
- تشدید زیر سنکرون

کتاب‌های برجسته‌ای در این زمینه‌ها وجود دارد. بنابراین بحث در این موارد در این کتاب به صورت خلاصه انجام خواهد شد، و محدود به مواردی می‌شود که در واقع برای شرح کنترل کننده‌های FACTS، بنیادی هستند. فن‌آوری FACTS به طور یقین می‌تواند برای غلبه بر محدودیت‌های "پایداری" مورد استفاده قرار گیرد، که از آن میان محدودیت‌های نهایی، حرارتی و عایقی هستند.

۱-٤ ملاحظات سیلان توان و پایداری دینامیکی در یک شبکه انتقال

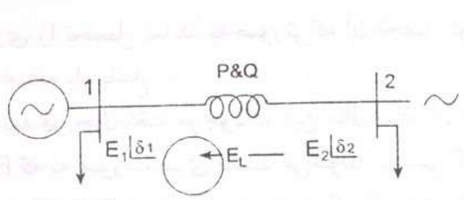
شکل ۳-۱ الف یک حالت ساده شده از سیلان توان در یک خط انتقال را نشان می‌دهد. مکان‌های ۱ و ۲ می‌توانند هر پست انتقالی باشند که بوسیله یک خط انتقال به یکدیگر متصل شده‌اند. پست‌ها می‌توانند دارای بار باشند؛ دارای تولید باشند؛ و یا صرفاً به صورت نقاط ارتباط بر روی سیستم باشند که برای سادگی آن‌ها را به صورت شینه‌های صلب نشان می‌دهند. E_1 و E_2 مقدار ولتاژ شینه‌ها و δ زاویه بین این دو مقدار است. فرض شده است که خط دارای امپدانس القایی X است و از مقدار مقاومت و رآکتانس خازنی خط نیز صرف‌نظر شده است.

همان‌طورکه در دیاگرام فازوری (شکل ۳-۱ ب) نشان داده شده، ولتاژ محرک تلفات در خط، اختلاف فازوری $\boldsymbol{E}_L$ است که بین دو ولتاژ فازوری $\boldsymbol{E}_1$ و $\boldsymbol{E}_2$ وجود دارد. مقدار جریان خط به صورت زیر به دست می‌آید:

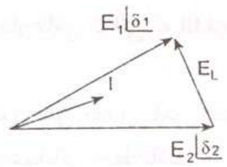
$$I = E_L/X \quad \text{و به اندازه ۹۰ درجه از } E_L \text{ عقب‌تر است.}$$

مهم است بدانیم که برای یک خط نمونه، زاویه δ و ولتاژ محرک مربوطه یا افت ولتاژ در طول خط، در مقایسه با ولتاژ خط مقدار کوچکی است. با دانستن این که در یک خط انتقال در زمان بار کامل، افت ولتاژ می‌تواند احتمالاً حدود یک درصد در هر ۱۰ کیلومتر باشد و با فرض این‌که خط بین دو شینه صلب (پست‌ها) ۲۰۰ کیلومتر طول داشته باشد، افت ولتاژ در این خط برابر ۲۰ درصد در حالت بار کامل است و زاویه δ مقدار کوچکی دارد. اگر می‌خواستیم رقمی در این مورد فرض کنیم، برای مثال وقتی مقادیر E_1 و E_2 برابر باشند و مقدار X برابر ۰/۲ پریونیت باشد، زاویه δ تنها برابر ۰/۲ رادیان یا ۱۱/۵ درجه خواهد بود.

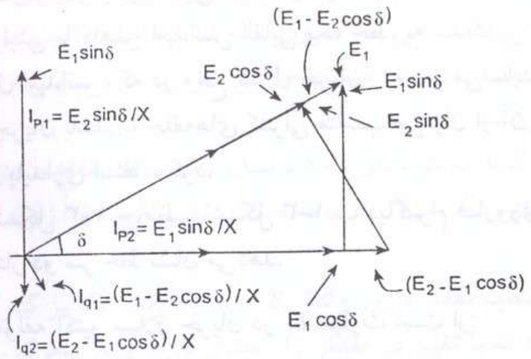
عبور جریان در خط می‌تواند با کنترل کردن E_L یا X یا δ کنترل شود. به منظور حصول درجه بالایی از کنترل بر روی جریان این خط، تجهیزات مورد نیاز که به صورت سری در خط قرار می‌گیرند نیاز به مقدار توان بسیار بالایی ندارند. به عنوان مثال، یک خط ۵۰۰ کیلوولت (۳۰۰ کیلوولت فاز به زمین) و ۲۰۰۰ آمپر، دارای توان عملیاتی ۱۸۰۰ مگاولت آمپر است و در یک طول ۲۰۰ کیلومتری افت ولتاژ آن در حدود ۶۰ کیلوولت خواهد بود. برای جبران سازی این افت به صورت سری و متغیر، مثلاً به اندازه ۲۵ درصد، تجهیزات سری مورد نیاز بایستی از مقدار توان نامی به اندازه $۰/۲۵ \times ۶۰\,kV \times ۲۰۰۰\,A = ۳۰\,MVA$ در هر فاز یا ۹۰ MVA برای سه فاز -که این مقدار تنها ۵ درصد مقدار توان عملیاتی ۱۸۰۰ مگاولت آمپری خط است- برخوردار باشند. ولتاژ اعمال شده بر روی تجهیز سری تنها ۱۵ کیلوولت در حالت بار کامل خواهد بود، اگرچه این تجهیز نیاز به عایق‌بندی ولتاژ بالا نسبت به زمین دارد (که این عامل آخر از نظر قیمت، فاکتور مهمی محسوب نمی‌شود). به این ترتیب، هر تجهیزی که به صورت سری متصل می‌شود، بایستی طوری طراحی شود که اضافه بارهای



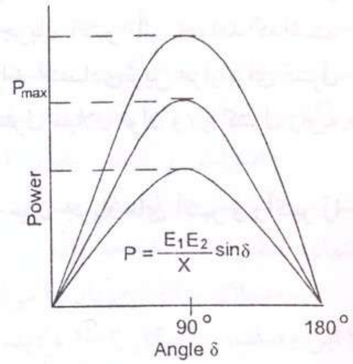
(الف)



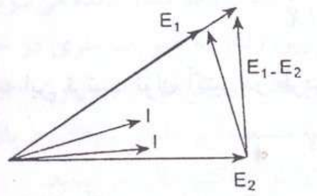
(ب)



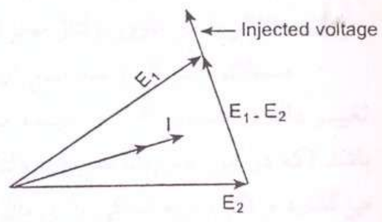
(ج)



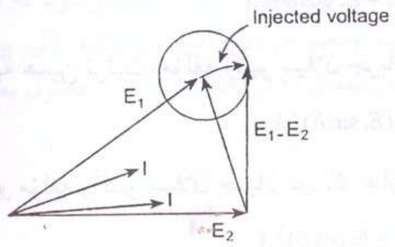
(د)



(ه)



(و)



(ز)

شکل ۳-۱ کنترل سیلان توان *ac* در یک خط انتقال: (الف) سیستم ساده دو ماشینه، (ب) سیلان جریان عمود بر ولتاژ دو طرف، (ج) دیاگرام فازوری سیلان توان آکتیو و رآکتیو، (د) منحنی های زاویه توان به ازای مقادیر مختلف X، (هـ) تنظیم مقدار ولتاژ عمدتاً توان رآکتیو را تغییرمی دهد، (و) تزریق ولتاژ عمود بر جریان خط عمدتاً توان آکتیو را تغییر می دهد، (ز) تزریق فازور ولتاژ به صورت سری با خط. (توجه کنید که در این شکل برای سهولت، فازورها معادل مقدار آن ها در نظر گرفته شده اند.)

- فروپاشی فرکانس
- فروپاشی ولتاژ
- تشدید زیر سنکرون

کتاب‌های برجسته‌ای در این زمینه‌ها وجود دارد. بنابراین بحث در این موارد در این کتاب به صورت خلاصه انجام خواهد شد، و محدود به مواردی می‌شود که در واقع برای شرح کنترل کننده‌های FACTS، بنیادی هستند. فن‌آوری FACTS به طور یقین می‌تواند برای غلبه بر محدودیت‌های "پایداری" مورد استفاده قرار گیرد، که از آن میان محدودیت‌های نهایی، حرارتی و عایقی هستند.

۱-٤ ملاحظات سیلان توان و پایداری دینامیکی در یک شبکه انتقال

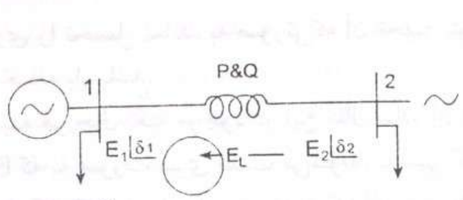
شکل ۳-۱ الف یک حالت ساده شده از سیلان توان در یک خط انتقال را نشان می‌دهد. مکان‌های ۱ و ۲ می‌توانند هر پست انتقالی باشند که بوسیله یک خط انتقال به یکدیگر متصل شده‌اند. پست‌ها می‌توانند دارای بار باشند؛ دارای تولید باشند؛ و یا صرفاً به صورت نقاط ارتباط بر روی سیستم باشند که برای سادگی آن‌ها را به صورت شینه‌های صلب نشان می‌دهند. E_1 و E_2 مقدار ولتاژ شینه‌ها و δ زاویه بین این دو مقدار است. فرض شده است که خط دارای امپدانس القایی X است و از مقدار مقاومت و رآکتانس خازنی خط نیز صرف‌نظر شده است.

همان‌طورکه در دیاگرام فازوری (شکل ۳-۱ ب) نشان داده شده، ولتاژ محرک تلفات در خط، اختلاف فازوری E_L است که بین دو ولتاژ فازوری E_1 و E_2 وجود دارد. مقدار جریان خط به صورت زیر به دست می‌آید:

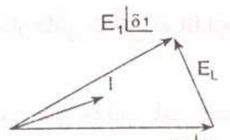
$$I = E_L/X$$ و به اندازه ۹۰ درجه از E_L عقب‌تر است.

مهم است بدانیم که برای یک خط نمونه، زاویه δ و ولتاژ محرک مربوطه یا افت ولتاژ در طول خط، در مقایسه با ولتاژ خط مقدار کوچکی است. با دانستن این که در یک خط انتقال در زمان بار کامل، افت ولتاژ می‌تواند احتمالاً حدود یک درصد در هر ۱۰ کیلومتر باشد و با فرض این‌که خط بین دو شینه صلب (پست‌ها) ۲۰۰ کیلومتر طول داشته باشد، افت ولتاژ در این خط برابر ۲۰ درصد در حالت بار کامل است و زاویه δ مقدار کوچکی دارد. اگر می‌خواستیم رقمی در این مورد فرض کنیم، برای مثال وقتی مقادیر E_1 و E_2 برابر باشند و مقدار X برابر ۰/۲ پریونیت باشد، زاویه δ تنها برابر ۰/۲ رادیان یا ۱۱/۵ درجه خواهد بود.

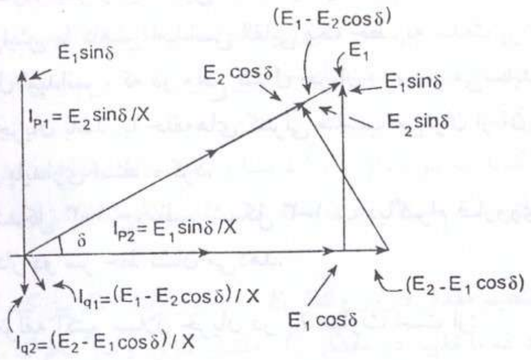
عبور جریان در خط می‌تواند با کنترل کردن E_L یا X یا δ کنترل شود. به منظور حصول درجه بالایی از کنترل بر روی جریان این خط، تجهیزات مورد نیاز که به صورت سری در خط قرار می‌گیرند نیاز به مقدار توان بسیار بالایی ندارند. به عنوان مثال، یک خط ۵۰۰ کیلوولت (۳۰۰ کیلوولت فاز به زمین) و ۲۰۰۰ آمپر، دارای توان عملیاتی ۱۸۰۰ مگاولت آمپر است و در یک طول ۲۰۰ کیلومتری افت ولتاژ آن در حدود ۶۰ کیلوولت خواهد بود. برای جبران سازی این افت به صورت سری و متغیر، مثلاً به اندازه ۲۵ درصد، تجهیزات سری مورد نیاز بایستی از مقدار توان نامی به اندازه $۰/۲۵ \times ۶۰\,kV \times ۲۰۰۰\,A = ۳۰\,MVA$ در هر فاز یا ۹۰ MVA برای سه فاز -که این مقدار تنها ۵ درصد مقدار توان عملیاتی ۱۸۰۰ مگاولت آمپری خط است- برخوردار باشند. ولتاژ اعمال شده بر روی تجهیز سری تنها ۱۵ کیلوولت در حالت بار کامل خواهد بود، اگرچه این تجهیز نیاز به عایق‌بندی ولتاژ بالا نسبت به زمین دارد (که این عامل آخر از نظر قیمت، فاکتور مهمی محسوب نمی‌شود). به این ترتیب، هر تجهیزی که به صورت سری متصل می‌شود، بایستی طوری طراحی شود که اضافه بارهای



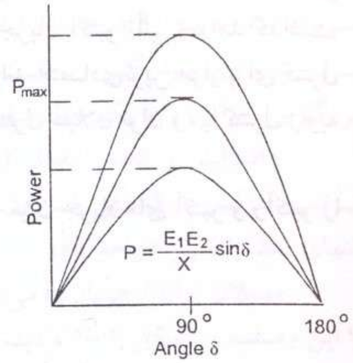
(الف)



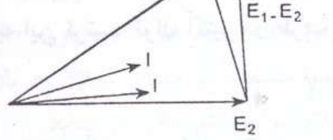
(ب)



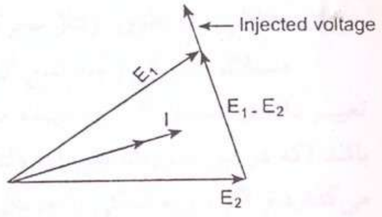
(ج)



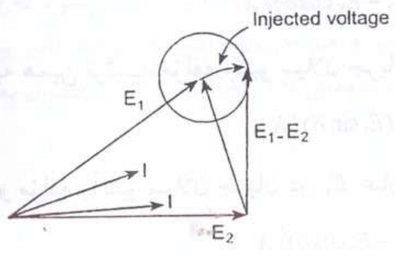
(د)



(ه)



(و)



(ز)

شکل ۳-۱ کنترل سیلان توان ac در یک خط انتقال: (الف) سیستم ساده دو ماشینه، (ب) سیلان جریان عمود بر ولتاژ دو طرف، (ج) دیاگرام فازوری سیلان توان آکتیو و رآکتیو، (د) منحنی های زاویه توان به ازای مقادیر مختلف X، (هـ) تنظیم مقدار ولتاژ عمدتاً توان رآکتیو را تغییرمی دهد، (و) تزریق ولتاژ عمود بر جریان خط عمدتاً توان آکتیو را تغییر می دهد، (ز) تزریق فازور ولتاژ به صورت سری با خط. (توجه کنید که در این شکل برای سهولت، فازورها معادل مقدار آن ها در نظر گرفته شده اند.)

اضطراری را تحمل نماید، به صورتی‌که آن تجهیز بتواند دارای مقدار نامی توانی به اندازه ۱۰۰ درصد ظرفیت اضافه بار باشد.

به هر حال نکته موجود در این مثال ساده آن است که به طور کلی مقدار نامی کنترل کننده‌های FACTS که به صورت سری نصب می‌شوند، بایستی کسری از توان عملیاتی خط باشد.

شکل ۳-۱ ب نشان می‌دهد که فازور سیلان جریان، عمود بر ولتاژ محرک است (۹۰ درجه تأخیر فاز). اگر زاویه بین دو ولتاژ شینه کوچک باشد، سیلان جریان عمدتاً نشان دهنده توان آکتیو است. افزایش یا کاهش امپدانس القایی یک خط، به شدت بر سیلان جریان آکتیو تأثیر خواهد گذاشت. لذا کنترل امپدانس، که در واقع کنترل جریان را میسر می‌نماید، می‌تواند اقتصادی‌ترین ابزار برای کنترل سیلان جریان باشد. با حلقه‌های کنترلی مناسب می‌توان از آن برای کنترل سیلان توان و/ یا کنترل زاویه به منظور پایداری استفاده کرد.

شکل ۳-۱ ج، نظیر شکل ۳-۱ ب دیاگرام فازوری رابطه میان جریان‌های آکتیو و رآکتیو را برپایه ولتاژ دو سر خط نشان می‌دهد.

مؤلفه آکتیو سیلان جریان در E_1 عبارت است از:

$$I_{p1} = (E_2 \sin\delta)/X$$

مؤلفه رآکتیو سیلان جریان در E_1 عبارت‌است از:

$$I_{q1} = (E_1 - E_2 \cos\delta)/X$$

به این ترتیب توان آکتیو در طرف E_1 :

$$P_1 = E_1(E_2 \sin\delta)/X$$

و توان رآکتیو در طرف E_1 :

$$Q_1 = E_1(E_1 - E_2 \cos\delta)/X \qquad (۱-۱)$$

به همین ترتیب، مؤلفه آکتیو سیلان جریان در E_2 عبارت‌است از:

$$I_{p2} = (E_1 \sin\delta)/X$$

و مؤلفه رآکتیو سیلان جریان در E_2 عبارت‌است از:

$$I_{q2} = (E_2 - E_1 \cos\delta)/X$$

لذا توان آکتیو در طرف E_2 :

$$P_2 = E_2(E_1 \sin\delta)/X$$

و توان رآکتیو در طرف E_2 :

$$Q_2 = E_2(E_2 - E_1 \cos\delta)/X \qquad (۱-۲)$$

طبیعتاً P_1 و P_2 یکی هستند:

$$P = E_1(E_2 \sin\delta)/X \qquad (۱-۳)$$

زیرا فرض شده است که تلفات توان آکتیو در خط وجود ندارد. بنابراین با تعیین مقدار X، مقادیر P، Q_1 و Q_2 به ترتیب براساس روابط ۱-۱، ۲-۱ و ۳-۱ تغییر خواهند کرد.

با فرض این‌که E_1 و E_2 مقادیر ولتاژ داخلی دو ماشین معادل هستند که دو سیستم را نمایندگی می‌کنند، و امپدانس X شامل امپدانس‌های داخلی دو ماشین معادل است، شکل ۳-۱ د یک نیمه موج سینوسی توان آکتیو را نشان می‌دهد که با افزایش زاویه δ به ۹۰ درجه، به پیک می‌رسد. سپس با افزایش زاویه، توان کاهش پیدا می‌کند و نهایتاً هنگامی که زاویه δ برابر ۱۸۰ درجه می‌شود مقدار توان به صفر می‌رسد. می‌توان به سادگی تشخیص داد که بدون کنترل سریع هر یک از پارامترهای E_1، E_2، $E_1 - E_2$، X و δ، خط انتقال فقط می‌تواند برای انتقال توان در سطحی به مراتب پایین‌تر از سطح مربوط به زاویه ۹۰ درجه مورد استفاده قرار گیرد. این امر ضرورت دارد، تا حاشیه مناسب مورد نیاز برای پایداری دینامیکی و حالت گذرا حفظ گردد و اطمینان حاصل شود که سیستم پس از خروج بزرگترین ژنراتور و یا یک خط، سقوط نمی‌کند.

افزایش و کاهش مقدار X، همان‌گونه که در شکل ۳-۱ د نشان داده شده، ارتفاع منحنی را به ترتیب افزایش و کاهش خواهد داد. برای یک سیلان توان داده شده، تغییر X متناظراً زاویه بین دو انتهای خط را تغییر خواهد داد.

سیلان توان / جریان را می‌توان با تنظیم مقدار فازور ولتاژ E_1 یا فازور ولتاژ E_2 نیز کنترل کرد. با این وصف، در شکل ۳-۱ ه دیده می‌شود که با تغییر در مقدار E_1، مقدار فازور ولتاژ محرک $E_1 - E_2$ زیاد تغییری نکرده، اما زاویهٔ فاز تغییر می‌کند. این به معنای آن است که تنظیم مقدار فازور ولتاژ E_1 و/یا E_2 تأثیر بسیار بیشتری بر سیلان توان رآکتیو دارد تا سیلان توان آکتیو؛ همان‌گونه که از دو فازور جریان، متناظر با دو فازور ولتاژ محرک $E_1 - E_2$، که در شکل ۳-۱ ه نشان داده شده، دیده می‌شود.

سیلان جریان و به تبع آن سیلان توان را می‌توان با تزریق ولتاژ به صورت سری در خط نیز تغییر داد. در شکل ۳-۱ و، دیده می‌شود که وقتی ولتاژ تزریق شده با جریان دارای زاویه ۹۰ درجه باشد (که در این صورت تقریباً با ولتاژ محرک هم فاز خواهد شد) مستقیماً بر مقدار سیلان جریان تأثیر می‌گذارد و اگر زاویه اندکی با جریان داشته باشد، در واقع بر سیلان توان آکتیو تأثیر می‌نماید.

به طور جایگزین، ولتاژی که به صورت سری به خط تزریق شده، می‌تواند به صورت فازوری باشد که مقدار و رابطه فازی آن با ولتاژ خط متغیر است. در شکل ۳-۱ ز دیده می‌شود که با تغییر مقدار و زاویه فازی ولتاژ تزریق شده، هم جریان آکتیو و هم جریان رآکتیو می‌توانند تأثیر بپذیرند. روش‌های تزریق ولتاژ، مهم‌ترین سهم را در کنترل کننده‌های FACTS دارند و در فصول بعدی به صورت مشروح‌تر مورد بحث قرار خواهند گرفت.

۱-۵ اهمیت نسبی پارامترهای قابل کنترل

با مراجعه به مباحث بالا و شکل ۳-۱، توجه به چند نکته اساسی در مورد امکانات کنترل سیلان توان، ارزشمند می‌باشند:

- کنترل امپدانس خط X (مثلاً با یک خازن سری کنترل شونده با تریستور) می‌تواند ابزار قدرتمندی برای کنترل جریان فراهم کند.
- هنگامی که زاویه فاز زیاد نباشد -که معمولاً نیز چنین است- کنترل X یا زاویه در واقع کنترل توان آکتیو را تأمین می‌کند.
- کنترل زاویه (مثلاً به کمک یک تنظیم کننده زاویه فاز) که به نوبه خود ولتاژ محرک را کنترل می‌کند، هنگامی که زاویه مقدار زیادی ندارد، ابزار قدرتمندی برای کنترل سیلان جریان و لذا سیلان توان آکتیو را فراهم می‌کند.

- تزریق یک ولتاژ به صورت سری در خط، و به صورت عمود بر جهت سیلان جریان، می‌تواند مقدار سیلان جریان را افزایش یا کاهش دهد. از آن‌جا که سیلان جریان نسبت به ولتاژ محرک به اندازه ۹۰ درجه تأخیر فاز دارد، این امر به معنای تزریق توان رآکتیو به صورت سری می‌باشد، (به عنوان مثال بوسیله جبران ساز سنکرون سری استاتیکی) و می‌تواند ابزار قدرتمندی برای کنترل جریان خط و لذا توان آکتیو در زمانی که زاویه فاز مقدار کمی دارد، فراهم نماید.
- تزریق ولتاژ به صورت سری در خط و با هر زاویه فازی نسبت به ولتاژ محرک، می‌تواند مقدار و فاز جریان خط را کنترل نماید. این امر به معنای آن است که تزریق یک فازور ولتاژ با زاویه فاز متغیر می‌تواند ابزار قدرتمندی برای کنترل دقیق سیلان توان آکتیو و رآکتیو فراهم کند. این کار نیاز به تزریق هر دو توان آکتیو و رآکتیو به صورت سری دارد.
- از آن‌جا که امپدانس پریونیت خط، معمولاً کسر کوچکی از ولتاژ خط است، مقدار مگاولت آمپر یک کنترل کننده سری اغلب کسر کوچکی از مگاولت آمپر توان عملیاتی خط خواهد بود.
- هرگاه زاویه فاز بزرگ نباشد، کنترل مقدار هر یک از ولتاژهای خط (مثلاً با یک تنظیم کننده ولتاژ تریستوری) می‌تواند ابزار بسیار مقرون به صرفه‌ای برای کنترل سیلان توان رآکتیو در شبکه باشد.
- ترکیبی از کنترل کننده امپدانس خط با کنترل کننده سری، و تنظیم ولتاژ با کنترل کننده موازی می‌تواند ابزار مقرون به صرفه‌ای برای کنترل سیلان هر دو توان آکتیو و رآکتیو بین دو سیستم باشد.

۱-۶ انواع اصلی کنترل کننده‌های FACTS

به طور کلی، کنترل کننده‌های FACTS را می‌توان به چهار دسته تقسیم کرد:

- کنترل کننده‌های سری
- کنترل کننده‌های موازی (شنت)
- کنترل کننده‌های ترکیبی سری- سری
- کنترل کننده‌های ترکیبی سری- موازی

شکل ۴-۱ الف نماد عمومی برای یک کنترل کننده FACTS را نشان می‌دهد که به صورت یک پیکان، تریستور در داخل یک جعبه است.

کنترل کننده‌های سری: [شکل ۴-۱ ب] کنترل کننده سری می‌تواند یک امپدانس متغیر باشد، مثل خازن، رآکتور، و غیره...، یا یک منبع متغیر فرکانس اصلی یا زیر سنکرون و فرکانس‌های هارمونیکی مبنی بر الکترونیک قدرت باشد، (یا ترکیبی از آن‌ها) که نیاز موردنظر را برآورده نماید. در اصل همه کنترل کننده‌های سری ولتاژ را به صورت سری به خط تزریق می‌کنند. حتی یک امپدانس متغیر ضرب در جریان داخل آن، نماینده یک ولتاژ سری است که در خط تزریق شده است. تا زمانی که ولتاژبر جریان خط عمود است، کنترل کننده سری فقط مقادیری توان رآکتیو تأمین یا مصرف می‌کند. هر اختلاف فاز دیگری، جابه‌جایی توان واقعی را نیز درگیر خواهد نمود.

کنترل کننده‌های موازی: [شکل ۴-۱ ج] مثل حالت کنترل کننده‌های سری، کنترل کننده موازی می‌تواند امپدانس متغیر، منبع متغیر یا ترکیبی از آن‌ها باشد. در اصل همه کنترل کننده‌های موازی در نقطه اتصال خود جریان به سیستم تزریق می‌کنند. حتی یک امپدانس متغیر که به ولتاژ خط متصل شده باشد موجب سیلان جریان متغیری شده و لذا نماینده تزریق جریان به داخل خط است. تا زمانی

که جریان تزریق شده و ولتاژ خط عمود باشند، کنترل کننده موازی فقط مقادیری توان رآکتیو تأمین یا مصرف می‌کند. هر اختلاف فاز دیگری، جابه جایی توان واقعی را نیز درگیر خواهد کرد.

کنترل کننده ترکیبی سری- سری: [شکل ۴-۱ د] این وسیله می‌تواند ترکیبی از کنترل کننده‌های سری جداگانه باشد که در چند خط انتقال یک سیستم نصب شده و به صورت هماهنگ شده کنترل می‌شوند. یا می‌تواند یک کنترل کننده یکپارچه شده باشد (شکل ۴-۱ د) که در آن، کنترل کننده‌های سری، جبران سازی رآکتیو سری را به طور مستقل برای هر خط انجام می‌دهند، اما توان واقعی را نیز از طریق رابط توان بین خطوط منتقل می‌نمایند. قابلیت انتقال توان در کنترل کننده یکپارچه شده سری-سری که به آن *کنترل کننده سیلان توان بین خطی* می‌گویند، تعادل سیلان هر دو توان واقعی و رآکتیو را در خطوط ممکن می‌سازد و به این طریق بهره‌برداری از سیستم انتقال را به حداکثر می‌رساند. توجه نمایید که اصطلاح "یکپارچه شده" در این جا به این معنی است که ترمینال‌های *dc* در کنورتورهای همه کنترل کننده‌ها، همه به یکدیگر متصل شده‌اند تا توان واقعی را منتقل نمایند.

کنترل کننده ترکیبی سری- موازی: [شکل ۴-۱ ه ، شکل ۴-۱ و] این وسیله می‌تواند ترکیبی از کنترل کننده‌های سری و موازی جداگانه باشد که به صورت هماهنگ شده کنترل می‌شوند (شکل ۴-۱ ه)، یا یک *کنترل کننده یکپارچه شده* سیلان توان با اجزاء موازی و سری (شکل ۴-۱ و). در اصل کنترل کننده‌های ترکیب شده سری و موازی، جریان را با بخش موازی کنترل کننده و ولتاژ سری شده با خط را در بخش سری کنترل کننده، به سیستم تزریق می‌کنند. هرگاه کنترل کننده‌های سری و موازی یکپارچه شوند، تبادل توان واقعی می‌تواند بین کنترل کننده‌های سری و موازی از طریق خط رابط توان انجام شود.

۱-۶-۱ اهمیت نسبی انواع مختلف کنترل کننده‌ها

دانستن این نکته اهمیت دارد که کنترل کننده متصل شده به صورت سری بر ولتاژ محرک تأثیر می‌گذارد، و لذا جریان و توان مستقیماً سیلان می‌یابند. بنابراین اگر منظور از به کار بردن آن، کنترل سیلان جریان / توان و میرا کردن نوسانات باشد، کنترل کننده سری برای یک اندازه معین مگاولت آمپر چندین مرتبه قدرتمندتر از کنترل کننده موازی است.

از طرف دیگر همان‌گونه که اشاره شد، کنترل کننده موازی، شبیه یک منبع جریان است، که جریان را از خط می‌کشد یا به آن تزریق می‌کند. بنابراین کنترل کننده موازی راه مناسبی است برای کنترل ولتاژ در نقطه اتصال و حول و حوش آن، که از طریق تزریق جریان رآکتیو (با تأخیر یا تقدم فاز) - به تنهایی یا با ترکیبی از جریان‌های آکتیو و رآکتیو به منظور کنترل مؤثرتر ولتاژ و میرا کردن نوسانات ولتاژ- عمل می‌نماید.

این امر به مفهوم گفتن این نکته نیست که کنترل کننده سری را نمی‌توان برای حفظ ولتاژ خط در یک محدوده مشخص به کار گرفت. به هر حال، نوسانات ولتاژ عمدتاً نتیجه افت ولتاژ در امپدانس‌های سری خط، ترانسفورماتورها و ژنراتورهاست. بنابراین، افزودن یا کاستن ولتاژ کنترل کننده FACTS به صورت سری (در فرکانس اصلی، زیر سنکرون یا ولتاژهای هارمونیک و ترکیبات آن‌ها) می‌تواند اقتصادی ترین راه برای اصلاح پروفیل ولتاژ باشد. با این وجود، کنترل کننده موازی بسیار بیشتر در حفظ پروفیل ولتاژ مورد نظر در یک شینه پست، مؤثر است. یک مزیت مهم کنترل کننده موازی این است که فارغ از خطوطی که به شینه متصل شده باشند، مستقیماً به گره شینه وصل شده و عمل می‌نماید.

راه‌حل کنترل‌کننده سری ممکن است -اما نه الزاماً- برای خطوط متعدد متصل شده به پست نیاز به کنترل‌کننده سری جداگانه داشته باشد؛ به خصوص اگر در کاربرد آن، خروجی اضطراری خط

۱-۱ شرح مختصر و تعاریف کنترل کننده‌های FACTS

منظور از این بخش ارائه تعریف و شرح مختصری از کنترل کننده‌های سری، موازی و ترکیبی است و توضیحات مشروح‌تر کنترل کننده‌ها در فصول مربوط به آن‌ها انجام خواهد شد.

قبل از ورود به شرح بسیار مختصر مجموعه‌ای از کنترل کننده‌های معین FACTS، شایان ذکر است که برای کنترل کننده‌های بر پایه کنورتور، دو نوع اساسی کنورتور با دستگاه‌های قطع دریچه وجود دارد. این‌ها همان کنورتورهای منبع ولتاژی و منبع جریانی هستند. همان‌طورکه در سمت چپ (شکل ۵-۱ الف) دیده می‌شود، کنورتور منبع ولتاژی به صورت نمادین به شکل جعبه‌ای نشان داده شده که در آن، دستگاه قطع دریچه با یک دیود معکوس، موازی شده و یک خازن *dc* به عنوان منبع ولتاژ دارد. همان‌طورکه در سمت راست (شکل ۵-۱ الف) دیده می‌شود، کنورتور منبع جریانی با یک جعبه نشان داده شده که در آن دستگاه قطع دریچه با یک دیود به صورت سری قرار گرفته و یک راکتور *dc* نیز به عنوان منبع جریان دارد.

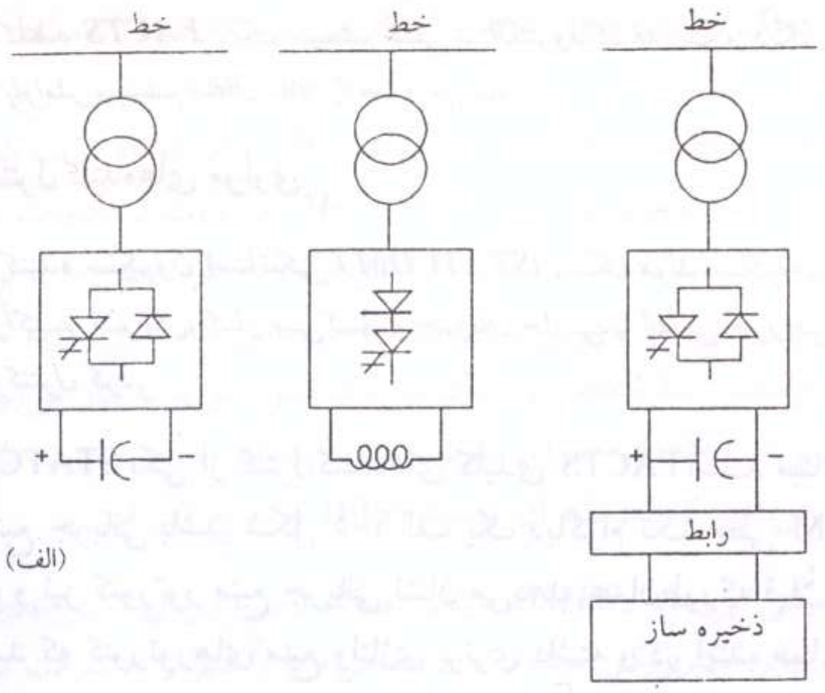
جزئیات مجموعه‌ای از کنورتورهای منبع ولتاژی که مناسب برای کاربردهای توان بالا هستند در فصل ۳ و کنورتورهای منبع جریانی در فصل ٤ مورد بحث قرارگرفته‌اند. فعلاً فقط ذکر این نکته کفایت می‌کند که در کنورتور منبع ولتاژی، ولتاژ یکسویه *dc* یک خازن *dc*، از طریق کلیدزنی مرحله‌ای دستگاه‌ها، در سمت *ac* و به عنوان ولتاژ *ac* ارائه می‌شود. با تعیین مکان صحیح کنورتور می‌توان ولتاژ خروجی *ac* را از نظر مقدار و نیز زاویه فازی با ولتاژ سیستم، تغییر داد. معکوس شدن توان موجب معکوس شدن جریان –و نه ولتاژ– می‌شود. هنگامی که ظرفیت ذخیره‌سازی خازن *dc* کوچک باشد، و منبع توان دیگری به آن متصل نشده باشد، کنورتور نمی‌تواند توان واقعی را چندان بیش از یک سیکل تأمین و یا جذب نماید. ولتاژ *ac* خروجی با ۹۰ درجه تقدم یا تأخیر فاز نسبت به جریان *ac* نگه داشته می‌شود، و کنورتور فقط برای تأمین یا جذب توان راکتیو مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در کنورتور منبع جریانی، جریان *dc*، از طریق کلیدزنی مرحله‌ای دستگاه‌ها، به عنوان جریان *ac* قابل تغییر در دامنه و نیز در هر اختلاف فازی نسبت به ولتاژ سیستم، به طرف *ac* ارائه می‌شود. معکوس شدن توان موجب معکوس شدن ولتاژ –و نه جریان– می‌شود. کنورتور منبع جریانی، به طور نمادین به صورت جعبه‌ای با دستگاه توان و یک القاگر *dc* به عنوان منبع جریان آن نشان داده می‌شود.

به نظر می‌رسد که از لحاظ هزینه کلی، کنورتورهای منبع ولتاژی مناسب تر هستند، و مبنای عرضه اغلب کنترل کننده‌های FACTS بر پایه کنورتور، خواهند بود.

واقعیت این است که کسانی که با FACTS سر و کار پیدا می‌کنند، بایستی به تعداد انبوهی از نام‌های مخفف عادت کنند. نام‌های مخفف بسیاری در حال حاضر وجود دارند و در آینده نیز توسط تولید کنندگان برای محصول خاص‌شان، و نیز توسط مؤلفین مقالات برای کنترل کننده‌های جدید یا مدل تغییر یافته‌ای از یک کنترل کننده موجود، ساخته خواهند شد. گروه کاری FACTS در کمیته کاری جامعه مهندسین قدرت (PES)، وابسته به انجمن مهندسین برق و الکترونیک (آمریکا) IEEE، اصطلاحات و تعاریف مربوط به FACTS و کنترل کننده‌های FACTS را تعریف نموده است. در کنار شرح مختصری از کنترل کننده‌های FACTS، اصطلاحات و تعاریف مناسب IEEE نیز به صورت حروف خوابیده، به عنوان مرجع، در این بخش ارائه شده است. به طور کلی این کتاب اصطلاحات و تعاریف IEEE را مورد استفاده قرار خواهد داد.

انعطاف پذیری انتقال نیرو. *توانایی سیستم انتقال الکتریکی در همساز شدن با تغییرات یا شرایط کاری، در حالی که حاشیه کافی برای حالت ماندگار و گذرا وجود داشته باشد.*



شکل ۵-۱ کنترل کننده های موازی بسته شده: (الف) جبران کننده سنکرون استاتیکی(STATCOM) مبتنی بر کنورتورهای منبع ولتاژی و منبع جریانی؛ (ب) STATCOM با ذخیره ساز، یعنی سیستم ذخیره انرژی باطری (BESS) ، ذخیره ساز انرژی مغناطیس ابررسانا و خازن dc بزرگ؛ (ج) جبران کننده توان راکتیو استاتیکی(SVC)، مولد توان راکتیو استاتیکی(SVG)، سیستم توان راکتیو استاتیکی(SVS)، راکتور قابل کنترل با تریستور(TCR)، خازن قابل کلید زنی با تریستور(TSC)، وراکتور قابل کلید زنی با تریستور(TSR)؛ (د) ترمز مقاومتی با کنترل تریستوری.

سیستم انعطاف پذیر انتقال AC (FACTS). *سیستم‌های انتقال نیروی جریان متناوب، با ترکیب کنترل کننده‌های مبتنی بر الکترونیک قدرت وکنترل کننده‌های استاتیکی دیگر برای افزایش قابلیت کنترل و افزایش قابلیت انتقال توان.*

شایسته است که به کلمات "کنترل کننده‌های استاتیکی دیگر" در این تعریف FACTS توجه شود. این ترکیب گویای آن است که کنترل کننده‌های استاتیکی دیگری که بر الکترونیک قدرت مبتنی نیستند، نیز وجود دارند.

*کنترل کننده **FACTS**. یک سیستم مبتنی بر الکترونیک قدرت و دیگر تجهیزات استاتیکی که کنترل یک یا چند پارامتر سیستم انتقال ac را مسیر می‌سازد.*

۱-۷-۱ کنترل‌کننده‌های موازی

***جبران کننده سنکرون استاتیکی (STATCOM)** : یک مولد سنکرون استاتیکی که به عنوان جبران ساز توان راکتیو موازی، کار می‌کند و جریان خازنی یا القایی خروجی آن را می‌توان مستقل از ولتاژ ac سیستم کنترل کرد.*

STATCOM یکی از کنترل‌کننده‌های کلیدی FACTS است. مبنای آن می‌تواند بر کنورتور منبع ولتاژی یا منبع جریانی باشد. شکل ۵-۱ الف یک دیاگرام تک خطی STATCOM را براساس کنورتور منبع ولتاژی و نیز کنورتور منبع جریانی نشان می‌دهد. همان‌طورکه قبلاً اشاره شد، از لحاظ هزینه کلی، به نظر می‌رسد که کنورتورهای منبع ولتاژی برتری داشته و در آینده مبنای عرضه اغلب کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر کنورتور خواهند بود.

در کنورتورهای منبع ولتاژی، ولتاژ *ac* خروجی، طوری کنترل می‌شود که درست برای سیلان جریان راکتیو مورد نیاز کفایت نماید. برای هر ولتاژ شینه *ac*، ولتاژ خازن *dc* به صورت خودکار به اندازه مورد نیاز، جهت عمل کردن به عنوان منبع ولتاژ کنورتور، تنظیم می‌شود. می‌توان STATCOM را به صورتی طراحی کرد که به عنوان یک فیلتر فعال، هارمونیک‌های سیستم را نیز جذب نماید.

STATCOM به صورتی که توسط IEEE در بالا تعریف شده، یک زیر مجموعه از گستره کنترل کننده‌های موازی است که قابلیت در اختیار داشتن یک منبع توان آکتیو یا ذخیره را در طرف *dc*، به صورتی که جریان تزریق شده بتواند شامل توان آکتیو باشد، داراست. چنین کنترل کننده‌ای به صورت زیر تعریف می‌شود.

***مولد سنکرون استاتیکی (SSG)** : یک کنورتور استاتیکی خود-تغییر برای کلیدزنی توان، که از یک منبع مناسب انرژی الکتریکی تغذیه می‌شود و برای تولید مجموعه‌ای از ولتاژهای خروجی قابل تنظیم به کار می‌رود و می‌تواند برای تبادل توان های حقیقی و راکتیوی که مستقلاً قابل کنترل هستند، با یک سیستم قدرت ac جفت شود.*

روشن است که SSG (مولد سنکرون استاتیکی) ترکیبی از STATCOM و هر منبع انرژی، برای تأمین یا جذب توان است. اصطلاح SSG، نامی عمومی برای دربر گرفتن هر منبع انرژی ازجمله باطری، چرخ طیار، مغناطیس ابررسانا، خازن ذخیره *dc* بزرگ، یک متناوب‌ساز[1]/یکسوساز دیگر و غیره، می‌باشد. معمولاً یک واسطه الکترونیکی که به عنوان برش‌گر[2] شناخته می‌شود، بین منبع انرژی و کنورتور مورد نیاز است. در کنورتور نوع منبع ولتاژی، منبع انرژی در خدمت تأمین متناسب بار خازن از طریق واسطه الکترونیکی است و ولتاژ مورد نیاز خازن را حفظ می‌کند.

در محدوده تعریف SSG، سیستم ذخیره انرژی باطری هم وجود دارد که تعریف آن توسط IEEE به شرح زیر است:

***سیستم ذخیره انرژی باطری (BESS)** : یک سیستم ذخیره انرژی با پایه شیمیایی، با استفاده از کنورتورهای منبع ولتاژی موازی شده، که قادر به تنظیم سریع مقدار توان جذب شده یا تأمین شده برای یک سیستم ac را دارد.*

---

[1] Inverter
[2] Chopper

شکل ۵-۱ ب یک دیاگرام تک خطی ساده را نشان می‌دهد که در آن وسائط ذخیره سازی به STATCOM متصل شده است. برای کاربردهای انتقال، واحد ذخیره سازی نوع BESS تمایل به کوچک‌تر شدن دارد (در حدود چند ده مگاوات ساعت)، و اگر توان کوتاه مدت کنورتور به اندازه کافی بزرگ باشد، می‌تواند مگاوات‌هایی با نسبت *MW/MWH* (مگاوات برمگاوات ساعت) بالاتری برای حالت پایداری گذرا تأمین نماید. درضمن، کنورتور می‌تواند به طور هم زمان، توان راکتیوی در محدوده ظرفیت مگاولت آمپری خود را تحویل یا جذب نماید. زمانی که کنورتور به تأمین توان آکتیو برای سیستم مشغول نیست، به منظور شارژ باطری با یک سرعت قابل قبول، به کار می‌رود.

زیر مجموعه دیگری از SSG که برای کاربردهای انتقال مناسب است، ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی ابررسانا (SMES) می‌باشد که تعریف آن توسط IEEE به شرح زیر است:

***ذخیره ساز انرژی مغناطیسی ابررسانا (SMES)** : یک دستگاه ذخیره انرژی الکترومغناطیسی به صورت ابررسانا که شامل کنورتورهای الکترونیکی است و توان حقیقی و/یا راکتیو را به سرعت تزریق و/یا جذب می‌کند، یا سیلان توان را در سیستم ac به صورت دینامیکی کنترل می‌کند.*

از آن‌جا که جریان *dc* در مغناطیس به سرعت تغییر نمی‌کند، توان ورودی یا خروجی مغناطیس، با کنترل ولتاژ در طول مغناطیس، با استفاده از واسطه الکترونیکی مناسبی جهت اتصال به STATCOM، تغییر می‌کند.

***جبران ساز توان راکتیو استاتیکی (SVC)** : یک مولد یا جذب کننده استاتیکی توان راکتیو که به صورت موازی متصل شده و خروجی آن برای مبادله جریان خازنی یا القایی تنظیم می‌شود، به طوری که پارامترهای مشخصی در سیستم قدرت (نوعاً ولتاژ شینه) را حفظ یا کنترل نماید.*

این عبارت اصطلاحی عمومی برای یک راکتور قابل کلیدزنی با تریستور یا قابل کنترل با تریستور، و/یا خازن (یا ترکیب خازن و راکتور) قابل کلیدزنی با تریستور است(شکل ۵-۱ ج). عملکرد SVC بر مبنای تریستورهای فاقد قابلیت قطع دریچه است، و شامل تجهیزات جداگانه‌ای برای تقدم یا تأخر فاز توان راکتیو است. این تجهیزات عبارتند از راکتور: با قابلیت کلیدزنی یا کنترل تریستوری برای جذب توان راکتیو، و خازن: با قابلیت کلیدزنی تریستوری برای تأمین بار راکتیو. برخی SVC را گزینه ارزان قیمت تر STATCOM می‌دانند، هرچند اگر ملاک مقایسه براساس عملکرد مورد نیاز باشد، و نه فقط مقدار *MVA*، وضعیت به این صورت نخواهد بود.

***راکتور قابل کنترل با تریستور (TCR)** : یک القاگر قابل کنترل با تریستور که به صورت موازی بسته شده و راکتانس مؤثر آن، با کنترل هدایت جزیی دریچه تریستور، به صورت پیوسته تغییر می‌کند.*

TCR زیرمجموعه‌ای از SVC است که در آن زمان هدایت و به این ترتیب جریان در یک راکتور موازی، با یک کلید *ac* مبتنی بر تریستور که زاویه آتش آن قابل کنترل است، کنترل می‌شود (شکل ۵-۱ ج).

***راکتور قابل کلیدزنی با تریستور (TSR)** : یک القاگر قابل کلیدزنی با تریستور که به صورت موازی بسته شده و مقدار راکتانس مؤثر آن، با عملکرد دریچه تریستور در حالت‌های هدایت صفر یا کامل، به صورت پله‌ای تغییر می‌کند.*

TSR (شکل ۵-۱ ج) یک زیر مجموعه دیگر از SVC است. TSR از چندین القاگر تشکیل شده است که به صورت موازی بسته شده‌اند، و با کلیدهای تریستوری فاقد کنترل زاویه آتش به مدار وارد یا از آن خارج می‌شوند تا پله‌های تغییرات مورد نیاز در توان راکتیو اخذ شده از سیستم به دست آید. استفاده از

کلیدهای تریستوری فاقد کنترل زاویه آتش منجر به هزینه و تلفات کمتر می‌شود، اما کنترل به صورت پیوسته نمی‌باشد.

خازن قابل کلیدزنی با تریستور (TSC) : *یک خازن قابل کلیدزنی با تریستور که به صورت موازی بسته شده و رآکتانس مؤثر آن با عملکرد دریچه تریستور در حالت‌های هدایت صفر یا کامل، به صورت پله‌ای تغییر می‌کند.*

TSC (شکل ۵-۱ ج) هم یک زیر مجموعه SVC است، که در آن کلیدهای *ac* مبتنی بر تریستور (بدون کنترل زاویه آتش) برای وارد کردن و خارج کردن واحدهای خازن موازی به کار می‌روند تا پله‌های تغییرات مورد نیاز در توان رآکتیو تحویل شده به سیستم به دست آید. بر خلاف رآکتورهای موازی، خازن‌های موازی را نمی‌توان با کنترل زاویه آتش متغیر، به صورت پیوسته کلیدزنی کرد.

تعاریف سایر کنترل کننده‌های گسترده سری در IEEE به شرح زیر است:

مولد یا جذب کننده توان رآکتیو (SVG) : *یک دستگاه یا سیستم الکتریکی – استاتیکی که قادر به کشیدن جریان القایی و/یا خازنی کنترل شده از سیستم قدرت الکتریکی است و به این ترتیب توان رآکتیو تولید یا جذب می‌کند. این دستگاه عموماً متشکل از رآکتور(های) قابل کنترل با تریستور و/یا خازن‌های قابل کلیدزنی با تریستور که به صورت موازی متصل شده‌اند، می‌باشد.*

SVG، با همه گستردگی تعریف IEEE، به سادگی یک منبع توان رآکتیو (Var) است که با کنترل‌های مناسب می‌تواند به هر نوع جبران ساز موازی توان رآکتیو مشخص یا چند منظوره، تبدیل شود. لذا هم SVC و هم STATCOM مولدهای استاتیکی توان رآکتیو محسوب می‌شوند که مجهز به حلقه‌های کنترل برای تغییر Var خروجی هستند، تا اهداف مشخص جبران سازی تأمین گردد.

سیستم توان رآکتیو (Var) استاتیکی (SVS) : *ترکیبی از جبران سازهای توان رآکتیو با کلیدزنی‌های مختلف استاتیکی و مکانیکی، که خروجی آن ها با یکدیگر هماهنگ شده است.*

ترمز مقاومتی با کنترل تریستوری (TCBR) : *یک مقاومت قابل کلیدزنی با تریستور که به صورت موازی بسته شده، و به منظور کمک به متعادل کردن یک سیستم قدرت یا حداقل کردن شتاب گیری توان ژنراتور در زمان اخلال، کنترل می‌شود.*

TCBR عبارت است از کلیدزنی سیکل به سیکل یک مقاومت (معمولاً یک مقاومت خطی) به وسیله یک کلید*ac* مبتنی برتریستورکه دارای کنترل زاویه آتش است (شکل ۵-۱ د). برای هزینه کمتر، TCBR را می‌توان با تریستور کلیدزنی کرد؛ یعنی بدون کنترل زاویه آتش. به هر حال با کنترل آتش که می‌تواند به صورت نیم سیکل به نیم سیکل باشد، می‌توان به صورت انتخابی نوسانات کم فرکانس را میرا نمود.

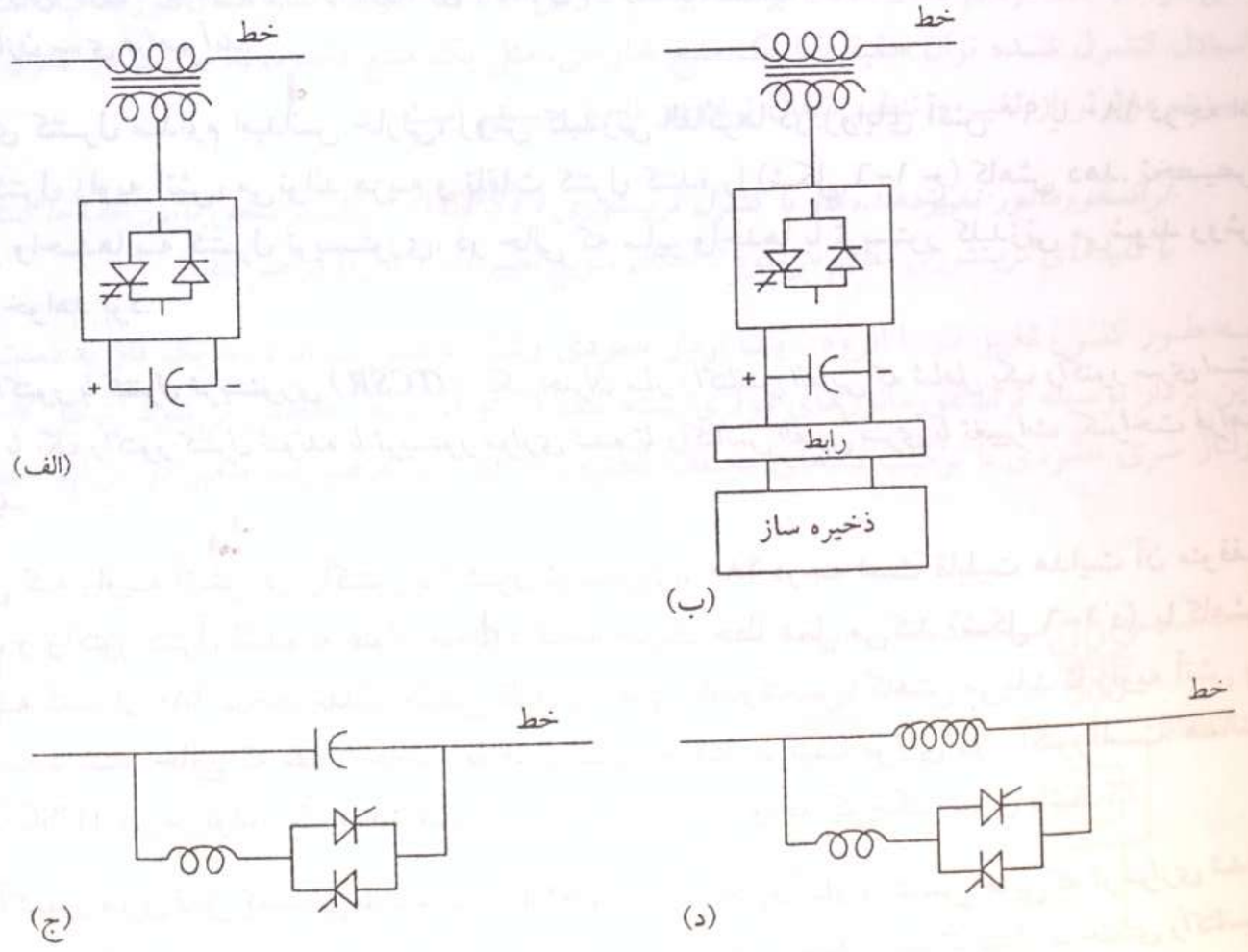
۱-۷-۲ کنترل‌کننده‌های متصل شده به صورت سری

جبران ساز سنکرون استاتیکی به صورت سری (SSSC) : *یک مولد سنکرون استاتیکی که بدون منبع انرژی الکتریکی خارجی، به عنوان جبران ساز سری کار می‌کند و ولتاژ خروجی آن هم دارای ۹۰ درجه اختلاف فاز با جریان خط بوده و هم قابل کنترل به طور مستقل از جریان خط است و به منظور افزایش یا کاهش کل افت ولتاژ رآکتیو در طول خط و در نتیجه کنترل توان الکتریکی انتقال یافته، به کار می‌رود. SSSC می‌تواند شامل ذخیره انرژی در حد مقدار گذرا یا وسایل جذب کننده انرژی باشد تا عملکرد دینامیکی سیستم قدرت را با جبران سازی توان حقیقی اضافی به صورت موقت افزایش دهد و کل افت ولتاژ حقیقی (افت ولتاژ مقاومتی) را در طول خط به صورت لحظه‌ای افزایش یا کاهش دهد.*

SSSC یکی از مهم‌ترین کنترل کننده‌های FACTS است. مشابه STATCOM است؛ با این تفاوت که ولتاژ *ac* خروجی به صورت سری با خط است. می‌تواند بر پایه کنورتور منبع ولتاژی(شکل ۶-۱ الف) یا کنورتور منبع جریانی باشد. معمولاً ولتاژ تزریق شده به صورت سری، در مقایسه با ولتاژ خط بسیار کوچک است، و عایق‌بندی فاز به زمین کاملاً زیاد است. با عایق‌بندی مناسب بین اولیه و ثانویه ترانسفورماتور، تجهیزات کنورتور در پتانسیل زمین قرار می‌گیرند، مگر این‌که کل تجهیزات کنورتور بر روی سکویی که کاملاً از زمین عایق شده باشد، قرار گیرد. نسبت سیم پیچ ترانسفورماتور، متناسب با اقتصادی ترین طراحی کنورتور، انتخاب می‌شود. بدون منبع انرژی اضافی، SSSC فقط می‌تواند ولتاژ متغیری را که ۹۰ درجه با جریان تقدم یا تأخر فاز دارد، به خط تزریق کند. اولیه ترانسفورماتور و لذا ثانویه آن به همراه کنورتور بایستی جریان کامل خط را به همراه جریان خطا عبور دهند، مگر این‌که کنورتور در جریان خطاهای سنگین خط به طور موقت میان‌بر زده شود.

منابعی مثل باطری ذخیره یا ذخیره مغناطیسی ابررسانا هم می‌توانند به کنترل کننده سری (شکل ۶-۱ ب) متصل شوند تا یک بردار ولتاژ با زاویه متغیر را به صورت سری به خط تزریق کنند.

کنترل کننده سیلان توان میان خط (IPFC) : *IPFC کنترل کننده جدیدی است که در همین اواخر معرفی شده است، لذا IEEE هنوز تعریفی برای آن ارائه نکرده است. یک تعریف احتمالی عبارت خواهد بود از: ترکیبی از دو یا چند جبران ساز سنکرون استاتیکی سری که با واسطه یک رابط dc با هم جفت شده‌اند تا سیلان یکسویه توان حقیقی را بین ترمینال‌های SSSC ها تسهیل کنند؛ و کنترل آن ها به منظور جبران سازی مستقل توان رآکتیو است تا سیلان توان حقیقی در هر خط، تنظیم شده و توزیع مطلوب*



شکل ۶-۱ (الف) جبران کننده سنکرون سری استاتیکی(SSSC)؛ (ب) SSSC با ذخیره ساز؛ (ج) خازن سری قابل کنترل با تریستور(TCSC) وخازن سری قابل کلید زنی با تریستور(TSSC)؛ (د) رآکتور سری قابل کنترل با تریستور(TCSR) و رآکتور سری قابل کلیدزنی با تریستور(TSSR).

سیلان توان راکتیو در میان خطوط حفظ شود. ساختار IPFC هم می‌تواند شامل یک STATCOM باشد که با رابط dc مشترک IPFC ها جفت شده، تا جبران سازی توان راکتیو موازی را انجام دهد و کمبود کل توان حقیقی مجموعه SSSC ها را تأمین یا جذب نماید.

خازن سری با کنترل تریستوری (TCSC) *: یک جبران ساز راکتانس خازنی، که شامل یک بانک خازن سری است و با یک راکتور کنترل شونده با تریستور موازی شده تا راکتانس خازنی سری با تغییرات یکنواخت فراهم آید.*

TCSC (شکل ۶-۱ ج)، بر مبنای تریستورهایی بدون قابلیت قطع دریچه است. به عنوان جایگزینی برای SSSC قبلی محسوب می‌شود و مثل یک SSSC از ادوات مهم کنترل کننده FACTS است. یک راکتور متغیر مثل یک راکتور قابل کنترل با تریستور (TCR) به دو طرف یک خازن سری متصل می‌شود. زمانی که زاویه آتش TCR، ۱۸۰ درجه است، راکتور غیرهادی می‌شود و خازن سری امپدانس عادی خود را دارد. با شروع کاهش زاویه آتش از ۱۸۰ درجه به کمتر از ۱۸۰ درجه، امپدانس خازنی افزایش می‌یابد. در طرف دیگر، هنگامی که زاویه آتش TCR ۹۰ درجه است، راکتور به طور کامل هادی می‌شود و امپدانس کلی حالت القایی پیدا می‌کند؛ زیرا امپدانس راکتور طوری طراحی شده است که بسیار کمتر از امپدانس خازن سری باشد. در زاویه آتش ۹۰ درجه، TCSC به محدود ساختن جریان خطا کمک می‌کند. TCSC می‌تواند یک واحد منفرد بزرگ باشد، و یا از چندین خازن کوچکتر هم اندازه یا متفاوت جهت رسیدن به عملکرد بهتر تشکیل شده باشد.

خازن سری قابل کلیدزنی با تریستور (TSSC) *: یک جبران ساز راکتانس خازنی که شامل یک بانک خازنی سری است و با یک راکتور قابل کلیدزنی با تریستور موازی شده تا کنترل مرحله‌ای برای راکتانس خازن سری فراهم آید.*

به جای کنترل مداوم امپدانس خازنی، روش کلیدزنی القاگرها در زوایای آتش ۹۰ یا ۱۸۰ درجه اما بدون کنترل زاویه آتش، می‌تواند هزینه و تلفات کنترل کننده را (شکل ۶-۱ ج) کاهش دهد. تخصیص یکی از واحدها به کنترل تریستوری، در حالی که سایر واحدها با تریستور کلیدزنی می‌شوند روش معقولی خواهد بود.

راکتور با کنترل تریستوری (TCSR) *: یک جبران ساز راکتانس القایی که شامل یک راکتور سری است و با یک راکتور کنترل شونده با تریستور موازی شده تا راکتانس القایی سری با تغییرات یکنواخت فراهم آید.*

هنگامی که زاویه آتش در راکتور با کنترل تریستوری، ۱۸۰ درجه است قابلیت هدایت آن متوقف می‌شود، و راکتور کنترل نشده به عنوان محدود کننده جریان خطا عمل می‌کند (شکل ۶-۱ د). با کاهش زاویه به کمتر از ۱۸۰ درجه، مقدار خالص ظرفیت القایی (اندوکتانس) کاهش می‌یابد تا زاویه آتش به ۹۰ درجه برسد، جایی که مقدار خالص ظرفیت القایی حاصل ترکیب موازی دو راکتور است. همانند TCSR، TCSC نیز می‌تواند یک واحد منفرد بزرگ و یا چندین واحد کوچکتر سری باشد.

راکتور سری قابل کلیدزنی با تریستور (TSSR) *: یک جبران ساز راکتانس القایی که از موازی شدن یک راکتور سری با راکتور قابل کنترل و کلیدزنی با تریستور تشکیل شده، تا کنترل مرحله‌ای راکتانس القایی سری فراهم آید.*

این وسیله مکمل TCSR است، اما با کلیدهای تریستوری به طور کامل باز یا بسته‌ای (بدون کنترل زاویه آتش) که جهت دست یافتن به ترکیبی مرحله‌ای از اندوکتانس سری به کار می‌روند (شکل ۶-۱ د).

۳-۷-۱ کنترل کننده‌های ترکیبی موازی و سری

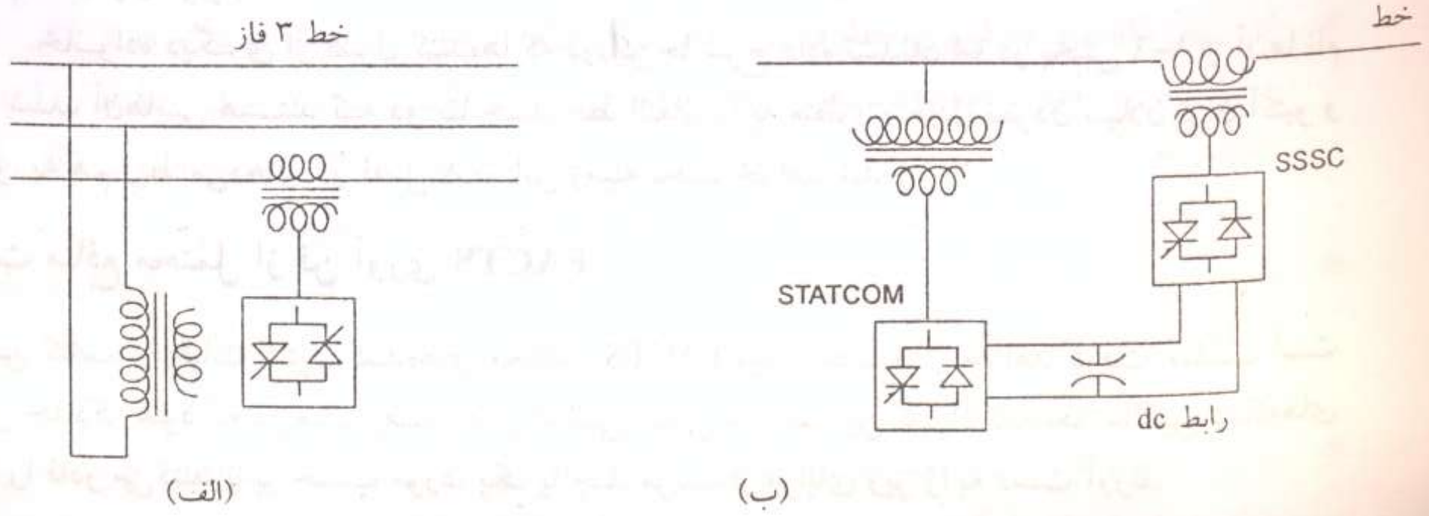
کنترل کننده یکپارچه سیلان توان (UPFC) *: ترکیبی از جبران ساز سنکرون استاتیکی (STATCOM) و جبران ساز سری استاتیکی (SSSC) که از طریق یک رابط dc به هم جفت شده‌اند، تا اجازه سیلان دو سویه توان حقیقی را بین ترمینال‌های خروجی سری SSSC و ترمینال‌های خروجی موازی STATCOM بدهند؛ و کنترل آن ها به منظور جبران سازی سری هم‌زمان توان حقیقی و راکتیو خط، بدون منبع خارجی انرژی الکتریکی، صورت می‌گیرد. UPFC، با تزریق ولتاژ سری بدون محدودیت زاویه، قادر به کنترل هم‌زمان یا انتخابی ولتاژ خط انتقال، امپدانس، زاویه، و یا به طور جایگزین کنترل سیلان توان حقیقی و راکتیو در خط می‌باشد. هم‌چنین UPFC می‌تواند جبران سازی توان راکتیو را به صورت موازی با قابلیت کنترل مستقل فراهم نماید.*

در UPFC (شکل ۷-۱ ب)، که ترکیبی از STATCOM (شکل ۵-۱ الف) و یک SSSC (شکل ۶-۱ الف) است، توان آکتیو برای واحد سری (SSSC) از طریق STATCOM موازی کسب می‌شود؛ واحد اخیر با کنترل توان راکتیو خط، برای کنترل ولتاژ خط نیز به کار می‌رود. این یک کنترل کننده کامل برای کنترل توان آکتیو و راکتیو در خط و نیز کنترل ولتاژ خط است.

ذخیره اضافی مثل مغناطیس ابررسانا که از طریق یک واسطه الکترونیکی به رابط dc متصل می‌شود، باعث فراهم شدن امکان توسعه بیشتر کارایی UPFC خواهد شد. همان‌طورکه قبلاً اشاره شد، تبادل کنترل شده توان حقیقی با یک منبع خارجی، مثل یک منبع ذخیره، به مراتب در کنترل دینامیک سیستم مؤثرتر از تغییر و تنظیم انتقال توان در داخل سیستم است.

ترانسفورماتور تغییردهنده فاز با کنترل تریستوری (TCPST) *: یک ترانسفورماتور جابه‌جا کننده فاز که با کلیدهای تریستوری تنظیم می‌شود تا امکان سریع تغییر زاویه فاز را فراهم کند.*

به طور کلی، تغییر فاز با افزودن یک بردار عمودی ولتاژ، به صورت سری با یک فاز به دست می‌آید. این بردار بوسیله ترانسفورماتورهای موازی بسته شده از دو فاز دیگر حاصل می‌شود (شکل ۷-۱ الف). ولتاژ سری عمودی با ترکیب بندهای مختلف الکترونیک قدرت، به صورت متغیر در می‌آید. تصوری از



شکل ۷-۱ (الف) ترانسفورماتور جابه جاکننده فاز قابل کنترل با تریستور(TCPST) یا تنظیم کننده زاویه فاز قابل کنترل با تریستور(TCPR)؛ (ب)کنترل کننده یکپارچه سیلان توان(UPFC).

یک مدار که بتواند ولتاژ را معکوس نماید، می‌تواند تغییر فاز را در هر جهتی انجام دهد. این کنترل کننده را به نام *تنظیم کننده زاویه فاز قابل کنترل با تریستور (TCPAR)* هم می‌نامند.

کنترل کننده میان فاز توان (IPC) : *یک کنترل کننده توان آکتیو و رآکتیو که به صورت سری متصل شده و در هر فاز شامل شاخه‌های القایی و خازنی است که هر کدام در معرض ولتاژهایی قرار دارند که به صورت جداگانه تغییر فاز داده شده‌اند. با استفاده از کلیدهای مکانیکی یا الکترونیکی، توان آکتیو و رآکتیو را می‌توان به صورت مستقل و با تنظیم جابه جایی فاز و/یا امپدانس شاخه، تنظیم کرد. در حالت خاص که امپدانس خازنی و القایی یک جفت توأم را تشکیل می‌دهند، هر ترمینال IPC یک منبع جریان تأثیرپذیر است که بستگی به ولتاژ ترمینال دیگر دارد.*

این یک مفهوم گسترده از کنترل کننده‌های سری است، که می‌تواند برای کنترل روی توان آکتیو و رآکتیو طراحی شود.

۱-۷-٤ کنترل کننده‌های دیگر

محدود کننده ولتاژ با کنترل تریستوری (TCVL) : *یک واریستور اکسید فلزی (MOV) که به منظور محدود سازی ولتاژ روی ترمینال‌های آن در زمان شرایط گذرا استفاده می‌شود.*

کلید تریستوری را می‌توان به صورت سری با یک برق‌گیر بدون رخنه قرارداد؛ یا (همان‌طورکه در شکل ۸-۱ الف نشان داده شده) بخشی از (حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد) برق‌گیر بدون رخنه را می‌توان با کلید تریستوری میان‌بر کرد تا سطح محدود کنندگی ولتاژ، به صورت دینامیکی کاهش یابد. به طور کلی، MOV بایستی به طرز چشمگیری قدرتمندتر از برق‌گیر بدون رخنه باشد، تا TCVL بتواند اضافه ولتاژهای دینامیکی را که در صورت سرکوب نشدن می‌توانند تا چند ده سیکل طول بکشند، موقوف کند.

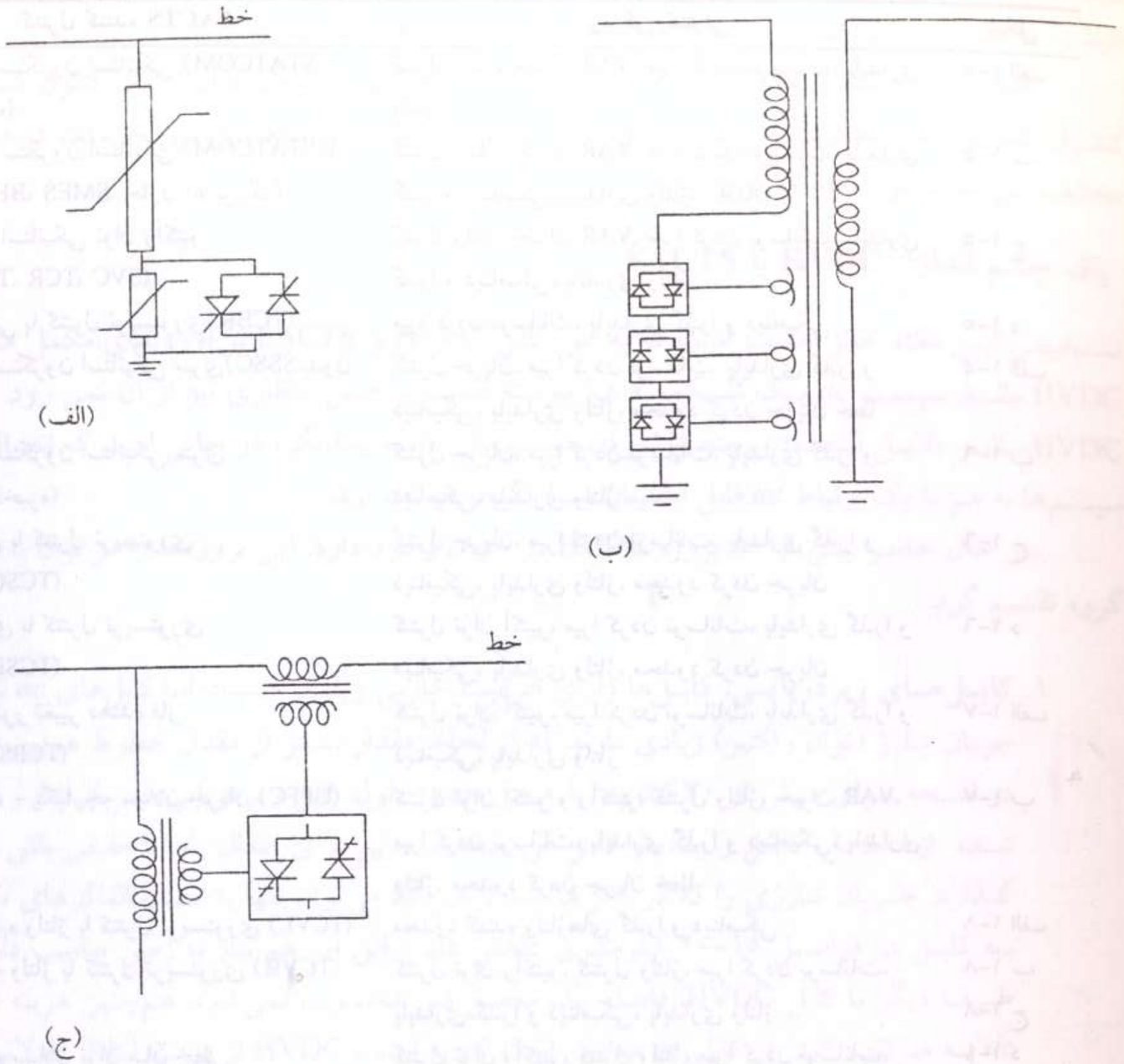
تنظیم کننده ولتاژ با کنترل تریستوری (TCVR) : *یک ترانسفورماتور قابل کنترل با تریستور که می‌تواند ولتاژ هم فاز متغیر، با کنترل مداوم را تأمین نماید.*

بنابر دلایل عملی، این وسیله می‌تواند یک ترانسفورماتور معمولی با تپ چنجر قابل کنترل با تریستور (شکل ۸-۱ ب) باشد، یا ترانسفورماتوری معمولی با یک کنورتور ولتاژ *ac* به *ac* که قابل کنترل با تریستور است و برای تزریق ولتاژ *ac* از هر فاز به صورت سری به همان خط استفاده می‌شود (شکل ۸-۱ ج). چنین کنترل کننده نسبتاً کم قیمتی می‌تواند برای کنترل سیلان توان رآکتیو بین دو سیستم *ac* بسیار مؤثر باشد.

خانواده دیگری از کنترل کننده‌ها که در این‌جا شرح داده نشدند، اما در بخش ٦-۱ از آن‌ها نام برده شد، آن‌هایی هستند که دو یا چند خط انتقال را به منظور متعادل نمودن سیلان توان آکتیو و رآکتیو، به هم ربط می‌دهند. در فصل ۸ در این زمینه بحث خواهد شد.

۱-۸ لیست منافع محتمل از فن آوری FACTS

در این کتاب، جزئیات کنترل کننده‌های مختلف FACTS مورد بحث قرار خواهد گرفت. مناسب است همین جا ذکر شود که در میان رهنمودهای اساسی ایمنی سیستم، این کنترل کننده‌ها، مالکین شبکه‌های انتقال را قادر می‌کنند تا بر حسب مورد، یک یا چند مزیت از مزایای زیر را به دست آورند:



شکل ۸-۱ انواع کنترل کننده های دیگر: (الف) محدود کننده ولتاژ قابل کنترل با تریستور(TCVL)؛ (ب) تنظیم کننده ولتاژ قابل کنترل با تریستور(TCVR) مبتنی بر تغییر تپ؛ (ج) تنظیم کننده ولتاژ قابل کنترل با تریستور(TCVR) مبتنی برتزریق ولتاژ.

- کنترل سیلان توان بر حسب سفارش. استفاده از کنترل سیلان توان می‌تواند ناشی از تعهد قراردادی، برآورده کردن نیاز خود شرکت برق، حصول اطمینان از سیلان مقدار بهینه توان، راهبری سیستم در شرایط اضطراری یا ترکیبی از این‌ها باشد.
- افزایش قابلیت بارگیری خطوط تا حد حرارتی آن‌ها، شامل حد کوتاه مدت و فصلی. این امر می‌تواند با غلبه بر محدودیت‌های دیگر به انجام رسد و تقسیم توان در میان خطوط بر اساس قابلیت‌های آن‌ها صورت گیرد. توجه به این نکته اهمیت دارد که قابلیت حرارتی یک خط بسته به شرایط محیطی و تاریخچه بارگیری خط حاشیه تغییرات گسترده‌ای دارد.
- افزایش ایمنی سیستم از طریق افزایش حد پایداری گذرا، محدود کردن جریان اتصال کوتاه و اضافه بارها، مدیریت کردن خاموشی‌های مکرر و میرا کردن نوسانات الکترومکانیکی در سیستم قدرت و ماشین‌ها
- تأمین خطوط ارتباط امن با شرکت‌ها و مناطق هم‌جوار و از این طریق کاهش ظرفیت رزرو تولید برای هر دو طرف.
- ایجاد انعطاف بیشتر در جایابی نیروگاه‌های جدید

جدول ۱-۱ تخصیص ویژگی به کنترل کننده‌ها

کنترل کننده FACTS	ویژگی کنترلی	شکل
جبران ساز سنکرون استاتیکی (STATCOM بدون ذخیره)	کنترل ولتاژ، جبران VAR، میرا کردن نوسانات، پایداری ولتاژ	۱-۵ الف
جبران ساز سنکرون استاتیکی (STATCOM با ذخیره، BESS، SMES، خازن dc بزرگ)	کنترل ولتاژ، جبران VAR، میرا کردن نوسانات، پایداری گذرا و دینامیکی، پایداری ولتاژ، AGC	۱-۵ ب
جبران ساز استاتیکی توان رآکتیو (SVC، TCR، TCS، TRS)	کنترل ولتاژ، جبران VAR، میرا کردن نوسانات، پایداری گذرا و دینامیکی، پایداری ولتاژ	۱-۵ ج
ترمز مقاومتی با کنترل تریستوری(TCBR)	میرا کردن نوسانات، پایداری گذرا و دینامیکی	۱-۵ د
جبران‌ساز سنکرون استاتیکی سری(SSSC بدون ذخیره)	کنترل جریان، میرا کردن نوسانات، پایداری گذرا و دینامیکی، پایداری ولتاژ، محدود کردن جریان خطا	۱-۵ الف
جبران‌ساز سنکرون استاتیکی سری (SSSC با ذخیره)	کنترل جریان، میرا کردن نوسانات، پایداری گذرا و دینامیکی، پایداری ولتاژ	۱-۶ ب
خازن سری با کنترل تریستوری (TCSC ، TSSC)	کنترل جریان، میرا کردن نوسانات، پایداری گذرا و دینامیکی، پایداری ولتاژ، محدود کردن جریان	۱-۶ ج
رآکتور سری با کنترل تریستوری (TCSR ، TSSR)	کنترل توان آکتیو، میرا کردن نوسانات، پایداری گذرا و دینامیکی، پایداری ولتاژ، محدود کردن جریان	۱-۶ د
ترانسفورماتور تغییر دهنده فاز (TCPST، TCPR)	کنترل توان آکتیو، میرا کردن نوسانات، پایداری گذرا و دینامیکی، پایداری ولتاژ	۱-۷ الف
کنترل کننده - یکپارچه سیلان جریان (UPFC)	کنترل توان آکتیو و رآکتیو، کنترل ولتاژ، جبران VAR، میرا کردن نوسانات، پایداری گذرا و دینامیکی، پایداری ولتاژ، محدود کردن جریان خطا	۱-۷ ب
محدود کننده ولتاژ با کنترل تریستوری (TCVL)	محدود کننده ولتاژهای گذرا و دینامیکی	۱-۸ الف
تنظیم کننده ولتاژ با کنترل تریستوری (TCVR)	کنترل توان رآکتیو، کنترل ولتاژ، میرا کردن نوسانات، پایداری گذرا و دینامیکی، پایداری ولتاژ	۱-۸ ب ۱-۸ ج
کنترل کننده سیلان توان میان خطی (IPFC)	کنترل توان رآکتیو، کنترل ولتاژ، میرا کردن نوسانات، پایداری گذرا و دینامیکی، پایداری ولتاژ	۱-٤ د

- ارتقاء ظرفیت خطوط
- کاهش سیلان توان رآکتیو و فراهم کردن امکان برای انتقال بیشتر توان آکتیو توسط خطوط
- کاهش سیلانات حلقوی
- افزایش بهره‌گیری از کمترین هزینه تولید. یکی از اساسی‌ترین دلایل برای انتقال به هم پیوسته، بهره‌گیری از کمترین هزینه تولید است. هنگامی که چنین امری محقق نشود، به معنای آن است که ظرفیت انتقال نیروی مقرون به صرفه به اندازه کافی وجود ندارد. لذا افزایش ظرفیت مقرون به صرفه اقتصادی، اجازه استفاده بیشتر از تولید با کمترین هزینه را خواهد داد.

طبیعتاً هم‌پوشانی در میان مزایای فوق وجود دارد، و در واقع، هر یک یا دو مزیت از این مزایا عامل توجیه برای انتخاب یک کنترل کننده FACTS خواهد بود. با این وجود، مرور کردن لیست این مزایا بر حسب میزان ارزش افزوده هر یک مهم است.

از آن‌جا که ولتاژ، جریان، امپدانس، توان حقیقی، و توان رآکتیو به یکدیگر وابستگی دارند، هر کنترل کننده‌ای، دارای چندین ویژگی در زمینه کنترل ولتاژ، سیلان توان، پایداری و غیره است که در جدول نشان داده شده است. این کنترل‌کننده‌ها می‌توانند چندین حلقه باز و حلقه بسته کنترلی داشته باشند تا از مزایای مختلف آن‌ها استفاده به عمل آید. جدول ۱-۱ یک لیست از ویژگی‌های کنترل

کننده‌های مختلف ارائه می‌کند. این لیست جامع نبوده، به خصوص شامل کنترل کننده‌هایی که چندین خط را به هم متصل می‌کنند و در فصل ۸ مورد بحث قرار خواهند گرفت نیست.

البته درجه کنترل کنندگی، به خصوص کنترل پایداری و سیلان توان از یک کنترل کننده به کنترل کننده دیگر تفاوت می‌کند. برای درک ارزش این کنترل کننده‌ها، بایستی جزئیات در فصول مختلف این کتاب مورد مطالعه قرار گیرد.

۱-۹ یک چشم انداز: HVDC یا FACTS

تشخیص این نکته حائز اهمیت است که به طور کلی HVDC و FACTS فن‌آوری‌های مکمل هستند. HVDC مانند سیستم *ac* یک شبکه به هم پیوسته نیست و چنین انتظاری نیز از آن نمی رود. نقش HVDC، بنابر دلایل اقتصادی، متصل نمودن سیستم‌های *ac* به یکدیگر، در جایی است که اتصال این سیستم‌ها به هم با یک ارتباط *ac* قابل اطمینان بسیار گران خواهد بود.

در حال حاضر بیش از ۵۰ پروژه HVDC در جهان وجود دارد. این پروژه‌ها را می‌توان به چهار گروه تقسیم کرد:

۱. **کابل‌های زیردریایی.** کابل‌ها دارای ظرفیت خازنی زیادی هستند، لذا کابل‌های *ac* نیاز به جریان شارژ (توان رآکتیو) زیادی دارند که از لحاظ مقدار بیشتر از مقدار خطوط هوایی است. در نتیجه برای بیش از ۳۰ کیلومتر یا همین حدود طول کابل زیردریایی، جریان شارژ تغذیه شده از ساحل، کابل را به بار کامل می‌رساند و جایی برای انتقال توان حقیقی باقی نمی‌گذارد. جریان شارژی را که در کابل‌ها سیلان می‌یابد می‌توان تنها با اتصال القاگرهای موازی به کابل در فواصل ۱۵-۲۰ کیلومتری کاهش داد و این امر هم نیاز به زمین مناسب دارد. از طرف دیگر با کابل HVDC، فاصله یک معضل فنی محسوب نمی‌شود. هم‌چنین هزینه انتقال *dc* به مراتب کمتر از کابل *ac* معادلی است که به اندازه HVDC از مزیت انتقال طولانی زیر دریایی برخوردار است. در چنین گستره‌ای، فن آوری FACTS (مثلاً UPFC) می‌تواند با کنترل کردن مقدار ولتاژ یکی از طرفین (مثلاً طرف گیرنده)، به صورتی که معادل طرف دیگر باقی بماند، بهبودی در انتقال به عمل آورد. به این طریق، طول مؤثر کابل از نقطه نظر جریان شارژ قابل نصف شدن است. چنین روشی ممکن است که راه‌حل اقتصادی برای طول‌های زیردریایی متوسط تا حدود ۱۰۰ کیلومتر را فراهم کند، اما برای طول‌های زیاد، انتقال به صورت HVDC هم‌چنان بدون رقیب می‌ماند.

۲. **خطوط طولانی انتقال نیروی هوایی.** اگر طول خط انتقال نیرو به اندازه کافی بلند باشد، مثلاً ۱۰۰۰ کیلومتر، صرفه جویی در هزینه‌های سرمایه‌ای و تلفات در هنگام استفاده از انتقال dc آن قدر خواهد بود که قیمت دو دستگاه کنورتور را تأمین نماید (توجه نمایید که HVDC نشانگر ظرفیت الکترونیک قدرت تا حد ۲۰۰ درصد ظرفیت مجاز انتقال است). این فاصله را طول سر به سر می‌گویند. طول سر به سر به عوامل متعددی بستگی دارد، شامل: قیمت خط، کریدور عبور خط، انشعاب گیری در وسط‌های خط، و اغلب مهم‌تر از همه سیاست‌های اخذ مجوز برای احداث خط. در هر صورت تشخیص این نکته مهم است که، هنگامی که FACTS می‌تواند نقش مهمی در عملکرد مؤثر انتقال *ac* داشته باشد، احتمالاً تأثیر زیادی بر طول سر به سر خطوط نخواهد داشت. لذا نقش اصلی FACTS در بازار گسترده انتقال *ac* است؛ یعنی جایی که HVDC از نظر اقتصادی نمی‌تواند قابل دوام باشد.

۳. **انتقال زیرزمینی.** به دلیل هزینه زیاد کابل‌های زیرزمینی، طول سربه سر برای HVDC بیشتربه رقم ۱۰۰ کیلومترشبیه است تا رقم ۱۰۰۰ کیلومتر که در خطوط هوایی وجود داشت. در این زمینه نیز فن آوری FACTS احتمالاً نقش زیادی در تعیین طول سر به سر ندارد. به هر حال تاکنون پروژه کابل زیرزمینی طولانی چه در *ac* و چه در *dc* وجود نداشته است؛ زیرا در یک مسیر باز و بدون مانع، هزینه انتقال هوایی به مراتب کمتر از انتقال زیرزمینی است (حدود ۲۵ درصد انتقال زیرزمینی). انتقال نیروی کابلی، به صورت هوایی پتانسیل قابل توجهی در کاهش قیمت‌ها –هم در قیمت کابل و هم در قیمت اجرا– دارد.

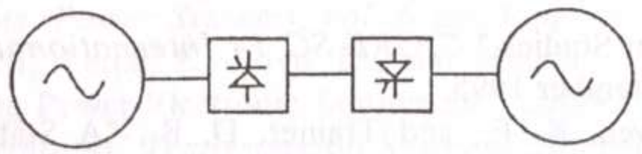
٤. **اتصال سیستم‌های *ac* با فرکانس‌های متفاوت وناسازگار.** بنا به دلایل تاریخی، اقیانوس‌ها سیستم‌های الکتریکی جهان را به بخش‌های ۵۰ و ٦۰ هرتز تقسیم می‌کنند. فرکانس عادی ٦۰ هرتز، تمام کشورهای آمریکایی به جز آرژانتین و پاراگوئه را دربر می‌گیرد. این دو کشور به همراه مابقی کشورهای جهان به جز ژاپن که نیمی دارای فرکانس ۵۰ هرتز و نیمی ٦۰ هرتز است، دارای فرکانس ۵۰ هرتز هستند. به طور کلی اقیانوس‌ها عظیم‌تر و عمیق‌تر از آن هستند که اتصال دو سیستم ۵۰ و ٦۰ هرتز را توجیه‌پذیر کنند. بنابراین جهت برقرار کردن ارتباط بین سیستم‌های ۵۰ و ٦۰ هرتز، بازار بسیار محدودی برای HVDC به وجود می‌آید.

بازار مرتبط، اما بزرگتر برای HVDC، مرتبط ساختن سیستم‌های *ac* ای است که دارای کنترل فرکانس‌های ناسازگار هستند؛ مثلاً وقتی که زاویه فاز بین دو سیستم به اندازه یک سیکل کامل یا بخشی از یک سیکل کامل اعوجاج دارد. حتی یک یا دو بار در روز تخطی زاویه فاز تا بیش از ٦۰ درجه، اغلب برای از کار انداختن دستگاه مکانیکی جابه‌جا کننده فاز کافی است. HVDC می‌تواند این مسئله را حل کند. تا کنون پروژه‌های HVDC زیادی وجود داشته‌اند که اغلب آن‌ها به صورت اتصالات پشت به پشت، به این منظور خدمت می‌کنند و بعضی از آن‌ها شامل طولی از خط *dc* هم هستند. متخصصین توافق دارند که بعضی از این اتصالات هرگاه همسایگان توافق کنند و استراتژی یکسانی را برای کنترل فرکانس اتخاذ کنند، از چرخه کار خارج خواهند شد. این در واقع اتفاقی بود که در اروپا افتاد. در زمانی نه چندان دور اتحادیه سابق کومکن[1] (شامل اروپای شرقی و بخش اروپایی اتحاد جماهیر شوروی سابق) به صورت یک سیستم *ac* به هم متصل بودند، اما نتوانسته بودند به سیستم اروپای غربی که UCPTE نام داشت، متصل شوند؛ زیرا آنان سیاست‌های کنترل فرکانس و ذخایر حاشیه‌ای در دسترس متفاوتی را مورد استفاده قرار می‌دادند. در آن زمان تمایل به مبادله توان با شرق اروپا موجب به اجرا در آمدن سه اتصال پشت به پشت به شرح زیر شد:

اتصال ۵۵۰ مگاواتی دونروهر[2] که اتریش را به لهستان وصل می‌کند؛ اتصال ٦۰۰ مگاواتی اتزنرشیت[3] که آلمان را به جمهوری چک متصل می‌کند؛ و اتصال ٦۰۰ مگاواتی شرق – غرب وین که اتریش را به مجارستان متصل می‌نماید. به هر حال با یکپارچه شدن بعدی آلمان و تغییرات سیاسی بعدی، آلمان شرقی و کشورهای اروپای شرقی شامل لهستان، جمهوری چک و اسلواک، و مجارستان خود را در یک گروه مرکزی سازمان دادند و کنترل‌های نیروگاهی و مراکز کنترل خود را نصب و کالیبره کردند. سپس در ماه‌های سپتامبر و اکتبر سال ۱۹۹۵ سیستم آن‌ها از طریق سیستم *ac* به اروپای غربی متصل شد. سایر کشورهای عضو کومکن یا سیستم‌های خود را به صورت منفرد راه می‌برند یا به یک سیستم قدرت یکپارچه با روسیه پیوسته‌اند. یکی از تبعات جانبی این امور آن بود که سه اتصال دونروهر، شرق –

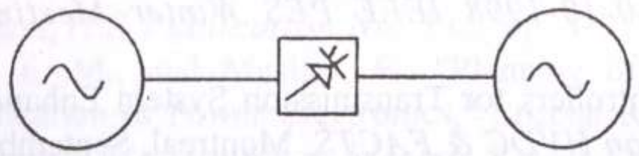
[1] Comecon
[2] Dürnrohr
[3] Etzenricht

HVDC



- استقلال فرکانس و کنترل از یکدیگر
- هزینه های کمتر خط
- کنترل توان، کنترل ولتاژ، کنترل پایداری

FACTS



- کنترل توان، کنترل ولتاژ، کنترل پایداری

هزینه های تمام شده (به میلیون دلار)

توان عبوری MW	HVDC با دو ترمینال	FACTS
200 MW	$ 40–50 M	$ 5–10 M
500 MW	75–100	10–20
1000 MW	120–170	20–30
2000 MW	200–300	30–50

شکل ۹-۱ HVDC و FACTS : راه حل های مکمل

غرب در اتریش، و اتزنرشیت در آلمان دیگر به کار نمی‌آمدند و کنار گذاشته شدند. این اتفاق در هند نیز، که در آن مناطق برق با اتصالات پشت به پشت به هم متصل شده‌اند احتمال وقوع دارد.

بسیاری از نقاط دیگر در جهان وجود دارد که استراتژی‌های کنترل فرکانس در آن‌ها مشابه هستند اما، به دلیل فواصل طولانی مرکز ثقل الکتریکی آن‌ها از نقطه موردنظر برای اتصال به یکدیگر، زاویه فاز بین آن‌ها تغییر کرده و در محدوده وسیعی، حتی تا یک سیکل کامل نیز با هم تفاوت می‌کند. سیستم‌های شرق و غرب ایالات متحده آمریکا مثالی از این نوع هستند، لذا اتصال آن‌ها به یکدیگر با چندین اتصال پشت به پشت HVDC است. ازنظر مفهومی، فن‌آوری FACTS می‌تواند مشکل تغییرات وسیع زاویه فاز را هم حل نماید. مثلاً، برای حل این مسئله نیاز به یک کنترل کننده زاویه فاز برای یک طرف است که زاویه طرف دیگر را تعقیب کند و یا نسبت به آن تقدم ایجاد کند. در واقع از نظر فنی، با مفاهیم شناخته شده کنترل کننده فاز، این امر ممکن است. با این حال، شاید اقتصاد به نفع HVDC باشد. به هر جهت HVDC مستقل از زاویه فاز بوده و به این ترتیب، هم‌ارز با یک کنترل کننده زاویه فاز است، و یک کنترل کننده واقعی ۳٦۰ درجه ممکن است بسیار گران تر باشد.

توان بالقوه بازار برای FACTS در درون سیستم *ac* و بر پایه ارزش افزوده‌ای است، که درآن:

- زاویه فاز حالت ماندگار در بین گره‌های شینه، منطقی است.
- هزینه راه‌حل FACTS کمتر از هزینه HVDC است، و
- ظرفیت کنترل کننده FACTS مورد نیاز، کمتر از ۱۰۰ درصد توان عملیاتی انتقال در سیستم است.

شکل ۹–۱، ویژگی‌های اساسی FACTS و HVDC را ارائه می‌کند؛ هم‌چنین در شکل، مقایسه کلی هزینه بین HVDC و FACTS ارائه شده که طبق آن پاسخ های FACTS قابلیت عملی داشته و می‌توانند به صورت کاربردی درآیند.

مراجع

Adapa, R., "Summary of EPRI's FACTS System Studies," *CIGRE SC 14 International Colloquium on HVDC & FACTS,* Montreal, September 1995.

Ainsworth, J. D., Davies, M., Fitz, P. J., Owen, K. E., and Trainer, D. R., "A Static VAR Compensator Based on Single-Phase Chain Circuit Converters," *IEE Proc. Gen. Trans. and Dist., vol.* 145, no. 4, July 1998.

Arabi, S., Kundur, P., and Adapa, R., "Innovative Techniques in Modeling UPFC for Power System Analysis," *Paper PE-231-PWRS-0-10-1998 IEEE PES Winter Meeting,* New York, January-February 1999.

Baker, M. H., "An Assessment of FACTS Controllers for Transmission System Enhancement," *CIGRE SC 14 International Colloquium on HVDC & FACTS,* Montreal, September 1995.

Baker, M. H., Povh, D., and Larsen, E. V., "FACTS Equipment," *Special Report CIGRE Symposium on Power Electronics in Electric Power Systems,* Tokyo, May 1995.

Baker, M. H., Thanawala, H. L., Young, D. J., and Erinmez L. A. "Static VAR Compensators Enhance a Meshed Transmission System," *CIGRE Special Report: Technology and Benefits of Flexible AC Transmission Systems, Joint Session of SC14/37/38,* Paris, 1992.

Breuer, G., "Flexible AC Transmission Scoping Studies," *EPRI Proceedings,* FACTS Conference 1, Cincinnati, OH, November 1990.

Brochu, J., Pelletier, P., Beauregard, F., and Morin, G., "The Inter-phase Power Controller, A new Concept for Managing Power Flow Within AC Networks," *IEEE Transactions on Power Delivery, vol.* 9, no. 2, pp. 833-841, April 1994.

Caviars, C. A., "Analysis of SVC and TCSC in Voltage Collapse," *IEEE PES 1998 Summer Meeting,* San Diego, CA, July 1998.

Cannon, D. Jr., Stevenson, C., Hanson, D., Lyons, P. F., and McCafferty, M., "ASCR Conductor Performance Under High Thermal Loading" *EPRI Conference on the Future of Power Delivery,* Washington, DC, April 1996.

Casazza, J. A., and Lekang, D. J., "New FACTS Technology: Its Potential Impact on Transmission System Utilization," *EPRI Conference on Flexible AC Transmission System,* Cincinnati, OH, November 1990.

Chamia, M., "Power Flow Control in Highly Integrated Transmission Network," *EPRI Conference on Flexible AC Transmission System,* Cincinnati, OH, November 1990.

Davriu, A., Douard, G., Mallet, P., and Therond, P. G., "Taking Account of FACTS Investment Selection Studies," *CIGRE Symposium on Power Electronics in Electric Power Systems,* Tokyo, May 1995.

Davriu, A., Mallet, P., and Pramayon, P., "Evaluation of FACTS Functionalities Within the Planning of the Very High Voltage Transmission Network: The EDF Approach," *Proceedings of the IEEE/Royal Institute of Technology Stockholm Power Tech: Power Electronics,* Stockholm, June 1995.

DeMarco, C. L., "Security Measures To Evaluate the Impact of FACTS Devices in Preventing Voltage Collapse," *Proceedings of EPRI Conference on Flexible AC Transmission Systems* (FACTS), Boston, MA, May 1992.

Dense, J., Stubbe, M., Meyer, B., and Panciatici, P., "Modeling of FACTS for Power System Analysis," *CIGRE Symposium on Power Electronics in Electric Power Systems,* Tokyo, May 1995.

Douglass, D. A., Edris, A. A., and Pritchard, G. A., "Field Application of A Dynamic Thermal Circuit Rating Method," *IEEE PES 1995 Winter Meeting,* New York, January-February 1995.

Edris A., Adapa, R., Baker, M. H., Bohmann, L., Clark, K., Habashi, K., Gyugui, L., Lemay, J., Mehraban, A. S., Meyers, A. K., Reeve, J., Sener, F., Torgerson, D. R., and Wood, R. R., "Proposed Terms and Definitions for Flexible AC Transmission System (FACTS)," *IEEE Trans on Power Delivery, vol.* 12, no. 4, October 1997, pp. 1848-1853.

Edris, E., "Enhancement of First-Swing Stability Using a High Speed Phase Shifter," *IEEE Trans. Power Systems, vol.* 6, no. 3, pp. 1113-1118, 1991.

Erche, M., Lerch, E., Povh, D., and Mihalic, R., "Improvement of Power System Performance Using Power Electronic Equipment," *CIGRE Special Report: Technology and Benefits of Flexible AC Transmission Systems, Joint Session of SC14/37/38,* Paris, 1992.

Ewart, D. N., Koessler, R. J., Mountford, J. D., and Maratukulam, D., "FACTS Options Permit the Utilization of the Full Thermal Capacity of AC Transmission," *IEE Conference Publication Series 5, International Conference on AC and DC Power Transmission,* London, *IEE Publication No. 345, pp.* 1-7, September 1991.

Eunson, E. M., and Meslier, F., "Planning of the Power System Taking Into Account the Application of Power Electronics," Special Report for Session 2, *CIGRE 1995 Symposium on Power Electronics in Electric Power Systems,* Tokyo, May 1995.

Eunson, E. M., Meslier, Daniel, D., Le Du, A., Poumarede, C., Therond, P. G., Langlet, B., Taisne, J. P., and Collet-Billon, V., "Power Electronics: An Effective Tool for Network Development? An Electricite de France Answer Based on the Development of a Prototype Unified Power Flow Controller," *CIGRE Symposium on Power Electronics in Electric Power Systems,* Tokyo, May 1995.

Falk, Christensen, J., "More Effective Networks," CIGRE Special Report P1-00, Paris, Session, 1996.

Feak, S. D., "Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES): Utility Application Studies," *IEEE PES 1996 Summer Meeting,* Denver, Paper 96 SM 472-1-PWRS, July-August 1996.

Ferguson, J., Woolery, B., and Lyons, P. F., "Innovative Upgrades of Transmission Lines," *EPRI Conference on the Future of Power Delivery,* Washington, DC, April 1996.

Galiana, F. D., Almeida, K., Toussaint, M., Griffen, J., Ooi, B. T., and McGillis, D. T., "Assessment and Control of the Impact of FACTS Devices on Power System Performance," *IEEE PES 1996 Winter Meeting,* Baltimore, Paper 96 WM 256-8-PWRS, January 1996.

Gama, C. A., Ellery, E. H., Azvedo, D. C. B., and Ponte, J. R. R., "Static VAR Compensators (SVC) Versus Synchronous Condesners (SC) for Inverter Stations Compensation-Technical and Economical Aspects in Electronorte Studies," *CIGRE Group 14 Paper 14-103,* 1992.

Gjengedal, T., Gjerde, J. O., and Flolo, R., "Prospective Use of HVDC and FACTS-Components for Enhancement of Power System Stability in the Norwegian Main Grid," *EPRI Conference on the Future of Power Delivery,* Washington, DC, April 1996.

Gyugyi, L., "Solid State Control of AC Power Transmission," *EPRI Conference on Flexible AC Transmission System, Proceedings,* Cincinnati, OH, November 1990.

Hammad, A. E., "Comparing the Voltage Control Capabilities of Present and Future VAR Compensating Techniques in Transmission Systems," *IEEE Transactions on Power Delivery,* vol. 11, no. 1, January 1995.

Hammad, A. E., "FACTS Control Concepts: Case Study for Voltage Stability," *EPRI Conference on the Future of Power Delivery,* Washington, DC, April 1996.

Hammad, A. E., "FACTS Specification: Criteria and Associated Studies," *EPRI Conference on the Future of Power Delivery,* Washington, DC, April 1996.

Henderson, M., and Lemay, J., "Design and Implementation of the Interphase Power Controller Between NYPA and VELCO Systems," *IEEE PES 98 Summer Meeting,* San Diego, CA. July 1998.

Henderson, M. L, "Operating Issues for FACTS Devices: An Operations Planning Perspective," *EPRI Conference on Flexible AC Transmission System,* Baltimore, MD, October 1994.

Hingorani, N. G., "Power Electronics in AC Transmission Systems," *CIGRE Special Report* PI-02, Paris Session, 1996.

Hingorani, N. G., "Future Opportunities for Electric Power Systems," IEEE PES Summer Power Meeting Luncheon Speech, San Francisco, CA, July 1987.

Hingorani, N. G., "Power Electronics in Electric Utilities: Role of Power Electronics in Future Power Systems," *Proceedings of the IEEE Special Issue,* vol. 76, no. 4, April 1988.

Hingorani, N. G., "High Power Electronics and Flexible AC Transmission System," *IEEE Power Engineering Review,* vol. 8, no. 7, July 1988. Reprint of Joint American Power Conference/IEEE Luncheon Speech, Chicago, IL, April 1988.

Hingorani, N. G., "Flexible AC Transmission Systems (FACTS)-Overview," Paper presented at the Panel Session of FACTS, *IEEE PES 1990 Winter Meeting,* Atlanta, February 1990.

Hingorani, N. G., "FACTS: Flexible AC Transmission Systems," *EPRI Conference on Flexible AC Transmission System,* Cincinnati, OH, November 1990.

Hingorani, N. G., "FACTS-Flexible AC Transmission System," Proceedings of the Fifth International Conference on AC and DC Power Transmission, London, *IEE Publication No. 345, pp.* 1-7, September 1991.

Hingorani, N. G., "Flexible AC Transmission," *IEEE Spectrum,* vol. 30, no. 4, April 1993.

Hingorani, N. G., and Stahlkopf, K. E., "High Power Electronics," *Scientific American, vol.* 269, no. 5, pp. 77-85, November 1993.

Hingorani, N. G., "Power Electronics," *IEEE Power Engineering Review,* vol. 15, no. 10, October 1995.

IEEE Power Electronics Modeling Task Force, "Guidelines for Modeling Power Electronics in Electric Power Engineering Applications," *IEEE 1996 PES Summer Meeting,* Denver, Paper 96 SM 439-0-PWRD, July-August 1996.

Kapoor, S. C., Tripathy, A. K., Kumar, M., Senthil, J., Adhikari, T., and Chaukiyal, G. P., "A Proposed Rapid Network Impedance Control Scheme for an Existing Power Corridor in India," *Proceedings of CIGRE Group 14, Paper 14-106,* August-September 1994.

Klein, M., Le, L. X., Rogers, G. J., Farrokhpay, S., and Balu, N. J., "H-Infinity Damping Controller Design in Large Power Systems," *IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10,* no. 1, pp. 158-166, February 1995.

Koessler, R., "Investigation of FACTS Options to Utilize the Full Thermal Capacity of AC Transmission," *EPRI Conference on Flexible AC Transmission System,* Cincinnati, OH, November 1990.

Kurita, A., Okubo, H., Miller, N. W., and Sanchez-Gasca, J. J., "Application of Fast Controllable Electronic Devices for Performance Enhancement in Tightly Interconnected Systems," *CIGRE 1995 Symposium on Power Electronics in Electric Power Systems,* Tokyo, May 1995.

Lachs, W. R., Sutanto, D., and Logothetis, D. N., "Power System Control in the Next Century," *IEEE Transactions on Power Systems,* vol. 11, no. 1, pp. 11-18, February 1996.

Lacoste, J., Cholley, P., Trotignon, M., Daniel, D., and Nativel, G., "FACTS Equipment and Power System Dynamics," *CIGRE 1995 Symposium on Power Electronics in Electric Power Systems,* Tokyo, May 1995.

Larsen, E., Bowler, C., Damsky, B., and Nilsson, S., "Benefits of Thyristor Controlled Series Compensation," *CIGRE Special Report: Technology and Benefits of Flexible AC Transmission Systems, Joint Session of SC14/37/38,* Paris, 1992.

Larsen, E., and Weaver, T., "FACTS Overview," *IEEE/CIGRE FACTS Working Group, IEEE Technical Publication 95 TP108,* 84 pages, 1995.

Larsen, E., and Sener, F., "Current Activity in Flexible AC Transmission System (FACTS)," *IEEE Publication No. 92TH0465-5-PWR,* April 1992.

Le Du, A., Tontini, G., and Winfield, M., "Which FACTS Equipment for Which Need? Identification of the Technology Developments to Meet the Needs of Electricite de France (EDF), Ente Nazionale per l'Energia Eletrica (ENEL) and National Grid Company (NGC)," *CIGRE Special Report: Technology and Benefits of Flexible AC Transmission Systems, Joint Session of SC14/37/38,* Paris, 1992.

Lei, X., Lerch, E., Povh, D., Wang, X., and Haubrich, H. J., "Global Settings of FACTS Controllers in Power Systems," *CIGRE Session Group 14,* Paris, Paper 14-305, 1996.

Lemay, J., "A Planner's View of FACTS: Meeting the Needs of Modern Networks Power," *Technology International,* United Kingdom, pp. 109-111, 1996.

Lerch, E., and Povh, D., "Performance of AC Systems Using FACTS Equipment," *Proceedings of EPRI Conference on Flexible AC Transmission Systems (FACTS),* Boston, MA, May 1992.

Lu, C. F., Liu, C. C., and Wu, C. J., "Dynamic Modeling of Battery Energy Storage System and Application to Power System Stability," *IEE Proceedings, Generation, Transmission and Distribution, vol.* 142, no. 4, pp. 429-435, July 1995.

Maguire, T. L., and Gole, A. M., "Digital Simulation of Flexible Topology Power Electronic Apparatus in Power Systems," *IEEE SM 414-3 PWRD,* 1991.

Maliszewski, R. M., Eunson, E. M., Meslier, F., Balazs, P., Schwarz, J., Takahashi, K., and Wallace, P., "Interaction of System Planning in the Development of the Transmission Networks of the 21st Century," *CIGRE 1995 Symposium on Power Electronics in Electric Power Systems,* Tokyo, May 1995.

Maliszewski, R. M., and Meslier, F., "More Effective Network: An Answer to Question 10 of the Special Report," *CIGRE Special Report PI-06,* Session 1996.

Maliszewski, R. M., Pasternack, B. M., Scherer, Jr., H. N., Chamia, M., Frank, H., and Paulsson, L., "Power Flow in a Highly Interconnected Transmission Network," *CIGRE Paper 37-303,* Paris, 1990 Session, 1990.

Manzoni, G., Salvaderi, Eunson, E. M., Schwarz, J., and Casazza, J. A., "Power System Planning with Changing Institutional Arrangements," *CIGRE Panel Session Paper No. P2-01,* 1996.

Miller, N. W., Mukerji, R., and Clayton, R. E., "The Role of Power Electronics in Open Access Markets," *EPRI Conference on the Future of Power Delivery,* Washington, DC, April 1996.

Mitani, Y., Uranaka, T., and Tsuji, K., "Power System Stabilization by Superconducting Magnetic Energy Storage with Solid State Phase Shifter," *IEEE Transactions on Power Systems, vol.* 10, no. 3, August 1995.

Mittelstadt, W. A., "Considerations in Planning Use of FACTS Devices on a Utility System," *EPRI Conference on Flexible AC Transmission System, Proceedings,* Cincinnati, OH, November 1990.

Nilsson, S. L., "Security Aspects of Flexible AC Transmission System Controller Applications," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* (United Kingdom), vol. 17, no. 3, pp. 173-179, June 1995.

Norris, W. T., and James, D. A., "Series Compensation Using Power Electronic Switches: The SERCOM," *Proceedings of the IEE Sixth International Conference on AC and DC Transmission, pp.* 405-410, April-May 1996.

Oh, T. K., Choi, K. H., Byon, S. B., Kim, Y. H., Hwang, J. Y., and Lee, K. J., "Power Transfer Capability Increase and Transient Stability Enhancement by FACTS Devices Application," *EPRI Conference on the Future of Power Delivery,* Washington, DC, April 1996.

Okamoto, H., Kurita, A., and Sekine, Y., "A Method for Identification of Effective Locations of Variable Impedance Apparatus on Enhancement of Steady-State Stability in Large Scale Power Systems," *IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10,* no. 3, August 1995.

Ooi, B. T., Kazerani, M., Marceau, R., Wolanski, Z., Galiana, F. D., McGillis, D., and Joos, G., "Mid-Point Siting of FACTS Devices in Transmission Lines," *Paper No. PE-292-PWRD-0-01-1997,* IEEE PES, 1997.

Padiyar, K. R., Geetha, M. K., and Rao, K. U., "A Novel Power Flow Controller for Controlled Series Compensation," *Proceedings, of the ZEE Sixth International Conference on AC and DC Transmission, pp.* 3290-3334, April-May 1996.

Padiyar, K. R., and Kulkarni, A. M., "Application of Static Condenser for Enhancing Power Transfer in Long AC Lines," *CIGRE 1995 Symposium on Power Electronics in Electric Power Systems,* Tokyo, May 1995.

Padiyar, K. R., and Rao, K. U., "Discrete Control of TCSC for Stability Improvement in Power Systems," Proceedings, *IEEE Fourth Conference on Control Applications,* Albany, NY, pp. 246-251, September 1995.

Paserba, J. J., Condordia, C., Lerch, E., Lysheim, D. P., Ostojic, D., Thorvaldsson, B. H., Dagle, J. E., Trudnowski, D. J., Hauer, J. F., and Janssens, N., "Opportunities for Damping Oscillations by Applying Power Electronics in Electric Power Systems," *CIGRE 1995 Symposium on Power Electronics in Electric Power Systems,* Tokyo, May 1995.

Pastos, D. A., Vovos, N. A., and Giannakopoulos, G. B., "Comparison of Compensators Capability to Modulate the Real Power Flow in Integrated AC/DC Systems," *IEEE PES 97 Summer Meeting,* Berlin, Germany, July 1997.

Pilotto, L. A. S., Ping, W. W., Carvalho, A. R., Prado, S., Wey, A., Long, W. F., and Edris, A. A., "First Results on the Analysis of Control Interactions on FACTS Assisted Power Systems," EPRI Conference on Flexible AC Transmission System, Baltimore, MD, October 1994.

Pilotto, L. A. S., Ping, W. W., Carvalho, A. R., Wey, A., Long, W. F., Alvarado, F. L., DeMarco, C. L., and Edris, A. A., "Determination of Needed FACTS Controllers That Increase Asset Utilization of Power Systems," *IEEE PES 1996 Winter Meeting,* Baltimore, Paper 96 WM 090-1-PWRD, January 1996.

Povh, D., "Advantages of Power Electronics Equipment in AC Systems," *CIGRE SC147nternational Colloquium on HVDC and FACTS Systems,* Wellington, New Zealand, September 1993.

Povh, D., and Mihalic, R., "Enhancement of Transient Stability on AC Transmission by Means of Controlled Series and Parallel Compensation," *IEE Conference Publication Series 5, International Conference on AC and DC Power Transmission,* London, *ZEE Publication No. 345,* pp. 8-12, September 1991.

Povh, D., Mihalic, R., and Papic, L, "FACTS Equipment for Load Flow Control In High Voltage ' Systems," *CZGRE 1995 Symposium on Power Electronics in Electric Power Systems,* Tokyo, May 1995.

Pramayon, P., Nonnon, P., Mallet, P., Trotignon, M., and Lauzanne, B., "Methodology for Technical and Economical Evaluation of FACTS Impact and Efficiency on EHV Transmission System," *EPRI Conference on the Future of Power Delivery,* Washington DC, April 1996.

Rajaraman, R., "Oscillations in Power Systems with Thyristor Switching Devices," *IEEE PES 1996 Winter Meeting,* Baltimore, Paper 96 WM 255-0-PWRS, January 1996.

Rajaraman, R., and Dobson, L, "Damping Estimates of Subsynchronous and Power Swing Oscillations in Power Systems with Thyristor Switching Devices," *IEEE PES Winter Meeting,* Baltimore, January 1996.

Rajaraman, R., Maniaci, A., and Camfield, R., "Determination of Location and Amount of Series Compensation to Increase Over Transfer Capability," *IEEE PES 97 Summer Meeting,* Berlin, Germany, July 1997.

Ray, C., "Meeting Security and Quality Requirements In an Open Market," *EPRI Conference on the Future of Power Delivery,* Washington, DC, April 1996.

Rehtanz, C., "Systemic Use of Multifunctional SMES in Electric Power Systems," *Paper PE224-PWRS-0-10-1998, IEEE PES Winter Meeting,* New York, January-February 1999.

Sanchez, J. J., "Coordinated Control of Two FACTS Devices for Damping Inter-Area Oscillations," *IEEE PES 97 Summer Meeting,* Berlin, Germany, July 1997.

Sekine, Y., Hayashi, T., Abe, K., Inoue, Y., and Horiuchi, S., "Application of Power Electronics Technologies to Future Interconnected Power System in Japan," *CIGRE 1995 Symposium on Power Electronics in Electric Power Systems,* Tokyo, May 1995.

Sekine, Y., Takahashi, K., and Hayashi, T., "Application of Power Electronics Technologies to the 21st Century's Bulk Power Transmission in Japan," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* (United Kingdom), vol. 17, no. 3, pp. 181-193, June 1995.

Simo, J. B., and Kamwa, L, "Exploratory Assessment of the Dynamic Behavior of MultiMachine System Stabilized by a SMES Unit," *IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10,* no. 3, August 1995.

Singh, B., Al-Haddad, K., and Chandra, A., "A New Control Approach to Three Phase Active Power for Harmonics and Reactive Power Compensation," *IEEE PES 97 Summer Meeting,* Berlin, Germany, July 1997.

Smith, P., Thanawala, H. L., and Corcoran, J. W. C., "Potential Application of Power Electronic Equipment in the Irish Power Transmission System," *CIGRE 1995 Symposium on Power Electronics in Electric Power Systems,* Tokyo, May 1995.

Strbac, G., and Jenkins, N., "FACTS Devices in Uplift Control," *Proceedings of the IEE Sixth International Conference on AC and DC Transmission, pp.* 214-219, April-May 1996.

Sugimoto, S., Kida, J., Arita, H., Fukui, C., and Yamagiwa, T., "Principle and Characteristics of a Fault Current Limiter With Series Compensation," *IEEE Transactions on Power Delivery,* vol. 11, no. 2, April 1996.

Sultan, M., Reeve, J. R., and Adapa, R., "Combined Transient and Dynamic Analysis of HVDC and FACTS Systems," *Paper No. PE-83-PWRD-0-1-1998, IEEE PES,* 1998

Sybille, G., Haj-Maharsi, Y., Morin, G., Beauregard, F., Brochu, J., Lemay, J., and Pelletier, P., "Simulator Demonstration of the Interphase Power Controller Technology" *IEEE PES 1996 Winter Meeting,* Baltimore, January 1996.

Tang, Y., and Meliopoulos, A. P. S., "Power System Small Signal Stability Analysis with FACTS Elements," *IEEE PES 1996 Summer Meeting,* Denver, Paper 96 SM 467-1-PWRD, July-August 1996.

Taranto, G. N., Chow, J. H., and Othman, H. A., "Robust Redesign of Power System Damping Controllers," *IEEE Transactions on Control Systems Technology,* vol. 3, no. 3, pp. 290-298, September 1995.

Taranto, G. N., Pinto, L. M. V. G., and Pereira, M. V. F., "Representation of FACTS Devices in Power System Economic Dispatch," *IEEE Trans Power Systems,* vol. 7, no. 2, pp. 572-576, May 1992.

Tenorio, A. R. M., Ekanayake, J. B., and Jenkins, N. "Modeling of FACTS Devices," Proceedings of the *ZEE Sixth International Conference on AC and DC Transmission, pp.* 340-345, April-May 1996.

Tripathy, S. C., and Juengst, K. P., "Sampled Data Automatic generation Control with Superconducting Magnetic Energy Storage in Power System," *IEEE PES 1996 Winter Meeting,* Baltimore, Paper 96 WM 046-3-EC, January 1996.

Vieira, X., Szechtman, M., Salgado, E., Praca, J. C. G., Ping, W. W., and Bianco, A., "Prospective Applications of FACTS in the Brazilian Interconnected Power Systems," *CIGRE 1995 Symposium on Power Electronics in Electric Power Systems,* Tokyo, May 1995.

Wang, Y., Mohler, R. R., Spec, R., and Mittelstadt, S. W., "Variable Structure FACTS Controllers for Power System Transient Stability," *IEEE Trans Power Systems,* vol. 7, no. 1, pp. 307-313, February 1992.

Wang, H. F., and Swift, F. J., "A Unified Model for the Analysis of FACTS Devices in Damping Power System Oscillations. Part 1: Single-Machine Infinite-Bus Power Systems," *IEEE PES 1996 Summer Meeting,* Denver, Paper 96 SM 464-8-PWRD, July-August 1996.

Yokoyama, A., Okamoto, H., and Sekine, Y., "Simulation Study on Steady State and Transient Stability Enhancement of Multi-Machine Power System by Dynamic Control of Variable Series Capacitor," *CIGRE 1995 Symposium on Power Electronics in Electric Power Systems,* Tokyo, May 1995.

۲

ادوات

نیمه هادی قدرت

۲-۱ چشم اندازی از ادوات قدرت

منظور از این بخش، تنها ارائه اطلاعات عمومی در مورد ادوات نیمه هادی قدرت است که برای کنترل-کننده‌های FACTS مناسب هستند. اطلاعات کافی برای مهندسین سیستم‌های قدرت ارائه می‌شود تا انتخاب‌های متفاوت و ارتباط آن‌ها با کاربردهای FACTS را دریابند. کتاب‌هایی در دسترس است که اطلاعات عمیق‌تری را به آنان که علاقه‌مند به جزئیات این ادوات هستند ارائه می‌کند.

به طور کلی، کاربردهای FACTS، نمایانگر یک سیستم سه فاز با مقدار مجاز توان بین چند ده تا چند صد مگاوات است. در اصل، کنترل کننده‌های FACTS مبتنی بر مجموعه‌ای از کنورتورهای *ac/dc* و/یا *dc/ac* و/یا کلیدهای پرتوان *ac* هستند. یک کنورتور مجموعه‌ای از والوها (و سایر تجهیزات) است، و هر والو به نوبه خود و بر حسب نیاز، مجموعه‌ای از دستگاه‌های قدرت و مدارهای ضربه گیر(مدارهای میراکننده)، به همراه مدارهای راه انداز دریچه‌های قطع و وصل است. به طریق مشابه، هر کلید *ac* مجموعه‌ای از دستگاه‌های قدرت متصل شده به یکدیگر به صورت پشت به پشت، به همراه مدارهای میراکننده و مدارهای راه‌انداز وصل و قطع دریچه می‌باشد. توان نامی دستگاه‌های بزرگ قدرت در محدوده ۱ تا ۵ کیلوآمپر و ۵ تا ۱۰ کیلوولت برای هر دستگاه است، و توان قابل استفاده آن‌ها در مدار ممکن است تنها ۲۵ تا ۵۰ درصد توان نامی آن‌ها باشد. این می‌رساند که کنورتورها و کلیدهای *ac* حاصل به هم پیوستن تعداد زیادی از دستگاه‌های قدرت هستند. کنورتورها، کلیدهای *ac*، و دستگاه‌ها، به صورت سری و/ یا موازی به یکدیگر متصل می‌شوند تا عملکرد و توان مطلوب کنترل کننده FACTS را فراهم کنند؛ در بعضی از حالات نیز کنترل کننده می‌تواند به مجموعه‌های تک فاز مجزا تقسیم شود. چنین ملاحظاتی امکان جالب و در واقع الزام‌آوری را فراهم می‌کنند تا سازنده به منظور استفاده مؤثر از دستگاه‌های قدرت، مدولار بودن را در آن‌ها رعایت کند. مدولار بودن اگر به صورت مناسبی استفاده شود، نه تنها می‌تواند با استاندارد کردن مدول‌ها و اجزاء آن‌ها، هزینه را کاهش دهد، بلکه از منظر مصرف کننده هم می‌تواند نوعی دارایی شامل قابلیت اطمینان، قدرت انتخاب و سرمایه‌گذاری تدریجی به حساب آید.

مقادیر مجاز، مشخصات و نحوه استفاده از دستگاه اثری تعیین کننده بر هزینه، عملکرد، ابعاد، وزن و تلفات کنترل‌های FACTS و تمام کاربردهای دستگاه‌های قدرت دارد. این تعیین کنندگی شامل تمام چیزهایی است که درحوزه اطراف دستگاه‌ها قرار می‌گیرند، مثل: مدارهای ضربه گیر، مدارهای راه انداز دریچه، ترانسفورماتورها، و سایر تجهیزات مغناطیسی، فیلترها، تجهیزات خنک کننده، تلفات، نحوه عملکرد و نیازهای تعمیر و نگهداری. به عنوان مثال قابلیت کلیدزنی سریع‌تر، منجر به مدارهای

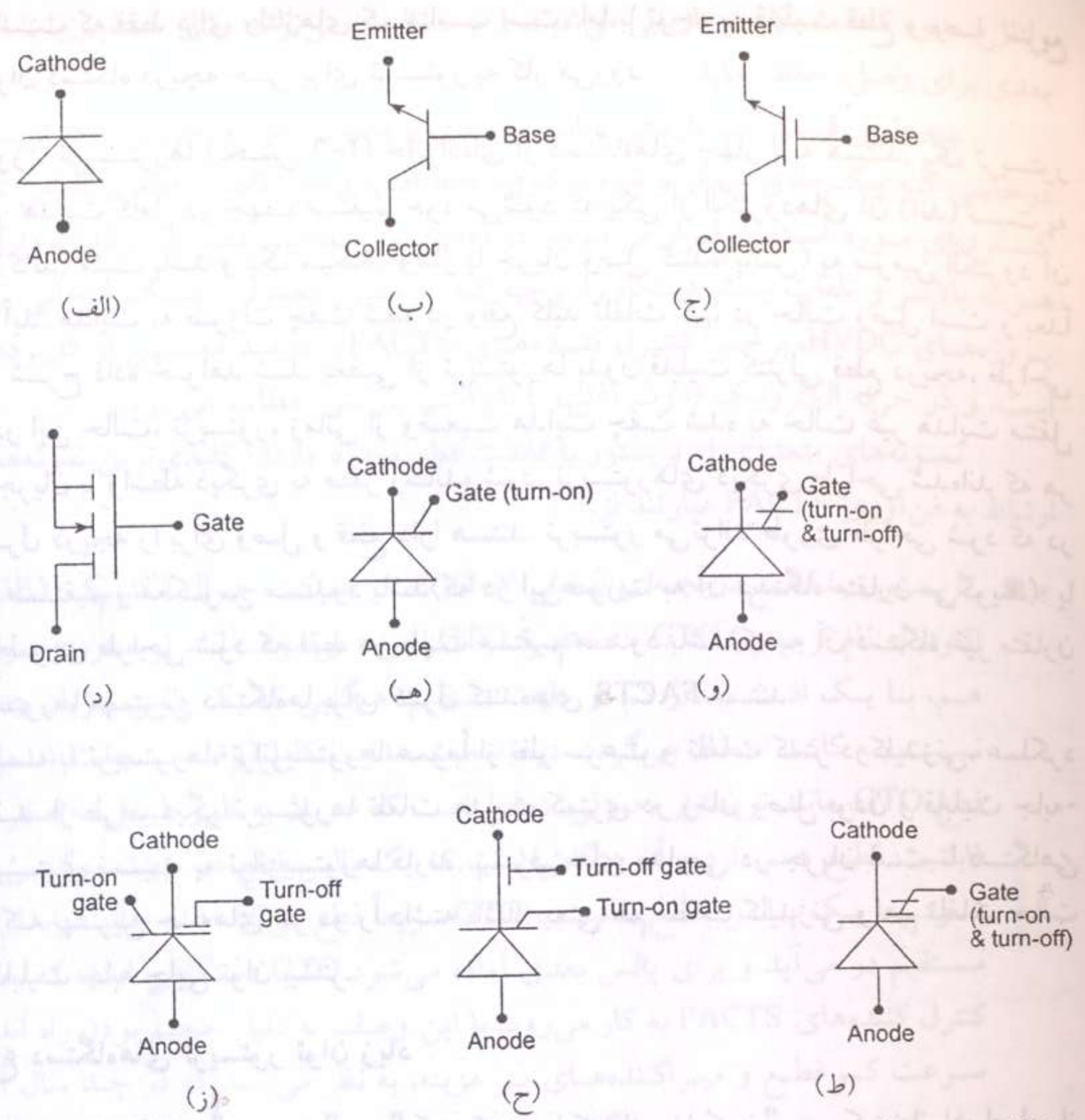
ضربه گیرکمتر، با تلفات کمتر در آن‌ها و تولید طرح‌هایی با هارمونیک‌های کمتر و اخذ پاسخ سریع‌تر از کنترل کننده FACTS، می‌شود. اهمیت دیگر آن‌ها، در اجرای موفقیت آمیز مفاهیم خاصی از کنترل کننده‌های FACTS، مثل فیلترهای فعال است.

مفاهیم مداری پیشرفته زیادی در کاربردهای صنعتی با توان کمتر وجود دارند که اغلب محرک انتخاب آن‌ها هزینه اولیه است، در حالی که در سطوح توان بالاتر، کاربرد اقتصادی(این مفاهیم) عمدتاً تابعی از پیشرفته بودن دستگاه‌هاست. این مفاهیم شامل مدولاسیون عرض پالس (PWM)، کلیدزنی آرام، کنورتورهای تشدید کننده، برش‌گرها و دیگر مفاهیم است. بنابراین طراحی تجهیزات کنترل کننده FACTS، معمولاً بایستی مبتنی بر دستگاه‌هایی با بهترین مشخصه‌های قابل دسترس باشد، و لو اینکه متضمن هزینه‌های بیشتری باشد. اگرچه هزینه دستگاه‌ها خود یک عامل محسوب می‌شود، با این حال صحیح خواهد بود اگر بگوییم که در دسترس بودن دستگاه‌هایی با مشخصه‌های بهتر، یک اهرم مهم در انتخاب‌های FACTS به وجود آورده و یک عامل رقابتی برای تأمین کنندگان فن‌آوری FACTS در برآورده کردن عملکردهای معین با کمترین قیمت ارزیابی شده، فراهم می‌کند. لذا هزینه، عملکرد، و موفقیت کنترل کننده‌های FACTS در بازار، بسیار با پیشرفت دستگاه‌های نیمه هادی و چگونگی شکل‌بندی آن‌ها ارتباط دارد. در واقع طراح کنترل کننده‌های FACTS از گفتگو با تأمین کننده دستگاه‌ها در زمینه مشخصه دستگاه‌ها، نحوه فرم بندی آن‌ها و زیر مجموعه‌های مربوطه، دست‌آوردهای بسیار بیشتری خواهد داشت تا اینکه مشخصه‌های ذکر شده در کاتالوگ دستگاه را ملاک طراحی کنترل کننده قرار دهد. بنابراین برای کاربر فن‌آوری FACTS، داشتن ایده‌ای کلی از انواع انتخاب‌ها، در نیمه هادی‌های قدرت، وضعیت فن‌آوری دستگاه و پیشرفت‌های آتی آن، و نیز مفاهیم مدار مورد استفاده در شرکت برق و کاربردهای صنعتی، حائز اهمیت می‌باشد.

به عبارت کلی، دستگاه‌های الکترونیک توان بالا کلیدهای سریعی هستند که براساس قرص سیلیکونی تک کریستالی با خلوص زیاد، به منظور کلیدزنی با مشخصه‌های مختلف، طراحی شده‌اند. این دستگاه‌ها در راستای هدایت مستقیم خود، می توانند عمل وصل و قطع جریان را، در صورتی‌که فرمان آن توسط یک دریچه کنترل صادر شده باشد، انجام دهند. بعضی از دستگاه‌های قدرت بدون قابلیت بلوکه کردن جریان در جهت مخالف طراحی می‌شوند؛ در این حالت آن‌ها به همراه دستگاه دیگری که خاصیت بلوکه کردن جریان معکوس را دارد (دیود) به صورت سری ارائه می‌شوند؛ یا آن‌ها را با دستگاه دیگری (دیود) در جهت عکس و به صورت موازی میان‌بر می‌کنند.

در اساس، دستگاه‌های نیمه هادی قدرت، شامل مجموعه‌ای از دیودها، ترانزیستورها، و تریستورها هستند. دستگاه‌های پایه‌ای در این گروه‌بندی‌ها به صورت نمادین در شکل ۱-۲ نشان داده شده‌اند. اغلب این نمادها به صورتی متفاوت با آنچه در شکل ۱-۲ نشان داده شده ترسیم می‌شوند. در پاراگراف‌های زیر این سه گروه بندی به صورت مختصر معرفی و سپس دستگاه‌های خاص با جزئیات بیشتری توضیح داده شده‌اند.

دیودها. دیودها خانواده‌ای از دستگاه‌های دو لایه با قابلیت هدایت یکسویه هستند. دیود در جهت مستقیم (جهت هدایت) از سمت آند به سمت کاتد عمل هدایت را انجام می‌دهد، مشروط به اینکه آند آن نسبت به کاتد مثبت باشد. دیود فاقد دریچه برای کنترل هدایت جریان در جهت مستقیم است. هدایت در جهت عکس دیود مسدود است و این هنگامی است که کاتد آن نسبت به آند مثبت تر است. دیود یک مؤلفه کلیدی در بسیاری از کنترل کننده‌های FACTS محسوب می‌شود.



شکل ۱-۲ دستگاه های نیمه هادی قدرت: (الف) دیود، (ب) ترانزیستور، (ج) ترانزیستور دو قطبی با دریچه یکپارچه(IGBT)، (د) ترانزیستور اثرمیدانی MOS (MOSFET)، (هـ) تریستور، (و) تریستور با قطع دریچه (GTO) و تریستور با کنترل دریچه (GCT)، (ز) تریستور با قطع MOS (MTO)، (ح) تریستور با قطع امیتر(ETO)، و (ط) تریستور با کنترل MOS (MTO).

ترانزیستور. ترانزیستورها خانواده‌ای از دستگاه‌های سه لایه هستند. ترانزیستور، در جهت مستقیم، هنگامی که یکی از الکترودهای آن که کلکتور نامیده می‌شود نسبت به الکترود دیگر آن که امیتر نام دارد مثبت باشد، و یک سیگنال ولتاژ یا جریان وصل به الکترود سوم که بیس نام دارد، اعمال شود، عمل هدایت را انجام می‌دهد. درصورتی‌که ولتاژ یا جریان بیس کمتر از مقداری باشد که برای وصل کامل مورد نیاز است، عمل هدایت انجام می‌شود در حالی که آند نسبت به کاتد هم‌چنان مقداری ولتاژ دارد. ترانزیستورها به طور گسترده‌ای در کاربردهای توان‌پایین و توان‌متوسط به کار می‌روند. یک‌نوع از ترانزیستورها که به نام "ترانزیستور دوقطبی با دریچه عایق شده" (IGBT بخش ۱۱-۲) شناخته می‌شود، تا حد مصرف وسیع در کاربردهای توان‌پایین و توان‌متوسط رشد کرده و مصرف آن تا کاربردهای چندین مگاوات و حتی چند ده مگاوات افزایش یافته است. بنابراین IGBT برای FACTS از نوعی اهمیت برخوردار است. ترانزیستور اثر میدانی MOS (MOSFET[1])، نوع دیگری

[1] MOSFET=Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

از ترانزیستور است که فقط برای ولتاژهای کم مناسب است، اما با توجه به قابلیت قطع و وصل سریع آن، اغلب به عنوان دستگاه دریچه جنبی برای تریستور به کار می‌رود.

تریستور . تریستورها (بخش ۶-۲) خانواده‌ای از دستگاه‌های چهار لایه هستند. یک تریستور هنگامی درگیر هدایت کامل در جهت مستقیم خود می‌شود که یکی از الکترودهای آن (آند) نسبت به الکترود دیگر (کاتد) مثبت باشد و یک سیگنال ولتاژ یا جریان وصل کننده(پالس) به سومین الکترود آن (دریچه) وارد آید. هدایت به صورت چفت شده در واقع کلید تلفات کم، در حالت وصل است و بعداً در بخش ۶-۲ شرح داده خواهد شد. بعضی از تریستورها بدون قابلیت کنترلی قطع دریچه، طراحی می‌شوند؛ که در این حالت، تریستور، زمانی از وضعیت هدایت چفت شده به حالت غیر هدایت منتقل می‌شود که جریان با واسطه دیگری به صفر رسانده شود. تریستورهای دیگری طراحی شده‌اند که هر دو قابلیت کنترل دریچه را برای وصل و قطع دارا هستند. تریستور می‌تواند طوری طراحی شود که در هر دو جهت مستقیم و معکوس مسدود باشد(که در این‌صورت به آن دستگاه متقارن می‌گویند)؛ یا ممکن است طوری طراحی شود که فقط در جهت مستقیم مسدود باشد(که به آن دستگاه غیر متقارن می‌گویند). تریستورها مهمترین دستگاه‌ها برای کنترل کننده‌های FACTS هستند.

در مقایسه با تریستورها، ترانزیستورها عموماً از نظر سرعت و تلفات کمتر درکلیدزنی، عملکرد ممتازتری دارند. از طرف دیگر تریستورها تلفات هدایت کمتری در زمان وصل بودن و قابلیت جابه-جایی توان بیشتری نسبت به ترانزیستورها دارند. پیشرفت‌های مداومی در جریان است تا دستگاهی حاصل شود که بهترین جنبه‌های هر دو را داشته باشد؛ یعنی هم تلفات کلیدزنی و هم تلفات حالت وصل کمتر با قابلیت جابه جایی توان بیشتر.

۱-۱-۲ انواع دستگاه‌های تریستور توان زیاد

از نظر فنی، اصطلاح "تریستور" و "یکسوکننده با کنترل سیلیکون" به یک خانواده اصلی از دستگاه‌های نیمه هادی چهار لایه، با قابلیت کنترل اطلاق می‌شود که در آن قطع و وصل بستگی به باز خورد احیا کننده pnpn دارد (شرح بیشتر در بخش ۶-۲). نام یکسوکننده با کنترل سیلیکون[1](SCR) توسط مخترعین آن انتخاب شد و پیشگامی آن با شرکت جنرال الکتریک (GE)، در جریان مربوط به ساخت یک دستگاه بود که دارای قابلیت وصل بوده ولی فاقد قابلیت قطع باشد. اصطلاح SCR به وسیله دیگران به تریستور تغییر یافت. با ظهور دستگاهی که قابلیت قطع و وصل را با هم دارا بوده و تریستور با دریچه قطع یا همان GTO[2] نامیده شده، دستگاهی که فقط قابلیت وصل را داشت به تدریج به نام "تریستور معمولی" یا فقط تریستور خوانده شد. اعضای دیگر خانواده تریستور یا SCR، نام‌های دیگری بر اساس حروف اختصاری به خود گرفته‌اند. در این کتاب، اصطلاح تریستور به طور کلی به معنای "تریستور معمولی" به کار رفته است.

هدایت تریستور در جهت مستقیم هنگامی آغاز می‌شود که یک پالس جریان راه‌انداز از دریچه به کاتد عبور کند و تریستور را سریعاً در حالت هدایت کامل و با افت ولتاژ مختصری در جهت مستقیم، چفت کند (مقدار افت ولتاژ ۱/۵ تا ۳ ولت بسته به نوع تریستور و جریان است). همان‌طورکه اشاره شد، تریستور معمولی نمی‌تواند جریان خود را به صفر بازگرداند، و به جای آن برای صفرکردن جریان به مدار تکیه می‌کند. هنگامی که جریان مدار به صفر برسد، تریستور در چند ده میکرو ثانیه از

[1] SCR=Silicon Controled Rectifiered
[2] GTO=Gate Turn Off

ولتاژ مسدود کننده معکوس بازیابی می‌شود، و به دنبال آن می‌تواند ولتاژ مستقیم را تا اعمال شدن پالس بعدی برای وصل، حفظ نماید.

به دلیل قیمت کم، بازدهی زیاد، توانمندی و قابلیت ولتاژ و جریان زیاد، تریستورهای معمولی درجایی که پیکربندی مدار و الزام برکاربرد اقتصادی، وجود قابلیت قطع را الزامی نکنند، به صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. در اغلب موارد قابلیت قطع تا آن اندازه دارای نفع نیست که هزینه بالاتر و تلفات بیشتر دستگاه را توجیه کند. تریستور معمولی، دستگاه انتخابی برای تقریباً تمامی پروژه‌های HVDC، برخی کنترل کننده‌های FACTS و درصد معتنابهی از کاربردهای صنعتی بوده است، و در حرفه الکترونیک قدرت اغلب با نام اسب بارکش خطاب می‌شود.

نمونه‌های متعددی از تریستور با قابلیت قطع وجود دارند؛ کلیدی‌ترین نمونه‌ها در میان آن‌ها با ارتباط به فن‌آوری FACTS عبارتند از:

- *تریستور با قطع دریچه‌ای* (بخش ۷-۲)، که در شرکت جنرال الکتریک (GE) اختراع شده و اکنون به نام تریستور GTO یا مختصراً GTO نامیده می‌شود. مانند تریستور معمولی، این تریستور هم، با یک افت ولتاژ کم در جهت مستقیم، هنگامی که یک پالس جریان وصل به دریچه آن نسبت به کاتد اعمال می‌گردد، در وضعیت هدایت کامل(وضعیت چفت شده)، وصل می‌شود. قطع GTO، مانند تریستور معمولی، زمانی است که جریان به طور طبیعی به صفر برسد؛ اما GTO قابلیت قطع هم دارد و آن هنگامی است که یک پالس قطع در جهت معکوس به دریچه اعمال شود. با یک پالس قطع مناسب، GTO سریعاً قطع می‌کند و به حالت پایداری در برابر ولتاژ مستقیم در می‌آید و برای پالس بعدی آماده می‌شود.GTO دستگاهی است که به گستردگی برای کنترل کننده‌های FACTS به کار می‌رود؛ با این وصف به دلیل حجیم بودن راه اندازهای دریچه و سرعت کم قطع و میراکننده‌های پر هزینه، به نظر می‌رسد که در چند سال آتی با GTOهای پیشرفته‌تر و تریستورها جایگزین شود. این تریستورهای پیشرفته، که به نوبه خود بخشی از خانواده تریستورها هستند، اسامی مخفف زیر را دارند و شرح مختصری درمورد آن‌ها بعداً در همین فصل ارائه می‌شود.
- *تریستور با قطع MOS* (MTO[1] بخش ۸-۲)، که در شرکت پاورسیلیکون (SPCO[2]) به وسیله هرشاد مهتا[3] اختراع شد، و از ترانزیستورها در قطع بهره می‌برد و قابلیت قطع سریع و تلفات اندک کلیدزنی قطع را داراست. این دستگاه به تازگی به صورت تجاری عرضه شده و قابلیت خوبی را برای استفاده در کاربردهای صنعتی توان متوسط تا توان زیاد و کنترل کننده‌های FACTS دارد.
- *تریستور با قطع امیتر* (ETO[4]، بخش ۹-۲)، در "مرکز الکترونیک قدرت ویرجینیا[5]" و با همکاری SPCO ساخته شد. این تریستور یکی دیگر از انواع تغییر یافته GTO بوده و از ترانزیستورهای ولتاژ کم به صورت سری با یک GTO ولتاژ زیاد تشکیل شده، تا قطع سریع و تلفات اندک در هنگام کلیدزنی قطع، حاصل شود.

[1] MTO=MOS Turn Off
[2] SPCO=Silicon Power COrporation
[3] Hershad Mehta
[4] ETO=Emitter Turn Off
[5] Virginia Power Electronics Center