بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی برق گرایش قدرت

عنوان پایان‌نامه :

بهبود پایداری گذرا در سیستم قدرت توسط مکان‌یابی ادوات FACTS در حضور پایدارساز سیستم قدرت

استاد راهنما : دکتر رستمی

استاد مشاور : دکتر درودی

نگارنده : علی درویش فالحی

پائیز ۱۳۸۹

کلیه حقوق این پایان‌نامه متعلق به "دانشگاه شاهد" می‌باشد.

در ابتدا جا دارد که فرصت را غنیمت شمرده و بدینوسیله تشکر و قدردانی خودمان را از اساتید محترم جناب دکتر رستمی و دکتر درودی ابراز داریم و معتقدم که بدون حمایت‌ها و راهنمایی‌های ایشان امکان انجام این فعالیت علمی وجود نداشت.

علی درویش فالحی

فهرست مطالب

چکیده ۱

فصل اول: مروری بر ادوات FACTS و PSS..... ۲

۱-۱) مقدمه ۲

۱-۱-۱) ظهور و فرصت‌های آتی FACTS ۳

۱-۱-۲) شبکه قدرت به هم پیوسته ۴

۱-۱-۳) عبور توان در یک سیستم AC ۴

۱-۱-۴) عبور توان از مسیرهای موازی ۴

۱-۱-۵) عواملی که باعث محدودیت عبور توان در شبکه می‌شوند..... ۵

۱-۱-۶) ملاحظات عبور توان و پایداری دینامیکی در یک شبکه انتقال ۶

۱-۱-۷) اهمیت نسبی پارامترهای قابل کنترل ۹

۱-۱-۸) اهداف FACTS ۱۰

۱-۱-۹) کنترل‌کننده‌های FACTS ۱۱

۱-۱-۱۰) انواع کنترل‌کننده‌های FACTS از نظر نحوه استقرار در شبکه..... ۱۲

۱-۱۰-۱-۱)کنترل‌کننده‌های سری ۱۲

۱-۱۰-۱-۲)کنترل‌کننده‌های موازی ۱۲

۱-۱۰-۱-۳) کنترل‌کننده‌های ترکیبی سری – سری ۱۲

۱-۱۰-۱-۴)کنترل‌کننده‌های ترکیبی سری – موازی ۱۳

۱-۱۱) فواید ادوات FACTS ۱۴

۱-۲)جبران‌سازهای استاتیکی توان راکتیو (STATCOM) ۱۵

۱-۲-۱) مشخصه STATCOM (V-I) و عملکرد آن ۱۷

۱-۲-۲) الزامات کنترلی برای جبران‌ساز ۱۹
۱-۲-۳) مولدهای توان راکتیو نوع کنورتور سوئیچ شونده ۱۹
۱-۲-۴) کنترل توان راکتیو ۲۱
۱-۲-۵) قابلیت تبادل توان حقیقی ۲۱
۱-۲-۶) سیستم کنترل STATCOM ۲۲
۱-۳) جبران ساز توان راکتیو استاتیکی (SVC) ۲۳
۱-۳-۱) راکتور قابل کنترل با تریستور (TCR) ۲۴
۱-۳-۲) راکتور قابل کلید زنی با تریستور (TSR) ۲۴
۱-۳-۳) خازن قابل کلید زنی با تریستور (TSC) ۲۵
۱-۳-۴) سیستم کنترل SVC ۲۵
۱-۳-۵) مشخصه SVC (V-I) و عملکرد آن ۲۶
۱-۴) پایدارساز سیستم قدرت (PSS) ۲۶
۱-۴-۱) کاهش تغییرات سرعت توسط رتور ۲۷
۱-۴-۲) ایجاد مؤلفه گشتاور الکتریکی همفاز با تغییرات سرعت ۲۷
۱-۴-۳) مراحل عملکرد PSS مبتنی بر سرعت به صورت زیر است ۲۸
۱-۴-۴) مقابله با نوسانات فرکانس پایین توسط پایدارساز سیستم قدرت ۲۸
۱-۴-۵) پایدارساز سیستم قدرت کلاسیک ۲۸
۱-۵) پایداری و تعریف آن در سیستم‌های قدرت ۲۹
۱-۵-۱) انواع پدیده‌ها و انواع پایداری در یک سیستم قدرت ۲۹
۱-۵-۲) پایداری دینامیکی در سیستم‌های قدرت ۳۲
۱-۵-۳) پایداری گذرا (سیگنال بزرگ) در سیستم‌های قدرت ۳۲
۱-۶) ضرورت بکارگیری الگوریتم ژنتیک جهت بررسی بهبود پایداری سیستم قدرت..... ۳۳

فصل دوم : الگوریتم ژنتیک ۳۵
۲-۱) مقدمه ۳۵
۲-۲) زمینه‌های بیولوژیکی ۳۶
۲-۳) فضای جستجو ۳۷
۲-۴) مفاهیم اولیه در الگوریتم ژنتیک ۳۸
۲-۴-۱) اصول پایه ۳۸
۲-۴-۲) کدکردن ۳۸
۲-۴-۲-۱) کروموزوم ۳۸
۲-۴-۲-۲) جمعیت ۳۹
۲-۴-۲-۳) مقدار برازندگی ۳۹
۲-۴-۲-۴) عملگر تقاطعی ۴۰
۲-۴-۲-۵) عملگر جهشی ۴۲
۲-۴-۳) مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک ۴۳
۲-۴-۴) خلاصه مراحل روند بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک ۴۴
فصل سوم : بهبود پایداری گذرای سیستم قدرت توسط مکان‌یابی ادوات FACTS موازی ۴۷
۳-۱) سیستم قدرت دو ماشینه و دو ناحیه‌ای مورد مطالعه ۴۸
۳-۲) تحلیل سیستم دو ناحیه‌ای با حضور ادوات FACTS موازی ۴۹
۳-۳) قرارگیری SVC و STATCOM و PSS در سیستم قدرت دو ناحیه‌ای ۵۲
۳-۳-۱) بکارگیری SVC و PSS جهت بهبود پایداری گذرا ۵۳
۳-۳-۲) بکارگیری STATCOM و PSS جهت بهبود پایداری گذرا ۵۵
۳-۳-۳) مقایسه SVC و STATCOM در بهبود پایداری گذرا ۵۸
۳-۴) بکارگیری الگوریتم ژنتیک جهت دستیابی به بهترین مکان قرارگیری آنها ۵۹
۳-۵) تحلیل نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها ۶۴

فصل چهارم: هماهنگی کنترلر میراکننده تکمیلی SVC و PSS جهت کاهش نوسانات سیستم قدرت.....۶۵
۴-۱) ارائه کنترلر میراکننده تکمیلی برای SVC.....۶۵
۴-۲)هماهنگی بین SVC-BSDC و PSS برای بهبود پایداری گذرا توسط الگوریتم ژنتیک.....۶۷
۴-۲-۱) هماهنگی بین SVC- BSDC و PSS در شبکه تک باسه و شین بینهایت ۶۷
۴-۲-۱-۱) وضعیت بارگیری نامی ۶۹
۴-۲-۱-۲) وضعیت بارگیری سنگین ۷۲
۴-۲-۱-۲) وضعیت بارگیری سبک ۷۴
۴-۲-۲) هماهنگی بین SVC- BSDC و PSS در شبکه سه ماشینه و دو ناحیه‌ای ۷۵
۴-۳) تأثیر سیگنال محلی و سیگنال دور به عنوان ورودی SVC- BSDC در بهبود پایداری گذرا ۷۹
۴-۳-۱) سیگنال محلی و سیگنال دور در پایداری شبکه تک باسه و شین بینهایت ۷۹
۴-۳-۲) سیگنال محلی و سیگنال دور در پایداری شبکه دو ماشینه و دو ناحیه‌ای ۸۳
۴-۴) تحلیل نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها ۸۶
فصل پنجم : نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۸۷
ضمیمه ۸۹
مراجع ۹۳

چکیده

سیستم قدرت همیشه در معرض اغتشاشات گوناگونی می‌باشد که ممکن است آن را دچار نوسانات شدید کرده و نهایتاً آن را ناپایدار کند. لذا با تجهیز کردن سیستم قدرت به ادوات SVC، STATCOM و PSS این نوسانات را به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش داده و سرانجام پایداری گذرای آن را می‌توان بهبود داد. نشان داده شده است که تجهیز STATCOM پایداری گذرا را بصورت قابل توجهی نسبت به SVC افزایش داده است. مکان نصب این ادوات نیز در افزایش بهبود پایداری گذرا نقش تأثیرگذاری دارد، که در این رساله به کمک الگوریتم ژنتیک، مکان بهینه قرارگیری STATCOM در سیستم دو ناحیه‌ای مشخص می‌شود. میزان تلفات خط انتقال نیز در تعیین این مکان نیز مؤثر است، لذا با تغییر بار محلی و بار اصلی به کمک الگوریتم ژنتیک مکان بهینه این تجهیز در خط انتقال تعیین، و استنتاج خواهد گردید که با کاهش تلفات در خط انتقال بهترین مکان قرارگیری این تجهیز به سمت مرکز خط انتقال تغییر می‌نماید.

بعلاوه می‌توان با مجهز کردن SVC به سیستم کنترل بر مبنای میراکنندگی نوسانات، این نوسانات را به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش داد و سرانجام پایداری گذرای سیستم قدرت را نسبت به حالت بدون حضور این سیستم کنترل بصورت چشمگیری بهبود بخشید. نشان داده شده است که علاوه بر این، با انجام کنترل هماهنگ بین این سیستم کنترل پیشنهادی و پایدارساز سیستم قدرت توسط الگوریتم ژنتیک میزان پایداری گذرای سیستم قدرت افزایش داده می‌شود. هر دو سیگنال دور و سیگنال محلی را می‌توان به عنوان ورودی سیستم کنترل میراکننده انتخاب کرد، لیکن، سیگنال دور به دلیل اینکه حاوی مدهای نوسانی بهتری نسبت به سیگنال محلی می‌باشد پایداری گذرای سیستم قدرت را به نسبت بیشتری افزایش می‌دهد. به دلیل پیشرفت‌های اخیر در زمینه مخابرات فیبر نوری سیگنال‌های دور (دوردست) می‌توانند به سرعت اندازه‌گیری شده و بصورت همزمان به مرکز کنترل تحویل داده شوند، که در بدترین حالت این سیگنال‌ها تا زیر 50ms اندازه‌گیری و انتقال داده می‌شوند، که این مقدار تأخیر زیاد در میراکردن نوسانات تأثیرگذار نیست.

کلمات کلیدی : ادوات FACTS، PSS، بهبود پایداری گذرا، مکان‌یابی، سیستم کنترل میرا کننده، الگوریتم ژنتیک

فصل اول

مروری بر ادوات FACTS و PSS

۱-۱) مقدمه

شبکه‌های انتقال AC انعطاف‌پذیر (FACTS[1]) یکی از جنبه‌های انقلاب الکترونیک است که توسعه و گسترش آن در همه زمینه‌های سیستم قدرت در حال وقوع می‌باشد. گستره ادوات قدرتمند نیمه‌هادی علاوه بر مزایای کلیدزنی سریع و قابلیت اطمینان، با تکیه بر مفاهیم جدیدی از مدارها فرصت‌هایی را برای ارزشمند نمودن انرژی الکتریکی فراهم می‌کند. درحالی‌که فن‌آوری‌هایی همچون ترانزیستور و میکروالکترونیک بسیاری از جنبه‌های زندگی ما را دچار تحول کرده‌اند تأثیر حائز اهمیت ادوات الکترونیک قدرت در زمینه‌های انرژی و به دنبال آن برمسائل روزمره زندگی را نیز بی‌تردید نمی‌توان نادیده انگاشت. بدیهی است که انقلاب الکترونیک قدرت در حال وقوع است وکاربرد الکترونیک قدرت به گسترش خود ادامه خواهد داد.

در زمینه تولید انرژی کاربرد بالقوه الکترونیک قدرت عمدتاً به انرژی‌های تجدید پذیر معطوف می‌شود. در زمینه توزیع نیرو استفاده از این فن‌آوری امکان تحویل انرژی مناسب به مشترکین صنعتی و تجاری بدون اعوجاج ولتاژ را فراهم کرده است.

---

[1] flexible ac transmission system

امروزه دیگر آشکار است که کاهش بیش از ۱۵ تا ۲۰ درصد ولتاژ در مدت زمانی بیش از چند سیکل بـه تلفـات گسـترده در صنایعی که بیش از پیش به سوی فرآیندهای اتوماسیون می‌رونـد منجـر خواهـد شـد. در زمینـه انتقـال نیـرو کـاربرد الکترونیک قدرت شامل انتقال قدرت جریان مستقیم وFACTS است. با بکارگیری ادوات FACTS در سیسـتم قـدرت می‌توان نقش تعیین‌کننده‌ای را در افزایش قابلیت کنترل و انتقال توان شبکه‌های AC ایفا کرد. [۳۷و۳۸]

۱-۱-۱) ظهور و فرصت‌های آتی FACTS

مشکلات موجود در سیستم‌های انتقال رایج (فاصله، پایداری وکنترل‌پذیری عبور توان) که موجب بهـره‌بـرداری نامناسـب می‌گردد، به همراه تأثیر قابل ملاحظه جبرانگرهای کنترل‌شده منجر به ظهور جبرانگرهای کنترل‌شده به وسیله تجهیـزات الکترونیک قدرت در اواخر دهه ۷۰ میلادی گردید. در سال‌های اخیر گسترش قابل ملاحظه‌ای در این زمینه حاصل شـده است. در اواخر دهه ۸۰ میلادی موسسه EPRI نظریه سیستم‌های انتقال متناوب قابل انعطاف را ارائه کرد. هم‌اکنـون در موسسه تحقیقات صنعت برق (EPRI) در ایالات متحده مطالعاتی تحت عنوان سیستم انتقال قابل انعطـاف (FACTS) با هدف کنترل بلادرنگ سیستم انتقال به وسیله تجهیزات الکترونیک قدرت در دست انجام است.

آنچه که برای برنامه‌ریزان شبکه‌های قدرت در بحث انتقال جالب اسـت، آن اسـت کـه فـن‌آوری FACTS فرصـت‌هـای جدیدی را برای کنترل توان و افزایش ظرفیت بهره‌برداری خطوط موجود و همچنین خطوط جدید و ارتقـاء یافتـه فـراهم می‌کند. امکان کنترل جریان در داخل یک خط انتقال با هزینه‌ای منطقی و افزایش ظرفیت خطـوط موجـود را بـه شـکل خطوطی با هادی‌های بزرگتر و استفاده از یکی از ادوات کنترل‌کننده FACTS عبور تـوان را در چنـین خطـوطی تحـت شرایط عادی و پیش بینی نشده ممکن می‌سازد.

فن‌آوری FACTS همچنین قابلیت آن را دارد که بتوان با استفاده از آن حد انتقال قابل بهره‌برداری را به صورت گام بـه گام و با سرمایه‌گذاری مرحله‌ای در مواقع ممکن و لازم انجام داد.

طراح سیستم می‌تواند پیش‌بینی خود را بر اساس یک سناریوی گسترش یابنـده متشـکل از ادوات کلیـدزنی مکـانیکی و کنترل‌کننده‌های FACTS بنا نهد به گونه‌ای که خطوط انتقال نیروی درگیر با ترکیبی از کنترل‌کننده‌های مکانیکی و FACTSاهداف مورد نظر را در یک برنامه سرمایه‌گذاری مرحله‌ای و مناسب کسب نماید. [۳۷]

۱-۱-۲) شبکه قدرت به هم پیوسته

اغلب سیستم‌های تأمین نیروی برق در جهان به صورت گسترده‌ای به هم پیوسته‌اند. این به هم‌پیوستگی شامل ارتباطات داخلی قلمرو شرکت‌های برق بوده که در حد اتصالات بین شبکه‌ای گسترده شده و در نهایت به شبکه‌های فرا منطقه‌ای و بین المللی توسعه یافته است. این کار به دلایل اقتصادی انجام می‌شود تا هزینه برق کاهش یافته و قابلیت اعتماد آن افزایش یابد.

۱-۱-۳) عبور 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.

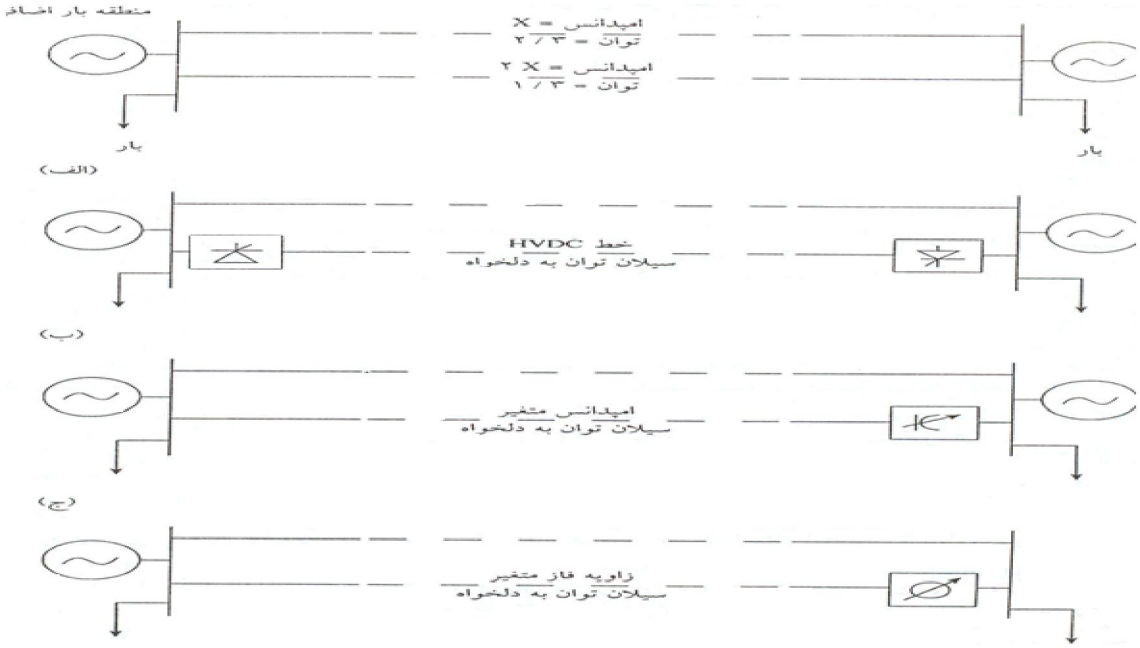
در سیستم‌های قدرت AC ، اگر ذخیره تولید قابل توجهی وجود نداشته باشد، تولید و مصرف برق بایستی در تمام مدت دارای تعادل باشند. تا حدودی، سیستم‌های الکتریکی حالت «خود تنظیم» دارند. اگر تولید کمتر از بار مصرفی باشد، ولتاژ و فرکانس کاهش می‌یابند، و در نتیجه بار تا حد برابر شدن با تولید، منهای تلفات انتقال،کاسته می‌شود. با این وجود برای چنین خود تنظیم کنندگی فقط درصد مختصری حاشیه تغییرات وجود دارد اگر ولتاژ با حمایت توان راکتیو 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 راکتیو نامناسب باشد، سیستم دچار فروپاشی ولتاژ خواهد شد.

اگر مقدار تولید متناسب باشد، مقداری توان اکتیو از مناطقی که مازاد تولید دارند به مناطقی که کمبود دارند جریان می‌یابند، 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 نیروگاه و مناطق بار متعددی گذر می‌کنند. [۳۸]

۱-۱-۴) عبور توان از مسیرهای موازی

یک حالت بسیار ساده از عبور توان در شکل(۱-۱) که از دو مسیر موازی 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 می‌رود. بدون هیچگونه کنترل، عبور 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 اضافه‌بار شده و در نتیجه بارگیری هر دو خط را دچار محدودیت نماید، هرچند خط دیگر که امپدانس بیشتری دارد بطور 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 سرمایه‌گذاری محکوم به شکست است بخصوص اگر خط با امپدانس بالاتر هنوز ظرفیت اضافی داشته باشد.



شکل ۱-۱

۱-۱-۵) عواملی که باعث محدودیت عبور توان در شبکه می‌شوند [۳۸]:

۱-حرارتی

۲-عایقی

۳-پایداری

لازمه عملکرد یک سیستم قدرت AC این است که ژنراتورها از سنکرونیزم خارج نشده و ولتاژها به مقادیر نامی نزدیک باشند. توانایی یک سیستم قدرت در برآورده ساختن این شرایط در صورت وقوع اغتشاش با پایداری ولتاژ، پایداری دینامیکی و گذرا مشخص می‌گردد. حداکثر توان قابل انتقال بوسیله ملاحظات پایداری با در نظر گرفتن ایمنی مورد نظر،

تعیین می‌شود. برای خطوط انتقال یک حد حرارتی در نظر می‌گیرند این امکان وجود ندارد کـه خطـوط همـواره در حـد حرارتی خود کار کنند. توجه به این نکته اهمیت دارد که قابلیت حرارتی یک خط بسته بـه شـرایط محیطـی و تاریخچـه بارگیری خط حاشیه تغییرات گسترده‌ای دارد.

برای مواد عایقی بکار رفته در تجهیزات موجود در سیستم انتقال نیز از نظر تحمل ولتاژ، عبور جریان و پدیده‌هایی ماننـد کرونا محدودیت‌هایی وجود دارد.

۱-۱-۶) ملاحظات عبور توان و پایداری دینامیکی در یک شبکه انتقال[۳۸]

در شکل (**۱-۲** الف) یک حالت ساده شده از عبور توان در یک خط انتقال را نشان می‌دهد. مکان‌های **۱** و **۲** می‌توانند هر پست انتقالی باشند که به وسیله یک خط انتقال به یکدیگر متصل شده‌اند.

پست‌ها می‌توانند دارای بار باشند، دارای تولید باشند و یا صرفاً به صورت نقاط ارتباط بـر روی سیسـتم باشـند کـه بـرای 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 اسـت و از مقدار مقاومت و راکتانس خازنی خط نیز صرف نظر شده است. همـان‌طـور کـه در دیـاگرام فـازوری (شـکل **۱-۲** ب) نشان داده شده، ولتاژ محرک تلفات در خط، اختلاف فازوری E_L است که بـین دو ولتـاژ فـازوری E_1 و E_2 وجـود دارد. مقدار جریان خط بصورت زیر بدست 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 خـط، در مقایسـه بـا ولتـاژ خط مقدار کوچکی است. برای مثال وقتی مقادیر E_1 وE_2 برابر باشند و مقدار X برابر 0.2^{pu} باشد ، زاویه δ تنها برابـر 0.2^{rad} یا11.5 درجه خواهد بود شکل (۱-۲ ج) ، نظیر شکل(۱-۲ ب) دیاگرام فازوری رابطه میان جریـان‌هـای اکتیـو و راکتیو بر پایه ولتاژ دو سر خط نشان می‌دهد.

مؤلفه اکتیو عبور جریان در E_1 عبارت است از :

$$I_{P1} = (E_2 \sin\delta)/X \qquad (۱-۱)$$

مؤلفه راکتیو عبور جریان در E_1 عبارت است از :

$$I_{q1} = (E_1 - E_2\cos\delta)/X \qquad (۲-۱)$$

به این ترتیب توان اکتیو در طرف E_1 :

$$P_1 = E_1(E_2 \sin\delta)/X \qquad (۳-۱)$$

و توان راکتیو در طرف E_1 :

$$Q_1 = E_1(E_1 - E_2\cos\delta)/X \qquad (۴-۱)$$

به همین ترتیب مؤلفه اکتیو عبور جریان در E_2 عبارت است از :

$$I_{p2} = (E_1\sin\delta)/X \qquad (۵-۱)$$

و مؤلفه راکتیو عبور جریان در E_2 عبارت است از :

$$I_{q2} = (E_2 - E_1\cos\delta)/X \qquad (۶-۱)$$

لذا توان اکتیو در طرف E_2 :

$$P_2 = E_2\,(E_1\sin\delta)/X \qquad (۷-۱)$$

و توان اکتیو در طرف E_2:

$$Q_2 = E_2\,(E_2 - E_1\cos\delta)/X \qquad (۸-۱)$$

طبیعتاً P_1 و P_2 یکی هستند :

$$P = E_1\,(E_2\sin\delta)/X \qquad (۹-۱)$$

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 امپدانس داخلی دو ماشین معادل هستند شکل(۱-۲ د) یک نیمه موج سینوسی توان اکتیو 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 .

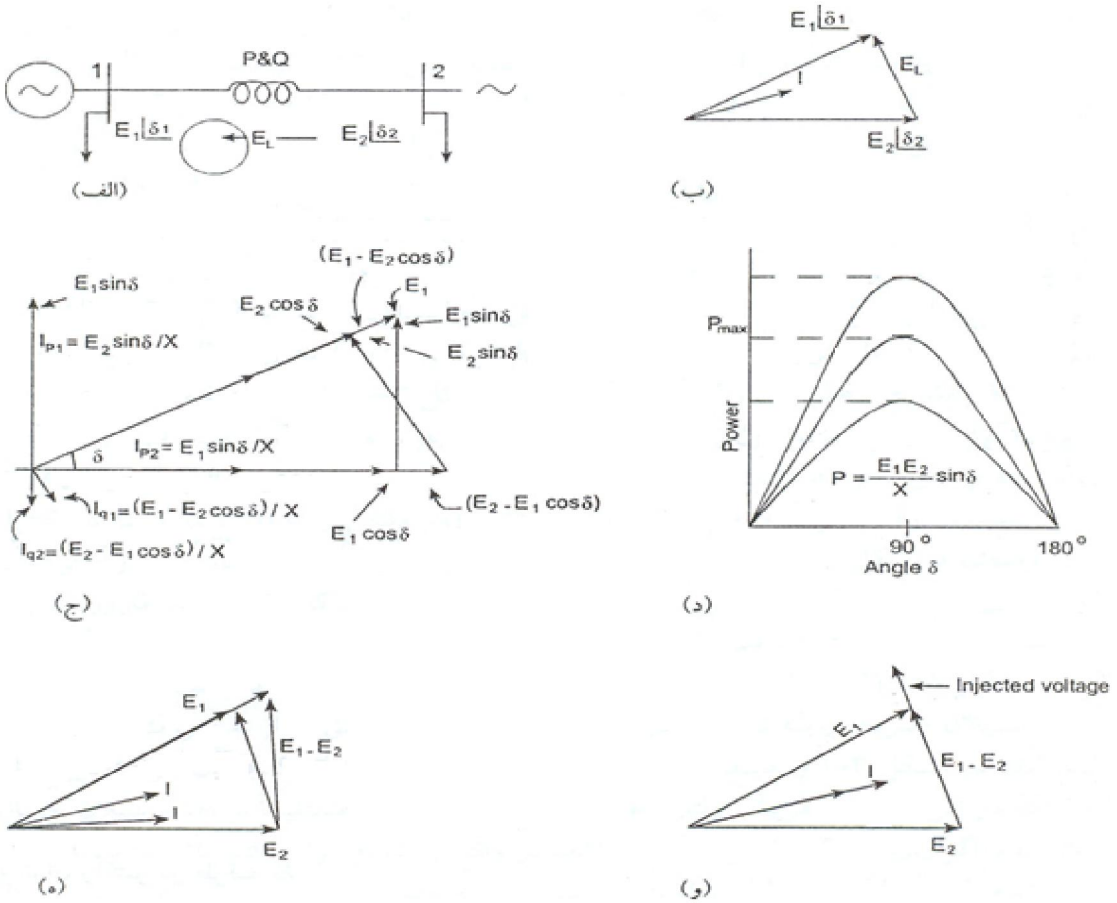
افزایش و کاهش مقدار X همان‌گونه که در شکل(**۱-۲** -د) نشان داده شده ،ارتفاع منحنی را به ترتیب افزایش و کـاهش خواهد داد. برای یک عبورتوان داده شده، تغییرX متناظراً زاویه بین دو انتهای خط را تغییر خواهد داد.

عبور توان و جریان را می‌توان با تنظیم مقدار فازور ولتاژ E_1 یا فازور ولتاژ E_2 نیز کنترل کرد. با این وصف، در شکل **۱-۲** دیده می‌شود.

عبور جریان به تبع آن عبور توان را می‌توان با تزریق ولتاژ به صورت سـری در خـط نیـز تغییـر داد. در شـکل(**۱- ۲** -و)، دیده می‌شود که وقتی ولتاژ تزریق شده با جریان دارای زاویه ۹۰ درجه باشد مستقیماً بر مقدار عبـور جریـان تـأثیر مـی-گذارد و اگر زاویه اندکی با جریان داشته باشد، در واقع بر عبور توان اکتیو تأثیر می‌نماید .

بطور جایگزین، ولتاژی که به صورت سری به خط تزریق شده، می‌تواند بصورت فازوری باشد که مقدار و رابطه فازوری آن با ولتاژ خط متغیر است. در شکل (**۱-۲**) دیده می‌شود که با تغییر مقدار و زاویه فازی ولتاژ تزریق شده، هم جریان اکتیـو و هم جریان راکتیو می‌توانند تأثیر بپذیرند. روش‌های تزریق ولتاژ، مهـم‌تـرین سـهم را در کنتـرل‌کننـده‌هـای FACTS دارند.

عبور جریان، به تبع آن عبور توان را می‌توان با تزریق ولتاژ به صورت سـری در خـط نیـز تغییـر داد. در شـکل(**۱- ۲** -و)، دیده می‌شود که وقتی ولتاژ تزریق شده با جریان دارای زاویه ۹۰ درجه باشد مستقیماً بر مقدار عبـور جریـان تـأثیر مـی-گذارد و اگر زاویه اندکی با جریان داشته باشد، در واقع بر عبور توان اکتیو تأثیر می‌نماید.



شکل ۱-۲- عبور توان در یک خط انتقال

۱-۱-۷) اهمیت نسبی پارامترهای قابل کنترل [۳۸]

با مراجعه به مباحث بالا و شکل (۱-۲)، توجه به چند نکته اساسی در مورد امکانات کنترل عبور توان، ارزشمند می‌باشد :

کنترل امپدانس خط X (مثلاً با یک خازن سری کنترل شونده با تریستور) می‌تواند ابزار قدرتمندی برای کنترل جریان فراهم کند.

هنگامیکه زاویه فاز زیاد نباشد، که معمولاً نیز چنین است، کنترل X با زاویه در واقع کنترل توان اکتیو را تأمین می‌کند.

کنترل زاویه (مثلاً به کمک یک تنظیم‌کننده زاویه فاز) که به نوبه خود ولتاژ محرک را کنترل می‌کند، هنگامیکه زاویه مقدار زیادی ندارد، ابزار قدرتمندی برای کنترل عبورجریان و لذا عبور توان اکتیو را فراهم می‌کند.

تزریق یک ولتاژ به صورت سری در خط و به صورت عمود بر جهت عبور جریان، می‌تواند مقدار عبور جریان را افـزایش یـا کاهش دهد. از آنجا که عبور جریان نسبت به ولتاژ محرک به اندازه **۹۰** درجه تأخیر فاز دارد، ایـن امـر بـه معنـای تزریـق توان راکتیو به صورت سری می‌باشد، (بعنوان مثال به وسـیله جبـران‌سـاز سـنکرون سـری اسـتاتیکی) و مـی‌توانـد ابـزار قدرتمندی برای کنترل جریان خط و لذا توان اکتیو 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 خـط را کنتـرل نماید. این امر به معنای آن است که تزریق یک فازور ولتاژ با زاویه فاز متغیر می‌تواند ابزار قدرتمندی برای کنتـرل دقیـق عبور توان اکتیو و راکتیو فراهم کند. این کار نیاز به تزریق هر دو توان اکتیو و راکتیو به صورت سری دارد.

از آنجا که عدد امپدانس پریونیت خط، معمولاً کسر کوچکی از ولتاژ خط است، مقدار MVA یک کنتـرل کننـده سـری اغلب کسر کوچکی از MVA توان عملیاتی خط خواهد بود.

هرگاه زاویه فاز بزرگ نباشد، کنترل مقدار ولتاژ خط (مثلاً با یک تنظیم‌کننـده ولتـاژ تریسـتوری) مـی‌توانـد ابـزار بسـیار مقرون به صرفه‌ای برای کنترل عبور توان راکتیو در شبکه باشد.

ترکیبی از کنترل‌کننده امپدانس خط با کنترل‌کننده سری، و تنظیم ولتاژ با کنترل‌کننده موازی می‌تواند ابزار مقـرون بـه صرفه‌ای برای کنترل عبور هر دو توان اکتیو و راکتیو بین دو سیستم باشد.

۱-۱-۸) اهداف FACTS[۳۷]

۱. افزایش قابلیت انتقال توان سیستم‌های انتقال
۲. عبور دادن توان از مسیرهای مورد نظر
۳. دست‌یابی به استراتژی کنترل بهینه و سیستم پروتکل‌های امنیتی و ارتباطات مخابراتی

هدف اول به این معنی است که اگر پایداری سیستم در هنگام وقوع خطا و پـس از آن بـا اعمـال کنتـرل بلادرنـگ تـوان حفظ شود می‌توان توان انتقالی را تا رسیدن به حد حرارتی افزایش داد. در صورتی کـه بـا اعمـال کنتـرل‌هـای بلادرنـگ پایداری حفظ گردد. البته این هدف بدان معنی نیست که خطوط همیشه در حد حرارتی خود کار کند، زیرا تلفات انتقـال زیاد و غیر قابل قبول خواهد بود .

اما این امر در شرایط اضطراری ممکن است بکار گرفته شود. با استفاده از کنترل‌کننده‌های FACTS به جای در نظر گرفتن حاشیه پایداری بزرگ، انتقال توان در وضعیت عادی به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش خواهد یافت.

هدف دوم بیان می‌دارد که در صورت قابل کنترل‌بودن جریان خط می‌توان عبور توان را از طریق کریدورهای انتقال دلخواه عبور داده و عبور گردشی توان را محدود کرد و همچنین این هدف به صورت حتمی بیان می‌دارد که تغییر سریع مسیر عبور توان در صورت وقوع حادثه ای باید امکان پذیر باشد تا عبور توان در کل سیستم انتقال به شکل دلخواه باشد.

واضح است دو هدف اول بطور قابل ملاحظه‌ای بر بهره‌برداری از سیستم‌های انتقال موجود اثر گذاشته و نقش مهمی در تسهیل تحقق سیستم‌های با ساختار نوین رقابتی خواهد داشت. انجام دو هدف مذکور مستلزم بهبود گسترش کنترل-کننده‌ها و جبرانگرهای توان بالا می‌باشد.

تکنولوژی مورد نیاز برای این مسأله در تجهیزات الکترونیکی فشار قوی و کنترل بلادرنگ آنها نهفته است. هنگامیکه تعداد مناسبی از این کنترل‌کننده‌ها و جبرانگرهای سریع در کل سیستم قرار داده شده کنترل کلی سیستم برای دست-یابی به حداکثر مزایای ممکن و جلوگیری از بروز عکس العمل‌های نامناسب بین آرایش های مختلف سیستم و اهداف مورد نظر مسأله تکنولوژیک مهمی به وجود خواهد آورد. در این میان دست‌یابی به استراتژی کنترل بهینه و سیستم پروتکل‌های امنیتی و ارتباطات مخابراتی اهمیت دارد. می‌توان تحقق کنترل بهینه چنین سیستمی را به نوعی هدف سوم FACTS به شمار آورد.

۱-۱-۹) کنترل‌کننده‌های FACTS[۳۷]

تکامل کنترل‌کننده‌های FACTS منجر به پدید آمدن دو روش مختلف شده است. با هر کدام از این روش‌ها گروهی از کنترل‌کننده‌ها ابداع شده و همگی قادر به بر آورده کردن مسائل خطوط انتقال می‌باشد.

انواع کنترل‌کننده‌های FACTS از نظر ساختار:

- در گروه اول از امپدانس‌های راکتیو با ترانسفورماتورهای تغییردهنده تپ و کلیدهای تایریستوری برای کنترل استفاده می‌شود.
- در گروه دوم از مبدل‌های استاتیکی با کموتاسیون خودی به عنوان منابع ولتاژ کنترل‌شده استفاده می‌شود.

۱-۱-۱۰) انواع کنترل‌کننده‌های FACTS از نظر نحوه استقرار در شبکه[۳۸]

۱. کنترل‌کننده‌های سری
۲. کنترل‌کننده‌های موازی (شنت)
۳. کنترل‌کننده‌های ترکیبی سری – سری
۴. کنترل‌کننده‌های ترکیبی سری – موازی

۱-۱-۱۰-۱) کنترل‌کننده‌های سری

مطابق شکل ۱-3-ب کنترل‌کننده سری می‌تواند یک امپدانس متغیر باشد، مثل خازن، راکتور و... با یک منبع متغیر فرکانس اصلی یا زیرسنکرون و فرکانس‌های هارمونیکی مبنی بر الکترونیک قدرت باشد که نیاز مورد نظر را برآورده نماید. در اصل همه کنترل‌کننده‌های 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 زمانی‌که ولتاژ بر جریان خط عمود است کنترل‌کننده سری فقط مقادیری توان راکتیو تأمین یا مصرف می‌کند، هر اختلاف فاز دیگری جابجایی توان حقیقی را نیز بدنبال خواهد داشت.

۱-۱-۱۰-۲) کنترل‌کننده‌های موازی

شکل (۱-۳-ج) مثل حالت کنترل‌کننده‌های سری، کنترل‌کننده موازی می‌تواند امپدانس متغیر، منبع متغیر یا ترکیبی از آن باشد. در اصل همه کنترل‌کننده‌های موازی در نقطه اتصال خود جریان به سیستم تزریق می‌کنند. حتی یک امپدانس متغیر که به ولتاژ خط متصل شده باشد موجب عبور جریان متغیری شده و لذا نماینده تزریق جریان به داخل خط است.

تا زمانی که جریان تزریق شده و ولتاژ خط عمود باشد،کنترل‌کننده موازی فقط مقادیری توان راکتیو تأمین یا مصرف می‌کند. هر اختلاف فاز دیگری، جابجایی توان حقیقی را نیز بدنبال خواهد داشت.

۱-۱-۱۰-۳) کنترل‌کننده‌های ترکیبی سری – سری

شکل(۱-۳-د) این وسیله می‌تواند ترکیبی از کنترل‌کننده‌های سری جداگانه باشد که در چند خط انتقال یک سیستم نصب شده و به صورت هماهنگ‌شده کنترل می‌شوند. یا می‌تواند یک کنترل‌کننده یکپارچه شده باشد که در آن کنترل-