پایان نامه دوره کارشناسی ارشد برق
گرایش الکترونیک

مکان یابی کنترل کننده یکپارچه پخش توان با هدف جبران سازی افت ولتاژ و مدیریت تراکم

صابر ایزدپناه طوس

استاد راهنما:

خانم دکتر حسن پور

بهار ۱۳۹۱

بسم الله الرحمن الرحيم

اعتراف می‌کنم که نه زبان شکر تو را دارم و نه توان تشکر از بندگان تو، اما بر حسب وظیفه

از کلیه اساتید ارجمندم در طول سال‌های به یاد ماندنی شاگردیشان تشکر می‌نمایم. از استاد ارجمندم خانم دکتر حسن‌پور برای راهنمایی، مشاوره و هدایت این پایان‌نامه خاضعانه سپاسگزارم. همچنین از اساتید عزیز آقایان دکتر مافی‌نژاد، دکتر نبوتی، دکتر قائنی، دکترگلمکانی و دکتراحدی اخلاقی که دوران تحصیل راهنما و مشوق اینجانب بوده و همواره از ایده‌های خوب آنان بهره مند گردیده‌ام، تقدیر و تشکر می‌نمایم.

در پایان از پدر و مادر عزیزم و همه فرشتگانی که بال‌های محبت خود را گسترانیدند و با تحمل دشواری‌ها، سبب شدند تا در کمال آسودگی خیال و فراغت بال، شوق آموختن در من زنده بماند صمیمانه سپاسگزارم و این نیست جز جلوه‌ای از لطف و رحمت پرودگاری که از ادای شکر حتی یک نعمت او ناتوانم.

چکیده

در سال‌های اخیر، پیشرفت در قطعات نیمه هادی توان بالا باعث توسعه یک کاربرد جدید در سیستم‌های قدرت شده است، که به عنوان سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر[1] شناخته شده‌اند. ادوات FACTS در سیستم قدرت می‌تواند قابلیت کنترل و انعطاف پذیری در تمام سیستم را از طریق اجزای الکترونیک قدرت بهبود بخشد. کنترل کننده یکپارچه پخش توان[2] یک تجهیز قوی و با چند کاربرد در بین تمام ادوات FACTS است. کنترل کننده یکپارچه پخش توان توانایی کنترل همزمان پارامترهای اساسی انتقال اعم از راکتانس خط، دامنه و اختلاف فاز ولتاژهای طرفین خط را دارد. UPFC از دو منبع ولتاژ سری که به صورت پشت به پشت از طریق یک خازن DC وصل شده، تشکیل شده است. یک منبع ولتاژ سری AC به خط انتقال تزریق می‌کند و با کنترل کردن اندازه و فاز ولتاژ تزریقی، پخش بار را تنظیم می‌کند. مبدل ولتاژ سری با خط انتقال، توسط یک ترانسفورماتور سری وصل شده است. مبدل موازی می‌تواند توان اکتیو و راکتیو را به طور مستقل جبران‌سازی موازی کند. UPFC قابلیت کنترل مستقل هر دو توان اکتیو و راکتیو را در خط دارد. با توجه به اینکه هزینه نصب و راه اندازی دستگاه بسیار بالا است، لذا نکته مهمی که باید در نظر گرفت مکان یابی بهینه UPFC می‌باشد. مکان‌یابی بهینه UPFC می‌تواند به منظور بهبود شرایط استاتیکی و یا به منظور بهبود افزایش پایداری دینامیکی سیستم باشد.

در سیستم‌های قدرت افزایش بار شبکه موجب افت ولتاژ در باس‌ها می‌شود. افت ولتاژ بیش از حد در شبکه باعث فروپاشی ولتاژ و درنتیجه خاموشی در شبکه می‌شود. روش‌های مختلفی برای جلوگیری و جبران سازی افت ولتاژ در زمان افزایش بار شبکه وجود دارد که می‌توان به خازن گذاری در شبکه و استفاده از سیستم‌های انتقال انعطاف پذیر جریان متناوب اشاره کرد. همچنین از آنجا که محدودیت انتقال توان شبکه اساساً با کنترل فلوی شبکه قابل رفع یا کاهش است، لذا استفاده از این عناصر برای مدیریت تراکم نیز بسیار مفید به نظر می‌رسد.

در این پایان نامه به منظور جلوگیری از افت ولتاژ در هنگام افزایش بار شاخص‌های جدیدی برای مکان‌یابی سیستم‌های انتقال انعطاف پذیر جریان متناوب از جمله UPFC پیشنهاد شده است. برای استفاده بهینه از قابلیت‌های UPFC، روش پیشنهادی با معیار سهم هزینه تراکم[3] به منظور جبران سازی افت ولتاژ و مدیریت تراکم ترکیب شده است.

[1] Flexible AC Transmission System (FACTS)
[2] Unified Power Flow Controller
[3] Congestion Rent Contribution

فهرست مطالب

فصل اوّل:

مقدمه ۱

فصل دوّم:

کنترل کننده یکپارچه پخش توان ۴

۲-۱ مقدمه ۴

۲-۲ مدل تزریق UPFC ۵

۲-۳ مدهای کاری UPFC ۹

فصل سوّم:

مکان یابی بهینه کنترل کننده یکپارچه پخش توان ۱۱

۳-۱ مقدمه ۱۱

۳-۲ مکان یابی بهینه UPFC با هدف کاهش هزینه های تولید، سرمایه گذاری و بهبود پروفایل ولتاژ ۱۲

۳-۳ تاثیر UPFC بر مدیریت تراکم انتقال ۱۶

۳-۳-۱ مفهوم تراکم ۱۶

۳-۳-۲ مکان یابی بهینه UPFC با هدف مدیریت تراکم انتقال ۱۷

۳-۴ جایابی بهینه UPFC با هدف افزایش بارپذیری ۲۱

۳-۵ مکان یابی بهینه UPFC با هدف افزایش بارپذیری، کاهش هزینه سوخت وUPFC و کاهش تلفات توان ۲۲

۳-۶ مکان یابی بهینه UPFC با هدف افزایش امنیت سیستم ۲۵

۳-۷ مکان یابی بهینه UPFC با هدف حداقل سازی نیازهای قطع بار ۲۷

۳-۸ مکان یابی بهینه UPFC با هدف افزایش ظرفیت انتقال قابل استفاده..... ۲۹

۳-۸-۱ مفهوم ظرفیت انتقال قابل استفاده ۳۰

۳-۸-۲ فرمول بندی مساله ۳۰

فصل چهارم:

مکان یابی کنترل‌کننده یکپارچه پخش توان با هدف جبران سازی افت ولتاژ در زمان افزایش بار شبکه ۳۲

۴-۱ مقدمه ۳۲

۴-۲ روش پیشنهادی ۳۳

۴-۳ مطالعه موردی ۳۵

۴-۴ نتیجه گیری ۳۸

فصل پنجم:

مکان یابی کنترل‌کننده یکپارچه پخش توان با هدف جبران سازی افت ولتاژ در زمان افزایش بار شبکه و مدیریت تراکم با معیار سهم هزینه تراکم..... ۳۹

۵-۱ مقدمه ۳۹

۵-۲ روش پیشنهادی ۳۹

۵-۲-۱ بررسی معیار سهم هزینه تراکم ۴۰

۵-۳ مطالعه موردی ۴۱

۵-۳-۱ جبران سازی افت ولتاژ در زمان افزایش بار شبکه ۴۲

۵-۳-۲ مدیریت تراکم ۴۴

۵-۳-۳ تعیین مکان بهینه نصب UPFC ۴۵

۵-۴ نتیجه گیری ۴۹

فصل ششم:

نتیجه گیری و پیشنهادات ۵۰

۶-۱ نتیجه گیری ۵۰

۶-۲ پیشنهادات ۵۱

مراجع ۵۲

پیوست ۵۵

اطلاعات شبکه ۲۳ باس ۵۵

فهرست اشکال

شکل(۲-۱): ساختار کنترل کننده یکپارچه توان ۴

شکل(۲-۲): ساختار مدار الکتریکی UPFC ۵

شکل(۲-۳): منبع ولتاژ سری ۶

شکل(۲-۴): منبع ولتاژ سری تبدیل شده ۶

شکل(۲-۵): منبع ولتاژ سری تبدیل شده با تزریق توان به باس ۷

شکل(۲-۶): تزریق توان به باس از UPFC ۷

شکل(۲-۷): مدل تزریق UPFC ۸

شکل(۲-۸): تنظیم ولتاژ ۹

شکل(۲-۹): جبران سازی سری ۹

شکل(۲-۱۰): شیفت فاز ۱۰

شکل(۳-۱): فلوچارت الگوریتم پیشنهاد شده [۷] ۱۵

شکل(۴-۱): الگوریتم پیشنهادی برای تعیین مکان بهینه UPFC ۳۴

شکل(۴-۲): شبکه ۱۴ باس IEEE با نصب UPFC در باس ۹ و خط ۹-۱۰ ..... ۳۷

شکل(۴-۳): مجموع افت ولتاژ شبکه قبل و بعد از نصب UPFC ۳۸

شکل(۵-۱): شبکه ۲۳ باس ۴۱

فهرست جداول

جدول (۴-۱): نتایج پخش بار قبل از افزایش بار شبکه ۳۵
جدول (۴-۲): محاسبه VDI برای j=1 ..... ۳۵
جدول (۴-۳): محاسبه VDI برای j=2 ..... ۳۶
جدول (۴-۴): محاسبه VDI برای j=3 ..... ۳۶
جدول (۴-۵): رتبه بندی باس‌ها بر اساس TVDI ۳۶
جدول (۴-۶): نتایج پخش بار و محاسبه TVDNI پس از نصب UPFC در باس‌های کاندید ۳۷
جدول (۴-۷): نتایج پخش بار با نصب UPFC در باس ۹ و خط ۹-۱۰ ..... ۳۸
جدول (۵-۱): نتایج پخش بار قبل از افزایش بار شبکه ۴۲
جدول (۵-۲): محاسبه VDI برای j=1 ..... ۴۲
جدول (۵-۳): محاسبه VDI برای j=2 ..... ۴۳
جدول (۵-۴): رتبه بندی باس‌ها بر اساس TVDI ۴۳
جدول (۵-۵): مقدار اختلاف LMP ها، هزینه تراکم هر خط، کل هزینه تراکم خطوط و سهم هر خط در تراکم بدون حضور UPFC ۴۴
جدول (۵-۶): تعیین مکان‌های مناسب نصب UPFC ۴۵
جدول (۵-۷): نتایج شبیه سازی با نصب UPFC در باس ۸ ..... ۴۵
جدول (۵-۸): نتایج شبیه سازی با نصب UPFC در باس ۵ ..... ۴۶
جدول (۵-۹): نتایج شبیه سازی با نصب UPFC در باس ۱۵ ..... ۴۶
جدول (۵-۱۰): نتایج شبیه سازی با نصب UPFC در باس ۱۷ ..... ۴۷
جدول (۵-۱۱): نتایج شبیه سازی با نصب UPFC در خطوط مختلف ۴۷

جدول (۵-۱۲): نتایج شبیه سازی با نصب UPFC در خط ۸-۹ ..... ۴۸

جدول (۵-۱۳): نتایج شبیه سازی با نصب UPFC در باس‌های ۱۳ و ۱۴ (خط ۱۳-۱۴) ۴۸

جدول (پ-۱): اطلاعات بار ۵۵

جدول (پ-۲):اطلاعات ژنراتور ۵۵

جدول (پ-۳): اطلاعات ترانسفورماتور ۵۵

جدول (پ-۴): اطلاعات باس ۵۶

جدول (پ-۵): اطلاعات خطوط ۵۶

فصل اول

مقدمه

بهره برداری مفید و بهینه از سیستم قدرت از عوامل پیشرفت صنعت برق در عرصه تولید و انتقال است. هدف اساسی در سیستم قدرت تامین انرژی الکتریکی مورد نیاز مصرف کنندگان است به طوریکه انرژی الکتریکی با کیفیت مطلوب و با کمترین هزینه به دست مصرف کننده برسد. توان عبوری در یک خط انتقال تابعی از امپدانس خط، اندازه ولتاژ پایانه‌ها و نیز زاویه بین این دو ولتاژ می‌باشد.

از لحاظ تئوری یک خط انتقال قادر است توانی را تا حد ظرفیت بارگیری خود انتقال دهد، اما در عمل قبل از رسیدن به حد حرارتی، که همان ظرفیت واقعی است، ممکن است محدودیت‌های دیگری امکان استفاده بهینه از تمام ظرفیت انتقال را محدود کند. عوامل اصلی محدود کننده ظرفیت یک خط انتقال و بالتبع آن ظرفیت انتقال شبکه محدودیت حرارتی، محدودیت ولتاژ و محدودیت‌های بهره برداری می‌باشند. برای غلبه بر محدودیت‌های انتقال انرژی و استفاده بهینه از ساختار شبکه، راه حل‌هایی ارائه شده است که از مهمترین آن‌ها می‌توان به تغییر در ساختار شبکه موجود، استفاده از جبران‌سازها جهت کنترل پارامترهای شبکه و تکنولوژی خطوط انتقال فشارقوی DC اشاره نمود.

با پیشرفت الکترونیک قدرت و ساخت نیمه هادی‌های توان بالا، تحولی عظیم در زمینه جبران سازهای سیستم قدرت به وجود آمده است که حاصل آن ایجاد تکنولوژی جدید جبران سازها تحت عنوان FACTS است. از عواملی که نیاز به ادوات FACTS را درشبکه‌های انتقال موجود ضروری می‌سازد مسائل اشتراکی تبادل انرژی و توان و بازارهای تجدید ساختار یافته است که در آن‌ها میزان تولید به سرعت تغییر می‌کنند و اضافه کردن تجهیزات انتقال به دلایل اقتصادی و مسائل زیست محیطی محدود می‌باشد. بنابراین برای بر طرف کردن این مساله به تغییر سیستم انتقال بدون احداث خطوط جدید نیاز است که تکنولوژی FACTS به این نیاز پاسخ می‌دهد [۱].

کاربردهای اصلی ادوات FACTS عبارتند از:

۱) کنترل پخش توان
۲) افزایش ظرفیت خط انتقال
۳) کنترل ولتاژ
۴) جبران سازی توان راکتیو

۵) بهبود پایداری
۶) بهبود کیفیت توان
۷) کاهش فلیکر [۲].

ادوات FACTS به طور کلی به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند:

۱) ادوات FACTS کنترل شونده با تریستور[1] :

در این گروه ادواتی قرار دارند که در ساختار خود از عناصر پسیو نظیر خازن‌ها، راکتورها و نیز ترانسفورماتورهای تپ چنجردار در کنار کلیدهای تریستوری استفاده می‌کنند.

برخی از ادوات FACTS کنترل شونده با تریستور:

SVC[2] : جبران کننده استاتیکی توان راکتیو

TCSC[3] : خازن سری کنترل شونده با تریستور

TCPST[4] : ترانسفور جابجا کننده فاز کنترل شونده با تریستور

TCR[5] : راکتور کنترل شونده با تریستور

۲) ادوات FACTS بر پایه مبدل منبع ولتاژ[6] :

در این گروه ادواتی مطرح هستند که در ساختار خود از مبدل‌های منبع ولتاژ بر پایه کلیدهای نیمه هادی با قابلیت خاموش شدن استفاده می‌کنند.

برخی از ادوات FACTS بر پایه مبدل منبع ولتاژ:

STATCOM[7] : جبران کننده سنکرون استاتیکی

SSSC[8] : جبران کننده سری سنکرون استاتیکی

UPFC[9] : کنترل کننده یکپارچه پخش توان

[1] Thyristor Controlled FACTS
[2] Static Var Compensator
[3] Thyristor Controlled Series Capacitor
[4] Thyristor Controlled Phase Shifter Transformer
[5] Thyristor Controlled Reactor
[6] Voltage Source Converter (VSC)
[7] Static Synchronous Compensator
[8] Static Synchronous Series Compensator
[9] Unified Power Flow Controller

IPFC[1] : کنترل کننده بین خطی توان [۱].

روش دیگر دسته بندی ادوات FACTS بر اساس نحوه اتصال آن‌ها به سیستم قدرت است، که به سه دسته تقسیم می‌شوند [۳] و [۴]:

۱) موازی (SVC ،STATCOM)
۲) سری (TCSC ،SSSC)
۳) سری- موازی (TCPST ،UPFC)
۴) سری- سری (IPFC)

گرچه یک کنترلر FACTS هزینه سرمایه گذاری زیادی دارد اما باید توجه داشت در طول عمر عملکرد خود، سال‌ها بهبود ولتاژ و کنترل توان را با هزینه تعمیر و نگهداری کمی انجام خواهد داد. در هر حال برای بهینه کردن و استفاده هر چه مفیدتر از این ادوات، در نظر گرفتن سه موضوع زیر ضروری است:

۱) نوع ادوات مورد استفاده
۲) مقدار نامی ادوات
۳) بهترین محل نصب ادوات در سیستم

نصب ادوات FACTS در مکان‌های مختلف شبکه، مزایای متفاوتی دارد. برای تحقق اهداف مورد نظر، نوع مناسب ادوات، مکان آن‌ها و مقدار نامی آن‌ها باید به طور هم زمان تعیین شود.

در فصل دوم با معرفی کنترل کننده یکپارچه پخش توان ، سعی بر آن است تا پیش زمینه‌ی لازم برای درک مطالب را فراهم شود. در این فصل عملکرد، مدل و روابط UPFC مختصر مورد بحث قرار گرفته است. در فصل سوم روش‌ها و شاخص‌های مطرح شده برای مکان یابی بهینه UPFC مورد بررسی قرار گرفته اند. در فصل چهارم روشی جدید برای مکان یابی بهینه UPFC با هدف جبران سازی افت ولتاژ در زمان افزایش بار شبکه پیشنهاد شده است. در فصل پنجم روش پیشنهادی با معیار سهم هزینه تراکم[2] ترکیب شده و روشی جدید برای مکان یابی بهینه UPFC با دو هدف جبران سازی افت ولتاژ و مدیریت تراکم ارائه شده است و در فصل پنجم نتیجه‌گیری از بحث‌های گفته شده در مورد مکان یابی بهینه UPFC و پیشنهادات آورده شده است.

[1] Interline Power Flow Controller
[2] Congestion Rent Contribution

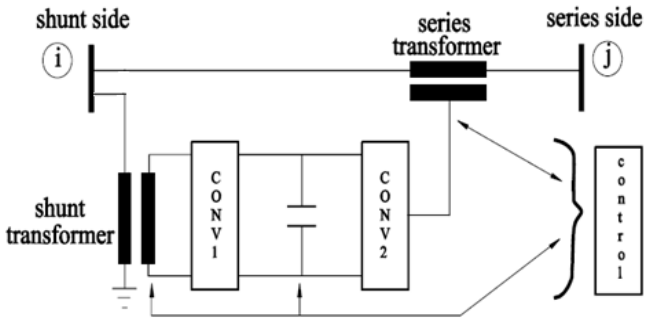
فصل دوم

کنترل کننده یکپارچه پخش توان

در این فصل کنترل کننده یکپارچه پخش توان مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. در ابتدا عملکرد UPFC و روابط مربوطه توضیح داده شده اند و سپس مدهای کاری UPFC بیان خواهند شد.

۲-۱ مقدمه

کنترل کننده یکپارچه توان – سال ۱۹۹۱ توسط Gyugyi- آخرین دستاوردی است که پیشرفت‌های اخیر صنعت الکترونیک قدرت در سطوح بالای توان و نیز تکنولوژی‌های کنترلی به سیستم‌های انتقال انرژی AC عرضه داشته است. کنترل کننده یکپارچه پخش توان می‌تواند به طور جداگانه یا به صورت ترکیبی هر سه پارامتر انتقال (ولتاژ، امپدانس و زاویه فاز) را کنترل نماید. توان‌های اکتیو و راکتیو عبوری از خط انتقال نیز مستقل از یکدیگر توسط UPFC قابل کنترل اند. این کنترل کننده که ساختار آن در شکل (۲-۱) نشان داده شده است متشکل از دو مبدل منبع ولتاژ است که به صورت پشت به پشت و از طریق یک باس DC به یکدیگر اتصال دارند. این دو مبدل که با شماره ۱ و۲ مشخص شده اند از طریق یک خط DC مشترک تغذیه می‌شوند. چنین ساختاری به عنوان یک مبدل توان AC به AC ایده آل رفتار می‌کند که توان حقیقی می‌تواند آزادانه در هر دو جهت بین ترمینال‌های AC دو مبدل جریان یابد و هر مبدل می‌تواند به طور مستقل توان راکتیو را در ترمینال AC خروجی‌اش با شبکه مبادله نماید.



شکل(۲-۱): ساختار کنترل کننده یکپارچه توان [۵]

وظیفه اصلی مبدل شماره ۱ که به صورت موازی با خط است تغذیه تقاضای توان اکتیو مورد نیاز مبدل شماره۲- که به صورت سری با خط است - از طریق خط DC مشترک می‌باشد. این تقاضا از طریق مبدل شماره ۱ و از طریق ترانسفورماتور موسوم به ترانسفورماتور تغذیه به خط انتقال می‌پیوندد. توان اکتیو مبادله

شده بین مبدل سری و سیستم برابر توان اکتیو مبادله شده بین سیستم و مبدل موازی می‌باشد. مبدل شماره ۱ همچنین توانایی تولید یا جذب توان راکتیو به صورت کنترل شده را دارد و بدین وسیله می‌توان جبران‌سازی موازی را به صورت مستقل و در صورت نیاز فراهم آورد. وظیفه مبدل شماره ۲ تزریق یک ولتاژ سری با دامنه و زاویه فاز قابل کنترل می‌باشد. این ولتاژ تزریقی از طریق یک ترانسفورماتور موسوم به ترانسفورماتور تزریق به صورت سری به خط انتقال تزریق می‌شود. عبور جریان خط انتقال از این ترانسفورماتور منجر به مبادله توان اکتیو و راکتیو بین مبدل و خط انتقال می‌شود. توان راکتیو مبادله شده بین ترمینال‌های AC این مبدل، توسط خود مبدل و در داخل آن تولید می‌شود. در صورتی که توان اکتیو مبادله شده در ترمینال‌های AC مبدل به توان DC تبدیل شود در خط DC مشترک بین دو مبدل به صورت تقاضای توان حقیقی (مثبت یا منفی) پدیدار می‌گردد [۱] و [۵].

۲-۲ مدل تزریق UPFC

ولتاژ خروجی مبدل سری به صورت سری به خط تزریق شده و مانند یک منبع ولتاژ AC عمل می‌کند همان‌طور که در شکل (۲-۲) نشان داده شده است. راکتانس x_s توصیف کننده یک راکتانس دیده شده از پایانه‌های ترانسفورماتور سری است و معادل با (در مبنای P.U شده ولتاژ و توان مبنا) [۵]:

$$x_s = x_k r_{max}^2 (\frac{S_B}{S_S}) \quad (۱-۲)$$

که

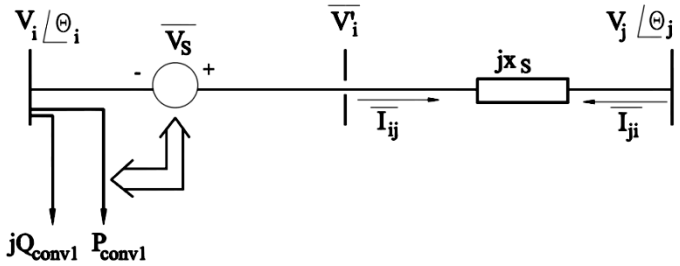
x_k: راکتانس ترانسفورماتور سری

r_{max}: حداکثر مقدار دامنه ولتاژ تزریقی (P.U)

S_B: توان مبنای سیستم

$S_S = S_{conv2}$: مقدار مجاز نامی توان مبدل سری

مدل تزریق UPFC، قادر به کنترل همزمان سه پارامتر- توان راکتیو موازی(Q_{conv1})، دامنه(r) و زاویه(γ)- بوسیله ولتاژ سری تزریق شده ($\overline{V_s}$) است و $\overline{I_{ij}}$ فلوی جریان از طریق منبع ولتاژ متصل شده می‌باشد.



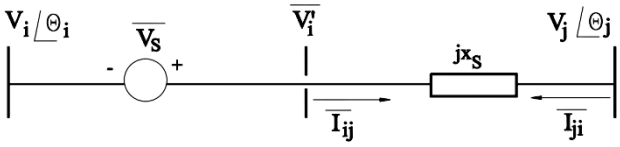
شکل(۲-۲): ساختار مدار الکتریکی UPFC [۵]

منبع ولتاژ متصل شده به صورت سری با یک ولتاژ سری ایده آل ($\overline{V_S}$) مدل شده که دامنه و فاز آن قابل کنترل می‌باشد [۵].

$$\overline{V_s} = r\overline{V_i}e^{j\gamma} \xrightarrow{\overline{V_i}=V_i e^{j\theta_i}} \overline{V_s} = rV_i e^{j(\gamma+\theta_i)} = V_s e^{j(\gamma+\theta_i)} \quad (۲-۲)$$

$$V_s = rV_i \quad (۲-۳)$$

که $0 \le \gamma < 2\pi$ و $0 \le r \le r_{max}$ است. برای بدست آوردن مدل تزریق UPFC لازم است ابتدا منبع ولتاژ سری که در شکل (۲-۳) نشان داده شده است، مطرح شود.



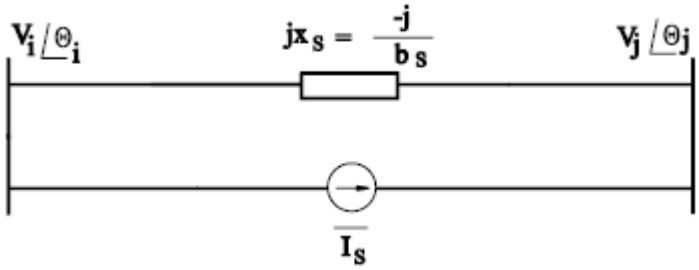
شکل(۲-۳): منبع ولتاژ سری [۵]

ولتاژ $\overline{V_i'}$ و جریان و $\overline{I_{ij}}$ به صورت زیر تعریف می‌شوند [۵]:

$$\overline{V_i'} = \overline{V_i} + \overline{V_s} \quad (۲-۴)$$

$$\overline{I_{ij}} = \frac{\overline{V_i'} - \overline{V_j}}{jx_s} \quad (۲-۵)$$

در مرحله بعد منبع ولتاژ سری به معادل نورتن تبدیل می‌شود، شکل (۲-۴). جریان $\overline{I_s}$ و سوسپتانس b_s به جای ولتاژ $\overline{V_s}$ و راکتانس x_s قرار داده می‌شود.



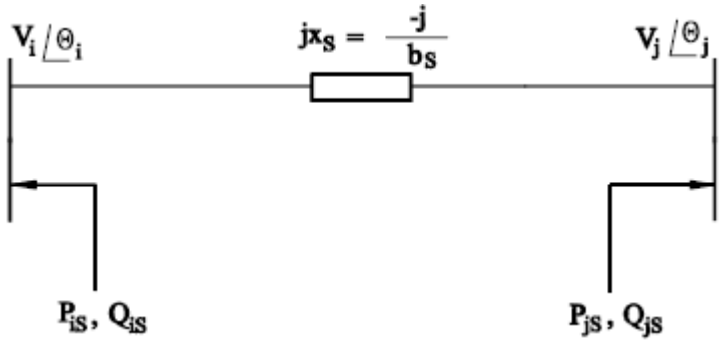
شکل(۲-۴): منبع ولتاژ سری تبدیل شده [۵]

جریان $\overline{I_s}$ به صورت زیر تعریف می‌شود [۵]:

$$\overline{I_s} = \frac{\overline{V_s}}{jx_s} = jb_s\overline{V_s} \quad (۲-۶)$$

سوسپتانس b_s معادل است با $b_s = -\frac{1}{x_s}$.

منبع ولتاژ سری تبدیل شده تزریق توان باس به باس‌های دیگر را فراهم می‌سازد، شکل (۲-۵).



شکل(۲-۵): منبع ولتاژ سری تبدیل شده با تزریق توان به باس [۵]

منبع جریان $\overline{I_s}$ توان‌های $\overline{S_{is}}$ و $\overline{S_{js}}$ را به ترتیب به باسهای i و j تزریق می‌کند به طوریکه [۵]:

$$\overline{S_{is}} = \overline{V_i}(-\overline{I_s})^* \quad (۷-۲)$$

$$\overline{S_{js}} = \overline{V_j}(\overline{I_s})^* \quad (۸-۲)$$

تزریق توان به باس($\overline{S_{is}}$ و $\overline{S_{js}}$) از رابطه زیر بدست می‌آید [۵]:

$$\overline{S_{is}} = \overline{V_i}(-jb_s\overline{V_s})^* = \overline{V_i}(-jb_sr\overline{V_i}e^{j\gamma})^* = rb_sV_i^2\,sin(\gamma) + jrb_sV_i^2\,cos(\gamma) \quad (۹-۲)$$

$$\overline{S_{js}} = \overline{V_j}(jb_s\overline{V_s})^* = \overline{V_j}(jb_sr\overline{V_i}e^{j\gamma})^* = -rb_sV_iV_j\,sin(\theta_i - \theta_j + \gamma) - jrb_sV_iV_j\,cos(\theta_i - \theta_j + \gamma) \quad (۱۰-۲)$$

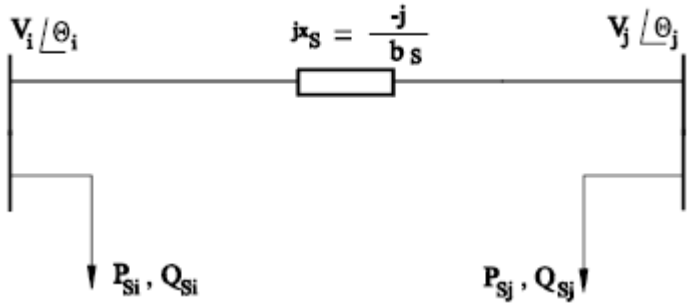
سپس منبع ولتاژ سری به قسمت موازی UPFC متصل شده است. با گذاشتن شاخه‌های وصل شده UPFC، تزریق توان به باس از UPFC به صورت زیر تعریف می‌شود و در شکل (۲-۶) نشان داده شده است [۵]:

$$P_{si} = -Re(\overline{S_{is}}) + Re(\overline{S}_{conv1}) \quad (۱۱-۲)$$

$$Q_{si} = -Im(\overline{S_{is}}) + Im(\overline{S}_{conv1}) \quad (۱۲-۲)$$

$$P_{sj} = -Re(\overline{S_{js}}) \quad (۱۳-۲)$$

$$Q_{sj} = -Im(\overline{S_{is}}) \quad (۱۴-۲)$$



شکل(۲-۶): تزریق توان به باس از UPFC [۵]

برای تعیین کردن تزریق توان به باس از UPFC در سمت i لازم است تا توان ظاهری مبدل موازی $\overline{S}_{conv1}$ تعیین شود. مبدل‌های سری و موازی UPFC فقط تبادل توان اکتیو دارند در حالی‌که توان راکتیو به طور مستقل در هر دو طرف کنترل می‌شود [۵].

$$P_{conv1} = P_{conv2} \quad (۱۵-۲)$$

$$Q_{conv1} = \text{مستقل کنترل می شود} \quad (۱۶-۲)$$

توان اکتیو مبدل موازی از روی توان ظاهری مبدل سری محاسبه می‌شود [۵]:

$$\begin{aligned}\overline{S}_{conv2} &= \overline{V_s}(\overline{I_{ij}})^* = r\overline{V_i}e^{j\gamma}\left[\frac{\overline{V_i'} - \overline{V_j}}{jx_s}\right] = \\ &= -rb_sV_iV_j\,sin(\theta_i - \theta_j + \gamma) + rb_sV_i{}^2\,sin(\gamma) + \\ &+j[rb_sV_iV_j\,cos(\theta_i - \theta_j + \gamma) - rb_sV_i{}^2\,cos(\gamma) - rb_sV_i{}^2]\end{aligned} \quad (۱۷-۲)$$

در نهایت تزریق توان به باس از UPFC نتایج زیر را فراهم می آورد [۵]:

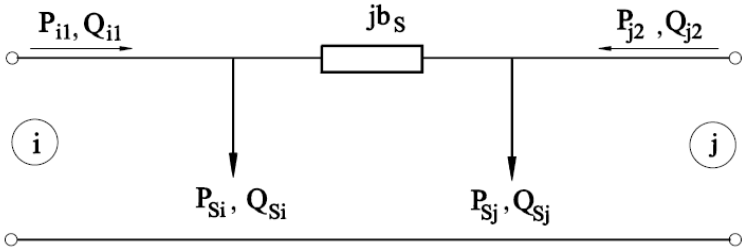
$$P_{si} = -rb_sV_iV_j\,sin(\theta_i - \theta_j + \gamma) \quad (۱۸-۲)$$

$$Q_{si} = -rb_sV_i{}^2\,cos(\gamma) + Q_{conv1} \quad (۱۹-۲)$$

$$P_{sj} = rb_sV_iV_j\,sin(\theta_i - \theta_j + \gamma) \quad (۲۰-۲)$$

$$Q_{sj} = rb_sV_iV_j\,cos(\theta_i - \theta_j + \gamma) \quad (۲۲-۲)$$

که γ و r متغیرهای کنترلی UPFC هستند. با قرار دادن تزریق توان به باس از UPFC، مدل تزریق UPFC کامل می شود، شکل (۲-۷).



شکل(۲-۷): مدل تزریق UPFC [۵]

پخش توان اکتیو و راکتیو در سمت موازی UPFC از رابطه زیر بدست می‌آید [۵]:

$$P_{i1} = -rb_sV_iV_j\,sin(\theta_i - \theta_j + \gamma) - b_sV_iV_j\,sin(\theta_i - \theta_j) \quad (۲۲-۲)$$

$$Q_{i1} = -rb_sV_i{}^2\,cos(\gamma) + Q_{conv1} - b_sV_i{}^2 + b_sV_iV_j\,cos(\theta_i - \theta_j) \quad (۲۳-۲)$$

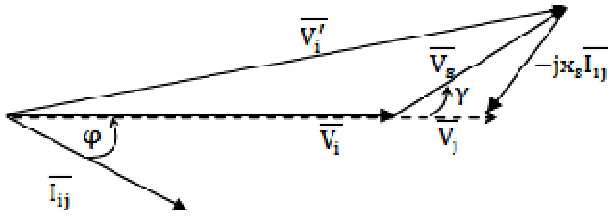
و در سمت سری داریم [۵]:

$$P_{j2} = rb_sV_iV_j\,sin(\theta_i - \theta_j + \gamma) + b_sV_iV_j\,sin(\theta_i - \theta_j) \quad (۲۴-۲)$$

$$Q_{j2} = rb_sV_iV_j\,cos(\theta_i - \theta_j + \gamma) - b_sV_j{}^2 + b_s\,V_iV_jcos(\theta_i - \theta_j) \quad (۲۵-۲)$$

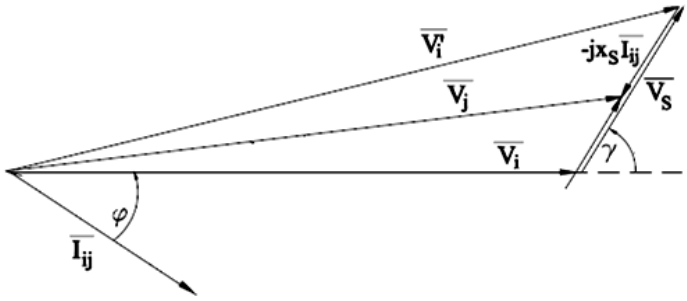
۲-۳ مدهای کاری UPFC

۱) تنظیم ولتاژ: $\overline{V_S}$ طوری تزریق می‌شود که فقط در اندازه ولتاژ خط انتقال تغییر ایجاد شود که به لحاظ رفتاری شبیه ترانسفورماتور تپ چنجردار با تپ های بسیار کوچک است. بنابراین UPFC در این شرایط نقش یک تنظیم کننده طولی ولتاژ را ایفا می‌کند، شکل (۲-۸).



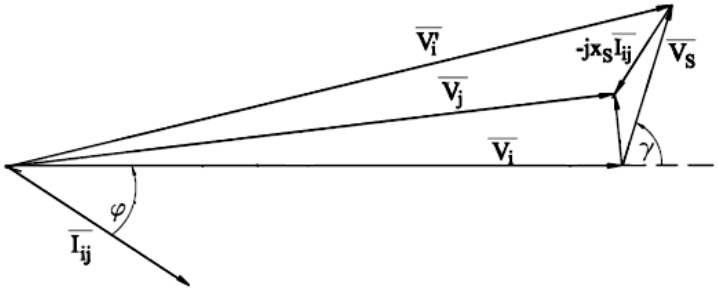
شکل(۲-۸): تنظیم ولتاژ [۶]

۲) جبران‌سازی سری: در این حالت $\overline{V_S}$ به طور عمود بر جریان خط انتقال تزریق می‌شود تا یک جبران کننده سری حاصل شود که به لحاظ رفتاری شبیه یک خازن سری کنترل شده می‌باشد. ولتاژ جبران‌سازی به طور مستقل از جریان خط کنترل می‌شود، شکل (۲-۹).



شکل(۲-۹): جبران سازی سری [۶]

۳) شیفت فاز: $\overline{V_S}$ به گونه‌ای تزریق می‌شود که در اندازه ولتاژ خط انتقال تغییری حاصل نشود. در نتیجه یک تنظیم کننده عرضی ولتاژ ایجاد شده است که به لحاظ رفتاری شبیه ترانسفورماتور جابجا کننده فاز می‌باشد، شکل (۲-۱۰).



شکل(۲-۱۰): شیفت فاز [۶]

۴) کنترل همزمان ولتاژ، امپدانس و زاویه: در این حالت طوری تزریق می‌شود که یک کنترل کننده توان چند تابعی حاصل می‌شود که می‌تواند به طور همزمان به تنظیم ولتاژ، جبران‌سازی سری و شیفت فاز به پردازد.

۵) UPFC قادر به کنترل میرایی نوسانات الکترومکانیکی و تنظیم پخش توان نیز می‌باشد [۱] و [۵].