کاربردهای پخش بار بهینه در سیستم های قدرت (با تاکید بر کاربرد در FACTS ها)

قاسم صادقی

دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد- دانشکده فنی مهندسی

کلمات کلیدی : پخش بار بهینه، سیستم های مدیریت انرژی، کنترل پخش توان، FACTS,UPFC ، برنامه ریزی خطی

چکیده : در گذشته استفاده ازپخش بار بهینه با توجه به سرعت و دقت کم و عدم نیرومندی روشها محدود بود.
پخش بار بهینه توسعه یافته با پیشرفت تکنولوژی سیستمهای قدرت در نتیجه سرعت و توانایی اجرای مسائل پیچیده با قیود گوناگون کاربردهای گستردهای یافته است.
این مقاله به بیان برخی از کاربردهای OPFدر سیستم های قدرت می پردازد و روشی را جهت ادغام بیازهای کنترل پخش توان سیستم های پخش توان AC انعطاف پذیر و مسئله پخش توانهای حقیقی ارائه می کنیم.
در این مقاله سه دستهاز FACTS ها در نظر گرفته شده اند- TCSC,TCPS,UPFC – روش مفروض مسئله اصلاح شده OPF را با تفکیک به دو زیر مسئله تکرار حل می کند. مسئله اول یک زیر مسئله کنترل پخش بار و دومی یک مسئله OPF معمولی است
در مقاله نشان داده شده است که OPF توان حقیقی اصلاح شده قابلیت حل بوسیله یک راهبرد تکرار جدید مبتنی بر بر نامه ریزی های خطی را دارد

۱ مقدمه

OPF[1] یک نرم افزار بهینه سازی جهت تنظیم شبکه قدرت برای رسیدن به مقادیر بهینهءاز قبل تعیین شده ، از قبیل هزینه تولید و تلفات می باشد . در صورت استفاده مناسب از OPF ،این نرم افزار می تواند مزایای زیادی در بهره برداری و طراحی سیستم های قدرت داشته باشد [1] . در واقع OPFنتیجه طبیعی نیاز به یک وسیله موثر و هوشمند جهت آنالیز مسائل با چندین متغیر و چندین راه حل می باشد که حل آنها بدون استفاده از OPF سخت و یا حتی غیر ممکن به نظر می رسد.خصوصیات منحصر بفرد OPF (خصوصا در دو دهه اخیر) عبارتند از : نیرومندی ،دقت و هزینه کم ،که باعث کاربرد گسترده این نرم افزار در سیستم های قدرت شده کاربردهایی از قبیل :

- توسعه مدلهای پایه
- طراحی توانهای موهومی
- تنظیم توانهای موهومی و تنظیم ولتاژ

[1] Optimal Power Flow

- کاربرد در FACTS[2] ها
- ناپایداریهای ولتاژ
- پاسخ پیشامد
- پخش اقتصادی مقید شده
- تنظیمات فصلی
- سیستم های مدیریت انرژی

توسعه مدلهای پایه

شاید معمول ترین کار برد پخش بار بهینه این مورد باشد . طراحان سیستم معمولاً با مسئولیت فرو بردن اطلاعات چندین منبع به یک سازگاری مناسب ، مدل قابل اعتماد و عموما رها از خطاها مواجه هستند . مواردی تا ۵۰۰۰۰ شین همراه با شرایط ولتاژی و توانهایِ موهومیِ مشکل ، که این تواند کار بسیار سختی است. در بسیاری موارد اطلاعات همراه با خطاهای زیادی هستند و تناقص های زیای در آنها مشاهده می شود که باعث می شوند پخش بارهای معمول دچار مشکل عدم همگرائی شوند . پخش بار بهینه ، مزیت بکارگیری پارامترهای ناسازگار و ولتاژ و توانهای موهومی برنامه ریزی شده – جهت محاسبه یک حل مناسب و سازگار برای معادلات غیر خطی پخش بار – را دارد . شرایط مناسب به سادگی و سرعت بدست می آید . می توان مکررا شبکه را توسعه داد و همواره اصول طراحی یکسان خواهد بود .

طراحی توانهای موهومی

مزیت پخش بار بهینه عدم نیاز به همگرائی معادلات پخش بار در نقطه شروع می باشد . در طراحی های با مقیاس بزرگ – که با مشکل نیاز به جبران توان موهومی در قسمت های مختلف شبکه مواجه هستند - نرم افزار پخش بار بهینه می تواند بهترین موقعیت برای جبرانسازهای موازی را تعریف کرده و نیازمندی های نهائی را برآورده سازد . در مطالعات اخیر روی سیستم توسعه یافته $EGAT, \ ۵۰۰^{kv}$ در تایلند ، برنامه پخش بار بهینه مستقیما کمینه توان موهومی مورد نیاز تجهیزات - وقتی تپ ترانسفورماتورها و نقاط تنظیم ولتاژ ژنراتورها جهت کمینه سازی تلفات همزمان تغییر می کردند - را تعریف کرد .در مطالعات روی سیستم های خصوصی ایالات متحده ، برنامه پخش بار بهینه به سرعت حداقل توان موهومی مورد نیاز ، موقعیت ها و ظرفیت ها را محاسبه نموده و یک حل عالی برای دستیابی به یک یا دو موقعیت جهت نرم افزار پخش بار ارائه کرد . مزیت دیگر ، نیازمندی ها جهت دستیابی به یک نمودار ولتاژ در حل ، جائی که کمینه های ولتاژ فراوان هستند می باشد که در صورت استفاده از اندازه گیری نمونه می تواند منجر به تحمیل توان موهومی و اضافه تخمین در ظرفیت خازنها شود .

تنظیم ولتاژ و توان موهومی

از نرم افزار پخش بار بهینه می توان جهت تنظیم ولتاژ و توان موهومی بهره برداری برای یک سیستم در راستای کمینه سازی تلفات ، حذف چرخش توان موهومی ، یا تعیین آثار افزایش تولید همزمان شرکتها ، استفاده کرد. محدودیت های ولتاژ و سایر محدودیت ها که اثر قابل توجهی بر حل بهینه دارند با حساسیتهای افزایشی بزرگ خود تعریف می شوند

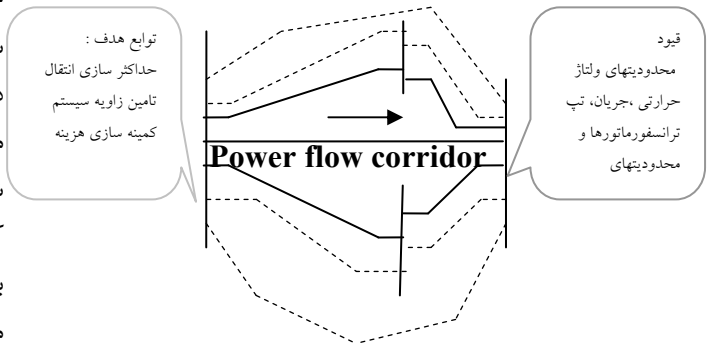
کاربرد در FACTS [3]

این کاربرد می تواند یک فعالیت پیچیده باشد ، در آینده توجه قابل ملاحظه ای به کاربرد OPF در FACTSها خواهد شد . درحال حاضر مطالعات زیادی توسط شرکتهای مختلف در این زمینه در حال انجام می باشد . چند مورد از این کاربردها توسط EPRI کشف شده است . FACTS ها ابزاری هستند که می توانند پخش بار AC را به همان روشی که در HVDC کنترل می شود ، کنترل کنند . و این شامل وسایل کنترل تریستوی است که می توانند بصورت هوشمند توان و ولتاژ شبکه را کنترل کنند . FACTS ها شامل ابزارهایی از قبیل : خازنهای سری کنترل شده بوسیله تریستور (TCSC) ، تنظیم کننده های زاویه فاز با سوئیچ های تریستوری (PAR) ، جبران سازهای سری سنکرون استاتیکی (SSSC) ،UPFC ها و STACOM ها می باشد . یکی از مهمترین موارد مورد توجه طراحان و کاربران امروز ، امکان کنترل جهت پخش توان می باشد ،که اجازه بهره برداری بهتر از سیستم انتقال موجود که به طور یکنواخت بارگذاری نشده است و یا از جریانهای چرخشی رنج می برند یا در ظرفیت- بوسیله پایداری ، بیشتر از جنبه حرارتی - محدود شده است را می دهد . هر دو روش PAR ها و TCSC ها برای غلبه براین مشکلات قابل استفاده اند. مزیت TCSC بر PAR قابل ملاحظه می باشد . جدا از کنترل امپدانس ، خازنهای سری ، توان راکتیو تولید خواهند کرد ، که تنظیم کننده ها از آن استفاده می کنند . بعلاوه ، خازنهای سری به طور ذاتی دینامیک سیستم را بهبود خواهند بخشید . همین مطالب درباره UPFC وجود

[2] Flexible AC Transmission Systems

[3] Flexible AC Transmission Systems

دارد . مشکل ، یافتن ترکیبی کمینه از تجهیزات سری و موازی است ، وقتی کنترل پخش توان را در یک سیستم تحت فشار و شرایط نامطلوب بهره برداری را بر عهده دارد . یکی از مطالعات اخیر ، آزمایش پیچیده تعریف تجهیزات یک کریدر و ^{kv} ۵۰۰ ، همراه با تعداد زیادی گره بود که توانست از محدوده سطح ولتاژ انتقالی در ^{Mw} ۵۰۰ ، تا حد گرمائی آنرا راه اندازی کند . این تجهیزات ظرفیت انتقالی را به صورت مؤثر نسبت به حالت بدون اضافه کردن آنها دو برابر خواهد کرد . ترکیب سنجیده ای که بر این نیازمندیها پایه گذاری شده باشد ، اجازه هیچ افزایش انتقالی به جریان خارج از کوریدر تعریف شده نمی دهد و به نحو مؤثری از استفاده تجهیزات موازی شبکه جلوگیر می کند . فرض کنیم که از TCSC ها استفاده کنیم - همراه با تأخیر کننده های موازی – سؤال مطرح شده یافتن ترکیب حداقل هزینه تجهیزات می باشد . شکل شماره ۱ نمایش دهده رفتاری است که پخش بار در یک سیستم ساده می تواند بوسیله ترکیبِ بی نهایت جبرانسازِ سری و موازی وابسته به معیارهای بهره برداری انجام دهد . به هر حال استفاده از OPF با انتخاب دقیق تابع هدف و قیود ،



Parallel System

شکل شماره ۱

باعث تعریف دقیقی از ترکیبات کمینه در تجهیزات می شود که منجر به سیستم با محدودیت های ولتاژ و محدودیت گرمائی برای شرایط احتمالی - به خوبی شرایط عادی - می شود . کلید فرایند بهینه سازی تأمین زاویه ثابت در طول کوریدرحین فرایند حل می باشد . فقط بوسیله این وسایل می توان از اثر شبکه موازی جلوگیری کرد . OPF زاویه شبکه را - وقتی سطوح امپدانس های سری جهت کنترل پخش بار تعریف می شوند - ثابت نگه می دارد .

کاربرد دیگر OPF ، تأمین توان رأکتیو بوسیله خازنهای سری و تعریف کمترین هزینه ترکیبیِ جبرانسازهای سری و موازی همراه با همه قیود ولتاژ و بارگیری با همان درجه اهمیت می باشد . نتایج OPF بر جسته کننده نیاز به متغیر – وقتی سطح ثابتی از جبرانسازهای سری و موازی جهت تأمین شرایط احتمالی استفاده می شوند - می باشند .

ناپایداری ولتاژ

ارائه پخش بار از شبکه قدرت در شرایط ماندگار می تواند جهت دستیابی به حدود حاشیه MW و MVAR در افت ولتاژ ها به کار گرفته شود . پخش بار بنیانگر محدودیتهای بهره برداری ، خصوصا ظرفیت راکتیو ژنراتورها می باشد . مدل بار آن می تواند نشان دهنده وابستگی به ولتاژ و ترکیب آثار ماندگار پخش ترانسفورماتورها در تغییرات حین کار تپ ها و دینامیکِ کند در شبکه باشد . جهت دستیابی به حاشیه سقوط ولتاژ ، پخش بار به صورت پارامتری تنظیم می شود تا به شرایطی منجر شود که ژاکوبین پخش بار به منفرد شدن نزدیک شود . حاشیه MW و MVAR عبارت است از فاصله از نقطه اولیه عملکرد تا ولتاژ مشرف بر سقوط .

حاشیه MW ، ممکن است چگونگی انتقال MW در فصل مشترک ارتباط یا تولید افزایش یافته در یک منطقه پخش باشد.

حاشیه MVAR ، ممکن است مقدار توان موهومی تزریق شده مورد نیاز ،برای رسیدن به پایداری ولتاژ باشد . یک نگرانی در مورد روشهای مبتنی بر پخش بار تعریف حاشیه سقوط ولتاژ می باشد که با حرکت به سمت حاشیه سقوط ولتاژ ، حل دچار شرایط نامناسب می شود . روشهای مختلفی ایجاد شده است که اطلاعات مناسب را در نزدیکی نقطه سقوط نگه می دارد. بدین منظور از الگوریتم های ضد همگرائی و تزریق توانهای موهومی - به همان صورت استفاده شده در منحنی های Q - V و روشهای پیوسته ، استفاده شده-استفاده می شود .

کاربرد OPF در سیستم های مدیریت انرژی[4] (EMS)

یکی از اصلی ترین فعالیت های تجاری در واحد های الکتریکی ، مدیریت شبکه انتقال به شکل مطمئن و اقتصادی می باشد . اصلی ترین بحث در این باب این است که انرژی منتقل شده توسط شبکه با تغییر بار مصرف کننده هادر حال تغییر است و در مجموع بار شبکه ثابت نمی باشد . هدف تجاری برای یک شبکه این است که برای سطح ایمنی داده شده با حداقل هزینه کار کند و این دقیقا همان مسئله ای می باشد ، که الگوریتم پخش بار بهینه جهت آن طراحی شده است به هر صورت بسته

[4] Energy Management System

های نرم افزاریِ پخش بار بهینه تنها یکی از اجزاء مدیری انرژی می باشد . یک سیستم مدیریت انرژی قسمتی از سیستم کنترل است و از اجزاء با سطوح تشکیل می شود . بالاترین سطح سیستم مدیریت انرژی شامل سیستم های کنترل ناظرو تهیه اطاعات SCADA درمرکزکنترل می باشد . سیستم مدیریت انرژی اطلاعات خام SCADA را تحلیل می کند و آنالیز شبکه بدست آید . این سیستم ها به عنوان کمترین کار تحلیل توپولوژی و تخمین موقعیت ها را انجام می دهند تحلیل توپولوژی به وضعیت گذار در کلیدها - به عنوان مثال بریکرها - و عایق بندی ها توجه دارد که این کار را برای تبدیل مدل عملکرد شبکه به نمایش گره_شاخه، که قابلیت تحلیل به روش ماتریسی را دارد ، انجام می شود . تخمین موقعیت عمل محاسبه ولتاژ شینها و بخش بارها با استفاده از مدل پارامترهای شبکه و مقادیر اندازه گیری از راه دور توسط SCADA را انجام می دهد . حل تخمین زننده موقعیت یک اساس سازگار با سایر آنالیزهای کاربردی از قبیل پخش بار بهینه دارد.هدف پخش بار بهینه محاسبه نقاط تنظیم پیشنهادی سیستم های کنترلی قدرت به نحوی است که هر دو مقوله امنیت و اقتصادی بودن را برآورده سازد . محاسبات پخش بار بهینه قابلیت ادغام و تکمیل توابع EMS به دو شکل اصلاحی و پیشگرانه را دارد . در روش اصلاحی پخش بار بهینه پس از تغییرات اساسی در مدل اقتصادی_امنیتی به تغییرات در توپولوژی شبکه می پردازد . به عبات دیگر اگر تخمین موقعیت تخلفات جدی را نشان دهد ، پخش بار بهینه می تواند کنترل کننده های توان اکتیو و رأکتیو را مجددا برنامه ریزی کند در روش پیشگیرانه ، بهینه سازی پخش بار برای تهیه اصلاحات پیشنهاد شده و پیشامدهای احتمالی و انتخاب شده استفاده می شود و این ممکن است شامل بدترین حالتِ ممکنِ یافت شده توسط آنالیز پیشامدهای احتمالی یا خروجی های برنامه ریزی شده باشد . برای یک برنامه ریزی OPF بیشتر اطلاعات مورد نیاز همانند سایر کاربردهای EMS است، بعلاوه OPF می تواند نتایجی تولید کند که دارای کاربردهای EMS قابل توجهی باشد . تجهیزات الکتریکی هدفِ تجاریِ عملِ اقتصادیِ شبکه انتقال وامنیت را برعهد دارند . پخش بار بهنیه روشی می باشد که برای حل این مشکل طرح شده استOPF می تواند توسط یک سیستم مدیریت انرژی از طریق اندازه گیری از راه دور روی آن قسمت از شبکه که قابل نظارت است به کار برده شود . ابزارهای فوق در کاربردهای پخش بار بهنیه نیازمند مجموعه ای مناسب از شبکه ها ، قیود و هزینه هامی باشد . نکته مهم دیگر این است که پخش بار بهینه اطلاعات مؤثری برای استفاده تهیه می کند که می توان بوسیله آن خروجیِ شین ها را توجیه کرد .[2]

در این مقاله به تشریح کلربرد OPFدر سه دسته از FACTS ها -TCSC,TCPS,UPFC- می پردازیم.که ابتدا به اصول مدلسازی آنها و سپس به بیان فرمولبندیهای جدید OPF می پردازیم.

۲ کاربرد در FACTS ها

مفهوم سیستم های انتقال AC انعطاف پذیر (FACTS)اولین بار بوسیله هینگورانی[5][3]. در سال ۱۹۸۸ تعریف شد . تاکنون نیز وسایلFACTS پیشرفته زیادی در راستای پیشرفتهای تکنولوژی الکترونیکِ قدرتِ جدید مطرح شده است[5][4] . این FACTS ها توانائی بالائی برای هدایت سیستم های قدرت را به سمت عملکرد با انعطاف پذیری وامنیت و عاملهای اقتصادی بیشتردارند . بعلاوه FACTS ها می توانند سیستم قدرت را مجبور به عملکرد بهتر نمایند. بنابراین یک ترکیب خوب و سازگار جهت بهره برداری کامل از خصوصیات جدید FACTS ها مورد نیاز می باشد . اخیراً مطالعات FACTS ها به طور عمده بر پیشرفت FACTS ها، و اثر آنها بر سیستم های قدرت متمرکزمی باشد، مطالعاتی مانند مدلسازی پخش بار و کنترل آن ، بهبود پایداری حالتهای گذرا ، بهبود پایداری اشکالات کوچک و از بین بردن نوسانات .[5] همچنین در مطالعه روی FACTS ها یک مطلبِ بسیار مهم بهبود عملکرد سیستم های قدرت از قبیل بهبود الگوریتم های نرم افزاری در سیستم های مدیریت انرژی (EMS) است .[6] همان طور که در مقدمه گفته شد ، تابع بهینه سازی پخش بار یکی از نرم افزار های مهم بهینه سازی در EMS است . در حالی که کنترل پخش توان یکی از اهداف اساسی تکنولوژی FACTS ها می باشد . هدف اساسی OPF برنامه ریزی سیستم های کنترلی جهت بهینه سازی یک تابع هدف - وقتی مجموعه ای از قیود غیر خطیِ تساوی و نا مساوی را ارضاء می کند - است .

از نظر ریاضی مسئله OPF به صورت یک بهینه سای غیر خطیِ مقید شده قابل فرمولبندی می باشد . رهیافتهای حل متعددی جهت حل مسائل OPF پیشنهاد شده است [7]. متغیرهای اصلی و مرسوم کنترل در بهینه سازی پخش توان

[5] Hingorani N.G

حقیقی، MW تولیدیِ ژنراتورها می باشد . اگر برخی از خطوط انتقال از پیش تعیین شده در یک مقدار معین کنترل شده باشد، با برنامه ریزی ژنراتورها این مطلب میتواند ارزش بیشتری داشته باشد .

از طرف دیگر ، افزایش حضور کننده های وابستهIPP [6]های ترکیب شد با حذف نظارت دولت بر شرکتهای قدرت ، باعث شده بهره برداری های سیستم های قدرت نیازمند کنترل پخش بار پیچیده ای باشند [8]. تحقیقات مختلفی در زمینه کنترل پخش بار و یا OPF [10][9] با در نظر گرفتن حضور استاتیک FACTS ها ،[12][11] صورت گرفته است . نیاز ضروری جهت تحقیق روی کنترل پخش بار OPF وجود دارد که حضور استاتیکِ FACTS ها را احساس می شود .

در این جا روش جدیدی جهت ترکیب نیاز کنترل پخش بار با پخش بار بهینهء توانهای حقیقی با استفاده از مدل DC پخش توان ارائه می شود . در این روش از سه گروهِ اساسی از FACTS ها به شرح زیر استفاده می شود :

جبرانساز های سریِ کنترل شده تریستوری (TCSC) انتقال دهنده های فازی کنترل شده تریستوری (TCPS) ، کنترل کننده های پخش توانِ منفرد شده (UPFC) نیازهایِ کنترل پخش توان مشخص شده وابسته به استفاده از FACTS ها در مسئله پخش بار بهینه حاضر لحاظ می شود .

مثال اصلی از نیازهای پخش توان این می باشد که بر خطی از خطوط انتقال مشخص شده از قبل باید با مقدار پخش توان مشخصی بهره برداری شود که آنها بصورت مجموعه ای از قیود مساوی در OPF توان حقیقی مفروض در نظر گرفته می شوند . بدلیل وجود دو پارامتر در میان ۳ پارامتر قابل کنترلِ UPFC که رابه زیادی با توانهای حقیقی و موهومی خطوط UPFC دارند ، نیازهای کنترلِ پخش توانِ موهومی و حقیقی خطوط UPFC در OPF توان حقیقی مفروض بصورت همزمان معرفی شده اند تا از منفرد بودن حل ، اطمینان حاصل شود . روش مفروض ، حل مسئله OPF مدل شده را، با دو مسئله تکرار انجام می دهد . اولین مسئله ، یک زیر مسئله کنترلِ پخشِ توان می باشد و دومین مسئله ، یک مسئله OPF عادی است .

۲-۱ نمایش استاتیک عمل FACTS ها

بدلیل این که توجه ما معطوف به OPF تواهای حقیقی خواهد بود - که اساسا به پخش توانِ حقیقی سیستم قدرت توجه دارد - مدل استفاده شده یک مدل پخش توان غیرخطیِ خطی شده ،می باشد . در نتیجه ، مسائل ولتاژ و توان موهومی را در نظر نمی گیریم . بهینه سازیِ نهائی از طریق تکرارهای این OPF توان حقیقی با OPF توان موهومی بدست خواهد آمد که به آن نمی پردازیم . بنابراین مطالب ذکر شده بر اساس پخش DC توان می باشد .

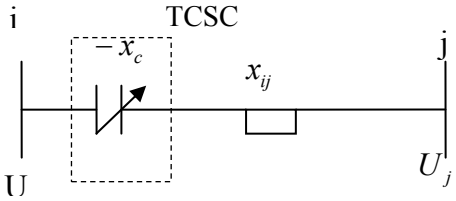
الف : جبران سازِ سریِ کنترل شده با تریستور(TCSC)

شکل ۲، نمایش دهنده TCSC برای یک خط انتقال جبران شده با پارامتر $x_{ij} - x_c$ بین باس i ام و j ام می باشد

سوسپتانسِ نهائی خط انتقال می تواند به صورت زیر فرمولبندی شود .

$$b_{ij} = 1/(x_{ij} - x_c) \qquad (۲-۱-۱)$$

و این مستقیماً به عنوان متغیر کنترل ، در ماتریس سوسپتانسِ باس استفاده می شود .



شکل شماره۲: مدار معادل TCSC

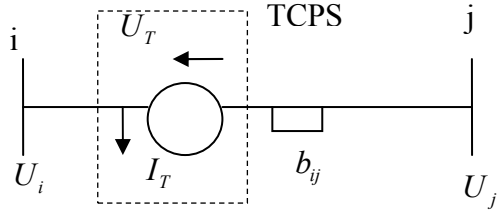
بر اساس مدل پخش توان DC معادلات پخش بارِ شاخه به صورت زیر می تواند فرمولبندی شود .

$$P_{ij} = b_{ij}\delta_{ij} \qquad (۲-۱-۲)$$

δ_{ij} : زاویه در طول خط TCSC می باشد .

ب : انتقال دهنده فازیِ کنترل شده با تریستور (TCPS)

مدل خطِ انتقال با TCPS در شکل ۳ نمایش داده شده است پارامتر قابل کنترل ، از TCPS ، تغییر ولتاژ تغییردهنده زاویه



شکل شماره ۳ : :مدار معادل TCPS

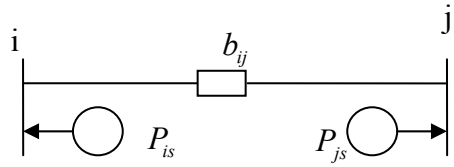
می باشد . بنابراین معادلات پخش توان حقیقیِ شاخه TCPS به صورت زیر فرمولبندی می شود

[6] Independent Power Products

$$P_{ij} = b_{ij}(\delta_{ij} + \psi) \qquad (۳-۱-۲)$$

$$P_{ji} = -b_{ij}(\delta_{ij} + \psi) \qquad (۴-۱-۲)$$

بر اساس نظریه اساسی مدار ، مدار معادل تزریقیِ بدست آمـده از شکل ۳ به شکل ۴ قابل نمایش می باشد .



شکل شماره ۴ :مدل تزریق شده از TCPS

توانهای حقیقی و موهومی تزریقی در باس i و j به صورت زیـر قابل استخراج است .

$$P_{is} = -b_{ij}\psi \qquad (۵-۱-۲)$$

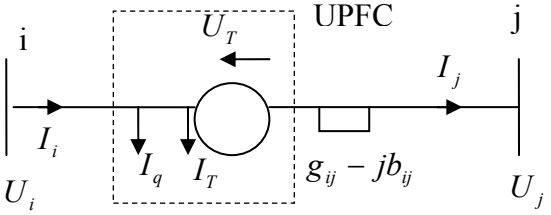
$$P_{js} = b_{ij}\psi \qquad (۶-۱-۲)$$

ج : کنترل کننده پخش توان منفرد شده (UPFC)

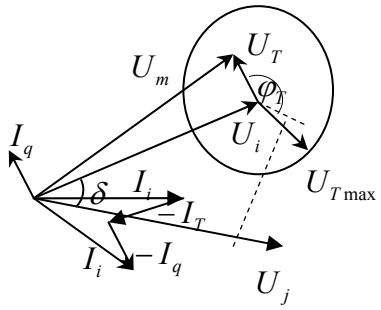
اساس سـاختمان UPFC در [13] توضـیح داده شـده اسـت .

UPFC : شامل دو پارامتر قابل کنترل می باشد - منبع ولتـاژ به صورت سری با خط قرارداده شده ، منبع جریـان بـه صـورت موازی با خط متصل شده اند - دامنه و زاویه ولتـاژ (φ_T, U_T) پارامترهای قابل کنترل می باشند.

در حالی که فقط دامنه جریان متغیر قابل کنترل اسـت . مـدار معادل (UPFC) در شکل ۵ نمایش داده شده است . و دیاگرم برداری آن نیز در شکل ۶ نمایش داده شده است [14] . بدلیل اینکه UPFC در این مور در ترمینال خط لحاظ می شـود کـه در آن ولتاژ ، وابسته به جریان خـط اسـت ، پـارامتر I_q هـیچ تأثیری بر OPF توان حقیقی ندارد .



شکل شماره۵:مدارمعادلUPFC



شکل شماره۶ : نمودار برداری UPFC

بنابراین سؤال مطرح شده این است که چگونه دو پـارامتر قابـل کنترل دیگر را جهت دستیابی به برنامـه تولیـد بهینـه کنتـرل کنیم ، در حالی که نیازمندی های کنتـرل پخـش تـون ارضـاء شده باشد . اصول ریاضی مربوط، در ادامه بیان خواهنـد شـد . [14]

$$U_j = U_i + U_T \qquad (۷-۱-۲)$$

$$Arg(I_q) = Arg(U_i) \pm 90 \qquad (۸-۱-۲)$$

$$Arg(I_T) = Arg(U_i) \qquad (۹-۱-۲)$$

$$I = \mathrm{Re}[U_T I_i^*]/U_i \qquad (۱۰-۱-۲)$$

معادلات پخش توان حقیقی از شـاخه UPFC براسـاس مـدل DC شبکه به صورت زیر قابل استخراج است .

$$P_{ij} = b_{ij}(\delta_{ij} + U_T Sin\varphi_T) \qquad (۱۱-۱-۲)$$

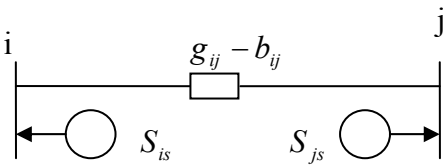
$$P_{ji} = -b_{ij}(\delta_{ij} + U_T Sin\varphi_T) \qquad (۱۲-۱-۲)$$

پخش توان موهومی معادلات پخش بـار بـرای شـاخه UPFC نیز به شکل زیر قابل استخراج هستند .

$$Q_{ij} = -U_{ij}I_q + U_i^2 b_{ij} - U_i U_T[g_{ij}Sin(\varphi_T - \delta_{ij}) - b_{ij}Cos(\varphi_T - \delta_{ij})] - U_i U_j(g_{ij}Sin\delta_{ij} + b_{ij}Cos\delta_{ij}) \qquad (۱۳-۱-۲)$$

$$Q_{ji} = U_i^2 b_{ij} - U_i U_T(g_{ij}Sin\varphi_T + b_{ij}Cos\varphi_T) + U_i U_j(g_{ij}Sin\delta_{ij} - b_{ij}Cos\delta_{ij}) \qquad (۱۴-۱-۲)$$

مدل UPFC تزریق شده شبیه TCPS است بر اسـاس شـکل ۴ مدار معادل UPFC را می توان به شکل ۷ نمایش داد . توان حقیقی و موهومی تزریق شده به باس i وj بر اساس روابط زیـر قابل استخراج است .



شکل شماره ۷:مدل تزریق شده از UPFC

$$S_{is} = -U_i (I_q + I_T + I_s)^* \quad (۱۵-۱-۲)$$

$$S_{js} = U_j I_s^* \quad (۱۶-۱-۲)$$

توان حقیقی تزریق شده نیز به صورت زیر استخراج می شود .

$$P_{is} = -U_T b_{ij} Sin\varphi_T \quad (۱۷-۱-۲)$$

$$P_{js} = U_T b_{ij} Sin\varphi_T \quad (۱۸-۱-۲)$$

۲-۲ فرمولبندی مسئله :

مسئله OPF مدل شده جدید ، به صورت زیر قابل فرمولبندی است :

$$CP \quad : \text{کمینه کن} \quad (۱-۲-۲)$$

$$\sum P_i = \sum L_i + P_L \quad (۲-۲-۲)$$

$$SF + P_c = L \quad (۳-۲-۲)$$

$$F - bS'\delta = 0 \quad (۴-۲-۲)$$

$$F^{SP} = H(\delta, b, \psi, U_T, \varphi_T) \quad (۵-۲-۲)$$

$$\underline{F} \le F(0) \le \overline{F} \quad (۶-۲-۲)$$

$$\underline{F} \le F(l) \le \overline{F} \quad (۷-۲-۲)$$

$$\underline{P_c} \le P_c \le \overline{P_c} \quad (۸-۲-۲)$$

$$\underline{b} \le b \le \overline{b} \quad (۹-۲-۲)$$

$$\underline{\psi} \le \psi \le \overline{\psi} \quad (۱۰-۲-۲)$$

$$0 \le U_T \le \overline{U_T} \quad (۱۱-۲-۲)$$

$$\underline{\pi} \le \varphi_T \le \overline{\pi} \quad (۱۲-۲-۲)$$

C بردار هزینه تولید

P بردار تولیدِ حقیقیِ باس

p_c بردار تولید باس شامل توانهای تزریقی جبرانسازهای UPFC و TCPS

S' ماتریس جابجائی تلاقیِ باس – شاخه است .

b ماتریس قطری از سوسپتانس شبکه است .

δ بردار زاویه ولتاژ

F^{sp} بردار مقدار کنترل پخش توان مشخص شده است .

F(0) بردار حال اساسی پخش توان حقیقی در خطوط است .

F(l) بردار پخش توان در خطوط وقتی شاخه i ام از خط خارج شود .

P_l تلفات توان حقیقی در شبکه است .

L بردار بارهای حقیقی باس

$\overline{F}, \underline{F}$ محدودیت های بار مدار

$\overline{P}, \underline{P}$ محدودیت های تولید.

در این مسئله بهینه سازی معادلات (۲-۲-۹)- (۲-۲-۱۲) محدودیت های بهره برداری متغیرهای وابسته FACTS ها است . معادله (۲-۲-۵) مجموعه ای از قیودتساوی وابسته به FACTS می باشد . بسته به نوع FACTS معادلات تساوی مختلفی وجود دارد . وقتی خطوط انتقال با TSCS یا TCPS کنترل شده اند معادلات (۲-۱-۲) و (۲-۱-۳) جداگانه به کار برده خواهند شد . وقتی خطوط انتقال یا UPFC کنترل شده باشند (۲-۱-۱۱) و(۲-۱-۱۳) به طور همزمان استفاده خواهند شد . در اینجا ما پخش توان موهومی از UPFC خط را در مسئله OPF توان حقیقی معرفی می کنیم . این دو دلیل دارد : اول اینکه دو پارامترِ کنترلِ UPFC رابطه زیادی با پخش توان حقیقی و موهومی دارند ، اگر تنها هدف کنترل توان حقیقی در OPF توانِ حقیقی به کار برده شود ،OPF نهائیِ توانهای حقیقی و موهومی ممکن است مشکل همگرائی داشته باشند . دومین دلیل این است که اگر فقط UPFC خط جهت مقید کردنِ پخش توان حقیقی به کار برده شده باشد پخشِ توان حقیقیِ از قبل تعیین شده ، بوسیله دو پارامتر UPFC کنترل شده است ، و این منجر به یک حل بهینه نخواهد شد ، بنابراین پخش توان موهومی UPFC باید جهت ایجاد یک حل یگانه معرفی شود . پارامترهای وابسته از نتایج OPF توانهای موهومی ، قابل دستیابی هستند . مشاهده می شود که OPF توانهای حقیقی مدل شده با OPF های موسوم بخاطر معادلات (۲-۲-۳)- (۲-۲-۵) و چهار پارامترِ کنترلِ FACTS متفاوت است . این OPF توان حقیقی دیگر ، مسئله بهینه سازی خطی نمی باشد . بنابراین مجاز به استفاده از تکنیک های مبتنی بر روشهای برنامه ریزی خطی موسوم بطور مستقیم نیستیم [16][15]. در قسمت بعدی . یک راهبردحلِ تکرارِ جدید ، جهت حل مسئله OPF توان حقیقی مدل شده ، فرض شده که باعث می شود روش متنی بر برنامه ریزیهای خطی موسوم قابل استفاده باشد .

۲-۳ روش جدید OPF توان حقیقی

راهبرد حل :

از فرمولبندی مسئله OPF توان حقیقی مدلسازی شده ، می توانیم دریابیم که این مسئله را نمی توان مستقیماً بوسیله روشهای متنی بر LP حل نمود زیرا معادلات (۲-۲-۳و۴و۵) غیر خطی هستند . معادلات (۲-۲-۳) و (۲-۲-۴) معادلات پخش توان DC و (۲-۲-۵) قیود کنترلِ پخش توانِ مشخص شده می باشد . اگر سه معادله و متغیرهای وابسته (معادلات (۲-۲-۹)تا(۲-۲-۱۲) از مسئله اصلی جهت ایجاد زیر مسئله جداسازی نماییم ، قادر خواهیم بود که زیر مسئله و مسئله اصلی را با تکرار حل کنیم ، سپس ، مسئله اصلی را می توانینم با روش مبتنی بر برنامه ریزی خطی حل نماییم . بر اساس این نظریه راهبرد حلِ مفروض به صورت زیر فرمولبندی خواهد شد .

- با استفاده از مقادیر بهره برداری اولیه ، مسئله پخش بار حل شود .
- زیر مسئله کنترل پخش توان جداگانه حل شود ، پارامترهای قابل کنترل FACTS مشخص شوند .
- با پارامترهای قابل کنترل FACTS داده شده . مسئله اصلی OPF توان حقیقی با روش متنی بر LP حل شود ،که مقادیر موسوم متغیرهای کنترل بدست می آید .
- مسئله پخش بار با متغیرهای کنترل جدید حل شود (شامل پارامترهای قابل کنترل جدید FACTS)
- اگر عدم تطابق بین نتایج مرحله قبلِ پخش توانِ از پیش تعیین خط انتقال ، کمتر از محدوده خطای تعیین شد باشد ، حل بدست آمده ، در غیر این صورت به سه مرحله قبل برو و چرخه را ادامه بده .

الف: زیر مسئله کنترل پخش توان

زیر مسئله کنترل پخش بار- شامل معادلات (۲-۲-۳) تا (۲-۲-۵) محدوده های وابسته – معادلات(۲-۲-۹)تا (۲-۲-۱۲)هستند . برای راحتی بیان ، بردار u به عنوان بردار کنترل متغیرها شامل سه دسته FACTS است ، وقتی x بردار متغیرهای حالت (زاویه ولتاژ باسها) می باشد .

بنابراین زیر مسئله پخش بار به صورت زیر قابل فرمولبندی می باشد .

$$F^{SP} = H(U, X^{\circ}) \qquad (۲-۳-۱)$$

$$h(u, x^{\circ}) = 0 \qquad (۲-۳-۲)$$

$$\underline{U} \le U \le \overline{U} \qquad (۲-۳-۳)$$

وقتی (۲-۳-۱) بیان کننده (۲-۲-۵) ، (۲-۳-۲)بیانگر معادلات پخش توان DC – (۲-۲-۳و۴) - ومعادله (۲-۳-۳)بیانگر (۲-۲-۹)تا (۲-۲-۱۲)از (۲-۳-۱) و (۲-۳-۲) معادلات زیر قابل دستیابی است.

$$\Delta F = [H_u - H_x h_x^{-1} h]\Delta U = S_{wu}\Delta U \qquad (۲-۳-۴)$$

ماتریس حساسیت های بار خط با توجه به متغیرهای کنترلِ u است و $S_{wu} = H_u - H_x h_x^{-1} h_u$ ماتریس های ژاکوپین هستند h_x, h_u, H_x, H_u .

معادلات بالا دسته ای ار معادلات خطی هستند .

وقتی تعداد بار خطوط کنترل شده کوچکتر یا مساوی تعداد کنترل کننده های FACTS باشد ، ماتریس S_{wu} کامل بوده و مجموعه معادلات به سادگی حل می شوند . وقتی تعداد بار خطوط کنترل شده بیشتر از تعداد کنترل کننده های FACTS باشد . این دسته از معادلات قابل حل نمی باشند و روش مفروض قابل حل نمی باشد . - معمولاً ، تعداد خطوط کنترل شده از تعداد FACTS های قابل کنترل تجاوز نمی کند .این ماتریسِ حساسیت در [9] به کار برده شده است - بنابراین می توانیم u را از معادله زیر بدست آوریم :

$$U = U^{\circ} + \Delta U \qquad (۲-۳-۵)$$

U باید معادله (۲-۳-۳) را ارضاء کند در غیر این صورت حد بالا یا پایین قرار داده خواهد شد .

۲-۴ مسئله OPF توان حقیقی اصلی

وقتی متغیرهای کنترل مربوط به FACTS ها ، از مسئله بالا بدست آمدند ، OPF توان حقیقی اصلی بر اساس مدل DC شبکه و منحنی تکه ای هزینه ها به صورت زیر قابل بازنویسی است .

فرمولبندی است :

$$CP \text{ : کمینه کن} \qquad (۲-۴-۱)$$

$$\sum P_i = \sum L_i + P_L \qquad (۲-۴-۲)$$

$$SF + P_c = L \qquad (۲-۴-۳)$$

$$F - \gamma S'\delta = 0 \qquad (۲-۴-۴)$$

$$\underline{F} \le F(0) \le \overline{F} \qquad (۲-۴-۵)$$

$$\underline{F} \le F(l) \le \overline{F} \qquad (۲-۴-۶)$$

$$\underline{P_c} \le P_c \le \overline{P_c} \qquad (۲-۴-۷)$$

این یک مسئله امنیت مقید شده OPF توان حقیقی می باشد . این مسئله بهینه سازی به صورت زیر قابل معادل سازی است.

فرمولبندی است :

کمینه کن : CP (۸-۴-۲)

$$\sum P_i = \sum L_i + P_L \quad (۹-۴-۲)$$

$$\underline{F} \le A(0)(P-L) \le \overline{F} \quad (۱۰-۴-۲)$$

$$\underline{F} \le A(l)(P-L) \le \overline{F} \quad (۱۱-۴-۲)$$

$$\underline{P_c} \le P_c \le \overline{P_c} \quad (۱۲-۴-۲)$$

$A(0)$ ماتریس ضرایب حالت بین باسهای تزریقی و پخش توان شاخه است ، و می تواند به راحتی از ماتریس سوسپتاسِ پخش بار DC و راکتانس خط مستقیم است .

$A(l)$ فضای یکسان با $A(0)$ دارد ، اما خط l قطع شده است . این یک مسئله OPF توان حقیقی موسوم است و قابلیت حل بر اساس تکنیک حل OPF متنی بر استفاده برنامه ریزی خطی را دارد. [16] [15] تکنیک بهینه سازی مرکزی با یک روش برنامه نویسی خطی تکه ای دو تائی بوجود آمده است . تااینجا ،می توانیم دریابیم که ، این راهبرد حل میتواند نیازهای کنترل پخش توان خط FACTS ها و حضور استاتیک FACTS را به نرم افزار پخش بهینه توان حقیقی در EMS ترکیب کند . تغییرات کمی جهت در نظر گرفتن اثر FACTSها لازم است . بنابراین ما می توانیم ار مزایای ذخیره سازی تجربیات در الگوریتم OPF حاضر و کاهشِ هزینه نگهداری و پیشرفت نرم افزار را خواهیم داشت .

۳ نتایج

یک روش جدید جهت ترکیب نیاز های کنترل پخش توان با OPF توان حقیقی ارائه شد ، نمایش استاتیک سه FACTS بخصوص در نظر گرفته شده است . روش مفروض مسئله OPF مدل سازی شده را به دو مسئله تکراری جداسازی میکند ، اولین مسئله یک ،زیر مسئله کنترل پخش توان است در حالی که مسئله دوم یک مسئله OPF معمولی است.بنابراین ، تغییرات کوچکی برای تابع OPFحاضر در EMS لازم است تا شامل نیازهای کنترل پخش توان و نشان دهنده حالت استاتیک FACTS است. روش شرح داده شده برآورنده برنامه ریزی های مرسوم OPF با تغییرات کمی میباشد . مطالعات دیگر جهت گسترش روش برای OPFموهومی و مدلهای ACشبکه در حال انجام است.

۴ مراجع

[1] M.Huneault , F.D. Galliana ,"A Survey of the Optimal Power Flow Literature," IEEE Transaction on Power System ,Volume 6, Number 2, pages 762-770 May 1991

[2] T .Berry ,C Gharban ,S Zhang" Applying optimal power flow withing an Energy Management system

[3] N. G Hingorani. "High power Electronics and Flexible AC transmission system" ,IEEE power Engineering Review ,July 1988

[4] N.G Hingorani , "Flexible ac Transmission, ," IEEE spectrum , April 1993 ,pp.40-45

[5] B.M Zhang and Q.F.Ding, "The Development of Facts and its control," Forth International Conference on Advances in Power System Control, Operation & Management, Nov.11-14, 1997, Hong Kong, China.

[6] B Avramovic and L H Fink "Energy Management Systems Vol.17 No.3 1995 pp195-198

[7] M Hneault and F.D Galiana, "A Survey of Optimal Power Flow Literature ," IEEE Transaction an Power System Vol.PWRS-6 May 1991 , pp 762-770

[8] M D Ilic , "Fundamental Engineering Problems and Opportunities Operation Power Transmission Grids of the Future ,"Electrical Power & Energy Systems , Vol.17 No.3 1995 pp 207-214

[9] M.Noroozian and G.Andersson, "Power Flow Control by Use of Controllable Series, "IEEE Trans. On Power Delivery. Vol. 8, July 1993, pp.1420-1429

[10] C.R Fuerte-Esquivel and E.Acha , "Newton-Raphson Algorithm for the Reliable Solution of Large Power Flow Networks with Embedded FACTS Devices ", IEEE Proc C,Vol.143,No.5,September 1996 , pp.444-454

[11] G. N.Taranto L. M. V. G. Pinto,M. V. F. Pereia," Representation of

FACTS Devices in power system economic Dispatch" IEEE Trans. On Power Systems, Vol.7 NO.2 May 1992 pp.572-576

[12] L. L. Lai and J. T. Ma "Generic Algorithms and UPFC for Power flow control " Engineering intelligent systems Vol.4 NO. December, 1996, pp.237-242

[13]. L Gyugyi, "A Unified Power Flow Control Concept for Flexible AC Transmission Systems", Fifth International Conference on AC and DC Power Transmission, London, 17-20Sept.1991

[14] CIGRE TF 38-01-06-Final Report, "Load Flow Control in High Voltage Systems Using FACTS Controllers."Oct. 1995

[15]. B. Stottand J.L.Marinho, "Linear Programming for Power System Network Security Application."IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98. May/June 1979,pp .837-848

[16] O. Alsac, J. Bright, M.Prais and B.Stott. "Further Developments in LP- Based Optimal Power Flow." IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5,NO.3, AujustI990, pp.697-710.