بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده برق

جایابی TCSC در سیستم‌های قدرت از طریق بهینه‌سازی چند منظوره ارتقا یافته با الگوریتم‌های هوشمند

رساله برای دریافت درجهٔ دکتری در رشتهٔ مهندسی برق

گرایش قدرت

محسن گیتی‌زاده‌حقیقی

استاد راهنما:

دکتر محسن کلانتر

خرداد ۱۳۸۸

تأییدیه‌ی هیأت داوران جلسه‌ی دفاع از رساله

نام دانشکده: دانشکده مهندسی برق

نام دانشجو: محسن گیتی زاده‌حقیقی

عنوان رساله: جایابی TCSC در سیستم‌های قدرت از طریق بهینه‌سازی چند منظوره ارتقا یافته با الگوریتم‌های هوشمند

تاریخ دفاع: ۱۳۸۸/۳/۲

رشته: مهندسی برق

گرایش: قدرت

ردیف	سمت	نام و نام خانوادگی	مرتبه دانشگاهی	دانشگاه یا مؤسسه	امضا
۱	استاد راهنما	محسن کلانتر	دانشیار	علم و صنعت ایران	
۲	استاد مدعو خارجی	محمد توکلی بینا	دانشیار	خواجه نصیر	
۳	استاد مدعو خارجی	علی یزدیان	استادیار	تربیت مدرس	
۴	استاد مدعو داخلی	حیدرعلی شایانفر	استاد	علم و صنعت ایران	
۵	استاد مدعو داخلی	عباس شولایی	استاد	علم و صنعت ایران	
۶	استاد مدعو داخلی	علیرضا جلیلیان	استادیار	علم و صنعت ایران	

تأییدیه‌ی صحت و اصالت نتایج

باسمه تعالی

اینجانب محسن گیتی‌زاده‌حقیقی به شماره دانشجویی ۸۱۸۱۱۰۵۷ دانشجوی رشته مهندسی برق گرایش قدرت در مقطع تحصیلی دکتری، تأیید می‌نمایم که کلیه‌ی نتایج این رساله حاصل کار اینجانب و بدون هرگونه دخل و تصرف است و موارد نسخه‌برداری‌شده از آثار دیگران را با ذکر کامل مشخصات منبع ذکر کرده‌ام. درصورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص دانشگاه مطابق با ضوابط و مقررات حاکم (قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان و قانون ترجمه و تکثیر کتب و نشریات و آثار صوتی، ضوابط و مقررات آموزشی، پژوهشی و انضباطی ...) با اینجانب رفتار خواهد شد و حق هرگونه اعتراض درخصوص احقاق حقوق مکتسب و تشخیص و تعیین تخلف و مجازات را از خویش سلب می‌نمایم. در ضمن، مسؤولیت هرگونه پاسخگویی به اشخاص اعم از حقیقی و حقوقی و مراجع ذی‌صلاح (اعم از اداری و قضایی) به عهده‌ی اینجانب خواهد بود و دانشگاه هیچ‌گونه مسؤولیتی در این خصوص نخواهد داشت.

نام و نام خانوادگی:

امضا و تاریخ:

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

بهره‌برداری از این پایان‌نامه در چهارچوب مقررات کتابخانه و با توجه به محدودیتی که توسط استاد راهنما به شرح زیر تعیین می‌شود، بلامانع است:

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله برای همگان بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله تا تاریخ ..... ممنوع است.

نام استاد یا اساتید راهنما:

تاریخ:

امضا:

تشکر و قدردانی:

بسمه تعالی

حمد و سپاس مخصوص خداوند یکتایی است که انسان را نعمت حیات بخشید و خلعت کرامت را به جهت عقل بر او پوشانید تا بدین وسیله در وادی معرفت خویش گام نهد و شکرگذار نعماتش گردد.

از آنجاکه شکر مخلوقات در راستای شکر حضرت خالق می باشد؛ بر خود واجب می دانم ابتدا از زحمات بیدریغ والدین گرامی‌ام هر چند ناچیز سپاس گزاری نمایم که اگر نبود حمایت های مادی و معنوی ایشان، توفیق در انجام کار حاضر به ثمر نمی‌رسید. سپس بر خود فرض می دانم از اساتید معظمی که تعالیم و راهنمایی های ایشان امکان موفقیت در این مرحله علمی را موجب گردید، در حد بضاعت تشکر کنم. همچنین از همراهی و همدلی بی شائبه همسر صبور و مهربانم با تقدیم این اثر، قدردانی می نمایم. باشد که بهره مندی از الطاف بی پایان حضرتش همواره توشه راهمان گردد، به منه و کرمه.

چکیده

امروزه بیش از هر زمانی، طراحی و بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت به‌منظور افزایش بازده، حایز اهمیت است. به‌علاوه، با وجود مشکلاتی از قبیل رعایت حریم و توسعه خطوط انتقال که منجر به افزایش بارگذاری خطوط و استفاده از حداکثر ظرفیت انتقال می‌گردد، تامین پایداری ولتاژ در شرایط عادی و پیشامدهای احتمالی، دشوارتر بوده و مستلزم توجه بیشتری است. TCSC وSVC به‌عنوان دو جبران‌ساز پیشرفته، به دلیل داشتن پاسخ سریع و عملکرد منعطف در وضعیت‌های مختلف سیستم، امکان افزایش بازده و اعمال شاخص پایداری ولتاژ عام را به‌خوبی فراهم می‌آورند.

در این رساله، TCSC وSVC با هدف دستیابی هم‌زمان به افزایش پایداری استاتیکی ولتاژ، افزایش بارپذیری شبکه، کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ، مکان‌یابی شده‌اند. همچنین در تابع هدف کاهش تلفات، هزینه سرمایه‌گذاری عناصر جبران‌ساز و توان تولیدی نیروگاه‌ها در اوج بار با احتساب نرخ بهره سالیانه نیز اضافه می‌گردد به نحوی که کاهش عوامل اصلی هزینه در جایابی مد نظر قرار گیرد. لذا به‌منظور تعیین پاسخ مساله شامل مقدار، موقعیت، تعداد و نوع مناسب آنها در سیستم قدرت، از روش‌های بهینه‌سازی چند منظوره مبتنی بر فازی و برنامه‌ریزی آرمانی (با اعمال نظر طراح)، استفاده شده است. مساله مکان‌یابی تشکیل شده، دارای پاسخ‌های متعددی است. بنابراین برای افزایش دقت در تعیین پاسخ، روش‌های هوشمند الگوریتم ژنتیک و آبکاری فولاد (با قابلیت عبور از بهینه‌های محلی) در کنار روش‌های بهینه‌سازی چند هدفه، بکار رفته‌اند. همچنین، برای کاربردی‌تر شدن نتایج، سطوح مختلف بار سالیانه نیز در مکان‌یابی لحاظ شده‌اند.

ساختار بهینه نصب که توسط روش پیشنهاد شده برای شبکه ۱۴ شینه IEEE و یک شبکه واقعی انتقال به‌دست آمده است، تمامی اهداف مورد نظر را به‌صورت هم‌زمان تامین نموده و علاوه بر خرید ادوات از محل کاهش هزینه سیستم، منافع مالی اضافه نیز به‌همراه داشته است. مسیرهای همگرایی زیگزاگ در تعیین پاسخ، قابلیت روش را در عبور از بهینه‌های محلی تایید می‌کند. به‌علاوه، نتایج نشان می‌دهند که عدم اعمال سطوح مختلف بار، به تعیین ساختار نصب اشتباه منجر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: مکان‌یابی، بهینه‌سازی چند منظوره، الگوریتم‌های هوشمند، TCSC وSVC.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه ۲

فصل دوم: مروری بر ادبیات موضوع

۲-۱- مقدمه ۱۰

۲-۲- مروری بر سابقه موضوع ۱۰

۲-۲-۱- جایابی FACTS به روش تحلیل حساسیت ۱۵

۲-۲-۲- جایابی بر مبنای پخش بار بهینه (OPF) ۱۷

۲-۲-۲-۱- فرمول‌بندی جایابی ادوات FACTS بر مبنای پخش بار بهینه ۱۸

۲-۲-۲-۲- برخی نتایج جایابی ادوات FACTS بر مبنای پخش بار بهینه ۱۹

۲-۲-۳- جایابی برمبنای بارپذیری سیستم قدرت ۲۰

۲-۲-٤- جایابی براساس حداقل تلفات ۲۲

۲-۲-۵- جایابی به‌منظور افزایش پایداری ولتاژ استاتیک ۲۳

۲-۲-۵-۱- افزایش پایداری استاتیکی ولتاژ با هدف حداقل هزینه جمعی ۲۳

۲-۲-۵-۲- نصب و بهره‌برداری از ادوات FACTS به‌منظور افزایش پایداری استاتیکی .. ۲۵

۲-۲-٦- شاخص تعادل بار ۲٦

۲-۲-۷- جایابی ادوات FACTS جهت حفظ امنیت در شرایط اضطراری ۲۷

۲-۳- نتیجه‌گیری ۲۸

فصل سوم: اهداف مکان‌یابی و مدل‌سازی‌ها

۳-۱- مقدمه ۳۱

۳-۲- معرفی توابع هدف ۳۳

۳-۲-۱- فرضیات بکار رفته در حل مساله ۳٤

۳-۲-۲- کاهش هزینه، حداقل‌سازی تلفات ۳۵

۳-۲-۲-۱- هزینه تلفات انرژی ۳٦

۳-۲-۲-۲- هزینه تولید در اوج بار ۳۷

۳-۲-۲-۳- هزینه تجهیزات TCSC و SVC ۳۸

۳-۲-۲-٤- تابع هزینه نهایی ٤١
۳-۲-۳- افزایش امنیت سیستم در مقابل سقوط ولتاژ ٤١
۳-۲-۳-۱- محاسبه حاشیه امنیتی سیستم ٤٣
۳-۲-٤- کاهش تخطی ولتاژ از محدودهٔ مجاز ٥٠
۳-۲-٥- محدودیت‌ها در مکان‌یابی ادوات FACTS ٥١
۳-۲-٦- نیاز به بهینه‌سازی چند هدفه ٥٢
۳-۳- مدل‌سازی TCSC/SVC و تغییرات لازم در معادلات امنیت ولتاژ ٥٣
۳-۳-۱- مشخصات TCSC ٥٣
۳-۳-۲- مشخصات SVC ٥٥
۳-۳-۳- مدل ریاضی TCSC و SVC و تغییرات لازم در معادلات امنیت ولتاژ ٥٦
۳-۳-۳-۱- مدل تزریق توان ٥٦
۳-۳-۳-۲- مدل خط و معادلات توان ٥٧
۳-۳-۳-۳- مدل حالت دایم و تزریق توان TCSC ٥٨
۳-۳-۳-٤- مدل حالت دایم SVC ٦٠
۳-۳-۳-٥- تغییرات لازم در معادلات امنیت ولتاژ ٦٣
۳-٤- نتیجه‌گیری ٦٤

فصل چهارم: بکارگیری الگوریتم‌های هوشمند بهینه‌سازی چند هدفه در حل مساله

٤-١- مقدمه ٦٦
٤-٢- بهینه‌سازی چند هدفه و روش‌های آن ٦٦
٤-٢-١- روش جمع وزنی ٦٨
٤-٢-٢- روش قیدی ε ٦٩
٤-٢-٣- روش منطق فازی ٧٠
٤-٢-٤- روش بهینه‌سازی آرمانی ٧٢
٤-٣- بهینه‌سازی به‌کمک روش‌های هوشمند ٧٣
٤-٣-١- الگوریتم ژنتیک، ساختار کلی و مفاهیم اساسی ٧٤
٤-٣-١-١- ترکیب الگوریتم ژنتیک با منطق فازی و بهینه‌سازی آرمانی ٧٦
٤-٣-٢- آبکاری فولاد ٨٢
٤-٣-٢-١- ترکیب روش آبکاری فولاد با منطق فازی و بهینه‌سازی آرمانی ٨٦
٤-٤- نتیجه‌گیری ٩١

فصل پنجم: نتایج و تحلیل آن‌ها

۵-۱- مقدمه ۹۳

۵-۲- تعیین مقادیر اولیه اهداف مکان‌یابی بدون حضور TCSC/SVC ۹۳

۵-۳- تعیین مقادیر بهینه تکی هر یک از توابع هدف ۹۹

۵-۳-۱- تابع هدف هزینه ۱۰۰

۵-۳-۲- تابع هدف افزایش حاشیه امنیتی و بارپذیری ۱۰۱

۵-۳-۳- تابع هدف کاهش انحراف ولتاژ ۱۰۲

۵-۳-٤- توابع هدف هزینه، حاشیه امنیتی- بارپذیری و انحراف ولتاژ با تعداد معلوم عناصر ۱۰۲

۵-٤- مکان‌یابی TCSC به‌تنهایی و به‌همراه SVC ۱۰٤

۵-۵- رفع گرفتگی خطوط به کمک افزایش بارپذیری شبکه ۱۰۹

۵-۵-۱- استفاده از ترکیب آبکاری فولاد و جمع وزنی جهت افزایش بارپذیری ۱۱۰

۵-۵-۲- استفاده از ترکیب الگوریتم ژنتیک و روش فازی در افزایش بارپذیری ۱۱۳

۵-۵-۳- مقایسه روش ضرایب وزنی با روش چند هدفه ژنتیک- فازی ۱۱۵

۵-٦- مکان‌یابی هوشمند و چندهدفه TCSC/SVC ۱۱٦

۵-٦-۱- استفاده از تحلیل حساسیت جهت انتخاب نقاط کاندیدای نصب ادوات ۱۲۳

۵-٦-۲- مقایسه روش بکار رفته و بررسی تاثیر سطوح بار بر نتایج مکان‌یابی ۱۲۵

۵-۷- ملاحظات مربوط به پیشامدهای اضطراری ۱۳۱

۵-۸- نتیجه‌گیری ۱۳۷

فصل ششم: جمع‌بندی و پیشنهادها

٦-۱- جمع‌بندی ۱٤۱

٦-۲- نوآوری‌ها ۱٤٦

٦-۳- پیشنهادها ۱٤٦

فهرست مراجع ۱٤۸

پیوست یک- مکانیزم اغتشاش در مکان‌یابی TCSC/ SVC ۱۵۷

پیوست دو- اطلاعات شبکه‌های ۱٤ شینه IEEE ۱٦۰

فهرست تصاویر

عنوان **صفحه**

۲-۱- افزایش ضریب بار براساس افزایش عناصر FACTS در یک شبکه با ۱۱۸ شین..... ۲۱
۳-۱- هزینه‌های سرمایه‌گذاری نمونه برای دو عنصر FACTS از جمله SVC..... ۳۹
۳-۲- هزینه‌های سرمایه‌گذاری نمونه سه عنصر FACTS از جمله TCSC..... ۳۹
۳-۳- تابع هزینه ادوات FACTS..... ٤۰
۳-٤- ساختار مداری TCSC و نمودار P-V..... ٥٤
۳-٥- ساختار مداری TSSC..... ٥٤
۳-٦- ساختمان SVC و مشخصه V-I آن..... ٥٥
۳-۷- مدل Π خط..... ٥۷
۳-۸- مدل Π خط به‌همراه یک TCSC مدل شده با خازن راکتانس متغییر..... ٥۸
۳-۹- چگونگی اعمال روش توان تزریقی..... ٥۹
۳-۱۰- مدل توان تزریقی TCSC..... ٥۹
۳-۱۱- مشخصه ولتاژ-جریان SVC..... ٦۱
۳-۱۲- مدل‌های پخش بار متداول SVC الف) مدل ژنراتور با شیب مشخصه ب) مدل ژنراتور با شیب مشخصه و ترانسفورماتور..... ٦۱
۳-۱۳- مقایسه توان راکتیو کشیده شده توسط مدل ژنراتوری و مدل سوسپتانس ثابت..... ٦۲
۳-۱٤- مدل سوسپتانس متغیر SVC..... ٦۳
٤-۱- تصویر فضای پارامتر به فضای توابع هدف..... ٦۸
٤-۲- مجموعه جواب‌های حداقل در یک فضای دو بعدی..... ٦۸
٤-۳- مرز جواب در یک فضای غیر محدب (مقعر)..... ٦۹
٤-٤- درک هندسی روش قیدی ε..... ٦۹
٤-٥- درک هندسی روش بهینه‌سازی آرمانی..... ۷۳
٤-٦- روندنمای کلی الگوریتم ژنتیک..... ۷٦
٤-۷- روندنمای ترکیب الگوریتم ژنتیک با منطق فازی..... ۷۷
٤-۸- تشکیل کروموزوم در الگوریتم ژنتیک..... ۷۷
٤-۹- توابع عضویت فازی برای اهداف f_1 ، f_2 و f_3..... ۸۰
٤-۱۰- ساختار کروموزوم در الگوریتم ژنتیک با تعداد مشخص ادوات..... ۸۱
٤-۱۱- ترکیب الگوریتم ژنتیک و روش فازی برای بهینه‌سازی اهداف رابطه (۴-۱۷)..... ۸۲

٤-١٢- تابع توزیع احتمال بولتزمن به ازاء مقادیر مختلف T..... ٨٤
٤-١٣- روندنمای روش آبکاری فولاد در حالت کلی..... ٨٥
٤-١٤- روندنمای روش آبکاری فولاد با اعمال منحنی بار سالیانه..... ٨٩
٤-١٥- تولید ساختار جدید با تعداد مشخص TCSC،SVC به‌کمک تحلیل اغتشاش..... ٩٠
٥-١- روند بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک در مکان‌یابی TCSC..... ١٠٦
٥-٢- ولتاژ شین‌های بار شبکه ١۴ شینه IEEE، با استفاده از TCSC و بدون آن..... ١٠٦
٥-٣- ولتاژ شین‌های بار شبکه ١۴ شینه IEEE، با استفاده از TCSC/SVC و بدون آنها..... ١٠٨
٥-٤- ولتاژ شین‌های بار شبکه ١۴ شینه IEEE، با استفاده از TCSC/SVC تعیین شده
در جدول (٥-١٥) و بدون آنها..... ١١٤
٥-٥- مسیر همگرایی تابع هدف فازی..... ١١٥
٥-٦- مقایسه نتایج مکان‌یابی در استفاده از روش‌های ژنتیک-فازی و آبکاری فولاد-
ضرایب وزنی..... ١١٦
٥-٧- مسیر همگرایی تابع هدف α در روش آبکاری فولاد-بهینه‌سازی آرمانی..... ١٢٠
٥-٨- مسیر همگرایی تابع هدف هزینه در روش آبکاری فولاد-بهینه‌سازی آرمانی..... ١٢٠
٥-٩- مسیر همگرایی تابع هدف حاشیه امنیتی- بارپذیری در روش آبکاری فولاد-
بهینه‌سازی آرمانی..... ١٢٠
٥-١٠- مسیر همگرایی تابع هدف ولتاژ در روش آبکاری فولاد-بهینه‌سازی آرمانی..... ١٢١
٥-١١- مقایسه هزینه تلفات، هزینه سرمایه‌گذاری TCSC/SVC و هزینه کل برای
پاسخ‌های پارتو، پاسخ آبکاری فولاد و پاسخ اولیه..... ١٢٨
٥-١٢- پاسخ‌های پارتو و آبکاری فولاد در مقایسه با پاسخ اولیه جهت بهبود حاشیه امنیتی..... ١٢٩
٥-١٣- پاسخ‌های پارتو و آبکاری فولاد در مقایسه با پاسخ اولیه جهت کاهش تخطی ولتاژ..... ١٢٩
٥-١٤- تاثیر استفاده از پاسخ‌های پارتو بدست آمده با بار سالیانه ثابت بر تخطی ولتاژ..... ١٣٠
پ١-١- حرکت جمعی تفاضلی (الف) ساختار جاری (ب) ساختار جدید بعد از حرکت..... ١٥٨
پ١-٢- حرکت ضربی (الف) ساختار جاری (ب) ساختار جدید با گام تصادفی دوازده..... ١٥٨
پ١-٣- حرکت تبادلی (الف) ساختار جاری (ب) ساختار جدید بعد از حرکت..... ١٥٩
پ١-٤- حرکت ترکیبی (الف) ساختار جاری (ب) ساختار جدید بعد از حرکت..... ١٥٩
پ٢-١- نمایش تک خطی شبکه نمونهٔ IEEE با ١٤ شین..... ١٦١
پ٢-٢- نمایش تک خطی شبکه تغییر یافته IEEE با ١٤ شین..... ١٦٢

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

۵-۱-الف- مقادیر محاسبه شده اولیه ولتاژ و توان بحرانی در شبکه نمونهٔ IEEE با ۱۴ شین در شرایط اولیه ضعیف ۹۴

۵-۱-ب- مقادیر محاسبه شده اولیه تلفات، تخطی ولتاژ و حاشیهٔ امنیتی در شبکه نمونهٔ IEEE با ۱۴ شین در شرایط اولیه ضعیف ۹۴

۵-۲- اطلاعات لازم جهت محاسبات اقتصادی در شبکه IEEE با ۱۴ شین ۹۵

۵-۳- اطلاعات لازم جهت محاسبات اقتصادی در شبکه برق فارس ۹۸

۵-۴- مقادیر ولتاژ حالت عادی و بحرانی (با بار اوج) شین‌های شبکه برق فارس به همراه بار بحرانی آنها ۹۹

۵-۵- مقادیر و موقعیت‌های TCSC و SVC در تعیین مقدار بهینه تابع هدف هزینه ۱۰۱

۵-۶- مقادیر و موقعیت‌های TCSC و SVC در تعیین مقدار بهینه تابع هدف حاشیه امنیتی ۱۰۱

۵-۷- مقادیر و موقعیت‌های TCSC و SVC در تعیین مقدار بهینه تابع هدف انحراف ولتاژ ۱۰۲

۵-۸- نتایج بهینه‌سازی تکی اهداف با تعداد پنج TCSC و SVC ۱۰۳

۵-۹- ساختار بهینه نصب TCSC و مقادیر اهداف مکان‌یابی ۱۰۶

۵-۱۰- ساختار بهینه نصب سه عدد TCSC و SVC به‌همراه مقادیر اهداف مکان‌یابی ۱۰۷

۵-۱۱- ساختار بهینه نصب سه عدد TCSC و SVC با تابع انحراف ولتاژ رابطه (۳-۳۱) ۱۰۹

۵-۱۲- ساختار بهینه نصب TCSC و SVC برای رفع گرفتگی خطوط شبکه ۱۴ شینه IEEE (روش آبکاری فولاد- جمع وزنی) ۱۱۱

۵-۱۳- مقایسه توان خطوط در هر دو حالت پایه و استفاده از TCSC و SVC جهت رفع گرفتگی خطوط در شبکه IEEE با ۱۴ شین ۱۱۱

۵-۱۴- ساختار بهینه نصب پنج عدد TCSC و SVC برای رفع گرفتگی خطوط شبکه ۱۴ شینه IEEE به‌همراه مقادیر اهداف ۱۱۲

۵-۱۵- ساختار بهینه نصب TCSC و SVC برای تامین اهداف رابطه (۴-۱۷) در شبکه ۱۴ شینه IEEE، (روش ژنتیک-فازی) ۱۱۳

۵-۱۶- مقایسه توان خطوط با استفاده از نتایج جدول (۵-۱۵) ۱۱۴

۵-۱۷- ساختار بهینه نصب پنج TCSC و SVC برای تامین تمامی اهداف مکان‌یابی در شبکه IEEE با ۱۴ شین، (روش آبکاری فولاد- بهینه‌سازی آرمانی) ۱۱۸

۵-۱۸- مقادیر اهداف مکان‌یابی با پنج عنصر بهینه تعیین شده در جدول (۵-۱۷)..... ۱۱۹
۵-۱۹- ساختار بهینه نصب TCSC و SVC برای تامین تمامی اهداف مکان‌یابی در شبکه برق فارس (روش ژنتیک- بهینه‌سازی آرمانی)..... ۱۲۲
۵-۲۰- نتایج بهینه در هر سطح بار بر اساس ادوات جایابی شده در جدول (۵-۱۹)..... ۱۲۲
۵-۲۱- ساختار بهینه نصب TCSC و SVC به‌همراه مقادیر اهداف مکان‌یابی بدون تحلیل حساسیت..... ۱۲۴
۵-۲۲- ساختار بهینه نصب TCSC و SVC به‌همراه مقادیر اهداف مکان‌یابی با انجام تحلیل حساسیت..... ۱۲۴
۵-۲۳- مقایسه نقاط بهینه پارتو در روش چند هدفی الگوریتم ژنتیک و پاسخ بهینه روش آبکاری فولاد..... ۱۲۷
۵-۲۴- تعیین مقادیر اهداف با نقاط بهینه پارتو از روش چند هدفی الگوریتم ژنتیک در سطوح مختلف بار..... ۱۳۱
۵-۲۵- حوادث خروج خط در شبکه ۱۴ شینه IEEE، بررسی حالت اولیه و کاربرد ادوات مکان‌یابی شده در جدول (۵-۱۷)..... ۱۳۳
۵-۲۶- حوادث خروج خط در شبکه ۱۴ شینه IEEE، بررسی ساختار بهینه و تنظیم مجدد TCSC و SVC..... ۱۳۴
۵-۲۷- نتایج بهینه نصب دو عنصر TCSC/SVC برای مقابله با شرایط اضطرای شبکه ۱۴ شینه IEEE..... ۱۳۶
۵-۲۸- ساختار نهایی نصب TCSC/SVC برای بهبود شرایط عادی و اضطرای در شبکه ۱۴ شینه IEEE..... ۱۳۷
پ۲-۱- اطلاعات شین‌های شبکه ۱۴ شینه IEEE..... ۱۶۰
پ۲-۲- محدودیت‌های توان در شبکه ۱۴ شینه IEEE..... ۱۶۰
پ۲-۳- اطلاعات خطوط شبکه ۱۴ شینه IEEE..... ۱۶۱
پ۲-۴- اطلاعات شین‌ها در شبکه تغییر یافته IEEE با ۱۴ شین..... ۱۶۲
پ۲-۵- محدودیت‌های توان در شبکه تغییر یافته IEEE با ۱۴ شین..... ۱۶۲
پ۲-۶- اطلاعات خطوط شبکه تغییر یافته IEEE با ۱۴ شین..... ۱۶۳

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

امروزه افزایش تقاضای جهانی مصرف انرژی به‌دلیل رشد جمعیت، گسترش شهرنشینی و تنوع استفاده از انرژی در کشورهای صنعتی، محدودیت‌هایی را در توان انتقالی از خطوط فراهم آورده است. لذا با توجه به اینکه ساخت یک سیستم انتقال جدید جهت تقویت سیستم اولیه نیازمند صرف زمانی طولانی است، انتقال توان بیشتر از سیستم اولیه، مشکلاتی نظیر پایداری ماندگار و گذرای سیستم را در همین مدت باعث خواهد شد. به‌عنوان یک راه حل برای غلبه بر این مشکلات و محدودیت‌های منابع مالی جهت ساخت واحدهای تولیدی جدید، اتصال شبکه های مجاور برق در کشورهای مختلف و تقویت خطوط ارتباطی بین آن ها مناسب به نظر می‌رسد. اما در این شرایط نیز با کاهش ظرفیت کلی نصب شده مشکلاتی مانند کنترل پخش توان، پایداری دینامیکی، پایداری ولتاژ و پایداری گذرا در سیستم پدیدار خواهد شد. همچنین خطر فروپاشی شبکه به‌دلیل قطعی‌های پی‌درپی تقویت می‌شود.

بهره‌برداری مفید و بهینه از سیستم‌های قدرت راه حل دیگری برای کاهش مشکلات تولید و انتقال توان است. این مشکلات عمدتاً مربوط به محیط زیست، حریم عبور، مسایل مالی، هزینه نصب و ساخت می‌باشند که توسعه شبکه‌های انتقال را با محدودیت مواجه می‌سازد. علاوه برآن، افزایش تولید به‌منظور تامین مصرف راه حل نهایی به‌شمار نمی‌رود، زیرا در این‌صورت با افزایش توان انتقالی از خطوط، تلفات شبکه تمایل به افزایش داشته و همان‌گونه که گفته شد پایداری سیستم به مخاطره می‌افتد. بنابراین استفاده موثر و بهینه از ظرفیت تجهیزات شبکه به‌عنوان یک راه حل مفید و اقتصادی در دستور کار شرکت‌های برق قرار گرفت و منجر به ابداع ابزارهایی جهت نیل به اهداف مذکور گردید که FACTS[1] نامیده شدند. انجام بهره‌برداری نامناسب از شبکه به‌دلیل وجود مشکلات متداول سیستم انتقال (پایداری و کنترل پخش توان) از یک سو و توانمندی کنترلی مناسب ادوات FACTS که خود مبتنی بر تجهیزات الکترونیک قدرت می‌باشند از سوی دیگر، منجر به رونق‌گیری کاربرد آنها در اواخر دهه هشتاد میلادی گردید. اولین مطالعات جهت بکارگیری این ادوات در موسسه تحقیقات

1-Flexible AC Transmission System

صنعت برق ایالات متحده صورت پذیرفت.

چگونگی تغییر شرایط مصرف، بهره‌برداری از شبکه‌های برق و بروز مشکلات تولید و انتقال برق بر اساس سوابق تاریخی موضوع نیز که منجر به پیدایش ادوات FACTS گردید، قابل توضیح است. مسایلی از جمله تحریم صدور نفت در اواسط دهه هفتاد، توجه به محیط زیست و مخالفت عمومی با گسترش نیروگاه‌های اتمی، قوانین محدود کننده و افزایش هزینه‌ها را در پی داشت. در این راستا صنایع متمرکز و بزرگ جای خود را به صنایع کوچک‌تر در نقاط مختلف جغرافیایی دادند. علاوه بر آن، نقل مکان مردم از مناطق سرد به گرم (به دلیل گرانی سوخت)، تغییرات قابل ملاحظه‌ای را در تقاضای برق موجب گردید. بدین ترتیب افزایش ظرفیت تولیدی شبکه و خطوط انتقال برای تامین برق مورد نیاز ضروری می‌نمود اما مشکلات اقتصادی، توجه عمومی به محیط زیست و سلامتی و ایجاد قوانین متعدد در مورد حریم‌ها موجب تاخیر زیادی در ساخت نیروگاه و احداث خطوط انتقال گردید.

پیدایش مشکلات اجتماعی جدید، تقویت شبکه‌های مجاور را از طریق اتصال آنها به یکدیگر و تشکیل شبکه یکپارچه قدرتمند اجتناب ناپذیر ساخت. فراهم شدن امکان بهره‌برداری از تولیدهای پراکنده، بهره‌مندی از تغییر اوج بار به دلیل شرایط آب و هوایی و زمانی مناطق مختلف و امکان استفاده از ظرفیت رزرو مناطق دیگر، تغییر قیمت سوخت و تغییر قوانین را می‌توان از مزایای دیگر اتصال شبکه‌های مجاور برشمرد. با این همه، هنوز انعطاف لازم برای مقابله با تغییرات محیطی و اقتصادی در سیستم‌های قدرت وجود نداشت.

در سیستم‌های بهم‌پیوسته، توان تولیدی نیروگاه‌های دور دست باید با عبور از سیستم انتقال شرکت‌های مختلف به محل مصرف مورد نظر برسد. این امر با توجه به اینکه توان عبوری از خطوط با امپدانس کمتر بیش از خطوط با ظرفیت بیشتر است، باعث عبور توان گردشی در مسیرهای ارتباطی شبکه‌های همجوار و در نتیجه اضافه بار خطوط و ایجاد تغییرات ولتاژ و مسائل حرارتی می‌گردید. در محل تحویل توان نیز، بدلیل احتمال بالای وقوع خطا و قطع شدن مسیر خطا دار، خطر فروپاشی ولتاژ ناشی از وجود بار سنگین در محل خطا قوت می‌گرفت. برای حل این مشکلات استفاده از

جبران‌گرهای خازنی پیشنهاد گردید. در سیستم‌های پیوسته رو به رشد، تامین حاشیه امنیتی کافی در مقابل سقوط ولتاژ بدون استفاده از جبران‌کننده‌ها جهت تقویت شبکه انتقال تقریباً ناممکن بود. لذا با توجه به مشکلات توسعه شبکه و محدودیت منابع مالی، استفاده گسترده از جبران‌گرهای قابل کنترل در دستور کار شرکت‌های برق قرار گرفت.

تازه‌ترین چالشی که صنعت برق با آن روبروست مساله سیستم‌های نوین رقابتی است. در این سیستم‌ها که هدف اصلی، ایجاد فضای رقابتی در زمینه تولید و عرضه برق جهت کاهش هزینه تمام شده می‌باشد، استقلال شرکت‌های تولید، انتقال و توزیع مطرح شده است. لذا با افزایش تولیدکنندگان مستقل در این گونه سیستم‌ها، تمایل به احداث نیروگاه در مناطق کم هزینه‌تر افزایش یافته و سطوح تولید متناسب با هزینه نسبی انواع سوخت و قوانین حافظ محیط زیست، دچار تغییراتی خواهد شد. این مساله بدون تردید مشکلات سیستم انتقال را تشدید کرده و تغییر ساختار شبکه‌های انتقال توان جهت آماده‌سازی بستر مناسب اجرای طرح را طلب می‌کند. این مهم علیرغم اینکه توسط راه حل‌های سنتی نظیر تقویت سیستم انتقال از طریق احداث خطوط جدید امکان پذیر است اما به‌دلایل زیست محیطی و اقتصادی عملی نیست. بنابراین در سیستم‌های جدید نیز استفاده از مزایای ادوات FACTS اجتناب ناپذیر می‌نماید.

FACTS عبارت از بکارگیری کنترل‌کننده‌های مبتنی بر الکترونیک قدرت در سیستم‌های انتقال متناوب به منظور افزایش کنترل‌پذیری سیستم و افزایش قابلیت انتقال توان، می‌باشد. به بیان دیگر، حل مشکلات بی‌باری خط انتقال (افزایش ولتاژ انتهای خط، کاهش پایداری)، مشکلات بارداری (افت ولتاژ، کاهش قدرت قابل انتقال)، فروپاشی ولتاژ، ناپایداری ولتاژ، نوسانات توان و زاویه و ناپایداری گذرا که همگی با افزایش طول خط شدت می‌یابند، نیاز به تجهیزاتی داشت که توان اکتیو و راکتیو را بصورت لحظه‌ای کنترل نماید. ادوات FACTS برای حل این مشکلات از آنجا که جبران‌سازهای متداول قادر به کنترل لحظه‌ای نبوده و فقط پله‌ای عمل می‌کنند، در دو نسل مبتنی بر کنترل تریستوری و مبتنی بر مبدل‌های استاتیک ظهور یافت. برای غلبه بر محدودیت‌های موجود در ساختار خطوط انتقال و برای سهولت تبادل توان بین شرکت‌های مختلف، ادوات FACTS دو هدف

اساسی را دنبال می‌کنند:

- افزایش قابلیت انتقال توان
- عبور دادن توان از مسیرهای مورد نظر

هدف اول به معنی این است که اگر سیستم در هنگام وقوع خطا و پس از آن کنترل شود، می‌توان توان انتقالی را تا رسیدن به حد حرارتی افزایش داد. البته این بدان معنی نیست که خطوط همیشه در حد حرارتی خود کار کنند (زیرا تلفات انتقال، زیاد و غیر قابل قبول خواهد بود) اما این امر در شرایط اضطراری ممکن است بکار گرفته شود.

هدف دوم بیان می‌دارد که در صورت قابل کنترل بودن جریان خط، می‌توان انتقال توان را از طریق مسیرهای انتقال دلخواه (قراردادی) عبور داده و عبور گردشی توان را محدود کرد. همچنین این هدف بصورت ضمنی بیان می‌دارد که تغییر سریع مسیر عبور توان در صورت وقوع حادثه باید امکان‌پذیر باشد تا عبور توان در کل سیستم انتقال به‌شکل دلخواه ممکن گردد.

واضح است که انجام این دو هدف، بطور قابل ملاحظه‌ای بر بهره‌برداری از سیستم انتقال موجود (و آینده) اثر گذاشته و مشکلات برشمرده را برطرف می‌سازد. در حال حاضر انواع مختلفی از عناصر FACTS در سیستم‌های قدرت برای کاربردهای متفاوت مورد استفاده قرار می‌گیرند. دو عنصر مشهور از این خانواده عبارتند از SVC[1] (جبران‌ساز Var استاتیک) و TCSC[2] (خازن سری کنترل تریستوری). از مهمترین کاربردهای SVC می‌توان موارد ذیل را برشمرد:

- تثبیت ولتاژ در شبکه ضعیف؛
- کاهش تلفات انتقال؛
- افزایش ظرفیت انتقال توان؛
- افزایش میرایی اغتشاشات کوچک؛
- بهبود پایداری ولتاژ؛
- حذف نوسان توان.

1-Static Var Compenstor
2-Thyristor Controlled Series Compensator

استفاده از خازن‌های سری قابل تنظیم، ابزار موثری جهت جبران‌سازی راکتیو خطوط انتقال بوده و روش مناسبی جهت کنترل توان انتقال یافته از این خطوط به‌حساب می‌آید. افزایش در توان انتقال یافته از خطوط بلند بدلیل اندوکتانس نسبتاً زیاد این خطوط در شرایط عادی (بدون جبران‌سازی) می‌تواند سبب ناپایداری شود. خازن‌های سری قابل تنظیم می‌توانند با کنترل راکتانس خط، نقش موثری در تثبیت خطوط بلند ایفا کنند. معمولاً هدف از جبران‌سازی خطوط انتقال با خازن‌های سری را می‌توان در تحقق موارد ذیل دانست:

- افزایش ظرفیت انتقال توان و افزایش حدپایداری گذرا؛
- کاهش تلفات (تسهیم توان بین خطوط موازی)؛
- افزایش حد پایداری استاتیکی ولتاژ.

با توجه به ویژگی‌های دو عنصر TCSC و SVC که تجهیزات متداول شبکه قدرت نمی‌توانند جایگزیین کاربردهای آنها شوند، این سوال مطرح است که آیا بهره‌برداری بهینه از شبکه با کمک این ادوات به نحوی که از محل صرفه‌جویی اقتصادی احتمالی حاصل شده بتوان، هزینه مربوط به نصب تجهیزات جدید را به میزان قابل توجهی کاهش داده و علاوه بر آن امکان کاهش ظرفیت واحدهای تولیدی را فراهم آورد، میسر است؟ همچنین به‌دلیل تنوع تغییرات در میزان و موقعیت بارها در فصول مختلف که باعث عدم توسعه شبکه قدرت هم‌راستا با افزایش مصرف در شبکه می‌شود، آیا ادوات مذکور می‌توانند به نحوی جایابی شوند که در شرایط تغییر بار، همچنان قادر به برقراری بهره‌برداری بهینه از شبکه باشند؟ آیا این ادوات می‌توانند علاوه بر بهبود بهره‌برداری شرایط عادی شبکه، به‌طرز قابل قبولی در کاهش تاثیرات نامطلوب پیشامدها موثر واقع شود؟ به‌عنوان مثال، آیا در اثر بروز خطا یا یک پیشامد احتمالی، می‌توان به کمک این ادوات از خروج تعداد زیادی از خطوط انتقال جلوگیری کرده و حذف اضافه بار سایر خطوط، بهبود حاشیه ایمنی شبکه و رفع ناپایداری ولتاژ را باعث شد؟ در این صورت، مقادیر، موقعیت و نوع ادوات مورد نیاز چگونه تحت تاثیر قرار می‌گیرند؟ آیا استفاده از TCSC به‌تنهایی قادر به تامین تمامی اهداف می‌باشد یا اینکه اهداف مکان‌یابی در صورت استفاده هم‌زمان از دو عنصر TCSC و SVC بهتر تامین می‌شوند؟