نشریه علمی‌پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی
سال دهم، شمارهٔ سوم/ پاییز ۱۳۹۹/ صفحه ۱۲ـ۲۹

جایابی بهینهٔ ادوات FACTS در شبکهٔ برق منطقه‌ای گیلان با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات مبتنی بر DPL نرم‌افزار DIgSILENT

امیر باقری[۱*]، عباس ربیعی[۲]، سجاد گلوانی[۳]، فرزاد فلاحی[۴]

[۱] استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
amir_bagheri@znu.ac.ir
[۲] دانشیار، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
rabiee@znu.ac.ir
[۳] استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
s.galvani@urmia.ac.ir
[۴] کارشناس ارشد، دفتر برنامه‌ریزی و مطالعات بار، شرکت برق منطقه‌ای گیلان، رشت، ایران
f.falahi@gilrec.co.ir

چکیده: سیستم‌های انتقال انعطاف‌پذیر (FACTS) کارایی مناسبی در رفع مشکلات شبکه‌های انتقال از خود نشان داده‌اند. هدف از برنامه‌ریزی ادوات FACTS تعیین نوع، مکان، و مشخصات مناسبِ این تجهیزات در شبکه به‌منظور بهبود پارامترهای مختلف فنی سیستم قدرت است. برنامه‌ریزی ادوات FACTS یک مسئلهٔ بهینه‌سازی غیرخطی با متغیرها و قیود فراوان است که برای حل آن استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مناسب ضروری می‌باشد. معمولاً برنامه‌های بهینه‌سازی در محیط نرم‌افزارهای MATLAB یا GAMS پیاده‌سازی می‌شوند. از طرفی، در شرکت‌های برق معمولاً از نرم‌افزار DIgSILENT به‌منظور انجام مطالعات شبکه استفاده می‌شود. لذا برای بهینه‌سازی لازم خواهد بود که اطلاعات شبکه به نرم‌افزارهای مذکور انتقال داده شود که این عمل برای کاربران امری دشوار و زمان‌بر است. در این مقاله، مسئلهٔ جایابی ادوات FACTS توسط الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات گسسته بر روی شبکهٔ برق منطقه‌ای گیلان صورت می‌پذیرد. الگوریتم مذکور در محیط برنامه‌نویسی (DPL) نرم‌افزار دیگسایلنت پیاده‌سازی شده و بدین ترتیب نیازی به انتقال اطلاعات شبکه برای انجام بهینه‌سازی در نرم‌افزار دیگر نخواهد بود. نتایج مطالعه بیانگر کارایی فنی و اقتصادی احداث ادوات FACTS پیشنهادی در شبکهٔ مورد مطالعه است.

واژه‌های کلیدی: ادوات FACTS، جایابی بهینه، الگوریتم اجتماع ذرات گسسته، نرم‌افزار DIgSILENT، محیط DPL.

---

* نویسندهٔ مسئول

۱. مقدمه

سیستم‌های انتقال و فوق توزیع به‌عنوان مهم‌ترین مدارهای واسط در زنجیرهٔ تولید تا مصرف مطرح‌اند. کارایی و عملکرد مناسب این مجموعه در حالت ماندگار و گذرای سیستم قدرت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و در امنیت و کفایت کلِ سیستم قدرت تأثیر بسزایی خواهد داشت. کاهش تلفات و افت ولتاژ در مسیر شارش توان از مراکز تولید به مراکز مصرف، همواره به‌عنوان یک شاخص مهم از معیارهای کارایی سیستم قدرت در حالت ماندگار مطرح بوده است. از سوی دیگر، قابلیت سیستم قدرت در حفظ پایداری خود در شرایط گذرایی که ناشی از وقوع اغتشاش و خطا در نقاط مختلف شبکه است، به‌عنوان یک معیار اساسی دیگر از معیارهای یک سیستم قدرتِ کارا و قابل اطمینان محسوب می‌شود [۱ـ۳]. دو عامل اشاره‌شده یعنی افت ولتاژ مجاز و مسائل مربوط به پایداری دینامیکی و گذرا دلایلی هستند که مانع بهره‌برداری کامل از ظرفیت خطوط انتقال و سایر تجهیزات نظیر ترانسفورماتورها می‌شوند. این موانع باعث می‌شوند که توان عبوری از تجهیزات کمتر از حد حرارتی مجاز آن‌ها شود. همچنین با توجه به اینکه در بازار برق رقابتی مصرف‌کنندگان قابلیت انتخاب منبع انرژی (نیروگاه) و عقد قرارداد را دارند ممکن است برخی خطوط دچار اضافه‌بار و یا گرفتگی شوند. در صورت ادامهٔ اضافه‌بار و یا گرفتگی خطوط، امنیت شبکه دچار مشکل شده و ممکن است فروپاشی رخ دهد [۴]. از سوی دیگر، عبور توان راکتیو از شبکه باعث افزایش تلفات و ایجاد افت ولتاژ می‌شود. در صورتی که توان راکتیو تأمین نگردد ممکن است باعث ایجاد نوسان ولتاژ و در نهایت باعث فروپاشی ولتاژ شود. بنابراین یکی از دلایل اصلی فروپاشی ولتاژ در سیستم‌های قدرت، محدودیت توان راکتیو در سیستم است [۵]. در این راستا تلاش‌های فراوانی توسط محققان و شرکت‌های برق برای جبران توان راکتیو به‌منظور بهبود شرایط ولتاژ، کاهش تلفات و افزایش پایداری صورت گرفته و روش‌های متنوعی برای تحقق این امر اتخاذ شده است. پیشرفت سریع تکنولوژیِ الکترونیک قدرت، امکان توسعهٔ تجهیزات کنترلی جدید به‌منظور بهره‌برداریِ بهتر از سیستم‌های موجود را فراهم آورده است. در سال‌های اخیر، تجهیزات کنترلی متعددی با عنوان تکنولوژی سیستم‌های انتقال انعطاف‌پذیر AC (FACTS[1]) طراحی و تکمیل شده‌اند. تجهیزات FACTS را می‌توان به‌طور مؤثری برای کنترل عبور توان، تقسیم بار بین کریدورهای موازی، تنظیم ولتاژ، افزایش پایداری گذرا و میراسازی نوسانات فرکانس پایین سیستم به کار برد [۶].

در حال حاضر، در اکثر شرکت‌های برق منطقه‌ای، کنترل پخش بار، ولتاژ، و توان راکتیو به‌صورت استاتیک و توسط خازن‌ها و راکتورها انجام می‌شود. تجهیزات استاتیکیِ کنترل ولتاژ به‌دلیل تغییر بار به‌صورت روزانه و فصلی، توانایی کافی در بهبود پیوستهٔ پخش بار و ولتاژ را در همهٔ شرایط کاری ندارند. با توجه به اهمیت مسئلهٔ پخش بار بهینه و کاهش تلفات، و پتانسیل بالقوهٔ ادوات FACTS جهت کنترل پخش بار تحت تمامی شرایط بهره‌برداری، مطالعه و بررسی به‌کارگیری این ادوات می‌تواند بسیار مفید و مؤثر بوده و مزایای فنی و اقتصادی فراوانی برای شرکت‌های برق به دنبال داشته باشد. از دیدگاه نوع اتصال به شبکه، ادوات FACTS به سه دسته تقسیم‌بندی می‌شوند: ادوات سری (مانند TCSC[2] و SSSC[3]) که نقش اصلی آن‌ها کنترل پخش توان و بهبود نوسانات فرکانس پایین توان می‌باشد، ادوات موازی (مانند SVC[4] و STATCOM[5]) که هدف اصلی از به‌کارگیری آن‌ها کنترل ولتاژ می‌باشد، و ادوات سری–موازی (مانند UPFC[6] و PST[7]) که می‌توانند هم‌زمان کنترل پخش توان و ولتاژ را انجام دهند. در صورتی که بتوان نوع مناسبی از ادوات FACTS را با ظرفیت و تنظیمات پارامتری مناسب در مکان مناسبی از شبکه احداث کرد، می‌توان انتظار داشت که توان به‌طور مناسبی بین خطوط تقسیم و تعدیل شده، پروفیل ولتاژ شبکه بهبود یافته، اضافه‌بار خطوط کم و یا حذف شده، پایداری گذرا و دینامیکی شبکه بهبود یافته، بارپذیری سیستم افزایش یافته و نیاز به تقویت و توسعهٔ شبکهٔ موجود برطرف و یا کمتر گردد [۶]. هدف از جایابی ادوات FACTS یافتن نوع، ظرفیت، مکان و تنظیم بهینهٔ پارامترهای این تجهیزات است. مطالعات متعددی دربارهٔ جایابی تجهیزات مختلف FACTS در سیستم قدرت صورت پذیرفته است [۷ـ۱۵]. مرجع [۷] از SVC و TCSC برای افزایش ظرفیت در دسترس سیستم انتقال (ATC) در طی شرایط عادی و پیشامد خطوط استفاده کرده است که در آن ATC[8] به کمک پخش بار تداومی (CPF) با درنظرگرفتن حد حرارتی و پروفیل ولتاژ محاسبه می‌شود. برای بهینه‌سازی مکان و پارامترهای کنترلی SVC و TCSC از الگوریتم ژنتیک با کدینگ حقیقی استفاده شده است. همین مسئله در مرجع [۱۱] به‌صورت یک بهینه‌سازی چندهدفه با اهداف بهبود پروفیل ولتاژ، کاهش بارگذاری خطوط و کاهش تلفات با استفاده از الگوریتم طوفان مغزی (BSOA[9]) مطرح شده است. شبیه‌سازی‌ها در محیط نرم‌افزار MATLAB انجام پذیرفته و نتایج با الگوریتم‌های PSO[10]، ژنتیک، تکامل تفاضلی (DE[11]) و الگوریتم ترکیبی

1. Flexible AC Transmission System

2. Thyristor-Controlled Series Capacitor
3. Static Synchronous Series Compensator
4. Static VAr Compensator
5. STATic COMpensator
6. Unified Power Flow Controller
7. Phase Shifting Transformer
8. Available Transmission Capacity
9. Brain-Storm Optimization Algorithm
10. Particle Swarm Optimization
11. Differential Evolution

ژنتیک و جستجوی الگو (GA-PS[1])، الگوریتم جستجوی عقبگرد (BSA[2]) الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA[3]) و الگوریتم بازتولید غیرجنسی (ARO[4]) مقایسه شده است. در مرجع [۱۲] مسئلهٔ جایابی ادوات FACTS به‌صورت یک پخش بار بهینهٔ مقید پراکنده (Sparsity-Constrained OPF) فرمول‌بندی شده و در محیط نرم‌افزار MATLAB توسط روش تغییر جهت ضرایب حل شده است. روش پیشنهادی به جایابی SVC، TCSC و ترانسفورماتور شیفت فاز (PST) بر روی شبکه‌های با ابعاد مختلف پرداخته است. مرجع [۱۳] روشی برای جایابی بهینهٔ ادوات مختلف FACTS در سیستم قدرت در حضور منابع تولیدی بادی در محیط بازار برق با هدف حداکثر سازی سود و کاهش هزینه‌های احداث و بهره‌برداری سیستم پرداخته است. یک مدل بهینه‌سازی دومرحله‌ای برای جایابی بهینهٔ راکتور سری متغیر (VSR[5]) و ترانسفورماتور شیفت فاز در سیستم انتقال در حضور نفوذ بالای تولیدات بادی در مرجع [۱۴] ارائه شده است. مرحلهٔ اولِ الگوریتم به دنبال حداقل‌سازی هزینه‌های ادوات FACTS، هزینه قطع توان بادی، و هزینهٔ قطع بار می‌باشد. مرحلهٔ دوم نیز به تسویهٔ قیمت بازار تحت سناریوهای مختلف بهره‌برداری می‌پردازد. یک روش تجزیه برای حل این الگوریتم دومرحله‌ای به کار گرفته شده است. این مرجع از مدل DC برای محاسبات پخش بار استفاده کرده است. در مرجع [۱۶]، مدلی برای در مدار قرار گرفتن واحدها (UC[6]) در حضور ادوات FACTS و ذخیره‌سازهای انرژی ارائه شده است. نتایج در چهار حالت شبیه‌سازی بررسی شده است: حالت بدون حضور ادوات FACTS و ذخیره‌سازها، فقط حضور ادوات FACTS، فقط حضور ذخیره‌سازها، و حضور همزمان ادوات FACTS و ذخیره‌سازها. چهار حالت مذکور از دیدگاه‌های مختلف از جمله هزینه‌های احداث و بهره‌برداری، هزینهٔ قطع توان بادی، و تعداد واحدهای نیروگاهی در مدار قرار گرفته مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. کمترین تعداد واحدهای در مدار قرار گرفته زمانی است که هر دوی ادوات FACTS و ذخیره‌سازها مورد استفاده قرار گیرند، اما نتیجه‌گیری کلی این است که استفاده از ادوات FACTS به‌صرفه‌تر خواهد بود. این مرجع از مدل DC برای پخش بار استفاده کرده و مدل‌سازی در محیط نرم‌افزار GAMS[7] انجام شده است. در مرجع [۱۷] یک روش بهینه‌سازی برای جایابی بهینهٔ TCSC و UPFC به همراه واحدهای تولید بادی برای به‌دست‌آوردن حداکثر رفاه اجتماعی شامل سود مصرف‌کنندگان و شرکت‌های تولیدی پیشنهاد شده است. نتایج به‌دست‌آمده در نرم‌افزار MATLAB نشان می‌دهد که جایابی واحدهای بادی در میزان سود اقتصادی تحت شرایط بازار برق بسیار مهم است. عدم قطعیت باد باعث تأثیر منفی در سود اقتصادی می‌شود که احداث ادوات FACTS می‌تواند این نقیصه را برطرف کند. همچنین، در مقایسه با TCSC، استفاده از UPFC کارایی اقتصادی بیشتری خواهد داشت. مرجع [۱۸] یک مدل تصادفی برای جایابی ادوات FACTS توزیع شده (D-FACTS[8]) و بررسی اثرات آن‌ها بر پخش بار ارائه داده است. این ادوات از دیدگاه کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و قطع انرژی بادی با ادوات FACTS معمولی مقایسه شده‌اند. نتایج تحت سناریوهای متفاوتی از عدم قطعیت شرایط شامل نوسانات قیمت سوخت، بازنشستگی واحدهای تولیدی و تولید واحدهای بادی بررسی شده‌اند. نتایج مقایسه بیانگر کارایی بیشتر ادوات D-FACTS نسبت به ادوات FACTS معمولی است.

مرور مقالات پیشین نشان می‌دهد که مطالعات انجام‌شده در زمینهٔ برنامه‌ریزی ادوات FACTS، بهینه‌سازی را در محیط نرم‌افزارهایی مانند GAMS و MATLAB انجام داده‌اند. درحالی‌که در عمل و در شرکت‌های برق، مطالعات سیستم قدرت معمولاً در محیط نرم‌افزارهای DIgSILENT[9] یا PSSE[10] انجام می‌پذیرد. بدین ترتیب لازم خواهد بود که اطلاعات شبکه از این دو نرم‌افزار به نرم‌افزارهای بهینه‌سازی انتقال داده شده و پس از بهینه‌سازی با روش‌های ریاضی، ابتکاری یا فرابتکاری، در نهایت نتیجهٔ بهینه‌سازی دوباره وارد نرم‌افزار گردد. علاوه بر آنکه این موضوع کار را برای مهندسین و کاربران دشوار و زمان‌بر می‌کند، نیاز به دو نرم‌افزار خواهد داشت. همچنین مقالات مورد بررسی، شرایط واقعی شبکه مانند سطوح مختلف بارگذاری، مدل AC برای پخش بار شبکه، حبس تولید و تبادلات توان‌های اکتیو و راکتیو با شبکه‌های برق مجاور را مد نظر قرار نداده‌اند. لذا در این مقاله، بهینه‌سازی جایابی ادوات FACTS در شبکهٔ برق منطقه‌ای گیلان در محیط برنامه‌نویسی (DPL[11]) نرم‌افزار دیگسایلنت صورت می‌پذیرد و به این ترتیب نیازی به انتقال اطلاعات بین نرم‌افزارها نخواهد بود. همچنین الزامی به ساده‌سازی و یا خطی‌سازی معادلات پخش بار وجود نداشته و محاسبات می‌تواند با دقت کامل در نرم‌افزار دیگسایلنت انجام پذیرد. در این مقاله از میان ادوات FACTS دو تجهیز SVC و PST برای حل مشکلات شبکه شامل اضافه‌بار خطوط و افت ولتاژ پست‌ها با استفاده از بستهٔ نرم‌افزاری پیشنهادی در شبکهٔ برق منطقه‌ای گیلان جایابی می‌شوند. با توجه به پیچیده و غیرخطی بودن

1. Genetic Algorithm
2. Backtracking Spiral Algorithm
3. Gravitational Search Algorithm
4. Sexual Reproduction Optimization
5. Variable Series Reactor
6. Unit Commitment
7. General Algebraic Modeling
8. Distributed FACTS
9. DIgital SImuLation and Electrical NeTwork
10. Power System Simulator for Engineering
11. DIgSILENT Programming Language

مسئله از الگوریتم اجتماع ذرات گسسته (DPSO[1]) به‌منظور بهینه‌سازی در محیط DPL نرم‌افزار دیگسایلنت بهره گرفته می‌شود. نتایج مطالعه بیانگر کارایی روش پیشنهادی در مدیریت پخش بار و بهبود پارمترهای فنی سیستم است. به‌طور کلی، نوآوری‌های مقالهٔ حاضر را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

- فرموله کردن مسئلهٔ جایابی بهینهٔ ادوات FACTS به‌صورت یک مسئلهٔ بهینه‌سازی غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح (MINLP[2])؛
- پیاده‌سازی مدل بهینه‌سازی بر روی یک شبکه واقعی و لحاظ کردن شرایط واقعی شبکه و تعیین محل، ظرفیت و تنظیمات بهینهٔ ادوات FACTS؛
- حل مسئله جایابی به‌ازای سطوح مختلف بارگذاری شبکه و نه فقط یک نقطهٔ کار؛
- درنظرگرفتن محدودیت‌های واقعی شبکه، نظیر پخش بار AC، شرایط ولتاژ، حبس تولید و تبادلات توان‌های اکتیو و راکتیو با شبکه‌های برق منطقه‌ای مجاور؛
- انجام بهینه‌سازی در داخل نرم‌افزار DIgSILENT و عدم نیاز به نرم‌افزار بهینه‌سازی دیگر مانند GAMS یا MATLAB؛
- راحتی کار با بسته نرم‌افزاری تهیه‌شده برای طراحان و کارشناسان شرکت‌های برق.

۲. مدل‌سازی ادوات FACTS

در این مقاله از میان تجهیزات FACTS از جبران‌ساز استاتیکی وار (SVC) به‌عنوان تجهیز موازی، و از ترانسفورماتور شیفت فاز (PST) به‌عنوان تجهیز سری استفاده شده است.

۱.۲. علت به‌کارگیری SVC و PST در شبکهٔ برق منطقه‌ای گیلان

توان عبوری از خطوط انتقال توسط سه عامل محدود می‌شود: الف. حد حرارتی هادی‌های خط انتقال (در خطوط انتقال کوتاه) ب. حد افت ولتاژ مجاز (در خطوط با طول متوسط) و ج. حد پایداری سیگنال کوچک (در خطوط با طول بلند). در شبکهٔ برق منطقه‌ای گیلان خطوط انتقال طولانی وجود ندارند به‌گونه‌ای که میانگین طول خطوط ۲۳۰ کیلوولت شبکه حدود ۴۰ کیلومتر، و میانگین طول خطوط ۶۳ کیلوولت حدود ۱۱ کیلومتر است. این مسئله حاکی از آن است که با توجه به کوتاه بودن خطوط، مشکل شبکه عمدتاً مربوط به رسیدن خطوط به حد بارگذاری حرارتی‌شان می‌باشد. برای کنترل بارگذاری خطوط و بارگذاری آن‌ها، ادوات FACTS ای PST، TCSC، و SSSC کاربرد دارند. تجهیزات TCSC و SSSC برای کاهش امپدانس سری خط معمولاً در زمانی که حد پایداری محدودکنندهٔ انتقال توان است به کار می‌روند، درحالی‌که در خطوط شبکهٔ برق منطقه‌ای گیلان، حد حرارتی عامل محدود کننده است و مشکل پایداری زاویه‌ای مطرح نیست. بنابراین مناسب خواهد بود که از تجهیز برای تغییر زاویه انتقال استفاده گردد تا امکان کنترل روی گردش توان اکتیو جهت کاهش بارگذاری خطوطِ پربار و یا ایجاد تعادل توان بین خطوط وجود داشته باشد. با به‌کارگیری تجهیز PST، کنترل ذکرشده می‌تواند متناسب با شرایط بهره‌برداری شبکه منعطف باشد و مشکلاتی نظیر حبس تولید (عدم امکان تولید توان در ظرفیت نامیِ نیروگاه‌ها به‌خاطر مشکل تراکم خطوط) را حل نماید. از طرف دیگر با توجه به بهره‌برداری شبکهٔ فوق توزیع برق منطقه‌ای گیلان در حالت رینگ، بارگذاری سنگین شبکه (مخصوصاً در شرایط بار پیک) و گردش نامناسب توان راکتیو در خطوط که منجر به افت ولتاژ بالا در برخی پست‌ها و افزایش تلفات انرژی می‌شود، وجود جبران‌سازی موازی در سطوح فوق توزیع ضروری می‌نماید. با استفاده از جبران‌ساز مناسب توان راکتیو، می‌توان پروفیل ولتاژ در رینگ‌های فوق توزیع را به‌صورت مسطح درآورد که این امر منجر به کاهش چشمگیر گردش توان راکتیو و در نهایت کاهش بارگذاری خطوط و پست‌ها خواهد شد. البته با توجه به تغییر شرایط بهره‌برداری (مثلاً تغییرات مستمر بار شبکه)، لازم است این جبران‌سازی به‌صورت دینامیک توسط ادوات FACTS موازی مانند SVC صورت پذیرد. برای جبران‌سازی موازی خط می‌توان از تجهیزات دیگر مانند STATCOM و برای جبران‌سازی همزمان سری/ موازی از تجهیزاتی مانند UPFC بهره برد، اما این تجهیزات نسبت به SVC و PST گران‌تر بوده و صرفهٔ اقتصادی ندارند و همچنین سیستم کنترلی آن‌ها بسیار پیچیده است. مضاف بر اینکه نمونه‌های عملی زیادی از این تجهیزات در شبکه‌های قدرت مختلف دنیا وجود ندارند.

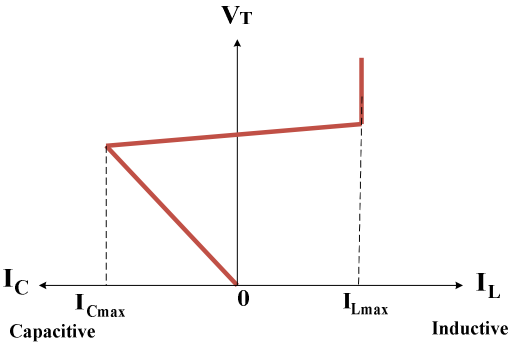
۲.۲. مدل SVC

جبران‌ساز استاتیکی وار با وارد نمودن امپدانس موازی در مدار و تزریق یا جذب جریان راکتیو، باعث کنترل پارامترهای سیستم قدرت به‌ویژه ولتاژ باس‌ها می‌شود. همان طور که در شکل (۱-الف) نشان داده شده، SVC شامل راکتور سوئیچ‌شونده یا کنترل‌شونده با تریستور (TSR/TCR[3])، خازن سوئیچ‌شونده با تریستور (TSC[4])، خازن سوئیچ‌شوندهٔ مکانیکی (MSC[5]) و فیلتر هارمونیکی است. مشخصهٔ ولتاژ-جریان SVC نیز در شکل (۱-ب) نمایش داده شده است [۶ و ۱۹].

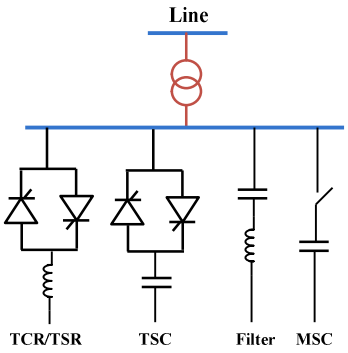
1. Discrete Particle
2. Mixed-Integer Non-Linear Programming
3. Thyristor-Controller (Switched) Reactor
4. Thyristor-Switched Capacitor
5. Mechanically-Controlled Capacitor

۳.۲. مدل PST

ترانسفورماتور شیفت فاز (PST) نوع خاصی از ترانسفورماتور است که قادر است با تزریق ولتاژ سری که زاویهٔ آن قابل کنترل است، باعث کنترل پخش توان اکتیو در سیستم‌های انتقال سه‌فاز گردد. ساختار مداری PST در شکل (۲-الف) نشان داده شده است. این ساختار شامل یک ترانسفورماتور تحریک برای تأمین ولتاژ ورودی، یک ترانسفورماتور سری برای تزریق ولتاژ قابل کنترل $\vec{V}_\alpha$ در خط انتقال، و یک مبدل یا تپ‌چنجر که کنترل اندازه یا زاویهٔ ولتاژ تزریقی را بر عهده دارد تشکیل شده است [۱۹]. در شکل (۲-الف) PST روی یک خط انتقال مابین باس‌های i و j نصب شده است. سمت‌های ارسال و دریافت خط انتقال با فازور ولتاژ V_S و V_R و امپدانس‌های مربوطه با Z_S و Z_R مشخص شده‌اند.

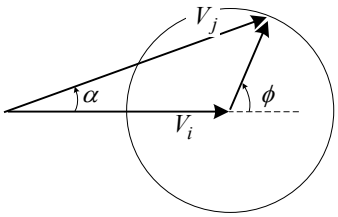


(ب)

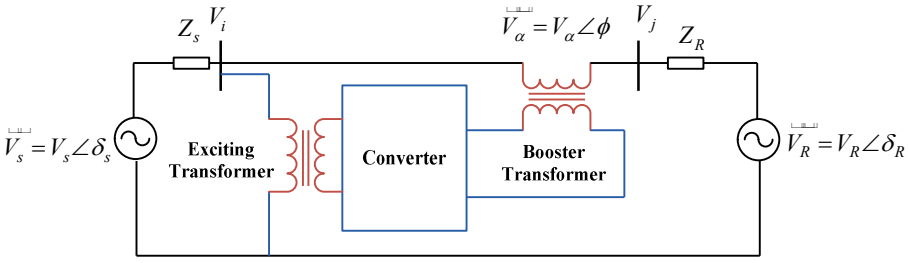


(الف)

شکل (۱): (الف). ساختار مداری SVC؛ (ب). مشخصهٔ ولتاژ جریان SVC



(ب)



(الف)

شکل (۲): ترانسفورماتور شیفت فاز (الف). ساختار مداری؛ (ب). دیاگرام فازوری شیفت فاز

با توجه به اندازه و زاویهٔ ولتاژ تزریقی ($\vec{V}_\alpha$)، اندازه و زاویهٔ ولتاژ شبکه (V_j) تغییر می‌کند (شکل ۲-ب) [۲۰ و ۲۱]. با وجود PST در خط انتقال، معادلهٔ عبور توان اکتیو با رابطهٔ زیر قابل بیان است:

$$P=\frac{|V_S||V_R|}{X_{eq}}sin(\delta_S-\delta_R\pm\alpha) \qquad (۱)$$

که در آن، X_{eq} امپدانس معادل خط و منبع، و δ_S و δ_R زوایای فاز ولتاژهای V_S و V_R می‌باشند.

۳. فرمول‌بندی مسئله

مسئلهٔ جایابی ادوات FACTS یک مسئلهٔ بهینه‌سازی است که مدل ریاضی آن را می‌توان توسط تابع هدف و قیود مربوطه به شرح زیر بیان کرد.

۱.۳. تابع هدف

با توجه به اینکه هدف از جایابی تجهیزات FACTS کاهش بارگذاری خطوط و بهبود پروفیل ولتاژ در شبکه می‌باشد، تابع هدف مسئله (OF) به‌صورت رابطهٔ (۲) تعریف شده است که در آن، جملات اول و دوم به‌ترتیب بیانگر تابع هدف بارگذاری و پروفیل ولتاژ می‌باشند.

از آنجا که این دو تابع هدف هم‌جنس نیستند، به‌صورت نرمالیزه‌شده یا پریونیت با هم جمع بسته شده‌اند؛ به‌عبارتی هر دو تابع هدف طبق روابط (۳) تا (۶) به مقدار اولیهٔ خودشان (مقدار قبل از جایابی تجهیزات FACTS) تقسیم شده‌اند. رابطهٔ (۴) مقدار بارگذاری تجهیزات را به‌صورت نرمالیزه‌نشده نشان می‌دهد که در آن جملات اول و دوم به‌ترتیب بیانگر مجموع بارگذاری خطوط و ترانسفورماتورها می‌باشند. در این رابطه برای خطوط و ترانسفورماتورهایی که بارگذاری آن‌ها از حد مجاز (۸۰٪) فراتر باشد یک ضریب جریمهٔ بزرگ (که توسط کاربر تعیین می‌شود) در نظر گرفته شده است (α و γ). همچنین برای ایجاد تمایز بین خطوط

انتقال و فوق توزیع یک ضریب اهمیت (μ) نیز در نظر گرفته شده است؛ با توجه به این ضریب کاربر می‌تواند اهمیت خطوط انتقال نسبت به فوق توزیع را در نظر بگیرد. همچنین رابطهٔ (۶) مجموع مقدار انحراف ولتاژ باس‌ها از ۱ پریونیت را به‌صورت نرمالیزه‌نشده نشان می‌دهد که در آن، ضریب جریمهٔ β برای باس‌هایی در نظر گرفته شده است که ولتاژ آن‌ها از محدودهٔ استاندارد ($0.95 \le |V| \le 1.05$) خارج شده باشد. شایان ذکر است که با توجه به تغییرات بار و شرایط بهره‌برداری سیستم، در این مقاله مطالعه برای سه سطح بارِ پیک، میان‌باری و کم‌باری صورت می‌پذیرد. اندیس ℓ در روابط بیانگر سطوح مختلف بار شبکه (Loading) است. پارامترهای مربوط به معادلات به‌طور کامل در ضمیمه تعریف شده‌اند.

$$f_{total} = \bar{f}_{Loading} + \bar{f}_{Voltage} \quad (۲)$$

$$\bar{f}_{Loading} = \frac{f_{Loading}}{f_{L0}} \quad (۳)$$

$$f_{Loading} = \sum_{b\in\Omega_L}\sum_{\forall\ell}\left(\alpha_{b,\ell}\times\mu_{b,\ell}\times S_{b,\ell}\right) + \sum_{t\in\Omega_T}\sum_{\forall\ell}\left(\gamma_{t,\ell}\times S_{t,\ell}\right) \quad (۴)$$

$$\bar{f}_{Voltage} = \frac{f_{Voltage}}{f_{V0}} \quad (۵)$$

$$f_{Voltage} = \sum_{i\in\Omega_B}\sum_{\forall\ell}\beta_{i,\ell}\left|V_{i,\ell}-1\right| \quad (۶)$$

۲.۳. قیود مسئله

برای حل معادلات پخش بار مسئله، مدل AC طبق روابط (۷) و (۸) در نظر گرفته شده است. سایر قیود حاکم بر مسئله به‌صورت روابط (۹) تا (۱۳) می‌باشد. قیود (۹) و (۱۰) محدودیت تولید توان‌های اکتیو و راکتیو در نیروگاه‌های شبکه، و قید (۱۱) مربوط به محدودیت تزریق یا جذب توان راکتیو توسط واحدهای SVC می‌باشد. رابطهٔ (۱۲) بیانگر تثبیت ولتاژ شین محل نصب SVC می‌باشد و در نهایت رابطهٔ (۱۳) محدودیت تغییر زاویه توسط ترانسفورماتور شیفت فاز خواهد بود.

$$P_{G_i,\ell} - P_{D_i,\ell} = V_{i,\ell}\sum_{j\in\Omega_i} V_{j,\ell}Y_{ij}\times \cos\left(\delta_{i,\ell,c}-\delta_{j,\ell}-\theta_{ij}+\phi_{ij,\ell}\right) \quad \forall i\in\Omega_B\ ,\ \forall\ell \quad (۷)$$

$$Q_{G_i,\ell} - Q_{G_i,\ell} + Q^{SVC}_{i,\ell} = V_{i,\ell}\sum_{j\in\Omega_i} V_{j,\ell}Y_{ij}\times \sin\left(\delta_{i,\ell}-\delta_{j,\ell}-\theta_{ij}+\phi_{ij,\ell}\right) \quad \forall i\in\Omega_B\ ,\ \forall\ell \quad (۸)$$

$$P^{\min}_{G_i} \le P_{G_i,\ell} \le P^{\max}_{G_i} \quad ;\quad \forall i\in\Omega^G_B\ ,\ \forall\ell \quad (۹)$$

$$Q^{\min}_{G_i} \le Q_{G_i,\ell} \le Q^{\max}_{G_i} \quad ;\quad \forall i\in\Omega^G_B\ ,\ \forall\ell \quad (۱۰)$$

$$Q^{SVC,\min}_{i} \le Q^{SVC}_{i,\ell} \le Q^{SVC,\max}_{i} \quad ;\quad \forall i\in\Omega^{SVC}_B\ ,\ \forall\ell \quad (۱۱)$$

$$V_{i,\ell} = V^{spc}_{i,\ell} \quad ;\quad \forall i\in\Omega^{SVC}_B\ ,\ \forall\ell \quad (۱۲)$$

$$\phi^{\min}_{ij} \le \phi_{ij,\ell} \le \phi^{\max}_{ij} \quad ;\quad \forall ij\in\Omega^{PS}_L\ ,\ \forall\ell \quad (۱۳)$$

۴. الگوریتم اجتماع ذرات گسسته

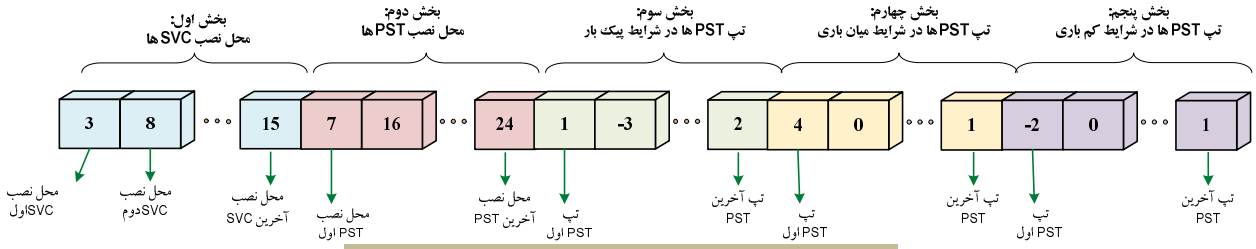
الگوریتم اجتماع ذرات یا PSO از روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری مبتنی بر جمعیت است که از رفتار اجتماعی جانداران، مانند دسته‌های پرندگان و ماهیان الهام گرفته است. رفتار اعضای تشکیل‌دهندهٔ یک دسته مبتنی بر قوانینی مانند هماهنگی سرعت با نزدیک‌ترین همسایه و همچنین شتاب‌گیری برحسب فاصله است [۲۱ و ۲۴]. در الگوریتم PSO مانند الگوریتم‌های تکاملی، یک تابع هدف در نظر گرفته شده و مجموعهٔ جواب‌های کاندید برای مسئله برحسب ذرات یا افراد بیان می‌شود. این ذرات همگی در فضای چندبُعدی شناور بوده و تحت‌تأثیرِ تجربهٔ خود و همسایگان، به‌سمت جواب بهینه در حرکت می‌باشند. تشریح کامل این الگوریتم در مراجع [۲۱ـ۲۶] قابل دسترس است. با توجه به اینکه مجهولات مورد نظر در این مقاله از نوع عدد صحیح هستند، از الگوریتم PSO مبتنی بر عدد صحیح (Discrete PSO یا DPSO) استفاده شده است.

۱.۴. اعمال روش بهینه‌سازی DPSO به مسئلهٔ برنامه‌ریزی ادوات FACTS

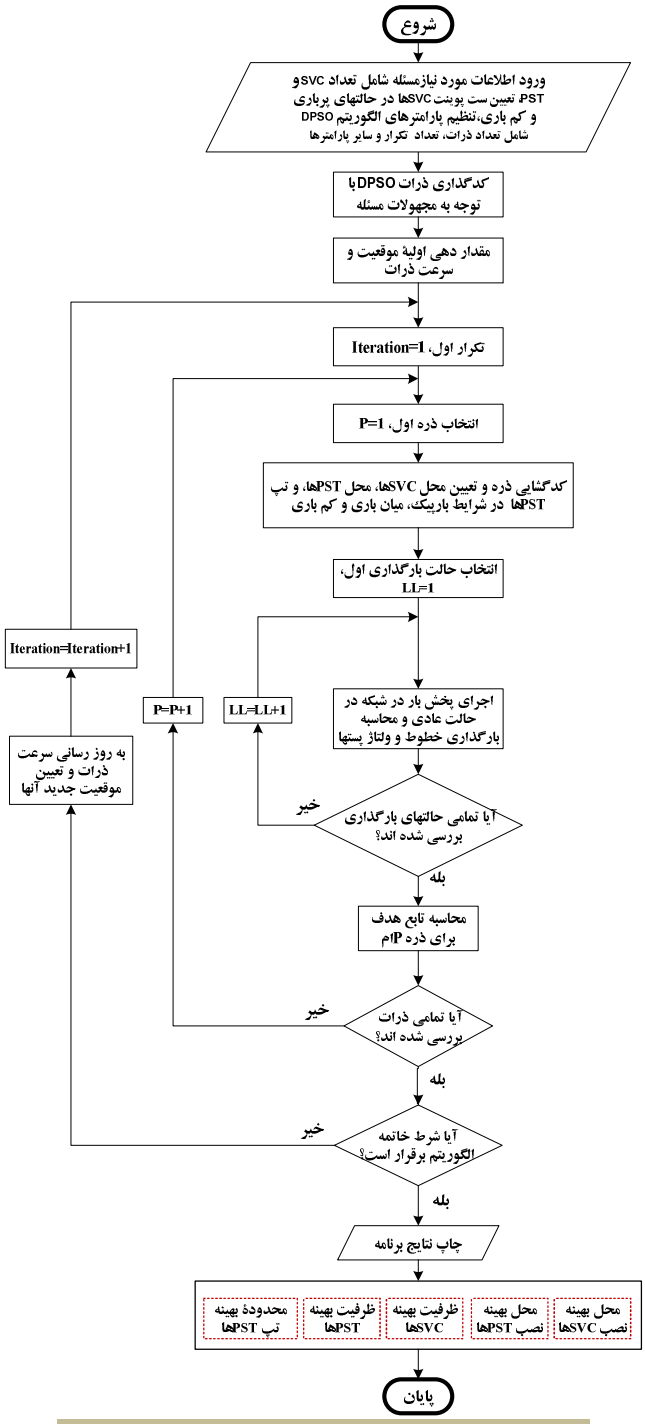
در این قسمت، نحوهٔ کدگذاری ذرات در الگوریتم DPSO به‌منظور جایابی تجهیزات FACTS تشریح می‌شود. ساختار ذرهٔ مورد نظر به‌صورت شکل (۳) است. با توجه به این شکل، تمامی مجهولات مورد نظر در مسئله کدگذاری می‌شوند و هدف از بهینه‌سازی پیدا کردن بهترین مقدار برای قسمت‌های مختلف ذرهٔ مورد نظر با توجه به تابع هدف رابطهٔ (۲) می‌باشد. روند بهینه‌سازی مسئله توسط الگوریتم DPSO به‌صورت طرح‌وارهٔ شکل (۴) خواهد بود.

۲.۴. پیاده‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی در محیط DPL نرم‌افزار DIgSILENT

نرم‌افزار دیگسایلنت علاوه بر محیط گرافیکی برای اتصال تجهیزات و انجام شبیه‌سازی‌های مختلف، دارای یک محیط برنامه‌نویسی نیز می‌باشد [۲۷]. زبان برنامه‌نویسی دیگسایلنت یا DPL که دستورات عمومی آن مشابه زبان C++ است، معمولاً به‌منظور انجام کارهای تکراری و زمان‌بر و همچنین محاسبات مد نظر کاربر و انجام خودکار فعالیت‌ها، پیاده‌سازی الگوریتم‌های خاص و... به کار می‌رود. هر کاری که به‌صورت دستی امکان انجام آن در دیگسایلنت وجود داشته باشد، با DPL نیز قابل انجام است.

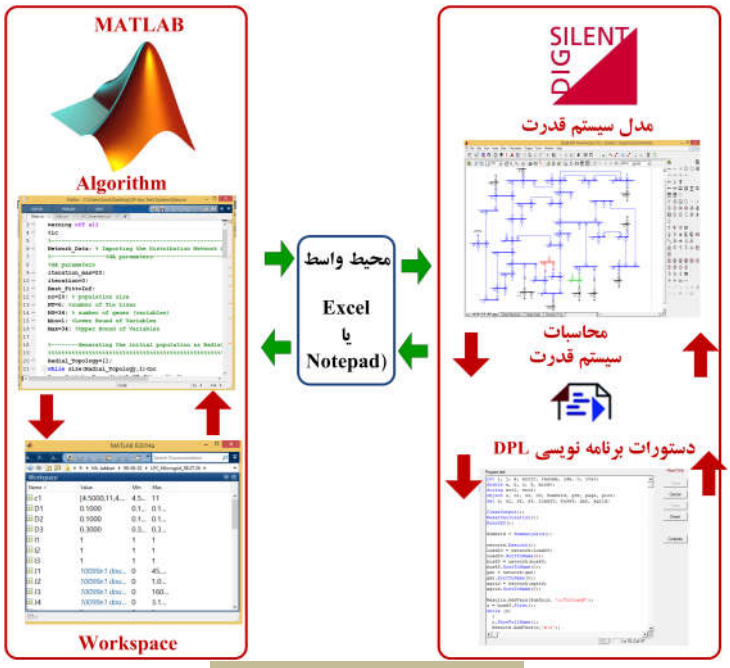


شکل (۳): ساختار در نظر گرفته‌شده برای ذره در الگوریتم DPSO



شکل (۴): طرح‌وارهٔ بهینه‌سازی مسئله به کمک الگوریتم DPSO

در نرم‌افزار DIgSILENT برای هر تجهیز، مشخصات آن، و محاسبات مربوطه مانند پخش بار، اتصال کوتاه، مطالعات دینامیکی و... کد خاصی وجود دارد که دسترسی به آن را در محیط DPL امکان‌پذیر می‌سازد. همچنین می‌توان در صورت نیاز برخی از پارامترهای مورد نیاز را به‌صورت ورودی از طریق کاربر دریافت کرد. علاوه بر این، می‌توان نتایج را به‌صورت خروجی به نرم‌افزارهایی مانند Excel یا MATLAB انتقال داد.



شکل (۵): طرح‌وارهٔ محیط شبیه‌سازی

و در صورت نیاز، بین دیگسایلنت و این نرم‌افزارها ارتباط دوطرفه برقرار کرد. شکل (۵) به‌طور خلاصه بیانگر این مطالب است. در مقالهٔ حاضر، تابع هدف و قیود اشاره‌شده در بخش ۳ در محیط DPL کدنویسی شده و عملگرهای الگوریتم PSO به‌منظور یافتن بهترین مقدار برای تابع هدف اعمال می‌شوند. برای محاسبات پخش بار نیز از مدل دقیق AC استفاده شده است.

۵. مطالعات عددی

۱.۵. معرفی شبکه مورد مطالعه

شبکهٔ در نظر گرفته‌شده برای مطالعات این مقاله، شبکهٔ انتقال و فوق توزیع شرکت برق منطقه‌ای گیلان واقع در شمال ایران است. نمای تک‌خطی این شبکه در شکل (۶) نشان داده شده است. در این شبکه نیروگاه‌ها با نماد G و پست‌های انتقال با نماد S نمایش داده شده‌اند (به‌دلیل واقعی بودن اطلاعات شبکه، نویسندگان مجاز به ارائهٔ مشخصات دقیق شبکه نبوده‌اند). این شرکت از جنوب با شرکت‌های برق منطقه‌ای تهران و زنجان، از شرق با برق منطقه‌ای مازندران و از غرب با برق منطقه‌ای آذربایجان از طریق خطوط انتقال ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت در ارتباط است.

سطح ولتاژ انتقال این شبکه دارای ولتاژهای ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت، و بخش فوق توزیع دارای سطوح ولتاژ ۶۳ و ۱۳۲ کیلوولت است. پیک بار شبکه در سال ۱۳۹۷ برابر ۱۵۴۰ مگاوات بوده است. مجموع ظرفیت تولیدِ نیروگاه‌های این شبکه (شامل نیروگاه‌های گیلان، لوشان، پره‌سر و سد سفیدرود) برابر ۲۵۶۸ مگاوات است. بار شبکه توسط نیروگاه‌های داخل منطقه و نیز توسط خطوط انتقال بین این شبکه با شبکه‌های مجاور تأمین می‌شود.

با توجه به مقدار بار و وسعت جغرافیایی منطقه، شبکهٔ گیلان یک شبکهٔ متراکم و پربار است و مشکل عمده در این شبکه افت ولتاژ شدید و بارگذاری بالای خطوط و پست‌ها مخصوصاً در شرایط پرباری می‌باشد. همان گونه که قبلاً اشاره شد، هدف از برنامه‌ریزی جایابی ادوات FACTS، بررسی کارایی این تجهیزات در حل مشکلات شبکه است. از میان تجهیزات FACTS دو عنصر SVC و PST مد نظر می‌باشند. به‌منظور انجام مطالعات برنامه‌ریزی، سال ۱۴۰۵ به‌عنوان سال افق در نظر گرفته شده است. در این سال با توجه به رشد بار، مجموع بار شبکه در شرایط پیک، میان باری و کم‌باری به‌ترتیب برابر ۲۴۸۶، ۱۲۹۰ و ۹۴۲ مگاوات خواهد بود ولی ظرفیت تولید بدون تغییر باقی خواهد ماند. تعداد پست‌های انتقال ۲۳۰/۶۳ کیلوولت شبکه که کاندید

احداث SVC هستند ۱۲ عدد می‌باشند که لیست این پست‌ها در جدول (۱) داده شده است. SVC در سمت ۶۳ کیلوولت این پست‌ها به‌منظور جبران ولتاژ و توان راکتیو نصب خواهد شد و ظرفیت و مکان نصب SVCها جزو مجهولات مسئله است. از طرف دیگر، به‌منظور کنترل مقدار و جهت توان عبوری از خطوط، واحدهای PST بر روی خطوط انتقال و فوق توزیع شبکه نصب خواهند شد. ظرفیت و مکان نصب این واحدهای PST به همراه تپ آن‌ها در شرایط مختلف بهره‌برداری سیستم، دستهٔ دوم از مجهولات مسئله را تشکیل می‌دهد. تمامی خطوط ۲۳۰، ۱۳۲ و ۶۳ کیلوولت شبکه که شامل ۱۸۸ خط هستند کاندید نصب PST خواهند بود. ظرفیت واحدهای SVC به‌صورت پیوسته فرض شده و با توجه به نمونه‌های واقعی ساخته‌شده و نصب‌شده در دنیا، حداکثر ظرفیت 300MVAr برای این واحدها در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که ظرفیت SVCها وابسته به ولتاژ تنظیمی (V^{spc}) آن‌هاست که این پارامتر به‌عنوان یکی از ورودی‌های برنامه توسط طراح شبکه وارد می‌گردد. با افزایش ولتاژ تنظیمی، معمولاً نیاز به ظرفیت بالاتری از SVC وجود خواهد داشت. برای PST نیز محدودهٔ تپ برابر ۵± پله با زاویهٔ هر تپ برابر ۲ درجه در نظر گرفته شده است. ظرفیت PST طبق رابطهٔ $S_{PST}=2\times\sin(\phi)\times S_{Line}$، وابسته به تعداد پلهٔ تپ بوده و بر اساس محدودهٔ تپ و نیز با توجه به ظرفیت خطی که روی آن نصب می‌شود به دست می‌آید. ϕ حداکثر زاویهٔ شیفت فاز بوده و S_{Line} ظرفیت حرارتی خطی است که PST روی آن نصب شده است. شایان ذکر است که نمونه‌های واقعی برای PST تا توان 500MVA با ۱۶ (±۸) پلهٔ تپ با قابلیت تغییر زاویهٔ ۲۵± درجه نیز موجود می‌باشد.

۲.۵. تحلیل وضعیت شبکه بدون حضور ادوات FACTS

۱.۲.۵. تحلیل وضعیت شبکه در شرایط کم‌باری

در شرایط کم‌باری همهٔ ولتاژهای انتقال و فوق توزیع در شرایط نرمال و در محدودهٔ مجاز قرار دارند. بارگذاری خطوط و ترانسفورماتورها نیز مطلوب است، به‌طوری که بیشترین بارگذاری در ترانسفورماتورهای انتقال مربوط به ترانسفورماتور ۴۰۰/۲۳۰/۲۰ نیروگاه گیلان (نیروگاه G1 در شکل (۶)) با بارگذاری ۵۷٪ است. همچنین، در ترانسفورماتورهای فوق توزیع نیز ترانسفورماتور ۶۳/۲۰ پست شهر صنعتی با بارگذاری ۶۲٪ بیشترین میزان بارگذاری را دارد. در خطوط انتقال ۲۳۰ کیلوولت نیز خط لوشان–سفیدرود (خط بین نیروگاه G2 و G3 در شکل (۶)) با ۵۷٪ بیشترین بارگذاری را دارد. همچنین خط ۶۳ کیلوولت انصاری–سیاهکلده با ۳۷٪ بیشترین بارگذاری را در بین خطوط فوق توزیع شبکه دارد. تلفات توان اکتیو شبکه نیز در شرایط کم‌باری حدود ۲۸ مگاوات خواهد بود.

۲.۲.۵. تحلیل وضعیت شبکه در شرایط میان‌باری

در شرایط میان‌باری به‌دلیل افزایش میزان بارگذاری شبکه، میزان افت ولتاژ و همچنین بارگذاری تجهیزات بیشتر خواهد شد. تلفات شبکه نیز در حالت میان‌باری حدود ۵۶ مگاوات است. در ادامه، لیست پست‌های فوق توزیع و انتقال دارای افت ولتاژ زیاد و همچنین خطوط و ترانسفورماتورهای پربار ارائه شده است:

- پست‌های ۶۳ کیلوولت دارای افت ولتاژ زیاد: پست حویق (۰/۹۳ پریونیت)، پست آستارا (۰/۹۴۸ پریونیت)
- بارگذاری خطوط انتقال: لوشان–سفیدرود (۹۳٪)، گیلان–لوشان (۶۳٪) و گیلان–سفیدرود (۶۲٪).
- بارگذاری خطوط فوق‌توزیع: غرب رشت–سلیمان‌داراب (۱۰۵٪) و شهرصنعتی–سیادتی (۶۹٪).

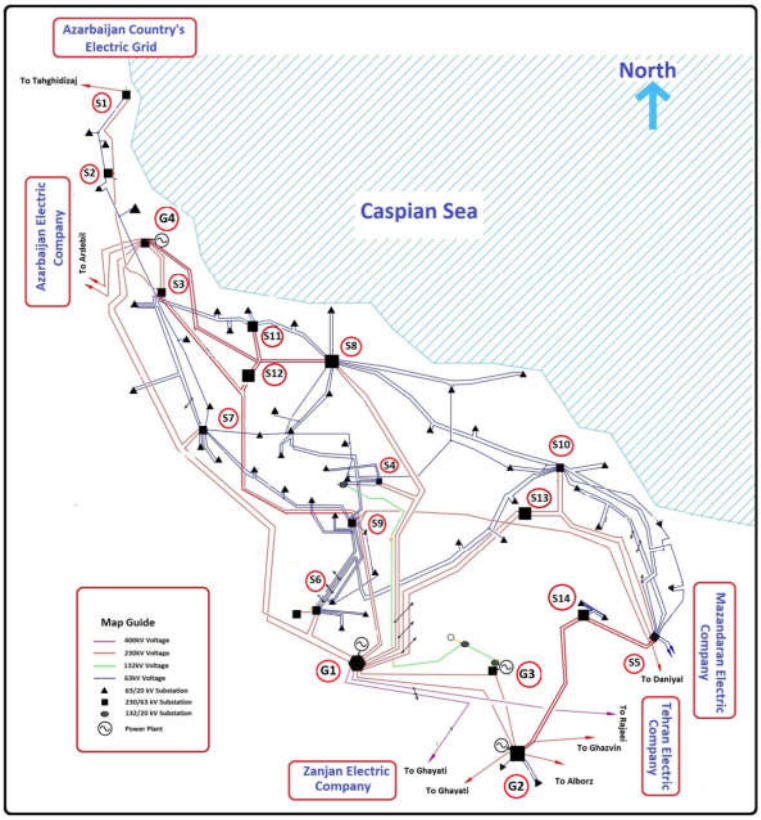
جدول (۱): مشخصات پست‌های انتقال کاندید برای نصب SVC [۲۸]

ردیف	نام پست	سطح ولتاژ پست (kV)	ظرفیت پست (MVA)
۱	آستارا	۲۳۰/۶۳	۲×۴۰
۲	تالش	۲۳۰/۶۳	۲×۹۰
۳	پونل	۲۳۰/۶۳	۲×۱۲۵
۴	عضدی	۲۳۰/۶۳	۳×۱۶۰
۵	چابکسر	۲۳۰/۶۳	۲×۱۲۵
۶	لاکان	۲۳۰/۶۳	۳×۱۶۰
۷	نفوت	۲۳۰/۶۳	۲×۱۶۰
۸	رشت شمالی	۲۳۰/۶۳	۲×۱۶۰
۹	سیادتی	۲۳۰/۱۳۲/۶۳	۲×۱۶۰+۲×۵۰
۱۰	سیاهگلده	۲۳۰/۶۳	۲×۱۲۵
۱۱	انزلی	۲۳۰/۶۳	۲×۱۶۰
۱۲	غرب رشت	۲۳۰/۶۳	۳×۱۶۰

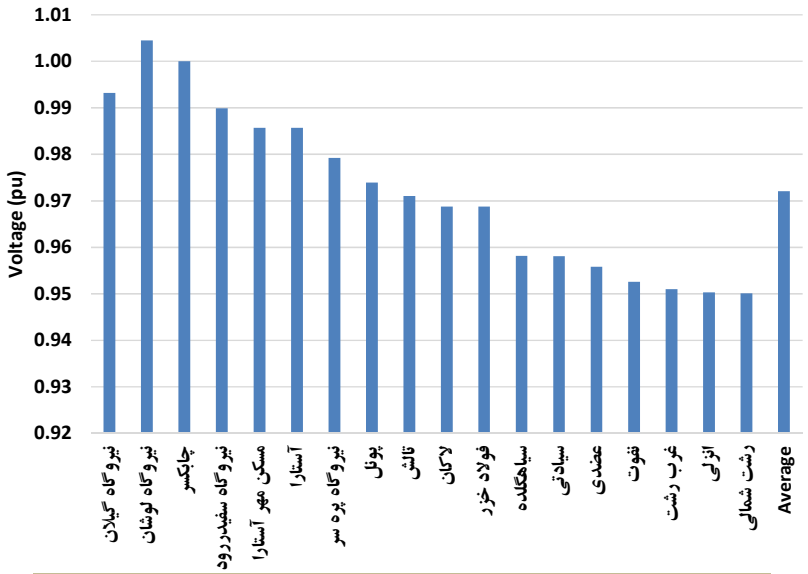
۳.۲.۵. تحلیل وضعیت شبکه در شرایط پرباری (پیک بار)

در شرایط پرباری شبکه، ولتاژ پست‌های انتقال و فوق توزیع در شکل‌های (۷) و (۸) ارائه شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، ولتاژ پست‌های انتقال در محدودهٔ بالاتر از ۰/۹۵ پریونیت قرار دارند، درحالی‌که ولتاژ در اغلب پست‌های فوق‌توزیع پایین‌تر از محدودهٔ مجاز خود می‌باشد. در این شکل‌ها ولتاژ شینه‌های ۶۳ کیلوولت رسم شده است. پایین بودن ولتاژ برخی پست‌ها به‌دلیل بارگذاری سنگین اکتیو و راکتیو این پست‌ها و نیز تغذیهٔ به‌صورت شعاعی آن‌ها از پست‌های انتقال است. لذا این پست‌ها در شرایط پیک بار شبکه دچار افت ولتاژ شدید می‌باشند. البته بارهای شبکه در سمت ۲۰ کیلوولت پست‌های فوق توزیع قرار دارند، لذا می‌توان با تنظیم تپ ترانسفورماتورهای ۶۳/۲۰ کیلوولت، ولتاژ سمت ۲۰ کیلوولت این پست‌ها را تنظیم نمود،

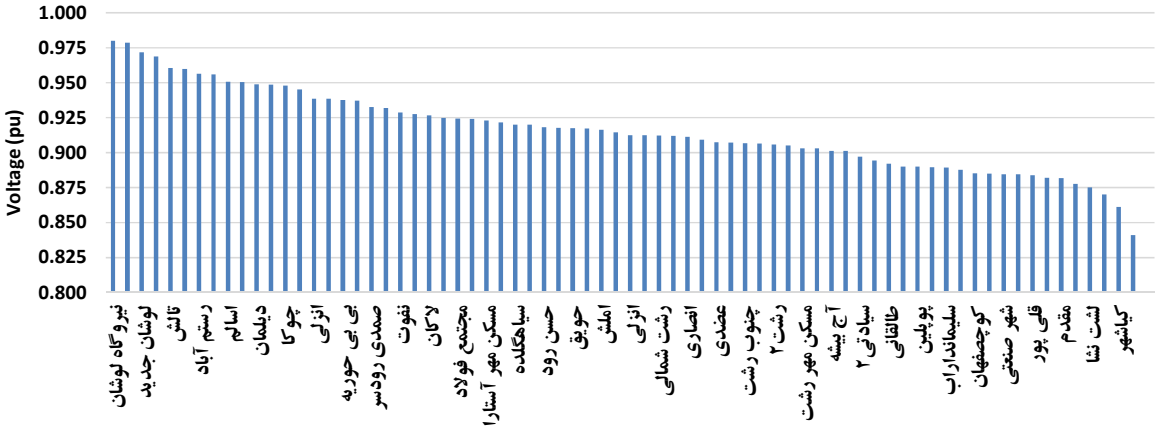
اما با این کار به‌دلیل عبور تـوان راکتیـو بیشـتر از ترانسـفورماتور، ولتـاژ سمت ۶۳ کیلوولت کاهش می‌یابد که شکل (۸) نیـز بیـانگر ایـن مـورد است. شایان ذکر است که در بهره‌برداری شبکه، هدف حفظ ولتاژ سمت ۲۰ کیلوولت در محدودهٔ مجاز می‌باشد چون فیدرهای شبکهٔ توزیـع بـه این سمت متصل هستند و پایین بودن ولتاژ در سمت ۶۳ مشکل چندانی ایجاد نمی‌کند. خطوط انتقال و فوق توزیع پربار (بـا بارگـذاری بـیش از ۶۰٪) نیز در شکل (۹) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که خطوط پوپلین–سیادتی و رشت شمالی–پوشش بیشـترین بارگـذاری را در ایـن شرایط دارند. در شکل (۱۰) نیز بارگذاری ترانسـفورماتورها ارائـه شـده است. قابل مشاهده است که بارگذاری اغلب ترانسـفورماتورهای انتقـال بیش از ۶۰٪ است. در این شـرایط، تلفـات شـبکه حـدود ۹۷ مگـاوات است.



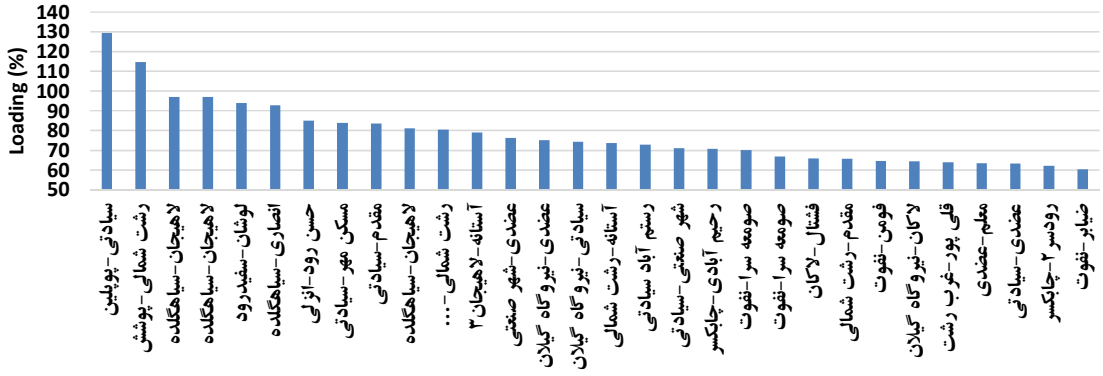
شکل (۶): دیاگرام تک خطی شبکه شرکت برق منطقه‌ای گیلان



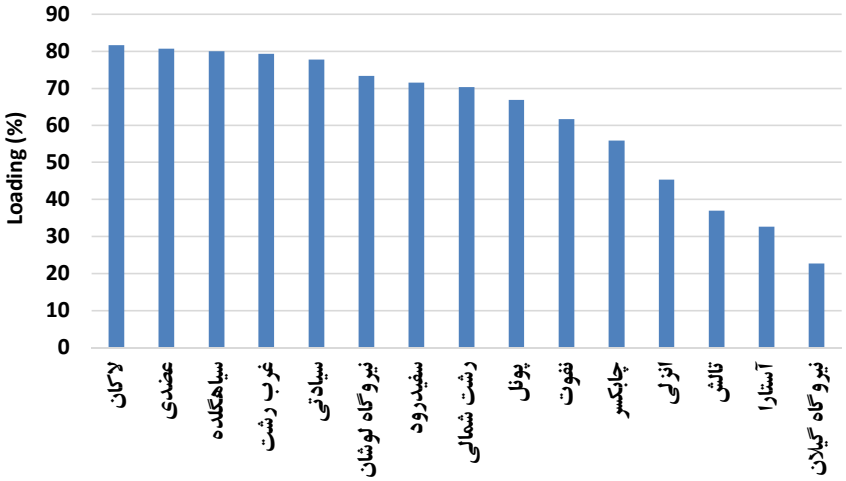
شکل (۷): پروفیل ولتاژ پست‌های انتقال در بار پیک ۱۴۰۵ قبل از نصب ادوات FACTS



شکل (۸): پروفیل ولتاژ پست‌های فوق‌توزیع در بار پیک ۱۴۰۵ قبل از نصب ادوات FACTS



شکل (۹): بارگذاری خطوط انتقال و فوق‌توزیع پربار (با بارگذاری بیش از ۶۰٪) در شرایط پرباری قبل از نصب ادوات FACTS



شکل (۱۰): بارگذاری ترانسفورماتورهای انتقال در شرایط پرباری بدون حضور ادوات FACTS

۳.۵. تحلیل وضعیت شبکه در حضور ادوات FACTS

با بررسی شرایط شبکه قبل از حضور تجهیزات FACTS مشخص شد که در بسیاری از پست‌های فوق توزیع مشکل افت ولتاژ وجود دارد. همچنین در سه ناحیه از شبکه، مشکل تراکم خطوط وجود دارد. ناحیهٔ شرق گیلان در خطوط منتهی به پست سیاهکلده، ناحیهٔ جنوب حوالی نیروگاه لوشان که در تراکم در این منطقه به‌دلیل وجود سه نیروگاه گیلان (G1)، لوشان (G3) و سفیدرود (G2) بوده، و ناحیهٔ مرکزی شبکه که به‌دلیل چگالی زیاد بار در این منطقه است. سعی بر این است که با احداث کمترین تعداد ادوات FACTS بتوان مشکلات مذکور را برطرف کرد. برای اجرای بهینه‌سازی تعداد ذرات الگوریتم PSO برابر ۲۰ عدد و

ضرایب c1 و c2 مساوی و برابر ۲ در نظر گرفته شده‌اند. شرط خاتمه نیز به‌صورت تعداد مشخصی از تکرارها (۱۰۰۰ تکرار) در نظر گرفته شده است گفتنی است که برای اطمینان از بهینه بودن جواب به‌دست‌آمده، الگوریتم PSO چندین بار اجرا شده است. همچنین نقطهٔ تنظیمی ولتاژ SVCها (V^{spc}) برابر ۱ لحاظ گردیده است. علاوه بر این، زاویهٔ شیفت فاز هر پلهٔ تپ PSTها برابر ۲ درجه است. به‌منظور تعیین تعداد تجهیزات PST و SVC مورد نیاز در شبکه، یک تحلیل حساسیت با لحاظ ترکیبات متنوعی از این تجهیزات صورت پذیرفته و به بررسی تغییرات تابع هدف برحسب تعداد تجهیزات پرداخته شد. با اجرای برنامهٔ بهینه‌سازی با تعدادهای متفاوتی از تجهیزات FACTS، مشخص شد که حضور ۲ عدد SVC و ۴ عدد PST می‌تواند تا حدود زیادی در راستای رفع مشکل افت ولتاژ پست‌ها و تراکم خطوط مؤثر باشد. مشخصات تجهیزات احداث‌شده به‌صورت جداول (۲) و (۳) می‌باشد. برای مشاهدهٔ اثر این تجهیزات بر شبکه، در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) پروفیل ولتاژ پست‌های انتقال و فوق توزیع در شرایط پیک بار نمایش داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که سطح ولتاژ پست‌های انتقال و فوق توزیع نسبت به حالت بدون تجهیزات FACTS بسیار بهبود یافته است. مقایسهٔ شکل‌های (۷) و (۱۱) نشان می‌دهد که میانگین ولتاژهای سطح انتقال از ۰/۹۷ به ۰/۹۹ پریونیت ارتقا پیدا کرده است.

جدول (۲): مشخصات PSTهای احداث‌شده در شبکهٔ برق منطقه‌ای گیلان

شماره PST	خطی که PST بر روی آن احداث می‌شود	ولتاژ نامی (کیلوولت)	موقعیت تپ PST (هر پلهٔ تپ معادل ۲ درجه شیفت فاز است)			ظرفیت PST (MVA)
			پیک	میان‌باری	کم‌باری	
۱	سیاهگلده–چابکسر	۲۳۰	-۲	۰	۰	۷۷/۸
۲	لوشان–سفیدرود	۲۳۰	۲	-۱	۰	۴۰/۳
۳	سیادتی–رستم‌آباد	۱۳۲	۳	-۳	۰	۳۳/۵
۴	مقدم–پوشش	۶۳	۲	۰	۰	۷/۰

جدول (۳): مشخصات SVCهای احداث‌شده در شبکهٔ برق منطقه‌ای گیلان

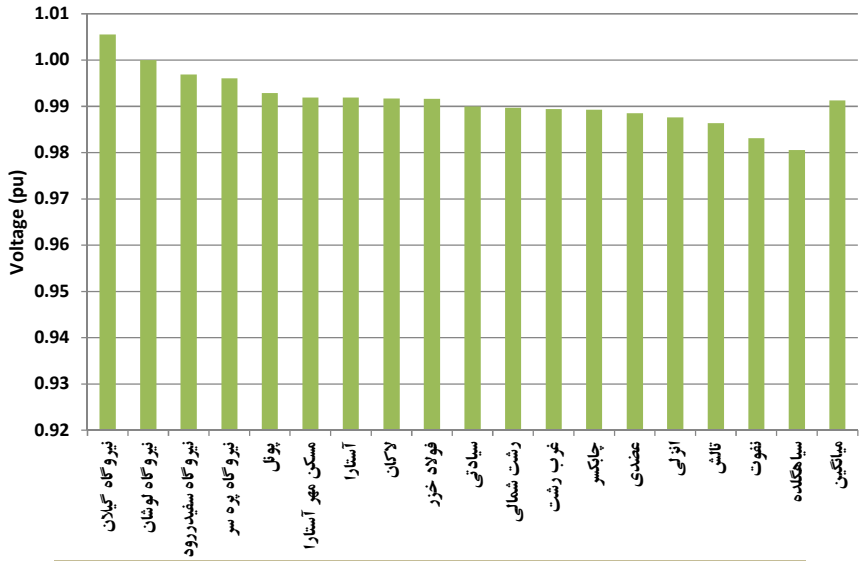
شماره SVC	پستی که SVC بر روی آن احداث می‌شود	توان راکتیو تزریقی SVC (مگاوار)			محدودهٔ ظرفیت (مگاوار) (- : سلفی، + : خازنی)
		پیک	میان‌باری	کم‌باری	
۱	رشت شمالی (S8)	۱۷۰	-۳۵	۲۸	[۱۷۰ -۳۵]
۲	غرب رشت (S9)	۲۲۵	-۳۳	۴۹	[۲۲۵ -۳۳]

از طرفی دیگر طبق شکل (۸)، اکثر شینه‌های فوق توزیع در حالت عدم حضور تجهیزات FACTS دارای ولتاژ پایین‌تر از ۰/۹۵ پریونیت بودند که پس از جایابی این تجهیزات طبق شکل (۹) فقط تعداد اندکی از شینه‌ها دارای ولتاژ کمتر از ۰/۹۵ پریونیت شده‌اند. مقایسهٔ شکل‌های (۹) و (۱۳) نیز نشان می‌دهد که احداث ادوات FACTS باعث کاهش قابل ملاحظهٔ بارگذاری خطوط پربارِ شبکه شده است. روند مشابهی طبق اشکال (۱۰) و (۱۴) در مورد بارگذاری ترانسفورماتورهای انتقال مشاهده می‌شود. در شرایط میان‌باری شبکه که مشکل شبکه وقوع تراکم در یک خط انتقال (سفیدرود–نیروگاه لوشان) و یک خط فوق توزیع (غرب رشت–سلیمان‌داراب) بود، PSTهای احداث‌شده با تغییر پلهٔ تپشان نسبت به حالت پیک، قادر به کاهش بارگذاری و رفع تراکم خطوط مذکور می‌باشند. همچنین ولتاژ پست‌های دارای افت ولتاژ بالا (حویق و آستارا) تا حد زیادی ارتقا یافته‌اند که فقط نتایج مربوط به شرایط پیک گزارش شده است. شایان ذکر است که پس از نصب ادوات FACTS، تلفات شبکه در شرایط کم‌باری و میان‌باری تغییر چندانی نمی‌کند اما تلفات در بار پیک از مقدار ۹۷ مگاوات به ۹۰ مگاوات کاهش می‌یابد که کاهش حدود ۷ درصدی را نشان می‌دهد که با توجه به هزینهٔ بالای تلفات، رقم قابل توجهی است. البته گفتنی است در صورتی که تابع هدف مسئله تلفات شبکه باشد، شاهد کاهش بیشتری در مقدار آن خواهند بود.

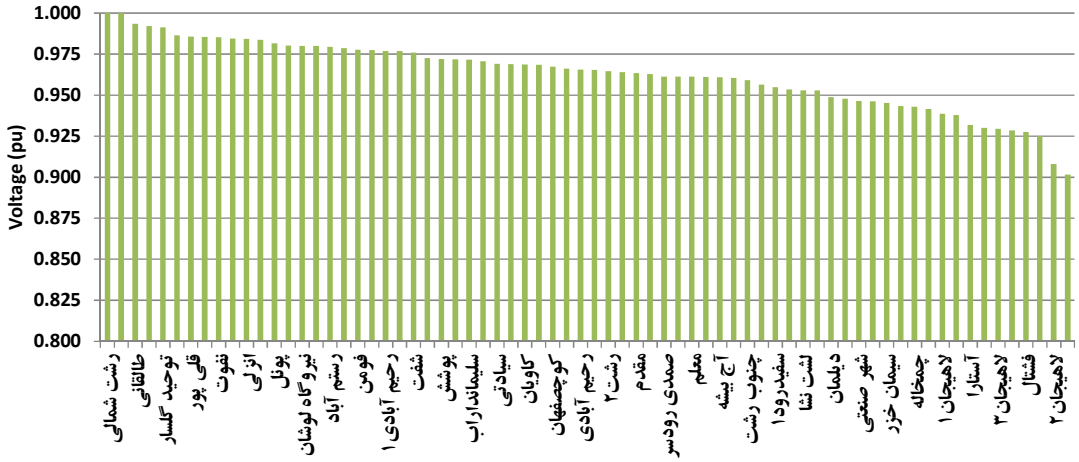
۱.۳.۵. بررسی موردی عملکرد PSTهای نصب‌شده

همان گونه که اشاره شد، احداث ترانسفورماتورهای شیفت فاز امکان مدیریت و کنترل پخش بار و توان‌های عبوری از خطوط را به‌منظور کاهش بارگذاری و رفع تراکم خطوط فراهم می‌آورند. در این قسمت، برای نمونه، عملکرد اولین PST احداث‌شده (PST روی خط ۲۳۰ کیلوولت سیاهگلده–چابکسر) در رفع اضافه‌بار خطوط در شرایط پیک بار، مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. در شکل (۱۵)، پخش بار شبکه در حوالی پست سیاهگلده قبل از نصب ادوات FACTS نشان داده شده است. در این شکل، رنگ قرمز بیانگر سطح ولتاژ ۲۳۰ بوده و رنگ آبی سطح ولتاژ ۶۳ کیلوولت را نشان می‌دهد. نتایج پخش بار شامل ولتاژ شینه‌های ۲۳۰ کیلوولت و توان‌های جاری در خطوط و ترانسفورماتور و بارگذاری آن‌هاست. همان گونه که مشاهده می‌شود سه خط ۶۳ کیلوولت انصاری، لاهیجان ۱ و لاهیجان ۳ دارای بارگذاری بالاتر از حد مجاز (۸۰٪) می‌باشند. بارگذاری ترانسفورماتور ۲۳۰/۶۳ کیلوولت پست سیاهگلده نیز حدود ۸۰٪ است. نتیجهٔ پخش بار پس از نصب ادوات FACTS در شکل (۱۶) نشان داده شده است. با مقایسهٔ شکل‌های (۱۵) و (۱۶) مشاهده می‌شود که بارگذاری خط انصاری از ۹۳٪ به ۷۷٪، خط، خط لاهیجان ۱ از ۸۱٪ به ۵۴٪، و خط لاهیجان ۳ از ۹۷٪ به ۸۲٪ کاهش یافته است. بارگذاری ترانسفورماتور ۲۳۰/۶۳ کیلوولت پست سیاهگلده نیز از ۸۰٪ به ۶۶٪ تقلیل پیدا کرده است. این نتایج در شکل‌های (۹)، (۱۰)، (۱۳) و (۱۴) نیز قابل مشاهده است. در شکل‌های

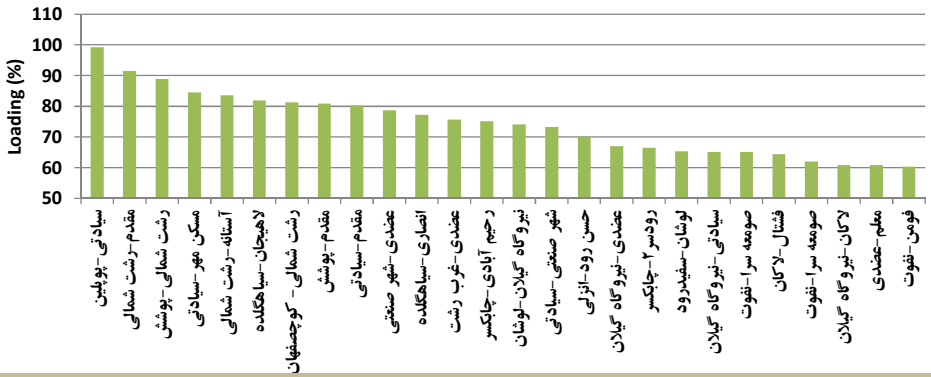
(۱۵) و (۱۶)، تغییر زاویهٔ ولتاژ باس‌ها و تغییر فلوی توان در خطـوط در اثر نصب PST کاملاً مشهود است. در پایان، گفتنی است که برای ادوات FACTS جایابی‌شده، آنالیز اقتصادی نیز صورت پذیرفته است کـه در آن هزینهٔ احداثِ این ادوات، با هزینهٔ احداث پست‌هـا و خطـوط انتقـال و فوق توزیعِ لازم برای حل مشکل افت ولتاژ باس‌ها و اضافه‌بـار خطـوط مقایسه شده است. همچنین هزینهٔ تلفات نیز در این آنالیز مـد نظـر قـرار گرفته است. این آنالیز بیانگر صرفهٔ اقتصادی بسیار بالاترِ ادوات FACTS نسبت به ارتقای ظرفیت شبکه از طریق احداث پست‌ها و خطوط اسـت که در ادامه ذکر شده است.



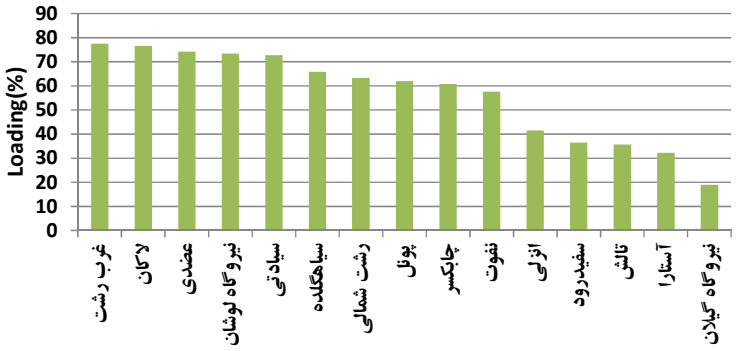
شکل (۱۱): پروفیل ولتاژ پست‌های انتقال در بار پیک ۱۴۰۵ پس از نصب ادوات FACTS



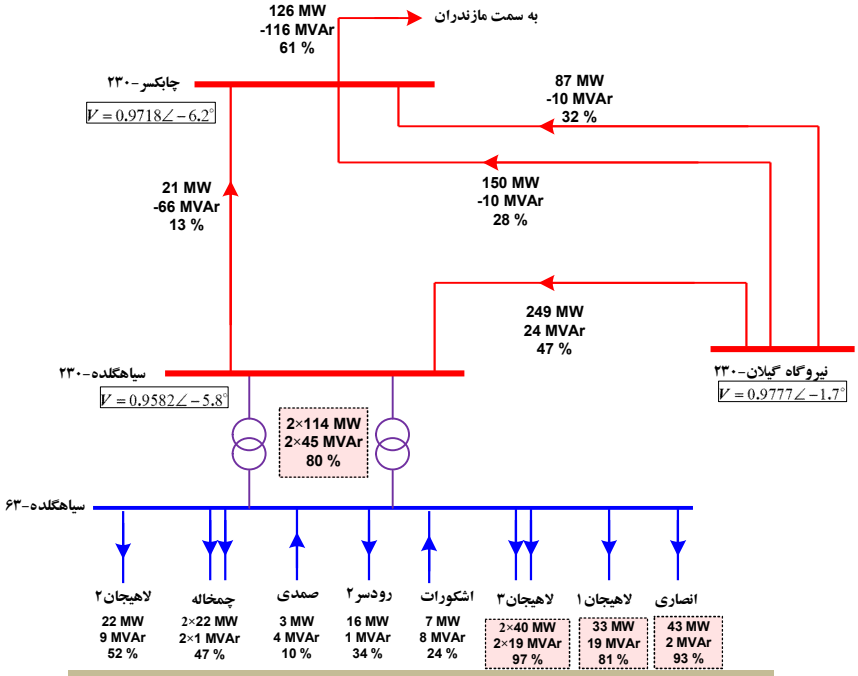
شکل (۱۲): پروفیل ولتاژ پست‌های فوق‌توزیع در بار پیک ۱۴۰۵ پس از نصب ادوات FACTS



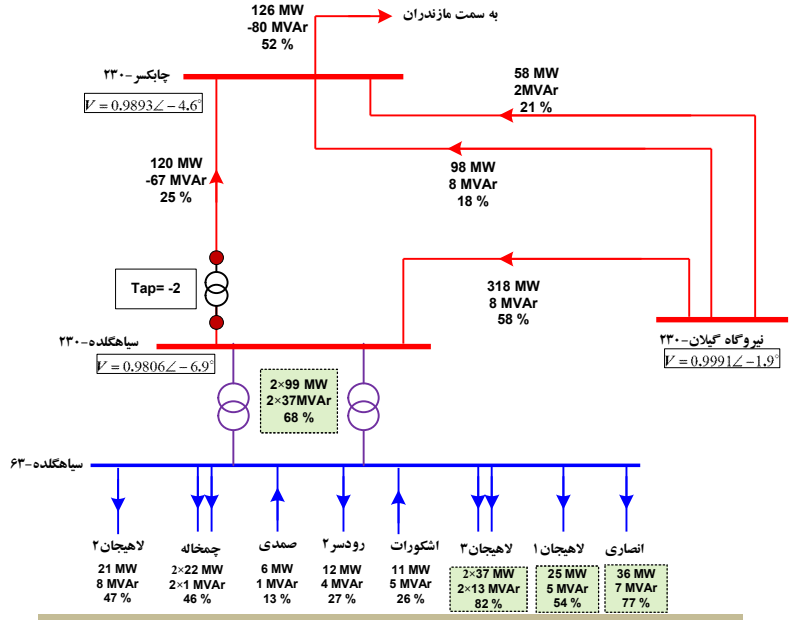
شکل (۱۳): بارگذاری خطوط انتقال و فوق‌توزیع پربار (با بارگذاری بیش از ۶۰٪) در شرایط پرباری پس از نصب ادوات FACTS



شکل (۱۴): بارگذاری ترانسفورماتورهای انتقال در شرایط پرباری پس از نصب ادوات FACTS



شکل (۱۵): پخش بار شبکه در حوالی پست سیاهگلده قبل از نصب ادوات FACTS



شکل (۱۶): پخش بار شبکه در حوالی پست سیاهگلده بعد از نصب ادوات FACTS

۲.۳.۵. تحلیل هزینه-فایدهٔ احداث ادوات FACTS

در شبکهٔ برق منطقه‌ای گیلان، با توجه به مطالعات صورت‌گرفته، تعدادی طرح توسعه مربوط به پست‌ها و خطوط انتقال و فوق توزیع پیش‌بینی شده است که تا سال ۱۴۰۵ احداث گردند تا بدین ترتیب ظرفیت شبکه افزایش یافته و تغذیهٔ بار شبکه بدون مشکلات افت ولتاژ و بارگذاری (که در بخش ۵. ۲ ذکر شدند) صورت پذیرد. از آنجا که نصب ادوات FACTS می‌تواند بسیاری از مشکلات مربوط به بارگذاری خطوط شبکه و همچنین ولتاژ پست‌ها را مرتفع نماید، نیاز به اجرای برخی طرح‌های توسعه برطرف می‌شود. در این بخش تصمیم برآن است مقایسهٔ اقتصادی بین هزینهٔ نصب ادوات FACTS و صرفه‌جویی ناشی از عدم اجرای طرح‌های توسعهٔ سنتی پست و خط انجام شود. این طرح‌ها به شرح زیر است:

- احداث پست انتقال ابریشم و پست فوق توزیع لنگرود ۲ (در ناحیهٔ شرق گیلان)
- احداث پست انتقال دیلمان و خطوط ۲۳۰ کیلوولت دیلمان-لوشان و دیلمان چابکسر (نواحی جنوب و شرق گیلان)
- پست‌های فوق توزیع رشتیان، نقره‌دشت و ملت به همراه خطوط ارتباطی آن (در ناحیهٔ مرکزی گیلان)

علاوه بر این، با توجه به نتایجی که پیش‌تر ارائه شد، نصب ادوات FACTS منجر به کاهش تلفات در بار پیک می‌شود که از نقطه‌نظر هزینهٔ تلفات پیک بسیار حائز اهمیت بوده و سبب صرفه‌جویی اقتصادی قابل ملاحظه‌ای می‌شود. در جدول (۴) هزینهٔ سرمایه‌گذاری برای احداث ادوات FACTS پیشنهادی ارائه شده است. جدول (۵) نیز به هزینهٔ احداث پست‌ها و خطوط مربوط را نشان می‌دهد. با احداث ادوات FACTS و عدم نیاز به این طرح‌های توسعه، در واقع هزینه‌های محاسبه‌شده در جدول (۵) همان صرفه‌جویی در هزینه‌ها هستند. همچنین، به‌دلیل کاهش تلفات به میزان ۶/۴۲ مگاوات در بار پیک نیز صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای وجود خواهد داشت. طبق استعلام از شرکت توانیر، هزینهٔ تلفات در سال ۹۸ برابر با ۳۳۹۳/۱ یورو به‌ازای هر کیلووات تلفات توان است. در نهایت جدول (۶) هزینه‌ها و صرفه‌جویی‌های کلی را ارائه می‌دهد.

با کم کردن هزینهٔ احداث ادوات FACTS از میزان صرفه‌جویی در زمینهٔ احداث طرح‌های جدید و کاهش تلفات پیک، مقدار صرفه‌جویی خالص ۴۶۶۲/۳۲ میلیارد ریال به دست می‌آید. شایان ذکر است که این میزان صرفه‌جویی صرفاً فقط با درنظرگرفتن عدم اجرای تعدادی از طرح‌های توسعه به دست آمده است. بدیهی است که در صورت محاسبهٔ صرفه‌جویی ناشی از عدم احداث سایر طرح‌ها، میزان نهایی صرفه‌جویی حاصل بیش از این مقدار خواهد بود.

جدول (۴): مشخصات ادوات نصب‌شده در شبکه و هزینهٔ سرمایه‌گذاری

شمارهٔ PST	نام خط	ظرفیت PST (MVA)	هزینهٔ احداث (میلیارد ریال)
۱	سیاهکلده-چابکسر	۷۷/۸	۵۱/۳۵
۲	سفیدرود-نیروگاه لوشان	۴۰/۳	۲۶/۶۰
۳	سیادتی-رستم آباد	۳۳/۵	۲۲/۱۱
۴	مقدم-پوشش	۷/۰	۴/۶۲
شمارهٔ SVC	نام پست انتقال	ظرفیت SVC (MVAr)	
۱	رشت شمالی	۱۷۰	۱۵۷۰
۲	غرب رشت	۲۲۵	۲۰۷۹
مجموع			۳۷۵۳/۶۸

جدول (۵): مشخصات طرح‌های منتفی‌شدهٔ توسعهٔ پست و خط و صرفه‌جویی مربوطه

شماره	نام پست	سطح ولتاژ (kV)	ظرفیت (MVA)	هزینهٔ احداث (میلیارد ریال)
۱	ابریشم و خطوط ارتباطی	۲۳۰	۳×۱۶۰	۲۵۳۱
۲	دیلمان و خطوط ارتباطی	۲۳۰	۲×۴۰	۷۴۸
۳	لنگرود ۲ و خطوط ارتباطی	۶۳	۲×۵۰	۵۰۰
۴	رشتیان و خطوط ارتباطی	۶۳	۲×۵۰	۵۷۰
۵	نقره‌دشت و خطوط ارتباطی	۶۳	۲×۵۰	۸۲۰
۶	ملت و خطوط ارتباطی	۶۳	۲×۵۰	۷۲۰
مجموع				۵۸۸۹

جدول (۶): تحلیل هزینه-فایده و صرفه‌جویی نهایی

آیتم	توضیح	هزینه/فایده (میلیارد ریال)
۱	هزینهٔ احداث ادوات FACTS پیشنهادی	۳۷۵۳/۶۸
۲	صرفه‌جویی ناشی از عدم احداث پست و خطوط مربوط	۵۸۸۹
۳	صرفه‌جویی ناشی از کاهش تلفات در بار پیک	$۱۶/۴۲MW \times ۳۳۹۳/۱ \frac{یورو}{kW} \times ۱۰۰۰ \times ۱۱۶۰۰ \times ۱۰^{-۸} \frac{ریال}{یورو} = ۲۵۲۷$
صرفه‌جویی خالص (میلیارد ریال)		۴۶۶۲/۳۲

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی مبتنی بر الگوریتم اجتماع ذرات گسسته به‌منظور جایابی ادوات FACTS بر روی شبکهٔ برق منطقه‌ای گیلان ارائه شد. بهینه‌سازی مسئله در محیط برنامه‌نویسی (DPL) نرم‌افزار دیگسایلنت پیاده‌سازی شده و از این نظر برای شرکت‌های برق منطقه‌ای بسیار ساده و کاربردی است؛ زیرا برنامه‌های بهینه‌سازی معمولاً در محیط نرم‌افزارهایی مانند MATLAB و GAMS اجرا می‌شوند که مشکل تبادل اطلاعات بین دیگسایلنت و این‌نرم‌افزارها مطرح است. در مطالعهٔ حاضر، تعیین مکان، ظرفیت و سایر مشخصات دو تجهیز SVC و PST از مجموعه ادوات FACTS به‌منظور بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش تراکم خطوط با توجه به سطوح مختلف بار شبکه صورت پذیرفت. نتایج مطالعه بیانگر کارایی روش پیشنهادی در مدیریت پخش بار و بهبود پارامترهای فنی سیستم است. نتیجهٔ نهایی مطالعه نشان می‌دهد که احداث ادوات FACTS با هزینه‌ای بسیار کمتر نسبت به توسعهٔ سنتی شبکه (احداث پست‌ها و خطوط فوق توزیع و انتقال) می‌تواند تا حدود زیادی مشکلات بهره‌برداری شبکه را مرتفع کند. مضاف بر اینکه در شبکهٔ گیلان در رابطه با احداث شبکهٔ جدید، مشکلات زیادی از قبیل سستی خاک، مشکل مربوط به حریم خطوط و موارد دیگر وجود دارد که احداث پست‌ها و خطوط جدید را بسیار هزینه‌بر می‌کند. شایان ذکر است که با توجه به پیاده‌سازی نرم‌افزار بهینه‌سازی در محیط نرم‌افزار DIgSILENT، علاوه بر مطالعات جایابی تجهیزات FACTS، می‌توان روش پیشنهادی را برای مسائل کاربردی دیگری از جمله کلیدزنی بهینهٔ خطوط انتقال، برنامه‌ریزی توسعهٔ خطوط و پست‌ها، تنظیم بهینهٔ ست‌پوینت ولتاژ نیروگاه‌ها، هماهنگی بهینهٔ تپ‌چنجرها و... نیز به کار گرفت.

فهرست علائم

i	اندیس شمارهٔ باس (انتقال و فوق توزیع)
b	اندیس شمارهٔ خط
t	اندیس شمارهٔ ترانسفورماتور
l	اندیس سطح بار
Ω_L	مجموعهٔ خطوط
Ω_B	مجموعهٔ شین‌ها
Ω_T	مجموعهٔ ترانسفورماتورها
Ω_B^G	مجموعهٔ باس‌های نیروگاهی
Ω_B^{SVC}	مجموعهٔ باس‌های محل نصب SVC
Ω_L^{PST}	مجموعهٔ خطوط محل نصب PST
f_{total}	تابع هدف کل
$f_{Loading}$	تابع هدف بارگذاری
$\overline{f}_{Loading}$	مقدار نرمالیزه‌شدهٔ تابع هدف بارگذاری
f_{L0}	بارگذاری شبکه در حالت پایه (بدون حضور ادوات FACTS)
$f_{voltage}$	تابع هدف پروفیل ولتاژ
$\overline{f}_{Voltage}$	مقدار نرمالیزه‌شدهٔ تابع پروفیل ولتاژ
f_{V0}	شاخص پروفیل ولتاژ شبکه در حالت پایه
$\alpha_{b,\ell}$	ضریب جریمه برای بارگذاری خط bام در سطح بار ℓام
$\mu_{b,\ell}$	ضریب اهمیت خطوط فوق توزیع نسبت به خطوط انتقال از نظر بارگذاری
$\gamma_{t,\ell}$	ضریب جریمه برای بارگذاری ترانسفورماتورام در سطح بار ℓام
$\beta_{i,\ell}$	ضریب جریمه برای ولتاژ باس iام در سطح بار ℓام
$S_{b,\ell}$	بارگذاری خط bام در سطح بار ℓام برحسب درصد
$S_{t,\ell}$	بارگذاری ترانسفورماتور tام در سطح بار ℓام برحسب درصد
$V_{i,\ell}$	ولتاژ باس iام در سطح بار ℓام برحسب پریونیت

تشکر و قدردانی

مقالهٔ حاضر حاصل نتایج بخشی از پروژهٔ تحقیقاتی مشترک بین دانشگاه زنجان و شرکت برق منطقه‌ای گیلان است. بدین وسیله از زحمات و کمک‌های ارزشمند تمامی همکاران محترم شرکت برق منطقه‌ای گیلان به‌ویژه آقای دکتر فرزاد فلاحی و آقایان مهندس جوادی، قمی و شهیدی تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

[1] Hemmati, R., Hooshmand, R.A. and Khodabakhshian, A., "*Market based transmission expansion and reactive power planning with consideration of wind and load uncertainties*", Renew. Sustain. Energy Rev., Vol. 29, pp. 1-10, Jan. 2014.

[2] Kishore, T.S. and Singal, S.K., "*Optimal economic planning of power transmission lines: a review*", Renew. Sustain. Energy Rev., Vol. 39, pp. 949-74, Nov. 2014.

[3] Shah, R., Mithulananthan, N., Bansal, RC. And Ramachandaramurthy, V.K., "*A review of key power system stability challenges for large-scale PV integration*", Renew. Sustain. Energy Rev., Vol. 41, pp.1423-1436, Jan. 2015.

[4] Verma, KS., Singh, SN. and Gupta, H. O., "*Location of unified power flow controller for congestion management*", Elect. Power Syst. Res., Vol. 58, No. 2, pp. 89-96, Jun. 2001.

[5] Singh, J., Singh, S. and Srivastava, S., "*An approach for optimal placement of static VAr compensators based on reactive power spot price*", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 22, No. 4, pp. 2021-2029, Nov. 2007.

[6] Hingorani, N.G., Gyugyi, L. and El-Hawary, M., "*Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems*", Vol. 1. New York: IEEE press, 2000.

[7] Nireekshana, T., Kesava Rao, G. and Siva Naga Raju, S., "*Enhancement of ATC with FACTS devices using Real-code genetic algorithm*", Elect. Power Energ. Syst. Vol. 43, No. 1, pp. 1276-1284, Dec. 2012.

[8] Mondal, D., Chakrabarti, A. and Sengupta, A., "*Optimal placement and parameter setting of SVC and TCSC using PSO to mitigate small signal stability problem*", Elect. Power Energ. Syst., Vol. 42, No. 1, pp. 334-340, Nov. 2012.

[9] Shayeghi, H. and Ghasemi, M., "*FACTS devices allocation using a novel dedicated improved pso for optimal operation of power system*", Journal of Operation & Automation in Power Engineering, Vol. 1, No. 2, pp. 1-11, Jul. 2013.

[10] Dutta, S., Roy, PK. and Nandi, D., "*Optimal location of UPFC controller in transmission network using hybrid chemical reaction optimization algorithm*", Elect. Power Energ. Syst., Vol. 64, 194-211, Jan. 2015.

[11] Rezaee Jordehi, A., "*Brainstorm optimization algorithm (BSOA): An efficient algorithm for finding optimal location and setting of FACTS devices in electric power systems*", Elect. Power Energ. Syst., Vol. 69, pp. 48-57, Jul. 2015.

[12] Duan, C., Fang, W., Jiang, L. and Niu, Sh., "*FACTS devices allocation via sparse optimization*", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 31. No. 2, pp. 1308-1319, Mar. 2016.

[13] Elmitwally, A., Eladl, A. and Morrow, J., "*Long-term economic model for allocation of FACTS devices in restructured power systems integrating wind generation*", IET Gener. Trans. Distr., Vol. 10, No. 1, pp. 16-30, Jan. 2016.

[14] Zhang, X., Shi, D., Wang, Z. and et al., "*Optimal Allocation of Series FACTS Devices under High Penetration of Wind Power within a Market Environment*", IEEE Trans. Power Syst.,Vol. 33, No. 6, pp. 6206-6217, Nov. 2018.

[15] Zhang, X., Tomsovic, K. and Dimitrovski, A., "*Optimal allocation of series FACTS devices in large-scale systems*", IET Gen. Trans. Distr., Vol. 12. No. 8, pp. 1889-1896, Apr. 2018.

[16] Sen, K.K. and Sen, M.L., "*Introduction to FACTS controllers: theory, modeling and applications*", Wiley and IEEE Press, Hoboken, New Jersey, 2009.

[17] Eremia, M., Liu, C.C. and Edris, A.A., "*Advanced solutions in power systems: HVDC, FACTS, and Artificial Intelligence*", IEEE Press and Wiley, Hoboken, USA, 2016.

[18] Eremia, M. and Sphahidehpour, M., "*Handbook of electrical power system dynamics: modeling, stability and control*", IEEE Press and Wiley, Hoboken, USA, 2013.

[19] Eberhart, R.C. and Kennedy, J., "*A new optimizer using particle swarm theory*", Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, Nagoya, Japan, 1995, pp. 39-43.

[20] Jin, YX., Cheng, H.Z., Yan, J. and Zhang, L., "*New discrete method for particle swarm optimization and its application in transmission network expansion planning*", Elect. Power Syst. Res., Vol. 77, pp. 227-233, Mar. 2007.

[21] Clerc, M., Kennedy, J., "*The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex*

[25] Dawn, S., Tiwari, PK. and Goswami, AK., "*An approach for long term economic operations of competitive power market by optimal combined scheduling of wind turbines and facts controllers*", Energy, Vol. 181, pp. 709-723, Aug. 2019.

[26] Sang, Y. and Sahraei-Ardakani, M., "*Effective power flow control via distributed FACTS considering future uncertainties*", Electr. Power Syst. Res. Vol. 168, pp. 127-36, Mar. 2019.

[27] https://www.digsilent.de/en/scripting-and-automation.html

[۲۸] دفتر برنامه‌ریزی و برآورد بار، معاونت برنامه‌ریزی و تحقیقات، شرکت برق منطقه‌ای گیلان، رشت، ایران.

space", IEEE Trans EVol. Comput., Vol. 6, No. 1, pp. 58-73, Feb. 2002.

[۲۲] وطن‌پور، محسن، صادقی یزدانخواه، احمد، نظری، یوسف، «**برنامه‌ریزی تولید همزمان انرژی الکتریکی و حرارتی با درنظرگرفتن اثر دریچه‌های بخار و نواحی ممنوعهٔ تولید توسط الگوریتم ترکیبی BF-PSO**»، نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، دوره ششم، شماره ۳، صفحه ۲ـ۱۳، پاییز ۱۳۹۵.

[۲۳] صیادی شهرکی، فهیمه، کی‌نیا، فرشید، اسماعیلی، سعید، «**پخش بار اقتصادی دینامیکی بهینه با استفاده از P-PSO پیشنهادی**»، نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، دوره پنجم، شماره ۲، صفحه ۲ـ۱۳، تابستان ۱۳۹۴.

[24] Luburic, Z. and Pandzic, H. "*FACTS devices and energy storage in unit commitment*", Electr. Power & Energ. Syst, Vol. 104, pp.311-325, Jan 2019.