

فصلنامه علمی-ترویجی پدافند غیرعامل

سال ششم، شماره ۳، پائیز ۱۳۹۴، (تابی ۲۳): صص ۳۱-۴۶

افزایش مقاومت شبکه برق آذربایجان در برابر بمب گرافیتی

رضا غفارپور^{۱*}، ابراهیم برزگر^۲

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۱/۲۶

تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۳/۰۹

چکیده

یکی از مهم‌ترین تهدیدات شبکه‌های برق، بمب‌های گرافیتی هستند. این بمب‌ها قادر هستند با ایجاد اتصال کوتاه، تعدادی از تجهیزات شبکه قدرت را از مدار خارج کنند. یکی از تهدیدهای اصلی که این بمب‌ها به شبکه تحمیل می‌کنند، خروج شینه از سامانه است. به همین منظور برای شبیه‌سازی چنین تهدیداتی ابتدا پست‌های برق موجود در شبکه آذربایجان را یک‌به‌یک از سامانه خارج کرده تا پست برقی که با خروج آن بیشترین تراکم برای سامانه تولید می‌شود شناسایی شود. با مشخص شدن این پست با استفاده از جبران‌ساز سری کنترل‌شونده توسط تایریستور (TCSC) و ترانسفورماتور شیفته‌دهنده فاز (PST) که نوعی از ادوات FACTS هستند به مدیریت تراکم در سامانه پرداخته می‌شود. برای مکان‌یابی ادوات از دو الگوریتم CFA-PSO و ABC استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که تراکم خطوط با خروج هر یک از پست‌های شبکه از جمله پست‌هایی که ژنراتور به آن‌ها متصل است، کاهش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: بمب گرافیتی، مدیریت تراکم، جبران‌ساز سری کنترل‌شونده توسط تایریستور (TCSC)، ترانسفورماتور شیفته‌دهنده فاز (PST)، الگوریتم CFA-PSO، الگوریتم ABC

۱- مربی و عضو هیئت علمی دانشگاه جامع امام حسین (ع)

۲- کارشناس ارشد مهندسی برق دانشگاه محقق اردبیلی

۱- مقدمه

از جنگ جهانی دوم تاکنون، شبکه های برق یک هدف راهبردی برای حملات نظامی به شمار می روند. به طور کلی در حمله به شبکه برق، چهار هدف اصلی دنبال می شود که عبارتند از: کاهش روحیه شهروندان، تحمیل هزینه به مقامات سیاسی برای القای تغییر مورد نظر، اختلال در حمله نظامی و جلوگیری از تولید و ضربه زدن به بدنه اقتصادی کشور. در سال های اخیر، شبکه های برق به عنوان یک هدف بالقوه برای حملات سایبری نیز به شمار می روند. معمولاً حمله به تأسیسات مربوط به تولید، انتقال و توزیع برق، آسان و کم هزینه بوده و آثار تخریبی زیادی را به دنبال دارد. صنعت برق یک کشور به عنوان یکی از زیرساخت های حیاتی آن کشور است. این ساختار فیزیکی و سازمانی از چنان اهمیتی برخوردار است که آسیب رسیدن به آن عواقب وحشتناک اقتصادی را در پی دارد. به همین دلیل سامانه انتقال برق همواره جزء اهداف نظامی و تروریستی است تا با آسیب رساندن به آن باعث تضعیف ثبات اقتصادی و اجتماعی یک کشور شوند [۵-۱].

گرافیت، رسانایی است که جزء دگرشکل های عنصر کربن است. این ماده کاربردهای وسیعی را در صنایع نظامی و غیرنظامی دارد. یکی از کاربردهای نظامی آن، تولید بمب گرافیتی^۱ است. این بمبها قدرت تخریب ندارند و اصطلاحاً به آنها بمب های نرم نیز گفته می شود [۱].

هدف این بمبها بیشتر سامانه های قدرت است، زیرا می توانند بدون ایجاد انفجار، کارکرد عادی سامانه را مختل کنند. روش های مقابله با این بمبها به دو دسته کلی تقسیم می شوند:

۱- اقدامات قبل از تماس گرافیت با تجهیزات سامانه

۲- اقدامات پس از تماس گرافیت با تجهیزات سامانه

مشکلات ایجاد شده برای سامانه هنگام مواجه شدن با چنین حملاتی عبارتند از [۶]:

(۱) افزایش جریان خطا و تراکم خطوط و آسیب دیدن ادوات و تجهیزات نصب شده در سامانه.

(۲) با وقوع خطا، کیفیت توان شبکه افت می کند و به تجهیزات حساس الکترونیکی و نظامی متصل به سامانه آسیب وارد می شود.

پست های برق در برابر حملات با آسیب پذیری جدی تری روبرو هستند. زیرا به پستها چند خط انتقال متصل می شود و اگر پست مورد حمله قرار گیرد بیش از یک خط انتقال از شبکه خارج خواهد شد. با توجه به استاندارد N-1، شبکه طبق استاندارد نمی تواند این خروجها را تحمل کند و دچار مشکل خواهد شد. از جمله روش های حفظ پستها در برابر حملات می توان به قرار دادن پدافند هوایی برای پستها و یا افزایش کارکنان و نیرو در پستها اشاره کرد. خطاهای حاصل از خروج یک پست از سامانه، با استفاده از ادوات FACTS^۲ قابل کاهش است. اگر مکان و تنظیمات مناسب این ادوات مشخص شود و در جای مناسب نصب شوند باعث کاهش تراکم خطوط و بهبود شرایط عملکرد سامانه خواهند شد.

۱-۲- بمب های گرافیتی

بمب های گرافیتی تاکنون در دو نوع الیافی و پودری استفاده شده اند [۱] و تحقیقات نظامی برای یافتن مدل های دیگر در برخی کشورها در حال گسترش است. در نوع الیافی، وقتی این بمبها در حمله به یک پست یا نیروگاه مورد استفاده قرار می گیرند، در ارتفاع مناسبی در هوا پخش می شوند و به آهستگی بر روی تجهیزات فرود می آیند. با فرود روی تجهیزات بین سطوح ولتاژ مختلف (خط به زمین یا خط به خط) اتصال کوتاه برقرار کرده و سامانه را دچار مشکل می کنند. به دلیل به هم پیوستگی سامانه، این اختلال می تواند گسترش پیدا کند و کل سیستم را مختل نماید.

در نوع پودری، کپسول هایی که دو قسمتی هستند به وسیله چتر فرود می آیند و در میانه راه، قسمت پایین کپسول جدا شده و پودر زغالی بسیار نرم و سبکی از آن خارج و در فضا منتشر می شود و به تدریج روی محل اتصالات مراکز نیروگاهی می نشیند. این پودر زغالی به صورت یک عایق الکتریسیته عمل می کند و تمام مدارات و جریانها را قطع می نماید.

بمب های گرافیتی نخستین بار توسط آمریکا در دوم ماه مه سال ۱۹۹۹ به وسیله هواپیماهای جنگنده علیه مراکز نیروگاهی و سامانه های الکترونیکی صربها به کار گرفته شدند. این بمبها خسارات زیادی به این مراکز وارد کردند به طوری که در مرحله اول حملات، ۷۰ درصد کشور در خاموشی فرو رفت و در مرحله بعدی که در هفتم ماه مه صورت گرفت، باقیمانده کشور نیز در خاموشی فرو رفت [۴].

قابل ملاحظه کمتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها است و الگوریتم PSO یک الگوریتم بسیار شناخته شده و معتبری است که در بیشتر مطالعات، محققین از این الگوریتم استفاده کرده‌اند. فقط برای به‌روزرسانی سرعت و مکان ذرات، از روش CFA استفاده شده که باعث بهبود شرایط الگوریتم PSO و پیشرفته شدن این الگوریتم می‌شود. از آنجا که TCSC و PST در بین ادوات FACTS نسبت به سایر ادوات مقرون به‌صرفه‌تر می‌باشند و همچنین TCSC می‌تواند راکتانس خطوط و PST زاویه ولتاژ شینه‌ها را کنترل کنند، به همین دلیل برای داشتن کنترل بیشتر بر روی المان‌های مختلف سامانه، از این ادوات در سامانه استفاده شده است.

۱-۳- پیشینه تحقیق در زمینه مکان‌یابی ادوات

FACTS

در طول چند سال گذشته، فعالیت‌های تحقیقاتی زیادی در زمینه مکان‌یابی ادوات FACTS برای بهبود شرایط سامانه قدرت انجام شده است. این تحقیقات زمینه‌های مختلف شرایط سامانه، مانند کاهش تلفات سامانه، کاهش تراکم خطوط و مدیریت تراکم سامانه، حفظ پایداری و امنیت سامانه را مورد بررسی قرار داده است.

صمیمی و همکاران [۸] به مکان‌یابی TCSC برحسب عامل حساسیت به منظور مدیریت تراکم سامانه پرداخته‌اند. در آن مقاله برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار DIGSILENT و DPL^۵ استفاده شده است. الگوریتم استفاده شده در آن مقاله، الگوریتم GA^۶ می‌باشد.

بشارتی و همکاران [۹] به مکان‌یابی TCSC در سامانه قدرت تجدید ساختاریافته با در نظر گرفتن تراکم پرداخته‌اند. روشی که برای مکان‌یابی در آن مقاله ارائه شده است بر مبنای شاخص عملکرد توان حقیقی و کاهش تلفات توان راکتیو سامانه می‌باشد. شبیه‌سازی‌های آن تحقیق در بسته نرم‌افزار Matpower انجام شده است.

یوسفی و همکاران [۱۰] به مکان‌یابی TCSC و SVC^۷ در سامانه قدرت به منظور مدیریت تراکم سامانه پرداخته‌اند. مدیریت تراکم پیشنهادی در آن مقاله بر مبنای استفاده از ادوات FACTS و برنامه پاسخ تقاضا است. پاسخ تقاضا بر اساس مشوق و عوامل جریمه مدل می‌شود. تابع هدف تراکم با در نظر گرفتن حدود

تاکنون راه‌های مختلفی برای مقابله با این بمب‌ها ارائه شده است، از جمله آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۱]:

۱. استفاده از سقف‌های فلزی یا توری یا پلاستیکی برای جلوگیری از تماس الیاف با تجهیزات
۲. استفاده از چتر برای جمع کردن گرافیت پخش شده در هوا
۳. استفاده از دمنده‌های قوی برای دور کردن پودر یا الیاف گرافیت از محل
۴. استفاده از فیلترهای الکترواستاتیک برای باردار کردن ذرات گرافیت و سپس جذب ذرات با استفاده از میدان‌های مغناطیسی
۵. آموزش گروه‌های ویژه برای پاک‌سازی محل پس از تماس الیاف گرافیت با تجهیزات.

در این مقاله سامانه آزمون مورد نظر، سامانه عملی آذربایجان است و فرض بر این می‌باشد که سامانه توسط بمب گرافیتی مورد حمله قرار گرفته و تمامی خطوط متصل به شینه از سامانه خارج شده‌اند. در گام اول با خروج یک‌به‌یک شینه‌ها از سامانه آزمون، شینه‌هایی که با خروج آن‌ها بیشترین تراکم برای خطوط به وجود می‌آید، شناسایی شده‌اند. برای خروج شینه از سامانه، تمامی خطوط متصل به آن شینه و واحدهای تولیدی موجود در آن شینه را از سامانه باید خارج کرد. در گام بعدی، زمانی که پرخطرترین شینه شناسایی شده و از سامانه خارج است، به مکان‌یابی یک دستگاه TCSC^۱ و PST^۲ مکان‌یابی هم‌زمان این ادوات در سامانه پرداخته شده است. در گام آخر، نتایج مقایسه شده است تا مشخص شود نصب چه دستگاهی در شبکه بیشترین کارایی را دارد. برای مکان‌یابی‌ها از الگوریتم‌های CFA-PSO^۳ و ABC^۴ استفاده می‌شود. به‌منظور انجام پخش بار، از بسته نرم‌افزار Matpower4.0 استفاده شده که به راحتی در نرم‌افزار MATLAB قابل اجراست.

به این دلیل از دو الگوریتم ذکر شده استفاده می‌شود که، الگوریتم ABC نسبتاً الگوریتم جدیدی است که از سایر الگوریتم‌ها در تعداد تکرار پایین‌تری همگرا می‌شود و دارای سرعت اجرای

5- DIGSILENT Programming Language

6- Genetic Algorithm

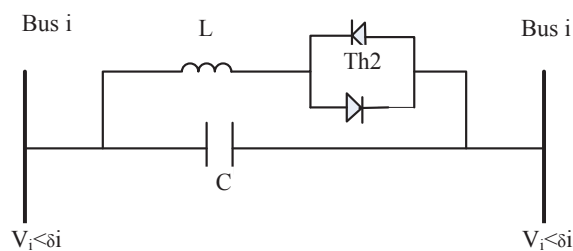
7- Static VAR Compensator

1- Thyristor Controlled Series Capacitor

2- Phase Shifting Transformers

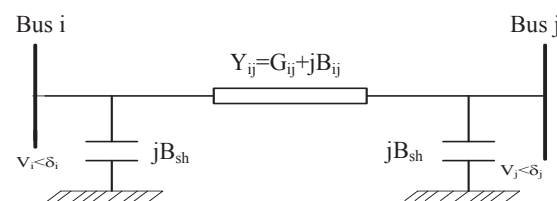
3- Constriction Factor Approach Particle Swarm Optimization

4- Artificial Bee Colony



شکل ۱- مدل تک فاز یک TCSC [۸]

در شکل (۲) پارامترهای معادل π خط انتقال نشان داده شده است که در آن، $V_i \delta_i$ و $V_j \delta_j$ به ترتیب ولتاژهای مختلط شینه‌های i و j هستند. توان اکتیو و راکتیو ارسالی از شینه i به j می‌توان به صورت روابط (۱) و (۲) بیان کرد [۱۶].

شکل ۲- مدل π خط انتقال [۱۶]

$$P_{ij} = V_i^2 G_{ij} - V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (1)$$

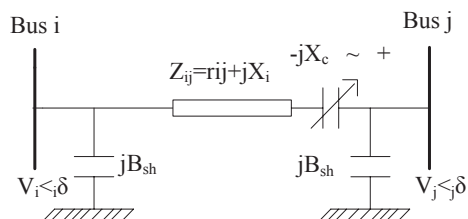
$$Q_{ij} = -V_i^2 (B_{ij} + B_{sh}) - V_i V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (2)$$

که در آن $\delta_{i,j} = \delta_i - \delta_j$ است. توان انتقالی از شینه j به i را نیز می‌توان به صورت روابط (۳) و (۴) بیان نمود.

$$P_{ij} = V_j^2 G_{ij} - V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} - B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (3)$$

$$Q_{ij} = V_j^2 (B_{ij} + B_{sh}) + V_i V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} + B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (4)$$

مدل خط انتقال پس از نصب TCSC بین شینه‌های i و j در شکل (۳) نشان داده شده است. در حالت ماندگار می‌توان TCSC را به صورت یک راکتانس در محدوده $-jX_c$ تا $+jX_c$ مدل کرد [۱۶-۱۸]. توان اکتیو و راکتیو عبوری از شینه i به شینه j و از شینه j به شینه i در حضور TCSC را می‌توان به صورت روابط (۵-۸) نوشت [۱۶-۱۷].

شکل ۳- مدل π خط انتقال پس از نصب یک TCSC [۱۶]

حرارتی خطوط و حدود ولتاژ مدل شده‌اند. در آن مقاله نرم‌افزار استفاده شده برای بهینه‌سازی CPLEX تحت نرم‌افزار GAMS^۱ است.

در کارهای مشابهی که آقای راشد و همکاران [۱۱-۱۳] انجام داده‌اند، به مدیریت تراکم خطوط سامانه هنگام خروج یک خط از سامانه پرداخته شده است. آن روش، مبنای کار در این مقاله قرار گرفته است، با این تفاوت که به جای خروج خط از سامانه، خروج پست (حتی پست‌های متصل به ژنراتور) از سامانه مورد مطالعه قرار گرفته و تراکم سامانه ارزیابی شده است.

گیتی‌زاده و همکاران [۱۴] به مکان‌یابی PST در سامانه قدرت با در نظر گرفتن معیارهای تراکم و تلفات سامانه با استفاده از یک روش ترکیبی پرداخته و کامجورن و همکاران [۱۵] برای مکان‌یابی PST از یک روش غربال‌گری استفاده کرده‌اند.

جثانی و همکاران [۲۵] به مکان‌یابی TCSC در سامانه قدرت به منظور بهبود امنیت سامانه پرداخته‌اند و سامانه آزمون در آن مقاله، سامانه ۱۴ شینه استاندارد IEEE است. دویتا و همکاران [۲۶] در مقاله خود به مکان‌یابی TCSC با استفاده از یک الگوریتم هیبریدی (DE/BBO) برای انجام پخش بار امن روی سامانه ۳۰ شینه استاندارد پرداخته‌اند.

واندای و همکاران در مقاله‌ای جدید [۲۷] به مکان‌یابی TCSC به منظور میرا کردن نوسانات در سامانه قدرت پرداخته‌اند. در آن مقاله برای شبیه‌سازی‌ها از بخش Simulations نرم‌افزار متلب استفاده شده است.

۲- مدل‌سازی ادوات

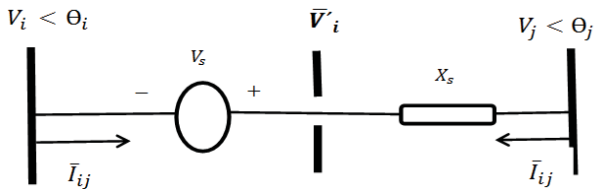
۲-۱- مدل‌سازی جبران‌کننده TCSC

کنترل‌کننده‌های FACTS برحسب نحوه قرار گرفتن در شبکه انتقال به سه دسته تقسیم‌بندی می‌شوند. کنترل‌کننده‌های سری یکی از آنهاست که به صورت سری در خط انتقال قرار می‌گیرند. پرکاربردترین عضو این خانواده، TCSC است که در آن، از راکتورهای کنترل‌شده با تایریستور (TCR) به طور موازی با بخش‌هایی از یک بانک خازنی استفاده می‌شود. این ترکیب به TCSC امکان می‌دهد تا با هدایت تایریستورها، یک المان راکتیو با تغییرات پیوسته فراهم آورد. شکل (۱)، مدل تک‌فاز یک TCSC را نشان می‌دهد که بین شینه‌های i و j قرار گرفته است [۸].

1- General Algebraic Modeling System
2- Thyristor Controlled Reactor

۲-۲- مدل سازی PST

منبع ولتاژ سری بین شینه‌های i و j را مطابق شکل (۵)، در نظر بگیرید که به صورت یک منبع ایده‌آل با ولتاژ V_s و راکتانس X_s نشان داده شده است [۱۴].



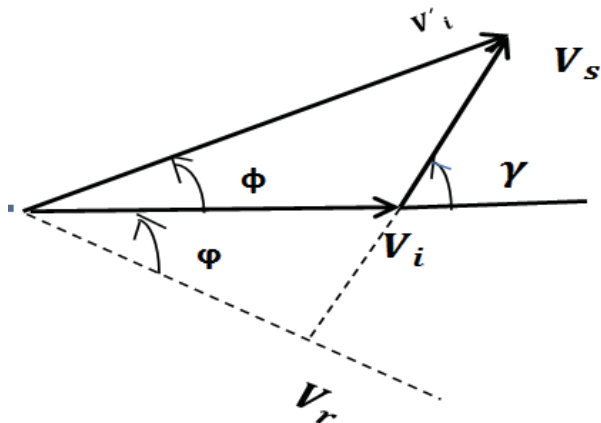
شکل ۵- منبع ولتاژ سری بین شینه‌های i و j [۱۴]

در شکل (۵) نشان‌دهنده یک منبع موهومی است که به صورت رابطه (۱۵) نشان داده می‌شود:

$$\bar{V}'_i = \bar{V}_s + \bar{V}_i \quad (15)$$

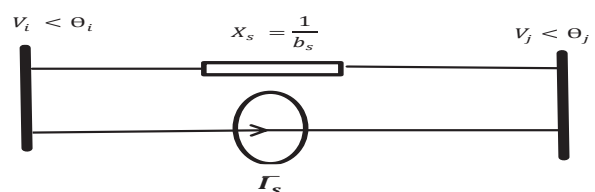
$$\bar{V}_s = r\bar{V}_i e^{j\gamma}, \quad 0 \leq r \leq 1 \quad (16)$$

دیگرام فازوری ولتاژ شکل (۵) در شکل (۶) نشان داده شده است که در آن، دامنه و فاز V_s قابل تنظیم خواهد بود.



شکل ۶- دیگرام فازوری ولتاژ شکل (۵) [۱۴]

شکل (۷)، مدل منبع جریان PST (مدل نورتن منبع ولتاژ سری) را نشان می‌دهد که در آن $I_B = -jb_s \bar{V}_s$ و $b_s = \frac{1}{X_s}$ می‌باشند [۱۴].



شکل ۷- مدل منبع نورتن منبع ولتاژ سری [۱۴]

$$P_{ij}^c = V_i^2 G'_{ij} - V_i V_j (G'_{ij} \cos \delta_{ij} + B'_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (5)$$

$$Q_{ij}^c = -V_i^2 (B'_{ij} + B_{sh}) + V_i V_j (G'_{ij} \sin \delta_{ij} - B'_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (6)$$

$$P_{ji}^c = V_j^2 G'_{ij} - V_i V_j (G'_{ij} \cos \delta_{ij} - B'_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (7)$$

$$Q_{ji}^c = -V_j^2 (B'_{ij} + B_{sh}) + V_i V_j (G'_{ij} \sin \delta_{ij} + B'_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (8)$$

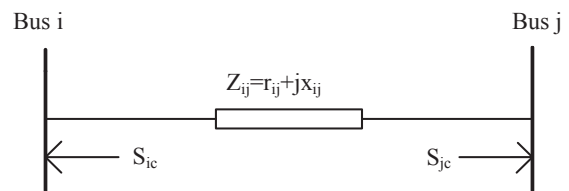
تلفات توان اکتیو و راکتیو را می‌توان از جمع توان‌های ارسالی دو شینه مطابق روابط (۹ و ۱۰) به دست آورد.

$$P_{Loss} = P_{ij} + P_{ji} = G'_{ij} (V_i^2 + V_j^2) - 2V_i V_j G'_{ij} \cos \delta_{ij} \quad (9)$$

$$Q_{Loss} = -(V_i^2 + V_j^2)(B'_{ij} + B_{sh}) + 2V_i V_j B'_{ij} \cos \delta_{ij} \quad (10)$$

که در روابط فوق، $G'_{ij} = \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + (x_{ij} - x_c)^2}$ و $B'_{ij} = \frac{-(x_{ij} - x_c)}{r_{ij}^2 + (x_{ij} - x_c)^2}$ است [۱۸ و ۱۹].

تغییر در توان جاری خط پس از نصب جبران‌کننده سری (TCSC) را می‌توان مطابق شکل (۴) به صورت توان تزریقی به شینه‌ها مدل کرد [۱۷-۱۹].



شکل ۴- مدل توان تزریقی نصب TCSC [۱۶]

همچنین، توان اکتیو و راکتیو تزریقی به شینه‌های i و j را می‌توان مطابق روابط (۱۱-۱۴) به دست آورد:

$$P_{ic} = V_i^2 \Delta G_{ij} - V_i V_j (\Delta G_{ij} \cos \delta_{ij} + \Delta B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (11)$$

$$P_{jc} = V_j^2 \Delta G_{ij} - V_i V_j (\Delta G_{ij} \cos \delta_{ij} - \Delta B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (12)$$

$$Q_{ic} = -V_i^2 \Delta B_{ij} - V_i V_j (\Delta G_{ij} \sin \delta_{ij} - \Delta B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (13)$$

$$Q_{jc} = -V_j^2 \Delta B_{ij} - V_i V_j (\Delta G_{ij} \sin \delta_{ij} + \Delta B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (14)$$

که در روابط فوق، $\Delta G_{ij} = \frac{x_c r_{ij}^2 (x_c - 2x_{ij})}{(r_{ij}^2 + x_{ij}^2)(r_{ij}^2 + (x_j - x_c)^2)}$ و $\Delta B_{ij} = \frac{-x_c (r_{ij}^2 + x_c x_{ij})}{(r_{ij}^2 + x_{ij}^2)(r_{ij}^2 + (x_j - x_c)^2)}$ است [۱۹].

۳-۲- تابع هدف

تابع هدف تابعی است که با توجه به هدف بهینه‌سازی توسط کاربر تعریف می‌شود و مهم‌ترین قسمت الگوریتم و اساس کار برنامه بهینه‌سازی است. در این مقاله هدف مدنظر، مدیریت تراکم خطوط پربار سامانه هنگام خارج شدن پرخطرترین پست از سامانه است. به این منظور، شاخص PI برای بررسی بار خطوط مطابق رابطه (۲۳) تعریف شده است. هدف از بهینه‌سازی‌ها کاهش هرچه بیشتر این شاخص است. با کاهش هر چه بیشتر این شاخص تراکم خطوط کمتر شده و احتمال خروج سامانه و روبرو شدن با خاموشی سراسری کاهش می‌یابد [۱۱-۱۳].

$$PI = \sum_{L=1}^{nt} \left(\frac{S_L}{S_{L,max}} \right) \quad (23)$$

در رابطه بالا، S_L توان عبوری از خط L ام، $S_{L,max}$ حداکثر توان عبوری از خط L ام برحسب MVA است که در Matpower با عنوان Rate A هر خط معرفی شده است و $nt-1$ تعداد خطوط سامانه آزمون است.

۳-۳- قیود بهره‌برداری

در هنگام بهره‌برداری از سامانه قدرت همواره با محدودیت‌هایی روبرو می‌شویم که به قیود شبکه معروف هستند و در صورت رعایت نشدن این قیود، پاسخ به‌دست آمده از بهینه‌سازی قابل اعمال به شبکه نخواهد بود [۱۷]. در این مقاله از آنجا که با حذف برخی شینه‌ها، واحد تولیدی توان متصل به آن شینه نیز از سامانه خارج می‌شود، برای توان تولیدی ژنراتورها حداکثر ۱۰ درصد افزایش توان در نظر گرفته شده است تا در صورت کاهش توان تولیدی مورد نیاز برای بارهای شبکه بتوان تا حدودی کمیود توان را جبران کرد. در صورتی که توان تولیدی ژنراتورها از این مقدار بالاتر باشد، به‌عنوان خطا تشخیص داده می‌شود. محدوده مجاز برای ولتاژ شینه‌ها بین ۱/۵۰ تا ۰/۹۵ پرونیت در نظر گرفته شده، و در صورت خروج ولتاژ شینه‌ها از این محدوده، خطا تشخیص داده می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که در سامانه آزمون، ولتاژ برخی شینه‌های متصل به ژنراتور در حالت عادی، خارج از این محدوده استاندارد هستند، به همین دلیل برای این شینه‌ها چنین خطایی در نظر گرفته نشده است. برای انجام پخش بار در الگوریتم، از پخش بار runpf موجود در Matpower استفاده شده، که یک پخش بار AC است و به‌طور پیش‌فرض از روش نیوتن رافسون برای اجرای پخش بار

با توجه به اینکه منبع جریان برای انتقال توان به شینه‌های i و j وابسته است، بنابراین \bar{S}_{is} و \bar{S}_{js} به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\bar{S}_{is} = \bar{V}_i (-\bar{I}_s)^* \quad (17)$$

$$\bar{S}_{js} = \bar{V}_j (-\bar{I}_s)^* \quad (18)$$

با قرار دادن روابط (۱۵) و (۱۶) در روابط (۱۷) و (۱۸) و ساده‌سازی، برای توان اکتیو و راکتیو تزریقی، روابط (۱۹-۲۲) به دست می‌آیند.

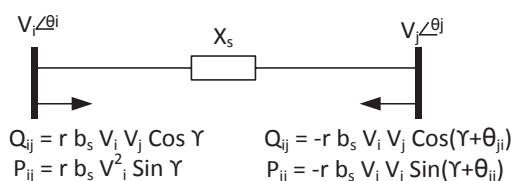
$$P_{is} = r b_s V_i^2 \sin \gamma \quad (19)$$

$$Q_{is} = r b_s V_i^2 \cos \gamma \quad (20)$$

$$P_{js} = -r b_s V_i V_j \sin(\theta_{ji} + \gamma) \quad (21)$$

$$Q_{js} = -r b_s V_i V_j \cos(\theta_{ji} + \gamma) \quad (22)$$

مدل تزریقی توان‌ها در حالت منبع ولتاژ سری در شکل (۸) نشان داده شده است.



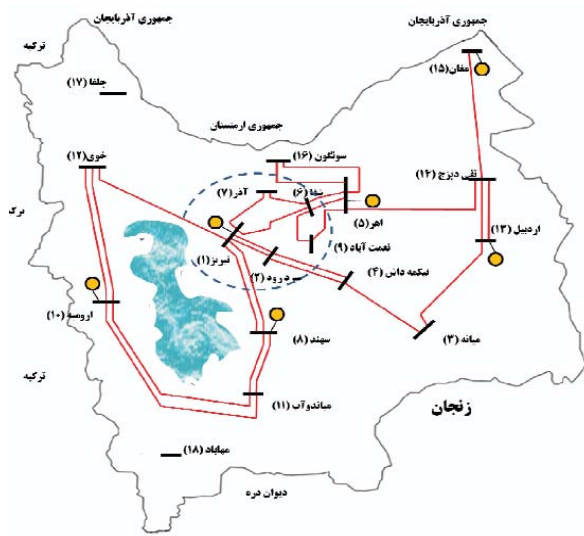
شکل ۸. مدل تزریقی و منبع ولتاژ سری [۱۴]

با استفاده از روابط (۱۹-۲۲) و به‌کارگیری یک ترانسفورماتور شیفت‌دهنده فاز (PST)، می‌توان زاویه γ را جابه‌جا کرده و به تناسب آن، مقدار توان اکتیو عبوری خط را نیز تغییر داد.

۳- تعریف مسئله

۳-۱- روش پیشنهادی

همان‌گونه که گفته شد، اساس کار این مقاله مطابق روشی است که در مراجع [۱۱-۱۳] آمده است، با این تفاوت که در این مقاله به جای خروج خط از سامانه، شینه‌ها (پست‌های برق) یک‌به‌یک از سامانه خارج می‌شوند. تمرکز بیشتر بر روی رتبه‌بندی احتمالات حاصل از خروج یک شینه انتقال از سامانه می‌باشد. برای خروج هر شینه از سامانه لیست تمام خطوط پربار به دست آمده است. پس از رتبه‌بندی احتمالات با استفاده از دو الگوریتم CFA-PSO و ABC مکان مناسب و تنظیمات درست ادوات مشخص شده است



شکل ۹- دیاگرام تک خطی شبکه آذربایجان [۲]

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \quad (23)$$

$$V_{id}^{k+1} = W V_{id}^k + c_1 r_1 (P_{best, id}^k - X_{id}^k) + c_2 r_2 (G_{best, id}^k - X_{id}^k) \quad (24)$$

$$W = W_{max} - \frac{W_{max} - W_{min}}{iter_{max}} \times iter \quad (25)$$

در رابطه بالا W ثابت وزنی اینرسی، W_{min} و W_{max} به ترتیب مقادیر اولیه و نهایی ثابت وزنی اینرسی، $iter_{max}$ و $iter$ به ترتیب مقادیر حداکثر تعداد تکرار و تعداد تکرار فعلی می‌باشند [۲۱-۲۲].

برای کدبندی مسئله در حالت نصب یک دستگاه در شبکه، هر عضو جمعیت شامل دو متغیر در نظر گرفته می‌شود. متغیر اول بیانگر محل نصب دستگاه بوده که مقداری گسسته بین یک تا حداکثر تعداد خطوط شبکه است. در حالت نصب TCSC، متغیر دوم، تنظیم مقدار جبران‌سازی دستگاه است که مقداری پیوسته بین $+0/2$ تا $-0/8$ و در حالت نصب PST، متغیر دوم، تنظیم مقدار زاویه است که مقداری پیوسته بین $+30$ تا -30 درجه است. در حالت نصب هم‌زمان دو دستگاه در شبکه، هر عضو جمعیت شامل چهار متغیر در نظر گرفته می‌شود. متغیر اول و سوم بیانگر محل نصب ادوات بوده که مقداری گسسته بین یک تا حداکثر تعداد خطوط شبکه و متغیر دوم، تنظیم مقدار جبران‌سازی TCSC است که مقداری پیوسته بین $+2/0$ تا $-8/0$ و متغیر چهارم تنظیم مقدار زاویه PST که مقداری پیوسته بین $+30$ تا -30 درجه می‌باشد.

پارامترهای به‌کاررفته در الگوریتم CFA-PSO به‌منظور

استفاده می‌کند. قیدی که باید در پخش بار رعایت شود، همگرا شدن پخش بار است. برای رعایت این قید، در برنامه runpf ثابتی به نام success تعریف شده است، هنگامی که این ثابت مخالف با یک باشد یعنی پخش بار همگرا نشده است. در صورت مواجه شدن با این موضوع الگوریتم خطایی را تشخیص می‌دهد. در برنامه شبیه‌سازی با مواجه شدن با چنین خطایی، ضریب جریمه‌ای بزرگ به تابع هدف اضافه می‌شود تا آن جواب جزء جواب‌های بهینه الگوریتم نباشد. با خروج یک پست یا شینه از سامانه، تمامی خطوط متصل به آن شینه از سامانه خارج می‌شود، در این حالات باید با قرار دادن شرط‌هایی، برنامه را طوری تنظیم کرد که خطوط خارج شده از سامانه از جواب‌های الگوریتم حذف شوند.

۴- اعمال شبیه‌سازی و نتایج

۴-۱- ابزار شبیه‌سازی و سامانه آزمون

برای شبیه‌سازی، از دو الگوریتم CFA-PSO و ABC استفاده شده که در نرم‌افزار متلب اجرا می‌شود و برای اجرای پخش بار سامانه از جعبه نرم‌افزار Matpower4.0 که به راحتی در متلب قابل اجراست استفاده شده است [۲۰]. روش ارائه شده بر روی سامانه عملی آذربایجان که در شمال غربی ایران قرار دارد، پیاده‌سازی شده است. دیاگرام تک خطی این سامانه در شکل (۹) نشان داده شده است. این سامانه دارای ۱۸ شینه می‌باشد که پست‌های ۱۷ و ۱۸ هنوز به شبکه متصل نشده‌اند و دارای ۲۷ خط است که تعدادی از خطوط به صورت موازی باهم قرار دارند و دارای ۶ تولیدکننده توان در شینه‌های ۱، ۵، ۸، ۱۰، ۱۳ و ۱۵ می‌باشد. سایر اطلاعات این سامانه و حداکثر توان عبوری خطوط به‌طور کامل در مرجع [۲] در دسترس است.

۴-۲- الگوریتم CFA-PSO

بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) یک روش اکتشافی است که در سال ۱۹۹۵ میلادی توسط کندی و ابرهارت بر اساس مفهوم ازدحام گله‌ای از پرندگان و یا ماهیان بر اساس تأثیر رفتار هریک از اعضا بر عضو دیگر به وجود آمد. اطلاعات کامل و جامع این الگوریتم و نحوه عملکرد آن در مراجع [۲۱ و ۲۲] آمده است. در این مقاله برای به‌روز رسانی متغیر اینرسی از رابطه (۲۴) بر مبنای رویه CFA^۲ استفاده شده است.

جدول ۳- دو اولویت اول هنگام خروج شینه از سامانه آذربایجان

شینه خارج شده	خطوط دارای اضافه بار				شاخص PI (MVA)	اولویت
	خط	توان عبوری (MVA)	rate A (MVA)	اضافه بار (MVA)		
۱	خط ۱۱	۴۷۳/۹۹	۳۹۷	۷۶/۹۹	۱۰۳۷/۱۶	۱
	خط ۱۲	۴۷۳/۹۹	۳۹۷	۷۶/۹۹		
	خط ۱۳	۴۲۲/۴۴	۳۹۷	۲۵/۴۴		
	خط ۱۴	۴۵۵/۵۲	۳۹۷	۵۸/۵۲		
	خط ۱۷	۶۴۹/۳۴	۳۹۷	۲۵۲/۳۴		
۱۵	خط ۴	۴۳۸/۳۶	۳۹۷	۴۱/۳۶	۶۵۴/۹	۲
	خط ۸	۴۳۳/۷۲	۳۹۷	۳۶/۷۲		
	خط ۱۷	۴۱۴/۴۳	۳۹۷	۱۷/۴۳		

انجام می‌شود. در این قسمت دو اولویت اول برای سامانه آزمون در جدول (۳) آمده است.

ذکر این نکته لازم است که در جدول (۳) در قسمت شاخص PI، عدد نشان داده شده مربوط به تمامی خطوطی است که با حذف شینه در سامانه باقی می‌ماند و تنها مربوط به خطوط دارای اضافه بار نیست. پس از تشکیل جدول اولویت بندی، مشخص می‌شود که خروج شینه ۱ از سامانه بیشترین ریسک و خطر را به سامانه تحمیل می‌کند.

با توجه به خروج شینه ۱ از سامانه، در سه سناریو مکان مناسب نصب ادوات در سامانه آذربایجان بررسی می‌شوند:

- سناریوی اول: نصب یک دستگاه TCSC در سامانه آزمون
- سناریوی دوم: نصب یک دستگاه PST در سامانه آزمون
- سناریوی سوم: نصب همزمان TCSC و PST در سامانه آزمون

۴-۴-۱- نصب یک دستگاه TCSC در سامانه آزمون

به منظور کنترل تراکم خطوط باید مکان مناسب نصب و تنظیمات درست TCSC را محاسبه کرد. نتایج مکان یابی در دو الگوریتم CFA-PSO و ABC در جدول (۴) و نمودار همگرایی این دو الگوریتم در شکل (۱۰) آمده است.

بهینه سازی در جدول (۱) آورده شده‌اند.

جدول ۱- مقدار پارامترهای موجود در الگوریتم CFA-PSO

مقدار پارامتر	پارامترهای CFA- PSO
۲	تعداد متغیرها
۱۰۰	جمعیت اولیه
۱/۱	ثابت های C_1 و C_2
۴/۰	ثابت W_{min}
۹/۰	ثابت W_{max}
۱۰۰	تعداد تکرارها

۴-۳- الگوریتم ABC

الگوریتم تجمعی زنبور عسل (ABC) یکی از الگوریتم‌های تکاملی است که با رویکرد اتفاقی پایین و جستجوی بهتر از سایر الگوریتم‌های ابتکاری از جمله الگوریتم ژنتیک، برنامه نویسی پویا و استراتژی‌های تکاملی برای حل مسائل بهینه‌سازی غیرخطی می‌تواند استفاده شود. اطلاعات کامل و جامع این الگوریتم و نحوه عملکرد آن در مراجع [۲۳-۲۴] آمده است. در این قسمت نیز برای کدبندی مسئله مانند حالت الگوریتم CFA-PSO عمل شده است. پارامترهای به کاررفته در الگوریتم ABC به منظور بهینه‌سازی در جدول (۲) آورده شده‌اند.

جدول ۲- مقدار پارامترهای موجود در الگوریتم ABC

مقدار پارامتر	پارامترهای ABC
۵۰	جمعیت اولیه
۵۰	Limit
۱۰۰	تعداد تکرار
۲/جمعیت اولیه	تعداد غذا

۴-۴-۲- نتایج شبیه‌سازی

همان‌گونه که گفته شد، هدف در این مقاله، مدیریت تراکم خطوط هنگام خروج شینه‌ای از سامانه است. در گام اول شینه‌های سامانه یک به یک از مدار خارج می‌شوند. برای خروج هر شینه از سامانه باید تمامی خطوط و تمامی واحدهای تولیدی متصل به آن شینه را از سامانه خارج کرد، سپس اولویت بندی بر اساس تعداد خطوط دارای اضافه بار و مقدار شاخص PI معرفی شده در رابطه (۲۳)

جدول ۵- توان عبوری خطوط پس از قرار دادن TCSC در سامانه

الگوریتم	خطوط دارای اضافه بار				شاخص PI (MVA)
	خط	توان عبوری (MVA)	rate A (MVA)	اضافه بار (MVA)	
CFA-PSO	خط ۱۱	۴۳۶/۴۱	۳۹۷	۳۹/۴۱	۹۲۱/۷۳
	خط ۱۲	۴۶۲/۱۳	۳۹۷	۶۵/۱۳	
	خط ۱۳	۴۰۳/۵۶	۳۹۷	۶/۵۶	
	خط ۱۴	۴۴۹/۴۷	۳۹۷	۵۲/۴۷	
	خط ۱۷	۶۳۱/۰۶	۳۹۷	۲۳۴/۰۶	
ABC	خط ۱۱	۴۳۶/۴۱	۳۹۷	۳۹/۴۱	۹۲۱/۷۳
	خط ۱۲	۴۶۲/۱۳	۳۹۷	۶۵/۱۳	
	خط ۱۳	۴۰۳/۵۶	۳۹۷	۶/۵۶	
	خط ۱۴	۴۴۹/۴۷	۳۹۷	۵۲/۴۷	
	خط ۱۷	۶۳۱/۰۶	۳۹۷	۲۳۴/۰۶	

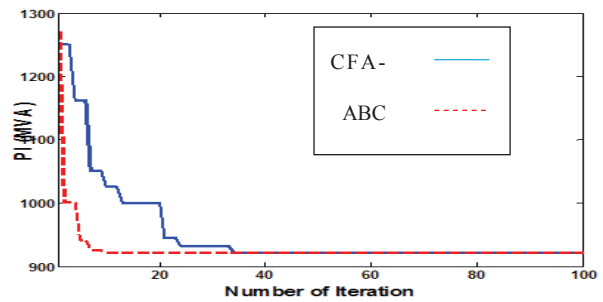
اولویت اول توسط دو الگوریتم معرفی شده، دستگاه با تنظیمات به دست آمده در سامانه قرار داده شده و پخش بار انجام شده است. نتایج حاصل از این مکان یابی در جدول (۷) آمده است. با توجه به جدول های (۷ و ۳) مشاهده می شود که در اولویت اول یعنی خروج شینه ۱ از سامانه، خطوط ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۷ با تراکم روبرو شده اند، پس از قرار دادن PST در سامانه بار عبوری از این خطوط در هر دو الگوریتم، مقدار کمی کاهش و مقدار شاخص PI در الگوریتم CFA-PSO و ABC به ترتیب ۱۲/۶۹ و ۱۰/۰۴ مگا ولت آمپر کاهش یافته است. این مقدار کاهش تراکم برای خطوط شبکه کم بوده و می توان گفت که نصب PST در شبکه نمی تواند هدف مدنظر را مرتفع کند و تراکم خطوط را کنترل نماید.

جدول ۶- مکان نصب و تنظیمات PST حاصل از مکان یابی الگوریتم ها

الگوریتم	مکان نصب PST	Ang (deg)	شاخص PI (MVA)
CFA-PSO	خط ۱۳	-۱۷/۸۶۲۴	۱۰۲۵/۴۷
ABC	خط ۱۳	-۱۷/۱۳۶۹	۱۲۰۷/۱۲

جدول ۴- مکان نصب و تنظیمات TCSC حاصل از مکان یابی الگوریتم ها

الگوریتم	مکان نصب TCSC	X _{TCSC} (p.u)	شاخص PI (MVA)
CFA-PSO	خط ۱۱	-۶۳۲۷/۰	۷۳/۹۲۱
ABC	خط ۱۱	-۶۳۲۷/۰	۷۳/۹۲۱



شکل ۱۰- نمودار همگرایی دو الگوریتم CFA-PSO و ABC در حالت نصب

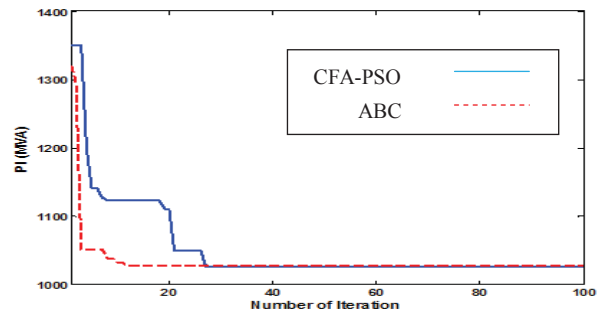
پس از انجام مکان یابی ها برای اولویت اول توسط دو الگوریتم معرفی شده، دستگاه با تنظیمات به دست آمده در سامانه قرار داده شده و پخش بار انجام شده است. نتایج حاصل از این مکان یابی در جدول (۵) آمده است. با توجه به جدول های (۵ و ۳) مشاهده می شود که در اولویت اول یعنی خروج شینه ۱ از سامانه، خطوط ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۷ با تراکم روبرو شده اند. پس از قرار دادن TCSC در سامانه مشاهده می شود که بار عبوری از این خطوط در هر دو الگوریتم، کاهش و مقدار شاخص PI، ۱۱۵/۴۳ مگا ولت آمپر کاهش یافته است. با قرار گرفتن TCSC در سامانه، می توان گفت با تغییر راکتانس خط و همچنین اثری که می تواند در تلفات خطوط ایجاد کند، مقداری تراکم سامانه کاهش یافته است. ولی کماکان خطوط سامانه دارای تراکم قابل ملاحظه ای هستند. دلیل این امر را می توان با توجه به توپولوژی سامانه توجیه کرد. با خروج شینه ۱، سامانه اصلی ترین منبع تولید توان خود را از دست می دهد لذا برای تأمین توان مورد نیاز از طریق ژنراتورهای باقی مانده سامانه مجبور به عبور توان از خطوط باقی مانده می باشد، که این می تواند دلیل تحمیل تراکم زیاد به سامانه باشد

۴-۴-۲- نصب یک دستگاه PST در سامانه آزمون

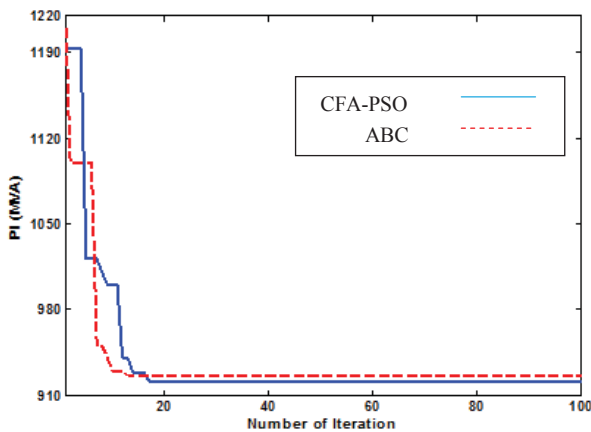
نتایج مکان یابی یک دستگاه PST حاصل از دو الگوریتم CFA-PSO و ABC در جدول (۶) و نمودار همگرایی این دو الگوریتم در شکل (۱۱) آمده است. پس از انجام مکان یابی ها برای

جدول ۸- مکان نصب و تنظیمات TCSC و PST حاصل از مکان یابی الگوریتم‌ها

الگوریتم‌ها				
الگوریتم CFA-PSO				
مکان نصب TCSC	XTCS (p.u)	مکان نصب PST	Ang (deg)	شاخص PI (MVA)
خط ۱۱	-۰/۶۳۲۷	خط ۱۷	-۱۳/۴۰۷۹	۹۲۱/۷۳
الگوریتم ABC				
مکان نصب TCSC	XTCS (p.u)	مکان نصب PST	Ang (deg)	شاخص PI (MVA)
خط ۱۱	-۰/۶۳۱۹	خط ۱۳	-۱۶/۲۱۶۳	۹۲۶/۲۱



شکل ۱۱- نمودار همگرایی دو الگوریتم CFA-PSO و ABC در حالت نصب PST



شکل ۱۲- نمودار همگرایی دو الگوریتم CFA-PSO و ABC در حالت نصب همزمان TCSC و PST

جدول ۹- توان عبوری خطوط پس از قرار دادن همزمان TCSC و PST در سامانه

الگوریتم	خطوط دارای اضافه‌بار				شاخص PI (MVA)
	خط	توان عبوری (MVA)	rate A (MVA)	اضافه‌بار (MVA)	
CFA-PSO	خط ۱۱	۴۳۶/۴۱	۳۹۷	۳۹/۴۱	۹۲۱/۷۳
	خط ۱۲	۴۶۲/۱۳	۳۹۷	۶۵/۱۳	
	خط ۱۳	۴۰۳/۵۶	۳۹۷	۶/۵۶	
	خط ۱۴	۴۴۹/۴۷	۳۹۷	۵۲/۴۷	
	خط ۱۷	۶۳۱/۰۶	۳۹۷	۲۳۴/۰۶	
ABC	خط ۱۱	۴۳۶/۴۱	۳۹۷	۳۹/۴۱	۹۲۶/۲۱
	خط ۱۲	۴۶۲/۱۳	۳۹۷	۶۵/۱۳	
	خط ۱۳	۴۰۴/۶۲	۳۹۷	۷/۶۲	
	خط ۱۴	۴۵۱/۷۸	۳۹۷	۵۴/۷۸	
	خط ۱۷	۶۲۹/۴۳	۳۹۷	۲۲۲/۴۳	

جدول ۷- توان عبوری خطوط پس از قرار دادن PST در سامانه

الگوریتم	خطوط دارای اضافه‌بار				شاخص PI (MVA)
	خط	توان عبوری (MVA)	rate A (MVA)	اضافه‌بار (MVA)	
CFA-PSO	خط ۱۱	۴۷۲/۶۲	۳۹۷	۷۵/۶۲	۱۰۲۴/۴۷
	خط ۱۲	۴۷۲/۶۲	۳۹۷	۷۵/۶۲	
	خط ۱۳	۴۱۲/۴۴	۳۹۷	۱۵/۴۴	
	خط ۱۴	۴۵۵/۱۶	۳۹۷	۵۸/۱۶	
	خط ۱۷	۶۴۶/۷۲	۳۹۷	۲۴۹/۷۲	
ABC	خط ۱۱	۴۷۲/۶۲	۳۹۷	۷۵/۶۲	۱۰۲۷/۱۲
	خط ۱۲	۴۷۲/۶۲	۳۹۷	۷۵/۶۲	
	خط ۱۳	۴۱۳/۱۶	۳۹۷	۱۶/۱۶	
	خط ۱۴	۴۵۴/۸۳	۳۹۷	۵۷/۸۳	
	خط ۱۷	۶۴۶/۰۹	۳۹۷	۲۴۹/۰۹	

۴-۳- نصب همزمان یک دستگاه TCSC و یک دستگاه PST در سامانه آزمون

در این سناریو یک دستگاه TCSC و یک دستگاه PST همزمان در سامانه قرار داده شده است. نتایج مکان‌یابی در دو الگوریتم CFA-PSO و ABC در جدول (۸) و نمودار همگرایی این دو الگوریتم در شکل (۱۲) آمده است. پس از انجام مکان‌یابی‌ها برای اولویت اول توسط دو الگوریتم معرفی شده، دستگاه‌ها با تنظیمات به‌دست آمده در سامانه قرار داده شده و پخش بار انجام شده است.

که، الگوریتم ABC نسبت به الگوریتم CFA-PSO الگوریتمی سریع تر بوده و در تعداد تکرارهای کمتری همگرا می شود.

در انتها برای این که از بهینه بودن جواب های به دست آمده اطمینان حاصل شود، چهار حالت نصب TCSC در سامانه به صورت کاملاً تصادفی انتخاب شده و شاخص تراکم برای این چهار حالت به دست آمده است. جدول های (۱۱-۱۰) نتایج را نشان می دهد، مشاهده می شود که در هر چهار حالت مقدار شاخص شبکه از شاخص های بهینه بیشتر هستند. شاخص بهینه در حالت نصب TCSC برابر $921/73$ به دست آمده است. شاخص های تراکم در چهار حالت تصادفی برابر $1028/56$ ، $1002/27$ ، $1123/1$ و $1034/91$ هستند که از شاخص های بهینه بیشتر هستند.

مکان نصب انتخاب شده از دید فنی ممکن است از لحاظ دسترسی به خط یا مسائل دیگر قابل اجرا نباشد. در اینجا دسترسی به بار خطوط وجود دارد و به همین دلیل برای بحث فنی، روی بار خطوط مقایسه انجام شده است. پس از انجام مکان یابی ها و گرفتن جواب از الگوریتم باید بررسی شود آیا مکانی که برای قرارگیری TCSC در سامانه به دست آمده از لحاظ فنی هم مناسب است یا خیر. به این منظور باید بار خطی که دستگاه قرار است آن نصب شود با بار سایر خطوط مقایسه شود، تا مشاهده شود خطی که دستگاه در آن نصب می شود جزء خطوط پربار سامانه باشد. دلیل این کار این است که ادوات باید از لحاظ فنی در خطوط پربار قرار گیرند تا بتوانند به خوبی تراکم بار خطوط پربار در سامانه را کاهش دهند. برای انجام این مقایسه توان عبوری از خطوط بر حداکثر توان مجاز خط تقسیم می شود. این عمل بعد از مکان یابی دستگاه برای خط قرارگیری دستگاه انجام شده و به صورت نمودار باهم مقایسه شده اند. برای انجام مقایسه بار خطوط ۸، ۱۰، ۱۱، ۱۴، ۱۹ و ۲۴ در نظر گرفته شده و بار این خطوط قبل و بعد از نصب بهینه مقایسه شده است. نتیجه این مقایسه در شکل (۱۳) ارائه شده است. از شکل (۱۳) مشاهده می شود که خط ۱۱ جز خطوط پربار شبکه است و این خط از لحاظ فنی نیز برای نصب TCSC مناسب است.

همان طور که توضیح داده شد، ولتاژ شینه ها باید در محدوده مجاز یعنی $1/05$ تا $0/95$ پریونیت قرار گرفته باشند. ولتاژ برخی از شینه های شبکه بعد از نصب TCSC در شکل (۱۴) آمده است. همان طور که در شکل (۱۴) مشاهده می شود ولتاژ شینه های سامانه در محدوده مجاز قرار دارند.

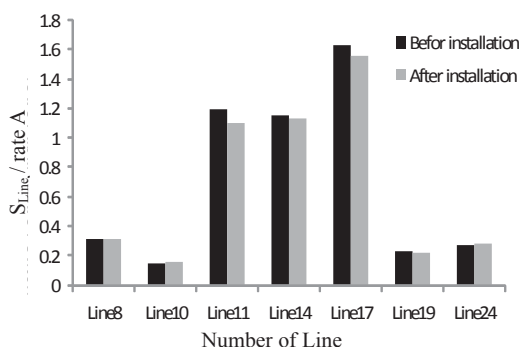
نتایج حاصل از این نحوه قرارگیری ادوات در سامانه آزمون در جدول (۹) آمده است.

با توجه به جدول های (۹ و ۳) مشاهده می شود که در اولویت اول یعنی خروج شینه ۱ از سامانه، خطوط ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۷ با تراکم روبرو شده اند، پس از قرار دادن ادوات در سامانه مشاهده می شود که بار عبوری از این خطوط در هر دو الگوریتم کاهش و مقدار شاخص PI در الگوریتم CFA-PSO و ABC به ترتیب $15/43$ و $110/95$ مگاولت آمپر کاهش یافته است.

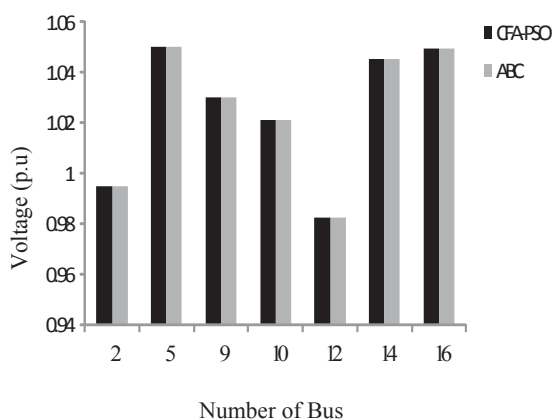
۴-۵- بحث بر روی نتایج

با توجه به سه سناریوی ارائه شده، این نتیجه به دست می آید که قرار دادن PST در سامانه ضعیف ترین نتیجه را در کنترل تراکم خطوط دارد و قرار دادن TCSC و قرار دادن همزمان ادوات نتایج مشابهی را در کنترل تراکم خطوط دارند. برای نصب و نگهداری سالیانه این ادوات هزینه هایی نیاز است، از لحاظ اقتصادی و از آنجایی که نتایج نصب TCSC و نصب همزمان، مشابه هم هستند، نصب TCSC به تنهایی در سامانه مقرون به صرفه تر بوده و نصب این دستگاه در سامانه آذربایجان برای کنترل تراکم خطوط پیشنهاد می شود. نتایج حاصل از این سه سناریو نشان می دهد که قرار دادن PST در سامانه آذربایجان نمی تواند شرایط سامانه را از لحاظ کنترل تراکم بهبود دهد. دلیل این امر را می توان در راکتانس خطوط جست و جو کرد. راکتانس خطوط سامانه آذربایجان در محدوده $(0/05390 - 0/053515)$ است در حالی که راکتانس خطوط سایر سامانه ها مانند سامانه ۱۴ شینه استاندارد IEEE در محدوده $(0/04211 - 0/05618)$ و سامانه ۳۰ شینه استاندارد IEEE در محدوده $(0/02 - 0/06)$ است، می توان گفت با توجه به کوچک بودن راکتانس خطوط در سامانه آذربایجان، این سامانه نسبت به تغییرات راکتانس واکنش، مشهودتری نشان داده و قرار دادن TCSC که می تواند راکتانس خطوط را تغییر دهد، تراکم خطوط را بهتر کنترل می کند. در ادامه بحث، نصب TCSC در سامانه در نظر گرفته شده و به بررسی نتایج حاصل از نصب این دستگاه در سامانه پرداخته می شود.

برای حصول اطمینان از جواب ها از دو الگوریتم استفاده شده است و هدف از انجام بهینه سازی توسط دو الگوریتم مقایسه بین این دو نبوده است، چراکه تمام شبیه سازی ها در حالت offline انجام شده و در این حالت مقایسه الگوریتم ها امکان پذیر نیست. تنها نکته ای که در مورد مقایسه این دو الگوریتم می توان گفت این است



شکل ۱۳- مقایسه بار برخی خطوط قبل و بعد از نصب TCSC در حالت خروج شینه ۱ از سامانه آذربایجان



شکل ۱۴- ولتاژ برخی شینه‌های سامانه آذربایجان بعد از نصب TCSC

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله سعی بر آن بود که در صورت هرگونه حمله تروریستی و مواجه شدن با بمب‌های گرافیتی در سامانه‌های انتقال برق و آسیب دیدن و خروج پست برقی از سامانه، بتوان تراکم ایجادشده در سامانه را تا حدودی مدیریت و از خروج یا به اصطلاح خاموشی سامانه جلوگیری کرد. برای این منظور سه حالت نصب ادوات در شبکه مورد بررسی قرار گرفت که نصب TCSC به‌تنهایی در سامانه، بهترین نتایج را در کنترل تراکم خطوط ایجاد کرد. در این مقاله با مکان‌یابی مناسب و تنظیم درست پارامترهای این دستگاه توسط دو الگوریتم CFA-PSO و ABC در حالتی که پرخطرترین پست از سامانه خارج‌شده، تراکم سامانه تا حدودی کاهش یافته است.

جدول ۱۰. چهار حالت تصادفی انتخابی برای مکان نصب TCSC

حالت	مکان نصب TCSC	X _{TCSC} (p.u)	شاخص PI (MVA)
حالت ۱	خط ۱۳	-۰/۷۴۵۶	۱۰۲۸/۵۶
حالت ۲	خط ۱۷	-۰/۲۱۳۵	۱۰۰۲/۲۷
حالت ۳	خط ۲۴	۰/۰۵۹۶	۱۱۲۳/۱
حالت ۴	خط ۲۶	-۰/۵۸۱۷	۱۰۳۴/۹۱

جدول ۱۱. توان عبوری خطوط پس از قرار دادن TCSC در سامانه آذربایجان برای چهار حالت تصادفی

حالت	خطوط دارای اضافه‌بار				شاخص PI (MVA)
	خط	توان عبوری (MV A)	rate A (MV A)	اضافه‌بار (MV A)	
حالت ۱	خط ۱۱	۴۶۸/۰۹	۳۹۷	۷۱/۰۹	۱۰۲۸/۵۶
	خط ۱۲	۴۶۸/۰۹	۳۹۷	۷۱/۰۹	
	خط ۱۳	۴۰۰/۳۷	۳۹۷	۳/۳۷	
	خط ۱۴	۴۴۸/۸۹	۳۹۷	۵۱/۸۹	
	خط ۱۷	۶۳۷/۶۳	۳۹۷	۲۴۰/۶۳	
حالت ۲	خط ۱۱	۴۶۲/۵۶	۳۹۷	۶۵/۵۶	۱۰۰۲/۲۷
	خط ۱۲	۴۶۲/۵۶	۳۹۷	۶۵/۵۶	
	خط ۱۳	۴۱۷/۳۲	۳۹۷	۲۰/۳۲	
	خط ۱۴	۴۵۲/۷۸	۳۹۷	۵۵/۷۸	
	خط ۱۷	۶۱۴/۱۷	۳۹۷	۲۱۷/۱۷	
حالت ۳	خط ۱۱	۴۸۰/۵۱	۳۹۷	۸۳/۵۱	۱۱۲۳/۱
	خط ۱۲	۴۸۰/۵۱	۳۹۷	۸۳/۵۱	
	خط ۱۳	۴۲۲/۸۶	۳۹۷	۲۵/۸۶	
	خط ۱۴	۴۵۲/۲۴	۳۹۷	۵۵/۲۴	
	خط ۱۷	۶۵۸/۷۶	۳۹۷	۲۶۱/۳۴	
حالت ۴	خط ۱۱	۴۶۷/۵۴	۳۹۷	۷۰/۵۴	۱۰۳۴/۹۱
	خط ۱۲	۴۶۷/۵۴	۳۹۷	۷۰/۵۴	
	خط ۱۳	۴۰۸/۱۹	۳۹۷	۱۱/۱۹	
	خط ۱۴	۴۴۹/۲۶	۳۹۷	۵۲/۲۶	
	خط ۱۷	۶۳۶/۹۸	۳۹۷	۲۳۹/۹۸	

- lel," IEEE T Applsupercon, vol. 18, pp. 680-683, 2008.
8. A. Samimi and P. Naderi, "A New Method for Optimal Placement of TCSC Based On Sensitivity Analysis for Congestion Management," Journal of Smart Grid and Renewable Energy, vol. 3, pp. 10-16, 2012.
 9. H. Besharat and S. A. Taher, "Congestion management by determining optimal location of TCSC in deregulated power systems," Int. J. Elec. Power, vol. 30, pp. 563- 568, 2008.
 10. A. Yousefi, T. T. Nguyen, H. Zareipoure, and O. P. Malik, "Congestion management using-demand response and FACTS Devices," J. Electr. Pow. Syst. Res., vol. 37, pp. 78-85, 2012.
 11. G. I. Rashed, H. I. Shaheen, X. Z. Duan, and S. J. Cheng, "Evolutionary Optimization Techniques for Optimal Location and Parameter Setting of TCSC under Single Line Contingency," J. Appl. Math. Comput., vol. 205, pp. 133-147, 2008.
 12. G. I. Rashed, H. I. Shaheen, and S. J. Cheng, "Evolutionary Optimization Techniques for Optimal Location and Parameter Setting of TCSC under Single Line Contingency," Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, pp. 1-9, 2008.
 13. G. I. Rashed and Y. Sun, "Optimal Placement of Thyristor Controlled Series Compensation for Enhancing Power Security Based on Computational Intelligence Techniques," Journal of Procedia Engineering, pp. 908-914, 2011.
 14. M. Gitizadeh and H. Khalilnezhad, "Phase Shifter Transformers Optimum Allocation in Power Systems Using a Combinational Method," in Proc., Int. IEEE Conf. on Power System Technology, pp. 886-890, 2010.
 15. P. D. Kamjorn, P. Kacrot, and P. Dcoutho, "A Screening Technique for Optimally Locating Phase Shifters in Power Systems," IEEE PES, Chicago, pp. 233-238, 1994.
 16. A. S. Siddiqui, R. Jain, M. Jamil, and C. P. Gupta, "Congestion Management in High Voltage Transmission Line Using Thyristor Controlled Series Capacitors (TCSC)," J. Electrical and Electronics Engineering Research, vol. 3, no. 8, pp. 151-161, 2011.
 17. N. Acharya and N. Mithulanathan, "Locating Series FACTS Devices for Congestion Management in Deregulated Electricity Market," J. Electr. Pow. Syst. Res., vol. 77, pp. 352-360, 2007.
- تراکم خطوط پرتراکم به مقدار زیادی کاهش نیافت، باین حال با توجه به شرایطی که در حملات تروریستی به شبکه تحمیل می شود، کاهش همین مقدار تراکم با نصب یک دستگاه TCSC هم از لحاظ بهبود عملکرد سامانه و مدیریت بحران و هم از لحاظ اقتصادی مناسب به نظر می رسد. مکان نصب TCSC هم با چند حالت تصادفی مقایسه شد و مکان نصب هم از لحاظ فنی بررسی شد، که در هر دو حالت مکان نصب در سامانه مناسب بود. با نصب TCSC اگرچه در تابع هدف معرفی شده، هدفی برای بهبود پروفایل ولتاژ و نزدیک کردن ولتاژ شینه ها به مقدار استاندارد یک پریونیت در نظر گرفته نشده است ولی با توجه به شرطی که برای ولتاژ شینه ها در بهره برداری سامانه اعمال شد، ولتاژ شینه ها در محدوده مجاز ۱/۰۵ تا ۰/۹۵ پریونیت قرار گرفته اند.
- ### ۶- مراجع
۱. ابراهیم نژاد، محمد، آشنایی با تسلیحات غیرکشنده، انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۸۶.
 ۲. برزگر، ابراهیم، مکان یابی بهینه هم زمان TCSC و PST به منظور بهبود عملکرد سیستم قدرت با استفاده از یک الگوریتم چندهدفه، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش قدرت، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده فنی و مهندسی، اردبیل، ایران.
 ۳. غفارپور، رضا، میرمطهری، رسول، ارائه طرحی برای کاهش خسارت ناشی از بمب های گرافیتی با در نظر گرفتن پایداری سیستم قدرت، فصلنامه پدافند غیرعامل، سال چهارم، شماره یک، صفحه ۷۱، بهار ۱۳۹۲.
 ۴. بدریان، رضا، مدیریت بحران در حوادث هسته ای، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، ۱۳۹۰.
 5. M. Bruch, V. Munch, and M. Aichinger, "Power Blackout Risks," Risk Management Options Emerging Risk Initiative- Position Paper, 2011.
 6. Y. Lin and A. Campbell, "Behavior Investigations of Superconducting Fault Current Limiters in Power Systems," IEEE T Applsupercon, vol. 16, pp. 662-665, 2006.
 7. Y. Shirai, K. Furushiba, Y. Shouno, M. Shiotsu, and T. Nitta, "Improvement of Power System Stability by Use of Superconducting Fault Current Limiter With ZnO Device and Resistor in Paral-

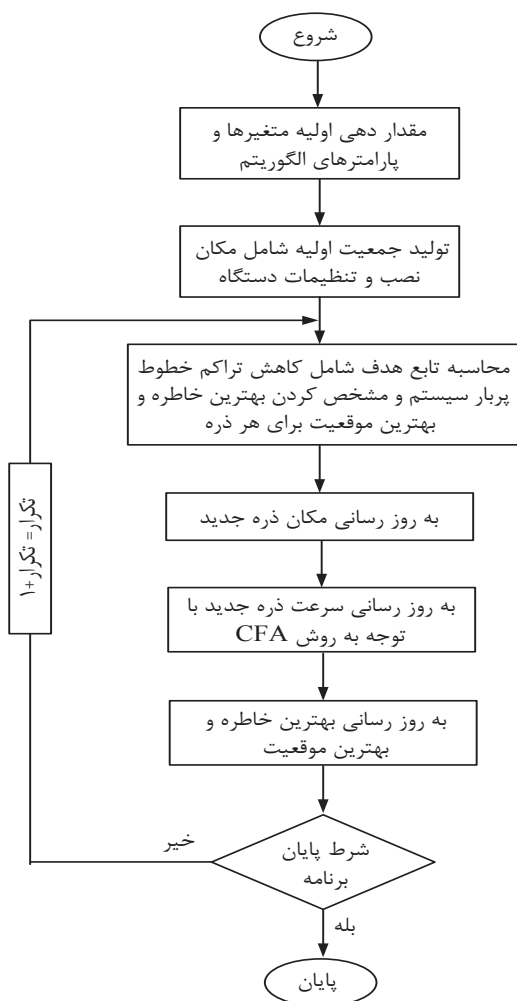
به دست آمده است.

$$P_{ij} = P_s = \frac{V_i^2}{|Z|} \cos \gamma - \frac{V_i V_j}{|Z|} \cos (\gamma + \delta_i - \delta_j)$$

$$Q_{ij} = Q_s = \frac{V_i^2}{|Z|} \sin \gamma - \frac{V_i V_j}{|Z|} \cos (\gamma + \delta_i - \delta_j)$$

ب) برای خروج شینه از سامانه باید تمامی خطوط و واحدهای تولیدی توان متصل به شینه از سامانه خارج شود. در Matpower برای خروج خط یا ژنراتوری از سامانه متغیری به نام status تعریف شده است، با صفر قرار دادن این متغیر در Matpower می توان آن خط یا ژنراتور مدنظر را از سامانه خارج کرد.

ج) فلوچارت پیشنهادی الگوریتم CFA-PSO

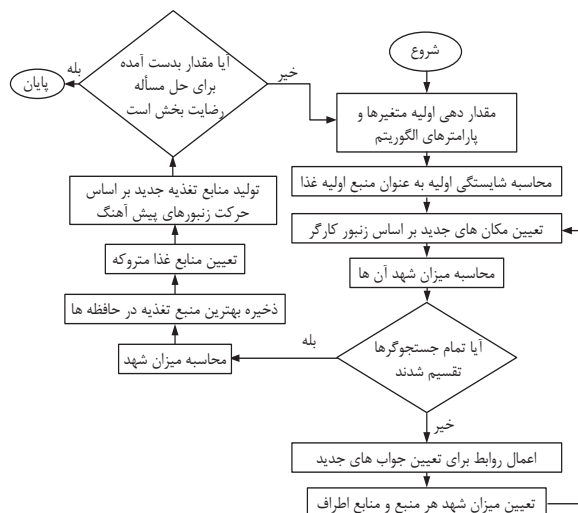


18. K. Shanmukha Sundar and H. M. Ravikumar, "Selection of TCSC Location for Secured Optimal Flow Under Normal and Network Contingencies."; Int J Elec Power, vol. 34, pp. 29-37, 2012.
19. K. Vijayakumar, "Optimal Location of FACTS Devices for Congestion Management in Deregulated Power Systems," Int. J. Comput. Appl. T., vol. 16, pp. 29-37, 2011.
20. R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sanchez, and R. J. Thomas, "Matpower: Steady-State Operations Planning and Analysis Tools for Power Systems Research and Education," IEEE T Power Syst., vol. 26, no. 1, pp. 12-19, 2011.
21. K. Kavitha and R. Neela, "PSO Based TCSC Placement for Security Enhancement," Int. J. Comput. Appl. T., vol. 56, no. 9, pp. 25-29, 2012.
22. D. P. Rini, S. M. Shamsuddin, and S. S. Yuhaziz, "Particle Swarm Optimization: Technique System and Challenges," Int. J. Comput. Appl. T., vol. 14, no. 1, pp. 19-27, 2011.
23. D. Karaboga and B. Basturk, "A Powerful and Efficient Algorithm for Numerical Function Optimization: Artificial Bee Colony(ABC) Algorithm," J. Global Optim., vol. 37, pp. 459-471, 2007.
24. H. Shayeghi, H. A. Shayanfar, E. Barzegar and M. Ghasemi, "Optimal Placement of Phase Shifter Transformer for Power Loss Reduction Using Artificial Bee Colony Algorithm," In Proc. of the International Conference on Artificial Intelligence pp. 881-887, 2012.
25. S. V. Jethani and V. P. Rajderkar, "Sensitivity Based Optimal Location of TCSC for Improvement of Power System Security," vol. 3, no. 4, pp. 121-124, 2014.
26. S. Dutta and P. K. Roy, "Optimal Location of TCSC Using Hybrid DE/BBO Algorithm," ICONCE, pp. 237-242, Jun 2014.
27. L. Vandai, L. Xinran, and L. Caoquyn, "A Novel Method for Seeking Optimal Placement of TCSC to Damp Oscillations i Power Systems," vol. 8, no. 4, pp. 333-346, 2015.

پیوست

الف) برای محاسبه توان عبوری خط متصل به شینه‌های نو، ابتدا توان‌های اکتیو و راکتیو عبوری از خط توسط روابط P و Q محاسبه شده و سپس توان عبوری خط از رابطه S=P+jQ

د) فلوچارت پیشنهادی الگوریتم ABC



ه) برای قرار دادن TCSC و PST در پخش بار Matpower، ابتدا چهار ورودی یکی برای مکان نصب و دیگری تنظیم پارامتر TCSC و ورودی سوم برای مکان نصب PST و ورودی چهارم برای تنظیم زاویه این دستگاه است و سپس پخش بار را با داشتن این چهار ورودی انجام می‌دهیم.

```
% num_branch_1=input('num_branch_1=')
% X_tcsc=input('X_tcsc=')
% num_branch_2=input('num_branch_2=')
% Ang_pst=input('Ang_pst=')
% [results, success]=runpf(case14
(num_branch_1,X_tcsc, num_branch_2,Ang_pst));
```

Increasing the Resistance of the Azarbaijan Electric Network Against Graphite Bomb

R. Ghaffarpour¹

E. Barzegar²

Abstract

Graphite bombs are one of the major threats of the electricity network. These bombs are able to create short circuits on the network. Maybe the most troublesome of these threats is bus elimination from the system. To simulate this problem first of all, electric stations were excluded from the system in Azerbaijan network one by one to identify the station that's absence led to maximum line density in the system. Secondly congestion management is implemented by Thyristor Controlled Series Compensation (TCSC) and Phase-Shifting Transformer (PST) that are types of FACTS devices. Due to locate the devices, used ABC and CFA-PSO algorithms. Simulation results shows the effectiveness of presented method.

Key Words: *Graphite Bomb, Congestion Management, Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC), Phase Shifting Transformers (PST), CFA-PSO Algorithm, ABC Algorithm.*

1-Instructor and Academic Member of Imam Hussein Comprehensive University (rghaffarpour@ihu.ac.ir) - Writer-in-Charge
2- M. S Candidate of University of Mohaghegh Ardabili