

## جایابی بهینه TCSC برای کاهش حساسیت در شین های انتقال

### با استفاده از روش های هوشمند

رضا غفارپور<sup>۱</sup>، ابراهیم برزگر<sup>۲</sup>، مهدی احسان<sup>۳\*</sup>

۱- مربی و عضو هیات علمی دانشگاه جامع امام حسین(ع) ۲- کارشناسی ارشد مهندسی برق دانشگاه محقق اردبیلی

۳- استاد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شریف

(دریافت: ۹۳/۰۴/۰۹، پذیرش: ۹۳/۱۰/۱۲)

#### چکیده

شبکه برق در برابر تروریست های آموزش دیده بسیار آسیب پذیر است. هنگام مواجه شدن با حملات تروریستی و آسیب دیدن سامانه قدرت، ممکن است شبکه با ناپایداری مواجه شده و به سوی فروپاشی حرکت کند. یکی از مهم ترین این حملات، حمله به پست های برق موجود در سامانه قدرت است. هدف این مقاله کاهش تراکم موجود در خطوط سامانه هنگام خروج پست از سامانه است. به همین منظور برای شبیه سازی چنین حملاتی ابتدا پست های برق موجود را یک به یک از سامانه خارج کرده تا پست برقی که با خروج آن بیشترین تراکم برای سامانه تولید می شود، شناسایی شود. با مشخص شدن این پست با استفاده از جبران ساز سری کنترل شونده توسط تایریستور (TCSC)، که نوعی از ادوات FACTS است به مدیریت تراکم در سامانه پرداخته می شود. برای مکان یابی TCSC از دو الگوریتم CFA-PSO و ABC استفاده شده است و برای ارزیابی قابلیت روش پیشنهادی، این روش روی سامانه ۱۴ شینه استاندارد IEEE اعمال و نتایج به دست آمده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که تراکم خطوط با خروج هر یک از پست های شبکه از جمله پست هایی که ژنراتور به آنها متصل است، کاهش می یابد.

**کلید واژه ها:** مدیریت تراکم، ادوات FACTS، جبران ساز سری کنترل شونده توسط تایریستور (TCSC)، الگوریتم CFA-PSO، الگوریتم ABC.

## Optimal Placement of TCSC for Sensitivity Reduction using Heuristic Methods

R. Ghaffarpour<sup>\*</sup>, E. Barzegar, M. Ehsan

Sharif University of Technology

(Received: 30/06/2014; Accepted: 02/01/2015)

#### Abstract

Power grid is mostly vulnerable to trained terrorists. The grid might go into instability or even blackout when exposed to terrorism attacks. One of the most significant attacks is impinging upon substations in the power grid. The purpose of this paper is to reduce congestion of grid lines when a substation is eliminated from the system. To simulate such attacks, the substations in the system are removed one by one to determine the substation whose elimination would cause the highest grid congestion. The next step is congestion management by TCSC which is one of the FACTS elements. CFA-PSO and ABC algorithms are used to locate the TCSC in optimal place. To evaluate the capability of the proposed method, it is applied to IEEE 14 bus standard system and the results are analyzed. Simulation results show that congestion decreases when substation is eliminated.

**Keywords:** Congestion Management, FACTS Devices, Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC), CFA-PSO Algorithm, ABC Algorithm.

\* Corresponding Author E-mail: rghaffarpour@ihu.ac.ir

## ۱. مقدمه

(حالتی که تمام پارامترهای شبکه در محدوده مجاز باشند) ممکن است به دلایل مختلف مثل فرسودگی، رعد و برق و ... یکی از خطوط از شبکه خارج شود. شبکه‌ای که با این تغییر از حالت نرمال خارج شود، نمی‌تواند شبکه مطمئنی باشد. از این رو شرکت قابلیت اطمینان شبکه برق آمریکای شمالی<sup>۲</sup> استانداردی را با نام N-1 ارائه داده است که مفهوم آن این است که شبکه برق باید طوری طراحی شود که بتواند خروج یک خط انتقال را بدون مشکل تحمل نماید [۱].

(۲) حملات تروریستی آگاهانه: در این حملات هدف اصلی دشمن نیروگاه‌ها و پست‌های برق شبکه‌های انتقال است. با خروج نیروگاهی از شبکه، نیروگاه رزرو وارد مدار می‌شود و محدودیت‌ها و خطاهای شبکه قابل کنترل است. در برابر نیروگاه‌ها، پست‌های برق با آسیب‌پذیری جدی‌تری روبه‌رو هستند. زیرا به پست‌ها چند خط انتقال متصل می‌شود 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 نمی‌تواند این خروج‌ها را تحمل کند و دچار مشکل خواهد شد. از جمله روش‌های حفظ پست‌ها در برابر حملات تروریستی می‌توان 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 را با استفاده از ادوات FACTS<sup>۳</sup> 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.

در این مقاله، یکی از مناسب‌ترین ادوات FACTS سری از لحاظ اقتصادی، یعنی جبران‌ساز سری کنترل شونده با تایریستور (TCSC)<sup>۴</sup> استفاده شده است. بر طبق تعریفی که استاندارد IEEE از این دستگاه ارائه داده است، این وسیله یک جبران‌ساز راکتانسی خازنی است که شامل یک خازن سری است و به منظور این که تغییرات آرام راکتانس سری خازنی را فراهم آورد، به صورت موازی به یک TCR<sup>۵</sup> متصل شده است [۵].

## ۲-۱. پیشینه تحقیق

در طول چند سال گذشته، فعالیت‌های تحقیقاتی زیادی در زمینه مکان‌یابی ادوات FACTS به ویژه TCSC 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 [۶] به مکان‌یابی TCSC بر حسب فاکتور

از جنگ جهانی دوم تا کنون، شبکه‌های برق یک هدف استراتژیک برای حملات نظامی به شمار می‌روند. به طور کلی در حمله به شبکه برق، چهار هدف اصلی دنبال می‌شود 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 ضربه‌زدن به بدنه اقتصادی کشور. در سال‌های اخیر، شبکه‌های برق به عنوان یک هدف بالقوه برای حملات سایبری نیز به شمار می‌روند. 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 زیرساخت‌های 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 [۱].

مشکلات ایجاد شده برای سامانه قدرت هنگام مواجه شدن با حملات تروریستی عبارتند از:

(۱) افزایش جریان خطا و تراکم خطوط و آسیب دیدن ادوات و تجهیزات نصب شده در شبکه. با تکرار وقوع خطا، میزان آسیب‌ها چند برابر شده و می‌تواند در نهایت منجر به خاموشی سراسری<sup>۱</sup> شود که نتیجه آن صرف هزینه و زمان بسیار زیاد برای راه‌اندازی دوباره آن خواهد بود [۲].

(۲) با وقوع خطا، کیفیت توان شبکه افت می‌کند و به تجهیزات حساس الکترونیکی و نظامی متصل به شبکه آسیب وارد می‌شود. در واقع با وقوع خطا در شبکه، میزان ولتاژ و فاز آن در دیگر نقاط شبکه (حتی نقاطی که دچار صدمه نشده‌اند) دچار نوسان می‌شوند. میزان این نوسانات به شرایط خطا مانند میزان جریان و زاویه خطا بستگی دارد [۳].

بین سال‌های ۱۹۸۷ تا ۱۹۹۶ میلادی بنا به گزارش‌ها بیش از ۲۰۰۰۰ حمله فیزیکی ثبت شده به شبکه‌های برق مانند خطوط انتقال، پست‌ها و ترانسفورماتورها انجام شده است که نتیجه آن اختلالاتی در سرویس‌های برق‌رسانی است [۴]. حملات تروریستی به سامانه قدرت می‌تواند به دو صورت انجام شود:

(۱) حملات تروریستی غیر آگاهانه: در این حملات هدف اصلی دشمن خطوط انتقال شبکه قدرت است. این نوع از حملات برای شبکه‌های برق زبان‌بار نیستند. زیرا در دنیا شبکه‌های برق به گونه‌ای طراحی می‌شوند که بتوانند خطای حاصل از خروج یک خط انتقال را بدون اینکه از حالت نرمال خارج شوند تحمل نمایند. در حالت نرمال

<sup>۱</sup> Blackout

<sup>۲</sup> NERC (North American Electric Reliability Corporation)

<sup>۳</sup> Flexible AC Transmission System

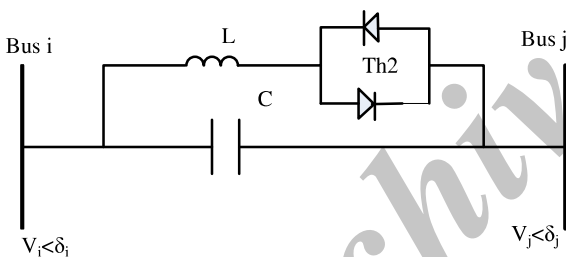
<sup>۴</sup> Thyristor Controlled Series Capacitor

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 قابل ملاحظه کمتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها است و الگوریتم PSO یک الگوریتم بسیار شناخته شده و معتبر 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.

## ۲. 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 کنترل شده 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 امان راکتیو با تغییرات پیوسته فراهم آورد.

شکل (۱) مدل تک فاز یک TCSC را نشان می‌دهد که بین شینه‌های  $i$  و  $j$  قرار گرفته است [۶].



شکل ۱. مدل تک فاز یک TCSC [۶]

در شکل (۲) پارامترهای معادل  $\pi$  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  $j$  را می‌توان به صورت روابط (۱) و (۲) بیان کرد [۱۳].

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

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

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 کرد.

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

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

حساسیت به منظور مدیریت تراکم سامانه پرداخته‌اند. در آن مقاله برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار DIGSILENT و DPL<sup>۱</sup> استفاده شده است. الگوریتم استفاده شده در این مقاله نیز الگوریتم GA<sup>۲</sup> می‌باشد.

بشارتی و همکاران [۷] به مکان‌یابی TCSC در سامانه قدرت تجدید ساختار یافته 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.

آچارپا و همکاران [۸] به مکان‌یابی TCSC برای مدیریت تراکم شبکه برق تجدید ساختار یافته پرداخته‌اند. در آن مقاله برای مکان‌یابی مقدار جبران‌سازی TCSC به مقدار ۷۰٪ راکتانس خط در نظر گرفته شده است.

یوسفی و همکاران [۹] به مکان‌یابی TCSC و SVC<sup>۳</sup> 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 حرارتی خطوط و حدود ولتاژ مدل شده‌اند. در آن مقاله نرم‌افزار استفاده شده برای بهینه‌سازی CPLEX تحت نرم‌افزار GAMS<sup>۴</sup> است.

در کارهای مشابهی که آقای راشد و همکاران [۱۰-۱۲] 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.

در این مقاله با خروج یک به یک شینه‌ها از سامانه آزمون ۱۴ شینه، ابتدا 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. سپس به مکان‌یابی یک دستگاه TCSC در سامانه پرداخته شده است، زمانی که پرخطرترین شینه شناسایی شده از سامانه خارج است برای انجام مکان‌یابی از الگوریتم‌های ABC<sup>۵</sup> و CFA-PSO<sup>۶</sup> استفاده می‌شود. به منظور انجام پخش‌بار از بسته نرم‌افزار Matpower4.0 استفاده شده که به راحتی در نرم‌افزار Matlab قابل اجراست.

<sup>1</sup> DIGSILENT Programming Language

<sup>2</sup> Genetic Algorithm

<sup>3</sup> Static VAR Compensator

<sup>4</sup> General Algebraic Modeling System

<sup>5</sup> Constriction Factor Approach Particle Swarm Optimization

<sup>6</sup> Artificial Bee Colony

مطابق روابط (۱۴-۱۱) به دست آورد.

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

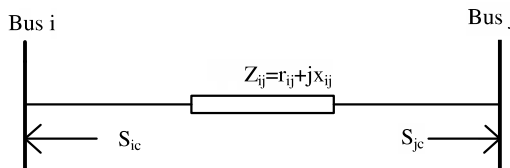
$$P_{jc} = V_j^2 \Delta G_{ij} - V_i V_j (\Delta G_{ij} \cos \delta_{ij} - \Delta B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (12)$$

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

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

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

$$\Delta B_{ij} = \frac{-x_c (r_{ij}^2 + x_c x_{ij})}{(r_{ij}^2 + x_{ij}^2)(r_{ij}^2 + (x_j - x_c)^2)} \quad \text{است [۱۵].}$$



شکل ۴. مدل توان تزریقی خط پس از نصب TCSC [۸]

### ۳. تعریف مسئله

#### ۳-۱. روش پیشنهادی

همان‌گونه که گفته شد، اساس کار این مقاله مطابق روشی است که در مراجع [۱۰-۱۲] آمده است، با این تفاوت که در این مقاله به جای خروج خط از سامانه شینه‌ها (پست‌های برق) یک به یک 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 TCSC مشخص شده است.

#### 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 می‌باشد. در این مقاله هدف مد نظر، مدیریت تراکم خطوط پربار سامانه هنگام خارج شدن پرخطرترین پست از سامانه است. به این منظور شاخص PI برای بررسی بار خطوط مطابق رابطه (۱۵) تعریف شده است. هدف بهینه‌سازی‌ها کاهش هر چه بیشتر این شاخص است. با کاهش هر چه بیشتر این شاخص تراکم خطوط کمتر شده و احتمال خروج سامانه و روبه‌رو شدن با خاموشی سراسری کاهش می‌یابد [۱۰-۱۲].

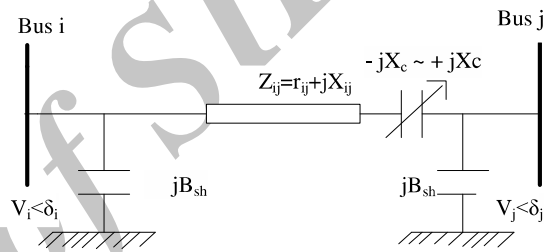
$$\text{Bus } i \quad \text{Bus } j$$

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$$

$$V_i < \delta_i \quad jB_{sh} \quad jB_{sh} \quad V_j < \delta_j$$

شکل ۲. مدل  $\pi$  خط انتقال [۱۳]

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 [۸، ۱۳] و [۱۴]. توان اکتیو و راکتیو عبوری از شینه  $i$  به شینه  $j$  از شینه  $j$  به شینه  $i$  در حضور TCSC را می‌توان به صورت روابط (۸-۵) نوشت [۸ و ۱۳].



شکل ۳. مدل  $\pi$  خط انتقال پس از نصب یک TCSC [۱۳]

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

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

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

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

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

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

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

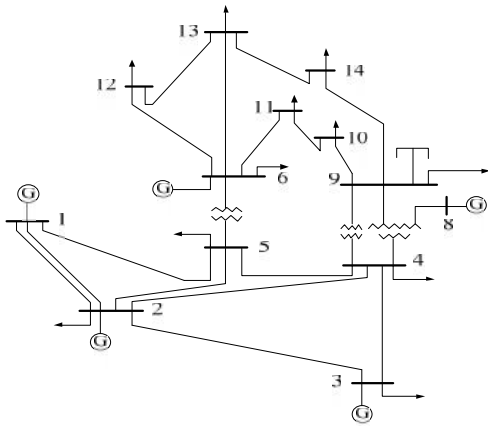
که در روابط فوق،  $B_{ij}' = \frac{-(x_{ij} - x_c)}{r_{ij}^2 + (x_{ij} - x_c)^2}$  و

$G_{ij}' = \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + (x_{ij} - x_c)^2}$  است [۱۴ و ۱۵]. تغییر در توان جاری

خط پس از نصب جبران‌کننده سری (TCSC) را می‌توان مطابق شکل (۴) به صورت توان تزریقی به شینه‌ها مدل کرد [۸ و ۱۵].

همچنین، توان اکتیو و راکتیو تزریقی به شینه‌های  $i$  و  $j$  را می‌توان

نرم‌افزار Matpower4.0 که به راحتی در متلب قابل اجراست استفاده شده است [۱۶]. روش ارائه شده بر روی سامانه ۱۴ شینه استاندارد IEEE موجود در Matpower4.0 پیاده‌سازی شده است. این سامانه آزمون دارای ۱۴ شینه و ۲۰ خط انتقال و ۵ واحد تولید متصل به شینه‌های ۱، ۲، ۳، ۶، ۸ می‌باشد. دیاگرام تک‌خطی این سامانه در شکل (۵) نشان داده شده است، سایر اطلاعات این سامانه و حداکثر توان عبوری خطوط به طور کامل در مرجع [۱۷] در دسترس است.



شکل ۵. سیستم ۱۴ شینه استاندارد IEEE [۱۷]

#### ۲-۴. 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 هر یک از اعضا بر عضو دیگر به وجود آمد. اعضاء در این ازدحام ذرات نامیده می‌شوند. پس از ایجاد ازدحام، مقدار تابع هدف برای هر عضو محاسبه می‌شود و با مقادیر حاصل از اعضای دیگر مقایسه شده و بهترین جواب  $P_{best}$  به دست می‌آید. در هر تکرار  $G_{best}$  بهترین مقداری است که توسط گروهی از ذرات به دست آمده و  $G_{best}$  حاصل از همان تکرار با  $G_{best}$  حاصل از تکرار قبل مقایسه و در صورت کمتر بودن به عنوان بهترین جواب ذخیره می‌شود. برای به‌روزرسانی ذرات از رابطه (۱۶) استفاده می‌شود. متغیر سرعت استفاده شده در این رابطه از رابطه (۱۷) و متغیر اینرسی ( $W$ ) به کار رفته در رابطه (۱۷) بر مبنای رویه CFA<sup>۳</sup> از رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود.

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \quad (16)$$

$$V_{id}^{k+1} = W.V_{id}^k + c_1 r_1 (P_{best,id}^k - X_{id}^k) + c_2 r_2 (G_{best,id}^k - X_{id}^k) \quad (17)$$

$$W = W_{max} - \frac{W_{max} - W_{min}}{iter_{max}} \times iter \quad (18)$$

$$PI = \sum_{n=1}^{ntl} \left( \frac{S_L}{S_{L,max}} \right) \quad (15)$$

در رابطه بالا،  $S_L$  توان عبوری از خط  $L$ ،  $S_{L,max}$  حداکثر توان عبوری از خط  $L$  بر حسب MVA است که در Matpower با عنوان rate هر خط معرفی شده است و  $ntl$  تعداد خطوط سامانه آزمون است.

#### ۳-۳. قیود بهره‌برداری

در هنگام بهره‌برداری از سامانه قدرت همواره با محدودیت‌هایی روبه‌رو می‌شویم که به قیود شبکه معروف هستند و در صورت رعایت نشدن این قیود، پاسخ به دست آمده از بهینه‌سازی قابل اعمال به شبکه نخواهد بود [۸]. 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 کمبود توان را جبران کرد. در صورتی که توان تولیدی ژنراتورها از این مقدار بالاتر باشد به عنوان خطا تشخیص داده می‌شود. محدوده مجاز برای ولتاژ شینه‌ها را بین ۱/۰۵ تا ۰/۹۵ پریونیت 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 شینه‌ها که متصل به ژنراتور هستند در حالت عادی خارج از این محدوده استاندارد هستند، به همین دلیل برای این شینه‌ها چنین خطایی در نظر گرفته نشده است. برای انجام پخش‌بار در الگوریتم از پخش‌بار  $runpf$  موجود در Matpower استفاده شده، که یک پخش‌بار AC است و به طور پیش فرض از روش نیوتن-رافسون برای اجرای پخش‌بار استفاده می‌کند. قیدی که باید در پخش‌بار رعایت شود، همگرا شدن پخش‌بار است. برای رعایت این قید در برنامه  $runpf$  ثابتی به نام  $success$  تعریف شده است، هنگامی که این ثابت مخالف با یک باشد یعنی پخش‌بار همگرا نشده است. در صورت مواجه شدن با این موضوع الگوریتم خطایی را تشخیص می‌دهد. در برنامه شبیه‌سازی با مواجه شدن با چنین خطاهایی 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 تست

برای شبیه‌سازی از دو الگوریتم CFA-PSO و ABC استفاده شده که در نرم‌افزار متلب اجرا می‌شود و برای اجرای پخش‌بار سامانه از

<sup>۲</sup> Particle Swarm Optimization

<sup>۳</sup> Constriction Factor Approach

<sup>۱</sup> Number of Tie Lines

### 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، برنامه‌نویسی پویا و استراتژی‌های تکاملی برای حل مسائل بهینه‌سازی غیرخطی می‌تواند استفاده شود. مطالعه برخی از سامانه‌های طبیعی مانند کلونی حشرات اجتماعی نشان می‌دهد که یک سری ارگانسیم‌های ساده خارجی قابلیت تولید سامانه‌هایی را دارند که به کمک برهم‌کنش‌های پویا قابلیت انجام اعمال بسیار پیچیده را دارند. گروه زنبورها به خاطر استقلال داخل کلونی، عملکرد توزیع شده و سامانه درون سازمانی، یکی از بهترین کلونی‌ها برای حل جامع مسائل پیچیده با عدم قطعیت است. جمعیت زنبورهای عسل در الگوریتم ABC شامل سه نوع زنبورهای کارگر، زنبورهای ناظر و زنبورهای دیده‌بان است. پروسه جستجوی غذای یک کلونی به وسیله زنبورهای دیده‌بان آغاز می‌شود که برای جستجوی گلزارهای با شهد زیاد فرستاده می‌شوند. این زنبورها به صورت تصادفی از گلزاری به گلزار دیگر می‌روند.

با توجه به مقدمه بیان شده، گام‌های اصلی الگوریتم که این رفتارها را شبیه‌سازی می‌کند، عبارتند از:

در اولین گام از الگوریتم، جواب‌های  $X_i (i=1,2,\dots,SN)$  به طور تصادفی در محدوده پارامترها تولید می‌شوند (SN تعداد منابع غذایی است). در دومین گام از الگوریتم، برای هر زنبور کارگر، که تعدادشان برابر با نیمی از تعداد منابع غذایی است، منبع جدیدی توسط رابطه (۱۹) تولید می‌شود.

$$V_{ij} = X_{ij} + \phi_{ij}(X_{ij} - X_{kj}) \quad (19)$$

که در رابطه بالا،  $\phi_{ij}$  یک عدد تصادفی حقیقی به طور یکنواخت توزیع شده در محدوده  $[-1, +1]$  است،  $k$  شاخص جواب به صورت تصادفی انتخاب شده از جمعیت بوده  $(k = \text{int}(\text{rand} * SN) + 1)$  و  $D, j=1, \dots, D$  که در آن  $D$  بعد مسئله است. پس از تولید  $V_i$ ، این جواب جدید با جواب  $X_i$  مقایسه شده و زنبور کارگر منبع بهتر را به کار می‌گیرد. در سومین گام از الگوریتم، یک زنبور ناظر منبع غذایی را با احتمال معرفی شده در رابطه (۲۰) انتخاب می‌کند و منبع جدیدی در مکان منبع غذایی انتخاب شده با استفاده از رابطه (۱۹) تولید می‌کند. مشابه عمل زنبور کارگر در اینجا نیز منبع بهتر برای بهره‌برداری انتخاب می‌شود.

$$P_i = \frac{fit_i}{\sum_{i=1}^{sn} fit_i} \quad (20)$$

که در رابطه بالا،  $fit_i$  برازندگی جواب  $X_i$  است. در حقیقت برای به دست آوردن برازندگی جواب‌ها از رابطه (۲۱) استفاده می‌شود. پس از اینکه همه ناظرها در منابع توزیع شدند، منابع آزمون می‌شوند که آیا آن‌ها را شونند یا خیر. اگر تعداد دفعاتی که یک منبع نمی‌تواند بهبود

در روابط بالا،  $V_{id}^{k+1}$  و  $V_{id}^k$  به ترتیب سرعت عضو  $id$  در تکرار  $k$  و  $k+1$  است،  $X_{id}^{k+1}$  و  $X_{id}^k$  به ترتیب موقعیت عضو  $id$  در تکرار  $k$  و  $k+1$  است،  $P_{best,id}$  بهترین مکان عضو  $id$  است،  $G_{best,id}$  بهترین موقعیت در بین اعضا،  $r_1$  و  $r_2$  اعداد تصادفی انتخاب شده در محدوده  $[0, 1]$ ،  $c_1$  و  $c_2$  ثابت‌هایی مثبت به نام ثابت شتاب،  $W$  ثابت وزنی اینرسی،  $W_{min}$  و  $W_{max}$  به ترتیب مقدار اولیه و نهایی ثابت وزنی اینرسی،  $iter_{max}$  و  $iter$  به ترتیب مقادیر حداکثر تعداد تکرار و تعداد تکرار فعلی،  $d$  تعداد متغیرها و  $i$  تعداد اعضا می‌باشند [۱۸ و ۱۹].

برای کدینگ مسئله 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. متغیر دوم تنظیم مقدار جبران‌سازی دستگاه است که مقداری پیوسته بین  $+0/2$  تا  $-0/8$  می‌باشد.

روش اعمال شده برای بهینه‌سازی در این مقاله را می‌توان در شش گام زیر خلاصه کرد:

گام اول: پارامترهای اولیه الگوریتم (تعداد متغیرها، تعداد جمعیت اولیه، حداکثر تعداد تکرار و ثوابت) مقداردهی اولیه می‌شوند.

گام دوم: یک جمعیت اولیه به صورت تصادفی بر اساس تعداد متغیرها بر مبنای کدینگ مسئله ایجاد می‌شود.

گام سوم: با توجه به تابع هدف ارائه شده با رابطه (۱۵) بهینه‌سازی انجام شده و بهترین جواب حاصل از هر ذره ( $P_{best}$ ) با بهترین جواب حاصل از ذرات دیگر مقایسه و بهترین جواب ( $G_{best}$ ) انتخاب می‌شود.

گام چهارم:  $G_{best}$  حاصل از هر تکرار با  $G_{best}$  تکرار قبل مقایسه و در صورت کمتر بودن جایگزین بهترین جواب می‌شود.

گام پنجم: جمعیت جدید با تغییر سرعت و موقعیت ذرات به وجود می‌آید.

گام ششم: محاسبات تا رسیدن به حداکثر تعداد تکرار مورد نظر ادامه پیدا می‌کند.

پارامترهای به کار رفته در الگوریتم CFA-PSO به منظور بهینه‌سازی 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	ثابت‌های $C_1$ و $C_2$
۰/۴	ثابت $W_{min}$
۰/۹	ثابت $W_{max}$
۱۰۰	تعداد تکرارها

یک واحد تولیدی با بیشترین ظرفیت تولید توان در سامانه است، به همین دلیل قبل از انجام پخش بار در Matpower پیش‌بینی می‌شود که خروج این شینه از سامانه بیشترین ریسک و تراکم را ایجاد کند.

در گام آخر از شبیه‌سازی‌ها، با توجه به خروج شینه ۲ از سامانه، به مکان‌یابی یک دستگاه TCSC در سامانه پرداخته شده است تا بتوان تراکم را در خطوط کنترل و شاخص PI را تا حدودی کاهش داد. نتایج مکان‌یابی در دو الگوریتم CFA-PSO و ABC در جدول (۴) و نمودار همگرایی این دو الگوریتم در شکل (۶) آمده است.

جدول ۳. دو اولویت اول هنگام خروج شینه از سامانه ۱۴ شینه آزمون

اولویت	شاخص PI (MVA)	خطوط دارای اضافه بار				شینه خارج شده
		افزایش بار (MVA)	Rate A (MVA)	نرخ عبوری (MVA)	خط	
۱	۱۵۲۵/۳۲	۱۴۸/۲۴	۱۵۰	۲۹۸/۲۴	خط ۲	۲
		۱۱۰/۵۳	۵۰	۱۶۰/۵۳	خط ۶	
		۱۹۲/۳۵	۵۰	۲۴۲/۳۵	خط ۷	
		۲۲/۴۰	۵۰	۷۲/۴۰	خط ۱۰	
۲	۱۲۳۳/۶	۱۰۳/۴۶	۱۵۰	۲۵۳/۴۶	خط ۱	۵
		۸۴/۸۱	۵۰	۱۳۴/۸۱	خط ۴	
		۱۱/۸۹	۵۰	۶۱/۸۹	خط ۸	
		۷/۶۵	۵۰	۵۷/۶۵	خط ۱۵	

جدول ۴. مکان نصب و تنظیمات TCSC حاصل از مکان‌یابی الگوریتم‌ها

الگوریتم	مکان نصب TCSC	XTCS (p.u)	شاخص PI (MVA)
CFA-PSO	خط ۲	-۰/۴۶۵۶	۱۴۳۱/۵
ABC	خط ۲	-۰/۵۴۶۴	۱۴۳۴/۸

پس از انجام مکان‌یابی‌ها برای اولویت اول توسط دو الگوریتم معرفی شده، دستگاه با تنظیمات به دست آمده در سامانه قرار می‌گیرد و سپس پخش بار انجام می‌شود. این نتایج در جدول (۵) آمده است.

با توجه به جدول‌های (۳ و ۵) مشاهده می‌شود که در اولویت اول یعنی خروج شینه ۲ از سامانه، خطوط ۲، ۶، ۷ و ۱۰ با تراکم روبه‌رو شده‌اند. پس از قرار دادن TCSC در سامانه مشاهده می‌شود که بار عبوری از این خطوط در هر دو الگوریتم، کاهش و مقدار شاخص PI در الگوریتم CFA-PSO و ABC به ترتیب ۹۳/۸۲ و ۹۰/۵۲ مگاوات امپر کاهش یافته است. با توجه به دیاگرام سامانه که در شکل (۵) آمده است مشاهده می‌شود که خطوط ۲، ۵، ۷ و ۱۰ به شینه ۵

یابد، بیشتر از یک حد از قبل تعیین شده باشد (Limit)، تصمیم بر این می‌شود که منبع تخلیه شود. زنبور کارگر در رابطه با منبع تخلیه شده به عنوان یک دیده‌بان عمل می‌کند و یک جستجوی تصادفی را در محدوده مسئله به وسیله رابطه (۲۲) انجام می‌دهد.

$$fit_i = \begin{cases} \frac{1}{1 + f_i} & , f_i \geq 0 \\ \frac{1}{1 + abs(f_i)} & , f_i < 0 \end{cases} \quad (21)$$

$$X_{ij} = X_j^{min} + (X_j^{max} - X_j^{min}) * rand \quad (22)$$

ذخیره کردن بهترین جواب (منبع تغذیه با کیفیت) که تا این مرحله به دست آمده و افزایش تکرار (cycle=cycle+1)، تکرار تمام مراحل قبلی تا رسیدن به شرط پایان برنامه است [۲۰ و ۲۱].

در این قسمت نیز برای کدینگ مسئله هر عضو جمعیت شامل دو متغیر در نظر گرفته می‌شود. متغیر اول بیانگر محل نصب دستگاه بوده که مقداری گسسته بین یک تا تعداد خطوط شبکه دارد و متغیر دوم تنظیم مقدار جبران‌سازی دستگاه است که مقداری پیوسته بین ۰/۸ تا ۰/۸ می‌باشد.

پارامترهای به کار رفته 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. نتایج شبیه‌سازی

همان‌گونه که گفته شد، هدف در این مقاله مدیریت تراکم خطوط هنگام خروج شینه‌های 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 اولویت‌بندی بر اساس تعداد خطوط دارای اضافه بار و مقدار شاخص PI معرفی شده در رابطه (۱۵) 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 هستند که با حذف شینه در سامانه باقی می‌ماند و تنها مربوط به خطوط دارای اضافه بار نیست. پس از تشکیل جدول اولویت‌بندی، مشخص می‌شود که خروج شینه ۲ از سامانه بیشترین ریسک و خطر را به سامانه تحمیل می‌کند. اگر به توپولوژی سامانه تست نیز توجه شود، مشخص است که شینه ۲ دارای

از این رو امکان صحت‌سنجی روش ارائه شده در این مقاله با سایر مقالات وجود ندارد. به همین دلیل و برای حصول اطمینان از جواب‌هایی از دو الگوریتم استفاده شده است و هدف از انجام بهینه‌سازی توسط دو الگوریتم مقایسه بین این دو نبوده است، چرا که تمام شبیه‌سازی‌ها در حالت offline انجام شده و در این حالت مقایسه الگوریتم‌ها امکان‌پذیر نیست. تنها نکته‌ای که در مورد مقایسه این دو الگوریتم می‌توان گفت این است که، الگوریتم ABC نسبت به الگوریتم-CFA PSO الگوریتمی سریع‌تر بوده و در تعداد تکرارهای کمتری همگرا می‌شود.

در انتها برای اینکه از بهینه بودن جواب‌های 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. جدول‌های (۶ و ۷) نتایج را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در هر چهار حالت مقدار شاخص شبکه از شاخص‌های بهینه بیشتر هستند. شاخص تراکم در حالت‌های بهینه برابر ۱۴۳۱/۵ و ۱۴۳۴/۸ به دست آمده است. شاخص‌های تراکم در چهار حالت تصادفی برابر ۱۶۳۶/۲، ۱۵۱۳/۱، ۱۵۲۵/۹ و ۱۵۳۸/۹ هستند که از شاخص‌های بهینه بیشتر هستند.

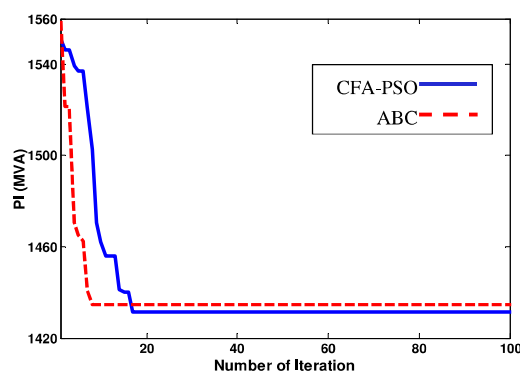
جدول ۶. چهار حالت تصادفی انتخابی برای مکان نصب TCSC

شاخص PI (MVA)	$X_{TCSC}$ (p.u)	مکان نصب TCSC	حالت
۱۶۳۶/۲	۰/۱۴۵۷	خط ۲	حالت ۱
۱۵۱۳/۱	-۰/۵۶۲۳	خط ۱۳	حالت ۲
۱۵۲۵/۹	-۰/۱۷۴۵	خط ۹	حالت ۳
۱۵۳۸/۹	-۰/۴۴۶۷	خط ۱۰	حالت ۴

با توجه به جدول‌های (۵ و ۷) مشاهده می‌شود در حالت‌های ۱، ۳ و ۴ نه تنها اضافه‌بار خطوط کاهش نیافته بلکه شاخص PI نیز نسبت به حالت عادی و نصب نکردن TCSC در سامانه افزایش یافته است. این نشان می‌دهد که اگر TCSC در جای مناسب خود قرار نگیرد نه تنها شرایط عملکردی سامانه را بهبود نمی‌دهد بلکه سامانه را با مشکلات جدی‌تری نیز روبه‌رو خواهد ساخت.

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 مکان‌یابی‌ها و گرفتن جواب از الگوریتم باید بررسی شود که 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 در آن نصب شود با بار سایر خطوط مقایسه شود، تا مشاهده شود خطی که دستگاه در آن نصب می‌شود جزء خطوط پربار سامانه باشد. دلیل این کار این است

متصل است. همچنین این شینه دارای بار هم می‌باشد. تنها راه تغذیه این بار از طریق همین خطوط است، ولی با خروج شینه ۲ از سامانه خط ۵ و ژنراتور متصل به این شینه از سامانه خارج می‌شود. یعنی این که بار شینه ۵ یکی از اصلی‌ترین راه‌های تأمین توان مورد نیازش را از دست داده است و به همین دلیل برای ادامه فعالیت خود به شدت به خطوط ۲، ۷ و ۱۰ نیاز پیدا می‌کند و بار عبوری از این خطوط افزایش می‌یابد. با قرار دادن TCSC می‌توان گفت با تغییر راکتانس خط و همچنین اثری که می‌تواند در تلفات خطوط ایجاد کند، مقداری تراکم کاهش داده می‌شود، ولی کماکان این خطوط تراکم قابل ملاحظه‌ای دارند، دلیل این امر تغذیه بار موجود در شینه ۵ در نبود ژنراتور موجود در شینه ۲ و خروج خط ۵، از طریق سه خط ۲، ۷ و ۱۰ است. در صورتی که لازم باشد تراکم موجود در این خطوط بیشتر از این کاهش یابد، باید بار موجود در شینه ۵ کاهش یافته و یا حذف شود.



شکل ۶. نمودار همگرایی دو الگوریتم CFA-PSO و ABC

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

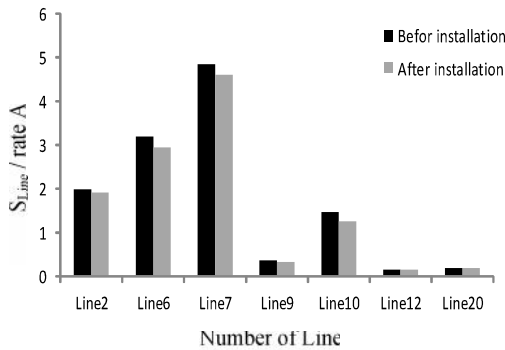
شاخص PI (MVA)	خطوط دارای اضافه‌بار				الگوریتم
	مکان اضافه‌بار (MVA)	rate A (MVA)	توان عبوری (MVA)	خط	
۱۴۳۱/۵	۱۳۹/۹۶	۱۵۰	۲۸۹/۹۶	خط ۲	CFA-PSO
	۹۷/۹۴	۵۰	۱۴۷/۴۹	خط ۶	
	۱۷۹/۶۵	۵۰	۲۲۹/۶۵	خط ۷	
	۱۳۳/۳۶	۵۰	۶۳/۳۶	خط ۱۰	
۱۴۳۴/۸	۱۴۰/۳۱	۱۵۰	۲۹۰/۳۱	خط ۲	ABC
	۹۷/۳۴	۵۰	۱۴۷/۳۴	خط ۶	
	۱۷۹/۵	۵۰	۲۲۹/۵	خط ۷	
	۱۵/۲۷	۵۰	۶۵/۲۷	خط ۱۰	

تا کنون در هیچ مقاله‌ای بحثی شبیه کار مقاله پیش‌رو ارائه نشده است و حتی در مراجع [۱۰-۱۲] که اساس کار این مقاله هستند، به بررسی خروج یک خط و اثرات آن روی سامانه پرداخته شده است.

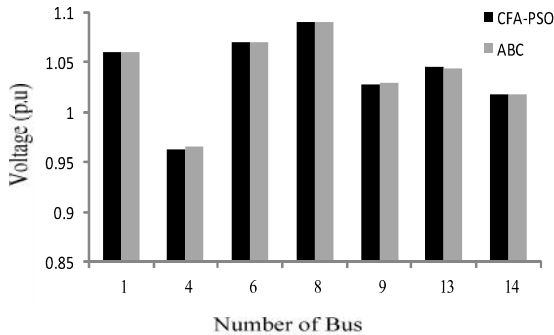


حالت عادی خارج از این محدوده‌اند، به همین دلیل ولتاژ این شینه‌ها را نه در قیود بهره‌برداری آورده شده و نه پس از مکان‌یابی و قرار دادن TCSC ولتاژ این شینه‌ها در محدوده مجاز مورد مقایسه قرار گرفته است. ولتاژ برخی از شینه‌های این سامانه بعد از نصب TCSC در شکل (۸) آمده است.

همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود ولتاژ شینه‌های سامانه در محدوده مجاز قرار دارند، البته شینه‌های متصل به ژنراتور که ولتاژ آن‌ها در حالت عادی نیز خارج از محدوده مجاز می‌باشد، بعد از نصب TCSC نیز تغییری نمی‌کند. ولتاژ این شینه‌ها توسط ژنراتور کنترل می‌شود و همیشه ثابت در نظر گرفته می‌شوند.



شکل ۷. مقایسه بار برخی خطوط قبل و بعد از نصب TCSC در حالت خروج شینه ۲ از سامانه



شکل ۸. ولتاژ برخی شینه‌های سامانه ۱۴ شینه بعد از نصب TCSC

### ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله سعی بر آن بود که در صورت هرگونه حمله تروریستی و یا نظامی به سامانه‌های انتقال برق و آسیب دیدن و خروج پست برقی از سامانه، بتوان تراکم ایجاد شده در سامانه را تا حدودی مدیریت کرده و از خروج یا به اصطلاح خاموشی سامانه جلوگیری شود. یک روش مناسب برای کنترل تراکم سامانه، استفاده بهینه از ادوات

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 می‌شود. این عمل بعد از مکان‌یابی دستگاه برای خط قرارگیری دستگاه انجام شده و به صورت نمودار با هم مقایسه شده‌اند.

برای انجام مقایسه بار خطوط ۲، ۶، ۷، ۹، ۱۰، ۱۲ و ۲۰ در نظر گرفته شده و بار این خطوط قبل و بعد از نصب بهینه، مقایسه شده است. نتیجه این مقایسه در شکل (۷) ارائه شده است.

جدول ۷. توان عبوری خطوط پس از قرار دادن TCSC در سامانه برای چهار حالت تصادفی

شاخص PI MVA	خطوط دارای اضافه‌بار			حالت
	اضافه بار MVA	rate A MVA	توان عبوری MVA	
۱۶۳۶/۲	۱۶۹/۷۲	۱۵۰	۳۱۹/۷۲	خط ۲
	۱۲۴/۳۹	۵۰	۱۷۴/۳۹	خط ۶
	۲۰۵/۵	۵۰	۲۵۵/۵	خط ۷
	۲۹/۸۴	۵۰	۷۹/۸۴	خط ۱۰
۱۵۱۳/۱	۱۴۸/۲۳	۱۵۰	۲۹۸/۲۳	خط ۲
	۱۱۰/۳۷	۵۰	۱۶۰/۳۷	خط ۶
	۱۹۱/۷۳	۵۰	۲۴۱/۷۳	خط ۷
	۲۲/۸۳	۵۰	۷۲/۸۳	خط ۱۰
۱۵۲۵/۹	۱۴۸/۰۸	۱۵۰	۲۹۸/۰۸	خط ۲
	۱۱۰	۵۰	۱۶۰	خط ۶
	۱۹۳/۷	۵۰	۲۴۳/۷	خط ۷
	۲۱/۹۳	۵۰	۷۱/۹۳	خط ۱۰
۱۵۳۸/۹	۱۴۳/۷۴	۱۵۰	۲۹۳/۷۴	خط ۲
	۱۰۱/۸۱	۵۰	۱۵۱/۸۱	خط ۶
	۱۷۴/۲۴	۵۰	۲۲۵/۲۴	خط ۷
	۵۲/۲۳	۵۰	۱۰۲/۲۳	خط ۱۰

از شکل (۷) و همچنین نتایج جدول‌های (۳) و (۴) مشاهده می‌شود که خط ۲ جز خطوط پربار شبکه است و این خط از لحاظ فنی نیز برای نصب TCSC مناسب است.

همان‌طور که توضیح داده شد، ولتاژ شینه‌ها باید در محدوده مجاز یعنی ۱/۰۵ تا ۰/۹۵ پیرونیت قرار گرفته باشند. ذکر این نکته لازم است که در سامانه ۱۴ شینه، برخی خطوط متصل به ژنراتورها در

- [11] Rashed, G. I.; Shaheen, H. I.; Cheng, S. J. "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 21<sup>st</sup> Century, 2008, 1-9.
- [12] Rashed, G. I.; Sun, Y. "Optimal Placement of Thyristor Controlled Series Compensation for Enhancing Power Security Based on Computational Intelligence Techniques"; J. of Procedia Engineering, 2011, 908-914.
- [13] Siddiqui, A. S.; Jain, R.; Jamil, M.; Gupta, C. P. "Congestion Management in High Voltage Transmission Line Using Thyristor Controlled Series Capacitors (TCSC)"; J. Electrical and Electronics Engineering Research; 2011, 3, 151-161.
- [14] Shanmukha Sundar, K.; Ravikumar, H. M. "Selection of TCSC Location for Secured Optimal Flow Under Normal and Network Contingencies"; Int. J. Elect. Power, 2012, 34, 29-37.
- [15] Vijayakumar, K. "Optimal Location of FACTS Devices for Congestion Management in Deregulated Power Systems"; Int. J. Comput. Appl. T. 2011, 16, 29-37.
- [16] Zimmerman, R. D.; Murillo-Sanchez, C. E.; Thomas, R. J. "Matpower: Steady-State Operations, Planning and Analysis Tools for Power Systems Research and Education"; IEEE T. Power Syst. 2011, 26, 12-19.
- [17] Zeraatzade, M. "Transmission Congestion Management by Optimal Placement of FACTS Devices"; Ph.D. Thesis, Brunel Univ., West London; Available in <http://bura.brunel.ac.uk/handle/2438/4710>
- [18] Kavitha, K.; Neela, R. "PSO Based TCSC Placement for Security Enhancement"; Int. J. Comput. Appl. T. 2012, 56, 25-29.
- [19] Rini, D. P.; Shamsuddin, S. M.; Yuhaniz, S. S. "Particle Swarm Optimization: Technique, System and Challenges"; Int. J. Comput. Appl. T. 2011, 14, 19-27.
- [20] Karaboga, D.; Basturk, B. "A Powerful and Efficient Algorithm for Numerical Function Optimization: Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm"; J. Global Optim., 2007, 37, 459-471.
- [21] Shayeghi, H.; Shayanfar, H. A.; Barzegar, E.; Ghasemi, M. "Optimal Placement of Phase Shifter Transformer for Power Loss Reduction Using Artificial Bee Colony Algorithm"; In Proc. of the Int. Conf. on Artificial Intelligence, 2012, 881-887.

#### ۷. پیوست

(الف) برای محاسبه توان عبوری خط متصل به شینه‌های  $i$  و  $j$ ، ابتدا توان‌های اکتیو و راکتیو عبوری از خط توسط روابط  $P$  و  $Q$  محاسبه شده و سپس توان عبوری خط از رابطه  $S=P+jQ$  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) در سامانه ۱۴ شینه آزمون، ۵ ژنراتور متصل به شینه‌های ۱، ۲، ۳، ۶ و ۸ وجود دارد، که در شرایط عادی ولتاژ شینه‌های ۱، ۶ و ۸ به ترتیب برابر با ۱/۰۶، ۱/۰۷ و ۱/۰۹ پریونیت، که در شرایط عادی ولتاژ خارج از محدوده مجاز ۱/۰۵ تا ۰/۹۵ پریونیت است.

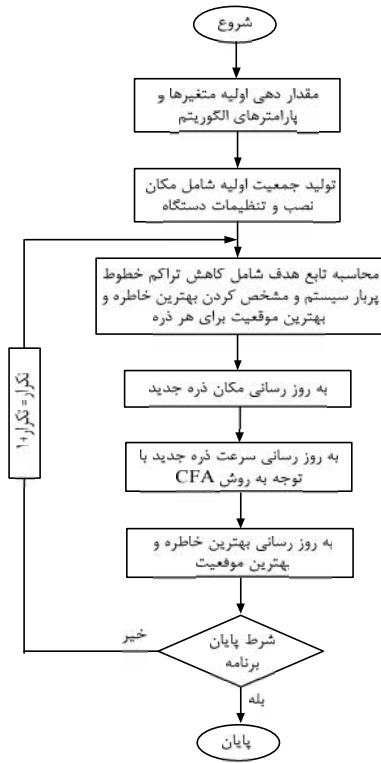
(ج) برای خروج شینه از سامانه باید تمامی خطوط و واحدهای تولیدی توان متصل به شینه از سامانه خارج شود. در Matpower

FACTS به ویژه TCSC است. 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 خارج شده، تراکم سامانه تا حدودی کاهش یافته است. شاخص تراکم کل سامانه در حد خوبی کاهش داده شد ولی به این دلیل که در حالت مدنظر (حذف شینه ۲) اصلی‌ترین ژنراتور (ژنراتور متصل به پست) از سامانه خارج شده بود، تراکم خطوط پرتراکم به مقدار زیادی کاهش نیافت. با این حال با توجه به شرایطی که در حملات تروریستی به شبکه تحمیل می‌شود، 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 می‌رسد. مکان نصب TCSC هم با چند حالت تصادفی مقایسه و هم از لحاظ فنی بررسی شد، که در هر دو حالت مکان نصب در سامانه مناسب بود. با نصب TCSC اگر چه در تابع هدف معرفی شده، هدفی برای بهبود پروفایل ولتاژ و نزدیک کردن ولتاژ شینه‌ها به مقدار استاندارد پریونیت در نظر گرفته نشده است، ولی با توجه به شرطی که برای ولتاژ شینه‌ها در بهره‌برداری سامانه اعمال شد، ولتاژ شینه‌ها در محدوده مجاز ۱/۰۵ تا ۰/۹۵ پریونیت قرار گرفته‌اند.

#### ۶. مراجع

- [1] Bruch, M.; Munch, V.; Aichinger, M. "Power Blackout Risks"; Risk Management Options Emerging Risk Initiative- Position Paper; 2011, pp.10.
- [2] Lin, Y.; Campbell, A. "Behavior Investigations of Superconducting Fault Current Limiters in Power Systems"; IEEE T. Appl. Supercon. 2006, 16, 662-665.
- [3] Shirai, Y.; Furushiba, K.; Shouno, Y.; Shiotsu, M.; Nitta, T. "Improvement of Power System Stability by Use of Superconducting Fault Current Limiter With ZnO Device and Resistor in Parallel"; IEEE T. Appl. Supercon, 2008, 18, 680-683.
- [4] Abel, A.; Parfomak, P. W.; Shea, D. A. "Electric Utility Infrastructure Vulnerabilities: Transformer, Tower and Terrorism"; CRS Report for Congress, Congressional Research Service, 2004.
- [5] Glanzmann, G. "FACTS: Flexible Alternating Current Transmission Systems"; EEH Power Systems Laboratory: ETH Zurich, 2005.
- [6] Samimi, A.; Naderi, P. "A New Method for Optimal Placement of TCSC Based On Sensitivity Analysis for Congestion Management"; J. of Smart Grid and Renewable Energy, 2012, 3, 10-16.
- [7] Besharat, H.; Taher, S. A. "Congestion Management by Determining Optimal Location of TCSC in Deregulated Power Systems"; Int. J. Elect. Power, 2008, 30, 563- 568.
- [8] Acharya, N.; Mithulanathan, N. "Locating Series FACTS Devices for Congestion Management in Deregulated Electricity Market"; J. Elect. Pow. Syst. Res. 2007, 77, 352-360.
- [9] Yousefi, A.; Nguyen, T. T.; Zareipoure, H.; Malik, O. P. "Congestion Management Using Demand Response and FACTS Devices"; J. Elect. Pow. Syst. Res. 2012, 37, 78-85.
- [10] Rashed, G. I.; Shaheen, H. I.; Duan, X. Z.; Cheng, S. J. "Evolutionary Optimization Techniques for Optimal Location and Parameter Setting of TCSC under Single Line Contingency"; J. Appl. Math. Comput. 2008, 205, 133-147.

(و) فلوجارت پیشنهادی الگوریتم CFA-PSO

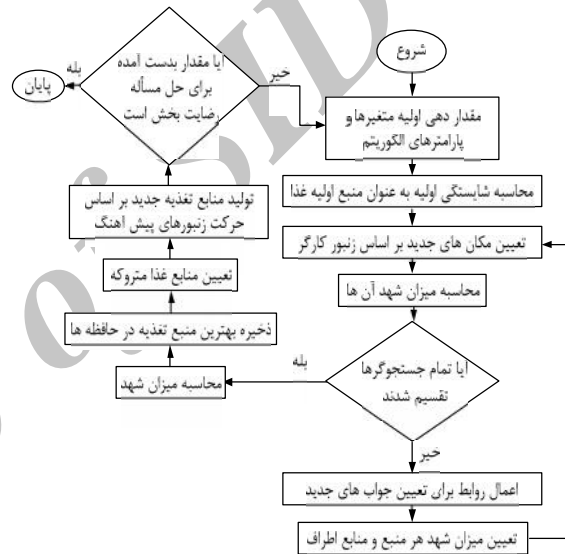


برای خروج خط یا ژنراتوری از سامانه متغییری به نام status تعریف شده است، با صفر قرار دادن این متغیر در Matpower می‌توان آن خط یا ژنراتور مدنظر را از سامانه خارج کرد.

(د) برای قرار دادن TCSC در پخش بار Matpower، ابتدا دو ورودی یکی برای مکان نصب و دیگری تنظیم پارامتر این دستگاه تعریف و سپس پخش بار را با داشتن این دو ورودی انجام می‌دهیم.

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

(ه) فلوجارت پیشنهادی الگوریتم ABC



Archive