جایابی بهینه چند منظوره ادوات FACTS با استفاده از الگوریتم PSO مبتنی بر رتبه‌بندی حاشیه سراسری

احسان توسلی نژاد*[۱]، افشین لشکرآرا[۲]

*۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه برق، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، e.tavasoli70@gmail.com
۲- استادیار، گروه برق، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، lashkarara@alumni.iust.ac.ir

چکیده: افزایش تقاضا برای انرژی الکتریکی و توسعه نیافتن شبکه انتقال، سبب شده است که سیستم‌های انتقال به عنوان یک محیط واسطه‌ای میان تولید و مصرف، بیش از پیش تحت فشار قرار بگیرند. در صورتی که شبکه انتقال قادر به اصلاح تعاملات مورد نظر بازار نباشد، تراکم در بازار برق رخ می‌دهد. اگر این تراکم کنترل نشود، منجر به افزایش قیمت بازار و انحصار در فروش می‌شود. یکی از روش‌های مؤثر برای مقابله با این موضوع، استفاده از ادوات FACTS نظیر TCSC است که با تغییر امپدانس خط، قابلیت کنترل توان عبوری از خطوط را دارد. لذا یافتن ظرفیت و محل نصب این ادوات، به عنوان یک ضرورت برای اپراتورهای سیستم قدرت است. در این مقاله یک روش بهینه‌سازی برای یافتن تعداد، محل نصب و ظرفیت بهینه TCSC به منظور کنترل تراکم شبکه در نظر گرفته شده است که اهداف این مسأله بهینه‌سازی، کاهش هزینه-های عملیاتی، بهبود پروفیل ولتاژ و بهبود پایداری گذرا می‌باشد. برای این منظور از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات مبتنی بر رتبه‌بندی حاشیه سراسری برای حل مسأله استفاده شده است. روش ارائه شده بر روی سیستم آزمایشی نیوانگلند با استفاده از برنامه MATLAB متلب پیاده‌سازی شده است. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها، بیانگر صحت و کارآمدی روش ارائه شده می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: مدیریت تراکم، ادوات FACTS، TCSC، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات مبتنی بر رتبه‌بندی حاشیه سراسری، پایداری گذرا، پروفیل ولتاژ

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 5 -No. 1- spring & summer 2016

[DOR: 20.1001.1.23222468.1395.5.1.3.3]

۱-مقدمه

شبکه انتقال به عنوان یک محیط واسطه‌ای بین منابع تولید توان و مراکز مصرف قرار دارد و دارای ظرفیت محدود و همچنین دارای نگرانی‌های امنیتی مخصوص به خود است. تراکم در بازارهای برق هنگامی رخ می‌دهد که شبکه انتقال قادر به اصلاح تمام تعاملات مورد نظر بازار نباشد که این امر ناشی از برخی تغییرات در محدودیت-های عملیاتی آن است[۲]. بنابراین اپراتورهای سیستم که مسئول حفظ امنیت و بازار رقابتی برق هستند، باید با استفاده از امکانات موجود و یا ابزارهای مبتنی بر بازار، تراکم را کاهش دهند. لذا از آنجا که محدودیت انتقال توان شبکه اساساً با کنترل فلوی توان قابل رفع یا کاهش است، به منظور دستیابی به اهداف مدیریت تراکم، از برخی تجهیزات نظیر ترانسفورماتورهای شیفت دهنده فاز یا ادوات سیستم های انتقال انعطاف پذیر جریان متناوب (FACTS) می‌توان استفاده نمود تا با افزایش ظرفیت انتقال توان که جایگزین مناسبی بجای ساخت خطوط انتقال جدید است، وضعیت شبکه‌های موجود را به طور مؤثری بهبود بخشید.[۱۲] در سال‌های اخیر، محققان زیادی از تکنیک‌های مختلفی برای حل مسئله مدیریت تراکم در سیستم‌های قدرت استفاده کرده‌اند، که از جمله آن‌ها می‌توان به چارچوب های چند هدفی تصادفی با درنظر گرفتن عدم قطعیت سیستم قدرت جهت بهبود پایداری ولتاژ و مدیریت تراکم[۹] و روش‌هایی برای قرارگیری ادوات FACTS در یک بازار برق مقررات‌زدایی شده با هدف کاهش تراکم [۱۵] و روش‌هایی برای مدیریت تراکم شبکه با توجه به تأثیر مدل بار امپدانس، جریان و توان ثابت [۱] و استفاده از جبران‌کننده-های سری کنترل شده با تریستور (TCSC) برای مدیریت تراکم [۱۴] اشاره کرد. کنترل تراکم بار انتقال، یک موضوع با اهمیت و حیاتی در بازار برق به حساب می‌رود. یکی از روش‌های مطرح شده که در این مقاله مورد ارزیابی قرار گرفته است، ادوات FACTS سری نظیر TCSC می‌باشند که به عنوان ابزارهای مؤثر برای کاهش تراکم بار به کار می-روند. با توجه به اینکه پس از کاهش تراکم بار ممکن است پایداری شبکه تحت تأثیر قرار گیرد، در این مقاله از یک چارچوب چند منظوره بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم PSO مبتنی بر رتبه‌بندی حاشیه سراسری برای کنترل تراکم بار استفاده شده است که شامل سه تابع هدف رقابتی از جمله هزینه کل عملیاتی، حاشیه پایداری گذرا و بهبود پروفیل ولتاژ است که به صورت همزمان بهینه‌سازی می‌شوند. این امر منجر به یک نقطه عملیاتی قوی و مقرون به صرفه می‌شود که در آن سطح ولتاژ و امنیت پایداری گذرا و ناپایدار را در بر می‌گیرد. در ادامه مقاله در بخش دوم به بیان مسأله، مدل‌سازی TCSC، فرمول بندی مدیریت تراکم چند هدفه، معرفی قیود و محدودیت‌های موجود در سیستم قدرت برای مدیریت تراکم خطوط انتقال و بخصوص استفاده از ادوات FACTS در این مهم، ارائه شده است. در بخش سوم به تشریح الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات مبتنی بر رتبه‌بندی حاشیه سراسری، پرداخته خواهد شد. در بخش چهارم، حل مسأله مطرح شده در قبل به همراه نتایج شبیه‌سازی ارائه شده است. نتیجه‌گیری کلی از انجام این پژوهش در بخش پنجم بیان شده است.

۲-مدیریت تراکم با استفاده از ادوات FACTS سری

۲-۱-لیست اولویتی برای جایابی بهینه ادوات FACTS سری

در هنگامی که هیچ تراکمی در بازار برق اشتراکی وجود ندارد، قیمت نقطه‌ای انرژی الکتریکی در تمامی شینه‌ها برابر قیمت تسویه بازار است. با این حال، در هنگامی که تراکم در بازار وجود دارد، ممکن است که قیمت حاشیه‌ای محلی (LMP) در هر شین متفاوت باشد. تفاوت بین LMPهای شینه‌های نهایی یک شاخه می‌تواند به منزله یک اندازه-گیری از تراکم یا پرشدگی در آن شاخه باشد. بنابراین، اختلاف LMP می‌تواند برای یافتن متراکم‌ترین شاخه‌ها و همچنین بهترین موقعیت‌ها برای نصب ادوات FACTS سری مورد استفاده قرار بگیرد که این کار باعث بهبود قابلیت انتقال متراکم‌ترین شاخه‌ها می‌شود. اختلاف قیمت نقطه‌ای بین دو شین در طول شاخه i-j بیان می‌شود:

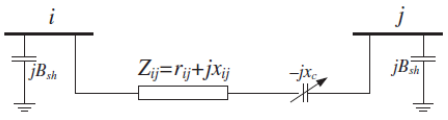
$$\rho_i = \lambda + \lambda_{Loss,i} + \lambda_{Con,i} \quad (۱)$$

$$\rho_{ij} = \rho_i - \rho_j = (\lambda_{Loss,i} - \lambda_{Loss,j}) + (\lambda_{Con,i} - \lambda_{Con,j}) \quad (۲)$$

در این روابط قیمت نقطه‌ای هر شینه (ρ_i)، مؤلفه انرژی حاشیه‌ای (λ)، مؤلفه تلفات حاشیه‌ای ($\lambda_{Loss,i}$) و مؤلفه تراکم حاشیه‌ای ($\lambda_{Con,i}$) می باشند [۱۰].

۲-۲-مدل سازی TCSC

مدل‌های مختلفی می‌توان برای مدل‌سازی TCSC به‌عنوان یکی ادوات FACTS سری مورد استفاده قرار بگیرد، که انتخاب این مدل به کاربرد آن در مطالعه در حال بررسی بستگی دارد. در مطالعات حالت ماندگار، TCSC می‌تواند به صورت ساده به شکل یک خازن استاتیک متغیر بین شین‌های i و j در نظر گرفته شود، همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱) مدل‌سازی TCSC برای کاربردهای حالت ماندگار

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 5 -No. 1- spring & summer 2016

[DOR: 20.1001.1.23222468.1395.5.1.3.3]

در این شکل Z_{ij} و jB_{sh} به ترتیب نشان دهنده امپدانس سری و موازی خط انتقال و jX_c نشان دهنده راکتانس خازنی TCSC است. این نوع از مدل‌سازی TCSC برای مطالعات حالت ماندگار متداول است[۱۰].

در حقیقت، قرارگیری و نصب TCSC در امتداد خط انتقال سبب تغییر مقادیر ماتریس ادمیتانس شبکه می‌گردد. با این حال روش‌هایی برای مدل‌سازی TCSC وجود دارد که ماتریس ادمیتانس شبکه را تغییر نمی‌دهد. یکی از این روش‌ها که به صورت گسترده در مطالعات حالت ماندگار TCSC مورد استفاده قرار می‌گیرد، مدل تزریق توان است، که در آن اثر TCSC به عنوان تزریق توان در شین‌های ترمینال i و j که TCSC بین آن قرار گرفته، در نظر گرفته می‌شود. تزریق توان TCSC می‌تواند محصول مشتق‌گیری تزریق توان به شینه‌های i و j در دو مورد با TCSC و بدون آن باشد. در نتیجه، TCSC در مدل تزریق توان توسط چهار توان تزریق شده نمایش داده می‌شود [۱۰]:

$$P_i^{TCSC} = |V_i|^2 \Delta G_{ij} - |V_i||V_j|\left[\Delta G_{ij}\,\mathrm{Cos}(\delta_i-\delta_j)+\Delta B_{ij}\,\mathrm{Sin}(\delta_i-\delta_j)\right] \quad (۳)$$

$$Q_i^{TCSC} = -|V_i|^2 \Delta B_{ij} - |V_i||V_j|\left[\Delta G_{ij}\,\mathrm{Sin}(\delta_i-\delta_j)-\Delta B_{ij}\,\mathrm{Cos}(\delta_i-\delta_j)\right] \quad (۴)$$

$$P_j^{TCSC} = |V_j|^2 \Delta G_{ij} - |V_i||V_j|\left[\Delta G_{ij}\,\mathrm{Cos}(\delta_i-\delta_j)-\Delta B_{ij}\,\mathrm{Sin}(\delta_i-\delta_j)\right] \quad (۵)$$

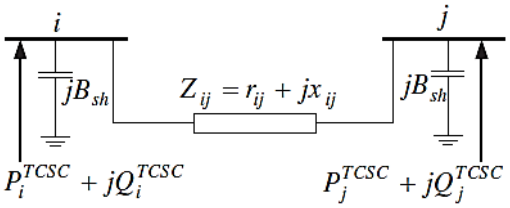
$$Q_j^{TCSC} = -|V_j|^2 \Delta B_{ij} + |V_i||V_j|\left[\Delta G_{ij}\,\mathrm{Sin}(\delta_i-\delta_j)+\Delta B_{ij}\,\mathrm{Cos}(\delta_i-\delta_j)\right] \quad (۶)$$

که در این روابط P_i^{TCSC}، Q_i^{TCSC}، P_j^{TCSC} و Q_j^{TCSC} توان تزریق شده (مثبت یا منفی) توسط نصب TCSC در شاخه i-j هستند. همچنین، $|V_i|$، δ_i، $|V_j|$و δ_j به ترتیب مربوط به دامنه ولتاژ و فازهای شین‌های i و j هستند. ΔG_{ij} و ΔB_{ij}وابسته به راکتانس TCSC هستند و به صورت روابط (۷) و (۸) محاسبه می‌شوند [۱۰]:

$$\Delta G_{ij} = \frac{x_c r_{ij}(x_c - 2x_{ij})}{(r_{ij}^2 + x_{ij}^2)\left[r_{ij}^2 + (x_{ij}-x_c)^2\right]} \quad (۷)$$

$$\Delta B_{ij} = -\frac{x_c (r_{ij}^2 - x_{ij}^2 + x_c x_{ij})}{(r_{ij}^2 + x_{ij}^2)\left[r_{ij}^2 + (x_{ij}-x_c)^2\right]} \quad (۸)$$

که در آن r_{ij} و x_{ij} به ترتیب نشان دهنده مقاومت و راکتانس شاخه‌ای می‌باشند که TCSC بر روی آن نصب شده است. مقدار بهینه x_c توسط مسأله مدیریت تراکم تعیین می‌گردد. با استفاده از مدل تزریق توان، مدار معادل فشرده π (بعد از نصب TCSC) شاخه خط انتقال i-j می‌تواند به صورت شکل (۲) با افزودن تزریق توان معادل حاصل از TCSC، اصلاح شود.



شکل (۲) مدار معادل فشرده π شاخه i-j با استفاده از مدل تزریق توان TCSC

۲-۳-فرمول بندی مسأله مدیریت تراکم چند هدفه

چارچوب چند هدفه پیشنهادی برای مسأله مدیریت تراکم دارای سه تابع هدف است که در معرض مجموعه‌ای از قیود و محدودیت‌های سیستم قدرت قرار دارند. اولین تابع هدف که بعنوان تابع هدف اصلی (f_1) است، کل هزینه عملیاتی سیستم قدرت می‌باشد. توابع هدف دوم و سوم (f_2 و f_3) به ترتیب شاخص‌های پایداری ولتاژ و پایداری گذرا می‌باشند، که تابع هدف نهایی به صورت $Min[f_1,f_2,f_3]$ می‌باشد. روش مدیریت تراکم چند هدفه پیشنهادی هزینه را کمینه کرده و VSM و CTEM را برای افزایش پایداری سیستم قدرت، بیشینه می‌نماید. شایان ذکر است که افزایش VSM و CTEM در روش پیشنهادی تضمین دهنده این است که راه‌حل بدست آمده پس از مسأله مدیریت تراکم، یک نقطه کار ایمن است. در نتیجه، برنامه بهینه‌سازی چند هدفه ارائه شده در این مقاله، باعث مقاوم‌تر شدن سیستم قدرت در برابر اختلالات شده و در نتیجه باعث کاهش نرخ قطعی‌ها می‌شود.

۲-۳-۱-کمینه کردن تابع هدف اصلی: کل هزینه عملیاتی

کل هزینه عملیاتی بازار برق به صورت رابطه (۹) در نظر گرفته می‌شود [۱۰]:

$$Minimize f_1 = \sum_{k\in SG} C_{GK}(P_{Gk}) - \sum_{k\in SD} B_{DK}(P_{Dk}) \quad (۹)$$

در این رابطه C_{GK} و B_{DK} به ترتیب نشان دهنده منحنی پیشنهادی تولیدکننده k و منحنی سود تقاضا k است. همچنین، SG و SD نیز به ترتیب مجموعه تولیدکنندگان شرکت‌کننده و تقاضا در بازار است. منحنی پیشنهادی تولیدکنندگان و منحنی سود تقاضا معمولاً به عنوان توابع درجه دوم در نظر گرفته می‌شود.

۲-۳-۲-بیشینه کردن تابع هدف دوم: شاخص پایداری ولتاژ

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 5 -No. 1- spring & summer 2016
[DOR: 20.1001.1.23222468.1395.5.1.3.3]

به منظور مقاوم کردن سیستم قدرت در برابر اختلالات مربوط به ولتاژ، ضروری است که پس از مدیریت تراکم، یک سطح کافی از امنیت ولتاژ حفظ شود. در اینجا، VSM برای اندازه‌گیری امنیت ولتاژ مورد استفاده قرار گرفته است.

$$VSM = f(P_{DK}, Q_{DK}) \quad (۱۰)$$

که در این رابطه، P_{DK} و Q_{DK} به ترتیب مصرف توان اکتیو و راکتیو تقاضای K هستند. در مطالعات پایداری ولتاژ، P_{DK} و Q_{DK} معمولاً با یک فاکتور توان ثابت مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. بنابراین، می‌توان اظهار داشت که متغیرهای P_{DK} و Q_{DK} وابسته بوده و بنابراین VSM می‌تواند به عنوان تابعی از توان راکتیو تقاضا Q_{DK} فرض می‌شود[۸].

۲-۳-۳-بیشینه کردن تابع هدف سوم: شاخص پایداری گذرا

به منظور توانمندسازی سیستم قدرت در برابر خطاها و اختلالات پایداری گذرا، می‌بایست یک سطح کافی از امنیت گذرا پس از مدیریت تراکم فراهم آید. به منظور اندازه‌گیری امنیت گذرا در چارچوب مدیریت تراکم پیشنهادی، CTEM به عنوان یک شاخص پایداری گذرای خطی به کار برده شده است [۵]. CTEM عمدتاً تابعی از تولید توان اکتیو ژنراتورها می‌باشد. در چارچوب چند هدفه پیشنهاد شده، برای مشتق‌گیری حساسیت CTEM نسبت به هر ژنراتور، تقریب مرتبه اول از سری تیلور حول نقطه کار مبنای سیستم قدرت مورد استفاده قرار گرفته است. با استفاده از این تقریب، تغییر در CTEM با توجه به تغییر تولید پس از مدیریت تراکم می‌تواند به صورت رابطه (۱۱) بیان گردد:

$$\Delta CTEM \cong \sum_{k \in SG} \frac{\partial CTEM}{\partial P_{Gk}} \Delta P_{Gk} \quad (۱۱)$$

در نتیجه، CTEM نهایی پس از مدیریت تراکم به صورت رابطه (۱۲) نوشته می‌شود:

$$f_3 = CTEM = CTEM_o + \Delta CTEM \quad (۱۲)$$

رابطه فوق $CTEM_o$ مقدار CTEM قبل از اعمال مدیریت تراکم است. f_3 سومین تابع هدف است که در چارچوب چندهدفه پیشنهادی بیشینه می‌گردد [۱۰].

۲-۴-محدودیت ها و قیود مسأله بهینه سازی

مدیریت تراکم چند هدفه پیشنهادی در این مقاله شامل سه تابع هدف است که در بخش قبلی توضیح داده شد که در صورت نصب TCSC در شاخه i-j ، با استفاده از روابط و قیود سیستم قدرت زیر مورد بهینه-سازی قرار می‌گیرد.

$$x_c^{\min} \le x_c \le x_c^{\max} \quad (۱۳)$$

$$P_{GK}^{\min} \le P_{GK} \le P_{GK}^{\max} \quad k \in SG \quad (۱۴)$$

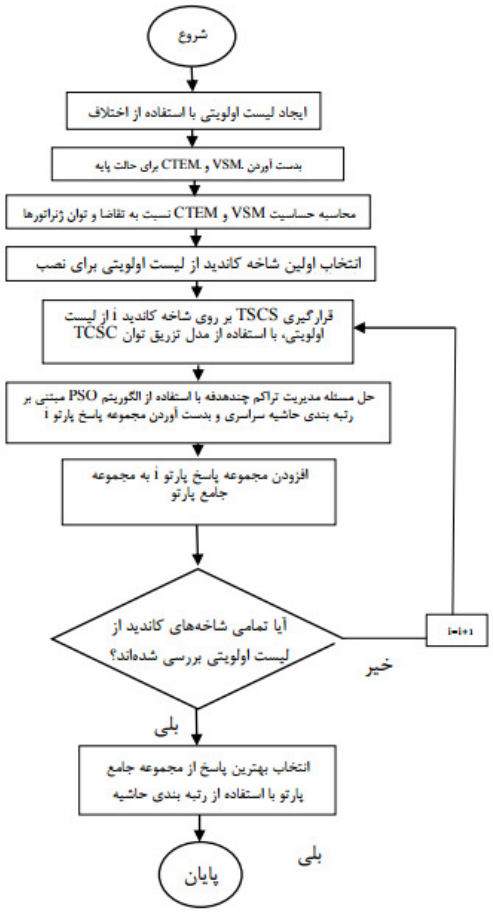
$$Q_{GK}^{\min} \le Q_{GK} \le Q_{GK}^{\max} \quad k \in SG \quad (۱۵)$$

$$P_{DK}^{\min} \le P_{DK} \le P_{DK}^{\max} \quad k \in SD \quad (۱۶)$$

$$Q_{Dk} = P_{Dk} \tan(\phi_{Dk}) \quad k \in SD \quad (۱۷)$$

$$V_K^{\min} \le |V_K| \le V_K^{\max} \quad k \in SN \quad (۱۸)$$

رابطه (۱۳) حدود راکتانس TCSC سری استفاده شده را مشخص می-نماید. SN نشان دهنده مجموعه شین‌های سیستم قدرت است. همچنین SG و SD به ترتیب مجموعه ژنراتورها، تقاضا و شاخه‌ها می-باشد. روابط (۱۴) و (۱۵) حدود توان‌های اکتیو و راکتیو ژنراتورها را نشان می‌دهد. همچنین، رابطه (۱۶) ارائه دهنده حدود توان اکتیو تقاضای مشارکت‌کننده در بازار است. رابطه (۱۷) ارائه دهنده توان راکتیو تقاضا، با فرض ضریب توان ثابت برای تقاضاها است. رابطه (۱۸) ارائه دهنده تولید گره‌ای شین‌ها به صورت مجموعی از واحدهای تولید است، در حالی که واحدهای متعدد در یک نیروگاه نصب شده باشد[۱۰].



شکل(۳): فلوچارت کلی چارچوب پیشنهادی برای قرارگیری TCSC برای مسئله مدیریت تراکم چند هدفی

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 5 -No. 1- spring & summer 2016

[DOR: 20.1001.1.23222468.1395.5.1.3.3]

در بخش بعد به بررسی الگوریتم چندهدفه ارائه شده در این مقاله جهت حل این مسأله بهینه‌سازی پرداخته شده است.

۳-الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات مبتنی بر رتبه‌بندی حاشیه سراسری

با توجه به اینکه الگوریتم پیشنهادی در این مقاله نوع خاصی از الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) است، از این رو الگوریتم PSO مختصرا مورد بررسی قرار گرفته و سپس به استراتژی رتبه بندی حاشیه سراسری که هدف این مقاله است پرداخته می شود.

۳-۱-الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات

روش PSO یک روش سراسری بهینه سازی است که با استفاده از آن می‌توان با مسائلی که جواب آن ها یک نقطه یا سطح در فضای n بعدی می باشد، برخورد نمود. در اینچنین فضایی فرضیاتی مطرح می-شود و یک سرعت ابتدایی به ذرات اختصاص داده می‌شود و همچنین کانال های ارتباطی بین درات در نظر گرفته می‌شود سپس این ذرات در فضای پاسخ حرکت می‌کنند و نتایج حاصله بر مبنای یک ملاک شایستگی پس از هر بازه زمانی محاسبه می‌شود. با گذشت زمان ذرات به سمت ذراتی که دارای ملاک شایستگی بالاتری هستند و در گروه ارتباطی یکسانی قرار دارند شتاب می‌گیرند[۶]. مزیت اصلی این روش بر استراتژی‌های بهینه سازی دیگر این است که تعداد فراوان ذرات ازدحام کننده، باعث انعطاف روش در برابر مشکل پاسخ بهینه محلی می‌گردد. هر ذره دارای یک موقعیت است که مشخص کننده مختصات ذره در فضای جستجوی چند بعدی می‌باشد و با حرکت ذره در طول زمان، موقعیت ذره تغییر می‌نماید. $x_i(t)$ موقعیت ذره iام را مشخص می نماید. همچنین هر ذره برای حرکت نمودن در فضا نیاز به یک سرعت دارد $v_i(t)$ سرعت ذره iام در زمان tام را مشخص می‌نماید. با ا فزودن سرعت به موقعیت هر ذره می توان موقعیت جدیدی برای ذره در نظر گرفت. معادلات به روز نمودن سرعت و موقعیت ذره در رابطه (۱۹) و رابطه (۲۰) آورده شده اند[۶].

$$x_i(t+1)=\begin{cases} y_i(t) & if \quad f(x_i(t+1)) \geq f(y_i(t)) \\ x_i(t+1) & if \quad f(x_i(t+1)) \leq f(y_i(t)) \end{cases} \qquad (۱۹)$$

$$x_i(t+1)=x_i(t)+v_i(t+1) \qquad (۲۰)$$

$$x_i(t) \square U(x_{\min}, x_{\max})$$

۳-۲-استراتژی رتبه‌بندی حاشیه سراسری

از اطلاعات موقعیت فردی در فضای هدف، برای بدست آوردن حاشیه تحت سلطه در کل جمعیت استفاده می‌شود. با استفاده از اطلاعات حاشیه‌ای، می‌توان مقادیر تحت سلطه فردی در فضای حل را بدست آورد، که چگونگی اهمیت حاشیه‌ها در میان راه‌حل‌ها را مورد توجه قرار می‌دهد. در رتبه‌بندی حاشیه سراسری، رتبه‌بندی سراسری با استفاده از ترکیب اطلاعات تراکم افراد در سراسر جمعیت، برای ارزیابی کیفیت افراد برای انجام بهینه‌سازی بدست می‌آید. رتبه‌بندی حاشیه سراسری برای افراد، به صورت مجموع تفاوت مقادیر تمامی اهداف تعریف می‌شود [۷]:

$$GMR(X_i) \triangleq \sum_{X_i \neq X_j} \max\left(\left(\prod_{m=1}^{M} f_m(X_i) - \prod_{m=1}^{M} f_m(X_j)\right), 0\right) \qquad (۲۱)$$

که در آن، X_i و X_j دو راه‌حل هستند و M تعداد اهداف است. با مفهوم سلطه پارتو، $GMR(X_i)$ کوچکتر، بیشتر راه‌حل‌های X_i غالب خواهند بود. بر اساس رابطه (۴۲) برای هر دو راه حل در فضا، X_i بر X_j برتری دارند، اگر و فقط اگر $GMR(X_i) < GMR(X_j)$ باشد. اگر $GMR(X_i) = 0$ باشد، X_i با هیچ یک از افراد در فضای جستجو تحت سلطه نخواهد بود.

۳-۳-حفظ توزیع همراه با GMR

یکی از اهداف مورد نظر بهینه‌سازی چندهدفه، بدست آوردن کاندیداهای ممکن، با گستردگی و توزیع یکنواخت است؛ که یک درجه‌بندی از شایستگی الگوریتم است. در این مقاله، از مجموع فاصله اقلیدسی فردی به سایر آیتم‌ها در فضای جستجو، به عنوان یک اندازه-گیری از تجمع افراد در فضای جستجو استفاده شده و تعریف تراکم سراسری (GD) به صورت رابطه (۲۲) تعریف می‌گردد[۷]:

$$GD(X_i) = \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{pop} d_{i,j} \qquad (۲۲)$$

که در این رابطه $GD(X_i)$ نشان دهنده تراکم سراسری ذره X_i و $d_{i,j}$ نشان دهنده فاصله اقلیدسی بین x_i و x_j است. بزرگتر بودن مقدار $GD(X_i)$ نشان دهنده کم بودن ذرات در اطراف X_i، به همراه تفاوت بیشتری میان افراد و توزیع بهتر است. رتبه‌بندی عمومی سراسری (GGR) به صورت رابطه (۲۳) تعریف می‌شود[۷]:

$$GGR(X_i) \triangleq \frac{GMR(X_i)}{GD(X_i)} \qquad (۲۳)$$

در این رابطه $GGR(X_i)$ نشان دهنده رتبه‌بندی عمومی سراسری X_i است. کوچکتر بودن $GGR(X_i)$ نشان دهنده غالب بودن X_i است؛ همچنین نشان می‌دهد که تراکم سراسری X_i دارای توزیع بهتری است.

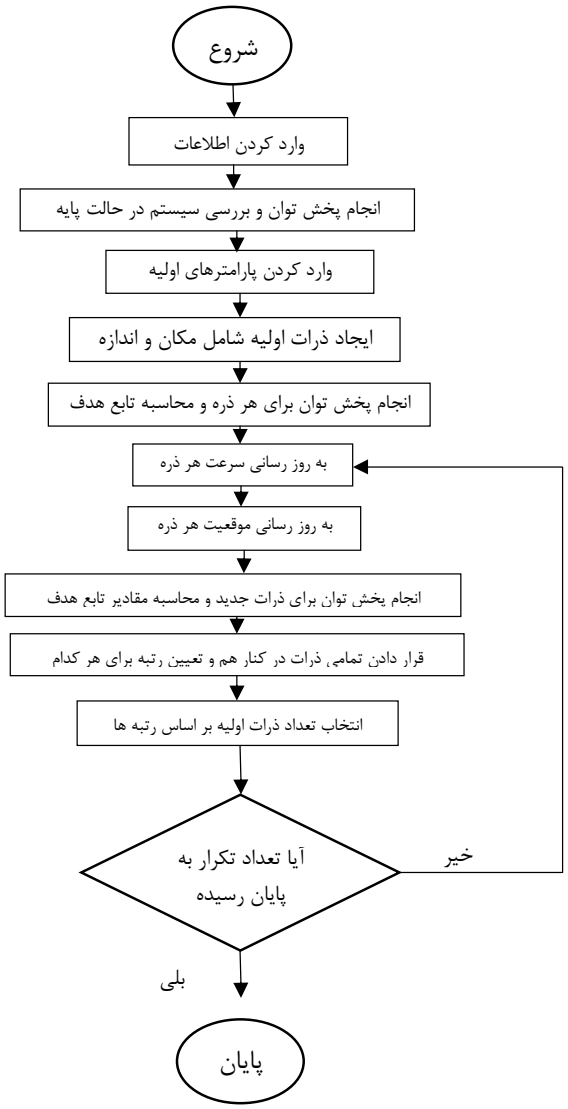
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 5 -No. 1- spring & summer 2016

[DOR: 20.1001.1.23222468.1395.5.1.3.3]

۳-۴-نحوه کدبندی مسأله در الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات مبتنی بر رتبه‌بندی حاشیه سراسری

به منظور شبیه‌سازی مسأله بیان شده در بخش‌های قبلی، به شیوه زیر عمل می‌گردد؛ همچنین برای هر TCSC دو متغیر تعریف می‌گردد، که یکی برای موقعیت نصب این ادوات و دیگری برای تعریف اندازه آن است. فلوچارت این الگوریتم در شکل (۴) نشان داده شده است.



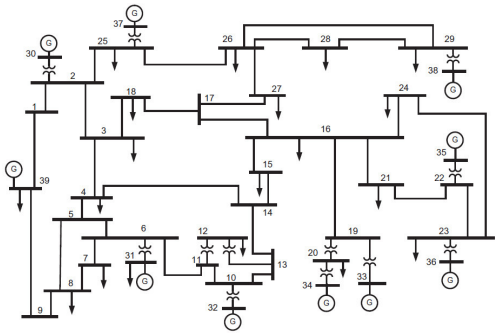
شکل (۴) فلوچارت الگوریتم PSO مبتنی بر رتبه بندی حاشیه سراسری برای حل مسئله جایابی TCSC

۴-نتایج شبیه سازی

در این بخش نتایج شبیه سازی جایابی ادوات FACTS با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات مبتنی بر رتبه‌بندی حاشیه سراسری، به منظور بهبود سه شاخص مهم در شبکه ارائه شده است. شاخص‌ها در این مقاله شامل هزینه عملیاتی، حاشیه پایداری گذرا و بهبود پروفیل ولتاژ می‌باشد. از این رو از TCSC، به منظور کاهش در تراکم خطوط استفاده شده است و با قرارگیری در مکان‌های مدنظر، سبب بهبود در شاخص‌های سیستم گردیده است. به منظور بررسی تعداد TSCS ها در سیستم و اثرات آن‌ها بر روی شاخص‌های سیستم، سناریوهای متفاوتی که وابسته به تعداد TSCSها می‌باشد ارائه گردیده است. سپس در هر مرحله میزان هزینه، بهبود پروفابل ولتاژ و همچنین حد پایداری ولتاژ مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۱-۴-سیستم مورد مطالعه

در این مقاله از سیستم قدرت ۳۹ شینه New England، همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده است، برای شبیه سازی‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. این نمایش ساده از سیستم انتقال ۳۴۵ کیلو ولت در New England با داشتن ۱۰ ژنراتور، ۲۹ باس بار و ۴۶ خطوط انتقال است.



شکل (۵) شمای سیستم ۳۹ شینه New-England [۱۱]

۲-۴- سناریو ها

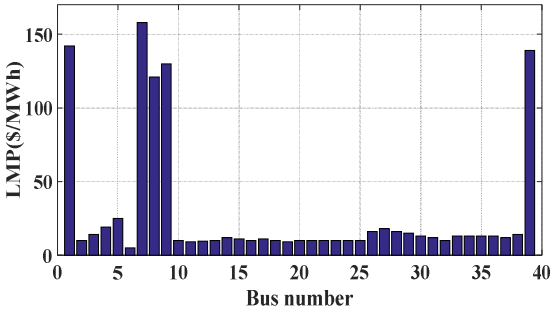
در این مقاله سه سناریو با تغییر در تعداد TCSCها جهت مکان‌یابی ارائه شده است. سناریو اول فقط یک TCSC را جهت ارزیابی و مکان-یابی در نظر می‌گیرد. سناریو دوم تعداد دو TCSC برای مکان‌یابی و بهبود شاخص‌ها و اهداف مسئله در نظر می‌گیرد. در سناریو سوم، تعداد TCSC را نامعلوم درنظر گرفته و با استفاده از روش بهینه‌سازی بهترین تعداد مشخص می‌شود و اندازه و مکان هر کدام تعیین می-گردد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 5 -No. 1- spring & summer 2016

[DOR: 20.1001.1.23222468.1395.5.1.3.3]

در نهایت این سه سناریو با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در این سیستم هزینه تأمین توان در حالت پایه برابر ۹۶۲۸/۱۸ دلار می‌باشد.در شکل (۶) مقدار LMPها برای تمامی شین‌های سیستم نشان داده شده است.



شکل (۶) مقدار LMP شین‌های سیستم مورد مطالعه

در جدول (۱) سناریو اول شامل یک TCSC به منظور بهبود هزینه عملیاتی، حد پایداری گذرا و بهبود پروفیل ولتاژ ارائه شده است.

در جدول (۲) سناریو دوم شامل دو TCSC به منظور بهبود هزینه عملیاتی، حد پایداری گذرا و بهبود پروفیل ولتاژ، و درجدول (۳) سناریو سوم شامل حداکثر چهار TCSC به منظور بهبود هزینه عملیاتی، حد پایداری گذرا و بهبود پروفیل ولتاژ ارائه شده است.

جدول (۱) نتایج مکان قرارگیری TCSC در سیستم ۳۹ شینه New-England در جواب های برتر

شماره خط	شماره شینه ابتدا	شماره شینه انتها	TCSC (%)	Cost($)	VSM (%)	CTEM (p.u.)	de(V)%
۳۷	۲۲	۳۵	۶۴/۲۹	۳۷۹۹۱/۱۳	۱۴/۹۸	۷/۰۲	۲/۹۱
۲۵	۱۵	۱۶	۶۱/۰۵	۴۴۳۲۵/۰۴	۱۴/۸۹	۸/۱۲	۱/۴۷
۴۰	۲۵	۲۶	۵۴/۳۹	۵۱۰۹۵/۹۵	۱۵/۰۵	۶/۷۴	۳/۰۱
۳۴	۲۰	۳۴	۶۰/۳۳	۳۹۳۶۲/۳۱	۱۴/۹۸	۹/۱۵	۱/۹۹

جدول (۲): نتایج مکان قرارگیری دو TCSC در سیستم ۳۹ شینه New-England در جواب های برتر

شماره خط	شماره شین ابتدا	شماره شین انتها	TSCS(%)	شماره خط	شماره شین ابتدا	شماره شین انتها	TSCS(%)	Cost($)	VSM(%)	CTEM(p.u)	de(V)%
۳۴	۲۰	۳۴	۱۲/۷۳	۲۵	۱۵	۱۶	۶۹/۱۴	۴۱۲۷۳/۳	۱۴/۹۰	۲۰/۳۴	۱/۱۷
۳۶	۲۲	۲۳	۲۰/۴۲	۶	۳	۴	۱۲/۷۱	۳۹۲۸۲/۸۲	۱۴/۹۰	۱۴/۵۵	۱/۱۰
۳۷	۲۲	۳۵	۳۲/۳۱	۴۶	۲۹	۳۸	۵۸/۳۳	۴۰۳۹۲/۰۲	۱۴/۹۴	۱۸/۶۴	۱/۳۴
۴۳	۲۶	۲۸	۱۱/۲۱	۲۴	۱۴	۱۵	۸۰/۰۰	۴۲۲۷۵/۸	۱۴/۸۵	۲۵/۴۶	۰/۹۳

جدول (۳): نتایج مکان قرارگیری حداکثر چهار TCSC در سیستم ۳۹ شینه New-England در جواب های برتر

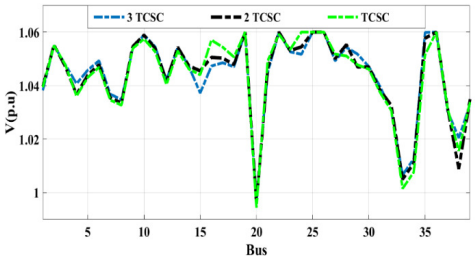
شماره نقاط	تعداد	شماره خط ها	اندازه (درصد)	Cost($)	VSM(%)	CTEM(p.u)	de(V)%
۱	۳	۲۶-۱۵-۵	۱۵/۲۳-۴۳/۸۱-۱۲/۶۹	۴۱۰۰۱/۵۵	۱۴/۹۱	۱۹/۱۶	۳/۵۰
۲	۳	۴۶-۴۲-۳۵	۵۷/۱۶-۶۰/۱۹-۵۰/۹۶	۴۰۲۹۶/۳۹	۱۵/۶۹	۱۴/۹۰	۲/۵۹
۳	۲	۴۲-۶	۴۲/۴۳-۴۴/۳۹	۴۱۱۷۳/۶۵	۱۶/۶۷	۲۲/۲۷	۵/۷۱
۴	۴	۳۵-۳۳-۳۱-۱۵	۲۳/۷۵-۱۵/۷۹-۷۱/۲۱-۷۳/۷۴	۳۹۴۴۷/۳۰	۱۴/۷۸	۱۴/۴۴	۶/۰۷
۵	۴	۳۱-۳۰-۲۸-۱۵	۵۴/۶۳-۴۹/۴۷-۱۲/۳۴-۷۱/۷۵	۴۱۹۱۶/۵۷	۱۵/۷۸	۲۷/۳۲	۵/۷۳
۶	۲	۱۵-۶	۵۸/۷۶-۲۰/۰۴	۴۱۱۴۰/۰۱	۱۴/۶۷	۲۵/۸۶	۴/۳۰
۷	۳	۱۶-۶-۴۶	۴۸/۷۹-۲۷/۱۴-۵۰/۱۵	۴۰۷۴۴/۱۳	۱۶/۶۹	۱۸/۵۵	۱/۵۸

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 5 -No. 1- spring & summer 2016

[DOR: 20.1001.1.23222468.1395.5.1.3.3]

در آخر به مقایسه و بررسی نتایج پروفیل ولتاژ برای سه سناریو پرداخته شده است. به این منظور، ۳ جواب از بهترین جواب‌های انتخاب شده در حالت‌های قبلی با یکدیگر در شکل (۷) مقایسه شده‌اند. به این منظور و برای صحت‌سنجی بهتر، ۳ تعداد مختلف برای TCSCها در نظر گرفته شده است.



شکل (۷) مقایسه ۳ پروفیل ولتاژ برای تعداد مختلف TCSC در سه سناریو

همانطور که در شکل (۶) ملاحظه می‌شود، با قرارگیری یک TCSC، پروفیل در مکان قرارگیری آن، بهبود خوبی را در خود میبینند، اما برای دیگر شینه‌ها تأثیر چندانی ندارد. زمانی که دو TCSC در سیستم قرار می‌گیرد با پراکندگی مناسب، سبب بهبود در چند بخش سیستم می‌گردد. این امر سبب می‌شود که پروفیل در اکثر نقاط بهتر از حالت قرارگیری یک TCSC در سیستم شود. زمانی که سه TCSC در سیستم قرار می‌گیرد با وجود اینکه مقدار ظرفیت مجموع آن، تفاوت چندانی با حالت ۲ TCSC ندارد، سبب بهبود بهتر می‌گردد، زیرا با پراکندگی در سیستم، سبب بهبود تراکم در نقاط بیشتری از سیستم شده و پروفیل بهتری برای سیستم به دست آمده است.

همانطور که ملاحظه می‌گردد سه TCSC دارای پروفیل مورد قبول‌تری نسبت به دو حالت قبل‌تر می‌باشد و می‌توان تراکم سیستم را کاهش و سبب بهبود پایداری گذرای سیستم گردد.

۵-نتیجه گیری

با قرار دادن یک TCSC در سناریو اول، پروفیل ولتاژ فقط در شینی که TCSC نصب شده بهبود می‌یابد، اما تأثیر چندانی بر روی سایر شین‌ها ندارد. با قرار دادن دو TCSC، پروفیل ولتاژ سیستم و شاخص‌های عملکردی مورد بررسی نسبت به سناریو اول بهبود بیشتری پیدا می‌نمایند. گسترش پراکندگی ظرفیت TCSCها در نقاط مختلف شبکه، باعث بهبود پروفیل ولتاژ، کاهش تراکم سیستم و بهبود پایداری گذرا می‌شود. بطور کلی استفاده از الگوریتم مبتنی بر رتبه‌بندی حاشیه‌ای سراسری دارای مزایای بسیاری نسبت به سایر الگوریتم های بهینه سازی می‌باشد که می‌توان به سرعت همگرایی بالا و کاهش قابل توجه محاسبات اشاره کرد و در نهایت نیز با توجه به نتایج شبیه‌سازی استفاده از این روش بهینه سازی بهبود ۱۴٪ شاخص پایداری، بهبود ۱۸٪ پروفیل ولتاژ و کاهش ۴/۶٪ هزینه عملیاتی را در بر داشته است.

مراجع

[1] Abdullah Asuhaimi Mohd Zin, Mehdi Moradi and Azhar Khairuddin, "Short-Term Congestion Management by Strategic Application of FACTS Devices and Demand Response Programs Under Contingency Conditions", IETE JOURNAL OF RESEARCH VOL. 63, NO. 1, 109–123, 2017.

[2] Anderson, E. J., & Cau, T. D. H. Implicit collusion and individual market power in electricity markets. European Journal of Operational Research, 211, 403–414. (2011).

[3] A . López Jaimes, C.A . Coello Coello, Study of preference relations in many-objective optimization, in: Proceedings of the 11th Annual conference on Genetic and evolutionary computation - GECCO '09, volume Montreal, ACM, ACM Press, New York, New York, USA, p. 611, doi: 10.1145/1569901, 2009.

[4] C.W. Reynholds,Flocks. Herds and schools: A Distributed Behavioral Model. Computer Graphics,21(4):25-34,1987.

[5] Da-Zhong, F., Chung, T. S., Yao, Z., & Wennan, S. Transient stability limit conditions analysis using a corrected transient energy function approach. IEEE Transactions on Power Systems, 15, 804–810. (2000).

[6] Kennedy, J. and Eberhart, R. C., "Particle Swarm Optimization", Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, Piscataway, NJ, pp. 1942-1948, 1995.

[7] Li Li, Wanliang Wang, Xinli Xu, "Multi-objective particle swarm optimization based on global margin ranking", Information Sciences Elsevier, Vol375, pp 30–47 , 2017.

[8] L. J. Cai, I. Erlich and G. Stamtsis, "Optimal Choice and Allocation of FACTS Devices in Deregulated Electricity Market Using Genetic Algorithms", IEEE PES Power Systems Conference of Exposition, New York, USA, 10-13 Oct. 2004.

[9] Masoud Esmaili, Heidar Ali Shayanfar, Nima Amjady,"Multi-objective congestion management incorporating voltage and transient stabilities", elsevier,Energy 34 1401–1412 (2009).

[10] Masoud Esmaili, Heidar Ali Shayanfar, Ramin Moslemi, "Locating series FACTS devices for multi-objective congestion management improving voltage and transient stability", European Journal of Operational Research 236, 763–773,2014.

[11] M. Garza-Fabre, G.T. Pulido, C.A.C. Coello, Ranking methods for many-objective optimization, in: MICAI 2009: Advances in Artificial Intelligence, in: LNAI, vol. 5845, pp. 633–645, doi: 10.1007/978- 3- 642- 05258- 3 _ 56 , Springer, 2009.

[12] Pineau, P.-O., Rasata, H., & Zaccour, G. Impact of some parameters on investments in oligopolistic electricity markets. European Journal of Operational Research, 213, 180–195. (2011).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 5 -No. 1- spring & summer 2016

[DOR: 20.1001.1.23222468.1395.5.1.3.3]

[13] P.J. Bentley , J.P. Wakefield , Finding acceptable solutions in the Pareto-optimal range using multiobjective genetic algorithms, in: Soft Computing in Engineering Design and Manufacturing, Springer, pp. 231–240, 1998 .

[14] Siva Sankar Akumalla, Sujatha Peddakotla, Seetha Rama Anjaneyulu Kuppa, "A Modified Cuckoo Search Algorithm for Improving Voltage Profile and to Diminish Power Losses by Locating Multi-type FACTS Devices",J Control Autom Electr Syst 27:93–104 (2016).

[15] Seyed Abbas Taher, Hadi Besharatl, "Transmission Congestion Management by Determining Optimal Location of FACTS Devices in Deregulated Power Systems",American Journal of Applied Sciences 5 (3): 242-247, 2008.

[16] S. N. Singh, "Location of FACTS Devices for Enhancing Power System Security", IEEE Trans. On Power Delivery, pp. 162-170, 2001.

رزومه



احسان توسلی نژاد در دزفول متولد شده است(۱۳۷۰). تحصیلات دانشگاه خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق – الکترونیک از دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول (۱۳۹۳)، کارشناسی ارشد مهندسی برق – قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول (۱۳۹۶) سپری کرده است.
فعالیت های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه شبکه‌های هوشمند، بهینه سازی سیستم های قدرت و ادوات FACTS می‌باشد.



افشین لشکرآرا در تهران متولد شده است(۱۳۵۲). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری خود رت در سال‌های (۱۳۷۴)، (۱۳۸۰) و (۱۳۸۹) به ترتیب در دانشگاه دزفول، دانشگاه مازندران و دانشگاه علم و صنعت ایران در رشته مهندسی برق – قدرت اخذ نموئه است. ایشان هم اکنون عضو ارشد انجمن مهندسی برق و الکترونیک امریکا (IEEE Senior Member) و از سال (۱۳۸۰) تا کنون عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول می-باشند. زمینه‌های تحقیقاتی ایشان شبکه‌های هوشمند، بهینه سازی سیستم های قدرت، مطالعه استاتیکی و دینامیکی سیستم های قدرت ، پایداری و کنترل و ادوات FACTS می‌باشد.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1395.5.1.3.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 5 -No. 1- spring & summer 2016
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

Multi-Objective optimal location of FACTS device using PSO algorithm based on Global Margin Ranking

Abstract:

Increased demand for electrical energy and the lack of development of the transmission network, has made transmission systems, as an intermediary between production and consumption, be more pressed. If the transmission network is not able to correct the desired interactions in the market congestion occurs in the electricity market. If this density is not controlled leading to a rise in market prices and monopolies in sales. One of the effective ways to deal with the issue is the use of FACTS devices such as TCSC, by changing the transmission line impedance, it has the ability to control the power flow of the transmission lines. Therefore, finding the capacity and location of these devices, it is a necessity for power system operators. In this thesis, an optimization method is used to find the number, the installation location and optimal capacity of the TCSC are intended to control network congestion. The goal of the optimization problem is to improve the voltage profile, improve transient stability and reduce operating costs. For this purpose, the Multi-objective particle swarm optimization based on global margin ranking has been used to solve the problem. In this research, several scenarios have been presented to illustrate the effect of adding TCSC to the network. The proposed method has been implemented on the New England Testing System, which has been used for this purpose by the Matlab software environment. The results obtained by the proposed algorithm indicate the accuracy and efficiency of the proposed method.

Keywords:
Congestion Management, FACTS devices, TCSC, Multi-objective particle swarm optimization based on global margin ranking, Transient Stability, Voltage Profile

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1395.5.1.3.3]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 5 -No. 1- spring & summer 2016