

KN0-0903-3706

جایابی و انتخاب بهینه پارامترهای DPFC بمنظور مدیریت تراکم در

سیستم‌های قدرت تجدید ساختار شده

ياسر ابلاغی eblaghi301@gmail.com

زهرا کرمی zkarami.ie@gmail.com

برق منطقه ای / تهران ایران

سازمان ملی استاندارد / کرج ایران

چکیده: پدیدار شدن تجدید ساختار در سیستم های قدرت و دسترسی آزاد به شبکه انتقال متضمن تحقق یک رقابت سالم در مبادله توان است و پرشدگی خطوط انتقال می تواند به عنوان یک مشکل جدی مانع از ایجاد این رقابت سالم باشد. از آنجا که ادوات FACTS شرایط و امکان کنترل پارامترهای موثر بر توان انتقالی در سطح شبکه انتقال را فراهم می سازند، استفاده از این ادوات برای مدیریت پر شدگی خطوط به عنوان یکی از راهکارها، مفید به نظر می رسد. به همین منظور محل نصب و تنظیم پارامترهای ادوات FACTS جهت دستیابی به اهداف مورد نظر حائز اهمیت است. در این مقاله جهت مدیریت تراکم، ادوات FACTS نوینی تحت عنوان DPFC معرفی و بررسی می گردد. به منظور تنظیم پارامترهای DPFC و تعیین مکان مناسب آن برای مدیریت و کاهش تراکم انتقال در محیط تجدید ساختاریافته، یک روش بر مبنای الگوریتم PSO و استفاده از پخش بار بهینه (AC-OPF) در ترکیب با DPFC استفاده شده است. برای این منظور دو تابع هدف کل هزینه تراکم و هزینه تولید ژنراتورها در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه سازی روی شبکه بر روی سیستم های ۱۴ باسه و ۵۷ باسه IEEE تاثیر مکان مناسب DPFC را در کاهش هزینه های تراکم بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: مدیریت تراکم، ادوات FACTS، الگوریتم PSO، پخش بار بهینه (AC-OPF)، DPFC

۱. مقدمه

پدیدار شدن تجدید ساختار در صنعت برق، از مسائل جدید در سال های اخیر است که به منظور ایجاد رقابت در تولید برق و در نتیجه کاهش قیمت برق، افزایش بازده شبکه برق، بهبود سرویس دهی و کیفیت برق و ... در سیستم قدرت مطرح شده است. از طرفی محدودیت انتقال توان در خطوط، شبکه انتقال را بصورت یک مشکل جدی بر سر راه تجدید ساختار تبدیل کرده است. بدلائل مختلفی چون خروج خطوط، خروج ژنراتورها و تغییر در میزان قراردادهای تبادل توان، ممکن است بخش هایی از شبکه انتقال با اضافه بار روبرو شوند. در ساختار سنتی این مشکل با دستورالعمل هایی برطرف می

گردید و از آنجا که این بخش ها در شبکه های سنتی مشخص و مقدار حدی آن در دوره معینی بسته به میزان بار ثابت می ماند، راه حل اساسی برای رفع پرشدگی افزایش خطوط انتقال یا اضافه کردن ظرفیت نصب شده شبکه انتقال بود. اما با طرح دسترسی آزاد در شبکه انتقال در سیستم های تجدید ساختار شده، پرشدگی خطوط شکل حادثتری به خود گرفته و بروز آن از حالت معین و ثابت در سیستم های سنتی به وضعیتی نامعین، غیردقیق، ریسک پذیر و بعضاً در مکانی از پیش تعیین نشده تغییر یافته است [1].

مستقیم در خطوط انتقال جای داده شده، در نتیجه خطوط انتقال در زمان خطا این از سیستم قدرت جدا می شوند.

به سبب این دو اشکال مهم، UPFC بطور وسیع به کار برده نمی شود. حتی وقتی بیشترین تقاضا جهت سیلان توان در شبکه هست بطور معمول انتخاب اول صنعت نمی باشد. بطور معمول ترانس PST که دارای توانایی کنترل کم می باشد، بدلیل اقتصادی، انتخاب می شود [8].

در این مقاله با توجه به مسائل بحث شده و موانع موجود، یک راهکار جدید، با قابلیت اطمینان بالا و اقتصادی برای سیلان توان در خطوط، تحت عنوان کنترل سیلان توان توزیع شده (DPFC^۳) معرفی می شود. این تجهیز بعنوان عضو جدیدی از خانواده ادوات FACTS توزیع شده D-FACTS^۴ به حساب می آید در ادامه بخش های بعد ثابت خواهد شد. DPFC علاوه بر اینکه دارای توانایی های UPFC می باشد، معایب UPFC برطرف نموده و دارای قابل اطمینان بالا و هزینه پایین می باشد.

در این مقاله قابلیت DPFC را بعنوان یکی از ادوات FACTS با قابلیت بالا برای رفع تراکم انتقال بررسی شده سپس برای یافتن مکان بهینه DPFC و تنظیم پارامترهای آن از یک روش ترکیبی استفاده شده سپس با استفاده از الگوریتم PSO بهترین مکان DPFC از بین خطوط انتخاب و با هدف کمینه سازی کل هزینه تراکم یا تولید مشخص می شود.

۲- ساختار و اصول عملکرد DPFC

کنترل کننده یکپارچه توان (UPFC) به دلیل هزینه ها و امکان خرابی زیاد، بطور وسیع به کار برده نمی شود. بر این اساس، روش جدیدی جهت افزایش قابلیت اطمینان و کاهش هزینه ها، مورد نیاز است. پس از بررسی حالت های خرابی ادوات FACTS ترکیبی، مشخص گردید که لینک DC مشترک بین مبدل ها باعث کاهش قابلیت تجهیزات می شود. با حذف این لینک DC مشترک، مبدل های موجود در ادوات FACTS، بطور مستقل عمل کرده و در نتیجه قابلیت اطمینان آنها افزایش خواهد می یابد. با حذف لینک DC مشترک همچنین اجازه می دهد تا مفهوم DSSC^۵ در مبدل های سری استفاده شود. در این صورت، قابلیت اطمینان تجهیز جدید به سبب افزونگی که به وسیله مبدل های توزیع شده سری می باشد، بهبود

روش های بسیاری برای کاهش تراکم انتقال وجود دارد. یکی از این روش ها استفاده از ادوات FACTS^۱ می باشد. از آنجا که محدودیت انتقال توان شبکه اساساً با کنترل فلوی توان قابل رفع یا کاهش است، استفاده از ادوات FACTS بسیار مفید به نظر می رسد [2]. در این میان در بسیار از مراجع [3]، [4]، [5]، [6] و...^۲ UPFC به منظور رفع یا کاهش پرشدگی معرفی شده است. اگر چه UPFC دارای توانایی بالایی در کنترل سیلان توان دارند، ولی معمولاً استفاده تجاری ندارند اولین دلیل: هزینه آن است ظرفیت این تجهیز که معمولاً در حدود ۱۰۰ مگاوات آمپر، با ولتاژ ۱۰۰ کیلوولت تا ۵۰۰ کیلوولت است. که نیاز به تعداد زیادی کلیدهای الکترونیک قدرت جهت اتصال بصورت سری و موازی است. به منظور فراهم آوردن ایزولاسیون ولتاژ، استفاده از ترانسفورماتور سه فاز ولتاژ بالا، ضروری است. همچنین ادوات FACTS در محل های مختلف برای اهداف مختلف نصب می شوند، هر یک از آنها منحصر به فرد هستند. در نتیجه هر یک از ادوات FACTS نیاز به هزینه طراحی و ساخت، که منجر به سیکل ساخت طولانی و هزینه های زیادی می شوند. در نهایت ادوات FACTS یک سیستم پیچیده می باشد و نیاز به یک محیط بزرگ برای نصب و راه اندازی دارد. همچنین نیاز به مهندسان آموزش دیده برای تعمیر و نگهداری دارد. دومین دلیل که دارای اهمیت می باشد: امکان خرابی ادوات FACTS ترکیبی می باشد. دو موضوع که باید در نظر گرفته شود عبارتند از: قابلیت اطمینان خود تجهیزات و تاثیر آنها بر امنیت سیستم است. ادوات FACTS ترکیبی یک سیستم پیچیده است، که شامل تعداد زیادی مولفه های اکتیو و پسیو می باشد. که بدون اقدام احتیاط مناسب، احتمال خرابی ادوات FACTS ترکیبی از دیگری جبران سازها زیاد است. به منظور افزایش قابلیت اطمینان مطلوب، استفاده از حفاظت پیچیده (مدار bypass) و افزونگی پشتیبان (ترانس ها و بانک خازنی پشتیبان) همیشه برای تجهیزات FACTS ترکیبی، فراهم می شود که باعث بالا رفتن هزینه ها می شود [7]. همچنین تاثیر امکان خرابی در تجهیزات FACTS ترکیبی نسبت به سایر تجهیزات در سیستم قدرت خیلی بحرانی تر است. بطور مثال خرابی تجهیز شنت، باعث می شود این تجهیز از شبکه قطع شده که مانع جبران سازی توان اکتیو می شود. و همچنین بدلیل اینکه مبدل سری مربوط به تجهیزات FACTS ترکیبی بطور

^۱ - Distributed FACTS

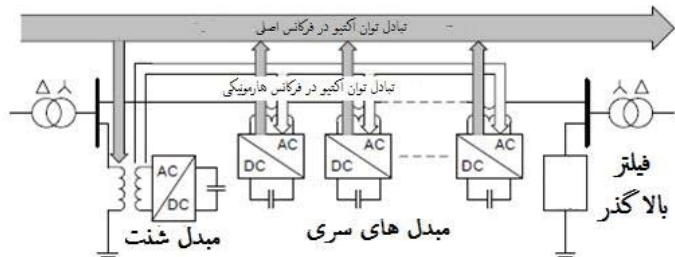
^۵ - Distributed Static Series Compensator

^۱ - Flexible AC Transmission Systems

^۲ - Unified Power Flow Controller

^۳ - Distributed Power Flow Controller

با استفاده از این روش برای DPFC، مبدل شنت می تواند توان اکتیو را از شبکه در فرکانس اصلی جذب کند و این توان را در فرکانس های هارمونیک سوم تزریق کند. این توان اکتیو هارمونیک از طریق خطوط انتقال دارای که دارای مبدل سری می باشد، جاری می شود. با توجه به مقدار مورد نیاز توان اکتیو در فرکانس اصلی، مبدل سری DPFC ولتاژی در فرکانس هارمونیک تولید می کند، به موجب آن توان اکتیو از مولفه های هارمونیک جذب می شود. صرف نظر از تلفات، توان اکتیو تولید شده در فرکانس اصلی مساوی با توان جذب شده در فرکانس هارمونیک می باشد. برای فهمیدن بهتر، شکل (2) نحوه تبادل توان اکتیو در مبدل های شنت و سری DPFC را نشان می دهد. فیلتر بالا گذر در DPFC مولفه فرکانس اصلی را بلوکه کرده و اجازه می دهد مولفه های هارمونیک عبور کنند. بنابراین یک مسیر برگشتی برای مولفه های هارمونیک فراهم می شود. مبدل های شنت و سری، فیلتر بالا گذر و زمین برای جریان هارمونیک یک مسیر حلقه بسته ای را تشکیل می دهند [9].



شکل (2) نحوه تبادل توان اکتیو بین مبدل های DPFC

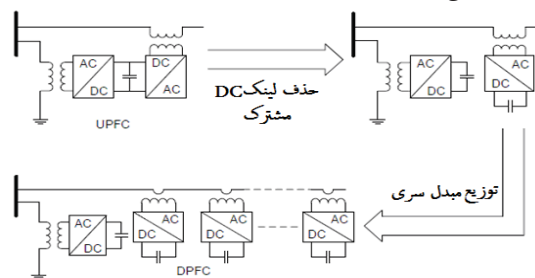
۲.۲ مزایا و محدودیت های DPFC

مزایای DPFC در مقایسه با UPFC به شرح ذیل می باشد:
- توانایی کنترل بالا : DPFC می تواند همه پارامترهای شبکه انتقال را بطور همزمان کنترل کند.

- قابلیت اطمینان : افزودن مبدل های سری موجب افزایش قابلیت اطمینان سیستم بدون افزایش هزینه شده است. علاوه بر این، مبدل های سری و شنت بصورت مستقل از هم کار می کنند و خرابی یکی از آنها تاثیری در مبدل های دیگر ندارد.

- هزینه پایین : ایزولاسیون فاز به فاز ولتاژ برای مبدل سری مورد نیاز نبوده و همچنین مقدار توان هر مبدل سری پایین می باشد و می توان برحسب نیاز جبران سازی، از آن استفاده کرد. اگر سیستم قدرت در حال حاضر نیاز به STATCOM دارد، می توان این سیستم را در صورت نیاز و با هزینه کم تبدیل به DPFC کرد، که در نتیجه هزینه ها پایین می آید [10].

داده شود. علاوه بر این، در مبدل سری توزیع شده با توجه به عدم نیاز به ایزولاسیون ولتاژ زیاد و عدم نیاز به مقدار توان زیاد در هر واحد از بخش سری، از هزینه ها کاسته می شود. با استفاده از دو روش، حذف لینک DC مشترک و توزیع مبدل سری در UPFC، ادوات FACTS ترکیبی جدیدی تحت عنوان کنترل کننده توزیع شده سیلان توان (DPFC) حاصل می شود [9]. که در شکل (1) نشان داده شده است.



شکل ۱- مراحل تغییر از UPFC به DPFC

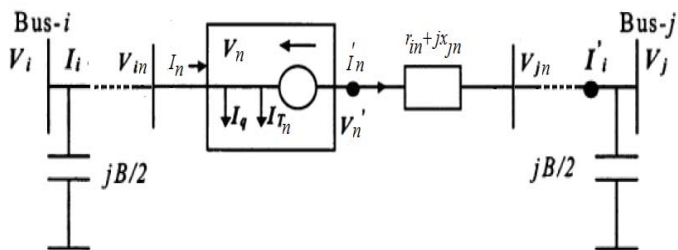
۲.۱ اصول عملکرد DPFC

از آنجاییکه در DPFC از طریق خطوط انتقال یک ارتباط مشترکی از طریق ترمینال های AC مبدل های شنت و سری وجود دارد بنابراین می توان از طریق ترمینال های AC، توان اکتیو را تبادل کرد. این روش بر مبنای تئوری توان مولفه های غیر سینوسی است. با توجه به تجزیه و تحلیل فوریه، ولتاژ و جریان غیر سینوسی می توان مجموع توابع سینوسی در فرکانس و دامنه ها های متفاوت بیان کرد. توان اکتیو ناشی از این ولتاژ و جریان می باشد. زمانیکه انتگرال همه ضرب برداری عبارتها با فرکانس های مختلف صفر هستند، توان اکتیو را می توان بصورت زیر بیان کرد.

$$P = \sum_{i=1}^{\infty} V_i I_i \cos \phi_i \quad \text{معادله (1)}$$

از آنجاییکه V_i و I_i بترتیب ولتاژ و جریان در فرکانس هارمونیک i^{th} است و ϕ_i متناظر با زاویه ولتاژ و جریان می باشد. معادله (1) نشان می دهد که توان های اکتیو در فرکانس های مختلف مستقل از یکدیگر هستند و ولتاژ یا جریان در یک فرکانس تاثیری در توان اکتیو در فرکانس های دیگر ندارد. مستقل از توان اکتیو در فرکانس های مختلف این امکان را می دهد که مبدل بدون منبع توان، می تواند توان اکتیو را در یک فرکانس تولید و این توان را در دیگر فرکانس ها جذب کند.

مدل نشان داده شده است. DPFC دارای سه پارامتر قابل تنظیم می باشد. اندازه ولتاژ V_n و فاز آن ϕ_n در هریک از مبدل های سری و اندازه جریان راکتیو ترانس موازی (تحریک) I_q



شکل (4): مدار معادل هر بخش از DPFC در خط انتقال

منبع ولتاژ سری وارد شده توسط DPFC وظیفه کنترل توان عبور از خط را بر عهده دارد. جریان شاخه موازی (I_q) وظیفه جذب یا تزریق توان راکتیو به باس مورد نظر به منظور بهبود پروفیل ولتاژ شبکه و همچنین بالا بردن ظرفیت انتقال توان اکتیو از خطوط را انجام می دهد. هریک از این پارامترها دارای محدودیت هایی می باشد:

$$\begin{aligned} V_n^{\min} &\leq V_n \leq V_n^{\max} \\ \phi_n^{\min} &\leq \phi_n \leq \phi_n^{\max} \\ I_q^{\min} &\leq I_q \leq I_q^{\max} \end{aligned} \quad (2)$$

با توجه به شکل (3) و (4)، روابط ریاضی برای DPFC به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} I_{shunt} &= I_q + I_{Tt} \\ V_T &= V_1 + V_2 + \dots + V_n \\ Z_T &= Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n \end{aligned} \quad (3)$$

$$Z_T = r_{ij} + jx_{ij}$$

$$I_{Tt} = I_{T1} + I_{T2} + \dots + I_{Tn}$$

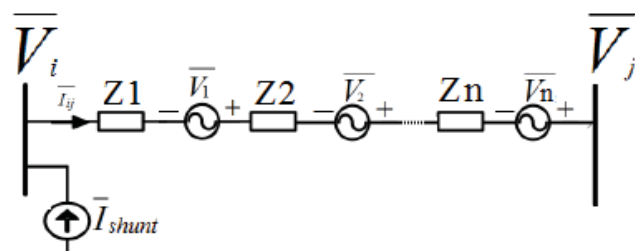
$$I_i = I_{Tt} + I_q + I_i'$$

$$I_{Tn} = \frac{\text{Re}[V_n \times I_n']}{V_{in}}$$

$$V_{in}' = V_{in} + V_n$$

۳. مدل سازی و فرمولاسیون DPFC در معادلات پخش بار بهینه

محاسبات پخش بار در سیستم های قدرت برای ارزیابی وضعیت سیستم در حالت بهره برداری و در شرایط مختلف بارگذاری از مهم ترین امور در مطالعات شبکه قدرت محسوب می شود. بکارگیری ادوات FACTS در سیستم های قدرت به منظور کنترل متغیرهای شبکه قدرت می تواند به عنوان عامل موثر در بهره برداری از شبکه و نیز طراحی شبکه های جدید محسوب شود. برای بررسی دقیق تاثیر ادوات FACTS در شبکه، مدل سازی و فرمول بندی آنها امر ضروری می باشد. یکی از روشهای مدل سازی حالت ماندگار ادوات FACTS در مطالعات پخش بار، روش توان می باشد. این مدل اولین بار توسط Noroozian برای ادوات FACTS سری ارائه شده است [11]. در مرجع [12] جهت مدل سازی UPFC نیز توسعه داده شده است. در این روش امکان مدل سازی هر نوع از ادوات FACTS میسر بوده و این ادوات به توان های اکتیو و راکتیو تزریقی تبدیل می شوند. از طرف دیگر این توانهای تزریقی را می توان مطابق با هر نوع از ادوات FACTS به پارامترهای کنترلی آن وسیله کرد. مزیت عمده مدل تزریق توان این است که در این روش معادلات پخش بار AC دستخوش تغییر زیادی نمی شود. در این مقاله از مدل تزریقی توان DPFC برای مدل سازی شبکه استفاده شده است. در ادامه این بخش مدل سازی DPFC با استفاده از مدل تزریقی توان شرح داده می شود. مدل توان تزریقی ادوات FACTS مدل مناسبی می باشد و از آنجا که این روش مدل سازی ماتریس ادمیتانس شبکه را تغییر نمی دهد. پیاده سازی آن در برنامه های بخش بار بهینه آسان خواهد بود. شکل (3) مدار معادل DPFC نشان داده شده است [13].



شکل (3): مدار معادل DPFC

تاثیر DPFC روی شبکه را می توان توسط منابع ولتاژ سری (DSSC) وارد شده $V_n < \phi_n$ (هر کدام بطور مجزا) و جریان شاخه موازی (ترانس موازی) I_{shunt} مدل کرد که در شکل (4) این

به هر ذره و بهترین شایستگی قبلی مربوط به همسایگان هر ذره، عمل جستجو را در فضای مسأله انجام می دهد. PSO با یک گروه از جوابهای تصادفی (ذره ها) شروع به کار می کند، سپس برای یافتن جواب بهینه در فضای مسأله با به روز کردن نسلها به جستجو می پردازد. هر ذره با دو مقدار که به V_i و X_i که به ترتیب معرف وضعیت مکانی و سرعت مربوط به آمین ذره هستند تعریف می شود. در هر مرحله از حرکت جمعیت، ذره با دو مقدار بهترین به روز می شود [14]. اولین مقدار، بهترین جواب از لحاظ شایستگی^۱ است که تاکنون برای هر ذره بطور جداگانه بدست آمده است، این مقدار p_best نامیده می شود. مقدار بهترین دیگری که توسط PSO به دست می آید، بهترین مقداری است که تا کنون توسط تمام ذره ها در میان جمعیت بدست آمده است، این مقدار، بهترین کلی است و g_best نام دارد. بعد از یافتن دو مقدار p_best و g_best ، هر ذره سرعت و مکان جدید خود را طبق روابط زیر به روز می کند:

$$V_i^{k+1} = W \times V_i^k + C_1 \times rand \times (p_best_i - S_i) + C_2 \times rand \times (g_best_i - S_i) \quad (6)$$

$$S_i^{k+1} = S_i^k + V_i^{k+1} \quad (7)$$

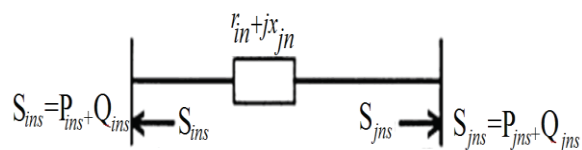
$$W = W_{max} + \frac{(W_{min} - W_{max})}{iterMax} \times iter \quad (8)$$

که لیست متغیرها مطابق جدول (۱) است.

جدول (۱): لیست متغیرهای الگوریتم PSO

V_i^k	سرعت ذره i در تکرار k ام
V_i^{k+1}	سرعت ذره i در تکرار k+1 ام
W	وزن اینرسی
$C_2 = C_1$	ضریب وزنی
S_i^k	مکان فعلی ذره i در تکرار k ام
S_i^{k+1}	مکان فعلی ذره i در تکرار k+1 ام
iter	شماره تکرار فعلی
iter max	ماکزیمم تعداد تکرار
P_best_i	بهترین جواب ذره i از لحاظ شایستگی

مدل توان تزریقی DPFC در شکل (5) نشان داده شده است. معادلات توان عبوری از خط in-jn که DPFC در آن قرار دارد گرفته شده است را می توان به صورت زیر محاسبه کرد:



شکل (5): مدل توان تزریقی هر بخش از DPFC

$$Y_{injn} = \frac{1}{Z_{injn}} = \frac{1}{r_{injn} + jx_{injn}} = (g_{injn} + jb_{injn})$$

$$S_{injn} = P_{injn} + jQ_{injn} = V_{in} \times I_{injn}^* \quad (4)$$

$$S_{jnin} = P_{jnin} + jQ_{jnin} = V_{jn} \times I_{jnin}^*$$

با توجه به روابط (3) و (4) و مدل DPFC در خط انتقال، توان های تزریقی به باس های in-jn در شکل (5) طبق زیر بدست می آید:

(5)

$$P_{ins} = g_{injn} V_n^2 - 2V_{in} V_n g_{injn} \cos(\phi_n - \delta_{in})$$

$$+ V_{jn} V_n [g_{injn} \cos(\phi_n - \delta_{in}) + b_{injn} \sin(\phi_n - \delta_{in})]$$

$$Q_{ins} = V_{in} I_q + V_{in} V_n [g_{injn} \sin(\phi_n - \delta_{in}) - b_{injn} \cos(\phi_n - \delta_{in})]$$

$$P_{jns} = V_{jn} V_n [g_{injn} \cos(\phi_n - \delta_{jn}) - b_{injn} \sin(\phi_n - \delta_{jn})]$$

$$Q_{jns} = -V_{jn} V_n [g_{injn} \sin(\phi_n - \delta_{jn}) - b_{injn} \cos(\phi_n - \delta_{jn})]$$

$$P_{ij} = P_1 + P_2 + \dots + P_n$$

$$Q_{ij} = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$$

$$S_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij} = V_i \times I_{ij}^* = V_i (I_i + jV_i B/2)^*$$

$$S_{ji} = P_{ij} + jQ_{ji} = V_j \times I_{ji}^* = V_j (jV_j B/2 - I_j)^*$$

برای حل مسأله بهینه سازی (OPF) در ترکیب با نرم افزار با

DPFC از نرم افزار Matpower5.0b1 استفاده شده است.

۴. مروری بر الگوریتم PSO

امروزه با بزرگتر شدن مسائل و اهمیت یافتن سرعت رسیدن به پاسخ و جلوگیری از قرار گرفتن در بهینه های محلی از الگوریتم های جستجوی تصادفی استقبال بیشتری می شود. در این مقاله از روش PSO که یکی از جدیدترین روشهای جستجو است استفاده شده است. در این روش با تنظیم مسیر حرکت یک جمعیتی از ذرات در فضای مسأله بر پایه اطلاعات مربوط به بهترین شایستگی قبلی مربوط

^۱ -Fitness

g_best_i	بهترین جواب گروه از لحاظ شایستگی
W_{max}	مقدار اولیه برای وزن اینرسی
W_{min}	مقدار نهایی برای وزن اینرسی

شرط توقف را می توان به چند صورت تعریف کرد، مثلاً بر روی حداکثر تعداد تکرار، یا اینکه ماکزیمم تغییر در بهترین شایستگی برای دو تکرار متوالی کمتر از تلورانس تعریف شده باشد [15].

$$|g_best^{(k+1)} - g_best^{(k)}| \leq \varepsilon \quad (9)$$

$$where = 0.001$$

رابطه (۶) شامل جمع سه عبارت است که عبارت اول نسبتی از سرعت جاری ذره است، به همراه عبارت دوم که متناسب با تفاضل مکان پرند با بهترین موقعیت قبلی آن و عبارت سوم که تفاضل مکان آن با بهترین جواب در میان کل جمعیت است سبب هدایت سرعت جدید ذره به سمت جواب بهینه می شوند. همگرایی مسأله به پارامترهای PSO مانند W و C_1 و C_2 وابسته می باشد. مقادیر C_1 و C_2 را معمولاً برابر و $(C_1 = C_2)$ و در بازه $[0-2]$ در نظر می گیرند. ضریب اینرسی وزنی هم با تغییر توسط رابطه (۸) باعث همگرایی خواهد شد. که به صورت دینامیک در بازه $[0.2-0.8]$ تعریف می شود.

۵. روش ارائه شده برای حل مسأله

در این مقاله دو تابع هدف برای تعیین مکان مناسب DPFC و تنظیم پارامترهای آن در نظر گرفته شده است:

۱- کل هزینه تولید ژنراتورها (Total Generation) TGC (Cost)

۲- کل هزینه تراکم در شبکه، (Total Congestion Cost) که به صورت زیر تعریف می شود:

$$TCC = \sum_{ij=1}^{NL} P_{ij} \times \Delta\rho_{ij} \quad (10)$$

$$\Delta\rho_{ij} = |LMP_i - LMP_j| \quad (11)$$

که در آن TCC، کل هزینه تولید تراکم، که در آن P_{ij} ، توان عبوری از خط ij ، NL، تعداد کل خطوط انتقال شبکه LMP_j و به ترتیب قیمت حاشیه ای توان در باسهای i و j می باشد. به منظور کمتر شدن فضای حل مسأله و بررسی نکردن تمام خطوط شبکه برای جابجایی DPFC از معیار "Congestion Rent

Contribution" استفاده شده است [16]. به عبارت دیگر این روش خطوطی را که قابلیت بیشتری برای انتقال توان دارند برای تأثیر روی امپدانس آنها انتخاب شده است. در این روش با توجه به مقادیر محاسبه شده CCC_{ij} برای هر خط و مرتب کردن آن ها به صورت نزولی تعدادی از خطوط شبکه بعنوان کاندیدا برای نصب DPFC انتخاب می شوند.

$$CC_{ij} = \Delta\rho_{ij} \times P_{ij}$$

$$CCC_{ij} = \frac{CC_{ij}}{TCC} \quad (12)$$

که CC_{ij} کرایه تراکم خط ij نامیده می شود. در این مقاله برای مدیریت تراکم شبکه انتقال از الگوریتم بهینه سازی PSO و پخش بار بهینه AC در ترکیب DPFC استفاده شده است. روش ارائه شده به صورت گام به گام در زیر شرح داده می شود: گام اول: ابتدا برنامه OPF را بدون حضور DPFC نرم افزار Matpower 5.0b1 اجرا میکنیم و مقادیر LMP باس ها و توان عبوری از خطوط شبکه را بدست می آوریم. گام دوم: مقادیر CCC_{ij} را توسط اطلاعات بدست آمده از گام اول برای هر خط محاسبه کرده و با مرتب کردن آن ها خطوط کاندیدا برای قرار گرفتن DPFC را مشخص می کنیم. گام سوم: حالا الگوریتم PSO را همراه با برنامه OPF ترکیب شده با DPFC برای تنظیم پارامترهای DPFC و تعیین محل مناسب آن از بین خطوط بدست آمده از گام دوم بکار می گیریم. جمعیت تولید شده توسط PSO بصورت زیر می باشد:

محل نصب DPFC	V_T	ϕ_T	I_q
--------------	-------	----------	-------

که برای حل مسأله، حدود پارامترهای DPFC را به صورت زیر در نظر می گیریم (مقادیر بر حسب P.U می باشند):

$$P.U \ 0 \leq V_n \leq 0.25 \quad (13)$$

$$\text{rad} \quad 0 \leq \phi_n \leq 2\pi$$

$$-1 \leq I_q \leq 1 \text{ P.U}$$

محل نصب و مقادیر بهینه پارامترهای DPFC با توجه به توابع هدف بدست می آید.

که در این حالت باید به دنبال اولویت های بعدی باشیم که این روش با ارائه لیستی از خطوط این مشکل را حل می کند. از بین 10 خط انتخاب شده با استفاده از الگوریتم PSO مکان مناسب DPFC بر اساس تابع هدف تعریف شده مشخص می شود. نتایج حاصل در جدول (۴) ارائه شده است. جدول (4) لیست اولویت خطوط برای قرار گرفتن DPFC و همچنین پارامترهای آن را بر اساس تابع هدف کل هزینه تراکم نشان می دهد. مطابق جدول (4)، خط 5 به عنوان اولویت اول و بهترین مکان DPFC با کل هزینه تراکم $399.2 \$/hr$ در مقایسه با کل هزینه تراکم $1995.7 \$/hr$ برای حالت بدون حضور DPFC می باشد، اولویت های بعدی برای قرار گرفتن DPFC به ترتیب شامل خطوط ۱۱، ۲، ۴، ۱، ۶، ۲۰، ۱۳، ۷، ۵، ۳ می باشد. در ادامه، جدول (۵) لیست اولویت خطوط برای قرار گرفتن DPFC و همچنین پارامترهای آن را بر اساس تابع هدف کل هزینه تولید ژنراتورها نشان می دهد. مطابق جدول (5)، خط 5 به عنوان اولویت اول و بهترین مکان DPFC با کل هزینه تولید $1982.4 \$/hr$ می باشد، در صورتی که برای حالت بدون حضور DPFC در شبکه این مقدار برابر $7021.1 \$/hr$ می باشد.

خطوط ۱۱، ۲، ۴، ۱، ۶، ۲۰، ۱۳، ۷، ۵، ۳ به ترتیب در اولویت های بعدی برای قرارگیری DPFC قرار دارند. در نهایت با مقایسه جدول های (2) و (4) و (5) مشاهده می شود در خطوط مورد نظریا هدف کاهش هزینه تراکم، مقدار $1596.5 = 1995.7 - 399.2$ هزینه در هر ساعت و با هدف کاهش هزینه تولید مقدار $1982.4 - 7021.1 = 5038.7$ هزینه در هر ساعت صرفه جویی می شود. با توجه به میزان اهمیت هر یک از توابع هدف، مکان مناسب DPFC مشخص می شود.

۶. مطالعه موردی

دو سیستم 14 و 57 باسه IEEE برای نشان دادن تاثیر حضور DPFC در شبکه بررسی شده است. اطلاعات مربوط به بار و شبکه برای هر دو سیستم در [17] آمده است.

۶.۱ سیستم 14 باسه IEEE

این سیستم شامل 20 خط انتقال می باشد که محدودیت های حرارتی برای هر یک از خطوط در [18] آمده است. جدول (2) هزینه کل تراکم، هزینه سوخت و خطوط اضافه بار شده را برای سیستم 14 باسه نشان می دهد. با توجه به جدول (۲) خطوط 1 و 2 دچار پرشدگی شده اند. در جدول (۳) مقادیر CCC_{ij} را برای تمام خطوط شبکه نشان می دهد. مطابق جدول (۳) از بین ۲۰ خط شبکه انتخاب ۱۰ از بین 20 خط شبکه انتخاب 10 خط (خطوط ۲۰، ۴، ۱۱، ۳، ۷، ۵، ۶، ۲، ۱) به عنوان خطوط کاندید برای نصب DPFC کافی می باشد. تعداد خطوط انتخاب شده نیز به اندازه شبکه و تعداد خطوط آن بستگی دارد.

جدول (۲): نتایج حاصل از OPF بدون حضور DPFC برای

سیستم 14 باسه IEEE

Congested line number	Total congestion cost(\$/hour)	Production cost(\$/hour)	Power flow of congested lines(MVA)
4(4-5)	1995.7	7021.1	50
7(7-6)			60

گاهی اوقات به علت وجود برخی محدودیت ها نصب ادوات FACTS در بهترین محل بدست آمده در شبکه امکان پذیر نمی باشد

جدول (۳): مقادیر CCC_{ij} برای سیستم ۱۴ باسه IEEE

line no	CCC_{ij}	line no	CCC_{ij}	line no	CCC_{ij}	line no	CCC_{ij}
۱	0.3053	6	0.1052	11	0.0105	16	0.0009
۲	0.0848	7	0.0101	12	0.0026	17	0.0108
۳	0.2208	8	0.0211	13	0.0098	18	0.0056
۴	0.1195	9	0.0088	14	0.0099	19	0.0018
۵	0.00980	10	0.0105	15	0.0102	20	0.0078

جدول (4) : نتایج حاصل از OPF بر اساس تابع هدف کل هزینه تراکم با حضور DPFC برای سیستم 14 باسه IEEE



Priority no.	V_T	\varnothing_T	I_q	Total congestion cost(\$/hr)	DPFC location
۱	0.218 8	2.3 370	0.2 948	399.2	Line 5
۲	0.211 2	0.9 415	- 0.8701	472.7	Line 7
۳	0.250 0	2.0 955	0.2 853	566.1	Line 13
۴	0.062 7	5.8 676	- 0.7256	612.3	Line 6
۵	0.051 2	2.7 864	0.5 869	743.2	Line 20
۶	0.191 7	1.6 742	0.4 165	876.8	Line 1
۷	0.113 9	1.5 364	0.8 323	938.2	Line 4
۸	0.155 3	2.2 104	0.0 757	1085.7	Line 2
۹	0.051 3	2.0 019	0.4 164	1156.3	Line 11
۱۰	0.063 7	2.1 084	0.2 374	1612.1	Line 3

جدول (5) : نتایج حاصل از OPF بر اساس تابع هدف کل هزینه تولید ژنراتورها با حضور DPFC برای سیستم 14 باسه IEEE

Priority no.	V_T	\varnothing_T	I_q	Total congestion cost(\$/hr)	DPFC location
۱	0.070 1	2.13 35	0.561 2	1982.4	Line 5
۲	0.182 4	2.75 61	0.198 7	2179.7	Line 6
۳	0.258 9	2.60 11	0.498 4	2806.8	Line 1
۴	0.200 2	2.16 62	0.389 1	2841.9	Line 7
۵	0.198 2	1.10 98	0.045 8	2971.4	Line 2
۶	0.216 3	2.78 12	0.397 8	3099.5	Line 20
۷	0.135 6	1.51 94	0.100 1	3383.1	Line 3
۸	0.121 9	1.67 10	0.231 1	4055.8	Line 11
۹	0.152 3	2.26 12	0.019 -9	4221.4	Line 4
۱۰	0.115 4	1.87 31	0.097 8	4341.7	Line 13



18(4-16)	5153.1	۵۰۸۱۰	0۴
23(8-9)			60

۶.۲ سیستم 57 باسه IEEE

این سیستم شامل 80 خط انتقال می باشد که محدودیت های حرارتی برای هر یک از خطوط این سیستم به این صورت می باشد [20]: حد 50MVA برای خطوط ۱۶،۱۵،۲،۱۸ و ۱۸ حد 170MVA برای خط ۸، حد 40MVA برای خط ۱۷ و حد 70MVA برای خط ۲۲ و حد حرارتی سایر خطوط انتقال 500MVA در نظر گرفته شده است. جدول (۶) کل هزینه تراکم، کل هزینه تولید ژنراتورها و خطوط اضافه بار شده را برای سیستم 57 باسه IEEE نشان می دهد. با توجه به جدول (6)، خطوط 1 و 2 دچار پرشدگی شده اند. در جدول (7) مقادیر CCC_{ij} برای تمام خطوط سیستم 57 باسه IEEE آمده است. مطابق جدول (۷) از بین 80 خط این شبکه، تنها 20 خط (خطوط ۱۷، ۲۲، 5۸، ۱۶، ۱۵، ۱۰، ۴۱، ۹۱۲، ۶۰، ۷۱، ۷۲، ۱۱، ۶۲، ۲۷، ۶۸، ۳۰۶) به عنوان خطوط کاندید برای نصب DPFC انتخاب شده اند.

جدول (۶): نتایج حاصل از OPF بدون حضور DPFC برای

سیستم 57 باسه IEEE

Congested line number	Total congestion cost(\$/hour)	Production cost(\$/hour)	Power flow of congested lines(MVA)
-----------------------	--------------------------------	--------------------------	------------------------------------

جدول (8) لیست اولویت خطوط برای نصب DPFC همچنین پارامترهای آن را بر اساس تابع هدف کل هزینه تراکم نشان می دهد. مطابق جدول (5)، خط 9 به عنوان اولویت اول و بهترین مکان DPFC با کل هزینه تراکم 1258.7\$/hr می باشد و خطوط ۱۲ و ۱۶ به ترتیب در اولویت های دوم و سوم قرار دارند. در صورتی که مطابق جدول (6)، این مقدار برای حالت بدون حضور DPFC برابر 5153.1 \$/hr می باشد. در ادامه، جدول (9) مقادیر پارامترهای DPFC و همچنین لیست اولویت خطوط بر اساس تابع هدف کل هزینه تولید ژنراتورها، برای نصب DPFC را نشان می دهد. مطابق جدول، خطوط شماره ۸، ۲۲ و ۲۸ به عنوان سه اولویت اول برای نصب DPFC انتخاب شده اند. خط 18 با هزینه کل تولید 40200\$/hr در مقایسه با کل هزینه تولید 41921 \$/hr برای حالت بدون حضور DPFC به عنوان بهترین خط انتخاب می شود. با مقایسه جدول های (6) و (8) و (9) مقدا هزینه مطابق زیر می باشد: مقدا هزینه صرفه جویی شده با هدف کمینه کردن کل هزینه تولید ژنراتورها: 41200 - 50810 = 9610 \$/hr

مقدا هزینه صرفه جویی شده با هدف کمینه کردن کل هزینه تراکم:

$$5153.1 - 1259.7 = 3893.4 \text{ $/hr}$$

جدول (7): مقادیر CCC_{ij} برای سیستم 57 باسه IEEE

line no	CCC _{ij}	line no	CCC _{ij}	line no	CCC _{ij}	line no	CCC _{ij}
۱	0.0136	2۱	0.0018	4۱	0.0199	6۱	0.0009
۲	0.0185	۲2	0.2483	42	0.0017	62	0.0003
۳	0.0130	2۳	0.0030	4۳	0.0011	6۳	0.0006
۴	0.0065	2۴	0.0039	4۴	0.0006	6۴	0.0057
5	0.0106	25	0.0065	45	0.0001	65	0.0007
6	0.0066	26	0.0052	46	0.0020	66	0.0078
7	0.0466	27	0.0075	47	0.0008	67	0.0006
8	0.1365	28	0.0075	48	0.0019	68	0.0008
9	0.0334	29	0.0024	49	0.0016	69	0.0079
10	0.0198	30	0.0002	50	0.0049	70	0.0128
11	0.0164	31	0.00003	51	0.00004	71	0.0003
12	0.0190	32	0.000004	52	0.000006	72	0.0128



13	0.0007	33	0.0102	53	0.0011	73	0.0010
14	0.0023	34	0.0113	54	0.0019	74	0.0043
15	0.0353	35	0.0016	55	0.0066	75	0.0026
16	0.0293	36	0.0008	56	0.0019	76	0.0012
17	0.1818	37	0.0019	57	0.0011	77	0.0010
18	0.0025	38	0.0038	58	0.0045	78	0.0012
19	0.0002	39	0.0010	59	0.0029	79	0.0017
20	0.0002	40	0.0031	60	0.0111	80	0.0037

جدول (۸): نتایج حاصل از OPF بر اساس تابع هدف کل هزینه تراکم با حضور DPFC برای سیستم 57 باسه IEEE

Priority no.	V_T	δ_T	I_q	Total congestion cost(\$/hr)	DPFC location
۱	0.1120	1.5996	0.5138	1258.1	Line 28
۲	0.1589	1.8914	0.6815	1523.3	Line 16
3	0.1086	2.6087	0.6953	1810.2	Line 7
۴	0.2600	1.8012	0.6823	1973.1	Line 22
5	0.1558	3.1810	0.7586	2187.6	Line 27
6	0.2498	2.2452	0.6282	2201	Line 11
7	0.0387	3.8439	0.5600	2221	Line 5
8	0.1990	1.3610	0.4095	2240.2	Line 71
9	0.2500	2.4065	0.3389	2289.1	Line 12
10	0.2659	1.1290	0.6021	2302.8	Line 10
11	0.1357	1.9730	0.6052	2336	Line 69
12	0.0296	2.3467	0.2014	2385.3	Line 41
13	0.1839	1.9253	0.0279	2448.5	Line 15
14	0.1001	1.8745	0.5362	2571.6	Line 9
15	0.1555	1.8951	0.5829	2687.1	Line 8
16	0.0332	2.2543	0.3765	2803.9	Line 60
17	0.1480	1.7643	0.604	2849.5	Line 66
18	0.0599	2.2645	0.4089	2641.2	Line 2
19	0.1980	2.1285	0.4910	3162.2	Line 17
20	0.0469	2.2581	0.2041	3979.3	Line 70

جدول (9): نتایج حاصل از OPF بر اساس تابع هدف کل هزینه تولید ژنراتورها با حضور DPFC برای سیستم 57 باسه IEEE

Priority no.	V_T	δ_T	I_q	Total congestion cost(\$/hr)	DPFC location
۱	0.2409	2.4977	0.401	41200	Line 22
۲	0.2326	2.1086	0.320	41941	Line 8
3	0.1673	2.2021	0.438	41972	Line 28
۴	0.2189	2.2864	0.687	42984	Line 72



5	0.2659	1.5965	0.499	43699	Line 60
6	0.1872	2.1201	0.323	43790	Line 10
7	0.2666	2.1023	-0.19	43800	Line 15
8	0.2423	2.0492	0.218	45207	Line 7
9	0.2081	2.5981	0.412	45397	Line 12
10	0.2419	2.5123	0.231	45457	Line 5
11	0.2310	2.6301	0.466	46586	Line 16
12	0.2559	1.9838	0.401	47688	Line 69
13	0.1883	2.2445	0.674	47866	Line 2
14	0.2321	1.7532	0.421	48413	Line 66
15	0.1200	2.3790	0.869	48525	Line 9
16	0.1800	1.5839	0.823	48619	Line 70
17	0.1021	2.4985	-0.41	48754	Line 17
18	0.1410	2.7193	0.227	48673	Line 11
19	0.0867	0.2979	0.121	49701	Line 41
20	0.1209	1.9956	0.219	49880	Line 17

system by a New advanced Heuristic method", *International Journal on —Technical and Physical Problems of Engineering*, ISSN 2077-3528, December 2010.

[7] A. K. Verma, A. Srividya, and B. I. C. Deka. "Impact of a FACTS controller on reliability of composite power generation and transmission system". *Electric Power Systems Research*, 2004.

[8] Zhihui Yuan, Sjoerd W.H de Haan, Braham Frreira and Dalibor Cevoric "A FACTS Device: Distributed Power Flow Controller (DPFC)" *IEEE Transaction on Power Electronics*, vol.25, no.10, October 2010.

[9] Zhihui Yuan and Dalibor "A FACTS Device: Distributed Power-Flow Controller (DPFC)" *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, VOL. 25, NO. 10, OCTOBER 2010

[10] Wenchao Song, Xiaohu Zhou and Zhigang Liang "Modeling and Control Design of Distributed Power Flow Controller based-on Perphase control" *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, VOL. 4, NO. 3, OCTOBER 2011

[11] M. Noorozian, G. Andersson, "Power Flow Control by Use of Controllable Series Component", *IEEE, PES Summer Meeting, Seattle, July 1992*.

[12] A. Nabavi-Niaki, M.R. Iravani, "Steady State and Dynamic Models of Unified Power Flow Controller for Power System Studies", *IEEE, PES Winter Meeting 1996*.

۷. نتیجه گیری

از آنجا که ادوات FACTS بویژه UPFC، شرایط و امکان کنترل پارامترهای مؤثر بر توان عبوری از خطوط را فراهم می سازند، ولی به دلیل هزینه بسیار بالا و قابلیت اطمینان این تجهیزات، معمولاً استفاده تجاری ندارد. در این مقاله با توجه به موانع موجود و مسائل بحث شده، یک راهکار جدید، با قابلیت اطمینان بالا و اقتصادی برای سیلان توان در خطوط، تحت عنوان کنترل سیلان توان توزیع شده (DPFC) معرفی گردید. در ادامه از یک روش ترکیبی برای تنظیم بهینه پارامترهای DPFC و تعیین مکان مناسب آن برای کاهش هزینه تراکم انتقال و یا کاهش هزینه تولید ژنراتورها در سیستمهای قدرت استفاده شد. سپس نتایج حاصل از بکارگیری این روش بر روی دو سیستم نمونه 14 و 57 باس IEEE در دو حالت با و بدون حضور DPFC در شبکه باهم مقایسه شد. نتایج بدست آمده نشان دهنده قابلیت بالای DPFC برای کنترل فلو عبوری از خطوط انتقال می باشد.

۸- منابع

- [1] فتاحی می آبادی عباس، احسان مهدی، "مدیریت پرشدگی خطوط انتقال در سیستمهای قدرت تجدید ساختار شده"، نشریه علمی برق، سال شانزدهم، شماره 37
- [2]. S. Phichaisawat, S. H. Song, X. L. Wang, X. F. Wang, "Combined Active and Reactive Congestion Management with FACTS Devices", *Electric Power Component and System*, 30:1195-1205, 2002, Taylor & Francis Group.
- [3] H. A. Abdelsalam, G.E.M. Aly, M. Abdelkrim, K.M. Shebl, "Optimal Location of the Unified Power Flow Controller in Electrical Power systems", *Power-Engineering*, 2004, LESCOPE04, 2004 large Engineering systems conference on 28-30 July 2004, pp.41-46.
- [4]. M.Kowsalya, K.K.Ray, Udai Shipurkar and Saranathan, "Voltage Stability Enhancement by Optimal Placement of UPFC" *Journal of Electrical Engineering & Technology Vol. 4, No. 3, pp. 310~314, 2009*
- [5] H. Barati, M. Ehsan and M. Fotuhi-Firuzabad, "Location of Unified Power Flow Controller and its Parameters Setting for Congestion Management in Pool Market Model Using Genetic Algorithm", *Power Electronics, Drives and Energy System*, 12- 15 Dec. 2006 Page(s):1 – 7.
- [6] R.Jahani H.A.Shayanfar N.M.Tabatabaei J. Olamaei, "Optimal placement of UPFC power