

جایابی بهینه STATCOM به منظور کنترل ولتاژ با استفاده از روش های تقسیم بندی شبکه و

الگوریتم اجتماع ذرات فازی اصلاح شده

مصیب برناپور^۱، اسکندر قلی پور^۲ و محمدرضا اسماعیلی^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه اصفهان- اصفهان- ایران

mbornapour@eng.ui.ac.ir

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه اصفهان- اصفهان- ایران

e.gholipour@eng.ui.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه اصفهان- اصفهان- ایران

m.r.ismaili@eng.ui.ac.ir

چکیده: در این مقاله ابتدا با استفاده از یک روش فازی (C-Means)، سیستم قدرت به نواحی مختلف تقسیم گردیده تا به وسیله کنترل کننده های محلی از پخش اغتشاش بین نواحی آن جلوگیری کند. یک روش کنترل ولتاژ ثانویه بر اساس الگوریتم های بهینه سازی برای پیدا کردن باس های کترلی (باس هایی که جبران کننده ها در آن ها برای کنترل ولتاژ نصب می شوند) ارائه شده است. سپس تعدادی از باس ها به عنوان باس های کترلی انتخاب شده اند. الگوریتم کترلی یک کنترل کننده غیرمتمرکز است که سعی می کند مانع تخطی ولتاژ بر اثر تغییرات بار و اغتشاشات شود. در انتها این کترلر غیرمتمرکز به یکی از ادوات FACTS (STATCOM) اعمال و نتیجه روی شبکه ۱۱۸ باس IEEE بررسی شده است. نتایج بدست آمده نشان دهنده عملکرد مناسب الگوریتم تقسیم بندی و انتخاب باس های کترلی برای تنظیم ولتاژ و جلوگیری از پخش اغتشاشات بین نواحی مختلف است. **واژه های کلیدی:** الگوریتم بهینه سازی اجتماع ذرات فازی اصلاح شده، الگوریتم بخش بندی FCM، کنترل ولتاژ شبکه، STATCOM

۱- مقدمه

قسمت های مختلف سیستم های قدرت به چالش کشیده است. سیستم های قدرت هوشمند جدید نیازمند تنوع در ایجاد پیشرفت در فراساختار مانند مانیتورینگ، ارتباطات، حفاظت و کنترل هستند. از طرفی روش های کنترل برای سیستم غیرخطی چند ورودی چند خروجی در مقیاس بالا، موجب ایجاد بار سنگین محاسباتی شده است. بعلاوه، روش های سنتی بهینه سازی از لحاظ محاسباتی غیرقابل قبول و یا نامناسب شده اند. ساختار سیستم های کترلی بر پایه کنترل غیرمتمرکز به منظور کاهش پیچیدگی محاسباتی و مدیریت مقدار زیادی از داده های توزیع شده و مسائل جفت شدگی میان زیرسیستم ها مورد توجه قرار گرفته است.

امروزه سیستم های قدرت از یک ساختار سنتی به سمت سیستم های هوشمند در حال توسعه هستند. تغییر در ساختار سیستم های قدرت، تکنولوژی ها و الگوریتم های جدید را در

^x تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۰۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۲۲

نام نویسنده مسئول: اسکندر قلی پور

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اصفهان - دانشگاه اصفهان

- دانشکده فنی مهندسی

مدل ارائه شده است [۱۶-۱۱]. کاموا و همکارانش یک روش تقسیم بندی را بر اساس یک الگوریتم خوشه بندی که در آن خوشه ها در اطراف باس های موجود به نام باس-مدیود^۳ جمع شده اند، ارائه داده اند [۱۲]. آن ها این روش را روی یک شبکه واقعی (هیدرو-کبک) با مشخصات واقعی جغرافیایی و دینامیک سیستم پیاده سازی کرده اند [۱۳].

در مقاله ی حاضر، روش فازی C-means سیستم قدرت را به نواحی کوچک تر به منظور اجتناب از رخداد های آشپاری تقسیم می کند. این شبکه به نواحی که برای داشتن حداقل برهم کنش طراحی شده اند، تقسیم شده است و بنابراین هرگونه اغتشاش در یک ناحیه خاص نمی تواند به خوبی به نواحی دیگر منتقل شود. انتخاب باس های کنترلی در هر ناحیه برای به حداکثر رساندن قابلیت بارگیری سیستم قدرت با تخصیص دادن دستگاه STATCOM به این باس ها در نواحی تعیین شده سیستم ۱۱۸-باس IEEE با استفاده از یک روش بهینه سازی ارائه شده است [۱۷].

در این مقاله از الگوریتم تکاملی اجتماع ذرات فازی اصلاح شده جهت حل مسئله مورد بررسی استفاده شده است. این الگوریتم نسخه اصلاح شده و بهبود یافته الگوریتم بهینه سازی اجتماع ذرات^۴ است. از الگوریتم PSO تاکنون برای حل مسائل بهینه سازی مختلف در زمینه سیستم های قدرت استفاده شده است [۱۸-۲۰].

ادوات FACTS می توانند کارایی شبکه های موجود را با توزیع دوباره الگوهای جریان خط در مسیری که محدودیت های دمایی ایجاد مشکل نمی کنند، بهبود بخشند؛ انجام این امر، نیازمندی های قراردادی بین سهامداران شبکه و افزایش قابلیت بارگیری سیستم را موجب می شود. از نقطه نظر حالت ماندگار، ادوات FACTS با اعمال و یا جذب قدرت واکنشی عمل می کنند که موجب افزایش یا کاهش ولتاژ و کنترل امپدانس سری خطوط انتقال و یا تغییر زاویه فاز می شود.

مزایای این دستگاه ها شدیداً به شکل، اندازه، تعداد و محل استقرار آن ها در شبکه ی قدرت بستگی دارد. در روش بهینه سازی که از الگوریتم اجتماع ذرات فازی اصلاح شده^۴ استفاده شده است، فرآیند جایگذاری برای تعداد متفاوتی از STATCOM ها به منظور بیشینه نمودن قابلیت بارگیری

مهرجردی و همکارانش، کنترل کننده های غیرمتمرکز را در کنترل ولتاژ ثانویه به منظور پیشگیری از زیاد شدن اغتشاش در سیستم های قدرت ارائه داده اند. آن ها کنترل کننده را بر روی باس هایی که به عنوان حساس ترین باس ها در میان باس های یک منطقه مشابه هستند، نصب می نمایند [۱].

اکوینو لوگو و همکارانش یک الگوریتم بهینه سازی به منظور کنترل منابع توان راکتیو در سیستم توزیع ارائه داده اند. در این مقاله، الگوریتم های تکاملی به منظور اجرای الگوریتم های کنترلی غیرمتمرکز مورد استفاده قرار گرفته اند [۲]. جایگزینی سیستم های کنترل ولتاژ متمرکز با فن های غیرمتمرکز دارای مزایای زیادی مانند امکان سنجی عملی، سهولت سخت افزار، پیاده سازی و کم هزینه بودن هستند.

روش های متعددی برای طراحی یک SVC مطرح شده اند [۳-۶]. سیستم های چند عامل^۱ در سیستم های بزرگ به منظور مقابله با پیچیدگی سیستم های قدرت مورد استفاده قرار گرفته اند [۷-۹]. شنگ و همکارانش یک الگوریتم تنظیم ولتاژ ثانویه را بر اساس MAS ارائه داده اند [۱۰]. در شرایط اضطراری، این الگوریتم موجب افزایش توانایی سریع و هماهنگ کنترل توان راکتیو و ولتاژ می شود.

در بعضی از سیستم های انتقال شبکه قدرت مانند خطوط شبکه هیدرو-کبک^۲ بارها دور از تولید هستند و هنگامی که بار شبکه افزایش می یابد، تثبیت ولتاژ بسیار مشکل خواهد بود. این موضوع باعث می شود که بدون سیستم کنترل ولتاژ، امنیت و کیفیت شبکه به مخاطره خواهد افتاد.

مقاله ی حاضر به بررسی و تحلیل استفاده از STATCOM برای سیستم های قدرت بر اساس الگوریتم قسمت بندی و الگوریتم کنترل غیرمتمرکز تکاملی می پردازد. این روش با حفظ ولتاژها در یک دامنه تعریف شده برای همه باس ها، به دنبال تغییر در شرایط بهره برداری، به ارائه ی یک سیستم تنظیم ولتاژ کارا و امن برای سیستم های قدرت می پردازد. این روش به منظور حفظ ولتاژ باس ها (تا جایی که ممکن است نزدیک به میزان مرجع ناحیه ای شان باشد)؛ خصوصاً هنگامی که به قدرت بالا نیاز است مورد استفاده قرار می گیرد.

روش های متفاوتی برای شناسایی بخش ها و کاهش

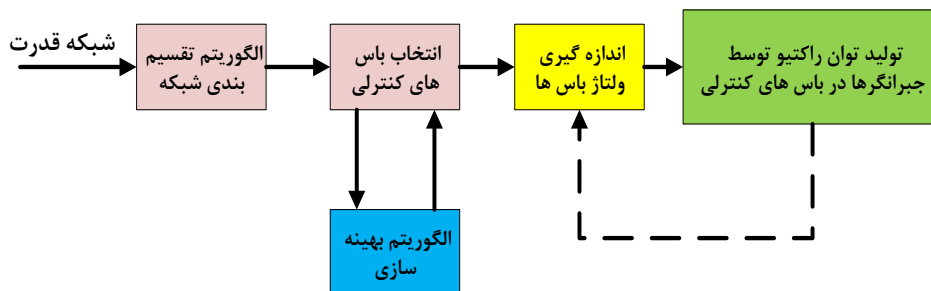
شکل مشاهده نمود، سیستم قدرت توسط یک الگوریتم هوشمند تقسیم‌بندی شده است. سپس تعداد پاس‌های مشخص شده به‌عنوان پاس‌های کنترلی در هر ناحیه (که جبران‌کننده‌ها در این پاس‌ها نصب می‌شوند) انتخاب می‌شوند تا ولتاژها را در نواحی مختلف کنترل نمایند. انتخاب پاس کنترلی می‌تواند با استفاده از الگوریتم‌های مختلفی انجام شود. در این مقاله یک الگوریتم بهینه‌سازی به‌منظور انتخاب پاس‌های موردنظر برای نصب المان‌های کنترلی بر روی آن‌ها در نظر گرفته شده است. ابتدا ولتاژ پاس‌ها بررسی تا مشخص شود آیا آن‌ها در محدوده‌ی موردنظر هستند، سپس در صورت وجود انحراف در ولتاژ پاس‌های یک ناحیه، کنترل‌کننده‌ی نصب‌شده بر روی پاس‌ها عمل می‌کند و قدرت راکتیو مورد نیاز را به ناحیه اعمال می‌کند.

شبکه، توسعه یافته است. مناطق بهینه و مقادیر داده‌شده STATCOM در نواحی انتخاب‌شده سیستم ۱۱۸ باسه IEEE به‌وسیله یک‌روند بهینه‌سازی تعیین می‌شود.

کنترل‌کننده‌ها به‌صورت خاص برای هر ناحیه که قدرت راکتیو مورد نیاز را به درون ناحیه‌ی دارای اغتشاش و تغییرات ولتاژ ناحیه‌ای تزریق می‌کند، طراحی شده است. این روش برای سیستم ۱۱۸-باسبه IEEE دارای سه ناحیه و کنترل‌کننده‌های نصب‌شده بر روی پاس‌های کنترلی به‌منظور حذف اضافه ولتاژ در سیستم به‌کاربرده شده است.

۲- فرموله کردن مسئله

شکل (۱) نشان‌دهنده دیاگرام عمومی سیستم قدرت بر اساس الگوریتم تقسیم‌بندی است. همان‌گونه که می‌توان در این



شکل (۱): دیاگرام عمومی سیستم قدرت بر اساس الگوریتم تقسیم‌بندی

حرکت تجمعی پرندگان یا انواع ماهیان، برای یافتن غذا، اقدام به طراحی الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات کردند. این الگوریتم که به نام‌های الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات و الگوریتم پرندگان نیز مشهور است، یکی از الگوریتم‌های موفق در زمینه بهینه‌سازی پیوسته و گسسته بوده است.

در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های تکاملی، مزیت‌های الگوریتم PSO، عبارت‌اند از:

- محسوس بودن مفاهیم الگوریتم
- پیاده‌سازی آسان
- قابلیت کنترل و تنظیم پارامترهای آن
- نیاز به حافظه اندک
- قابلیت جستجوی تصادفی سراسر در کل فضای

مسئله

۳- طراحی کنترل‌کننده‌های STATCOM با استفاده از الگوریتم پیشنهادی اجتماع ذرات فازی اصلاح شده

مسئله مورد بررسی یک مسئله پیچیده بهینه‌سازی است و به همین دلیل در این مقاله از روش جدیدی مبتنی بر الگوریتم بهبود یافته بهینه‌سازی اجتماع ذرات برای حل مسئله استفاده شده است. این روش الگوریتم اجتماع ذرات فازی اصلاح شده نام‌گذاری می‌گردد. در ادامه، ابتدا اصول کلی روش بهینه‌سازی اجتماع ذرات توضیح داده شده و سپس روش پیشنهادی ارائه خواهد شد.

توضیح اجمالی الگوریتم PSO

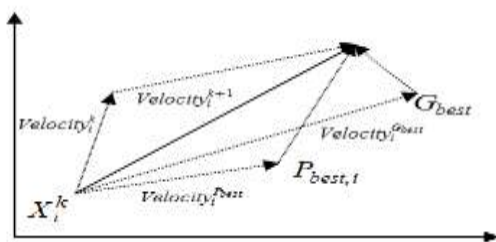
در سال ۱۹۹۵، Kennedy و Eberhart با ایده گرفتن از

بردار موقعیت نیز توسط رابطه زیر مکان جدید خود را به دست می آورد.

$$X_i^{k+1} = Velocity_i^{k+1} + X_i^k \quad (۳)$$

در روابط بالا ω ، ضریب وزنی، c_1, c_2 ضرایب یادگیری و $rand(.)$ یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱ است. در ضمن k شماره تکرار جاری است.

شکل (۲) اساس کار الگوریتم PSO را به تصویر می کشد.



شکل (۲): اساس کار الگوریتم PSO

با وجود مزیت های PSO، عملکرد این الگوریتم وابستگی زیادی به پارامترهایش دارد و اغلب از افتادن در نقطه بهینه محلی و همگرایی سریع رنج می برد. به منظور غلبه بر این مشکلات و بهبود عملکرد الگوریتم، روش های بسیاری وجود دارد که در زیر به آن ها اشاره می کنیم. در این پروژه برای غلبه بر مشکلات PSO، اصلاحات زیر پیشنهاد می شود.

تنظیم ضریب وزنی با استفاده از روش تطبیقی فازی همان طور که در رابطه (۲) دیده می شود پارامتر قابل تنظیم ω ، تأثیر زیادی روی عملکرد الگوریتم دارد. ضریب وزنی ω به منظور کنترل اثر حافظه سرعت های گذشته روی سرعت های کنونی استفاده می شود. انتخاب مناسب ω ، می تواند یک تعادل بین جستجوی نقطه بهینه کلی و نقطه بهینه محلی فراهم نماید.

روش های مختلفی جهت تعیین این پارامتر وجود دارد، انتخاب ضریب وزنی ثابت، کاهش خطی ω و یا انتخاب تصادفی ω از روش های موجود در مقالات است.

در حالت کاهش خطی ضریب وزنی از رابطه زیر استفاده می شود.

$$\omega = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min} / Iter_{\max}) * Iter \quad (۴)$$

الگوریتم PSO یک الگوریتم جستجوی سراسر است و در مقایسه با دیگر الگوریتم ها با دارای سرعت بالاتری است و در تعداد تکرارهای کمتری به پاسخ بهینه همگرا می شود. با اصلاحیه هایی که در این مقاله بر روی این الگوریتم انجام شده است، قدرت و عملکرد این الگوریتم به نحو مطلوبی بهبود یافته است.

با توجه به مزایای فوق، الگوریتم PSO برای حل مسائل مختلف بهینه سازی سیستم های قدرت مورد توجه زیادی قرار گرفته است. به عنوان مثال در طراحی بهینه پایدار کننده های سیستم های قدرت، تخمین حالت سیستم های توزیع، مدل های پیش بینی بار، مدیریت بهره برداری بهینه شبکه های توزیع و مسائل بسیار دیگری از این الگوریتم استفاده شده است.

الگوریتم PSO، در واقع متشکل از ذراتی است که در فضای جستجو حرکت می کنند و هر ذره بهترین تجربه شخصی خود را اعم از بردار موقعیت و نیز بردار سرعت خود حفظ کرده و از طرفی همه اجتماع ذرات نیز به نوبه خود بهترین تجربه جمعی را ساخته و حفظ می کنند [۲۱]. فرض کنید X و $Velocity$ به ترتیب بردارهای مختصات موقعیت و سرعت ذرات موجود در یک فضای جستجو باشند. بنابراین می توان i امین عضو گروه را در یک فضای n بعدی با دو مشخصه زیر معرفی کرد.

$$X_i = [x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n}] \quad (۱)$$

$$Velocity_i = [v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,n}]$$

آنچه در این الگوریتم بردار سرعت خوانده می شود، در واقع حاصل از سه عامل است که شامل سرعت در گام قبل، بهترین تجربه شخصی و بهترین تجربه جمعی است که به روزرسانی شده و سرعت بعدی را می سازند.

سرعت بعدی با توجه به رابطه زیر به دست می آید [۲۲]:

$$Velocity_i^{k+1} = \omega * Velocity_i^k + c_1 * rand(.) * (P_{best,i} - X_i^k) + c_2 * rand(.) * (G_{best} - X_i^k) \quad (۲)$$

بهترین جواب موردنظر FV_{max}

بدترین جواب موردنظر FV_{min}

متغیر خروجی در این سیستم، تصحیح در ضریب وزنی ($\Delta\omega$) است برای تصحیح ضریب وزنی به هردو مقدار مثبت و منفی $\Delta\omega$ نیازاست، بنابراین بازه تغییرات $\Delta\omega$ بین $[-0.1, 0.1]$ در نظر گرفته می شود. تعیین مقدار ضریب وزنی توسط رابطه زیر بیان می شود.

$$\omega^{k+1} = \omega^k + \Delta\omega \quad (6)$$

توابع عضویت برای ورودی و خروجی ها در شکل (۴) نشان داده شده است. برای توابع عضویت متغیرهای شناسایی تعریف می کنند که این متغیرها برای ورودی ها به صورت متغیرهای بزرگ ۶، متوسط ۷ و کوچک ۸ و برای خروجی ها، مثبت ۹، منفی ۱۰ و صفر ۱۱ تعریف می شوند.

۹ قاعده فازی به منظور تصحیح ضریب وزنی در جدول (۱) آورده شده است. هر قاعده یک نقشه از فضای ورودی به فضای خروجی است. به طور مثال:

اگر ضریب وزنی ω متغیر شناسایی متوسطی و NFV متغیر شناسایی کوچکی داشته باشد آنگاه تصحیح ضریب وزنی منفی پیدا می کند. به همین ترتیب به کمک قواعد فازی، متغیر خروجی را می سازیم.

در رابطه فوق داریم

ω_{max} ضریب وزنی حداکثر

ω_{min} ضریب وزنی حداقل

$Iter_{max}$ تکرار حداکثر

$Iter$ شمارنده تکرار

ضریب وزنی بزرگ قابلیت جستجوی سراسر الگوریتم را بالا می برد و ضریب وزنی کوچک باعث همگرایی سریع تر می شود. بنابراین تعیین یک ضریب وزنی خاص که در همه ی شرایط خوب کار کند غیرممکن است. تطبیقی نمودن ضریب وزنی با استفاده از تکنیک فازی یک راه مناسب برای حل این مشکل است. در ادامه به نحوه ی تعیین ضریب وزنی می پردازیم.

در این مقاله یک سیستم فازی برای تطبیق ضریب وزنی با ورودی و خروجی طراحی شده است. متغیرهای ورودی در این سیستم عبارت اند از:

مقدار نرمالیزه شده برازندگی^۰

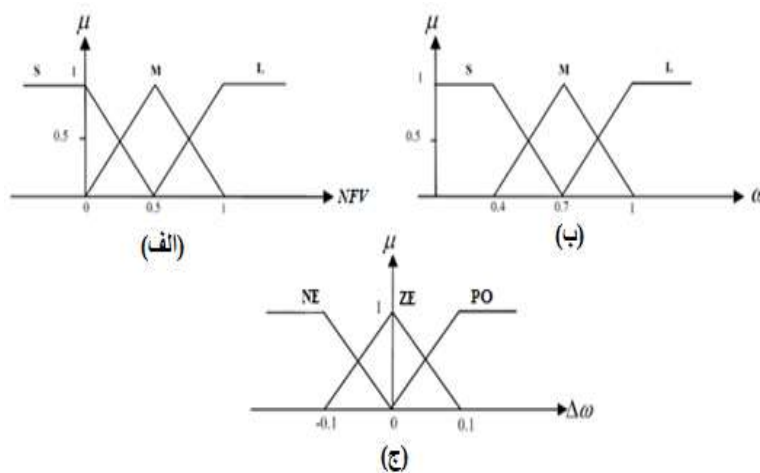
ضریب وزنی ω

مقدار نرمالیزه شده برازندگی با توجه به رابطه زیر به دست می آید.

$$NFV = \frac{(FV - FV_{min})}{(FV_{max} - FV_{min})} \quad (5)$$

در رابطه فوق:

FV بهترین جواب به دست آمده در هر مرحله اجرا



شکل (۳): توابع عضویت برای ورودی ها و خروجی سیستم فازی

جدول (۱): قواعد فازی تصحیح ضریب وزنی

انگانه	اگر		قواعد فازی
	NFV	ω	
$\Delta\omega$	S	S	۱
ZE	S	M	۲
NE	S	L	۳
PE	M	S	۴
ZE	M	M	۵
NE	M	L	۶
PE	L	S	۷
ZE	L	M	۸
NE	L	L	۹

می شود.

$$x_{new,i}^k = \begin{cases} x_{mut,i}^k & \text{if } rand1(.) \leq rand2(.) \\ x_{swam,i}^k & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۸)$$

در روابط فوق داریم:

$$x_{mut,i}^k: \text{I آمین بردار جهش ساخته شده در تکرار } K \text{ آم}$$

$$x_{mut,i}^k: \text{درایه } I \text{ آم بردار جهش ساخته شده در تکرار } K \text{ آم}$$

$$x_{swam,i}^k: \text{درایه } I \text{ آم بردار ذرات در تکرار } K \text{ آم}$$

$$x_{new,i}^k: \text{درایه } I \text{ آم بردار جدید ساخته شده در تکرار } K \text{ آم}$$

$$rand1(.), rand2(.), rand(.): \text{ عدد تصادفی بین } 0 \text{ و } ۱$$

$$N_{swam}: \text{ تعداد اعضا (ذرات)}$$

در آخر برای تمامی جواب های به دست آمده، مقدار تابع هدف را تعیین می کنیم. از آنجاکه مسئله مورد نظر، یک مسئله مینیمم سازی است، به ترتیب نزولی جواب ها را مرتب می کنیم و به تعداد N_{swam} جواب را انتخاب می کنیم.

۳-۲- تابع هدف فرآیند بهینه سازی

هدف فرآیند بهینه سازی به حداکثر رساندن قابلیت بارگیری سیستم در شبکه بدون هیچ گونه اضافه ولتاژ باس و یا بارگیری انشعاب است. به منظور دستیابی به این هدف، فاکتور بارگیری شبکه (λ) با یک روند بهینه سازی متوالی مانند زیر افزایش می یابد. شرایط اولیه λ برابر با ۱ است ($\lambda_0 = 1$).

در ابتدا، قدرت های تولید شده در باس های مولد (باس های PG) به صورت رابطه زیر تغییر می کنند.

ترکیب الگوریتم اجتماع ذرات با عملگر تکاملی جهش

از آنجاکه در الگوریتم PSO تمام اعضای گروه به عنوان همسایگی یک عضو در نظر گرفته شود، بهترین عضو گروه همواره هدایتگر (رهبر) سایر اعضا است. از این رو چنانچه بعد از چند تکرار نقطه بهتری کشف نگردد، موقعیت بهترین عضو گروه ثابت می ماند و بنا به ماهیت قوانین حرکت، ممکن است تمام اعضا به نقطه بهینه محلی همگرا شوند؛ بنابراین هر راه حلی که بتواند به شیوه ای مناسب حرکت و جستجو در فضای پاسخ را تقویت بخشد، مورد توجه قرار خواهد گرفت. در این قسمت عملکرد الگوریتم PSO با استفاده از عملگر جهش بهبود داده می شود. در روش پیشنهادی با اعمال عملگر جهش، تبادل اطلاعات بین ذرات بهبود می یابد.

در هر تکرار با انتخاب تصادفی سه ذره و اعمال عملگر جهش، اعضای جدیدی به مجموعه اضافه شده تا در صورت یافتن نقاطی بهتر جایگزین اعضا موجود شوند. چنانچه با اعمال این عملگر، نقطه بهینه تری پیدا شود، ذرات به سمت آن نقطه حرکت خواهند نمود. از طرفی اگر نقطه بهینه تری پیدا نشود با توجه به حافظه دار بودن الگوریتم، ذرات از مسیر منحرف نخواهند شد و لذا سرعت همگرایی حفظ خواهد شد. در این تحقیق از رابطه زیر برای اعمال عملگر جهش بر روی ذرات استفاده شده است.

$$X_{mut,i}^k = X_{m_1}^k + rand(.) * (X_{m_2}^k - X_{m_3}^k) \quad (۷)$$

$$; j = 1, 2, \dots, N_{swam}$$

$$X_{mut}^k = [x_{mut,1}^k, x_{mut,2}^k, \dots, x_{mut,n}^k]$$

بعد از اعمال عملگر جهش، جمعیت حاصله از جهش با جمعیت تکرار قبل با رویکرد درایه ای مطابق رابطه زیر ادغام

سیستم)، می‌تواند به صورت زیر ارائه شود. در ابتدا $\lambda_0 = 1$ قرار داده شده و شماره دستگاه STATCOM انتخاب شده است. سپس در گام دوم $\lambda = \lambda + 0.01$ افزایش داده شده است و یک جمعیت اولیه از ذرات را ایجاد شده است. سپس محدودیت‌ها برای هر ذره چک شده است. اگر ذره‌ای وجود دارد که محدودیت برای آن به وجود نیامده است، این بدان معنا است که در این فاکتور بار (λ) حالتی وجود دارد که محدودیت‌های قابلیت بارگیری را راضی کرده و در نتیجه باید فاکتور بار افزایش داده شود. سرانجام در گام سوم این حلقه تا جایی که به یک فاکتور بار که هیچ‌گونه فردی با تابع برازندگی برابر با صفر وجود نداشته باشد، ادامه داده می‌شود. این بدان معنا است که در این فاکتور بار، هیچ حالتی از دستگاه STATCOM که می‌تواند سطح ولتاژ شبکه و محدودیت‌های بارگیری را به یک دامنه قابل قبول بیاورد، وجود ندارد.

در این نقطه فاکتور بار قبلی متناظر با حداکثر فاکتور بار λ_{max} و فرد قبلی که شامل نواحی بهینه و مقادیر کنترل‌کننده STATCOM است، گزارش داده شود.

۴- الگوریتم بخش‌بندی FCM

در این بخش، قسمت‌بندی بر اساس FCM توضیح داده شده است.

FCM یک روش خوشه‌بندی است که به یک دسته داده مشخص اجازه می‌دهد تا به یک خوشه و یا خوشه‌های بیشتری تقسیم شوند. معمولاً FCM در کاربردهای خوشه‌بندی مهندسی استفاده می‌شود و بر اساس حداقل کردن تابع هدف زیر است:

$$F_m = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^C u_{ij}^m \|x_i - C_j\|^2 \quad 1 \leq m < \infty \quad (15)$$

که m هرگونه عدد حقیقی بزرگ‌تر از ۱ است، u_{ij} درجه عضویت x_i در خوشه j است و x_i ، i امین داده اندازه‌گیری شده d بعدی است، C_j مرکز d بعدی خوشه و $\| \cdot \|$ هرگونه نرم نشان‌دهنده تشابه بین هر داده اندازه‌گیری شده و مرکز است.

فازی کننده m سطح فازی بودن خوشه را تعیین می‌کند. یک m بزرگ موجب ایجاد عضویت کوچک‌تر u_{ij}

$$P_{Gi} = \lambda P_{G0i} \quad (9)$$

که P_{G0i} قدرت تولیدی اولیه در باس i و P_{Gi} قدرت تولیدی تغییر یافته است. سپس برای باس‌های بار (باس‌های PQ) تقاضاهای اکتیو و راکتیو (Q_L و P_L) به صورت رابطه زیر تغییر یافته‌اند.

$$P_{Li} = \lambda P_{L0i} \quad (10)$$

که P_{L0i} و Q_{L0i} قدرت اکتیو و راکتیو بار ابتدایی در باس i و P_{Li} و Q_{Li} مقادیر تغییر یافته هستند.

در هر تکرار بر اساس روابط فوق فاکتور بار افزایش یافته است و انحرافات شدید ولتاژ و بارگذاری شاخه‌ها چک می‌شود. هنگامی که نتوان برای مدت زیادی انحرافات شدید ولتاژ و بارگذاری شاخه‌ها را نگه داشت، می‌توان نتیجه گرفت قابلیت بارگیری به حداکثر خود رسیده است. در واقع این یک الگوریتم چندمرحله‌ای است که به دنبال حل تکاملی ایجاد انتخاب بهینه موضعی در هر مرحله است به امید اینکه یک جواب بهینه کلی پیدا کند.

تابع هدف متناظر که قابلیت بارگیری (λ) سیستم را به حداکثر می‌رساند را می‌توان به صورت زیر فرموله کرد:

$$J = \text{Max} \{ \lambda \} \quad (11)$$

با توجه به محدودیت‌های زیر:

برای همه انشعابات شبکه:

$$S_l \leq S_{lmax} \quad (12)$$

برای همه باس‌های شبکه:

$$|\Delta V_{bi}| = 0.05 \quad (13)$$

برای همه باس‌های تولید کننده شبکه:

$$P_{gi}^{\min} \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{\max} \quad (14)$$

که S_{lmax} حداکثر میزان قدرت ظاهری خط l ، S_l قدرت ظاهری جریان خط l و ΔV_{bi} تفاوت بین ولتاژ نرمال در باس i و ولتاژ فعلی، P_{gi} تولید قدرت اکتیو در باس i ، P_{gi}^{\min} و P_{gi}^{\max} حداقل و حداکثر کران‌ها بر روی P_{gi} هستند.

به طور خلاصه روند بهینه‌سازی که فاکتور حداکثر بارگیری λ_{max} را پیدا می‌کند (حداکثر قابلیت بارگیری

است. در محدوده $m=1$ ، عضویت u_{ij} ، به صفر یا یک همگرا می شود که نشان دهنده یک قسمت بندی ترد است. الگوریتم FCM با n نقطه داده (x_1, \dots, x_n) با مرکز خوشه ها، خوشه بندی می شود. تابع FCM در متلب برای طبقه بندی استفاده شده است. تعداد قسمت ها داده شده است (در اینجا عدد ۳) و FCM مراکز سه خوشه و سه منطقه را پیدا می کند. FCM با یک حدس اولیه برای مراکز خوشه شروع می کند که برای میانگین ناحیه هر خوشه مورد استفاده قرار می گیرند. بعلاوه، برای هر نقطه داده ای یک درجه عضویت برای هر خوشه تعیین می کند. با بروز کردن پشت سر هم مراکز خوشه ها و درجه های عضویت برای هر نقطه داده آن، به صورت تکراری مراکز خوشه ها را به ناحیه سمت راست در یک دسته داده ای حرکت می دهد. این تکرار بر اساس حداقل کردن یک تابع هدف است که نشان دهنده فاصله از هرگونه نقطه به یک مرکز خوشه وزن دار شده با درجه عضویت نقاط داده ای است.

قسمت بندی فازی انجام شده طی یک بهینه سازی تکراری تابع هدف نشان داده شده در بالا، با بروز نمودن عضویت u_{ij} و مراکز خوشه ای C_j توسط فرمول زیر نشان داده می شود.

$$u_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^C \frac{\|x_i - C_j\|}{\|x_i - C_k\|}^{2/(m-1)}} \quad (16)$$

$$C_j = \frac{\sum_{i=1}^N u_{ij}^m x_i}{\sum_{i=1}^N u_{ij}^m} \quad (17)$$

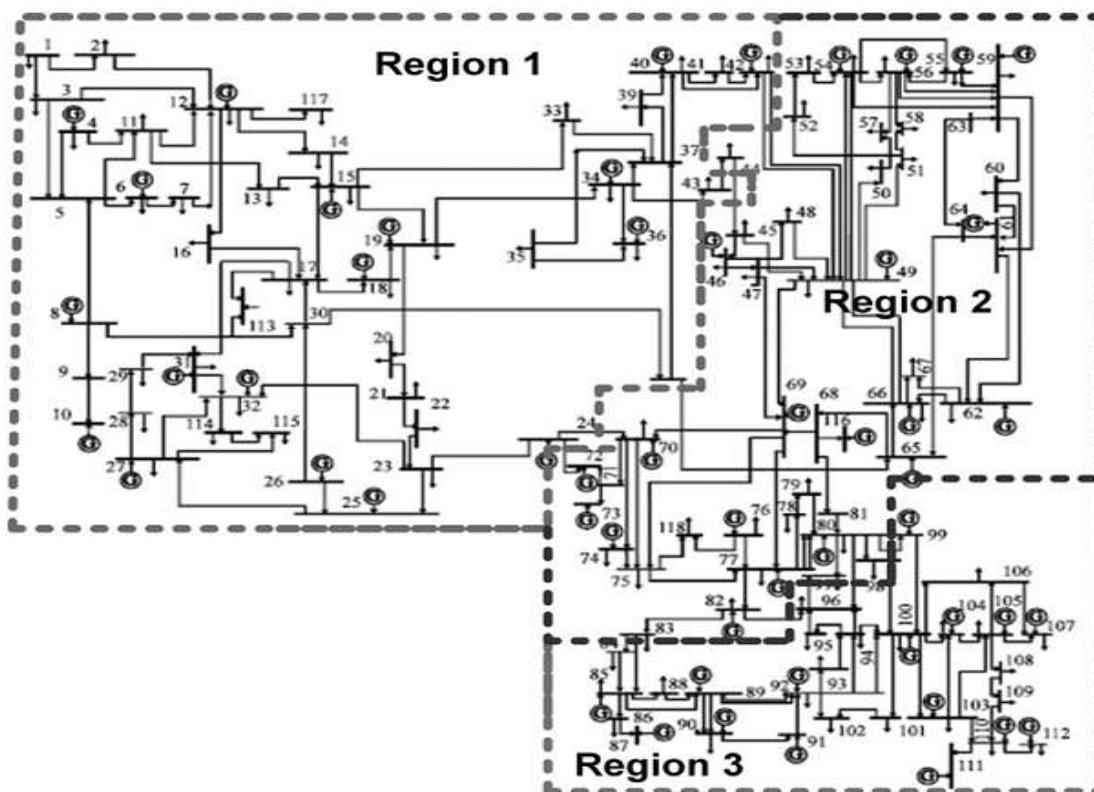
این تکرار هنگامی که $\max_{ij} \{|u_{ij}^{(k+1)} - u_{ij}^{(k)}|\} < \varepsilon$ خاتمه می یابد، به طوری که ε یک معیار خاتمه بین ۰ و ۱ است و k گام های تکرار است، متوقف خواهد شد. این فرایند به سمت یک حداقل موضعی و یا یک نقطه زین اسبی همگرا می شود. الگوریتم شامل گام های زیر است:

۱. برای شروع $U = [u_{ij}]$ به عنوان $U^{(0)}$ شروع کن.
۲. در خلال مرحله k : بردارهای مرکزی $C^{(k)} = [c_j]$ را با $U^{(k)}$ محاسبه کن.
۳. $U^{(k)}$ و $U^{(k+1)}$ را به روز کن.
۴. اگر $\|U^{(k+1)} - U^{(k)}\| < \varepsilon$ در آن صورت توقف

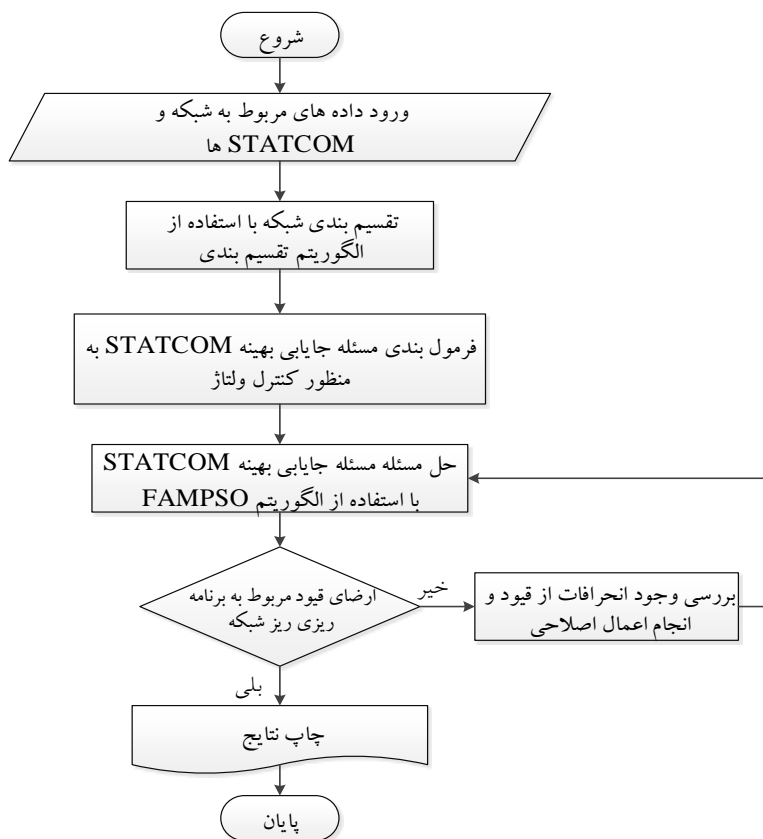
کن، در غیر این صورت به گام ۲ برگرد. تعدادی از آزمون ها با استفاده از این الگوریتم با تعداد نواحی مختلفی انجام شده است. تعداد نواحی برای شبکه ۱۱۸ با سه IEEE ۵۴ ژنراتور، ۹۹ بار، ۱۱۸ باس و ۱۸۶ انشعاب وجود دارند. پخش بار با استفاده از نرم افزار Matpower به دست آمده است. شکل (۴) نتایج قسمت بندی با الگوریتم FCM را نشان می دهد.

در قسمت بندی FCM، ابتدا یک پخش بار در حالت عادی که هیچ گونه آشفتگی بر روی بارها نیست صورت گرفته است. این ولتاژ، زاویه فاز، قدرت واقعی و مقادیر قدرت واکنشی را در همه ی باس های PV و PQ استخراج می نماید. ثانیاً، آشفتگی های موجود بر روی بارها اعمال می شود و پخش بار دیگر به منظور دست یافتن به مقادیر جدید برای همه باس ها به کار برده می شود. سرانجام، تفاوت های بین مقادیر بعد از آشفتگی ها و تحت شرایط معمول به عنوان داده های ورودی برای الگوریتم FCM محاسبه می شوند. در این مقاله ۲۰٪ آشفتگی بر روی باس های ۲، ۱۰۲، ۹۲، ۸۲، ۷۲، ۶۲، ۵۲، ۴۲، ۳۲، ۲۲، ۱۲ و ۱۱۲ برای اولین ورودی های داده ها و سپس برای دومین ورودی های داده ها، ۲۰٪ اختلالات بر روی باس های ۳، ۱۰۳، ۹۳، ۸۳، ۷۳، ۶۳، ۵۳، ۴۳، ۳۳، ۲۳، ۱۳ و ۱۱۳ است.

در ابتدا، ولتاژ باس ها به عنوان داده ورودی در نظر گرفته شده که نتایج قسمت بندی راضی کننده نبودند و بعضی از نواحی به دست آمده به صورت فیزیکی متصل نشدند. نتایج قسمت بندی خوب نبودند، زیرا ولتاژ باس های PV همیشه ثابت باقی می ماند و نمی توانند یک دسته خوب از داده های ورودی باشند. پس از آن، زاویه فازها به دلیل مقادیر تغییراتشان برای همه باس ها، در شرایط عادی و آشفته، به عنوان داده ورودی در نظر گرفته شد. داده های ورودی به FCM داده می شوند و خروجی FCM یک تعداد از خوشه هایی است که شامل باس های با واکنش مشابه نسبت به آشفتگی ها هستند.



شکل (۴): قسمت بندی FCM (۱۱۸-باس IEEE)



شکل (۵) فلوچارت ترکیبی روش ارائه شده

برای هر فرد تائید می شوند تا الگوریتم را بر اساس گام ارائه شده در قسمت قبلی ادامه دهد. سپس در یک ذره خاص، حداکثر قابلیت بارگیری سیستم (λ_{max}) تعیین خواهد شد.

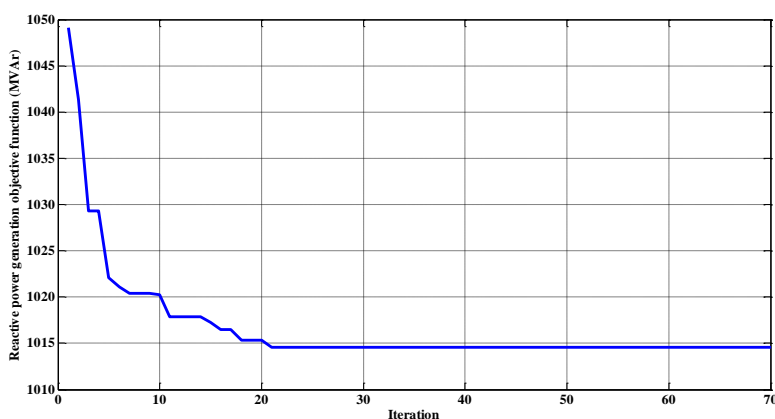
در مرحله اول شبیه سازی در هر ناحیه یک STATCOM جایابی شده است. شکل (۶) روند همگرایی الگوریتم پیشنهادی را نشان می دهد. همان طور که این شکل نشان می دهد الگوریتم ارائه شده در تعداد تکرارهای پایینی به جواب بهینه سراسر همگرا شده است و این نشان از قدرت الگوریتم ارائه شده دارد.

نتایج برای این مرحله از شبیه سازی در جدول ۳ آورده شده است.

فلوچارت ترکیبی الگوریتم بهینه سازی ارائه شده و الگوریتم تقسیم بندی شبکه FCM در شکل (۵) نشان داده شده است.

۵- نتایج شبیه سازی

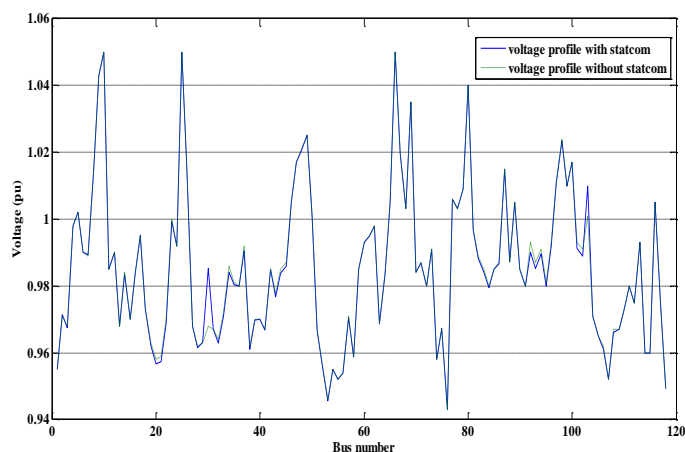
بر اساس الگوریتم ارائه شده در قسمت ۳، فرایند تخصیص برای تعداد مختلف STATCOM، در نواحی مختلف شبکه ۱۱۸- باسه IEEE به منظور حداکثر کردن قابلیت بارگیری سیستم قدرت اجرا شده است. طی فرایند بهینه سازی، الگوریتم بهینه سازی پیشنهادی به صورت تصادفی نواحی و مقادیر را برای همه دستگاه های STATCOM، بعد از تنظیم کردن آنها در سیستم قدرت انتخاب می نماید. سپس محدودیت های قابلیت بارگیری



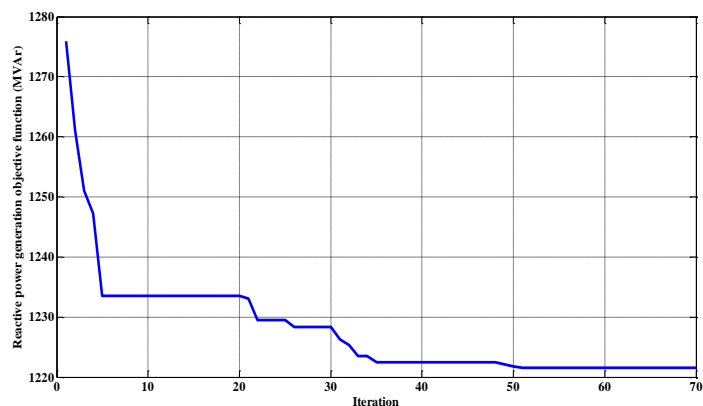
شکل (۶): روند همگرایی الگوریتم پیشنهادی برای جایابی سه STATCOM

جدول (۳): نتایج جایابی بهینه یک STATCOM در هر ناحیه سیستم آزمون ۱۱۸- باسه IEEE

شماره بخش	تعداد STATCOM	نتایج جایابی		λ_{max}	افزایش قابلیت بارپذیری
		شماره باس محل نصب	مقدار توان راکتیو		
۱	۱	۲۸	۷۰	۱/۰.۱	۴۲/۸۴۴۲
۲	۱	۷۶	۷۰		
۳	۱	۱۰۷	۷۰		



شکل (۷): پروفیل ولتاژ بدون حضور STATCOM و در حضور سه STATCOM



شکل (۸): روند همگرایی الگوریتم پیشنهادی برای جایابی دو STATCOM در هر بخش

به جواب بهینه سراسر همگرا شده است و این نشان از قدرت الگوریتم ارائه شده دارد. نتایج این مرحله از شبیه سازی در جدول (۴) آورده شده است.

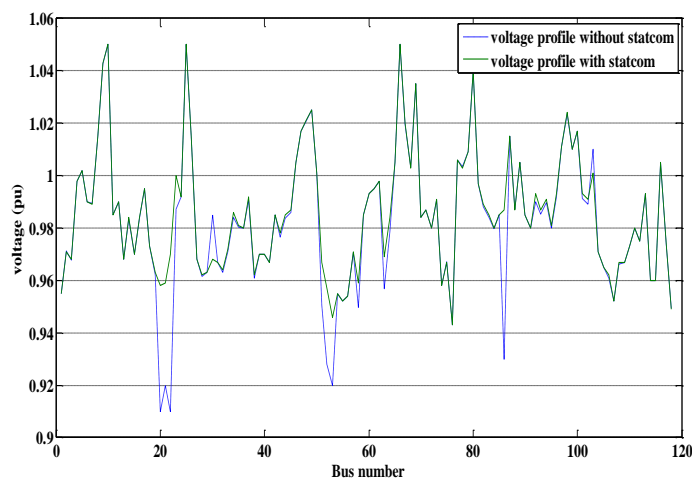
شکل (۹) پروفیل ولتاژ را برای شبکه موردنظر در حالت های بدون STATCOM و با حضور دو STATCOM در هر ناحیه نشان می دهد. همان طور که این شکل نشان می دهد پروفیل ولتاژ در حضور STATCOM بسیار بهبود یافته است.

شکل (۷) پروفیل ولتاژ را برای شبکه موردنظر در حالت های بدون STATCOM و با STATCOM نشان می دهد. همان طور که این شکل نشان می دهد پروفیل ولتاژ در حضور STATCOM بهبود یافته است.

در مرحله دوم شبیه سازی در هر ناحیه دو STATCOM جایابی شده است. شکل (۸) روند همگرایی الگوریتم پیشنهادی را نشان می دهد. همان طور که این شکل نشان می دهد الگوریتم ارائه شده در تعداد تکرارهای پایینی

جدول (۴): نتایج جایابی بهینه دو STATCOM در هر ناحیه سیستم آزمونی ۱۱۸-باسه IEEE

شماره بخش	تعداد STATCOM	نتایج جایابی		λ_{max}	میزان افزایش قابلیت بارپذیری
		شماره باسی محل نصب	مقدار توان راکتیو		
۱	۲	۲۱	۷۲	۱/۰۵	۲۱۴/۲۲۱
		۲۲	۷۵		
۲	۲	۶۳	۷۰		
		۵۳	۸۰		
۳	۲	۱۰۷	۷۰		
		۸۶	۷۸		



شکل (۹): پروفیل ولتاژ بدون حضور STATCOM و در حضور دو STATCOM در هر ناحیه

جدول (۵): مقایسه نتایج الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم ژنتیک

	میزان افزایش قابلیت بارپذیری (MW)
GA [۲۳]	۱۶۹
FAMPSO	۲۱۴/۲۲۱

به دست آمده نیز عملکرد مطلوب الگوریتم قسمت بندی و الگوریتم تکاملی ارائه شده را نشان می دهند.

مراجع

- [1] Mehrjerdi, H., Lefebvre, S., Saad, M. Asber, D.: 'A decentralized control of partitioned power networks for voltage regulation and prevention against disturbance propagation', IEEE Trans. Power Syst., Vol. 28, No. 2, pp. 1461–1469, 2013.
- [2] Aquino-Lugo, A.A. Klump, R. Overbye, T.J.: 'References a control framework for the smart grid for voltage support using agent-based technologies', IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 2, No. 1, pp. 173–180, 2011.
- [3] Paul, J.P. Leost, J.Y. Tesson, J.M.: 'Survey of the secondary voltage control in France: present realization and investigation', IEEE Trans. Power Syst., Vol. 2, pp. 505–511, 1987.
- [4] Corsi, S. Pozzi, M. Sabelli, C. Serrani, A.: 'The coordinated automatic voltage control of the Italian transmission grid – Part I: Reasons of the choice and overview of the consolidated hierarchical system', IEEE Trans. Power Syst., Vol. 19, No. 4, pp. 1723–1732, 2004.
- [5] Wen, J.Y. Wu, Q.H. Turner, D.R. Cheng, S.J. Fitch, J.: 'Optimal coordinated voltage control for power system voltage stability', IEEE Trans. Power Syst., Vol. 19, No. 2, pp. 1115–1122, 2004.

در جدول (۵) مقایسه ای بین الگوریتم FAMPSO پیشنهادی و الگوریتم ژنتیک ارائه شده در [۲۳] انجام شده است. همان طور که نتایج نشان می دهد قابلیت افزایش بارپذیری شبکه در حالت جایابی دو STATCOM در هر ناحیه با الگوریتم پیشنهادی در این مقاله بیشتر است.

۶- نتیجه گیری

وقتی که سیستم های انتقال نزدیک به محدودیت ها عمل می کنند، کنترل ولتاژ سیستم های قدرت ضروری است. ابتدا در این مقاله، یک تکنیک قسمت بندی شبکه الکتریکی به منظور تقسیم یک سیستم قدرت به نواحی مناسب با در نظر گرفتن کمیته سازی برهمکنش بین نواحی مطرح شده است. الگوریتم قسمت بندی با استفاده از الگوریتم FCM پیاده سازی شده است. سپس باس های کنترل به منظور نصب کنترل کننده های STATCOM با استفاده از یک روش بهینه سازی بر پایه انبوه ذرات انتخاب شدند. هدف این فرایند حداکثر کردن قابلیت بارگیری سیستم قدرت با قرار دادن بهینه ی کنترل کننده های STATCOM است. شناسایی باس های کنترلی و استفاده از الگوریتم تقسیم بندی شبکه و تکاملی، افزایش قابلیت بارگیری شبکه را به دنبال دارد. نتایج عددی

- No. 2, pp. 877–884, 2010.
- [15] 15 Jonsson, M. Begovic, M. Daalder, J.: ‘A new method suitable for real-time generator coherency determination’, *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 19, No. 3, pp. 1473–1482, 2004.
- [16] De Tuglie, E. Iannone, S.M. Torelli, F.: ‘A coherency recognition based on structural decomposition procedure’, *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 23, pp. 555–563, 2008.
- [17] Ghahremani, E. Kamwa, I.: ‘Maximizing transmission capacity through a minimum set of distributed multi-type FACTS’. *Proc. IEEE PES General Meeting, San Diego, USA, 22–27 July 2012.*
- [18] Majhi, B. Sabyasachi, S. Mishra, S.: ‘Classification of Power Signals Using PSO based K-Means Algorithm and Fuzzy C Means Algorithm’, *Journal of Agriculture and Life Sciences.*, Vol. 1, No. 1, pp. 95–107, 2014.
- [19] Ras Guerriche, K. Bouktir, T.: ‘Optimal Allocation and Sizing of Distributed Generation with Particle Swarm Optimization Algorithm for Loss Reduction’, *Revue des Sciences et de la Technologie – RST.*, Vol. 6, No. 1, pp. 59–69, 2015.
- [20] Rezaee Jordehi, A. Jasni, J. Abdul Wahab, N.I. Abd Kadir, M.Z.A.: ‘Particle Swarm Optimisation Applications in FACTS Optimisation Problem’, 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2013) IEEE, Langkawi, Malaysia. 3–4 June 2013.
- [21] Amoozegar M, Eftekhari M. Automatic Model-Based Software Performance Optimization Based on MOPSO. *ISEE.*; Vol. 2, No. 2, pp.1–11, 2011.
- [22] aliakbar golkar M, ahmadian A, modarresi J, safari A. Design of an Output Feedback Controller for STATCOM in view of Low Frequency Oscillation Damping Using HBMO and PSO. *ISEE.*; Vol. 2 No. 3, pp.1–16, 2011.
- [23] Mehrjerdi, H. Ghahremani, E. Lefebvre, S. Saad, M. Asber D.: ‘Authenticated voltage control of partitioned power networks with optimal allocation of STATCOM using heuristic algorithm’, *IET Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 7, No. 9, pp. 1037–1045, 2013.
- [6] Wang, H.F. Li, H. Chen, H.: ‘Coordinated secondary voltage control to eliminate voltage violations in power system contingencies’, *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 18, No. 2, pp. 588–595, 2003.
- [7] Hossack, J.A. Menal, J. McArthur, S.D.J. McDonald, J.R.: ‘A multiagent architecture for protection engineering diagnostic assistance’, *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 18, No. 2, pp. 639–647, 2003.
- [8] Heo, J.S. Lee, K.Y.: ‘A multi-agent system-based intelligent identification system for control and fault-diagnosis for a large-scale power plant’. Presented at the IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal, QC, Canada, 2006.
- [9] Metzger, M. Polaków, G.: ‘A survey on applications of agent technology in industrial process control’, *IEEE Trans. Ind. Inf.*, Vol. 7, No. 4, pp. 570–581, 2011.
- [10] Sheng, S. Li, K.K. Chan, W.L. Xiangjun, Z. Xianzhong, D.: ‘Framework and implementation of secondary voltage regulation strategy based on multi-agent technology’, *Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 31, pp. 67–77, 2009.
- [11] Mehrjerdi, H. Lefebvre, S. Saad, M. Asber, D.: ‘Eliminating voltage violations in power systems using secondary voltage control and decentralized neural network’. *Proc. IEEE PES General Meeting, Vancouver, Canada, 21–25 July 2013.*
- [12] Kamwa, I. Pradhan, A.K. Joos, G.: ‘Automatic segmentation of large power systems into fuzzy coherent areas for dynamic vulnerability assessment’, *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 22, No. 4, pp. 1974–1985, 2007.
- [13] Kamwa, I. Pradhan, A.K. Joos, G. Samantaray, S.R.: ‘Fuzzy partitioning of a real power system for dynamic vulnerability assessment’, *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 24, No. 5, pp. 1356–1365, 2009.
- [14] Xu, G. Vittal, V.: ‘Slow coherency based cutset determination algorithm for large power systems’, *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 25,

¹ Multi Agent System (MAS)

² Hydro-Quebec

³ Particle Swarm Optimization (PSO)

⁴ Fuzzy Adaptive Modified Particle Swarm Optimization (FAMPSO)

⁵ Normalized Fitness Value-NFV

⁶ Large-L

⁷ Medium-M

⁸ Small-S

⁹ Positive-PE

¹⁰ Negative-NE

¹¹ Zero-ZE

