

استفاده از ویرایش جدید الگوریتم توسعه یافته اجتماع ذرات در مدیریت بهینه اقتصادی -

امنیتی توان راکتیو در سیستم‌های قدرت

محمود عبادیان^۱، رضا ابولی^۲ و محسن فرشاد^۳

۱- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران

Mahmoud_ebadian@yahoo.com

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه بیرجند - بیرجند- ایران

Rezaaboli@Gmail.com

۳- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران

Moh_farshad@yahoo.com

چکیده: در این مقاله، رویکردی جدید در جهت مدیریت توان راکتیو سیستم‌های قدرت، با ملاحظه اهداف امنیتی و اقتصادی، به منظور بهره‌برداری بهینه و ایمن از این سیستم‌ها ارائه شده است. مدیریت توان راکتیو به عنوان یک مسأله بهینه‌سازی غیرخطی چند هدفه با متغیرهای پیوسته و گسسته فرمول‌بندی می‌شود که در آن، کاهش تلفات اهمی به عنوان هدف اقتصادی و بهبود در پروفیل ولتاژ و پایداری آن نیز به عنوان اهداف امنیتی انتخاب می‌شوند. برای حل مسأله بهینه‌سازی فوق از رویکرد فازی‌سازی اهداف و ویرایش جدیدی از الگوریتم توسعه یافته اجتماع ذرات که قابلیت بالایی در ارائه بهترین جواب‌ها در زمان کم دارد، استفاده شده است. تولید بهینه توان راکتیو ژنراتورها و اندازه حداقل مقدار ویژه ماتریس ژاکوبین، دو شاخص کارآمد در ارزیابی پایداری ولتاژ سیستم تحت شرایط کاری نرمال هستند، که در این مقاله مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این مقاله، همچنین شاخص جدیدی برای تولید بهینه توان راکتیو ژنراتورها در جهت ارزیابی پایداری ولتاژ پیشنهاد شده است. مدل پیشنهادی بر روی سیستم نمونه ۳۰ باسه IEEE اجرا گردیده است که نتایج حاصله، مبین کارایی قابل قبول الگوریتم پیشنهادی در مدیریت توان راکتیو در هر دو شرایط امنیتی و اقتصادی است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم اجتماع ذرات، بهینه‌سازی چندهدفه، پایداری ولتاژ، تلفات، توان راکتیو

۱- مقدمه

امروزه به‌طور گسترده به‌کار گرفته می‌شود. به‌طور کلی مدیریت توان راکتیو به روش‌هایی اطلاق می‌گردد که با استفاده از کنترل ولتاژ ژنراتورهای مجهز به سیستم AVR، تنظیم تپ ترانسفورماتورها، تنظیم منابع توان راکتیو موجود، نصب منابع جدید توان راکتیو، تصمیم بر بهبود بهره‌برداری از سیستم تحت شرایط کاری نرمال و غیرنرمال را دارد. در شرایط کاری نرمال، ولتاژهای قابل قبول در باس‌ها، پروفیل ولتاژ مناسب و تلفات کمینه مهمترین اهداف هستند. روش‌های مدیریت توان راکتیو در شرایط استاتیک و دینامیک سیستم را می‌توان به دو دسته اصلی شامل:

مدیریت توان راکتیو یکی از مؤثرترین روش‌ها در بهره‌برداری ایمن و اقتصادی از سیستم‌های قدرت است، که

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۸۹/۱۰/۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۰/۴/۱۸

نام نویسنده مسؤول: رضا ابولی

نشانی نویسنده مسؤول: ایران - بیرجند - شوکت آباد - دانشگاه بیرجند - دانشکده مهندسی

تحت شرایط کاری نرمال) و زیرمسائل (شرایط کاری غیر نرمال به‌عنوان قید) استفاده شده است. در مرجع [۸] از افزایش جهت‌دار ذخیره توان راکتیو به‌منظور بهبود پایداری ولتاژ استفاده شده است. در مرجع [۹]، تعیین حداکثر بارگذاری به‌عنوان یک مسأله بهینه‌سازی برای بهبود پایداری ولتاژ به کار گرفته شده است.

رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه کنترل ولتاژ و توان راکتیو در سیستم‌های قدرت در مراجع [۱۰-۱۲]، مطرح شده است. در مرجع [۱۰] از کمیته‌سازی تلفات و افزایش ذخیره توان راکتیو به‌عنوان دو هدف در بهره‌برداری بهینه در شرایط کاری نرمال سیستم، استفاده شده است. در این مرجع برای ادغام اهداف، از ضرایب وزنی بنا به میزان اهمیت هریک از اهداف استفاده شده است. لازم به ذکر است که در اکثر بهینه‌سازی‌های چندهدفه از روش ضرایب وزنی بهره گرفته شده است. در مرجع [۱۱] از سه هدف اصلی سیستم‌های قدرت؛ یعنی تلفات کمینه، کاهش انحراف ولتاژ و افزایش پایداری استاتیک ولتاژ استفاده شده است. در این مرجع، از شاخص L [۱۳] برای ارزیابی پایداری ولتاژ بهره گرفته شده است. در مرجع [۱۲]، یک روش بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر الگوریتم‌های تکاملی و مفهوم نامغلوبی ارائه شده که تنها اهداف اقتصادی و امنیتی تحت شرایط کاری نرمال سیستم، یعنی تلفات کمینه و کاهش انحراف ولتاژ مد نظر قرار گرفته است. در این مرجع به افزایش پایداری سیستم تحت شرایط غیرنرمال توجهی نشده است.

تاکنون از روش‌ها و الگوریتم‌های متفاوتی برای حل مسأله بهینه‌سازی مدیریت توان راکتیو، از قبیل برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی، روش بهینه‌سازی دور از کرانه و روش‌های هوشمند استفاده شده است [۱۴]. اما، مدیریت توان راکتیو یک مسأله غیرخطی با متغیرهای گسسته و پیوسته بوده، که دارای بعد بالا و تعداد زیادی نقاط بهینه محلی است. لذا در این مقاله به‌منظور مدیریت بهینه توان راکتیو با استفاده از روش دوم؛ یعنی توزیع توان راکتیو با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی و امنیتی تحت شرایط کاری نرمال، از ویرایش جدیدی از الگوریتم توسعه یافته اجتماع ذرات استفاده شده است. الگوریتم پیشنهادی در ارائه

برنامه‌ریزی توان راکتیو و توزیع بهینه توان راکتیو طبقه‌بندی نمود. برنامه‌ریزی توان راکتیو به نصب منابع جدید توان راکتیو، شامل: راکتورها، خازنهای قابل کلیدزنی و ادوات FACTS در سیستم‌های قدرت ارتباط دارد [۱-۲]. بهره‌برداری بهینه از تجهیزات قابل کنترل موجود در سیستم نیز شامل دسته دوم؛ یعنی توزیع بهینه توان راکتیو است. استفاده از روش دوم مدیریت توان راکتیو به دلیل عدم نیاز به سرمایه‌گذاری در جهت نصب منابع و تجهیزات جدید، از اهمیت ویژه و قابل توجهی در نزد بهره‌برداران و طراحان سیستم قدرت برخوردار است.

امروزه شبکه‌های قدرت الکتریکی به دلایل متعددی نزدیک به حدود پایداری مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند و این موضوع به کاهش امنیت در بهره‌برداری از این سیستم‌ها منجر شده است. در چند دهه اخیر، وقایع زیادی در ارتباط با فروپاشی ولتاژ در کشورهای مختلف گزارش شده است، که از مهمترین دلایل آن کمبود توان‌های راکتیو استاتیکی و دینامیکی در سیستم بوده است [۳]. این موضوع، اهمیت در نظر گرفتن مسأله پایداری ولتاژ و امنیت سیستم‌های قدرت را برای شرایط کاری غیرنرمال در بهینه‌سازی مدیریت توان راکتیو، آشکار می‌سازد.

در بهینه‌سازی مدیریت توان راکتیو، چندین روش توسط مراجع [۴-۶] ارائه شده است، که برای حل مسأله، تنها یک هدف بررسی شده است. کاهش تلفات توان اکتیو یکی از مهمترین اهداف اقتصادی است که اگر به‌تنهایی در مسائل بهینه‌سازی مطرح شود، می‌تواند به کاهش امنیت سیستم در شرایط کاری نرمال و غیرنرمال و تخریب پروفیل ولتاژ منجر گردد. کاهش انحراف ولتاژ باس‌ها از مقدار مطلوب در شرایط کاری نرمال نیز به دلیل حساسیت بالای برخی بارهای الکتریکی به ولتاژ، یکی از اهدافی است که به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷]. در مراجع [۸-۹] هدف بهینه‌سازی، افزایش امنیت سیستم در شرایط غیرنرمال است. در این مراجع افزایش امنیت سیستم به عنوان تنها هدف بهینه‌سازی مدنظر قرار گرفته و از اهداف اقتصادی صرف‌نظر شده است. در این مراجع از روش بهینه‌سازی سلسله مراتبی با استفاده از تجزیه بندرز و الگوریتم‌های کلاسیک برای حل مسأله اصلی (بهینه‌سازی

۲-۱- توابع هدف

۲-۱-۱- کمینه‌سازی تلفات اهمی

کمینه‌سازی تلفات اهمی سیستم را می‌توان به صورت رابطه (۱) نوشت:

$$\text{Min } F_1 = \sum_{b \in N_B} P_{\text{Loss},b}(x, u) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، NB تعداد شاخه‌های سیستم است. x و u نیز به ترتیب متغیرهای حالت و کنترلی هستند. در اینجا متغیرهای حالت شامل ولتاژ باس‌های بار، توان راکتیو تولیدی ژنراتورها و متغیرهای کنترلی شامل ولتاژ ژنراتورهای مجهز به AVR، اندازه تپ ترانسفورماتورهای مجهز به تپ‌چنجر و اندازه جبران‌سازی موازی توان راکتیو هستند.

۲-۱-۲- کمینه‌سازی انحراف ولتاژ

بهبود پروفیل ولتاژ سیستم، از جمله اهداف امنیتی در شرایط کاری نرمال است که برای عملکرد برخی از بارهای حساس به ولتاژ بسیار حائز اهمیت بوده که به صورت رابطه (۲) قابل تعریف است:

$$\text{Min } F_2 = \frac{1}{N_L} \sum_{i \in N_L} |V_{Li} - V_{Li}^{ref}| \quad (2)$$

که در آن NL تعداد باس‌های بار سیستم، V_{Li} اندازه ولتاژ در باس بار i ام و V_{Li}^{ref} اندازه ولتاژ مرجع در باس بار i ام است که معمولاً یک پریونیت انتخاب می‌گردد.

۲-۱-۳- افزایش پایداری ولتاژ

امروزه بارگذاری روی سیستم‌ها به هم‌پیوسته قدرت به دلیل عدم توسعه سیستم مطابق با تقاضا روزه‌روز در حال افزایش بوده، بهره‌برداران ناگزیر به بهره‌برداری از شبکه‌های قدرت نزدیک به حدود پایداری هستند. از آنجا که پایداری ولتاژ ارتباط نزدیکی با توان راکتیو و به ویژه ذخیره راکتیو ژنراتورها دارد، لذا باید افزایش حاشیه پایداری ولتاژ نیز به عنوان یکی از اهداف در بهینه‌سازی مدیریت توان راکتیو در نظر گرفته شود.

جواب‌های بهینه یا نزدیک به بهینه در مدت زمان کم دارای قابلیت بالایی است. اهداف مورد نظر در این مقاله شامل: تلفات توان حقیقی، انحراف ولتاژ و شاخص پایداری استاتیکی ولتاژ هستند. در این مقاله، برای وارد نمودن هدف پایداری ولتاژ از دو نوع مهم شاخص‌های ارزیابی پایداری ولتاژ در شرایط کاری نرمال؛ یعنی اندازه حداقل مقدار ویژه ماتریس ژاکوبین و تولید بهینه توان راکتیو ژنراتورها استفاده شده است. هر یک از شاخص‌ها جهت ارزیابی میزان تاثیر در جواب بهینه مقایسه شده‌اند. از مهمترین ویژگی‌های این شاخص‌ها، ارزیابی پایداری ولتاژ در شرایط نرمال و عدم نیاز به اجرای پخش‌بارهای متعدد هستند، که این موضوع در زمان اجرای الگوریتم بسیار تأثیرگذار است. در این مقاله از فرآیند فازی سازی اهداف در جهت نرمالیزه نمودن آن‌ها و تبدیل به یک هدف واحد استفاده شده است.

در ادامه مقاله، پایه ریاضی مسأله شامل فرمول‌بندی مسأله بهینه‌سازی و روش‌های ارزیابی پایداری استاتیکی ولتاژ در بخش ۲ ارائه می‌شوند. در همین بخش فرمول‌بندی چندهدفه فازی اهداف نیز ارائه می‌گردد. در بخش ۳ روش حل مسأله بهینه‌سازی مدیریت توان راکتیو مبتنی بر ویرایش جدیدی از الگوریتم توسعه یافته اجتماع ذرات معرفی می‌شود. در بخش ۴ نیز روش پیشنهادی مدیریت توان راکتیو چند هدفه و شاخص پیشنهادی ارزیابی پایداری ولتاژ روی سیستم ۳۰ باسه IEEE پیاده سازی شده و نتایج آن نیز در همین بخش از مقاله ارائه شده است. در بخش پایانی نیز نتیجه‌گیری کلی از مقاله آورده شده است.

۲- فرمول‌بندی مسأله بهینه‌سازی

بهره‌برداری ایمن و اقتصادی از سیستم‌های قدرت به‌همراه برقراری محدودیت‌های بهره‌برداری، مهمترین وظیفه بهره‌برداران می‌باشد. مهمترین هدف اقتصادی، کاهش تلفات اهمی و مهمترین اهداف امنیتی نیز شامل بهبود پروفیل ولتاژ باس‌های بار نسبت به مقدار مطلوب و بهبود حاشیه پایداری ولتاژ است. در این قسمت اهداف و محدودیت‌ها در مدیریت توان راکتیو فرمول‌بندی می‌گردند.

$$\text{Min } F_{3,1} = -(\text{Min}(\text{eig}(\text{Jacobian}))) \quad (4)$$

که در آن Jacobian ، ماتریس ژاکوبین معادلات پخش بار است و $\text{eig}(\text{Jacobian})$ نیز مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین را به دست می‌دهد.

در اکثر رویه‌هایی که به فروپاشی ولتاژ منجر شده، کمبود ذخیره توان راکتیو ژنراتورها به عنوان یکی از عوامل اصلی گزارش شده است [۳]. این موضوع به آن دلیل است که، وقتی ژنراتورهای مهم (نزدیک به نواحی ضعیف) به محدودیت تولید توان راکتیو برسند، عمل کنترل ولتاژ خود را از دست می‌دهد که این نیز به افت شدیدتر ولتاژ منجر می‌شود و از این رو فروپاشی ولتاژ با از دست رفتن کنترل ولتاژ توسط ژنراتورهای دیگر با سرعت بیشتری رخ می‌دهد. لذا افزایش ذخیره راکتیو ژنراتورهای نزدیک به نواحی بحرانی در شرایط کاری نرمال سیستم، می‌تواند شاخصی مناسب برای افزایش پایداری ولتاژ در مسائل بهینه‌سازی باشد. اما انتخاب ژنراتورهایی که در مدیریت نواحی ضعیف از اهمیت بالایی برخوردارند، در تعیین ذخیره بهینه ژنراتورها و افزایش پایداری ولتاژ بسیار حائز اهمیت هستند. لذا در این مقاله روش جدیدی در افزایش ذخیره راکتیو ژنراتورها به منظور افزایش حد بارگذاری در یک ناحیه مشخص ارائه شده است. فرمول‌بندی شامل کمینه‌سازی مجموع مربع تغییرات توان راکتیو ژنراتورها از شرایط کاری نرمال تا افزایش مشخصی بارگذاری در ناحیه مورد نظر است. این فرمول‌بندی به صورت رابطه (۵) بیان می‌شود:

$$\text{Min } F_{3,2} = \sum_{i \in N_G} W_i (Q_{gi}^s - Q_{gi}^b)^2 \quad (5)$$

در رابطه (۵)، Q_{gi}^b و Q_{gi}^s به ترتیب، توان راکتیو تولیدی ژنراتور i با توجه به افزایش الگوی بارگذاری معین در ناحیه مشخص شده (معمولاً ناحیه با کمترین حد بارگذاری) و توان راکتیو تولیدی در شرایط کاری نرمال است. W_i ، نیز ضریب وزنی ژنراتور i بنا به اهمیت آن در افزایش ذخیره راکتیو است. از جمله مزیت شاخص ارائه شده نسبت به شاخص‌های دیگر مانند حداقل مقدار ویژه ماتریس ژاکوبین آن است که، افزایش ذخیره راکتیو ژنراتورهای مهمتر، به افزایش توانایی این ژنراتورها در حفظ کنترل ولتاژ خود منجر شده، لذا این ژنراتورها در

تا کنون برای ارزیابی و تعیین حد پایداری ولتاژ روش‌های متعددی ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به موارد ارائه شده در [۱۳] و [۱۵-۱۷] اشاره نمود. به‌طور کلی، روش‌های ارائه شده را می‌توان به دو گروه اصلی روش‌های مستقیم و غیر مستقیم تقسیم‌بندی نمود. از مهمترین و پرکاربردترین روش‌های مستقیم، می‌توان به روش پخش بار تداومی [۱۵] و روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی [۱۶-۱۷] اشاره نمود، که به‌طور مستقیم میزان بارپذیری سیستم را از نقطه کار اولیه تا نقطه فروپاشی، تعیین می‌نمایند. این روش‌ها از زمان اجرای بالایی برای تعیین جواب نهایی برخوردار هستند. لذا در مسائل بهینه‌سازی توزیع بهینه توان راکتیو که به زمان اجرای کم الگوریتم نیاز است، این روش‌ها نمی‌توانند خیلی مؤثر واقع شوند. در پخش بار تداومی، افزایش بارگذاری و تولید به صورت رابطه (۳) فرمول‌بندی می‌شود.

$$P_{xi} = P_{xi} (1 + \lambda K_{xi}) \quad (3)$$

در رابطه (۳)، λ ضریب بارگذاری، K_{xi} ضریب مشارکت شین i در تولید یا مصرف توان (X بیانگر هریک از شین‌های بار یا تولید است) و P_{xi} تولید یا مصرف توان در شین i است. در روش‌های غیر مستقیم که معمولاً بر اساس اطلاعات پخش بار کلاسیک هستند، تنها اطلاعاتی از وضعیت سیستم در رابطه با درجه‌ی پایداری آن و نواحی ضعیف از لحاظ ولتاژ ارائه می‌شود و اطلاعاتی درباره حد بارگذاری سیستم داده نمی‌شود. از مهمترین این شاخص‌ها می‌توان به اندازه حداقل مقدار ویژه ماتریس ژاکوبین [۱۸]، شاخص L و میزان ذخیره راکتیو سیستم اشاره نمود. این روش‌ها برای ارزیابی پایداری ولتاژ تنها به اطلاعات شرایط نرمال سیستم نیاز دارند، لذا در این روش‌ها تنها به اجرای یکبار پخش بار کلاسیک نیاز است. این روش‌ها بخصوص در مسائل بهینه‌سازی که به زمان و اجرای محاسبات کم نیاز است، بسیار کارا و مؤثر هستند. در این مقاله از اندازه حداقل مقدار ویژه ماتریس ژاکوبین و فرمول‌بندی جدیدی از ذخیره راکتیو ژنراتورها برای ارزیابی پایداری ولتاژ استفاده شده است که در ادامه تشریح می‌گردند. افزایش حداقل مقدار ویژه ماتریس ژاکوبین به صورت رابطه (۴)، فرمول‌بندی می‌شود:

استفاده از ویرایش جدید الگوریتم توسعه یافته اجتماع ذرات در مدیریت بهینه اقتصادی - امنیتی توان راکتیو در سیستم‌های قدرت ۷۱

آنها نمی‌تواند در ارائه یک جواب بهینه مناسب کارا و مفید باشد. لذا در این مقاله به منظور در نظر گرفتن هر سه هدف، از فازی‌سازی اهداف برای نرمالیزه نمودن آنها در بازه [۰-۱] استفاده شده است. با توجه به اینکه هر سه تابع هدف در قالب کمی‌سازی ارائه شده‌اند، لذا می‌توان از فرمول‌بندی کلی به صورت رابطه (۸) برای نرمالیزه نمودن آنها استفاده نمود.

$$F_i = \begin{cases} 0 & \text{if } F_i \leq F_{i,\min} \\ \frac{F_i - F_{i,\min}}{F_{i,\max} - F_{i,\min}} & \text{if } F_{i,\min} < F_i < F_{i,\max} \\ 1 & \text{if } F_i > F_{i,\max} \end{cases} \quad (8)$$

در رابطه (۸)، F_i ، $F_{i,\min}$ و $F_{i,\max}$ به ترتیب مقدار واقعی، حداقل و حداکثر تابع هدف نام هستند. پس از نرمالیزه نمودن توابع هدف، تابع هدف واحد به صورت زیر بیان می‌شود.

$$F_T = w_1 F_1 + w_2 F_2 + w_3 F_3 + Penalty \quad (9)$$

در رابطه (۹)، w_1 ، w_2 و w_3 ضرایب وزنی برای هر یک از توابع هدف بنا به اهمیت در بهبود است. $Penalty$ نیز به عنوان ضریب جریمه در صورت خروج متغیرها از محدودیت‌ها مجاز به تابع هدف اضافه شده، در غیر این صورت مقدار آن صفر است.

$$Penalty = P_V \sum_L \Delta V_L^2 + P_Q \sum_G \Delta Q_G^2 \quad (10)$$

که در آن PV و PQ به ترتیب ضرایب جریمه برای قیود ولتاژ بارها و تولید توان راکتیو ژنراتورها هستند. در رابطه (۱۰)، ΔV_L و ΔQ_G به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\Delta V_L = \begin{cases} V_{L,\min} - V_L & \text{if } V_L < V_{L,\min} \\ V_L - V_{L,\max} & \text{if } V_L > V_{L,\max} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

$$\Delta Q_G = \begin{cases} Q_{G,\min} - |Q_G| & \text{if } Q_G < Q_{G,\min} \\ Q_G - Q_{G,\max} & \text{if } Q_G > Q_{G,\max} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

بارگذاری بیشتری به محدودیت‌های خود می‌رسند. به عبارتی دیگر، می‌توان گفت که محدودیت توان راکتیو تولیدی ژنراتورها به عنوان یک عامل اصلی در میزان بارپذیری سیستم در این فرمول‌بندی در نظر گرفته شده است. مهمترین ویژگی این فرمول‌بندی شناسایی ژنراتورهای مهمتر نسبت به ناحیه‌ای مشخص با استفاده از تغییرات توان راکتیو تولیدی آنها از شرایط نامی تا افزایش بارگذاری ناحیه است. در این حالت ژنراتورهایی که در پاسخ به افزایش بارگذاری راکتیو تمایل بیشتری دارند، به سهولت تعیین می‌شوند. استفاده از توان دوم تغییرات راکتیو ژنراتورها نیز به منظور تأثیر بیشتر ژنراتورها با تغییرات بالاتر در کمی‌سازی رابطه (۵) است.

۲-۲- محدودیت‌های مسأله

محدودیت‌های مسأله بهینه‌سازی شامل محدودیت‌های بهره‌برداری است که عبارت از محدودیت‌ها پخش بار تعادل توان‌های اکتیو و راکتیو و محدودیت‌های متغیرهای کنترلی و حالت سیستم هستند. این محدودیت‌ها به صورت زیر فرموله می‌شوند:

$$\begin{aligned} P_G^i - P_L^i - P^i(x, u) &= 0 \\ Q_G^i - Q_L^i - Q^i(x, u) &= 0 \\ V_{G,\min}^i \leq V_G^i \leq V_{G,\max}^i \\ V_{L,\min}^i \leq V_L^i \leq V_{L,\max}^i \\ T_{\min}^i \leq T^i \leq T_{\max}^i \\ Q_{c,\min}^i \leq Q_c^i \leq Q_{c,\max}^i \\ Q_{G,\min}^i \leq Q_G^i \leq Q_{G,\max}^i \end{aligned} \quad (6)$$

در روابط بالا زیرنویس G ، L و C به ترتیب مربوط به باس‌های ژنراتوری، باس‌های بار و جبران‌کننده‌های موازی توان راکتیو هستند. T_i نیز موقعیت تپ ترانسفورماتور در باس نام است.

۲-۳- فرمول‌بندی چند هدفه

با توجه به اینکه اهداف ذکر شده در مدیریت توان راکتیو از یک جنس نبوده، در محدوده متفاوتی از جواب‌ها قرار دارند، لذا جمع وزنی این اهداف بدون نرمالیزه نمودن

۳- روش بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم

اجتماع ذرات

$$X_{i+1} = X_i + V_{i+1} \quad (14)$$

۳-۲- توسعه الگوریتم اجتماع ذرات

داس و همکاران در [۲۰]، طرحی جدید از بروزرسانی سرعت ذرات در الگوریتم اجتماع ذرات را با استفاده از یک عملگر برداری دیفرانسیلی برگرفته از خانواده الگوریتم تکامل تفاضلی [۲۱] پیشنهاد کرده‌اند. همان طور که ذکر شد، سرعت هر ذره در الگوریتم اجتماع ذرات دارای سه قسمت اصلی است. در طرح ارائه شده توسط [۲۰]، قسمت دانش فردی ذره در بروز رسانی سرعت آن حذف شده و به جای آن یک قسمت جدید شامل اختلاف موقعیت دو ذره مجزا در فضای جستجو اضافه می‌گردد. این دو ذره به صورت تصادفی از میان ذرات موجود در فضای جستجو انتخاب می‌شوند. قسمت سرعت تفاضلی از بروز رسانی سرعت ذرات از طرح عملگر جهش در الگوریتم تکامل تفاضلی انتخاب شده و از این رو در مرجع [۲۰]، الگوریتم پیشنهادی به عنوان PSO-DV (بهینه‌سازی اجتماع ذرات با سرعت آشفته‌گی تفاضلی) نام‌گذاری شده است.

در الگوریتم پیشنهادی توسط [۲۰]، برای هر ذره i در فضای جستجو، دو ذره دیگر j و k ($k \neq j \neq i$) به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند. اختلاف بین موقعیت دو ذره انتخابی به عنوان یک بردار تفاضلی به صورت رابطه (۱۵) تعریف می‌شود.

$$\delta_i = X_k - X_j \quad (15)$$

سپس سرعت آزمایشی برای ذره مورد نظر نام به صورت رابطه (۱۶) بروز می‌شود:

$$V_{i+1} = \begin{cases} K[wV_i + \beta\delta_i + C_{2i}(Gbest - X_i)] & \text{if } r \leq CR \\ V_i & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

که در آن CR، احتمال وقوع عملگر تقاطع، r یک عدد تصادفی در بازه [۰-۱] و β نیز یک عدد اسکالر است که در بازه [۰-۱] انتخاب می‌شوند. با محاسبه سرعت جدید، موقعیت جدید آزمایشی برای ذره نام؛ یعنی Ti از طریق جمع سرعت جدید حاصل از روابط (۱۶) با موقعیت قبلی ذره به صورت رابطه (۱۷) به دست می‌آید.

الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO)، یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر جمعیت است که برای اولین بار توسط کندی و ابره‌ارت پیشنهاد شد [۱۹]. ایده اصلی در الگوریتم اجتماع ذرات، مدل‌سازی و شبیه‌سازی حرکت و رفتار گروهی ذرات (مانند پرندگان) در جستجوی غذا است. در این مقاله، از یکی از روش‌های توسعه یافته این الگوریتم [۲۰] که دارای قابلیت بالایی در ارائه جواب بهینه‌ی مطلق یا نزدیک به آن با سرعت بالاست، برای حل مسأله مدیریت بهینه‌ی اقتصادی - امنیتی توان راکتیو با اهداف چندگانه استفاده شده است. شایان ذکر است که در روش بهینه‌سازی پیشنهاد شده در این مقاله، برای افزایش کارایی بیشتر الگوریتم توسعه یافته، عملگر جهش با رویکردی مناسب به این الگوریتم افزوده شده است.

۳-۱- الگوریتم کلاسیک اجتماع ذرات

در الگوریتم کلاسیک PSO، هر ذره i دارای دو قسمت اصلی، شامل موقعیت فعلی ذره (X_i) و سرعت فعلی ذره (V_i) است. در هر تکرار، تغییر موقعیت هر ذره در فضای جستجو بر اساس موقعیت فعلی ذره و سرعت به روز شده‌ی آن انجام می‌شود. سرعت هر ذره نیز بر مبنای سه فاکتور اصلی؛ یعنی سرعت فعلی ذره، بهترین موقعیت تجربه شده از سوی ذره (دانش فردی) و موقعیت ذره با بهترین وضعیت در میان ذرات گروه (دانش اجتماعی)، به فرم رابطه (۱۳) به روز می‌گردد.

$$V_{i+1} = K \left[wV_i + C_{1i}(Pbest_i - X_i) + C_{2i}(Gbest_i - X_i) \right] \quad (13)$$

که در آن w ، ضریب اینرسی ذره نام برای حرکت با سرعت قبلی، C_{1i} و C_{2i} به ترتیب ضرایب یادگیری فردی و گروهی ذره نام که در جهت حفظ خاصیت احتمالی الگوریتم به صورت تصادفی در بازه [۰-۲] انتخاب می‌شوند. با تعیین سرعت بعدی هر ذره نام، موقعیت بعدی آن از رابطه (۱۴) به دست می‌آید.

استفاده از ویرایش جدید الگوریتم توسعه یافته اجتماع ذرات در مدیریت بهینه اقتصادی - امنیتی توان راکتو در سیستم‌های قدرت ۷۳

X_i^l و X_i^u نیز به ترتیب حدود بالا و پایین متغیر کنترلی نام (ذره انتخابی) هستند. μ_i نیز یک تغییر کوچک در جواب است که از طریق توزیع چند جمله‌ای زیر به دست می‌آید:

$$\mu_i = \begin{cases} (2r_j)^{\frac{1}{\eta+1}} - 1 & \text{if } r_j \leq 0.5 \\ 1 - [2(1-r_j)]^{\frac{1}{\eta+1}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (20)$$

در رابطه (۲۰) r_j یک عدد تصادفی در بازه $[0, 1]$ و η نیز شاخص توزیع جهش هستند. همان طور که ذکر شد، ذره تولید شده از طریق عملگر جهش با ذره ثابت شده در موقعیت خود برای تعداد مشخصی تکرار، مقایسه و در صورت داشتن برابری بهتر جایگزین می‌شود. در این مقاله برای مجزا ساختن این روش با روش پیش‌تر (PSO-DV) از اختصار MPSO-DV برای الگوریتم بهبود یافته استفاده می‌شود. که در آن M نشان دهنده عملگر جهش اضافه شده به این الگوریتم است.

۴- نتایج شبیه سازی

در این بخش روش پیشنهادی بهینه‌سازی مدیریت توان راکتو با در نظر گرفتن پایداری و لثاژ به‌عنوان هدف امنیتی تحت شرایط کاری نرمال سیستم با استفاده از هر دو الگوریتم‌های توسعه یافته و کلاسیک اجتماع ذرات اجرا گردیده است. به منظور اجرای شبیه‌سازی و نمایش کارایی الگوریتم‌های توسعه یافته در بهینه‌سازی مدیریت توان راکتو از شبکه ۳۰ باس IEEE [۲۳] به‌عنوان آزمون سیستم نمونه استفاده شده است. دیاگرام تک خطی سیستم نمونه در شکل (۱) نشان داده شده است.

این سیستم دارای شش ژنراتور مجهز به سیستم کنترل اتوماتیک ولتاژ در باس‌های (۱، ۲، ۵، ۸، ۱۱ و ۱۳)، چهار ترانسفورماتور مجهز به سیستم تپ‌چنجر قابل تغییر زیربار در شاخه‌های (۶-۹، ۶-۱۰، ۴-۱۲ و ۲۷-۲۸) با قابلیت تغییر یک درصدی ولتاژ برای هر تپ و دو خازن قابل کلیدزنی در باس‌های (۱۰ و ۲۴) با پله‌های یک مگاواوری است. اطلاعات باس‌ها و شاخه‌های سیستم نمونه از [۲۳-۲۴] برداشت شده است. جدول (۱) محدودیت‌های در نظر

$$T_i = X_i + V_{i+1} \quad (17)$$

موقعیت آزمایشی T_i ، در صورتی جایگزین موقعیت فعلی X_i می‌شود که نسبت به آن دارای برابری بهتری باشد.

اگر هدف بهینه‌سازی، کمینه‌سازی تابع هدف $F(X)$ باشد، آن‌گاه ذره نام به صورت زیر بروز می‌گردد.

$$X_{i+1} = \begin{cases} T_i & \text{if } F(T_i) \leq F(X_i) \\ X_i & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

۳-۳- بهبود بیشتر الگوریتم توسعه یافته اجتماع ذرات

در الگوریتم ارائه شده توسط [۲۰]، این امکان وجود دارد که یک ذره برای تعداد زیادی تکرار بدون حرکت بوده، در جای خود ثابت بماند [۲۰]. این موضوع می‌تواند روند همگرایی الگوریتم در رسیدن به جواب نهایی را کندتر کند. در روش پیشنهادی این مقاله برای غلبه بر مشکل فوق و بهبود بیشتر الگوریتم ارائه شده توسط [۲۰]، روشی ساده بر اساس عملگر جهش در الگوریتم ژنتیک ارائه شده است. در این روش، هر ذره که برای تعداد مشخصی تکرار بدون حرکت باقی بماند، توسط یک ذره جهش یافته مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در صورتی که ذره جهش یافته از برابری بالاتری برخوردار باشد، جایگزین ذره ثابت می‌شود در غیر این صورت ذره قبلی مجدداً در همان موقعیت قرار می‌گیرد. در اینجا از عملگر جهش چند جمله‌ای عدد-حقیقی به کارگرفته شده در مرجع [۲۲] که برای اجرای عدد حقیقی الگوریتم ژنتیک استفاده شده، بهره گرفته شده است. پس از انتخاب تصادفی یک ذره از جمعیت جواب‌ها به عنوان والد، ذره جدید از طریق عملگر جهش به عنوان فرزند جدید به صورت رابطه (۱۹) تعیین می‌شود.

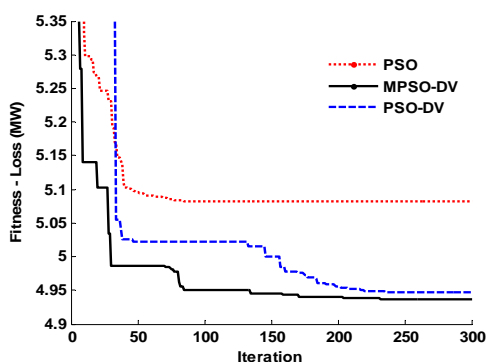
$$C_i = X_i + (X_i^u - X_i^l)\mu_i \quad (19)$$

که در آن C_i فرزند تولید شده از طریق عملگر جهش، X_i والد یا ذره تولید شده به صورت تصادفی (این ذره از بین چند ذره با برابری بالا انتخاب می‌شود) هستند.

می‌گردند. جداول (۳) نتایج اجرای الگوریتم‌ها را برای هر یک از اهداف نشان می‌دهد. نتایج ارائه شده شامل بهترین، بدترین، میانگین و انحراف معیار است که به ازای ۲۰ بار اجرای مجزای هریک از الگوریتم‌ها با ۵ ذره در جمعیت و ۳۰۰ تکرار حاصل شده‌اند. همان‌طور که از جدول (۳) مشاهده می‌شود، الگوریتم‌های توسعه یافته و اصلاح شده PSO-DV و MPSO-DV نسبت به الگوریتم کلاسیک اجتماع ذرات جواب‌های بسیار بهتری را برای هریک از توابع هدف ارائه می‌نمایند. همچنین ملاحظه می‌گردد که الگوریتم MPSO-DV در بیشتر موارد جواب تقریباً بهتری را نسبت به PSO-DV دارد. این موضوع بیانگر مؤثر واقع شدن عملگر اضافه شده به الگوریتم PSO-DV است.

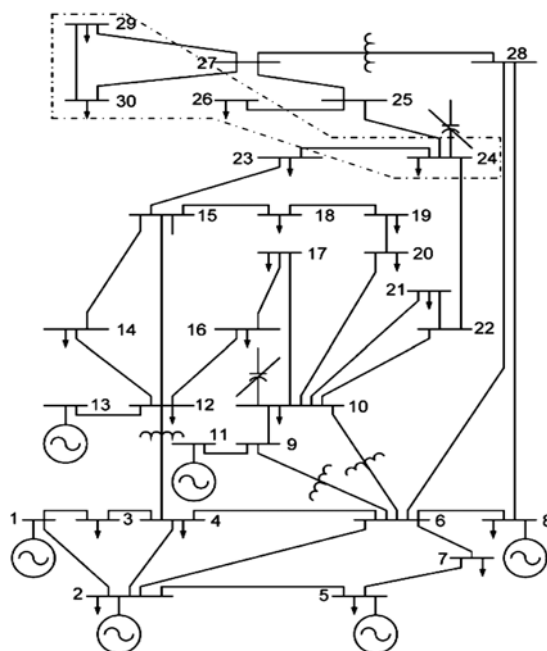
شکل (۲)، فرآیند همگرایی هر سه الگوریتم را برای کمینه‌سازی تابع هدف تلفات نشان می‌دهد. برخلاف الگوریتم کلاسیک دو الگوریتم دیگر در کمینه‌های محلی گیر نکرده، تا رسیدن به جواب نهایی جستجو را پیوسته انجام می‌دهند. همچنین ملاحظه می‌شود که الگوریتم MPSO-DV در رسیدن به جواب بهینه دارای سرعت بالاتری نسبت به PSO-DV است. جدول (۴) متغیرهای کنترلی حاصل از اجرای هر سه الگوریتم را در کمینه‌سازی تلفات نشان می‌دهد.

جدول (۵)، نتایج حاصل از بهینه‌سازی چند هدفه مدیریت توان راکتیو را با اهداف کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ و بهبود پایداری ولتاژ نشان می‌دهد. جواب‌های ارائه شده در جدول (۵) برای سه بار اجرای مجزای الگوریتم MPSO-DV با ۱۰ ذره در جمعیت هستند.



شکل (۲): فرآیند همگرایی سه الگوریتم با تابع هدف تلفات

گرفته شده برای متغیرهای حالت و کنترلی سیستم را نشان می‌دهد. پارامترهای مربوط به الگوریتم‌ها شامل تعداد جمعیت و تعداد تکرارها به ترتیب ۵ و ۳۰۰ انتخاب شده‌اند.



شکل (۱)- دیاگرام تک‌خطی سیستم ۳۰ باسه IEEE [۱۱]

همان‌طور که می‌دانیم، ناپایداری ولتاژ در ابتدا یک پدیده محلی بوده، در صورت عدم کنترل آن ممکن است که کل سیستم را در بر گیرد. لذا در این مقاله به منظور افزایش بارگذاری سیستم و تعیین حد پایداری ولتاژ، دو ناحیه برای افزایش بارگذاری در نظر گرفته شده است. باید توجه داشت که انتخاب نواحی می‌تواند براساس هر ایده‌ای از قبیل ایده نواحی کنترل ولتاژ تعیین شود. در این مقاله باس‌های شماره ۲۴، ۲۶، ۲۹ و ۳۰ به‌عنوان ناحیه ۱ (این ناحیه در شکل (۱) با خط‌چین نشان داده شده است) و باس‌های شماره ۱۲، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۸، ۱۹ و ۲۰ نیز به‌عنوان ناحیه دوم به منظور افزایش بارگذاری انتخاب شده‌اند. جدول (۲) اطلاعات حد بارگذاری و ضرایب بارگذاری سیستم را برای افزایش بارگذاری در هر دو ناحیه در شرایط اولیه سیستم نشان می‌دهد.

در ابتدا به منظور ارزیابی هریک از توابع هدف و همچنین نمایش کارایی الگوریتم‌های توسعه یافته در بهینه‌سازی مدیریت توان راکتیو، الگوریتم‌ها به صورت تک هدفه و برای هریک از اهداف به صورت جداگانه اجرا

جدول (۱): محدودیت متغیرها سیستم ۳۰ باسه IEEE

محدودیت توان راکتور ژنراتورها						
باس	1	۲	۵	۸	۱۱	۱۳
Q_{max}	۱	۰/۶	۰/۶۲۵	۰/۴۸۴	۰/۴	۰/۴۴۷
Q_{min}	-۰/۵	-۰/۲	-۰/۱۵	-۰/۱۵	-۰/۱	-۰/۱۵
محدودیت باس‌های ژنراتوری و بار						
V_{Lmin}	V_{Gmin}	V_{Lmax}	V_{Gmax}			
۰/۹۵	۰/۹۵	۱/۰۵	۱/۱			
محدودیت تیچنجر و خازن‌ها						
Q_{Cmin}	Q_{Cmax}	T_{min}	T_{max}			
۰	۰/۲	۰/۹	۱/۱			

جدول (۲): حد بارگذاری نواحی در شرایط اولیه سیستم ۳۰ باسه IEEE

ناحیه بارگذاری	بارگذاری اولیه	حد بارگذاری	ضریب بارگذاری
ناحیه ۱	۲۸۳/۴	۳۳۸/۴	۰/۱۹۳۱
ناحیه ۲	۲۸۳/۴	۴۲۱/۳	۰/۴۸۵۶

جدول (۳): نتایج اجرای الگوریتم برای توابع هدف مستقل

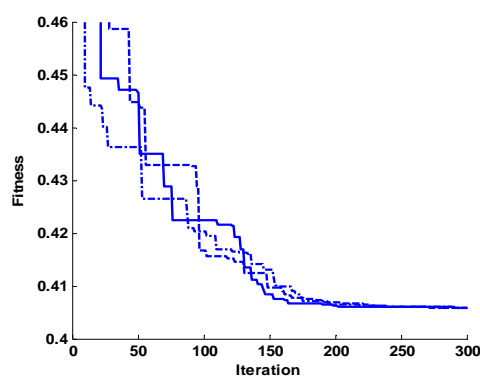
تلفات بعنوان تابع هدف				الگوریتم
انحراف معیار	میانگین	بدترین	بهترین	
۰/۰۴۶۵	۵/۱۴۶	۵/۲۳	۵/۰۸۲	PSO
۰/۰۴۱۴	۵	۵/۱۱۶	۴/۹۴۵	PSO-DV
۰/۲۰۴	۴/۹۶۰	۴/۹۹۶	۴/۹۳۱	MPSO-DV
انحراف و لئاژ بعنوان تابع هدف				الگوریتم
انحراف معیار	میانگین	بدترین	بهترین	
۰/۰۰۱۳۱	۰/۰۰۸۴	۰/۰۱۱۰۶	۰/۰۰۶۶۴	PSO
۰/۰۰۰۵۹	۰/۰۰۶۶	۰/۰۰۷۶۸	۰/۰۰۵۶۱	PSO-DV
۰/۰۰۰۷۲	۰/۰۰۷۶	۰/۰۰۷۸۸	۰/۰۰۵۵۳	MPSO-DV
شاخص ۱ پایداری و لئاژ (مقدار ویژه)				الگوریتم
انحراف معیار	میانگین	بدترین	بهترین	
۰/۰۰۲۰۵	۰/۲۴۳۹	۰/۲۴۱۳	۰/۲۴۸۱	PSO
۰/۰۰۰۷۷	۰/۲۵۳۱	۰/۲۵۱۹	۰/۲۵۴۶	PSO-DV
۰/۰۰۰۷۶	۰/۲۵۳۳	۰/۲۵۱۱	۰/۲۵۵۱	MPSO-DV

جدول (۴): متغیرهای کنترلی برای هر سه الگوریتم و شرایط اولیه سیستم با هدف کمیته‌سازی تلفات

اولیه	الگوریتم			متغیر
	PSO	PSO-DV	MPSO-DV	
۱/۰۴	۱/۰۵۹۱	۱/۰۷۰۵	۱/۰۷۱۶	VG1
۱/۰۴۵	۱/۰۴۹۲	۱/۰۶۳۸	۱/۰۶۲۴	VG2
۱/۰۲	۱/۰۲۴۱	۱/۰۳۹۸	۱/۰۳۹۶	VG3
۱/۰۲	۱/۰۲۶۶	۱/۰۴۲۶	۱/۰۴۱۴	VG4
۱/۰۵	۱/۰۵۸	۱/۰۶۹۷	۱/۰۷۵۳	VG5
۱/۰۵	۱/۰۳۲۴	۱/۰۶۶۶	۱/۰۶۷۱	VG6
۱	۰/۹۹	۱	۱/۰۱	T6-9
۱	۰/۹۸	۱/۰۲	۱	T6-10
۰/۹۳	۰/۹۶	۰/۹۹	۰/۹۹	T4-12
۱/۰۱	۰/۹۵	۰/۹۸	۰/۹۷	T28-27
۰	۲۰	۱۹	۱۹	C1۰
۰	۶	۱۰	۱۰	C۲۴

جدول (۵): نتایج ۳ بار اجرای الگوریتم چند هدفه فازی

مقدار ویژه	انحراف و لتاژ	تلفات	هدف کلی	اجرا
۰/۲۴۱۷۲	۰/۰۱۶۹۵	۴/۹۹۰	۰/۴۰۵۹۴۷	1
۰/۲۴۱۷۱	۰/۰۱۶۷۶	۴/۹۹۲	۰/۴۰۵۹۴۶	۲
۰/۲۴۱۷۰	۰/۰۱۶۵۰	۴/۹۹۳	۰/۴۰۵۹۴۳	۳
۰/۲۴۱۷۱	۰/۰۱۶۷۳	۴/۹۹۱۶	۰/۴۰۵۹۴۵	میانگین



شکل (۳): فرآیند همگرایی سه الگوریتم در بهینه‌سازی چندهدفه فازی

شکل (۳) نیز فرآیند همگرایی سه بار اجرای الگوریتم MPSO-DV را نشان می‌دهد. در بهینه‌سازی صورت گرفته شده، ضریب وزنی تلفات برابر 0/6، ضریب وزنی انحراف و لتاژ 0/2 و ضریب وزنی شاخص پایداری و لتاژ (اندازه حداقل مقدار ماتریس ژاکوبین) نیز 0/2 انتخاب شده‌اند. جدول (۶) متغیرهای کنترلی را برای هر سه بار اجرای الگوریتم نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، الگوریتم توسعه یافته برای بهینه‌سازی چند هدفه نیز دارای عملکرد خوبی است؛ به طوری که برای وزن‌های ارائه شده برای هر یک از توابع هدف در نهایت با اجرای سه بار متفاوت الگوریتم، شاهد جواب‌ها نسبتاً مشابهی هم بوده‌ایم. این موضوع نیز کارایی الگوریتم توسعه یافته در بهینه‌سازی چند هدفه مدیریت توان راکتیو را نشان می‌دهد.

در این مقاله، برای در نظر گرفتن تابع هدف پایداری و لتاژ دو شاخص معرفی شد. در بالا برای بهینه‌سازی تک‌هدفه و چند هدفه، از شاخص اندازه حداقل مقدار ویژه ماتریس ژاکوبین در مسأله بهینه‌سازی استفاده شد. همان‌طور

به‌عنوان شاخص ارزیابی پایداری ولتاژ استفاده می‌شود. در این مقاله این شاخص نیز با دو شاخص دیگر با عنوان شاخص ۳ مقایسه می‌گردد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، شاخص پیشنهادی، در هماهنگی بهینه منابع کنترل توان راکتو برای افزایش بارگذاری در ناحیه ۱ نسبت به شاخص اندازه حداقل مقدار ویژه ماتریس ژاکوبین از قابلیت بیشتری برخوردار است. جواب‌های تعیین شده برای هر دو شاخص از طریق اجرای الگوریتم توسعه یافته MPSO-DV است.

یکی از ویژگی شاخص ارائه شده در این مقاله، قابلیت بالای آن؛ حتی بدون اعمال وزن‌های مختلف بنا به اهمیت ژنراتورهاست. همان‌طور که از جدول (۷) ملاحظه می‌شود، برای تمامی شاخص‌ها حد بارگذاری در ناحیه ۱ و ۲ نسبت به شرایط اولیه افزایش یافته است. اما با توجه به اینکه هدف، افزایش بیشتر بارگذاری در ناحیه ۱ بوده، لذا مطابق جدول (۷) اجرای الگوریتم با شاخص پیشنهادی به ضریب بارگذاری بیشتر در این ناحیه منجر شده است. ضریب بارگذاری کمتر ناشی از شاخص ۳ به دلیل نیاز این شاخص به ضرایب وزنی مناسب بنا به اهمیت هر یک از ژنراتورها برای داشتن ذخیره بیشتر به منظور حمایت ناحیه ضعیف است.

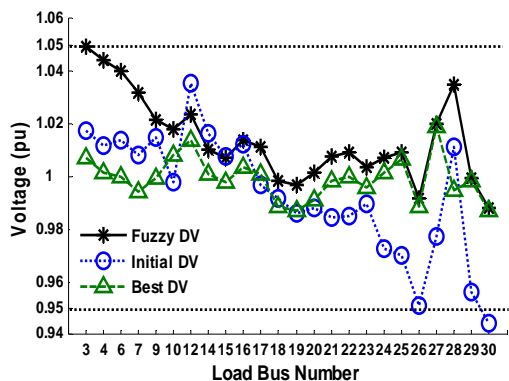
شکل (۴)، منحنی P-V در باس ۳۰ برای بهره‌برداری از سیستم تحت شرایط بهینه برای هر سه شاخص و شرایط بهره‌برداری اولیه را نشان می‌دهد. از این شکل نیز مشاهده می‌شود که استفاده از شاخص پیشنهادی به افزایش بیشتر بارگذاری در ناحیه ۱ نسبت به شاخص‌های دیگر منجر شده است.

شکل (۵) پروفیل ولتاژ را برای سه شرایط بهینه تک‌هدفه با هدف کمترین انحراف ولتاژ، شرایط اولیه و شرایط بهینه سازی چندهدفه فازی نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که برای شرایط بهینه‌سازی ولتاژ تمامی باس‌ها در محدوده مجاز قرار گرفته است.

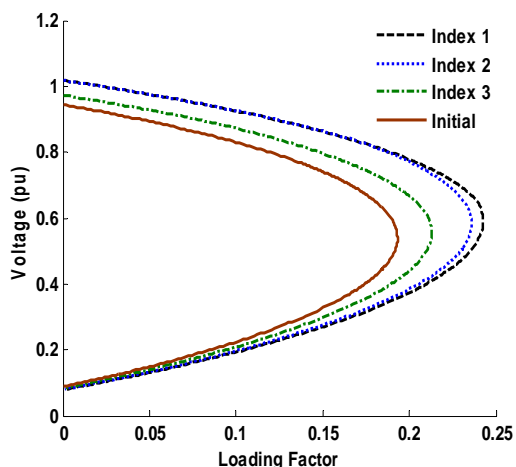
که گفته شد، یکی از مهمترین مسائل در بروز ناپایداری ولتاژ در سیستم‌های قدرت، از دست رفتن قابلیت کنترل ولتاژ توسط ژنراتورهای مهم است.

بنابراین باید طرحی اندیشید که این ژنراتورها از ذخیره کافی توان راکتو برای مواجه شدن با شرایط غیر نرمال و حمایت کافی نواحی ضعیف برخوردار باشند. استفاده از شاخص حداقل مقدار ویژه ماتریس ژاکوبین در این زمینه به دلیل ماهیت غیر خطی مسأله نمی‌تواند به‌طور کامل مؤثر واقع شود. بنابراین، در این مقاله شاخصی برای افزایش بهینه ذخیره راکتو ژنراتورها برای این منظور ارائه شده که می‌تواند قابلیت بالاتری را در هماهنگی بهینه منابع کنترل توان راکتو در مسائل بهینه‌سازی و به منظور افزایش حاشیه پایداری ولتاژ داشته باشد. در ادامه این شاخص با شاخص اندازه حداقل مقدار ماتریس ژاکوبین مقایسه می‌گردد.

برای اجرای روش پیشنهادی مدیریت توان راکتو با استفاده از شاخص ارائه شده در جهت ارزیابی پایداری ولتاژ، باید ناحیه از سیستم را که از نظر پایداری یا بارگذاری ضعیف است، انتخاب نمود. در این مقاله ناحیه ۱ (در سیستم نمونه این ناحیه با خط‌چین مشخص شده است) به دلیل بارگذاری کمتری برای این منظور استفاده می‌شود. سیستم برای افزایش بارگذاری در این ناحیه از حاشیه پایداری کمتری نسبت به بارگذاری در ناحیه ۲ برخوردار است. با انتخاب ناحیه مورد نظر دو شرایط کاری را برای سیستم در نظر می‌گیریم. شرایط اول مربوط به عملکرد سیستم در شرایط کاری اولیه و شرایط دوم نیز مربوط به افزایش الگوی بارگذاری مشخص در ناحیه اول است. این دو شرایط در فرآیند اجرای الگوریتم مرتباً تکرار شده تا از این طریق برازندگی جواب‌ها مطابق با شاخص ارائه شده در رابطه (۵) برای هر ذره ارزیابی گردد. جدول (۷)، مقایسه بین شاخص‌ها در افزایش حد بارگذاری سیستم در ناحیه ۱ را نشان می‌دهد. در این جدول شاخص ۱ و شاخص ۲ به ترتیب بیانگر حداقل مقدار ویژه ماتریس ژاکوبین و شاخص ذخیره راکتو هستند. در برخی مقالات کمینه‌سازی مجموع تولید توان راکتو ژنراتورها در شرایط کاری نرمال



شکل (۵): پروفیل ولتاژ باس‌های بار در شرایط مختلف بهره‌برداری



شکل (۴): منحنی P-V در باس ۳۰ برای شرایط مختلف بهره‌برداری

جدول (۶): متغیرهای کنترلی برای هر سه بار اجرای مجزای بهینه‌سازی چندهدفه با الگوریتم MPSO-DV

اجرا			متغیر
اجرا ۳	اجرا ۲	اجرا ۱	
۱/۰۷۲۶	۱/۰۱۷۷	۱/۰۷۲۴	VG1
۱/۰۶۳۰	۱/۰۶۲۵	۱/۰۶۲۷	VG2
۱/۰۴۰۴	۱/۰۳۹۱	۱/۰۳۹۶	VG3
۱/۰۳۹۲	۱/۰۴۰۲	۱/۰۳۹۳	VG4
۱/۰۴۲۷	۱/۰۴۳۴	۱/۰۴۱۳	VG5
۱/۰۴۵۵	۱/۰۴۷۴	۱/۰۴۱۸	VG6
۱/۰۲۷۲	۱/۰۲۶۱	۱/۰۲۵۶	T6-9
۱/۰۲	۱/۰۲۰	۱/۰۲	T6-10
۱/۰۲	۱/۰۲۰	۱/۰۲	T4-12
۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	T28-27
۱۸	۱۸	۱۸	C1۰
۱۱	۱۱	۱۱	C۲۴

جدول (۷): نتایج ۳ بار اجرای الگوریتم چند هدفه فازی

شرایط بهره برداری	بارگذاری اولیه	ضریب بارگذاری ناحیه ۱	ضریب بارگذاری ناحیه ۲
اولیه	۲۸۳/۴	۰/۱۹۳۱	۰/۴۸۵۶
بهینه با شاخص ۱	۲۸۳/۴	۰/۲۳۵۹	۰/۶۲۴۹
بهینه با شاخص ۲	۲۸۳/۴	۰/۲۴۱۹	۰/۶۲۲۴
بهینه با شاخص ۳	۲۸۳/۴	۰/۲۱۲۸	۰/۵۵۷۷

۵- نتیجه گیری

در این مقاله بهینه‌سازی مدیریت توان راکتیو چندهدفه با استفاده از الگوریتم توسعه‌یافته اجتماع ذرات مورد توجه قرار گرفت. به منظور افزایش سرعت همگرایی الگوریتم پیشنهادی از عملگر جهش با رویکردی مناسب استفاده شد. در بهینه‌سازی چند هدفه ارائه شده، اهدافی نظیر کمینه‌سازی تلفات اکتیو، کمینه‌سازی انحراف ولتاژ و بهبود پایداری ولتاژ مدنظر قرار گرفتند. با توجه به این‌که اهداف مذکور از یک جنس نبوده، در محدوده متفاوتی از جواب‌ها قرار دارند، لازم بود که به طریقی با واحدهای یکسان بیان شوند که در این مقاله از فازی‌سازی برای نرمالیزه نمودن توابع هدف در بازه [۰-۱] استفاده شد. روش پیشنهادی مدیریت توان راکتیو چند هدفه با استفاده از ویرایش جدیدی از الگوریتم توسعه اجتماع ذرات روی سیستم نمونه ۳۰ باسه IEEE اجرا گردید. نتایج شبیه‌سازی حاکی از دقت و سرعت بالای الگوریتم در رسیدن به جواب بهینه است، به طوری که هر سه هدف با توجه به ضرایب وزنی در نظر گرفته شده، نسبت به شرایط اولیه بهبود قابل توجهی دارند. در این مقاله همچنین شاخصی جدید، مبتنی بر توزیع بهینه توان راکتیو ژنراتورها در شرایط کاری نرمال به منظور افزایش پایداری ولتاژ سیستم ارائه گردید که نتایج اجرای الگوریتم با شاخص پیشنهادی مبین افزایش بیشتر پایداری ولتاژ نسبت به شاخص دیگر ارزیابی پایداری ولتاژ شامل حداقل مقدار ویژه ماتریس ژاکوبین است.

مراجع

- [6] M. Varadarajan and K. S. Swarup, "Differential evolutionary algorithm for optimal reactive power dispatch," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 30, pp. 435-441, 2008
- [7] W. Zhang, and Y. Liu, "Multi-Objective Reactive Power and Voltage Control Based on Fuzzy Optimization Strategy and Fuzzy Adaptive Particle Swarm," *Electric Power Systems Research*, vol. 30, pp. 525-532, 2009.
- [8] F. Dong, B. H. Chowdhury, M. L. Crow, and L. Acer "Dynamic Security Constrained Optimal Power Flow/Var Planning," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 16, no. 1, pp. 38-43, 2001.
- [9] H. Song, B. Lee, S. Kwon and V. Ajjarpu "Reactive Reserve - Based Contingency Constrained Optimal Power Flow (RCCOPF) for Enhancement of Voltage Stability Margins," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 4, pp. 1538-1546, 2003.
- [10] F. Dong, B. H. Chowdhury, M. L. Crow, and L. Acer "Improving Voltage Stability by Reactive Power Reserve Management," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 1, pp. 338-345, 2005.
- [11] M. A. Abido, and J. M. Bakhshwain, "Optimal VAR dispatch using a multiobjective evolutionary algorithm," *Electric Power Systems Research*, vol. 27, pp. 13-20, 2005.
- [12] M. A. Abido, and J. M. Bakhshwain, "Optimal VAR dispatch using a multiobjective evolutionary algorithm," *Electric Power Systems Research*, vol. 27, pp. 13-20, 2005.
- [13] P. Kessel and H. Glavitsch, "Estimating the voltage stability of a power system," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 1, no. 3, pp. 346-354, 1986.
- [14] W. Zhang, F. Li and L. M. Tolbert "Review of Reactive Power Planning: Objectives, Constraints and Algorithms" *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 4, pp. 2177-2186, 2007.
- [15] V. Ajjarapu and C. Christy, "The Continuation Power Flow: A Tool to Study Steady State Voltage Stability," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 416-423, 1992.
- [16] H. Song, B. Lee, S. Kwon and V. Ajjarpu "Maximum Loadability Limit of a Power System Using Multiagent-based Hybrid Particle Swarm Optimization," *Electric Power Components and Systems*, vol. 36, pp. 575-586, 2008.
- [17] G. D. Irisarri, X. Wang, J. Tong and S. Mokhtari "Maximum loadability of power systems using interior point nonlinear optimization method," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, no. 1, pp. 162-172, 1997.
- [18] P. Kundur, "power system stability and control". EPRI, 1996.
- [19] J. Kennedy and R. Eberhart "Particle Swarm Optimization," *Proceeding of IEEE International Conference on Neural Networks, USA*, vol. 5, pp. 1942-1948, 1995.
- [20] S. Das. A. Abraham and A. Konar, "Particle Swarm Optimization and Differential Evolution Algorithms: Technical Analysis, Applications and Hybridization Perspectives," *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, vol. 116, pp. 1-38, 2008
- [21] Z. He, C. Wei, L. Yang, X. Gao, S. Yao, R. Eberhart and Y. Shi "Extracting Rules from Fuzzy Neural Network by Particle Swarm Optimization,"
- [1] T. J. E. Miller, "Reactive Power Control in Electric Systems", Willey, 1983
- [2] H. Raoufi and M. Kalantar, "Reactive Power Rescheduling with Generator Ranking for Voltage Stability Improvement," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, pp. 1129-1135, 2009.
- [3] Federal Energy Regulatory Commission, Staff Report "Principles for Efficient and Reliable Reactive Power Supply and Consumption," Docket, no. AD05-1-000, February 4, 2005.
- [4] B. Zhao, C. X. Guo and Y. J. Cao "A Multiagent-Based Particle Swarm Optimization Approach for Reactive Power Dispatch" *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 1070-1078, 2005
- [5] A. A. Esmi, G. Lambert-Torres, and C. Z. Souza "A Hybrid Particle Swarm Optimization Applied to Loss Power Minimization," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 859-866, 2005

Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation, Anchorage, Alaska, USA, 1998.

- [22] H. G. Beyer and K. Deb "Extracting on Self-Adaptive Features in Real-Parameter Evolutionary Algorithm," IEEE Transactions on Evolutionary Computation. vol. 5, no. 3, pp. 250–270, 2001.
- [23] Power System Test Case Archive, [http://www.ee.washington.edu/research/pstca/R.D.Zimmerman, C.E. Murillo-Sánchez, D. Gan, Matlab Power System Simulation Package \(Version 4.0b1\), Available at http://www.pserc.cornell.edu/matpower/](http://www.ee.washington.edu/research/pstca/R.D.Zimmerman,C.E.Murillo-Sánchez,D.Gan,MatlabPowerSystemSimulationPackage(Version4.0b1),Availableathttp://www.pserc.cornell.edu/matpower/), 2009.

زیر نویس

¹Particle Swarm Optimization