تعیین بهینه تولید و مکان و اندازه بهینه ادوات FACTS به منظور حذف تراکم خطوط

ابراهیم حجتی نجف آبادی[۱] سید مسعود برکاتی[۲] سعید توکلی افشار[۳]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه سیستان و بلوچستان- زاهدان- ایران
ebrahim.hojjati@gmail.com
۲-استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه سیستان و بلوچستان- زاهدان- ایران
smbaraka@ece.usb.ac.ir
۳- دانشیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه سیستان و بلوچستان- زاهدان- ایران
tavakoli@ece.usb.ac.ir

چکیده: کاربرد سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS) نشان می‌دهد که این ادوات می‌توانند پارامترهای فنی سیستم انتقال را به طور موثری کنترل نمایند. اما، تعیین مکان و اندازه بهینه آنها مساله مهمی است و معمولا برای حل این مساله نمی‌توان از روش‌های تحلیلی استفاده کرد. یک روش برای حل این قبیل مسائل استفاده از الگوریتم‌های بهینه سازی تکاملی است. اما کارایی این الگوریتم‌ها وابستگی شدیدی به تابع هدف تعریف شده، دارد. در این مقاله، دو الگوریتم بهینه سازی چند هدفه به نام‌های : الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب (NSGA-II) و بهینه سازی اجتماع ذرات چند هدفه (MOPSO) به منظور حل مساله تراکم در خطوط انتقال سیستم قدرت استفاده شده است. به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی، شبیه سازی‌ها روی سیستم‌های تست ۱۴ و ۳۰ باسه اصلاح شده، انجام گردیده است. ابتدا بار سیستم به صورت یکنواخت افزایش داده شده تا تراکم ایجاد شود. سپس الگوریتم‌های بهینه سازی برای یافتن مکان و اندازه بهینه ادوات FACTS و همچنین میزان بهینه تغییر در توان اکتیو تولیدی ژنراتورها، استفاده شده اند. دو نوع ادوات FACTS به نام‌های جبرانساز استاتیک توان راکتیو (SVC) و خازن سری کنترل شونده با تریستور (TCSC) برای حذف تراکم به کار برده شده اند. نتایج بدست آمده کارایی توابع هدف پیشنهادی را نشان می‌دهند.

کلمات کلیدی: سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)، الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب (NSGA-II)، بهینه سازی چند هدفه اجتماع ذرات (MOPSO)، جبرانساز استاتیک توان راکتیو (SVC)، خازن سری کنترل شونده با تریستور (TCSC)

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۲/۱/۱۵
تاریخ پذیرش مشروط: ۱۳۹۲/۰۸/۲۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۲/۲۷
نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر سید مسعود برکاتی
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – زاهدان – خیابان دانشگاه – دانشگاه سیستان و بلوچستان – دانشکده‌ی برق و کامپیوتر

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-10]

۱- مقدمه

با افزایش تقاضای توان الکتریکی و محدودیت‌های پیش روی احداث و توسعه سیستم‌های قدرت جدید، معمولا مجبور به بهره برداری از خطوط انتقال با ظرفیتی نزدیک حد حرارتی آن‌ها هستیم. در چنین شرایطی، قابلیت اطمینان سیستم کاهش می‌یابد، زیرا افزایش ناخواسته بار یا خروج بعضی خطوط منجر به افزایش بار در خطوط انتقال می‌گردد. در نتیجه با افزایش خطوط خارج شده، شرایط سیستم بحرانی تر شده و احتمال خاموشی سراسری افزایش می‌یابد.

خط دارای تراکم، خطی است که توان عبوری از آن بیشتر از مقدار نامی مجاز باشد. به طور کلی روش‌های مدیریت تراکم به دو دسته روش‌های فنی و روش‌های غیر فنی طبقه بندی می‌شوند که روش‌های غیر فنی به دو دسته روش‌های مبتنی بر بازار و غیر مبتنی بر بازار تقسیم می‌شوند [۱]. از روش‌های فنی می توان به قطع خطوط دارای تراکم، به کارگیری شیفت دهنده‌های فاز و بهره برداری از ادوات FACTS اشاره کرد. زمان‌بندی تولید ژنراتورها، قطع بار و قیمت گذاری نقطه‌ای و ناحیه‌ای از جمله روش‌های غیر فنی به شمار می‌روند. از بین دو روش اصلی بالا، روش‌های فنی دارای مزیت‌هایی از جمله عدم تاثیر گذاری بر مسائل اقتصادی هستند، به این ترتیب تولید کننده و توزیع کننده (GENCO and DISCO) درگیر نمی شوند. بنابراین، ادوات FACTS به عنوان یک تکنولوژی که می تواند تراکم انتقال را کاهش دهد و منجر به استفاده بهتر از شبکه موجود گردد، مورد بهره برداری قرار گرفته است [۲] . به نظر برخی دیگر از محققین، افزایش میل به استفاده از این ادوات به دو دلیل است: اولا پیشرفت‌های اخیر در الکترونیک قدرت این ادوات را مقرون به صرفه ساخته و ثانیا افزایش بار سیستم‌های قدرت، همراه با مقررات زدایی در صنعت برق، باعث افزایش تمایل در به کارگیری ادوات کنترل پخش توان به عنوان ابزارهای دارای توجیه اقتصادی در توزیع توان شده است[۳].

زمان‌بندی تولید برای مدیریت تراکم در [۴] و [۵] استفاده شده است. در [۴]، از ضرایب توزیع تراکم انتقال بر مبنای توان حقیقی خط استفاده شده تا تراکم ناحیه بندی شود و بهره بردار سیستم بتواند به طور بهینه تولید را زمانبندی مجدد کرده و تراکم را مدیریت نماید. حساسیت ژنراتورها به توان عبوری روی خطوط دارای تراکم برای انتخاب ژنراتورهای شرکت کننده در حل مساله تراکم استفاده شده، سپس الگوریتم بهینه سازی اجتماع ذرات برای حل مساله برنامه ریزی مجدد به کار گرفته شده است[۵].

مدیریت تراکم با استفاده از تعیین بهینه مکان و اندازه تولیدات پراکنده در [۹-۶] مورد توجه قرار گرفته است. برای در نظر گرفتن تاثیرات عدم قطعیت سیستم روی تعیین مکان و اندازه بهینه تولید پراکنده، از روش شبیه سازی مونت کارلو در [۶] استفاده شده است. در [۷] اندیس نسبت مزیت به هزینه (BCR) که عبارتست از نسبت بین مزیت و هزینه نصب منابع پراکنده تعریف شده است و هدف، ماکزیمم شدن اندیس BCR است. تعیین مکان و اندازه بهینه تولید پراکنده برای مدیریت تراکم در [۸] به صورت یک برنامه ریزی مختلط عدد صحیح (MIP) فرمول‌بندی شده است که هدف اصلی، کاهش هزینه کل تولید است. تعیین مکان بهینه تولید پراکنده، با توجه به قیمت گذاری حاشیه‌ای محلی (LMP) در [۹] انجام شده است. روش دیگر برای مدیریت تراکم استفاده از ادوات FACTS است. مکان بهینه TCSC برای مدیریت تراکم در [۳] با استفاده از دو اندیس تلفات توان حقیقی و عملکرد پخش توان حقیقی مورد مطالعه قرار گرفته است. مدیریت تراکم با توجه به ماکزیمم سازی رفاه اجتماعی در [۱۰] بررسی شده است. نوع، مکان و اندازه جبرانساز استاتیک توان راکتیو و خازن سری کنترل شونده با تریستور با استفاده از الگوریتم ژنتیک چند هدفه در [۱۱] تعیین شده است. برخی الگوریتم‌های تکاملی نظیر ژنتیک، ازدحام ذرات، تکامل تفاضلی و شبیه سازی تبرید برای بررسی مساله تراکم در [۱۵-۱۲] به کار گرفته شده اند. الگوریتم بهینه سازی ترتیبی برای حل مساله تراکم و بهینه سازی مکان و اندازه SVC و TCSC با توجه به محدودیت‌های بهره برداری در [۱۶] استفاده شده است. اما هزینه‌های تولید و ادوات FACTS در نظر گرفته نشده اند. مدیریت تراکم در بازار برق با استفاده از SSSC و STATCOM در [۱۷] انجام شده است. در [۱۸] علاوه بر کاهش تراکم، کاهش نوسانات بین ناحیه ای نیز از اهداف مطلوب در تعیین تعداد، مکان و اندازه بهینه SVC و TCSC در نظر گرفته شده است. مدل دینامیکی برای SVC با توجه به شیب منحنی مشخصه و تاخیر در زاویه آتش و برای TCSC فقط بر اساس تاخیر در زاویه آتش در نظر گرفته شده است. برای افزایش ظرفیت انتقال در دسترس (ATC) برخی ادوات FACTS نظیر ترانسفورماتور شیفت دهنده فاز کنترل شونده با تریستور (TCPST)، TCSC و SVC به کار گرفته شده اند [۱۹] و [۲۰]. هدف، یافتن مکان و تنظیمات بهینه

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-10]

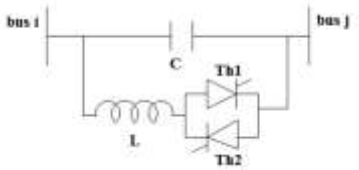
ادوات FACTS است به گونه‌ای که توان قابل انتقال بین نواحی افزایش یابد.

در این مقاله دو الگوریتم بهینه سازی چند هدفه به نام‌های NSGA-II و MOPSO برای یافتن مکان و اندازه بهینه ادوات FACTS بعلاوه مقدار تغییر در توان اکتیو تولیدی ژنراتورها مورد استفاده قرار گرفته‌اند تا تراکم خطوط بر طرف شده و دامنه ولتاژ باس‌ها نیز اصلاح گردد.

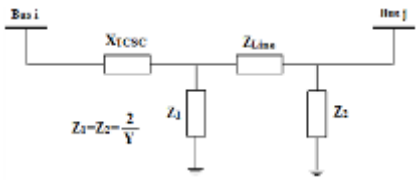
۲- تاثیرات ادوات FACTS

TCSC -۱-۲

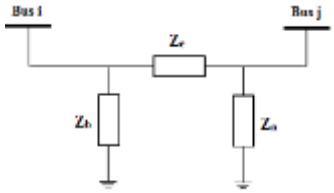
ساختار کلی یک TCSC که شامل یک خازن موازی با یک راکتور کنترل شونده با تریستور می‌باشد، در شکل (۱) نشان داده شده است. یکی از وظایف TCSC کنترل پخش توان در خطوط است. برای این منظور، TCSC با تغییر راکتانس خود، امپدانس خط را تنظیم می‌کند. شکل (۲) مدل π یک خط انتقال را در حضور TCSC که با X_{TCSC} مدل شده است، نشان می‌دهد. با استفاده از تبدیلات ستاره- مثلث و بالعکس، مدل معادل جدید به صورت شکل (۳) خواهد بود.



شکل (۱): ساختار TCSC



شکل (۲): مدار معادل خط i-j در حضور TCSC



شکل (۳): مدل π خط انتقال در حضور TCSC

$$Z_a = \frac{(Z_{1a} + jX_{TCSC})Z_{2a} + (Z_{1a} + jX_{TCSC})Z_{3a} + Z_{2a}Z_{3a}}{Z_{1a} + jX_{TCSC}} \quad (۱)$$

$$Z_b = \frac{(Z_{1a} + jX_{TCSC})Z_{2a} + (Z_{1a} + jX_{TCSC})Z_{3a} + Z_{2a}Z_{3a}}{Z_{2a}} \quad (۲)$$

$$Z_c = \frac{(Z_{1a} + jX_{TCSC})Z_{2a} + (Z_{1a} + jX_{TCSC})Z_{3a} + Z_{2a}Z_{3a}}{Z_{3a}} \quad (۳)$$

که در این معادلات داریم:

$$Z_{1a} = \frac{Z_1 Z_{Line}}{2Z_1 + Z_{Line}} \qquad Z_{2a} = \frac{Z_1 Z_{Line}}{2Z_1 + Z_{Line}} \qquad Z_{3a} = \frac{Z_1^2}{2Z_1 + Z_{Line}}$$

همانطور که در مدل جدید π نشان داده شده، امپدانس سری خط برابر Z_c است و دو ادمیتانس موازی خط به ترتیب $1/Z_a$ و $1/Z_b$ می‌باشند که با یکدیگر برابر نیستند. توان عبوری از خط i-j عبارتست از:

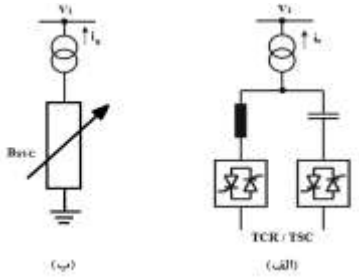
$$P_{ij} = \frac{|V_i|^2}{Z_c}\cos\gamma - \frac{|V_i||V_j|}{Z_c}\cos(\gamma + \delta_1 - \delta_2), \quad (۴)$$

$$Q_{ij} = \frac{|V_i|^2}{Z_c}\sin\gamma - \frac{|V_i||V_j|}{Z_c}\sin(\gamma + \delta_1 - \delta_2), \quad (۵)$$

که γ زاویه Z_c است و δ_1 و δ_2 به ترتیب زوایای ولتاژ باس‌های i و j هستند.

SVC -۲-۲

ساختار کلی یک SVC و مدل سوسپتانس متغیر آن در شکل (۴) نشان داده شده اند. SVC به صورت موازی به باسی که می‌خواهیم ولتاژ آنرا کنترل کنیم، متصل می‌شود و با تزریق یا جذب توان راکتیو، ولتاژ باس را کنترل می‌کند. برای مدل‌سازی SVC، که شامل یک راکتور کنترل شونده با تریستور (TCR) و خازن سوییچ شونده با تریستور (TSC) است، یک سوسپتانس متغیر (B_{SVC}) در بازه $[B_{min}, B_{max}]$ را می‌توان استفاده کرد.



شکل (۴): مدار معادل و مدل SVC؛ (۱): مدار معادل، (۲): مدل سوسپتانس متغیر SVC

بر مبنای ولتاژ باس و اختلاف آن با مقدار مطلوب، SVC سوسپتانس خود را تغییر می‌دهد تا با تزریق یا جذب توان راکتیو، ولتاژ باس را کنترل کند. توان راکتیو تزریقی توسط SVC متصل به باس i ام طبق معادله زیر قابل محاسبه است[۲۱]:

$$Q_{SVC_i} = B_{SVC_i} V_i^2 \quad (۶)$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-10]

۳- فرمول بندی مساله

برای شبیه سازی شرایط تراکم در سیستم قدرت، یک ضریب افزایش یکنواخت (λ) در تمام بارهای سیستم ضرب شده است. هرچه λ بزرگتر باشد، هم تعداد خطوط دارای تراکم و هم تعداد باس‌هایی که ولتاژشان از محدوده مجاز خارج شده، بیشتر می‌شود. هدف از بهینه‌سازی، حذف تراکم است به گونه‌ای که از قیود بهره‌برداری سیستم تجاوز نشود. این قیود را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\sum P_{G_i} - P_{loss} - (1+\lambda) P_{D_0} = 0, \quad (۷)$$

$$\sum Q_{G_i} + Q_{SVC_i} - Q_{loss} - (1+\lambda) Q_{D_0} = 0, \quad (۸)$$

$$P_{G_i}^{\min} \le P_{G_i} \le P_{G_i}^{\max}, \quad (۹)$$

$$S_{ij} \le S_{ij}^{\max}, \quad (۱۰)$$

$$Q_{G_i}^{\min} \le Q_{G_i} \le Q_{G_i}^{\max}, \quad (۱۱)$$

$$Q_{SVC_i}^{\min} \le Q_{SVC_i} \le Q_{SVC_i}^{\max}, \quad (۱۲)$$

$$X_{TCSC}^{\min} \le X_{TCSC} \le X_{TCSC}^{\max}, \quad (۱۳)$$

$$V_i^{\min} \le V_i \le V_i^{\max}. \quad (۱۴)$$

که P_{Gi}^{min} و P_{Gi}^{max} حد پایین و بالای توان اکتیو تولیدی ژنراتور i ام، Q_{Gi}^{min} و Q_{Gi}^{max} حد پایین و بالای توان راکتیو تولیدی ژنراتور i ام، P_{loss} و Q_{loss} تلفات حقیقی و راکتیو در خطوط، S_{ij}^{max} ماکزیمم توان قابل انتقال از خط متصل بین باس‌های i و j ، V_i^{min} و V_i^{max} حدود مجاز دامنه ولتاژ در باس i ام، Q_{SVCi}^{min} و Q_{SVCi}^{max} حد پایین و بالای توان راکتیو تزریقی توسط SVC ی متصل به باس i ام، X_{TCSC}^{min} و X_{TCSC}^{max} حد پایین و بالای راکتانس TCSC ی نصب شده در خط i-j هستند.

۴- الگوریتم‌های بهینه سازی

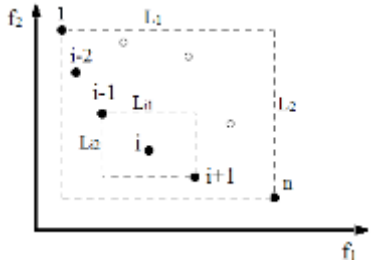
۴-۱- الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب (NSGA-II)

این الگوریتم که در سال ۲۰۰۲ توسط دب و همکارانش معرفی شد[۲۲]، توانایی بالایی در بهینه سازی چند هدفه و یافتن مجموعه بهینه پرتو دارد.

۴-۱-۱- محاسبه رتبه و فاصله ازدحام

رتبه هر جواب بر اساس تعداد جواب‌هایی که آن جواب را مغلوب می‌کنند، بدست می‌آید. هرچه جواب مورد نظر توسط جواب‌های کمتری مغلوب شود، رتبه پایین تری پیدا خواهد کرد. جواب‌های دارای رتبه پایین تر به جبهه پرتو نزدیکترند.

شرط فاصله ازدحام به منظور ارزیابی اعضای دارای رتبه یکسان تعریف شده است. برای محاسبه فاصله ازدحام، هر تابع هدف به صورت افزایشی مرتب می‌شود. در شکل (۵) دایره‌های توپر جواب‌های دارای رتبه یکسان را نشان می‌دهد.



شکل (۵): محاسبه فاصله ازدحام

برای جواب‌های مرزی (اولین و آخرین جواب)، فاصله ازدحام برابر بی‌نهایت در نظر گرفته می‌شود. برای جواب‌های بین این دو، مثلا برای جواب i ام، فاصله ازدحام (C.D) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$C.D = \frac{L_{i1}}{L_1} + \frac{L_{i2}}{L_2} \quad (۱۵)$$

که L طول اضلاع مستطیل ایجاد شده توسط اولین و آخرین عضو جبهه است و L_i طول اضلاع مستطیل ایجاد شده توسط جواب‌های مجاور جواب i ام است.

۴-۱-۲- حلقه اصلی الگوریتم

در ابتدای الگوریتم، جمعیت اولیه P_0 با N عضو به صورت تصادفی ایجاد می‌شود. جمعیت بر اساس مفهوم غلبه (domination) مرتب می‌شود. هر عضو جمعیت، رتبه‌ای دارد و بهترین رتبه ۱ است. سپس با استفاده از عملگرهای الگوریتم ژنتیک (یعنی انتخاب، ترکیب و جهش) جمعیت جدید Q_0 با N عضو ایجاد می‌شود. سپس شمارنده t برابر صفر قرار داده می‌شود و الگوریتم وارد حلقه اصلی خود می‌شود. در این حلقه، یک جمعیت مرکب R_t شامل 2N عضو از اجتماع دو مجموعه P_t و Q_t بوجود می‌آید و بر اساس مفهوم غلبه مرتب می‌شود. سپس از بین اعضای R_t، N عضو که دارای رتبه کمتری هستند، انتخاب می‌شوند. برای انتخاب از بین اعضای دارای رتبه یکسان، از شرط فاصله ازدحام استفاده می‌شود. یعنی عضوی که بیشترین فاصله ازدحام را دارد برای انتخاب، تقدم دارد. اعضای انتخاب شده در مجموعه P_{t+1} قرار می‌گیرند و دوباره عملگرهای ژنتیکی برای ایجاد مجموعه Q_{t+1} استفاده می‌شوند. این مراحل تکرار می‌شوند تا شرط توقف الگوریتم تحقق یابد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-10]

۴-۲- بهینه سازی اجتماع ذرات چند هدفه

کوئلو و همکارانش الگوریتم بهینه سازی چند هدفه ازدحام ذرات را معرفی کردند[۲۳]. مراحل این الگوریتم به شرح زیر است:

۱. ایجاد جمعیت اولیه (Pop) به طور تصادفی؛
۲. مقداردهی اولیه به سرعت ذرات (در ابتدا سرعت تمام ذرات برابر صفر قرار داده می‌شود)؛
۳. ارزیابی هر ذره؛
۴. قرار دادن ذرات نامغلوب در یک مجموعه جدید به نام مخزن (Repository)؛
۵. تقسیم بندی فضای جستجو با استفاده از مربع‌های کوچک؛
۶. مقداردهی اولیه به حافظه هر ذره $Pbest(i)=Pop(i)$
۷. محاسبه سرعت هر ذره از رابطه زیر:

$$Vel(i)=w\,Vel(i)+R_1.\left(Pbest(i)-Pop(i)\right)+\ldots \\ R_2.\left(\mathrm{Re}p(h)-Pop(i)\right), \qquad (۱۶)$$

که w ضریب وزنی، R_1 و R_2 اعداد تصادفی از بازه [۰ ۱/۵] هستند. $Pbest(i)$ بهترین موقعیتی است که توسط ذره i ام بدست آمده است. $Rep(h)$ ذره‌ای از مخزن است که به صورت زیر انتخاب می‌شود:

ابتدا برای هر مربع در فضای جستجو که دارای یک یا چند ذره است، شایستگی محاسبه می‌شود که مقدار آن با تعداد ذرات موجود در مربع مورد نظر رابطه معکوس دارد. سپس یکی از این مربع‌ها با استفاده از روش چرخ رولت، انتخاب می‌شود. $Rep(h)$ به طور تصادفی از بین اعضای این مربع انتخاب می‌شود.

۸. موقعیت‌های جدید برای تمام ذرات از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Pop(i)=Pop(i)+Vel(i), \qquad (۱۷)$$

۹. برای هر ذره که موقعیت آن از مرزهای مجاز خارج شده، موقعیت برابر همان مرز قرار داده می‌شود.
۱۰. ارزیابی هر ذره؛
۱۱. به روز رسانی مخزن: جواب‌های نامغلوب در جمعیت جدید، به مخزن اضافه می‌شوند. علاوه بر آن، اعضایی از مخزن که با ورود اعضای جدید مغلوب شده اند، حذف می‌شوند؛
۱۲. به روز رسانی حافظه هر ذره: اگر موقعیت جدید هر ذره توسط موقعیت موجود در حافظه مغلوب شود، حافظه ذره نگهداشته می‌شود؛ در غیر این صورت موقعیت جدید در حافظه ذخیره می‌شود؛
۱۳. یک واحد به شمارنده حلقه اضافه می‌شود؛
۱۴. اگر شمارنده حلقه کمتر از مقدار مشخص است، به مرحله ۷ باز می‌گردد؛ در غیر این صورت به مرحله ۱۵ می‌رود؛
۱۵. نمایش ذرات موجود در مخزن به عنوان جواب‌های بهینه پرتو.

۵- روش پیشنهادی

۵-۱- توابع هدف

حذف تراکم و کاهش تلفات ضمن توجه به جنبه‌های اقتصادی و نگهداشتن ولتاژ باس‌ها در محدوده مطلوب، اهداف اصلی این مقاله هستند. بنابراین، یک مساله بهینه سازی چهار هدفه باید حل شود. این مساله را می‌توان با استفاده از ضرایب نرمالیزه و ضرایب وزنی به یک مساله بهینه سازی تک هدفه تبدیل کرد و به یک جواب بهینه دست یافت. گاهی در یک مساله بهینه سازی، اهداف با همدیگر در تضاد هستند. به این ترتیب جوابی که از نظر یکی از اهداف بهترین جواب است، ممکن است از نظر دیگر اهداف مناسب نباشد. به عنوان مثال، در این مقاله حذف تراکم با کمینه سازی هزینه در تضاد است. اگر مساله به صورت چند هدفه حل شود و یک مجموعه جواب بدست آید، امکان انتخاب بهترین جواب فراهم می‌گردد. بنابراین در این مقاله، دو تابع هدف تعریف شده و در هر تابع هدف دوتا از اهدافی که تضاد کمتری با هم دارند، قرار گرفته اند. در ادامه، هرکدام از توابع هدف شرح داده شده اند.

۵-۱-۱- تابع هدف Z_{11}

این تابع شامل اهداف زیر است:

الف) اندیس عملکرد پخش توان حقیقی (PI):

این اندیس به صورت زیر تعریف می‌شود[۲۴]:

$$PI=\sum_{m=1}^{l}\frac{W_m}{2n}\left(\frac{P_{l_m}}{P_{l_m}^{\max}}\right)^{2n}, \qquad (۱۸)$$

که P_{lm} و $P_{lm}{}^{max}$ به ترتیب توان حقیقی عبوری و ماکزیمم توان قابل انتقال خط m ام هستند. n یک مقدار ثابت و W_mها، ضرایب وزنی غیر منفی هستند. در این مقاله، n برابر ۱ بوده و W_mها از رابطه زیر بدست می‌آیند:

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol12- No.1 Spring & Summer 2015
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-10]

$$W_m = \begin{cases} 1 & \text{if } \dfrac{P_{l_m}}{P_{l_m}^{\max}} \le 1, \\ 1 + 0.01 * \left| \dfrac{P_{l_m}}{P_{l_m}^{\max}} \right| & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (۱۹)$$

کوچک بودن PI نشان دهنده پخش توان یکنواخت در خطوط است.

ب) تلفات خطوط:

به منظور مینیمم سازی تلفات خطوط شبکه، این ترم به صورت زیر تعریف و به تابع هدف اول اضافه شده است:

$$Loss = \sum_{i=1}^{l} loss_i , \quad (۲۰)$$

که $loss_i$ تلفات خط i ام است. به این ترتیب تابع هدف اول به صورت زیر تعریف شده است:

$$Z_{11} = A_1 PI + A_2 Loss. \quad (۲۱)$$

که A_1 و A_2 ضرایب مور نیاز برای تبدیل مساله چند هدفه به تک هدفه هستند و از روش معیار سراسری بدست می‌آیند.

۵-۲-۱- تابع هدف Z_{22}

این تابع هدف به هزینه‌ها اختصاص دارد و هزینه‌های تولید و همچنین هزینه‌های ادوات FACTS را شامل می‌شود.

الف) هزینه تولید:

هزینه تولید هر ژنراتور با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید[۲۵]:

$$C_{g_i} = a_i P_{g_i}^2 + b_i P_{g_i} + c_i \ \text{(US\$/h)} \quad (۲۲)$$

که P_{gi} توان اکتیو تولیدی ژنراتور i ام است و a_i، b_i و c_i ضرایب ثابت مربوط به تابع هزینه این ژنراتور می‌باشند.

ب) هزینه ادوات FACTS:

توابع هزینه ادوات FACTS به صورت زیر بیان می‌شوند[۲۶]:

$$C_{SVC_i} = 0.0003 S_i^2 - 0.3051 S_i + 127.38 \ \text{[US\$/kVar]}, \quad (۲۳)$$

$$C_{TCSC_i} = 0.0015 S_i^2 - 0.7130 S_i + 153.75 \ \text{[US\$/kVar]}, \quad (۲۴)$$

چون تابع هزینه تولید ژنراتور برای یک دوره پنج ساله و بر حسب دلار بر ساعت تعریف شده است، تابع هزینه ادوات FACTS را نیز باید برای یک دوره پنج ساله و بر حسب دلار بر ساعت تعریف کنیم. بنابراین تابع هدف Z_{22} به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Z_{22} = C_{gen} + \left(\frac{C_{FACTS}}{5 \times 365 \times 24} \right), \quad (۲۵)$$

که در این معادله داریم:

$$C_{gen} = \sum_{i=1}^{n_g} C_{g_i} , \qquad C_{FACTS} = \sum_{i=1}^{n_{FACTS}} C_{FACTS_i} S_i .$$

۵-۲- توابع هدف با در نظر گرفتن جریمه‌ها

برای نگهداشتن دامنه ولتاژ باس‌ها در محدوده مجاز $[0.95^{\text{p.u.}}\ 1.09^{\text{p.u.}}]$ و همچنین جلوگیری از تراکم، دو جریمه تعریف شده است. جریمه اول (Pen) برای حذف تراکم بوده و برابر با تعداد خطوط دچار تراکم می‌باشد. جریمه دوم $(V.C)$ برابر با تعداد باس‌هایی است که دامنه ولتاژ آن‌ها از محدوده مجاز خارج است. حالت‌های مختلفی برای اضافه شدن جریمه‌ها به توابع هدف بررسی شد که تمام آنها با شکست مواجه شدند، مگر حالتی که در آن جریمه‌ها به هر دو تابع هدف و متناسب با مقدار آن تابع هدف اضافه شدند. توابع هدف نهایی با در نظر گرفتن جریمه‌ها به صورت زیر هستند:

$$Z_1 = Z_{11} + \left(0.5 * Z_{11} * \left(V.C + Pen \right) \right) \quad (۲۶)$$

$$Z_2 = Z_{22} + \left(0.5 * Z_{22} * \left(V.C + Pen \right) \right) \quad (۲۷)$$

شکل (۶) فلوچارت روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. به دلیل حفظ اختصار، در این شکل فقط فلوچارت روش پیشنهادی بر مبنای الگوریتم NSGA-II آورده شده است.

۵-۳- بهترین جواب مصالحه‌ای

برای مقایسه مجموعه جواب‌های بهینه پرتو حاصل از دو الگوریتم بهینه سازی چند هدفه، از هر مجموعه یک جواب انتخاب می‌شود که بهترین جواب مصالحه‌ای نام دارد. با مقایسه این دو جواب، مجموعه پرتو برتر انتخاب می‌شود. برای یافتن بهترین جواب مصالحه‌ای مراحل زیر طی می‌شود[۲۷]:

ابتدا به ازای n امین تابع هدف از m امین جواب، تابع عضویت $MF_{m,n}$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

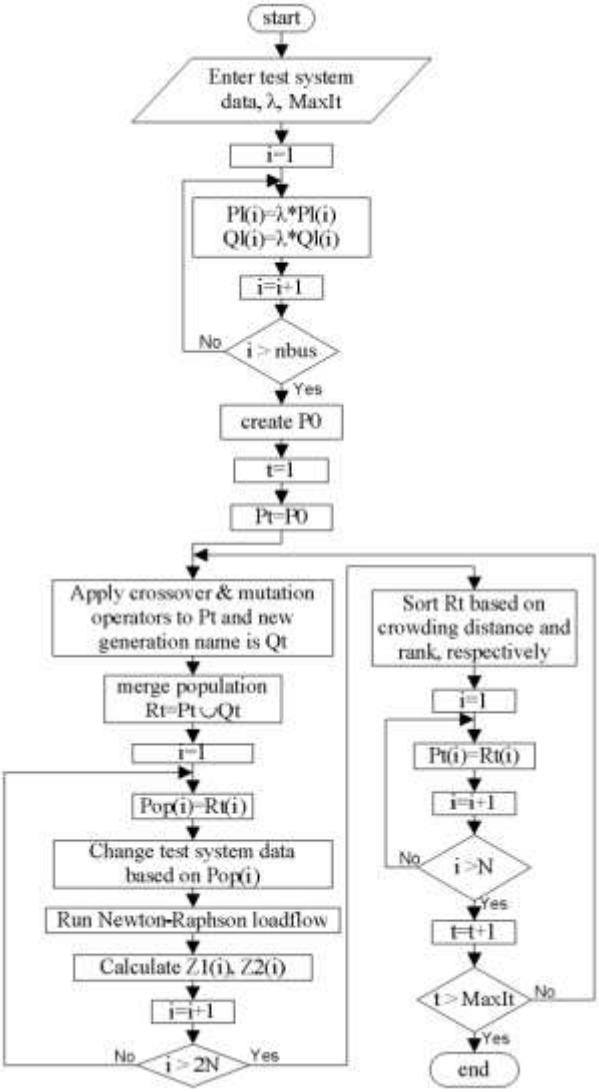
$$MF_{m,n} = \begin{cases} 1 & Z_{m,n} \le Z_{n,\min} \\ \dfrac{Z_{n,\max} - Z_{m,n}}{Z_{n,\max} - Z_{n,\min}} & Z_{n,\min} \le Z_{m,n} \le Z_{n,\max} \\ 0 & Z_{m,n} \le Z_{n,\min} \end{cases} \quad (۲۸)$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-10]

که $Z_{n,max}$ و $Z_{n,min}$ به ترتیب مقادیر بیشینه و کمینه تابع هدف n ام در بین جواب‌های مجموعه پرتو هستند. سپس برای هر جواب از مجموعه پرتو، تابع عضویت نرمالیزه شده MF_m به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$MF_m = \frac{\sum_{n=1}^{N_{obj}} MF_{m,n}}{\sum_{m=1}^{N_{Par}} \sum_{n=1}^{N_{obj}} MF_{m,n}}, \qquad (۲۹)$$

که N_{Par} تعداد جواب‌های مجموعه پرتو و N_{obj} تعداد توابع هدف هستند. جوابی که بیشترین مقدار تابع عضویت نرمالیزه شده را داشته باشد، به عنوان بهترین جواب مصالحه‌ای انتخاب می‌شود.

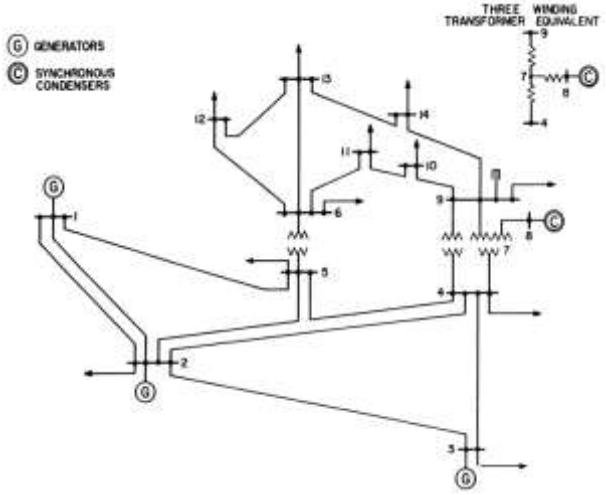


شکل (۶): فلوچارت روش پیشنهادی بر مبنای NSGA-II

۶- نتایج شبیه سازی

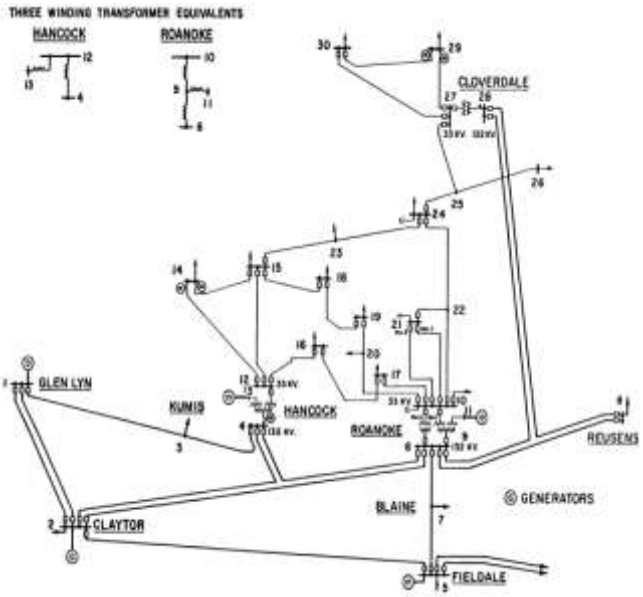
دو سیستم تست تغییر یافته ۱۴ باسه و ۳۰ باسه IEEE، به منظور بررسی کارایی توابع هدف پیشنهادی، استفاده شده اند.

سیستم ۱۴ باسه شامل ۲۱ خط، ۳ ژنراتور و یک کندانسور سنکرون است که کندانسور به باس ۸ متصل می‌باشد.



شکل (۷): دیاگرام تک خطی سیستم تست ۱۴ باسه IEEE

سیستم ۳۰ باسه دارای ۴۳ خط و پنج ژنراتور است. در این مقاله، خطی را دچار تراکم می‌دانیم که توان عبوری از آن از مقدار نامی خط بیشتر شود. همچنین، برای هر خط اندیسی با عنوان نسبت تراکم (congestion ratio) تعریف شده است که برابر نسبت توان اکتیو عبوری از خط به توان نامی خط می‌باشد. هدف اصلی، حذف تراکم تمام خطوط است.



شکل (۸): دیاگرام تک خطی سیستم تست ۳۰ باسه IEEE

کارایی روش پیشنهادی در حذف تراکم، با استفاده از هر دو سیستم تست ارزیابی شده است.

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol12- No.1 Spring & Summer 2015
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-10]

۶-۱- ساختار هر جواب و پارامترهای الگوریتم‌های بهینه سازی

هر کروموزوم /ذره از هر الگوریتم ، همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است، دارای ۱۰ قسمت است که ۸ قسمت اول، مکان و اندازه ادوات FACTS را نمایش می‌دهند و دو قسمت آخر به مقدار تغییر در توان اکتیو تولیدی دو تا از ژنراتورهای سیستم اختصاص دارد که در سیستم تست ۱۴ باسه این دو ژنراتور به باس‌های ۲ و۳ و در سیستم ۳۰ باسه به باس‌های ۲ و ۱۱ متصل هستند . پارامترهای الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO در جدول ۲ آورده شده اند.

جدول (۱): ساختار هر کروموزوم/ ذره در الگوریتم‌های بهینه سازی

مکان TC_1	مکان SV_1	اندازه TC_1	اندازه SV_1	مکان TC_2	اندازه TC_2	مکان SV_2	اندازه SV_2	ΔP_G	ΔP_G

تغییر در توان اکتیو ژنراتورهای مشخص شده=ΔP_G, SV=SVC, TC=TCSC

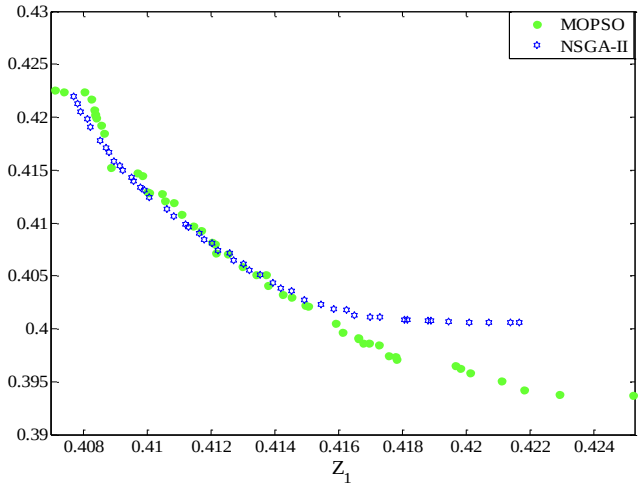
جدول (۲): پارامترهای الگوریتم‌های بهینه سازی

	تعداد جمعیت	احتمال ترکیب	احتمال جهش	ضریب w	تعداد اعضای مخزن
NSGA-II	۵۰	۰/۸	۰/۳	-	-
MOPSO	۵۰	-	-	۰/۸	۵۰

۶-۲- نتایج و مقایسه آنها

۶-۲-۱- نتایج برای سیستم تست ۱۴ باسه IEEE

به منظور ایجاد تراکم شدید در شبکه ، λ برابر ۱/۵۵۱ در نظر گرفته شده است. مجموعه‌های بهینه پرتو حاصل از دو الگوریتم بهینه‌سازی در شکل (۹) نمایش داده شده اند.



شکل (۹): منحنی‌های بهینه پرتو برای سیستم تست ۱۴ باسه

هر مجموعه بهینه پرتو جواب‌هایی دارد که تراکم را حذف می‌کنند و دامنه ولتاژ باس‌ها را بهبود می‌بخشند. مکان و اندازه ادوات FACTS بعلاوه مقدار تغییر در توان اکتیو تولیدی ژنراتورها (ΔP_G) به ازای بهترین جواب مصالحه‌ای هر مجموعه پرتو، در جدول ۳ آورده شده اند. در جدول۴ هزینه‌های تولید و ادوات FACTS برای حالت اولیه سیستم بدون بهینه سازی و همچنین به ازای بهترین جواب‌های مصالحه‌ای آورده شده است.

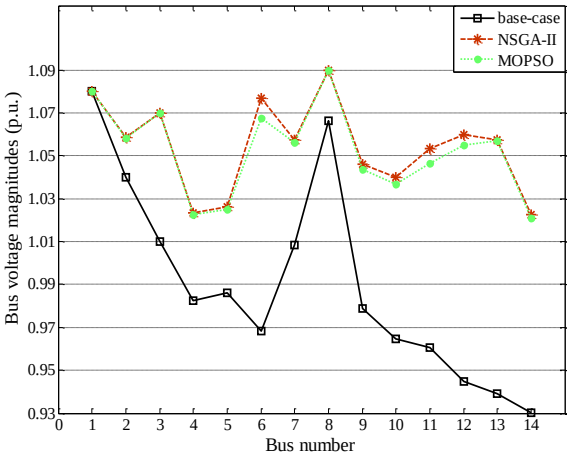
جدول (۳): بهترین جواب‌های مصالحه‌ای هر الگوریتم برای سیستم تست ۱۴ باسه

	NSGA-II	MOPSO
مکان TCSC1	۶	۶
مکان SVC1	۶	۱۳
اندازه TCSC1 (پریونیت)	-۰/۰۳۵۷	-۰/۰۳۰۶
اندازه SVC1 (پریونیت)	۰/۱۸۹۰	۰/۲۱۷۷
مکان TCSC2	۷	۷
اندازه TCSC2 (پریونیت)	-۰/۱۲۶۸	-۰/۱۲۱۴
مکان SVC2	۱۳	۶
اندازه SVC2 (پریونیت)	۰/۱۳۲۴	۰/۰۷۳۲
ΔPG2 (مگاوات)	۱۴/۵۸۸۰	۱۵
ΔPG3 (مگاوات)	۹۹/۶۹۰۴	۹۹/۹۹۹۲

جدول (۴): هزینه‌های تولید و ادوات FACTS برای حالت اولیه سیستم و به ازای هر جواب مصالحه‌ای

	حالت اولیه	NSGA-II	MOPSO
هزینه تولید (میلیون دلار)	۷۵۵/۲۴۳	۸۵۳/۷۹۳	۸۵۵/۴۵۸
هزینه ادوات FACTS (میلیون دلار)	-	۱/۶۳۸۳	۰/۹۶۳۱
هزینه کل (میلیون دلار)	۷۵۵/۲۴۳	۸۵۵/۴۳۱۳	۸۵۶/۴۲۱۱

دامنه ولتاژ باس‌ها برای حالت اولیه و همچنین به ازای بهترین جواب‌های مصالحه‌ای، در شکل (۱۰) نشان داده شده اند.

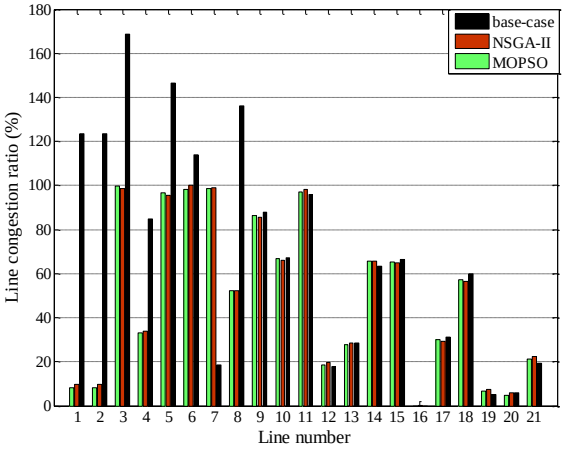


شکل (۱۰): دامنه ولتاژ باس‌ها به ازای حالت اولیه در مقایسه با نتایج حاصل از بهترین جواب‌های مصالحه‌ای برای سیستم تست ۱۴باسه

ولتاژباس‌های ۱۳،۱۲و۱۴ پیش از بهینه سازی کمتر از مقدار مجاز بوده است، در حالی که پس از بهینه سازی به ازای هر دو

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-10]

جواب مصالحه‌ای، دامنه ولتاژ تمام باس‌ها در محدوده مجاز قرار گرفته است. نسبت تراکم خطوط قبل و بعد از بهینه سازی، در شکل (۱۱) نشان داده شده است. قبل از بهینه سازی، خطوط ۱، ۲، ۳، ۵، ۶ و ۸ دچار تراکم هستند، در حالی که به ازای هر دو جواب مصالحه‌ای، تراکم به طور کلی حذف شده است.

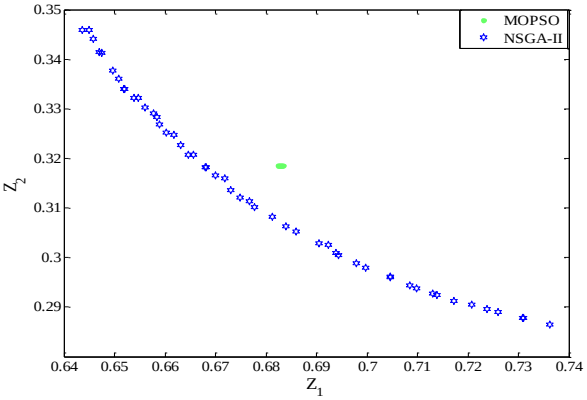


شکل (۱۱): نسبت تراکم برای جواب‌های مصالحه‌ای در مقایسه با شرایط اولیه برای سیستم تست ۱۴ باسه

اگر چه هزینه کل پس از بهینه سازی افزایش یافته، به ازای جواب‌های مصالحه‌ای تراکم به طور کلی حذف شده ودامنه ولتاژ باس‌ها بهبود یافته است.

۶-۲-۲- نتایج برای سیستم تست ۳۰ باسه

در این قسمت برای بررسی عملکرد الگوریتم‌های بهینه سازی، شرایط تراکم شدیدی روی سیستم ۳۰ باسه ایجاد شده است. برای این منظور، ضریب افزایش یکنواخت بار (λ) برابر ۱/۳۵ در نظر گرفته شده است. منحنی‌های بهینه پرتو حاصل از هر الگوریتم، در شکل (۱۲) نشان داده شده اند.



شکل (۱۲): منحنی‌های بهینه پرتو حاصل از الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO برای سیتم تست ۳۰ باسه

الگوریتم NSGA-II پس از ۴۰۰ تکرار به مجموعه‌ای از جواب‌ها با توزیع مناسب در فضای جستجو رسیده است اما مجموعه جواب حاصل از MOPSO در محدوده کوچکی از توابع هدف Z_1, Z_2 قرار دارد. بنابر این در این مورد با تکرارهای یکسان مجموعه جواب حاصل از NSGA-II بهتر از جموعه جواب حاصل از MOPSO می‌باشد. بهترین جواب‌های مصالحه‌ای برای هر الگوریتم در جدول ۵ آورده شده اند.

جدول (۵): بهترین جواب‌های مصالحه‌ای هر الگوریتم برای سیستم تست ۳۰ باسه

	NSGA-II	MOPSO
مکان TCSC1	۳	۴۲
مکان SVC1	۲۷	۲۸
اندازه TCSC1 (پریونیت)	-۰/۱۲۴۹	-۰/۱۴۶۳
اندازه SVC1 (پریونیت)	۰/۲۴۹۸	۰/۲۸۳۰
مکان TCSC2	۴۳	۳۰
اندازه TCSC2 (پریونیت)	-۰/۱۰۹۶	-۰/۱۱۴۵
مکان SVC2	۱۸	۲۷
اندازه SVC2 (پریونیت)	۰/۰۱۹۹	۰/۲۵۳۷
ΔP_{G2} (مگاوات)	۴۴/۲۷۷۹	۸۴/۴۹۴۹
ΔP_{G11} (مگاوات)	۴۳/۶۴۰۸	۴۱/۰۱۳۷

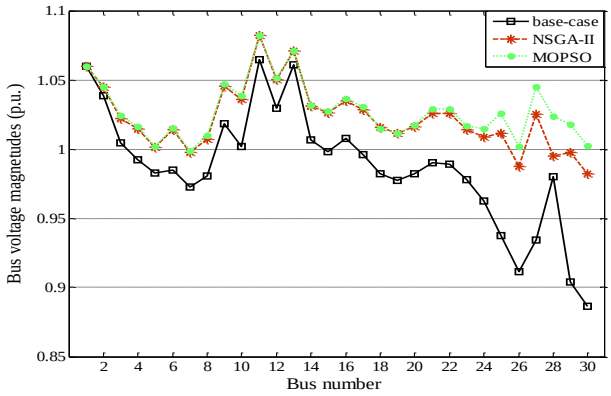
هزینه‌های تولید و ادوات FACTS به ازای هر جواب در جدول ۶ آورده شده اند. الگوریتم NSGA-II هزینه‌ها را به نحو مطلوب تری کاهش داده است.

جدول (۶): هزینه‌های تولید و ادوات FACTS به ازای شرایط اولیه و بهترین جواب‌های مصالحه‌ای برای سیستم ۳۰ باسه

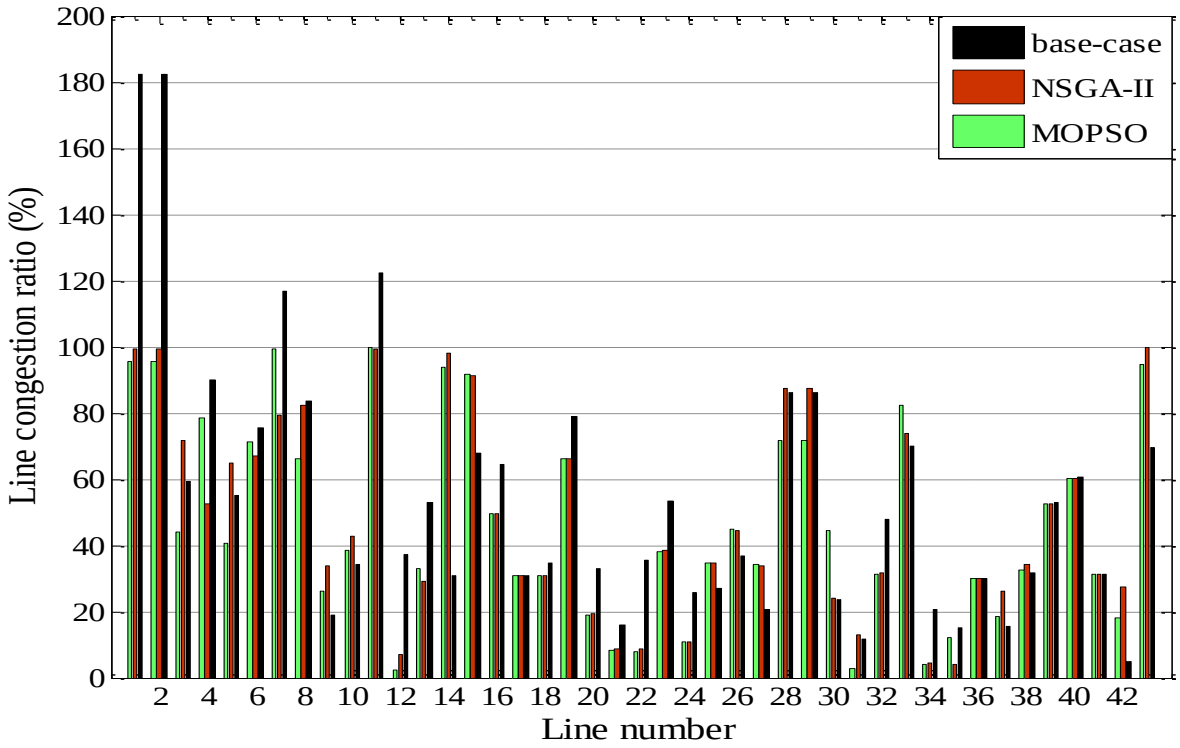
	حالت اولیه	NSGA-II	MOPSO
هزینه تولید (میلیون دلار)	۵۸۳/۲۸۴۶	۵۸۳/۲۴۰۸	۶۳۷/۱۱۴۸
هزینه ادوات FACTS (میلیون دلار)	-	۴/۱۶۳۲	۸/۷۱۳۳
هزینه کل (میلیون دلار)	۵۸۳/۲۸۴۶	۵۸۷/۴۰۴۰	۶۴۵/۸۲۸۱

دامنه ولتاژ باس‌ها و نسبت تراکم برای بهترین جواب‌های مصالحه‌ای در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است. طبق شکل (۱۳) دامنه ولتاژ باس‌ها از جمله باس‌های ۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۹ و ۳۰ که قبل از بهینه سازی خارج از محدوده مجاز بوده اند، به ازای هر دو جواب مصالحه‌ای بهبود یافته اند.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-10]



شکل (۱۳): دامنه ولتاژ باس‌ها به ازای شرایط اولیه و بهترین جواب‌های مصالحه‌ای برای سیستم تست ۳۰ باسه



شکل (۱۴): نسبت تراکم به ازای شرایط اولیه و جواب‌های مصالحه‌ای برای سیستم تست ۳۰ باسه

با توجه به شکل (۱۴) می‌توان توانایی هر دو الگوریتم در حذف تراکم را استنتاج کرد. قبل از نصب ادوات FACTS و تنظیم توان حقیقی ژنراتورها، خطوط ۱، ۲، ۷ و ۱۱ دچار تراکم بوده اند. با اعمال تغییرات پیشنهادی بوسیله هرکدام از جواب‌های مصالحه‌ای، توان مورد نیاز بارها به گونه‌ای روی خطوط شبکه توزیع شده است که تراکم به طور کلی حذف گردیده است.

تلفات کل خطوط به ازای شرایط اولیه و همچنین بهترین جواب‌های مصالحه‌ای در جدول ۷ ارائه شده است. تلفات کل خطوط به ازای هر دو جواب کاهش یافته است.

جدول (۷): تلفات کل خطوط به ازای شرایط اولیه و بهترین جواب‌های مصالحه‌ای

سیستم تست	کل تلفات خطوط (مگاوات)		
	حالت اولیه	NSGA-II	MOPSO
۱۴ باسه	۱۶/۵۴۸۷	۱۰/۴۶۹۷	۱۰/۴۵۳۹
۳۰ باسه	۲۶/۶۳۹۴	۱۷/۰۱۹۴	۱۵/۷۰۵۰

بهترین، بدترین و مقدار متوسط هزینه کل به ازای جواب‌های بهینه پرتو حاصل از هر الگوریتم برای دو سیستم تست ۱۴ و ۳۰ باسه در جدول ۸ ارائه شده اند. برای سیستم تست ۱۴ باسه، الگوریتم MOPSO در مقایسه با NSGA-II عملکرد بهتری دارد و مجموعه جواب پرتو به شکل مناسبتری در فضای جستجو توزیع شده است. این نکته را می‌توان با توجه به مقدار انحراف

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-10]

معیار نیز استنتاج کرد، انحراف معیار بزرگتر مشخص کننده توزیع بهتر در فضای جستجو است. در سیستم ۳۰ باسه، MOPSO در مقایسه با NSGA-II عملکرد بسیار ضعیفی دارد. جواب‌های حاصل از MOPSO بسیار به هم نزدیک هستند و در بازه کوچکی از توابع هدف Z_1 و Z_2 قرار گرفته اند.

جدول (۸): مقایسه الگوریتم‌های بهینه سازی از لحاظ هزینه‌ها

		هزینه کل (دلار بر ساعت)			
		بهترین	بدترین	متوسط	انحراف معیار
۱۴ باسه	NSGA-II	۱۸۵۸۱/۹۸	۱۹۵۳۷/۰۳	۱۸۹۰۳/۲۵	۳۰۷/۱۹
	MOPSO	۱۸۲۳۰/۷۷	۱۹۵۶۷/۰۷	۱۸۸۵۵/۳۶	۴۲۱/۴۷
۳۰ باسه	NSGA-II	۱۳۲۱۳/۱۲	۱۵۸۳۵/۱۹	۱۴۴۰۹/۳۳	۸۳۶/۰۸
	MOPSO	۱۴۵۴۵/۸۶	۱۴۵۴۶/۱۳	۱۴۵۴۶/۰۱	۰/۰۶

در جدول ۹ الگوریتم‌ها از نظر زمان اجرا با هم مقایسه شده اند. الگوریتم MOPSO بسیار سریعتر از NSGA-II عمل کرده و مجموعه جواب را ایجاد می‌کند.

جدول (۹): مقایسه الگوریتم‌ها از نظر زمان اجرا

سیستم تست	زمان اجرای بهینه سازی (ثانیه)	
	NSGA-II	MOPSO
۱۴ باسه	۳۱۰	۱۴۰
۳۰ باسه	450	۲۴۲

اما در این مقاله، که هدف تعیین مکان و اندازه بهینه ادوات FACTS است، سرعت بالا در اجرای شبیه سازی و حصول مجموعه جواب در مقایسه با بهینه بودن جوابها اهمیت چندانی نخواهد داشت. بر این اساس اگرچه MOPSO بسیار سریع عمل کرده است، بهینه بودن و توزیع مناسب مجموعه جواب NSGA-II در مورد سیستم تست ۳۰ باسه موید برتری این الگوریتم بر MOPSO در مساله تعیین مکان و اندازه بهینه ادوات FACTS می‌باشد.

۷- نتیجه گیری

در این مقاله دو الگوریتم بهینه سازی چند هدفه استفاده شده اند تا مکان و اندازه بهینه ادوات FACTS همراه با مقدار تغییر در توان اکتیو تولیدی ژنراتورها به نحوی تعیین شوند که تراکم حذف و هزینه‌ها به حداقل برسد. شبیه سازی‌ها روی دو سیستم تست ۱۴ و ۳۰ باسه تغییر یافته IEEE انجام شده است. به منظور شبیه سازی شرایط تراکم در شبکه، تمام بارها به طور یکنواخت افزایش یافته است. هر جواب از مجموعه‌های بهینه پرتو حاصل از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، تراکم را حذف و دامنه ولتاژ باس‌ها را بهبود می‌بخشند.

با توجه به نتایج شبیه سازی‌ها خصوصا نتایج مربوط به سیستم تست ۳۰ باسه، الگوریتم NSGA-II عملکرد بهتری در مقایسه با MOPSO دارد، زیرا مجموعه جواب حاصل از این الگوریتم به نحو مطلوب‌تری در فضای جستجو توزیع شده است. اگرچه هر دو الگوریتم تلفات را به خوبی کاهش داده اند، جواب انتخاب شده از بین جواب‌های MOPSO منجر به تلفات کمتری می‌شود؛ باید در نظر داشت که جواب‌های مورد بررسی به روش مصالحه‌ای انتخاب شده‌اند. هیچ کدام از مجموعه‌های پرتو به طور مطلق نسبت به مجموعه دیگر، بهینه نیست. به این ترتیب مشاهده می‌شود جواب انتخابی از مجموعه جواب NSGA-II که هزینه را بهتر کاهش داده است، دارای تلفات بیشتری نسبت به جواب انتخابی از مجموعه جواب MOPSO می‌باشد.

نتایج حاصل از شبیه سازی‌ها کارایی توابع هدف پیشنهادی را به خوبی نشان می‌دهند، زیرا با وجود شرایط تراکم شدید در سیستم‌های تست مورد مطالعه، به دلیل انتخاب توابع هدف مناسب، الگوریتم‌های بهینه‌سازی جواب‌هایی را ارائه کرده اند که تراکم را حذف و دامنه ولتاژ باس‌ها را بهبود بخشیده اند.

پیوست

اطلاعات مورد نیاز سیستم‌های تست مورد مطالعه در این مقاله، در جدول ۱۰ آورده شده‌است.

جدول(۱۰): اطلاعات سیستم‌های تست مورد مطالعه

	IEEE 30-bus		IEEE 14-bus	
Bus num	PG [p.u.]	Voltage [p.u.]	PG [p.u.]	Voltage [p.u.]
۱	slag	۱/۰۶	slag	۱/۰۸
۲	۶۰	۱/۰۴۵	۱۵۰	۱/۰۴۵
۳	-	-	۱۰۰	۱/۰۷
۵	۲۵	۱/۰۱	-	-
۸	-	-	۰	۱/۰۹
۱۱	۱۸	۱/۰۸۲	۰	-
۱۳	۱۷	۱/۰۷۱	۰	۱

مراجع

[1] K. MWANZA, Y. SHI, Congestion Management: Re-dispatch and Application of FACTS, M.Sc. thesis, Department of Energy and Environment, Division of Electric Power Engineering, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Goteborg, Sweden, 2006.

[2] L. Rajalakshmi, M. V. Suganyadevi, S. Parameswari, Congestion Management in Deregulated Power System by Locating Series

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-10]

FACTS Devices, International Journal of Computer Applications, Vol. 13, No. 8, pp. 19-22, 2011.

[3] H. Besharat and S. A. Taher, "Congestion Management by Determining Optimal Location of TCSC in Deregulated Power Systems", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 30, No. 10, pp. 563-568, 2008.

[4] J.Sridevi, J.Amarnath, G.Govinda Rao, "Impact of FACTS Devices on Zonal Congestion Management in Deregulated Power System" , Innovative Systems Design and Engineering, Vol. 3, No 1, 2012.

[5] S. Dutta, S. P. Singh, "Optimal Rescheduling of Generators for Congestion Management Based on Particle Swarm Optimization", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 23, no. 4, pp. 1560–1569, Nov 2008.

[6] M. A. Paqaleh, A. R. Noori, "Transmission Congestion Management Using Distributed Generation considering Load Uncertainty", Power and Energy Engineering Conf. , pp. 1–4, 2010.

[7] M. A. Paqaleh, A. A. Abbaspour, M. Rashidinejad, and K. Y. Lee, "Optimal Placement and Sizing of Distributed Resources for Congestion Management Considering Cost/Benefit Analysis", Power and Energy Society General meeting, 2010, pp. 1–7.

[8] M. Khanabadi, M. Doostizadeh, A. Esmaeilian, and M. Mohseninezhad "Transmission Congestion Management through Optimal Distributed Generation's Sizing and Placement", International Conference on Environment and Electrical Engineering, pp. 1–4, 2011.

[9] N. Kumar, P. Dutta, and L. Xie, "Optimal DG Placement for Congestion Mitigation and Social Welfare Maximization", North American Power Symposium, pp. 1-5, 2011.

[10] R. S. Wibovo, N. Yorino, M. Eghbal, Y. Zoka and Y. Sosaki, "FACTS Devices Allocation with Control Coordination Considering Congestion Relief and Voltage Stability", IEEE Trans. Power System, Vol. 26, no. 4, pp. 2302–2310, Nov 2011.

[11] S. S. Reddy, M. S. Kumari, and M.. Sydulu, "Congestion Management in Deregulated Power System by Optimal Choice and Allocation of FACTS Controllers using Multi-Objective Genetic Algorithm", IEEE PES Transmission and Distribution Conf., pp. 1-7, 2010.

[12] N. A. Hosseinipoor and M. H. Nabavi, "Social Welfare Maximization by Optimal Locating and Sizing of TCSC for Congestion Management in Deregulated Power Market", International Conference on Power system Technology, pp. 1-5, 2010.

[13] R. S. Wibovo, N. Yorino, M. Eghbal, Y. Zoka and Y. Sosaki, "FACTS Devices Allocation for Congestion Management Considering Voltage Stability by means of MOPSO", IEEE Transmission and Distribution Conf., pp. 1-4, 2009.

[14] H. I. Shahin, G. I. Rashed and S. J. Cheng, "Application and comparison of computational intelligence techniques for optimal location and parameter setting of UPFC", Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 30, pp. 203-216, 2010.

[15] M. Gitizadeh, and M. Kalantar, "A New Approach for Congestion Management via Optimal Location of FACTS Devices in Deregulated Power Systems", International Conference on Electric Deregulation and Restructuring and Power Technologies, pp. 1592–1597, 2008.

[16] Y. C. Chang, R. F. Chang, T. Y. Hsiao, and C. N. Lu, "Transmission System Load ability Enhancement Study by Ordinal Optimization Method", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 26, no. 1, pp. 451–459, Feb 2011.

[17] S. Rahimzadeh and M. Tavakoli, "Looking for optimal number and placement of FACTS devices to manage the transmission congestion", Energy Conversion and Management, Vol. 52, pp. 437-446, 2011.

[18] A. Berizzi, C. Bovo, V. Ilea, "Optimal placement of FACTS to mitigate congestions and inter-area oscillations"، IEEE Conf. on Power Tech., pp. 1-8, 2011.

[19] R. M. Idris, A. Kharuddin, and M. W. Mustafa, "Optimal Choice of FACTS Devices for ATC Enhancement using Bees Algorithm", Power Engineering Conf. , pp. 1–6, 2009.

[۲۰] سید عباس طاهر، اکرم شاهقلیان "جایابی بهینه منابع تولید پراکنده به همراه SSVR در شبکه های توزیع با استفاده از الگوریتم تکاملی ایمنی"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال ۱۱، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۳.

[21] P. Zhang, C. Rehtanz, B. Pal, Flexible AC Transmission Systems: Modeling and Control, Springer, Berlin, pp. 319-329, 2006.

[22] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A Fast and Elitist Multi-Objective Genetic Algorithm: NSGA-II", IEEE Trans. Evolutionary Computation, Vol. 6, no. 2, pp. 182–197, Apr 2002.

[23] C. A. C. Coello, G. T. Pulido, M. S. Lechuga, "Handling Multiple Objectives With Particle Swarm Optimization", IEEE Trans. Evolutionary Computation, Vol. 8, no. 3, pp. 256–279, Jun 2004.

[24] M. Bavafa, N. Navidi, S. Hesami, and B. A. Parsa, "A New Approach for Security Constrained Congestion Management using SSSC with Ant Colony Search Algorithm", Asia-Pacific IEEE Power and Energy Engineering Conf., pp. 1-5, 2010.

[25] A. J. Wood, B. F. Wollenberg, Gerald B. Sheble Power Generation, Operation and Control, 3rd edition, John Wiley & Sons, 2013.

[26] L. J. Cai, I. Erlich, G. Stamtsis, "Optimal Choice and Allocation of FACTS Devices in Deregulated Electricity Market using Genetic Algorithms", Power System Conference and Exposition, pp. 201-207, 2004.

[27] Y. Lu, J. Zhou, H. Qin, Y. Wang and Y. Zhang, "Environmental/economic dispatch problem of

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-10]

power system by using an enhanced multi-objective differential evolution algorithm", Energy Conversion and Management, Vol. 52, pp. 1175-1183, 2011.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-10]