

کاربرد الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای پخش بار بهینه چندهدفه با وجود ادوات TCSC

احسان افضالن و محمود جورابیان

۱- مقدمه

پخش بار بهینه^۱ (OPF) یک مسأله برنامه‌ریزی غیر خطی ایستا است که یک تابع هدف مشخص را در عین ارضای مجموعه‌ای از قیود فیزیکی و عملکردی تحمیل شده توسط محدودیت‌های تجهیزات و ملزومات امنیتی بهینه می‌کند. در سه دهه گذشته روش‌های موفق زیادی در این رابطه اعمال شده‌اند [۱] تا [۴] که می‌توان به روش‌های گرادینان کاهش‌یافته عمومی، برنامه‌ریزی غیر خطی متوالی، برنامه‌ریزی مربعی متوالی، روش نیوتن، تجزیه P-Q، روش نقطه درونی، الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی تکاملی اشاره کرد.

پیشرفت‌های اقتصادی و اجتماعی خصوصاً گرایش گسترده به سمت مقررات‌زدایی، مفاهیم و تکنولوژی‌های جدیدی را می‌طلبند تا به بهترین شکل از سیستم‌های قدرت موجود بدون از دست دادن ایمنی سیستم ناشی از قیود محیطی یا اقتصادی استفاده شده و مراکز تولید و خطوط انتقال جدید ساخته شود. بنابراین علاقه به استفاده بهتر ظرفیت‌های سیستم قدرت موجود از طریق نصب ادوات سیستم‌های انتقال ac قابل انتقال^۲ (FACTS) وجود دارد. ادوات FACTS برای کنترل شارش توان استفاده می‌شوند به نحوی که از مسیرهای اختصاص داده شده عبور کند، قابلیت خط انتقال به بیشینه حد حرارتی خود افزایش یابد و ایمنی سیستم انتقال و پایداری شبکه با کمترین سرمایه‌گذاری زیربنایی بهبود یابد.

ایستگاه‌های تولیدی با استفاده از سوخت‌های فسیلی، اکسیدهای سولفور و نیتروژن و دی اکسید کربن به اتمسفر متصاعد می‌سازند و به دلیل افزایش نگرانی در مورد ملاحظات محیطی، جامعه متقاضی الکتریسیته مناسب و ایمن نه تنها با کمترین هزینه ممکن بلکه با کمترین سطح آلودگی است. چندین استراتژی برای کاهش آلودگی اتمسفر در [۵] پیشنهاد و بحث شده‌اند که آنها شامل نصب تمیزکننده‌های آلودگی، رجوع به سوخت‌های با آلودگی کم، جایگزین کردن کوره‌های سوخت قدیمی با کوره‌های جدید و پخش بار با در نظر گرفتن آلودگی هستند. سه گزینه اول نیازمند سرمایه زیاد بوده و در نتیجه می‌توانند به عنوان گزینه‌های بلندمدت در نظر گرفته شوند. در سال‌های اخیر گزینه پخش بار با در نظر گرفتن آلودگی که در آن هم هزینه هم آلودگی قرار است بهینه شوند، مورد توجه زیادی قرار گرفته زیرا نیازمند تنها اصلاح اندکی در مسأله پخش بار پایه برای در نظر گرفتن آلودگی است. تکنیک بهینه‌سازی چندهدفه فازی برای مسأله پخش بار اقتصادی محیطی^۳ (EED) در [۶] پیشنهاد شده است. ولی این راه حل‌ها، زیربهینه هستند و الگوریتم

چکیده: این مقاله الگوریتم ژنتیک چندهدفه (eV-MOGA) را برای بهینه‌سازی هزینه تولید، آلودگی و تلفات انتقال توان اکتیو در سیستم‌های قدرت مجز شده به سیستم‌های انتقال ac قابل انعطاف (FACTS) ارائه می‌کند. در رویکرد پیشنهادی، مسأله پخش بار بهینه به عنوان یک مسأله بهینه‌سازی چندهدفه فرمول‌بندی گردیده و ادوات FACTS در نظر گرفته شده شامل خازن سری کنترل شده با تایریستور (TCSC) است. رویکرد پیشنهادی روی یک سیستم تست ۵۷ باسه آزمایش شده و نتایج به دست آمده از رویکرد پیشنهادی با نتایج به دست آمده از روش‌های NSGA-II و MODE مقایسه شده‌اند.

کلید واژه: پخش بار بهینه چندهدفه، الگوریتم ژنتیک چندهدفه (eV-MOGA)، خازن سری کنترل شده با تایریستور (TCSC).

فهرست علائم و اختصارات

P_{Gm} و Q_{Gm} : توان اکتیو و راکتیو تولیدی واحدها در باس m
 P_{Gm}^{\max} و P_{Gm}^{\min} : حداقل و حداکثر توان تولیدی در باس m
 Q_{Gm}^{\max} و Q_{Gm}^{\min} : حد پایین و بالای توان راکتیو تولیدی در باس m
 P_{Dm} و Q_{Dm} : توان اکتیو و راکتیو بار در باس m
 P_D و Q_D : مجموع توان اکتیو و راکتیو بار
 P_L و Q_L : تلفات اکتیو و راکتیو انتقال توان
 δ_m و V_m : اندازه و زاویه فاز ولتاژ در باس m
 V_m^{\max} و V_m^{\min} : حد پایین و بالای اندازه ولتاژ در باس m
 S_m : ظرفیت انتقال خط m
 S_m^{\max} : ماکسیمم ظرفیت انتقال خط m
 γ_{mn} و θ_{mn} : اندازه و زاویه المان mn در ماتریس ادمیتانس باس‌ها
 r_{mn} و x_{mn} : مقاومت و راکتانس بین باس m و باس n
 g_{mn} و b_{mn} : کوندکتانس و سوسپتانس بین باس m و باس n
 x_{cm} : راکتانس TCSC باس m
 a_m, b_m, c_m, d_m, e_m : ضرایب هزینه‌ای واحد نیروگاهی m
 $\lambda_m, \eta_m, \gamma_m, \beta_m, \alpha_m$: ضرایب آلودگی واحد نیروگاهی m
 N_G : شاخص باس واحد نیروگاهی
 N_Q : شاخص منبع توان راکتیو
 N_B : شاخص باس
 N_L : شاخص خط انتقال
 N_{TCSC} : شاخص TCSC

این مقاله در تاریخ ۴ تیر ماه ۱۳۹۲ دریافت و در تاریخ ۱۴ اردیبهشت ماه ۱۳۹۳ بازنگری شد.

احسان افضالن، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز (email: Ehsan.afzalan@ymail.com).

محمود جورابیان، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز (email: mjoorabian@scu.ac.ir).

1. Optimal Power Flow
2. Flexible AC Transmission Systems
3. Economic Environmental Dispatch

اکتیو به صورت هم‌زمان در سیستم‌های قدرت مجهز به ادوات FACTS بهینه می‌شوند در حالی که قیود توازن توان، حدود تولید توان اکتیو و راکتیو، حدود ولتاژ، حدود خط انتقال و حدود فیزیکی ادوات FACTS حفظ شوند. خازن سری کنترل‌شده با تایریستور (TCSC) در مسأله OPF با استفاده از مدل راکتانس در نظر گرفته شده است. برای نشان دادن مؤثر بودن روش پیشنهادی سیستم تست IEEE ۵۷ باسه به عنوان مثال در نظر گرفته شده‌اند. نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی با نتایج به دست آمده با استفاده از نسخه دوم الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر مغلوب (NSGA - II)، الگوریتم تکامل دیفرانسیلی چندهدفه (MODE) با قراردادن TCSC در مکان‌های ثابت مقایسه شده‌اند.

۲- مدل‌سازی ادوات TCSC

تأثیر TCSC بر روی شبکه را می‌توان به صورت یک راکتانس قابل کنترل قرار داده شده در خط انتقال مربوط لحاظ کرد. مدل شبکه با TCSC در شکل ۱ نشان داده شده و بنابراین مدل استاتیک TCSC در این مطالعه مورد نظر قرار می‌گیرد. با افزودن TCSC به صورت سری با خط، راکتانس انتقال آن خط مابین باس m و n کاهش یافته و در نتیجه موجب افزایش بیشینه توان قابل انتقال در آن خط و به علاوه کاهش تلفات مؤثر توان راکتیو می‌شود. خازن سری کنترل‌شده با تایریستور می‌تواند به عنوان یک راکتانس استاتیک $-jX_c$ تحت شرایط حالت ماندگار در نظر گرفته شود. راکتانس مؤثر (X_{eff}) همراه با جبران‌سازی خازنی سری با معادله زیر داده می‌شود [۴]

$$X_{eff} = X_{mn} - X_c \quad (۱)$$

$$X_{eff} = (1 - K)X_{mn} \quad (۲)$$

که در آن $K = X_c / X_{mn}$ درجه جبران‌سازی سری و X_{mn} راکتانس خط بین باس‌های m و n است.

افزودن TCSC در خطی مابین باس‌های m و n موجب تغییر ماتریس سوسیتانس می‌شود و بنابراین فقط عناصر متصل مابین باس m و n با TCSC تغییر خواهند کرد. ماتریس ادیمیتانس باس منتجه سیستم با TCSC می‌تواند به صورت زیر به روز شود

$$Y'_{bus} = Y_{bus} + \Delta Y_{bus} \quad (۳)$$

که در آن Y'_{bus} ماتریس ادیمیتانس باس با TCSC، Y_{bus} ماتریس ادیمیتانس باس بدون TCSC و ΔY_{bus} تغییر ایجادشده در ماتریس ادیمیتانس باس به دلیل قراردادن TCSC است.

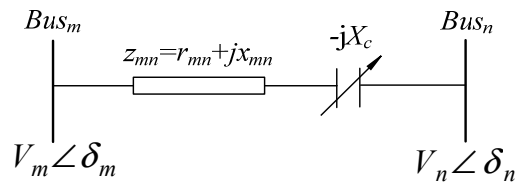
ماتریس ادیمیتانس باس مطابق با اندازه TCSC به روز می‌شود. فرمول‌بندی پیشنهادشده برای درجات مختلفی از جبران‌سازی سری برای TCSC قابل تغییر است که البته در این مطالعه به صورت پیش‌فرض برای سیستم، تست حدود خازن سری به نحوی اتخاذ شده‌اند که نسبت بیشینه حد خازن سری به راکتور خط مساوی یا بیشتر از ۵۰٪ باشد.

معادلات پخش توان خط به صورت زیر استخراج می‌شوند

$$P_{mn} = V_m^* g_{mn} - V_m V_n g_{mn} \cos(\delta_m - \delta_n) - V_m V_n b_{mn} \sin(\delta_m - \delta_n) \quad (۴)$$

$$Q_{mn} = V_m^* g_{mn} - V_m V_n g_{mn} \sin(\delta_m - \delta_n) + V_m V_n b_{mn} \cos(\delta_m - \delta_n) \quad (۵)$$

$$P_{nn} = V_m^* g_{mn} - V_m V_n g_{mn} \cos(\delta_m - \delta_n) + V_m V_n b_{mn} \sin(\delta_m - \delta_n) \quad (۶)$$



شکل ۱: مدل TCSC.

ساختاری سیستماتیک و نظام‌مندی را برای هدایت جستجو به سمت جبهه pareto - optimal فراهم نمی‌کند. در [۷] روال بهینه‌سازی با برنامه‌ریزی خطی ارائه شده که در آن اهداف مسأله یکی یکی در نظر گرفته می‌شوند. از آنجا که مسأله EED یک مسأله بهینه‌سازی به شدت غیر خطی است، روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک قادر به یافتن نقطه بهینه کلی نیستند و به علاوه این رویکرد هیچ اطلاعاتی در مورد بدهستان در مسأله نمی‌دهد. یک تکنیک جستجوی چندهدفه تصادفی برای مسأله EED در [۸] پیشنهاد شده ولی این تکنیک از نظر محاسباتی پیچیده و وقت‌گیر است.

در سال‌های اخیر مطالعات روی الگوریتم‌های تکاملی از جمله الگوریتم تکاملی چندهدفه^۱ (MOEA) تا [۹]، نسخه دوم الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیر مغلوب^۲ (NSGA-II) [۱۲]، تکاملی دیفرانسیلی چندهدفه^۳ (MODE) [۱۳] و ... نشان داده‌اند که این روش‌ها می‌توانند به نحو مؤثری برای حذف بیشتر مشکلات روش‌های کلاسیک مورد استفاده قرار گیرند. از آنجا که این روش‌ها تکنیک‌هایی مبتنی بر جمعیت هستند، در یک اجرای برنامه می‌توان چندین حل pareto - optimal را یافت.

در [۱۴] تا [۱۶] سه الگوریتم تکاملی چندهدفه یعنی الگوریتم مرتب‌سازی ژنتیک غیر مغلوب، الگوریتم ژنتیک فرورفته^۴ و الگوریتم تکاملی قدرت pareto برای حل مسأله پخش بار اقتصادی محیطی اعمال شده است. در [۱۷] الگوریتم ازدحام ذرات^۵ بر مبنای روش خوشه‌بندی فازی برای مسأله پخش بار اقتصادی محیطی پیشنهاد شده و در [۱۸] الگوریتم ایمن تطبیقی چندهدفه^۶ (MOAIA) برای حل مسأله پخش توان راکتیو بهینه^۷ (ORPF) شامل پایداری ایستای ولتاژ ارائه شده است. در [۱۵] تا [۱۷] فقط هزینه و آلودگی به عنوان اهداف در رقابت با هم در نظر گرفته شده‌اند و ادوات FACTS لحاظ نشده‌اند. الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی جهش قورباغه برای مسأله پخش بار بهینه با در نظر گرفتن آلودگی در [۱۹] پیشنهاد شده اما پاسخ‌های این روش نزدیک به حل بهینه است. در [۲۰] از ترکیب الگوریتم جستجوی ذرات و روش فازی با الگوریتم نلدر-مید برای حل مسأله پخش بار بهینه به صورت تک‌هدفه با در نظر گرفتن تعداد حالات مختلف شبیه‌سازی استفاده شده است. هدف از ترکیب روش فازی با الگوریتم گروه ذرات و نلدر-مید در این مرجع یافتن روشی است که علاوه بر داشتن مزیت‌های دو الگوریتم هوشمند، نقص‌های این دو الگوریتم را نداشته باشد.

در این مقاله الگوریتم ژنتیک چندهدفه^۸ (ϵ -MOGA) برای حل OPF چندهدفه پیشنهاد شده که هزینه تولید، آلودگی و تلفات انتقال توان

1. Multi-Objective Evolutionary Algorithm
2. Non Dominated Sorting Genetic Algorithm-II
3. Multi-Objective Differential Evolution
4. Niched
5. Particle-Swarm
6. Multi-Objective Adaptive Immune Algorithm
7. Optimal Reactive Power Flow
8. ϵ - Multi Objective Genetic Algorithm Variable

$$\sum_{n=1}^{N_B} V_m V_n \gamma_{mn} \sin(\theta_{mn} + \delta_m + \delta_n) - Q_{Gm} - Q_{ms} + Q_{Dm} = \cdot \quad (12)$$

$\forall m \in N_B$

$$\sum_{m=1}^{N_G} P_{Gm} - P_D - P_L = \cdot \quad (13)$$

$$\sum_{m=1}^{N_Q} Q_{Gm} - Q_D - Q_L = \cdot \quad (14)$$

$$P_{Gm}^{\min} \leq P_{Gm} \leq P_{Gm}^{\max}, \forall m \in N_G \quad (15)$$

$$Q_{Gm}^{\min} \leq Q_{Gm} \leq Q_{Gm}^{\max}, \forall m \in N_Q \quad (16)$$

$$V_m^{\min} \leq V_m \leq V_m^{\max}, \forall m \in N_B \quad (17)$$

$$|S_m| \leq S_m^{\max}, \forall m \in N_L \quad (18)$$

$$x_{cm}^{\min} \leq x_{cm} \leq x_{cm}^{\max}, \forall m \in N_{TCSC} \quad (19)$$

۴- مبانی بهینه‌سازی چندهدفه

تعداد زیادی از مسایل بهینه‌سازی دنیای واقعی شامل چندین تابع هدف هستند که هر یک از آنها باید به صورت هم‌زمان حل شود، زیرا این توابع معمولاً در رقابت با هم بوده و شامل اهداف در تضاد با هم هستند. مسایل بهینه‌سازی چندمنظوره همواره منجر به مجموعه‌ای از حل‌های بهینه می‌شوند و هیچ یک از این حل‌ها نمی‌تواند بهتر از بقیه آنها فرض شود. این حل‌های بهینه به عنوان حل‌های Pareto-optimal شناخته می‌شوند. به صورت عمومی مسایل بهینه‌سازی چندمنظوره متشکل از توابع هدف و قیود تساوی و نامساوی متناظر هستند که می‌تواند به شکل زیر فرموله شود

$$\min F(x) = \min [f_1(x), f_2(x), \dots, f_s(x)] \quad (20)$$

تحت شرایط

$$\begin{aligned} g_q(x) &\leq 0, \quad (1 \leq q \leq r) \\ h_k(x) &= 0, \quad (1 \leq k \leq n) \\ x_{li} &\leq x_i \leq x_{ui}, \quad (1 \leq i \leq L) \end{aligned} \quad (21)$$

که به ترتیب $h_k(x)$ و $g_q(x)$ ، X ، $f_i(x)$ ، $i \in B = [1, \dots, s]$ تابع هدف که حلی داخل فضای L بعدی حل D است و r قید نامساوی و n قید مساوی موجود است. به علاوه x_{ui} و x_{li} به ترتیب قیود پایینی و بالایی تعیین‌کننده فضای حل D هستند.

برای حل مسأله چندمنظوره مجموعه Pareto-optimal X_p باید یافت شود. غلبه Pareto به شکل ذیل تعریف می‌شود:

حل x^1 بر حل دیگر x^2 غلبه دارد و به صورت $x^1 < x^2$ نوشته می‌شود اگر

$$\forall i \in B, f_i(x^1) \leq f_i(x^2) \wedge \exists k \in B: f_k(x^1) < f_k(x^2) \quad (22)$$

بنابراین مجموعه Pareto-optimal X_p توسط رابطه زیر داده می‌شود

$$X_p = \{x \in D \mid \nexists \tilde{x} \in D: \tilde{x} < x\} \quad (23)$$

X_p یکتا است و معمولاً شامل حل‌های نامحدود است. بنابراین مجموعه X_p^* (که یکتا نیست) با تعداد محدودی عنصر از X_p باید به دست آید.

۴-۱ متغیر الگوریتم ژنتیک چند هدفه (εV-MOGA)

متغیر الگوریتم ژنتیک چندهدفه (εV-MOGA) بر اساس ایده غلبه

$$Q_{mn} = -V_m^x g_{mn} + V_m V_n g_{mn} \sin(\delta_m - \delta_n) + V_m V_n b_{mn} \cos(\delta_m - \delta_n) \quad (7)$$

که

$$g_{mn} = \frac{r_{mn}}{r_{mn}^2 + (x_{mn} - x_c)^2}$$

$$b_{mn} = -\frac{x_{mn} - x_c}{r_{mn}^2 + (x_{mn} - x_c)^2}$$

۳- فرمول‌بندی مسأله

مسأله OPF چندهدفه با وجود TCSC، هزینه تولید، آلودگی و تلفات انتقال توان اکتیو را در عین ارضای چندین قیود تساوی و نامساوی بهینه‌سازی می‌کند به این معنی که این تابع معمولاً یک مسأله کمینه‌سازی تحت قیود تساوی و نامساوی است. مسأله OPF به صورت کلی به شکل ریاضی بدین صورت بیان می‌شود:

$f(z)$ را کمینه کن تحت شرایط

$$\begin{aligned} g(z) &= \cdot \\ lb &\leq h(z) \leq ub \\ z &\geq \cdot \end{aligned}$$

که در آن z یک بردار متغیر محتوی کنترل‌های تنظیم‌پذیر، مقادیر تزریق توان راکتیو، اندازه ولتاژ باس‌ها و پارامترهای ثابت سیستم است. حدود lb و ub حدود بالایی و پایینی قیود نامساوی از جمله مقادیر MVA خطوط، حدود ولتاژ، حدود ژنراتور و تنظیمات ادوات FACTS است و نهایتاً اهداف مسأله در ادامه فرمول‌بندی می‌شود.

۳-۱ هزینه سوخت

تابع هزینه سوخت از واحدی تولیدی حرارتی با در نظر گرفتن اثرات نقطه شیر [۲۱] به صورت جمع یک تابع مربعی و سینوسی بیان می‌شود. هزینه کل سوخت بر حسب توان حقیقی خروجی می‌تواند به شکل زیر بیان شود

$$F = \sum_{m=1}^{N_G} (a_m + b_m P_{Gm} + C_m P_{Gm}^2 + |d_m \sin(e_m (P_{Gm}^{\min} - P_{Gm}))|) \quad (8)$$

۳-۲ آلودگی

آلوده‌کننده‌های اتمسفر از قبیل اکسید سولفور و اکسید نیتروژن ناشی از واحدهای تولیدی حرارتی می‌توانند به صورت مجزا مدل‌سازی شوند ولی برای اهداف مقایسه‌ای آلودگی کل این آلاینده‌ها که جمع یک تابع مربعی و نمایی است [۲۲] می‌تواند به شکل زیر بیان شود

$$E = \sum_{m=1}^{N_G} (\alpha_m + \beta_m P_{Gm} + \gamma_m P_{Gm}^2 + \eta_m \exp(\lambda_m P_{Gm})) \quad (9)$$

۳-۳ تلفات

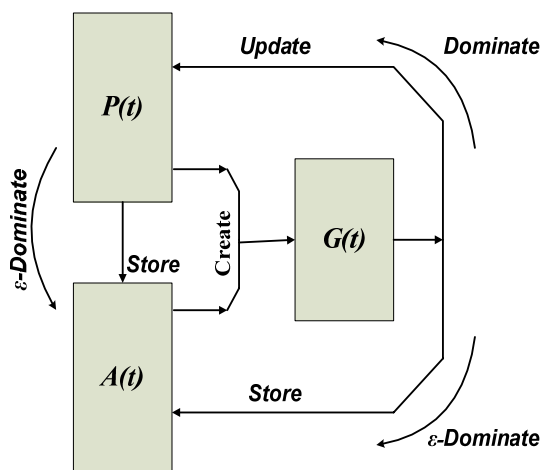
تلفات انتقال توان اکتیو سیستم می‌تواند به شکل زیر بیان شود

$$P_L = \sum_{m,n} g_{mn} (V_m^2 + V_n^2 - 2V_m V_n \cos(\delta_m - \delta_n)) \quad (10)$$

به شرط

$$\sum_{n=1}^{N_B} V_m V_n \gamma_{mn} \cos(\theta_{mn} + \delta_m + \delta_n) - P_{Gm} - P_{ms} + P_{Dm} = \cdot \quad (11)$$

$\forall m \in N_B$



شکل ۳: ساختار الگوریتم V-MOGA. ε.

بنابراین V-MOGA موظف به به روز رسانی محتوای $A(t)$ با ذخیره تنها حل‌های غالب از نظر ϵ است که جبهه یکسانی را شریک نیستند. وقتی دو حل از نظر ϵ غالب متقابل با هم رقابت می‌کنند، آن حلی که در $A(t)$ غلبه می‌کند آن حلی است که به مرکز جبهه از همه نزدیک‌تر باشد. بنابراین می‌توان از این که حل‌های متعلق به جبهه‌های مجاور (که هیچ یک بر دیگری غلبه نمی‌کند) به یکدیگر بیش از حد نزدیک باشند ممانعت نموده و به این شکل یک توزیع هوشمندانه را پیش برد.

هدف V-MOGA دستیابی به X_{PE}^* با بیشترین تعداد حل‌ها برای مشخص کردن جبهه Pareto به صورت مناسب است. با وجود این که تعداد حل‌های ممکن وابسته با شکل جبهه و جبهه $n-box_i$ است، از سطح زیر فراتر نمی‌رود

$$|X_{PE}^*| \leq \frac{\prod_{i=1}^n n_box_i + 1}{n_box_{max} + 1}, \quad n_box_{max} = \max_i n_box_i \quad (30)$$

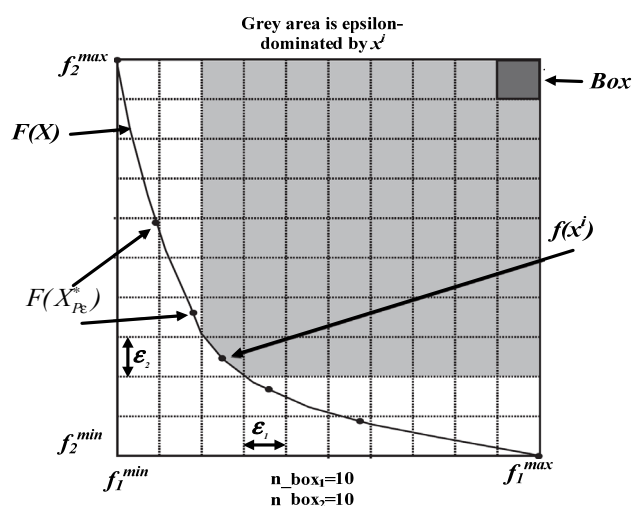
که سودمند است، زیرا می‌توان بیشینه تعداد حل‌های استفاده‌شده برای مشخص کردن جبهه Pareto را کنترل نمود.

به علاوه به نقاط لنگر $f_i(x^{i*})$ مقدار $box_i(x^{i*}) = 0$ تخصیص می‌یابد که در آن $f_i(x^{i*}) = f_i^{min}$ و بنابراین هیچ حل x نمی‌تواند از نظر ϵ بر نقاط لنگر غلبه کند زیرا اعمال تعریف جبهه، مقدار $box_i(x) \geq 1$ است.

شکل ۲ نشان می‌دهد که X_{PE}^* می‌تواند با اعمال مفاهیم غلبه ϵ به یک نمونه دوهدفه هنگامی که از روابط $n_box_1 = n_box_2 = 10$ استفاده شود، به دست آید. مقادیر ϵ_1 و ϵ_2 به حدود جبهه $f_1^{max}, f_1^{min}, f_2^{max}, f_2^{min}$ بستگی دارند که به صورت دینامیکی در تطابق با حل‌ها در حین مکان‌یابی آنها تنظیم می‌شوند. می‌توان ملاحظه نمود که توزیع حل‌ها متشکل از $F(X_{PE}^*)$ است، در امتداد جبهه، توزیع وابسته به شیب است و بیشترین تعداد نقاط در ناحیه مرکزی تجمع می‌کنند (نشان داده شده با خط چین) که شیب بیشترین مقدار است. ساختار V-MOGA در شکل ۳ نشان داده شده است.

در این الگوریتم از سه جمعیت مطابق ذیل برای تنظیم پهنای ϵ_i به صورت دینامیکی استفاده می‌شود:

الف) جمعیت اصلی $P(t)$ ، با جمعیت $Nind_p$ ، فضای جستجوی D را در طی تکرارهای الگوریتم کاوش می‌کند.
 ب) آرشیو $A(t)$ با جمعیت $Nind_A$ حل X_{PE}^* را ذخیره می‌کند. لازم به یادآوری است که اندازه آن متغیر ولی محدود است.



شکل ۲: مفهوم غلبه ϵ .

ϵ شکل می‌گیرد [۲۳]. از این متغیر برای چک کردن مؤلفه آرشیو $A(t)$ که در آن نتیجه مسأله بهینه‌سازی ذخیره می‌شود استفاده می‌گردد. الگوریتم V-MOGA سعی می‌کند که تضمین نماید $A(t)$ در جهت مجموعه ϵ Pareto X_{PE}^* به شکلی هوشمندانه پراکنده شده همراه با جبهه Pareto ϵ با استفاده از منابع حافظه محدود و با تطبیق حدود جبهه Pareto به صورت پرنرزی و برگرداندن فقدان حل‌های انتهایی جبهه‌ها همگرا می‌شود و بر این اساس فضای هدف به تعداد ثابتی جبهه تقسیم می‌شود. برای هر بعد n_box_i ، $i \in B$ ، سولول با پهنای ϵ_i به صورت زیر ساخته می‌شوند

$$\epsilon_i = \frac{f_i^{max} - f_i^{min}}{n_box_i} \quad (24)$$

$$f_i^{max} = \max_{x \in X_{PE}^*} f_i(x) \quad (25)$$

$$f_i^{min} = \min_{x \in X_{PE}^*} f_i(x)$$

این درجه تنوع $F(X_{PE}^*)$ را حفظ می‌کند زیرا هر جبهه می‌تواند توسط فقط یک حل در $A(t)$ اشغال شود و در همین شرایط توزیعی هوشمندانه ایجاد می‌نماید. الگوریتم فقط جبهه‌های اشغال شده را چک می‌کند (نه همه جبهه‌ها را). مدیریت محتوای $A(t)$ از نیاز به استفاده از سایر تکنیک‌های خوشه‌بندی برای به دست آوردن توزیع‌های کافی جلوگیری می‌کند که به میزان قابل توجهی هزینه محاسباتی را کاهش می‌دهد [۲۳].

مفهوم غلبه ϵ به صورت زیر تعریف می‌شود. برای حل $X \in D$ جبهه $box_i(x)$ توسط رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$box_i(x) = \frac{f_i(x) - f_i^{min}}{f_i^{max} - f_i^{min}} \cdot n_box_i, \quad \forall i \in B \quad (26)$$

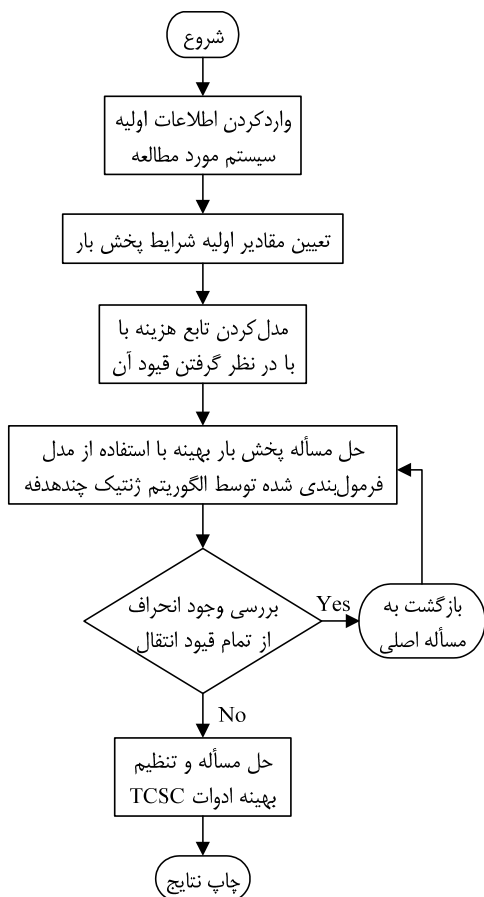
$$box_i(x) = \{box_a(x), \dots, box_s(x)\} \quad (27)$$

حل x^1 با مقدار $f(x^1)$ بر حل x^2 با مقدار $f(x^2)$ از نظر ϵ غلبه دارد و توسط $f(x^1) <_{\epsilon} f(x^2)$ نشان داده می‌شود اگر و فقط اگر

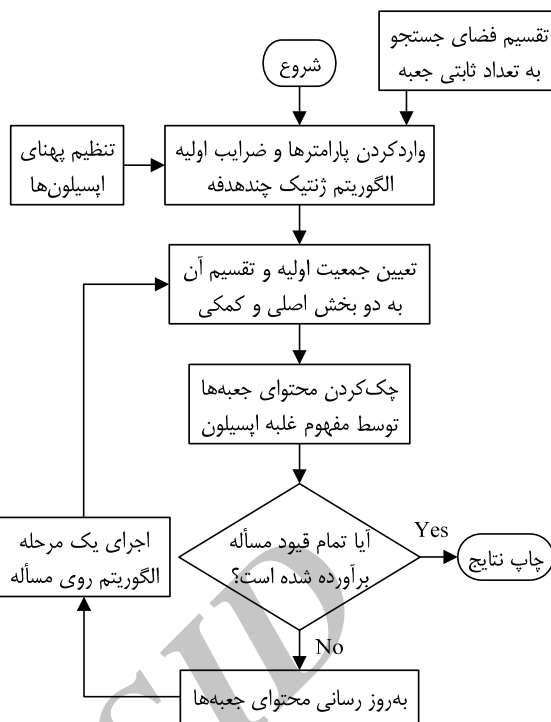
$$box(x^1) < box(x^2) \vee (box(x^1) = box(x^2) \text{ and } x^1 < x^2) \quad (28)$$

بنابراین مجموعه ϵ -Pareto، $X_{PE}^* \subseteq X_p$ است اگر و فقط اگر $\forall x^1, x^2 \in X_{PE}^*, x^1 \neq x^2$,

$$box(x^1) \neq box(x^2) \text{ and } box(x^1) <_{\epsilon} box(x^2) \quad (29)$$



شکل ۵: روندنمای مسأله پخش بار چندهدفه.



شکل ۴: روندنمای الگوریتم پیشنهادی.

ج) جمعیت کمکی $G(t)$ دارای جمعیت $Nind_G$ است و به علاوه اندازه‌های آن باید عددی زوج باشد. روند اصلی الگوریتم به صورت زیر مرتب می‌شود:

گام ۱) به صورت تصادفی جمعیت اصلی $P(0)$ را با $Nind_P$ فرد از فضای جستجوی D شروع کنید.

گام ۲) مقدار تابع را برای هر شخص در $P(t)$ محاسبه کنید.

گام ۳) به صورت هم‌زمان اشخاص در $P(t)$ و آرشیو $A(t)$ را چک کنید تا اشخاص مشابه هم را به صورت زیر اکتشاف نمایید:

الف) اشخاص غیر غالب $P(t)$ یعنی X_{ND} را کشف نمایید.

ب) حدود جبهه Pareto یعنی f_i^{max} و f_i^{min} را از $f(x), \forall x \in X_{ND}$ محاسبه نمایید.

ج) به صورت جداگانه اشخاص را در X_{ND} تحلیل نموده و اعضای از $A(t)$ که توسط اشخاص به صورت \mathcal{E} مغلوب نیستند در $A(t)$ ذخیره می‌شوند.

گام ۴) $G(t)$ را در هر تکرار مطابق ذیل شناسایی نمایید:

الف) به صورت تصادفی دو شخص، یعنی x^p از $P(t)$ و x^a از $A(t)$ را انتخاب نمایید.

ب) به صورت تصادفی عدد u محدود به بازه $[0, 1]$ را تولید نمایید.

ج) در صورتی که $u < P_{c/m}$ ، x^p را با x^a با استفاده از تکنیک بازترکیب خطی توسعه داده شده قطع نمایید [۲۴]. $P_{c/m}$ احتمال قطع / موتاسیون است.

د) مقادیر x^p و x^a را اگر $u \leq P_{c/m}$ تغییر دهید که در آن از موتاسیون تصادفی با یک توزیع گوسی استفاده شده [۲۲] و سپس در $G(t)$ ذخیره می‌شود. این گام دوباره به $Nind_G/2$ بار اجرا می‌شود تا زمانی که $G(t)$ پر شود.

گام ۵) مقدار تابع را برای هر شخص در $G(t)$ محاسبه نمایید.

گام ۶) به صورت هم‌زمان اشخاص در $G(t)$ و آرشیو $A(t)$ را چک نمایید تا اشخاص یکسان را کشف نمایید به نحوی که $\forall x^G \in G(t)$ به صورت ذیل:

الف) $f(x^G)$ را در $A(t)$ شامل کنید، اگر توسط هیچ شخصی از $A(t)$ به صورت \mathcal{E} مغلوب نباشد و با سطح Z_1 شمرده می‌شود. به علاوه اشخاص از $A(t)$ که با x^G به صورت \mathcal{E} مغلوب هستند حذف خواهند شد.

ب) تمامی اشخاص در $A(t)$ را غالب نمایید اگر $f(x^G)$ به ناحیه Z_2 تعلق داشته و در $A(t)$ در بر گرفته نشده است.

ج) به صورت هم‌زمان اشخاص در $P(t)$ و آرشیو $A(t)$ را چک نموده تا همان اشخاص استفاده شده در گام ۳ را در جمعیت $A(t) \cup x^G = P'(t)$ کشف نمایید، اگر $f(x^G)$ به ناحیه Z_2 متعلق باشد. در این فرایند حدود جدید جبهه Pareto و عرض‌های \mathcal{E}_i می‌توانند دوباره محاسبه شوند.

د) تمامی اشخاص را از $A(t)$ حذف نمایید زیرا تمامی آنها توسط x^G به صورت \mathcal{E} مغلوب هستند، اگر $f(x^G)$ متعلق به ناحیه Z_2 است. مورد شمول قرار گرفته و حدود فضای هدف $f(x^G)$ هستند.

گام ۷) مقدار $P(t)$ را با اشخاص از $G(t)$ به روز کنید هنگامی که هر شخص x^G از $G(t)$ با شخص x^p که به صورت تصادفی از اشخاص در $P(t)$ که توسط x^G مغلوب می‌شوند، به روز نمایید. در نهایت اشخاص از $A(t)$ شامل X_{PE}^* هستند که مشخصه هوشمندانه جبهه Pareto است.

۴-۴ روندنمای الگوریتم و حل مسأله پیشنهادی

شکل ۴ روندنمای الگوریتم پیشنهادی جهت حل مسأله پخش بار بهینه چندهدفه را نمایش می‌دهد. در این روش، مسأله بهینه‌سازی معرفی شده در روابط فوق با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه حل می‌گردد. همچنین شکل ۵ روندنمای روش پیشنهادی جهت حل و

اول است با این تفاوت که برای تابع هزینه آلودگی یک فاکتور جریمه هم در نظر گرفته شده و همان طور که ذکر شد این امر موجب تک‌هدفه شدن تابع در این حالت می‌شود. در واقع مسأله پخش بار بهینه در حالت‌های اول و دوم به صورت چندهدفه که موضوع مقاله است مورد بررسی قرار گرفته و در حالت سوم به صورت تک‌هدفه با استفاده از الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه به منظور انجام مقایسه و نشان‌دادن برتری روش پیشنهادی چندهدفه، نسبت به الگوریتم تک‌هدفه انجام شده است. به همین منظور بهینه‌سازی بر روی هزینه سوخت، آلودگی و تلفات انتقال توان اکتیو با استفاده از GA به صورت جداگانه انجام شده و نتایج در جدول ذیل ارائه شده‌اند.

۵-۱ سیستم تست تحت مطالعه

سیستم تست، یک سیستم IEEE ۵۷ باسه است. در این فعالیت ۵ خط (۱۸-۱۹)، (۳۱-۳۲)، (۳۳-۳۴)، (۴۰-۴۶) و (۳۹-۵۷) همراه با TCSC نصب شده‌اند. در اینجا حدود اندازه ولتاژ باس‌های ژنراتور و باس‌های بار به ترتیب برابر با $0.95 p.u \leq V \leq 1.1 p.u$ و $0.93 p.u \leq V \leq 1.1 p.u$ و حدود زاویه ولتاژ برابر با $0^\circ < \delta < 20^\circ$ قرار داده شده‌اند.

۵-۲ تحلیل نتایج

هزینه سوخت، آلودگی و تلفات انتقال توان اکتیو با استفاده از GA به صورت جداگانه کمینه شده و تمامی نتایج در جدول ۱ ارائه شده‌اند. روش $\mathcal{E}V$ -MOGA برای حل حالت‌های ۱ و ۲ اعمال شده و حالت ۳ با استفاده از GA کمینه شده است. از جدول ۱ ملاحظه می‌شود که هزینه سوخت تحت معیار کمینه‌سازی هزینه برابر با ۸۳۰۴/۸۷ دلار بر ساعت است ولی برای حالت‌های معیارهای کمینه‌سازی آلودگی و تلفات انتقال توان اکتیو با استفاده از GA به ۱۵۹۰۱/۹۲ دلار بر ساعت و ۱۵۶۹۵/۲۳ دلار بر ساعت افزایش می‌یابد. در حالت ۱ هزینه سوخت برابر با ۹۹۴۰/۱۱ دلار بر ساعت است که بیشتر از ۸۳۰۴/۸۷ دلار بر ساعت و کمتر از ۱۵۹۰۱/۹۲ دلار بر ساعت بوده و آلودگی برابر ۲/۰۶۸۷ تن بر ساعت است که کمتر از ۲/۴۲۹۸ تن بر ساعت و بیشتر از ۱/۸۵۳۴ تن بر ساعت است. تلفات انتقال توان اکتیو ۲۷/۶۳ مگاوات می‌باشد. در حالت ۲ هزینه سوخت و آلودگی برابر با ۱۱۵۰۵/۸۹ دلار بر ساعت و ۲/۱۲۱۳ تن بر ساعت هستند که از حالت ۱ بیشتر است و تلفات انتقال توان اکتیو برابر با ۲۴/۵۸ مگاوات است که کمتر از ۲۷/۶۳ مگاوات می‌باشد. نتایج به دست آمده از روش $\mathcal{E}V$ -MOGA با نتایج به دست آمده از روش‌های NSGA-II، MODE و حالت ۳ مقایسه شده‌اند که در جدول ۲ نشان داده شده است. از جداول دیده می‌شود که روش پیشنهادی دارای زمان CPU کمتر و همچنین پاسخ‌های بهینه‌تری نسبت به سایر روش‌های مقایسه‌شده است که این امر بیان‌گر قدرت بالای الگوریتم پیشنهادی می‌باشد.

برای سیستم تست، در $\mathcal{E}V$ -MOGA، GA و NSGA-II اندازه جمعیت، crossover، احتمال‌های موتاسیون و بهینه‌سازی نسل‌ها به ترتیب به صورت ۹، ۰/۱۰۰، ۰/۲ و ۱۰۰ انتخاب شده و در MODE اندازه جمعیت، عامل مقیاس‌بندی، ثابت crossover و بهینه‌سازی نسل‌ها به ترتیب به صورت ۱۰۰، ۱/۰، ۱/۰ و ۱۰۰ انتخاب شده‌اند.

۶- نتیجه‌گیری

این مقاله الگوریتم ژنتیک چندهدفه را برای کار با مسأله پخش بار بهینه برای سیستم‌های قدرت مجهز شده به TSCS دارای چندین هدف از جمله هزینه سوخت، آلودگی و تلفات انتقال توان اکتیو ارائه داده است.

ارضای قیود مسأله پخش بار بهینه چندهدفه را نمایش می‌دهد. در این روش، مسأله پخش بار چندهدفه با استفاده از روابط ارائه‌شده در بخش فرمول‌بندی مسأله و الگوریتم پیشنهادی حل می‌گردد.

۵- نتایج عملی

در این مقاله عملکرد روش OPF پیشنهادی بر مبنای $\mathcal{E}V$ -MOGA استفاده از یک سیستم تست IEEE ۵۷ باسه که مشخصات ژنراتوری آن در جدول پ-۱ داده شده، بررسی می‌شود. برای نشان‌دادن مؤثر بودن الگوریتم $\mathcal{E}V$ -MOGA پیشنهادی، NSGA-II و MODE به همان سیستم تست اعمال شده‌اند. تمامی الگوریتم‌ها یعنی GA، MODE، NSGA-II و الگوریتم استفاده‌شده در این مقاله برای حل مسأله OPF با استفاده از Matlab ۷.۰ بر روی یک کامپیوتر شخصی اجرا شده‌اند.

همان گونه که اشاره شد خازن سری کنترل‌شده با تایریستور (TCSC) یکی از مؤثرترین ادوات FACTS است که موجب افزایش بهینه‌سازی قابل انتقال و کاهش تلفات مؤثر توان اکتیو می‌شود که مقدار این افزایش و کاهش به میزان درجه جبران‌سازی آن بستگی دارد. هدف مقاله به دست آوردن حل مسأله OPF از طریق تعیین اندازه بهینه راکتانس TCSC و در نتیجه بهبود پایداری استاتیکی سیستم است. به همین منظور TCSC با تنظیمات مختلف درجه جبران‌سازی در مکان‌های تعیین‌شده مورد شبیه‌سازی قرار داده و مطالعات پخش توان را اجرا شده‌اند تا زمانی که تمام نقض حدود حذف/کمتر شوند. اگر تمام نقض حدود حذف/کمتر شده باشند، سطح جبران‌سازی در این نقطه برابر با تنظیم بهینه TCSC است و در نهایت حل مسأله OPF و تنظیم بهینه ادوات TCSC را به دست آورده و نتایج چاپ می‌شوند.

در نهایت برای سیستم تست حدود خازن سری به نحوی اتخاذ شده‌اند که نسبت بهینه حد خازن سری به راکتور خط مساوی یا بیشتر از ۵۰٪ باشد. این شرایط برای تمام حالات یکسان در نظر گرفته شده و از نتایج واضح است که با تنظیم بهینه TCSC به یک حل بهینه و ایمن پخش توان دست یافته‌ایم.

سه تابع هدف یعنی هزینه سوخت، آلودگی و تلفات انتقال توان اکتیو در این مقاله مد نظر قرار گرفته و همچنین دو حالت در نظر گرفته شده است. در حالت ۱ مسأله OPF اقتصادی محیطی در نظر گرفته شده که در آن هر دو تابع هدف هزینه و آلودگی به صورت هم‌زمان به عنوان اهداف در رقابت با هم در لحاظ شده‌اند. در حالت ۲ هزینه آلودگی و تلفات انتقال توان اکتیو به صورت هم‌زمان به عنوان اهداف در رقابت با هم در نظر گرفته شده‌اند. مصالحه مابین اهداف در رقابت با هم با تأکید روی حل‌های غیر مغلوب و همچنین تأکید برای به دست آوردن مجموعه‌ای از حل‌ها با توزیع مناسب به دست می‌آید. این دو ویژگی برای یافتن مجموعه‌ای از حل‌ها نزدیک به حل‌های pareto-optimal پذیرفته می‌شوند.

در حالت ۳ مسأله OPF اقتصادی محیطی با معرفی فاکتور جریمه هزینه h به یک مسأله بهینه‌سازی تک‌هدفه تبدیل می‌شود و می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\psi = F + h \times E \quad (31)$$

در واقع تابع هدف این حالت که ψ نام دارد از حاصل جمع دو تابع هدف هزینه سوخت به نام F و حاصل ضرب هزینه آلودگی (E) در فاکتور جریمه هزینه h تشکیل شده است.

در مورد حالت سوم باید بیان شود که این حالت، حالت خاصی از حالت

جدول ۱: نتایج بهینه هزینه، آلودگی و تلفات مربوط به سیستم تحت مطالعه.

Data system	Genetic Algorithm (GA)		
	Minimum cost	Minimum emission	Minimum loss
P_{G_1} (MW)	۵۲۰/۱	۲۹۵/۱۵	۳۱۸/۵۸
P_{G_2} (MW)	۰/۰	۰/۰	۰/۰
P_{G_3} (MW)	۱۰۲/۷۳	۸۴/۲۱	۴۵/۹۰
P_{G_4} (MW)	۰/۰	۰/۰	۰/۰
P_{G_5} (MW)	۱۷۵/۶۲	۴۱۱/۵	۴۰۶/۶۳
P_{G_6} (MW)	۰/۰	۰/۰	۰/۰
$P_{G_{12}}$ (MW)	۴۸۵/۲۵	۴۷۵/۳۴	۴۹۵/۰۱
Total P_G (MW)	۱۲۸۳/۴۵	۱۲۶۸/۱۰	۱۲۶۵/۱۲
x_{c14-14} (p.u)	۰/۰۶۰۵	۰/۰۸۳۰	۰/۰۱۰۰
x_{c21-21} (p.u)	۰/۰۱۹۹	۰/۰۶۷۳	۰/۰۰۰۳
x_{c24-24} (p.u)	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۸
x_{c27-26} (p.u)	۰/۰۹۳۱	۰/۰۴۳۶	۰/۰۸۱۸
x_{c31-27} (p.u)	۰/۰۴۶۷	۰/۰۷۷۳	۰/۰۸۴۲
Cost (\$/h)	۸۳۰۴/۸۷	۱۵۹۰۱/۹۲	۱۵۶۹۵/۲۳
Emission (ton/h)	۲/۴۲۲۳	۱/۸۵۱۱	۱/۹۶۶۹
P_{loss} (MW)	۳۳/۵۶	۱۸/۲۸	۱۶/۲۳
CPU time (s)	۶۷۸/۳	۶۸۸/۹	۶۹۹/۴

جدول ۲: نتایج بهینه حالت‌های ۱، ۲ و ۳ مربوط به سیستم تحت مطالعه.

Data system	ε V-MOGA		MODE		NSGA-II		GA
	Case -1	Case -2	Case -1	Case -2	Case -1	Case -2	Case -3
P_{G_1} (MW)	۴۳۰/۳۳	۴۴۰/۴۰	۴۳۵/۳۷	۴۵۱/۱۶	۴۳۱/۱۲	۴۳۴/۲۵	۴۷۴/۶۸
P_{G_2} (MW)	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
P_{G_3} (MW)	۱۰۰/۰۳	۶۷/۲۸	۱۰۲/۴۹	۶۸/۱۲	۹۸/۳۱	۵۰/۷۵	۸۱/۶۲
P_{G_4} (MW)	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
P_{G_5} (MW)	۲۴۹/۲۷	۳۰۸/۹۳	۲۵۲/۴۱	۳۰۶/۱۰	۲۵۴/۳۴	۳۰۵/۷۵	۲۷۷/۰۳
P_{G_6} (MW)	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
$P_{G_{12}}$ (MW)	۴۹۹/۰	۴۵۸/۶۱	۴۸۸/۷۶	۴۵۰/۱۳	۴۹۴/۹۶	۴۸۳/۶۳	۴۴۶/۲۰
Total P_G (MW)	۱۲۷۸/۶۳	۱۲۷۵/۲۲	۱۲۷۹/۰۳	۱۲۷۶/۴۱	۱۲۷۸/۷۳	۱۲۷۴/۲۸	۱۲۷۹/۵۳
x_{c14-14} (p.u)	۰/۰۶۰۸	۰/۰۰۱۶	۰/۰۶۰۷	۰/۰۵۳۶	۰/۰۶۰۷	۰/۰۰۹۶	۰/۰۰۷۶
x_{c21-21} (p.u)	۰/۰۸۹۰	۰/۰۳۷۸	۰/۰۸۹۱	۰/۰۳۴۶	۰/۰۸۹۱	۰/۰۸۸۵	۰/۰۳۶۱
x_{c24-24} (p.u)	۰/۰۷۶۱	۰/۰۱۱۷	۰/۰۷۶۲	۰/۰۷۹۵	۰/۰۷۶۲	۰/۰۱۳۹	۰/۰۸۳۴
x_{c27-26} (p.u)	۰/۰۸۲۲	۰/۰۰۷۸	۰/۰۸۲۱	۰/۰۰۵۶	۰/۰۸۲۱	۰/۰۹۲۳	۰/۰۲۱۹
x_{c31-27} (p.u)	۰/۰۴۴۵	۰/۰۷۱۵	۰/۰۴۴۵	۰/۰۵۵۳	۰/۰۴۴۵	۰/۰۹۹۳	۰/۰۵۲۱
Cost (\$/h)	۹۹۴۰/۱۱	۱۱۵۰۵/۸۹	۹۹۹۲/۰	۱۱۳۶۷/۶	۱۰۰۴۵/۵	۱۱۵۳۹/۴	۱۰۳۹۸/۱۱
Emission (ton/h)	۲/۰۶۸۷	۲/۱۲۱۳	۲/۰۷۶۲	۲/۱۵۰۲	۲/۰۷۵۸	۲/۱۵۷۲	۲/۲۱۱۸
P_{loss} (MW)	۲۷/۶۳	۲۴/۵۸	۲۸/۳۲	۲۵/۷۳	۲۷/۹۸	۲۴/۶۱	۲۸/۸۳
CPU time (s)	۸۲۲/۴	۸۹۹/۸۵	۱۰۱۱/۵۶	۱۱۰۲/۴	۸۴۹/۸	۹۰۹/۳	۷۰۱/۶

مراجع

- [1] J. A. Momoh, M. E. El - Hawary, and R. Adapa, "A review of selected optimal power flow literature to 1993, part I: nonlinear and quadratic programming approach," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, no. 1, pp. 96-104, Feb. 1999.
- [2] J. A. Momoh, M. E. El - Hawary, and R. Adapa, "A review of selected optimal power flow literature to 1993, part II: newton, linear programming and interior point methods," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, no. 1, pp. 104-111, Feb. 1999.
- [3] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, New York: IEEE Press, 1999.

نتایج به دست آمده از رویکرد پیشنهادی با نتایج به دست آمده از MODE, NSGA-II روی سیستم‌های تست IEEE اصلاح شده ۵۷ باس با TCSC در مکان‌های ثابت مقایسه شده‌اند. از مقایسه دیده می‌شود که رویکرد پیشنهادی رفتار قابل رقابتی از دیدگاه حل‌ها و نیز زمان محاسباتی فراهم می‌کند.

پیوست

مشخصات سیستم تحت تست در جدول پ-۱ ارائه شده است.

جدول پ-۱: مشخصات سیستم تحت تست.

Bus no	P_G^{\min} (MW)	P_G^{\max} (MW)	a (\$/h)	b (\$/MWh)	c (\$/MW ² h)	d (\$/h)	e (rad/MW)	α (ton/h)	β (ton/MWh)	γ (ton/MW ² h)	η (ton/h)	λ (V/MW)
۱	۰	۶۰۰	۰	۲/۰۰	-۰.۰۳۷۵	۱۸/۰۰	-۰.۳۷۰	$۴,۰۹۱E-۲$	$-۵,۵۵۴E-۴$	$۶,۴۹۰E-۶$	$۲,۰E-۴$	$۲,۸۵۷E-۳$
۲	۰	۵۰۰	۰	۱/۷۵	-۰.۱۷۵۰	۱۶/۰۰	-۰.۳۸۰	$۲,۵۴۳E-۲$	$-۶,۰۴۷E-۴$	$۵,۶۳۸E-۶$	$۵,۰E-۴$	$۳,۳۳۳E-۳$
۳	۰	۵۰۰	۰	۳/۰۰	-۰.۲۵۰۰	۱۳/۵۰	-۰.۴۱۰	$۶,۱۳۱E-۲$	$-۵,۵۵۵E-۴$	$۵,۱۵۱E-۶$	$۱,۰E-۵$	$۶,۶۶۷E-۳$
۶	۰	۵۰۰	۰	۲/۰۰	-۰.۰۳۷۵	۱۸/۰۰	-۰.۳۷۰	$۳,۴۹۱E-۲$	$-۵,۷۵۴E-۴$	$۶,۳۹۰E-۶$	$۳,۰E-۴$	$۲,۶۵۷E-۳$
۸	۰	۶۵۰	۰	۱/۰۰	-۰.۰۶۲۵۰	۱۴/۰۰	-۰.۴۰۰	$۴,۲۵۸E-۲$	$-۵,۰۹۴E-۴$	$۴,۵۸۶E-۶$	$۱,۰E-۶$	$۸,۰۰۰E-۳$
۹	۰	۵۰۰	۰	۱/۷۵	-۰.۱۹۵۰	۱۵/۰۰	-۰.۳۹۰	$۲,۷۵۴E-۲$	$-۵,۸۴۷E-۴$	$۵,۲۳۸E-۶$	$۴,۰E-۴$	$۲,۸۷۵E-۳$
۱۲	۰	۵۰۰	۰	۳/۲۵	-۰.۰۸۳۴	۱۲/۰۰	-۰.۴۵۰	$۵,۳۲۶E-۲$	$-۳,۵۵۵E-۴$	$۳,۳۸۰E-۶$	$۲,۰E-۳$	$۲,۰۰۰E-۳$

- dispatch," *IEEE Trans. Evol Comput*, vol. 12, no. 5, pp. 529-541, Oct. 2008.
- [18] X. Hugang, C. Haozhong, and L. Haiyub, "Optimal reactive power flow incorporating static voltage stability based on multi-objective adaptive immune algorithm," *Energy Convers Manage*, vol. 49, no. 5, pp. 1175-1181, May 2008.
- [19] T. Niknam, M. R. Narimani, M. Jabbari, and A. R. Malekpour, "A modified shuffle frog leaping algorithm for multi-objective optimal power flow," *Energy*, vol. 36, no. 11, pp. 6420-6432, Nov. 2011.
- [20] M. Joorabian and E. Afzalan, "Optimal power flow under both normal and contingent operation conditions using the hybrid fuzzy particle swarm optimization and Nelder-Mead algorithm (HFPSO-NM)," *Applied Soft Computing*, pt. C, vol. 14, pp. 623-633, Jan. 2014.
- [21] D. C. Walters and G. B. Sheble, "Genetic algorithm solution of economic dispatch with valve point loading," *IEEE Trans. Power Syst*, vol. 8, no. 3, pp. 1325-1332, Aug. 1993.
- [22] R. Yokoyama, S. H. Bae, T. Morita, and H. Sasaki, "Multiobjective optimal generation dispatch based on probability security criteria," *IEEE Trans. Power Syst*, vol. 3, no. 1, pp. 317-324, Feb. 1988.
- [23] M. Laumanns, L. Thiele, K. Deb, and E. Zitzler, "Combining convergence and diversity in evolutionary multi-objective optimization," *Evolutionary Computation*, vol. 10, no. 3, pp. 263-282, Fall 2002.
- [24] M. Basu, "Economic environmental dispatch using multi-objective differential evolution," *Applied Soft Computing*, vol. 11, no. 1, pp. 2845-2853, Mar. 2011.
- [4] W. Ongsakul and P. Bhasaputra, "Optimal power flow with FACTS devices by hybrid TS/SA approach," *Electr Power Energy Syst*, vol. 24, no. 1, pp. 851-857, 2002.
- [5] J. H. Talaq, F. El-Hawary, and M. E. El-Hawary, "A summary of environmental/economic dispatch algorithms," *IEEE Trans. Power Syst*, vol. 9, no. 3, pp. 1508-1516, Aug. 1994.
- [6] D. Srinivasan, C. S. Chang, and A. C. Liew, "Multiobjective generation scheduling using fuzzy optimal search technique," *IEE IEE Proceedings - C: Generation, Transmission and Distribution*, vol. 141, no. 3, pp. 233-242, May 1994.
- [7] A. Farag, S. Al-Baiyat, and T. C. Cheng, "Economic load dispatch multiobjective optimization procedures using linear programming techniques," *IEEE Trans. Power Syst*, vol. 10, no. 2, pp. 731-738, May 1995.
- [8] D. B. Das and C. Patvardhan, "New multi-objective stochastic search technique for economic load dispatch," *IEE IEE Proceedings - C: Generation, Transmission and Distribution*, vol. 145, no. 6, pp. 747-752, Nov. 1998.
- [9] D. A. V. Veldhuizen and G. B. Lamont, "Multiobjective evolutionary algorithms: analyzing the state-of-the-art," *Evolutionary Computation*, vol. 8, no. 2, pp. 125-147, Jun. 2000.
- [10] E. Zitzler, M. Laumanns, and L. Thiele, "Improving the strength pareto evolutionary algorithm, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, Switzerland, Technical Report TIK - Report 103, May 2001.
- [11] H. A. Abbass and R. Sarker, "The pareto differential evolution algorithm," *Int J. Artif Intell Tools*, vol. 11, no. 4, pp. 531-552, Dec. 2002.
- [12] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," *IEEE Trans. Evol Comput*, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, Apr. 2002.
- [13] B. V. Babu and B. Anbarasu, "Multi-objective differential evolution (MODE): an evolutionary algorithm for multi-objective optimization problems (MOOPs)," in *Proc. of 3rd Int. Conf. on Computational Intelligence, Robotics, and Autonomous Systems, CIRAS'05*, Singapore, Dec. 2005.
- [14] K. V. Price, R. Storn, and J. Lampinen, *Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization*, Berlin: Springer-Verlag, 2005.
- [15] M. A. Abido, "Environmental/economic power dispatch using multiobjective evolutionary algorithm," *IEEE Trans. Power Syst*, vol. 18, no. 4, pp. 1529-1537, Nov. 2003.
- [16] M. A. Abido, "Multi-objective evolutionary algorithms for electric power dispatch problem," *IEEE Trans. Evol Comput*, vol. 10, no. 3, pp. 315-329, Jun. 2006.
- [17] S. Agrawal, B. K. Panigrahi, and M. K. Tiwari, "Multiobjective particle swarm algorithm with fuzzy clustering for electrical power
- احسان افضان** مدارک کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی برق- قدرت در سال‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۹۰ از دانشگاه آزاد اسلامی دریافت کرد. وی هم‌اکنون شاغل در شرکت مدیریت تولید برق اهواز (نیروگاه حرارتی رامین) می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده متنوع بوده و شامل موضوعاتی شامل بازار برق، مدل‌سازی سیستم‌های قدرت، شبکه‌های توزیع برق و شبکه‌های تجدیدساختار یافته است.
- محمود جورابیان** تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی و کارشناسی ارشد به ترتیب در سال‌های ۱۳۶۲ (دانشگاه نیهیون-آمریکا) و ۱۳۶۴ (دانشگاه صنعتی رن سی لیر- آمریکا) در رشته مهندسی برق قدرت آغاز نمود. وی مقطع دکتری مهندسی برق را در سال ۱۳۷۵ در دانشگاه باث انگلستان به پایان رسانده است و هم‌اکنون استاد دانشکده مهندسی برق دانشگاه شهید چمران اهواز می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی ایشان شبکه‌های عصبی مصنوعی، سیستم‌های هوشمند، شبکه‌های انتقال و توزیع قدرت الکتریکی، دینامیک و کنترل سیستم‌های قدرت، بازارهای برق و سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف‌پذیر (FACTS) می‌باشد.