

پخش بار بهینه در شبکه‌های انتقال HVAC/HVDC با یک الگوریتم ابتکاری ترکیبی

سیدجلال سیدشوا، حسین سیفی و محمدصادق سپاسیان

توابع هدف برآورده شوند. مسأله پخش بار بهینه، یک مسأله بهینه‌سازی غیر خطی، نامحدب، ایستا، ترکیبی عدد صحیح و با ابعاد بزرگ شامل توابع هدف و قیود مشتق‌ناپذیر می‌باشد. به همین دلیل روش‌های متعددی برای OPF توسعه یافته است. این روش‌ها را می‌توان به دو دسته روش‌های ریاضی و روش‌های ابتکاری تقسیم کرد. روش‌های ریاضی شامل برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی غیر خطی، برنامه‌ریزی درجه دوم، نقطه داخلی و الگوریتم‌های گرادیان مینا (نیوتن مینا) و روش‌های حداقل‌سازی نامقید متوالی^[۱] می‌باشند [۱] تا [۵]. اگرچه روش‌های بر مبنای برنامه‌ریزی خطی سریع و قابل اعتمادند اما ایراد اصلی آنها نیاز به تقریب تکه‌ای خطی توابع می‌باشد. عیب اصلی روش‌های بر مبنای برنامه‌ریزی غیر خطی مشکلات آنها در تضمین همگرایی و پیچیدگی آنها است. ایراد روش‌های بر مبنای برنامه‌ریزی درجه دوم نیاز به تقریب تکه‌ای درجه دوم تابع هزینه در آنها می‌باشد. روش‌های بر مبنای گرادیان یا نیوتن به دلیل حساسیتشان به شرایط اولیه مشکلاتی در همگرایی دارند به طوری که انتخاب نامناسب شرایط اولیه می‌تواند باعث عدم همگرایی روش شود. در روش‌های حداقل‌سازی نامقید متوالی وقتی ضرایب جریمه خیلی بزرگ انتخاب می‌شوند، روش با مشکلات عددی مواجه می‌شود. با وجود کارایی خوب روش‌های نقطه داخلی، اگر اندازه گام در این روش‌ها به صورت مناسبی انتخاب نشود، زیرمسأله خطی حاصل ممکن است در دامنه غیر خطی اولیه ناشدنی باشد [۶]. به علاوه این روش‌ها نیز به انتخاب نامناسب شرایط اولیه و معیارهای خاتمه و بهینگی حساس‌اند و در اغلب موارد قادر به حل توابع غیر خطی و درجه دوم پیچیده نمی‌باشند [۷]. اغلب این رویه‌ها از روش‌های تحلیل حساسیت و گرادیان مینا با خطی‌سازی توابع هدف و قیود سیستم حول نقطه کار استفاده می‌کنند. مسأله OPF یک مسأله بهینه‌سازی بسیار غیر خطی و چندین بعدی شامل متغیرهای پیوسته و گسسته است و به همین دلیل بهینه‌های محلی متعددی دارد. بنابراین روش‌های بهینه‌سازی ریاضی که از مشتقات و گرادیان‌ها استفاده می‌نمایند، برای این مسأله مناسب نمی‌باشند؛ زیرا معیاری وجود ندارد که نشان دهد بهینه محلی حاصل همان بهینه سراسری می‌باشد. به علاوه در اغلب این روش‌ها لازم است فرضیات ریاضی بسیاری همچون محدب، تحلیلی و مشتق‌پذیر بودن توابع هدف را برای ساده‌سازی مسأله به کار بست. در حالی که در حالت کلی مسأله OPF یک مسأله بهینه‌سازی با توابع هدف نامحدب، غیر هموار و مشتق‌ناپذیر ترکیبی شامل متغیرهای پیوسته و گسسته می‌باشد. به همین دلیل تمایل به استفاده از روش‌های ابتکاری برای حل این مسأله روز به روز افزایش می‌یابد. روش‌های ابتکاری استفاده‌شده برای حل مسأله OPF عبارتند از الگوریتم ژنی (GA) [۸]، شبیه‌سازی آبرکاری فلزات^(SA) و جستجوی ممنوع (TS)

چکیده: در این مقاله مدلی برای پخش بار بهینه در شبکه‌های انتقال HVAC/HVDC ارائه شده است. پخش بار بهینه از ابزارهای اصلی در مطالعات برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از شبکه‌های برق می‌باشد. عدم تحدب، غیر خطی بودن، وجود متغیرهای گسسته در کنار متغیرهای پیوسته و وجود همبستگی بالا بین متغیرها، مسأله پخش بار بهینه را به مسأله‌ای پیچیده تبدیل کرده است. در مدل ارائه‌شده این مقاله برای پخش بار بهینه، پارامترهای کنترلی شبکه و اتصالات HVDC موجود در آن به نحوی تنظیم می‌شوند که نیاز به تجهیزات اضافی برای عملکرد مناسب شبکه در حالت پخش بار AC حداقل شده و در عین حال شبکه بیشترین حاشیه امنیت را داشته باشد. برای حل مدل ارائه‌شده یک الگوریتم تکاملی ترکیبی حاصل از ترکیب روش‌های ابتکاری PSO و روش تکامل تفاضلی پیشنهاد شده و کارایی مدل و الگوریتم پیشنهادی برای شبکه آزمون ۳۰ باس IEEE مورد آزمایش قرار گرفته است.

کلید واژه: پخش بار بهینه، PSO، روش تکامل تفاضلی، HVDC.

۱- مقدمه

پخش بار بهینه (OPF) یکی از ابزارهای اصلی در مطالعات برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت می‌باشد. در برنامه‌ریزی توسعه سیستم‌های قدرت، پخش بار بهینه در مراحل متعدد برنامه‌ریزی به‌عنوان ابزاری برای تکمیل طراحی و همچنین ارزیابی گزینه‌های توسعه مختلف به‌دست آمده از مطالعات برنامه‌ریزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجا که مطالعات برنامه‌ریزی با استفاده از برخی پیش‌بینی‌های احتمالی در خصوص بار، تولید و سایر عوامل انجام می‌گیرد و این پیش‌بینی‌ها عدم قطعیت‌هایی را در خود دارند، پخش بار بهینه مورد استفاده در این مطالعات باید به نحوی فرمول‌بندی شود که امکان مواجهه سیستم با عدم قطعیت‌ها را فراهم کند. بنابراین پخش بار بهینه مورد استفاده در مطالعات برنامه‌ریزی سیستم باید دارای معیارهای قابلیت اطمینان، امنیت و پایداری باشد. با توجه به ایستابودن مطالعات برنامه‌ریزی، این قیود نیز به صورت استاتیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

هدف از پخش بار بهینه تنظیم تمامی انواع متغیرهای کنترل‌پذیر، همچون ولتاژ ژنراتورها، تپ ترانسفورماتورها، خازن‌ها و القاگرهای موازی و دیگر متغیرهای کنترلی می‌باشد به نحوی که ضمن برآوردن مجموعه‌ای از قیود فیزیکی و بهره‌برداری، هزینه تولید و تلفات حداقل شده و سایر

این مقاله در تاریخ ۲۰ شهریور ماه ۱۳۸۶ دریافت و در تاریخ ۱۷ مرداد ماه ۱۳۸۸ بازنگری شد.

سیدجلال سیدشوا، استادیار گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی، (email: jshenava@gmail.com).

حسین سیفی، استاد گروه قدرت، رئیس مرکز ملی مطالعات و برنامه‌ریزی شبکه‌های قدرت، دانشگاه تربیت مدرس، (email: seifi_ho@modares.ac.ir).

محمدصادق سپاسیان، استادیار گروه مهندسی برق، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباس‌پور)، (email: sepasian@pwut.ac.ir).

1. Sequential Unconstrained Optimization

2. Simulated Annealing

2-1 تابع هدف

تابع هدف مورد نظر برای بهینه‌سازی با رابطه زیر داده می‌شود

$$F_T(P_g, Q_c, Q_q, V, \theta, T, a, \alpha, I_{dc}) = \sum_{i \in N_g} C_{gi}(P_{gi}) + \sum_{i \in N_c} C_{ci}(Q_{ci}) + C(loss) + \sum_{i \in N_b} C_{qi}(Q_{qi}) + \lambda_f F_f(infeasibility) + F_s(security - margin) \quad (4)$$

در این رابطه $C_{gi}(P_{gi})$ هزینه تولید توان P_{gi} به وسیله ژنراتور i ، $C_{ci}(Q_{ci})$ هزینه تولید توان راکتیو Q_{ci} به وسیله منبع مولد توان راکتیو i ، $C(loss)$ هزینه تلفات شبکه، $C_{qi}(Q_{qi})$ هزینه نصب جبران‌ساز موازی در باس i ، $F_f(infeasibility)$ تابع بیانگر مقدار ناشدنی بودن مسأله، λ_f ضریب جریمه مربوط و $F_s(security - margin)$ تابع ارزیابی‌کننده میزان حاشیه امنیت شبکه می‌باشد. N_g بیانگر باس‌های ژنراتوری، N_c نشان‌دهنده باس‌های دارای منبع مولد توان راکتیو و N_b بیانگر کلیه باس‌های شبکه (باس مرجع، باس‌های PV و باس‌های PQ) می‌باشد. از آنجا که یکی از اهداف بهینه‌سازی تعریف‌شده با تابع هدف فوق حداقل کردن تلفات حقیقی می‌باشد، فرض می‌شود که هزینه تلفات برابر هزینه همان مقدار تولید توان حقیقی توسط گران‌ترین ژنراتور شبکه باشد. با این ترتیب وزن تلفات در تابع هدف افزایش داده می‌شود. همچنین به دلیل وابستگی اندک بین توان‌های حقیقی و راکتیو، افزایش وزن تلفات در تابع هدف اثر قابل توجهی بر مقدار جبران‌سازهای راکتیو مورد نیاز شبکه نمی‌گذارد. نحوه محاسبه مقدار ناشدنی بودن مسأله و ارزیابی حاشیه پایداری آن در بخش‌های آتی ارائه می‌شود.

2-2 حدود متغیرها و قیود بهره‌برداری

مقدار توان حقیقی تولیدشده به وسیله ژنراتورها و مقدار توان راکتیو تولیدشده به وسیله منابع تولیدکننده توان راکتیو محدود به مقادیر حداقل و حداکثر خود می‌باشند

$$P_{gi}^{\min} \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{\max}, \quad i = 1, \dots, N_g \quad (5)$$

$$Q_{ci}^{\min} \leq Q_{ci} \leq Q_{ci}^{\max}, \quad i = 1, \dots, N_c \quad (6)$$

برای جبران توان راکتیو مورد نیاز شبکه در سطوح بار مختلف، لازم است در برخی از باس‌ها جبران‌سازهای توان راکتیو (راکتور یا خازن) موازی نصب شوند. در جبران‌سازهای قطع و وصل‌شونده مقدار این منابع توان راکتیو، مقادیر گسسته می‌باشند و در حین بهینه‌سازی یک مقدار حداقل و یک مقدار حداکثر برای این جبران‌سازها در نظر گرفته می‌شود

$$Q_i^{\min} \leq Q_i \leq Q_i^{\max}, \quad i = 1, \dots, N_b \quad (7)$$

ولتاژ در باس‌های شبکه به یک مقدار حداقل و یک مقدار حداکثر مقید می‌باشد. لازم به ذکر است که مقدار ولتاژ در باس‌ها، تابعی از تولید یا مصرف در آن باس می‌باشد

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}, \quad i = 1, \dots, N_b \quad (8)$$

توان مختلط جاری‌شده در مدارهای AC شبکه، به حدود مجاز مدار محدود می‌باشد. در خطوط AC این حدود بسته به مشخصات مدار (طول خط، نوع خط، سطح ولتاژ و سایر مشخصات فنی) ناشی از حدود حرارتی، پایداری ولتاژ یا پایداری زاویه‌ای می‌باشند

$$S_{ij} \leq S_{ij}^{\max}, \quad i, j = 1, \dots, N_b, \quad i \neq j \quad (9)$$

[9] و [10]، برنامه‌ریزی تکاملی (EP) [11] و [12]، بهینه‌سازی کولنی مورچگان (ACO) [13]، تکامل تفاضلی (DE) [14] و بهینه‌سازی بر مبنای تئوری ذرات¹ (PSO) [15]، استفاده از الگوریتم ژنی و صورت‌های مختلف آن به دلایل راحتی کاربرد، قابلیت حل مسائل بهینه‌سازی بسیار غیر خطی و ترکیبی عدد صحیح و توانایی آن در یافتن بهینه سراسری در مقالات و در صنعت بسیار گسترده می‌باشد. اما تحقیقات جدید نشان داده است که GA در حل مسائلی با متغیرهای با همبستگی بالا دچار مشکل می‌شود [16]. از طرف دیگر روش‌های DE و PSO این مشکل را ندارند. روش DE در بیشتر موارد بهینه مناسب‌تری نسبت به دو روش دیگر دارد ولی نسبت به PSO زمان محاسباتی بیشتری را لازم داشته و در حل مسائل نوبت‌دار دچار مشکل می‌شود [17] و [18].

مطالعات نشان داده است که سیستم‌های انتقال جریان مستقیم ولتاژ بالا (HVDC) می‌توانند اثرات هماهنگ‌کننده در توزیع توان حقیقی و راکتیو شبکه AC مجاور داشته باشند و بنابراین حضور این اتصالات می‌تواند باعث بهبود بهره‌برداری اقتصادی از شبکه شود [19]. به علاوه با توجه به کنترل‌پذیری سریع و بالای این سیستم‌ها، از آنها می‌توان برای افزایش قابلیت اطمینان و حاشیه‌های امنیت در سیستم استفاده کرد [20].

در این مقاله یک روش ترکیبی PSO با DE برای حل مسأله پخش بار بهینه در شبکه‌های انتقال ترکیبی AC/HVDC ارائه شده است. هدف از پخش بار بهینه ارائه‌شده، تنظیم توان حقیقی ژنراتورها، توان راکتیو باس‌های کنترل ولتاژ، نقطه تنظیم ترانسفورماتورهای تپ‌دار، ولتاژ در باس‌های کنترل ولتاژ و پارامترهای اتصالات HVDC موجود در شبکه انتقال به شکلی است که ضمن حداقل‌سازی هزینه بهره‌برداری از مولدها، تلفات و هزینه جبران‌سازهای موازی، معیارهای قابلیت اطمینان برآورده شده و حداکثر حاشیه امنیت برای شبکه فراهم آید.

در ادامه مطالب در بخش 2 فرمول‌بندی پخش بار بهینه، در بخش 3 بهینه‌سازی با روش ابتکاری ترکیبی DEPSO، در بخش 4 پخش بار بهینه به روش DEPSO و در بخش 5 مطالعات موردی آورده شده و در نهایت بخش 6 به نتیجه‌گیری اختصاص یافته است.

2- فرمول‌بندی پخش بار بهینه

مسأله پخش بار بهینه در یک شبکه انتقال HVAC/HVDC را می‌توان بر مبنای روابط زیر بیان نمود

$$\text{Minimize } F_T(P_g, Q_c, Q_q, V, \theta, T, a, \alpha, I_{dc}) \quad (1)$$

$$\text{Subject to: } h(P_g, Q_c, Q_q, V, \theta, T, V_{dc}, a, \alpha, I_{dc}) = 0 \quad (2)$$

$$g(P_g, Q_c, Q_q, V, \theta, T, V_{dc}, a, \alpha, I_{dc}) \leq 0 \quad (3)$$

در روابط فوق $F_T(\cdot)$ بیانگر تابع هدفی است که باید بهینه شود و $h(\cdot)$ بیانگر معادلات پخش بار و $g(\cdot)$ نشان‌دهنده حدود متغیرهای حالت و قیود بهره‌برداری می‌باشند. $P_g, Q_c, Q_q, V, \theta, T, V_{dc}, a, \alpha, I_{dc}$ به ترتیب تولید توان حقیقی ژنراتورها، تولید منابع مولد توان راکتیو، مقدار جبران‌ساز موازی نصب‌شده در باس‌ها، دامنه ولتاژ، زاویه فاز باس‌ها و تنظیم ترانسفورماتورهای تپ‌دار می‌باشند. همچنین $V_{dc}, a, \alpha, I_{dc}$ به ترتیب ولتاژ، تنظیم تپ ترانسفورماتور میدل، زاویه آتش میدل و جریان در اتصالات HVDC می‌باشند.

$$V_{dR} = V_{dl} + R_d I_d \quad (15)$$

در روابط فوق زیرنویس C بیانگر مبدل می‌باشد و در سمت یکسوساز زیرنویس R و در سمت اینورتر زیرنویس I جایگزین آن می‌شود (شکل ۱). V_{dC} , V_{dR} , I_d , n_{pC} , a_c , X_{cC} و R_d به ترتیب اندازه ولتاژ در سمت DC مبدل مربوط، اندازه ولتاژ مؤثر خط به خط در سمت AC، جریان مستقیم، تعداد پل‌های متصل سری و تنظیم تپ ترانسفورماتور مبدل، راکتانس کموتاسیون و مقاومت خط DC می‌باشند. S_{dC} , P_{dC} و Q_{dC} به ترتیب توان ظاهری، توان حقیقی و توان راکتیو در ایستگاه مبدلی می‌باشند. α_R زاویه روشن شدن برای عملکرد یکسوسازی و α_I زاویه خاموش شدن در عملکرد اینورتری می‌باشد. در (۱۵) اتصال HVDC به صورت یک قطبی در نظر گرفته شده است. اگر اتصال دوقطبی با برگشت فلزی باشد، ضریب مقاوت ۲ خواهد بود. در صورتی که اتصال HVDC یک اتصال چندپایانه‌ای باشد، با تغییراتی اندک باز هم می‌توان از روابط فوق استفاده کرد. در این حالت با توجه به نوع اتصال (موازی شعاعی یا حلقوی و یا سری) روابط مداری اتصال به روابط فوق اضافه خواهند شد و با توجه به نوع عملکرد هر پایانه (یکسوسازی یا اینورتری)، از معادلات مناسب آن عملکرد استفاده می‌شود.

با توجه به (۱۱) تا (۱۵)، قیود زیر ناشی از حضور اتصالات HVDC به مسأله پخش بار بهینه اضافه خواهند شد

$$P_i(\theta, V) - P_{gi} + k_{pdi} P_{di} + P_{Di} = 0, \quad i = 1, \dots, N_b \quad (16)$$

$$Q_i(\theta, V) - Q_{ci} + k_{qdi} Q_{di} + Q_{Di} = 0, \quad i = 1, \dots, N_b \quad (17)$$

$$V_{dC} - \left(\frac{\sqrt{2}}{\pi} n_{pC} a_c V_{tC} \cos \alpha_C - \frac{3}{\pi} X_{cC} n_{pC} I_d \right) = 0 \quad (18)$$

$$S_{dC} - \frac{\sqrt{2}}{\pi} a_c V_{tC} n_{pC} I_d = 0, \quad C = R \text{ or } I \quad (19)$$

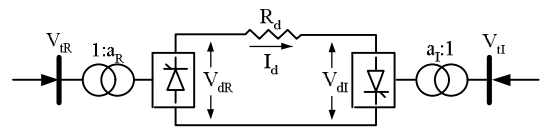
روابط (۱۶) و (۱۷) نشان‌دهنده معادلات تعادل توان در باس‌های شبکه می‌باشند. P_{Di} و Q_{Di} مصرف توانهای حقیقی و راکتیو در باس i را نشان می‌دهند. ضریب k_{pdi} در باس‌هایی که مبدل یکسوساز به آنها متصل است +۱، در باس‌هایی که مبدل اینورتر به آنها متصل می‌باشد -۱ و ضریب k_{qdi} در هر دو مورد +۱ می‌باشد. اگر مبدلی به باس i متصل نباشد هر دوی این ضرایب صفر خواهند بود.

۳- بهینه‌سازی با روش ابتکاری ترکیبی DEPSO

برای بهینه‌سازی تابع هدف ارائه شده در (۱) به همراه قیود تساوی (۲) و نامساوی (۳) از یک روش ابتکاری ترکیبی استفاده می‌کنیم. این روش از ترکیب روش PSO با روش DE حاصل شده است.

۳-۱ الگوریتم PSO

الگوریتم PSO یک سیستم بهینه‌سازی اجتماعی و چندعاملی است که از شبیه‌سازی رفتار اجتماعی پرندگان الهام گرفته شده است. در ابتدا این الگوریتم به منظور کشف الگوهای حاکم بر پرواز همزمان پرندگان و تغییر ناگهانی مسیر آنها و تغییر شکل بهینه دسته به کار گرفته شد. هر عامل، یک عضو از مجموعه کل دسته می‌باشد که در فضای D بعدی S بر مبنای تجربیات و دانش شخصی خودش و همسایگانش پرواز می‌کند. بنابراین موقعیت دیگر عضوهای دسته بر چگونگی جستجوی یک عضو اثر می‌گذارد. نتیجه مدل‌سازی این رفتار اجتماعی، فرآیند جستجویی است که عضوها به سمت نواحی موفق حرکت می‌کنند. عضوها در دسته از



شکل ۱: نمایش ساده‌ای از انتقال HVDC.

برای ترانسفورماتورهای تپ‌دار، تنظیم تپ کمیته گسسته است که مابین یک مقدار حداقل و یک مقدار حداکثر می‌باشد

$$T_i^{\min} \leq T_i \leq T_i^{\max}, \quad i = 1, \dots, N_t \quad (10)$$

در رابط فوق N_t بیانگر ترانسفورماتورهای دارای تغییردهنده تپ می‌باشد.

۳-۲ مدل‌سازی اتصالات HVDC

به صورت معمول اتصالات HVDC برای انتقال توان در مسیرهای طولانی هوایی، کابلی زیرزمینی یا زیرآبی و اتصال شبکه‌های غیر سنکرون با هم مورد استفاده قرار می‌گیرند. کنترل‌پذیری انتقال توان حقیقی در سیستم‌های HVDC و امکان تنظیم توان راکتیو در ایستگاه‌های مبدلی به خصوص در سیستم‌های VSC-HVDC در کنار قابلیت این سیستم‌ها در کاهش نوسانات توان، افزایش پایداری ولتاژ و بهبود پایداری گذرای سیستم‌های قدرت، اتصالات HVDC را به عنوان یکی از گزینه‌های قابل توجه در برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های انتقال مطرح نموده است. همچنین سیستم‌های HVDC می‌توانند در مدیریت سیلان توان حقیقی در حالت کار عادی شبکه انتقال قدرت یا در وضعیت‌های پس از پیشامد آن نقش ایفا نمایند. این امر با تنظیم میزان توان انتقالی از اتصال HVDC در جهت یا در خلاف جهت مسیرهای بحرانی شبکه فراهم می‌شود. به علاوه این سیستم‌ها قادرند در بهبود مسائل ولتاژ در شبکه نقش حمایت‌کننده داشته باشند. این امر با کنترل سیلان توان حقیقی به صورت غیر مستقیم و یا از طریق کنترل‌های توان راکتیو محلی در ایستگاه‌های مبدلی میسر می‌شود. برای در نظر گرفتن این اتصالات در پخش بار بهینه، فرضیات زیر را برای حالت کار مانای اتصال در نظر می‌گیریم:

- شکل موج ولتاژهای AC در ترمینال‌های مبدل‌ها سینوسی با دامنه و فرکانس ثابت می‌باشد و ولتاژها و جریان‌های سه‌فاز متعادلند.
- تمامی ولتاژها و جریان‌های هارمونیک تولیدشده به وسیله مبدل‌ها، در ایستگاه‌های مبدلی فیلتر شده و در سمت AC ظاهر نمی‌شوند.
- از مقاومت و امپدانس مغناطیس‌کننده برای ترانسفورماتورهای مبدل‌ها صرف نظر می‌شود.
- شیرهای مبدل‌ها، ایده‌آل می‌باشند. بنابراین از تلفات توان حقیقی و افت ولتاژ در آنها چشم‌پوشی می‌شود.
- ولتاژ و جریان DC فاقد موجک می‌باشند.
- در یک مبدل n_p پالس، شیرها در زاویه $2\pi/n_p$ آتش می‌شوند و از هم‌پوشانی در زمان آتش آنها صرف نظر می‌شود.

با فرضیات فوق معادلات اساسی در یک اتصال دوپایانه‌ای HVDC در حالت کار مانا عبارتند از [۲۱]

$$V_{dC} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} n_{pC} a_c V_{tC} \cos \alpha_C - \frac{3}{\pi} X_{cC} n_{pC} I_d \quad (11)$$

$$P_{dC} = V_{dC} I_d \quad (12)$$

$$S_{dC} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} a_c V_{tC} n_{pC} I_d \quad (13)$$

$$Q_{dC} = \sqrt{S_{dC}^2 - P_{dC}^2} \quad (14)$$

$$u_{j,i}^{k+1} = \begin{cases} p_{j,i}^k + K.(p_{j,r_1}^k - p_{j,i}^k) + F.(p_{j,r_2}^k - p_{j,r_3}^k), \\ \text{if } (rand_{j,i}[0,1]) < CR \vee j = j_{rand} \\ p_{j,i}^k, \text{ otherwise} \end{cases} \quad (24)$$

check bounds

Select:

$$\bar{p}_i^{k+1} = \begin{cases} \bar{u}_i^{k+1}, \text{ if } F_T(\bar{u}_i^{k+1}) \leq F_T(\bar{p}_i^k) \\ \bar{p}_i^k, \text{ otherwise} \end{cases} \quad (25)$$

در روابط فوق N_p تعداد جمعیت (عضوها)، D تعداد متغیرها و K و F به ترتیب ضرایب ترکیب و جهش می‌باشند. CR درصدی از جمعیت است که روش تکامل تفاضلی بر آنها اعمال می‌شود. اگرچه رابطه ترکیب و جهش ارائه شده در روش تکامل تفاضلی مشابه با دیگر روش‌های تکاملی می‌باشد، اما تفاوت‌هایی نیز بین آنها وجود دارد. ترکیب ارائه شده در این روش، جهت جستجو را در عضوی که ترکیب بر آن اعمال می‌شود، در جهت یک محور انتخاب شده به صورت تصادفی هدایت می‌کند. r_1 محور مورد نظر برای حرکت را تعیین می‌کند و K معین می‌کند که حرکت مابین دو نقطه p_{j,r_1}^k و p_{j,r_2}^k خواهد بود ($K < 0$) یا فراتر از آن دو نقطه ($K > 0$). برخلاف رابطه ترکیب، در رابطه جهش مرجعی برای تعیین نمی‌شود. در روش تکامل تفاضلی، F مقداری بین صفر و ۲ انتخاب شده، طی فرآیند بهینه‌سازی ثابت نگه داشته می‌شود.

۴- پخش بار بهینه به روش DEPSO

در مطالعات برنامه‌ریزی توسعه یک شبکه انتقال، پس از به دست آوردن طرح‌های توسعه بر مبنای فرمول‌بندی پخش بار DC، عملکرد این طرح‌ها با استفاده از فرمول‌بندی پخش بار AC مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در صورت نیاز برای عملکرد قابل قبول این طرح‌ها، تجهیزات جدیدی از جمله جبران‌سازهای موازی به آنها اضافه می‌شود. از آنجایی که اصولاً بهره‌برداری از هر شبکه‌ای در شرایط اقتصادی صورت می‌گیرد، ارزیابی و افزودن تجهیزات جدید باید به نحوی باشد که علاوه بر داشتن حداقل هزینه بهره‌برداری، هزینه تأسیسات جدید نیز حداقل باشد. در عین حال با توجه به وجود عدم قطعیت در پارامترهایی که برنامه‌ریزی بر مبنای آنها انجام یافته است، لازم است شبکه از حاشیه امنیت کافی برخوردار باشد. برای برآوردن همه این منظورها از یک فرمول‌بندی پخش بار بهینه بر مبنای روش ابتکاری پیشنهاد شده در بخش ۳ و با فرمول‌بندی ارائه شده در بخش ۲ استفاده شده است. متغیرهای مسأله برای مدارهای AC عبارتند از: مقدار تولید توان حقیقی در ژنراتورها (P_{gi})، مقدار تولید توان راکتیو در منابع مولد توان راکتیو (Q_{ci})، مقدار جبران‌ساز موازی نصب شده در باس‌های بدون مولد توان راکتیو (Q_{qi})، تنظیم تپ ترانسفورماتورها (T_{ii}) و نقطه تنظیم ولتاژ در باس‌های کنترل ولتاژ (V_{ci}). حدود این متغیرها از قیود ارائه شده در (۵) تا (۸) و (۱۰) به دست می‌آیند. برای اتصالات HVDC، جریان مستقیم (I_d)، تنظیم تپ ترانسفورماتورهای مبدل‌ها (a_r و a_l) و با توجه به مُد کاری مورد نظر برای اتصال، ولتاژ در سمت DC مبدل‌ها (V_{dR} یا V_{dL}) و زاویه روشن شدن در سمت یکسوساز (α_r) یا زاویه خاموش شدن در سمت اینورتر (α_l) متغیرهای مورد نظر می‌باشند. فرض می‌شود که مشخصات فنی و حدود متغیرهای اتصال HVDC موجودند. جمعیت اولیه به صورت تصادفی با توزیع نرمال مابین مقادیر حداقل و حداکثر متغیرها تولید می‌شوند. هزینه‌های تولید و هزینه جبران‌سازهای موازی با توجه به مشخصات فنی مولدها و

یکدیگر می‌آموزند و بر مبنای دانش به دست آمده به سمت بهترین همسایگی خود حرکت می‌کنند. اساس کار PSO بر این مطلب استوار است که در هر لحظه، یک عضو مکان خود را در فضای جستجو با توجه به بهترین مکانی که تاکنون در آن قرار گرفته است و بهترین مکانی که در کل دسته وجود دارد، تنظیم می‌کند. سرعت حرکت و مکان i امین عضو با $\vec{v}_i = (v_{v,i}, \dots, v_{j,i}, \dots, v_{D,i})$ و $\vec{x}_i = (x_{v,i}, \dots, x_{j,i}, \dots, x_{D,i})$ بیان می‌شود. بهترین مکان قبلی هر عضو، ذخیره شده و با $\vec{p}_i = (p_{v,i}, \dots, p_{j,i}, \dots, p_{D,i})$ نشان داده می‌شود و مجموعه حاصل $pbest$ نامیده شده است. بهترین عضو $pbest$ با \vec{p}_g نشان داده شده و $gbest$ نامیده می‌شود. در هر گام، حرکت هر عضو از دسته با روابط زیر تعیین می‌شوند

$$v_{j,i}^{k+1} = w v_{j,i}^k + c_1 \cdot rand.(p_{j,i}^k - x_{j,i}^k) \quad (20)$$

$$+ c_2 \cdot rand.(p_{j,g}^k - x_{j,i}^k)$$

$$x_{j,i}^{k+1} = x_{j,i}^k + v_{j,i}^{k+1} \quad (21)$$

که w وزن لختی، c_1 و c_2 ثابت‌های شتاب‌دهنده و $rand$ مقداری تصادفی بین صفر و یک می‌باشد. پس از محاسبه $x_{j,i}^{k+1}$ و $pbest$ و $gbest$ به روز رسانی می‌شوند. تحقیقات متعدد نشان داده است که عضوها با امواج سینوسی متفاوتی نوسان می‌کنند و به سرعت همگرا می‌شوند؛ اما ممکن است به یک مقدار غیر بهینه یا لااقل به یک بهینه محلی همگرا شوند. احتمال این امر به خصوص وقتی که w مقدار کوچکی داشته باشد، بسیار بالا می‌باشد [۱۶]. در مراحل بهینه‌سازی $pbest$ یا $gbest$ در برخی از مراحل تکامل نباید بسیار به هم نزدیک بشوند تا باعث غیر فعال شدن برخی از عضوها شوند. بدین ترتیب حفظ تنوع در مراحل تکامل بسیار مهم می‌باشد. در این مقاله برای داشتن تنوع لازم در همه مراحل تکامل، از روش PSO ترکیب یافته با روش DE که DEPSO نامیده می‌شود، استفاده شده است.

۳- روش تکامل تفاضلی (DE)

روش تکامل تفاضلی، گونه‌ای از الگوریتم‌های تکاملی بسیار کارا برای مواجعه با انواع متغیرهای گسسته و به خصوص متغیرهای پیوسته می‌باشد. از مزایای این روش سرعت، سادگی استفاده و تنظیم، کارایی عالی آن در یافتن بهینه سراسری، ذاتاً موازی، با دقت بالا، بدون نیاز به مرتب‌سازی یا ضرب ماتریسی، امکان استفاده ترکیبی آن با روش‌های دیگر بهینه‌سازی و مزایای فراوان دیگر است [۲۲]. روش تکامل تفاضلی، هدایت فرآیند جستجو در جهت محورهای مختصات متغیرهای بهینه‌سازی و در صورت لزوم تغییر راستای محورهای مختصات در جهتی مناسب می‌باشد به طوری که یافتن بهینه سراسری تسریع شود. در روش ارائه شده در این مقاله تکامل تفاضلی با اعمال ساز و کار جهش هم‌زمان با ترکیب در $pbest$ تنوع در اعضای آن را در مراحل مختلف بهینه‌سازی حفظ کرده و یافتن بهینه سراسری در PSO تضمین می‌شود. روش تکامل تفاضلی استفاده شده به صورت خلاصه به شرح زیر می‌باشد

$$\forall i \leq N_p$$

$$r_1, r_2, r_3 \in \{1, 2, \dots, N_p\}, \text{ randomly selected, except } : r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq i \quad (22)$$

$$j_{rand} \in \{1, 2, \dots, D\}, \text{ randomly selected once each } i \quad (23)$$

$$\forall j \leq D$$

$$F_{f,VI} = \begin{cases} \frac{V_{dl}^{\min} - V_{dl}}{V_{dl}^{\min}}, & \text{if } V_{dl} < V_{dl}^{\min} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (31)$$

همچنین افزایش جریان مستقیم از حد مجاز خود به‌عنوان یکی دیگر از ایرادهای این اتصالات در نظر گرفته می‌شود

$$F_{f,Id} = \begin{cases} \frac{I_d - I_d^{\max}}{I_d^{\max}}, & \text{if } I_d > I_d^{\max} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (32)$$

بدین ترتیب تابع ناشدنی بودن با رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$F_f(\text{infeasibility}) = F_{f,\text{success}} + F_{f,\text{Pslack}} + F_{f,\text{Qslack}} + F_{f,V} + F_{f,L} + F_{f,VI} + F_{f,Id} \quad (33)$$

ضریب جریمه λ_f برای تابع ناشدنی بودن که در (۴) به‌کار رفته، به‌منظور تنظیم وزن عواملی است که منجر به ناشدنی بودن یک پاسخ می‌شوند. افزایش λ_f باعث می‌شود تا پاسخ‌های ناشدنی در مراحل اولیه DEPSO حذف شوند. این امر منجر به افزایش همگرایی روش می‌گردد ولی می‌تواند باعث به دام افتادن در یک بهینه محلی شود. برای کاهش اثر λ_f در فرایند بهینه‌سازی، در (۲۷) تا (۳۲) هر کدام از عواملی که باعث ناشدنی بودن می‌شوند به‌صورت نرمالیزه تعریف شده‌اند.

۲- محاسبه تابع $F_s(\text{security-margin})$

تابع $F_s(\text{security-margin})$ معیاری از حاشیه اطمینان هر عضو از دسته را ارائه می‌دهد. زمانی که پخش بار بهینه به‌صورت غیر بالادرنگ استفاده می‌شود، معیارهای استاتیک برای ارزیابی قابلیت اطمینان و حاشیه امنیت مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۳]. در مطالعات برنامه‌ریزی و طراحی یک شبکه برای این که شبکه طراحی شده به هنگام مواجهه با عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای طراحی، همانند عدم قطعیت در پیش‌بینی بار، تولید و سایر موارد حاشیه اطمینان کافی را داشته باشد، فرایند پخش بار بهینه باید به‌نحوی اجرا شود که در ضمن حداقل‌سازی هزینه‌ها، حاشیه اطمینان شبکه حداکثر شود. حداکثرسازی حاشیه اطمینان برای حالت ایستای ولتاژهای باس‌ها و اختلاف زوایای فازها در خطوط، تنظیم تپ ترانسفورماتورها، میزان تولید واحدهای تولیدی و پارامترهای اتصال HVDC اعمال می‌شود. برای این که همزمان با حداقل‌سازی هزینه تولید و تلفات، شبکه دارای پروفیل ولتاژ مسطحی باشد، از تابع $F_{s,V}$ استفاده شده است

$$F_{s,V} = \sum_{i=1}^{N_b} \sqrt{|V_i^y - 1|} \quad (34)$$

در رابطه فوق از نرم دو به‌عنوان معیاری مرسوم برای ارزیابی وضعیت پروفیل ولتاژ استفاده شده که در آن ولتاژها بر حسب پریونیت می‌باشند.

برای داشتن حاشیه امنیت مناسب برای پایداری زاویه‌ای استاتیک، حداکثر اختلاف زوایای بین باس‌ها را حداقل می‌سازد

$$F_{s,\theta} = \max(|\theta_i - \theta_j|), \quad i, j = 1, \dots, N_b, \quad i \neq j \quad (35)$$

منابع تولید توان‌های حقیقی و راکتیو باید به‌نحوی تنظیم شوند که در صورت مواجهه با عدم قطعیت‌ها بدون رسیدن به حدود مجاز خود امکان تغییرات در تولید را داشته باشند. به‌همین منظور از تابع $F_{s,Pg}$ برای توان

جبران‌سازها محاسبه می‌شوند. تلفات شبکه از روی محاسبات پخش بار به‌دست می‌آید. توابع بیان‌کننده مقدار ناشدنی بودن هر عضو و حاشیه امنیت آن بر مبنای مباحث ارائه‌شده در بخش‌های بعدی محاسبه می‌شوند.

۱- محاسبه تابع $F_f(\text{infeasibility})$

تابع $F_f(\text{infeasibility})$ معیاری از ناشدنی بودن یک عضو از دسته را ارائه می‌دهد. زمانی یک عضو ناشدنی می‌شود که قیود تساوی یا نامساوی مسأله پخش بار بهینه برآورد نشوند. در این مقاله ناشدنی بودن بر مبنای روابط زیر محاسبه می‌شود.

در صورتی که قیود تساوی (۱۶) تا (۱۹) ناشی از حل پخش بار برقرار نشوند یا پخش بار همگرا نشود، مسأله ناشدنی می‌باشد. در این حالت یک مقدار ثابت بزرگ به‌عنوان ناشدنی بودن مسأله در نظر گرفته می‌شود

$$F_{f,\text{success}} = K_{\text{success}} \quad (26)$$

توان‌های حقیقی و راکتیو تولیدشده در باس مرجع حاصل جمع مصرف و تلفات این توان‌ها می‌باشند و پس از حل پخش بار به‌دست می‌آیند و بنابراین ممکن است از حدود مجاز خود فراتر روند. تخطی از حدود به صورت زیر محاسبه و به‌عنوان ناشدنی بودن مسأله در نظر گرفته می‌شود

$$F_{f,\text{Pslack}} = \begin{cases} \frac{P_{\text{slack}} - P_{\text{slack}}^{\max}}{P_{\text{slack}}^{\max}}, & \text{if } P_{\text{slack}} > P_{\text{slack}}^{\max} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (27)$$

$$F_{f,\text{Qslack}} = \begin{cases} \frac{Q_{\text{slack}} - Q_{\text{slack}}^{\max}}{Q_{\text{slack}}^{\max}}, & \text{if } Q_{\text{slack}} > Q_{\text{slack}}^{\max} \\ \frac{Q_{\text{slack}}^{\min} - Q_{\text{slack}}}{Q_{\text{slack}}^{\min}}, & \text{if } Q_{\text{slack}} < Q_{\text{slack}}^{\min} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (28)$$

اگر ولتاژها در باس‌های PQ از حدود مجاز خود فراتر روند، به‌عنوان ناشدنی بودن مسأله به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند

$$F_{f,V} = \begin{cases} \frac{V_i - V_i^{\max}}{V_i^{\max}}, & \text{if } V_i > V_i^{\max} \\ \frac{V_i^{\min} - V_i}{V_i^{\min}}, & \text{if } V_i < V_i^{\min}, \quad i = 1, \dots, N_b \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (29)$$

تخطی سیلان توان در خطوط، یکی دیگر از مواردی است که باعث ناشدنی بودن مسأله شده و با رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$F_{f,L} = \begin{cases} \frac{S_{ij} - S_{ij}^{\max}}{S_{ij}^{\max}}, & \text{if } S_{ij} > S_{ij}^{\max}, \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad i, j = 1, \dots, N_b, \quad j \neq i \quad (30)$$

مقدار نامناسب پارامترهای اتصالات HVDC نیز می‌تواند باعث عملکرد نامناسب این اتصالات یا تأثیر نامناسب آنها بر شبکه شوند. مقدار ولتاژ پایین در مبدل‌ها، به‌خصوص در سمت اینورتر می‌تواند باعث کم‌تاسیون ناقص در آنها شود

جدول ۱: ضرایب هزینه تولید ژنراتورها برای شبکه ۳۰ باس [۲۴].

Generators	Bus number	Cost coefficients		
		α_i (\$/h)	β_i (\$/MWh)	γ_i (\$/MWh)
G1	۱	۰.۰	۲,۰۰۰	۰.۰۰۳۷۵
G2	۲	۰.۰	۱,۷۵۰	۰.۰۱۷۵۰
G3	۵	۰.۰	۱,۰۰۰	۰.۰۶۲۵۰
G4	۸	۰.۰	۳,۲۵۰	۰.۰۰۸۳۴
G5	۱۱	۰.۰	۳,۰۰۰	۰.۰۲۵۰۰
G6	۱۳	۰.۰	۳,۰۰۰	۰.۰۲۵۰۰

که (۳۹) برای تأمین بازه تغییرات مناسب در زاویه آتش، (۴۰) برای تأمین دامنه تغییرات کافی در تنظیم تپ ترانسفورماتورهای میدلی، (۴۱) برای تأمین بازه تغییرات لازم در دامنه ولتاژ باس اینورتور و (۴۲) برای تأمین دامنه تغییرات در جریان اتصال استفاده شده است.

بدین ترتیب تابع F_s (security-margin) با رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$F_s (\text{security} - \text{margin}) = \lambda_{sv} F_{s,v} + \lambda_{s\theta} F_{s,\theta} + \lambda_{spg} F_{s,pg} + \lambda_{sqc} F_{s,qc} + \lambda_{st} F_{s,t} + \lambda_{sar} F_{s,sar} + \lambda_{sac} F_{s,sac} + \lambda_{svdl} F_{s,vdl} + \lambda_{sld} F_{s,ld} \quad (43)$$

در رابطه فوق ضرایب λ_s ، ضرایبی هستند که با توجه به اهمیت حاشیه امنیت متغیر مربوط تعیین می‌شوند. در صورتی که همه متغیرها به صورت یکسان در حاشیه امنیت دیده شوند، این ضرایب به نحوی انتخاب می‌شوند که بیانگر اهمیت اقتصادی تابع مربوط به خود باشند.

۵- مطالعات موردی

برای این که روش پیشنهادی را بتوان با دیگر روش‌های ارائه شده در مقالات مقایسه نمود، شبکه ۳۰ باس IEEE مورد مطالعه قرار گرفته است. اطلاعات این شبکه را می‌توان در [۲۳] و [۲۴] پیدا کرد. برای برقراری امکان مقایسه از تابع هزینه زیر برای محاسبه هزینه تولید ژنراتورها استفاده شده است

$$F_i(P_{gi}) = \alpha_i + \beta_i P_{gi} + \gamma_i P_{gi}^2 \quad \$/\text{MWh} \quad (44)$$

بدیهی است که بر مبنای روش پیشنهادی از هر نوع تابع هزینه (پیوسته و ناپیوسته) می‌توان استفاده کرد. در جدول ۱ ضرایب هزینه واحدهای تولیدی ارائه شده است.

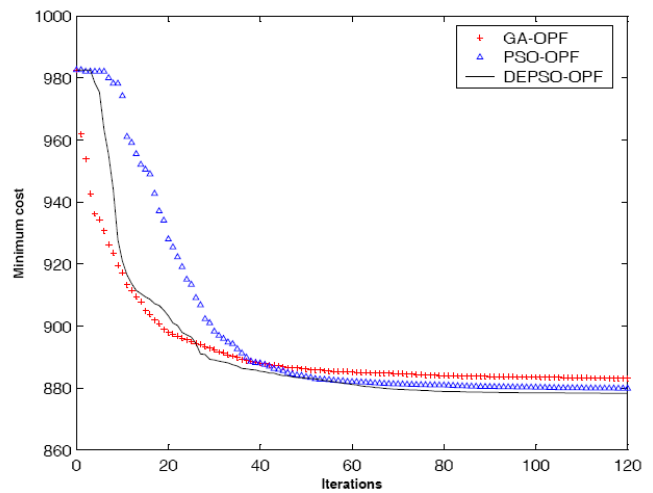
لازم به ذکر است که در مطالعات حاضر، هزینه تولید برای منابع توان راکتیو برابر صفر در نظر گرفته شده است.

در اعمال الگوریتم DEPSO از پارامترهای زیر استفاده کرده‌ایم

$$N_p = 100, w = 0.6, c_1 = c_2 = 2.05, F = 0.3, K = 0.5, CR = 1, \max \text{ iteration} = 120$$

در جدول ۲ نتایج اعمال روش‌های مختلف بر مسأله پخش بار بهینه در بار پیک نشان داده شده است. در این جدول برای مقایسه روش‌های مختلف با نتایج ارائه شده در سایر مراجع، در اعمال روش‌های PSO و DEPSO از حاشیه امنیت صرف نظر شده است.

در جدول ۳ نتایج حاصل از بهینه‌سازی شامل حداقل‌سازی هزینه تولید، حداقل‌سازی تلفات و حداکثرسازی حاشیه امنیت شبکه، با سه روش GA، PSO و DEPSO ارائه شده و در شکل ۲ همگرایی این سه روش برای حل پخش بار بهینه با هم مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. برای به دست آوردن این نتایج تعداد چهل جمعیت اولیه تصادفی متفاوت ساخته شده،



شکل ۲: مقایسه همگرایی الگوریتم‌های مختلف تکاملی برای OPF.

حقیقی و از تابع $F_{s,qc}$ برای توان راکتیو استفاده شده است

$$F_{s,pg} = \sum_{i=1}^{N_g} \delta_i \cdot \frac{\sqrt{P_{gi}^2 - \bar{P}_{gi}^2}}{P_{gi}^{\max}}, \quad \delta_i = \begin{cases} 1 & \text{if } P_{gi} > \bar{P}_{gi}, \bar{P}_{gi} = sr \cdot P_{gi}^{\max} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (36)$$

$$F_{s,qc} = \sum_{i=1}^{N_c} \frac{\sqrt{Q_{ci}^2 - \tilde{Q}_{ci}^2}}{\tilde{Q}_{ci}}, \quad \tilde{Q}_{ci} = \frac{Q_{ci}^{\max} + Q_{ci}^{\min}}{2} \quad (37)$$

در (۳۶) ضریب sr معیاری از ذخیره چرخان مورد نظر برای سیستم می‌باشد. ذخیره چرخان برای برآوردن معیارهای قابلیت اطمینان واحدهای تولیدی در نظر گرفته می‌شود و فرض شده است که ذخیره چرخان به صورت درصدی از حداکثر ظرفیت واحدهای در حال تولید در نظر گرفته می‌شود.

به علاوه لازم است تا تنظیم تپ ترانسفورماتورها به نحوی تنظیم شود که حداکثر بازه برای مواجهه با تغییرات احتمالی در وضعیت شبکه موجود باشد. به همین منظور از تابع $F_{s,t}$ استفاده شده است

$$F_{s,t} = \sum_{i=1}^{N_t} \sqrt{|T_i^2 - 1|} \quad (38)$$

برای اتصال HVDC با فرض عملکرد این اتصال در مُد یک (کنترل زاویه آتش ثابت در پایانه اینورتر و کنترل جریان ثابت در پایانه یکسوساز)، حاشیه‌های اطمینان با روابط زیر محاسبه می‌شوند

$$F_{s,sar} = \sqrt{|\alpha_R^2 - \tilde{\alpha}_R^2|}, \quad \tilde{\alpha}_R = \frac{\alpha_R^{\max} + \alpha_R^{\min}}{2} \quad (39)$$

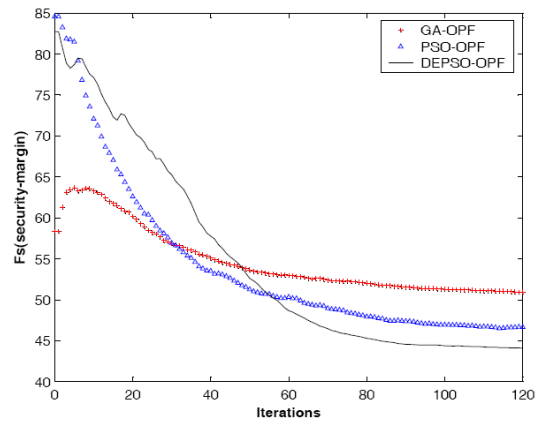
$$F_{s,sac} = \sum_{C=R,I} \sqrt{|a_C^2 - \tilde{a}_C^2|}, \quad \tilde{a}_C = \frac{a_C^{\max} + a_C^{\min}}{2} \quad (40)$$

$$F_{s,vdl} = \frac{\sqrt{|V_{dl}^2 - V_{dc, rated}^2|}}{V_{dc, rated}} \quad (41)$$

$$F_{s,ld} = \begin{cases} \frac{\sqrt{|I_d^2 - I_{dc, rated}^2|}}{I_{dc, rated}}, & \text{if } I_d > I_{dc, rated} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (42)$$

جدول ۲: مقایسه روش‌های مختلف OPF.

OPF approach	Min. generation cost (\$/h)	Loss (MW)
Steepest descent [۲۴]	۸۰۳,۵۴۹۶	۹,۸۰۸
GA [۲۴]	۸۰۳,۹۱۵۸	۹,۶۵۵
EP [۲۴]	۸۰۳,۵۷۱۹	۹,۷۱۳
PSO	۸۰۳,۷۱۸۸	۸,۵۵۴
DEPSO	۸۰۳,۲۸۸۷	۸,۹۰۷



شکل ۳: تغییرات تابع حاشیه پایداری در حین حل OPF در روش‌های مختلف.

جدول ۳: مقایسه روش‌های مختلف OPF با در نظر گرفتن حاشیه پایداری.

OPF approach	Min. gen. cost (\$/h)	Loss (MW)	Mean Vbus (p.u)	max $ \theta_i - \theta_j $ (deg.)	Mean tap set
GA	۸۰۶,۰۸۰۹	۸,۸۲۳۹	۱,۰۰۱۷	۶۹,۶۱۴	۰,۹۸۲۵
PSO	۸۰۷,۰۸۸۵	۸,۴۴۳۹	۱,۰۰۵۳	۶۸,۰۲۷	۰,۹۸۵۰
DEPSO	۸۰۵,۵۴۷۹	۹,۰۵۹۷	۱,۰۰۷۵	۶۸,۹۷۳	۰,۹۸۲۵

جدول ۴: پخش بار بهینه در شبکه ترکیبی HVAC/HVDC.

gen. cost = ۷۹۳,۱۵۵ \$/h	Loss = ۶,۴۷۹ MW
Mean V _{bus} = ۱,۰۰۹۹ p.u	max $ \theta_i - \theta_j $ = ۶,۳۵ deg.
P _R = ۵۸,۶۱ MW	Q _R = ۲۳,۱۸۵ MVar
V _{DR} = ۲۸۷,۲۳ kV	a _R = ۰,۹۳۴۵
P _I = ۱۲۶,۲۴ MW	Q _I = ۱۹,۳۷۱۹ MVar
V _{DI} = ۲۹۱,۹۴۹ kV	a _I = ۰,۹۳۴۵
	α _R = ۱۹,۸ deg.
	α _I = ۱۶,۰۰ deg.

تلفیق می‌کنند، نشان می‌دهد که روش DEPSO نسبت به روش‌های PSO و GA موفق‌تر عمل نموده است.

برای بررسی عملکرد روش در پخش بار بهینه شبکه‌های انتقال ترکیبی HVAC/HVDC و امکان تحقیق و مقایسه نتایج، همانند [۲۵] یک اتصال HVDC دوپایانه‌ای دوقطبی را بین باس‌های ۱ و ۲۸ به شبکه اضافه می‌کنیم. باس ۱ را به‌عنوان باس یکسوساز و باس ۲۸ را به‌عنوان باس اینورتور در نظر می‌گیریم. مشخصات اتصال HVDC، مشابه مشخصات سیستم HVDC ارائه شده در [۲۶] می‌باشد غیر از این که ولتاژ نامی جریان مستقیم ۲۸۷ کیلوولت در نظر گرفته شده است. نتیجه DEPSO-OPF در جدول ۴ ارائه شده است. این جدول نشان می‌دهد که حضور اتصال HVDC باعث کنترل بهتر پخش توان در شبکه و توزیع مناسب‌تر توان مابین واحدهای تولیدی شده است. در این حالت، هزینه تولید ۱/۵۴ درصد و تلفات ۲۸/۴۹ درصد نسبت به وضعیتی که اتصال HVDC در شبکه وجود ندارد، کاهش یافته است. در [۲۵] حضور اتصال HVDC مشابه باعث کاهش ۱/۳۶ درصدی در هزینه تولید و کاهش ۲۷/۹۷ درصدی در تلفات شده است که نشان‌دهنده عملکرد مناسب‌تر روش DEPSO می‌باشد. همچنین در این روش تنظیم پارامترهای اتصال HVDC به‌نحوی انجام یافته است که حاشیه امنیت کافی برای تغییرات در مواجهه با عدم قطعیت‌های ممکن در پارامترهای شبکه فراهم آید.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش ابتکاری ترکیبی برای پخش بار بهینه در شبکه‌های انتقال HVAC/HVDC ارائه شده است. این روش از ترکیب روش‌های ابتکاری PSO و DE حاصل شده و DEPSO نام گرفته است.

سپس برای هر کدام به تعداد صد بار OPF با هر کدام از روش‌های مورد نظر حل شده است. هر کدام از منحنی‌های همگرایی، حاصل میانگین شبیه‌سازی‌های انجام‌یافته برای روش مربوط می‌باشد.

ستون چهارم جدول ۳ بیانگر میانگین ولتاژ باس‌های با ولتاژ کنترل‌نشده، ستون چهارم بیانگر حداکثر اختلاف زاویه‌ای مابین باس‌های به هم متصل شبکه و ستون پنجم میانگین تنظیم نقطه تپ ترانسفورماتورها است. برای ارزیابی حاشیه امنیت استاتیک ولتاژ، با توجه به استفاده از نرم دو در (۳۴) از میانگین ولتاژ باس‌های کنترل‌نشده به‌عنوان معیاری از پروفیل ولتاژ شبکه استفاده شده است. بنابراین هرچه پروفیل ولتاژ شبکه به یک پربونیت نزدیک‌تر باشد، نشانگر پروفیل ولتاژ مسطح‌تر خواهد بود. به همین ترتیب هرچه اختلاف زوایای بین باس‌ها کمتر باشد، معیاری از وضعیت مناسب‌تر در پایداری زاویه‌ای استاتیک و هرچه میانگین نقطه تپ ترانسفورماتورها به یک نزدیک‌تر باشد، بیانگر بازه بیشتر در مواجهه با تغییرات احتمالی در شبکه می‌باشد. نتایج ارائه شده در جدول ۳ و در شکل ۲ نشان می‌دهد که روش DEPSO در یافتن پاسخ بهینه سراسری یا نزدیک به آن نسبت به دو روش دیگر از کارایی مناسب‌تری برخوردار می‌باشد. در روش پیشنهادشده، پخش بار بهینه به‌نحوی انجام یافته است که ولتاژ باس‌ها، اختلاف زاویه دو سر هر مدار و تنظیم تپ ترانسفورماتورها به‌گونه‌ای باشد که شبکه در برابر عدم قطعیت‌های محتمل در پارامترهای خود دارای حاشیه امنیت کافی باشد.

در شکل ۳ نحوه تغییرات تابع ارزیابی‌کننده حاشیه امنیت در طی روند بهینه‌سازی، در روش‌های مختلف نشان داده شده است. مقایسه روش‌های مختلف که چند هدف متفاوت برای بهینه‌سازی (حداقل نمودن هزینه بهره‌برداری، حداقل کردن تلفات و حداکثر نمودن حاشیه پایداری) را با هم

- [16] W. J. Zhang and X. F. Xie, "DEPSO: hybrid particle swarm with differential evolution operator," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 4, pp. 3816-3821, 5-8 Oct 2003, <http://www.adaptivebox.net/research/fields/algorithm/psa>.
- [17] R. Hassan, B. Cohanin, O. de Weck, and G. Venter, "A comparison of particle swarm optimization and the genetic algorithm," in *Proc. The 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conf.*, Austin, Texas, American Institute of Aeronautics and Astronautics, pp. 1-13, 18-21 Apr. 2004.
- [18] J. Vesterstrum and R. Thomsen, "A comparative study of differential evolution, particle swarm optimization, and evolutionary algorithms on numerical benchmark problems," *Congress on Evolutionary Computation IEEE, CEC2004*, vol. 2, pp. 1980-1987, Jun. 2004.
- [19] G. Opoku and C. M. Ong, "Coordinate of reactive power sources to correct bus voltage violations in an ac-dc system," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 103, no. 6, pp. 1128-1134, Jun. 1984.
- [20] E. Rumpf, "The operational performance of HVDC systems throughout the world during 1975 - 1978," in *Proc. of Symp. on Incorporating HVDC Power Transmission into System Planning*, pp. 1-23, Phoenix, Arizona, Mar. 1980.
- [21] H. Ambriz-Perez, E. Acha, and C. R. Fuerte-Esquivel, "High voltage direct current modeling in optimal power flows," *Electrical Power & Energy Systems*, vol. 30, no. 3, pp. 157-168, Mar. 2008.
- [22] D. Corne, M. Dorigo, and F. Glover, *New Ideas in Optimization*, McGraw Hill Co., 1999.
- [23] O. Alsac and B. Stott, "Optimal load flow with steady state security," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 93, no. 3, pp. 745-751, May 1974.
- [24] Y. R. Sood, "Evolutionary programming based optimal power flow and its validation for deregulated power system analysis," *Electrical Power & Energy Systems*, vol. 29, no. 1, pp. 65-75, Jan. 2007.
- [25] C. N. Lu, S. S. Chen, and C. M. Ong, "The incorporation of HVDC equations in optimal power flow methods using sequential quadratic programming techniques," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 3, no. 3, pp. 1005-1011, Aug. 1988.
- [26] C. Grigg, et al., "The IEEE reliability test system-1996: a report prepared by the Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 14, no. 3, pp. 1010-1020, Aug. 1999.

سیدجلال سیدشیراز مدارک کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی برق - قدرت به ترتیب در سال ۱۳۷۰ از دانشگاه تهران و در سال ۱۳۷۳ از دانشگاه تربیت مدرس اخذ نمود. وی از سال ۱۳۷۴ به عنوان عضو هیئت علمی در دانشگاه محقق اردبیلی مشغول به کار می باشد. دکتر سیدشیراز مدرک دکتری خود در رشته مهندسی برق - قدرت را در سال ۱۳۸۷ از دانشگاه تربیت مدرس اخذ نموده است. زمینه های پژوهشی ایشان عبارتند از: برنامه ریزی سیستم های انتقال، بهره برداری و پایداری گذرا در سیستم های قدرت.

حسین سیفی تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی از دانشگاه شیراز در سال ۱۳۵۹ و کارشناسی ارشد و دکترای خود را از دانشگاه منچستر (بومبست) در رشته مهندسی برق به ترتیب در سال های ۱۳۶۶ و ۱۳۶۸ دریافت کرد و از همان سال در دانشگاه تربیت مدرس مشغول فعالیت گردید. دکتر سیفی اکنون استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر این دانشگاه و رئیس مرکز ملی مطالعات و برنامه ریزی شبکه های قدرت است. زمینه های تحقیقاتی ایشان، برنامه ریزی، دینامیک، بهره برداری و بازار در سیستم های قدرت است.

محمدصادق سیاسیان تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی در دانشگاه تبریز، کارشناسی ارشد در دانشگاه تهران و دکتری در دانشگاه تربیت مدرس به ترتیب در سال های ۱۳۶۹، ۱۳۷۲ و ۱۳۷۹ در رشته مهندسی برق به انجام رسانده و از سال ۱۳۷۳ در دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباس پور) مشغول فعالیت گردید. دکتر سیاسیان هم اکنون استادیار دانشکده مهندسی برق این دانشگاه بوده و زمینه های تحقیقاتی ایشان برنامه ریزی، دینامیک و بهره برداری در سیستم های انتقال و توزیع می باشد.

فرمول بندی معمول پخش بار بهینه برای لحاظ کردن اتصالات HVDC تکمیل شده و فرمول بندی پخش بار بهینه حاصل برای داشتن حداقل هزینه تولید، حداقل تلفات شبکه و حداکثر حاشیه امنیت بسط داده شده است. مطالعات موردی نشان دهنده برتری روش ترکیبی پیشنهاد شده نسبت به دیگر روش ها می باشد. همچنین نشان داده شد که اتصالات مناسب HVDC می توانند باعث کاهش هزینه های بهره برداری و در عین حال حفظ حاشیه امنیت کافی در شبکه باشند. لازم به ذکر است که هدف از این بررسی مقایسه اقتصادی بین شبکه های انتقال کاملاً HVAC با شبکه های انتقال ترکیبی HVAC/HVDC نمی باشد.

مراجع

- [1] B. H. Chowdhury and S. Rahman, "A review of recent advances in economic dispatch," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 5, no. 4, pp. 1248-1259, Nov. 1990.
- [2] J. Momoh, M. El-Hawary, and R. Adapa, "A review of selected optimal power flow literature to 1993, part I: non-linear and quadratic programming approaches," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 96-104, Feb. 1999.
- [3] J. Momoh, M. 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. on Power Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 105-111, Feb. 1999.
- [4] F. Capitanescu, M. Glavic, D. Ernst, and L. Wehenkel, "Interior-point based algorithms for the solution of optimal power flow problems," *Electric Power System Research*, vol. 77, no. 5-6, pp. 508-517, Apr. 2007.
- [5] M. Rahli and P. Pirotte, "Optimal load flow using sequential unconstrained minimization," *Electric Power System Research*, vol. 52, no. 1, pp. 61-64, 1 Oct. 1999.
- [6] X. Yan and V. H. Quintana, "Improving an interior point based OPF by dynamic adjustment of step sizes and tolerances," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 14, no. 2, pp. 709-717, May 1999.
- [7] J. A. Momoh and J. Z. Zhu, "Improved interior point method for OPF problems," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 14, no. 3, pp. 1114-1120, Aug. 1999.
- [8] A. G. Bakirtzis, P. N. Biskas, C. E. Zoumas, and V. Petridis, "Optimal power flow by enhanced genetic algorithm," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 17, no. 2, pp. 229-236, May 2002.
- [9] W. Ongsakul and P. Bhasaputra, "Optimal power flow with FACTS devices by hybrid TS/SA approach," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 24, no. 10, pp. 851-857, Dec. 2002.
- [10] T. Kulworawanichpong and S. Sujitjorn, "Optimal power flow using Tabu search," *IEEE Power Eng. Review*, vol. 22, no. 6, pp. 37-39, Jun. 2002.
- [11] P. Somasundaram, K. Kuppasamy, and R. P. Kumudini Devi, "Evolutionary programming based security constrained optimal power flow," *Electric Power System Research*, vol. 72, no. 2, pp. 137-145, 1 Dec. 2004.
- [12] D. Bhagwan Das and C. Patvardhan, "Useful multi-objective hybrid evolutionary approach to optimal power flow," in *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 150, no. 3, pp. 275-282, 13 May 2003.
- [13] J. G. Vlachoginnis, N. D. Hatzigaryriou, and K. Y. Lee, "Ant colony system - based algorithm for constrained load flow problem," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 1241-1249, Aug. 2005.
- [14] M. Varadarajan and K. S. Swarup, "Network loss minimization with voltage security using differential evolution," *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 5, pp. 815-823, May 2008.
- [15] M. A. Abido, "Optimal power flow using particle swarm optimization," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 24, no. 7, pp. 563-571, Oct. 2002.