حل مسئله پخش بار بهینه در شرایط نرمال و اضطراری با استفاده از الگوریتم ترکیبی گروه ذرات و نلدر مید (PSO-NM)

محمود جورابیان[1] احسان افضلان[2]

۱ – استاد دانشکده مهندسی - دانشگاه شهید چمران اهواز- ایران
mjoorabian@scu.ac.ir
۲- دانش آموخته- کارشناس ارشد مهندسی برق - گرایش قدرت
Ehsan.afzalan@ymail.com

چکیده: در این مقاله به منظور حل مسئله پخش‌بار بهینه (OPF)، از الگوریتم ترکیبی گروه ذرات (PSO) و نلدر – مید-(Nelder Mead) برای تنظیم بهینه متغیرهای کنترلی پخش‌بار بهینه استفاده شده است. هدف از ترکیب دو الگوریتم گروه ذرات و نلدر- مید یافتن روشی می‌باشد که علاوه بر داشتن مزیت‌های دو الگوریتم فوق، عیب ونقص‌های این دو الگوریتم را نداشته باشد. قدرت بالا در جستجو و وابستگی زیاد عملکرد به انتخاب اولیه نقاط از مزایا و معایب الگوریتم نلدر – مید می‌باشد. همچنین از مزایا و معایب الگوریتم گروه ذرات می‌توان به یافتن بهترین جواب و سرعت پایین در رسیدن به همگرایی اشاره کرد. بنابراین با ترکیب این دو الگوریتم، می‌توان به روش هوشمندی دست یافت که علاوه بر عدم وابستگی به انتخاب اولیه نقاط، دارای قدرت و سرعت بالایی در همگرایی می‌باشد. الگوریتم پیشنهادی برروی شبکه استاندارد IEEE bus -۳۰ با در نظرگرفتن اهداف حداقل نمودن هزینه سوخت ژنراتورها، اصلاح پروفیل ولتاژ و افزایش پایداری ولتاژ در شرایط عادی و اضطراری بررسی شده است. توابع هزینه مورد استفاده در این مطالعه بصورت چند جمله‌ای درجه دوم تکه‌ای ناهموار و غیرمحدب می‌باشند. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از الگوریتم مذکور با نتایج حاصل از سایر الگوریتم‌های تکاملی ارائه شده در مقالات سال‌های اخیر مقایسه شده است که نتایج نشان‌دهنده برتری الگوریتم PSO-NM در حل مسئله پخش‌بار بهینه می‌باشد.

کلمات کلیدی: پخش‌بار بهینه (OPF)، پایداری ولتاژ،الگوریتم ترکیبی گروه ذرات و نلدر مید (PSO-NM)، بهبود پروفیل ولتاژ، تابع هزینه ناهموار، کاهش هزینه سوخت.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۱/۰۶/۰۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۳/۳۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۱/۲۸
نام نویسنده‌ی مسئول: محمود جورابیان
نشانی نویسنده‌ی مسئول : ایران – اهواز – دانشگاه شهید چمران – دانشکده‌ی مهندسی-گروه برق

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol12- No.1 Spring & Summer 2015
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-09]

۱- مقدمه

بهره‌برداری اقتصادی یکی از مسائل اساسی در سیستم‌های قدرت می‌باشد. پخش بار بهینه یکی از ابزارهای مهم برای سطوح برنامه‌ریزی می‌باشد. هدف اصلی پخش بار بهینه بدست آوردن مقادیر مربوط به پارامترهای بهینه سیستم قدرت جهت عملکرد ایمن و اقتصادی سیستم قدرت می‌باشد [۱] در این راستا هزینه تولیدی نیروگاه‌ها با در در نظر گرفتن قیود واقعی سیستم حداقل می‌شود [۲].

جهت حل مسئله پخش بار بهینه تا کنون روشهای مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. پخش بار بهینه یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی با قیود استاتیکی است که با توسعه تکنیک‌های بهینه‌سازی عددی و روش‌های محاسباتی در مطالعات سیستم قدرت مورد توجه واقع شده است. تکنیک‌های کلاسیک حل مسئله پخش بار بهینه، شامل برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی غیرخطی، برنامه‌ریزی درجه‌دوم، نقطه درونی و روش نیوتن می‌باشند، که در مراجع [۵-۳] به این روشها پرداخته شده است. با توجه به اینکه پخش بار بهینه یک مسئله بهینه‌سازی به شدت غیرخطی و چند قیدی می‌باشد، لذا بیش از یک نقطه بهینه محلی برای حل پخش بار بهینه بدست می‌آید. همچنین با توجه به عدم وجود معیاری برای انتخاب یک مینیمم محلی به عنوان مینیمم سراسری، تعیین مینیمم سراسری با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک مبتنی بر مشتق و شیب خط مناسب نمی‌باشند.

پخش بار بهینه یک مسئله با تابع هدف محدب (غیر محدب)، ناصاف و مشتق‌ناپذیر می‌باشد و این امر سبب بسط و پیشرفت روش‌های بهینه‌سازی جهت غلبه بر این مشکلات شده است. اخیراً به منظور غلبه یر محدودیت‌های روش‌های کلاسیک از روش‌های هوشمند تکاملی جهت حل مسئله پخش بار بهینه استفاده شده است. طیف گسترده‌ای از روش‌های بهینه‌سازی ابتکاری همچون الگوریتم برنامه‌ریزی تکاملی (EP) [۶]، برنامه‌ریزی تکاملی بهبودیافته (IEP) [۷]، الگوریتم ژنتیک بهبودیافته [۸] سردشدن تدریجی (SA) [۹] جستجوی تابو (TS) [۱۰]، الگوریتم تکاملی تفاضلی (DE) [۱۱, ۱۲] و الگوریتم تکاملی تفاضلی بهبودیافته (MDE) [۱۳] و جغرافیای زیستی (BBO) [۱۴] نیز در حل مسئله پخش بار بهینه استفاده شده‌اند.

اخیراً یک تکنیک محاسباتی با عنوان گروه ذرات (PSO) معرفی شده است [۱۵] و [۱۶] که می‌توان از آن به منظور حل بسیاری از مسائل سیستم قدرت از قبیل توزیع توان راکتیو [۱۷] و پخش بار بهینه [۱۵] استفاده می‌شود. در این مقاله جهت حل مسئله پخش بار بهینه از روش ترکیبی مبتنی بر گروه ذرات و نلدر - مید جهت حداقل نمودن تابع هزینه استفاده شده است. هدف از ترکیب این دو روش، استفاده از مزایا و اجتناب از معایب این دو روش می‌باشد [۱۸]. روش نلدر - مید یکی از روش‌های موثر در یافتن مینیمم محلی است اما ین روش به شدت به نقاط اولیه وابسته است [۱۹]. همچنین الگوریتم گروه ذرات متعلق به دسته‌ای از روش‌های جستجوی سراسری می‌باشد اما برای رسیدن به همگرایی لازم نیاز به محاسبات طولانی دارد. در این راستا با ترکیب این دو روش، از مزیت جستجوی سراسری الگوریتم ذرات و همگرایی روش نلدر - مید به صورت همزمان استفاده می‌شود[۱۸]. در این مقاله از الگوریتم PSO-NM جهت حل مسئله پخش بار بهینه با چندین تابع هدف متفاوت استفاده شده است.

در این مقاله در بخش دوم به بیان فرمولاسیون مسئله پخش بار بهینه پرداخته شده است. در این بخش قیود مسئله و همچنین حدود متغیرهای کنترلی و حدود متغیرهای حالت بیان شده است. در بخش سوم الگوریتم ترکیبی PSO-NM بررسی شده است. در این بخش ابتدا مروری بر الگوریتم گروه ذرات صورت گرفته است و سپس الگوریتم نلدر – مید به طور کامل برای یک مسئله بهینه‌سازی با دو متغییر بیان شده است. نهایتاً در انتهای این بخش ترکیب این دو الگوریتم و نحوه پیاده‌سازی آن بیان شده است. نتایج شبیه‌سازی در بخش چهارم بررسی شده اند. در این راستا توابع هدف همچون حداقل نمودن هزینه سوخت ژنراتورها، اصلاح پروفیل ولتاژ و افزایش پایداری ولتاژ هم در شرایط نرمال و هم در شرایط وقوع پیشامد و نیز با در نظر گرفتن توابع هزینه ناهموار و غیر محدب در پنج زیر بخش جداگانه توضیح داده شده است. سرانجام، نتیجه‌گیری در بخش پنجم بیان شده است که نتایج شبیه‌سازی کارآیی مناسب الگوریتم پیشنهاد شده PSO-NM نسبت به سایر الگوریتم‌ها را در یافتن حل بهینه پخش‌بار بهینه سیستم‌های قدرت نشان می دهد.

۲- فرمول‌بندی مسئله و معرفی تابع هدف

پخش بار بهینه به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی مقید کلی به صورت زیر فرمول بندی می‌شود [۱۳]

$$\min\ F(x,u)$$

$$subject\ \ to: \begin{cases} g(x,u)=0 \\ h^{\min} \le h(x,u) \le h^{\max} \end{cases} \qquad (۱)$$

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.12- No.1 Spring & Summer 2015

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-09]

بطوریکه در روابط مذکور، u مجموعه متغیرهای کنترل‌پذیر، x متغیرهای مستقل که متغیرهای حالت نامیده می‌شوند. در رابطه (۱) تابع هدف $F(x,u)$ اسکالر، تساوی‌ها $g(x,u)$ معادلات مرسوم پخش‌بار و نامساوی‌ها $h(x,u)$ حدود فیزیکی روی متغیرهای کنترل‌پذیر و متغیرهای حالت را نشان می‌دهند. بطور کلی متغیرهای کنترل‌پذیر در سیستم قدرت توان اکتیو خروجی ژنراتورها به جز باس مرجع، دامنه ولتاژ باس‌های تنظیم ولتاژ، تپ ترانسفورماتورهای قابل تنظیم، شیفت دهنده‌های فاز، جبران سازهای توان راکتیو و بارهای داخل و خارج شونده به شبکه می‌باشند. همچنین متغیرهای حالت در سیستم قدرت دامنه ولتاژ در باس‌های بار، اندازه فاز ولتاژ در هر باس، میزان توان عبوری از خطوط، توان راکتیو خروجی ژنراتورها و توان اکتیو خروجی باس مرجع می‌باشد.

۲-۱- قیود مسئله پخش بار بهینه

در مسئله پیشنهادی، دو نوع قید مساوی و نامساوی در نظر گرفته می‌شود.

۲-۱-۱- قیود مساوی

قیود تامین توان اکتیو و راکتیو هر شین مربوط به پخش بار به صورت روابط خطی زیر بیان می‌شود:

$$P_{Gi} - P_{Di} - \sum_{j=1}^{n} |V_i||V_j||Y_{ij}| Cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) = 0 \quad (۲)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} + \sum_{j=1}^{n} |V_i||V_j||Y_{ij}| Sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) = 0 \quad (۳)$$

که $Q_{Di}, Q_{Gi}, P_{Di}, P_{Gi}$ توان اکتیو و راکتیو ژنراتور و بار در باس i، $|Y_{ij}|$ و θ_{ij} عنصر ij ماتریس ادمیتانس و $V_i \angle \delta_i$ دامنه و فاز ولتاژ شین در باس i می‌باشد.

۲-۱-۲-قیود نامساوی

این قیود محدودیت‌های امنیتی و کاری سیستم قدرت را تأمین می‌کنند که به صورت زیر بیان می‌شود :

۲-۱-۲- ۱- حدود متغیرهای کنترلی

الف- خروجی توان اکتیو ژنراتورها

$$P_{Gi}^{\min} \le P_{Gi} \le P_{Gi}^{\max}, i = 1,...,G_N \quad (۴)$$

$P_{Gi}^{\min}, P_{Gi}^{\max}$ ماکزیمم و مینیمم توان اکتیو خروجی ژنراتورها می‌باشد. G_N تعداد ژنراتورهای سیستم به استثنا ژنراتور مرجع می‌باشد

ب- دامنه ولتاژها در هر باس‌های تنظیم ولتاژ

$$V_i^{\min} \le V_i \le V_i^{\max}, i = 1,...,G_N \quad (۵)$$

که در این رابطه، $V_i^{\min}, V_i^{\max}$ ماکزیمم و مینیمم ولتاژ ژنراتورها است.

ج- تپ ترانسفورماتورها

$$T_i^{\min} \le T_i \le T_i^{\max}, i = 1,...,T_N \quad (۶)$$

که در این رابطه، $T_i^{\min}, T_i^{\max}$ ماکزیمم و مینیمم تپ ترانسفورماتورها است. T_N تعداد تپ ترانسفورماتورهای سیستم می‌باشد.

ح- منابع تزریق توان راکتیو

$$Q_{ci}^{\min} \le Q_{ci} \le Q_{ci}^{\max}, i = 1,...,C_N \quad (۷)$$

C_N تعداد منابع تزریق توان راکتیو سیستم می‌باشد. همچنین متغیرهای P_{Gi}، Q_{Gi}، V_i، T_i و Q_{ci} متغیرهای پیوسته می‌باشند.

۲-۱-۲- ۲- حدود متغیرهای حالت :

الف- خروجی توان راکتیو ژنراتورها

$$Q_{Gi}^{\min} \le Q_{Gi} \le Q_{Gi}^{\max}, i = 1,...,G_N \quad (۸)$$

$Q_{Gi}^{\min}, Q_{Gi}^{\max}$ ماکزیمم و مینیمم توان راکتیو خروجی ژنراتورها می‌باشد.

ب- تولید توان اکتیو باس مرجع:

$$P_{G1}^{min} \le P_{G1} \le P_{G1}^{max} \quad (۹)$$

$P_{Gl}^{\min}, P_{Gl}^{\max}$ ماکزیمم و مینیمم توان اکتیو خروجی باس مرجع

ج- دامنه ولتاژها باس‌های بار:

$$V_i^{min} \le V_i \le V_i^{max}, i = 1,..., N_L \quad (۱۰)$$

که در این رابطه، $V_i^{\min}, V_i^{\max}$ ماکزیمم و مینیمم ولتاژ باس‌های بار است. N_L تعداد باس‌های بار سیستم می‌باشد.

ح- حد حرارتی خطوط انتقال

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol12- No.1 Spring & Summer 2015
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-09]

$$S_{Li} \le S_{Li}^{\max}, i = 1,...L_N \qquad (11)$$

که $S_{Li}^{\max}$، حد حرارتی خطوط انتقال می‌باشد. L_N تعداد باس‌های بار سیستم می‌باشد.

۳- الگوریتم ترکیبی PSO-NM

۳-۱- الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات (PSO)

ایده اصلی روش PSO از حرکت ذرّات هجومی همچون کلاغ‌ها و ماهی‌ها به‌دست آمده است؛ به عنوان مثال در هنگام حرکت یک دسته کلاغ، یک کلاغ دارای بهترین موقعیت (سرگروه) می‌باشد و سایر کلاغ‌ها با توجه به موقعیت فعلی خود و کلاغ‌های مجاور سعی به نزدیک شدن به سرگروه و بهبود موقعیت خود را دارند [۲۱-۲۰]، عملکرد روش PSO نیز به همین صورت می‌باشد. به این معنی که دسته‌ای از ذرّات (متغیر های مسئله بهینه سازی) در محیط جست‌وجو پخش می‌شوند. در این حالت برخی از ذرّات موقعیت بهتری نسبت به سایر ذرّات دارند یعنی دارای تابع هزینه با مقدار بهتری می‌باشند. سپس سایر ذرّات بر اساس رفتار ذرّات هجومی، سعی می‌کنند تا به ذرّات با موقعیت مطلوب (با تابع هزینه بهتر)، نزدیک شوند. از طرفی دیگر موقعیت سردسته نیز در حال تغییر است در نتیجه کل سیستم به سمت نقاط بهینه حرکت می‌کند.

تغییر موقعیت هر ذره بر اساس تجربه خود آن ذره و تجربه ذرّات همسایه انجام می‌شود و در واقع هر ذره از برتری و یا عدم برتری خود نسبت به ذرّات همسایه و همچنین کل گروه آگاه است و با توجه به این موارد موقعیت خود را تغییر می‌دهد. برای شبیه سازی رفتار ذرات هجومی پارامترهای زیر تعریف می‌شود[۲۰].

الف) توده ذرّات: n ذره که در ابتدا به‌صورت اتفاقی جایابی می‌گردند و تابع را به سمت جواب بهینه رهنمون می‌سازند. همچنین هر ذره به‌نوبه خود به‌صورت تصادفی در توده حرکت می‌نماید. این توده ذرّات به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$pop(t) = \{x_1(t), x_2(t),..., x_n(t)\} \qquad (12)$$

ب) P_{best}: این پارامتر، بیانگر بهترین موقعیتی است که هر ذره در طول اجرای الگوریتم کسب کرده است.

ج) G_{best}: این متغیر بهترین موقعیتی را که کل ذرّات در طول اجرای الگوریتم کسب کرده اند، نشان می‌دهد.

د) پارامتر شناخت فردی (Φ_1) : این کمیت باعث می‌شود که ذره به سمت P_{best} بهترین موقعیتی که تاکنون کسب کرده حرکت کند.

ه) پارامتر شناخت اجتماعی (Φ_2) : این ضریب باعث می‌شود که ذره به سمت G_{best} بهترین موقعیتی که تاکنون کل ذرات کسب کرده‌اند حرکت کند.

و) ضریب لختی یا انقباض (w): این ضریب، باعث ایجاد تعادل در جستجوی محلّی و کلی در الگوریتم می‌شود.

ز) لغزش (V): این پارامتر، تغییر موقعیت ذره در محیط جستجو را نشان می‌دهد.

موقعیت ذره در لحظهٔ بعد، با استفاده از دو پارامتر P_{best} و G_{best} به دست می‌آید. سومین عامل موثر در موقعیت آینده ذره هم سرعت قبلی ذره است. این سه عامل در کل، موقعیت آینده ذره را تشکیل می‌دهند. به عبارت دیگر:

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_{ij}(t+1) \qquad (13)$$

در این رابطه $V_{ij}(t)$ سرعت ذره iام که دارای بعد m می‌باشد در لحظه t می‌باشد. مقدار سرعت (نرخ تغییر موقعیت از لحظه t تا لحظه $t+1$ برای بعد jام ذره می‌باشد) از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$V_{ij}(t+1) = wV_{ij}(t) + \Phi_1 rand(p_{best,ij} - X_{ij}) + \Phi_2 rand(G_{best,ij} - X_{ij}) \qquad (14)$$

که مقدار V_{ij} بین $V_{ij}^{\max}$ و $V_{ij}^{\min}$ قرار دارد. در این رابطه (Φ_1) ضریبی است که رسیدن به بهترین نقطه را تضمین می‌نماید. از طرفی (Φ_2) نیز ضریب مربوط به رسیدن بهترین نقطه عمومی ذرّات می‌باشد. همچنین w وزن اینرسی برای سرعت‌گیری ذرات می‌باشد، که می بایست در بازه [۱و۰] قرار گیرد.

انتخاب مناسب وزن اینرسی w یک تعادل بین شناسایی محلی و کلی را فراهم می‌کند. بنابراین، در این مقاله برای افزایش محیط جستجو، w را بطور خطی از مقدار۰/۹ تا ۰/۴درطول اجرا کاهش می‌دهیم، تا در زمان لازم الگوریتم PSO سرعت بگیرد و در نزدیکی جواب بهینه به کندی مسیر را ادامه دهد. عموماً وزن اینرسی w مطابق معادله زیر بیان می‌شود:

$$w^{t+1} = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{t_{\max}} \times t \qquad (15)$$

که دراین رابطه $t_{\max}$: ماکزیمم تعداد تکرار و t: شماره تکرار جاری می‌باشد.

در این الگوریتم، بهترین نقطه‌ای که یک ذره تا کنون کسب کرده است از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-09]

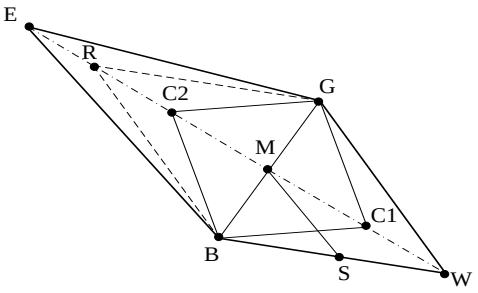
$$P_{best,i}=\begin{cases} P_{best,i} & if \quad F_{cost}(X_i)\geq F_{cost}(P_{best,i}) \\ X_i & if \quad F_{cost}(X_i)< F_{cost}(P_{best,i}) \end{cases} \qquad (۱۶)$$

در حالت کلی اگر $\Phi_2 >> \Phi_1$ باشد، ذرّات به سمت G_{best} (یعنی موقعیت بهینه کلی) کشیده می‌شوند. حال اگر $\Phi_2 << \Phi_1$ باشد آنگاه ذرّات به سمت P_{best} (یعنی موقعیت بهینه محلی) کشیده می‌شوند در این صورت برای داشتن حالت میانگین باید $\Phi_2 = \Phi_1$ باشد. در این حالت، تمایل به رسیدن به G_{best} و P_{best} به یک میزان خواهد شد. اگر (Φ_1)و (Φ_2) مقادیر بزرگی باشند در این صورت، سرعت رسیدن به نقطه بهینه زیاد می‌شود، ولی دقت محاسبه نقطه بهینه کم می‌باشد و احتمال به وجود آمدن نوسان در محاسبه نقاط بهینه در این الگوریتم زیاد می‌گردد. از طرفی اگر مقدار (Φ_1)و (Φ_2) کوچک باشد دقت نقطهٔ اندازه‌گیری شده، بالا بوده ولی سرعت رسیدن به آن نقطه کم می‌شود. از طرف دیگر در حالت کلی می‌توان گفت که برای (Φ_1)و (Φ_2) باید شرط $\Phi_1+\Phi_2\geq 4$ برقرار باشد. معمولا $\Phi_1+\Phi_2=2.05$ قرار می‌دهند تا این شرط و شرط سرعت برآورده شود.

در مورد ضریب انقباض نیز باید ذکر کرد که این ضریب باعث رسیدن به مقدار بهینه می‌شود. چون مقادیر کوچک w باعث ایجاد جابه‌جایی‌های کند نقاط می‌شود، لذا حوزه جستجو کوچک می‌شود. همچنین مقادیر بزرگ w نیز باعث ایجاد جابه‌جایی‌هایی با دامنه‌های بزرگ می‌شود. در نتیجه حوزه جستجو بزرگ می‌شود. اگر $w=0$ باشد توده ذرّات با دقت زیادی به نقطه نهایی می‌رسد و اگر $w\approx 1$ باشد توده به آرامی به نقطه نهایی می‌رسد.

۳-۲- الگوریتم نلدر- مید (NM)

یک روش ساده جهت یافتن یک مینیمم محلی از یک تابع چند متغیره توسط Nelder و Mead ابداع شده است [۱۸, ۱۹, ۲۲]. روش Nelder-Mead برای مقایسه مقادیر تابع هدف در $n+1$ راس جهت حل مسئله بهینه‌سازی n بعدی استفاده می‌شود. در هر مرحله یک راس جدید ایجاد می‌گردد. سپس اگر راس جدید نسبت به رئوس قبلی دارای مقدار تابع هدف کمتری باشد، این راس جدید با بدترین راس در مرحله قبل جایگزین می‌شود. روش Nelder-Mead برای مسئله با ۲ متغیر یک الگوی جستجو می‌باشد که مقادیر تابع هدف را در ۳ راس مثلث با هم مقایسه می‌کند. روش جستجوی مستقیم Nelder-Mead برای مینیمم‌سازی یک تابع غیرخطی در فضای ۲ بعدی در شکل(۱) نشان داده شده است.



شکل (۱) : الگوریتم Nelder-Mead

الف- تعیین مثلث اولیه BGW: بهینه سازی تابع $f(x,y)$ به عنوان هدف مسئله در نظر گرفته می‌شود. در روش بهینه‌سازی Nelder-Mead، الگوریتم با سه نقطه اولیه آغاز می‌گردد. این سه نقطه $V_K=(x_k,y_k)\ k=1,2,3$، یک مثلث را تشکیل می دهند. سپس مقدار تابع $Z_k=f(x_k,y_k)$ در هر سه نقطه به دست می‌آید. حال اگر $Z_1<Z_2<Z_3$ باشد آنگاه $B=(x_1,y_1)$ و $G=(x_2,y_2)$ و $W=(x_3,y_3)$ نام‌گذاری می‌گردد.

ب- تعیین نقطه میانی ناحیه مناسب: در این قسمت، نقطه میانی M از پاره‌خط واصل بین G و B به دست می‌آید که :

$$M=\left(\frac{B+G}{2}\right)=\left(\frac{x_1+x_2}{2},\frac{y_1+y_2}{2}\right) \qquad (۱۷)$$

ح- عمل بازتاب با استفاده از نقطه R: نقطه R با استفاده ازعمل بازتاب بر روی ضلع $\overline{BG}$ طبق رابطه زیربه دست می‌آید.

$$R=M+(M-W)=2M-W \qquad (۱۸)$$

ج- عمل انبساط با استفاده از نقطه E: اگر مقدار تابع در نقطه R نسبت به مقدار تابع در نقطه W کوچکتر باشد، جهت صحیحی برای مینیمم کردن به دست آمده است. در این حالت از مثلث انبساط یافته BGE استفاده می شود که نقطه E از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$E=M+\eta(M-W) \qquad (۱۹)$$

که η ضریب انبساط می‌باشد و دارای مقداری بزرگتر از یک می‌باشد. اگر مقدار تابع در نقطه E، کمتر از مقدار تابع در نقطه R باشد، آنگاه نقطه بهتری نسبت به نقطه R پیدا شده است.

پ- عمل انقباض با استفاده از نقطه C: اگر مقدار تابع در R و W یکسان باشد، باید نقطه دیگری به دست آید. در این حالت، دو نقطه میانی C_1 و C_2 در نظر گرفته شده و مقدار تابع در این دو نقطه به دست می‌آید.

$$C_1,C_2=M\pm k(M-W) \qquad (۲۰)$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-09]

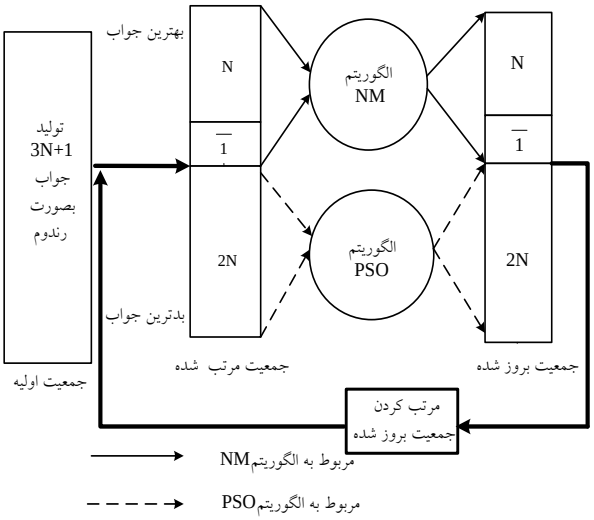
که k ضریب انقباض با مقداری کوچکتر از یک می‌باشد. هر کدام از نقاط C_1 و C_2، که دارای مقدار تابع کمتری باشد آن نقطه C نامگذاری می‌شود.

ث- حرکت به سمت کوچک شدن (انقباض): اگر مقدار تابع در نقطه C از مقدار تابع در نقطه W کوچکتر نباشد، نقاط W و G باید نسبت به نقطه B کوچک شوند، بنابراین نقطه G با نقطه M و نقطه W با نقطه S جایگزین می شود.

$$S=\left(\frac{B+W}{2}\right)=\left(\frac{x_1+x_3}{2},\frac{y_1+y_3}{2}\right) \qquad (۲۱)$$

۳-۳- الگوریتم ترکیبیِ بهینه سازی گروه ذرات با نلدر –مید (PSO-NM)

هدف از ترکیب دو الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات والگوریتم نلدر - مید بدست آوردن الگوریتمی است که علاوه بر اینکه دارای مزیت های دو الگوریتم فوق است، عیب ونقص های دو الگوریتم درآن وجود نداشته باشد. الگوریتم نلدر- مید با وجود قدرت بالایش در فضای جستجو، تاحدود زیادی عملکردش به انتخاب اولیه نقاط وابسته است.الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات هم با وجود قدرت بالایش در بدست آوردن بهترین جواب، دارای سرعت پایینی است. ولی با ترکیب این دو الگوریتم، می‌توان به الگوریتمی رسید که علاوه بر قدرت و سرعت بالایش در همگرایی، به انتخاب اولیه نقاط وابسته نیست. نحوه ترکیب دوالگوریتم فوق در شکل (۲) نشان داده شده است [۱۹-۱۸].



شکل(۲) : ترکیب الگوریتم PSO باNM

برای اعمال الگوریتم ترکیبی فوق بر روی مسئله پخش‌بار بهینه مراحل زیر طی می‌گردد :

۱- در این مرحله اطلاعات مورد نیاز برای حل مسئله پخش‌بار بهینه و پارامترهای الگوریتم ترکیبی PSO-NM تعیین می‌شوند.

۲- دراین مرحله مسئله بهینه‌سازی همراه با قیود به یک مسئله بهینه‌سازی بی‌قید تبدیل می‌شود. این عمل با استفاده از رابطه زیر انجام می‌شود:

$$\min\ F(x,u)+\sum_{j=1}^{N_{eq}}K_j\left(g(x,u)-0\right)^2+\Gamma \qquad (۲۲)$$

$$\Gamma_i=\begin{cases}U_i\left(h-h_{\lim}\right)^2 & \text{if violated}\\ 0 & \text{otherwise}\end{cases} \qquad (۲۳)$$

در این رابطه $h_{\lim}$ حد مازیمم و مینیمم h می‌باشد.

۳- جمعییت اولیه بصورت رندوم تولید می‌شود. معمولا تعداد جمعیت اولیه $3N+1$ انتخاب می‌گردد. جمعییت اولیه بفرم زیر است:

$$Population=\begin{bmatrix}X_1\\ \vdots\\ X_i\\ \vdots\\ X_{3N+1}\end{bmatrix} \qquad (۲۴)$$

که:

$$X_i=\left\{P_1,\cdots,P_{G_N},V_1,\cdots,V_{G_N},T_1,\cdots,T_N,Q_{c1},\cdots,Q_{cC_N}\right\}$$

و N تعداد جمعیت اولیه می‌باشد.

۴- محاسبه تابع هدف برای هر یک از اعضای جمعیت اولیه.

۵- مرتب کردن نزولی ذرات بر حسب مقدار تابع هدف به این صورت که ذره دارای کمترین مقدار تابع هدف در بالاترین رده می‌گیرد.

۶- انتخاب $N+1$ ذره اول در لیست بدست آمده از روش (۵) واعمال آن به الگوریتم نلدر- مید و تعیین مقدار تابع هدف.

۷- اعمال $2N$ ذره باقیمانده از جمعیت اولیه به الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات و تعیین مقدار تابع هدف.

۸- ترکیب نتایج حاصل ازPSO وNM و بهترین جواب بدست آمده انتخاب می‌گردد.

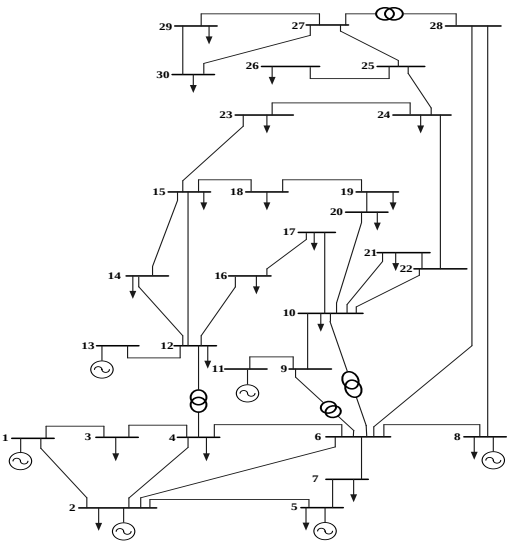
۹- خارج شدن از الگوریتم در صورت برآورده شدن معیار انتخاب شده، در غیر اینصورت بازگشت به مرحله ۵.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-09]

۴- نتایج شبیه‌سازی

الگوریتم پیشنهادی برای حل مسئله پخش‌بار بهینه در شبکه تست 30-bus IEEE استاندارد که دیاگرام تک خطی آن مطابق شکل (۳) می‌باشد، بکار گرفته شده است. اطلاعات شبکه، حداقل و حداکثر مجاز متغیرهای کنترلی در مرجع [۱۱] موجود می‌باشد.

شبکه مورد مطالعه دارای شش ژنراتور در باس‌های ۱، ۲، ۵، ۸، ۱۱، ۱۳ و چهار ترانسفورماتور با تپ‌های قابلت تنظیم در خطوط ۴-۱۲، ۶-۱۰، ۶-۹ و ۲۸-۲۷ می‌باشد. همچنین باس‌های ۱۰، ۱۲، ۱۵، ۱۷، ۲۰، ۲۱، ۲۳، ۲۴ و ۲۹ جهت نصب منابع توان راکتیو در نظر گرفته شده‌اند. به طور کلی ۲۴ متغیر کنترلی باید توسط الگوریتم بهینه‌سازی تعیین شود. به منظور نشان دادن کارآیی روش پیشنهادی چندین حالت، با در نظر گرفتن توابع هدف مختلف آورده شده است که در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته می‌شود. همچنین پارامترهای الگوریتم پیشنهادی PSO-NM در جدول (۱) نشان داده شده است.



شکل (۳) : دیاگرام تک خطی شبکه تست IEEE 30-bus

جدول(۱): مقادیر پارامترهای اصلی الگوریتم در شبیه‌سازی

$N=24$	$t=200$	$\Phi_1=1.05$	$\Phi_2=1.05$
$W^{max}=0.8$	$W^{min}=0.4$	$K=0.5$	$\eta=2$

۴-۱- حالت اول: حداقل نمودن هزینه سوخت

در سیستم‌های قدرت عملی، یک واحد تولیدی از منابع سوخت فسیلی همچون زغال سنگ، گاز طبیعی و نفت استفاده می‌کند. همچنین می‌توان هزینه سوخت این واحدها را به شکل تابع درجه دوم در نظر گرفت [۱۵،۱۱]. تابع هدف یا تابع هزینه ژنراتورها در رابطه (۲۵) نشان داده شده است.

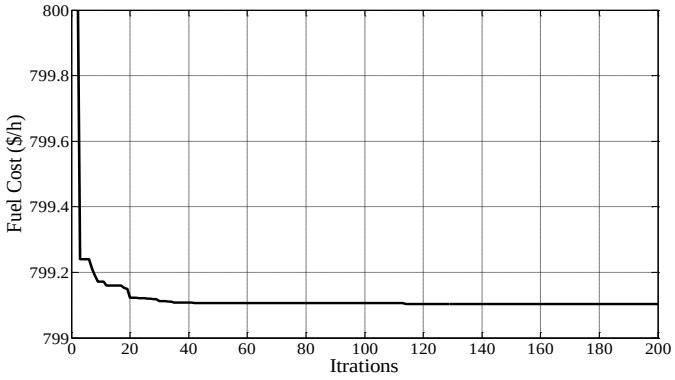
$$F = \sum_{i=1}^{G_N} a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 \qquad (۲۵)$$

دررابطه (۲۵)، a_i، b_i و c_i ضرایب هزینه iامین ژنراتور را نشان می‌دهدکه مقادیرآن در مراجع [۱۵،۱۱] قابل مشاهده است. به منظور نشان دادن توانایی الگوریتم PSO-NM در یافتن جواب بهینه کلی، نتایج شبیه‌سازی با استفاده از روش پیشنهادی PSO-NM و الگوریتم تکاملی تفاضلی اصلاح شده MDE [۱۲]، الگوریتم ژنتیک بهبود یافتهImproved GA [۸]، الگوریتم گروه ذرات PSO [۱۵]، الگوریتم تکاملی تفاضلی DE [۱۱]، و جغرافیای زیستی BBO [۱۳] و روش شیب method Gradient [۱۳] در جدول (۲) مقایسه شده است. همچنین مقدار بهینه متغیرهای کنترلی بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی برحسب پریونیت همراه با دیگر روش‌های هوشمند در جدول (۲) بررسی شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، با در نظر گرفتن شرایط یکسان از قبیل تعداد و حدود متغیرهای کنترلی، شرایط اولیه و سایر اطلاعات شبکه مورد مطالعه، الگوریتم PSO-NM عملکرد بهتری نسبت به دیگر الگوریتم‌های ذکر شده دارد.مجموع هزینه سوخت ژنراتورها با استفاده از روش پیشنهادی (\$/h) ۷۹۹/۱۰۳۰ بدست آمده است واین درحالی است که بهترین مقدار بدست آمده با استفاده از روش گزارش شده جغرافیای زیستی(\$/h) ۷۹۹/۱۱۱۶ می‌باشد که بخوبی کارآیی الگوریتم PSO-NM در حل مسئله پخش بار بهینه نشان داده شده است. نمودار همگرایی حداقل نمودن تابع هدف یا مجموع هزینه سوخت ژنراتورها در شکل (۴) آورده شده است. لذا، این شکل دقت و سرعت بالای الگوریتم PSO-NM را در رسیدن به جواب بهینه نشان می‌دهد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-09]

جدول (۲): نتایج شبیه‌سازی مربوط حالت اول

Control Variable (Pu)	Case study 1						
	PSO-NM	BBO [13]	DE [11]	PSO [15]	Improved GA[8]	MDE [12]	Gradient method[13]
P_1	**1.77015**	1.770177	1.762592	1.7696	1.77594	1.75974	1.87219
P_2	**0.48641**	0.486410	0.485602	0.4898	0.48722	0.48884	0.53781
P_5	**0.21239**	0.212390	0.213402	0.2130	0.21454	0.21510	0.16955
P_8	**0.21136**	0.211360	0.220553	0.2119	0.20954	0.22240	0.11288
P_{11}	**0.11944**	0.119440	0.117785	0.1197	0.11768	0.12251	0.11287
P_{13}	**0.12054**	0.120540	0.120217	0.1200	0.12052	0.12000	0.13355
V_1	**1.1000**	1.1000	1.0999	1.0855	1.081	1.0500	1.10
V_2	**1.0876**	1.0876	1.0890	1.0653	1.063	1.0382	1.08
V_5	**1.0614**	1.0614	1.0659	1.0333	1.034	1.0113	1.03
V_8	**1.0695**	1.0695	1.0697	1.0386	1.038	1.0191	1.04
V_{11}	**1.0982**	1.0982	1.965	1.0848	1.10	1.0951	1.08
V_{13}	**1.0998**	1.0998	1.996	1.0512	1.055	1.0837	1.08
T_{11}	**1.050**	1.05	1.0429	1.233	1.0	0.9866	1.072
T_{12}	**0.900**	0.90	0.9176	0.9557	0.975	0.9714	1.070
T_{15}	**0.990**	0.99	1.0190	0.9724	0.975	0.9972	1.032
T_{36}	**0.970**	0.97	0.9836	0.9728	1.0	0.9413	1.068
Q_{c10}	**0.050**	0.05	0.045453	0.0335	0.001	NA	0.00692
Q_{c12}	**0.050**	0.05	0.044158	0.0220	0.007	NA	0.00046
Q_{c15}	**0.050**	0.05	0.041734	0.0198	0.019	NA	0.00285
Q_{c17}	**0.050**	0.05	0.025171	0.0315	0.024	NA	0.0287
Q_{c20}	**0.050**	0.05	0.20916	0.0454	0.015	NA	0.00208
Q_{c21}	**0.050**	0.05	0.041990	0.0381	0.022	NA	0.00
Q_{c23}	**0.040**	0.04	0.025527	0.0398	0.047	NA	0.0033
Q_{c24}	**0.050**	0.05	0.043812	0.0500	0.047	NA	0.00938
Q_{c29}	**0.030**	0.03	0.027503	0.02510	0.024	NA	0.00269
Fuel Cost ($/h)	**799.1030**	799.1116	799.2891	800.41	800.805	802.376	804.853
Power Loss (MW)	**8.642**	8.63	8.629	-	-	9.459	10.486



شکل (۴): نمودار همگرایی تابع هدف برای حالت اول

۴-۲- حالت دوم: حداقل نمودن هزینه سوخت بهمراه بهبود پروفیل ولتاژ

در صورتیکه در حل مسئله OPF تنها حداقل کردن هزینه سوخت ژنراتورها مدنظر قرار گیرد این احتمال وجود دارد که حل بهینه بدست آمده پروفیل ولتاژ مناسبی را نتیجه ندهد، بنابراین در این بخش تابع هدف در نظر گرفته شده دارای دو قسمت می‌باشد، قسمت اول مربوط به هزینه سوخت ژنراتورها و قسمت دوم به منظور بهبود پروفیل ولتاژ به تابع هدف اضافه شده است که بصورت حداقل نمودن انحراف ولتاژ باس‌های بار از مقدار مرجع ۱ پریونیت منظور می‌شود. لذا تابع هدف در نظر گرفته شده از رابطه (۲۶) پیروی می‌کند.

$$F = \sum_{i=1}^{G_N} a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 + w \sum_{j=1}^{N_L} |V_j - 1.0| \quad (۲۶)$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-09]

در این حالت ضرایب هزینه سوخت همانند حالت اول در نظر گرفته شده است. در رابطه مذکور، w ضریب وزنی بوده که تعادل بین دو تابع هدف را برقرار می‌سازد و از غلبه کردن یک تابع هدف بر دیگری جلوگیری می‌کند. در این مقاله w با توجه به مرجع [۱۳] برابر۱۰۰ انتخاب شده است. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از روش پیشنهادی PSO-NM در جدول (۳) نشان داده شده است. همچنین این نتایج با نتایج حاصل ا ز روش‌های BBO، PSO و DE مقایسه شده است. هزینه سوخت ژنراتورها و انحراف ولتاژ باسها با استفاده از روش پیشنهادی (\$/h) ۸۰۳/۸۶۱۵ و (pu) ۰/۰۹۷۶۴ بدست آمده است که بهترین هزینه سوخت ژنراتورها و انحراف ولتاژ باسها را که با استفاده از روش جغرافیای زیستی BBO (\$/h) ۸۰۴/۹۹۸۲ و (pu) ۰/۱۰۲۰ می‌باشد را به ترتیب بمیزان ۰/۱۴۱٪ و ۴/۲۷٪ کاهش داده است.

جدول (۳): نتایج شبیه‌سازی مربوط حالت دوم

Control Variable (Pu)	Case Study 2			
	PSO-NM	BBO [13]	PSO[15]	DE [11]
P_1	**1.76082**	1.734298	1.7368	1.831277
P_2	**0.49302**	0.4906	0.4910	0.474435
P_5	**0.21995**	0.2177	0.2181	0.187281
P_8	**0.21650**	0.2327	0.2330	0.161515
P_{11}	**0.12234**	0.1384	0.1388	0.118855
P_{13}	**0.12015**	0.1198	0.1200	0.165050
V_1	**1.0389**	1.0272	0.0142	1.0490
V_2	**1.0230**	1.0088	1.0022	1.0335
V_5	**1.0074**	1.0145	1.0170	1.0117
V_8	**1.0111**	1.0092	1.0100	1.0043
V_{11}	**1.0389**	1.0510	1.0506	1.0432
V_{13}	**0.9878**	1.0170	1.0175	0.9931
T_{11}	**1.0560**	1.0722	1.0702	1.0439
T_{12}	**0.9000**	0.9000	0.9000	0.9230
T_{15}	**0.9478**	1.0000	0.9954	0.09345
T_{36}	**0.9703**	0.9708	0.9703	0.9616
Q_{c10}	**0.0345**	0.4140	0.0403	0.036479
Q_{c12}	**0.04864**	0.03550	0.0369	0.003806
Q_{c15}	**0.0500**	0.05000	0.0500	0.040931
Q_{c17}	**0.0000**	0.00000	0.0000	0.029372
Q_{c20}	**0.0500**	0.05000	0.0500	0.047958
Q_{c21}	**0.0500**	0.05000	0.0500	0.044684
Q_{c23}	**0.0500**	0.05000	0.0500	0.038162
Q_{c24}	**0.0499**	0.04900	0.0500	0.042009
Q_{c29}	**0.02583**	0.02650	0.0259	0.012597
Fuel cost (\$/h)	**803.8615**	804.9982	806.38a	805.2619
Power loss (MW)	**9.882**	9.95	NA	10.4412
Voltage deviation (pu)	**0.09764**	0.1020	0.0891	0.1357

۴-۳- حالت سوم

حداقل نمودن هزینه سوخت بهمراه بهبود پایداری ولتاژ

۴-۳-۱- در شرایط نرمال

قرار داشتن ولتاژ باس‌ها در محدوده مجاز کاری در شرایط عملکرد نرمال شبکه و هم چنین بعد از وقوع پیشامد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به منظور افزایش پایداری ولتاژ می‌توان از شاخص L استفاده نمود، در این حالت متغیرهای کنترلی شبکه به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که حداکثر شاخص L برای باس‌های بار شبکه حداقل گردد و بدین ترتیب محدوده پایداری ولتاژ افزایش می‌یابد. شاخص L یک کمیت عددی بوده که با استفاده از اطلاعات پخش‌بار معمولی، برای کلیه باس‌های بار شبکه محاسبه می‌شود [۲۳]. به این شاخص در محدوده صفر(حالت بی باری) و یک (حالت وقوع ناپایداری ولتاژ) قرار دارد که برای کلیه باس‌های بار شبکه محاسبه می‌شود. جهت محاسبه شاخص L از اطلاعات شبکه و ولتاژهای بدست آمده از برنامه پخش بار استفاده می‌گردد. جهت محاسبه شاخص L برای یک سیستم قدرت داریم:

$$I_{bus}=Y_{bus}\times V_{bus} \qquad (۲۷)$$

با جداسازی باس‌های PQ و PV معادله (۲۷) را می‌توان به شکل روابط (۲۸) و (۲۹) باز نویسی نمود.

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol12- No.1 Spring & Summer 2015
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-09]

$$\begin{bmatrix} I_L \\ I_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 & Y_2 \\ Y_3 & Y_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_L \\ V_G \end{bmatrix} \qquad (۲۸)$$

در روابط بالا V_L، I_L ولتاژها و جریان‌های باس‌های P_Q و I_G،V_G ولتاژها و جریان‌های باس‌های P_V می‌باشند. نهایتا شاخص L به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$L_j = \left| 1 - \sum_{i=1}^{G_N} \gamma_{ji} \frac{V_i}{V_j} \right| \qquad j = 1,2,\cdots,N_L \qquad (۲۹)$$

که γ_{ji} به صورت زیر تعریف می‌گردد

$$\gamma_{ji} = -[Y_1]^{-1} \times [Y_2] \qquad (۳۰)$$

پارامتر L_{max} مقدار حداکثر شاخص L می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌گردد

$$L_{max} = \max(L_j) \quad j = 1,2,\cdots,N_L \qquad (۳۱)$$

جهت افزایش پایداری ولتاژ و دور کردن نقطه کار از نقطه فروپاشی ولتاژ (POC) معادله (۳۱) به معادله (۲۵) اضافه می‌گردد. در این حالت تابع هدف به صورت رابطه (۳۲) تعریف می‌گردد.

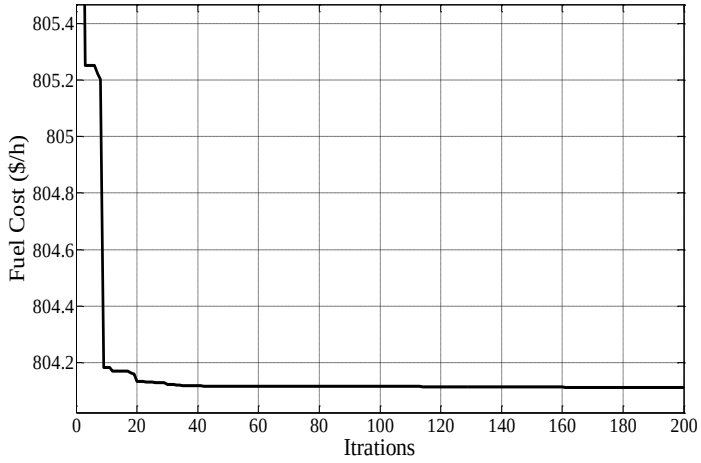
$$F = \sum_{i=1}^{G_N} a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 + w L_{max} \qquad (۳۲)$$

که در آن w رابطه ضریب وزنی بوده و مطابق با مرجع [۱۱,۱۳] برابر۶۰۰۰ در نظر گرفته شده است. همچنین در این حالت ضرایب هزینه سوخت همانند حالت اول در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از روش پیشنهادی PSO-NM در جدول (۴) نشان داده شده است.همچنین این نتایج با نتایج حاصل از روش‌های BBO، PSO و DE مقایسه شده است. هزینه سوخت ژنراتورها و مقدار حداکثر شاخص L با استفاده از روش پیشنهادی (\$/h) ۸۰۴/۱۱۳۷ و (pu) ۰/۱۰۵۱ بدست آمده است. که بهترین هزینه سوخت ژنراتورها و مقدار حداکثر شاخص L را که با استفاده از روش جغرافیای زیستی BBO (\$/h) ۸۰۵/۷۲۵۲ و (pu) ۰/۱۱۰۴ می‌باشد را به ترتیب بمیزان ۰/۲۰٪ و ۴/۸۰٪ کاهش داده است. که کارایی الگوریتم PSO-NM را در مینیمم کردن تابع هدف را نشان می‌دهد. نمودار همگرایی تابع مجموع هزینه سوخت ژنراتورها درشکل (۵) نشان داده شده است.

جدول (۴): نتایج شبیه‌سازی مربوط حالت سوم

Control Variable (Pu)	Case Study 3(normal)				Case Study 3(contingent)	
	PSO-NM	BBO [13]	DE [11]	PSO[15]	**PSO-NM**	DE [11]
P_1	**1.680**	1.752686	1.716553	1.7553	**1.70047**	1.8556
P_2	**0.4581**	0.48265	0.489937	0.4798	**0.45873**	0.3857
P_5	**0.2000**	0.21375	0.222895	0.2092	**0.21148**	0.1835
P_8	**0.3500**	0.19817	0.210117	0.2450	**0.33994**	0.2612
P_{11}	**0.1115**	0.1354	0.173254	0.1151	**0.10028**	0.1010
P_{13}	**0.1200**	0.15411	0.124386	0.1200	**0.12130**	0.1578
V_1	**1.075**	1.0669	1.0777	1.0891	**1.09762**	1.0954
V_2	**1.061**	1.0390	1.0668	1.0693	**1.09272**	1.0894
V_5	**1.043**	1.0157	1.0828	1.0464	**1.08198**	1.0876
V_8	**1.045**	0.9886	1.0875	1.0465	**1.06228**	1.0996
V_{11}	**1.10**	1.0880	1.0597	1.0277	**1.08418**	1.0961
V_{13}	**1.088**	1.0018	1.0191	1.0294	**1.09836**	1.0551
T_{11}	**0.900**	0.9900	0.9032	0.9694	**0.94030**	0.9684
T_{12}	**1.100**	1.1000	0.9656	0.9238	**0.90073**	1.0226
T_{15}	**0.900**	1.1000	0.9181	0.9467	**0.94997**	0.9373
T_{36}	**0.909**	0.9000	0.9147	0.9820	**0.92938**	0.9147
Q_{c10}	**0.050**	0.05000	0.017913	0.0162	**0.04996**	3.4580
Q_{c12}	**0.050**	0.05000	0.045849	0.0424	**0.03263**	1.0405
Q_{c15}	**0.050**	0.05000	0.019791	0.0256	**0.04994**	3.8668
Q_{c17}	**0.040**	0.05000	0.011993	0.0465	**0.00064**	0.8019
Q_{c20}	**0.050**	0.05000	0.043640	0.0348	**0.04956**	2.3140
Q_{c21}	**0.000**	0.04000	0.048026	0.0500	**0.04956**	4.3131
Q_{c23}	**0.050**	0.05000	0.022490	0.0488	**0.04990**	4.5468
Q_{c24}	**0.050**	0.05000	0.012199	0.0500	**0.00070**	1.1061
Q_{c29}	**0.000**	0.05000	0.008939	0.0500	**0.00004**	1.8337
Fuel cost (\$/h)	**804.1137**	805.7252	807.5272	801.16	**807.5284**	810.2661
power loss(MW)	**8.638**	10.21	10.3142	NA	**9.823**	10.3142
maximum L-index (pu)	**0.1051**	0.1104	0.1219	0.1246	**0.1279**	0.1347

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-09]



شکل (۵) : نمودار همگرایی تابع هدف برای حالت سوم

۴-۳- ۲- در شرایط وقوع پیشامد

در این حالت خارج شدن خط ۶-۲ به عنوان وقوع یک پیشامد در شبکه در نظر گرفته شده است [۱۱, ۸]. حفظ پایداری ولتاژ در این حالت از اهمیت ویژه ای برخوردار می‌باشد لذا جهت بالابردن پایداری ولتاژ، تابع هدف در این حالت نیز مطابق با رابطه (۳۲) در نظرگرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از روش پیشنهادی PSO-NM در جدول (۴) نشان داده شده است. همچنین در این حالت ضرایب هزینه سوخت همانند حالت اول در نظر گرفته شده است.

مجموع هزینه سوخت ژنراتورها و مقدار حداکثر شاخص L با استفاده از روش پیشنهادی ۸۰۷/۵۲۸۴ ($/h) و ۰/۱۲۷۹ (pu) بدست آمده است. همانطور که مشاهده می‌گردد سیستم در این حالت با توجه به شاخص L از پایداری مناسبی برخوردار می‌باشد. همچنین نتایج این روش پیشنهادی با نتایج حاصل از روش تکاملی تفاضلی DE مقایسه شده است. در این راستا با توجه به جدول (۴) مقدار مجموع هزینه سوخت ژنراتورها و مقدار حداکثر شاخص L با استفاده از روش تکاملی تفاضلی ۸۱۰/۲۶۶۱ ($/h) و ۰/۱۳۴۷ (pu) می‌باشد که این مقادیر به ترتیب بمیزان ۰/۳۳٪ و ۵/۰۴٪ توسط روش پیشنهادی کاهش داده شده است.

۴-۴- حالت چهارم: حداقل نمودن تابع هزینه سوخت به صورت تکه‌ای ناهموار

در سیستم‌های قدرت عملی، یک واحد تولیدی ممکن است از منابع سوخت متفاوتی همچون زغال سنگ، گاز طبیعی و نفت استفاده کند، لذا تابع هزینه سوخت این واحدها به شکل توابع درجه دوم تکه‌ای بیان می‌شود.دراین شرایط با یک مسئله بهینه‌سازی غیرمحدب روبرو هستیم که تعداد زیادی نقطه مینیمم محلی دارد. بنابراین حل پخش‌بار بهینه با استفاده از تکنیک‌های کلاسیک در این شرایط با محدویت‌های زیادی روبرو می‌باشد [۱۱]. در این مقاله، هزینه سوخت ژنراتورهای موجود درباس‌های ۱ و ۲ به صورت تکه‌ای ناهموار مطابق رابطه (۳۳) و توابع هزینه سایر ژنراتورها به شکل یک تابع درجه دوم مطابق رابطه (۲۵) در نظر گرفته شده است.

$$f_i = \begin{cases} a_{i1} + b_{i1}P_{Gi} + c_{i1}P_{Gi}^2 & P_{Gi}^{\min} \le P_{Gi} \le P_{Gi,1} \\ a_{i2} + b_{ii2}P_{Gi} + c_{i2}P_{Gi}^2 & P_{Gi,1}^{\min} \le P_{Gi} \le P_{Gi,2} \\ \vdots & \\ a_{ik} + b_{ik}P_{Gi} + c_{ik}P_{Gi}^2 & P_{Gi,k-1}^{\min} \le P_{Gi} \le P_{Gi}^{\max} \end{cases} \quad (۳۳)$$

ضرایب a_{ik}، b_{ik} و c_{ik} ضرایب هزینه i امین ژنراتور برای k امین نوع سوخت را نشان می‌دهند. تابع هدف حداقل نمودن هزینه سوخت به صورت تکه‌ای ناهموار به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$F = \sum_{i=1}^{2} a_{ik} + b_{ik}P_{Gi} + c_{ik}P_{Gi}^2 + \sum_{i=3}^{G_N} a_i + b_iP_{Gi} + c_iP_{Gi}^2 \quad (۳۴)$$

ضرایب هزینه ژنراتور باس‌های ۱ و ۲ (G_1,G_2) مطابق جدول (۵) در نظر گرفته شده است[۱۱]. همچنین ضرایب a_i، b_i و c_i ضرایب هزینه $i \in [3,6]$ امین ژنراتور را نشان می‌دهد که همانند حالت شبیه‌سازی اول در نظر گرفته شده است.

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol12- No.1 Spring & Summer 2015
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-09]

جدول(۵): ضرایب تابع هزینه ژنراتور واحدهای ۱ و ۲

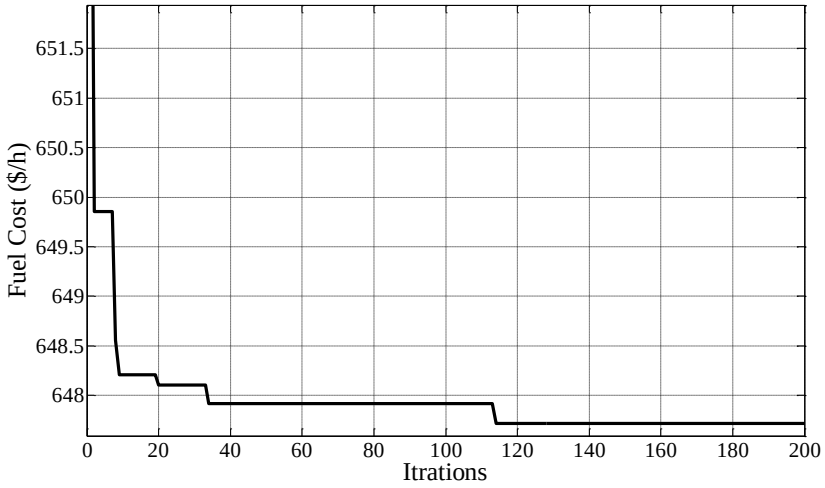
	From	To	Cost Coefficients		
	MW	MW	a	b	c
G1	50	140	55.0	0.70	0.0050
	140	200	82.5	1.05	0.0075
G2	20	55	40.0	0.30	0.0100
	55	80	80.0	0.60	0.0200

نتایج شبیه‌سازی با استفاده از روش پیشنهادی PSO-NM در جدول (۶) نشان داده شده است. همچنین این نتایج با نتایج حاصل از روش‌های BBO، PSO، MDE و DE مقایسه شده است. مجموع هزینه سوخت ژنراتورها با استفاده از روش پیشنهادی (\$/h) ۶۴۷/۷۱۸ بدست آمده است. همچنین این نتایج با نتایج حاصل از روش‌های BBO، PSO، MDE و DE مقایسه شده است. بهترین مجموع هزینه سوخت ژنراتورها با استفاده از روش جغرافیای زیستی BBO (\$/h) ۶۴۷/۷۴۳۷ می‌باشد. همچنین لازم به ذکر است که مجموع هزینه سوخت ژنراتورها با استفاده از روش PSO در مرجع [۱۵] (\$/h) ۶۴۷/۶۹ گزارش شده است اما با توجه به پارامترهای گزارش شده در صورتی که شین (۱) به عنوان شین مرجع در نظر گرفته شده باشد هزینه سوخت ژنراتورها ۷۳۳/۳۱۱۱ می‌باشد و در صورتی که شین (۵) به عنوان شین مرجع در نظر گرفته شده باشد هزینه سوخت ژنراتورها ۶۴۷/۸۳۰۱ می‌باشد [۱۳]. بنابراین مقدار مجموع هزینه سوخت گزارش شده صحیح و قابل استناد نمی‌باشد. همچنین نمودار همگرایی تابع مجموع هزینه سوخت ژنراتورها در شکل (۶) نشان داده شده است.

جدول (۶): نتایج شبیه‌سازی مربوط به حالت چهارم

Control Variable (Pu)	Case Study 4				
	PSO-NM	BBO [13]	PSO[15]	MDE [12]	DE [11]
P_1	**1.4000**	1.40000	1.40000	1.40000	1.399830
P_2	**0.54999**	0.55000	0.5500	055000	0.548249
P_5	**0.24117**	0.241257	0.2415	0.24000	0.257889
P_8	**0.34999**	0.35000	0.3500	0.348331	0.348331
P_{11}	**0.18224**	0.18660	0.1851	0.18044	0.172469
P_{13}	**0.18115**	0.17681	0.1779	0.18462	0.183565
V_1	**1.050**	1.0500	1.0500	1.0500	1.421
V_2	**1.0406**	1.0396	1.0412	1.0400	1.0364
V_5	**1.0152**	1.0133	1.0170	1.0139	1.0080
V_8	**1.0263**	1.0225	1.282	1.0259	1.0070
V_{11}	**1.0990**	1.0722	1.0910	1.940	1.0402
V_{13}	**1.1000**	1.0866	1.0876	1.0773	1.0204
T_{11}	**1.0119**	1.0060	1.0192	0.9714	0.9984
T_{12}	**0.9001**	0.9000	0.9573	1.0046	0.9880
T_{15}	**0.9715**	0.9645	1.120	0.9902	1.0674
T_{36}	**0.9296**	0.9305	0.9503	0.9494	0.9307
Fuel cost (\$/h)	**647.718**	647.7437	647.69	647.846	650.8224
Loss (MW)	**7.058**	7.06	-	7.095	7.6333
maximum L-index (pu)	**-**	-	-	-	-

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-09]



شکل (۶): نمودار همگرایی تابع هدف برای حالت پنجم

۴-۵- حالت پنجم:تابع هزینه درجه دوم بامولفه سینوسی

به منظور نشان دادن تاثیر باز و بستن شیر مخازن سوخت یک مولفه سینوسی نیز به تابع هزینه رابطه (۲۵) اضافه شده است، لذا هزینه سوخت واحد تولیدی iام از رابطه (۳۵) پیروی می-کند.

$$f_i = a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 + |d_i \sin(e_i(P_{Gi}^{min} - P_{Gi}))| \quad (۳۵)$$

ضرایب a_i، b_i، c_i، d_i و e_i ضرایب هزینه iامین واحد تولیدی می‌باشند. هزینه سوخت واحدهای تولیدی اول و دوم (G_1,G_2) به شکل رابطه (۳۵) با ضرایب هزینه موجود در جدول (۷) و هزینه سوخت سایر ژنراتورها مطابق حالت اول در نظرگرفته شده است. همچنین از منابع تزریق توان راکتیو نیز صرفنظر شده است. بنابراین تابع هدف به صورت رابطه(۳۶) در نظر گرفته می-شود.

جدول (۷): ضرایب هزینه ژنراتورهای اول و دوم در حالت پنجم

Bus	P_{Gi}^{min}	P_{Gi}^{max}	Q_{Gi}^{min}	Q_{Gi}^{max}	Cost coefficients				
					a	b	c	d	e
1	50	200	-20	200	150	2	0.0016	50	0.0630
2	20	80	-20	100	25	2.25	0.0100	40	0.0980

$$F = \sum_{i=1}^{2} a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 + |d_i Sin(e_i(P_{Gi}^{min} - P_{Gi}))$$
$$+ \sum_{i=3}^{G_N} a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 \quad (۳۶)$$

نتایج شبیه‌سازی با استفاده از روش پیشنهادی PSO-NM در جدول (۸) نشان داده شده است. مجموع هزینه سوخت ژنراتورها با استفاده از روش پیشنهادی (\$/h) ۹۱۷/۴۲۲۶ بدست آمده است. همچنین این نتایج با نتایج حاصل ا ز روش‌های BBO و MDE مقایسه شده است. مجموع هزینه سوخت ژنراتورها با استفاده از روش جغرافیای زیستی BBO (\$/h) ۹۱۹/۷۶۴۷ می‌باشدکه این مقدار بمیزان ۰/۲۵٪ توسط روش پیشنهادی کاهش یافته است.

جدول (۸): نتایج شبیه‌سازی مربوط به حالت پنجم

Control Variable (Pu)	Case Study 7		
	PSO-NM	BBO [13]	MDE [12]
P_1	**1.98210**	1.9999	1.97426
P_2	**0.5198**	0.37812	0.52037
P_5	**0.1500**	0.20251	0.15000
P_8	**0.1000**	0.14375	0.10000
P_{11}	**0.1000**	0.10035	0.10001
P_{13}	**0.1200**	0.12001	0.12000
V_1	**1.05**	1.500	1.0371
V_2	**1.0326**	1.0358	1.0130
V_5	**0.9500**	1.0086	0.9648
V_8	**0.9500**	1.0137	1.0320
V_{11}	**0.950**	1.0958	1.0982
V_{13}	**1.100**	1.0814	1.0890
T_{11}	**1.0924**	1.0308	1.0969
T_{12}	**0.9000**	0.b91443	1.0909
T_{15}	**0.9279**	0.99142	1.0991
T_{36}	**0.9000**	0.93864	1.0021
Fuel Cost(\$/h)	**917.4226**	919.7647	930.793
Loss(MW)	**13.792**	12.18	13.064

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به منظور حل مسئله پخش بار بهینه با در نظرگرفتن قیود استاتیکی شامل ولتاژ باس‌ها، توان اکتیو و راکتیو خروجی ژنراتورها، تپ ترانسفورماتورها، ظرفیت تجهیزات توان راکتیو و توان عبوری از خطوط، از الگوریتم ترکیبی PSO-NM استفاده شده است، بطوریکه نتایج بدست آمده از اعمال پخش بار بهینه بر روی شبکه ۳۰-bus IEEE کارآیی الگوریتم مذکور را

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-09]

در حل مسئله پخش بار بهینه با وجود توابع هزینه تکه‌ای ناهموار و غیرمحدب نشان می‌دهد. در پروسه بهینه‌سازی، متغیرهای کنترلی شبکه به‌گونه‌ای تنظیم شدند که اهدافی همچون مجموع هزینه سوخت ژنراتورها، انحراف ولتاژ از مقدار مرجع حداقل گردد و پایداری ولتاژ شبکه هم در شرایط نرمال و هم درشرایط اضطراری افزایش یابد.مقایسه نتایج الگوریتم-PSO NM با نتایج حاصل از سایر الگوریتم‌های هوشمند بهینه‌سازی برتری این الگوریتم را در یافتن جواب بهینه کلی مسائل غیرمحدب نسبت به سایر الگوریتم‌ها نشان می‌دهد.

مراجع

[1] Zhang, X. P., Petoussis, S.G., Godfrey, K.R., Nonlinear interior-point optimal power flow method based on a current mismatch formulation, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 152, No. 6 pp. 795-805, 2005.

[2] AlRashidi, M. R., El-Hawary, M. E., Hybrid Particle Swarm Optimization Approach for Solving the Discrete OPF Problem Considering the Valve Loading Effects, IEEE Trans. Power Syst., Vol. 22, No. 4, pp. 2030-2038, 2007.

[3] Wu, F. F., Gross, G., Luini, J. F., Look, P. M., A Two-Stage Approach to Solving Large-Scale Optimal Power Flows, in Proc. IEEE Power Industry Computer Applications Conf 1979.

[4] Momoh, J. A., El-Hawary, M. E., Adapa, R., A Review of Selected Optimal Power Flow Literature to 1993. Part I: Non-Linear and Quadratic Programming Approaches, IEEE Trans. on Power Syst., Vol. 14, No. 1, pp. 96-104, 1999.

[5] Momoh, J. A., El-Hawary, M. E., Adapa, R., A Review of Selected Optimal Power Flow Literature, Part II: Newton, Linear Programming and Interior Point Methods, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 14, No. 1, pp. 105-111, 1999.

[6] Yuryevich, J., Womg , K. P., Evolutionary Programming Based Optimal Power Flow algorithms, IEEE Trans. on Power Syst., Vol.14, No.4, pp.1245-1250, 1999.

[7] Ongsakul, W., Tantimaporn, T., Optimal Power Flow by Improved Evolutionary Programming, Elect. Power Comp. Syst., Vol. 34, No. 1, pp.79-95, 2006.

[8] Lai, L.L., Ma, J.T., Improved genetic algorithms for optimal power plow Under both Normal and contingent operation states, Int. J. Electr. power Energy Syst., Vol. 19, No. 5, pp. 287-292, 1997.

[9] Roa-Sepulveda, C. A., Pavez-Lazo, B. J., A Solution to Optimal Power Flow Using Simulated Annealing , Elect. Power Energy Syst., Vol. 25, No. 1, pp. 47-57, 2003.

[10] Abido, M. A., Optimal Power Flow Using Tabu Search Algorithm, Elect. Power Comp. Syst., Vol. 30, No. 5, pp.469-483,2002.

[11] Abou ElEla, A. A., Abido, M. A., Optimal power flow using differential evolution algorithm, Electr. power Syst. Res., Vol. 80, No. 7, pp. 878-885, 2010.

[12] Abou ElEla, A. A., Abido, Spea, S. R., Differential Evolution Algorithm for Optimal Reactive Power Dispatch, Elect. Power Syst. Res., Vol. 30, No. 7, pp. 878–885, 2010.

[13] Sayah, S., Zehar, K., Modified differential evolution algorithm for optimal power flow with Non-smooth cost functions, Int. J. Energy Convers. Manage. Vol. 49, No. 11, pp.3036-3042, 2008.

[14] Bhattacharya, A., Chattopadhyay, P. K., Application of Biogeography-Based Optimization to Solve Different Optimal Power Flow Problems, IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 5, No. 1, pp. 70-60, 2011.

[15] Abido, M. A., Optimal power flow using particle swarm optimization, proc. Int. J. Electr. power Energy Syst., Vol. 24, No. 7, pp. 563-571, 2002.

[16] M. Aghashabani, J. Milimonfared, A. Kashefi Kaviani, M. Ahabani "A Neural Network-PSO Based Control for Brushless DC Motors for Minimizing Commutation Torque Ripple", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 7, No. 2, 2010.

[17] Onate Yumbla, P. E., Ramirez, J. M., Coello Coello, C. A., Optimal power flow subject to security constraints solved with a particle swarm optimization, IEEE Trans. Power Syst., Vol. 23, No. 1, pp. 33-40, 2008.

[18] Zahara, E., Yi-Tung, K., Hybrid Nelder–Mead simplex search and particle swarm optimization for constrained engineering design problems, Expert Systems with Applications Vol. 36, No. 1, pp. 3880-3886, 2009.

[19] Shu-Kai, S. F., Yun-Chia, L., Zahara, E., genetic algorithm and a particle swarm optimizer hybridized with Nelder–Mead simplex search, Computers & Industrial Engineering Vol. 50, No. 4, pp. 401-425, 2006.

[20] Park, J. B., Lee, K. S., Shin, J. R., Lee, K. Y., A Particle Swarm Optimization for Economic Dispatch with Nonsmooth Cost Functions, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 20, No. 1, pp.34-42,2005.

[21] Kennedy, J., Eberhart, R., Particle Swarm Optimization, Proceedings of IEEE Int. Conference on Neural Netwroks, Vol. 4, No. 1, pp. 1942-1948, 1995.

[22] Afzalan E, Joorabian M. Emission, reserve and economic load dispatch problem with non-smooth and non-convex cost functions using epsilon-multi-objective genetic algorithm variable. Int. J. Elect Power Energy Syst, 52:55–67, 2013.

[23] Kessel, P., Glavitsch, H.: 'Estimating the Voltage stability of a power system', IEEE Trans. Power Deliv., Vol. 1, No. 3, pp. 346-354, 1986.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-09]