

پخش بار بهینه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی یادگیری ردیابی بازگشتی

عبدالعظیم گل پیچی*

*۱- کارشناس ارشد برق، شرکت تعمیر و نگهداری انتقال نیرو خوزستان، اهواز، ایران
Gol_azim@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۵

چکیده: در این مقاله، یک الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی مبتنی بر الگوریتم ردیابی بازگشتی (BSA) و الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری (TLBO) به نام الگوریتم بهینه‌سازی یادگیری ردیابی بازگشتی (LBSA) ارائه شده است. این الگوریتم پیشنهادی یک روش بهینه‌سازی تکاملی با ساختاری ساده و دارای تنها یک پارامتر کنترلی جهت حل مسائل بهینه‌سازی عددی می‌باشد. در این تحقیق پخش بار بهینه با توابع هدف تلفات اکتیو، هزینه سوخت و مقدار آلاینده‌گی واحدهای تولید کننده انرژی الکتریکی و همچنین پروفیل ولتاژ با رعایت قیود مساوی و نامساوی به عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده است. الگوریتم پیشنهادی بر روی شبکه استاندارد اصلاح شده ۳۰ شینه IEEE پیاده‌سازی شده و نتایج حاصل از این روش، تجزیه و تحلیل شده است. نتایج شبیه‌سازی، کارایی و عملکرد مناسب الگوریتم پیشنهادی را در مقایسه با روش‌های دیگر نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم بهینه‌سازی LBSA، پخش بار بهینه، هزینه سوخت، اثر شیر بخار.

۱- مقدمه

ب- روش‌های محاسبات تکاملی
بسیاری از روش‌های کلاسیک مانند روش نیوتن، برنامه‌نویسی درجه دوم، برنامه‌نویسی خطی، برنامه‌نویسی غیرخطی و روش‌های نقطه داخلی برای حل مسئله OPF استفاده شده‌اند [5]. اما OPF یک مسئله بهینه‌سازی غیرمحدب و غیرخطی می‌باشد که دارای پیچیدگی و گسترده‌گی خاص است. همچنین در نظر گرفتن محدودیت‌هایی مانند اثر شیر بخار، مناطق ممنوعه و ... این مساله را پیچیده‌تر کرده است. در نتیجه استفاده از رویکردهای ریاضی در این مساله با نقاط ضعفی مانند عدم سازگاری با خصوصیات مسئله بهینه‌سازی OPF و عملکرد نامناسب در مسائل بهینه‌سازی خاص مواجه شده است.

در چند سال گذشته روش‌های فرا ابتکاری زیادی جهت حل مسائل بهینه‌سازی توسعه یافته‌اند که برخی از این روش‌ها عبارتند از: الگوریتم کلونی زنبور عسل (ABC) [۶]، الگوریتم سیاه‌چاله (BH) [7] الگوریتم بهینه‌سازی بر اساس آموزش و یادگیری (TLBO) [۸]،

پخش بار بهینه (OPF) یکی از ابزارهای پرکاربرد سیستم قدرت از حدود نیم قرن پیش، باقی مانده است. هدف اصلی OPF، کاهش هزینه تولید با تنظیم بهینه متغیرهای کنترلی می‌باشد، در حالی که محدودیت‌های سیستم بر تولید ژنراتور، ظرفیت خط، ولتاژ باس‌ها و تعادل جریان برق باید در نظر گرفته شود [2]. اولین تحقیق جامع در رابطه با پخش بار بهینه توسط هاپ ارائه شد و متعاقباً یک گروه کار IEEE تحقیقی در رابطه با توابع اقتصادی-امنیتی در ۱۹۸۱ ارائه کرد [3]. در سال ۱۹۸۵ کاربنتر تحقیق و دسته بندی الگوریتم‌های OPF بر اساس روش‌های حل آنها را ارائه کرد در ۱۹۹۰ چادهری و همکارانش تحقیقی در رابطه با روش‌های پخش بار اقتصادی انجام دادند. در ۱۹۹۹ موموه و همکارانش خلاصه و مروری بر بعضی از تکنیک‌های انتخاب شده OPF را ارائه دادند [۴]. به طور کلی روش‌های بهینه‌سازی جهت حل OPF به دو دسته تقسیم می‌شوند:

الف- روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک

شده‌اند داده شود. کیفیت یک راه‌حل بستگی به دقت مدل مورد مطالعه دارد. OPF، یک مسئله بهینه‌سازی همراه با تابع هدف و قیود است، که به صورت روابط کلی (۱)، (۲) و (۳) نمایش داده می‌شود:

$$\text{Minf}(x, u) \quad (1)$$

$$\text{st. } g(x, u) = 0 \quad (2)$$

$$h(x, u) \leq 0 \quad (3)$$

که x بردار متغیرهای حالت (متغیرهای وابسته) می‌باشد. این بردار توان ژنراتور مرجع، ولتاژ شین‌های بار، توان راکتیو خروجی ژنراتورها و بار گذاری خطوط انتقال را شامل می‌شود. بنابراین x می‌تواند به صورت رابطه (۴) بیان شود:

$$x^T = [P_{G_1}, V_{L_1}, \dots, V_{L_{NL}}, Q_{G_1}, \dots, Q_{G_{NG}}, S_{L_1}, \dots, S_{L_{nl}}] \quad (4)$$

که nl ، NG ، NL و nl به ترتیب تعداد شین‌های بار، تعداد ژنراتورها و تعداد خطوط انتقال می‌باشند. u بردار متغیرهای کنترلی می‌باشد. متغیرهای عمده کنترلی که معمولاً برای این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل ولتاژ و توان اکتیو خروجی ژنراتورها، تنظیمات تپ ترانسفورماتورها و ظرفیت جبران‌سازهای توان راکتیو می‌باشند که می‌تواند به صورت رابطه (۵) نوشته شود:

$$U^T = [P_{G_2}, \dots, P_{G_{NG}}, V_{G_1}, \dots, V_{G_{NG}}, Q_{C_1}, \dots, Q_{C_{NG}}, T_1, \dots, T_{NT}] \quad (5)$$

که در آن NT ، NC ، NG به ترتیب تعداد ژنراتورها، تعداد جبران‌سازهای توان راکتیو و تعداد ترانس‌های دارای تپ قابل تغییر می‌باشند. f تابعی است که باید بهینه شود. یا به عبارت دیگر تابع هدف است. g مجموعه قیود برابری و h مجموعه قیود نابرابری بر روی متغیرهای حالت و کنترل است.

۲-۱- قیود مساوی

قیود برابری توان‌های شبکه به وسیله معادلات پخش بار طبق روابط (۶) و (۷) ارائه شده‌اند:

$$P_{Gi} - P_{Di} - V_i \sum_{j=1}^N V_j [G_{ij} \cos(\theta_{ij}) + B_{ij} \sin(\theta_{ij})] = 0 \quad (6)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - V_i \sum_{j=1}^N V_j [G_{ij} \sin(\theta_{ij}) + B_{ij} \cos(\theta_{ij})] = 0 \quad (7)$$

بطوریکه N تعداد باس، P_{Gi} و Q_{Gi} توانهای اکتیو و راکتیو تولیدی باس i ام، P_{Di} و Q_{Di} توان‌های اکتیو و راکتیو مصرفی باس i ام، G_{ij} و B_{ij} عناصر ماتریس ادمیتانس، کندوکتانس و سوسپتانس به ترتیب بین باس i و j می‌باشند.

۲-۲- قیود نامساوی

قیود نامساوی ارائه دهنده محدودیت‌ها بر روی تمام متغیرهای سیستم بصورت زیر ارائه می‌شوند:

۲-۲-۱- قیود ژنراتور

برای تمام ژنراتورها همچنین ژنراتور اسلک ولتاژ و توان‌های اکتیو و راکتیو بایستی بین حدود بالا و پایین بصورت روابط (۸)، (۹) و (۱۰) محدود شوند:

الگوریتم لیگ جهانی (LCA) [۹]، الگوریتم جستجوی تفاضلی (DSA) [۱۰]، الگوریتم جستجوی جاذبه‌ای (GSA) [۱۱]، الگوریتم رقابت استعماری (ICA) [۱۲]، الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی گروهی (GSO) [۱۳].

الگوریتم‌های تکاملی انتخاب مناسب برای حل OPF به دلیل قابلیت جستجوی جهانی خود و همچنین توانایی موثر آن‌ها می‌باشند. الگوریتم بهینه‌سازی BSA بعنوان پایه و اساس الگوریتم LBSA توسعه یافته توسط Civicioglu یک الگوریتم ابتکاری جدید جهت حل مسائل بهینه‌سازی عددی می‌باشد که بر مبنای سه عملگر اصلی به نام‌های انتخاب، جهش و ترکیب است [۱۴]. از زمان معرفی این الگوریتم از آن جهت حل مسائل بهینه‌سازی مختلفی استفاده شده است. در مرجع [۱۶] از الگوریتم BSA جهت طراحی بهینه آنتن استفاده شده است. در مرجع [۱۷] برای طراحی پایدار کننده سیستم‌های قدرت (PSS) در سیستم‌های چند ماشینه از الگوریتم BSA استفاده شده است در مرجع [۱۸] از الگوریتم BSA در تخصیص ژنراتور در سیستم‌های توزیع استفاده شده است و در مرجع [۱۹] از الگوریتم LBSA جهت حل مسئله پخش بار اقتصادی با در نظر گرفتن اثر شیر بخار استفاده شده است با این حال با توجه به توابع هدف مختلف نمی‌توان هیچگونه الگوریتمی را در حل مسئله پخش بار بهینه به عنوان بهترین معرفی کرد، به همین دلیل همیشه نیاز به معرفی الگوریتم‌های جدید می‌باشد.

در این مقاله پخش بار بهینه با هدف کاهش تلفات اکتیو، هزینه سوخت و مقدار آلایندگی واحدهای تولیدکننده انرژی الکتریکی و همچنین پروفیل ولتاژ بر روی شبکه استاندارد ارزیابی شده است. و همچنین یک الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی مبتنی بر الگوریتم جستجوی ردیابی بازگشتی (BSA) و الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری (TLBO) به نام الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی یادگیری ردیابی بازگشتی (LBSA) جهت حل مسئله پخش بار بهینه ارائه شده است. نتایج به دست آمده از الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم‌های ازدحام ذرات و بیوگرافی، کارایی این الگوریتم را به اثبات می‌رساند.

در این مقاله ابتدا مسئله و توصیف توابع هدف مطرح شده است و در ادامه الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی یادگیری ردیابی بازگشتی بیان شده است. در بخش پنجم، نتایج حاصل از شبیه‌سازی روی شبکه استاندارد ارائه، بررسی، تجزیه و تحلیل شده و در نهایت نتیجه‌گیری بیان گردیده است.

۲- فرمول بندی مسئله

در مساله پخش بار بهینه، مقادیر بعضی یا همه متغیرهای کنترل برای بهینه ساختن (حداقل یا حداکثر ساختن) یک تابع هدف از پیش تعریف شده، نیاز است که مشخص گردد. همچنین مهم است که در ابتدا تعریف صحیحی از مسئله، همراه با اهدافی که به وضوح بیان

و رسیدن به یک رابطه مفید و واقعی تر می توان از رابطه (۱۶) که دارای یک ترم سینوسی می باشد برای محاسبه هزینه تولید استفاده کرد.

$$F(P_G) = \left(\sum_{i=1}^{NG} \left(a_i + b_i P_{G_i} + c_i P_{G_i}^2 + |e_i \times \sin(f_i \times (P_{G_i}^{min} - P_{G_i}))| \right) \right) \quad (16)$$

که در آن f_i ، e_i و ضرایب هزینه ژنراتور i ام می باشند.

۲-۳-۲- آلودگی

آلاینده های آلوده کننده اتمسفر مانند اکسید گوگرد و اکسید نیتروژن ناشی از واحدهای حرارتی می باشند که از سوخت های فسیلی نظیر زغال سنگ و نفت استفاده می کنند. کمینه کردن این آلودگی ها در سال های اخیر از موضوعات مورد توجه طراحان سیستم بوده است. این آلاینده ها را می شود با استفاده از رابطه (۱۷) بر حسب تن بر ساعت محاسبه کرد:

$$E(P_G) = \sum_{i=1}^{NG} (\alpha_i + \beta_i P_{G_i} + \gamma_i P_{G_i}^2) \quad (17)$$

که در آن α_i ، β_i و ضرایب آلودگی ژنراتور i ام می باشند.

۲-۳-۳- تلفات اکتیو

در واقع تلفات اکتیو انتقال ناشی از مقاومت اهمی هادی های خطوط انتقال می باشد. هر چند این تلفات را نمی توان به صفر رساند ولی با استفاده از پخش بار بهینه و تعیین متغیرهای کنترل به وسیله الگوریتم معرفی شده در تحقیق می توان آن را به حداقل رساند. این تلفات را بصورت ریاضی می توان به شکل رابطه (۱۸) ارائه کرد:

$$P_L = \sum_{k=1}^{nl} G_K [V_i^2 + V_j^2 - 2 |V_i| |V_j| \cos \delta_{ij}] \quad (18)$$

بطوریکه G_K کاندوکتانس k امین خط انتقال بین باس i ام و باس j ام می باشد [19].

۲-۳-۴- پروفیل ولتاژ

ولتاژ باس همواره یکی از مهمترین فاکتورهای کیفیت توان می باشد. مجموع اختلاف ولتاژ باس های بار نسبت به ۱ پریونیت به عنوان پروفیل ولتاژ (VD) معرفی می شود. کمینه کردن پروفیل ولتاژ به عنوان یکی از توابع هدف در این مقاله در نظر گرفته شده است که بصورت رابطه (۱۹) ارائه می شود:

$$VD = \sum_{i=1}^{NL} |V_{L_i} - 1| \quad (19)$$

۳- روش حل مسئله

در این بخش به منظور معرفی روشی جهت حل مسئله این تحقیق، به صورت مبسوط به معرفی الگوریتم بهینه سازی یادگیری ردیابی بازگشتی، پرداخته می شود.

$$V_{i \min} \leq V_i \leq V_{i \max} \quad i = 1.2. \dots . NG \quad (8)$$

$$P_{Gi \min} \leq P_i \leq P_{Gi \max} \quad i = 1.2. \dots . NG \quad (9)$$

$$Q_{Gi \min} \leq Q_i \leq Q_{Gi \max} \quad i = 1.2. \dots . NG \quad (10)$$

۲-۲-۲- قیود ترانسفورماتور

تپ ترانسفورماتورهای دارای تنظیم کننده ولتاژ می بایستی بر روی یک سری تپ های مشخص بین حدود بالا و پایین بصورت رابطه (۱۱) قرار گیرند:

$$T_{i \min} \leq T_i \leq T_{i \max} \quad (11)$$

۲-۲-۳- قیود باس های بار

ولتاژ باس های بار باید بین حدود ولتاژ بالا و پایین بصورت رابطه (۱۲) قرار گیرد:

$$V_{Li \min} \leq V_i \leq V_{Li \max} \quad i = 1.2. \dots . NL \quad (12)$$

۲-۲-۴- قیود خطوط انتقال

توان ظاهری عبوری از خطوط انتقال باید رابطه (۱۳) را برآورده سازد:

$$S_{li} \leq S_{li \max} \quad i = 1.2. \dots . nl \quad (13)$$

۲-۲-۵- قیود جبران سازها

ظرفیت جبران سازها نیز باید بین حدود بالا و پایین بصورت رابطه (۱۴) محدود شود:

$$Q_{ci \min} \leq Q_{ci} \leq Q_{ci \max}, \quad i = 1.2. \dots . NC \quad (14)$$

۲-۳-۳- توابع هدف

در این مقاله جهت شناخت توانایی های الگوریتم پیشنهادی، پخش بار بهینه با پنج تابع هدف مختلف انجام می شود، که این توابع در ادامه معرفی می شوند:

۲-۳-۱- هزینه سوخت

هدف از این تابع، کمینه کردن هزینه سوخت تمام واحدهای حرارتی تولیدکننده انرژی الکتریکی درون شبکه با رعایت تمام قیود مساوی و نامساوی می باشد. هزینه سوخت را می توان با استفاده از رابطه (۱۵) محاسبه کرد.

$$F(P_G) = \sum_{i=1}^{NG} (a_i + b_i P_{G_i} + c_i P_{G_i}^2) \quad (15)$$

که در آن a_i ، b_i و c_i ضرایب هزینه ژنراتور i ام می باشند. در واحدهای بخار تولید انرژی الکتریکی که دارای چندین شیر بخار ورودی به توربین می باشند، برای در نظر گرفتن اثر موقعیت شیر بخار

$$M = P + F \cdot (0.5 \times (oldP - P) + 0.5 \times rand(\cdot) \times (Teacher - P)) \quad (22)$$

عملیات جهش اصلاح شده علاوه بر استفاده از بهترین فرد نسل حاضر، با اجتناب از بدترین فرد نسل حاضر و با انتخاب یک فرد از نسل حاضر بصورت تصادفی می‌تواند جامعه آزمایشی پویاتری که دارای تنوع جمعیتی بهتری است را تولید کند. عملیات جهش اصلاح شده را می‌توان بصورت رابطه‌ی (۲۳) و (۲۴) خلاصه کرد. اگر فرد i ام نسبت به فرد k ام بهتر باشد از رابطه (۲۳) و در غیر این صورت از رابطه (۲۴) استفاده می‌شود:

$$M_{i,j} = P_{i,j} + rand \times (P_{i,j} - P_{k,j}) + rand \times (Teacher_{1,j} - P_{i,j}) - rand \times (Worst_{1,j} - P_{i,j}) \quad (23)$$

$$M_{i,j} = P_{i,j} + rand \times (P_{k,j} - P_{i,j}) + rand \times (Teacher_{1,j} - P_{i,j}) - rand \times (Worst_{1,j} - P_{i,j}) \quad (24)$$

$P_{k,j}$ از جمعیت به صورت تصادفی انتخاب شده است. آموزش‌دهنده و بدترین فرد، بهترین و بدترین موقعیت از نسل حاضر می‌باشند.

۳-۱-۴- ترکیب

در LBSA، مقدار اولیه جمعیت آزمایشی از فرآیند جهش بوجود می‌آید و افراد آزمایشی با برآزش بهتر برای تکامل افراد جامعه هدف استفاده می‌شوند. یک ماتریس با داده‌های مقداری صحیح باینری (نگاشت) با اندازه $N \times D$ ، مسیرهای ترکیب الگوریتم LBSA را هدایت می‌کنند. استراتژی ترکیب LBSA در رابطه (۲۵) بیان شده است.

$$V_{i,j} = \begin{cases} P_{i,j} & \text{if } map_{i,j} = 1 \\ M_{i,j} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (25)$$

۳-۱-۵- گزینش ثانویه

در این مرحله، جمعیت نسل بعدی باتوجه به مکانیزم گزینش حریصانه تولید می‌شود. در روش پیشنهادی، برای مسائل کوچک، اگر برآزش v_i نسبت به p_i کوچکتر باشد، p_i جایگزین v_i می‌شود. این فرآیند در رابطه (۲۶) نشان داده شده است. این پنج فرآیند تا رسیدن به شرایط مورد نظر تکرار می‌شوند.

$$P_i^{next} = \begin{cases} V_i & \text{if } f(V_i) \leq f(P_i) \\ P_i & \text{otherwise} \end{cases} \quad (26)$$

۳-۲- روش حل مسئله با استفاده از LBSA

حل مسئله پخش بار بهینه با استفاده از الگوریتم LBSA با توابع هدف هزینه، آلودگی و تلفات اکتیو در محیط نرم افزار متلب شامل مراحل زیر است:

۳-۱- بازگشتی الگوریتم بهینه‌سازی یادگیری ردیابی (LBSA)

الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی یادگیری ردیابی، بازگشتی (LBSA) یک الگوریتم بهینه‌سازی تصادفی بر اساس جمعیت است که اولین بار در سال ۲۰۱۷ توسط آقای دبانوچن و همکارانش ارائه شد. این الگوریتم با استفاده از ترکیب دو الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی ردیابی بازگشتی (BSA) و الگوریتم بهینه‌سازی آموزش یادگیری (TLBO) ساخته شده است. به همین دلیل از لحاظ ساختاری به این دو الگوریتم بسیار شباهت دارد. دو تنوع جمعیتی در الگوریتم LBSA وجود دارد که یکی از آنها جمعیت تکاملی و دیگری جمعیت آزمایشی می‌باشد. جمعیت آزمایشی از برخی اطلاعات پیشین جمعیت تکاملی تشکیل شده است و یک ماتریس جستجوی جهت‌دار توسط دو جمعیت برای بروزسانی موقعیت افراد ایجاد می‌شود. تنها یک پارامتر کنترلی، یعنی نرخ ترکیبی وجود دارد، که تعداد عناصر فردی را کنترل می‌کند.

الگوریتم LBSA شامل پنج فرایند با عنوان‌های: مقدار دهی اولیه، گزینش اولیه، جهش، ترکیب و گزینش ثانویه می‌باشد، که در ادامه هر کدام توضیح داده خواهد شد. تمامی این مراحل در الگوریتم LBSA همانند الگوریتم BSA بنیادی می‌باشد ولی مرحله جهش جهت افزایش قابلیت‌های الگوریتم و سرعت همگرایی بیشتر از الگوریتم TLBO گرفته شده است [20].

۳-۱-۱- مقداردهی اولیه:

جمعیت اولیه (P) و تاریخچه جمعیت ($oldP$) با توجه به رابطه‌های (۲۰) مقداردهی می‌شوند که U توزیع یکنواخت است و low_j و up_j مرزهای پایین و بالای متغیرها بوده و i تعداد افراد جمعیت و j ابعاد افراد جمعیت است.

$$P_{i,j} \sim U(low_j, up_j) \quad (20)$$

$$oldP_{i,j} \sim U(low_j, up_j)$$

۳-۱-۲- گزینش اولیه

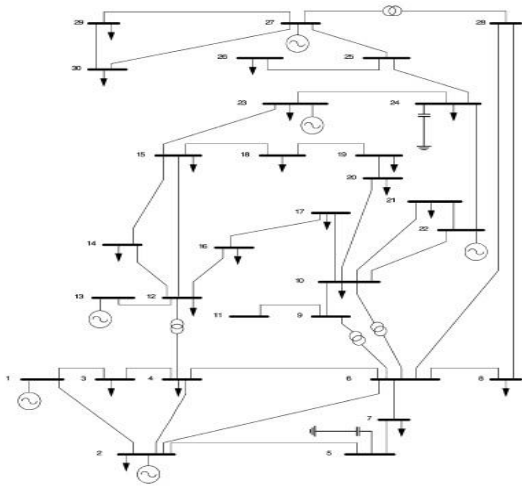
در ابتدا، تاریخچه جمعیت ($oldP$) با توجه به رابطه (۲۱) تولید می‌شوند.

$$oldP = \begin{cases} P & \text{if } (a < b \mid a, b \sim U(0,1)) \\ oldP & \text{otherwise} \end{cases} \quad (21)$$

$$oldP_{i,j} := \text{permuting}(oldP)$$

۳-۱-۳- جهش

فرد اولیه جمعیت آزمایشی با عملیات جهش با استفاده از مزیت تجربیات نسل‌های قبلی و همچنین بهترین فرد نسل حاضر و بوسیله ماتریس جستجوی جهت دار F تولید می‌شود. مقدار مشترک F برابر با $3 \times rand$ است. فرایند جهش طبق رابطه (۲۲) نشان داده می‌شود:



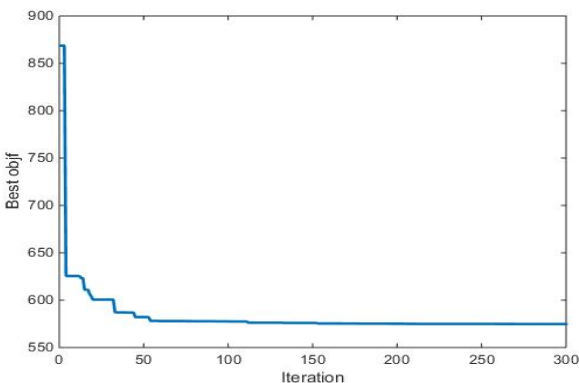
شکل (۱) شبکه استاندارد ۳۰ شینه IEEE

۴- نتایج شبیه‌سازی

الگوریتم پیشنهادی LBSA با توابع هدف هزینه، هزینه با اثر موقعیت شیر بخار، آلودگی، تلفات و پروفیل ولتاژ بصورت تک هدفه روی شبکه استاندارد ۳۰ شینه IEEE در محیط نرم افزار متلب اجرا و نتایج ارائه شده است.

۴-۱-۴ نتایج شبیه سازی با تابع هدف هزینه

در این حالت، تابع هدف جهت بهینه‌سازی هزینه تولید واحدهای حرارتی تولید کننده انرژی الکتریکی شبکه مورد مطالعه می‌باشد که ضرایب هزینه و سایر مشخصات آنها در جدول (۳) آورده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی شامل مقادیر توابع هدف به همراه مقادیر متغیرهای کنترلی در جدول (۲) آورده شده است. نمودار همگرایی تابع هدف بدست آمده از شبیه‌سازی پخش بار بهینه با تابع هدف هزینه در شکل (۲) قابل مشاهده می‌باشد.



شکل (۲) نمودار همگرایی با تابع هدف هزینه

۱- تعیین پارامترهای اولیه شامل: تعداد افراد جمعیت (N)، ابعاد افراد که برابر تعداد متغیرهای کنترلی شبکه مورد مطالعه است (D)، تعداد تکرار، تابع هدف و حدود بالا و پایین متغیرها.

۲- تولید P و oldP طبق روابط.

۳- ارجاع P و oldP به مت پاور جهت حل PF و تعیین مقدار تابع هدف به ازاء هر فرد و انتخاب بهترین و بدترین فرد.

۴- تولید ماتریس صفر و یک map.

۵- تولید جمعیت آزمایشی newP با توجه به ماتریس map.

۶- کنترل درایه‌های ماتریس newP.

۷- ارجاع افراد جمعیت آزمایش newP به مت پاور و حل دوباره PF و تعیین مقادیر تابع هدف به ازاء هر فرد جمعیت

۸- انتخاب P ثانویه از بین P اولیه و newP با توجه به تابع هدف.

۹- تعیین بهترین و بدترین فرد از بین P ثانویه و بروز کردن بهترین و بدترین فرد.

۱۰- برگشت به مرحله ۴ تا پایان تعداد تکرار تعیین شده.

۱۱- انتخاب بهترین فرد به عنوان بهترین راه‌حل و بهترین جواب تابع هدف.

جدول (۱) پارامترهای کنترل کننده الگوریتم LBSA را نشان می‌دهد.

جدول (۱) پارامترهای کنترل کننده الگوریتم LBSA

پارامتر	مقدار تنظیم شده [۱]
تعداد تکرار	۳۰۰
تعداد افراد (N)	۱۰۰
تعداد بعد فرد (D)	۱۷
DimRate	۱ [۲]

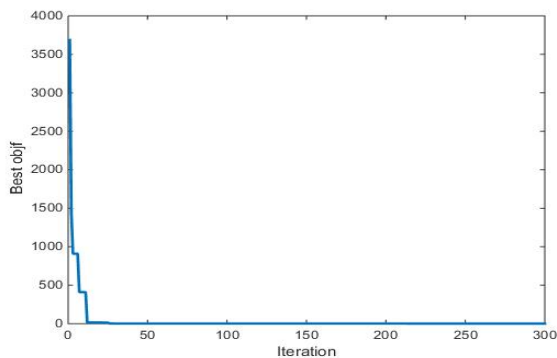
۳-۳- شبکه مورد مطالعه

در این تحقیق از شبکه استاندارد ۳۰ شینه IEEE بعنوان شبکه مورد مطالعه استفاده شده است. این شبکه استاندارد ارائه شده در شکل شماره (۱) شامل شش ژنراتور، ۴۱ خط انتقال، ۴ عدد ترانسفورماتور دارای تنظیم کننده ولتاژ و ۲ دستگاه جبران‌ساز توان راکتیو می‌باشد که بر روی شینه‌های ۵ و ۲۴ قرار گرفته اند. مجموع بار سیستم ۱۸۹/۲ مگاوات و ۱۰۷/۲ مگاوار می‌باشد. اندازه ولتاژ روی باس‌های ژنراتور بین ۰/۹۵ تا ۱/۱ و باس‌های بار بین ۹/۰ تا ۱/۰۵ می‌باشد. اندازه ولتاژ روی ترانسفورماتورهای دارای تنظیم کننده ولتاژ بین ۰/۹ تا ۱/۰۵ می‌باشد، که این تغییرات باید با پله‌های ۰/۰۱ پیرونیته انجام شود. ظرفیت جبران‌سازهای توان راکتیو باید بین ۰ تا ۴۰ مگاوار باشد و تغییرات ظرفیت جبران‌سازها باید با پله‌های ۱ مگاوازی انجام شود.

در شکل (۴) می‌توان نمودار همگرایی با تابع هدف آلودگی را مشاهده کرد. همگرا شدن مقدار تابع هدف در تکرار های اول نشان از توانایی الگوریتم ارائه شده در همگرا شدن به سمت مقادیر بهینه متغیرهای کنترلی و تابع هدف دارد.

۴-۴ - نتایج شبیه سازی با تابع هدف تلفات اکتیو

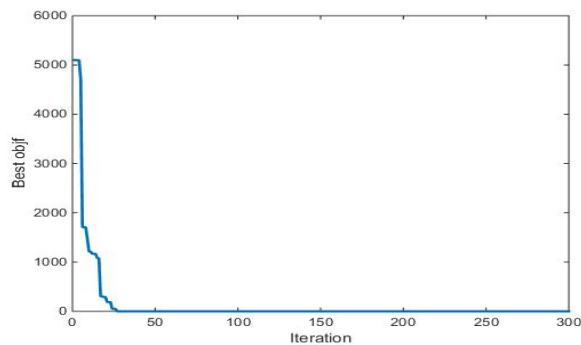
در این حالت مجموع تلفات اکتیو خطوط انتقال شبکه استاندارد ۳۰ شینه IEEE به عنوان تابع هدف جهت پخش بار بهینه در نظر گرفته شده است. در جدول (۲) نتایج شبیه سازی حاصل از الگوریتم LBSA ارائه شده است. ملاحظه می‌شود مقدار تابع هدف در این حالت نسبت به سایر حالات مقدار کمتری دارد همچنین نمودار همگرایی تابع هدف در شکل (۵) ارائه شده است.



شکل (۵) نمودار همگرایی با تابع هدف تلفات اکتیو

۴-۵ - نتایج شبیه سازی با تابع هدف پروفیل ولتاژ

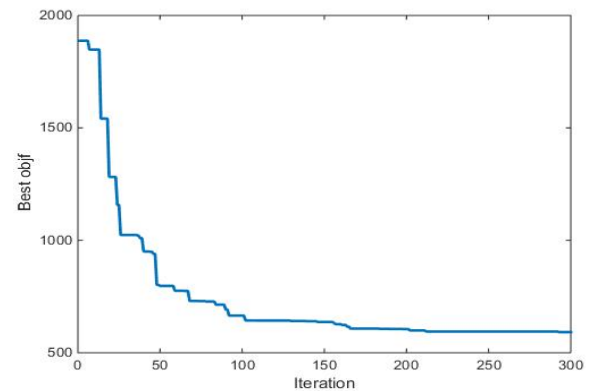
در این حالت پروفیل ولتاژ بعنوان تابع هدف جهت بهینه سازی در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی با این تابع، در جدول شماره (۲) آورده شده است. در این حالت مشاهده می‌شود که ولتاژ باس های بار به سمت یک پریونیت بسیار نزدیک شده است، هر چند که هزینه و آلودگی افزایش داشته‌اند. نمودار همگرایی این تابع هدف در شکل (۶) و همچنین نمودار اندازه ولتاژ باسها در شکل (۷) قابل مشاهده می‌باشند.



شکل (۶) نمودار همگرایی با تابع هدف پروفیل ولتاژ

۴-۲ - نتایج شبیه سازی با تابع هدف هزینه با اثر شیر بخار

در این حالت تابع هدف جهت بهینه سازی هزینه تولید با در نظر گرفتن اثر شیر بخار می‌باشد که باید از رابطه (۱۶) جهت بدست آوردن هزینه استفاده کرد. نتایج حاصل از شبیه سازی در جدول (۲) آورده شده است. مشاهده می‌شود که هزینه نسبت به حالتی که اثر شیر بخار در نظر گرفته نمی‌شود افزایش داشته است. در شکل (۳) نمودار همگرایی تابع هدف هزینه با در نظر گرفتن اثر شیر بخار را می‌توان مشاهده کرد.

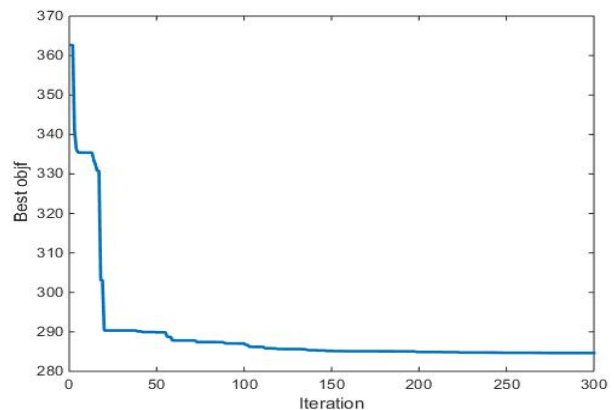


شکل (۳): نمودار همگرایی تابع هدف هزینه با اثر شیر بخار

۴-۳ - نتایج شبیه سازی با تابع هدف آلاینده‌گی

در این حالت آلودگی حاصل از واحدهای حرارتی تولید کننده انرژی الکتریکی شبکه استاندارد ۳۰ شینه IEEE به عنوان تابع هدف جهت بهینه سازی در نظر گرفته شده است. ضرایب آلودگی واحدهای حرارتی را می‌توان در جدول (۳) مشاهده کرد.

در جدول (۲) نتایج حاصل از بهینه سازی با تابع هدف آلودگی را می‌توان مشاهده کرد. ملاحظه می‌شود که در این حالت آلودگی نسبت به سایر حالتها کمتر می‌باشد در صورتی که مقدار هزینه و مقادیر سایر توابع هدف افزایش داشته است.



شکل (۴) نمودار همگرایی با تابع هدف آلودگی

جدول (۲) نتایج حاصل از الگوریتم LBSA با توابع هدف مختلف

تابع هدف	هزینه	هزینه با اثر شیر بخار	آلودگی	پروفیل ولتاژ	تلفات
Pg1	۴۲/۲۴	۴۷/۱۲۵	۲۵/۴۳۲	۴۷/۴۱۸	۷/۴۱۴۱
Pg2	۵۶/۸۴	۵۷/۱۰۳	۲۸/۹۴۱	۳۵/۰۶۳	۵۲/۷۹۴
Pg3	۲۳/۴۴	۲۹/۹۱۳	۳۳/۵۳۳	۳۲/۸۷۲	۴۰/۴۷۵
Pg4	۳۵/۸۳	۳۱/۳۷۰	۴۴/۱۵۳	۴۵/۳۵۱	۳۳/۷۶۸
Pg5	۱۵/۲۰۶	۱۷/۹۵۶	۲۶/۴۲۸	۲۰/۱۱۷۷	۱۶/۳۴۷
Pg6	۱۸/۰۲۵	۸/۹۸۸	۳۲/۷۷	۱۱/۰۱۴	۴۰
V1	۱/۰۲۲	۱/۰۱۲۴	۱/۰۲۶۶	۱/۰۱۸	۱/۰۲۱۳
V2	۱/۰۱۷	۰/۹۹۵۳	۱/۰۱۹۶	۱/۰۲	۱/۰۲۱۹
V22	۱/۰۴۶	۱/۰۱۸۲	۱/۰۱۱۵	۱/۰۰۶	۱/۰۴۶۷
V27	۱/۰۵۹	۱/۰۵۹۶	۱/۰۲۵۲	۱/۰۲۵	۱/۰۵۷۸
V23	۱/۰۴۹	۱/۰۳۷۱	۱/۰۲۶۶	۱/۰۱۵	۱/۰۴۸۶
V13	۱/۰۹	۱/۰۰۸۹	۱/۰۶۴۷	۱/۰۴۸	۱/۰۹۷۷
Qc5	۶/۰	۱۷	۹/۰	۰/۹۹۲	۵/۰
Qc24	۹/۰	۲۶	۱۳/۰	۰/۹۴۶	۸/۰
T6-9	۰/۹۵	۰/۹۲۴	۰/۹۸	۱/۰۰۷	۰/۹۵
T6-10	۰/۹۳	۱/۰۵	۱/۰۰	۱/۰۳۵	۰/۹۴
T4-12	۱/۰۱	۰/۹	۱/۰۲	۰	۱/۰۲
T27-2	۱/۰۴	۱/۰۴۶	۱/۰۴	۱	۱/۰۴
هزینه	۵۴۴/۷۶۶	۵۸۶/۳۱۱	۶۱۴/۵۶۸	۵۹۴/۴۲	۶۳۴/۹۳۴
آلودگی	۳۸۴/۱۶	۴۱۱/۳۵۹	۲۸۴/۶۶۱	۳۴۹/۸۲۲	۳۵۹/۳۹۶
تلفات	۲/۳۹۷	۳/۲۵۶	۲/۰۵۵۳	۲/۶۹۴	۱/۵۹۸
VD	۰/۶۹۵۶	۰/۴۰۶۵	۰/۳۹۴۹	۰/۱۳۵۵	۰/۶۲۴۲
زمان	۰/۷۴۲	۰/۷۵۹	۰/۷۱	۰/۷۳۹	۰/۶۹۶

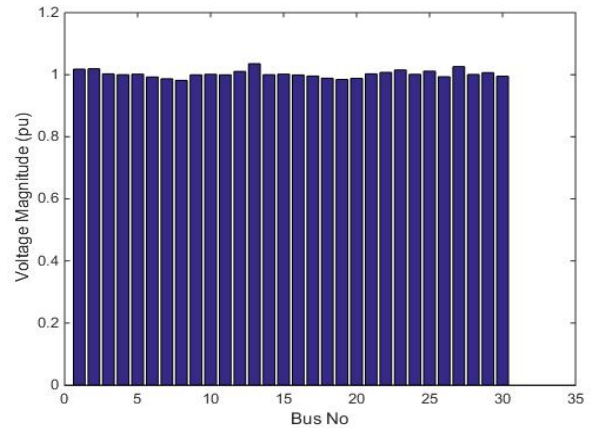
جدول (۳): ضرایب هزینه و آلودگی واحدهای حرارتی

Gen no	Pmin	Pmax	a	b	c	E	f	alfa	beta	Gama
۱	0	80	۰	۲	۰/۰۲	۳۰۰	۰/۲	۰/۰۴۰۹۱	-۰/۰۵۵۵۴	۰/۰۶۴۹
۲	0	80	۰	۱/۷۵	۰/۰۱۷۵	200	۰/۲۲	۰/۰۲۵۴۳	۰/۰۶۰۴۷	۰/۰۵۶۳۸
۳	0	50	۰	۱	۰/۰۶۲۵	150	۰/۴۲	۰/۰۴۲۵۸	-۰/۰۵۰۴۹	۰/۰۴۵۸۶
۴	0	55	۰	۳/۲۵	۰/۰۰۸۳۴	100	۰/۳	۰/۰۵۳۲۶	-۰/۰۳۵۵	۰/۰۳۳۸
۵	0	30	۰	۳	۰/۰۲۵	200	۰/۳۵	۰/۰۴۲۵۸	-۰/۰۵۰۹۴	۰/۰۴۵۸۶
۶	0	40	۰	۳	۰/۰۲۵	200	۰/۳۵	۰/۰۶۱۳۱	-۰/۰۵۵۵۵	۰/۰۵۱۵۱

جدول (۴) مقایسه نتایج بدست آمده از الگوریتم LBSA با سایر الگوریتمها

الگوریتم تابع هدف	PSO[19]	BBO[21]	LBSA
هزینه	۵۷۴/۱۴۳	۵۷۴/۱۱۴	۵۷۴/۷۶۶
هزینه با اثر شیر بخار	۶۱۵/۲۵	۵۸۶/۳۱	۵۸۶/۳۱۱
آلودگی	۲۸۲/۲۱۸	۲۸۲/۰۸۹	۲۸۴/۶۶۱
پروفیل ولتاژ	-	-	۰/۱۳۵۵
تلفات	۱/۵۴	۱/۵۲۸	۱/۵۹۸

- [4] Pandya KS, Joshi SK. Survey Opt Power Flow Methods ;2008;0:450-8.
- [5] Frank S, Steponavice I." *Optimal power flow?: a bibliographic survey I.Formulations and deterministic methods*". p. 221-58. 2012.
- [6] Ayan K, Kılıç U, Baraklı B." *Chaotic artificial bee colony algorithm based solution of security and ransient stability constrained optimal power flow*". Int J Electr Power Energy Syst;64:136-47, 2015.
- [7] Boucekara HREH, "Optimal power flow using black-hole-based optimization approach". *Appl Soft Comput J* ;24:879-88 ;2014.
- [8] Boucekara HREH, Abido Ma, Boucherma M, " *Optimal power flow using teaching-learning-based optimization technique*". Electr Power Sys t Res;114:49 ---59, 2014.
- [9] Boucekara HREH, Abido Ma, Chaib aE, Mehasni R,"*Optimal power flow using the league championship algorithm: a case study of the Algerian power system*" Energy Convers Manag;87:58-70,2014.
- [10] Boucekara HRE-H, Abido MA, , " *Optimal power flow using differential search algorithm*", Electr Power Components Syst ;42:1683-99,2014.
- [11] Duman S, Güvenç U, ". *Optimal power flow using gravitational search algorithm*",Energy Convers Manag ;59:86-95,2012.
- [12] Ghasemi M, Ghavidel S, Ghanbarian MM, assrur HR, Gharibzadeh M., "Application of imperialist competitive algorithm with its modifiedtechniques for multi-objective optimal power flow problem: a omparative study". *Inf Sci (Ny)* ;281:225-47, 2014.
- [13] Daryani N, Hagh MT, Teimourzadeh S, ". *Adaptive group search optimization algorithm for multi-objective optimal power flow problem*", *Appl Soft Comput* 38:1012-24 ;2016.
- [14] P. Civicioglu, "Backtracking search optimization algorithm for numerical optimization problems",*Appl. Math. Comput*, Vol. 219(15), pp. ;8121-8144, ;2013.
- [15] Mandal S, Sinha RK, Mittal K, " *omparative analysis of backtrack search optimization algorithm (BSA) with other evolutionary algorithms for global continuous optimization*", *Int J Comput Sci Inf Technol* ;6:3237-41, 2015.
- [16] Civicioglu P, " *Circular antenna array design by using evolutionary search Algorithms*". *Prog Electromagn Res B*;54:265-84, 2013.
- [17] Shafiullah M, Abido MA, Coelho LS, " *Design of robust PSS in multimachine power systems using backtracking search algorithm* ", 2015.
- [18] El-Fergany A, " *Multi-objective allocation of multi-type distributed generators along distribution networks using backtracking search algorithm and fuzzy expert rules*", *Electr Power Components Syst* ;5008:1-16,2015.
- [19] AlRashidi, M. R., & El-Hawary, M. E." *Hybrid particle swarm optimization approach for solving the discrete OPF problem considering the valve point effect*". *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(4), ;2030-2038. 2007.
- [20] Debao Chen a, Feng Zou, Renquan Lu, Peng Wang, "Learning backtracking search optimisation algorithm and its application", *Information Sciences*, Vol. 376, pp. 71-94, 2017.
- [21] P.K. Roy, S.P. Ghoshal, S.S. Thakur," *Biogeography based optimization for multi-constraint optimal power flow with emission and non-smooth cost function* ", *Expert Systems with Applications* , Vol . 37 ,PP. 8221-8228,2010.
- [22] Ray D. Zimmerman CEM-S& D (David) G. MATPOWER. <<http://www.pserc.cornell.edu/matpower/#docsn.d>>.



شکل (۷) نمودار اندازه ولتاژ با تابع پروفیل ولتاژ

با توجه به نتایج بدست آمده از پخش بار بهینه با الگوریتم LBSA با توابع هدف مختلف ارائه شده، در جدول (۴) ملاحظه می شود که نتایج با اختلاف جزئی نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) و الگوریتم بهینه سازی بیوگرافی (BBO) نزدیک می شوند و این نتایج در زمانی به مراتب کمتر از الگوریتم PSO بدست می آیند که این نشان دهنده توانایی الگوریتم LBSA در حل مسئله پخش بار بهینه می باشد.

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق از الگوریتم جدیدی به نام الگوریتم بهینه سازی یادگیری ردیابی بازگشتی (LBSA) جهت حل مسئله پخش بار بهینه استفاده شده است. وجود متغیرهای پیوسته مانند توان و اندازه ولتاژ و متغیرهای گسسته مانند تپ ترانسفورماتورها و ظرفیت جبران سازه های توان راکتیو و همچنین استفاده از توابع هدف مختلف جهت حل مسئله پخش بار بهینه، بر پیچیدگی های مسئله می افزاید. با این وجود نتایج بدست آمده نشان می دهد که این الگوریتم از توانایی بسیار بالایی در مقایسه با سایر الگوریتم ها جهت حل مسئله و در زمانی کمتر برخوردار است. همچنین نمودارهای همگرایی نشان از توانایی این الگوریتم در همگرا شدن به سمت نقاط بهینه را دارد.

مراجع

- بهنام گلستانی، افشین لشکرآرا، "پخش بار اقتصادی نیروگاه های حرارتی با در نظر گرفتن اثر شیر بخار با استفاده از الگوریتم بهینه سازی یادگیری ردیابی بازگشتی"، *مجله هوش محاسباتی در مهندسی برق*، دوره ۸، شماره ۴، صفحه ۱۷-۳۰، زمستان ۱۳۹۶.
- [2] J. Carpentier, "Contribution to the economic dispatch problem"(in French), *Bull. Soc. FranQ. Elect.*, vol. 8, pp. 431-447, August 1962.
- [3] Dommel H. W, Tinney W. F, "Optimal Power Flow Solutions", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1968.

رزومه

عبدالعظیم گل پیچی در دزفول متولد شده است (۱۳۵۹).
تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق -
قدرت از دانشگاه آزاد واحد دزفول (۱۳۸۱) و کارشناسی ارشد
مهندسی برق - قدرت از دانشگاه آزاد واحد دزفول (۱۳۹۶)
سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه مندی ایشان در
زمینه ادوات FACTS، و بهره برداری از سیستم های قدرت
است.

Optimal Power Flow using Learning Backtracking Search Algorithm

Abdol-Azim Gol-Pichi^{1*}

*1- Senior Electrical Engineer, Khuzestan Power Transmission Maintenance and Repairs Company, Ahwaz, Iran, Gol_azim@yahoo.com

Abstract: This paper presents a learning backtracking search algorithm (LBSA) that combines the ideas of TLBO and BSA to solve optimal power flow problem that has both discrete and continuous optimization variables. The proposed method is an evolutionary technique of optimization with simple structure and single control parameter to solve numerical optimization problem. The objective functions are considered as the system real power losses, fuel cost and the gaseous emissions of the generating units and voltage profile. The proposed algorithm is applied on modified IEEE 30 bus test power system in Matlab software and the results obtained are compared with results of other algorithm.

Keywords: LBSA optimization algorithm, optimal power flow, fuel cost, valve point.