



بازآرایی شبکه‌های توزیع به منظور کاهش تلفات با استفاده از الگوریتم ترکیبی NFAPSO-DE

صدیقه جانی پور^۱، صمد نجاتیان^{۲*}، مصیب برناپور^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج

۲- استادیار، مهندسی برق- مخابرات، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج

۳- دانشجوی دکتری مهندسی برق - قدرت، دانشگاه اصفهان، اصفهان

چکیده

بازآرایی شبکه‌های توزیع به منظور کاهش تلفات توان یکی از راه‌های مهم برای ذخیره انرژی الکتریکی است. در این مقاله از الگوریتم تکاملی-ترکیبی جدیدی برای حل مسئله بازآرایی شبکه‌های توزیع استفاده شده است، الگوریتم ارائه شده بر اساس ترکیب الگوریتم جدید اجتماع ذرات تطبیق یافته فازی (NFAPSO) و الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) است که به صورت NFAPSO-DE تعریف می‌شود. به منظور بهره‌گیری از مزایای این دو الگوریتم از جمله قدرت اکتشاف الگوریتم DE و همین‌طور سیستم جستجوی سریع و قابلیت کنترل و تنظیم پارامترهای الگوریتم PSO روش ترکیبی PSO-DE ارائه شده است، این الگوریتم ترکیبی از الگوریتم PSO برای پیدا کردن منطقه جواب بهینه استفاده می‌کند و سپس از ترکیب دو الگوریتم برای پیدا کردن نقطه بهینه استفاده خواهد کرد. از طرفی به این دلیل که الگوریتم PSO به مقادیر پارامترهای خود از جمله ضریب‌وزنی و پارامترهای یادگیری به شدت وابسته است، یک سیستم فازی استفاده شده تا پارامترها را در طول روند جستجو مطابق با هم تنظیم کند. در پایان عملکرد الگوریتم با استفاده از دو سیستم تست ۳۳ و ۶۹ باس IEEE ارزیابی شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که روش ارائه شده بسیار قدرتمند و مؤثر برای دستیابی به جواب بهینه کلی است.

کلیدواژگان: الگوریتم جدید اجتماع ذرات تطبیق یافته فازی (NFAPSO)، الگوریتم تکامل تفاضلی (DE)، بازآرایی شبکه‌های توزیع (DFR)

Distribution feeder reconfiguration for loss reduction with new fuzzy adaptive PSO and DE algorithms

Sedigheh Janipour¹, Samad Nejatian^{2*}, Mosayeb Bornapour³

1-Department of Electrical and Electronic Engineering, Islamic Azad University, Yasouj, Iran

2-Department of Electrical and Electronic Engineering, Islamic Azad University, Yasouj, Iran

3- Department of Electrical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Abstract

Distribution feeder reconfiguration for loss reduction is a very important way to save the electrical energy. This paper proposes a new hybrid evolutionary algorithm to solve the Distribution Feeder Reconfiguration problem (DFR). The algorithm is based on combination of a New Fuzzy Adaptive Particle Swarm Optimization (NFAPSO) and differential evolution algorithm (DE) called NFAPSO-DE. To exploit the advantages of the exploration ability of DE and the high speed search system and the ability to control and adjust the parameters of PSO algorithm, a hybrid PSO-DE method is proposed. The hybrid method uses the PSO to find the region of optimal solution, and then a combination of PSO and DE to find the optimal solution. In other hand, due to the results of PSO algorithm highly depends on the values of their parameters such as the inertia weight and learning factors, a fuzzy system is employed to adaptively adjust the parameters during the search process. Finally, the proposed algorithm is tested on 33 bus and 69 bus distribution test systems. The results of simulation shows that the proposed method is very powerful and effective to obtain the global optimization.

Keywords: New Fuzzy Adaptive Particle Swarm Optimization (NFAPSO), Differential Evolution (DE), Distribution Feeder Reconfiguration (DFR).

۱- مقدمه

شبکه‌های توزیع برای دارا بودن قابلیت اطمینان بالاتر معمولاً به صورت حلقوی طراحی می‌شوند، اما به صورت شعاعی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. این شبکه‌ها به علت سطح ولتاژ پایین و در نتیجه جریان بالا دارای تلفات توان و افت ولتاژ بسیار بالا می‌باشند، در سیستم‌های توزیع شعاعی به منظور کاهش این تلفات می‌توان ساختار اولیه سیستم را تغییر داد و به ساختار جدیدی رسید. در این شبکه‌ها دو نوع کلید وجود دارد: کلیدهایی که در حالت معمول باز^۱ و کلیدهایی که در حالت معمول بسته^۲ هستند، این تغییر ساختار یا همان بازآرایی با باز کردن کلیدهای به صورت عادی بسته (سکشنالایزرها) و بستن کلیدهای در حالت عادی باز (تای سویچ‌ها) انجام می‌شود به گونه‌ای که ساختار شعاعی سیستم باقی بماند و همه‌ی بارها تغذیه شوند [۱، ۲].

مفهوم بازآرایی^۳ شبکه‌های توزیع به منظور کاهش تلفات ابتدا در سال ۱۹۷۵ توسط مرلین و بک معرفی شد [۳]، نویسندگان آن یک مدل بهینه‌سازی خطی ارائه می‌دهند که به کمک روش شاخه و باند گسسته حل می‌شود، در این روش ابتدا تمام کلیدهای شبکه بسته می‌شوند و هر دفعه یک کلید باز می‌شود تا یک آرایش شعاعی جدید حاصل شود به گونه‌ای که تلفات خطوط آرایش جدید کمینه شود. مزیت این ایده آن است که آرایش نهایی شبکه مستقل از حالت اولیه کلیدها می‌تواند تعیین شود، اما از طرفی همگرایی الگوریتم تضمین نشده و به مقدار محاسبات بسیار زیادی برای شبکه واقعی نیاز دارد. پس از آن شیرمحمدی و هانگ همان ایده بالا را توسعه دادند [۴].

در سال‌های اخیر الگوریتم‌های تکاملی به دلیل توانایی آنها در حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده، غیرخطی و گسسته اغلب مورد توجه قرار گرفته‌اند. یکی از پرکاربردترین آنها الگوریتم ژنتیک^۴ است که بر اساس قوانین تکامل و انتخاب طبیعی است. از سال ۱۹۹۰ الگوریتم ژنتیک به‌طور گسترده‌ای به منظور حل مسئله بازآرایی شبکه‌های توزیع مورد استفاده قرار گرفت [۵-۸]. در کنار مزایای فراوان الگوریتم ژنتیک، این الگوریتم دارای سرعت همگرایی پایین و همچنین مراحل زیاد شبیه‌سازی برای پیدا کردن نقطه بهینه است. الگوریتم PSO^۵ در مورد این‌گونه مسائل بهینه‌سازی بهبودهایی نشان داده است، از جمله توانایی جستجوی محلی و عمومی برای پیدا کردن نقطه بهینه با زمان کم محاسبات، الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات الگوریتم نسبتاً جدیدی است که همانند الگوریتم ژنتیک الگوریتمی مبتنی بر جمعیت است و با ایده گرفتن از حرکت جمعی پرندگان یا انواع ماهیان هنگام یافتن غذا، برای یافتن نقطه بهینه جمعیت را به‌روزرسانی می‌کند ولی برخلاف الگوریتم ژنتیک هیچ عملگر تکاملی ندارد [۹-۱۲]. از جمله معایب الگوریتم اجتماع ذرات می‌توان گفت که این الگوریتم با وجود سیستم جستجوی سریع در مسائل با توابع هدف پیچیده اغلب از افتادن در نقطه بهینه محلی و همگرایی سریع در نقطه بهینه محلی رنج می‌برد. در این مقاله برای رفع این مشکل و استفاده از قدرت اکتشاف و عملگر بهینه الگوریتم تکامل تفاضلی از ترکیب این دو الگوریتم با هم استفاده شده است. الگوریتم DE مدل ارتقا یافته الگوریتم ژنتیک است و عملگرهای یکسانی دارند با این تفاوت که در الگوریتم تکامل تفاضلی ابتدا عملگر جهش و سپس تقاطع اعمال می‌شود [۱۳-۱۶] همچنین پژوهش‌های فراوانی برای جایابی و استفاده از منابع تولیدپراکنده

در شبکه‌های توزیع با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی انجام شده است [۱۷].

[۱۸]

بازآرایی شبکه‌های توزیع یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی با متغیرهای عددی پیچیده است، بنابراین این مسائل را نمی‌توان با روش‌های متداول حل کرد، همچنین اکثر الگوریتم‌های بهینه‌سازی پاسخ مناسبی برای حل این مسائل پیدا نخواهند کرد و نقطه بهینه محلی را به جای نقطه بهینه کلی به عنوان پاسخ خروجی در نظر می‌گیرند.

در این مقاله الگوریتم تکاملی ترکیبی جدیدی بر اساس ترکیب دو الگوریتم اجتماع ذرات فازی شده و الگوریتم تکامل تفاضلی برای حل مسئله بازآرایی ارائه شده است. اگر چه الگوریتم PSO برای این مسئله نهایتاً پاسخ مطلوب را به دست خواهد داد اما به دلیل سرعت همگرایی پایین این الگوریتم باید پارامترهای آن به دقت تعیین شوند، مقدار ثابت برای آنها مناسب نخواهد بود، همانند روش بکار رفته در مرجع [۱۹] که الگوریتم چندین بار با مقادیر ثابت مختلف برای پارامترها اجرا شده است. در مرجع [۲۰] با اندکی تفاوت نسبت به مرجع [۱۹] دو پارامتر با مقادیر ثابت و فقط یکی از پارامترها به صورت فازی تطبیق داده شده، در مقاله [۲۱] نیز فقط ضریب وزنی w به‌عنوان ورودی سیستم فازی در نظر گرفته شده است.

در این مقاله با استفاده از یک سیستم فازی همه پارامترها در طول روند جستجو مطابق با هم تنظیم شده‌اند. از طرفی به منظور ترکیب کردن مزایای این دو الگوریتم از جمله: عملگرهای مهم و مؤثر الگوریتم DE، قدرت اکتشاف آن و قابلیت کنترل و تنظیم پارامترهای الگوریتم PSO از ترکیب این دو الگوریتم با هم استفاده شده است، این الگوریتم ترکیبی از الگوریتم PSO برای پیدا کردن منطقه جواب بهینه استفاده می‌کند و سپس از الگوریتم ترکیبی برای پیدا کردن نقطه بهینه استفاده خواهد کرد.

موضوعات ابتکاری مقاله به شرح زیر است:

۱- الگوریتم PSO با وجود مزیت‌های فراوان از جمله روند پیاده‌سازی آسان، تعداد کم پارامترهای تنظیم، و سیستم جستجوی سریع در مسائل با توابع هدف پیچیده اغلب از افتادن در نقطه بهینه محلی رنج می‌برد. در این مقاله برای رفع مشکل همگرایی در نقطه مینیمم محلی و استفاده از قدرت اکتشاف الگوریتم DE از ترکیب این دو الگوریتم با هم استفاده شده است.

۲- به علت سرعت پایین همگرایی در نقطه بهینه کلی و همین‌طور به این دلیل که عملکرد این الگوریتم وابستگی زیادی به پارامترهایش دارد، در اینجا برای رفع این مشکل و بهینه کردن عملکرد الگوریتم، یک سیستم فازی استفاده شده تا پارامترها را در طول روند جستجو مطابق با هم تنظیم کند.

۳- از روش پخش بار پسر و پیشرو استفاده شده است، روش ارائه شده یک تکنیک بهینه برای حل مسئله پخش بار شبکه توزیع سه فاز نامتعادل است که از دو ماتریس جریان شاخه‌ها بر حسب جریان تزریقی باس‌ها و ماتریس ولتاژ باس‌ها بر حسب جریان شاخه‌ها استفاده می‌کند [۲۲].

۲- مسئله بازآرایی شبکه‌های توزیع

بازآرایی شبکه‌های توزیع یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی با متغیرهای عددی پیچیده است، همچنین یک مسئله چند هدفه است شامل اهدافی مانند: کاهش تلفات توان، کاهش تغییرات ولتاژ از مقدار نامی، کاهش

¹ Tie switch
² Sectionalizing switch
³ Reconfiguration
⁴ Genetic Algorithm
⁵ Particle swarm optimization

می‌رسد تا آنکه جواب مورد نظر بدست آید. پارامترهای الگوریتم شامل:

۱- یک ضریب وزنی w

۲- دو ضریب یادگیری C_1 و C_2 که به ترتیب به عنوان "ضریب یادگیری خودی" یا پارامتر شناختی" و "ضریب یادگیری گروهی" یا پارامتر اجتماعی" نامیده می‌شوند.

هر ذره در این فضا دارای پنج خاصیت است: موقعیت، سرعت (جهت حرکت)، بهترین موقعیت تجربه شده، تابع هدف متناظر با آن موقعیت، تابع هدف متناظر با بهترین موقعیت تجربه شده. سرعت و موقعیت با توجه به روابط زیر به روزرسانی می‌شوند:

$$Velocity_i^{k+1} = w * velocity_i^k + c_1 * rand(.) * (p_{best,i}^k - x_i^k) + c_2 * rand(.) * (G_{best} - x_i^k) \quad (9)$$

$$x_i^{k+1} = velocity_i^{k+1} + x_i^k \quad (10)$$

$\overline{p_{best}}(t)$ (بهترین موقعیت تجربه شده برای هر ذره) و $\overline{G_{best}}(t)$ (بهترین موقعیت تجربه شده ذرات در کل همسایگی)، $velocity_i^k$ سرعت ذره i ام در تکرار k ام و $Velocity_i^{k+1}$ سرعت به روزرسانی شده ذره i ام در تکرار $k+1$ ام، x_i^k مکان کنونی ذره i ام در تکرار k ام و x_i^{k+1} مکان به روزرسانی شده ذره i ام در تکرار $k+1$ ام، مقدار $rand(.)$ عددی تصادفی بین ۰ و ۱ است [۲۴، ۲۱].

۴- الگوریتم جدید اجتماع ذرات تطبیق یافته فازی (NFAPSO)

الگوریتم PSO سه پارامتر تنظیم کننده W , C_1 , C_2 دارد که عملکرد الگوریتم را به طور عمده تحت تاثیر قرار می‌دهند. یک ضریب وزنی بزرگ جستجوی عمومی را آسان تر می‌کند، در حالی که ضریب وزنی کوچکتر تلاش می‌کند جستجوی محلی را آسان تر کند. فاکتورهای یادگیری C_1 و C_2 ذرات را به سمت مکان‌های بهینه عمومی و محلی P_{best} و G_{best} هدایت می‌کنند، همان طور که در معادله (۹) نشان داده شده است. از آنجایی که C_1 بیان می‌کند که هر ذره چقدر به تجربه قبلی خود اعتماد دارد آن را پارامتر اطمینان خودی یا پارامتر شناختی گوئیم و همچنین به این دلیل که C_2 بیانگر این است که هر ذره چه مقدار به تجربه جمعی اعتماد دارد آن را پارامتر اجتماعی می‌نامیم. حال اگر $C_1 > C_2$ انتخاب شود ذرات بیشتر به سمت موقعیت بهینه حاصل از تجربه خود P_{best} کشیده می‌شوند تا موقعیت بهینه اجتماعی G_{best} و اگر $C_1 = C_2$ در نظر بگیریم ذرات به سمت موقعیتی می‌روند که بین P_{best} و G_{best} باشد [۲۵، ۲۰].

پارامترهای تنظیم W , C_1 , C_2 اغلب ثابت هستند و یا اینکه به صورت خطی تغییر می‌کنند اما تغییرات این پارامترها به صورت خطی در بسیاری از موارد جواب بهینه‌ای به دست نخواهد داد. طبق تجربه می‌دانیم: ۱- وقتی که بعد از اجرای برنامه مینیمم سازی یک تابع هدف، مقدار بهترین تابع هدف که تاکنون بدست آمده (BF) پایین است، پارامترهای یادگیری بالا و ضریب وزنی پایین ترجیح داده می‌شود، ۲- وقتی که بعد از اجرا تابع هدف برابر مقدار بهینه محلی خود است و همچنین تعداد تولیدات تابع هدف بهبود نیافته (NU) زیاد است، در این شرایط سیستم در مینیمم محلی گیر می‌افتد، بنابراین سیستم باید روی بهره‌برداری از جواب‌ها بیشتر تمرکز کند تا جستجو پس ضریب وزنی باید افزایش یابد و پارامترهای یادگیری کاهش یابند. بر اساس این دانش یک سیستم فازی برای

نامتعادلی بار روی ترانسها و باسها، کاهش تغییرات جریان خطوط، افزایش قابلیت اطمینان شبکه و... در این مقاله هدف اصلی از بازآرایی مینیمم کردن کل تلفات اکتیو شبکه است، و سایر اهداف به عنوان محدودیت در نظر گرفته شده‌اند. تابع هدف مینیمم کردن تلفات توان حقیقی است، که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$f(X) = \sum_{i=1}^N R_i * |I_i|^2 \Rightarrow f(X) = \sum_{i=1}^N R_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i} \quad (1)$$

R_i مقاومت شاخه i ام، P_i و Q_i به ترتیب توان اکتیو و راکتیو عبوری از شاخه i ام، V_i ولتاژ باس i ام و N تعداد کل شاخه‌های شبکه می‌باشد. (۱) محدودیت خطوط توزیع:

$$|p_{ij}^{line}| < |p_{ij,max}^{line}| \quad (2)$$

توان حقیقی عبوری از خطوط و ماکزیمم توان مجاز عبوری از خط i و j را نشان می‌دهد. معادله توان عبوری از خط به صورت زیر است

$$P_i = \sum_{j=1}^{N_{bus}} V_i V_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^{N_{bus}} V_i V_j Y_{ij} \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (4)$$

(۲) محدودیت ولتاژ باسها:

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \quad (5)$$

(۳) حفظ ساختار شعاعی سیستم:

$$M = N_{bus} - N_{source} \quad (6)$$

M تعداد شاخه‌ها، N_{bus} تعداد گره‌ها و N_{source} تعداد منابع است.

(۴) محدودیت جریان فیدرها:

$$|I_{f,i}| \leq I_{f,i}^{max} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

که جریان فیدر و ماکزیمم جریان مجاز فیدر است.

(۵) محدودیت جریان ترانسها:

$$|I_{f,i}| \leq I_{f,i}^{max} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

جریان ترانس و ماکزیمم جریان مجاز ترانس است.

۳- الگوریتم اجتماع ذرات (PSO)

در سال ۱۹۹۵ ابرهارت و کندی با ایده گرفتن از حرکت تجمعی پرندگان یا انواع ماهیان برای یافتن غذا، اقدام به طراحی الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات کردند [۲۳]. این الگوریتم یکی از الگوریتم‌های موفق در زمینه بهینه‌سازی پیوسته و گسسته بوده است. در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های تکاملی، مزیت‌های الگوریتم PSO عبارتند از: محسوس بودن مفاهیم الگوریتم، روند پیاده‌سازی آسان، قابلیت کنترل و تنظیم پارامترهای آن، نیاز به حافظه اندک، قابلیت جستجوی تصادفی سراسری در کل فضای مسئله.

الگوریتم PSO در واقع متشکل از موجوداتی است که آنها را ذره می‌نامیم و در فضای جستجو حرکت می‌کنند. هر ذره مقدار تابع هدف را در موقعیتی که قرار دارد محاسبه می‌کند و سپس با استفاده از بهترین محلی که قبلاً در آن بوده (بهترین تجربه شخصی خود) و همچنین اطلاعات یک یا چند ذره از بهترین ذرات موجود، جهتی (بردار سرعت) را برای حرکت انتخاب می‌کند. پس از انجام حرکت جمعی یک مرحله از الگوریتم به پایان

6 Best Fitness

7 Number Of Generation For Unchanged Best Fitness

جدول ۳: قواعد فازی فاکتور یادگیری C₂

C ₂	NU				
NBF		PS	PM	PB	PR
	PS	PR	PB	PM	PM
	PM	PB	PM	PS	PS
	PB	PM	PM	PS	PS
	PR	PM	PS	PS	PS

در این مقاله از قواعد استنتاج فازی ممدانی استفاده شده است، به عنوان مثال:

IF (NBF is PR) and (NU is PB), THEN (C₁ is PS), (C₂ is PS), (W is PR)

۵- الگوریتم تکامل تفاضلی

الگوریتم تکامل تفاضلی در سال ۱۹۹۵ توسط Storn & Price معرفی گردید [۲۶]. یک الگوریتم مبتنی بر جمعیت است و از جمله الگوریتم‌های تکاملی به حساب می‌آید. در کنار شباهت‌های کلی که الگوریتم تکامل-تفاضلی به سایر الگوریتم‌های تکاملی دارد، شیوه تولید پاسخ‌های جدید در الگوریتم تکامل تفاضلی، یک شیوه منحصر به فرد است.

در الگوریتم‌های تفاضلی، جمعیت جدید با استفاده از عملگرهای تقاطع^۸ و یا جهش^۹ ایجاد می‌شوند. اگر قرار بر استفاده از سه عملگر تقاطع و جهش و انتخاب^{۱۰} به طور همزمان باشد، غالباً ابتدا با استفاده از عملگر تقاطع، فرزندان تولید می‌شوند و سپس عملگر جهش بر روی آن‌ها اعمال می‌شود. در حالی که در الگوریتم تکامل تفاضلی:

* در ابتدا عملگر جهش به منظور تولید یک بردار جهش یافته به کار می‌رود و پس از آن عملگر تقاطع این دو بردار (بردار جهش یافته و بردار اولیه) را ترکیب کرده و یک بردار آزمایشی تولید می‌کند و پس از آن عملگر انتخاب برای تولید یک فرزند استفاده می‌شود.

* اندازه گام جهش از یک تابع توزیع احتمال از قبل شناخته شده نمونه‌گیری نمی‌شود. در الگوریتم تکامل تفاضلی، اندازه گام جهش از تفاضل میان افراد جمعیت فعلی متاثر می‌شود.

تکامل تفاضلی در حالی که شباهت‌هایی با سایر الگوریتم‌های تکاملی دارد اما استفاده از اطلاعات فاصله و جهت از جمعیت فعلی برای پیش بردن عملیات جستجو آن را از سایر الگوریتم‌های تکاملی متمایز کرده است. الگوریتم‌های تکامل تفاضلی اولیه برای مسائل فضای پیوسته به وجود آمدند ولی در ادامه برای مسائل فضای گسسته نیز تعمیم یافتند. کارایی DE متاثر از دو پارامتر کنترلی می‌باشد، ضریب مقیاس‌گذاری، β ، و احتمال ترکیب، p_r .

این الگوریتم شامل مراحل زیر است: مقدار دهی اولیه، ارزیابی تابع هدف، جهش، تقاطع، ارزیابی تابع هدف، انتخاب.

۵-۱- جهش

عملگر جهش DE یک بردار آزمایشی را برای هر فرد از جمعیت با جهش دادن یک بردار هدف و یک تفاضل وزن‌دار تولید می‌کند. این بردار

تنظیم پارامترهای W, C₁, C₂ به عنوان خروجی، متناسب با تغییرات مقدار بهترین تابع هدف (BF) و تعداد تولید برای تابع هدف بهبود نیافته (NU) به عنوان ورودی‌ها، به کار گرفته شده است.

BF عملکرد ذره‌ای را که به عنوان بهترین گزینه جواب انتخاب شده است مورد ارزیابی قرار می‌دهد، مسائل بهینه سازی متفاوت، مقادیر مختلفی از BF دارند. پس برای طراحی الگوریتم FAPSO کاربردی برای رنج وسیعی از مسائل مقادیر BF و NU در بازه [۰,۱] نرمالیزه شده‌اند، یک مثال از نرمالیزه کردن BF در معادله (۱۱) نشان داده شده است.

$$NBF = \frac{BF - BF_{\min}}{BF_{\max} - BF_{\min}} \quad (11)$$

و مقادیر W, C₁, C₂ به صورت زیر محدود می‌شوند [۲۵].

$$0.2 < W < 1.2 \quad 1 < C_1 < 2 \quad 1 < C_2 < 2 \quad (12)$$

۴-۱- ساخت مدل‌های فازی

سیستم‌های فازی، سیستم‌های مبتنی بر دانش یا قواعد می‌باشند؛ قلب یک سیستم فازی یک پایگاه دانش است که از قواعد اگر- آنگاه فازی تشکیل شده است. متغیرهای ورودی سیستم فازی از نوع فازی‌ساز و غیرفازی‌ساز می‌باشند که پیش از خروج از سامانه به عنوان دانسته خروجی باید از چهار مرحله عمده گذرانده شوند. این چهار مرحله شامل: فازی‌ساز، تولید قانون، ترکیب و جمع کردن، و غیرفازی‌ساز است. همچنین ساختار سیستم فازی شامل ۵ مفهوم است:

۱. پایگاه قواعد فازی: شامل قواعد فازی (اگر- آنگاه) می‌باشد، قلب یک سیستم فازی محسوب می‌شود. در این مقاله از قواعد استنتاج فازی ممدانی استفاده شده است.

۲. موتور استنتاج فازی: عملیات منطقی را بر روی قواعد اعمال می‌کند.

۳. فازی‌ساز: مقادیر ورودی را به مقداری متناسب با توصیف زبانی بین (۰, ۱) تبدیل می‌کند.

۴. غیرفازی‌ساز: نتایج خروجی که به صورت فازی است را به فرم متغیرهایی با مقادیر حقیقی تبدیل می‌کند. سه غیرفازی‌ساز داریم: غیرفازی‌ساز مرکز- ثقل، غیرفازی‌ساز میانگین مراکز (مورد استفاده در این مقاله)، غیرفازی-ساز ماکزیمم.

جداول قواعد فازی بکار رفته [۲۵] به صورت زیر است:

جدول ۱: قواعد فازی ضرب وزنی W

W	NU				
NBF		PS	PM	PB	PR
	PS	PS	PM	PB	PB
	PM	PM	PM	PB	PR
	PB	PB	PB	PB	PR
	PR	PB	PB	PR	PR

جدول ۲: قواعد فازی فاکتور یادگیری C₁

C ₁	NU				
NBF		PS	PM	PB	PR
	PS	PR	PB	PB	PB
	PM	PB	PM	PM	PR
	PB	PB	PM	PS	PR
	PR	PM	PM	PS	PR

⁸ Crossover

⁹ Mutation

¹⁰ selection

تکامل تفاضلی با الگوریتم اجتماع ذرات توأم شود و توانایی الگوریتم PSO برای فرار از گیرافتادن در نقطه مینیمم محلی افزایش یابد. به منظور ترکیب مؤثر این دو الگوریتم، الگوریتم تکامل تفاضلی بعد از الگوریتم اجتماع ذرات اعمال شده است [۲۷].

۷- مراحل اصلی الگوریتم ترکیبی

۱. مرحله اول: وارد کردن داده‌ها شامل مقادیر پارامترها، تعداد جمعیت، تعداد تکرارها و...

۲. تولید جمعیت اولیه: PSO یک جمعیت اولیه با مکان و سرعت تصادفی تولید می‌کند، هر ذره معرف یک حالت ممکن از ساختار شبکه است که می‌تواند یک جواب آزمایشی برای حل مسئله بازآرایی باشد.

جمعیت اولیه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$X_i = [Tie_1, Tie_2, \dots, Tie_{Ntie}] \quad (16)$$

$$i = 1, 2, \dots, N \quad (17)$$

X_i متغیر بهینه‌سازی و در واقع تعداد N نقطه‌ای است که به صورت تصادفی در فضای جستجو تولید می‌شود، هر یک از این نقاط معرف یک حالت ممکن از ساختار شبکه است که می‌تواند یک جواب آزمایشی برای حل مسئله بازآرایی باشد. مقادیر تابع هدف به ازای هر کدام از نقاط محاسبه شده و سپس مرتب می‌شوند.

۳. با اجرای برنامه پخش بار، تابع هدف برای هر ذره تخمین زده می‌شود $F_i(X)$. ذره‌ای که کمترین تابع هدف را دارد به عنوان بهترین مکان عمومی انتخاب می‌شود $G_{best}(t)$ و بهترین مکان هر ذره نیز محاسبه می‌شود $P_{best}(t)$.

۴. مکان و سرعت جدید ذرات توسط معادلات (۹) و (۱۰) بدست می‌آیند و پارامترها توسط سیستم فازی مسئله به‌روزرسانی می‌شود.

۵. اگر تکرارها به اتمام نرسیده باشد الگوریتم از مرحله ۳ اجرا می‌شود در غیراین صورت الگوریتم PSO به اتمام می‌رسد.

۶. عملگرهای الگوریتم DE روی همه ذرات اعمال شده و مقادیر الگوریتم DE برای مراحل قبل محاسبه می‌شود، بردارهای بهترین مکان ذرات P_{best} با بردارهای آزمایشی بدست آمده توسط سه عملگر جهش، تقاطع و انتخاب جایگزین می‌شوند.

۷. بهترین مکان عمومی و محلی قبل توسط مقادیر برازندگی جدید به‌روزرسانی می‌شود، و اگر بهتر بودند جایگزین می‌شوند. در اتمام تکرارها بهترین مکان عمومی به همراه تابع هدف آن خروجی مسئله خواهند بود.

۸- شبیه‌سازی و نتایج

در این بخش الگوریتم ارائه شده بر روی دو شبکه تست ۳۳ باس و ۶۹ باس اعمال می‌شود. برای مقایسه بهتر و سنجش عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌ساز در زمینه بازآرایی، برای الگوریتم PSO و DE جمعیت ۲۰ و تعداد تکرارها برای PSO برابر ۱۵۰ و برای DE برابر ۲۰۰ در نظر گرفته شده، و حالت اولیه شبکه به عنوان تعداد متغیرهای بهینه‌سازی برابر ۵ در نظر گرفته شده است. پارامترهای الگوریتم NFAPSO توسط یک سیستم فازی تنظیم می‌شوند، و پارامترهای الگوریتم DE در جدول ۴ آورده شده است.

هدف $X_i(t)$ که مکان کنونی ذره انتخاب شده است پس از آن با انجام جهش توسط بردار آزمایشی، بدین صورت برای تولید فرزند به کار گرفته می‌شود:

$$V_i(t) = X_{i1}(t) + \beta(X_{i2}(t) - X_{i3}(t)) \quad (13)$$

که $\beta \in (0, \infty)$ ضریب مقیاس است و میزان تاثیر تفاضل را کنترل می‌کند.

۵-۲- تقاطع

عملگر تقاطع DE یک ترکیب گسسته از بردار جهش یافته $V_i(t)$ و بردار والد $X_i(t)$ را برای تولید فرزند $U_i(t)$ پیاده سازی می‌کند. انتخاب نقاط برای تولید فرزند به این طریق پیاده سازی می‌شود:

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} U_{ij}(t) = \begin{cases} V_{ij}(t), & \text{if } rand \leq Pr \\ X_{ij}(t), & \text{else} \end{cases} \quad (14)$$

که در آن $x_{ij}(t)$ به زامین عنصر از بردار $X_i(t)$ اشاره می‌کند و Pr مجموعه ای از اندیس‌ها است که متحمل تغییر می‌شوند، یا به معنای دیگر، مجموعه ای از نقاط انتخاب می‌باشد.

۵-۳- انتخاب

از عملگر انتخاب به دو منظور استفاده می‌شود. اول برای مشخص شدن فردی که باید در عمل جهش برای تولید یک بردار آزمایشی به کار رود و دوم به منظور تعیین آنکه کدام یک از والد‌ها و یا فرزندان به نسل بعدی راه یابند.

در الگوریتم DE برای ساختن جمعیت نسل بعد، از روش انتخاب قطعی استفاده می‌شود، در این حالت فرزند به شرطی جایگزین والد خود می‌شود که بهتر از آن باشد، در غیر این صورت والد به نسل بعدی راه می‌یابد. این کار تضمین می‌کند که تابع ارزش میانگین جمعیت بدتر نمی‌شود.

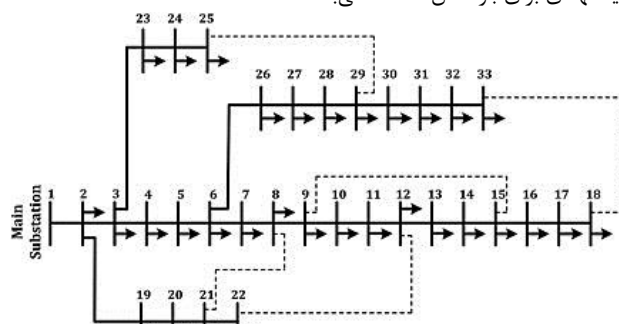
$$X_i^{k+1} = \begin{cases} U_i^k, & \text{if } f(U_i^k) \leq f(X_i^k) \\ X_i^k, & \text{else} \end{cases} \quad (15)$$

۶- الگوریتم ترکیبی NFAPSO-DE

هدف از ترکیب کردن این دو الگوریتم حذف معایب و افزودن مزایای آنهاست. الگوریتم PSO با وجود مزیت‌های فراوان از جمله روند پیاده‌سازی آسان، تعداد کم پارامترهای تنظیم، نیاز به حافظه اندک، قابلیت جستجوی تصادفی سراسری در کل فضای مسئله و... تحت شرایط خاصی عملکرد بهینه خود را از دست می‌دهد و گاهی دچار همگرایی زودرس می‌شود، به‌عنوان مثال: وقتی یک نقطه بهینه محلی بیابد، یا وقتی تنوع جمعیت کم است و یا وقتی سرعت الگوریتم پایین است. بنابراین این الگوریتم به تنهایی بهینه نخواهد بود و باید اصلاح شود [۲۴]. در این مقاله برای رفع مشکل همگرایی سریع در نقطه مینیمم محلی، افزایش تنوع جمعیت و استفاده از قدرت اکتشاف و عملکرد بهینه الگوریتم DE از ترکیب این دو الگوریتم با هم استفاده شده است. از طرفی به این علت که عملکرد این الگوریتم وابستگی زیادی به پارامترهایش دارد و در مسائل با توابع هدف پیچیده اغلب از افتادن در نقطه بهینه محلی و همگرایی سریع رنج می‌برد، برای رفع مشکل وابستگی به پارامترها و بهینه کردن عملکرد الگوریتم، پارامترهای آن توسط یک سیستم فازی تطبیق داده شده است. هدف اصلی از ترکیب این دو الگوریتم این است که عملگرهای الگوریتم

۸-۱- مشخصات شبکه تست ۳۳ باس

این شبکه ۳۳ باس [۲۸]، که به شبکه باران و وئو مشهور است یک شبکه متعادل مشهور در زمینه بازآرایی می‌باشد. این شبکه دارای یک فیدر، ۳۳ باس و ۳۷ شاخه است که ولتاژ شبکه برابر ۱۲/۶۶ کیلوولت و مجموع کل بارهای آن ۳۷۱۵ کیلووات و ۲۳۰۰ کیلوواری است. دیاگرام این شبکه در شکل ۱ نشان داده شده است. در حالت ابتدایی این شبکه، خطوط^{۱۱} ۳۳، ۳۴، ۳۵، ۳۶، ۳۷ باز هستند. تلفات اکتیو و مجموع انحراف از ولتاژ این شبکه به ترتیب برابر با ۲۰۲/۶۶۵ کیلووات و ۰/۰۲۴۶ کیلوولت و حداقل ولتاژ شین آن برابر ۰/۹۳۷ پریونیت می‌باشد. این شبکه دارای ۵ کلید در حالت عادی باز^{۱۲} خواهد بود. پس برای این شبکه به منظور بازآرایی هر رشته دارای ۵ عضو می‌باشد. ابتدا همه‌ی شاخه‌های شبکه به صورت بسته در نظر گرفته می‌شوند و سپس الگوریتم بهینه‌ساز با پیشنهاد تعداد مشخصی از این شاخه‌ها برای باز شدن سعی در بهینه‌سازی توابع هدف مسئله دارد. هر رشته از جواب‌های ممکن مسئله، دارای ۵ جز که کلیدهای پیشنهادی برای باز شدن هستند می‌باشد.



شکل ۱: دیاگرام تک خطی شبکه توزیع ۳۳ باس IEEE

نتایج در سه جدول به صورت مقایسه‌ای آورده شده است، جدول ۵ مقایسه الگوریتم پیشنهادی با دو الگوریتم NFAPSO و DE را ارائه داده است، جدول ۶ مقایسه برای ۲۰ بار اجرای برنامه را نشان می‌دهد، و جدول ۷ مقایسه الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم سایر مقالات معتبر را ارائه داده است.

جدول ۴: پارامترهای الگوریتم DE

Npop	β_{min}	β_{max}	Crossover Rate
۲۰	۰/۳	۰/۸	۰/۲

جدول ۵: نتایج الگوریتم ارائه شده برای شبکه ۳۳ باس

روش	تلفات توان (کیلووات)	Saving %	کلیدهای باز	بدترین ولتاژ (p.u)	باس با کمترین ولتاژ (kV)
حالت اولیه شبکه	۲۰۲/۶۶	---	s33,s34,s35,s36,s37	۰/۹۱۳۰	۱۸
الگوریتم تکاملی	۱۳۹/۷۸	۳۰/۹۸	s7,s9,s14,s28,s32	۰/۹۴۱۲	۳۲
الگوریتم اجتماع ذرات فازی شده	۱۳۹/۹۷	۳۰/۹۳	s7,s9,s14,s28,s32	۰/۹۴۱۲	۳۲
الگوریتم ترکیبی	۱۳۹/۵۳	۳۱/۱۴	s7,s9,s14,s32,s37	۰/۹۳۷۸	۳۲

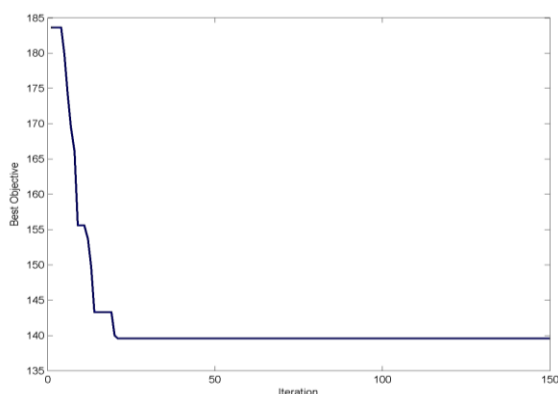
جدول ۶: مقایسه نتایج برای ۲۰ اجرای برنامه برای شبکه ۳۳ باس

Tie lines^{۱۱}
Tie switch^{۱۲}

روش	میانگین مقادیر تابع هدف (KW)	انحراف استاندارد	بدترین مقدار تابع هدف	بهترین مقدار تابع هدف	زمان محاسبه
الگوریتم ترکیبی	۱۳۹/۸۴	۰/۸۰۸۴	۱۴۲/۱۶۳۳	۱۳۹/۵۳	۹/۲۶
الگوریتم اجتماع ذرات فازی شده	۱۴۶/۷۷	۶/۱۱۲۹	۱۶۱/۲۳۶۷	۱۳۹/۹۷	۲۲/۱۹
الگوریتم تکاملی	۱۴۱/۷۱	۲/۴۶۷۶	۱۴۶/۹۲۳۸	۱۳۹/۷۸	۱۰/۶۴

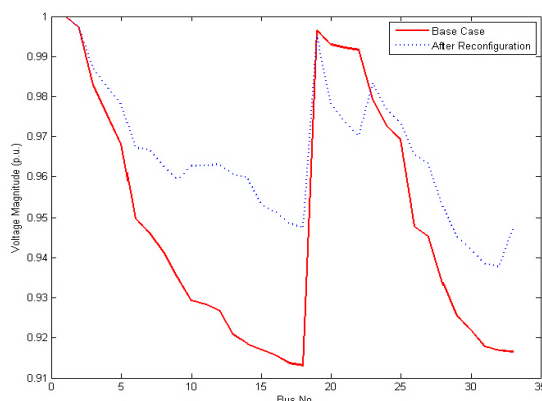
جدول ۷: مقایسه نتایج الگوریتم‌های مختلف برای شبکه ۳۳ باس

روش	کلیدهای باز	Saving%	تلفات توان (کیلووات)
Goswami and Basu [29]	s7, s9, s14, s32, s37	۳۱/۱۴	۱۳۹/۵۳
DcDermott, Drezga [30]	s7, s9, s14, s32, s37	۳۱/۱۴	۱۳۹/۵۳
Shirmohamadi&Hong[4]	s7,s10,s14,s32,s37	۳۱/۱۴	۱۴۰/۲۶
Gomes, Carneiro Jr [31]	s7, s9, s14, s32, s37	۳۱/۱۴	۱۳۹/۵۳
DPSO-HBMO [11]	s7, s9, s14, s32, s37	۳۱/۱۴	۱۳۹/۵۳
DPSO [16]	s7, s9, s14, s32, s37	۳۱/۱۴	۱۳۹/۵۳
PSO-ACO [11]	s7, s9, s14, s32, s37	۳۱/۱۴	۱۳۹/۵۳
HBMO [32]	s7, s9, s14, s32, s37	۳۱/۱۴	۱۳۹/۵۳
PSO-HBMO [33]	s7, s9, s14, s32, s37	۳۱/۱۴	۱۳۹/۵۳
NFAPSO-DE	s7, s9, s14, s32, s37	۳۱/۱۴	۱۳۹/۵۳



شکل ۲: نمودار بهترین تابع هدف بر حسب تعداد تکرار برای شبکه ۳۳ باس با تابع

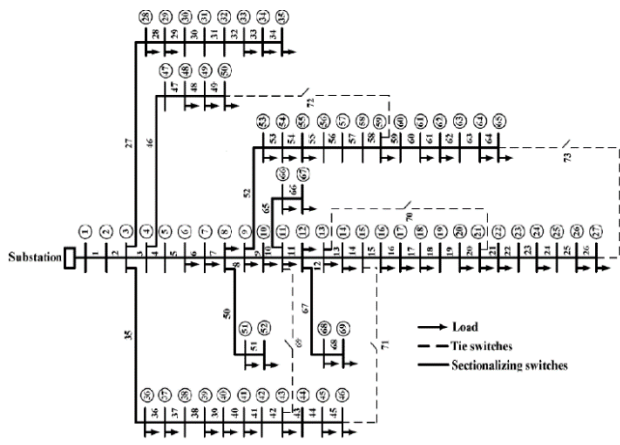
هدف تلفات توان و برای الگوریتم NFAPSO-DE



شکل ۳: نمودار مینیمم ولتاژ شبکه بر حسب شماره باس ها برای شبکه ۳۳ باس

با تابع هدف تلفات توان و برای الگوریتم NFAPSO-DE

با توجه به نتایج به دست آمده در جدول ۵ مشاهده می‌شود که الگوریتم



شکل ۴: دیاگرام تک خطی شبکه ۶۹ باس IEEE

NFAPSO-DE نسبت به الگوریتم NFAPSO و DE عملکرد بهتری ارائه داده و به خوبی تلفات توان را از مقدار ۲۰۲/۶۶ کیلووات به مقدار ۱۳۹/۵۷ کیلووات کاهش داده است. پاسخ الگوریتم PSO نشان می‌دهد که این الگوریتم به سرعت در نقطه مینیمم محلی به دام افتاده، الگوریتم DE نیز قدرت رقابت با الگوریتم ترکیبی ارائه شده را ندارد. در جدول ۶ که نتایج برای ۲۰ بار تکرار برنامه ثبت شده‌اند، همان‌طور که داده‌ها به خوبی نشان می‌دهند الگوریتم ترکیبی نقطه مینیمم عمومی را در زمانی مناسب ۹/۲۶ ثانیه یافته و مقدار انحراف استاندارد آن ۰/۸۰۸۴ پایین است. نتایج جدول ۷ نیز نشان می‌دهد الگوریتم ارائه شده نتایج مناسبی ارائه داده و قدرت رقابت با سایر روش‌های به کار رفته در مقالات معتبر را دارد، در حالی که ناهمگونی‌های زیادی بین نتایج دیگر روش‌ها مشاهده می‌شود، روش به کار رفته در این مقاله نتیجه‌ای مشابه با مقالات مورد تایید داشته است. با توجه به شکل ۲ الگوریتم NFAPSO-DE سریعاً همگرا شده است، تلفات توان را به سرعت از مقدار ۲۰۲/۶۶ کیلووات به مقدار ۱۳۹/۵۷ کیلووات کاهش داده است. همچنین در شکل ۳ مشاهده می‌شود این الگوریتم توانسته در مسئله بازآرایی شبکه با تابع هدف کاهش تلفات توان مقدار مینیمم ولتاژ شبکه را از ۰/۹۱۳۰ پریونیت به مقدار ۰/۹۳۷۸ پریونیت برساند، در واقع سطح ولتاژ نیز بهبود چشم‌گیری داشته هرچند که این مشخصه به‌طور مستقیم در ارتباط با تابع هدف مسئله نبوده است، علت این امر را می‌توان در این دانست که با کاهش تلفات در شبکه در واقع جریان عبوری از خطوط کاهش می‌یابد و در نتیجه افت ولتاژ بر روی امپدانس‌های خطوط کمینه می‌شود و در نتیجه ولتاژ میانگین شبکه بهبود می‌یابد.

جدول ۸: نتایج الگوریتم ارائه شده برای شبکه ۶۹ باس

روش	تلفات توان (کیلووات)	Saving %	کلیدهای باز	بدترین ولتاژ (p.u)	باس با کمترین ولتاژ (kv)
حالت اولیه شبکه	۲۲۴/۹۳	----	s69,s70,s71,s72,s73	۰/۹۰۹۱	۶۵
الگوریتم اجتماع ذرات فازی شده	۱۰۱/۲۶	۵۳/۶۴	s10,s14,s56,s61,s70	۰/۹۴۹۴	۶۱
الگوریتم تکاملی	۹۸/۹۷	۵۵/۹۱	s12,s13,s58,s61,s69	۰/۹۴۹۴	۶۱
الگوریتم ترکیبی	۹۸/۵۸	۵۶/۱۶	s12,s13,s55,s61,s69	۰/۹۴۹۴	۶۱

۸-۲- مشخصات شبکه تست ۶۹ باس

این شبکه توزیع دارای ۶۹ باس و ۷۳ شاخه است، دیاگرام تک خطی آن در شکل ۴ نشان داده شده است. کل بار روی فیدرهای آن برابر با ۳/۸۰۱ مگاوات و ۲/۶۹۴۴ مگاوار است، در حالت ابتدایی شبکه کلیدهای شماره ۶۹، ۷۰، ۷۱، ۷۲ و ۷۳ باز می‌باشند. ولتاژ کاری این شبکه ۱۲/۶۶ کیلوولت، کل توان تلفاتی برابر با ۲۲۴/۹۲ کیلووات، میانگین ولتاژ باس‌های شبکه ۹۷۳۴/۹۷ پریونیت و حداقل ولتاژ شین آن ۹۰۹۱/۹۰ پریونیت می‌باشد. این شبکه دارای ۵ کلید در حالت عادی باز است. پس برای این شبکه به منظور بازآرایی هر رشته از جواب‌های ممکن مسئله، دارای ۵ جز که کلیدهای پیشنهادی برای باز شدن هستند می‌باشد. ابتدا همه‌ی شاخه‌های شبکه به صورت بسته در نظر گرفته می‌شوند و سپس الگوریتم بهینه‌ساز با پیشنهاد تعداد مشخصی از این شاخه‌ها برای باز شدن سعی در بهینه‌سازی توابع هدف مسئله دارد.

جدول ۹: مقایسه نتایج برای ۲۰ اجرای برنامه برای شبکه ۶۹ باس

روش	میانگین مقادیر تابع هدف (kw)	انحراف استاندارد	بدترین مقدار تابع هدف	بهترین مقدار تابع هدف	زمان محاسبه (S)
الگوریتم ترکیبی	۱۰۳/۲۸	۳/۵۵	۱۱۲/۹۱	۹۸/۵۸	۱۱/۸
الگوریتم اجتماع ذرات فازی شده	۱۱۵/۳۸	۸/۹۰	۱۳۰/۲۱	۱۰۱/۲۶	۳۳/۹۸
الگوریتم تکاملی	۱۱۲/۵۹	۷/۵۸	۱۲۷/۶۰	۹۸/۹۷	۱۴/۵

جدول ۱۰: مقایسه نتایج الگوریتم‌های مقالات مختلف برای شبکه ۶۹ باس

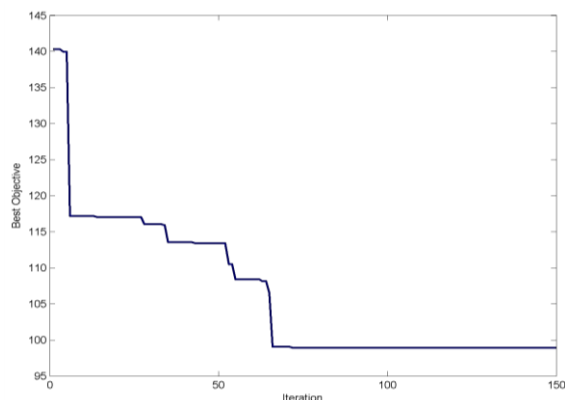
روش	کلیدهای باز	Saving %	تلفات توان (کیلووات)	بدترین ولتاژ (kv)
Chang and kuo[34]	S15,s56,s62,s70,s71	۰/۵۵	۹۹/۹	۰/۹۸۲۴
Jazebi& hosseini[16]	S13,s59,s62,s70,s71	۵۵/۶۴	۹۹/۸	۰/۹۴۲۸
NFAPSO-DE	S12,s13,s55,s61,s69	۵۶/۱۶	۹۸/۵	۰/۹۴۹۴

تایید ارائه داده است. مطابق شکل ۵ الگوریتم NFAPSO-DE سریعاً همگرا شده و تلفات توان را از مقدار ۲۲۴/۹۳ کیلووات به مقدار ۹۸/۵۸ کیلووات کاهش داده، همچنین در شکل ۶ مشاهده می‌شود این الگوریتم توانسته در بازآرایی شبکه با تابع هدف کاهش تلفات توان مقدار مینیمم ولتاژ شبکه را از مقدار ۰/۹۸۲۴ پرینیت به مقدار ۰/۹۴۹۴ پرینیت برساند، بنابراین سطح ولتاژ نیز بهبود چشمگیری داشته، هرچند که این مشخصه به طور مستقیم تابع هدف مسئله نبوده است، علت این امر را می‌توان در این دانست که با کاهش تلفات در شبکه در واقع جریان عبوری از خطوط کاهش می‌یابد و در نتیجه افت ولتاژ بر روی امیدانس‌های خطوط کمینه می‌شوند و در نتیجه ولتاژ میانگین شبکه بهبود می‌یابد.

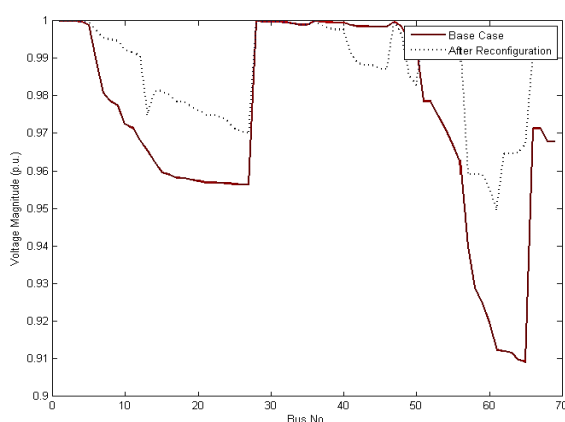
۹- نتیجه‌گیری

بازآرایی شبکه‌های توزیع یکی از روش‌های بسیار مؤثر و کم‌هزینه در زمینه کاهش تلفات توان و بهبود سطح ولتاژ در شبکه‌های توزیع است. در این مقاله الگوریتم تکاملی ترکیبی جدیدی به نام NFAPSO-DE برای حل مسئله بازآرایی شبکه‌های توزیع با تابع هدف کاهش تلفات توان ارائه شده است. عملکرد الگوریتم ترکیبی ارائه شده با استفاده از دو سیستم تست ۳۳ باس و ۶۹ باس IEEE نشان داده شده است و قدرت عملکرد آن با دو الگوریتم NFAPSO و DE و الگوریتم‌های ارائه شده در سایر مقالات مقایسه شده است. با توجه به بررسی نتایج بدست آمده از جداول و نمودارها مشاهده می‌شود که الگوریتم ترکیبی ارائه شده برای هر دو سیستم تست استاندارد عملکرد بسیار مناسب‌تری نسبت به سایر الگوریتم‌ها در رابطه با دستیابی به جواب بهینه کلی، سرعت همگرایی و زمان محاسبات داشته، در زمینه تلفات کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته و مینیمم ولتاژ شبکه را نیز بهبود داده است. بنابراین الگوریتم NFAPSO-DE ارائه شده می‌تواند به صورت مؤثری در حل مسائل بازآرایی شبکه‌های توزیع مورد استفاده قرار گیرد.

در رابطه با نتایج جداول می‌توان گفت که الگوریتم PSO با وجود مزیت‌های فراوان از جمله روند پیاده‌سازی آسان، تعداد کم پارامترهای تنظیم، محاسبات سریع و... عملکرد این الگوریتم وابستگی زیادی به پارامترهایش دارد و همین‌طور با وجود سیستم جستجوی سریع در مسائل با توابع هدف پیچیده اغلب از افتادن در نقطه بهینه محلی و همگرایی سریع رنج می‌برد، از طرفی این الگوریتم به دلیل ذات پیوسته‌ای که دارد برای مسائل گسسته مانند بازآرایی به خوبی عمل نخواهد کرد. در این مقاله برای رفع مشکل وابستگی به پارامترها و بهینه کردن عملکرد این الگوریتم، پارامترهای آن توسط یک سیستم فازی تطبیق داده شده‌اند، همچنین برای رفع مشکل همگرایی سریع در نقطه مینیمم محلی و استفاده از قدرت اکتشاف الگوریتم DE از ترکیب این دو الگوریتم با هم استفاده شده است.



شکل ۵: نمودار بهترین تابع هدف بر حسب تعداد تکرار برای شبکه ۶۹ باس با تابع هدف تلفات توان و برای الگوریتم NFAPSO-DE



شکل ۶: نمودار مینیمم ولتاژ شبکه بر حسب شماره باس‌ها برای شبکه ۶۹ باس با تابع هدف تلفات توان و برای الگوریتم NFAPSO-DE

همان‌گونه که برای شبکه ۳۳ باس توضیح داده شد، با توجه به نتایج به دست آمده در جدول ۸ مشاهده می‌شود که الگوریتم NFAPSO-DE نسبت به الگوریتم NFAPSO و DE عملکرد بهتری داشته و به خوبی تلفات توان را از مقدار ۲۲۴/۹۳ کیلووات به مقدار ۹۸/۵۸ کیلووات کاهش داده است، الگوریتم PSO به سرعت در نقطه مینیمم محلی به دام افتاده و الگوریتم DE نیز قدرت رقابت با الگوریتم ترکیبی را نداشته. در جدول ۹ که نتایج برای ۲۰ بار تکرار برنامه ثبت شده است، همان‌طور که داده‌ها به خوبی نشان می‌دهند الگوریتم ترکیبی نقطه مینیمم عمومی را در زمانی مناسب ۱/۸ ثانیه پیدا کرده و مقدار انحراف استاندارد آن پایین است، با توجه به جدول ۱۰ نیز مشاهده می‌شود که الگوریتم ترکیبی نسبت به سایر روش‌هایی که تاکنون معرفی شده‌اند قدرت رقابت داشته و نتایج مناسبی ارائه شده است. در حالی که ناهمگونی‌های زیادی بین نتایج دیگر روش‌ها وجود دارد روش ارائه شده در این مقاله نتیجه‌ای مشابه با سایر مقالات مورد

X	متغیر بهینه‌سازی
w	ضریب وزنی
C ₂ و C ₁	ضرایب یادگیری
M	تعداد شاخه‌ها
N _{bus}	تعداد گره‌ها
N _{source}	تعداد منابع است

R	مقاومت (Ω)	فهرست علائم
I	جریان (A)	
V	ولتاژ (v)	
P	توان اکتیو (KW)	
Q	توان راکتیو (KVAR)	
Y	ادمیتانس (1/Ω)	

علائم یونانی

θ	زاویه
δ	زاویه
β	ضریب مقیاس گذاری
ρ_r	احتمال ترکیب

نشانه های اختصاری

NU	تعداد تولید برای تابع هدف بهبود نیافته
BF	مقدار بهترین تابع هدف که تاکنون بدست آمده
NBF	مقدار بهترین تابع هدف نرمالیزه شده در بازه [۰,۱]
Pbest	بهترین موقعیت تجربه شده برای هر ذره
Gbest	بهترین موقعیت تجربه شده ذرات در کل همسایگی
rand ()	عددی تصادفی بین ۰ و ۱ است
PSO	الگوریتم اجتماع ذرات
DE	الگوریتم تکامل تفاضلی
ACO	الگوریتم کلونی مورچگان
HBMO	الگوریتم جفتگیری زنبور عسل

۵-منابع

[۱] ع. ا. گلکار، طراحی و بهره برداری از سیستم های توزیع انرژی الکتریکی. ۱۳۷۹.

European Transactions on Electrical Power, Vol. 20, No. 5, pp. 575-590, 2010.

[12] W.-C. Wu, M.-S. Tsai, Application of enhanced integer coded particle swarm optimization for distribution system feeder reconfiguration, *Power Systems, IEEE Transactions on, Vol. 26, No. 3, pp. 1591-1599, 2011.*

[13] C.-T. Su, C.-S. Lee, Network reconfiguration of distribution systems using improved mixed-integer hybrid differential evolution, *Power Delivery, IEEE Transactions on, Vol. 18, No. 3, pp. 1022-1027, 2003.*

[14] J.-P. Chiou, C.-F. Chang, C.-T. Su, Variable scaling hybrid differential evolution for solving network reconfiguration of distribution systems, *Power Systems, IEEE Transactions on, Vol. 20, No. 2, pp. 668-674, 2005.*

[15] A. C. Delbem, A. De Carvalho, N. G. Bretas, Main chain representation for evolutionary algorithms applied to distribution system reconfiguration, *Power Systems, IEEE Transactions on, Vol. 20, No. 1, pp. 425-436, 2005.*

[16] S. Jazebi, S. Hosseinian, B. Vahidi, DSTATCOM allocation in distribution networks considering reconfiguration using differential evolution algorithm, *Energy Conversion and Management, Vol. 52, No. 7, pp. 2777-2783, 2011.*

[17] T. Niknam, M. Bornapour, A. Gheisari, Combined heat, power and hydrogen production optimal planning of fuel cell power plants in distribution networks, *Energy Conversion and Management, Vol. 66, pp. 11-25, 2//, 2013.*

[18] T. Niknam, M. Bornapour, A. Ostadi, A. Gheisari, Optimal planning of Molten Carbonate Fuel Cell Power Plants at distribution networks considering Combined Heat, Power and Hydrogen production, *Journal of Power Sources, Vol. 239, pp. 513-526, 10/1/, 2013.*

[19] H. Fang, L. Chen, Z. Shen, Application of an improved PSO algorithm to optimal tuning of PID gains for water turbine governor, *Energy Conversion and Management, Vol. 52, No. 4, pp. 1763-1770, 2011.*

[20] T. Niknam, H. D. Mojarrad, H. Z. Meymand, A novel hybrid particle swarm optimization for economic dispatch with valve-point loading effects, *Energy Conversion and Management, Vol. 52, No. 4, pp. 1800-1809, 2011.*

[21] E. Farjah, M. Bornapour, T. Niknam, B. Bahmanifirouzi, Placement of combined heat, power and hydrogen production fuel cell power plants in a distribution network, *Energies, Vol. 5, No. 3, pp. 790-814, 2012.*

[22] A. Alsaadi, B. Gholami, An Effective Approach for Distribution System Power Flow Solution, *International Journal of Electrical and Electronics Engineering, Vol. 3, No. 12, pp. 730-734, 2009.*

[23] J. Kennedy, R. Eberhart, Particle swarm optimization, in *Proceeding of, 1942-1948 vol.4.*

[24] M. Bornapour, R.-A. Hooshmand, A. Khodabakhshian, M. Parastegari, Optimal coordinated scheduling of combined heat and power fuel cell, wind, and photovoltaic units in micro grids considering uncertainties, *Energy, Vol. 117, Part 1, pp. 176-189, 12/15/, 2016.*

[25] [T. Niknam, E. Azadfarsani, M. Jabbari, A new hybrid evolutionary algorithm based on new fuzzy adaptive PSO and NM algorithms for distribution feeder reconfiguration, *Energy Conversion and Management, Vol. 54, No. 1, pp. 7-16, 2012.*

[26] R. Storn, K. Price, Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces, *Journal of global optimization, Vol. 11, No. 4, pp. 341-359, 1997.*

[2] T. Niknam, M. Bornapour, A. Gheisari, B. Bahmani-Firouzi, Impact of heat, power and hydrogen generation on optimal placement and operation of fuel cell power plants, *International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 38, No. 2, pp. 1111-1127, 1/24/, 2013.*

[3] A. Merlin, H. Back, Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system, in *Proceeding of, 1-18.*

[4] D. Shirmohammadi, H. W. Hong, Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction, *Power Delivery, IEEE Transactions on, Vol. 4, No. 2, pp. 1492-1498, 1989.*

[5] K. Nara, A. Shiose, M. Kitagawa, T. Ishihara, Implementation of genetic algorithm for distribution systems loss minimum re-configuration, *Power Systems, IEEE Transactions on, Vol. 7, No. 3, pp. 1044-1051, 1992.*

[6] W.-M. Lin, F.-S. Cheng, M.-T. Tsay, Distribution feeder reconfiguration with refined genetic algorithm, *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol. 147, No. 6, pp. 349-354, 2000.*

[7] J. Z. Zhu, Optimal reconfiguration of electrical distribution network using the refined genetic algorithm, *Electric Power Systems Research, Vol. 62, No. 1, pp. 37-42, ۲۰۰۲,*

[8] Z. Ming, B. Pengxiang, L. Jian, Z. Wenyuan, An improved genetic algorithm for distribution system reconfiguration, in *Proceeding of, IEEE, pp. 1734-1738.*

[9] R. C. Eberhart, J. Kennedy, A new optimizer using particle swarm theory, in *Proceeding of, New York, NY, pp. 39-43.*

[10] M. Assadian, M. M. Farsangi, H. Nezamabadi-pour, GCPSO in cooperation with graph theory to distribution network reconfiguration for energy saving, *Energy Conversion and Management, Vol. 51, No. 3, pp. 418-427, 2010.*

[11] T. Niknam, An efficient hybrid evolutionary algorithm based on PSO and ACO for distribution feeder reconfiguration,

- [27] D. O. A. Sedki Hybrid particle swarm optimization and differential evolution for optimal design of water distribution systems, *Energy Conversion and Management*, Vol. 26, pp. 582-591, 2012 .
- [28] M. E. Baran, F. F. Wu, Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing, *Power Delivery, IEEE Transactions on*, Vol. 4, No. 2, pp. 1401-1407, 1989 .
- [29] S. K. Goswami, S. K. Basu ,A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization, *Power Delivery, IEEE Transactions on*, Vol. 7, No. 3, pp. 1484-1491, 1992 .
- [30] T. DcDermott, I. Drezga, R. P. Broadwater, A heuristic nonlinear constructive method for distribution system reconfiguration, *Power Systems, IEEE Transactions on*, Vol. 14, No. 2, pp. 478-483, 1999 .
- [31] F. V. Gomes, S. Carneiro Jr, J. L. R. Pereira, M. P. Vinagre, P. A. N. Garcia, L. R. Araujo, A new heuristic reconfiguration algorithm for large distribution systems, *Power Systems, IEEE Transactions on*, Vol. 20, No. 3, pp. 1373-1378, 2005 .
- [32] J. Olamaei, T. Niknam, G. Gharehpetian, Application of particle swarm optimization for distribution feeder reconfiguration considering distributed generators, *Applied Mathematics and computation*, Vol. 201, No. 1, pp. 575-586, 2008 .
- [33] T. Niknam, A new hybrid algorithm for multi-objective distribution feeder reconfiguration, *Cybernetics and Systems: An International Journal*, Vol. 40, No. 6, pp. 50۸-۵۲۷, ۲۰۰۹ .
- [34] H.-C. Chang, C.-C. Kuo, Network reconfiguration in distribution systems using simulated annealing, *Electric Power Systems Research*, Vol. 29, No. 3, pp. 227-238, 1994 .