



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 12, No. 3, 2021
Research Paper

Distribution Feeder Reconfiguration Using PSOGSA Algorithm in Presence of Distribution Generation Based on a Fuzzy Approach

Shiva Amini¹, Sasan Ghasemi², Jamal Moshtagh³

^{1,2,3} Dept. of Electrical Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

Abstract:

In this paper, to solve the multi-objective problem of distribution feeder reconfiguration (DFR) in the presence of distributed generation (DG), the hybrid particle swarm optimization and gravitational search algorithm (PSOGSA) has been proposed, which is a combination of particle optimization (PSO) and gravitational (GSA) optimization algorithm. In this field, the power losses and operating costs are the two most used objective functions in the literature. In addition to the mentioned objective functions, this paper also considers the optimal generation capacity of DG resources and energy not supplied (ENS), which is one of the basic reliability indexes of distribution networks. In this paper, the values of different objective functions are normalized by the fuzzy method, and also the Fuzzy decision-maker is used to determine the most optimal solution among the Pareto-optimal solutions. The proposed algorithm is implemented on IEEE 70-bus and 119-bus test systems. The simulation results show the efficiency of the proposed PSOGSA in improving the considered objective functions. The proposed method, by establishing a suitable fit between different objective functions has introduced a more efficient structure with lower losses and operating costs, as well as greater reliability, compared to other optimization algorithms.

Keywords: Distribution feeder reconfiguration, Distributed generation, Evolutionary algorithms, reliability.



2252-083X/ © 2021 The Authors. Published by University of Isfahan
This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<http://dx.doi.org/10.22108/isee.2020.123078.1383>

بازآرایی بهینه شبکه توزیع در حضور تولید پراکنده با استفاده از الگوریتم تکاملی

PSOGSA در چارچوب فازی

شیوا امینی^۱، ساسان قاسمی^۲، جمال مشتاق^{۳*}

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه کردستان - سنندج - ایران

Sh.amini@eng.uok.ac.ir

۲- پژوهشگر پسادکتری، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه کردستان - سنندج - ایران

Sasan.ghasemi@eng.uok.ac.ir

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه کردستان - سنندج - ایران

J.moshtagh@uok.ac.ir

چکیده: در این مقاله، مسئله بازآرایی چندهدفه شبکه‌های توزیع در حضور منابع تولید پراکنده (DG) مطالعه شده است. بیشتر، توابع هدفی مدنظر قرار گرفته‌اند که در بسیاری از مقالات در این زمینه بررسی شده‌اند؛ شامل تلفات و هزینه‌های بهره‌برداری. در این مقاله، علاوه بر تلفات و هزینه‌های بهره‌برداری، توان بهینه تولیدی منابع DG و انرژی توزیع نشده شبکه بررسی شده‌اند که یکی از پارامترهای اساسی قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع‌اند. در این مقاله، از الگوریتم PSOGSA برای حل مسئله بازآرایی چندهدفه فیدر توزیع کمک گرفته شده است. این الگوریتم، ترکیب شده الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و جستجوی گرانشی (GSA) است. در ادامه، مقادیر توابع هدف با استفاده از توابع عضویت فازی، نرمالیزه شده‌اند. در نهایت، از منطق فازی برای یافتن بهینه‌ترین جواب در میان جواب‌های پارتو به دست آمده استفاده شده است. روش پیشنهادی روی دو سیستم آزمون ۷۰ و ۱۱۹ باسه IEEE پیاده‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند روش پیشنهادی در بهبود توابع هدف در نظر گرفته شده، عملکرد مؤثری داشته و با برقراری یک تناسب مناسب میان توابع هدف مختلف، به معرفی ساختار بهینه‌تر با تلفات و هزینه بهره‌برداری کمتر و نیز قابلیت اطمینان بیشتر در مقایسه با سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی دست یافته است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم‌های تکاملی، بازآرایی شبکه توزیع، قابلیت اطمینان، منابع تولید پراکنده

۱- مقدمه

پایین آوردن سطوح اتصال کوتاه و به دنبال آن، میزان سرمایه‌گذاری، به صورت شعاعی بهره‌برداری می‌شوند. تا کنون روش‌های گوناگونی همچون نصب خازن، مدیریت بار ترانسفورماتور، مدیریت انرژی و اصلاح الگوی مصرف بار، استفاده از ادوات FACTS و بازآرایی شبکه برای مدیریت و کاهش تلفات شبکه‌های توزیع ارائه شده‌اند؛ اما به سبب اینکه در فرایند بازآرایی، بدون استفاده از هیچ‌گونه تجهیز اضافی و صرفاً با تغییر آرایش شبکه، تلفات کاهش می‌یابند، بهره‌برداران شبکه، به این روش نسبت به سایر روش‌ها توجه بیشتری داشته‌اند. تغییر ساختار شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی با تغییر در وضعیت کلیدهای در

شبکه‌های توزیع برای افزایش سطح قابلیت اطمینان، بهبود شرایط بارگذاری و کاهش مدت زمان خاموشی مشترکین به صورت حلقوی طراحی می‌شوند؛ اما به واسطه هماهنگی ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر سیستم‌های حفاظتی و

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۱۰

نام نویسنده مسئول: جمال مشتاق

نشانی نویسنده مسئول: ایران، سنندج، دانشگاه کردستان، دانشکده مهندسی برق

۷۴ بازآرایی بهینه شبکه توزیع در حضور تولید پراکنده با استفاده از الگوریتم تکاملی PSO-GSA در چارچوب فازی

الگوریتم جستجوی گرانشی بهبودیافته (EGSA) پیشنهاد شده است. در این مقاله، پایداری گذرا با استفاده از شاخص زمان بحرانی رفع خطا^۲ و با در نظر گرفتن احتمال وقوع خطا در مکان‌های مختلف محاسبه شده است.

در [۱۱] با استفاده از الگوریتم چندهدفه رقابت استعماری^۳ مبتنی بر منطق فازی، بازآرایی بهینه برای شبکه‌های توزیع با هدف بهبود هم‌زمان تلفات، متوسط انرژی تأمین‌نشده (AENS) شاخص دفعات قطع سیستم (SAIFI)، شاخص متوسط زمان قطعی سیستم (SAIDI)، شاخص متوسط دسترسی نداشتن به سرویس (ASUI) پیشنهاد شده است. در [۱۲] مدیریت انرژی چندهدفه با در نظر گرفتن اثرات بازآرایی، منابع تجدیدپذیر، پاسخگویی بار و ذخیره‌کننده‌های انرژی پیشنهاد شده است. مدل پیشنهادی به صورت هم‌زمان با تعیین مکان بهینه منابع تجدیدپذیر، ذخیره‌سازها و پاسخگویی بار، هزینه خرید انرژی و انرژی تأمین نشده را حداقل سازی می‌کند. در [۱۳] ابتدا به جایابی و اندازه بهینه منابع تولید پراکنده با استفاده از الگوریتم Runner-root می‌پردازد، سپس بازآرایی شبکه توزیع در حضور منابع DG و با هدف کاهش تلفات انجام می‌شود. در [۱۴] روشی برای بازآرایی در حضور منابع تولید پراکنده و با هدف حداقل تلفات، حداقل تعداد کلیدزنی و حداقل انحراف ولتاژ باس‌ها با استفاده از الگوریتم بهبودیافته جهش قورباغه^۴ ارائه و تأثیر هم‌زمان بازیابی و مکان‌یابی منابع DG در کاهش تلفات و همچنین افزایش سطح حداقل ولتاژ بررسی شده است. در [۱۵] به بهینه‌سازی مسئله بازآرایی در حضور منابع تولید پراکنده و با هدف کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ پرداخته شده است. در این مقاله، سطوح مختلف بار در نظر گرفته شده‌اند و از روش 3D-GSO برای حل مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است. منابع DG به صورت بار منفی مدل‌سازی شده‌اند و تأثیر آن بر پخش بار به صورت محدودیت‌های ولتاژ لحاظ شده است.

در این مقاله، به مسئله بهینه‌سازی چندهدفه بازآرایی شبکه‌های توزیع متعادل با در نظر گرفتن منابع DG پرداخته شده است. مزیت روش پیشنهادی در این مقاله نسبت به پژوهش‌های پیشین، ترکیب سه تابع هدف کاهش تلفات توان، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و افزایش قابلیت

حالت عادی باز و بسته شبکه، بازآرایی شبکه نامیده می‌شود. از جمله اهداف بازآرایی کاهش تلفات توان، بهبود قابلیت اطمینان، متعادل‌سازی بار، بهبود پروفیل ولتاژ و بازیابی سرویس پس از وقوع خطا [۱، ۲] و از مهم‌ترین قیود بازآرایی برقرار بودن همه باس‌ها، جریان مجاز عبوری از خطوط، محدوده ولتاژ باس‌ها و حفظ ساختار شعاعی شبکه هستند.

امروزه به دلیل مزایای منابع تولید پراکنده (DG) در شبکه‌های توزیع از قبیل کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ، بهبود قابلیت اطمینان، کاهش آلودگی‌های محیط زیستی و به تعویق انداختن سرمایه‌گذاری برای توسعه شبکه، تعداد و اندازه منابع DG متصل به شبکه توزیع با سرعت در حال افزایش است که با یافتن اندازه و مکان بهینه منابع DG تلفات شبکه به صورت چشمگیری کاهش می‌یابد.

قیود فنی و اقتصادی دخیل در مسئله بازآرایی و تعداد بالای متغیرهای تصمیم‌گیری، مسئله بازآرایی را به مسئله بهینه‌سازی پیچیده تبدیل کرده است که برای حل آن باید از روش‌های بهینه‌سازی قدرتمند و دقیق استفاده کرد. بازآرایی شبکه‌های توزیع برای نخستین بار در سال ۱۹۷۵ به منظور کاهش تلفات با استفاده از روش تعویض شاخه ارائه شد [۳]. روش کاهش دادن [۴] و روش شکل‌دادن [۵] از دیگر روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک‌اند. ضعف این روش‌ها سرعت پایین در یافتن جواب بهینه است. روش‌های هوشمند همانند الگوریتم ژنتیک (GA) [۶]، الگوریتم فازی [۷] و الگوریتم اجتماع پرندگان [۸] استفاده شده در حل مسئله بازآرایی، روش‌های هوشمند عموماً بر پایه پدیده‌های طبیعی‌اند که با محدود کردن فضای جستجو سرعت حل مسئله افزایش می‌یابد؛ اما ممکن است به عدم دستیابی به پاسخ بهینه منجر شود.

در [۹] یک روش بازآرایی براساس احتمال ارائه شده است که ساختار فصلی مطلوب و مکان‌های بهینه نصب واحدهای DG را با هدف کمینه سازی تلفات انرژی و کاهش هزینه پیشنهاد می‌دهد. در این مطالعه، محل کاندید نصب واحدهای DG از پیش تعیین شده است. در [۱۰] بازآرایی چندهدفه فیدرهای شبکه توزیع با در نظر گرفتن هزینه بهره‌برداری، پایداری گذرا و تلفات با استفاده از

تأمین نشده، بهترین ساختار شعاعی برای شبکه‌های توزیع تعیین می‌شود. مدل ریاضی این توابع در زیربخش‌های بعدی ارائه شده است.

۲-۱- توابع هدف

۲-۱-۱- تلفات توان اکتیو

بیشترین سهم تلفات در سیستم‌های قدرت، به شبکه‌های توزیع مربوط است. کاهش تلفات در شبکه‌های توزیع سبب آزاد شدن ظرفیت سیستم به‌ویژه در ساعات پیک مصرف می‌شود و همچنین نیاز به سرمایه‌گذاری برای توسعه سیستم را به تأخیر می‌اندازد. تلفات توان اکتیو به‌صورت رابطه (۱) ارائه می‌شوند:

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^{N_{Branch}} R_i \times |I_i|^2 \quad (1)$$

که R_i ، I_i و N_{Branch} به ترتیب مقاومت، جریان عبوری از خط i ام و تعداد کل خطوط شبکه‌اند. هدف از در نظر گرفتن تلفات توان اکتیو به‌عنوان یکی از توابع هدف، یافتن ساختار بهینه با کمترین تلفات توان است.

۲-۱-۲- کمینه کردن هزینه بهره‌برداری

هدف اصلی در طراحی و توسعه شبکه‌های توزیع، انتقال توان الکتریکی از پست‌های توزیع به مشترکین با کمترین هزینه با حفظ قیود بهره‌برداری شبکه است. هزینه بهره‌برداری شبکه توزیع با در نظر گرفتن منابع DG به شرح زیر است:

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^{N_{DG}} Price_{DG,i} \times P_{DG,i} + Price_{Sub} \times P_{Sub} \quad (2)$$

$$+ \sum_{j=1}^{N_{SW}} Price_{SW,j} \times |S_j - S_{j0}|$$

$$x = [Tie_1, Tie_2, \dots, Tie_{N_{Tie}}, SW_1, SW_2, \dots, SW_{N_{SW}}, P_{DG1}, P_{DG2}, \dots, P_{DGN_{DG}}] \quad (3)$$

که $Price_{DG}$ هزینه منابع DG، $Price_{Sub}$ هزینه پست توزیع، $Price_{SW}$ هزینه هر جفت کلیدزنی در شبکه و P_{DG} توان تولیدی منابع DG و P_{Sub} توان تولیدی پست توزیع است. Tie_i وضعیت i امین خط (tie line) شبکه است که

اطمینان در قالب کاهش شاخص انرژی تأمین نشده (ENS) به صورت هم‌زمان است. همچنین در این مقاله با لحاظ کردن هزینه کلیدزنی در هزینه بهره‌برداری شبکه از کلیدزنی‌های غیرضروری پرهیز شده است. اضافه کردن مسائل قابلیت اطمینان و منابع DG به مسئله بهینه‌سازی، بر پیچیدگی حل مسئله می‌افزاید؛ از این رو، الگوریتم به کار برده شده باید از دقت و کارایی مناسب برخوردار باشد. در این مقاله، علاوه بر پیاده‌سازی الگوریتم‌های فراابتکاری GA، PSO و EGSA، از الگوریتم PSO و سیستم بهینه‌سازی فازی به منظور حل مسئله بازآرایی شبکه توزیع با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده استفاده شده است. نتایج به دست آمده با برخی از روش‌های قبلی مقایسه شده‌اند و توانایی الگوریتم ارائه شده در مقایسه با سایر روش‌ها برای حل مسئله مذکور نمایش داده شده است. در نهایت کارایی روش‌های ارائه شده روی شبکه‌های ۷۰ و ۱۱۹ باسه شبکه توزیع، آزمون و با سایر روش‌های موجود مقایسه شده است. به‌طور کلی نوآوری‌های این مقاله عبارت‌اند از:

- بهینه‌سازی چندهدفه مسئله بازآرایی شبکه‌های توزیع متعادل به منظور کاهش تلفات توان، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و افزایش قابلیت اطمینان؛

- در نظر گرفتن منابع DG و تعیین توان بهینه تولیدی آنها؛

- محدود کردن تعداد کلیدزنی‌های شبکه با در نظر گرفتن هزینه‌های کلیدزنی در هزینه‌های بهره‌برداری شبکه؛

- حل مسئله بازآرایی با استفاده از الگوریتم فراابتکاری GA، PSO، EGSA و PSO.

- در ادامه، ابتدا در بخش ۲، اهداف بازآرایی تبیین می‌شوند. در بخش ۳، روش بهینه‌سازی شامل الگوریتم تکاملی PSO و منطق فازی ارائه شده است. شبیه‌سازی و نتایج عددی در بخش ۴ آورده شده‌اند و در بخش ۵ نتیجه‌گیری شده است.

۲- فرمول‌بندی مسئله

در این مقاله با در نظر گرفتن سه تابع هدف حداقل تلفات توان اکتیو، حداقل هزینه بهره‌برداری و حداقل انرژی

۷۶ بازآرایی بهینه شبکه توزیع در حضور تولید پراکنده با استفاده از الگوریتم تکاملی PSO-GSA در چارچوب فازی

ام شبکه است. مقادیر U_{ij} و U'_{ij} با معادلات (۵) و (۶) محاسبه می شوند.

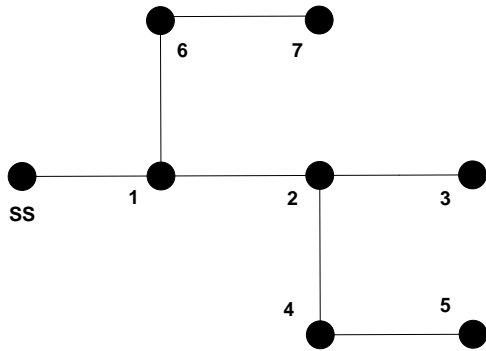
$$U_{ij} = \lambda_{ij} \times d_{ij} \times t_{ij} \quad (5)$$

$$U'_{ij} = \lambda'_{ij} \times d_{ij} \times t'_{ij} \quad (6)$$

که d_{ij} طول خط واصل بین گره i و گره j است؛ بنابراین، انرژی تأمین نشده کل سیستم به صورت معادله (۷) محاسبه می شود:

$$f_3(x) = ENS = \sum_{i=1}^{N_{bus}} ENS_i \quad (7)$$

$$ENS_6 = P_6 \times (U_{ss1} + U_{16} + U'_{67}) \quad (8)$$



شکل ۱: نمودار تک خطی یک شبکه ساده توزیع شعاعی

۲-۲-۲-۲-۲ قیود

قیود در نظر گرفته شده در این مقاله برای حل مسئله بازآرایی شبکه توزیع به صورت زیرند.

۲-۲-۲-۱-۲-۲ توان عبوری از خطوط

افزایش توان عبوری از خطوط انتقال سبب بالارفتن دمای آنها می شود. به دلیل محدود بودن ظرفیت حرارتی خطوط انتقال، توان عبوری از خطوط پس از هرگونه تغییر در ساختار شبکه باید به صورت (۹) محدود شود:

$$|P_{ij}^{line}| \leq P_{ij,Max}^{line} \quad (9)$$

که P_{ij}^{line} توان عبوری از خط ij است و $P_{ij,Max}^{line}$ نیز حداکثر توان عبورشدنی از آن است.

در حالت بسته بودن آن وضعیت ۱ دارد و در حالت بازبودن وضعیت ۰. SW_i شماره کلیدی است که با i امین خط tie line تشکیل یک حلقه می دهند. S_j و S_{j0} به ترتیب وضعیت اولیه و جدید کلید j ام شبکه است. N_{tie} تعداد خطوط tie line شبکه، N_{SW} تعداد کلیدزنی های شبکه و N_{DG} تعداد منابع DG شبکه اند.

۲-۱-۳-۳-۱-۲ قابلیت اطمینان

به توانایی سیستم های قدرت در برقرار نگه داشتن بارها قابلیت اطمینان گفته می شود [۱۶]. یکی از مهم ترین و پرکاربردترین شاخص های مبتنی بر بار و انرژی در محاسبات قابلیت اطمینان شبکه های توزیع، شاخص انرژی تأمین نشده است. با استفاده از این شاخص، مقدار انرژی توزیع نشده در اثر قطعی تعیین می شود. پارامترهای قابلیت اطمینان برای خط مابین گره های i و j عبارت اند از:

▪ نرخ خرابی λ_{ij} برحسب (fail/km-yr)؛

▪ میانگین زمان تعمیر (t_{ij}) برحسب (h/fail)؛

▪ میانگین زمان بازسازی (t'_{ij}) برحسب (h/fail).

t_{ij} به ترتیب میانگین زمان موردنیاز برای تعمیر یا مانور

خط خطادار پس از رخداد خطا و t'_{ij} میانگین زمان موردنیاز برای اتصال مجدد به شبکه است. فرض کنید هر خط از شبکه دارای یک کلید است که با تغییر در وضعیت آن ساختار شبکه تغییر داده می شود. طبق روش ارائه شده در [۱۶]، انرژی تأمین نشده در گره i ام به صورت معادله (۴) محاسبه می شود:

$$ENS_i = P_i \sum_{i,j \in V, i \neq j} (U_{ij} + U'_{ij}) \quad (4)$$

که P_i توان اکتیو گره i ام، $V = \{0, 1, \dots, n-1\}$ دسته

شامل گره های شبکه، U_{ij} دسترس ناپذیری گره ij ناشی از تعمیرات و U'_{ij} نیز در دسترس نبودن خط ij ناشی از

جداسازی آن است. به عبارت دیگر، U_{ij} مربوط به در دسترس نبودن خطوط پایین دست گره i ام شبکه است و

U'_{ij} نیز متناسب با در دسترس نبودن خطوط بالادست گره i

۲-۲-۲- معادلات پخش بار شبکه توزیع

مسائل بهینه‌سازی باید به گونه‌ای حل شوند که معادلات پخش بار آمده در معادلات (۱۰-۱۱) در هر شرایطی برقرار باشند:

$$P_i = \sum_{j=1}^{N_{Bus}} V_i V_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (10)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^{N_{Bus}} V_i V_j Y_{ij} \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (11)$$

که P_i و Q_i به ترتیب توان اکتیو و راکتیو تزریقی شبکه به باس i شبکه‌اند. V_i و δ_i به ترتیب دامنه و زاویه ولتاژ گره i هستند. Y_{ij} و θ_{ij} نیز به ترتیب دامنه و زاویه ادمیتانس بین گره‌های i ام و j ام شبکه است. در این مقاله، از روش نیوتن - رافسون برای انجام پخش بار استفاده شده است.

۲-۲-۳- محدودیت ولتاژ گره‌ها

در شبکه توزیع دامنه ولتاژ باس‌ها باید در محدوده پذیرفته شده به شرح (۱۲) حفظ شود:

$$V_{Min} \leq V_i \leq V_{Max} \quad (12)$$

به ترتیب مینیمم و ماکزیمم دامنه ولتاژ پذیرفته شده برای گره‌های شبکه‌اند و V_i نیز دامنه ولتاژ گره i ام شبکه است.

۲-۲-۴- ساختار شعاعی شبکه

به دلیل سادگی اجرای طرح‌های حفاظتی در ساختار شعاعی شبکه‌های توزیع، فرض بر این است که ساختار شبکه‌های توزیع باید پس از هر تغییر به صورت شعاعی باقی بماند و تمام گره‌های شبکه نیز برق‌دار باشند.

۲-۲-۵- محدودیت‌های ترانسفورماتورها

توان عبوری از ترانسفورماتورهای شبکه باید از حداکثر توان قابل عبور از آنها کمتر باشد.

۲-۲-۶- محدودیت جریان عبوری از فیدرها

جریان عبوری از فیدرها باید از حداکثر جریان مجاز عبوری از هر فیدر کمتر باشد، پس:

$$|I_{f,i}| \leq I_{f,i}^{Max} \quad (13)$$

که $I_{f,i}$ جریان عبوری از فیدر i ام شبکه و $I_{f,i}^{Max}$ نیز حداکثر جریان مجاز عبوری از فیدر i ام شبکه است.

۲-۲-۷- محدودیت‌های منابع تولید پراکنده (DG)

توان تولیدی منابع DG باید در محدوده مجاز تولیدی خود قرار داشته باشند؛ یعنی:

$$P_{DG} \leq P_{DG}^{max} \quad (14)$$

که P_{DG} و P_{DG}^{max} به ترتیب توان خروجی و حداکثر توان خروجی منابع DG است. منابع DG را در مقالات مختلف به دو صورت PV و PQ در نظر می‌گیرند [۱۷-۱۹]. در مدل PV، منابع DG علاوه بر تزریق توان اکتیو، با شبکه توان راکتیو نیز مبادله می‌کند تا بتواند ولتاژ گره را در مقدار مشخص شده نگه دارد؛ اما در مدل PQ، منابع DG را تنها به شبکه توان اکتیو تزریق می‌کند. در این مقاله، منابع DG به صورت مدل PQ در نظر گرفته شده‌اند.

۳- بهینه‌سازی چندهدفه

برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه تا کنون روش‌های مختلفی همچون روش‌های سلسله‌مراتبی [۲۰]، برنامه‌ریزی آرمانی [۲۱] و هم‌زمانی یا پارتو [۲۲] ارائه شده‌اند [۲۳، ۲۴]. از میان روش‌های پرکاربرد در این زمینه، الگوریتم‌های تکاملی، روش‌های ابتکاری و فراابتکاری همچون الگوریتم ژنتیک (GA) [۶]، الگوریتم فازی [۷] و الگوریتم اجتماع پرندگان [۸] هستند. در بیشتر موارد، زمان حل مسائل با الگوریتم‌های تکاملی، بیشتر از روش‌های ابتکاری است؛ اما احتمال رسیدن به جواب بهینه کلی با الگوریتم‌های تکاملی، بیشتر است [۲۵-۲۷]. به سبب اینکه

۷۸ بازآرایی بهینه شبکه توزیع در حضور تولید پراکنده با استفاده از الگوریتم تکاملی PSOGSA در چارچوب فازی

پسیو عامل i است. $G(t)$ ثابت گرانشی در زمان t است. ϵ یک مقدار ثابت کوچک است و R_{ij} فاصله اقلیدسی بین دو عامل i و j است. $G(t)$ مطابق معادله (۱۹) محاسبه می‌شود.

$$G(t) = G_0 \times \exp(-\alpha \times \text{iter} / \text{max iter}) \quad (19)$$

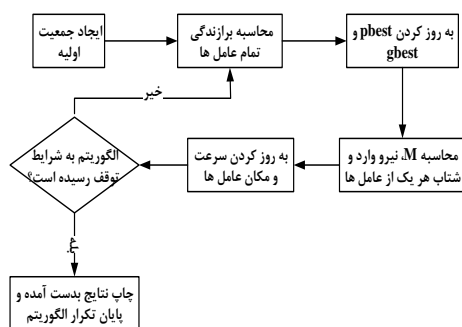
که α و G_0 به ترتیب ضریب نزولی و مقدار اولیه، iter شمارشگر تکرار و max iter حداکثر تعداد تکرارهای الگوریتم‌اند. کل نیروی وارد شده از طرف یک دسته از توده‌ها که به یک عامل وارد می‌شود، طبق قانون نیوتن به صورت معادله (۲۰) محاسبه می‌شود:

$$F_i^d(t) = \sum_{j \in K_{\text{best}} \atop j \neq i} \text{rand}_j F_{ij}^d \quad (20)$$

که rand_j یک عدد تصادفی بین صفر و یک برای j امین عامل است. براساس قوانین مکانیک نیوتن، شتاب هر عامل برابر است با:

$$ac_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{M_{ii}(t)} \quad (21)$$

که M_{ii} جرم جسم i است. بهترین جواب به دست آمده در هر تکرار به روز می‌شود. سپس سرعت همه عامل‌ها مطابق با معادله (۱۶) محاسبه و در نهایت، مکان جدید عامل‌ها طبق معادله (۲۱) تعیین می‌شود. فلوجارت روش PSOGSA در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲: فلوجارت کلی روش PSOGSA [۲۸]

بازآرایی شبکه در حالت عادی شبکه انجام می‌شود و زمان حل مسئله اهمیت چندانی ندارد، در این مقاله از الگوریتم تکاملی PSOGSA برای بهینه‌سازی استفاده شده است. جزئیات این الگوریتم در ادامه آورده شده‌اند.

۳-۱- روش ترکیب شده PSOGSA

یک سیستم با n توده^۰ را در نظر بگیرید که مکان i امین توده به صورت معادله (۱۵) است [۲۸]:

$$X_i = (x_i^1, x_i^2, x_i^3, \dots, x_i^n) \quad (15)$$

در PSOGSA عملکرد دو روش PSO و GSA به صورتی نیست که یکی پس از دیگری عمل کند؛ بلکه به صورت موازی با هم کار می‌کنند. ایده اصلی PSOGSA از ترکیب بهترین موقعیت به دست آمده برای اجتماع ذرات (gbest) در الگوریتم PSO با توانایی جستجوی محلی الگوریتم GSA آمده است. ترکیب شده این دو روش به صورت معادله (۱۶) است:

$$V_i(t+1) = w \times V_i(t) + c_1' \times \text{rand} \times ac_i(t) + c_2' \times \text{rand} \times (\text{gbest} - X_i(t)) \quad (16)$$

که $V_i(t)$ سرعت عامل i ام در تکرار t ام، c_1' بردار وزن، w بردار وزن، rand یک عدد تصادفی بین صفر و یک، $ac_i(t)$ شتاب عامل i ام در تکرار t ام و gbest بهترین جواب به دست آمده تا کنون است در هر تکرار، موقعیت ذرات به صورت معادله (۱۷) به روز می‌شود:

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (17)$$

در الگوریتم PSOGSA، ابتدا یک جمعیت اولیه ایجاد می‌شود، سپس هر عامل، یک کاندید جواب در نظر گرفته می‌شود.

کل نیروی وارد شده از طرف عامل i به عامل j در زمان t با معادله (۱۸) محاسبه می‌شود:

$$F_{ij}^d(t) = G(t) \frac{M_{pi}(t)M_{qj}(t)}{R_{ij}(t) + \epsilon} (x_j^d(t) - x_i^d(t)) \quad (18)$$

که M_{qj} جرم گرانشی اکتیو عامل j و M_{pi} جرم گرانشی

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, N_{obj}\}, F_i(X_1) \leq F_i(X_2) \quad (22)$$

$$\exists j \in \{1, 2, \dots, N_{obj}\}, F_j(X_1) < F_j(X_2)$$

که N_{obj} تعداد توابع هدف مسئله است.

۳-۳- تصمیم‌گیری فازی

پس از یافتن دسته جواب بهینه پارتو، با استفاده از منطق فازی به صورت معادله (۲۴) برای یافتن بهترین جواب ممکن از میان جواب‌های بهینه به دست آمده استفاده می‌شود.

$$N_{\mu_j} = \frac{\sum_{k=1}^{N_{obj}} \beta_k \times \mu_{jk}}{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \beta_k \times \mu_{jk}} \quad (23)$$

که β_k بردار وزن برای k امین تابع هدف و m تعداد جواب‌های نامطلوب است. بردار β_k بر اساس اهمیت توابع هدف مختلف تعیین می‌شود. پس جواب با بیشترین مقدار μ ، بهترین جواب به دست آمده با الگوریتم است.

۴- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

در این بخش، ابتدا به بهینه‌سازی تک‌هدف مسئله بازاریابی با در نظر گرفتن توابع هدف کاهش تلفات، هزینه‌های بهره‌برداری و انرژی تأمین نشده به صورت جداگانه، پرداخته و اثر منابع DG نیز در پروسه بازاریابی در نظر گرفته شده است، سپس به حل مسئله بازاریابی با در نظر گرفتن هم‌زمان تمامی توابع هدف ذکر شده و اثر منابع DG، در قالب بهینه‌سازی چندهدفه پرداخته می‌شود. برای نشان دادن قابلیت و کارایی روش پیشنهادی از شبکه‌های ۷۰ و ۱۱۹ باس IEEE استفاده شده است. روش پیشنهادی در محیط MATLAB برنامه‌نویسی شده است. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی، با نتایج به دست آمده در سایر مقالات مقایسه شده‌اند. نمونه‌هایی که مشابه آن در سایر مقالات بررسی نشده باشند، با نتایج شبیه‌سازی الگوریتم‌های تکاملی پرکاربرد GA، PSO و EGSA مقایسه شده‌اند. پارامترهای الگوریتم‌های به کار رفته در این مقاله در جدول ۱ آمده‌اند.

در الگوریتم PSO، برانزنگی جواب‌ها در پروسه به‌روزرکردن سرعت و مکان عامل‌ها دخیل شده است. عامل‌های نزدیک به جواب‌های بهتر در جذب سایر عامل‌ها سعی می‌کنند که این سبب بهبود و وسعت‌دادن به فضای جستجو می‌شود. زمانی که تمام عامل‌ها به یک جواب بهینه نزدیک می‌شوند، سرعت آنها کند می‌شود. در این شرایط، هر عامل با دیدن بهترین جواب به دست آمده تا کنون (*gbest*)، به سوی آن، جذب و در نهایت به حرکت به سوی جواب بهینه کلی منجر می‌شود.

۳-۱-۱- نرمالیزه کردن توابع هدف با منطق فازی

پس از محاسبه توابع هدف مختلف که دارای واحد یکسان نیستند، از منطق فازی برای نرمالیزه کردن آنها استفاده شده است؛ بنابراین، با استفاده از منطق فازی، مقدار هر تابع هدف به یک عدد بین ۰ و ۱ تبدیل می‌شود. هرچه یک جواب بهینه‌تر باشد، مقدار فازی شده آن به یک نزدیک‌تر است و برعکس.

$$\mu_{f_i}(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } F_i(x) \leq F_i^{\min} \\ \frac{F_i^{\max} - F_i(x)}{F_i^{\max} - F_i^{\min}} & \text{if } F_i^{\min}(x) \leq F_i(x) \leq F_i^{\max} \\ 0 & \text{if } F_i(x) \geq F_i^{\max} \end{cases} \quad (24)$$

X اندیس هر طرح بهینه جبهه پارتو، تابع $F_i(x)$ هدف معیار i ام مربوط به طرح X و، F_i^{\max} F_i^{\min} به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار معیار i ام است.

۳-۲- جواب بهینه پارتو

استفاده از روش جواب بهینه پارتو، یکی از روش‌های مناسب برای رسیدن به چندین جواب بهینه به جای یک جواب بهینه در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه است. در این روش، اساس کار بدین صورت است که اگر شرایط (۲۳) برقرار باشد، بردار جواب X_1 بردار جواب X_2 را مغلوب کرده است:

۸۰ بازآرایی بهینه شبکه توزیع در حضور تولید پراکنده با استفاده از الگوریتم تکاملی PSOGSA در چارچوب فازی

جدول ۱: پارامترهای الگوریتم‌های به کار برده شده

الگوریتم	تعداد جمعیت	تعداد تکرار	K	G ₀	ω
PSOGSA	۵۰	۲۰۰	۱۰۰	۱۰	۲۰
EGSA	۵۰	۲۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۲۰
PSO	۵۰	۲۰۰	-	-	-
GA	۵۰	۲۰۰	-	-	-

۴-۱- شبکه ۷۰ باسه IEEE

شبکه ۷۰ باسه توزیع یک شبکه با ۷۰ باس و ۷۹ خط است که با دو پست توزیع تغذیه می‌شود [۲۹]. این شبکه در سطح ولتاژ ۱۱ کیلوولت کار می‌کند و خطوط ۶۹ تا ۷۹ این شبکه در حالت عادی در وضعیت باز قرار دارند. هزینه تولید انرژی پست‌های توزیع شبکه ۰,۰۴۳ دلار بر کیلووات ساعت و هزینه هر جفت کلیدزنی در شبکه نیز ۰,۰۴۱ در نظر گرفته شده است [۳۰].

۴-۱-۱- بازآرایی به منظور کاهش تلفات توان

در این بخش، کاهش تلفات توان تنها هدف مسئله بازآرایی انتخاب شده است. نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی

مسئله بازآرایی با در نظر گرفتن تلفات شبکه به عنوان تابع هدف و با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی مختلف در جدول ۲ آورده شده‌اند. مطابق با نتایج به دست آمده در جدول ۲، میزان تلفات شبکه با استفاده از الگوریتم‌های EGSA و PSOGSA نسبت به دو الگوریتم دیگر کمتر است. الگوریتم‌های EGSA و PSOGSA به صورت یکسکان با بازکردن خط وسط ۲۰۲/۱۰۵۲ با تلفات ۵۱,۷۰,۷۱,۶۶,۳۰,۴۵,۳۹,۷۶,۷۷,۷۸,۷۹ کیلووات بازآرایی شبکه را به اتمام رسانده‌اند. تلفات اولیه شبکه ۲۲۷,۳۶۷۵ کیلووات است که پس از بازآرایی و با استفاده از الگوریتم تکاملی PSOGSA تلفات شبکه نسبت به حالت اولیه ۱۱٪ کاهش یافته است.

جدول ۲: تلفات شبکه ۷۰ باسه بدون منابع DG

تلفات (kW)	خطوط باز شبکه	الگوریتم
۲۲۷/۳۶۷۵	۶۷,۶۸,۶۹,۷۰,۷۱,۷۲,۷۳,۷۴,۷۵,۷۶,۷۷,۷۸,۷۹	حالت اولیه
۲۰۵/۳۲	۴۵,۴۶,۵۱,۶۵,۶۷,۷۲,۷۳,۷۶,۷۷,۷۸,۷۹	Das [25]
۲۰۵/۱۸	۴۹,۵۰,۵۱,۶۵,۶۷,۷۲,۷۳,۷۶,۷۷,۷۸,۷۹	SAPSO-MSFLA [31]
۲۰۲/۵۸۳۴	۵۱,۷۰,۷۱,۶۶,۳۰,۴۵,۳۸,۷۶,۷۷,۷۸,۷۹	GA
۲۰۲/۶۴۷۵	۵۱,۷۰,۷۱,۶۶,۳۰,۴۶,۳۸,۷۶,۷۷,۷۸,۷۹	PSO
۲۰۲/۱۰۵۲	۵۱,۷۰,۷۱,۶۶,۳۰,۴۵,۳۹,۷۶,۷۷,۷۸,۷۹	EGSA
۲۰۲/۱۰۵۲	۵۱,۷۰,۷۱,۶۶,۳۰,۴۵,۳۹,۷۶,۷۷,۷۸,۷۹	PSOGSA

به منظور نشان دادن اثر منابع DG در کاهش تلفات شبکه، فرض شده است ۷ واحد تولید پراکنده با ظرفیت یکسان ۵۰۰ kW به ترتیب در باس‌های ۹، ۱۵، ۲۲، ۲۸، ۲۹، ۳۹، ۴۳ و ۶۳ قرار دارد. هزینه تولید این منابع به ترتیب ۰,۰۴۳، ۰,۰۴۳، ۰,۰۴۳، ۰,۰۴۳، ۰,۰۴۳، ۰,۰۴۳، ۰,۰۴۳ و ۰,۰۴۳ دلار بر

کیلووات ساعت است [۳۰].

جدول ۳ نتایج حاصل از بازآرایی با روش‌های GA، PSO، EGSA و روش پیشنهادی در این مقاله به منظور کاهش تلفات توان در حضور منابع DG است. مطابق جدول ۳، میزان تلفات به دست آمده با روش‌های GA،

در این بخش، به حل مسئله بازآرایی به منظور کاهش هزینه‌های بهره‌برداری شبکه پرداخته شده است. جدول ۴ نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۴، الگوریتم PSO و EGSA به نتایج بهتری در کاهش هزینه‌های بهره‌برداری نسبت به سایر الگوریتم‌ها دست یافته است. با مقایسه نتایج به دست آمده در جدول ۴ مشاهده می‌شود استفاده از الگوریتم پیشنهادی به کاهش ۵/۴۵٪ هزینه بهره‌برداری شبکه نسبت به حالت اولیه منجر شده است.

۴-۱-۳- کاهش انرژی توزیع نشده (ENS)

نتایج حاصل از حل مسئله بازآرایی با هدف کاهش ENS بدون حضور منابع DG و با در نظر گرفتن آنها به ترتیب در جدول ۵ آورده شده‌اند. با توجه به نتایج جدول ۵، ENS در حالت اولیه شبکه ۱۳۶۶۴ کیلووات ساعت در سال است؛ این مقدار در بهترین حالت با بازآرایی شبکه با الگوریتم PSO، به مقدار ۱۲۶۷۰ کیلووات ساعت در سال کاهش یافته است.

PSO، EGSA و PSO و به ترتیب برابر ۸۷/۷۰۴۵، ۸۷/۶۶، ۸۶/۱۶۴۷ و ۸۵/۶۹۵۳ کیلووات است. این تفاوت در میزان تلفات به دست آمده با روش‌های مختلف ناشی از تفاوت در خطوط باز پیشنهادی و مقدار توان خروجی منابع DG است. با دقت بیشتر در جدول ۳ دیده می‌شود در تمامی روش‌ها خروجی منابع DG در باس‌های ۹، ۲۲، ۲۹ و ۶۳ در بیشترین مقدار ممکن ۵۰۰ کیلووات تنظیم شده است؛ اما خروجی سایر منابع DG متفاوت است.

با توجه به جدول ۳، الگوریتم PSO و EGSA خطوط باز ۶۶، ۳۰، ۶۶، ۷۱، ۷۰، ۵۱، ۷۶، ۳۷، ۷۹، ۷۸ و ۷۷ را پیشنهاد داده و نیز خروجی واحدهای DG در باس‌های ۹، ۱۵، ۲۲، ۲۸، ۲۹، ۳۹، ۴۳ و ۶۳ را به ترتیب در میزان ۵۰۰، ۲۶۷، ۵۰۰، ۴۶۰، ۵۰۰، ۳۳۳ و ۵۰۰ کیلووات تنظیم کرده است. برای این ساختار، تلفات شبکه از ۲۲۷/۳۶۷۵ به ۸۵/۶۹۵۳ رسیده است (۶۲٪ کاهش در میزان تلفات)؛ این بیشترین میزان کاهش تلفات در مقایسه با سایر روش‌ها است.

۴-۱-۲- کاهش هزینه‌های بهره‌برداری

جدول ۳: تلفات شبکه ۷۰ باسه در حضور منابع DG

تلفات (kW)	خروجی منابع DG (kW)	خطوط باز شبکه	الگوریتم
۲۲۷/۳۶۷۵	-	۶۹،۷۰،۷۱،۷۲،۷۳،۷۴،۷۵،۷۶،۷۷،۷۸،۷۹	حالت اولیه
۸۷/۷۰۴۵	۵۰۰-۳۱۰-۵۰۰-۴۶۰-۵۰۰-۲۳۵-۵۰۰	۵۱،۷۰،۷۱،۶۶،۳۰،۴۵،۳۸،۷۶،۷۷،۷۸،۷۹	GA
۸۷/۶۶	۵۰۰-۳۱۰-۵۰۰-۴۵۰-۵۰۰-۲۳۵-۵۰۰	۵۱،۷۰،۷۱،۶۶،۷۳،۴۵،۳۷،۷۶،۷۷،۷۸،۷۹	PSO
۸۶/۱۶۴۷	۵۰۰-۳۳۳-۵۰۰-۴۶۰-۵۰۰-۲۶۷-۵۰۰	۵۱،۷۰،۷۱،۶۶،۳۰،۴۵،۳۷،۷۶،۷۷،۷۸،۷۹	EGSA
۸۵/۶۹۵۳	۵۰۰-۳۳۳-۵۰۰-۴۶۰-۵۰۰-۲۶۷-۵۰۰	۵۱،۷۰،۷۱،۶۶،۳۰،۴۶،۳۷،۷۶،۷۷،۷۸،۷۹	PSO و EGSA

جدول ۴: هزینه بهره‌برداری شبکه ۷۰ باسه

هزینه (\$)	خروجی منابع DG (kW)	خطوط باز شبکه	الگوریتم
۲۰۲/۳۱۱۵	-	۶۹،۷۰،۷۱،۷۲،۷۳،۷۴،۷۵،۷۶،۷۷،۷۸،۷۹	حالت اولیه
۱۹۵/۰۶۹۲	۱۵۲-۱۷۹-۲۹۵-۲۰۷-۴۳۶-۳۲۰-۳۷۶	۱۱،۵۸،۵۰،۲۹،۴۳،۴۵،۴۷،۲۷،۶۶،۷۹،۳۹	GA
۱۹۴/۳۴	۱۵۲-۱۷۹-۲۹۵-۲۰۷-۳۲۰-۴۰۰	۱۳،۶۰،۵۰،۲۹،۴۳،۴۵،۴۷،۲۷،۶۶،۷۹،۳۹	PSO
۱۹۲/۱۷۰۷	۵۰۰،۵۰۰،۵۰۰،۵۰۰،۴۸۲،۵۰۰،۴۹۵	۵۲،۶۲،۶۷،۷۱،۷۲،۷۴،۷۶،۷۷،۷۸،۷۹،۸۰	EGSA [26]
۱۹۱/۸۵۴۳	۳۰۰-۵۰۰-۵۰۰-۳۳۵-۵۰۰-۵۰۰-۲۵۲	۱۳،۶۰،۵۰،۲۹،۴۳،۴۶،۴۷،۲۸،۶۶،۷۹،۷۰	PSO و EGSA

جدول ۵: ENS شبکه ۷۰ باسه بدون در نظر گرفتن منابع DG

الگوریتم	خطوط باز شبکه	ENS (kWh/yr)
حالت اولیه	۶۹،۷۰،۷۱،۷۲،۷۳،۷۴،۷۵،۷۶،۷۷،۷۸،۷۹	۱۳۶۶۴
GA	۷،۲۸،۲۹،۳۹،۴۰،۴۳،۷۵،۵۰،۶۸،۷۲،۴۶	۱۲۹۸۹
PSO	۷،۲۸،۲۹،۳۸،۳۶،۴۳،۷۵،۵۰،۶۸،۷۹،۴۶	۱۲۷۴۰
EGSA	۷،۲۸،۲۹،۷۰،۷۶،۴۳،۷۵،۵۰،۶۸،۷۹،۴۶	۱۲۶۷۳
PSO-GSA	۷،۲۸،۲۹،۳۹،۳۶،۴۳،۷۵،۵۰،۶۸،۷۹،۴۶	۱۲۶۷۰

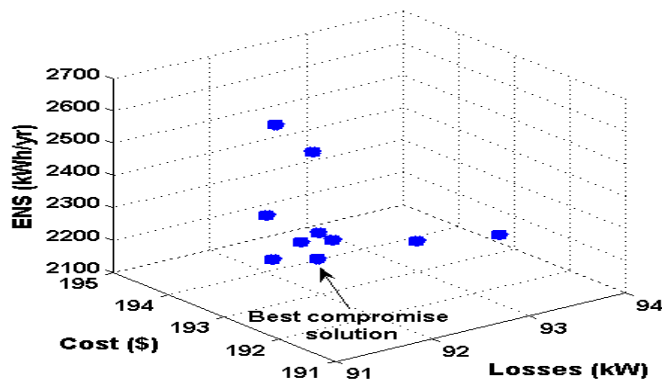
جدول ۶: بهینه‌سازی چندهدفه شبکه ۷۰ باسه

الگوریتم	خطوط باز شبکه	خروجی منابع DG (kW)	تلفات (kW)	هزینه بهره‌برداری (\$)	ENS (kWh/yr)
حالت اولیه	۶۹،۷۰،۷۱،۷۲،۷۳،۷۴،۷۵،۷۶،۷۷،۷۸،۷۹	-	-	۲۰۲/۳۱۱۵	۱۳۶۶۴
GA	۵۱،۳۸،۴۷،۶۶،۳۰،۶۱،۷۵،۷۶،۷۷،۱۳،۷۹	۴۳۰-۲۳۰-۵۰۰-۵۰۰-۲۱۰-۵۰۰	۹۹/۷۷	۱۹۳/۴۱	۲۶۱۱
PSO	۵۱،۳۸،۴۷،۶۶،۳۰،۶۱،۷۵،۶۰،۷۷،۱۳،۷۹	۴۹۰-۲۹۰-۴۸۰-۴۵۰-۵۰۰-۳۱۰-۳۹۰	۹۱/۸۵	۱۹۲/۸۹	۲۵۵۷
EGSA	۵۱،۳۸،۴۷،۶۶،۳۰،۶۱،۷۵،۷۶،۷۷،۱۳،۷۹	۵۰۰-۲۲۰-۵۰۰-۴۴۰-۵۰۰-۳۰۰-۵۰۰	۹۱/۵۳	۱۹۳/۱۵	۲۳۶۶
PSO-GSA	۵۰،۳۸،۴۷،۶۶،۳۰،۶۱،۷۵،۶۰،۷۷،۱۳،۷۹	۵۰۰-۲۹۰-۴۴۰-۴۴۰-۵۰۰-۳۰۰-۵۰۰	۹۱/۵۲	۱۹۲/۷۲	۲۲۱۹

۴-۱-۴- بهینه‌سازی چندهدفه مسئله بازآرایی

در این بخش، به بهینه‌سازی چندهدفه مسئله بازآرایی شبکه توزیع پرداخته شده است. نتایج بهینه‌سازی چندهدفه مسئله بازآرایی در جدول ۶ آورده شده‌اند. دسته جواب‌های بهینه به دست آمده با روش PSO-GSA در شکل ۳ نشان داده شده است. از میان این دسته جواب بهینه، بهترین جواب انتخاب شده با منطق فازی شامل بازکردن خطوط ۵۰، ۳۸، ۴۷، ۶۶، ۳۰، ۶۱، ۶۰ و ۱۳ و بستن خطوط ۷۵، ۷۷ و ۷۹ است. برای این ساختار به دست آمده تلفات شبکه از ۲۲۷/۳۶۷۵ به ۹۱/۹۲ کیلووات، هزینه بهره‌برداری از ۲۰۲/۳۱۱۵ به ۱۹۲/۹۲ دلار و انرژی توزیع نشده نیز از ۱۳۶۶۴ به ۲۲۱۹ کیلووات ساعت در سال کاهش یافته است. این مقادیر نشان می‌دهند روش PSO-GSA توانسته است به ترتیب ۶۰، ۵ و ۸۴ درصد در تلفات شبکه، هزینه‌های بهره‌برداری و انرژی توزیع نشده کاهش ایجاد کند. با توجه به نتایج، دیده می‌شود کمترین کاهش در هزینه‌های بهره‌برداری اتفاق افتاده است (۵ درصد کاهش)؛ دلیل این موضوع نیز به نزدیکی قیمت تولید انرژی در پست‌های توزیع و منابع تولید پراکنده برمی‌گردد؛ به گونه‌ای

که هزینه تولید انرژی در پست‌های توزیع ۰،۰۴۳ دلار و برای واحدهای تولید پراکنده این میزان بین دو عدد ۰،۰۴ و ۰،۰۴۳ دلار برای هر کیلووات ساعت متغیر است [۳۰]. جدول ۶ نتایج به دست آمده با روش پیشنهادی و سایر روش‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۶، سه الگوریتم PSO، EGSA و PSO-GSA تقریباً به یک میزان مقدار تلفات و هزینه‌های بهره‌برداری را کاهش داده‌اند؛ اما میزان تلفات در ساختار به دست آمده با روش GA به میزان چشمگیری بیشتر از سه الگوریتم دیگر است. انرژی توزیع نشده در ساختار به دست آمده با الگوریتم‌های GA، PSO، EGSA و PSO-GSA به ترتیب برابر ۲۶۱۱، ۲۵۵۷، ۲۳۶۶ و ۲۲۱۹ کیلووات ساعت در سال است. کمترین میزان آن به روش PSO-GSA مربوط است؛ از این رو، الگوریتم PSO-GSA با برقراری یک تناسب مناسب میان توابع هدف مختلف، تقریباً به جواب بهتری نسبت به سایر روش‌ها دست یافته است. با توجه به نتایج به دست آمده اینگونه استنتاج می‌شود که الگوریتم PSO-GSA قدرت زیادی در جستجوی فضای جواب در رسیدن به جواب بهینه دارد که این قابلیت این الگوریتم را در حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه افزایش می‌دهد.



شکل ۳: دسته جواب بهینه پارتو به دست آمده با روش PSO-GSA برای شبکه ۷۰ باسه

جدول ۷: نتایج بازاریابی هم‌زمان چندهدفه شبکه ۱۱۹ باسه و جایابی و ساینز بهینه واحدهای تولید پراکنده

روش	خطوط باز	خروجی DG (MW)	هزینه بهره‌برداری (\$)	تلفات (kW)	ENS (kWh/yr)
حالت اولیه	۱۱۹، ۱۳۳	-	۱۰۳۲۳۳۶	۱۲۹۸/۱	۵۱۹۷/۲
GA	۲۱، ۲۵، ۳۳، ۳۹، ۴۳، ۵۳، ۶۰، ۷۰، ۷۴، ۱۲۱، ۱۲۸، ۱۲۹، ۱۳۰، ۱۳۱	- ۲/۲۷۰۹ - ۳/۰۱۸۶ ۸/۱۲۴۳	۴۲۷۴۸۸۴	۶۴۵/۶۵	۲۳۱۴/۶
PSO	۲۳، ۲۵، ۳۴، ۳۹، ۴۲، ۴۳، ۵۰، ۶۱، ۷۰، ۷۳، ۷۶، ۹۵، ۱۰۷، ۱۰۸، ۱۳۰	- ۲/۶۵۱۰ - ۴/۱۹۰۹ ۲/۵۰۸۶	۶۰۱۱۳۲۵	۶۲۰/۵۹	۳۲۱۰/۳
EGSA	۲۳، ۲۵، ۳۴، ۳۹، ۴۲، ۴۳، ۵۰، ۶۱، ۷۰، ۷۳، ۷۶، ۹۵، ۱۰۷، ۱۰۸، ۱۳۰	- ۲/۲۷۰۹ - ۲/۳۳۰۲ ۸/۲۱۴۳	۳۹۰۸۵۴۷	۶۱۷/۹۲	۲۶۹۴/۴
PSOGSA	۱۶، ۲۳، ۳۴، ۴۲، ۴۳، ۵۰، ۶۱، ۷۰، ۷۴، ۷۵، ۸۲، ۱۰۸، ۱۲۴، ۱۲۵، ۱۳۰	- ۳/۹۷۳۹ - ۲/۲۹۸۳ ۸/۶۰۳۱	۳۴۴۴۶۸۱	۵۶۷/۲۴	۲۲۸۱/۹

۴-۲- شبکه ۱۱۹ باسه IEEE

در این بخش از شبکه ۱۱۹ باسه به‌عنوان سیستم مطالعه شده بعدی برای اثبات کارایی و برتری الگوریتم PSO-GSA در حل مسئله بازاریابی چندهدفه استفاده شده است. این شبکه دارای ۱۱۹ باس، ۱۳۳ خط و ۱۵ خط در حالت عادی باز است. خطوط ۱۱۹ تا ۱۳۳ این شبکه در حالت عادی بازند. کل بار مصرفی شبکه ۲۲/۷۰۹ مگاوات و ۱۷/۰۴۱ مگاوات است که در ولتاژ نامی ۱۱ کیلوولت کار می‌کند. مشخصات مربوط به شبکه و پارامترهای قابلیت اطمینان این شبکه در مرجع [۳۲] آمده‌اند. برای سیستم ۱۱۹ باس مدنظر ۳ منبع DG با حداکثر ظرفیت ۱۴ مگاوات در باس‌های ۷۹، ۲۹ و ۱۱۰ در نظر گرفته شده‌اند [۳۲]. هزینه تولید انرژی برای منابع DG، پست توزیع و هر جفت

کلیدزنی به ترتیب برابر ۰/۰۴۱، ۰/۰۴۳ دلار بر کیلووات ساعت و ۰/۰۴۱ دلار در نظر گرفته شده است [۳۰]. به‌منظور اثبات کارایی الگوریتم PSO-GSA با سایر روش‌ها، نتایج به دست آمده از حل مسئله بازاریابی چندهدفه با استفاده از الگوریتم پیشنهادی با سه الگوریتم PSO، GA و EGSA مقایسه شده‌اند. در جدول ۷، نتایج بازاریابی هم‌زمان چندهدفه شبکه ۱۱۹ باسه و ساینز بهینه واحدهای DG به دست آمده با روش‌های PSO، GA، EGSA و روش پیشنهادی PSO-GSA نشان داده شده‌اند. برای ساختار اولیه شبکه، مقدار تلفات ۱۲۹۸/۱ کیلووات، هزینه بهره‌برداری شبکه ۹۸۴۳۲۰۳ دلار و انرژی توزیع نشده شبکه نیز برابر ۵۱۹۷/۲ کیلووات در سال است. با توجه به نتایج جدول ۷، الگوریتم GA با بازکردن خطوط ۴۳، ۲۵، ۲۱، ۱۲۱، ۵۳، ۶۰، ۳۹، ۷۰، ۷۴، ۱۲۸، ۱۲۹، ۱۳۰، ۱۳۱

۸۴ بازآرایی بهینه شبکه توزیع در حضور تولید پراکنده با استفاده از الگوریتم تکاملی PSOGSA در چارچوب فازی

حل مسئله بازآرایی شبکه توزیع با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده (DG) استفاده شده است. اهداف مدنظر شامل کاهش تلفات، هزینه‌های بهره‌برداری و افزایش قابلیت اطمینان در حضور منابع DG هستند که به دو صورت بازآرایی تک‌هدفی و بازآرایی چندهدفه به صورت هم‌زمان انجام می‌شود. وضعیت بهینه کلیدها به منظور حداکثر کردن قابلیت اطمینان و حداقل کردن تلفات توان و هزینه‌های بهره‌برداری با استفاده از الگوریتم PSOGSA حاصل می‌شوند که ترکیبی از روش‌های الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم جستجوی گرانشی است. سپس از منطق فازی برای انتخاب بهترین ساختار شبکه استفاده شده است. روش پیشنهادی روی شبکه‌های ۷۰ و ۱۱۹ باسه توزیع IEEE پیاده‌سازی شده است. نتایج حاصل از مقایسه روش پیشنهادی در این مقاله با سایر روش‌ها حاکی از کارایی بهتر آن در کاهش میزان تلفات، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و افزایش قابلیت اطمینان نسبت به سایر الگوریتم‌های فراابتکاری در نظر گرفته شده است.

مراجع

- [1] P. Zhang, W. Li, and S. Wang, "Reliability-oriented distribution network reconfiguration considering uncertainties of data by interval analysis," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 34, No. 1, pp. 138-144, 2012.
- [2] Q. Zhou, D. Shirmohammadi, and W.-H. Liu, "Distribution feeder reconfiguration for service restoration and load balancing," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 12, No. 2, pp. 724-729, 1997.
- [3] A. Merlin, "Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration for an urban power distribution system," *Proc. of 5th PSCC, 1975*, Vol. 1, pp. 1-18, 1975.
- [4] L. W. de Oliveira, S. Carneiro Jr, E. J. De Oliveira, J. Pereira, I. C. Silva Jr, and J. S. Costa, "Optimal reconfiguration and capacitor allocation in radial distribution systems for energy losses minimization," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 32, No. 8, pp. 840-848, 2010.
- [5] J. Savier and D. Das, "Loss allocation to consumers before and after reconfiguration of radial distribution networks," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 33, No. 3, pp. 540-549, 2011.
- [6] M. Abdelaziz, "Distribution network reconfiguration using a genetic algorithm with varying population size," *Electric Power Systems*

۳۳ و نصب سه واحد DG با خروجی ۳/۰۱۸۶، ۲/۲۷۰۹ و ۸/۱۲۴۳ مگاوات، بازآرایی شبکه را به اتمام رسانده است. هزینه بهره‌برداری، تلفات و انرژی توزیع‌نشده برای ساختار به‌دست‌آمده به ترتیب برابر ۴۲۷۴۸۸۴ دلار، ۶۴۵/۶۵ کیلووات و ۲۳۱۴/۶ کیلووات ساعت در سال است. دو الگوریتم PSO و EGSA با بازکردن خطوط ۴۳، ۲۵، ۲۳، ۴۲، ۵۰، ۶۱، ۳۹، ۹۵، ۷۰، ۷۳، ۷۶، ۱۰۷، ۱۳۰، ۱۰۸، ۳۴ بازآرایی شبکه را انجام داده‌اند. الگوریتم PSO نصب سه واحد DG با خروجی ۴/۱۹۰۹، ۲/۶۵۱۰ و ۲/۵۰۸۶ مگاوات را پیشنهاد داده است که به ترتیب هزینه بهره‌برداری، تلفات و انرژی توزیع‌نشده شبکه را به مقادیر ۶۰۱۱۳۲ دلار، ۶۲۰/۵۹ کیلووات و ۳۲۱۰/۳ کیلووات ساعت در سال کاهش داده است؛ اما الگوریتم EGSA نصب سه واحد DG با خروجی ۲/۳۳۰۲، ۲/۲۷۰۹ و ۸/۲۱۴۳ مگاوات را پیشنهاد داده که به ترتیب هزینه بهره‌برداری، تلفات و انرژی توزیع‌نشده شبکه را به مقادیر ۳۹۰۸۵۴۷ دلار، ۶۱۷/۹۲ کیلووات و ۲۶۹۴/۴ کیلووات ساعت در سال کاهش داده است.

الگوریتم پیشنهادی PSOGSA در این مقاله با بازکردن خطوط ۴۳، ۱۶، ۲۳، ۴۲، ۵۰، ۶۱، ۱۲۴، ۱۲۵، ۷۰، ۷۴، ۷۵، ۸۲، ۱۳۰، ۱۰۸، ۳۴ و نصب سه واحد DG با خروجی‌های ۲/۲۹۸۳، ۳/۹۷۳۹ و ۸/۶۰۳۱ مگاوات، بازآرایی شبکه را به اتمام رسانده است. هزینه بهره‌برداری، تلفات و انرژی توزیع‌نشده شبکه برای این ساختار به ترتیب برابر ۳۴۴۴۶۸۱ دلار، ۵۶۷/۲۴ کیلووات و ۲۲۸۱/۹ کیلووات ساعت در سال است. با توجه به نتایج جدول ۷، دیده می‌شود روش پیشنهادی در این مقاله به خوبی توانسته است بیشترین کاهش را در مقادیر هر سه تابع هدف هزینه بهره‌برداری، تلفات و انرژی توزیع‌نشده نسبت به سایر روش‌ها ارائه دهد که این نشان‌دهنده قدرت زیاد و کارایی بهتر روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌ها در حل مسئله بازآرایی شبکه توزیع است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله از یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه برای

- of *Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 91, pp. 20-33, 2017.
- [19] T. Niknam, A. Ranjbar, and A. Shirani, "Impact of distributed generation on volt/var control in distribution networks," in *2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*, Vol. 3: IEEE, p. 7 pp. 2003.
- [20] T. L. Saaty, "Decision making with the analytic hierarchy process," *International journal of services sciences*, Vol. 1, No. 1, pp. 83-98, 2008.
- [21] S. M. Lee, *Goal programming for decision analysis*. Auerbach Publishers Philadelphia, 1972.
- [22] J. Knowles and D. Corne, "The pareto archived evolution strategy: A new baseline algorithm for pareto multiobjective optimisation," in *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406)*, 1999, Vol. 1: IEEE, pp. 98-105.
- [23] I. Roytelman, V. Melnik, S. Lee, and R. Lugtu, "Multi-objective feeder reconfiguration by distribution management system," *IEEE Transactions on Power systems*, Vol. 11, No. 2, pp. 661-667, 1996.
- [24] A. Ahuja, S. Das, and A. Pahwa, "An AIS-ACO hybrid approach for multi-objective distribution system reconfiguration," *IEEE transactions on power systems*, Vol. 22, No. 3, pp. 1101-1111, 2007.
- [25] D. Das, "A fuzzy multiobjective approach for network reconfiguration of distribution systems," *IEEE transactions on power delivery*, Vol. 21, No. 1, pp. 202-209, 2005.
- [26] M. R. Narimani, A. A. Vahed, R. Azizpanah-Abarghoee, and M. Javidsharifi, "Enhanced gravitational search algorithm for multi-objective distribution feeder reconfiguration considering reliability, loss and operational cost," *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 8, No. 1, pp. 55-69, 2014.
- [27] H. Lotfi, R. Ghazi, and M. bagher Naghibi-Sistani, "Multi-objective dynamic distribution feeder reconfiguration along with capacitor allocation using a new hybrid evolutionary algorithm," *Energy Systems*, pp. 1-31, 2019.
- [28] S. Mirjalili and S. Z. M. Hashim, "A new hybrid PSO-GSA algorithm for function optimization," in *2010 international conference on computer and information application*, 2010: IEEE, pp. 374-377.
- [29] T. Niknam, "An efficient hybrid evolutionary algorithm based on PSO and ACO for distribution feeder reconfiguration," *European Transactions on Electrical Power*, Vol. 20, No. 5, pp. 575-590, 2010.
- [30] H. Lotfi and R. Ghazi, "An Optimal Co-operation of Distributed Generators and Capacitor Banks in Dynamic Distribution Feeder Reconfiguration," in *2019 24th Electrical Power Distribution Conference (EPDC)*, 2019: IEEE, pp. 60-65.
- [31] T. Niknam and E. A. Farsani, "A hybrid self-adaptive particle swarm optimization and modified shuffled frog leaping algorithm for distribution feeder reconfiguration," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 23, No. 8, pp. 1340-1349, 2010.
- Research*, vol. 142, pp. 9-11, 2017.
- [7] M. Kaur and S. Ghosh, "Network reconfiguration of unbalanced distribution networks using fuzzy-firefly algorithm," *Applied Soft Computing*, Vol. 49, pp. 868-886, 2016.
- [8] R. Pegado, Z. Naupari, Y. Molina, and C. Castillo, "Radial distribution network reconfiguration for power losses reduction based on improved selective BPSO," *Electric Power Systems Research*, vol. 169, pp. 206-213, 2019.
- [9] A. Zidan and E. F. El-Saadany, "Distribution system reconfiguration for energy loss reduction considering the variability of load and local renewable generation," *Energy*, Vol. 59, pp. 698-707, 2013.
- [10] E. Mahboubi-Moghaddam, M. R. Narimani, M. H. Khooban, and A. Azizivahed, "Multi-objective distribution feeder reconfiguration to improve transient stability, and minimize power loss and operation cost using an enhanced evolutionary algorithm at the presence of distributed generations," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 76, pp. 35-43, 2016.
- [11] M. Sedighzadeh, M. Esmaili, and M. Mahmoodi, "Reconfiguration of distribution systems to improve reliability and reduce power losses using Imperialist Competitive Algorithm," *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 13, no. 3, pp. 287-302, 2017.
- [12] E. Hooshmand and A. Rabiee, "Energy management in distribution systems, considering the impact of reconfiguration, RESs, ESSs and DR: A trade-off between cost and reliability," *Renewable energy*, Vol. 139, pp. 346-358, 2019.
- [13] A. Viet Truong, T. Ngoc Ton, T. Thanh Nguyen, and T. Duong, "Two states for optimal position and capacity of distributed generators considering network reconfiguration for power loss minimization based on runner root algorithm," *Energies*, Vol. 12, no. 1, p. 106, 2019.
- [14] J. Siabalaee, N. Rezanejad, and G. B. Gharehpetian, "Reconfiguration and DG Sizing and Placement Using Improved Shuffled Frog Leaping Algorithm," *Electric Power Components and Systems*, pp. 1-14, 2020.
- [15] H. Teimourzadeh and B. Mohammadi-Ivatloo, "A three-dimensional group search optimization approach for simultaneous planning of distributed generation units and distribution network reconfiguration," *Applied Soft Computing*, Vol. 88, p. 106012, 2020.
- [16] J. Endrenyi, *Reliability modeling in electric power systems*. Wiley New York, 1978.
- [17] S. Khushalani, J. M. Solanki, and N. N. Schulz, "Development of three-phase unbalanced power flow using PV and PQ models for distributed generation and study of the impact of DG models," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 22, No. 3, pp. 1019-1025, 2007.
- [18] M. Emmanuel and R. Rayudu, "The impact of single-phase grid-connected distributed photovoltaic systems on the distribution network using PQ and PV models," *International Journal*

on *Electrical Engineering and Informatics*, Vol. 5,
No. 3, p. 297, 2013.

[32]S. Ghasemi and J. Moshtagh, "Radial distribution systems reconfiguration considering power losses cost and damage cost due to power supply interruption of consumers," *International Journal*

-
- ¹ Enhanced Gravitational Search Algorithm
 - ² Critical Clearing Times
 - ³ Imperialist competitive algorithm
 - ⁴ Improved Shuffled Frog Leaping Algorithm
 - ⁵ Mass
 - ⁶ Pareto-Optimal Solution