

Evaluation of Optimization and Bi-objective Reconfiguration of Distribution Systems in the Presence of Distributed Generation Units Using a Mixed-Integer Nonlinear Programming Model

Azadeh Barani,^{1,5} Majid Moazzami,^{2,5*} Ghazanfar Shahgholian,^{3,5} Fariborz Haghghatdar-Fesharaki^{4,5}

¹ Department of Electrical Engineering, Na. C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran, azadeh.barani@iau.ac.ir

² Department of Electrical Engineering, Na. C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran, majid.moazzami@iau.ac.ir

³ Department of Electrical Engineering, Na. C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran, shahgholiangh@iau.ac.ir

⁴ Department of Electrical Engineering, Na. C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran, fr_haghghat@iau.ac.ir

⁵ Smart Microgrid Research Center, Na. C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran

Keywords:

voltage deviation,
distribution system reconfiguration,
mixed integer programming,
active power losses,
distributed generation.

Abstract: In this paper, a novel mathematical formulation based on Mixed-Integer Nonlinear Programming (MINLP) is proposed, which for the first time solves the integrated problem of distribution system reconfiguration and distributed generation (DG) placement without using trigonometric functions and Without considering linear approximations; instead, it leverages the node-branch incidence matrix and the real-imaginary components of voltage and current. This model reduces computational complexity; it also ensures that a global optimal solution is attained through the branch-and-bound method in GAMS software. The primary objectives of the reconfiguration and optimal DG placement in distribution systems are to minimize active power losses, to reduce voltage deviation, and to improve voltage profiles. A bi-objective function is defined to enhance the efficiency of radial distribution systems; it provides an effective strategy while adhering to system constraints by considering total active power losses and voltage deviation. Simulation results on 33-bus and 69-bus distribution systems demonstrate the superior performance of the proposed method compared to the existing approaches. The results reveal that, owing to the elimination of trigonometric functions and the integrated optimization of both problems, the proposed method achieves 72.97% and 83.55% reductions in total active power losses for the 33-bus and 69-bus systems respectively. Additionally, voltage deviation in these systems is reduced by 94.77% and 96.99% respectively.

Original Research Article

Paper History:

Received: 26/01/2025

Revise: 19/06/2025

Accepted: 23/07/2025

How to cite this article: Barani, A., Moazzami, M., Shahgholian, Gh., Haghghatdar-Fesharaki, F., "Evaluation of Optimization and Bi-objective Reconfiguration of Distribution Systems in the Presence of Distributed Generation Units Using a Mixed-Integer Nonlinear Programming Model", Energy Engineering and Management, Vol. 14, No. 3, PP. 28-47, 2024, <https://doi.org/10.22052/EEM.2025.256256.1099>

© 2023 University of Kashan Press.

This is an open access article under the CC BY license.(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Extended Abstract

Introduction

Power distribution in distribution systems is carried out using a radial configuration. Unfortunately, the losses that occur in the power transmission and distribution process are a matter of concern and cannot be ignored. Approximately 70% of losses occur at the distribution level and about 30% at the transmission level. The radial structure of distribution systems and an increase in loading due to industrialization have increased power losses at the distribution level. The radial structure facilitates the coordination of protective devices and also leads to a reduction in the investment in the infrastructure and support. To reduce power losses in the distribution system, power sources such as distributed generation and capacitor banks are commonly used. Today, power generation companies are moving towards increasing their costs and maximizing the level of consumer satisfaction, so they are focused on the optimal management of the distribution system. In addition to the presence of distributed generation, a reliable and cost-effective method that ensures improved services is the reorganization of the distribution system. Improving the voltage profile and limiting power losses are two major challenges in the distribution system that can be solved by installing distributed generation as well as by reconfiguring the distribution system. The process of locating distributed generation to identify the most optimal bus for installation must be carried out with precision and comprehensiveness, which can only lead to a violation of the operating constraints of the distribution system. As a result, the optimal location must be determined by taking into account sensitivity calculations.

Materials and methods

In distribution systems, there are two types of switches, namely sectionalizer switches and communication switches, which are normally closed and open respectively. These switches adjust their open and closed positions by changing the configuration of the distribution system to maintain the system performance within the allowed range. In general, the problem can be described as: 'Determine the best subset of lines that creates a radial configuration system from an initial solution space corresponding to closed lines (sectionalizers) and open lines (communication switches) that allow reducing

the total active power losses in the system devices (current in the lines and power generation in the sources), ensuring power balance and voltage limits at all nodes'. In mathematical terms, this problem can be solved using a nonlinear programming model. The discussion of distribution system rearrangement along with the location of distributed generation is raised in this research as a dual-objective optimization problem. To solve the problem of distribution system rearrangement or distributed generation location, several methods have been proposed by researchers, including optimization methods such as the heuristic method (HM), arithmetic optimization algorithm (AOA), intelligent water droplet algorithm (IWDA), training-based optimization (TLBO), firework algorithm (FWA), and uniform voltage distribution algorithm based on constructive rearrangement (UVDA).

Considering the difficulty of solving the problem using metaheuristic optimization methods presented in research and the existence of very limited studies on solving the problem of optimal rearrangement of distribution systems simultaneously with the location of distributed generation units, in this paper a mixed integer nonlinear programming (MINLP) model is proposed to solve the problem. A new formulation is implemented, which replaces the formulation of trigonometric functions of power balance equations to solve the problem of integrating distribution system rearrangement with the location of distributed generation units. For the first time, an attempt is made to overcome this problem by presenting a novel mathematical formulation. In this method, there is no need to use trigonometric functions, and the complexity of optimization calculations is significantly simplified. The proposed model minimizes the objective functions, including active power losses and voltage deviation under different single-objective and dual-objective conditions, and ultimately improves the voltage profile. The implementation of the proposed model formulation is presented in the specialized software GAMS. The accuracy of the proposed model has been evaluated on medium (33 buses) and large (69 buses) test systems. The following can be briefly mentioned as the innovations of the study:

1. It introduces a new approach to mathematical formulation without the presence of trigonometric functions and linear approximation to solve the problem of distribution system

reorganization simultaneously with the location of distributed generation units, with the multi-objective objectives of reducing power losses, reducing voltage deviations, and consequently improving the voltage profile.

2. It examines the proposed model on medium and large systems to optimize the network layout and also to determine the location and size of distributed generation units under different scenarios and multiple modes.

3. It demonstrates the significant impact of the proposed model on reducing active power losses and modifying the voltage profile in the problem of integrating distribution system reorganization with the location of distributed generation units.

4. It offers a better performance of the proposed model compared to other existing methods in the optimization of distribution systems and finding the global optimal solution.

Result

Simulation results on 33-bus and 69-bus distribution systems show the superior performance of the proposed method compared to the other existing approaches. It is found that the percentage reduction of total active power losses in 33-bus and 69-bus distribution systems has reached 72.97 and 83.55 percent respectively. Also, the voltage deviation in these two systems has been reduced by 94.77 and 96.99 percent respectively.

Discussion and Conclusion

In this paper, the MINLP model is presented to solve the problem of simultaneous distribution system rearrangement with distributed generation location. In general, this complex hybrid problem aims to find the best network arrangement and location for installing distributed generation to reduce power losses and to improve the voltage profile. The proposed model effectively improves the optimization problem in the radial distribution system by satisfying the technical constraints for the bi-objective function. The performance of MINLP in 33 and 69 bus radial distribution networks has been evaluated for three different scenarios and multiple modes in the GAMS software. The new formulation of the node-branch intersection matrix in power distribution calculations has been used to manage simultaneously the distribution system rearrangement and the allocation of distributed generation units. Significant improvements in the active power loss indices, voltage deviation, and voltage profile have been observed in the case of simultaneous distribution system rearrangement with distributed generation location. For dual-objective conditions in the third scenario (reducing total active power losses as well as voltage deviation), the simultaneous reconfiguration mode with distributed generation location provides promising results.

ارزیابی بهینه‌سازی و بازآرایی دوهدفه سیستم‌های توزیع در حضور واحدهای تولید پراکنده با استفاده از مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط

آزاده بارانی^{۱،۵}، مجید معظمی^{۲،۵*}، غضنفر شاهقلیان^{۳،۵}، فربرز حقیقت‌دار- فشارکی^{۴،۵}

^۱ دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران،

azadeh.barani@iau.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، majid.moazzami@iau.ac.ir

^۳ استاد دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، shahgholian@iau.ac.ir

^۴ استادیار دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، fr_haghighat@iau.ac.ir

^۵ مرکز تحقیقات ریز شبکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

واژه‌های کلیدی:

انحراف ولتاژ،

بازآرایی سیستم توزیع،

برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط،

تلفات توان اکتیو،

تولیدات پراکنده.

چکیده: در این مقاله، یک فرمول‌بندی ریاضی نوین مبتنی بر برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط (MINLP) ارائه شده که برای اولین بار مسئله بازآرایی سیستم توزیع و مکان‌یابی تولیدات پراکنده را بدون استفاده از توابع مثلثاتی، بدون در نظر گرفتن تقریب‌های خطی‌سازی و با بهره‌گیری از ماتریس تلاقی گره-شاخه و مؤلفه‌های حقیقی-موهومی ولتاژ و جریان، به صورت یکپارچه حل می‌کند. این مدل، پیچیدگی محاسباتی را کاهش می‌دهد و تضمین می‌کند جواب بهینه سراسری با استفاده از روش شاخه و کران در نرم‌افزار با سرعت حل بالاتر گمز به دست آید. هدف اصلی بازآرایی و همچنین نصب بهینه تولیدات پراکنده در سیستم‌های توزیع، به حداقل رساندن تلفات توان اکتیو، کاهش انحراف ولتاژ و بهبود پروفیل ولتاژ است. یک تابع دوهدفه به منظور بهبود بهره‌وری سیستم توزیع شعاعی تعریف شده که علاوه بر حفظ محدودیت‌های سیستم، با در نظر گرفتن تلفات توان اکتیو کل و انحراف ولتاژ راهبرد مناسبی را ارائه می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی بر روی سیستم‌های توزیع ۳۳ باس و ۶۹ باس، برتری عملکرد روش پیشنهادی را در مقایسه با سایر رویکردهای موجود نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که روش پیشنهادی به دلیل حذف توابع مثلثاتی و ادغام بهینه‌سازی دو مسئله، درصد کاهش تلفات توان اکتیو کل در سیستم توزیع ۳۳ باس و ۶۹ باس به ترتیب به ۷۲/۹۷ و ۸۳/۵۵ رسیده است. همچنین، انحراف ولتاژ در این دو سیستم به ترتیب به ۹۴/۷۷ و ۹۶/۹۹ درصد کاهش یافته است.

مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱

۱. مقدمه

منابع)، تضمین تعادل توان و حدود ولتاژ در تمام گره‌ها را فراهم کند.» به عبارت ریاضی، این مسئله می‌تواند با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی حل شود [۳]. بحث بازآرایی سیستم توزیع به همراه مکان‌یابی تولیدات پراکنده در این پژوهش به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی دوهدفه مطرح می‌شود. برای حل مسئله بازآرایی سیستم توزیع و یا مکان‌یابی تولیدات پراکنده تاکنون روش‌های متعددی توسط محققان پیشنهاد شده که می‌توان روش‌های بهینه‌سازی مانند روش ابتکاری^۵ (HM) [۴]، الگوریتم بهینه‌سازی حسابی^۶ (AOA) [۵]، الگوریتم قطرات هوشمند آب^۷ (IWDA) [۶]، بهینه‌سازی مبتنی بر یادگیری و آموزش^۸ (TLBO) [۷]، الگوریتم آتش‌بازی^۹ (FWA) [۸] و الگوریتم توزیع یکنواخت ولتاژ مبتنی بر بازآرایی سازنده^{۱۰} (UVDA) [۹] را نام برد.

۲.۱. مرور ادبیات مرتبط

در مرجع [۱۰] از روش انطباق فازی برنامه‌نویسی تکاملی^{۱۱} (FEP) برای حل مسئله بازآرایی سیستم توزیع به منظور کاهش تلفات توان اکتیو و انحراف ولتاژ استفاده شده است. این روش از ترکیب منطق فازی و الگوریتم‌های تکاملی بهره می‌برد. اگرچه قابلیت مدیریت عدم قطعیت را دارد و برای حل طیف وسیعی از مسائل بهینه‌سازی، از جمله مسائل با ابعاد بالا به کار می‌رود، پاسخ بهینه سراسری را تضمین نمی‌کند. نویسندگان در مرجع [۱۱] از الگوریتم ژنتیک^{۱۲} (GA)، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^{۱۳} (PSO) و ترکیب این دو الگوریتم برای حل مسئله مکان‌یابی تولیدات پراکنده استفاده کرده‌اند. الگوریتم GA انعطاف‌پذیری بالا و قابلیت حل مسائل ساده تا پیچیده را دارد، اما برای مسائل با ابعاد بزرگ ممکن است زمان اجرای طولانی داشته باشد و در برخی موارد در جواب بهینه محلی به دام افتد. از جمله مزایای الگوریتم PSO سادگی پیاده‌سازی و سرعت همگرایی بالاست و معمولاً نسبت به الگوریتم GA سریع‌تر به جواب نزدیک می‌شود. این روش همانند الگوریتم GA احتمال گیر افتادن در کمینه‌های محلی و در برخی موارد در یک جواب بهینه محلی وجود دارد. با ترکیب این دو الگوریتم، می‌توان از مزایای هر دو بهره‌مند شد. برای مثال، می‌توان از توانایی الگوریتم GA در کاوش فضای

پخش توان در سیستم‌های توزیع، با استفاده از پیکربندی شعاعی انجام می‌شود و متأسفانه تلفاتی که در فرایند انتقال و پخش توان رخ می‌دهند، امری نگران‌کننده و غیرقابل اغماض است. در سطح توزیع تقریباً ۷۰ درصد و در سطح انتقال نیز حدود ۳۰ درصد تلفات رخ می‌دهد [۱]. ساختار شعاعی سیستم‌های توزیع و همچنین افزایش بارگذاری ناشی از صنعتی شدن باعث افزایش تلفات توان در سطح توزیع شده است. ساختار شعاعی باعث سهولت در هماهنگی ادوات حفاظتی (ریکلوزر، سکسیونر و فیوزها) می‌شود و همچنین منجر به کاهش سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌ها و پشتیبانی خواهد شد. به منظور کاهش تلفات توان در سیستم توزیع از منابع توان مانند تولیدات پراکنده^۱ و بانک‌های خازنی معمولاً استفاده می‌شود. امروزه شرکت‌های تولید برق به سمت افزایش هزینه‌های خود و به حداکثر رساندن سطح رضایت‌مندی مصرف‌کنندگان حرکت می‌کنند، بنابراین بر مدیریت بهینه سیستم توزیع متمرکز شده‌اند. علاوه بر حضور تولید پراکنده یک روش قابل اعتماد و مقرون به صرفه که بهبود خدمات را تضمین می‌کند، بازآرایی سیستم توزیع^۲ است.

بهبود پروفیل ولتاژ و محدود کردن تلفات توان دو چالش اصلی در سیستم توزیع است که می‌توان با نصب تولید پراکنده و همچنین بازآرایی سیستم توزیع مسئله را حل کرد. فرایند مکان‌یابی تولید پراکنده با هدف شناسایی بهینه‌ترین باس برای نصب، باید با دقت و جامعیت انجام شود که این امر تنها می‌تواند منجر به نقض محدودیت‌های بهره‌برداری سیستم توزیع شود؛ در نتیجه باید با در نظر گرفتن محاسبات حساسیت، مکان‌یابی بهینه انجام شود.

۱.۱. بیان مسئله

در سیستم‌های توزیع دو نوع کلید به نام کلید سکشنالایزر^۳ و کلید ارتباطی^۴ وجود دارد که به ترتیب در حالت نرمال بسته و باز هستند. این کلیدها با تغییر پیکربندی سیستم توزیع، مکان‌های باز و بسته خود را تنظیم می‌کنند تا عملکرد سیستم در محدوده مجاز حفظ شود [۲]. به طور کلی، مسئله را می‌توان این گونه توصیف کرد: «بهترین زیرمجموعه‌ای از خطوط را تعیین کنید که سیستم پیکربندی شعاعی را از یک فضای جواب اولیه منطبق با خطوط بسته (سکشنالایزرها) و خطوط باز (کلیدهای ارتباطی) ایجاد می‌کند که امکان کاهش تلفات توان اکتیو کل در ادوات سیستم (جریان در خطوط و تولید توان در

5. Heuristic method
6. Arithmetic optimization algorithm
7. Intelligent water drop algorithm
8. Training and learning based optimization
9. Fireworks algorithm
10. Uniform voltage distribution-based constructive reconfiguration algorithm
11. Fuzzy adaptation of evolutionary programming
12. Genetic algorithm
13. Particle swarm optimization

1. Distributed generations
2. Distribution system reconfiguration
3. Sectionalizing switch
4. Tie switch

محدودیت‌های پیچیده ممکن است به اصلاحات نیاز داشته باشد. در مرجع [۱۷] بهینه‌سازی جست‌وجوی گروهی سه‌بعدی (3D-GSO) اتخاذ شده است. یک روش ابتکاری برای یافتن جواب‌های بهینه در فضاهای جست‌وجوی سه‌بعدی است. از جمله معایب آن عدم تطبیق‌پذیری با همه مسائل است بدین‌صورت که برای همه انواع مسائل بهینه‌سازی مناسب نباشد و برای برخی مسائل، الگوریتم‌های دیگری عملکرد بهتری داشته باشند. محققان در مرجع [۱۸] برای بهبود کارایی سیستم توزیع الگوریتم سینوسی-کسینوسی بهبودیافته^۶ (ISCA) به کار برده‌اند. الگوریتم سینوسی-کسینوسی یک الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری است که از رفتار موج سینوسی و کسینوسی الهام گرفته شده است. نسخه‌های بهبودیافته این الگوریتم، با هدف افزایش کارایی و رفع برخی از محدودیت‌های نسخه اولیه توسعه یافته‌اند. در مرجع [۱۹] الگوریتم شبکه عصبی بهبودیافته^۷ (INNA) برای حل مسئله مد نظر ارائه شده است. این الگوریتم نسل جدیدی از شبکه‌های عصبی است که با استفاده از روش‌های مختلف، عملکرد و دقت آن به‌طور قابل توجهی بهبود یافته است. این الگوریتم برای آموزش به حجم زیادی از داده باکیفیت نیاز دارد و ممکن است زمان آموزش طولانی شود. در مرجع [۲۰] الگوریتم قطرات هوشمند آب پیشنهاد شده است. این الگوریتم را می‌توان با الگوریتم‌های GA و PSO مقایسه کرد. به‌طور کلی از GA ساده‌تر است، اما ممکن است در برخی مسائل پیچیده، عملکرد ضعیف‌تری داشته باشد. همچنین به نسبت الگوریتم PSO ممکن است سرعت همگرایی کمتری داشته باشد. در مرجع [۲۱] الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات گرینشی^۸ (SPSO) به‌منظور بهینه‌سازی بازآرایی سیستم توزیع پیشنهاد شده است. اگرچه این الگوریتم در ارزیابی کاهش تلفات توان و بهبود حداقل ولتاژ شبکه کارآمده بوده، به دلیل وابستگی به تابع سیگموئید ستی و حساسیت به پارامترهای اولیه می‌تواند به همگرایی زودرس یا افت کارایی منجر شود. در این مقاله، تأثیر منابع تولیدات پراکنده بر بازآرایی شبکه توزیع بررسی نشده است. در مرجع [۲۲] با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری^۹ (GWO) به بررسی حل مسئله بازآرایی سیستم توزیع شعاعی تحت شرایط بارگذاری مختلف اشاره شده که در آن مدل پیشنهادی تنها بر روی سیستم متوسط (۳۳ باس) اجرا شده است. از آنجاکه این الگوریتم به تنظیم دستی پارامترها وابسته است، روش فوق نمی‌تواند راهکار مناسب برای کاهش زمان محاسبات در ابعاد بزرگ ارائه کند. در مرجع [۲۳] یک روش

جست‌وجو و از سرعت همگرایی الگوریتم PSO استفاده کرد. با وجود این، پیاده‌سازی ترکیبی این دو الگوریتم نسبت به هریک از آن‌ها به‌تنهایی پیچیده‌تر است و تعداد پارامترهایی که باید تنظیم شوند افزایش می‌یابد که می‌تواند پیچیدگی تنظیم الگوریتم را افزایش دهد. در مرجع [۱۲] از الگوریتم بهینه‌سازی علوفه‌یابی باکتریایی^۱ (BFOA) در تخصیص تولیدات پراکنده به‌منظور کاهش تلفات توان و انحراف ولتاژ استفاده کردند. این الگوریتم الهام‌گرفته از طبیعت است که از رفتار جست‌وجوی غذا در باکتری اشریشیا کلی تقلید می‌کند. ساختار این الگوریتم نسبتاً ساده بوده و پیاده‌سازی آن آسان است. در برخی موارد، سرعت همگرایی الگوریتم مذکور ممکن است نسبت به سایر الگوریتم‌ها کمتر باشد. مجدد این الگوریتم هم ممکن است در بهینه محلی گیر کند و نتواند به بهینه سراسری دست یابد. در مرجع [۱۳] برای کاهش تلفات توان اکتیو در حل مسئله بازآرایی و مکان‌یابی تولیدات پراکنده الگوریتم جست‌وجوی هارمونی^۲ (HSA) را برگزیدند. یک الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری است که از فرایند تولید موسیقی الهام گرفته است. اگرچه در بسیاری موارد سرعت همگرایی بالایی دارد و به‌سرعت به جواب‌های نزدیک به بهینه می‌رسد، انتخاب اندازه مناسب برای حافظه هارمونی می‌تواند بر عملکرد الگوریتم تأثیرگذار باشد و مانند سایر الگوریتم‌های فراابتکاری ممکن است در بهینه محلی گیر کند و به بهینه سراسری نرسد. مدل بهینه‌سازی آنفلوآنزای خوکی مبتنی بر قرنطینه^۳ (SIMBO-Q) در مرجع [۱۴] برای حل مسئله انتخاب نمودند. با استفاده از این مدل منابع محدود را می‌توان به بهترین نحو تخصیص داد، اما پیچیدگی محاسباتی بالایی دارند که ممکن است اجرای آن را دشوار کند. الگوریتم جست‌وجوی فاخته بهبودیافته^۴ (ACSA) در مرجع [۱۵] استفاده شده است. این الگوریتم سرعت همگرایی و انعطاف‌پذیری بالایی دارد ولی به‌شدت به انتخاب پارامترهای آن مانند نرخ کشف لانه، نرخ جهش و اندازه جمعیت وابسته است و همچنین تعیین مقادیر مناسب برای پارامترهای کنترل آن می‌تواند چالش‌برانگیز باشد. پژوهشگران در مرجع [۱۶] از الگوریتم چرخه آب^۵ (WCA) برای بهبود بهره‌بری سیستم استفاده کردند. یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی بر طبیعت است که از فرایند طبیعی چرخه آب الهام گرفته شده است. این روش قابلیت ترکیب با سایر الگوریتم‌ها را دارد و در بسیاری موارد سرعت همگرایی آن بالا است. به نسبت برخی الگوریتم‌ها تنظیم پارامتر در آن ساده‌تر است و از طرفی برای حل مسائل با

6. Three-dimensional Group Search Optimization
7. Improved sine-conse algorithm
8. Improved neural network algorithm
9. Selective particle swarm optimization
10. Gray wolf optimization

1. Bacterial foraging optimization algorithm
2. Harmony search algorithm
3. Swine influenza model-based optimization with quarantine
4. Adaptive cuckoo search algorithm
5. Water cycle algorithm

گزارش شده، در شرایط عملی (مانند شبکه‌هایی با اتصالات پیچیده) ممکن است دقت کاهش یابد. MILP به دلیل خطی بودن ذاتی، برای مسائل غیرخطی و پیچیده ناکارآمد است. این روش نیاز به تقریب‌های نادقیق دارد که منجر به خطا در نتایج، جواب‌های زیربینه و عدم توانایی در مدل‌سازی مسائل پیچیده می‌شود. در مقابل روش‌های غیرخطی با حفظ ماهیت غیرخطی مسئله، دقت بالاتر و جواب‌های بهینه‌تر ارائه می‌دهند.

خلاصه‌ای از مقایسه عملکرد الگوریتم‌های مختلف در حل این نوع مسئله در جدول (۱) آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روش پیشنهادی ارائه‌شده رویکردی جامع‌تر نسبت به سایر روش‌های مقایسه‌شده دارد.

۳.۱. نوآوری و ساختار مقاله

با توجه به دشوار بودن حل مسئله توسط روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری ارائه‌شده در تحقیقات و وجود مطالعات بسیار محدود در حل مسئله بازآرایی بهینه سیستم‌های توزیع هم‌زمان با مکان‌یابی واحدهای تولید پراکنده، در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط به‌منظور حل مشکل پیشنهاد شده است. نوآوری اصلی این مطالعه، ارائه یک فرمول‌بندی ریاضی برای مسئله ترکیبی بازآرایی و مکان‌یابی است که با جایگزینی معادلات توان مبتنی بر توابع مثلثاتی با نمایش ماتریسی-مؤلفه‌ای و بدون در نظر گرفتن تقریب‌های خطی‌سازی، از گیر افتادن در بهینه‌های محلی جلوگیری می‌کند. علاوه بر این، این روش برای اولین بار امکان حل هم‌زمان دو مسئله بازآرایی و مکان‌یابی را در سیستم‌های توزیع بزرگ (مانند ۶۹ باس) با استفاده از حل‌کننده‌های دقیق MINLP فراهم می‌کند که در مطالعات پیشین به دلیل پیچیدگی محاسباتی امکان‌پذیر نبوده است. برای نخستین بار تلاش می‌شود تا با ارائه یک فرمول‌بندی ریاضی بدیع، بتوان بر این مشکل فائق آمد. در این روش نیازی به استفاده از توابع مثلثاتی نیست و پیچیدگی محاسبات بهینه‌سازی به‌طور چشمگیری ساده‌تر شده است. مدل پیشنهادی تحت شرایط مختلف تک‌هدفه و دوهدفه، توابع هدف شامل تلفات توان اکتیو و انحراف ولتاژ را به حداقل می‌رساند و در نهایت باعث بهبود پروفیل ولتاژ می‌شود. پیاده‌سازی فرمول‌بندی مدل پیشنهادی در نرم‌افزار تخصصی گمز (سیستم مدل‌سازی جبری عمومی^۱) ارائه می‌شود. صحت مدل پیشنهادی بر روی سیستم‌های آزمون متوسط (۳۳ باس) و بزرگ (۶۹ باس) ارزیابی شده است. از نوآوری مطالعه انجام‌شده می‌توان به‌طور خلاصه به موارد زیر اشاره کرد:

بهبود یافته مبتنی بر الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه^۱ (TSA) را برای بازآرایی سیستم‌های توزیع شعاعی ارائه می‌دهد که از نظر کارایی و سرعت نسبت به روش‌های موجود برتری دارد. با این حال، محدودیت‌های مصرف حافظه و وابستگی به شرایط آزمایشی ایدئال نیازمند بررسی بیشتر است. این روش برای مسائل عملیاتی در سیستم‌های توزیع امیدوارکننده بوده ولی تطبیق‌پذیری آن با سیستم‌های پیچیده‌تر و شرایط واقعی باید ارزیابی شود.

شایان‌ذکر است الگوریتم‌های ابتکاری به محاسبات کم، نیاز دارند و در ارائه نتایج سریع عمل می‌کنند. با وجود این، به‌خصوص برای سیستم‌های پیچیده و بزرگ، آن‌ها اغلب تحت تأثیر محدودیت‌هایی قرار می‌گیرند که باعث می‌شود جواب‌هایی باکیفیت پایین و در برخی موارد غیرعملی ارائه دهند. همچنین ویژگی اصلی رویکردهای بهینه‌سازی فراابتکاری این است که همه آن‌ها تلاش خود را برای حل مسئله بازآرایی سیستم توزیع و مکان‌یابی تولیدات پراکنده در گام‌های متوالی با پیشنهاد راه‌برد تدوین و تکامل متمرکز می‌کنند. این امر نشان می‌دهد که آن‌ها مسئله را به راه‌برد پایه-پیرو تجزیه می‌کنند که در آن رویکرد فراابتکاری لایه اصلی (پایه) است، و مرحله پیرو با رویکرد پخش توان مرسوم متناظر است [۲۴]. اگرچه همه روش‌های مذکور برای حل مسائل بهینه‌سازی با متغیرهای باینری کارایی خوبی دارند، تمرکز اصلی آن‌ها بر طراحی الگوریتم‌هاست و یک رویکرد یکپارچه را تضمین نمی‌کند. ممکن است برای یک مسئله بسیار خوب عمل کند، ولی با توجه به تغییر در شرایط مسئله، جواب بهینه را ارائه ندهد [۲۵ و ۲۶]. برای حل صحیح مسئله بازآرایی سیستم‌های توزیع، نویسندگان در مرجع [۳] یک فرمول‌بندی ریاضی کامل ارائه داده‌اند که برای حل مسئله برنامه‌ریزی بهینه سیستم‌های توزیع در نرم‌افزار AMPL مناسب است. با این حال، مشکل اصلی در این فرمول‌بندی، نمایش پروفیل‌های ولتاژ است؛ زیرا نویسندگان از روش کلاسیک استفاده کرده‌اند که از توابع مثلثاتی بهره می‌برد. این امر باعث ایجاد غیرخطی‌های قوی در مدل بهینه‌سازی می‌شود و احتمال گیر افتادن در جواب بهینه محلی را افزایش می‌دهد [۲۷ و ۲۸]. در مرجع [۲۹] مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط^۲ (MILP) برای حل هم‌زمان مسئله بازآرایی شبکه توزیع و مکان‌یابی تولیدات پراکنده ارائه شده است. هدف اصلی آن کاهش تلفات توان و بهبود پروفیل ولتاژ است. مدل پیشنهادی در مقاله مذکور با خطی‌سازی معادلات غیرخطی توازن توان، امکان استفاده از حل‌کننده CPLEX در نرم‌افزار AMPL را فراهم کرده است. اگرچه خطای مدل خطی‌شده ناچیز

1. Tabu search algorithm

2. Mixed-integer linear programming

جدول (۱): مقایسه روش پیشنهادی با چند روش دیگر

مرجع	روش	نوع تابع هدف		تابع هدف		مکان‌یابی
		تک‌هدفه	دوهدفه	تلفات توان	انحراف ولتاژ	
[۱۰]	انطباق فازی برنامه‌نویسی تکاملی	×	–	×	×	–
[۱۱]	الگوریتم ژنتیک	–	×	×	×	×
[۱۱]	بهینه‌سازی ازدحام ذرات	–	×	×	×	×
[۱۱]	بهینه‌سازی ازدحام ذرات/الگوریتم ژنتیک	–	×	×	×	×
[۱۲]	الگوریتم بهینه‌سازی علوفه‌یابی باکتریایی	–	×	×	×	×
[۱۳]	الگوریتم جست‌وجوی هارمونی	×	–	×	–	×
[۱۴]	مدل بهینه‌سازی آنفلوانزای خوکی مبتنی بر قرنطینه	×	×	×	×	×
[۱۵]	الگوریتم جست‌وجوی فاخته بهبودیافته	×	×	×	–	×
[۱۶]	الگوریتم چرخه آب	×	–	×	×	×
[۱۷]	بهینه‌سازی جست‌وجوی گروهی سه‌بعدی	×	–	×	–	×
[۱۸]	الگوریتم سینوسی – کسینوسی بهبودیافته	×	×	×	–	×
[۱۹]	الگوریتم شبکه عصبی بهبودیافته	×	×	×	–	×
[۲۰]	الگوریتم قطرات آب هوشمند	×	–	×	–	×
[۲۹]	برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط	–	×	×	×	×
روش پیشنهادی	برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط	×	×	×	×	×

۲. فرمول‌بندی حل مسئله مبتنی بر مدل برنامه‌ریزی

غیرخطی عدد صحیح مختلط

بهینه‌سازی بازآرایی سیستم‌های توزیع الکتریکی و مکان‌یابی تولیدات پراکنده، مسئله‌ای چالش‌برانگیز در حوزه بهینه‌سازی است. علت این پیچیدگی، وجود معادلات توازن توان است که حاوی عبارات غیرخطی بین ولتاژ و جریان هستند. علاوه بر این، ماهیت این مسئله بهینه‌سازی، باینری است. به عبارت دیگر، باید زیرمجموعه‌ای از خطوط و باس‌ها انتخاب شود که توابع هدف سیستم توزیع را تحت شرایط مشخص به حداقل برساند. مدل ریاضی کامل مسئله بهینه‌سازی مذکور در ادامه تشریح خواهد شد.

۱.۲. تابع هدف

تابع هدف در مسئله بازآرایی بهینه و مکان‌یابی تولیدات پراکنده، کاهش تلفات توان اکتیو [۳۰ و ۳۱] و انحراف ولتاژ [۳۱] است که به صورت معادله‌های (۱) و (۲) نشان داده می‌شود.

$$\min z_1 = P_{loss} = \sum_{l \in L} R_l I_l^2 \quad (1)$$

$$\min z_2 = VD = \sum_{k=1}^{T_{bus}} (1 - V_k)^2 \quad (2)$$

که در آن‌ها P_{loss} تلفات توان اکتیو، R_l مقاومت شاخه l ، I_l جریان جاری‌شده در شاخه l (متعلق به مجموعه شاخه‌ها L) اعم از

۱. رویکرد جدید فرمول‌بندی ریاضی بدون حضور تابع مثلثاتی و بدون تقریب خطی، برای حل مسئله بازآرایی سیستم توزیع هم‌زمان با مکان‌یابی واحدهای تولید پراکنده با اهداف چندمنظوره کاهش تلفات توان، کاهش انحراف ولتاژ و در نتیجه بهبود پروفیل ولتاژ.

۲. بررسی مدل پیشنهادی بر روی سیستم‌های متوسط و بزرگ برای بهینه‌سازی آرایش شبکه و همچنین تعیین مکان و سایز واحدهای تولید پراکنده تحت سناریوهای مختلف و حالت‌های چندگانه.

۳. تأثیر چشمگیر مدل پیشنهادی بر کاهش تلفات توان اکتیو و اصلاح پروفیل ولتاژ در مسئله ادغام بازآرایی سیستم توزیع با مکان‌یابی واحدهای تولید پراکنده.

۴. عملکرد بهتر مدل پیشنهادی نسبت به سایر روش‌های موجود در بهینه‌سازی سیستم‌های توزیع و یافتن جواب بهینه سراسری.

ساختار مقاله در ادامه به این شرح است: بخش دوم فرمول‌بندی مسئله اهداف فنی، محدودیت‌های مسئله و مدل‌سازی توابع هدف را ارائه می‌دهد. بخش سوم شامل روش‌شناسی MINLP پیشنهادی است. پس از آن، در بخش چهارم اعتبارسنجی عددی و مقایسه نتایج شبیه‌سازی با سایر گزارش‌ها بیان می‌شود. در نهایت، نتیجه‌گیری مطالعات پیشنهادی در بخش پنجم خلاصه شده است.

قیود جریان و ولتاژ مطابق رابطه‌های (۱۰) و (۱۱) در نظر گرفته می‌شوند:

$$-I_l^{\max} \leq I_l \leq I_l^{\max}, \forall l \in L \quad (10)$$

$$V_k^{\min} \leq V_k \leq V_k^{\max}, \forall k \in N \quad (11)$$

که در آن، $I_l^{\max}$ بیشینه محدودیت حرارتی در شاخه l و $V_k^{\min}$ و $V_k^{\max}$ کمینه و بیشینه ولتاژ در باس‌های سیستم است که به ترتیب ۰/۹۰ و ۱/۱۰ پریونیت در نظر گرفته می‌شود [۳۳]. برای تضمین شعاعی بودن سیستم توزیع پس از بازآرایی معادله (۱۲) تعریف می‌شود و تنظیم قیود تولیدات پراکنده در رابطه (۱۳) و (۱۴) آورده شده است [۳۴].

$$\sum_{l \in L} y_l = |N| - 1 \quad (12)$$

$$0 \leq P_{DGk} \leq u_k \times P_{DG \max} \quad (13)$$

$$\sum_{k=1}^N u_k \leq N_{DG \max} \quad (14)$$

که در آن، $P_{DG \max}$ و $N_{DG \max}$ به ترتیب حداکثر مقدار مجاز توان اکتیو و تعداد بیشینه واحد تولید پراکنده k -ام نشان می‌دهند و شایان ذکر است که برای مکان‌یابی تولیدات پراکنده باید متغیر باینری u_k نیز تعریف شود که در صورت موجود بودن یک و در غیر این صورت صفر لحاظ می‌شود.

۳.۲. شاخص‌های عملکرد

کاربرد روش پیشنهادی برای بازآرایی سیستم توزیع هم‌زمان با مکان‌یابی تولیدات پراکنده با توجه به شاخص‌های ارزیابی شامل شاخص کاهش تلفات توان اکتیو^۱ (APLRI) رابطه (۱۵) و شاخص کاهش انحراف ولتاژ^۲ (VDRI) رابطه (۱۶) استخراج شده است. این روش تأثیر سازنده‌تری در افزایش مقدار شاخص‌ها بر روی سیستم توزیع ارائه می‌دهد [۵].

$$APLRI\% = \frac{TPL_0 - TPL_{DSR+DG}}{TPL_0} \times 100 \quad (15)$$

$$VDRI\% = \frac{VD_0 - VD_{DSR+DG}}{VD_0} \times 100 \quad (16)$$

که در آن، TPL_0 تلفات توان اکتیو کل در حالت پایه سیستم توزیع و TPL_{DSR+DG} تلفات توان اکتیو کل در حالت بازآرایی سیستم توزیع هم‌زمان با مکان‌یابی تولیدات پراکنده است. همچنین VD_0 انحراف ولتاژ در حالت پایه سیستم توزیع و VD_{DSR+DG} انحراف ولتاژ در حالت بازآرایی سیستم توزیع هم‌زمان با مکان‌یابی تولیدات پراکنده است.

متصل یا منفصل) و ولتاژ باس‌های سیستم است. در نهایت تابع دوهدفه به صورت معادله (۳) تعریف شده است [۳۲].

$$\begin{cases} \min z_3 = z = (w_1 \times z_1 + w_2 \times z_2) \\ w_1 + w_2 = 1 \end{cases} \quad (3)$$

که در آن، w_1 و w_2 ضریب‌های وزنی هستند که به طور یکنواخت بین صفر و ۱ تغییر می‌کنند. در ابتدا w_1 و w_2 به ترتیب برابر یک و صفر تنظیم می‌شود و در گام‌های مختلف به اندازه ۰/۰۵ به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابند که به مقدار صفر و ۱ برسند.

۲.۲. تنظیم قیود

معادلات توازن توان اکتیو و راکتیو با استفاده از مؤلفه‌های حقیقی و موهومی متغیرهای ولتاژ و جریان به صورت معادله‌های (۴) و (۵) بیان می‌شود.

$$P_g^k - P_d^k = \sum_{l \in L} A_{kl} (V_k^r I_l^r + V_k^i I_l^i), \forall k \in N \quad (4)$$

$$Q_g^k - Q_d^k = -\sum_{l \in L} A_{kl} (V_k^r I_l^i - V_k^i I_l^r), \forall k \in N \quad (5)$$

که در آن، P_g توان تولیدی اکتیو در باس مرجع، Q_g توان تولیدی راکتیو در باس مرجع، P_d^k توان اکتیو مصرفی در باس k ، Q_d^k توان راکتیو مصرفی بار در باس k ، V_k^r مؤلفه حقیقی متغیر ولتاژ در باس k ، V_k^i مؤلفه موهومی متغیر ولتاژ در باس k ، I_l^r مؤلفه حقیقی متغیر جریان در شاخه l ، I_l^i مؤلفه موهومی متغیر جریان در شاخه l و ماتریس تلاقی گره با شاخه است. مطلوب است که در ماتریس تلاقی شاخه با گره A_{kl} در صورتی که شاخه l به باس k متصل باشد و جریان I_l از باس k خارج شود $A_{kl} + 1$ در صورتی که شاخه l به باس k متصل باشد و جریان I_l به باس k وارد شود -1 و در نهایت A_{kl} در صورتی که شاخه l از باس k منفصل باشد، صفر می‌شود. مؤلفه‌های حقیقی و موهومی شاخه l به صورت معادله‌های (۶) و (۷) نوشته می‌شود.

$$I_l^r = \frac{y_l}{R_l^2 + X_l^2} \sum_{k \in N} A_{kl} (R_l V_k^r + X_l V_k^i), \forall l \in L \quad (6)$$

$$I_l^i = \frac{y_l}{R_l^2 + X_l^2} \sum_{k \in N} A_{kl} (R_l V_k^i - X_l V_k^r), \forall l \in L \quad (7)$$

که در آن y_l متغیر باینری است که اتصال یا عدم اتصال شاخه l را نشان می‌دهد. اگر y_l برابر یک و شاخه l نیز متصل و چنانچه y_l برابر صفر باشد، شاخه l منفصل و X_l راکتانس شاخه l است. در نظر داشته باشید که N مجموعه باس‌های سیستم است. دامنه ولتاژ و جریان به صورت معادله‌های (۸) و (۹) بیان می‌شوند:

$$I_l = \sqrt{(I_l^r)^2 + (I_l^i)^2}, \forall l \in L \quad (8)$$

$$V_k = \sqrt{(V_k^r)^2 + (V_k^i)^2}, \forall k \in N \quad (9)$$

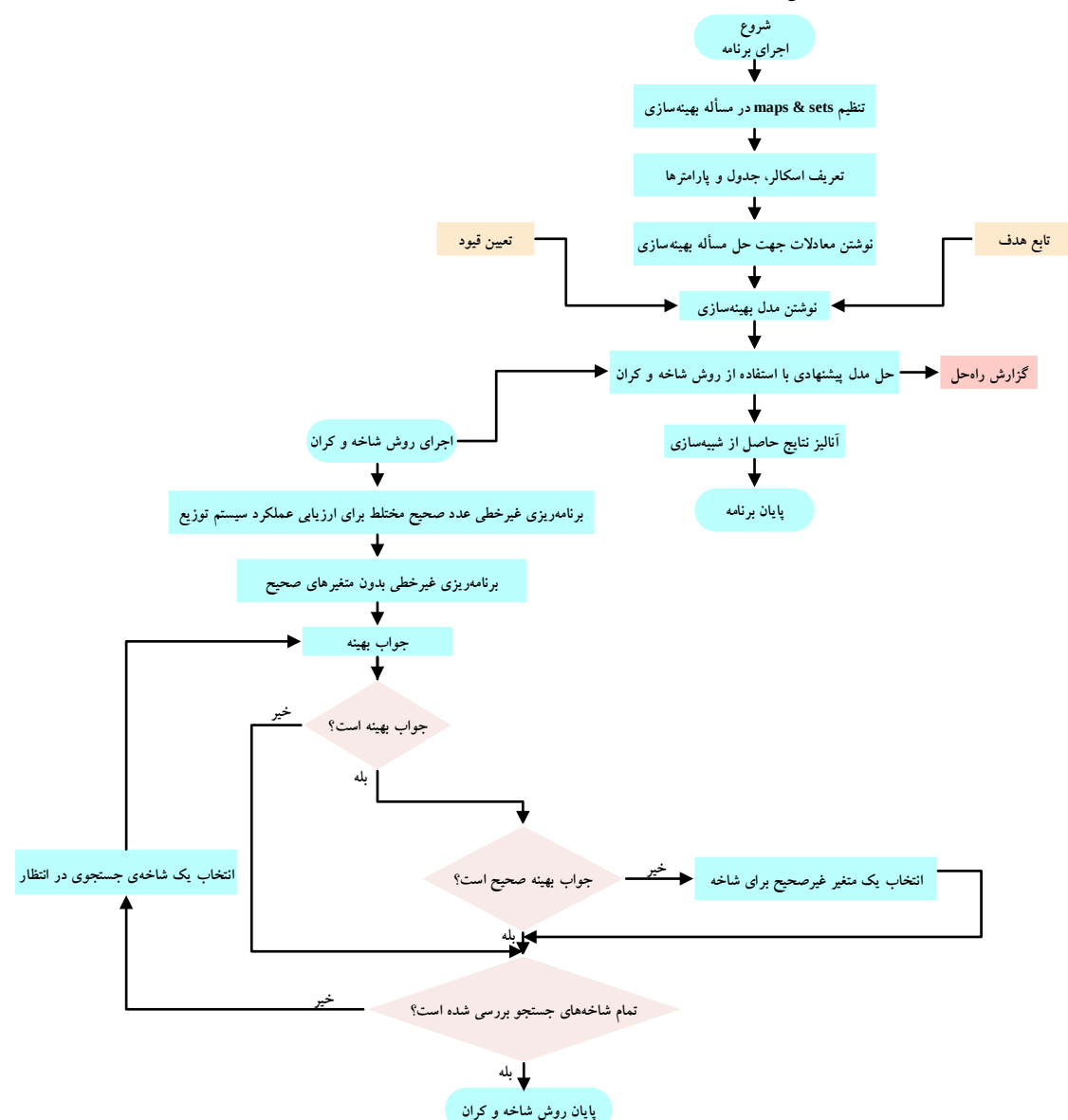
۳. روش پیشنهادی

در این بخش راهبرد بهینه‌سازی اتخاذشده برای حل مسئله بازآرایی بهینه سیستم‌های جریان متناوب هم‌زمان با مکان‌یابی تولیدات پراکنده در نظر گرفتن رابطه‌های (۱) تا (۱۴) مبتنی بر مدل MINLP ارائه می‌شود. برای این منظور از سیستم مدل‌سازی جبری عمومی استفاده می‌شود. نرم‌افزار گمز ابزار قدرتمندی است که حل مدل‌های بهینه‌سازی پیچیده شامل برنامه‌نویسی خطی و عدد صحیح مختلط، برنامه‌نویسی درجه دوم و مدل‌های برنامه‌نویسی غیرخطی با متغیرهای ترکیبی (مانند باینری و عدد صحیح) را ممکن می‌سازد. مدل MINLP برای مسئله ترکیبی بازآرایی سیستم توزیع هم‌زمان با مکان‌یابی تولیدات پراکنده مناسب است؛ زیرا شامل متغیرهای گسسته و

متغیرهای پیوسته است و تابع هدف و قیدها می‌توانند غیرخطی باشند. شایان‌ذکر است از روش شاخه و کران که یک الگوریتم قدرتمند برای حل مسائل MINLP است و به‌صورت سیستماتیک فضای جست‌وجو را کاوش می‌کند، استفاده شده است. شکل (۱) روندنمای پیاده‌سازی مسئله با استفاده از MINLP در نرم‌افزار گمز را نشان می‌دهد. جدول (۲) به‌طور دقیق مراحل نوشتن برنامه در این نرم‌افزار را تشریح می‌کند.

مراحل یافتن جواب بهینه سراسری برای تابع هدف مبتنی بر روش شاخه و کران به شرح زیر است:

۱. شروع (ایجاد یک مسئله ریشه): مسئله اصلی به‌عنوان مسئله ریشه در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۱): روندنمای پیاده‌سازی مسئله با استفاده از MINLP در نرم‌افزار گمز

۷. انتخاب یک زیرمسئله: یکی از زیر مسئله‌های باقی مانده برای بررسی بیشتر انتخاب می‌شود (مثلاً زیر مسئله‌ای که کمترین کران پایین را دارد).

۸. بازگشت به مرحله ۲: مراحل ۲ تا ۷ به صورت بازگشتی برای زیرمسئله انتخاب شده تکرار می‌شوند تا زمانی که همه شاخه‌ها بررسی شوند یا یک جواب صحیح با مقدار بهینه پیدا شود.

۴. نتایج شبیه‌سازی و تحلیل

در این بخش، تأثیر مدل پیشنهادی بر روی دو سیستم آزمون ۳۳ و ۶۹ باس نشان داده می‌شود. بازاریابی، با بسته بودن همه کلیدها اعم از سکشنلایزر و ارتباطی در سیستم توزیع حلقوی آغاز می‌شود. کلیدها یکی یکی باز می‌شوند تا حلقه‌ها حذف شوند و سیستم به صورت شعاعی شود. معیار باز کردن یک کلید، حداقل کردن تلفات اکتیو کل و انحراف ولتاژ است. باید کلیدی که کمترین تلفات توان اکتیو و انحراف ولتاژ را ایجاد می‌کند، باز شود. محدوده اندازه تولیدات پراکنده در سیستم ۳۳ باس بین صفر و ۱/۵ مگاوات [۱۴] و در سیستم ۶۹ باس بین صفر و ۲ مگاوات [۲۸] انتخاب شده است. تولیدات پراکنده مکان‌یابی شده در هر باس توان اکتیو تزریق می‌کنند. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از رایانه شخصی ۶۴ بیتی با پردازنده ۲/۵۹ گیگاهرتز، هسته i7 و حافظه رم ۷/۸ گیگابایت به دست آمده است. در جدول (۳) برای هر دو سیستم توزیع شعاعی مذکور، سناریوهای مورد مطالعه آورده و با نتایج مقالات اخیر مقایسه شده است.

جدول (۳): سناریوهای مورد مطالعه در سیستم توزیع شعاعی

سناریو	تابع هدف	حالت
اول	کاهش تلفات توان اکتیو کل	۱ بدون در نظر گرفتن بازاریابی و مکان‌یابی تولیدات پراکنده (سیستم پایه)
		۲ بازاریابی
		۳ مکان‌یابی تولیدات پراکنده.
دوم	کاهش انحراف ولتاژ	۱ بدون در نظر گرفتن بازاریابی و مکان‌یابی تولیدات پراکنده (سیستم پایه)
		۲ بازاریابی
		۳ مکان‌یابی تولیدات پراکنده
سوم	کاهش تلفات توان اکتیو کل و	۱ بدون در نظر گرفتن بازاریابی و مکان‌یابی تولیدات پراکنده (سیستم پایه)
		۲ بازاریابی
	کاهش انحراف ولتاژ	۳ مکان‌یابی تولیدات پراکنده
		۴ بازاریابی هم‌زمان با مکان‌یابی تولیدات پراکنده

جدول (۲): مراحل نوشتن برنامه در نرم‌افزار گمز

مرحله	عنوان	اقدامات انجام شده
۱	تعریف متغیرها	متغیرهای گسسته: وضعیت کلیدهای قطع و وصل (صفر یا ۱) و تعداد تولیدات پراکنده متغیرهای پیوسته: اندازه تولیدات پراکنده، جریان در شاخه‌ها و ولتاژ در باس‌ها
۲	تعریف تابع هدف	کمینه کردن تلفات توان اکتیو و انحراف ولتاژ
۳	تعریف قیدها	قیدهای شبکه: محدودیت توازن توان، محدودیت‌های ولتاژ و محدودیت‌های جریان قیدهای فنی: محدودیت اندازه تولیدات پراکنده و محدودیت وضعیت کلیدها
۴	مدل‌سازی	استفاده از دستورات variable, equation و model برای تعریف متغیرها، معادلات و مدل استفاده از توابع غیرخطی گمز برای بیان روابط غیرخطی
۵	حل مدل با استفاده از روش شاخه و کران	استفاده از حل‌کننده‌های MINLP مانند بهینه‌ساز خطی، تعاملی و گسسته ^۱ (LINDO) (LINDO)

۲. حل مسئله ریشه به صورت پیوسته: مسئله ریشه بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های صحیح به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی پیوسته^۲ حل می‌شود تا یک کران پایین برای مقدار بهینه تابع هدف به دست آید.

۳. بررسی جواب: اگر جواب حاصل از مرحله قبل، جواب صحیح مسئله MINLP باشد، الگوریتم خاتمه می‌یابد و جواب بهینه یافت شده است؛ در غیر این صورت یک متغیر صحیح که مقدار کسری دارد، انتخاب می‌شود.

۴. شاخه زدن (ایجاد زیرمسئله‌ها): دو زیرمسئله جدید ایجاد می‌شود: یک زیرمسئله که در آن متغیر انتخاب شده کمتر یا مساوی قسمت صحیح مقدار خود است و یک زیرمسئله که در آن متغیر انتخاب شده بزرگ‌تر یا مساوی قسمت صحیح مقدار خود به علاوه یک است.

۵. کران‌بندی: برای هر زیرمسئله، یک کران پایین برای مقدار بهینه تابع هدف محاسبه می‌شود.

۶. حذف شاخه‌ها: شاخه‌هایی که کران پایین آن‌ها از بهترین جواب صحیح به دست آمده بزرگ‌تر است، حذف می‌شوند. بدین صورت می‌توان فضای جست‌وجو را محدود کرد؛ زیرا این شاخه‌ها نمی‌توانند جواب بهینه بهتری را ارائه دهند.

1. Linear, interactive, and discrete optimizer
2. Continuous nonlinear programming

برتری دارد. در حالت (۳)، انحراف ولتاژ با استفاده از روش پیشنهادی ۰/۰۰۸٪ پروینیت است که در مقایسه با سایر روش‌ها کمترین مقدار است.

در سناریوی سوم تحت حالت‌های مختلف، پاسخ بهینه با کمینه کردن تلفات کل سیستم و انحراف ولتاژ به دست می‌آید. این فرایند با کمینه کردن تابع مجموع وزنی توصیف‌شده در معادله (۳) امکان‌پذیر است. مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه پارتو می‌تواند با کمینه کردن این تابع برای مقادیر مختلف وزن‌های w_1 و w_2 که از ۰ تا ۱ متغیر هستند، به دست آید. شایان ذکر است که حداقل تلفات برای w_1 و w_2 به ترتیب برابر ۱ و صفر به دست می‌آید که در حالت (۴) مقدار ۰/۰۵۴۷٪ مگاوات را ارائه می‌دهد. با این حال، انحراف ولتاژ زمانی کمینه می‌شود که w_1 و w_2 به ترتیب صفر و یک باشند و به مقدار ۰/۰۰۰۵٪ پروینیت در حالت (۴) می‌رسد. پاسخ‌های بهینه به دست‌آمده برای حالت (۴) با استفاده از روش جواب ایدئال (تلفات توان برابر ۰/۰۵۴۷٪ مگاوات و انحراف ولتاژ برابر ۰/۰۰۰۵٪ پروینیت) تعیین شده است و جواب جبهه پارتو با حداقل فاصله نسبت به جواب ایدئال^۱ (MRID)، به عنوان بهترین پاسخ مؤثر^۲ (BES) در نظر گرفته می‌شود. با توجه به معادله (۱۷) فاصله ایدئال نسبی مبتنی بر جواب ایدئال محاسبه می‌شود [۳۵]، نتایج به دست‌آمده در جدول (۶) آمده است.

$$RID = \sqrt{(z_1^{Ideal} - z_1^*)^2 + (z_2^{Ideal} - z_2^*)^2} \quad (17)$$

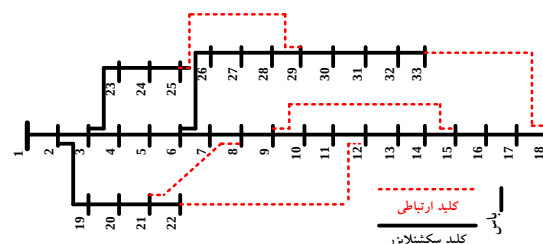
که در آن، z_1^* و z_2^* جواب‌های جبهه پارتو هستند. با توجه به نتایج به دست‌آمده بهترین پاسخ مؤثر برای تلفات توان اکتیو و انحراف ولتاژ به ترتیب مقادیر ۰/۰۵۷٪ مگاوات و ۰/۰۰۷٪ پروینیت است؛ همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده، در میان جواب‌های بهینه، جواب پارتو^۲ مبتنی بر معادله (۱۷) به عنوان بهترین جواب بهینه انتخاب شده است. شکل (۴) مرز پارتو برای سناریوی سوم در حالت (۴) نشان می‌دهد و بهترین جواب به دست‌آمده بر روی شکل قابل مشاهده است.

نتایج سناریوی سوم تحت حالت‌های چهارگانه برای ارزیابی اثربخشی روش پیشنهادی بر کاهش تلفات سیستم، کاهش انحراف ولتاژ و بهبود پروفیل ولتاژ در جدول (۷) جمع‌آوری شده است. در شکل (۵) تغییرات پروفیل ولتاژ نسبت به سیستم پایه قابل رؤیت است. مشاهده می‌شود که بهبود پروفیل ولتاژ در روش پیشنهادی عمدتاً ناشی از حذف توابع مثلثاتی، استفاده از معادلات بدون تقریب

شایان ذکر است که اطلاعات خطوط و بارها برای دو سیستم آزمون از مرجع [۲۸] استفاده شده است. همچنین مقادیر پایه در محاسبات پروینیت برای ولتاژ سیستم ۱۲/۶۶ کیلوولت و توان ظاهری سیستم یک مگا ولت‌آمپر است [۳۲].

۱.۴. سیستم آزمون ۳۳ باس

این سیستم دارای ۵ کلید ارتباطی، ۳۲ سکشن‌لایزر، ۳۷ خط و ۳۳ باس است. پنج کلید ارتباطی، خطوط ۳۷-۳۶-۳۵-۳۴-۳۳ هستند که ۵ حلقه را تشکیل می‌دهند. مجموع بارهای سیستم برابر با ۳/۷۱۵ مگاوات و ۲/۳۰۰ مگاوار است. محاسبات بر پایه سیستم پروینیت انجام شده است. افت ولتاژ در انتهای باس‌های این سیستم توزیع که ناشی از بارهای القایی است، می‌تواند با اتصال تولیدات پراکنده به این باس‌ها برای تأمین بخشی از تقاضای توان اکتیو و راکتیو محلی، کاهش یابد؛ در نتیجه، جریان‌های عبوری و تلفات کاهش پیدا می‌کند. شکل (۲) پیکربندی سیستم آزمون ۳۳ باس را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در بخش ۳ ذکر شد، حل‌کننده LINDO از میان حل‌کننده‌های موجود در نرم‌افزار گمز در سناریوهای مد نظر برگزیده شده است.

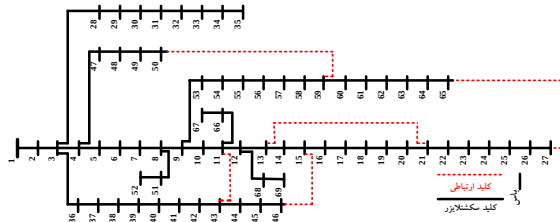


شکل (۲): سیستم آزمون ۳۳ باس

در حالت ابتدایی و سیستم پایه کلیدهای ارتباطی باز هستند. تلفات توان اکتیو، انحراف ولتاژ و حداقل ولتاژ سیستم پایه در حالت (۱)، به ترتیب ۰/۲۱۰۹٪ مگاوات، ۰/۱۳۳۸٪ پروینیت و ۰/۹۰۴٪ پروینیت است. جدول (۴) مقایسه وضعیت کلیدهای باز برای بازآرایی، مکان (شماره باس) و سایر تولیدات پراکنده، کمترین ولتاژ و تلفات توان اکتیو سیستم توزیع برای سناریو اول در این مقاله و سایر مقالات نشان می‌دهد. مطابق جدول (۴) مشاهده می‌شود برای حالت (۲)، MINLP تلفات توان ۰/۱۳۹۶٪ مگاوات را ارائه می‌دهد که به نسبت مرجع [۱۰] بهتر عمل کرده و تقریباً مشابه تلفات توان در مرجع [۵] است. برای حالت (۳)، با استفاده از مدل MINLP تلفات توان به ۰/۰۷۸۶٪ مگاوات می‌رسد که در مقایسه با سایر روش‌ها پاسخ بهتری است. جدول (۵) مقایسه نتایج به دست‌آمده برای سناریو دوم را نشان می‌دهد. در حالت (۲) انحراف ولتاژ ۰/۰۴۸۷٪ پروینیت با استفاده از MINLP به دست‌آمده که به نسبت روش استفاده‌شده در مرجع [۵]

۲.۴. سیستم آزمون ۶۹ باس

این سیستم توزیع شامل ۵ کلید ارتباطی، ۶۸ سکتانایزر، ۷۳ شاخه و ۶۹ باس است. پنج کلید ارتباطی، خطوط ۷۳-۷۲-۷۱-۷۰-۶۹ هستند که ۵ حلقه را تشکیل می‌دهند. تقاضای توان اکتیو و راکتیو کل برای این سیستم به ترتیب ۳/۸۹۰۶۹ مگاوات و ۲/۶۹۳۶ مگاوار است. ساختار سیستم آزمون ۶۹ باس در شکل (۶) نمایش داده شده است.

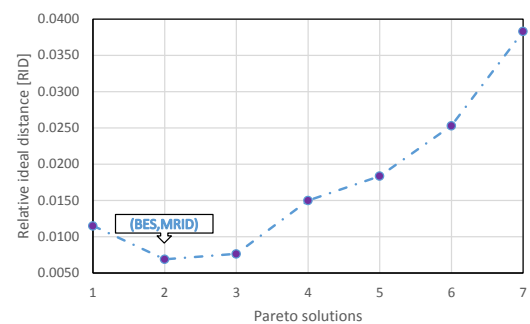


شکل (۶): سیستم آزمون ۶۹ باس

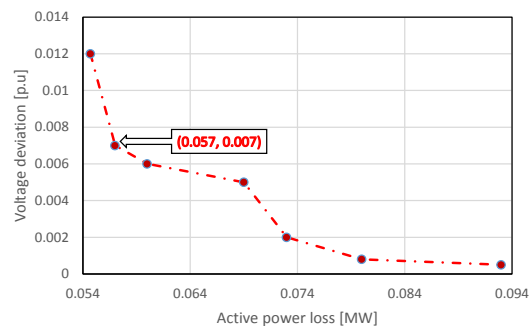
شایان ذکر است همانند سیستم ۳۳ باس، حل‌کننده LINDO از میان حل‌کننده‌های موجود در نرم‌افزار گمز انتخاب شده است. هنگامی که سیستم در شرایط عادی (حالت پایه) کار می‌کند کلیدهای ارتباطی باز هستند. در حالت (۱)، تلفات توان اکتیو، انحراف ولتاژ و کمترین ولتاژ به ترتیب ۰/۲۲۵ مگاوات، ۰/۰۹۹۳ پریونیت و ۰/۹۰۹ پریونیت است. جدول (۸) وضعیت کلیدهای باز برای بازآرایی، مکان (شماره باس) و سبب تولیدات پراکنده، کمترین ولتاژ و تلفات توان اکتیو این سیستم توزیع برای سناریو اول نشان می‌دهد. همچنین در این جدول برای حالت‌های مختلف تحت این سناریو، نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از روش پیشنهادی و روش‌های موجود در سایر مقالات مقایسه شده است. همان‌طور که از جدول (۸) مشاهده می‌شود، مدل MINLP در مقایسه با روش‌های دیگر بهترین عملکرد کلی را دارد.

جدول (۹) نتایج به‌دست‌آمده توسط روش‌های مختلف برای سناریوی دوم را نشان می‌دهد. در حالت (۲)، مقدار انحراف ولتاژ از روش پیشنهادی ۰/۰۲۱۷ پریونیت است که نسبت به مقدار به‌دست‌آمده در مرجع [۵] اندکی بیشتر است. در حالت (۳)، با استفاده از MINLP مقدار انحراف ولتاژ به ۰/۰۰۰۵ پریونیت رسیده و همان‌طور که مشاهده می‌شود به‌طور چشمگیری کاهش یافته است. همان‌گونه که پیش‌تر ذکر شد، در سناریو سوم تحت حالت‌های مختلف، با کاهش تلفات اکتیو کل و انحراف ولتاژ پاسخ بهینه به دست می‌آید. این فرایند با استفاده از روش وزن‌دهی به اهداف امکان‌پذیر است. برای حالت (۴)، پاسخ‌های بهینه به‌دست‌آمده در جدول (۱۰) گردآوری شده است. با استفاده از این روش جواب ایدئال (تلفات توان برابر ۰/۰۳۶ مگاوات و انحراف ولتاژ برابر ۰/۰۱۶ پریونیت) تعیین شده است.

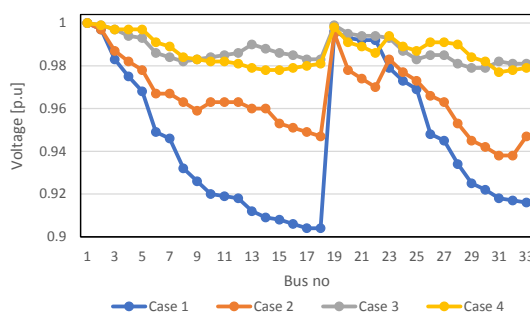
خطی‌سازی و ادغام بازآرایی با مکان‌یابی DG است. این درحالی است که روش‌های مبتنی بر الگوریتم‌های فراابتکاری مانند HSA و GA/PSO به دلیل عدم استفاده از مدل‌سازی دقیق ریاضی، قادر به دستیابی به این سطح از بهبود ولتاژ نیستند. همان‌گونه که از جدول (۷) قابل استخراج است، تلفات توان اکتیو به‌طور چشمگیری کاهش یافته است و روند کاهش انحراف ولتاژ و بهبود پروفیل ولتاژ ملاحظه می‌شود. تلفات توان اکتیو به ۰/۰۵۷ مگاوات، انحراف ولتاژ و ولتاژ کمینه به ترتیب به ۰/۰۰۷ و ۰/۹۷۷ پریونیت رسیده است. با توجه به معادله‌های (۱۵) و (۱۶) درصد کاهش تلفات توان اکتیو کل و انحراف ولتاژ به ترتیب ۷۲/۹۷ و ۹۴/۷۷ است که تأثیر روش پیشنهادی را به نمایش می‌گذارد.



شکل (۳): نمودار حداقل فاصله ایدئال نسبی و تعیین بهترین جواب مؤثر برای سیستم آزمون ۳۳ باس تحت حالت (۴) در سناریوی سوم



شکل (۴): جبهه بهینه پارتو برای سیستم آزمون ۳۳ باس تحت حالت (۴) در سناریوی سوم



شکل (۵): پروفیل ولتاژ در سیستم آزمون ۳۳ باس تحت حالت‌های مختلف در سناریوی سوم

جدول (۴): سناریو اول- مقایسه نتایج روش‌های مختلف برای سیستم آزمون ۳۳ باس با در نظر گرفتن تابع هدف تلفات توان

حالت	روش	کلیدهای باز	(مکان) - اندازه تولیدات پراکنده (مگاوات)	کمترین ولتاژ (پریونیت)	تلفات توان (مگاوات)
(۲)	MINLP	۳۷-۳۲-۱۴-۹-۷	-	۰/۹۳۸	۰/۱۳۹۶
	FEP [۱۰]		-	۰/۹۳۷۸	۰/۱۳۹۸۳
	AOA [۵]		-	۰/۹۳۷۸	۰/۱۳۹۵۵۱
(۳)	MINLP	۳۷-۳۶-۳۵-۳۴-۳۳	۰/۹۷۰(۱۰) - ۱/۳۴۹(۲۳) - ۰/۸۳۴(۳۲)	۰/۹۶۳	۰/۰۷۸۶
	GA [۱۱]		۱/۵۰۰(۱۱) - ۰/۴۲۲۸(۲۹) - ۱/۰۷۱۴(۳۰)	۰/۹۸۰۹	۰/۱۰۶۳۰
	PSO [۱۱]		۰/۹۸۱۶(۱۳) - ۰/۸۲۹۷(۳۲) - ۱/۱۷۶۸(۸)	۰/۹۸۰۶	۰/۱۰۵۳۵
	GA/PSO [۱۱]		۱/۲۰۰(۳۲) - ۰/۸۶۳۰(۱۶) - ۰/۹۲۵۰(۱۱)	۰/۹۸۰۸	۰/۱۰۳۴۰
	BFOA [۱۲]		۰/۶۵۲۱(۱۴) - ۰/۱۹۸۴(۱۸) - ۱/۰۶۷۲(۳۲)	۰/۹۷۰۵	۰/۰۸۹۹۰
	IWD [۶]		۰/۶۰۰۳(۹) - ۰/۳۰۰۰(۱۶) - ۱/۰۱۱۲(۳۰)	۰/۹۵۹	۰/۰۸۵۷۸

جدول (۵): سناریو دوم- مقایسه نتایج روش‌های مختلف برای سیستم آزمون ۳۳ باس با در نظر گرفتن تابع هدف انحراف ولتاژ

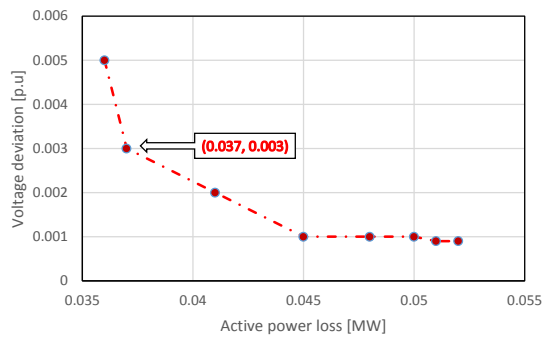
حالت	روش	کلیدهای باز	(مکان) - اندازه تولیدات پراکنده (مگاوات)	کمترین ولتاژ (پریونیت)	انحراف ولتاژ (پریونیت)
(۲)	MINLP	۳۷-۳۲-۱۴-۹-۷	-	۰/۹۳۸	۰/۰۴۸۷
	AOA [۵]	۳۲-۲۸-۱۴-۹-۷	-	۰/۹۴۱۳	۰/۰۴۴۱۱۷
(۳)	MINLP	۳۷-۳۶-۳۵-۳۴-۳۳	۱/۱۹۴(۱۲) - ۱/۴۶۲(۲۶) - ۱/۱۲۱(۳۱)	۰/۹۸۴	۰/۰۰۰۸
	TLBO [۷]		۱/۱۳۲۰(۱۴) - ۱/۱۹۸۰(۲۹) - ۱/۰۰۸۱(۳۰)	-	۰/۰۰۱۰
	QOTLBO [۷]		۱/۰۷۴۴(۱۴) - ۱/۲۰۰(۲۷) - ۱/۲۰۰(۳۳)	-	۰/۰۰۰۸۶
	SIMBO-Q [۱۴]		۱/۰۹۹۸(۱۳) - ۱/۱۷۰۲(۲۹) - ۱/۲۷۴۳(۲۸)	-	۰/۰۰۰۸۵

جدول (۶): جواب‌های پارتو با استفاده از روش وزن‌دهی به اهداف و کمترین فاصله ایدئال نسبی تحت حالت (۴) در سناریوی سوم

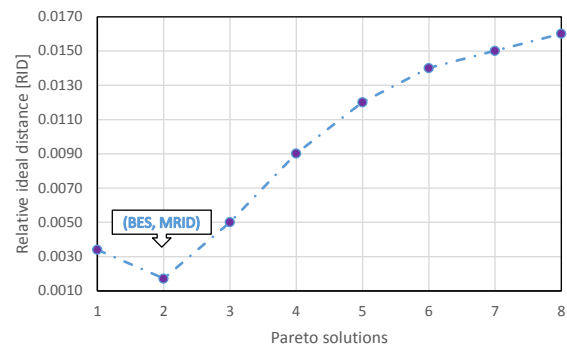
جواب پارتو سیستم ۳۳ باس	وزن‌های تعیین شده		مقادیر تابع هدف		فاصله ایدئال نسبی
	W ₁	W ₂	تلفات توان (مگاوات)	انحراف ولتاژ (پریونیت)	
۱	۱	۰	۰/۰۵۴۷	۰/۰۱۲	۰/۰۱۱۵
۲	۰/۷۵	۰/۲۵	۰/۰۵۷	۰/۰۰۷	۰/۰۰۶۹
۳	۰/۶۵	۰/۳۵	۰/۰۶۰	۰/۰۰۶	۰/۰۰۷۶
۴	۰/۴۵	۰/۵۵	۰/۰۶۹	۰/۰۰۵	۰/۰۱۵۰
۵	۰/۲۵	۰/۷۵	۰/۰۷۳	۰/۰۰۲	۰/۰۱۸۴
۶	۰/۱	۰/۹	۰/۰۸۰	۰/۰۰۰۸	۰/۰۲۵۳
۷	۰	۱	۰/۰۹۳	۰/۰۰۰۵	۰/۰۳۸۳

جدول (۷): سناریو سوم- عملکرد سیستم آزمون ۳۳ باس تحت حالت‌های مختلف با در نظر گرفتن تابع دوهدفه تلفات و انحراف ولتاژ

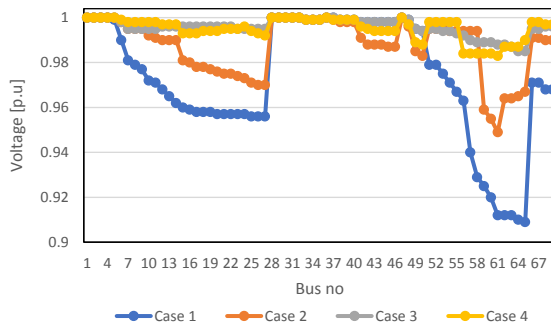
حالت	کلیدهای باز	(مکان) - اندازه تولیدات پراکنده (مگاوات)	کمترین ولتاژ (پریونیت)	تلفات توان (مگاوات)	انحراف ولتاژ (پریونیت)
(۱)	۳۷-۳۶-۳۵-۳۴-۳۳	-	۰/۹۰۴	۰/۲۱۰۹	۰/۱۳۳۸
(۲)	۳۷-۳۲-۱۴-۹-۷	-	۰/۹۳۸	۰/۱۴۰	۰/۰۴۸۷
(۳)	۳۷-۳۶-۳۵-۳۴-۳۳	۱/۵(۳) - ۱/۰۳۳(۱۳) - ۱/۰۹۰(۳۱)	۰/۹۷۹	۰/۰۸۴	۰/۰۰۶
(۴)	۳۴-۳۳-۳۰-۲۸-۱۱	۱/۲۳۴(۵) - ۱/۰۰۶(۱۸) - ۱/۱۳۴(۲۵)	۰/۹۷۷	۰/۰۵۷	۰/۰۰۷



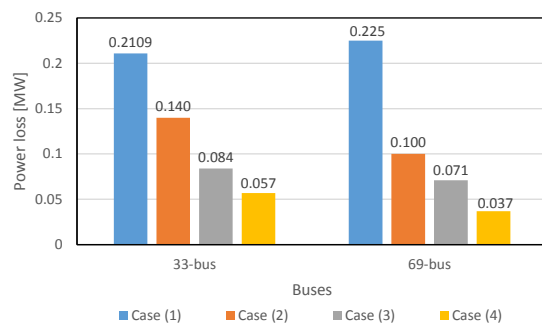
شکل (۸): جبهه بهینه پارتو برای سیستم آزمون ۶۹ باس تحت حالت (۴) در سناریوی سوم



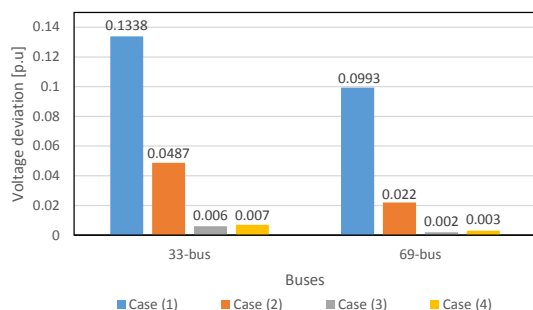
شکل (۷): نمودار حداقل فاصله ایدئال نسبی و تعیین بهترین جواب مؤثر برای سیستم آزمون ۶۹ باس تحت حالت (۴) در سناریوی سوم



شکل (۹): پروفیل ولتاژ در سیستم آزمون ۶۹ باس تحت حالت‌های مختلف در سناریوی سوم



شکل (۱۰): مقایسه تلفات توان برای دو سیستم آزمون با استفاده از مدل MINLP



شکل (۱۱): مقایسه انحراف ولتاژ برای دو سیستم آزمون با استفاده از مدل MINLP

همان‌طور که در شکل (۷) ملاحظه می‌شود با توجه به مقادیر MRID بهترین پاسخ مؤثر برای تلفات توان اکتیو و انحراف ولتاژ به ترتیب مقادیر ۰/۰۳۷ و ۰/۰۰۳ پریونیت است. شکل (۸) نمودار پارتو برای سناریوی سوم در حالت (۴) نشان می‌دهد و بهترین جواب بهینه بر روی شکل دیده می‌شود. برای سنجش تأثیر روش پیشنهادی، نتایج مستخرج از سناریوی سوم تحت حالت‌های چهارگانه در جدول (۱۱) جمع‌آوری شده است.

در شکل (۹) پروفیل ولتاژ بهبود یافته نسبت به سیستم پایه رؤیت می‌شود. مطابق جدول (۱۱)، تلفات توان اکتیو به‌طور چشمگیری کاهش یافته است و روند کاهش انحراف ولتاژ و بهبود پروفیل ولتاژ ملاحظه می‌شود. تلفات توان اکتیو به ۰/۰۳۷ مگاوات، انحراف ولتاژ و کمترین ولتاژ به ترتیب ۰/۰۰۳ و ۰/۹۸۳ پریونیت شده است. تلفات توان اکتیو کل و انحراف ولتاژ به ترتیب ۸۳/۵۵ و ۹۶/۹۹ درصد کاهش یافته است. شکل‌های (۱۰) و (۱۱) مقایسه تلفات توان اکتیو و انحراف ولتاژ را در سناریو سوم برای هر دو سیستم ۳۳ و ۶۹ باس خلاصه می‌کنند. بدیهی است که حالت (۴) بهترین عملکرد را دارد. شکل (۱۲) مقایسه بهبود حداقل ولتاژ در سناریوی سوم، برای هر دو سیستم آزمون نشان می‌دهد. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد نتایج حالت (۴) بسیار رضایت‌بخش است.

جدول‌های (۱۲) و (۱۳) مقایسه عملکرد مدل پیشنهادی و مدل خطی‌سازی شده در مرجع [۲۹] بر روی سیستم‌های آزمون ۳۳ و ۶۹ باس را با در نظر گرفتن تابع دوهدفه نشان می‌دهند. همان‌گونه که از جدول‌ها قابل رؤیت است، مدل پیشنهادی ما در حل مسئله به دلیل فرمول‌بندی دقیق ریاضی و حذف تقریب‌های خطی‌سازی عملکردی برتر نسبت به روش مبتنی بر MILP دارد. این برتری در هر دو سیستم آزمون ۳۳ و ۶۹ باس با کاهش بیشتر تلفات، بهبود ولتاژ و سرعت حل بالاتر به‌وضوح تأیید می‌شود.

جدول (۸): سناریو اول- مقایسه نتایج روش‌های مختلف برای سیستم آزمون ۶۹ باس با در نظر گرفتن تابع هدف تلفات توان

حالت	روش	کلیدهای باز	(مکان) - اندازه تولیدات پراکنده (مگاوات)	کمترین ولتاژ (پریونیت)	تلفات توان (مگاوات)
(۲)	MINLP	۷۰-۶۹-۶۱-۵۵-۱۴	-	۰/۹۴۹	۰/۰۹۹۶
	HSA [۱۳]	۶۱-۵۶-۱۳-۱۸-۶۹	-	۰/۹۴۲۸	۰/۰۹۹۳۵
	HM [۴]	۷۰-۶۹-۶۱-۵۵-۱۴	-	۰/۹۴۲۸	۰/۰۹۹۶۲
(۳)	MINLP	۷۳-۷۲-۷۱-۷۰-۶۹	۰/۳۶۳(۲۱) - ۱/۷۲۸(۶۱) - ۰/۴۹۲(۶۶)	۰/۹۷۹	۰/۰۶۹۹
	HSA [۱۳]		۰/۱۰۱۸(۶۵) - ۰/۳۶۹۰(۶۴) - ۱/۳۰۲۴(۶۳)	۰/۹۶۷۷	۰/۰۸۶۷۷
	ACSA [۱۵]		۰/۶۰۲۲(۱۱) - ۰/۳۸۰۴(۱۸) - ۰/۲۰۰۰(۶۱)	۰/۹۸۹۰	۰/۰۷۲۴۴
	FWA [۸]		۰/۴۰۸۵(۶۵) - ۱/۱۹۸۶(۶۱) - ۰/۲۲۵۸(۲۷)	۰/۹۷۴۰	۰/۰۷۷۸۵
	UVDA [۹]		۰/۱۴۱۰(۶۱) - ۰/۶۰۴۰(۱۱) - ۰/۴۱۷۰(۱۷)	۰/۹۶۸۸	۰/۰۷۲۶۲
	HM [۴]		۰/۵۱۹۳(۱۷) - ۰/۷۱۹۶(۵۰) - ۱/۷۲۶۶(۶۱)	۰/۹۷۷۰	۰/۰۷۰۳۰
	INNA [۱۹]		۰/۲۰۳۶(۱۲) - ۰/۳۸۸۵(۱۸) - ۱/۶۸۷(۶۱)	۰/۹۷۶۰	۰/۰۷۰۶۶
	3D-GSO [۱۷]		۰/۳۸۸۰(۲۷) - ۱/۴۶۴۰(۶۱) - ۰/۲۸۱۰(۶۴)	۰/۹۷۹۲	۰/۰۷۳۴۸
	ISCA [۱۸]		۰/۷۶۰۴(۱۲) - ۰/۷۶۰۴(۶۱) - ۰/۷۶۰۴(۶۲)	۰/۹۷۱۷	۰/۰۷۴۴۰
	IWDA [۲۰]		۰/۱۰۵۹(۶۵) - ۰/۵۵۲۶(۶۴) - ۱/۰۴۵۸(۱۷)	۰/۹۶۱۹	۰/۰۷۶۴۲
	WCA [۱۶]		۰/۷۷۵۰(۶۱) - ۱/۰۵۰(۶۲) - ۰/۴۳۸۰(۲۳)	۰/۹۸۷۰	۰/۰۷۱۵۰

جدول (۹): سناریو دوم- مقایسه نتایج روش‌های مختلف برای سیستم آزمون ۶۹ باس با در نظر گرفتن تابع هدف انحراف ولتاژ

حالت	روش	کلیدهای باز	(مکان) - اندازه تولیدات پراکنده (مگاوات)	کمترین ولتاژ (پریونیت)	انحراف ولتاژ (پریونیت)
(۲)	MINLP	۷۰-۶۹-۶۱-۵۸-۱۴	-	۰/۹۴۹	۰/۰۲۱۷
	AOA [۵]	۷۰-۶۹-۶۱-۵۸-۱۴	-	۰/۹۴۹۵	۰/۰۲۱۰۵۹
(۳)	MINLP	۷۳-۷۲-۷۱-۷۰-۶۹	۱/۲۰۷(۱۲) - ۰/۲۶۰(۱۵) - ۲/۰۰۰(۶۳)	۰/۹۹۴	۰/۰۰۰۵

جدول (۱۰): جواب‌های پارتو با استفاده از روش وزندهی به اهداف و کمترین فاصله ایدئال نسبی تحت حالت (۴) در سناریوی سوم

جواب پارتو سیستم ۶۹ باس	وزن‌های تعیین‌شده		مقادیر تابع هدف		فاصله ایدئال نسبی
	W ₁	W ₂	تلفات توان (مگاوات)	انحراف ولتاژ (پریونیت)	
۱	۱	۰	۰/۰۳۶	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳۴
۲	۰/۷۵	۰/۲۵	۰/۰۳۷	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱۷
۳	۰/۵	۰/۵	۰/۰۴۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۵۰
۴	۰/۳	۰/۷	۰/۰۴۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۹۰
۵	۰/۲۵	۰/۷۵	۰/۰۴۸	۰/۰۰۱	۰/۰۱۲۰
۶	۰/۲	۰/۸	۰/۰۵	۰/۰۰۱	۰/۰۱۴۰
۷	۰/۱۵	۰/۸۵	۰/۰۵۱	۰/۰۰۰۹	۰/۰۱۵۰
۸	۰/۱	۰/۹	۰/۰۵۲	۰/۰۰۰۹	۰/۰۱۶۰

جدول (۱۱): سناریو سوم- عملکرد سیستم آزمون ۶۹ باس تحت حالت‌های مختلف با در نظر گرفتن تابع دوهدفه تلفات و انحراف ولتاژ

حالت	کلیدهای باز	(مکان) - اندازه تولیدات پراکنده (مگاوات)	کمترین ولتاژ (پریونیت)	تلفات توان (مگاوات)	انحراف ولتاژ (پریونیت)
(۱)	۷۳-۷۲-۷۱-۷۰-۶۹	-	۰/۹۰۹	۰/۲۲۵	۰/۰۹۹۳
(۲)	۷۰-۶۹-۶۱-۵۸-۱۴	-	۰/۹۴۹	۰/۱۰۰	۰/۰۲۲
(۳)	۷۳-۷۲-۷۱-۷۰-۶۹	۰/۵۴۹(۱۲) - ۰/۴۰۸(۱۹) - ۱/۸۸۴(۶۱)	۰/۹۸۵	۰/۰۷۱	۰/۰۰۲
(۴)	۷۰-۶۹-۶۱-۵۵-۱۴	۰/۵۷۳(۵) - ۰/۷۹۹(۲۴) - ۱/۵۲۸(۶۱)	۰/۹۸۳	۰/۰۳۷	۰/۰۰۳

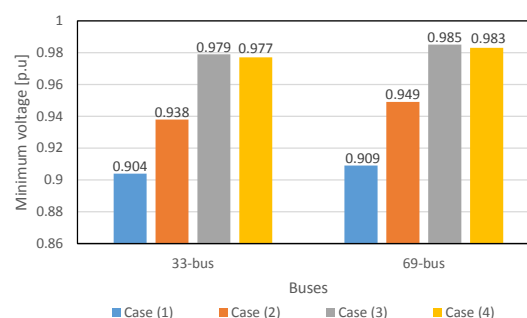
جدول (۱۲): مقایسه عملکرد مدل پیشنهادی در سیستم آزمون ۳۳ باس با در نظر گرفتن تابع دوهدفه تلفات و انحراف ولتاژ

مدل	تلفات توان (مگاوات)	درصد کاهش تلفات توان	کمترین ولتاژ (پرینیت)	زمان حل مدل (ثانیه)
MILP [۲۹]	۰/۰۸۴	۵۸/۷۱	۰/۹۶۰	۶/۹۵
مدل پیشنهادی	۰/۰۵۷	۷۲/۹۷	۰/۹۷۷	۳/۸

جدول (۱۳): مقایسه عملکرد مدل پیشنهادی در سیستم آزمون ۶۹ باس با در نظر گرفتن تابع دوهدفه تلفات و انحراف ولتاژ

مدل	تلفات توان (مگاوات)	درصد کاهش تلفات توان	کمترین ولتاژ (پرینیت)	زمان حل مدل (ثانیه)
MILP [۲۹]	۰/۰۵۱	۷۷/۴۹	۰/۹۶۵	۳/۰۹
مدل پیشنهادی	۰/۰۳۷	۸۳/۵۵	۰/۹۸۳	۳

گره با شاخه در محاسبات پخش توان برای مدیریت هم‌زمان بازآرایی سیستم توزیع و تخصیص واحدهای تولید پراکنده استفاده شده است. بهبود قابل توجهی در شاخص‌های تلفات توان اکتیو، انحراف ولتاژ و پروفیل ولتاژ در حالت بازآرایی سیستم توزیع هم‌زمان با مکان‌یابی تولیدات پراکنده مشاهده شده است. برای شرایط دوهدفه، در سناریوی سوم (کاهش تلفات توان اکتیو کل و کاهش انحراف ولتاژ) حالت بازآرایی هم‌زمان با مکان‌یابی تولیدات پراکنده نتایج امیدوارکننده‌ای ارائه می‌دهد. برای اعتبار عملکرد مدل و فرمول‌بندی پیشنهادی، نتایج MINLP با نتایج حاصل از سایر الگوریتم‌ها مقایسه شده است. مقایسه نتایج، برتری MINLP را نسبت به سایر روش‌ها نشان می‌دهد. همان‌گونه که از تحلیل نتایج این مقاله مشخص شد، فرمول‌بندی MINLP بدون استفاده از توابع مثلثاتی و تقریب‌های خطی‌سازی، و با ادغام دو مسئله بازآرایی و مکان‌یابی DG و سرعت حل بالاتر منجر به کاهش ۷۲/۹۷ درصد تلفات توان و ۹۴/۷۷ درصد انحراف ولتاژ در سیستم ۳۳ باس شده است. این بهبودها در سیستم ۶۹ باس نیز با کاهش ۸۳/۵۵ درصد تلفات و ۹۶/۹۹ درصد انحراف ولتاژ تأیید شد که نشان‌دهنده کارایی روش پیشنهادی در سیستم‌های بزرگ است.



شکل (۱۲): مقایسه حداقل ولتاژ برای دو سیستم آزمون با استفاده از مدل MINLP

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدل MINLP برای حل مسئله بازآرایی سیستم توزیع هم‌زمان با مکان‌یابی تولیدات پراکنده ارائه شده است. به‌طور کلی این موضوع یک مسئله پیچیده ترکیبی است که هدف آن یافتن بهترین آرایش شبکه و بهترین مکان برای نصب تولیدات پراکنده به‌منظور کاهش تلفات توان و بهبود پروفیل ولتاژ است. مدل پیشنهادی، مسئله بهینه‌سازی را در سیستم توزیع شعاعی با برآورده کردن محدودیت‌های فنی برای تابع دوهدفه به‌طور مؤثر بهبود بخشیده است. عملکرد MINLP در شبکه‌های توزیع شعاعی ۳۳ و ۶۹ باس برای سه سناریوی مختلف و حالت‌های چندگانه در نرم‌افزار گمز مورد ارزیابی قرار گرفته است. از فرمول‌بندی جدید ماتریس تلاقی

مراجع

- [1] Shaik, M.A., Mareddy, P.L., Visali, N., "Enhancement of voltage profile in the distribution system by reconfiguring with DG placement using equilibrium optimizer", Alexandria Engineering Journal, Vol. 61, No. 5, pp. 4081-4093, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.09.063>.
- [2] Chippagiri, S.S., Pemmada, S., Patne, N.R., "Distribution network reconfiguration and distributed generation injection using improved elephant herding optimization", Proceeding of the IEEE/STPEC, Vol. 1, No. 1, pp. 1-6, 2020, <https://doi.org/10.1109/STPEC49749.2020.9297805>.

- [3] Lavorato, M., Franco, J.F., Rider, M.J., Romero, R., "Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 27, No. 1 pp. 172-180, 2012, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2011.2161349>.
- [4] Jasthi, K., DasD., "Simultaneous distribution system reconfiguration and DG sizing algorithm without load flow solution", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 12, No. 6, pp. 1303-1313, 2018, <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.0338>.
- [5] Dey, I., Roy, P.K., "Simultaneous network reconfiguration and DG allocation in radial distribution networks using arithmetic optimization algorithm", International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, Vol. 36, No. 6, pp. 1-41, 2023, <https://doi.org/10.1002/jnm.3105>.
- [6] Prabha, D. R., Jayabarathi, T., Umamageswari, R., Saranya, S., "Optimal location and sizing of distributed generation unit using intelligent water drop algorithm", Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol. 11, pp. 106-113, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2015.07.003>.
- [7] Sultana, S., Roy, P.K., "Multi-objective quasi-oppositional teaching learning based optimization for optimal location of distributed generator in radial distribution systems", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 63, pp. 534-545, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.06.031>.
- [8] Imran, A.M., Kowsalya, M., Kothari, D.P., "A novel integration technique for optimal network reconfiguration and distributed generation placement in power distribution networks", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 63, pp. 461-472, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.06.011>.
- [9] Bayat, A., Bagheri, A., Noroozian, R., "Optimal siting and sizing of distributed generation accompanied by reconfiguration of distribution networks for maximum loss reduction by using a new UVDA-based heuristic method", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 77, pp. 360-371, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.11.039>.
- [10] Venkatesh, B., Ranjan, R., "Optimal radial distribution system reconfiguration using fuzzy adaptation of evolutionary programming", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 25, No. 10, pp. 775-780, 2003, [https://doi.org/10.1016/S0142-0615\(03\)00046-2](https://doi.org/10.1016/S0142-0615(03)00046-2).
- [11] Moradi, M.H., Abedini, M., "A combination of genetic and particle swarm optimization for optimal DG location and sizing in distribution system", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 34, No. 1, pp. 66-74, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2011.08.023>.
- [12] Imran, A.M., Kowsalya, M., "Optimal size and siting of multiple distributed generators in distribution system using bacterial foraging optimization", Swarm and Evolutionary Computation, Vol. 15, pp. 58-65, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2013.12.001>.
- [13] Rao, R.S., Ravindra, K., Satish, K., Narasimham, S.V.L., "Power loss minimization in distribution system using network reconfiguration in the presence of distributed generation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 28, No. 1, pp. 317-325, 2013, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2197227>.
- [14] Sharma, S., Bhattacharjee, S., Bhattacharya, A., "Quasi-oppositional swine influenza model based optimization with quarantine for optimal allocation of DG in radial distribution network", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 74, pp. 348-373, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.07.034>.
- [15] Nguyen, T. T., Truong, A. V., Phung, T. A., "A novel method based on adaptive cuckoo search for optimal network reconfiguration and distributed generation allocation in distribution network", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 78, pp. 801-815, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.12.030>.
- [16] Abou El-Ela, A.A., El-sehiemy, R.A., Abbas, A.S., "Optimal placement and sizing of distributed generation and capacitor banks in distribution systems using water cycle algorithm", IEEE Systems Journal, Vol. 12, No. 4, 2018, pp. 3629-3636, <https://doi.org/10.1109/JSYST.2018.2796847>.
- [17] Teimourzadeh, H., Ivatloo, B.M., "A three-dimensional group search optimization approach for simultaneous planning of distributed generation units and distribution network reconfiguration", Applied Soft Computing, Vol. 88, pp. 106012, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.106012>.

- [18] Raut, U., Mishra, S., "An improved sine-cosine algorithm for simultaneous network reconfiguration and DG allocation in power distribution systems", *Applied Soft Computing*, Vol. 92, pp. 106293, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106293>.
- [19] Tran, T.V., Truong, B.-H., Nguyen, T.P., Nguyen, T.A., Duong, T.L., Vo, D.N., "Reconfiguration of distribution networks with distributed generations using an improved neural network algorithm", *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 165618–165647, 2021, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3134872>.
- [20] Bhatt, N., Chandel, A.K., "An intelligent water drop approach for simultaneous reconfiguration and DG integration in distribution system", *Energy Systems*, Vol. 14, pp. 1–24, 2022, <https://doi.org/10.1007/s12667-022-00521-8>.
- [21] Musaruddin, M., Tambi, T., Zulkaidah, W., Masikki, G. A. N., Lolok, A., Djohar, A., Marwan, M., "Optimizing network reconfiguration to reduce power loss and improve the voltage profile in the distribution system: A practical case study", *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, Vol. 8, pp. 1-13, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100599>.
- [22] Akmayeva, D., Uzun, U.E., Pamuk, N., "Reconfiguration of Distribution Power Systems Using Heuristic Optimization Algorithms", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 4, pp. 135-141, 2024, <https://doi.org/10.5152/tepes.2024.24015>.
- [23] Yamamoto, R.Y., Pinto, T., Romero, R., Macedo, L. H., "Specialized tabu search algorithm applied to the reconfiguration of radial distribution systems", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 162, pp. 1-141, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.110258>.
- [24] Su, C.T., Chang, C.F., Chiou, J.P., "Distribution network reconfiguration for loss reduction by ant colony search algorithm", *Electric Power Systems Research*, Vol. 75, No. 2-3, pp. 190-199, 2005, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2005.03.002>.
- [25] Verma, H. K., Singh, P., "Optimal reconfiguration of distribution network using modified culture algorithm", *Journal of The Institution of Engineers (India)*, Vol. 99, pp. 613-622, 2018, <https://doi.org/10.1007/s40031-018-0344-6>.
- [26] Grisales-Noreña, L. F., Montoya, D. G., Ramos-Paja, C. A., "Optimal sizing and location of distributed generators based on PBIL and PSO techniques", *Energies*, Vol. 11, No. 4, pp. 1-27, 2018, <https://doi.org/10.3390/en11041018>.
- [27] Montoya, O.S., Walter, G.G., Grisales-Noreña, L.F., "An exact MINLP model for optimal location and sizing of DGs in distribution networks: A general algebraic modeling system approach", *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 11, No. 2, pp. 409-418, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.08.011>.
- [28] Sultana, S., Roy, P.K. "Oppositional krill herd algorithm for optimal location of distributed generator in radial distribution system", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 73, pp. 182-191, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.04.021>.
- [29] Pareja, L.A.G., López-Lezama, J.M., Carmona, O.A.G., "A Mixed-integer linear programming model for the simultaneous optimal distribution network reconfiguration and optimal placement of distributed generation", *Energies*, Vol. 15, Article Number: 3063, 2022, <https://doi.org/10.3390/en15093063>.
- [30] Mishra, A., Tripathy, M., Ray, P., "A survey on different techniques for distribution network reconfiguration", *Journal of Engineering Research*, Vol. 12, No. 1, pp. 173-181, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.09.001>.
- [31] Iftikhar, M.Z., Imran, K. "Network reconfiguration and integration of distributed energy resources in distribution network by novel optimization techniques", *Energy Reports*, Vol. 12, pp. 3155-3179, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.08.067>.
- [32] Moghari, P., Chabanloo, R.M., Torkaman, H. "Distribution system reconfiguration based on MILP considering voltage stability", *Electric Power Systems Research*, Vol. 222, Article Number: 109523, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109523>.
- [33] Ruiz-Rodríguez, F.J., Kamel, S., Hassan, M.H., Dueñas, J.A., "Optimal reconfiguration of distribution systems considering reliability Introducing long-term memory component AEO algorithm. Expert Systems with Applications", *Expert Systems with Applications*, Vol. 249, pp. 1-18, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.123467>.
- [34] Nojavan, S., Jalali, M., Zare, K., "An MINLP approach for optimal DG unit's allocation in radial/mesh distribution systems take into

- account voltage stability index*", Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Electrical Engineering, Vol. 39, pp. 155-165, 2015, <https://doi.org/10.22099/ijste.2015.3488>.
- [35] Murshid, K., Jalil, S. A., Muneeb, S. M., Ali, I., "A distance-based method for solving multi-objective optimization problems", Journal of Modern Applied Statistical Methods, Vol. 17, No. 1, pp. 1-23, 2018, <https://doi.org/10.22237/jmasm/1532525455>.