



Multi-objective Planning of Distributed Generation in the Electricity Network Considering the Interests of the Resource Investor and Network Operator

Amir Ali Hosseini¹ , Mahdi Hedayati² , Amir Khaledian^{3*} 

¹Graduate Student, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Tehran, Iran.

²Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran.

³Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 02.10.2022

Revised: 06.25.2022

Accepted: 08.20.2022

Keyword:

Distributed Generation
Network Operator
Voltage Profile
Loss Reduction
Resource Location

*Corresponding Author:

Amir Khaledian

Email: khaledian66@gmail.com

ABSTRACT

Due to the fast growth of energy consumption globally, distribution networks are seeking a solution to supply the required energy, considering the technical and economic conditions. In this research, distributed resources were planned in the distribution network, taking into account the interests of both the owner of the resources and the operation of the network. The objective function was designed to serve the interests of the owners of the distribution network, including the improvement of network parameters and the owners of distributed generation resources, which included the maximum possible profit from the sale of energy. The objective function was considered to be a combination of several linear functions. Due to the high reactance ratio in radial networks, forward-backward sweep load flow was used. Necessary constraints for the network with quality indicators were considered as equality and inequality constraints. For the location of distributed generators on the buses, the sensitivity factor was used and to achieve the final response of the objective function, the teaching-learning-based optimization (TLBO) algorithm was used and compared with particle swarm optimization. A standard 37-bus radial network was considered to evaluate the results of the proposed method. The simulation results show an improvement in power quality of the network and an increase in the profits of the owners of distributed generators.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Distributed generators (DGs) have made important changes in the electric network. These changes consist of the improvement of grid voltage profile, reduction of used capacity of network feeders, reduction of losses and reliability improvement. The location and capacity of DGs in the distribution network is the most important factor in determining the effectiveness of these sources. Considering the complexities in the optimization of DGs location and capacity, in this article, the problem is modelled in the form of a non-linear multi-objective optimization from the perspective of resource investor and network operator. The mathematical modelling and statement of the research problem are mentioned and the results of the implementation of the proposed method are presented with software simulation.

Methodology

The desired goals for the planning of DGs included the profits of the network operator such as reducing losses and improving the voltage profile and reliability, as well as the profits of the resource investor. Flowchart of the proposed method for multi-objective planning of distributed generators is shown in Figure 1.

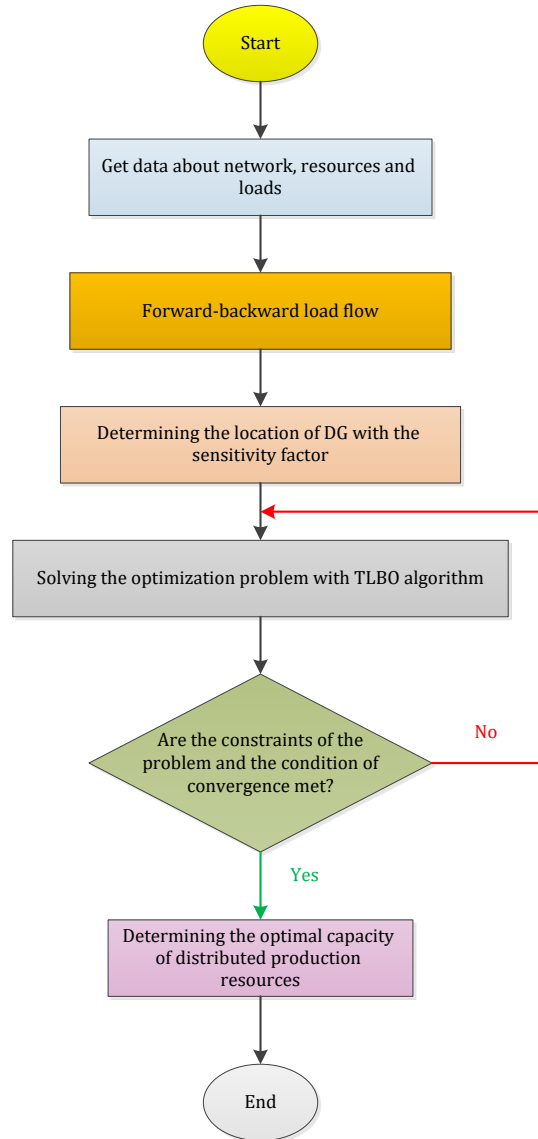


Figure 1. Flowchart of the proposed method for multi-objective planning of distributed generators.

The objective function has two parts. The first part is related to the owner of the DG and the economic income from the sale of the production power of the DGs according to the power plant cost function and the installation and operation costs. The second part is related to the interests of the network owners and represents the network usage conditions. Losses are expressed as costs and should be minimized.

The forward-backward sweep method was used for load flow in the studied distribution network in the presence of DGs. This method had a high speed and good convergence. The

reciprocating sweep method calculates the voltages at each node and the currents at each branch. In the forward stage (first stage), first, the currents are calculated based on the load connected to each bus, and in the return stage (second stage), according to the impedance of the lines, the bus voltages are updated for the next stage. If the voltage changes of each bus are greater than the convergence criterion, steps one and two are repeated again.

The sensitivity factor was used in this article to determine the location of DG. The location of DGs was determined based on the lowest value of the sensitivity factor. Teaching-learning-based optimization (TLBO) was used to solve the optimization problem. The advantage of using this algorithm is that there is no need to check the convexity of the optimization problem space and the derivability of the objective function and fast convergence in reaching the optimal answer. Furthermore, the accelerated particle swarm optimization (APSO) algorithm was used to validate and compare the proposed method

Results and discussion

In the present research, the 37 bus IEEE network was used to implement the proposed method. The proposed method reached convergence in 50 iterations in solving the optimization problem as depicted in Figure 2.

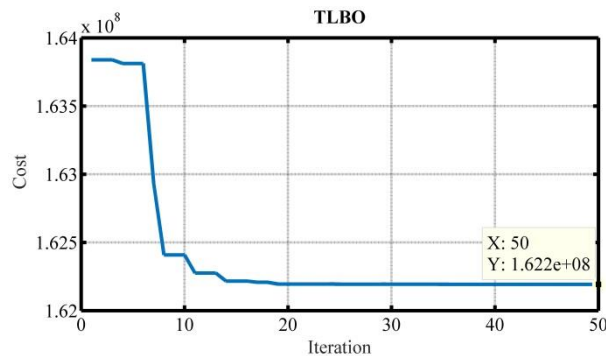


Figure 2. Progress graph of objective function with TLBO algorithm.

The comparison of the production of DGs is shown in Figure 3. As can be observed, greater power was produced by DGs in the TLBO algorithm, meaning greater profits for the owners of DGs. Additionally, in the TLBO algorithm, the production of the slack bus generator compared to APSO decreased. In other words, the capacity of the main generator was freed. It also showed that the network losses in the TLBO algorithm were reduced to a larger extent than that in APSO, while the active and reactive load of the lines remained the same.

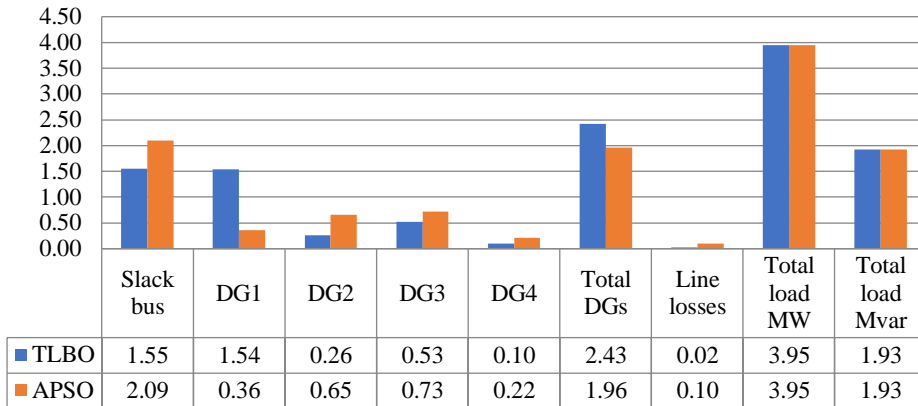


Figure 3. Comparison of DGs and slack bus production and line losses after optimization in APSO and TLBO.

Conclusion

In the present research, the planning of DGs in the electric distribution network with a multi-objective approach from the perspective of the resource investor and the network operator was discussed. For this purpose, mathematical modelling of the research problem was presented by taking into account the income from power injection into the grid by DG and the costs from the construction and operation of DG and network losses. Moreover, network constraints such as the number and capacity of sources, line power limits, bus voltage limits, equality of production and consumption, and reliability were considered. Then, by implementing forward-backward sweep load flow, which had better speed and convergence than other common load flow methods, the voltage status and occupied capacity of network feeders were reported. Next, the sensitivity factor was proposed as a new method for determining the suitable location for installing DGs, which was used in addition to the proposed TLBO algorithm to solve the optimization problem and determine the optimal capacity of DGs. By implementing the proposed method in Matlab software, the simulation results showed that the bus voltage drop, the amount of line losses, bus slack power plant production and environmental pollution were significantly reduced compared to the structure without DGs. Moreover, the TLBO algorithm performance better than the other used algorithm, i.e. APSO, in the speed and results of solving the optimization problem.

برنامه‌ریزی چندهدفه تولیدات پراکنده در شبکه توزیع انرژی الکتریکی با در نظر گرفتن منافع سرمایه‌گذار منابع و بهره‌بردار شبکه

امیرعلی حسینی^۱، مهدی هدایتی^۲، امیر خالدیان^{۳*}

- ۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران، ایران.
- ۲- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران.
- ۳- استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

با توجه به روند روبه‌رشد مصرف انرژی در جهان، شبکه‌های توزیع به دنبال راهکارهای نوین تأمین انرژی موردنیاز با فراهم بودن شرایط فنی و اقتصادی مطلوب هستند. در این تحقیق، برنامه‌ریزی منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع با توجه به منافع مالک منابع و بهره‌بردار شبکه در نظر گرفته شده است. تابع هدف به شکلی طراحی شده است که منافع صاحبان شبکه توزیع از جمله بهبود پارامترهای شبکه و مالکان منابع تولید پراکنده که شامل بیشترین سود ممکن حاصل از فروش انرژی است را تأمین کند. تابع هدف از ترکیب چند تابع خطی در نظر گرفته شده است. به علت نسبت مقاومت به راکتانس بالا در شبکه‌های شعاعی از پخش بار جاروب پیشرو پیرو استفاده شده است. قیود لازم برای شبکه با شاخص‌های کیفی به صورت قیود برابری و نابرابری در نظر گرفته می‌شود. برای تعیین محل نصب منابع تولید پراکنده بر روی باس‌ها، از شاخص حساسیت بهره گرفته شده است. همچنین برای رسیدن به پاسخ نهایی تابع هدف از الگوریتم بهینه‌سازی یادگیری معلم و مقایسه آن با الگوریتم ازدحام ذرات استفاده شده است. برای ارزیابی نتایج روش پیشنهادی از شبکه شعاعی ۳۷ باسه استاندارد استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی، نشان‌دهنده بهبود وضعیت شبکه و افزایش سود مالکان تولیدات پراکنده است.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۲۱

بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۰۴

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۲۹

کلید واژگان:

تولید پراکنده
بهره‌بردار شبکه توزیع
پروفیل ولتاژ
کاهش تلفات
مکان‌یابی منابع

* نویسنده مسئول: امیر خالدیان

پست الکترونیکی:

khaledian66@gmail.com

مقدمه

منابع تولید پراکنده (DG^1) با ورود به شبکه توزیع، تغییرات مهمی در ساختار شبکه ایجاد کرده‌اند. از جمله این تغییرات، بهبود وضعیت ولتاژ شبکه توزیع، کاهش ظرفیت اشغال‌شده فیدهای شبکه، کاهش تلفات و بهبود قابلیت اطمینان است [۱؛ ۲]. مکان و ظرفیت نصب منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع مهم‌ترین عامل در تعیین میزان تأثیرگذاری این منابع است [۳؛ ۴].

مزایای تولید پراکنده از یک سو از چشم‌انداز بهره‌بردار شبکه توزیع مطرح است. از طرف دیگر مالک منابع تولید پراکنده می‌تواند بخش خصوصی باشد که به دنبال انتفاع از این سرمایه‌گذاری است. آنچه از دیدگاه بخش خصوصی مهم است، سود بیشتر ناشی از سرمایه‌گذاری در حوزه منابع تولید پراکنده است. از این رو دستیابی به نقطه بهینه بین بهره‌بردار شبکه توزیع و مالکین منابع تولید پراکنده یکی از مسائل مطرح در شبکه‌های توزیع است [۵؛ ۶].

منابع متعددی به مطالعه مکان‌یابی منابع تولید پراکنده با هدف بهبود قابلیت اطمینان شبکه توزیع پرداخته‌اند [۷-۹]. این مطالعات بر این باورند که قابلیت اطمینان برای مالکان منابع تولید پراکنده و صاحبان شبکه ایجاد انگیزه می‌کند. در این مراجع بهترین مکان منابع تولید پراکنده در مراکز بار یا در نزدیکی آن است. در این مطالعات با استفاده از تلفیق راهکارهای الگوریتم‌های هوشمند بهینه‌سازی و روش‌های تحلیلی به حل مسئله مکان‌یابی منابع تولید پراکنده با هدف کاهش تلفات در شبکه توزیع و همچنین بالابردن سرعت همگرایی پرداخته شده است.

رویکرد تزریق توان اکتیو از باس مادر و توان راکتیو از DG ها، یک روش دیگر برای به حداقل رساندن تلفات است [۱۰]. در [۱۱] با در نظر گرفتن نرخ خرابی فیدهای شبکه و همچنین نوع بار مشترکین، مکان‌یابی منابع تولید پراکنده انجام شده است. این تحقیق نشان داده است که تغییرات غیرواقعی نرخ رشد بار مشترکین شبکه به‌شدت بر نتایج برنامه‌ریزی منابع تولید پراکنده مؤثر است. تعیین الگوی مناسب برای میزان خرابی فیدها و مدل بار واقعی در نتایج شبیه‌سازی تأثیر مثبتی خواهد داشت. در این مطالعه، مسئله برنامه‌ریزی محل قرارگیری DG در سیستم توزیع برق براساس حداقل هزینه کل سیستم با در نظر گرفتن چندین عامل اقتصادی، فنی، مدل‌سازی نوع بار مشتریان و میزان خرابی فیدر بررسی شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که مدل‌سازی غیرواقعی از نوع بار مشتری یا میزان خرابی فیدر در برنامه‌ریزی DG می‌تواند نتایج گمراه‌کننده‌ای داشته باشد و مضرات قابل توجهی را به بهره‌برداران شبکه توزیع محلی تحمیل کند.

برنامه‌ریزی هم‌زمان منابع تولید پراکنده و بازآرایی در شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی در [۱۲] برای کاهش تلفات و بهبود پایداری ولتاژ شبکه توزیع مطرح شده و برای حل مسئله بهینه‌سازی، از الگوریتم هوشمند فاخته بهره‌برداری شده است. بازآرایی شبکه توزیع که به معنای تغییر آرایش فیدهای شبکه توزیع است و نقش مؤثری در استفاده بهینه از منابع تولید پراکنده دارد در این مقاله مورد توجه قرار گرفته است. روش $ACSA^2$ با موفقیت به‌کار گرفته شده و برای تنظیم مجدد شبکه توزیع و موقعیت و اندازه DG ها به‌طور هم‌زمان استفاده شده است. هدف مقاله این است که تلفات توان اکتیو را به حداقل رساند و به تأمین توان و تقویت شاخص پایداری ولتاژ توزیع برق دست یابد. نتایج به‌دست‌آمده، موفقیت این روش را به‌اثبات رسانده است.

در [۱۳] مجموعه‌ای از اهداف و عوامل مطالعه و مرور شده است که منجر به افزایش نفوذ منابع تولید پراکنده در شبکه می‌شود. منابع مختلف نظیر نیروگاه بادی، سیستم ذخیره انرژی و نیروگاه پمپ ذخیره‌ای با استراتژی‌های اتحادیه تولیدکنندگان محلی به‌طور واقعی ارائه شده است. کاهش تلفات، بهبود ولتاژ و بهبود کیفیت توان، بهبود امنیت شبکه، کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و به تعویق انداختن هزینه‌های سرمایه‌گذاری از مجموعه مزایای فنی و اقتصادی است

¹ Distributed generator

² Adaptive cuckoo search algorithm

که در این تحقیق، به‌عنوان عوامل انگیزشی در راستای حضور منابع تولید پراکنده در شبکه مطرح شده است. این مطالعه به ایجاد یک ساختار ارتباطی با استفاده از تکنولوژی‌های فناوری ارتباطات تأکید دارد.

مراجع [۱۴-۱۷] مجموعه مطالعات صورت‌گرفته در حوزه برنامه‌ریزی منابع تولید پراکنده را مرور کرده‌اند. مرور اهداف و روش‌های بهینه‌سازی و توابع هدف مختلف در این مراجع به‌خوبی انجام شده است. در [۱۷] روش‌های ریاضی و تحلیلی در کنار روش‌های ابتکاری و فراابتکاری مقایسه شده است که نشان می‌دهد از میان این روش‌ها تکنیک‌های هوش مصنوعی در مقایسه با دیگر روش‌ها در برنامه‌ریزی منابع پاسخ بهتری داشته‌اند. در [۱۶] انواع قیود مطرح در بهینه‌سازی ظرفیت منابع تولید پراکنده بررسی و مرور شده است که نشان می‌دهد قیود دامنه ولتاژ، ظرفیت توان اکتیو و راکتیو و تعداد منابع تولید پراکنده، نرخ دشارژ باتری‌ها و ظرفیت فیدرها از موارد مطرح در این زمینه است؛ در حالی که در [۱۴] تأمین توان موردنیاز شبکه، کیفیت توان، پایداری ولتاژ، کاهش تلفات و قابلیت اطمینان در برنامه‌ریزی منابع تولید پراکنده بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. به برخی شاخص‌های خاص که می‌توانند به‌عنوان قیود استفاده از منابع تولید پراکنده مطرح باشند، در [۱۵] اشاره شده است. مواردی نظیر مقبولیت اجتماعی در پذیرش این منابع توسط مشترکین برق، پاسخگویی بار و نقش آن در بهره‌برداری از DGها، قوانین و مقررات اجتماعی و رگولاتوری در کنار سیاست‌های کلان کشورها در این زمینه قابل توجه است.

مقاله [۱۸] به بررسی و تعیین کفایت سیستم‌های قدرت در حضور منابع تولید پراکنده پرداخته‌اند. در این مقاله، یک روش برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته^۱ برای برنامه‌ریزی و توسعه بهینه تولیدات پیشنهاد شده است. ادعای این تحقیق، ارائه راهکاری بهینه و از جهت محاسباتی سریع، برای تصمیم‌گیری توسعه بهینه تولیدات و در عین حال، به مدار آوردن واحدها^۲ است. هدف این تحقیق بررسی اثر افزایش ضریب نفوذ واحدها در تعیین بهینه تولیدات و سود ژنراتورهای حرارتی است. در یک مطالعه موردی نشان می‌دهد که هرچه نیروگاه‌های بیشتری وارد شبکه شود، قیمت برق کاهش می‌یابد در حالی که هزینه رزرو عملیاتی افزایش می‌یابد. همچنین سود نیروگاه‌های حرارتی در اثر نفوذ نیروگاه بادی کاسته می‌شود. در واقع سود ژنراتورها کاملاً وابسته به نوسانات باد خواهد بود و ریسک سرمایه‌گذاری در این بخش بالا خواهد رفت مگر اینکه در بازارهای بلندمدت حضور داشته باشد. در مقابل، استفاده از مکانیزم‌های سرکوب، باعث قیمت‌گذاری‌های بسیار متنوع در بازار برق خواهد شد که این موضوع مطلوب نیست.

یکی از مباحثی که در جایابی منابع تولید پراکنده، ادبیات تحقیق را تشکیل داده است، ارائه روش‌های مختلف حل مسائل بهینه‌سازی در فرایند جایابی منابع تولید پراکنده است. استفاده از انواع الگوریتم‌های بهینه‌سازی، بهره‌گیری از منطق فازی و همچنین استفاده از نظریه بازی‌ها و تلفیق این راهکارها، از جمله راهکارهایی است که در مراجع تحقیق برای حل مسائل مربوط به برنامه‌ریزی منابع تولید پراکنده، پیشنهاد شده است [۱۹-۲۲].

در [۲۳] به کمک تلفیق نظریه بازی‌ها و الگوریتم هوشمند PDE^۳، به برنامه‌ریزی منابع تولید پراکنده از دید مالک و سرمایه‌گذار منابع پراکنده پرداخته است. سه هدف کلی شامل کاهش تلفات توان اکتیو، کاهش انحرافات ولتاژ و بهبود شاخص پایداری ولتاژ شبکه، در مکان‌یابی منابع تولید پراکنده و همچنین میزان سود مالک منبع در تعیین قیمت پیشنهادی منابع تولید پراکنده پیشنهاد شده است. مسئله چندهدفه در دو فاز بررسی شده است. فاز اول تعیین محل DGها و فاز دوم افزایش درآمد صاحبان DG است. سپس با الگوریتم بازی سعی دارد به قیمت مطلوب دو سر برد دست یابد. همچنین نشان داده شد که الگوریتم PDE در سرعت رسیدن به پاسخ‌ها مؤثر است.

به دلیل مشکلات ذاتی شبکه‌های شعاعی که تعداد گره‌ها و نسبت مقاومت به راکتانس (R/X) باعث ناکارآمدی روش‌های معمولی پخش بار شده است. در [۲۴] یک عامل حساس به تلفات بررسی و در مکان‌یابی منابع استفاده شده

¹ Mixed-integer program

² Unit commitment

³ Pareto-Frontier differential evaluation

است. این عمل بر تزریق جریان توان به باس موردنظر برای کاهش تلفات تمرکز دارد. بنابراین مطالعه حاضر ادعا دارد بدون استفاده از امیدانس، ادمیتانس و ماتریس جاکوبین برای به‌دست آوردن حداقل تلفات تلاش شده و در مقابل، با استفاده از الگوریتم ساده ماتریس‌ها به مکان‌یابی منابع پراکنده پرداخته است. در این تحقیق سه شبکه ۱۲، ۳۳ و ۶۹ باسه مطالعه شده و نتیجه به‌دست آمده این است که روش پیشنهادی، زمان کمتری را برای محاسبات صرف می‌کند.

مطالعات گذشته نشان می‌دهد منابع تولید پراکنده می‌تواند منجر به کاهش تلفات، بهبود وضعیت ولتاژ، بهبود قابلیت اطمینان، کاهش ظرفیت اشغال شده فیدهای شبکه و بهبود کیفیت توان شود. از طرفی، الگوریتم‌های فراابتکاری و هوش مصنوعی می‌تواند اهداف چندهدفه مد نظر در شبکه را تأمین کند. نکته‌ای که باید به آن توجه کرد این است که روش‌های حل مسائل بزرگ دارای پیچیدگی‌هایی است که کار با آن‌ها را بسیار دشوار می‌کند.

با توجه به پیچیدگی‌های مطرح در بهینه‌سازی مسائل بزرگ، در این مقاله با استفاده از فاکتور حساسیت، به مدل‌سازی برنامه‌ریزی منابع تولید پراکنده در قالب مدل بهینه‌سازی غیرخطی در شبکه توزیع انرژی الکتریکی با رهیافت چندهدفه از چشم‌انداز سرمایه‌گذار منابع و بهره‌بردار شبکه به کمک الگوریتم فراابتکاری یادگیری معلم پرداخته می‌شود. در بخش دوم مقاله مدل‌سازی ریاضی و مسئله تحقیق بیان می‌شود. در بخش سوم و چهارم به ترتیب الگوریتم‌های پیشنهادی برای حل مسئله بهینه‌سازی و پخش بار تشریح می‌گردد. در بخش پنجم نتایج اجرای روش پیشنهادی با شبیه‌سازی نرم‌افزاری ارائه می‌شود و در نهایت در بخش ششم نتایج مقاله بیان خواهد شد.

بیان مسئله تحقیق و راهکار پیشنهادی

مسئله تحقیق در قالب بهینه‌سازی چندهدفه به‌منظور برنامه‌ریزی منابع تولید پراکنده مطرح می‌شود. هدف از بهینه‌سازی، یافتن بهترین پاسخ با درنظر گرفتن محدودیت‌ها است. ساده‌ترین شکل تابع بهینه‌سازی تشکیل یک تابع به‌صورت ترکیب خطی از چند تابع هدف اصلی است و به هر تابع با توجه به میزان اثرگذاری، وزن ویژه‌ای اختصاص می‌یابد. اهداف موردنظر برای برنامه‌ریزی منابع تولید پراکنده، شامل اهداف بهره‌بردار شبکه نظیر کاهش تلفات، بهبود وضعیت ولتاژ و ارتقای قابلیت اطمینان و نیز اهداف سرمایه‌گذار منابع شامل سود مالکان منابع پراکنده است. به‌منظور تحلیل شبکه از پخش بار جاروب پیشرو پسرو و برای حل مسئله بهینه‌سازی از روش فاکتور حساسیت در کنار الگوریتم بهینه‌سازی یادگیری معلم استفاده می‌شود. همچنین از الگوریتم ازدحام ذرات به‌منظور صحت‌سنجی روش پیشنهادی و مقایسه با آن استفاده می‌شود.

مدل‌سازی ریاضی مسئله تحقیق

مسئله برنامه‌ریزی منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع در این تحقیق در قالب بهینه‌سازی چندهدفه غیرخطی مدل‌سازی شده است. فرم کلی مسئله بهینه‌سازی تحقیق شامل ترکیبی از چند تابع خطی است که با یکدیگر جمع شده‌اند. تابع هدف به‌صورت رابطه (۱) و شامل سه بخش f_1 ، f_2 و f_3 است که توسط روابط (۲) تا (۴) بیان می‌شود.

$$\text{Max} \left[\sum_{i=1}^n \left[(P_{DG_i} \cdot \text{Price}_{\text{sell}}) - (IC_{DG_i} + \text{Investment}_{DG_i}) \right] \right] + \text{Min} (P_{\text{loss}} \cdot \text{Price}_{\text{buy}}) \quad (1)$$

$$f_1 = P_{DG_i} \cdot \text{Price}_{\text{sell}} \quad (2)$$

$$f_2 = IC_{DG_i} + \text{Investment}_{DG_i} \quad (3)$$

$$f_3 = P_{\text{loss}} \cdot \text{Price}_{\text{buy}} \quad (۴)$$

در رابطه (۱)، تابع مطلوبیت دارای دو بخش است. بخش اول ($f_1 - f_2$) مربوط به مالک DG و درآمد اقتصادی حاصل از فروش توان تولیدی منابع تولید پراکنده i با توجه به تابع هزینه نیروگاه و هزینه‌های نصب و راه‌اندازی (تأسیس نیروگاه) است که تفاضل این دو باید بیشینه شود. بخش دوم (f_3) به منافع صاحبان شبکه مرتبط و معرف شرایط بهره‌برداری از شبکه است. تلفات به صورت هزینه بیان می‌شود و باید کمینه گردد. در این رابطه، P_{DG_i} توان تولیدی DG_i در شبکه دارای n منبع تولید پراکنده، $\text{Price}_{\text{sell}}$ قیمت فروش برق، IC_{DG_i} هزینه بهره‌برداری ژنراتور i ، Investment_{DG_i} هزینه نصب و راه‌اندازی ژنراتور i ، P_{loss} تلفات کل شبکه و $\text{Price}_{\text{buy}}$ قیمت خرید انرژی است. بخش اول تابع هدف بیان می‌کند که تفاضل درآمد حاصل از فروش توان از هزینه نصب و بهره‌برداری ژنراتور حداکثر شده است که هدف سود بیشتر تولیدکنندگان منابع پراکنده است. هزینه بهره‌برداری، تابعی غیرخطی از توان ژنراتور است که به صورت رابطه (۵) تعریف شده است.

$$\text{IC}_{DG_i} = C_n P^n + \dots + C_1 P^1 + C_0 \quad (۵)$$

هزینه‌های تأسیس یک نیروگاه شامل خرید دیزل ژنراتور، هزینه‌های نصب، راه‌اندازی و خرید زمین می‌باشد [۲۵]- [۲۷]. محاسبات هزینه تلفات خطوط نیز براساس مطالب مطرح‌شده در [۲۸] انجام شده است.

قیود و محدودیت‌های مسئله تحقیق

استفاده از منابع تولید پراکنده براساس قیود فنی شبکه و منابع انجام می‌شود که این محدودیت‌ها در حل مسئله بهینه‌سازی مورد توجه قرار می‌گیرد. رابطه (۶)، تعداد حداکثر منابع مورد استفاده در شبکه توزیع برای برنامه‌ریزی را محدود می‌سازد.

$$N_i \leq N_{DG} \quad (۶)$$

در این مقاله چهار منبع تولید پراکنده برای شبکه مورد مطالعه در نظر گرفته شده که با بهینه‌سازی، ظرفیت آن‌ها تعیین می‌شود. در رابطه (۶)، N_i تعداد منابع تولید پراکنده و N_{DG} حداکثر منابع تولید پراکنده مورد برنامه‌ریزی در شبکه است.

قیود برابری شبکه توسط معادلات پخش بار توصیف می‌گردند که در روابط (۷) تا (۱۱) مشخص شده است و بیانگر برابری تولید و مصرف است.

$$P_i(v, \delta) - P_{G_i} + P_{D_i} = 0 \quad (۷)$$

$$Q_i(v, \delta) - Q_{G_i} + Q_{D_i} = 0 \quad (۸)$$

$$P_i(v, \delta) = |V_i| \sum_{j=1}^N |V_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \phi_{ij}) \quad (۹)$$

$$Q_i(v, \delta) = |V_i| \sum_{(j=1)}^N |V_j| |Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \phi_{ij}) \quad (10)$$

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \phi_{ij} \quad (11)$$

قیود نابرابری که بیانگر حدود متغیرهای کنترلی و حدود بهره‌برداری تجهیزات می‌باشند، در روابط (۱۲) تا (۱۷) مشخص شده است.

$$V_{i,min} \leq V_i \leq V_{i,max}, \quad i = 1, \dots, N \quad (12)$$

$$\delta_{i,min} \leq \delta_i \leq \delta_{i,max}, \quad i = 1, \dots, N \quad (13)$$

$$P_{G_i,min} \leq P_{G_i} \leq P_{G_i,max}, \quad i = 1, \dots, N_G \quad (14)$$

$$Q_{G_i,min} \leq Q_{G_i} \leq Q_{G_i,max}, \quad i = 1, \dots, N_G \quad (15)$$

$$|P_l| \leq P_{l,max}, \quad i = 1, \dots, N_l \quad (16)$$

$$|S_l| \leq S_{l,max}, \quad i = 1, \dots, N_l \quad (17)$$

روابط (۱۲) تا (۱۵) به ترتیب حدود ولتاژ باس‌ها، زاویه ولتاژ باس‌ها، توان اکتیو تولیدی ژنراتورها و توان راکتیو ژنراتورها را نشان می‌دهد. حدود MW و MVA عبوری از خطوط نیز به ترتیب در روابط (۱۶) و (۱۷) مشخص شده‌اند. در مسئله بهینه‌سازی، محدودیت‌های قابلیت اطمینان شبکه با در نظر گرفتن شاخص‌های تأمین انرژی توسط رابطه (۱۸) در نظر گرفته شده است [۲۹].

$$EIR \geq R_0 \quad (18)$$

در این رابطه EIR^1 شاخص انرژی مربوط به قابلیت اطمینان است و R_0 حداقل قابلیت اطمینان موردانتظار از منابع تولید پراکنده است که برابر ۰/۹ در نظر گرفته می‌شود. EIR از رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود.

$$EIR = 1 - \frac{EUE}{E_T} \quad (19)$$

در این رابطه EUE انرژی تأمین نشده موردانتظار از منابع تولید پراکنده و E_T مقدار کل انرژی تولید شده توسط منابع تولید پراکنده است. رابطه (۱۹) را می‌توان به بیان دیگر با رابطه (۲۰) نشان داد که در آن EPNS توان تأمین نشده موردانتظار از منابع تولید پراکنده و D_T مقدار کل توان تولید شده توسط منابع تولید پراکنده است.

¹ Energy Index of Reliability

$$EIR = 1 - \frac{EPNS}{D_T} \quad (20)$$

می توان EPNS را با رابطه (۲۱) بیان کرد که در آن LOL_i میزان بی باری ناشی از خرابی DG_i و $prob_i$ احتمال وقوع این خرابی است.

$$EPNS = \sum_{i=1}^{N_{dg}} LOL_i \times prob_i \quad (21)$$

با توجه به اینکه مسئله بهینه سازی با محدودیت تعداد چهار DG در نظر گرفته شده است، احتمال وقوع خرابی DGها براساس جدول ۱ در نظر گرفته شده است.

جدول ۱. مشخصات منابع تولید پراکنده به منظور اتصال به شبکه ۳۷ باسه.

نام DG	ظرفیت برحسب کیلووات	احتمال وقوع خرابی ($prob_i$)
DG1	۲۰۰۰	۰/۰۶
DG2	۲۰۰۰	۰/۱۰
DG3	۲۰۰۰	۰/۰۸
DG4	۲۰۰۰	۰/۱۰

فاکتور حساسیت

فاکتور حساسیت در [۲۸] مطرح شده و در این مقاله برای تعیین محل نصب DG به کار رفته است. براساس کمترین مقدار فاکتور حساسیت که از رابطه (۲۲) به دست می آید مکان DGها تعیین می شود. برای شبکه هایی که منحنی بار دارند می توان از $\frac{\partial P_L}{\partial P_i}$ استفاده کرد که بیانگر تغییرات بار به تغییرات توان تزریق شده به باس i است.

$$\alpha_i = 2[R]^T [M.Re(I). \frac{\cos(\theta_i)}{|V_i|} + M.Im(I). \frac{\sin(\theta_i)}{|V_i|}] = \frac{\Delta P_{loss}}{\Delta P_{injected_i}} \sim \frac{\partial P_L}{\partial P_i} \quad (22)$$

در این رابطه R بردار مقاومت شاخه ها، I بردار جریان شاخه ها، θ_i زاویه بین بردار جریان و ولتاژ، M ماتریس رابطه جریان شاخه ها و تزریق به باس ها و V_i ولتاژ باس i است. مقادیر فاکتور حساسیت با استفاده از پخش بار اولیه به دست می آید. سپس کلیه مقادیر از کوچک به بزرگ مرتب می شود. در این مقاله چهار رتبه اول برای نصب چهار منبع تولید پراکنده در نظر گرفته می شود.

تأثیرات زیست محیطی

یکی از پارامترهای تحت بررسی در این مقاله، تأثیرات زیست محیطی ناشی از استفاده از منابع تولید پراکنده است. این پارامتر با رابطه (۲۳) در قالب سود ناشی از کاهش آلودگی محیط زیست به ریال بیان می شود.

$$\cos t_{inv} = (E_{woi} - E_{wi}) \cdot C_{inv} \cdot \beta \quad (22)$$

در این رابطه، E_{woi} مقدار برق سالیانه ناشی از شبکه اصلی بدون نیروگاه‌های پراکنده، E_{wi} مقدار برق سالیانه ناشی از شبکه اصلی در حضور نیروگاه‌های پراکنده، C_{inv} مقدار انتشار گاز CO₂ برحسب کیلوگرم بر کیلووات ساعت و β جریمه بابت انتشار گاز بر حسب ریال بر کیلوگرم است. این مقادیر برحسب جدول ۲ است که از مرجع [۲۸] استخراج و براساس قیمت ارز در سال ۱۴۰۱ محاسبه شده است.

جدول ۲. جدول نرخ و جریمه انتشار گازهای مضر نیروگاه‌ها.

جریمه بابت انتشار گاز (ریال بر کیلوگرم)	مقدار انتشار گاز (کیلوگرم بر کیلووات ساعت)
۶۰۰۰۰۰	۰/۳۱

الگوریتم یادگیری معلم

در این تحقیق از الگوریتم هوشمند یادگیری معلم^۱ (TLBO) برای حل مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است. مزیت به‌کارگیری این الگوریتم، نیاز نداشتن به بررسی محدب بودن فضای مسئله بهینه‌سازی و مشتق‌پذیر بودن تابع هدف و همگرایی سریع در رسیدن به پاسخ بهینه است. الگوریتم TLBO با الهام از فرایندی که در حین آموزش و یادگیری در کلاس اتفاق می‌افتد، توانسته است مدلی را برای بهینه‌سازی ارائه دهد. در جدول ۳ پارامترهای تنظیمی الگوریتم یادگیری معلم و چگونگی تأثیرگذاری آن پارامتر نشان داده شده است [۳۰-۳۲]. مقدار تابع هدف در این مقاله، معادل با معدل هر دانش‌آموز تلقی می‌شود.

جدول ۳. پارامترهای الگوریتم یادگیری معلم.

عنوان پارامتر	مشخصه تعیین‌کننده
تعداد کل دانش‌آموزان	قدرت رسیدن به جواب
بیشترین تعداد تکرار	زمان رسیدن به جواب
فاکتور یادگیری (TF)	جستجوی سراسری
فاکتور اتفاقی (RAND)	جستجوی محلی

روش پخش بار جاروب پیش‌رو پس‌رو^۲

در این مقاله روش جاروب پیش‌رو پس‌رو یا رفت و برگشت برای پخش بار در شبکه توزیع مورد مطالعه در حضور منابع تولید پراکنده به‌کار برده شده است. این روش سرعت بالایی دارد همچنین همگرایی خوب آن باعث شده است در مسائل پخش بار توزیع استفاده شود. روش جاروب رفت و برگشت ولتاژها را در هر گره و جریان‌ها را در هر شاخه محاسبه می‌کند. در رفت (مرحله اول) ابتدا جریان‌ها براساس بار متصل به هر شینه محاسبه می‌شود و در برگشت (مرحله دوم) با توجه به امپدانس خطوط، ولتاژ شینه‌ها برای مرحله بعد به‌روزرسانی می‌گردند. اگر تغییرات ولتاژ هر باس از معیار همگرایی بیشتر باشد مراحل یک و دو مجدداً تکرار می‌شود. برتری این روش در تضمین و سرعت همگرایی آن است.

¹ Teaching Learning Based Optimization

² Backward/forward sweep

در این روش ابتدا ضمن حرکت از باس انتهایی به سمت باس مادر توان شاخه‌ها براساس رابطه (۲۴) محاسبه می‌گردد. در این رابطه S_n توان شاخه n است. S_i توانی است که به بار متصل به گره یا شینه i تزریق می‌گردد. S_m توان مجموع شاخه‌های متصل به شاخه n و $Loss_n$ تلفات شاخه n است.

$$S_n = S_i + \sum_{m \in M} S_m + Loss_n \quad (24)$$

سپس از باس اسلک به سمت انتهای شاخه‌ها حرکت و برای شاخه n ابتدا جریان فرستنده شاخه (رابطه (۲۵)) و در ادامه ولتاژ در شینه گیرنده جریان شاخه (رابطه (۲۶))، محاسبه می‌شود. تلفات نیز از رابطه (۲۷) به دست می‌آید. در مرحله آخر تطابق نداشتن ولتاژ با رابطه (۲۸) بررسی خواهد شد.

$$J_n = \left(\frac{S_n}{V^i} \right) \quad (25)$$

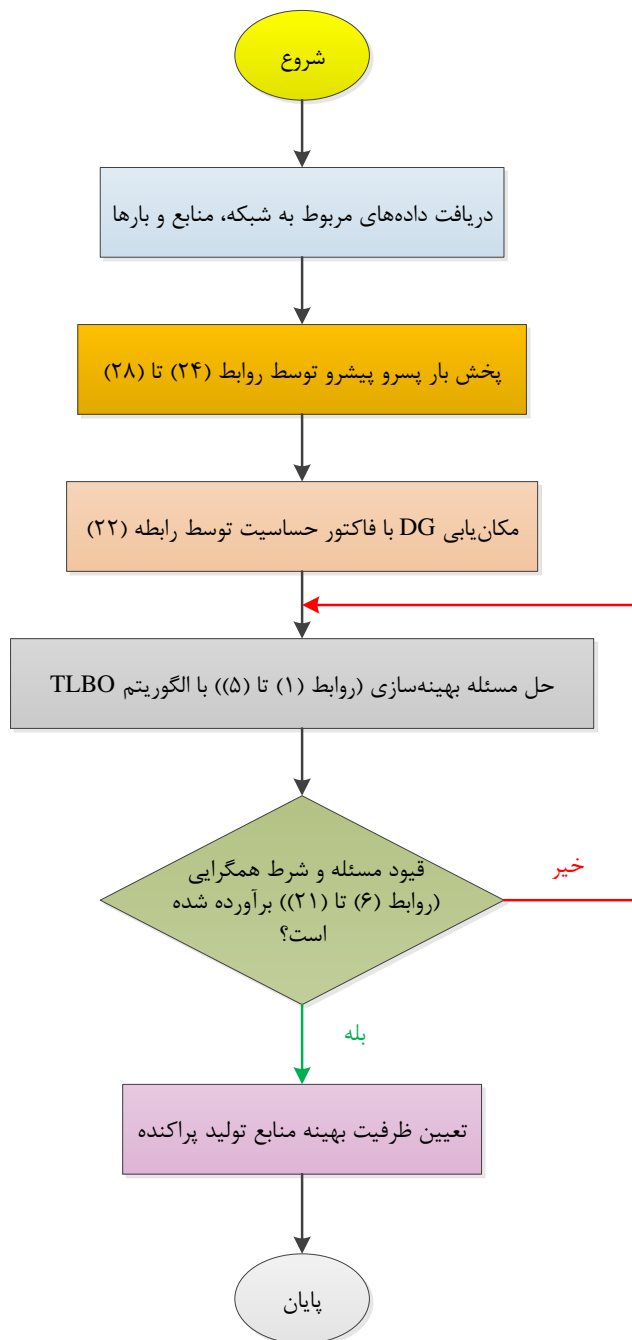
$$V^i = V^j - Z_n \cdot J_n \quad (26)$$

$$Loss_n = - (V^i - V^j) \cdot I_n^* \quad (27)$$

$$\Delta V^{i(k)} = |\Delta V^{i(k)}| - |\Delta V^{i(k-1)}| \quad (28)$$

شمارنده k تعداد تکرار را بیان می‌کند. در صورتی که هرکدام از مقادیر بیشتر از معیار همگرایی باشد، مراحل مجدداً تکرار می‌شوند تا همگرایی به دست آید.

روندنمای روش پیشنهادی به منظور برنامه‌ریزی چندهدفه منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع انرژی الکتریکی با در نظر گرفتن منافع سرمایه‌گذار منابع و بهره‌بردار شبکه در شکل ۱ نشان داده شده است.

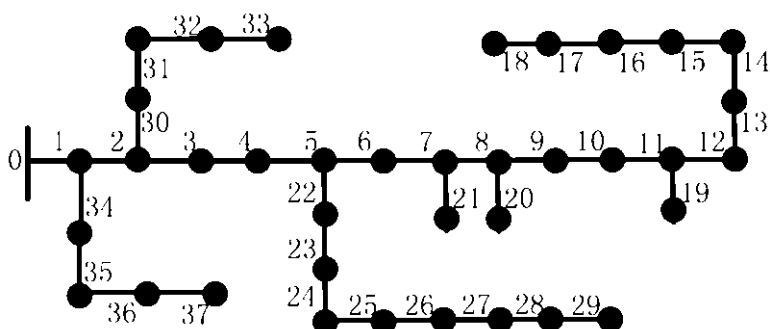


شکل ۱. روندنمای روش پیشنهادی در راستای برنامه‌ریزی چندهدفه منابع تولید پراکنده.

نتایج شبیه‌سازی

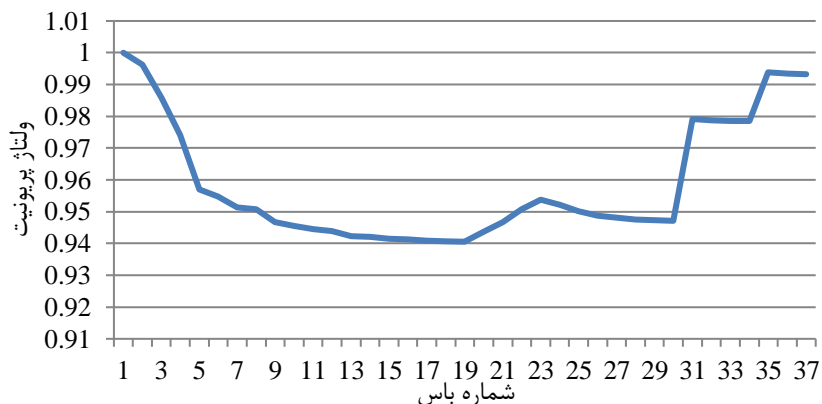
در این بخش به اجرای روش پیشنهادی در مقاله در راستای حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه برنامه‌ریزی منابع پراکنده پرداخته می‌شود. برای این منظور در ابتدا شبکه توزیع مورد مطالعه تشریح می‌گردد و وضعیت ولتاژ و توان عبوری از فیدها با اجرای پخش بار جاروب پسر و پیشرو گزارش می‌شود. سپس با در نظر گرفتن ملاحظات اجرا، شامل اطلاعات بار و هزینه‌های منابع تولید پراکنده، مسئله برنامه‌ریزی با ترکیب الگوریتم TLBO و فاکتور حساسیت حل می‌گردد و نتایج نشان داده می‌شود.

در این تحقیق از شبکه ۳۷ شینه استاندارد برای اجرای راهکار پیشنهادی و ارزیابی آن استفاده می‌شود. دیاگرام تک‌خطی این شبکه در شکل ۲ نشان داده شده است که در آن باس صفر، باس اسلک است [۲۸].



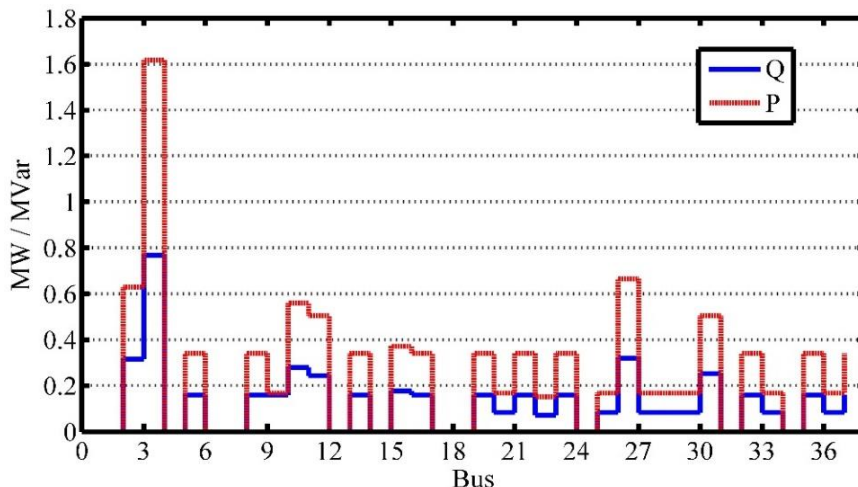
شکل ۲. شبکه ۳۷ شینه IEEE مورد مطالعه در مقاله.

با ارزیابی شبکه و اجرای تحلیل پخش بار جاروب پسر و پیشرو به کمک ابزار Matpower در نرم‌افزار Matlab، منحنی ولتاژ باس‌های شبکه به همراه توان مصرفی به‌دست آمده است. در شکل ۳ ولتاژ باس‌ها نشان داده شده که بیانگر آن است ولتاژ باس‌های ۹ الی ۲۳ و ۲۵ الی ۳۰ در محدوده کمتر از ۰/۹۵ پیرونیت و در بازه نامطلوب قرار دارد.



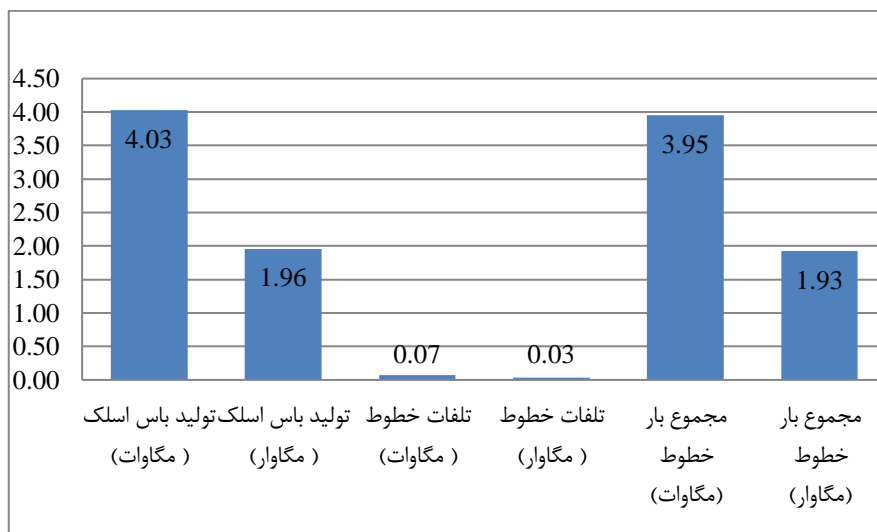
شکل ۳. ولتاژ باس‌های شبکه توزیع ۳۷ شینه قبل از بهینه‌سازی.

شکل ۴ نشان می‌دهد در باس‌های ابتدایی بار بیشتری تجمع پیدا کرده است و ممکن است تصور شود باید در باس‌های ابتدایی نیروگاه نصب شود در حالی که نتایج تحقیق نشان می‌دهد که بیشتر نیروگاه‌ها باید در شاخه‌های انتهایی نصب شوند.



شکل ۴. ظرفیت بار اکتیو (P) و راکتیو (Q) اشغال شده باس‌های شبکه قبل از بهینه‌سازی.

در شکل ۵ تلفات توان اکتیو و مصرف توان راکتیو در خطوط انتقال شبکه نشان داده شده است. همچنین مجموع بار اکتیو ۳/۹۵ مگاوات و مجموع بار راکتیو ۱/۹۳ مگاوار است.



شکل ۵. نمودار تولید و مصرف در شبکه ۳۷ باسه پیش از بهینه‌سازی.

منابع تولید پراکنده مورد برنامه‌ریزی در شبکه از نوع دیزل ژنراتور انتخاب شده است. فرض شده است که همه باس‌های شبکه برای نصب منابع تولید پراکنده آمادگی داشته باشند. تعداد حداکثر دیزل ژنراتور نصب‌شده در هر باس از شبکه، به یک عدد محدود شده است. همچنین دیزل ژنراتورها دارای ظرفیت‌های استاندارد ۲ مگاوات آمپر با ضریب توان ۰/۸ پس‌فاز هستند. مصرف سوخت ژنراتور ۲۰۰۰kVA برای هر کیلووات ساعت برق معادل ۱۶۰ لیتر گازوئیل است. با نرخ ۱۵۰۰۰ ریال برای هر لیتر گازوئیل، هزینه انرژی در هر ساعت ۲۴۰ هزار تومان خواهد شد. قیمت یک دیزل ۲ مگاوات‌آمپری معادل ۳۵۰ میلیارد ریال است. شایان ذکر است که نرخ‌های اعلام شده مربوط به سال ۱۴۰۱ است. برای حل مسئله بهینه‌سازی از الگوریتم بهینه‌سازی یادگیری معلم استفاده می‌شود و نتایج آن با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات انطباقی (APSO)^۱ [۳۳] مقایسه می‌گردد. تنظیمات هر دو الگوریتم در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده است.

جدول ۴. پارامترهای الگوریتم TLBO.

پارامتر	مقدار
حداکثر تعداد تکرار	۵۰
تعداد دانش‌آموز	۳۷
فاکتور معلم	عدد تصادفی با توزیع یکنواخت بین ۱ و ۲
تعداد متغیر تصمیم‌گیری	۴

جدول ۵. پارامترهای الگوریتم APSO.

پارامتر	مقدار
حداکثر تعداد تکرار	۵۰
تعداد ذرات	۳۷
دامنه تصادفی ذرات	۰.۲
سرعت همگرایی ۰ تا ۱	۰.۵
تعداد متغیر تصمیم‌گیری	۴

در مسئله بهینه‌سازی، تعداد باس‌ها معادل تعداد دانش‌آموزان است که قرار است میانگین آن بهبود یابد. نرخ تأثیر معلم برای آموزش عدد تصادفی ۱ یا ۲ می‌باشد. تعداد متغیری که به الگوریتم سپرده می‌شود تا با تغییرات آن مقدار بهینه را بیابد تولید چهار دیزل ژنراتور است.

پخش بار شبکه ۳۷ باسه شعاعی به روش جاروب پسر و پیشرو توسط ابزار Matpower نرم‌افزار Matlab انجام شده است. با استفاده از فاکتور حساسیت مکان DGها تعیین می‌گردد. جدول ۶ نشان می‌دهد که به ترتیب اولویت نصب منابع تولید پراکنده در باس‌های ۸، ۱۲، ۹ و ۳۵ می‌باشد.

پس از تعیین محل نصب منابع تولید پراکنده، با اجرای الگوریتم TLBO مسئله بهینه‌سازی به منظور تعیین ظرفیت DGها حل می‌شود. الگوریتم در هر تکرار مقادیری را برای ژنراتورها تعیین می‌کند و پخش بار انجام می‌گردد. همگرایی تابع هدف و قیود مسئله بررسی می‌شود و مقادیر جدید را برای دیزل ژنراتورها برنامه‌ریزی می‌کند. این عملیات به مقدار تعیین شده در الگوریتم تکرار می‌شود و پاسخ آخر به عنوان جواب مسئله بهینه‌سازی به دست می‌آید.

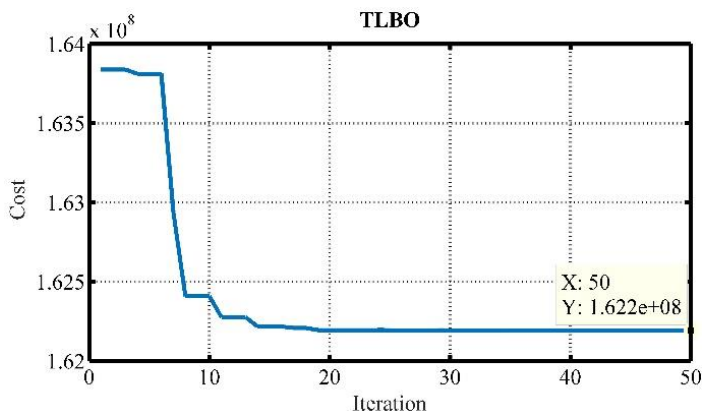
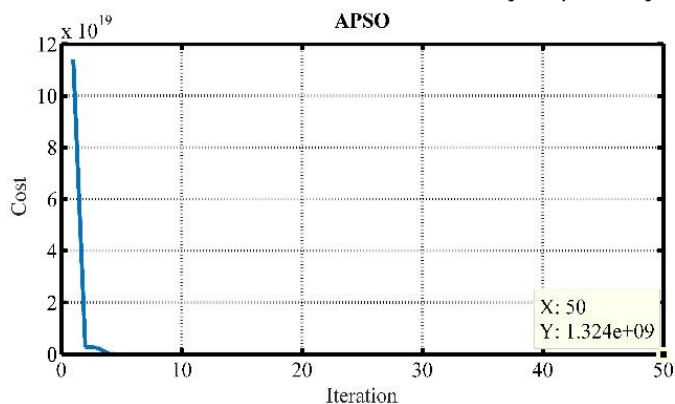
¹ Adaptive Particle Swarm Optimization

جدول ۶. نتایج محاسبه فاکتور حساسیت باس‌ها برای تعیین محل نصب منابع تولید پراکنده.

باس	ولتاژ P.U	$\frac{\cos(\theta_i)}{ V_i }$	$\frac{\sin(\theta_i)}{ V_i }$	فاکتور حساسیت α_i
۸	۰.۹۸۷۹	۱.۰۰۷۷	-۰.۰۹۶۲	۰.۰۰۰۲
۱۲	۰.۹۸۷۹	۱.۰۰۷۷	-۰.۰۹۶۲	۰.۰۰۰۳
۹	۰.۹۸۷۹	۱.۰۰۷۷	-۰.۰۹۶۲	۰.۰۰۰۵
۳۵	۰.۹۷۷۴	۱.۰۱۱۶	۰.۱۵۳۳	۰.۰۰۰۵
۱۸	۰.۹۷۵۹	۱.۰۱۱۱	۰.۱۶۶۲	۰.۰۰۰۵
۱۷	۰.۹۷۵۹	۱.۰۱۱۲	۰.۱۶۵۸	۰.۰۰۰۸
۱۳	۰.۹۷۶۳	۱.۰۱۱۴	۰.۱۶۲۵	۰.۰۰۰۹
۲۸	۰.۹۸۳۳	۱.۰۱۶۷	۰.۰۲۱۴	۰.۰۰۱۰
۲۹	۰.۹۸۳۳	۱.۰۱۶۷	۰.۰۲۱۴	۰.۰۰۱۰
۳۲	۰.۹۷۸۲	۱.۰۱۴۸	۰.۱۲۴۱	۰.۰۰۱۲
۱۶	۰.۹۷۶۰	۱.۰۱۱۱	۰.۱۶۵۸	۰.۰۰۱۵
۱۵	۰.۹۷۶۰	۱.۰۱۱۲	۰.۱۶۴۹	۰.۰۰۱۶
۲	۰.۹۷۶۷	۱.۰۱۱۹	۰.۱۵۶۱	۰.۰۰۱۶
۳	۰.۹۷۹۱	۱.۰۱۴۴	۰.۱۱۹۱	۰.۰۰۱۹
۳۱	۰.۹۷۸۶	۱.۰۱۴۸	۰.۱۱۹۷	۰.۰۰۱۹
۷	۰.۹۷۸۴	۱.۰۱۲۸	۰.۱۳۷۸	۰.۰۰۲۰
۲۷	۰.۹۸۳۴	۱.۰۱۶۷	۰.۰۲۰۳	۰.۰۰۲۴
۱۴	۰.۹۷۶۱	۱.۰۱۱۲	۰.۱۶۴۱	۰.۰۰۲۵
۲۶	۰.۹۸۳۵	۱.۰۱۶۶	۰.۰۱۸۷	۰.۰۰۲۹
۱۱	۰.۹۷۶۷	۱.۰۱۱۹	۰.۱۵۶۲	۰.۰۰۳۳
۶	۰.۹۷۷۷	۱.۰۱۴۱	۰.۱۳۳۱	۰.۰۰۳۳
۱۰	۰.۹۷۶۹	۱.۰۱۱۸	۰.۱۵۵۵	۰.۰۰۳۷
۹	۰.۹۷۷۱	۱.۰۱۱۶	۰.۱۵۵۴	۰.۰۰۶۲
۲۵	۰.۹۷۷۵	۱.۰۱۳۹	۰.۱۳۶۸	۰.۰۰۶۵
۲۳	۰.۹۷۷۶	۱.۰۱۴۰	۰.۱۳۵۳	۰.۰۰۷۶
۱۲	۰.۹۷۶۳	۱.۰۱۱۲	۰.۱۶۳۳	۰.۰۰۸۰
۲۴	۰.۹۷۷۵	۱.۰۱۳۹	۰.۱۳۶۰	۰.۰۰۸۹
۵	۰.۹۷۹۳	۱.۰۱۳۹	۰.۱۲۱۲	۰.۰۱۰۴
۶	۰.۹۷۸۵	۱.۰۱۲۸	۰.۱۳۶۵	۰.۰۱۶۰
۳	۰.۹۸۲۷	۱.۰۱۶۹	۰.۰۳۸۳	۰.۰۱۷۹
۸	۰.۹۷۷۴	۱.۰۱۱۶	۰.۱۵۳۱	۰.۰۱۸۸

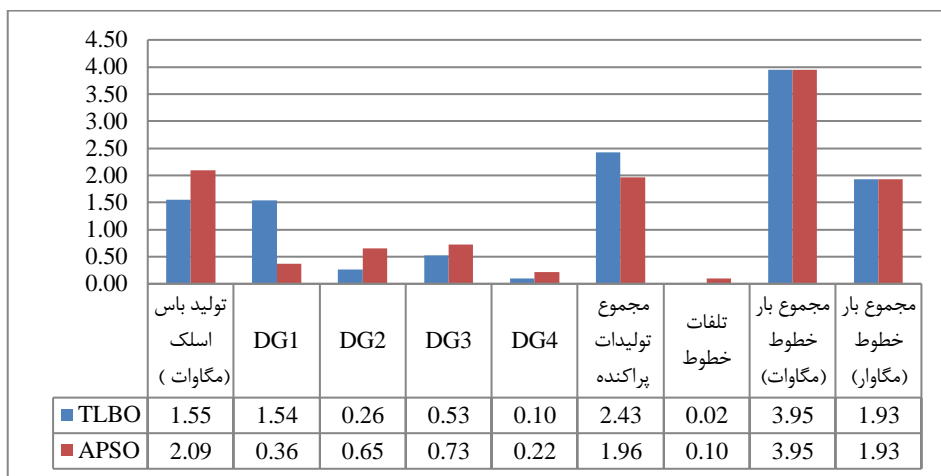
فاکتور حساسیت α_i	$\frac{\sin(\theta_i)}{ V_i }$	$\frac{\cos(\theta_i)}{ V_i }$	ولتاژ P.U	باس
۰.۰۵۹۸	۰.۱۱۷۹	۱.۰۱۳۷	۰.۹۷۹۹	۴
۰.۰۸۹۲	۰.۰۱۷۶	۱.۰۱۶۵	۰.۹۸۳۶	۲
۰.۱۷۴۳	-۰.۰۹۵۹	۱.۰۰۷۶	۰.۹۸۸۰	۱
۰.۱۶۶۹	-۰.۳۹۳۱	۰.۹۴۲۲	۰.۹۷۹۵	۲

شکل ۶ نمودار روند پیشرفت تابع هدف با اجرای الگوریتم APSO و TLBO را نشان می‌دهد. روش پیشنهادی در ۵۰ تکرار به همگرایی رسیده و در مقایسه با الگوریتم APSO که تا تکرار ۵۰ همچنان روند کاهشی خود را حفظ کرده، زودتر به پاسخ دست یافته است. این حقیقت از مقایسه اعداد در پنجاهمین تکرار نیز مشخص می‌شود زیرا الگوریتم TLBO به مقدار کمتری دست پیدا کرده است.



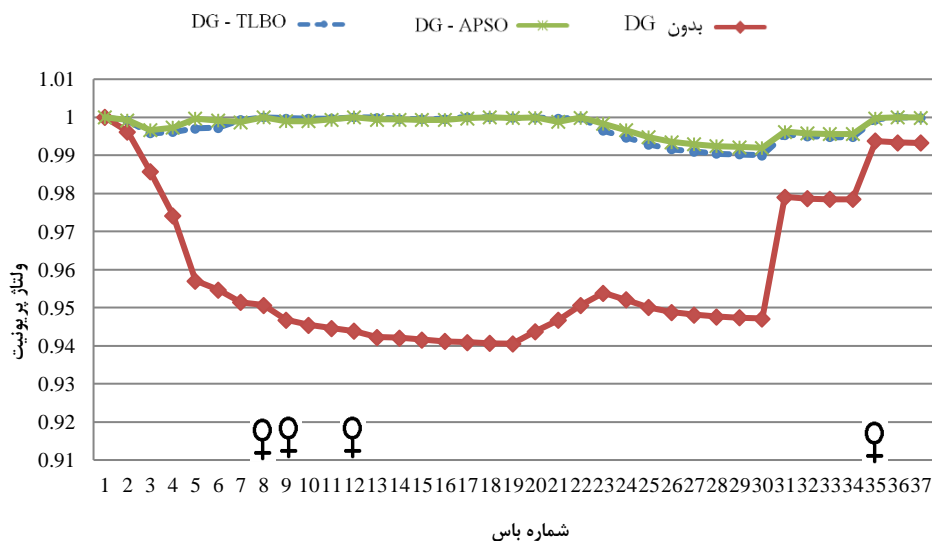
شکل ۶. نمودار روند پیشرفت تابع هدف با الگوریتم الف) APSO و ب) TLBO.

در شکل ۷ تولیدات منابع تولید پراکنده در باس‌های ۸ (DG1)، ۹ (DG2)، ۱۲ (DG3) و ۳۵ (DG4)، آمده است. مقایسه تولید نیروگاه‌های تولید پراکنده نشان می‌دهد که در الگوریتم TLBO توان بیشتری تولید شده و این به منزله سود بیشتر برای مالکان منابع تولید پراکنده است. همچنین مجموع تولیدات منابع تولید پراکنده و تولید نیروگاه اصلی در باس اسلک نشان داده شده است. این شکل بیانگر آن است که در الگوریتم TLBO نسبت به APSO با افزایش تولید منابع تولید پراکنده، تولید نیروگاه باس اسلک کاهش پیدا کرده و به عبارتی ظرفیت نیروگاه اصلی آزادتر شده است. همچنین نشان می‌دهد تلفات در الگوریتم TLBO نسبت به APSO کاهش بیشتری داشته است در حالی که بار اکتیو و راکتیو خطوط یکسان است.



شکل ۷. مقایسه تولید DGها، تولید نیروگاه اسلک، تلفات و بار خطوط پس از اجرای بهینه‌سازی در الگوریتم‌های APSO و TLBO.

پروفیل ولتاژ باس‌ها در حالت قبل از نصب DGها و بعد از نصب DGها با دو الگوریتم APSO و TLBO در شکل ۸ نشان داده شده است. پروفیل ولتاژ بعد از نصب DGها بسیار بهبود یافته است. همچنین نتایج الگوریتم APSO بسیار نزدیک به الگوریتم TLBO است. هرچند در برخی نقاط پاسخ‌های بهتری توسط APSO تولید شده است. محل نصب نیروگاه‌های تولید پراکنده در نمودار روی باس‌های ۸، ۹، ۱۲ و ۳۵ نشان داده شده است.



شکل ۸. پروفیل ولتاژ شبکه در حالت قبل و بعد از نصب DGها.

کاهش انتشار گازهای مضر، سود دوجانبه بیشتری را عاید صاحبان شبکه و مالکان DG می‌کند. با توجه به رابطه (۲۳) و جدول ۲، سود سالیانه پرداخت نشدن جریمه بابت آلاینده‌گی محاسبه شده که نشان‌دهنده نفع اقتصادی به‌دست‌آمده به دلیل استفاده از منابع تولید پراکنده است. در شرایط بهره‌برداری از شبکه با نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم TLBO دومیلیارد و نهمصد میلیون ریال و در الگوریتم APSO دومیلیارد و سیصد میلیون ریال سود حاصل شده است. به علت تولیدات بیشتر نیروگاه‌های پراکنده در الگوریتم TLBO سود بیشتری به‌دست آمده است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله به برنامه‌ریزی تولیدات پراکنده در شبکه توزیع انرژی الکتریکی با رهیافت چندهدفه از چشم‌انداز سرمایه‌گذار منابع و بهره‌بردار شبکه پرداخته شد. برای این منظور در ابتدا مدل‌سازی ریاضی مسئله تحقیق با در نظر گرفتن درآمد حاصل از تزریق توان به شبکه توسط DG و هزینه‌های حاصل از احداث و بهره‌برداری DG و تلفات شبکه ارائه شد. همچنین قیود شبکه نظیر محدودیت تعداد و ظرفیت منابع، محدودیت توان خطوط، حدود ولتاژی باس‌ها، برابری تولید و مصرف و قابلیت اطمینان در نظر گرفته شد. سپس با اجرای پخش بار جاروب پیش‌رو پس‌رو که نسبت به سایر روش‌های متداول پخش بار، دارای سرعت و همگرایی بهتری است، وضعیت ولتاژ و ظرفیت اشغال‌شده فیدرهای شبکه گزارش گردید. در ادامه، فاکتور حساسیت به‌عنوان روش جدید تعیین مکان مناسب برای نصب DGها مطرح گردید که به همراه الگوریتم پیشنهادی TLBO برای حل مسئله بهینه‌سازی و تعیین ظرفیت بهینه DGها مورد استفاده قرار می‌گیرد. با اجرای روش پیشنهادی در نرم‌افزار Matlab، نتایج شبیه‌سازی نشان داد که افت ولتاژ باس‌ها، مقدار تلفات خطوط، تولید نیروگاه باس اسلک و آلاینده‌گی زیست‌محیطی کاهش قابل توجهی نسبت به ساختار بدون منابع تولید پراکنده دارد. همچنین الگوریتم TLBO در سرعت رسیدن به پاسخ و نتایج حل مسئله بهینه‌سازی، عملکرد مطلوب‌تری نسبت به دیگر الگوریتم به‌کاررفته یعنی APSO دارد.

References

- [1] Askari, F. (2021). Assessment of the Impact of Distributed Generation and Distribution Network Faults on Generation Reliability Indices. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 18(3), 13-33. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.277262.1427>
- [2] Sabzevari, K. (2020). Provide a simple model of the Comprehensive Electric Power Controller. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 17(1), 13-26. <https://doi.org/10.48301/kssa.2020.112753>
- [3] Pham, T. D., Nguyen, T. T., & Dinh, B. H. (2021). Find optimal capacity and location of distributed generation units in radial distribution networks by using enhanced coyote optimization algorithm. *Neural Computing and Applications*, 33(9), 4343-4371. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05239-1>
- [4] Sambaiah, K. S., & Jayabarathi, T. (2021). Optimal reconfiguration and renewable distributed generation allocation in electric distribution systems. *International Journal of Ambient Energy*, 42(9), 1018-1031. <https://doi.org/10.1080/01430750.2019.1583604>
- [5] Akkas, Ö. P., & Ertugrul, C. (2020). Bidding and Operating Planning of a Virtual Power Plant in a Day-Ahead Market. *International Journal of Engineering Research and Development*, 12(3), 1-10. <https://doi.org/10.29137/umagd.842476>
- [6] Avar, A., & Sheikh-El-Eslami, M. K. (2021). Optimal DG placement in power markets from DG Owners' perspective considering the impact of transmission costs. *Electric Power Systems Research*, 196(9), 107218. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107218>
- [7] Aliakbari, M., Maghouli, P., & Aalami, H. A. (2018). Reliability constrained unit commitment considering the effect of DG and DR program. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 8(4), 1985-1996. <https://doi.org/10.11591/ijece.v8i4.pp1985-1996>
- [8] Nazari, M. H., Bagheri Sanjareh, M., Khodadadi, A., Torkashvand, M., & Hosseinian, S. H. (2021). An economy-oriented DG-based scheme for reliability improvement and loss reduction of active distribution network based on game-theoretic sharing strategy. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 27, 100514. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2021.100514>
- [9] Yahaya, A. A., AlMuhaini, M., & Heydt, G. T. (2020). Optimal design of hybrid DG systems for microgrid reliability enhancement. *Institution of Engineering and Technology generation, transmission & distribution*, 14(5), 816-823. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.0277>
- [10] Vatani, M., Solati Alkaran, D., Sanjari, M. J., & Gharehpetian, G. B. (2016). Multiple distributed generation units allocation in distribution network for loss reduction based on a combination of analytical and genetic algorithm methods. *Institution of Engineering and Technology Generation, Transmission & Distribution*, 10(1), 66-72. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.0041>
- [11] Rahmani-Andebili, M. (2015). Distributed generation placement modeling feeder's failure rate and customer's load type. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(3), 1598-1606. <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2498902>
- [12] Nguyen, T. T., Truong, A. V., & Phung, T. A. (2016). 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*, 78, 801-815. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.12.030>
- [13] Colmenar-Santos, A., Reino-Rio, C., Borge-Diez, D., & Collado-Fernández, E. (2016). Distributed generation: A review of factors that can contribute most to achieve a scenario

- of DG units embedded in the new distribution networks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1130-1148. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.023>
- [14] Ehsan, A., & Yang, Q. (2018). Optimal integration and planning of renewable distributed generation in the power distribution networks: A review of analytical techniques. *Applied Energy*, 210, 44-59. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.106>
- [15] Mehigan, L., Deane, J. P., Gallachóir, B. P. Ó., & Bertsch, V. (2018). A review of the role of distributed generation (DG) in future electricity systems. *Energy*, 163, 822-836. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.022>
- [16] Rezaee Jordehi, A. (2016). Allocation of distributed generation units in electric power systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 893-905. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.086>
- [17] Singh, B., & Sharma, J. (2017). A review on distributed generation planning. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 529-544. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.034>
- [18] Arabali, A., Ghofrani, M., Etezadi-Amoli, M., Fadali, M. S., & Moeini-Aghtaie, M. (2014). A Multi-Objective Transmission Expansion Planning Framework in Deregulated Power Systems With Wind Generation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 29(6), 3003-3011. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2316529>
- [19] Gampa, S. R., & Das, D. (2019). Simultaneous optimal allocation and sizing of distributed generations and shunt capacitors in distribution networks using fuzzy GA methodology. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 6(1), 1-18. <https://doi.org/10.1186/s43067-019-0003-2>
- [20] Karimizadeh, K., Soleymani, S., & Faghihi, F. (2019). Microgrid utilization by optimal allocation of DG units: Game theory coalition formulation strategy and uncertainty in renewable energy resources. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 11(2), 025505. <https://doi.org/10.1063/1.5078720>
- [21] Nagaballi, S., & Kale, V. S. (2020). Pareto optimality and game theory approach for optimal deployment of DG in radial distribution system to improve techno-economic benefits. *Applied Soft Computing*, 92, 106234. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106234>
- [22] Samala, R. K., & Kotapuri, M. R. (2020). Optimal allocation of distributed generations using hybrid technique with fuzzy logic controller radial distribution system. *Springer nature applied sciences*, 2(2), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-1957-3>
- [23] Levin, T., & Botterud, A. (2015). Capacity Adequacy and Revenue Sufficiency in Electricity Markets With Wind Power. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(3), 1644-1653. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2403714>
- [24] Gözel, T., & Hocaoglu, M. H. (2009). An analytical method for the sizing and siting of distributed generators in radial systems. *Electric Power Systems Research*, 79(6), 912-918. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2008.12.007>
- [25] Gharibi, M., & Askarzadeh, A. (2019). Size and power exchange optimization of a grid-connected diesel generator-photovoltaic-fuel cell hybrid energy system considering reliability, cost and renewability. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(47), 25428-25441. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.007>
- [26] Jamshidi, M., & Askarzadeh, A. (2019). Techno-economic analysis and size optimization of an off-grid hybrid photovoltaic, fuel cell and diesel generator system. *Sustainable Cities and Society*, 44, 310-320. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.021>
- [27] Jayasree, M. S., Sreejaya, P., & Bindu, G. R. (2019). Multi-Objective Metaheuristic Algorithm for Optimal Distributed Generator Placement and Profit Analysis. *Technology*

- and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy*, 4(1), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s40866-019-0067-z>
- [28] Zhang, L., Tang, W., Liu, Y., & Lv, T. (2015). Multiobjective optimization and decision-making for DG planning considering benefits between distribution company and DGs owner. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 73, 465-474. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.05.019>
- [29] Patra, S. B., Mitra, J., & Ranade, S. J. (2005, June 16). *Microgrid architecture: a reliability constrained approach*. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005, San Francisco, CA, USA. <https://doi.org/10.1109/PES.2005.1489500>
- [30] Kumar, Y., & Singh, P. K. (2019). A chaotic teaching learning based optimization algorithm for clustering problems. *Applied Intelligence*, 49(3), 1036-1062. <https://doi.org/10.1007/s10489-018-1301-4>
- [31] Shukla, A. K., Singh, P., & Vardhan, M. (2020). An adaptive inertia weight teaching-learning-based optimization algorithm and its applications. *Applied Mathematical Modelling*, 77, 309-326. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.07.046>
- [32] Xue, R., & Wu, Z. (2020). A Survey of Application and Classification on Teaching-Learning-Based Optimization Algorithm. *IEEE Access*, 8, 1062-1079. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2960388>
- [33] Fakhar, M. S., Kashif, S. A. R., Liaquat, S., Rasool, A., Padmanaban, S., Iqbal, M. A., Baig, M. A., & Khan, B. (2021). Implementation of APSO and Improved APSO on Non-Cascaded and Cascaded Short Term Hydrothermal Scheduling. *IEEE Access*, 9, 77784-77797. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3083528>