

Economic Load Dispatch and Environmental Emission Reduction in Power System Considering Rotational Reserve Using Multi-Objective Particle Swarm Optimization Algorithm

Soheil Ranjbar

Department of Electrical Engineering, Velayat University, Iranshahr, Iran
s.ranjbar@velayat.ac.ir

Keywords:

load economic dispatch
environmental emission
rotational reserve
particle swarm multi-objective
optimization

Abstract: Multi-area economic distribution of load (MAED) is a generalization of the basic problems of economic distribution of load (ED), which evaluate the optimal power distribution of multiple areas in terms of operating costs. In the following parts of this paper, the concept of MAED is extended to multi-regional economic/environmental distribution (MAEED) by considering environmental issues. The purpose of MAEED is to distribute power among different areas by minimizing operating costs and emissions at the same time. In this paper, first the MAEED problem was expressed as a formula; then, a multi-objective and advanced particle optimization (MOPSO) algorithm was expressed to deduce its Pareto optimal solutions, during the optimization process. The transmission limits of communication lines were expressed as a set of constraints to ensure the security of the system. In addition, the rotating storage area was to increase the reliability of the system. A reserve sharing pattern was applied to ensure each region's capability to meet reserve demand. The simulation was based on the four-zone experimental power system, and it showed the effect of the proposed optimization process and the effects caused by different issues.

Original Research Article

Paper History:

Received: 28/04/2023
Revise: 04/09/2023
Accepted: 01/11/2023

How to cite this article: Ranjbar, S., "Economic Load Dispatch and Environmental Emission Reduction in Power System Considering Rotational Reserve Using Multi-Objective Particle Swarm Optimization Algorithm", Energy Engineering and Management, Vol. 13, No. 3, PP. 32-45, Autumn 2023. <https://doi.org/10.22052/eem.2023.252878.1016>
© 2023 University of Kashan Press.

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



Introduction

Swarm Intelligence (SI) is mainly defined as the behaviour of natural or artificial self-organized, decentralized systems. Swarms interact locally with each other or with external agents, i.e.

environment, and it can be in the form of bird flocks, ants, bees, and so on. Introduced by [85] for optimizing continuous nonlinear functions, Particle Swarm Optimization (PSO) has defined a new era in SI. PSO is a population based

method for optimization. The population of the potential solution is called swarm, and each individual in the swarm is defined as a particle.

speed is to be considered.

Materials and Methods

In this paper, a method of economic dispatch in power systems is proposed to decrease the environmental emission using a multi-objective particle swarm optimization algorithm. The proposed scheme included three parts as (1) the effects on steady state conditions, (2) the effects of economic dispatch on load-frequency control, (3) The optimal combinations of load dispatch to reduce emission. The swarm optimization algorithm was considered the main logic for decreasing the cost and emission in this paper.

Results

In order to evaluate the proposed scheme through power system operating conditions, the proposed economic dispatch technique were evaluated, in which proper decisions, based on the network load response, with the aim of reducing the cost and emission were estimated. The effectiveness of the proposed scheme was evaluated on a test system consisting of different rotational reserves. Results showed the proper performance of the proposed approach to improve power system resiliency and to decrease the environmental emission in the presence of load conditions in real time operating conditions.

Discussion and Conclusion

In this study, the MOPSO algorithm was used to solve the ED problem considering emissions in a power system with various constraints. To obtain satisfactory results, the problem was solved by taking into account the operating and emission costs in a separate mode. Next, the problem was solved by trading off between two contrasting objective functions-- i.e., operating and emission cost functions-- for simultaneous minimization. This process was analyzed in two modes, without and with inter-area system. As the results indicate when two objective functions are optimized simultaneously the related costs are highly reduced. Comparing the results obtained with those produced by the method, it was observed that the MOPSO algorithm outperformed in terms of its accuracy and convergence speed. Besides, as results also show, if two cost functions of pollution and exploitation are optimized simultaneously, without considering inter-area speed, their values will be greater on the condition that the inter-area

توزیع اقتصادی بار و کاهش آلاینده‌گی زیست‌محیطی در سیستم چندناحیه‌ای به‌طور هم‌زمان با در نظر گرفتن ذخیره چرخان و قیود با استفاده بهینه‌سازی پیشرفته و چندهدفه MOPSO ازدحام ذرات

سهیل رنجبر

استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولایت، ایرانشهر، ایران

s.ranjbar@velayat.ac.ir

چکیده: در این مقاله روشی به‌منظور توزیع اقتصادی و چندناحیه‌ای بار تعمیم‌یافته و توزیع بهینه توان نواحی چندگانه برحسب هزینه‌های بهره‌برداری پیشنهاد می‌شود. برای این منظور، مفهوم توزیع اقتصادی ناحیه‌ای بار با در نظر گرفتن مسائل زیست‌محیطی، به توزیع اقتصادی / محیطی چندناحیه‌ای تعمیم می‌یابد. از مزایای روش پیشنهادی توزیع چندناحیه‌ای بار، توزیع توان بین نواحی مختلف با به حداقل رساندن هزینه‌های بهره‌برداری و انتشار آلاینده‌ها به‌صورت هم‌زمان است. در این زمینه، ابتدا مسئله توزیع چندناحیه‌ای بار به مدل‌سازی می‌شود و سپس با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی پیشرفته چندهدفه انبوه ذرات، مسئله پیاده‌سازی و بر روی راه‌حل‌های پاریتو بهینه می‌شود. در طول فرایند بهینه‌سازی، محدودیت‌های انتقال خطوط ارتباطی به‌عنوان مجموعه‌ای از قیود با هدف افزایش امنیت سیستم در نظر گرفته می‌شوند. علاوه بر این، ذخیره چرخان نواحی برای افزایش قابلیت اطمینان سیستم در نظر گرفته شده، به‌نحوی که الگوی اشتراک ذخیره واحدهای هر ناحیه با هدف برآوردن تقاضای ذخیره چرخان مطلوب اطمینان حاصل می‌شود.

در نتایج شبیه‌سازی، هزینه‌های سوخت و انتشار طرح پیشنهادی به‌کمک ناحیه میانی بر حالت نواحی جداگانه برتری دارد و می‌توان از اتصال نواحی چندگانه به‌منظور دستیابی به هزینه‌های سوخت و انتشار، پایین‌تر و تأمین تقاضای بار نواحی مختلف بهره گرفت. همچنین با اعمال روش پیشنهادی توزیع اقتصادی چندناحیه‌ای بار، نواحی قادر به تأمین ذخایر مورد نیاز خودشان هستند. در این زمینه، به‌ازای مقادیر منفی اشتراک ذخیره چرخان و در صورت نیاز، ذخیره می‌تواند از یک ناحیه به ناحیه دیگر فرستاده شود. ارزیابی طرح پیشنهادی بر روی یک شبکه آزمایشی ۶۸ باسه چهارناحیه‌ای اجرا شده و نتایج نشان‌دهنده تأثیر فرایند بهینه‌سازی روش پیشنهادی بر کاهش مسائل زیست‌محیطی در شرایط مختلف بهره‌برداری از سیستم قدرت است.

مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۱۰

۱. مقدمه

روش برنامه‌ریزی خطی دنبال شده است. در مرجع [۱۰]، مدیریت ریزش‌بکه با در نظر گرفتن نوسانات بازار برق بررسی شده است. در مراجع [۱۱ و ۱۲]، بهینه‌سازی هزینه‌ها را با در نظر گرفتن اثر آلودگی‌های زیست‌محیطی انجام داده‌اند. در مرجع [۱۳]، مدیریت تولید ریزش‌بکه با استفاده از یک روش بهینه‌سازی تک‌هدفه برای دو سناریوی کاملاً مستقل به‌منظور بهینه‌سازی هزینه‌های بهره‌برداری و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی انجام گرفته است. خلاصه‌ای از مقایسهٔ انجام‌شده میان روش‌های پیشین در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): مقایسهٔ میان روش‌های پیشین

ردیف	روش	ریزش‌بکه	چندهدفه	مبتنی بر مدل	اندازه‌گیری برخط	کلاسیک	فراابتکاری
[۱]	Mesh Adaptive Direct Search	✓	-	✓	✓	✓	-
[۲]	Online Optimal Management	✓	-	✓	✓	✓	-
[۳]	Microgrids management	✓	-	✓	-	✓	-
[۴]	Centralized Control	-	✓	✓	-	✓	-
[۵]	Optimal operation	✓	-	✓	-	-	✓
[۶]	Fuzzified Honey Bee	✓	✓	-	-	-	✓
[۷]	Demand Response	-	-	✓	-	✓	-
[۸]	Differential Evolution Algorithm	✓	✓	✓	-	-	✓
[۹]	HBMO	✓	-	✓	-	-	✓
[۱۰]	Interactive Particle Swarm	-	-	✓	✓	-	✓
[۱۱]	State Feedback	✓	-	✓	-	✓	-
[۱۲]	Bacterial Foraging	-	✓	✓	-	-	✓
[۱۳]	Optimal Power Flow	✓	✓	-	✓	✓	-

شاخص‌های خروج اضطراری خطوط، معیاری برای نشان تأثیر خطوط بر روی سیستم هستند. شاخص‌های احتمالاتی خروج خط برای یک سیستم قدرت براساس عملکرد خطوط تحت شرایط مختلف نشان‌دهندهٔ احتمال نسبی خروج خط است. این امر به اپراتور کمک می‌کند برخی اقدامات اصلاحی/پیشگیرانه را به‌منظور جلوگیری از وقوع فروپاشی‌های بزرگ از قبیل اختلالات سیستم (بارگذاری بیش از حد خطوط) و خروج بی‌درپی سیستم انجام دهد.

توسعهٔ توزیع اقتصادی بار می‌تواند به چندین مرحله تقسیم شود. هدف توزیع ED فقط به حداقل رساندن هزینه سوخت بود. با آگاهی‌های روزافزون در زمینهٔ حفاظت محیط زیست در سال‌های اخیر، توزیع EED به‌عنوان یک پیشنهاد برای دستیابی همزمان به کمینه کردن هزینه‌های سوخت و کاهش انتشار آلاینده‌ها مطرح شده است [۱ و ۲].

در چند دههٔ اخیر، به‌کارگیری واحدهای تولید پراکنده مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر به‌منظور کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی متناظر با تولید انرژی الکتریکی رایج شده است. در پی گسترش استفاده از تولیدات پراکنده در سیستم قدرت، استفاده از ریزش‌بکه‌ها مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است. ریزش‌بکهٔ یک شبکهٔ محلی شامل واحدهای تولید پراکنده، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی و بارهای کنترل‌پذیر است که می‌تواند در دو حالت متصل به شبکهٔ سراسری یا مستقل از آن (جزیره‌ای) مورد بهره‌برداری قرار گیرد [۳]. استفادهٔ بهینه از ریزش‌بکه‌ها موجب بی‌نیازی از احداث شبکه‌های انتقال جدید، کاهش آلودگی محیط زیست، کاهش تلفات انرژی در شبکه، افزایش کیفیت توان و نیز ایجاد راهکارهای مناسب برای استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی می‌شود [۴]. هر ریزش‌بکه دارای یک واحد مدیریت مرکزی است که در آن با پایشگری وضعیت بارها و تولید منابع، تصمیمات لازم در راستای بهینه‌سازی عملکرد آن با توجه به اهداف و محدودیت‌های تعیین‌شده اتخاذ می‌شود [۵]. در این راستا، اثرات استفاده از یک کنترل‌کنندهٔ مرکزی در ریزش‌بکه برای دستیابی به یک برنامهٔ هماهنگ در مرجع [۶] بررسی شده است. در مرجع [۷]، نقش مرکز مدیریت را با هدف بهره‌برداری بهینه و مدیریت تولیدات پراکنده بررسی شده و تبادل انرژی با شبکهٔ بالادست نیز در نظر گرفته شده است. بهینه‌سازی هزینه‌های بهره‌برداری از ریزش‌بکه با در نظر گرفتن اثر سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی هدفی است که در مرجع [۸] با روش تجمع ذرات و در مرجع [۹] با

مطابق با جدول (۱)، سهم زیادی از مراجع موردی بررسی، از روش‌های مبتنی بر مدل شبکه استفاده نموده‌اند. همچنین استفاده از روش‌های برون‌خط و کلاسیک از دیگر مواردی بوده است که مد نظر محققان قرار داشته است.

مطابق با جدول (۱)، کارهای محدودی در زمینهٔ مقابله با MAED انجام شده است. نوآوری و مزایایی طرح پیشنهادی به‌صورت بندهای ذیل معرفی می‌شوند:

- الف. تعمیم مفهوم EED در طرح MAED و پیشنهاد یک مفهوم جدید به نام توزیع اقتصادی/محیطی و چندناحیه‌ای MAEED؛
- ب. کاهش انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی در طرح پیشنهادی MAED؛

ج. مدل‌سازی خطی MAEED در قالب روابط ریاضیاتی؛

د. اجرای الگوریتم پیشرفته بهینه‌سازی انبوه ذرات MOPSO

برای حل مدل پیشنهادی MAEED در محیط فراابتکاری.

در مدل پیشنهادی، به منظور بهبود قابلیت اطمینان سیستم، ذخایر چرخان مورد نیاز باهم ترکیب می‌شوند. همچنین از یک برنامه ذخیره اشتراکی برای تأمین نیاز ناحیه، بدون ظرفیت کافی ذخیره‌ای استفاده می‌شود. مدل پیشنهادی بر روی یک سیستم قدرت آزمایشی چهارناحیه‌ای پیاده‌سازی می‌شود و کارایی روش پیشنهادی از طریق مطالعات شبیه‌سازی تحت شرایط بهره‌برداری مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین یک مطالعه مقایسه‌ای برای نشان دادن توانایی مدل پیشنهادی با روش‌های مختلف انجام می‌شود.

ادامه مقاله به این صورت تنظیم شده است: در بخش ۲، مسئله MAEED مدل‌سازی می‌شود. الگوریتم بهینه‌سازی PSO و طرح پیشنهادی MAEED ارائه می‌شود. نتایج شبیه‌سازی و تحلیل در بخش ۴ ارائه می‌شوند. در نهایت نتیجه‌گیری اصول مطالعاتی آینده در بخش ۵ مورد بحث قرار می‌گیرد.

۲. مدل‌سازی مسئله

مسئله MAEED به صورت یک بهینه‌سازی دوهدفه (دو هدف متفاوت) مدل می‌شود؛ یعنی هزینه‌های بهره‌برداری و انتشار آلاینده‌گی به طور همزمان به حداقل برسند. در ضمن قیود خاص سیستم نیز رعایت گردد.

۱.۲. اهداف طراحی

هدف ۱: به حداقل رساندن هزینه‌های بهره‌برداری

منحنی‌های هزینه ژنراتور با توابع درجه دوم معرفی و نمایش داده شده‌اند.

هزینه کل سوخت $FC(P_G)$:

$$FC(P_G) = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{M_j} a_{ij} + b_{ij} P_{G_{ij}} + c_{ij} P_{G_{ij}}^2 \quad (1)$$

که در آن، N تعداد ناحیه، M_j تعداد ژنراتورهای در مدار ناحیه (j) ، a_{ij} و b_{ij} ضرایب هزینه ژنراتور (i) در ناحیه j و $P_{G_{ij}}$ توان خروجی ژنراتور (i) در ناحیه (j) است.

در حالت کلی، برای محاسبه هزینه سوخت ناحیه j ، توان خروجی این ناحیه برابر P_{A_j} است و به صورت زیر در قالب ماتریس تعیین می‌شود.

$$P_{A_j} = [P_{G_{1j}}, P_{G_{2j}}, \dots, P_{G_{M_jj}}] \quad (2)$$

$$P_G = [P_{A_1}, P_{A_2}, \dots, P_{A_N}] \quad (3)$$

هزینه دیگر بهره‌برداری در طرح پیشنهادی MAEED، هزینه

انتقال $TC(P_T)$ برای انتقال توان بین نواحی است.

$$TC(P_T) = \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{k=j+1}^N f_{jk} P_{T_{jk}} \quad (4)$$

که در آن $P_{T_{jk}}$ توان خط ارتباطی از ناحیه j به ناحیه k و f_{jk} ثابت هزینه انتقال است که به $P_{T_{jk}}$ مربوط است. P_T بیان‌کننده توان انتقالی بین نواحی به فرم زیر است:

$$P_T = [P_{T_{1,2}}, \dots, P_{T_{1,N}}, P_{T_{2,3}}, \dots, P_{T_{2,N}}, \dots, P_{T_{N-1,N}}] \quad (5)$$

در نتیجه، کل هزینه‌های بهره‌برداری صورت محاسبه می‌گردد:

$$F_1 = FC(P_G) + TC(P_T) \quad (6)$$

هدف ۲: به حداقل رساندن انتشار آلاینده‌گی

انتشار گازهای SO_2 و NO_x را می‌توان به طور تقریبی با یک تابع درجه دوم که مربوط به خروجی ژنراتور است، اندازه‌گیری کرد.

$$F_2 = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{M_j} \alpha_{ij} + \beta_{ij} P_{G_{ij}} + \gamma_{ij} P_{G_{ij}}^2 \quad (7)$$

که در آن، α_{ij} ، β_{ij} ، γ_{ij} مربوط به مشخصه‌های انتشار ژنراتور i در ناحیه j هستند.

۲.۲. قیود طراحی

سه نوع قید وجود دارد که در این مسئله بیان شده است عبارت‌اند از: ۱. ظرفیت تولید هر ژنراتور؛ ۲. بالانس توان نواحی؛ ۳. توان انتقالی خطوط ارتباطی.

۱. قید ظرفیت تولید

$$P_{G_{ij}}^{\min} \leq P_{G_{ij}} \leq P_{G_{ij}}^{\max} \quad (8)$$

که در آن $P_{G_{ij}}^{\max}$ و $P_{G_{ij}}^{\min}$ حداقل و حداکثر توان تولیدشده در ژنراتور i در ناحیه j است.

۲. قید بالانس توان نواحی

در ناحیه j ، تولید توان کل باید تقاضای کل P_{D_j} را با توجه به توان ورودی و خروجی تحت پوشش قرار دهد. (از تلفات انتقال توان صرف‌نظر شده است).

$$\sum_{i=1}^{M_j} P_{G_{ij}} = P_{D_j} + \sum_{k, k \neq j} P_{T_{jk}}, \quad j = 1, 2, \dots, N. \quad (9)$$

۳. قید ذخیره چرخان ناحیه

در ناحیه j ، ذخیره چرخان مورد نیاز باید از طریق اشتراک ذخیره‌ای نواحی تأمین شود:

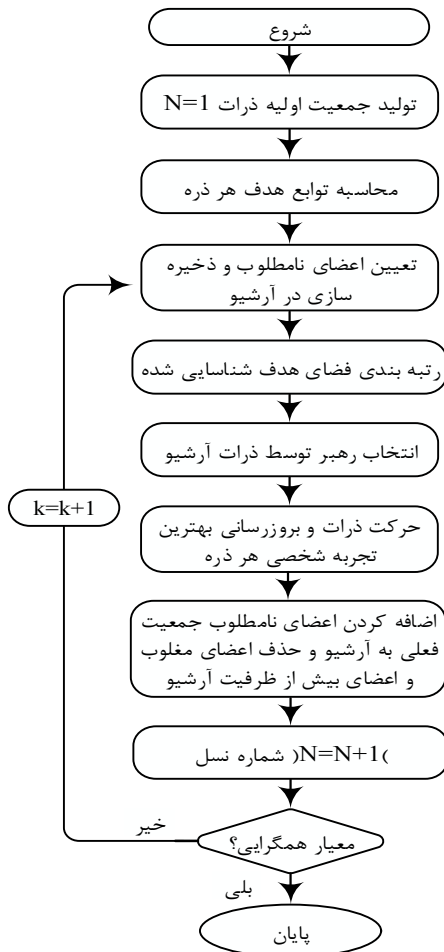
$$\sum_{i=1}^{M_j} P_{S_{ij}} \geq P_{S_{Reqj}} + \sum_{k, k \neq j} P_{RC_{jk}}, \quad j = 1, 2, \dots, N. \quad (10)$$

$$V_{t+1} = \omega \times c_1 \times rand \times (P_{ig,t} - X_t) \times V_t + c_2 \times Rand \times (P_{vg,t} - X_t) \quad (13)$$

$$X_{t+1} = X_t + V_{t+1} \quad (14)$$

که در آن V_{t+1} ، سرعت ذره‌ای به‌روزشده در تکرار بعدی است، V_t سرعت ذره‌ای در تکرار فعلی است، اما ω تعدیل‌کننده داخلی است که تأثیر تجربه فردی ذره در حرکت بعدی‌اش را نشان می‌دهد.

طرح‌واره پیشنهادی الگوریتم MOPSO در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): طرح‌واره پیشنهادی الگوریتم MOPSO

مقدار $c_1 \times rand$ یک تعداد توزیع شده به‌صورت یکپارچه را در فاصله زمانی $[0, c_1]$ ارائه می‌کند که نشان می‌دهد چطور همسایه‌های یک ذره روی مسیر حرکتش تأثیر می‌گذارند، $P_{ig,t}$ بهترین موقعیت همجوار است. همچنین، X_t موقعیت فعلی ذره است. $c_2 \times rand$ یک تعداد توزیع شده به‌صورت یکپارچه را در فاصله زمانی $[0, c_2]$ ارائه می‌کند که نشان می‌دهد چطور ذره به بهترین موقعیت نهایی اطمینان می‌کند، $P_{vg,t}$ بهترین موقعیت نهایی، و X_{t+1} موقعیت به‌روزشده ذره است.

که در آن، ذخیره چرخان واحد i در ناحیه j ، P_{Sij} که با P_{Gij}^{max} برابر است، و P_{SReqj} ذخیره چرخان مورد نیاز در ناحیه j می‌باشد و P_{RCkj} توزیع ذخیره‌های از ناحیه k به ناحیه j است. در اینجا یک بردار جدید معرفی می‌شود تا اشتراک ذخیره‌های بین نواحی را نشان دهد.

$$P_{RC} = [P_{RC_{1,2}}, \dots, P_{RC_{1,N}}, P_{RC_{2,3}}, \dots, P_{RC_{2,N}}, \dots, P_{RC_{N+1,N}}] \quad (11)$$

۴. قید خط ارتباطی

هم انتقال ژنراتور و هم انتقال ذخیره در ناحیه j به ناحیه k نباید به دلایل امنیتی از ظرفیت تبادل خط ارتباطی فراتر روند.

$$P_{Tjk,min} \leq P_{Tjk} + P_{RCjk} \leq P_{Tjk,max} \quad (12)$$

که در آن $P_{Tjk,max}$ و $P_{Tjk,min}$ قابلیت انتقال خط ارتباطی را تعیین می‌کند. به‌طور خلاصه، هدف بهینه‌سازی $MAEED$ ، به حداقل رساندن F_1 و F_2 به‌طور همزمان است که تابع قیود (۸)، (۹)، (۱۰) و (۱۲) هستند.

۳. پیاده‌سازی طرح پیشنهادی MAEED مبتنی بر

بهینه‌سازی انبوه ذرات MOPSO

بهینه‌سازی انبوه ذرات با الهام از رفتار اجتماعی حیواناتی چون ماهی‌ها و پرندگان که در گروه‌هایی کوچک و بزرگ کنار هم زندگی می‌کنند، طراحی شده است. در الگوریتم PSO، اعضای جمعیت جواب‌ها، به‌صورت مستقیم باهم ارتباط دارند و از طریق تبادل اطلاعات، به حل مسئله می‌رسند. الگوریتم PSO برای انواع مسائل پیوسته و گسسته مناسب است و پاسخ‌های بسیار مناسبی برای مسائل بهینه‌سازی مختلف داده است. نام‌های دیگر این الگوریتم عبارت‌اند از: الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم پرندگان یک ذره، موقعیت و سرعت خاص خودش را دارد.

۱.۳. طرح‌واره پیشنهادی MOPSO

مطابق با شکل (۱)، هریک از ذرات برای حرکت خود از بین اعضای آرشیو، یک رهبر انتخاب می‌کند. در این الگوریتم، از یک فضای هدف جدول‌بندی شده استفاده می‌شود. برای دانستن اینکه ذرات چگونه از میان اعضای آرشیو، یک رهبر انتخاب می‌کنند، باید احتمال انتخاب هرکدام از خانه‌های موجود در آرشیو را بررسی کنند و انتخاب از روش چرخ گردان و روش محاسباتی احتمال پاریتو انجام می‌شود. براساس قانون MOPSO، فرایند بهینه‌سازی در قالب مدل بهینه‌سازی ذیل به‌روزرسانی می‌شود:

مفهوم سلطه پارتیو اعمال می‌شود تا تعیین شود کدام یک برنده است. اگر یکی امکان‌پذیر بوده و دیگری نباشد، کاندیدای امکان‌پذیر حکمرانی می‌کند.

۳.۲.۳. روند بهینه‌سازی

روند محاسباتی فرایند بهینه‌سازی پیشنهادی به صورت زیر تنظیم شده است:

گام ۱: توان تولیدی ماکزیمم و مینیمم واحد و همچنین قیود انتقال خط ارتباطی را مشخص کنید. بارها و ذخیره‌های ناحیه را تعیین کنید.

گام ۲: به طور تصادفی، به متغیرها مقدار اولیه بدهید.

گام ۳: هر مورد مجزای P_i در جمعیت را براساس مفهوم سلطه پارتیو ارزیابی کنید.

گام ۴: اعضای فاقد سلطه را که تاکنون در فهرست یافت شده‌اند، ذخیره کنید.

گام ۵: به حافظه هر ذره که در یک محل بهینه به نام P_{best} ذخیره شده است، مقدار اولیه بدهید.

گام ۶: تکرار شمارشگر را افزایش دهید.

گام ۷: برای هر ذره براساس سوابق حافظه، بهترین موقعیت فردی P_{best} را انتخاب کنید. بهترین g_{best} گلوبال را با استفاده از گزینش مسابقه‌ای دو-دویی از بخش رشته‌رشته‌شده انتخاب کنید. همچنین مکانیزم کارگذاری و به اشتراک گذاشتن تناسب در سرتاسر این فرایند اعمال شد تا تنوع راه‌حل را تسهیل نماید.

گام ۸: براساس بخش ۳، سرعت v هر عنصر P_i را به صورت زیر به روز کنید:

$$V_{id}^{(t+1)} = \omega \times V_{id}^{(t)} + c_1 \times rand() \times (pbest_{id} - P_{id}^{(t)}) + c_2 \times Rand() \times (gbest_d - P_{id}^{(t)}), \quad (16)$$

$$i = 1, \dots, PS;$$

$$d = 1, \dots, (GN + 2 \times TLN)$$

که در آن GN تعداد کل ژنراتورهاست و TLN تعداد خطوط ارتباطی است.

گام ۹: براساس بخش ۴، تغییر موقعیت هر متغیر P_i به صورت زیر تعیین کنید:

$$P_{id}^{(t+1)} = P_{id}^{(t)} + V_{id}^{(t+1)} \quad (17)$$

گام ۱۰: فهرستی را که راه‌حل‌های بدون سلطه را براساس چهار معیار گزینش ذخیره می‌کند، به روز کنید.

گام ۱۱: اگر مورد فعلی تحت سلطه P_{best} در حافظه است، در این صورت P_{best} را در حافظه نگه دارید. در غیر این صورت، P_{best} را با مورد فعلی در حافظه جابه‌جا کنید.

در زمینه سرعت و معیار همگرایی، تعداد جمعیت اولیه برابر ۱۰۰ و تعداد آرشو نیز برابر ۱۰۰ عضو در نظر گرفته شده است.

برای ارزیابی منصفانه، تعداد تکرار الگوریتم به مقدار ۲۰۰ تکرار در نظر گرفته می‌شود. همچنین، از دو دسته تابع هدف چندمتغیره معرفی شده در بخش ۴.۳ برای بهینه‌سازی الگوریتم ابتکاری چندهدفه MOPSO استفاده می‌شود که وزن‌های $w_1=0.3$ و $w_2=1$ در نظر گرفته شده است. همچنین، در الگوریتم، با نرخ جهش 0.5 ، سرعت همگرایی تنظیم می‌شود.

به‌زای موارد فوق، مقادیر متغیرها به‌روزشده و ذرات به هم می‌پیوندند تا به سمت بهترین موقعیتی که تاکنون یافت شده حرکت کنند. این بدان معنی است که به دلیل وجود این نیروی محرک، می‌توان به دنبال راه‌حل‌های بهینه گشت.

۲.۳. طرح MOPSO در روش پیشنهادی MAEED

در این مقاله، یک الگوریتم بهینه‌سازی انبوه و چندهدفه و پیشرفته برای ذرات MOPSO ارائه می‌شود و برای حل موفقیت‌آمیز هر دو شکل EED جبری و تصادفی، از این الگوی بهینه‌سازی بهره گرفته می‌شود. در این بخش، الگوریتم برای مسئله MAEED به کار گرفته خواهد شد.

۱.۲.۳. الگوی رمزگذاری

در زمینه الگوی رمزنگاری حل مسئله MOPSO، در تکرار نخست الگوریتم، نیاز به یکسری رشته اعداد تصادفی و اولیه برای شروع محاسبات وجود دارد. بسته به تعداد متغیرهای مورد بررسی، رشته اعداد هر متغیر که در این قسمت به صورت «متغیر» معرفی شده‌اند متفاوت‌اند.

خروجی توان هر واحد تولیدی و توان عبوری از خط ارتباطی محاسبه شده از پخش بار، به عنوان مقادیر اولیه محاسبات در مقدار نهایی هر متغیر انتخاب می‌شود. این روش، راه‌حلی بالقوه برای حل مسئله MAEED است. تمامی متغیرهای مورد بررسی با اعداد واقعی به دست آمده از پخش بار کدگذاری (رمزگذاری) می‌شوند. در این زمینه، مقدار نام از توان متغیر P_i را می‌توان به صورت ذیل نمایش داد:

$$P_i = [P_G, P_{RC}, P_T], \quad i = 1, 2, \dots, PS \quad (15)$$

که در آن PS اندازه جمعیت است.

۲.۲.۳. بررسی قیود

از استراتژی نپذیرفتن به‌عنوان روند بررسی قیود استفاده شده است. وقتی دو مورد مجزا را باهم مقایسه می‌کنیم، اول قیودشان بررسی می‌شود. اگر هر دو از پس قیود برآیند، در آن صورت

جدول (۲): ضرایب هزینه سوخت و ظرفیت ژنراتور (P.U)

$P_{G_{ij}}^{\max}$	$P_{G_{ij}}^{\min}$	c_{ij}	b_{ij}	a_{ij}	ژنراتور ij
۰/۱۴	۰/۰۰۰۵	۰/۵۰	۱۸۹	۱۵۰	$G_{1,1}$
۰/۱۰	۰/۰۰۰۵	۰/۵۵	۲۰۰	۱۱۵	$G_{1,2}$
۰/۱۳	۰/۰۰۰۵	۰/۶۰	۳۵۰	۴۰	$G_{1,3}$
۰/۱۲	۰/۰۰۰۵	۰/۵۰	۳۱۵	۱۲۲	$G_{1,4}$
۰/۲۵	۰/۰۰۰۵	۰/۵۰	۳۰۵	۱۲۵	$G_{2,1}$
۰/۱۲	۰/۰۰۰۵	۰/۷۰	۲۷۵	۷۰	$G_{2,2}$
۰/۲۰	۰/۰۰۰۵	۰/۷۰	۳۴۵	۷۰	$G_{2,3}$
۰/۱۸	۰/۰۰۰۵	۰/۷۰	۳۴۵	۷۰	$G_{2,4}$
۰/۳۰	۰/۰۰۰۵	۰/۵۰	۲۴۵	۱۳۰	$G_{3,1}$
۰/۳۰	۰/۰۰۰۵	۰/۵۰	۲۴۵	۱۳۰	$G_{3,2}$
۰/۳۰	۰/۰۰۰۵	۰/۵۵	۲۳۵	۱۳۵	$G_{3,3}$
۰/۳۰	۰/۰۰۰۵	۰/۴۵	۱۳۰	۲۰۰	$G_{3,4}$
۰/۱۱	۰/۰۰۰۵	۰/۷۰	۳۴۵	۷۰	$G_{4,1}$
۰/۲۰	۰/۰۰۰۵	۰/۶۰	۳۸۹	۴۵	$G_{4,2}$
۰/۳۰	۰/۰۰۰۵	۰/۶۰	۳۵۵	۷۵	$G_{4,3}$
۰/۳۰	۰/۰۰۰۵	۰/۸۰	۳۷۰	۱۰۰	$G_{4,4}$

۲.۴. سناریوی شبیه‌سازی

در شبیه‌سازی‌ها، با انجام آزمایش‌های مختلف، هم اندازهٔ جمعیت و هم اندازهٔ بایگانی تا ۱۰۰ تعیین می‌شود و تعداد متغیر ژنراتورها نیز به تعداد ۵۰۰ تنظیم می‌شود.

۱. عامل اینرسی وزن w به‌صورت خطی و براساس فرمول زیر در طول اجرای بهینه‌سازی کاهش می‌یابد.

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{iter_{\max}} \times iter \quad (18)$$

که در آن، $iter_{\max}$ تعداد واحدها و $iter$ تعداد فعلی تکرارهاست. در ۲۰۰ ژنراتور اولیه g_{best} با استفاده از یک انحراف معیار استاندارد بزرگ رشته‌رشته شده است تا براساس توزیع گاوس، محدوده‌ای در اطراف g_{best} تولید کند. در ۳۰۰ ژنراتور باقی‌مانده، مقدارش کاهش یافته است. این مورد حقیقت دارد؛ زیرا مثل انتخاب مقادیر w ، انحراف معیارهای استاندارد اولیه و بزرگ امکان جست‌وجوی کلی را فراهم می‌سازند، درحالی‌که این انحراف معیار استاندارد کوچک با استفاده از حرکات کوچک در هر تکرار، جست‌وجوهای محلی را تسهیل می‌نماید.

جدول (۳): ضرایب انتشار آلاینده‌گی (P.U)

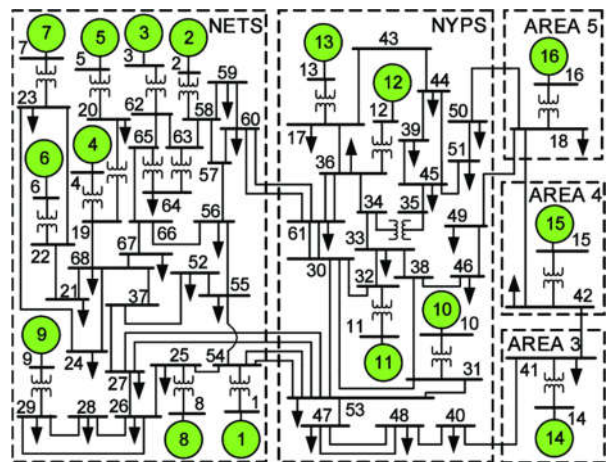
گام ۱۲: اگر به بیشترین میزان تکرارها دست یافتید، در آن صورت به گام ۱۳ بروید؛ در غیر این صورت به گام ۶ بروید.
گام ۱۳: به‌عنوان راه‌حل‌های نهایی مجموعه‌ای از راه‌حل‌های پاریتو - بهینه را از فهرست خارج کنید.

۴. مطالعات شبیه‌سازی

در این تحقیق، از یک سیستم آزمایشی چهارناحیه‌ای برای بررسی کارایی الگوریتم MOPSO پیشنهادی استفاده شده است.

۱.۴. اطلاعات شبکهٔ مورد مطالعه

نمای تک‌خطی شبکهٔ مورد مطالعه در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): نمای تک‌خطی شبکهٔ ۶۸ باس

مطابق با شکل (۲)، سیستم قدرت حاوی ۱۶ واحد ژنراتوری و ۳۵ باس بار است که به‌صورت شبکهٔ قدرت در ۶۸ باس توزیع شده‌اند. اطلاعات دقیق پارامترهای شبکه مورد مطالعه همانند توان تولیدی واحدها و امپدانس خطوط انتقال در مرجع [۱] آورده شده است.

مطابق با شکل (۲)، شبکه می‌تواند به‌صورت چهار ناحیهٔ مختلف مورد بهره‌برداری قرار بگیرد. در این زمینه، در هر ناحیه، چهار ژنراتور با سوخت و مشخصه‌های انتشار متفاوت وجود دارند که به‌ترتیب در جدول (۲) و (۳) نشان داده شده‌اند. قیود انتقال خط ارتباطی در جدول (۳) نشان داده شده‌اند. توان مبنای سیستم ۱۰۰ MVA است. بارهای نواحی به‌ترتیب ۰/۳، ۰/۵، ۰/۴ و ۰/۶ pu هستند. ذخیرهٔ چرخان در هر ناحیه ۳۰٪ تقاضای بار است. در شبیه‌سازی، از هزینهٔ انتقال چشم‌پوشی شده است زیرا معمولاً در مقایسه با هزینه‌های سوخت کل، مقدار کمی دارد.

بدون سرعت بین ناحیه‌ای (p.u.)	با سرعت بین ناحیه‌ای (p.u.)	ژنراتور/اهداف
۰/۱۰۷۴	۰/۱۳۲۰	$P_{G1,1}$
۰/۰۹۴۳	۰/۰۶۴۹	$P_{G1,2}$
۰/۰۵۰۳	۰/۱۲۰۱	$P_{G1,3}$
۰/۰۵۳۳	۰/۱۱۲۸	$P_{G1,4}$
۰/۲۵۰۷	۰/۲۰۴۷	$P_{G2,1}$
۰/۰۶۷۱	۰/۰۶۵۷	$P_{G2,2}$
۰/۰۹۸۰	۰/۱۳۱۶	$P_{G2,3}$
۰/۰۸۴۶	۰/۱۵۰۳	$P_{G2,4}$
۰/۱۰۸۳	۰/۰۵۷۲	$P_{G3,1}$
۰/۱۶۴۶	۰/۰۹۷۱	$P_{G3,2}$
۰/۰۶۶۲	۰/۰۶۶۳	$P_{G3,3}$
۰/۰۶۲۲	۰/۲۲۷۸	$P_{G3,4}$
۰/۰۷۵۴	۰/۰۷۵۹	$P_{G4,1}$
۰/۱۵۸۷	۰/۱۱۲۳	$P_{G4,2}$
۰/۱۰۷۱	۰/۰۵۲۰	$P_{G4,3}$
۰/۲۶۰۴	۰/۱۴۰۲	$P_{G4,4}$
-	-۰/۰۳۱۶	$P_{T1,2}$
-	-۰/۰۰۸۸	$P_{T1,3}$
-	۰/۱۶۹۹	$P_{T1,4}$
-	-۰/۰۳۲۰	$P_{T2,3}$
-	۰/۰۵۱۶	$P_{T2,4}$
-	۰/۰۰۴۸	$P_{T3,4}$
۲۱۹۱/۱۴	۲۱۶۶/۸۲	حداقل هزینه (\$/hour)
۳/۷۴۹۳	۳/۳۱۵۲	آلودگی (ton/hour)

γ_{ij}	β_{ij}	α_{ij}	ژنراتور ij
۲۳/۳۳۳	-۱/۵۰۰	۰/۰۱۶	$G_{1,1}$
۲۱/۰۲۲	-۱/۸۲۰	۰/۰۳۱	$G_{1,2}$
۲۲/۰۵۰	-۱/۲۴۹	۰/۰۱۳	$G_{1,3}$
۲۲/۹۸۳	-۱/۳۵۵	۰/۰۱۲	$G_{1,4}$
۲۱/۳۱۳	-۱/۹۰۰	۰/۰۲۰	$G_{2,1}$
۲۱/۹۰۰	۰/۸۰۵	۰/۰۰۷	$G_{2,2}$
۲۳/۰۰۱	-۱/۴۰۱	۰/۰۱۵	$G_{2,3}$
۲۴/۰۰۳	-۱/۸۰۰	۰/۰۱۸	$G_{2,4}$
۲۵/۱۲۱	-۲/۰۰۰	۰/۰۱۹	$G_{3,1}$
۲۲/۹۹۰	-۱/۳۶۰	۰/۰۱۲	$G_{3,2}$
۲۷/۰۱۰	-۲/۱۰۰	۰/۰۳۳	$G_{3,3}$
۲۵/۱۰۱	-۱/۸۰۰	۰/۰۱۸	$G_{3,4}$
۲۴/۳۱۳	-۱/۸۱۰	۰/۰۱۸	$G_{4,1}$
۲۷/۱۱۹	-۱/۹۲۱	۰/۰۳۰	$G_{4,2}$
۳۰/۱۱۰	-۱/۲۰۰	۰/۰۲۰	$G_{4,3}$
۲۲/۵۰۰	-۱/۴۰۰	۰/۰۴۰	$G_{4,4}$

جدول (۴): محدودیت‌های خط انتقال ارتباطی

$P_{T_{jk}}^{\max}$	$P_{T_{jk}}^{\min}$	خط jk
۰/۰۶۰	۰/۰۰۱	$P_{T1,2}$
۰/۰۴۰	۰/۰۰۱	$P_{T1,3}$
۰/۲۰۰	۰/۰۰۱	$P_{T1,4}$
۰/۰۳۵	۰/۰۰۱	$P_{T2,3}$
۰/۰۵۵	۰/۰۰۱	$P_{T2,4}$
۰/۰۰۹	۰/۰۰۱	$P_{T3,4}$

بر اساس نتایج شبیه‌سازی فوق به‌جز ناحیه ۱، سه ناحیه دیگر قادر به تأمین ذخیره مورد نیاز خودشان هستند. فقط ناحیه ۱ نیاز به اشتراک ذخیره از دیگر نواحی را دارد تا توان اضافی برای ذخیره‌سازی را تأمین نماید.

در اینجا فرض می‌شود که برنامه‌ریزی به اشتراک گذاشتن ذخیره اعمال می‌شود، مگر اینکه ظرفیت موجود در ناحیه نتوانند به‌تنهایی تقاضای ذخیره ناحیه را برآورده سازد. جدول (۷) اشتراک ذخیره را برای هزینه کمینه و انتشار کمینه نمایش می‌دهد. P_{RCGij} توزیع ذخیره از ژنراتور G_{ij} را بیان می‌کند. بار دیگر گفته می‌شود که مقادیر منفی اشتراک ذخیره P_{RCjk} که در آن $k > j$ است، نشان می‌دهد که در صورت نیاز، ذخیره از ناحیه k به ناحیه j

هزینه‌های کمینه سوخت و انتشار کمینه که با کمک ناحیه میانی و بدون آن به دست آمده‌اند، به‌ترتیب در جدول (۵) و جدول (۶) نشان داده شده‌اند. باید اشاره کرد که مقادیر منفی توان خط ارتباطی P_{Tjk} که در آن $k > j$ است، نشان می‌دهند که توان از ناحیه k به ناحیه j فرستاده شده است.

از نتایج شبیه‌سازی، هزینه‌های سوخت و انتشار MAEED به کمک ناحیه میانی بر حالت نواحی جداگانه غالب است؛ از این‌رو اتصال نواحی چندگانه به‌منظور دستیابی به هزینه‌های سوخت و انتشار، پایین‌تر و درعین‌حال، تأمین تقاضای بار نواحی مختلف، مطلوب است.

جدول (۵): حداقل هزینه‌های سوخت با و بدون کمک بین ناحیه‌ای

فرستاده می‌شود.

واحدها به‌روزرسانی شده و برای مراکز نیروگاهی و کنترل دیسپاچینگ شبکه ارسال می‌شود. مطابق با مقادیر به‌دست‌آمده، در پنجره زمانی بعدی، توان خروجی و ذخیره چرخان واحدهای ژنراتوری تغییر می‌کند.

براساس نتایج شبیه‌سازی می‌توانیم درک کنیم که وقتی ذخایر چرخان مورد نیاز ناحیه‌ای مطرح باشند، بدون شک هزینه‌های بهره‌برداری بالاتر و انتشار آلاینده‌گی بیشتر به‌منظور داشتن قابلیت اطمینان بالای سیستم قدرت انتظار می‌رود.

جدول (۷): به اشتراک گذاشتن ذخایر برای قدر ساختن ناحیه ۱ به‌منظور تأمین تقاضای ذخیره

ترکیب ذخیره	راه‌حل حداقل هزینه (p.u.)	راه‌حل حداقل آلودگی (p.u.)
$P_{SI,1}$	۰/۰۰۸۰	۰/۰۱۲۳
$P_{SI,2}$	۰/۰۳۵۱	۰/۰۳۷۵
$P_{SI,3}$	۰/۰۰۹۹	۰/۰۱۱۲
$P_{SI,4}$	۰/۰۰۷۲	۰/۰۲۵۵
$P_{RCG2,1}$	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۵
$P_{RCG2,2}$	۰/۰۰۰۵	۰
$P_{RCG2,3}$	۰/۰۰۰۵	۰
$P_{RCG2,4}$	۰/۰۰۰۵	۰
$P_{RCG3,1}$	۰/۰۰۷۰	۰/۰۰۱۲
$P_{RCG3,2}$	۰/۰۰۰۷	۰
$P_{RCG3,3}$	۰/۰۰۸۰	۰/۰۰۰۸
$P_{RCG3,4}$	۰/۰۱۰۰	۰/۰۰۱۰
$P_{RCG4,1}$	۰/۰۰۰۵	۰
$P_{RCG4,2}$	۰/۰۰۰۵	۰
$P_{RCG4,3}$	۰/۰۰۰۶	۰
$P_{RCG4,4}$	۰/۰۰۰۵	۰
$P_{RC1,2}$	-۰/۰۰۲۰	-۰/۰۰۰۵
$P_{RC1,3}$	-۰/۰۲۵۷	-۰/۰۰۳۰
$P_{RC1,4}$	-۰/۰۰۲۱	۰

۳.۴. مقایسه کنترل‌کننده پیشنهادی با روش‌های پیشین

جدول (۶): حداقل انتشار با کمک بین ناحیه‌ای و بدون آن

ژنراتور/اهداف	با سرعت بین ناحیه‌ای (p.u.)	بدون سرعت بین ناحیه‌ای (p.u.)
$P_{G1,1}$	۰/۱۲۷۷	۰/۱۰۸۹
$P_{G1,2}$	۰/۰۶۲۵	۰/۰۹۴۰
$P_{G1,3}$	۰/۱۱۸۸	۰/۰۵۰۰
$P_{G1,4}$	۰/۰۹۴۵	۰/۰۵۰۰
$P_{G2,1}$	۰/۱۶۸۴	۰/۲۴۶۴
$P_{G2,2}$	۰/۰۶۷۷	۰/۰۶۷۶
$P_{G2,3}$	۰/۱۸۹۱	۰/۱۰۲۲
$P_{G2,4}$	۰/۱۶۰۴	۰/۰۸۵۲
$P_{G3,1}$	۰/۰۶۱۹	۰/۱۰۸۹
$P_{G3,2}$	۰/۰۷۲۲	۰/۱۶۵۹
$P_{G3,3}$	۰/۰۹۰۱	۰/۰۶۵۸
$P_{G3,4}$	۰/۱۹۴۸	۰/۰۶۱۹
$P_{G4,1}$	۰/۰۹۰۰	۰/۰۷۹۴
$P_{G4,2}$	۰/۱۱۷۲	۰/۱۶۳۹
$P_{G4,3}$	۰/۰۵۹۵	۰/۱۰۷۵
$P_{G4,4}$	۰/۱۴۹۸	۰/۲۵۱۲
$P_{T1,2}$	-۰/۰۴۶۹	-
$P_{T1,3}$	-۰/۰۰۲۰	-
$P_{T1,4}$	۰/۱۴۲۷	-
$P_{T2,3}$	-۰/۰۲۰	-
$P_{T2,4}$	۰/۰۴۹۹	-
$P_{T3,4}$	-۰/۰۰۸۹	-
حداقل آلودگی (ton/hr)	۳/۲۳۰۱	۳/۶۹۲۳
هزینه سوخت (\$/hr)	۲۱۷۸/۲۰	۲۱۹۱/۲۷

قابل توجه است که در طرح پیشنهادی، مقادیر متغیرها به‌صورت دوره‌ای و در پنجره‌های زمانی متوالی به‌روزرسانی می‌شوند. در این حالت و به‌ازای تغییر ساختار شبکه همانند تغییر ماتریس امپدانس شبکه و یا تغییر توان تولیدی واحدهای ژنراتوری، با به‌روزرسانی متغیرها مبتنی بر MOPSO بر روی مدل پیشنهادی MAEED، میزان توزیع توان و ذخیره چرخان

هستند. در این حالت، عملکرد روش به شدت به شرایط بهره‌برداری و ساختار توپولوژیکی شبکه بستگی دارد. همچنین از جمله مزایای دیگر طرح پیشنهادی، قابلیت استفاده از آن شبکه‌های بزرگ به هم پیوسته قدرت است. در نتیجه، با توجه به کاربردی بودن رویکرد پیشنهادی MAEED می‌توان از آن در طیف گسترده‌ای از شبکه‌های مختلف با هزینه‌ها و پیچیدگی کمتر استفاده کرد.

۵. نتیجه گیری

در این مقاله، مفهوم جدید توزیع اقتصادی/محیطی چندناحیه‌ای MAEED به منظور کاهش انتشار آلاینده‌ها و بهره‌مندی بهتر از ذخایر چرخان در سیستم‌های قدرت پیشنهاد شد. برای این منظور، طرح پیشنهادی مدل‌سازی شده و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گروهی پیشرفته چندهدفه ذرات MOPSO، راه‌حل‌های بهینه در محیط چندبعدی تابع هدف به دست آمد. در حل MOPSO به منظور دستیابی به نتایج مطلوب، روش پاریتو به عنوان راه‌حل بهینه پیشنهاد شد و مورد استفاده قرار گرفت. در این زمینه، با در نظر گرفتن محدودیت‌های انتقال خطوط ارتباطی بین نواحی، امنیت سیستم قدرت تضمین شده است. همچنین، ذخایر چرخان مورد نیاز هر ناحیه برای افزایش قابلیت اطمینان سیستم در مدل پیشنهادی MAEED لحاظ شده و مشارکت بهینه از طریق مدل‌سازی و حل MOPSO طی شرایط بهره‌برداری مختلف به دست آمد.

در نتایج شبیه‌سازی، هزینه‌های سوخت و انتشار طرح پیشنهادی به کمک ناحیه میانی بر حالت نواحی جداگانه برتری داشته و می‌توان از اتصال نواحی چندگانه به منظور دستیابی به هزینه‌های سوخت و انتشار پایین‌تر و تأمین تقاضای بار نواحی مختلف بهره گرفت. همچنین با اعمال MAEED، نواحی قادر به تأمین ذخایر مورد نیاز خودشان بوده و به‌ازای مقادیر منفی اشتراک، ذخیره چرخان می‌تواند از یک ناحیه به ناحیه دیگر فرستاده شود. ارزیابی در نتایج شبیه‌سازی، اشتراک‌گذاری ذخایر چرخان تنها زمانی انجام می‌شود که ناحیه‌ای فاقد ظرفیت تولید کافی برای تأمین بار مورد تقاضا باشد. طرح پیشنهادی بر روی یک شبکه آزمایشی ۶۸ باسه چهارناحیه‌ای اجرا شده و نتایج نشان‌دهنده تأثیر فرایند بهینه‌سازی روش پیشنهادی بر کاهش مسائل زیست‌محیطی در شرایط مختلف بهره‌برداری از سیستم قدرت بوده است.

در زمینه مطالعات آینده، میزان ذخیره چرخان می‌تواند

در این بخش، به منظور ارزیابی اثربخشی طرح پیشنهادی MAEED، یک مطالعه مقایسه‌ای جامع بین رویکرد پیشنهادی و چند روش پیشین بررسی و در جدول (۸) خلاصه شده است. در زمینه صحت‌سنجی نتایج به دست آمده، با در نظر گرفتن سناریوی مشابه برای تمامی مراجع، پاسخ سیستم قدرت بررسی شده است.

جدول (۸): مقایسه طرح پیشنهادی MAEED با روش‌های پیشین

مرجع	روش	مبتنی بر مدل	هزینه	پیچیدگی در شبکه‌های بزرگ؟	قابل استفاده
[۱]	Mesh Adaptive Direct Search	✓	متوسط	زیاد	بلی
[۲]	Online Optimal Management	✓	زیاد	زیاد	خیر
[۳]	Microgrids management	✓	زیاد	متوسط	خیر
[۴]	Centralized Control	✓	متوسط	زیاد	خیر
[۵]	Optimal operation	✓	زیاد	زیاد	خیر
[۶]	Fuzzified Honey Bee	-	زیاد	کم	بلی
[۷]	Demand Response	✓	کم	متوسط	بلی
[۸]	Differential Evolution Algorithm	✓	زیاد	متوسط	خیر
[۹]	HBMO	✓	زیاد	کم	خیر
[۱۰]	Interactive Particle Swarm	✓	متوسط	کم	خیر
[۱۱]	State Feedback	✓	زیاد	متوسط	بلی
[۱۲]	Bacterial Foraging	✓	کم	متوسط	خیر
[۱۳]	Optimal Power Flow	-	زیاد	متوسط	خیر
[—]	طرح پیشنهادی MAEED	✓	کم	کم	بلی

مطابق با جدول (۸)، طرح پیشنهادی MAEED نتایج بهتری را به‌ازای سناریوی خطای یکسان به همراه دارد. مزیت اصلی روش پیشنهادی هزینه پایین‌تر نسبت به روش‌های دیگر و کاهش پیچیدگی است؛ به‌نحوی که می‌توان از آن در طیف گسترده‌ای از برنامه‌ها استفاده کرد. همچنین در مقایسه، اکثر روش‌های پیشین نیازمند مدل شبکه با وابستگی زیاد به ماتریس امپدانس سیستم

توان خروجی ژنراتور i در ناحیه j	P_{Gij}	به‌صورت همزمان با مسئله تولید برنامه‌ریزی شود. علاوه بر این‌ها
توان خروجی ناحیه j	PA_j	پخش ناحیه‌ای توان در هر ناحیه منجر به بهبود امنیت سیستم می‌شود. در این زمینه اجرای پخش بار بهینه چندهدفه بر روی
توان خط ارتباطی از ناحیه j به ناحیه k	P_{Tjk}	نواحی مختلف طی دوره‌های زمانی متوالی پیشنهاد می‌شود. مسائل
توان انتقالی بین نواحی	P_T	دیگر از قبیل تلفات انتقال، هزینه‌های انتقال و سیاست‌های
حداقل و حداکثر توان تولیدشده ژنراتور i در ناحیه j	P_{Gij}^{Max} و P_{Gij}^{Min}	خریدوفروش بین نواحی نیز می‌تواند برای نشان دادن راه‌حل‌های
تقاضای کل در ناحیه j	P_{Di}	واقع‌بینانه‌تر در زمینه مدل‌سازی مسئله MAEED در نظر گرفته
ذخیره چرخان واحد i در ناحیه j	P_{Sij}	شود.

فهرست علائم و اختصارات

		اختصارات
توزیع اقتصادی و چندناحیه‌ای بار	$MAED$	
توزیع اقتصادی/محیطی چندناحیه‌ای	$MAEED$	
بهینه‌سازی چندهدفه و پیشرفته ذرات	$MOPSO$	
توزیع اقتصادی سنتی بار	ED	
توزیع اقتصادی/محیطی	EED	
		علائم
ضرایب هزینه ژنراتور i در ناحیه j	c_{ij} و b_{ij}	a_{ij}
ثابت هزینه انتقال	f_{jk}	
تعداد کل ژنراتورها	GN	
بهترین موقعیت سراسری هر ذره	g_{best}	
تعداد فعلی تکرارها	$iter$	
تعداد واحدها	$iter_{max}$	
تعداد ژنراتورهای در مدار ناحیه j	M_j	
تعداد ناحیه	N	

- [1] Ahmadi, S., Samiei Moghaddam, M., Ranjbar, S., "New model of PEV parking lots in the presence of demand response uncertainties", Sustainable Energy, Grids and Networks, Vol. 30, No.3, pp.1728-1742, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.segan.2022.100641>.
- [2] Kumar, S., Krishnasamy, V., Kaur, R., Kandasamy, N.K., "Virtual energy storage-based energy management algorithm for optimally sized DC nanogrid", IEEE Systems Journal, Vol. 16, No.1, pp.231-239, 2022, <https://doi.org/10.1109/JSYST.2021.3050779>.
- [3] Ahmed, H.M.A., Ahmed, M.H., Salama, M.M.A., "A linearized multiobjective energy management framework for reconfigurable smart distribution systems considering BESSs", IEEE Systems Journal, Vol. 16, No. 1, pp. 1258-1269, 2022, <https://doi.org/10.1109/JSYST.2021.3062491>.
- [4] Cao, Y., et al., "Optimal energy management for multi-microgrid under a transactive energy framework with distributionally robust optimization", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 13, No. 1, pp. 599-612, 2022, <https://doi.org/10.1109/TSG.2021.3113573>.
- [5] Rostamnezhad, Z., Mary, N., Dessaint, L.A., Monfet, D., "Electricity consumption optimization using thermal and battery energy storage systems in buildings", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 14, No. 1, pp. 251-265, 2023, <https://doi.org/10.1109/TSG.2022.3194815>.
- [6] Goh, H.H., et al., "An assessment of multistage reward function design for deep reinforcement learning-based microgrid energy management", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 13, No. 6, pp. 4300-4311, 2022, <https://doi.org/10.1109/TSG.2022.3179567>.
- [7] Utkarsh, K., Ding, F., Jin, X., Blonsky, M., Padullaparti, H., Balamurugan, S.P., "A network-aware distributed energy resource aggregation framework for flexible, cost-optimal, and resilient operation", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 13, No. 2, pp. 1213-1224, 2022, <https://doi.org/10.1109/TSG.2021.3124198>.
- [8] Guo, Z., Wei, W., Chen, L., Wang, Z., Catalão, J.P.S., Mei, S., "Optimal energy management of a residential prosumer: a robust data-driven dynamic programming approach", IEEE Systems Journal, Vol. 16, No. 1, pp. 1548-1557, 2022, <https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.3043342>.
- [9] Huang, W., Zhang, X., Li, K., Zhang, N., Strbac, G., Kang, C., "Resilience oriented planning of urban multi-energy systems with generalized energy storage sources", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 37, No. 4, pp. 2906-2918, 2022, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3123074>.
- [10] Hosseinzadeh, A., Zakariazadeh, A., Ranjbar, S., "Fast restoration of microgrids using online evaluation metrics considering severe windstorms", Sustainable Energy, Grids and Networks, Vol. 26, No. 4, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2021.100458>
- [11] Ghadertootoonchi, A., Moeini-Aghtaie, M., Davoudi, M., "A hybrid linear programming-reinforcement learning method for optimal energy hub management", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 14, No. 1, pp. 157-166, 2023, <https://doi.org/10.1109/TSG.2022.3197458>.
- [12] Li, X., Li, C., Chen, G., Dong, Y., "A risk-averse energy sharing market game for renewable energy microgrid aggregators", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 37, No. 5, pp. 3528-3539, 2022, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3137898>.
- [13] Çiçek, A., Erdinç, O., "Optimal bidding strategy considering bilevel approach and multistage

process for a renewable energy portfolio manager managing RESs with ESS", IEEE Systems Journal, Vol. 16, No. 4, pp. 6062-6073, 2022,
<https://doi.org/10.1109/JSYST.2021.3131138>.