JOURNAL OF SOUTHERN COMMUNICATION ENGINEERING
ISLAMIC AZAD UNIVERSITY BUSHEHR BRANCH
E-ISSN: 2980-9231
https://jce.bushehr.iau.ir
https://doi.org/10.30495/jce.2023.1997636.1226

Vol. 13/ No. 51/Spring 2024

Research Article

Analysis of the Economic Impacts of Optimal Management of Large-Scale Energy Storage Facilities

Behnam Motalebinejad, PhD Student[1] | Majid Hosseina, Assistant Professor[2*] | Mojtaba Vahedi, Assistant Professor[3] | Mahmoud Samiei Moghaddam, Assistant Professor[4]

[1]Department of Electrical Engineering, Aliabad katoul Branch, Islamic Azad University, Aliabad katoul, Iran.
behtarmobi@gmail.com

[2]Department of Electrical Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar,Iran.
majidhosseina@gmail.com

[3]Department of Electrical Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran.
email@gmail.com

[4]Department of Electrical Engineering, Damghan Branch, Islamic Azad University, Damghan, Iran.,
samiei352@yahoo.com

Correspondence
Majid Hosseina, Assistant Professor of Electrical Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar,Iran.
Email: majidhosseina @gmail.com

Received: 29 September 2023
Revised: 26 October 2023
Accepted: 27 November 2023

Abstract

Due to technological advances, today it is possible to upgrade large-scale energy storage plants. The modern architecture and technology of these power plants facilitate the possibility of optimal use of renewable energy sources and, as a result, significantly reduce energy costs and increase energy efficiency. Also, by using artificial intelligence and optimization algorithms, the performance and operation of energy storage plants can be improved. In this article, the management of large energy storage power plants is discussed. This article presents innovative measures in the management of these power plants, which include limitations on the number of times of charging and discharging. In addition, the cuckoo search algorithm is used as a powerful and efficient method in solving the proposed model. This algorithm can find global optimal solutions and can be effective in improving the efficiency and increasing the profitability of large energy storage power plants. The simulation results show that the use of this approach in the management of large-scale energy storage plants brings significant economic effects. These impacts include reducing energy costs, increasing productivity, greater independence from fossil fuel sources, maintaining the stability of the power grid, and improving the performance of the power transmission system.

Keywords: Large-scale energy storage power plants, distribution substation, evolutionary algorithm, optimization.

Highlights

- Use of energy storage power plants as an innovative solution in optimizing energy management and smart grids.
- Utilizing the cuckoo search algorithm as a robust method to enhance the efficiency of energy storage power plants.
- Providing an economic optimization approach for optimal planning of large-scale storage system planning.

Citation: B. Motalebinejad, M. Hosseina, M. Vahedi, and M. Samiei Moghaddam, "Analysis of the Economic Impacts of Optimal Management of Large-Scale Energy Storage Facilities," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 13, no. 51, pp. 79–94, 2024, doi: 10.30495/jce.2023.1997636.1226, (in Persian).

مقاله پژوهشی

مدیریت نیروگاه‌های ذخیره انرژی بزرگ: بهینه‌سازی شارژ و دشارژ با الگوریتم جستجوی فاخته

بهنام مطلبی نژاد[۱] | مجید حسینا*[۲] | مجتبی واحدی[۳] | محمود سمیعی مقدم[۴]

[۱]گروه مهندسی برق، واحد علی آباد کتول، دانشگاه آزاد اسلامی، علی آباد کتول، ایران behtarmobi@gmail.com

[۲]گروه علوم مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران majidhosseina@gmail.com

[۳۱]گروه مهندسی برق، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران vahedi.mojtaba@gmail.com

[۴۱]گروه مهندسی برق، واحد دامغان، دانشگاه آزاد اسلامی، دامغان، ایران samiei352@yahoo.com

نویسنده مسئول

*مجید حسینا، استادیار، [۲]گروه علوم مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران majidhosseina@gmail.com

چکیده:

با توجه به پیشرفت‌های فناوری، امروزه امکان ارتقاء نیروگاه‌های ذخیره انرژی به مقیاس بزرگ وجود دارد. معماری و فناوری مدرن این نیروگاه‌ها امکان استفاده بهینه از منابع تجدیدپذیر انرژی را تسهیل کرده و در نتیجه، هزینه‌های انرژی را به شکل چشم‌گیری کاهش داده و بهره‌وری انرژی را افزایش می‌دهند. همچنین، با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی و بهینه‌سازی، می‌توان عملکرد و عملیات نیروگاه‌های ذخیره انرژی را بهبود بخشید. در این مقاله، به بررسی مدیریت نیروگاه‌های ذخیره انرژی بزرگ پرداخته می‌شود. این مقاله اقدامات نوآورانه‌ای در مدیریت این نیروگاه‌ها را ارائه می‌دهد، که شامل محدودیت‌هایی روی تعداد دفعات شارژ و دشارژ می‌باشد. به علاوه، الگوریتم جستجوی فاخته به عنوان یک روش قوی و کارآمد در حل مدل پیشنهادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این الگوریتم توانایی پیدا کردن جواب‌های بهینه سراسری را دارد و می‌تواند در بهبود کارایی و افزایش سودآوری نیروگاه‌های ذخیره انرژی بزرگ تأثیرگذار باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که بهره‌برداری از این رویکرد در مدیریت نیروگاه‌های ذخیره انرژی مقیاس بزرگ تأثیرات اقتصادی قابل توجهی را به همراه دارد. این تأثیرات شامل کاهش هزینه‌های انرژی، افزایش بهره‌وری، استقلال بیشتر از منابع سوخت فسیلی، حفظ پایداری شبکه برق و بهبود عملکرد سیستم انتقال برق می‌شود.

کلید واژه‌ها: الگوریتم تکاملی، بهینه‌سازی، پست فوق توزیع، نیروگاه‌های بزرگ ذخیره انرژی.

تاریخ دریافت: ۷ مهر ۱۴۰۲
تاریخ بازنگری: ٤ آبان ۱۴۰۲
تاریخ پذیرش: ٦ آذر ۱۴۰۲

https://doi.org/ 10.30495/jce.2023.1997636.1226

۱-مقدمه

سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در مقیاس بزرگ به مجموعه‌ای از فناوری‌ها و سیستم‌ها اطلاق می‌شود که به منظور ذخیره و مدیریت انرژی در مقیاس شهری یا منطقه‌ای به کار می‌روند. این سیستم‌ها با هدف مدیریت بهره‌وری انرژی و متناسب ساختن مصرف انرژی با نیازهای شهرها و جوامع بزرگ ایجاد می‌شوند. نیروگاه‌های ذخیره انرژی مقیاس بزرگ معمولاً به تأسیساتی اشاره دارند که دارای ظرفیت ذخیره بالا و توانایی تولید برق معتبر برای شبکه‌های برق منطقه‌ای یا کشوری هستند. این نیروگاه‌ها دارای ظرفیت ذخیره انرژی بزرگ هستند که معمولاً در چندین مگاوات‌ساعت اندازه‌گیری می‌شود. یکی از چالش‌های بزرگ در جوامع رشد کرده امروزی، بهره‌گیری از منابع انرژی پایدار و کاهش آلودگی هوا و انتشار گازهای گلخانه‌ای است. سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در مقیاس بزرگ در واقعیت، ترکیبی از فناوری‌های مختلف هستند که به شهرها و مناطق کمک می‌کنند تا از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند باد و خورشید بهره‌برداری کنند و انرژی را در دوره‌های باریکه و کم باری ذخیره کنند. این

سیستم‌ها شامل استفاده از باتری‌ها، سیستم‌های ذخیره‌سازی پمپ آب، تجهیزات تبدیل انرژی به هیدروژن، و سایر فناوری‌های نوین می‌شوند.

با استفاده از این سیستم‌ها، شهرها می‌توانند انرژی تولیدی از منابع تجدیدپذیر را در زمانی که نیاز به آن ندارند ذخیره کرده و در زمان‌های پیک مصرف بهره‌برداری کنند. این اقدام به بهره‌وری بالاتر از انرژی منجر می‌شود و در نهایت به کاهش هزینه‌ها و کاهش اثرات زیست‌محیطی مرتبط با تولید انرژی کمک می‌کند. با توجه به رشد جمعیت شهری و نیاز روزافزون به انرژی، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در مقیاس بزرگ اهمیت بسیاری پیدا کرده‌اند. این سیستم‌ها نه تنها به تحقق شهرهای پایدار و کارآمد کمک می‌کنند بلکه همچنین به کاهش تنش بر روی شبکه‌های انتقال انرژی و افزایش امنیت انرژی کمک می‌کنند. در کل، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در مقیاس بزرگ نقش بسیار مهمی در بهبود کیفیت زندگی شهروندان و حفاظت از محیط زیست ایفا می‌کنند.

چالش اصلی مورد بحث در مقاله، مدیریت بهینه نیروگاه‌های ذخیره انرژی بزرگ، در مقیاس بزرگ است. این مقاله تلاش می‌کند تا راهکارهای نوآورانه و کارآمدی برای بهبود مدیریت این نیروگاه‌ها ارائه دهد، به منظور مقابله با چالش‌هایی مانند تعداد محدودیت‌هایی برای فرآیندهای شارژ و دشارژ، که در این سیستم‌ها مطرح هستند. همچنین، این مقاله از الگوریتم جستجوی فاخته به عنوان یک روش کارآمد برای بهبود عملکرد و بهره‌وری نیروگاه‌های ذخیره انرژی بزرگ استفاده می‌کند. این الگوریتم توانایی دارد تا جواب‌های بهینه سراسری را پیدا کند و از طریق بهبود کارایی و افزایش سودآوری این نیروگاه‌ها تأثیرات اقتصادی قابل توجهی را فراهم کند. بنابراین، چالش اصلی مقاله در بهره‌برداری بهینه از نیروگاه‌های ذخیره انرژی بزرگ در مقیاس بزرگ و بهبود مدیریت و عملکرد آن‌ها در مواجهه با نیازهای روزافزون به انرژی و پیشرفت‌های فناوری است.

رشد جمعیت، به عنوان یکی از جریانات بزرگ دنیای مدرن، چالش‌های عمده‌ای را برای دولت‌ها در سطح جهان ایجاد کرده است. این چالش‌ها شامل مواردی چون آلودگی هوا و مصرف بی‌رویه انرژی می‌شوند [۱]. امروزه، با توجه به پیشرفت‌های چشمگیر در زمینه منابع انرژی پایدار، مفهوم شهر پایدار به عنوان یک راه حل اساسی به منظور مواجهه با این چالش‌ها در جهت افزایش کارایی عملیاتی خدمات شهری و بهبود کیفیت زندگی به وجود آمده است [۲]. شهرهای پایدار از نیروی نوآوری و توسعه در زمینه فناوری بهره می‌برند تا برنامه‌های مدیریتی جدیدی را برای بهره‌گیری بهینه از منابع انرژی ارائه دهند [۳]. این توسعه فناورانه، به معنای واقعی، در دستیابی به اهداف شهرهای پایدار و افزایش بهره‌وری انرژی نقش اساسی ایفا می‌کند. به این ترتیب، شهرهای پایدار نه تنها به بهبود محیط زیست و کاهش آثار منفی مصرف انرژی و آلودگی هوا کمک می‌کنند، بلکه نقشی مهم در ایجاد شرایط بهتری برای زندگی شهروندان و افزایش بهره‌وری اقتصادی ایفا می‌کنند. در مرجع [۴]، نمودار رقابت شبکه‌ای به منظور رقابت در بین برنامه پاسخگویی به تقاضا پیشنهاد شده است. در [۵]، نویسندگان یک مدل نظری از بازی رقابت بین برنامه‌های سمت تقاضا برای فروش انرژی ذخیره شده در باتری ارائه می‌دهند. مدل پیشنهادی در مرجع [۶] از نظر ریاضی به‌عنوان یک بهینه‌سازی دو مرحله‌ای قوی با عدم قطعیت ژنراتور توزیع‌شده تجدیدپذیر که توسط مجموعه عدم قطعیت چندوجهی تعیین می‌شود، فرمول‌بندی شده است. مرجع [۷] یک روش مبتنی بر غربالگری را برای شناسایی زمین مناسب برای نصب و راه‌اندازی ذخیره‌سازی انرژی در مقیاس بزرگ و نصب منابع تجدیدپذیر در پرتغال ارائه می‌دهد. در [۸] برنامه‌ریزی بهینه سیستم‌های ذخیره انرژی در شبکه توزیع ارائه شده است. برنامه‌ریزی بهینه مکان، ظرفیت و انرژی باتری‌ها را تعیین می‌کند در حالی که عملکرد هزینه را به محدودیت‌های فنی محدود می‌کند. در [۹] نویسندگان یک استراتژی پیشنهادی برای ردیابی پیش‌بینی بار با هدف کاهش ریسک تقاضا ارائه کرده‌اند. همچنین در این مدل، پیش‌بینی بار کوتاه مدت، پیش‌بینی انرژی باد و پیش‌بینی انرژی خورشیدی انجام شده است. مرجع [۱۰] به بررسی اثر عملکرد سیستم‌های ذخیره انرژی بر پایداری ولتاژ و کیفیت سیستم قدرت محلی می‌پردازد. مرجع [۱۱] کاربرد فناوری ذخیره‌سازی انرژی در مقیاس بزرگ و نقش پشتیبانی ذخیره انرژی باتری برای اتصال انرژی جهانی را معرفی می‌کند. مرجع [۱۲] روشی را برای بهینه‌سازی کمترین هزینه دارایی‌های تولید ارائه می‌کند در حالی که به صراحت محدودیت‌های قابلیت اطمینان ریزشبکه‌هایی را که قادر به مدیریت فعال تقاضا هستند برآورده می‌کند. مدل مدیریت باتری محدودیت‌های جنبشی را در عملکرد باتری در نظر می‌گیرد و ارسال میدان را برای تنظیم عمق تخلیه نشان می‌دهد. در [۱۳] مقایسه‌ای از برنامه‌ریزی بهینه چندین فناوری باتری برای یافتن بهترین انتخاب در کاربردهای شبکه توزیع را نشان می‌دهد. روش برنامه‌ریزی پیشنهادی یک روش چهار لایه است که عدم قطعیت مشخصات باتری و همچنین

بار و انرژی باد را در نظر می‌گیرد. نویسندگان در [۱۴] یک مدل محدب برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع فعال پیشنهاد می‌کنند که سیستم‌های ذخیره انرژی توزیع شده را یکپارچه می‌کند. در [۱۵]، شاخص پایداری ولتاژ و انرژی مورد انتظار تأمین نشده از شبکه‌های توزیع در پیکربندی پویا متعادل و نامتعادل شبکه توزیع، از جمله منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره انرژی الکتریکی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در مرجع [۱۶]، یک شبکه توزیع برق جریان مستقیم انعطاف‌پذیر بر اساس تئوری الگوریتم سازگاری، مزایا و معایب کنترل متمرکز و کنترل باتری توزیع شده را مورد بحث قرار می‌دهد. در [۱۷]، نویسندگان در سیستم‌های انتقال و ذخیره‌سازی هماهنگ تحت عدم قطعیت یک برنامه‌ریز مرکزی سرمایه‌گذاری می‌کنند. این امر با هدف دستیابی به گسترش کارآمد انتقال و ذخیره‌سازی است که هزینه‌های سرمایه‌گذاری را به حداقل می‌رساند، در حالی که دستیابی به راندمان مؤثر یک سیستم قدرت با نفوذ بالای انرژی‌های تجدیدپذیر است. مرجع [۱۸] یک مدل نظری از رقابت غیرهمکاری را ارائه می‌دهد که رقابت تقاضا-پاسخ را برای فروش انرژی ذخیره شده در دستگاه‌های ذخیره‌سازی جمع‌آوری می‌کند. مرجع [۱۹] روشی را برای داده‌کاوی خودروهای برقی پلاگین بر اساس روش تحلیل عاملی برای ذخیره انرژی و زمان‌بندی تولید پراکنده در شبکه توزیع فعال ارائه می‌کند. در مطالعه [۲۰]، نویسندگان روشی را برای تخصیص ظرفیت ذخیره انرژی هیبریدی برای شبکه توزیع فعال با توجه به پاسخ سمت تقاضا به منظور کاهش تلفات پیشنهاد کردند. در مرجع [۲۱] مطالعه گسترده‌ای در زمینه تخصیص و کنترل بهینه سیستم ذخیره انرژی انجام شده است. در [۲۲] یک مدل پیش‌بینی به حداقل رساندن سطح شیب‌دار را در یک شبکه توزیع فعال با استفاده از سیستم‌های ذخیره انرژی پیشنهاد می‌کند. در [۲۳] یک مدل برنامه‌ریزی مخروط مرتبه دوم عدد صحیح مختلط برای تعیین بهینه مکان‌ها و ظرفیت‌های انرژی-قدرت سیستم‌های ذخیره انرژی توزیع شده پیشنهاد شده است. در مرجع [۲۴] یک مفهوم ساختمان انرژی انعطاف‌پذیر جدید، مبتنی بر کنترل هوشمند، ذخیره‌سازی گرمای نهان با چگالی بالا و شبکه‌های هوشمند پیشنهاد شده است که قادر به پیش‌بینی بهترین استراتژی عملیاتی با توجه به شرایط محیطی، نرخ‌های اقتصادی و الگوهای اشغال مورد انتظار است. هدف اصلی مرجع [۲۵] بررسی اثرات بلندمدت برنامه سمت تقاضای پیشنهادی و تأثیر آن بر پیش‌بینی بار پیک سالانه مهم برای برنامه‌ریزی شبکه استراتژیک است. مرجع [۲۶] مروری بر فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی، مواد و سیستم‌ها، چالش‌ها و چشم‌اندازهای ذخیره‌سازی شبکه در مقیاس بزرگ ارائه می‌کند. در [۲۷] یک استراتژی برای یکپارچه‌سازی بهینه سیستم‌های ذخیره انرژی باتری برای بهبود بار و توانایی میزبانی نسل توزیع شده شبکه ابزار پیشنهاد شده است. مرجع [۲۸] تأثیر سیستم‌های ذخیره انرژی باتری را بر پایداری شبکه‌های توزیع با سطوح نفوذ بالای تولید پراکنده مبتنی بر مبدل مورد بحث قرار می‌دهد. در [۲۹] یک کنترل ولتاژ هماهنگ برای شبکه توزیع فعال با توجه به اثر ذخیره انرژی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی[1] پیشنهاد شده است. در [۳۰] تأثیر هزینه‌های شارژ باتری‌ها بر روی پست‌های فوق توزیع بررسی شده است. در [۳۱] بر اساس تجزیه و تحلیل وضعیت توسعه یک باتری مقیاس بزرگ، سناریوهای کاربردی مانند کاهش نوسانات توان خروجی، توافق با طرح خروجی در سمت تولید انرژی تجدیدپذیر، تنظیم فرکانس شبکه برق، بهینه‌سازی جریان برق در انتقال نیرو را معرفی شده است. در [۳۲] یک روش جدید مبتنی بر پاسخ شبکه پویا و ویژگی‌های مختلف پاسخ سیستم ذخیره باتری را برای بهینه‌سازی ذخایر پاسخ فرکانسی سریع و جلوگیری از شکستن فرکانس از آستانه‌های کاهش بار زیر فرکانس پیشنهاد کرده است. در [۳۳]، یک سیستم شاخص ارزیابی جامع باتری با در نظر گرفتن نیروگاه فتوولتائیک در منطقه‌ای از چین با استفاده از روش منطق فازی معرفی شده است. در [۳۴] روشی را برای ارزیابی مزایای مالی سیستم‌های ذخیره انرژی باتری (BESS) نصب شده روی مشتریان ولتاژ متوسط (MV) ارائه می‌دهد، که نشان می‌دهد باتری می‌تواند از نظر اقتصادی برای مشتریان MV با مشخصات مصرف قابل پیش‌بینی و پایدار، به ویژه آن‌هایی که دارای ساختار تعرفه زمان استفاده برای تقاضا و انرژی هستند مقرون به صرفه باشد. در [۳۵]، قابلیت اطمینان سیستم ذخیره‌سازی انرژی باتری متصل به شبکه در مقیاس بزرگ و همچنین تأثیرات آن بر قابلیت اطمینان کلی سیستم‌های قدرت با توجه به تخریب باتری و انتشار فرار حرارتی بررسی شده است. در [۳۶] روشی برای تنظیم ولتاژ توسط ذخیره‌گرها، تولید متغیر منابع تولید پراکنده و ادوات کنترلی ارائه گردیده است. برای هماهنگی میان ادوات مختلف تنظیم ولتاژ استراتژی ارائه گردیده که در آن هماهنگی‌ها شامل پیکربندی تغذیه‌کننده‌ها، پروفایل تقاضا، نقاط تنظیمی تپ چنجرهای[2] ترانسفورماتورها،

[1] Evolutinary Algorithm
[2] Tap changer

تنظیمات بانک‌های خازنی و ذخیره‌گرهای به کار گرفته شده است. در [۳۷] بهینه‌سازی برنامه‌ریزی ترکیب مزرعه بادی و پمپ ذخیره‌ای در بازار برق انجام شده است. مدل‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی در دو مرحله با قیمت‌های تصادفی بازار و تولید انرژی بادی صورت گرفته است. در [۳۸] هدف اصلی کاهش هزینه بهره‌برداری است. هزینه بهره‌برداری شامل هزینه عملکرد نیروگاه‌ها و نگهداری شبکه است. علاوه بر این در [۳۸] یک چارچوب بهینه‌سازی چند هدفه ایمن برای بهره‌بردار نیروگاه‌ها ارائه گردید. کمینه‌سازی هزینه، انرژی توزیع نشده به عنوان توابع هدف بهینه‌سازی در نظر گرفته شدند. در [۳۹] به بهینه‌سازی هم‌زمان تعداد، محل و اندازه منابع تولیدات پراکنده و جبران‌ساز سنکرون استاتیکی پرداخته شده و به‌منظور حل مسئله بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک (GA) استفاده شده است. به همین منظور تابع چند هدفه شامل هزینه‌های بهره‌برداری و تولید منابع تولیدات پراکنده و جبران‌ساز سنکرون استاتیکی و قابلیت بارپذیری سیستم ارائه شده است. در [۴۰] با استفاده از روش محاسباتی و روش هوشمند الگوریتم ژنتیک[1] به منظور حداقل کردن تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ شبکه اقدام به تعیین مکان و اندازه بهینه مولدهای مقیاس کوچک[2] در شبکه توزیع با ساختار شعاعی شده است، که ژنراتورها قادر به تولید توان اکتیو و راکتیو هستند.
با توجه به پیشینه تحقیق، انگیزه اصلی این تحقیق ارتقاء بهره‌وری و عملکرد نیروگاه‌های ذخیره انرژی بزرگ در مقیاس بزرگ با استفاده از روش‌های نوآورانه و بهینه‌سازی است. مقاله به بررسی چالش‌ها و مسائل مرتبط با مدیریت این نیروگاه‌ها پرداخته و سپس راهکارهایی ارائه می‌دهد تا از طریق محدودیت‌هایی برای تعداد فرآیندهای شارژ و دشارژ بهینه‌سازی شوند. همچنین، الگوریتم جستجوی فاخته به عنوان یک روش قوی برای بهبود کارایی این نیروگاه‌ها معرفی شده و بهره‌برداری از آن در مدیریت بهینه آن‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد.
با توجه به شکاف مطالعاتی وجود در پیشینه پژوهش، این تحقیق به مسئله مدیریت نیروگاه‌های ذخیره انرژی بزرگ با توجه به محدودیت‌هایی که در فرآیندهای شارژ و دشارژ وجود دارد، اشاره می‌کند. همچنین، توجه به استفاده از الگوریتم جستجوی فاخته به عنوان روش بهینه‌سازی جدیدی برای بهبود عملکرد نیروگاه‌های ذخیره انرژی بزرگ از جمله مشکلات مطالعاتی این تحقیق است. این شکاف مطالعاتی نشان می‌دهد که مطالعات بیشتری در زمینه بهبود بهره‌وری و کاهش هزینه‌های انرژی از طریق بهبود مدیریت نیروگاه‌های ذخیره انرژی بزرگ با توجه به محدودیت‌ها و استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی می‌توانند انجام شوند.
هدف این مقاله افزایش کارایی شبکه‌های توزیع با استفاده از مدیریت یکپارچه نیروگاه ذخیره انرژی بزرگ با استفاده از گزینه‌های مدیریتی متنوع است. نوآوری‌های اصلی این مقاله به شرح زیر است:

۱. ارائه یک مدل بهینه‌سازی جدید برای هماهنگی مدیریت نیروگاه ذخیره انرژی مقیاس بزرگ با در نظر گرفتن گزینه‌های مدیریتی برای کنترل تعداد دفعات شارژ و دشارژ.
۲. ارائه الگوریتم جستجوی فاخته برای حل مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی و تضمین رسیدن به جواب‌های بهینه سراسری نسبت به سایر الگوریتم‌های موجود.

پس از ارائه مقدمه در بخش اول، مدل بهینه‌سازی و روش حل مسئله پیشنهادی در بخش دوم و سوم ارائه شده است. بخش چهارم، به مطالعه عددی اختصاص دارد. در نهایت، بخش پنجم مقاله را به پایان می‌رساند.

۲- مدل بهینه‌سازی نیروگاه ذخیره انرژی

در این بخش به ارائه مدل پیشنهادی می‌پردازیم. تابع هدف مسئله در معادله ۱ نشان داده شده است. تابع هدف ۱ شامل پنج عبارت است، شامل سه سود و دو هزینه، که در آن B_t^{esm} سود تجارت انرژی مدیریت ذخیره انرژی است، B_t^{trans} سود حاصل از کاهش هزینه دسترسی انتقال است، و B_t^{dfi} سود حاصل از به تعویق انداختن سرمایه‌گذاری تسهیلات از طریق مدیریت ذخیره انرژی است. که در آن C^{esp} هزینه سرمایه‌گذاری نیروگاه‌های ذخیره انرژی و C^{om} هزینه بهره‌برداری و نگهداری نیروگاه ذخیره انرژی و عامل سالانه در معادله(۱-ج) آمده است. ρ^{day} و ρ^{month} به ترتیب تعداد روزها و ماه‌های بهره‌برداری نیروگاه ذخیره

[1] Genetic algorithm (GA)
[2] Distributed generation (DG)

انرژی در یک سال هستند. t تعداد ساعات کار نیروگاه ذخیره انرژی در یک روز و در نهایت i و d به ترتیب تورم و نرخ تنزیل هستند.

معادلات (۱-الف) الی (۱-ث) برای نشان دادن جمله‌های استفاده شده در تابع هدف (۱)، از جمله سود تجارت انرژی، سود ناشی از کاهش هزینه دسترسی به انتقال، سود حاصل از سرمایه‌گذاری تسهیلات به تعویق افتادن، هزینه سرمایه‌گذاری نیروگاه‌های ذخیره انرژی و هزینه بهره‌برداری و نگهداری نیروگاه‌های ذخیره انرژی است. در اینجا C_t^{pr} قیمت انرژی در ساعت، P_t^{ch} و P_t^{dis} به ترتیب توان شارژ و دشارژ نیروگاه ذخیره انرژی هستند. در اینجا ω_l ، ω_m و ω_h به ترتیب قیمت خرید انرژی از شبکه انتقال در دوره‌های زمانی کم، متوسط و بالا هستند. در اینجا C^{inv} هزینه سرمایه‌گذاری نیروگاه ذخیره انرژی است و ΔN تعداد سال‌های معوق است. سال معوق ΔN به دست آمده توسط رابطه ۱-چ محاسبه می‌گردد، که α برای کاهش پیک بار و ϑ افزایش تقاضای بار در هر سال است. در اینجا C^p و C^w به ترتیب اوج و هزینه ویژه انرژی نیروگاه ذخیره انرژی هستند. P^{max} و W^{max} به ترتیب حداکثر توان و حداکثر ظرفیت انرژی نیروگاه ذخیره انرژی هستند. در اینجا C^{mf} و C^{mv} به ترتیب هزینه‌های ثابت و متغیر عملیات و نگهداری نیروگاه ذخیره انرژی هستند و سالانه توان دشارژ سالانه نیروگاه ذخیره انرژی است.

محدودیت‌های در نظر گرفته شده در مدل پیشنهادی که شامل نیروگاه‌های ذخیره انرژی است، در معادلات ۲ تا ۸ آورده شده است. وضعیت انرژی نیروگاه ذخیره انرژی در ساعات مختلف در رابطه ۲ آمده است، که در آن E_t سطح انرژی نیروگاه ذخیره انرژی و η بازده نیروگاه ذخیره انرژی است. قیود ۳ و ۴ به ترتیب محدودیت شارژ و دشارژ نیروگاه ذخیره انرژی را نشان می‌دهد، که در آن X ظرفیت نیروگاه ذخیره انرژی است و متغیر باینری Z_t حالت عملیاتی شارژ-دشارژ نیروگاه ذخیره انرژی را نشان می‌دهد. معادله ۵ محدودیت انرژی را برای هر یک از نیروگاه‌های ذخیره انرژی در ساعت t نشان می‌دهد. معادلات ۶ و ۷ تعداد مجاز عملیات شارژ و دشارژ را در محدوده آن‌ها ϱ^{ch} و ϱ^{dis} نشان می‌دهد. که در آن ϱ^{ch} و ϱ^{dis} تعداد شارژ-دشارژ مجاز نیروگاه ذخیره انرژی است. معادله ۸ محدودیت دیگری را برای کاهش بار پیک اعمال می‌کند، $\bar{D}_t$ و D_t به ترتیب حداکثر بار پست و بار پست را نشان می‌دهد.

$$\max \sum_{t\in T}\left\{\left(B_t^{esm}\rho^{day}\tau\right)+\left(B_t^{trans}\rho^{month}\tau\right)\right\}+\left(B^{dfi}\right)-\left(C^{esp}\right)-\left(C^{om}\rho^{month}\tau\right) \quad (۱)$$

$$B_t^{esm}=c_t^{pr}\left(p_t^{dis}-p_t^{ch}\right)\ \forall t\in T \quad (۱\text{-الف})$$

$$B_t^{trans}=\sum_{t\in\{low\ fee\}}\omega_l\left(p_t^{dis}-p_t^{ch}\right)+\sum_{t\in\{medium\ fee\}}\omega_m\left(p_t^{dis}-p_t^{ch}\right)+\sum_{t\in\{high\ fee\}}\omega_h\left(p_t^{dis}-p_t^{ch}\right) \quad (۱\text{-ب})$$

$$B^{dfi}=c^{inv}\left(1-\left(\frac{1+i}{1+d}\right)^{\Delta N}\right) \quad (۱\text{-پ})$$

$$C^{esp}=c^{p}\left(p^{max}\right)+c^{w}\left(w^{max}\right) \quad (۱\text{-ت})$$

$$C^{om}=c^{mf}\left(p^{max}\right)+c^{mv}\left(w^{annual}\right) \quad (۱\text{-ث})$$

$$\tau=\left(\frac{1+i}{1+d}\right)^{t} \quad (۱\text{-ج})$$

$$\Delta N=\frac{\log(1+\alpha)}{\log(1+\vartheta)} \quad (۱\text{-چ})$$

$$E_{t+1}=E_t+p_t^{dis}*1/\eta-p_t^{ch}*\eta\ \ \forall t\in T \quad (۲)$$

$$0\le p_t^{ch}*\eta\le XZ_t\quad \forall t\in T \quad (۳)$$

$$0\le p_t^{dis}*1/\eta\le X\left(1-Z_t\right)\ \forall t\in T \quad (۴)$$

$$0\le E_t\le X\ \ \forall t\in T \quad (۵)$$

$$\sum_{t\in T}\left(1-Z_t\right)\le \wp^{dis} \quad (۶)$$

$$\sum_{t\in T}Z_t\le \wp^{ch} \quad (۷)$$

$$D_t-p_t^{dis}+p_t^{ch}-\left(1-\alpha\right)\bar{D}_t\le 0 \quad (۸)$$

۳-الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی

الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی فاخته یکی از الگوریتم‌های جدیدتر بهینه‌سازی است که در مهندسی برق استفاده می‌شود. CSA یک الگوریتم فرا ابتکاری مبتنی بر جمعیت است که تحت تأثیر رفتار تولید مثلی پرندگان فاخته (کوکو) طراحی شده است.

هدف الگوریتم CSA یافتن راه‌حل بهینه با شبیه‌سازی رفتار تولیدمثلی پرندگان فاخته است. در ادامه توضیح نحوه کار CSA ارائه می‌شود.

۱- مقداردهی اولیهCSA: با ایجاد جمعیتی از پرندگان فاخته آغاز می‌شود، جایی که هر پرنده یک راه‌حل محتمل در فضای جستجو را نمایندگی می‌کند.

۲- پرواز لووی: پرندگان فاخته در جستجوی لانه‌های مناسب برای تخم‌گذاری پروازهای تصادفی انجام می‌دهند. درCSA، پرواز لووی که یک قدم جستجوی تصادفی است برای هر پرنده فاخته انجام می‌شود. پرواز لووی یک پیاده‌روی تصادفی است که از توزیع تقویتی پیروی می‌کند و امکان بررسی مسافت‌های دورتر در فضای جستجو را فراهم می‌کند.

۳- انتخاب و جایگزینی لانه: پرندگان فاخته تخم خود را در لانه‌های پرنده‌های دیگر گذاشته و آن‌ها را فریب می‌دهند تا نسل خود را بزرگ کنند. درCSA، پرندگان فاخته تخم (راه‌حل جدید) را در لانه‌های انتخاب شده به‌صورت تصادفی (راه‌حل‌های موجود) قرار می‌دهند. اگر تخم تازه گذاشته شده (راه‌حل جدید) دارای بهترین مقدار برازندگی نسبت به لانه میزبان (راه‌حل موجود) باشد، لانه میزبان با راه‌حل جدید جایگزین می‌شود.

۴- تکرار: فرآیند پرواز لووی و انتخاب لانه به‌طور تکراری برای چند نسل انجام می‌شود. این امر به پرندگان فاخته اجازه می‌دهد تا به‌تدریج در فضای جستجو برای یافتن راه‌حل‌های بهتر بگردند و استفاده کنند.

۵- استخراج راه‌حل: پس از برآورده شدن شرط پایانی، بهترین راه‌حل به‌دست آمده در طول فرآیند بهینه‌سازی به‌عنوان راه‌حل بهینه استخراج می‌شود. این راه‌حل نشان‌دهنده تنظیمات بهینه برای مسئله بهینه‌سازی مهندسی برق است.

۶- الگوریتم جستجوی فاخته نتایج قابل قبولی را در برنامه‌های مختلف مهندسی برق از جمله توزیع اقتصادی، مشارکت واحد، جریان برق بهینه و یکپارچگی انرژی تجدیدپذیر نشان داده است. این الگوریتم از سادگی، کارایی و توانایی مدیریت مسائل بهینه‌سازی تک هدفه و چند هدفه برخوردار است.

مراحل الگوریتم جستجوی فاخته برای مسئله بهینه‌سازی کلی به صورت زیر است:

۱- مقداردهی اولیه:

ایجاد جمعیت اولیه از نقاط به طور تصادفی در فضای جستجو

۲- محاسبه ارزش تابع هدف:

برای هر نقطه، مقدار تابع هدف را محاسبه کرده و به عنوان ارزش برازندگی آن نقطه را ثبت می‌کنیم.

۳- پرواز لووی:

برای هر نقطه، با استفاده از یک تابع تصادفی مانند توزیع لووی، یک قدم جدید را در فضای جستجو انجام می‌دهیم.

۴- بروزرسانی نقاط:

اگر نقطه جدید بهتر از نقطه قبلی باشد، نقطه قبلی را با نقطه جدید جایگزین می‌کنیم.

۵- جایگزینی با استفاده از الگوریتم جستجوی فاخته:

برای یک تعداد تخم مشخص (تعداد نقاط جدید)، یک نقطه جدید را با استفاده از الگوریتم جستجوی فاخته جایگزین می‌کنیم.

۶- تکرار:

مراحل ۳ تا ۵ را برای تعداد تکرار مشخص تکرار می‌کنیم.

۷- استخراج نقطه بهینه:

نقطه بهترین برازندگی که در طول تمام تکرارها به‌دست آمده است، به عنوان نقطه بهینه استخراج می‌شود.

شکل ۱ نشان‌دهنده فرایند بهینه‌سازی در الگوریتم جستجوی فاخته است. الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی فاخته (COA) یک الگوریتم بهینه‌سازی فرا ابتکاری است که از رفتار فاخته‌های نر برای یافتن بهترین زیستگاه برای تخم‌گذاری تقلید می‌کند. این الگوریتم برای بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع با بازآرایی استفاده می‌شود.

در شکل ۱، فرایند بهینه‌سازی COA برای شبکه توزیع با بازآرایی نشان داده شده است. فرایند به شرح زیر است:

۱- مقداردهی اولیه جمعیت فاخته‌ها: در ابتدا، یک جمعیت اولیه از فاخته‌ها با موقعیت‌های تصادفی در شبکه توزیع ایجاد می‌شود. موقعیت هر فاخته نشان‌دهنده یک آرایه بازآرایی برای شبکه توزیع است.

۲- شعاع تخم‌گذاری برای هر فاخته را مشخص کن: برای هر فاخته، یک شعاع تخم‌گذاری مشخص می‌شود. این شعاع نشان می‌دهد که فاخته تا چه فاصله‌ای می‌تواند از موقعیت فعلی خود حرکت کند.

۳- تمامی فاخته‌ها را به سمت محیط جدید حرکت بده: هر فاخته با توجه به شعاع تخم‌گذاری خود به سمت محیط جدید حرکت می‌کند.

۴- تخم‌گذاری در لانه‌های مختلف: هر فاخته در لانه‌های مختلف تخم می‌گذارد. یک لانه نشان‌دهنده یک آرایه بازآرایی جدید برای شبکه توزیع است.

۵- برخی تخم‌ها شناسایی شده و از بین می‌روند: برخی از تخم‌ها شناسایی می‌شوند و از بین می‌روند. این تخم‌ها نشان دهنده آرایه‌های بازآرایی نامناسب هستند.

۶- جوامع فاخته‌ای را خوشه‌بندی کن: فاخته‌ها بر اساس موقعیت خود در شبکه توزیع خوشه‌بندی می‌شوند.

۷- آیا تعداد جمعیت بیشتر از مقدار بیشینه است؟ اگر تعداد جمعیت بیشتر از مقدار بیشینه باشد، فاخته‌های ساکن در بدترین زیستگاه‌ها از بین می‌روند.

۸- بهترین زیستگاه برای مهاجرت را انتخاب کن: بهترین زیستگاه برای مهاجرت انتخاب می‌شود. این زیستگاه نشان‌دهنده آرایه بازآرایی بهینه برای شبکه توزیع است.

۹- شروع فرآیند تخم‌گذاری فرآیند تخم‌گذاری دوباره شروع می‌شود.

۱۰- تابع هدف مسأله را ارزیابی کن: تابع هدف مسأله ارزیابی می‌شود.

۱۱- الگوریتم به شرط توقف رسیده است؟ اگر الگوریتم به شرط توقف رسیده باشد، فرایند بهینه‌سازی متوقف می‌شود.

در این الگوریتم، تابع هدف مسأله رابطه ۱ است. الگوریتم COA با تکرار مراحل ۲ تا ۱۱، به تدریج به سمت آرایه بازآرایی بهینه حرکت می‌کند.

ویژگی‌های الگوریتم COA عبارت‌اند از:

- ساده و کارآمد: الگوریتم COA یک الگوریتم ساده و کارآمد است که می‌تواند برای حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده استفاده شود.
- قابل انعطاف: الگوریتم COA قابل انعطاف است و می‌توان آن را برای حل طیف وسیعی از مسائل بهینه‌سازی استفاده کرد.
- مقیاس‌پذیر: الگوریتم COA مقیاس‌پذیر است و می‌توان آن را برای شبکه‌های توزیع بزرگ استفاده کرد.

الگوریتم COA برای بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع با بازآرایی نتایج خوبی حاصل کرده است. این الگوریتم می‌تواند به کاهش هزینه شارژ و دشارژ نیروگاه‌های باتری کمک کند.

طبق شکل ۱ مانند الگوریتم‌های تکاملی دیگر، الگوریتم بهینه‌سازی فاخته کار خود را با تولید یک جمعیت اولیه از فاخته‌ها آغاز می‌کند. جمعیت اولیه فاخته‌ها در لانه‌ی پرندگان پرورش می‌یابند. تخم‌هایی که بیشترین شباهت را با تخم‌های پرنده میزبان دارند، فرصت رشد و تبدیل شدن به فاخته‌های بالغ را دارا خواهند بود. سایر تخم‌ها توسط میزبان شناسایی شده و سپس

از بین می‌روند. فاخته‌ها برای ارزیابی شرایط زندگی به منظور بقا، به محیط پیرامونی خود توجه می‌کنند. محیطی که تعداد بیشتری تخم‌های فاخته در آن رشد کنند و به فاخته‌های بالغ تبدیل شوند، بیشترین سود را به دست خواهد آورد. به عبارت دیگر، فاخته‌ها در محیطی تخم‌گذاری می‌کنند که نرخ بقای تخم‌ها بیشینه باشد. تخم‌هایی که زنده می‌مانند و به فاخته‌های بالغ تبدیل می‌شوند، در محل زندگی خود جوامعی را تشکیل می‌دهند که از تعدادی فاخته تشکیل شده‌اند. هر جامعه از فاخته‌ها در یک زیستگاه خاص از محیط زندگی خود ساکن هستند. زیستگاهی که دارای بیشترین منابع غذایی و فرصت بقا برای فاخته‌ها باشد، به عنوان مقصد مهاجرتی برای جوامع دیگر انتخاب می‌شود. جوامع مهاجرت‌کننده به نزدیک‌ترین زیستگاه بهترین مکان سکونت را انتخاب می‌کنند. بر اساس تعداد تخم‌های هر فاخته و فاصله فاخته تا بهترین زیستگاه، یک "منطقه تخم‌گذاری" برای هر فاخته تعیین می‌شود. سپس، فاخته‌ها به صورت تصادفی در لانه‌های موجود در این منطقه تخم‌گذاری می‌کنند. این فرایند تا زمانی ادامه می‌یابد که بهترین نقطه با بیشترین سود (بیشترین منابع غذایی و بالاترین فرصت بقا) شناسایی شود، و سپس بیشتر فاخته‌ها به این نقطه همگرا می‌شوند. در ادامه، مراحل الگوریتم بهینه‌سازی فاخته توضیح داده خواهند شد.

برای حل یک مسأله بهینه‌سازی، در مرحله اول، مقادیر متغیرهای مسأله را باید در قالب یک آرایه نمایش دهیم. در الگوریتم بهینه‌سازی فاخته، این آرایه نمایش دهنده مقادیر متغیرهای مسأله، به عنوان "زیستگاه[1]" شناخته می‌شود. هر زیستگاه، یک نمونه یا یک جواب کاندید برای مسأله بهینه‌سازی است. جواب‌های کاندید در طی یک فرایند تکاملی به جواب بهینه سراسری همگرا می‌شوند. در یک مسأله بهینه‌سازی با NVar بُعد، زیستگاه به عنوان یک آرایه به ابعاد 1×NVar تعریف می‌شود. این آرایه مکان کنونی فاخته را در محیط نشان می‌دهد. شکل زیر نحوه تعریف این آرایه را نشان می‌دهد:

$$Habitat = [x1, x2, ..., xn] \quad (۹)$$

در اینجا xi نماینده مقدار متغیر iام در زیستگاه است.

مقادیر متغیرهای (x1,x2,x3,…, xNVar) در اینجا به صورت اعشاری هستند. سطح سود یک زیستگاه، توسط ارزیابی تابع هدف fp در زیستگاهی که شامل مقادیر (x1,x2,x3,…, xNVar) است، تعیین می‌شود. بنابراین، تابع هدف برای یک مسأله بهینه‌سازی به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$fp = f\left(x1, x2, x3, ..., xNvar\right) \quad (۱۰)$$

در اینجا، fp نشان‌دهنده سطح سود مرتبط با زیستگاه است که براساس مقادیر (x1,x2,x3,…, xNVar) محاسبه می‌شود.

گر هدف کمینه‌سازی یک تابع هزینه باشد، می‌توانید از روش بیشینه‌سازی تابع سود برای کمینه‌سازی تابع هزینه استفاده کنید. این کار از طریق تبدیل تابع هزینه به تابع سود معکوس انجام می‌شود. به عبارت دیگر، می‌توانید تابع هزینه را به صورت منفی از تابع سود بیشینه‌سازی شده نمایش دهید. به عنوان مثال، چنانچه تابع هزینه شما با f_cos(x1,x2,x3,…, xNVar) نمایش داده شود، تابع سود مرتبط با آن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$fp = -f_cost\left(x1, x2, x3, ..., xNvar\right) \quad (۱۱)$$

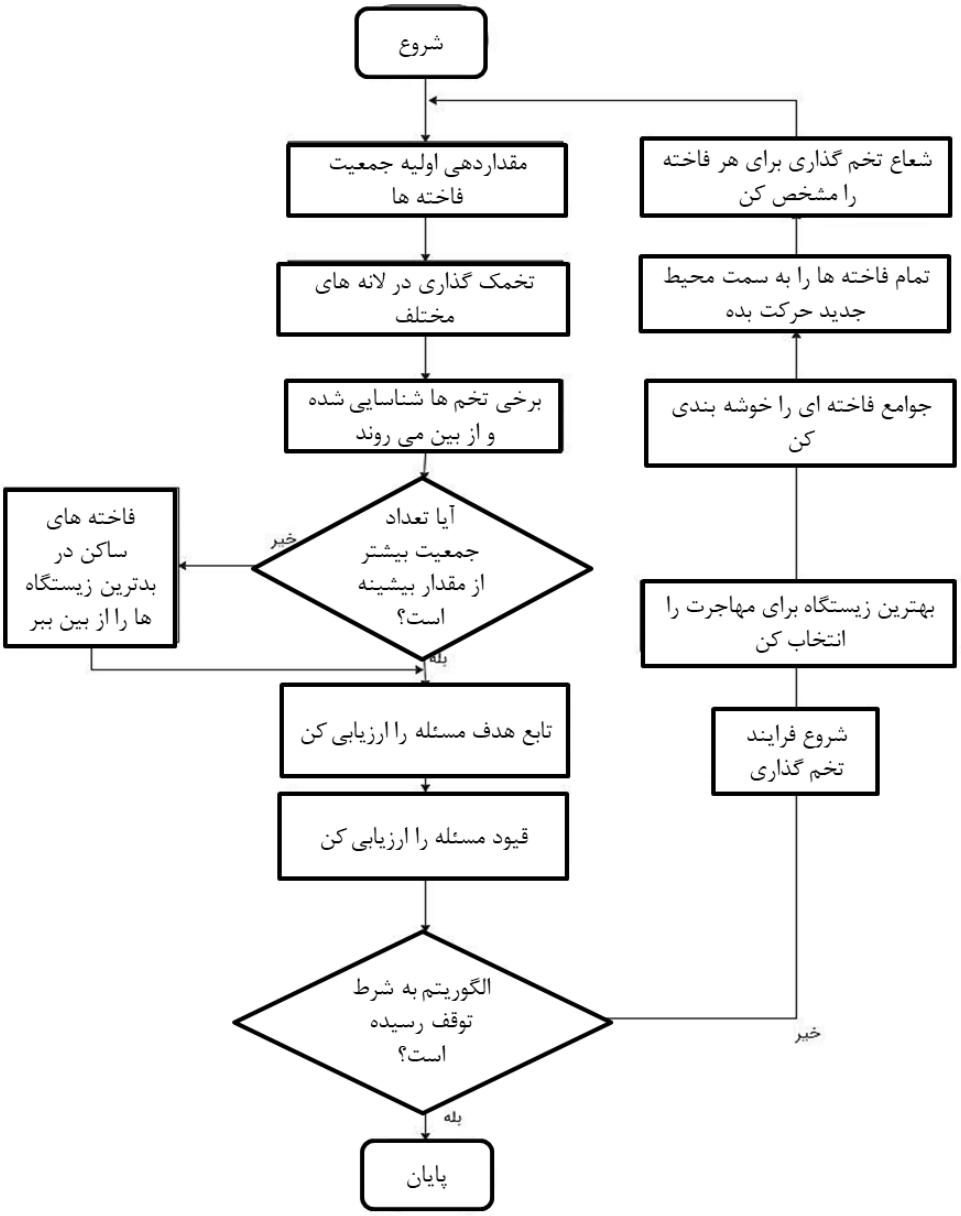
با استفاده از این تبدیل، می‌توانید با بیشینه کردن تابع سود fp ، مقدار کمینه متناظر تابع هزینه را بدست آورید. فرآیند تکاملی الگوریتم بهینه‌سازی فاخته به صورت زیر است: در ابتدا، یک ماتریس با اندازه NPopulation×NVar از زیستگاه‌های کاندید تولید می‌شود. سپس برای هر زیستگاه تولید شده، یک تعداد تصادفی از تخم‌های فاخته در نظر گرفته می‌شود. در طبیعت، هر فاخته به طور میانگین بین ۵ تا ۲۰ تخم می‌گذارد. این اعداد حداقل و حداکثر مجاز تعداد تخم‌های متغیرها در هر زیستگاه را تشکیل می‌دهند.

عادت دیگر فاخته‌ها در جهان واقعی این است که معمولاً در فاصله بیشینه از زیستگاه واقعی خود تخم‌گذاری می‌کنند. در الگوریتم فاخته، به این فاصله بیشینه، شعاع تخم‌گذاری (Egg Laying Radius) گفته می‌شود. در یک مسأله بهینه‌سازی، شعاع تخم‌گذاری برای هر فاخته، با توجه به تعداد کلی تخم‌ها و حداقل (VarHigh) و حداکثر (VarLow) مقادیر متغیرها، محاسبه می‌شود. بنابراین، شعاع تخم‌گذاری به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$EggLayingRadius = \left(VarLow - VarHigh\right) / \left(TotalEggs - 1\right) \quad (۱۲)$$

[1] Habitat

در اینجا، Egg Laying Radius نشان‌دهنده شعاع تخم‌گذاری است که به عنوان فاصله بین تخم‌ها در نظر گرفته می‌شود. در اینجا TotalEggs نشان‌دهنده تعداد کلی تخم‌ها در یک فاخته است و VarLow و VarHigh به ترتیب نشان‌دهنده حداقل و حداکثر مقادیر متغیرها هستند.



شکل ۱: فرایند الگوریتم فاخته
Figure 1. Cuckoo algorithm process

۴-نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، یک مطالعه موردی ارائه می‌شود تا اعتبار مدل پیشنهادی و نتایج آن در شرایط مختلف تحلیل شود. داده‌های بار و قیمت از منبع [۳۰] به دست آمده است. نوع نگهداری انرژی در این مطالعه باتری وانادیوم رداکس[1] (VRB) است که در منبع [۳۰] ذکر شده است. مدل ریاضی پیشنهادی (معادلات ۸-۱) با استفاده از الگوریتم تکاملی پیشنهادی حل شده است. موارد مورد بررسی برای تحلیل مدل پیشنهادی به شرح زیر است:

[1] Vanadium redox battery (VRB)

حالت اول: بدون در نظر گرفتن محدودیت برای تعداد دفعات شارژ و دشارژ نیروگاه ذخیره انرژی.
حالت دوم: در نظر گرفتن محدودیت تعداد دفعات شارژ و دشارژ نیروگاه ذخیره انرژی.
در این مطالعه، نرخ تورم و نرخ تخفیف به ترتیب برابر با ۱/۵٪ و ۹٪ در نظر گرفته شده است. بار پیک فعلی و افزایش تقاضای بار هر سال به ترتیب برابر با ۱۰٪ و ۱/۵٪ هستند. جدول ۱ پارامترهای مورد نظر برای نیروگاه ذخیره‌سازی انرژی نوع VRB را نشان می‌دهد. جدول۱، پارامترهای باتری وانادیوم رداکس (VRB) را نشان می‌دهد که به عنوان یک نیروگاه ذخیره‌سازی انرژی استفاده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کارایی این نوع ذخیره‌سازی برابر با ۷۰٪ در نظر گرفته شده است. در این مقاله، هزینه سرمایه‌گذاری یک نیروگاه ذخیره‌سازی انرژی برابر با ۳۰۰،۰۰۰ دلار آمریکا در نظر گرفته شده است، به طبق منبع [۳۰].

جدول ۱: پارامترهای نیروگاه ذخیره‌سازی انرژی
Table 1: Energy storage plant parameters

نوع	VRB
بازده (٪)	۷۰
هزینه پیک ($/kW)	۴۲۶
هزینه انرژی ($/kWh)	۱۰۰
هزینه ثابت بهره‌برداری ($/kW/year)	۹
هزینه سرمایه‌گذاری ($)	۳۰۰۰۰۰

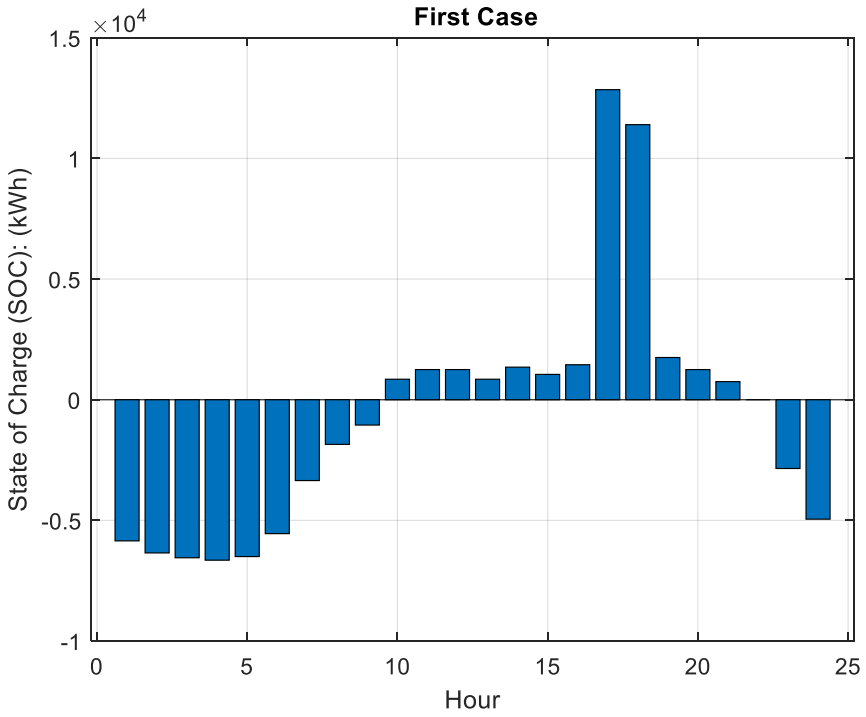
در جدول ۲ نتایج شبیه‌سازی حالت اول و دوم نشان داده شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی در جدول ۲، می‌توانیم تجزیه و تحلیلی برای دو حالت مختلف ارائه دهیم:
حالت اول: بدون محدودیت تعداد دفعات شارژ و دشارژ نیروگاه ذخیره انرژی؛ در این حالت، سود حاصل از سیستم ۶۲۸۹ دلار است. این مقدار نشان‌دهنده درآمد کلی حاصل از عملیات شارژ و دشارژ نیروگاه ذخیره انرژی در طول دوره زمانی است. توان پیک دشارژ؛ با در نظر گرفتن عدم محدودیت تعداد دفعات دشارژ، توان پیک دشارژ برابر با ۱۲۸۵۰ کیلووات است. این مقدار نشان‌دهنده حداکثر توانی است که نیروگاه ذخیره انرژی می‌تواند در هر زمان راه‌اندازی کند. توان پیک شارژ؛ در این حالت، توان پیک شارژ نیز برابر با ۶۶۵۰ کیلووات است. این مقدار نشان‌دهنده حداکثر توانی است که سیستم شارژ نیروگاه ذخیره انرژی می‌تواند در هر زمان ارائه دهد.
حالت دوم: با محدودیت تعداد دفعات شارژ و دشارژ نیروگاه ذخیره انرژی؛ سود، در این حالت، سود کلی کاهش یافته و به ۳۶۸۰ دلار می‌رسد. این مقدار نشان می‌دهد که محدودیت تعداد دفعات شارژ و دشارژ تأثیر قابل توجهی بر روی سود سیستم دارد. توان پیک دشارژ، با در نظر گرفتن محدودیت تعداد دفعات دشارژ، توان پیک دشارژ نیز به ۶۲۸۵ کیلووات کاهش می‌یابد. این مقدار نشان‌دهنده توان حداکثری است که می‌توان نیروگاه ذخیره انرژی راه‌اندازی کرد. توان پیک شارژ، با توجه به محدودیت تعداد دفعات شارژ، توان پیک شارژ به ۶۶۵۰ کیلووات ثابت می‌ماند و تحت تأثیر محدودیت قرار نمی‌گیرد.

در این تجزیه و تحلیل، می‌توانیم مشاهده کنیم که در حالت اول بدون محدودیت، سود بیشتر و توان پیک دشارژ بیشتری در دسترس است. اما در حالت دوم با محدودیت تعداد دفعات شارژ و دشارژ، سود کاهش می‌یابد و توان پیک دشارژ نیز محدودتر می‌شود. این تحلیل به ما کمک می‌کند تا تفاوت‌ها و تأثیر محدودیت‌ها را در دو حالت مختلف مشاهده کنید.

جدول ۲: نتایج حاصل از شبیه‌سازی و مقایسه حالت‌های مختلف
Table 2: The results of simulation and comparison of different modes

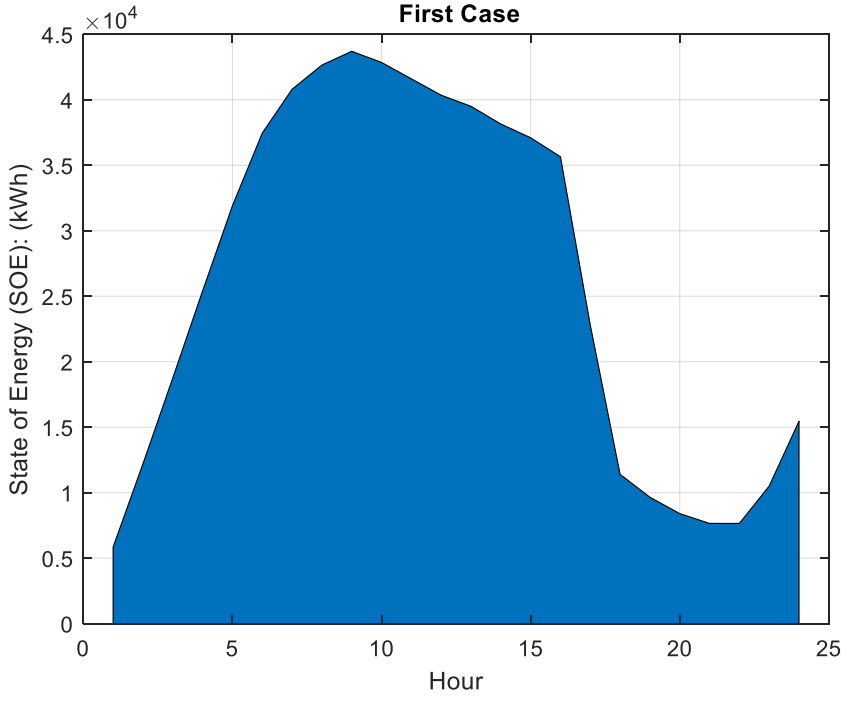
حالت	اول	دوم
سود ($)	۶۲۸۹	۳۶۸۰
توان پیک دشارژ (kW)	۱۲۸۵۰	۶۲۸۵
توان پیک شارژ (kW)	۶۶۵۰	۶۶۵۰

شکل ۲ وضعیت شارژ و دشارژ نیروگاه ذخیره انرژی را در حالت اول نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که وضعیت شارژ و دشارژ نیروگاه ذخیره انرژی در حالت دوم طبق شکل ۴ کاملاً با حالت اول متفاوت است. این ثابت می‌کند که علاوه بر تاثیر جدی محدودیت شارژ و دشارژ بر روی تابع هدف مسئله بر روی شارژ و دشارژ نیروگاه ذخیره انرژی هم تأثیر گذاشته است. در این شکل‌ها ناحیه منفی y نشان‌دهنده ناحیه شارژ و مثبت y نشان‌دهنده ناحیه دشارژ نیروگاه است. به همین ترتیب شکل‌های ۲ و ۴ نشان از وضعیت انرژی نیروگاه ذخیره انرژی در حالت اول و دوم است.



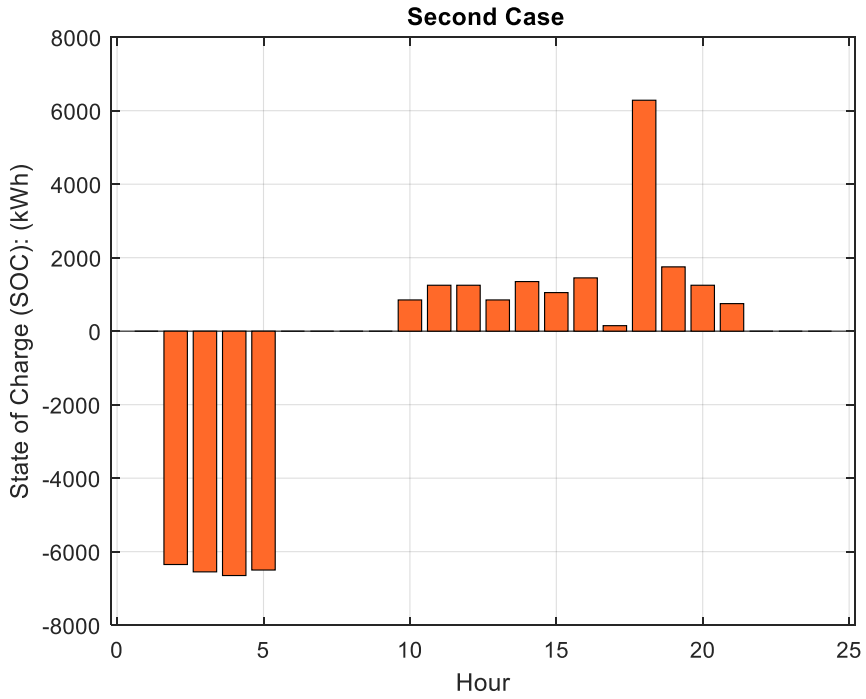
شکل ۲: توان شارژ و دشارژ باتری در حالت اول

Figure 2: Battery charging and discharging power in the first case



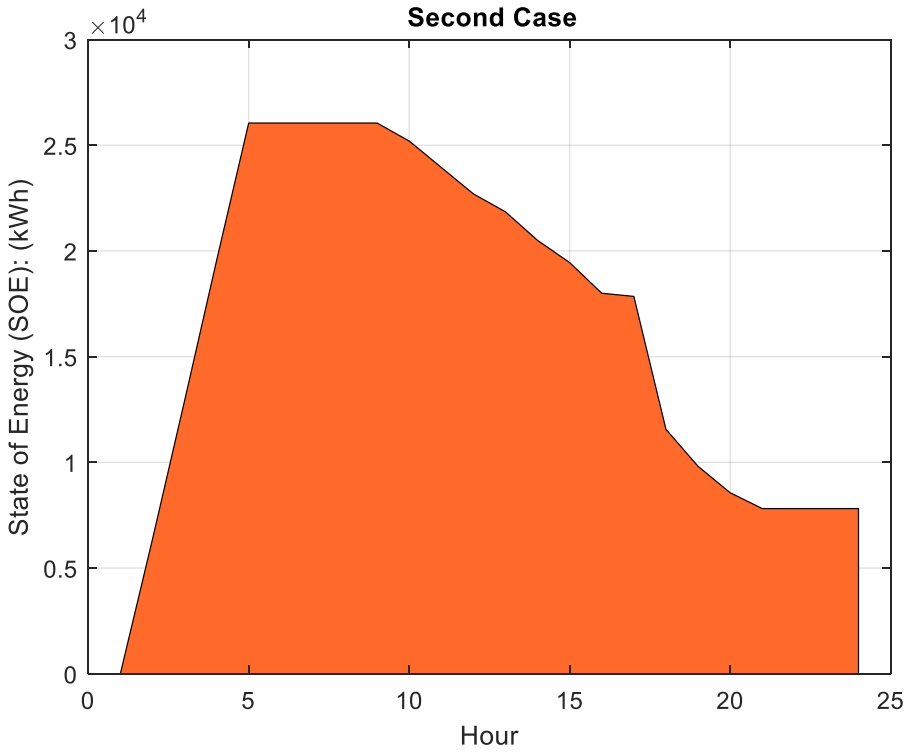
شکل ۳: وضعیت انرژی باتری در حالت اول

Figure 3: Battery energy status in the first case



شکل ۴: توان شارژ و دشارژ باتری در حالت دوم

Figure 4: Battery charging and discharging power in the second case



شکل ۵: وضعیت انرژی باتری در حالت دوم

Figure 5: Battery energy status in the second case

۴-۱- مقایسه

برای نشان دادن برتری روش پیشنهادی نسبت به دیگر روش‌های موجود، نتایج به دست آمده با سایر الگوریتم‌های تکاملی مقایسه شده است. در جدول ۳ مقایسه‌ای بین تابع هزینه به دست آمده در حالت اول و دوم نسبت به روش بهینه‌سازی ازدحام

ذرات[1] (PSO)، الگوریتم ژنتیک (GA) و بهینه‌سازی گرگ خاکستری[2](GWA) آمده است. با توجه به مقایسه‌ی نتایج جدول ۳، می‌توان مشاهده کرد که الگوریتم پیشنهادی در مسئله شارژ و دشارژ نیروگاه ذخیره انرژی نسبت به سایر روش‌های بهینه‌سازی (PSO، GA، GWA) عملکرد بهتری داشته است. در حالت اول، تابع هدف حالت اول با استفاده از الگوریتم پیشنهادی به مقدار ۶۲۸۹ دلار رسید، در حالی که روش PSO به ۵۳۴۹ دلار، روش GA به ۵۱۹۸ دلار و روش GWA به ۶۰۴۱ دلار رسیدند. این نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی قادر بوده است سود بیشتری را نسبت به سایر روش‌ها برای حالت اول به دست آورد. همچنین، در حالت دوم نیز الگوریتم پیشنهادی با تابع هدف به مقدار ۳۶۸۰ دلار بهترین نتیجه را کسب کرده است. در مقابل، روش PSO به ۲۷۸۰ دلار، روش GA به ۲۴۷۰ دلار و روش GWA به ۳۴۵۴ دلار رسیدند. این نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی در حالت دوم نیز قادر بوده است سود بیشتری را نسبت به روش‌های دیگر به دست آورد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم پیشنهادی در مسئله شارژ و دشارژ نیروگاه ذخیره انرژی بهترین عملکرد را از خود نشان داده است. نتایج بهبود یافته الگوریتم پیشنهادی می‌تواند به محققان و صنعتگران در ارتقای و بهینه‌سازی سیستم‌های ذخیره انرژی کمک کند و عملکرد آن‌ها را بهبود بخشد.

الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با روش‌های PSO، GA و GWA در دو حالت مختلف بهترین عملکرد را از خود نشان داده است. در حالت اول با تابع هدف ۶۲۸۹ دلار بهترین نتیجه را ارائه داده و در حالت دوم نیز با تابع هدف ۳۶۸۰ دلار به بهترین نتیجه دست یافته است. این نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی توانسته است در بهبود عملکرد نسبت به روش‌های مقایسه شده موفق باشد. به ویژه، افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها از جمله برتری‌های اصلی این الگوریتم است. در هر دو حالت، نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی به عنوان یک روش بهینه‌سازی کارآمد و قابل اعتماد در مسائل بهینه‌سازی عمل کرده و بهبود چشمگیری در سود و عملکرد مسائل مورد بررسی ایجاد کرده است.

جدول ۳: مقایسه الگوریتم پیشنهادی با سایر روش‌ها
Table 3: Comparison of the proposed algorithm with other methods

روش	الگوریتم پیشنهادی	PSO	GA	GWA
تابع هدف حالت اول (دلار)	۶۲۸۹	۵۳۴۹	۵۱۹۸	۶۰۴۱
تابع هدف حالت دوم (دلار)	۳۶۸۰	۲۷۸۰	۲۴۷۰	۳۴۵۴

۵-نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک رویکرد اقتصادی برای مدیریت انرژی در پست با نیروگاه ذخیره انرژی با در نظر گرفتن گزینه‌های مدیریتی در مسئله ارائه شده است. برای این منظور مدل ارائه شده قادر به کنترل تعداد دفعات شارژ و دشارژ است. مدل پیشنهادی چندین مزیت دارد، از جمله انعطاف‌پذیری کافی برای تعداد شارژها و دشارژ مجاز. علاوه بر این، مدل پیشنهادی با استفاده از الگوریتم جستجوی فاخته حل شده است. نتایج نشان داد که در مسئله شارژ و دشارژ نیروگاه ذخیره انرژی الگوریتم پیشنهادی در این مسئله بهبود و ارتقای قابل توجهی نسبت به روش‌های بهینه‌سازی معمول مانند PSO، GA و GWA داشته است. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی باعث افزایش سود بیشتری می‌شود. در هر دو حالت اول و دوم، الگوریتم پیشنهادی بهترین نتیجه را ارائه کرده و تابع هدف را به مقدار بیشتری از سایر روش‌ها بهبود داده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم پیشنهادی مناسب‌ترین روش بهینه‌سازی برای مسئله شارژ و دشارژ نیروگاه ذخیره انرژی است. این الگوریتم قابلیت افزایش سود و بهبود عملکرد سیستم‌های ذخیره انرژی را دارد و می‌تواند به محققان و صنعتگران در بهینه‌سازی و بهبود این سیستم‌ها کمک کند. در نتیجه، انتخاب الگوریتم پیشنهادی در مسئله شارژ و دشارژ نیروگاه ذخیره انرژی به عنوان یک روش بهینه‌سازی قابل اعتماد و کارآمد توصیه می‌شود و می‌تواند بهبود چشمگیری در سود و عملکرد این سیستم‌ها ایجاد کند. در نتیجه گیری، الگوریتم پیشنهادی نه تنها بهبود قابل توجهی در مسائل شارژ و دشارژ نیروگاه ذخیره انرژی ایجاد کرده است بلکه نتایج نشان می‌دهند که این الگوریتم به مقدار زیادی از روش‌های معمول بهینه‌سازی مانند PSO، GA و GWA برتری دارد. به عنوان مثال، الگوریتم پیشنهادی مقدار تابع هدف را به ۶۲۸۹ دلار ارتقاء داده است در حالی که بهترین روش موجود (PSO)

[1] Particle swarm optimization (PSO)
[2] Grey Wolf Algorithm (GWA)

مقدار ۵۳۴۹ دلار را داشته است. این نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی به حداقل ۱۷٪ برتری نسبت به PSO دارد. در کل، الگوریتم پیشنهادی از نظر عملکرد بهبود معناداری داشته و به عنوان روشی کارآمد و قابل اعتماد برای مسائل شارژ و دشارژ نیروگاه ذخیره انرژی توصیه می‌شود.

مراجع

[1] B. N. Silva, M. Khan and K. Han, "Towards sustainable smart cities: A review of trends, architectures, components, and open challenges in smart cities," *Sustainable Cities and Society*, vol. 38, pp. 697-713, 2018, doi: 10.1016/j.scs.2018.01.053.

[2] F. C. Robert, G. S. Sisodia and S. Gopalan, "A critical review on the utilization of storage and demand response for the implementation of renewable energy microgrids," *Sustainable cities and society*, vol. 40, pp. 735-745, 2018, doi: 10.1016/j.scs.2018.04.008.

[3] M. Motalleb, P. Siano and R. Ghorbani, "Networked stackelberg competition in a demand response market," *Applied energy*, vol. 239, pp. 680-691, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.174.

[4] F. Keck, M. Lenzen, A. Vassallo and M. Li, "The impact of battery energy storage for renewable energy power grids in Australia," *Energy*, vol. 173, pp. 647-657, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.02.053.

[5] S.-Y. Lee, I.-B. Lee and J. Han, "Design under uncertainty of carbon capture, utilization and storage infrastructure considering profit, environmental impact, and risk preference," *Applied Energy*, vol. 238, pp. 34-44, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.058.

[6] X. Wen, Y. Yu, Z. Xu, J. Zhao and J. Li, "Optimal distributed energy storage investment scheme for distribution network accommodating high renewable penetration," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, p. e12002, 2019, doi: 10.1002/2050-7038.12002.

[7] J. F. Carneiro, C. R. Matos and S. Van GESPel, "Opportunities for large-scale energy storage in geological formations in mainland Portugal," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 99, pp. 201-211, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2018.09.036.

[8] M. Sedghi, A. Ahmadian and M. Aliakbar-Golkar, "Optimal storage planning in active distribution network considering uncertainty of wind power distributed generation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 1, pp. 304-316, 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2404533.

[9] Y. Zheng *et al.*, "Optimal operation of battery energy storage system considering distribution system uncertainty," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 9, no. 3, pp. 1051-1060, 2018, doi: 10.1109/TSTE.2017.2762364.

[10] M. Katsanevakis, R. A. Stewart and L. Junwei, "A novel voltage stability and quality index demonstrated on a low voltage distribution network with multifunctional energy storage systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 171, pp. 264-282, 2019, doi: 10.1016/j.epsr.2019.01.043.

[11] B. Guo, M. Niu, X. Lai and L. Chen, "Application research on large-scale battery energy storage system under Global Energy Interconnection framework," *Global Energy Interconnection*, vol. 1, no. 1, pp. 79-86, 2018, doi: 10.14171/j.2096-5117.gei.2018.01.010.

[12] V. Mehra, R. Amatya and R. J. Ram, "Estimating the value of demand-side management in low-cost, solar micro-grids," *Energy*, vol. 163, pp. 74-87, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.07.204.

[13] M. Daghi, M. Sedghi, A. Ahmadian and M. Aliakbar-Golkar, "Factor analysis based optimal storage planning in active distribution network considering different battery technologies," *Applied energy*, vol. 183, pp. 456-469, 2016. doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.190

[14] H. Xing, H. Cheng, Y. Zhang and P. Zeng, "Active distribution network expansion planning integrating dispersed energy storage systems," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 3, pp. 638-

644, 2016, doi: 10.1049/iet-gtd.2015.0411.

[15] A. Azizivahed *et al*., "Energy Management Strategy in Dynamic Distribution Network Reconfiguration considering Renewable Energy Resources and Storage," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2019, doi: 10.1109/TSTE.2019.2901429.

[16] Y. Gao, Q. Ai, M. Yousif and X. Wang, "Source-load-storage consistency collaborative optimization control of flexible DC distribution network considering multi-energy complementarity," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 107, pp. 273-281, 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.11.033.

[17] X. Zhang and A. J. Conejo, "Coordinated investment in transmission and storage systems representing long- and short-term uncertainty," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 6, pp. 7143-7151, 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2018.2842045.

[18] M. Motalleb and R. Ghorbani, "Non-cooperative game-theoretic model of demand response aggregator competition for selling stored energy in storage devices," *Applied Energy*, vol. 202, pp. 581-596, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.05.186.

[19] A. Ahmadian, M. Sedghi, H. Fgaier, B. Mohammadi-ivatloo, M. A. Golkar and A. Elkamel, "PEVs Data Mining Based on Factor Analysis Method for Energy Storage and DG Planning in Active Distribution Network: Introducing S2S Effect," *Energy*, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.03.097.

[20] N. Yan, B. Zhang, W. Li and S. Ma, "Hybrid Energy Storage Capacity Allocation Method for Active Distribution Network Considering Demand Side Response," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 29, no. 2, pp. 1-4, 2019, doi: 10.1109/TASC.2018.2889860.

[21] L. A. Wong, V. K. Ramachandaramurthy, P. Taylor, J. Ekanayake, S. L. Walker and S. Padmanaban, "Review on the optimal placement, sizing and control of an energy storage system in the distribution network," *Journal of Energy Storage*, vol. 21, pp. 489-504, 2019, doi: 10.1016/j.est.2018.12.015.

[22] J. Li, Z. Xu, J. Zhao, S. Chai, Y. Yu and X. Xu, "Model Predictive Control Based Ramp Minimization in Active Distribution Network Using Energy Storage Systems," *Electric Power Components and Systems*, pp. 1-11, 2019, doi: 10.1080/15325008.2019.1577929.

[23] L. Bai, T. Jiang, F. Li, H. Chen and X. Li, "Distributed energy storage planning in soft open point based active distribution networks incorporating network reconfiguration and DG reactive power capability," *Applied Energy*, vol. 210, pp. 1082-1091, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.07.004.

[24] J. Lizana, D. Friedrich, R. Renaldi and R. Chacartegui, "Energy flexible building through smart demand-side management and latent heat storage," *Applied energy*, vol. 230, pp. 471-485, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.08.065.

[25] N. L. Rajakovic and V. M. Shiljkut, "Long-term forecasting of annual peak load considering effects of demand-side programs," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 6, no. 1, pp. 145-157, 2018, doi: 10.1007/s40565-017-0328-6.

[26] T. M. Gür, "Review of electrical energy storage technologies, materials and systems: challenges and prospects for large-scale grid storage," *Energy & Environmental Science*, vol. 11, no. 10, pp. 2696-2767, 2018, doi: 10.1039/C8EE01419A.

[27] N. Jayasekara, M. A. Masoum and P. J. Wolfs, "Optimal operation of distributed energy storage systems to improve distribution network load and generation hosting capability," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 7, no. 1, pp. 250-261, 2016, doi: 10.1109/TSTE.2015.2487360.

[28] K. Bangash, M. Farrag and A. Osman, "Investigation of Energy Storage Batteries in Stability Enforcement of Low Inertia Active Distribution Network," *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy*, vol. 4, no. 1, p. 1, 2019, doi: 10.1007/s40866-018-0059-4.

[29] G. Shaoyun, X. Zhengyang, L. Hong, L. Mengyi, Y. Zan and Z. Chenghao, "Coordinated Voltage Control for Active Distribution Network Considering the Impact of Energy Storage," *Energy Procedia*, vol. 158, pp.

1122-1127, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.277.

[30] F. A. Chacra, P. Bastard, G. Fleury and R. Clavreul, "Impact of energy storage costs on economical performance in a distribution substation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 684-691, 2005, doi: 10.1109/TPWRS.2005.846091.

[31] X. Li and S. Wang, "Energy management and operational control methods for grid battery energy storage systems," in *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 7, no. 5, pp. 1026-1040, Sept. 2021, doi: 10.17775/CSEEJPES.2019.00160.

[32] I. Alcaide-Godinez, F. Bai, T. K. Saha and R. Memisevic, "Contingency Reserve Evaluation for Fast Frequency Response of Multiple Battery Energy Storage Systems in a Large-scale Power Grid," in *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 9, no. 3, pp. 873-883, May 2023, doi: 10.17775/CSEEJPES.2022.01050.

[33] N. Pang, Q. Meng and M. Nan, "Multi-Criteria Evaluation and Selection of Renewable Energy Battery Energy Storage System-A Case Study of Tibet, China," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 119857-119870, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3107192.

[34] C. O. Pereira, R. Torquato, W. Freitas and H. Ding, "Wide-Scale Assessment of the Payback of a Battery Energy Storage System Connected to MV Customers," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 14, no. 3, pp. 1909-1912, July 2023, doi: 10.1109/TSTE.2023.3235213.

[35] S. Li, C. Ye, Y. Ding, Y. Song and M. Bao, "Reliability Assessment of Renewable Power Systems Considering Thermally-Induced Incidents of Large-Scale Battery Energy Storage," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 38, no. 4, pp. 3924-3938, July 2023, doi: 10.1109/TPWRS.2022.3200952.

[36] E. Azarkish and M. Esmaelbeag, “Using Genetic Optimization Algorithm in Coordination of Capacitor Banks, Transformer Tap Changers and Storage Devices in the Presence of Solar Systems,” *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 11, no. 42, pp. 77-95, 2021 (in persian).

[37] M. Parham and S. Mortazavi, “Optimization of random scheduling combining wind farm and storage pumps in the electricity market,” *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 9, no. 34, 2019 (in persian).

[38] S. Naseri, M. Esmaelbeag and M. Najafi, “Economic Dispatch Problem for Minimizing Cost and Improving Reliability Consifering Uncertainty,” *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 11, no. 41, pp. 77-91, 2021 (in persian).

[39] M. khadem and M. Esmaelbeag, “Optimize the Number, Locating, and Sizing of D-STATCOM and DGs Using GA Algorithm,” *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 11, no. 42, pp. 29-42, 2021 (in persian).

[40] M. Karami, T. Niknam and H. Mohammadi Kamerva, “Optimal placement of distributed generation sources in radial distribution network with the aim of reducing losses and improving voltage profiles using genetic algorithm,” *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 9, no. 34, 2020 (in persian).

COPYRIGHTS
©2024 by the authors. Published by the Islamic Azad University Bushehr Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) https://creativecommons.org/licenses/by/4.0