Journal of **N**ovel **R**esearches on **S**mart **P**ower **S**ystems - Vol. 13 - No. 4 – Winter 2025
P-ISSN: 2322-2468, E-ISSN: 2981-0272, https://jeps.dezful.iau.ir/

Research Article

Multi-Objective Energy Management Optimization in Smart Distribution Networks Using a Hybrid Fuzzy-Genetic Algorithm in the Presence of Renewable Energy Sources, Electric Vehicles, and Energy Storage Systems

Hadi Tavalaei[1], ***Ph.D. Student***, Mahmoud Samiei Moghaddam[2,*], ***Assistant Professor***, Mojtaba Vahedi[3], ***Assistant Professor***, Nasrin Salehi[4], ***Associated Professor*** ,Mohamad Hoseini Abardeh[5], ***Assistant Professor***

[1]Department of Electrical Engineering, Shahrood Branch., Islamic Azad University, Shahrood, Iran.
Tavalaei@iau.ir
[2] Department of Electrical Engineering, Damghan Branch, Islamic Azad University, Damghan, Iran.
samiei352@iau.ac.ir
[3]Department of Electrical Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran.
Vahrdi.mojtaba@iau.ac.ir
[4] Department of Basic Sciences, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran.
salehi@iau.ac.ir
[5]Department of Electrical Engineering Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran.
hoseini.abardeh@iau.ac.ir

Abstract:
In this paper, a novel framework for energy management in smart distribution networks is presented, which employs a hybrid fuzzy-genetic algorithm to solve a multi-objective optimization model. The proposed model is designed to reduce energy losses, improve voltage profiles, minimize operational costs, and mitigate environmental pollution, while effectively addressing the dynamic characteristics of load demand and uncertainties associated with renewable energy sources. The model incorporates the interaction among distributed generation resources, energy storage systems, and electric vehicles within a 24-hour scheduling framework. For optimization, a hybrid algorithm is utilized: fuzzy logic first identifies priority search regions, followed by the genetic algorithm extracting the optimal solution. Simulation results on standard 33-bus test systems demonstrate significant reductions in energy losses, enhanced voltage quality, and improved system efficiency compared to conventional methods. The proposed approach provides a flexible, efficient, and scalable solution, demonstrating high capability in addressing the complexities of future-oriented distribution networks.

Keywords: Energy Management, Smart Grid, Fuzzy Algorithm, Renewable Energy Sources.

Received: 16 Dec. 2024
Revised: 14 Jan. 2025
Accepted: 18 Feb. 2025

*** Corresponding Author:** Dr. Mahmoud samiei moghaddam

Citation: H. Tavalaei, M. Samiei Moghaddam, M. Vahedi, N. Salehi, M. Hoseini Abardeh, "Multi-Objective Energy Management Optimization in Smart Distribution Networks Using a Hybrid Fuzzy-Genetic Algorithm in the Presence of Renewable Energy Sources, Electric Vehicles, and Energy Storage Systems", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 13, no. 4, pp. 37-50, Ferbruary 2025 (in Persian).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-07-09]

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی چندهدفه انرژی در شبکه‌های توزیع هوشمند با استفاده از الگوریتم ترکیبی فازی-ژنتیک در حضور منابع تجدیدپذیر، خودروهای الکتریکی و ذخیره‌ساز انرژی

هادی تولایی[1]، دانشجوی دکترا، محمود سمیعی مقدم[2]، استادیار، مجتبی واحدی[3]، استادیار، نسرین صالحی[3]، دانشیار، محمد حسینی ابرده[3]، استادیار

۱- گروه برق، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران
*۲- گروه برق، واحد دامغان، دانشگاه آزاد اسلامی، دامغان، ایران
۳- گروه برق، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران
۴- گروه علوم پایه، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران
۵- گروه برق، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

چکیده: در این مقاله، یک چارچوب نوین برای مدیریت انرژی در شبکه‌های توزیع هوشمند ارائه می‌شود که در آن از ترکیب الگوریتم فازی با الگوریتم ژنتیک برای حل مدل بهینه‌سازی چندهدفه استفاده شده است. مدل پیشنهادی با هدف کاهش تلفات انرژی، بهبود نمایه ولتاژ، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و حداقل‌سازی آلایندگی زیست‌محیطی طراحی شده و توانایی پاسخ‌گویی به ویژگی‌های دینامیکی بار و عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر را دارد. در این مدل، تعامل بین منابع تولید پراکنده، سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی و خودروهای الکتریکی در چارچوب برنامه‌ریزی ۲۴ ساعته لحاظ شده است. جهت بهینه‌سازی مدل با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون، از یک الگوریتم ترکیبی بهره گرفته شده است که ابتدا با استفاده از منطق فازی، نواحی جست‌وجوی اولویت‌دار شناسایی و سپس با الگوریتم ژنتیک، راه‌حل بهینه استخراج می‌شود. نتایج شبیه‌سازی روی شبکه‌های استاندارد ۳۳ شینه نشان‌دهنده کاهش چشمگیر تلفات انرژی، بهبود کیفیت ولتاژ و افزایش بهره‌وری سیستم در مقایسه با روش‌های رایج هستند. روش پیشنهادی با فراهم آوردن یک راهکار انعطاف‌پذیر، کارا و مقیاس‌پذیر، قابلیت بالایی در مواجهه با پیچیدگی‌های شبکه‌های توزیع آینده‌محور دارد.

کلمات کلیدی: مدیریت انرژی، شبکه هوشمند، الگوریتم فازی، منابع تجدیدپذیر.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۹/۲۶
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۳۰

* **نام نویسنده مسئول:** دکتر محمود سمیعی مقدم
نشانی نویسنده مسئول: دامغان، دانشگاه ازاد اسلامی واحد دامغان، گروه برق

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-07-09]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025

۱- مقدمه

گسترش روزافزون منابع انرژی تجدیدپذیر، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و خودروهای الکتریکی، چشم‌انداز جدیدی را در بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع برق رقم زده است. این تحول فناورانه، ضمن ایجاد فرصت‌های تازه برای بهره‌وری انرژی و کاهش آلایندگی، پیچیدگی‌های قابل توجهی را نیز در مدیریت بهینه شبکه به همراه داشته است. به‌ویژه در شبکه‌های توزیع هوشمند، مدیریت هماهنگ این منابع متنوع و پراکنده با هدف بهبود عملکرد فنی و اقتصادی شبکه، به یک نیاز حیاتی تبدیل شده است. یکی از راهکارهای کلیدی برای دستیابی به بهره‌برداری بهینه از شبکه‌های توزیع، استفاده از پیکربندی مجدد شبکه و مدیریت هوشمندانه بار و منابع است. این فرآیند، علاوه بر کاهش تلفات انرژی و بهبود نمایه ولتاژ، می‌تواند در کاهش هزینه‌های خرید انرژی و کنترل انتشار آلاینده‌ها نقش مهمی ایفا کند. با این حال، ماهیت غیرخطی، چندهدفه و وابسته به زمان مسئله، موجب شده تا روش‌های کلاسیک مانند برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح یا تکنیک‌های رهاسازی مرسوم، در مقیاس‌های بزرگ و شرایط نامطمئن کارایی محدودی داشته باشند.

در مطالعه [۱]، یک استراتژی بهینه‌سازی برای سیستم‌های ترکیبی حرارت توان در منطقه سین‌کیانگ چین با استفاده از الگوریتم بهبود یافته ارائه شده است که نشان از اهمیت الگوریتم‌های متاهیوریستیک در بهره‌وری انرژی دارد. در پژوهش کلاسیک [۲]، باران و وو به بررسی پیکربندی مجدد شبکه‌های توزیع برای کاهش تلفات و تعادل بار پرداختند و نقش کلیدی تغییر توپولوژی در بهینه‌سازی عملکرد شبکه را مطرح کردند. در مطالعه [۳]، طراحی چندهدفه یک سیستم مستقل ترکیبی گرما و برق با استفاده از ذخیره‌ساز انرژی به منظور پاسخ‌گویی به بارهای حرارتی و الکتریکی بررسی شده که توجه خاصی به منابع ترکیبی انرژی دارد. در مقاله [۴]، پایداری و دینامیک شبکه‌های توزیع فعال با استفاده از فناوری تغییر فاز مرور شده که بر اهمیت دیدپذیری لحظه‌ای و پاسخ سریع در شبکه‌های هوشمند تأکید دارد. در مطالعه [۵]، مدلی محدب برای پیکربندی مجدد شبکه‌های توزیع معرفی شده که با تبدیل مسئله به فرم محدب، امکان حل دقیق‌تر فراهم شده است. در پژوهش [۶]، قیود شعاعی بودن شبکه با هدف تسهیل در بازپیکربندی در حضور منابع تولید پراکنده فرموله شده است، که نقش کلیدی در حفظ پایداری توپولوژیک شبکه دارد. در مقاله [۷]، فرمول‌بندی دو سطحی برای شناسایی اختلالات شدید در سیستم‌های انتقال با بهره‌گیری از بهینه‌سازی تکرارشونده پیشنهاد شده که قابل تعمیم به سیستم‌های توزیع نیز هست. مطالعه [۸] از یک الگوریتم جدید مبتنی بر انحلال گاز هیدروژن برای تحلیل حساسیت در سیستم‌های PV/DG/ESS بهره گرفته و قابلیت آن در بهینه‌سازی عملکرد این سیستم‌ها نشان داده شده است. در پژوهش [۹]، یک استراتژی کارای مبتنی بر هیدروژن برای کاهش تعداد سوییچ‌های انتقال در شبکه هوشمند معرفی شده که به کاهش پیچیدگی عملیاتی کمک می‌کند. در مقاله [۱۰]، بازپیکربندی شبکه با حداقل تلفات با استفاده از برنامه‌ریزی محدب عدد صحیح مدل‌سازی شده و دقت بالای روش در تعیین ساختار بهینه شبکه نشان داده شده است. مطالعه [۱۱] نقش فناوری‌های نوین کنترل، ذخیره‌سازی و منابع تجدیدپذیر را در افزایش پایداری سیستم‌های قدرت بررسی کرده است که بر ضرورت همگرایی فناوری‌ها تأکید دارد. در مقاله [۱۲]، طراحی یک مبدل توان بالا مبتنی بر داده برای انتقال بی‌سیم انرژی به خودروهای الکتریکی پیشنهاد شده است که اهمیت زیرساخت‌های انتقال قدرت را نمایان می‌سازد. مطالعه [۱۳] به مدل‌سازی بار مراکز داده با هدف کاهش محدودسازی منابع تجدیدپذیر پرداخته و به نقش مدیریت بارهای قابل کنترل در بهره‌وری سیستم انرژی اشاره دارد. در پژوهش [۱۴]، ارزیابی فنی-اقتصادی جایابی بهینه سلول‌های سوختی در صنایع پتروشیمی با استفاده از الگوریتم کرم شبتاب بهبود یافته انجام شده است. در مقاله [۱۵]، روش‌های بازیابی به‌منظور افزایش تاب‌آوری شبکه‌های قدرت مرور شده که در بهبود قابلیت اطمینان سیستم در برابر اختلالات مؤثر است. در مطالعه [۱۶]، فرمول‌بندی جدیدی برای قیود شعاعی با هدف بهبود بازپیکربندی مقاوم شبکه توزیع پیشنهاد شده که کارایی محاسباتی بالایی دارد. در پژوهش [۱۷]، راهبردی هماهنگ برای بازپیکربندی چندمرحله‌ای شبکه‌های توزیع و گرمایش ارائه شده که هدف آن افزایش تاب‌آوری در برابر حوادث است. مطالعه [۱۸]، یک رویکرد مبتنی بر ریسک برای بازپیکربندی دینامیکی شبکه با درنظرگیری ظرفیت میزبانی منابع تجدیدپذیر ارائه داده است. در مقاله [۱۹]، بازپیکربندی ترتیبی شبکه‌های نامتعادل با نقاط اتصال نرم با استفاده از یادگیری تقویتی عمیق مدل‌سازی شده است. در مطالعه [۲۰]، روش رهاسازی محدب ناهمگون برای بازپیکربندی دقیق‌تر شبکه توزیع معرفی شده که محدودیت‌های روش‌های مرسوم را برطرف

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-07-09]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 2- Summer 2024

می‌سازد. در پژوهش [۲۱]، کنترل هماهنگ در چند مقیاس زمانی با بازپیکربندی بهینه و استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی بررسی شده است. مطالعه [۲۲]، از یک الگوریتم بهینه‌سازی ارتقاءیافته برای طراحی سیستم مدیریت ریزشبکه بهره گرفته که کارایی آن را در شبکه‌های کوچک اثبات می‌کند. در مقاله [۲۳]، یک رویکرد ابتکاری و سریع برای بازپیکربندی شبکه‌های شعاعی پیشنهاد شده که بر سادگی و سرعت محاسباتی تأکید دارد. در مطالعه [۲۴]، بازپیکربندی مقاوم شبکه در حضور تولید پراکنده و عدم‌قطعیت بار با رویکردی مبتنی بر برنامه‌ریزی مقاوم پیشنهاد شده است. در پژوهش [۲۵]، زمان‌بندی هماهنگ تصادفی دو مرحله‌ای برای سیستم‌های توزیع گاز-برق یکپارچه با بازپیکربندی مدل شده است. در مقاله [۲۶]، بازپیکربندی شبکه فعال با نقاط اتصال نرم با لحاظ محدودیت‌های حفاظتی مدل‌سازی شده است. در مطالعه [۲۷]، مقایسه‌ای بین الگوریتم‌های یادگیری تقویتی برای بازپیکربندی شبکه با تأکید بر عملکرد DQN ارائه شده است. در پژوهش [۲۸]، الگوریتم حفظ شعاعیت برای هم‌بهینه‌سازی بازپیکربندی شبکه و ذخیره‌سازی معرفی شده است که عملکردی مطلوب در شرایط چندهدفه دارد. در مقاله [۲۹]، الگوریتم‌های رمزگذاری و رمزگشایی مبتنی بر حلقه برای بازپیکربندی شبکه‌های توزیع ارائه شده‌اند که موجب تسریع فرآیند بهینه‌سازی می‌شود. در [۳۰] نویسندگان تعیین اندازه بهینه سیستم‌های ریزشبکه ترکیبی را برای پایداری گذاری سیستم ارائه کرده‌اند. در مطالعه [۳۱] و [۳۲] بهبود شبکه توزیع را با استفاده از بازآرایی با یک روش محدب و منابع انرژی تجدیدپذیر ارائه نموده‌اند. مطالعه [۳۳] به بهره‌برداری بهینه ریزشبکه‌ها با استفاده از منابع تولید پراکنده و پاسخ تقاضا می‌پردازد. مطالعه [۳۴] تنظیم ولتاژ را با استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در ریزشبکه‌های ولتاژ مستقیم پیشنهاد کرده است. مطالعه [۳۵] و [۳۶] به بهینه‌سازی و مدیریت انرژی در ریزشبکه‌ها با هدف بهبود تاب‌آوری و تئوری گراف با استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی چند سطحی پرداخته شده است.

بررسی پیشینه پژوهش‌ها نشان می‌دهد که مطالعات متعددی به بهینه‌سازی ساختار شبکه با اهدافی چون کاهش تلفات [۲، ۱۰]، بهبود تاب‌آوری [۱۵، ۱۷]، یا ارتقاء ظرفیت میزبانی منابع تجدیدپذیر [۱۸] پرداخته‌اند. برخی از این تحقیقات از الگوریتم‌های متاهیوریستیک [۱، ۸، ۱۴] و برخی دیگر از رویکردهای مبتنی بر برنامه‌ریزی ریاضی [۵، ۶، ۱۰] بهره گرفته‌اند. در عین حال، تلاش‌هایی برای استفاده از یادگیری تقویتی [۱۹، ۲۷] و مدل‌های فازی [۱۶] نیز در حال گسترش است. با وجود این تلاش‌ها، اغلب مطالعات یا بر یک بعد خاص تمرکز داشته‌اند، یا نتوانسته‌اند به‌صورت جامع، پویایی بار، تعامل منابع و پاسخ به عدم قطعیت‌ها را در مدلی یکپارچه لحاظ کنند. شکاف موجود در ادبیات، فقدان رویکردی است که ضمن ارائه یک مدل چندهدفه کامل، بتواند با درنظر گرفتن منابع توزیع‌شده، ذخیره‌سازها و خودروهای الکتریکی، راهکاری سریع، منعطف و با توان انطباق بالا با شرایط واقعی فراهم آورد. همچنین، بسیاری از مدل‌ها از لحاظ همگرایی محاسباتی و امکان پیاده‌سازی در مقیاس‌های بزرگ دچار محدودیت هستند. در همین راستا، هدف پژوهش حاضر، طراحی یک چارچوب هوشمند مدیریت انرژی مبتنی بر الگوریتم ترکیبی فازی-ژنتیک است که بتواند با هدایت جست‌وجوی بهینه در فضای تصمیم‌گیری، راه‌حل‌هایی قابل اعتماد برای کاهش تلفات، بهبود ولتاژ، کاهش هزینه‌ها و ارتقاء پایداری زیست‌محیطی فراهم سازد. الگوریتم پیشنهادی با بهره‌گیری از منطق فازی برای ارزیابی شرایط سیستم و الگوریتم ژنتیک برای استخراج بهینه‌های چندهدفه، در پی دستیابی به عملکردی کارا و مقیاس‌پذیر در مدیریت منابع مدرن شبکه‌های توزیع است.

در بخش دوم مقاله مدل بهینه‌سازی پیشنهادی ارائه می‌شود و بخش سوم به ارائه الگوریتم پیشنهادی برای مدل پرداخته خواهد شد. بخش چهارم مقاله نتایج شبیه‌سازی تجزیه و تحلیل شده است و در بخش نهایی نتیجه‌گیری ارائه خواهد شد.

۲- مدل بهینه‌سازی پیشنهادی

در این پژوهش، یک مدل جامع برای مدیریت بهینه انرژی در شبکه‌های توزیع هوشمند ارائه می‌شود که هدف آن، کمینه‌سازی تلفات، هزینه‌ها و آلایندگی، و همچنین افزایش کیفیت ولتاژ و بهره‌وری سیستم است. مدل پیشنهادی یک مسئله چندهدفه، وابسته به زمان و ترکیبی از متغیرهای گسسته و پیوسته را شامل می‌شود. این مدل قابلیت مدل‌سازی دقیق منابع تولید پراکنده، سیستم‌های ذخیره‌سازی، خودروهای الکتریکی، پیکربندی مجدد شبکه، ترانسفورماتورهای OLTC و تنظیم‌کننده‌های ولتاژ را دارد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-07-09]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025

در این مدل، زمان بهره‌برداری به بازه‌های زمانی گسسته تقسیم می‌شود و متغیرهای تصمیم شامل توان تولیدی منابع، توان شارژ/دشارژ باتری‌ها و EVها، وضعیت کلیدهای شبکه، وضعیت SOC، تنظیمات OLTC و تپ تنظیم‌کننده ولتاژ در هر بازه زمانی هستند.

توابع هدف مدل پیشنهادی به شرح زیر تعریف می‌شوند، تابع هدف اول برای کاهش تلفات اکتیو شبکه در طول بازه بهره‌برداری تعریف می‌شود:

$$f_1 = \sum_{t=1}^{T} \sum_{l \in \text{Lines}} R_l \cdot \left(\frac{P_l^2(t) + Q_l^2(t)}{V_l^2(t)} \right) \quad (1)$$

که در آن R_l مقاومت خط l، و $P_l(t)$، $Q_l(t)$، و $V_l(t)$ به ترتیب توان اکتیو، راکتیو و ولتاژ دو سر خط هستند. تابع هدف دوم، هزینه خرید انرژی از پست اصلی را در طول زمان به حداقل می‌رساند:

$$f_2 = \sum_{t=1}^{T} C_{\text{grid}}(t) \cdot P_{\text{grid}}(t) \quad (2)$$

که در آن $C_{\text{grid}}(t)$ قیمت برق در زمان t و $P_{\text{grid}}(t)$ توان خریداری‌شده از شبکه است. تابع هدف سوم، هزینه‌های مربوط به شارژ و دشارژ ذخیره‌سازها و EVها را مدل می‌کند:

$$f_3 = \sum_{t=1}^{T} \left(C_{\text{ESS}}^{\text{op}}(t) + C_{\text{EV}}^{\text{op}}(t) \right) \quad (3)$$

تابع هدف چهارم، مجموع انحراف ولتاژ شین‌ها از مقدار مرجع (معمولاً ۱ pu) را کمینه می‌کند:

$$f_4 = \sum_{t=1}^{T} \sum_{i \in \text{Buses}} (V_i(t) - V_{\text{ref}})^2 \quad (4)$$

تابع هدف پنجم به حداقل‌سازی آلایندگی ناشی از منابع فسیلی اختصاص دارد:

$$f_5 = \sum_{t=1}^{T} \sum_{g \in \text{DG}} E_g \cdot P_g(t) \quad (5)$$

که در آن E_g ضریب آلایندگی منبع g است. برای حل این مسئله چندهدفه، توابع فوق با ضرایب وزنی ترکیب می‌شوند:

$$min\ F = \sum_{i=1}^{5} w_i \cdot f_i \quad (6)$$

که در آن w_i وزن مربوط به هدف i است که می‌تواند از طریق تحلیل فازی تعیین شود. مجموعه‌ای از قیود نیز به منظور تضمین بهره‌برداری ایمن و قابل قبول بر مدل حاکم است. قید توازن توان اکتیو در هر شین به شکل زیر است:

$$\sum_{g \in G_i} P_g(t) + P_{\text{ESS},i}^{\text{dis}}(t) - P_{\text{ESS},i}^{\text{ch}}(t) + P_{\text{EV},i}^{\text{dis}}(t) - P_{\text{EV},i}^{\text{ch}}(t) + P_{\text{grid},i}(t) = P_{L,i}(t) \quad (7)$$

و توازن توان راکتیو نیز به‌صورت مشابه برقرار می‌شود. قید ولتاژ نیز برای تمام شین‌ها و در تمامی زمان‌ها باید رعایت شود:

$$V_{min} \le V_i(t) \le V_{max} \quad (8)$$

برای مدل‌سازی ESS، وضعیت شارژ (SOC) با معادله دینامیکی زیر مشخص می‌شود:

$$SOC(t+1) = SOC(t) + \eta_{\text{ch}} \cdot P^{\text{ch}}(t) \cdot \Delta t - \frac{1}{\eta_{\text{dis}}} \cdot P^{\text{dis}}(t) \cdot \Delta t \quad (9)$$

همچنین قید زیر برای محدوده مجاز SOC اعمال می‌شود:

$$SOC_{min} \le SOC(t) \le SOC_{max} \quad (10)$$

و محدودیت‌های توان شارژ و دشارژ نیز تعریف می‌شوند:

$$0 \le P^{\text{ch}}(t) \le P_{max}^{\text{ch}}, 0 \le P^{\text{dis}}(t) \le P_{max}^{\text{dis}} \quad (11)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-07-09]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 2- Summer 2024

علاوه بر آن، برای جلوگیری از شارژ و دشارژ هم‌زمان، قید زیر به‌صورت منطقی اعمال می‌شود:

$$P^{\text{ch}}(t) \cdot P^{\text{dis}}(t) = ۰ \quad (۱۲)$$

مدل خودروهای الکتریکی (EV) مشابه ESS است، با این تفاوت که حضور آن‌ها در شبکه متناوب و وابسته به الگوی تردد است. بنابراین، در مدل، متغیری مانند $\alpha_{\text{EV}}(t) \in \{۰,۱\}$ معرفی می‌شود که نشان‌دهنده در دسترس بودن EV برای شارژ یا دشارژ در زمان t است و در صورت غیاب، تمام متغیرهای توان EV صفر می‌شوند.

مدل OLTC برای کنترل سطح ولتاژ در ترانسفورماتورهای اصلی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$V_{\text{sec}}(t) = V_{\text{pri}}(t) \cdot (۱ + \Delta \cdot \tau(t)) \quad (۱۳)$$

که در آن $\tau(t) \in [\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ متغیر گسسته مربوط به پله تپ در زمان t است. همچنین محدودیت تغییرات پله‌ای برای جلوگیری از جهش ناگهانی در عملکرد OLTC به شکل زیر اعمال می‌شود:

$$|\tau(t) - \tau(t-۱)| \leq ۱ \quad (۱۴)$$

برای مدل‌سازی تنظیم‌کننده ولتاژ ، عملکرد مشابه OLTC اما در مقیاس محلی‌تر تعریف می‌شود:

$$V_{\text{out}}(t) = V_{\text{in}}(t) \cdot (۱ + \delta \cdot \nu(t)) \quad (۱۵)$$

که در آن $\nu(t) \in [\nu_{\min}, \nu_{\max}]$ متغیر گسسته پله تنظیم‌کننده ولتاژ و δ گام تنظیم است.

در نهایت، قید شعاعی بودن شبکه برای جلوگیری از تشکیل حلقه در پیکربندی شبکه اعمال می‌شود. این قید یا به‌صورت الگوریتمی (در قالب رمزگذاری کروموزومی در الگوریتم ژنتیک) یا از طریق روابط گرافی مانند درخت پوشای مینیمم اعمال می‌شود. برای مثال:

$$N_{\text{closed_switches}} = N_{\text{buses}} - ۱ \quad (۱۶)$$

که بیان می‌کند تنها به اندازه لازم برای حفظ ساختار شعاعی می‌توان کلیدهای بسته داشت. این مجموعه کامل از توابع هدف، قیود فنی و مدلسازی تجهیزات کنترلی شبکه، چارچوب مدل پیشنهادی را تشکیل می‌دهد که در تعامل با الگوریتم ترکیبی فازی–ژنتیک، به‌صورت یکپارچه برای بهینه‌سازی عملکرد شبکه توزیع استفاده می‌شود. این مدل انعطاف‌پذیری بالایی در مواجهه با تغییرات زمانی، عدم‌قطعیت منابع، رفتار خودروهای الکتریکی و پاسخ‌گویی به شرایط اضطراری را داراست و مناسب بهره‌برداری آینده‌نگر از شبکه‌های توزیع است.

۳- الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی

در رویکرد پیشنهادی این پژوهش، دو مؤلفه اصلی یعنی منطق فازی و الگوریتم ژنتیک به‌صورت ترکیبی و هدفمند در کنار هم قرار گرفته‌اند تا یک چارچوب قدرتمند برای حل مسئله پیچیده مدیریت انرژی در شبکه‌های توزیع هوشمند فراهم شود. در این ساختار، سیستم فازی نقش تحلیل‌گر هوشمند اولیه را دارد و هدف آن، شناسایی شرایط بحرانی و تعیین اولویت مناطق تصمیم‌گیری در شبکه است. این تحلیل فازی بر اساس متغیرهای کلیدی عملکرد سیستم مانند انحراف ولتاژ، نرخ تلفات، بار خطوط و وضعیت شارژ/دشارژ ذخیره‌سازهای انرژی و خودروهای الکتریکی انجام می‌شود. به بیان ساده، منطق فازی داده‌های ورودی را که اغلب پیوسته، مبهم یا نامطمئن هستند، به اطلاعات تصمیم‌گیری قابل استفاده تبدیل می‌کند. در خروجی این سیستم، به هر ناحیه از شبکه یا هر متغیر تصمیمی، یک امتیاز اولویت تخصیص داده می‌شود.

برای مدل‌سازی عددی این فرآیند، امتیاز اولویت P_j برای ناحیه یا متغیر تصمیم j، به‌صورت یک ترکیب میانگین وزن‌دار از درجات عضویت فازی ورودی‌ها قابل تعریف است:

$$P_j = \frac{\sum_{k=۱}^{m} \mu_{A_k}(x_k) \cdot \alpha_k}{\sum_{k=۱}^{m} \mu_{A_k}(x_k)} \quad (۱۷)$$

در این معادله، $\mu_{A_k}(x_k)$ نشان‌دهنده درجه عضویت ورودی x_k در تابع عضویت فازی A_k است. این مقدار بیانگر شدت تعلق آن پارامتر به یک ویژگی خاص است، مثلاً اینکه «تلفات بالا» یا «ولتاژ پایین» تا چه حد برای نقطه مورد بررسی صدق می‌کند. ضریب α_k نیز بیانگر میزان اهمیت هر متغیر در تعیین اولویت کلی است که می‌تواند به‌صورت تجربی یا بر اساس سیاست اپراتور

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-07-09]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025

شبکه تنظیم شود. خروجی نهایی یعنی P_j، یک عدد نرمال‌شده است که مشخص می‌کند آن ناحیه از شبکه چقدر برای بهینه‌سازی باید در اولویت قرار گیرد. این امتیاز سپس در تولید جمعیت اولیه الگوریتم ژنتیک مورد استفاده قرار می‌گیرد، به‌گونه‌ای که افرادی که متغیرهای تصمیمشان در نواحی با P_j بالاتر قرار دارند، شانس بیشتری برای ورود به جمعیت اولیه خواهند داشت. این مکانیزم سبب جهت‌دهی هوشمند فرآیند جست‌وجوی الگوریتم ژنتیک از همان ابتدا می‌شود.

پس از تولید جمعیت اولیه هدفمند، الگوریتم ژنتیک وارد عمل می‌شود تا پاسخ‌های بهینه را از طریق یک فرآیند تکاملی شبیه‌سازی شده استخراج کند. هر راه‌حل در قالب یک کروموزوم رمزگذاری می‌شود که شامل متغیرهایی مانند وضعیت کلیدهای شبکه، میزان توان تولیدی منابع، سطح ذخیره انرژی و جریان‌های شارژ یا دشارژ خودروها و باتری‌هاست. در هر نسل از الگوریتم، مجموعه‌ای از کروموزوم‌ها توسط توابع هدف ارزیابی می‌شوند تا میزان کارایی آن‌ها برای بهره‌برداری بهینه از شبکه مشخص شود.

برای آن‌که الگوریتم بتواند با چندین تابع هدف به‌صورت هم‌زمان کار کند، از یک تابع هدف ترکیبی وزن‌دار استفاده می‌شود که بر مبنای اهمیت هر هدف، یک مقدار اسکالر نهایی را برای ارزیابی هر کروموزوم تولید می‌کند. شکل عمومی این تابع به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$min\ F = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot f_i(x) \quad (18)$$

در این رابطه، $f_i(x)$ تابع هدف شماره i است که ممکن است بیانگر تلفات توان، هزینه خرید انرژی، میزان انحراف ولتاژ، هزینه آلایندگی، یا هزینه‌های مربوط به پاسخ‌گویی بار و شارژ EVها باشد. ضرایب w_i نیز وزن‌هایی هستند که اهمیت نسبی هر تابع هدف را مشخص می‌کنند. این وزن‌ها می‌توانند ثابت باشند یا از خروجی سیستم فازی مشتق شوند تا فرآیند تصمیم‌گیری با منطق انسانی یا سیاست‌های اپراتور هماهنگ گردد. در نهایت، مقدار F به‌عنوان معیاری برای کیفیت راه‌حل به کار گرفته می‌شود و پاسخ‌هایی که مقدار کمتری از این تابع دارند، به عنوان بهتر شناخته شده و احتمال بقای آن‌ها در نسل بعد بیشتر است.

پس از ارزیابی، کروموزوم‌های مناسب‌تر به مرحله انتخاب وارد می‌شوند و از طریق عملیات تقاطع با یکدیگر ترکیب شده و فرزندان جدیدی ایجاد می‌کنند. در عین حال، عملیات جهش نیز برای حفظ تنوع ژنتیکی و جلوگیری از همگرایی زودهنگام به کار گرفته می‌شود. این چرخه تکامل برای چندین نسل ادامه می‌یابد تا در نهایت، یک یا چند پاسخ بهینه به‌دست آید. این پاسخ‌ها با مدل‌سازی کامل موجود در مقاله ضمیمه‌شده مطابقت دارند، به این معنا که شامل تمام قیود مربوط به پیکربندی مجدد، محدودیت‌های توان، ظرفیت ESS و EV، قیود ولتاژ، و سایر الزامات فنی هستند.

به کمک این ترکیب منحصربه‌فرد از استدلال فازی و تکامل ژنتیکی، الگوریتم پیشنهادی قادر است بدون نیاز به فرموله‌سازی پیچیده ریاضی، مدل غیردقیق و چندهدفه مقاله مرجع را با دقت بالا و در زمان معقول حل کند. همچنین، این الگوریتم انعطاف‌پذیری بالایی در برابر تغییر شرایط شبکه یا عدم‌قطعیت‌های منابع دارد که آن را برای استفاده در شبکه‌های توزیع واقعی و پویا مناسب می‌سازد.

شکل (۱) فلوچارت کلی چارچوب مدل‌سازی و بهینه‌سازی پیشنهادی در این پژوهش را نمایش می‌دهد. این چارچوب شامل مراحل اصلی از آماده‌سازی داده‌های اولیه تا تعیین پاسخ بهینه چندهدفه است. در مرحله ابتدایی، ورودی‌هایی نظیر داده‌های بار ساعتی، توان تولیدی منابع خورشیدی و بادی، ویژگی‌های فنی تجهیزات کنترلی و تنظیمات اولیه شبکه وارد می‌شوند. سپس، با در نظر گرفتن قیود عملیاتی سیستم، فرمول‌بندی ریاضی مدل شامل توابع هدف و قیود آغاز می‌گردد. در گام بعد، الگوریتم فازی–ژنتیک به‌منظور حل مدل استفاده می‌شود. در این مرحله، ابتدا جمعیت اولیه به‌صورت تصادفی تولید می‌شود. سپس برای هر کروموزوم، ارزیابی چندهدفه انجام شده و با استفاده از سیستم فازی، مقدار برازندگی کل با تلفیق توابع هدف مختلف محاسبه می‌گردد. انتخاب، ترکیب و جهش ژنتیکی در نسل‌های متوالی موجب هم‌گرایی به سوی جواب‌های بهینه می‌شود. همزمان، فرآیندهای کنترلی مانند تنظیم ولتاژ توسط OLTC و رگولاتورها، مدیریت توان ذخیره‌سازی در باتری‌ها و خودروهای الکتریکی و همچنین اجرای برنامه پاسخگویی به تقاضا با هدف کاهش هزینه و تلفات اعمال می‌گردند. این اقدامات در هر مرحله از الگوریتم

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-07-09]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 2- Summer 2024

به‌روز شده و در ارزیابی برازندگی تأثیر داده می‌شوند. در نهایت، پس از رسیدن به معیار توقف الگوریتم، جواب‌های بهینه شامل پروفایل توان تجهیزات، وضعیت کلیدزنی شبکه، ولتاژ شین‌ها و میزان تلفات و هزینه بهره‌برداری به‌دست می‌آیند. این خروجی‌ها قابلیت تحلیل، مقایسه و تصمیم‌گیری برای اپراتور شبکه را فراهم می‌سازند. چارچوب پیشنهادی ارائه‌شده در این فلوچارت به‌گونه‌ای طراحی شده است که می‌تواند به‌راحتی برای انواع دیگر از شبکه‌های توزیع، شرایط مختلف بهره‌برداری و سیاست‌های کنترلی توسعه یابد. این ساختار همچنین از انعطاف‌پذیری بالایی برای ترکیب روش‌های بهینه‌سازی دیگر و تحلیل سناریوهای مختلف برخوردار است.

شکل (۱): فلوچارت چارچوب پیشنهادی برای بهینه‌سازی عملکرد شبکه توزیع با در نظر گرفتن پاسخگویی به تقاضا، منابع انرژی تجدیدپذیر، باتری، خودروهای الکتریکی، OLTCو تنظیم‌کننده‌های ولتاژ با استفاده از الگوریتم فازی–ژنتیک

Figure (1): Flowchart of the proposed framework for optimizing distribution network performance, considering demand response, renewable energy resources, batteries, electric vehicles, OLTC, and voltage regulators using a fuzzy-genetic algorithm.

۴- نتایج شبیه‌سازی

هدف از این بخش، ارزیابی عملکرد مدل بهینه سازی پیشنهادی در شرایط واقعی شبکه‌های توزیع هوشمند و بررسی تأثیر اجزای مختلف شبکه از جمله منابع تولید پراکنده، ذخیره‌ساز انرژی، خودروهای الکتریکی، OLTC و تنظیم‌کننده‌های ولتاژ بر کیفیت عملکرد شبکه است. برای این منظور، مدل کامل پیشنهادی در یک محیط شبیه سازی توسعه یافته و نتایج حاصل در قالب سناریوهای مختلف تحلیل و با روش‌های بهینه‌سازی دیگر مقایسه شده‌اند. برای بررسی قابلیت الگوریتم پیشنهادی، شبکه تست استاندارد ۳۳ شینه IEEE به‌کار گرفته شده است. این شبکه شعاعی، دارای یک پست اصلی، ۳۲ خط، ۵ بار بزرگ صنعتی، و چندین بار مسکونی و تجاری است. ظرفیت کل بار در بازه زمانی مطالعه برابر با ۳,۷ مگاوات می‌باشد. منابع تولید پراکنده شامل ۳ واحد خورشیدی، یک واحد بادی، و یک DG مبتنی بر گاز طبیعی در شین‌های کلیدی شبکه قرار داده شده‌اند. همچنین، ۲ سیستم ذخیره‌سازی باتری در شین‌های ۱۸ و ۳۲ و یک ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی در شین ۳۰ مدل سازی شده است. OLTC در ترانسفورماتور ورودی پست و تنظیم‌کننده ولتاژ در شین ۲۸ قرار گرفته‌اند. داده‌های بار و تولید خورشیدی–بادی برای ۲۴ ساعت در اختیار مدل قرار داده شده‌اند. برای تحلیل اثر اجزای مختلف سیستم، شبیه‌سازی‌ها تحت ۵ سناریو انجام شده است:

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-07-09]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025

سناریو پایه: شبکه بدون تجهیزات هوشمند، فقط با DGها و بارها
سناریو ۱: فعال‌سازی پیکربندی مجدد شبکه
سناریو ۲: اضافه شدن ذخیره‌ساز انرژی (ESS)
سناریو ۳: اضافه شدن خودروهای الکتریکی (EV)
سناریو نهایی (پیشنهادی): فعال سازی کامل OLTC، تنظیم‌کننده ولتاژ، EV ،ESS، و ریکلوزرهای شبکه در چارچوب مدل پیشنهادی

جدول (۱): نتایج شبیه‌سازی در سناریوهای مختلف

Table (1): Simulation results under different scenarios

سناریو	تلفات کل انرژی (kWh)	میانگین ولتاژ شین‌ها (pu)	هزینه کل (دلار)	آلایندگی (kg CO□)
پایه	۱۵۴,۹	۰,۹۵۷	۱۴،۴۲۰	۱،۸۴۵
سناریو ۱	۱۳۲,۴	۰,۹۷۰	۱۳،۰۵۰	۱،۷۴۳
سناریو ۲	۱۲۱,۶	۰,۹۷۴	۱۲،۲۷۰	۱،۶۰۳
سناریو ۳	۱۱۵,۳	۰,۹۷۶	۱۱،۸۱۰	۱،۵۲۲
نهایی (پیشنهادی)	۱۰۹,۸	۰,۹۸۱	۱۱،۱۲۰	۱،۴۱۰

نتایج جدول (۱) نشان می‌دهد که استفاده مرحله‌ای از ابزارهای کنترلی در مدل پیشنهادی موجب بهبود تدریجی شاخص‌های عملکردی شبکه می‌شود. به‌ویژه در سناریوی نهایی، تلفات انرژی نسبت به حالت پایه حدود ۲۹٪ کاهش یافته، میانگین ولتاژ ۲,۴٪ افزایش داشته و هزینه نهایی بهره‌برداری حدود ۲۲,۹٪ کاهش یافته است. همچنین، به لطف مدیریت هوشمند DGها و خودروهای الکتریکی، آلایندگی CO□ نیز ۲۳,۵٪ کمتر شده است.

الگوریتم ترکیبی فازی–ژنتیک در این پژوهش با سه روش مرسوم دیگر شامل الگوریتم ژنتیک کلاسیک (GA)، الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) و روش ریاضی رهاسازی محدب ناهمگون (DCHR) مقایسه شده است.

جدول (۲): مقایسه نتایج با سایر روش‌های مشابه

Table (2): Comparison of results with other similar methods

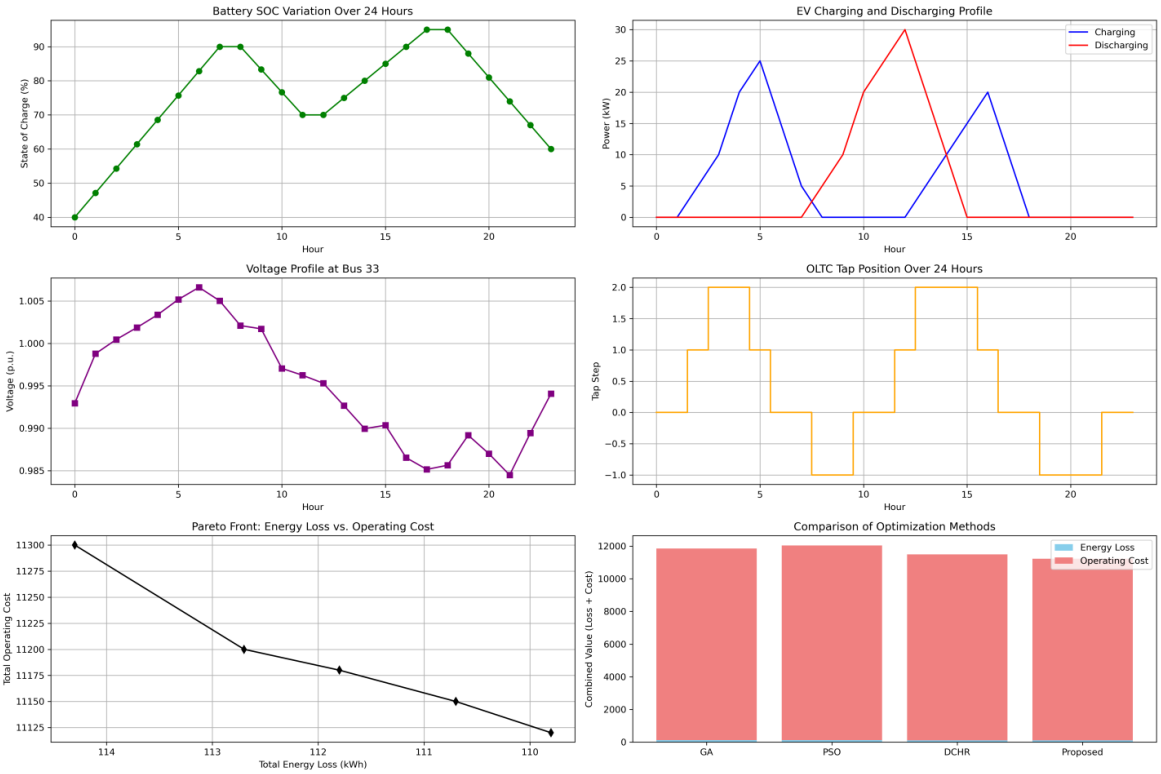
روش	تلفات کل انرژی (kWh)	هزینه کل (دلار)	زمان اجرا (ثانیه)	میانگین ولتاژ (pu)
GA[۳۰]	۱۱۶,۵	۱۱،۷۴۰	۱۲۱	۰,۹۷۸
PSO[۳۱]	۱۱۸,۸	۱۱،۹۲۰	۱۳۴	۰,۹۷۶
DCHR [۳۲]	۱۱۲,۹	۱۱،۳۸۰	۱۰۵	۰,۹۷۹
پیشنهادی	۱۰۹,۸	۱۱،۱۲۰	۹۶	۰,۹۸۱

همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی نه‌تنها بهترین کیفیت پاسخ را از نظر تلفات و هزینه ارائه می‌دهد، بلکه از نظر زمان اجرا نیز کاراتر از سایر روش‌ها عمل می‌کند. میانگین ولتاژ شین‌ها در این روش از سایر روش‌ها بالاتر است که بیانگر کیفیت توان بهتر و کاهش احتمال افت ولتاژ در بارهای حساس می‌باشد.

در ادامه، اثر حذف هر یک از تجهیزات کلیدی از مدل نهایی بررسی شد، حذف ESS منجر به افزایش تلفات به ۱۲۳,۱ kWh و هزینه به ۱۲،۱۳۰ واحد شد. حذف EV باعث افزایش هزینه به ۱۱،۹۲۰ واحد و افزایش آلایندگی به ۱،۵۸۵ کیلوگرم شد. غیرفعال‌سازی OLTC باعث نوسانات ولتاژ شدید در شین‌های ۳۱ تا ۳۳ و کاهش میانگین ولتاژ به ۰,۹۶۶ pu شد. حذف تنظیم‌کننده ولتاژ موجب خروج شین ۲۸ از محدوده مجاز (زیر ۰,۹۴ pu) در ساعات پیک شد. این نتایج تأکید می‌کند که عملکرد بهینه مدل پیشنهادی، وابسته به وجود و هماهنگی بین اجزای مختلف سیستم هوشمند است. مدل پیشنهادی ارائه‌شده، با استفاده از الگوریتم ترکیبی فازی–ژنتیک و مدلسازی دقیق تجهیزات کنترلی، موفق به کاهش قابل توجه تلفات، هزینه‌ها و آلایندگی شده و کیفیت ولتاژ شبکه را در سطح قابل قبولی حفظ کرده است. مقایسه با روش‌های دیگر نشان می‌دهد که مدل حاضر از نظر دقت پاسخ و سرعت اجرا عملکرد برتری دارد و قابلیت کاربرد در محیط‌های عملیاتی و آینده‌نگر شبکه‌های توزیع هوشمند را داراست.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-07-09]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 2- Summer 2024

شکل (۲) مجموعه‌ای از شش نمودار تحلیلی را در بر می‌گیرد که برای بررسی عملکرد مدل پیشنهادی در ابعاد مختلف فنی و اقتصادی طراحی شده‌اند. این نمودارها نشان‌دهنده تأثیر تجهیزات کنترلی همچون سیستم ذخیره‌سازی انرژی، خودروهای الکتریکی، OLTCو تنظیم‌کننده‌های ولتاژ در بهبود عملکرد شبکه توزیع هوشمند هستند. در نمودار بالا سمت چپ، تغییرات وضعیت شارژ باتری (SOC) طی شبانه‌روز به تصویر کشیده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، باتری در ساعات اولیه شب و نیمه‌شب شارژ می‌شود و در ساعات اوج مصرف روز (میان‌روز و غروب) به شبکه توان تزریق می‌کند. این الگوی رفتاری بیانگر عملکرد مؤثر سیستم مدیریت انرژی در استفاده بهینه از ظرفیت باتری است. نمودار بالا سمت راست به پروفایل شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی اختصاص دارد. مطابق این نمودار، شارژ خودروها عمدتاً در ساعات غیرپیک و هم‌زمان با تولید خورشیدی انجام شده و دشارژ آن‌ها در ساعات پیک بار به منظور کاهش بار شبکه صورت گرفته است. این هماهنگی نشان می‌دهد که EVها نه‌تنها بار بلکه یک منبع انعطاف‌پذیر انرژی هستند. نمودار وسط سمت چپ، پروفایل ولتاژ شین انتهایی شبکه (شین ۳۳) را نشان می‌دهد. این نمودار بیانگر آن است که استفاده ازOLTC ، تنظیم‌کننده ولتاژ و مدیریت توزیع بار موجب حفظ ولتاژ شین‌ها در بازه مجاز (بین ۰٫۹۵ تا pu۱٫۰۵) شده و از افت ولتاژ در ساعات بحرانی جلوگیری شده است. در نمودار وسط سمت راست، تغییرات پله‌ای تپ OLTC در طول ۲۴ ساعت ترسیم شده است. این تغییرات با نوسانات بار و تولید شبکه هم‌راستا بوده و در ساعات پیک و افت ولتاژ، به‌صورت خودکار موجب افزایش تپ و بازیابی ولتاژ شده‌اند. نمودار پایین سمت چپ، جبهه پارتو بین هزینه بهره‌برداری و تلفات انرژی را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی قادر است پاسخ‌های بهینه‌ای در طیفی وسیع از هزینه و تلفات تولید کند که اپراتور می‌تواند براساس سیاست مورد نظر یکی از آن‌ها را انتخاب کند. در نهایت، نمودار پایین سمت راست، مقایسه عملکرد روش پیشنهادی با سه روش مرسوم دیگر یعنیGA ، PSO و DCHR را در قالب مجموع تلفات و هزینه نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، روش پیشنهادی در هر دو بعد تلفات و هزینه، عملکرد برتری داشته و با کمترین هزینه و بیشترین بهره‌وری انرژی، مناسب‌ترین گزینه برای بهره‌برداری هوشمند از شبکه‌های توزیع آینده است.

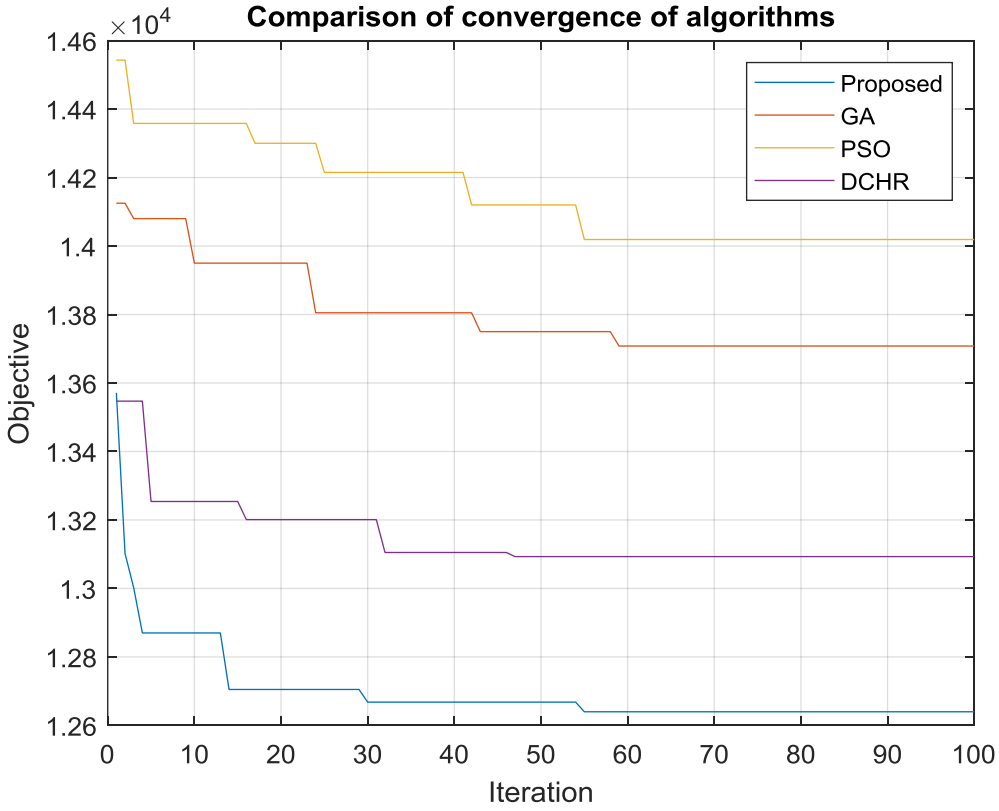


شکل (۲): نمودارهای تحلیلی مربوط به نتایج بهره‌برداری بهینه شبکه توزیع ۳۳ شینه تحت مدل پیشنهادی شامل الگوریتم فازی–ژنتیک و تجهیزات کنترلی هوشمند

Figure (2): Analytical diagrams of the optimal operation results for the 33-bus distribution network under the proposed model, including the fuzzy-genetic algorithm and smart control devices

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-07-09]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025

در شکل (۳) نمودار همگرایی هر یک از الگوریتم‌ها در ۱۰۰ تکرار نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که الگوریتم پیشنهادی کمترین مقدار تابع هدف را دارد که نشان‌دهنده برتری این رویکرد می‌باشد.



شکل (۳) : مقایسه همگرایی الگوریتم‌ها

Figure (3): Comparison of convergence of algorithms

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک چارچوب نوین برای بهینه‌سازی عملکرد شبکه‌های توزیع برق فعال ارائه شد که در آن ترکیب منابع انرژی تجدیدپذیر، سیستم ذخیره‌سازی انرژی (باتری)، خودروهای الکتریکی، تنظیم‌کننده‌های ولتاژ، ترانسفورماتور با تپ‌چنجر (OLTC)و پاسخگویی به تقاضا به صورت یکپارچه مدل‌سازی گردید. به‌منظور حل مدل غیرخطی، پیچیده و چندهدفه حاکم بر مسئله، از یک الگوریتم ترکیبی فازی–ژنتیک استفاده شد که امکان لحاظ همزمان چند تابع هدف شامل کمینه‌سازی تلفات توان، هزینه بهره‌برداری و انحراف ولتاژ را فراهم می‌سازد. در بخش مدل‌سازی، کلیه تجهیزات کنترلی با دقت مدل‌سازی شدند تا عملکرد واقعی شبکه به درستی منعکس شود. از جمله نوآوری‌های مهم این مطالعه، می‌توان به مدل دقیق پاسخ بار، مدل‌سازی فنی OLTC و رگولاتورها، در نظر گرفتن سناریوهای عدم قطعیت تولید تجدیدپذیر و بار، و همچنین استفاده از روش فازی برای تجمیع اهداف در یک چارچوب تصمیم‌گیری اشاره کرد. نتایج شبیه‌سازی بر روی یک شبکه نمونه ۳۳ شینه IEEE نشان داد که رویکرد پیشنهادی در مقایسه با روش‌های مرجع از جمله الگوریتم ژنتیک سنتی، الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم رهاسازه محدب ناهمگون DCHR، عملکرد بهتری از نظر کاهش تلفات شبکه، بهبود پروفایل ولتاژ و کاهش هزینه بهره‌برداری دارد. همچنین سیستم پیشنهادی توانست ولتاژ شین‌ها را در محدوده مجاز با انحراف کمتر حفظ کند و استفاده بهینه‌تری از منابع ذخیره و تولید پراکنده داشته باشد. در مجموع، چارچوب توسعه‌یافته در این تحقیق می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای تصمیم‌گیری در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری بهینه از شبکه‌های توزیع هوشمند، به‌ویژه در شرایط حضور گسترده منابع تجدیدپذیر و پاسخ بار، مورد استفاده قرار گیرد. همچنین قابلیت توسعه این روش برای شبکه‌های بزرگ‌تر، لحاظ ریزشبکه‌ها و اعمال سیاست‌های قیمت‌گذاری زمان‌مند از جمله زمینه‌های تحقیقاتی آتی خواهد بود.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-07-09]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 2- Summer 2024

References

مراجع

[1] S. Li, X. Fang, J. Liao, M. Ghadamyari, M. Khayatnezhad, N. Ghadimi, Evaluating the efficiency of CCHP systems in Xinjiang Uygur Autonomous Region: an optimal strategy based on improved mother optimization algorithm, Case Stud. Therm. Eng. 54 (2024) 104005.

[2] M.E. Baran, F.F. Wu, Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing, IEEE Trans. Power Deliv. 4 (1989) 1401–1407.

[3] S.M. Rashid, A. Zare-Ghaleh-Seyyedi, J. Moosanezhad, A.A. Khan, others, Multi-objective design of the energy storage-based combined heat and power off-grid system to supply of thermal and electricity consumption energies, J. Energy Storage 73 (2023) 108675.

[4] S. Bu, L.G. Meegahapola, D.P. Wadduwage, A.M. Foley, Stability and dynamics of active distribution networks (ADNs) with D-PMU technology: A review, IEEE Trans. Power Syst. 38 (2022) 2791–2804.

[5] J.A. Taylor, F.S. Hover, Convex models of distribution system reconfiguration, IEEE Trans. Power Syst. 27 (2012) 1407–1413.

[6] M.K. Singh, V. Kekatos, S. Taheri, K.P. Schneider, C.-C. Liu, Enforcing radiality constraints for DER-aided power distribution grid reconfiguration, ArXiv Prepr. ArXiv191003020 (2019).

[7] A.Z.G. Seyyedi, M.J. Armand, S. Shahmoradi, S.M. Rashid, E. Akbari, A.J.K. Al-Hassanawy, Iterative optimization of a bi-level formulation to identify severe contingencies in power transmission systems, Int. J. Electr. Power Energy Syst. 145 (2023) 108670.

[8] N. Ghadimi, M. Sedaghat, K.K. Azar, B. Arandian, G. Fathi, M. Ghadamyari, An innovative technique for optimization and sensitivity analysis of a PV/DG/BESS based on converged Henry gas solubility optimizer: A case study, IET Gener. Transm. Distrib. 17 (2023) 4735–4749.

[9] A.A. Niaki, M. Jamil, An efficient hydrogen-based water-power strategy to alleviate the number of transmission switching within smart grid, Int. J. Hydrog. Energy 70 (2024) 347–356.

[10] R.A. Jabr, R. Singh, B.C. Pal, Minimum loss network reconfiguration using mixed-integer convex programming, IEEE Trans. Power Syst. 27 (2012) 1106–1115.

[11] S.M. Rashid, Employing advanced control, energy storage, and renewable technologies to enhance power system stability, Energy Rep. 11 (2024) 3202–3223.

[12] J. Chevinly, S.S. Rad, E. Nadi, B. Proca, J. Wolgemuth, A. Calabro, H. Zhang, F. Lu, Gallium Nitride (GaN) based High-Power Multilevel H-Bridge Inverter for Wireless Power Transfer of Electric Vehicles, ArXiv Prepr. ArXiv240511131 (2024).

[13] A.Z.G. Seyyedi, E. Akbari, S.M. Rashid, S.A. Nejati, M. Gitizadeh, Application of robust optimized spatiotemporal load management of data centers for renewable curtailment mitigation, Renew. Sustain. Energy Rev. 204 (2024) 114793.

[14] V. Rajinikanth, N. Razmjooy, E. Jamshidpour, N. Ghadimi, G. Dhiman, S. Razmjooy, Technical and economic evaluation of the optimal placement of fuel cells in the distribution system of petrochemical industries based on improved firefly algorithm, in: Metaheuristics Optim. Comput. Electr. Eng. Vol. 2 Hybrid Improv. Algorithms, Springer, 2023: pp. 165–197.

[15] M. Aryanfar, G. Rahmani-Sane, M.H. Masali, A. Mosallanejad, Application of recovery techniques to enhance the resilience of power systems, in: Future Mod. Distrib. Netw. Resil., Elsevier, 2024: pp. 195–213.

[16] S. Sun, G. Li, C. Chen, Y. Bian, Z. Bie, A novel formulation of radiality constraints for resilient reconfiguration of distribution systems, IEEE Trans. Smart Grid 14 (2022) 1337–1340.

[17] K. Wang, Y. Xue, Q. Guo, M. Shahidehpour, Q. Zhou, B. Wang, H. Sun, A coordinated reconfiguration strategy for multi-stage resilience enhancement in integrated power distribution and heating networks, IEEE Trans. Smart Grid 14 (2022) 2709–2722.

[18] Z.N. Popovic, S.D. Knezevic, Dynamic reconfiguration of distribution networks considering hosting capacity: A risk-based approach, IEEE Trans. Power Syst. 38 (2022) 3440–3450.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-07-09]

[19] Z. Yin, S. Wang, Q. Zhao, Sequential reconfiguration of unbalanced distribution network with soft open points based on deep reinforcement learning, J. Mod. Power Syst. Clean Energy 11 (2022) 107–119.

[20] C. Lei, S. Bu, J. Zhong, Q. Chen, Q. Wang, Distribution network reconfiguration: A disjunctive convex hull approach, IEEE Trans. Power Syst. 38 (2023) 5926–5929.

[21] R. Zafar, H.R. Pota, Multi-timescale coordinated control with optimal network reconfiguration using battery storage system in smart distribution grids, IEEE Trans. Sustain. Energy 14 (2023) 2338–2350.

[22] H. Zhang, Y. Ma, K. Yuan, M. Khayatnezhad, N. Ghadimi, Efficient design of energy microgrid management system: a promoted Remora optimization algorithm-based approach, Heliyon 10 (2024).

[23] P. Harsh, D. Das, A simple and fast heuristic approach for the reconfiguration of radial distribution networks, IEEE Trans. Power Syst. 38 (2023) 2939–2942.

[24] M. Mahdavi, K.E.K. Schmitt, F. Jurado, Robust distribution network reconfiguration in the presence of distributed generation under uncertainty in demand and load variations, IEEE Trans. Power Deliv. 38 (2023) 3480–3495.

[25] J. Lyu, K. Cheng, Two-Stage stochastic coordinated scheduling of integrated gas-electric distribution systems considering network reconfiguration, IEEE Access 11 (2023) 51084–51093.

[26] A. Azizi, B. Vahidi, A.F. Nematollahi, Reconfiguration of active distribution networks equipped with soft open points considering protection constraints, J. Mod. Power Syst. Clean Energy 11 (2023) 212–222.

[27] N. Gholizadeh, N. Kazemi, P. Musilek, A comparative study of reinforcement learning algorithms for distribution network reconfiguration with deep Q-learning-based action sampling, IEEE Access 11 (2023) 13714–13723.

[28] M.A. Iqbal, R. Zafar, A novel radiality maintenance algorithm for the metaheuristic based co-optimization of network reconfiguration with battery storage, IEEE Access 11 (2023) 25689–25701.

[29] H.-W. Kim, S.-J. Ahn, S.-Y. Yun, J.-H. Choi, Loop-based encoding and decoding algorithms for distribution network reconfiguration, IEEE Trans. Power Deliv. 38 (2023) 2573–2584.

[30] Y. Wang, G. Strbac, Transient Stability-Driven Planning for the Optimal Sizing of Resilient AC/DC Hybrid Microgrids, IEEE Trans. Power Syst. 40 (2025) 2777–2790.

[31] Q. Lai, C. Shen, D. Li, Dynamic Modeling and Stability Analysis for Repeated LVRT Process of Wind Turbine Based on Switched System Theory, IEEE Trans. Power Syst. 40 (2025) 2711–2723.

[32] C. Lei, S. Bu, J. Zhong, Q. Chen, Q. Wang, Distribution Network Reconfiguration: A Disjunctive Convex Hull Approach, IEEE Trans. Power Syst. 38 (2023) 5926–5929.

[33] Rashidi pour B, Haroonabadi H. Optimal Operation of a Microgrid in Presence of Distributed Energy Resources and Demand Response Programs, Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 1, no. 3, pp. 67-77, Autumn 2013 (in Persian).

[34] Tabakhnejad P, Tavakoli A, Forouzanfar M. Improving Current Sharing and Voltage Regulation in DC Microgrids Based on Hybrid Energy Storage, Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 12, no. 1, pp. 63-75, Spring 2024 (in Persian).

[35] Sarhaddi S M, Soleymani S, Mozaffari S B. Resilience-Oriented Energy Management for Multiple Microgrids Coalition Based on a Cooperative Game Theory Model, Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 12, no. 3, pp. 49-60, Autumn 2023 (in Persian).

[36] Darafshdar V, Tabrizian M, Shahmirzad H. Scheduling energy storage in active distribution networks using multi-objective bi-level optimization, Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 12, no. 2, pp. 15-28, Summer 2023 (in Persian).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-07-09]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 2- Summer 2024

زیرنویس‌ها

[1]Voltage Regulator
[2]Radiality Constraint
[3]crossover
[4]mutation

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-07-09]