Karafan
Quarterly Scientific Journal of National University of Skill
Spring 2026, Vol. 23, No. 1, p. 185-207
Journal Homepage: https://karafan.tvu.ac.ir/?lang=en
: 10.48301/kssa.2025.517491.3189

Optimal Load and Energy Management Model in Active Distribution Networks with Prosumer Features

Hadi Zayandehroodi,[1] Abbas Safari,[2] Hesam Rahbarimagham,[3*]

[1, 2] Department of Electrical Engineering, Ke.C., Islamic Azad University, Kerman, Iran.

[3] Department of Electrical and Computer Engineering, Raf.C., Islamic Azad University, Rafsanjan, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:
Original Research

Received: 2025.04.21
Revised: 2025.06.02
Accepted:2025.12.14

Keyword:
Load and Energy Management
Active Distribution Networks
Prosumers
Renewable Energy Sources
Energy Optimization

***Corresponding Author:**
Hesam Rahbarimagham
Email: *h.rahbarim@aut.ac.ir*

ABSTRACT

This research presents a novel model for optimizing load and energy management in active distribution networks with prosumer (producer-consumer) features. The proposed model aims to simultaneously reduce costs and energy losses, specifically focusing on optimizing electricity generation costs by prosumers, energy losses in the network, load reduction, and costs associated with renewable resource curtailment. Simulation results demonstrate that the proposed model reduces energy losses by up to 14.5% and improves network voltage quality. Additionally, peak loads are reduced by 10%, and energy costs are lowered by 5%. By employing demand management strategies, the model establishes optimal coordination between energy production and consumption in the grid and creates improved conditions for selling electricity generated by prosumers, resulting in an 8% increase in their profitability. The optimization model effectively solves mixed-integer and complex optimization problems using advanced tree-search algorithms, such as branch and bound, enhancing solution speed and accuracy. These results highlight the model's positive impact on improving the efficiency, stability, and productivity of active distribution networks, as well as its high potential for enhancing energy resource management in smart grids.

©2024 the authors. Published by National University of Skill, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

E-ISSN: 2538-4430
ISSN: 2382-9796

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The increasing involvement of prosumers in active distribution networks (ADNs) presents new challenges in balancing energy generation, consumption, and storage. In line with the European Commission's 2050 decarbonization goals, efficient integration of renewable energy sources (RES) and energy storage systems (ESS) is essential. However, many existing studies address only specific aspects of energy optimization, often overlooking the need for a comprehensive approach that includes technical, economic, and social factors. This study introduces a multi-objective optimization model designed to minimize energy losses, reduce operational costs and peak loads, and at the same time, improve voltage stability and prosumer profitability.

Methodology

The proposed model integrates prosumers, photovoltaic (PV) systems, energy storage systems (ESS), and flexible loads into a unified optimization framework. The methodology is structured around four main objective functions.

The first objective is to minimize energy procurement costs for prosumers. This involves reducing the net cost resulting from purchasing electricity from the grid and selling excess electricity back to the grid across different time periods.

$$F_1\left(\boldsymbol{P^b_{n,t}}, \boldsymbol{P^s_{n,t}}\right) = \sum_{n\in N}\sum_{t\in T}\left(c^b_t P^b_{n,t} - c^s_t P^s_{n,t}\right)\Delta T$$

The second objective targets the reduction of energy losses in the distribution lines. These losses are primarily determined by the line resistance and power flow on each branch of the network over time.

$$F_2(\boldsymbol{B}) = \sum_{nm\in B}\sum_{t\in T} c^b_t\left(r_{nm} l_{nm,t}\right)\Delta T$$

The third objective aims to minimize the cost of curtailing photovoltaic generation. This is achieved by comparing the available solar generation in each scenario with the actual injected PV power, with the associated cost penalties included in the formulation.

$$F_3\left(\boldsymbol{P^P_{n,t}}\right) = \sum_{s\in S}\sigma_s\left(\sum_{n\in N}\sum_{t\in T} c^p_t\left(\overline{P}^P_{n,t,s} - P^P_{n,t}\right)\Delta T\right)$$

The fourth objective focuses on minimizing the penalties associated with load shedding. This is modeled by assessing the deviation of the demand response-adjusted load from the original load profile under various scenarios.

$$F_4\left(\boldsymbol{P^{DR}_{n,t}}\right) = \sum_{s\in S}\sigma_s\left(\sum_{n\in N}\sum_{t\in T} c^{DR}_t\left(P^L_{n,t,s} - P^{DR}_{n,t}\right)\Delta T\right)$$

The total objective function is formulated as the weighted sum of these four objectives, with the goal of finding a balanced solution that minimizes cost, losses, curtailment, and load reduction penalties.

$$F_T = min(F_1 + F_2 + F_3 + F_4)$$

The model also includes several operational constraints. These include power balance equations, which ensure that power injected into the network equals the total consumption and losses, and voltage constraints, which maintain network stability. Additional constraints account for the prosumer energy balance, considering the interaction between PV generation, demand response, and energy storage charging and discharging. Furthermore, the flexibility of demand response is modeled using upper and lower bounds around the baseline load, allowing for a controlled adjustment of consumption within a predefined range.

$$P_{nm,t} = r_{nm} l_{nm,t} + P^G_{n,t} + \sum_{k \in N_k, k \neq n} P_{mk,t} \quad \forall nm \in B, t \in T$$

$$P^G_{n,t} = P^{DR}_{n,t} - P^P_{n,t} - P^{dis}_{n,t} + P^{ch}_{n,t} \quad \forall n \in N, t \in T$$

$$P^L_{n,t,s} - P^L_{n,t,s} \times \varepsilon \leq P^{DR}_{n,t} \leq P^L_{n,t,s} + P^L_{n,t,s} \times \varepsilon \quad \forall n \in N, t \in T, s \in S$$

The optimization problem is formulated as a mixed-integer second-order cone programming (MISOCP) model. To address the inherent uncertainties in renewable energy source (RES) generation and load demand, the model is solved using the SCIP solver. This solver employs branch-and-bound techniques, which are effective in handling the combinatorial nature of integer variables while ensuring convergence to globally optimal or near-optimal solutions.

Results and discussion

The proposed model was evaluated on a standard 33-bus distribution network under various demand-side management (DSM) scenarios. The outcomes highlight the impact of integrating flexible loads and prosumer-based energy trading on system performance. According to Table 1, as DSM participation increases from 0% to 10%, energy losses in the network decrease from 0.195 MWh to 0.143 MWh. This represents a 14.5% reduction, which demonstrates the effectiveness of DSM in reducing power flow through the network and hence minimizing line losses. Voltage stability is also improved. The minimum voltage in the network increases from 0.976 p.u. to 0.979 p.u., and the maximum voltage decreases from 1.040 p.u. to 1.032 p.u. This leads to a narrower and more stable voltage range, which is crucial for maintaining the quality of power supply and reducing stress on voltage-sensitive equipment. From an economic standpoint, enabling DSM and prosumer trading contributes to a higher profitability for participants. The simulations show that prosumers benefit from an 8% increase in profit, mainly due to better alignment between production and consumption, and efficient energy exchange strategies based on time-varying electricity prices. In terms of computational performance, the model's complexity increases with higher DSM levels. The solution time grows from 22 seconds in the base case (no DSM) to 61 seconds when 10% of the demand is considered flexible. This increase is expected, as the optimization must account for more variables and scenarios. However, the improved system performance and cost savings justify the added computational effort. Overall, the results confirm that DSM and flexible loads can significantly enhance the technical and economic

efficiency of smart distribution networks

Table 1. Performance comparison under different demand-side management (DSM) scenarios.

Case	Energy Loss (MWh)	Min Voltage (p.u.)	Max Voltage (p.u.)	Peak Load (MW)
No DSM	0.195	0.976	1.040	0.420
5% DSM	0.167	0.977	1.036	0.399
10% DSM	0.143	0.979	1.032	0.378

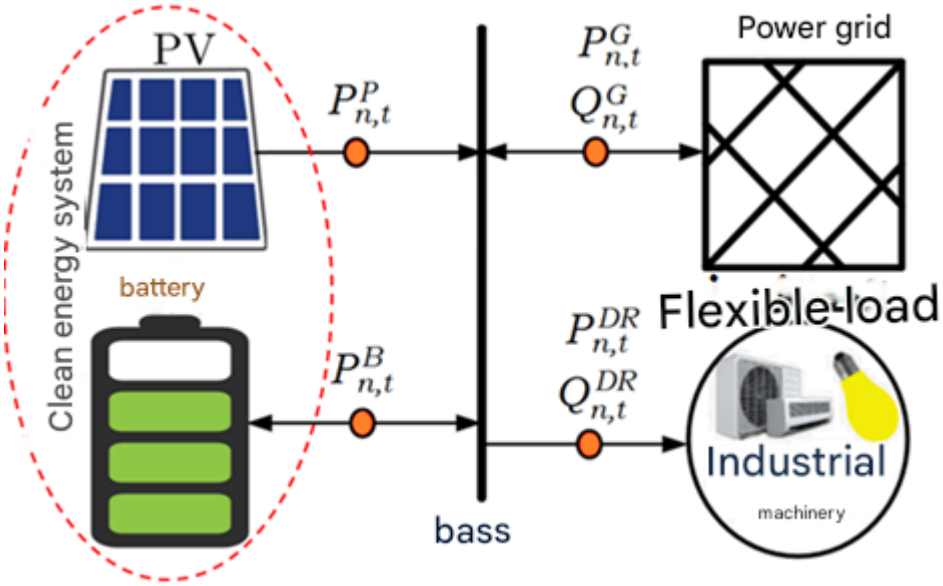


Figure 1. Proposed prosumer-integrated ADN model.

Conclusion

The developed model effectively tackles the technical and economic challenges in active distribution networks (ADNs) involving prosumers. The results indicate clear improvements, including reduced energy losses, better voltage regulation, and increased profitability for prosumers through optimized energy management. The framework demonstrates practical value for enhancing grid performance while supporting decentralized energy resources. Future extensions of this work will focus on incorporating electric vehicles (EVs) and more complex uncertainty modeling to further improve system flexibility and resilience. This research contributes a solid foundation for advancing scalable and sustainable smart grid operations.

کارافن
فصلنامه علمی دانشگاه ملی مهارت
بهار ۱۴۰۵، دوره ۲۳، شماره ۱، ۲۰۷-۱۸۵
آدرس نشریه: https://karafan.tvu.ac.ir
doi :10.48301/kssa.2025.517491.3189

مدل بهینه‌سازی مدیریت بار و انرژی در شبکه‌های توزیع فعال با ویژگی پروسومرها

هادی زاینده‌رودی [۱]، عباس صفری [۲]، حسام رهبری مقام [۳*]

۱و ۲- گروه مهندسی برق، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران.

۳- گروه مهندسی برق، واحد رفسنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، رفسنجان، ایران.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۰۱
بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۱۲
پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۲۳

کلید واژگان:
مدیریت بار و انرژی
شبکه‌های توزیع فعال
تولیدکنندگان مصرف‌کننده
منابع انرژی تجدیدپذیر
بهینه‌سازی انرژی

***نویسنده مسئول:**
حسام رهبری‌مقام
پست الکترونیکی:
h.rahbarim@aut.ac.ir

چکیده

این تحقیق یک مدل نوین برای بهینه‌سازی مدیریت بار و انرژی در شبکه‌های توزیع فعال با ویژگی تولیدکنندگان مصرف‌کننده (پروسومرها) ارائه می‌دهد. مدل پیشنهادی با هدف کاهش هم‌زمان هزینه‌ها و تلفات انرژی، به طور خاص به بهینه‌سازی هزینه‌های تولید برق توسط مصرف‌کنندگان-تولیدکنندگان، تلفات انرژی در شبکه، کاهش بار و هزینه‌های ناشی از قطع منابع تجدیدپذیر می‌پردازد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که مدل پیشنهادی توانسته است تلفات انرژی را تا ۱۴٫۵ درصد کاهش دهد و کیفیت ولتاژ شبکه را بهبود بخشد. همچنین، بارهای اوج تا ۱۰ درصد کاهش یافته و هزینه‌های انرژی تا ۵ درصد کاهش یافته است. مدل بهینه‌سازی با استفاده از استراتژی‌های مدیریت تقاضا، هماهنگی بهینه‌ای بین تولید و مصرف انرژی در شبکه برقرار می‌سازد و توانسته است شرایط بهتری برای فروش برق تولیدی توسط مصرف‌کنندگان-تولیدکنندگان فراهم آورد، که منجر به افزایش ۸ درصدی سودآوری آن‌ها می‌شود. این مدل با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته جستجوی درختی مانند شاخه‌بندی و قید، به‌طور موثر مسائل بهینه‌سازی عدد صحیح و مختلط را حل کرده و سرعت و دقت حل را افزایش می‌دهد. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت مدل در بهبود کارایی، پایداری و بهره‌وری شبکه‌های توزیع فعال است و پتانسیل بالای آن برای بهبود مدیریت منابع انرژی در شبکه‌های هوشمند را اثبات می‌کند.

شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰
شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

©2024 the authors. Published by National University of Skill, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

مقدمه

استراتژی انرژی کمیسیون اروپا با هدف کربن‌زدایی کامل تا سال ۲۰۵۰، بر ادغام سیستم‌های فتوولتائیک (PV) و ذخیره‌سازی انرژی (ESS) در شبکه برق تأکید دارد. استفاده از ESS در کنار PV به مدیریت تولید متناوب، کاهش بار اوج، بهینه‌سازی هزینه‌ها و ایجاد فرصت‌های جدید برای تولیدکنندگان مصرف‌کننده کمک می‌کند. برای تحقق این اهداف، همکاری میان اپراتورهای شبکه و فروشندگان ضروری است. در این چارچوب، شبکه‌های توزیع فعال با قابلیت یکپارچه‌سازی منابع تجدیدپذیر و ذخیره‌سازی، نقش مهمی در بهینه‌سازی سیستم انرژی دارند. با این حال، بهره‌برداری مؤثر از این منابع همچنان چالشی است. پژوهش حاضر مدلی بهینه سازی برای مدیریت بار و انرژی در این شبکه‌ها ارائه می‌دهد که با هدف کاهش هم‌زمان تلفات و هزینه‌ها طراحی شده است. این مدل با استفاده از استراتژی‌های مدیریت تقاضا و تنظیم توان تولیدی منابع خورشیدی و ذخیره سازی، هماهنگی بهینه‌ای بین تولید و مصرف برقرار می‌سازد و موجب بهبود عملکرد، پایداری و بهره‌وری شبکه می‌شود.

پیشینه پژوهش

تحقیقات بنیادی مختلف به توسعه استراتژی‌های مدیریت انرژی در شبکه‌های توزیع فعال پرداخته‌اند. برخی مطالعات به بررسی روش‌های هماهنگ برای مدیریت بهینه انرژی و کاهش هزینه‌ها در جوامع تولیدکننده مصرف‌کننده پرداخته‌اند. به‌عنوان نمونه، در تحقیقاتی مرجع [۱] به بررسی مدیریت انرژی هماهنگ پرداخته است که هدف آن کاهش هزینه‌ها و بهبود قابلیت اطمینان در شبکه‌های توزیع فعال می‌باشد. در این راستا، مرجع [۲] یک سیستم هوشمند برای بهینه‌سازی و ایجاد سود اقتصادی در شبکه‌های توزیع فعال معرفی کرده است و مرجع [۳] نیز چارچوبی برای مدیریت انرژی همکاری‌محور در زمان واقعی ارائه می‌دهد. در ادامه، مطالعات دیگر به معرفی مدل‌هایی برای درگیر کردن تولیدکنندگان مصرف‌کننده پرداخته‌اند. به‌طوری که مرجع [۴] از یک چارچوب چندعاملی برای تعادل حق بیمه‌ها در مدیریت انرژی استفاده می‌کند و مرجع [۵] نیز یک مدل تصادفی برای ریز شبکه‌های جزیره‌ای معرفی کرده است. همچنین، مرجع [۶] به بررسی محدودیت‌های عملیاتی و بهینه سازی پرداخته و بر یکپارچگی شبکه‌های متوسط و پایین ولتاژ تمرکز دارد. مرجع [۷] نیز الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات را برای مدیریت انرژی در شبکه‌های توزیع فعال مورد استفاده قرار داده است. در نهایت، مرجع [۸] تا [۱۰] مدل‌های بهینه‌سازی را برای افزایش کارایی شبکه و سودآوری تولیدکنندگان مصرف‌کننده ارائه می‌دهند. به‌طور خاص، مرجع [۸] از یک بازی تصادفی برای تنظیم ولتاژ با تولیدکنندگان مصرف‌کننده انرژی خورشیدی استفاده می‌کند، مرجع [۹] مدل بهینه‌سازی را برای کاهش تلفات شبکه و افزایش سود تولیدکنندگان مصرف‌کننده ارائه می‌دهد و مرجع [۱۰] به مسأله عدم تعادل ولتاژ و تأثیر آن بر رضایت خانوارها پرداخته است. در دیگر مطالعات، مدل‌های بهینه سازی و سیستم‌های دو مرحله‌ای برای مدیریت انرژی در شبکه‌های توزیع فعال معرفی شده است. مرجع [۱۱] یک سیستم دو مرحله‌ای برای تعادل شبکه بر اساس رفتار تولیدکنندگان مصرف‌کننده ارائه می‌دهد و مرجع [۱۲] مدلی برای کاهش هزینه‌ها برای تولیدکنندگان مصرف‌کننده حرارتی با استفاده از ذخیره سازی حرارتی معرفی می‌کند. مرجع [۱۳] چارچوبی برای توزیع توان راکتی پیشنهاد می‌دهد و مرجع [۱۴] کنترل بهینه ولتاژ/واریانس را برای کاهش تلفات توان معرفی می‌کند. همچنین، مرجع [۱۵] مدل انتشار کربن برای شبکه‌های دارای منابع تجدیدپذیر و ذخیره‌سازی انرژی را ارائه داده است و مرجع [۱۶] از یک مدل مارکوف برای بهینه‌سازی قابلیت اطمینان سیستم گرمایشی استفاده می‌کند. مرجع [۱۷] یک چارچوب برای محدوده‌های عملیاتی پویا معرفی کرده و مرجع [۱۸] از روش ضرب‌کننده‌های جهت متناوب برای زمان‌بندی چندعاملی قوی استفاده می‌کند. مرجع [۱۹] رویکردی هیبریدی با استفاده از منطق فازی برای مدیریت انرژی پیشنهاد می‌دهد و مرجع [۲۰] استراتژی مدیریت انرژی در ناحیه خانگی را برای پاسخگویی به تقاضا معرفی می‌کند. مرجع [۲۱] یک روش دو مرحله‌ای برای مدیریت تراکم در شبکه‌های توزیع فعال با منابع انرژی مختلف ارائه می‌دهد و مرجع

[۲۲] سیستم کنترل زمان واقعی برای شبکه‌های یکپارچه انتقال و توزیع با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی معرفی می‌کند. در [۲۳] عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک ثابت و متحرک در محیط‌های مختلف با استفاده از نرم‌افزار PVsystو داده‌های هواشناسی بررسی شد که نشان داد پنل‌های ثابت راندمان بالاتری دارند. در [۲۴] به بهینه‌سازی چندهدفه فنی-اقتصادی و زیست‌محیطی یک سیستم انرژی هیبریدی پرداخته شده که سیستم منتخب ۱۳٫۸٪ کمتر انتشار و ۲۲٫۳٪ بیشتر هزینه داشت. در [۲۵] طراحی اقتصادی نیروگاه هیبرید بادی-خورشیدی با سیستم ذخیره‌ساز انرژی بررسی شد که هزینه‌های انرژی را کاهش و عملکرد سیستم را بهبود بخشید.

شکاف مطالعاتی

با وجود مطالعات متعدد درباره بهینه‌سازی مدیریت انرژی در شبکه‌های توزیع فعال، همچنان چالش‌هایی وجود دارد که نیازمند پژوهش‌های جامع‌تری هستند. بیشتر تحقیقات بر جنبه‌های خاصی تمرکز داشته‌اند و کمتر به رویکردهای یکپارچه برای پوشش تعاملات پیچیده میان تولیدکنندگان مصرف‌کننده، ذخیره‌سازی انرژی و منابع تجدیدپذیر پرداخته‌اند. همچنین، اغلب مدل‌های موجود در شرایط ایستا و قطعی توسعه یافته‌اند و عملکرد مناسبی در برابر عدم‌اطمینان‌ها و تغییرات پویای شبکه ندارند. علاوه بر این، توجه کمی به ابعاد اقتصادی و اجتماعی شبکه‌های توزیع فعال شده است، از جمله تأثیر سیاست‌های اقتصادی بر رفاه و پایداری این سیستم‌ها. بنابراین، نیاز به توسعه مدل‌های جامع و نوآورانه‌ای وجود دارد که بتوانند به‌طور هم‌زمان ابعاد فنی، اقتصادی و اجتماعی را در مدیریت این شبکه‌ها در نظر بگیرند. مدل پیشنهادی با تکیه بر سناریوهای تصادفی قابل تعمیم به شرایطی است که در آن تغییرات بار و تولید به‌صورت هم‌زمان و وابسته به زمان اتفاق می‌افتند. در توسعه‌های بعدی، استفاده از روش‌های پیش‌بینی‌محور و مدل‌های زنجیره مارکوف برای مدل‌سازی عدم‌قطعیت‌های اقلیمی و فصلی پیشنهاد می‌شود.

انگیزه و نوآوری مطالعه

با رشد منابع انرژی تجدیدپذیر و نیاز به بهره‌برداری بهینه از آن‌ها در شبکه‌های توزیع فعال، اغلب پژوهش‌ها به مدل‌های جزئی و صرفاً فنی پرداخته‌اند. تاکنون رویکردی جامع که ابعاد مدیریتی، اقتصادی و اجتماعی این شبکه‌ها به‌ویژه با حضور تولیدکنندگان مصرف‌کننده را پوشش دهد، کمتر ارائه شده است؛ مسئله‌ای که انگیزه اصلی این پژوهش را شکل می‌دهد. هدف این تحقیق توسعه مدلی نوآورانه و یکپارچه برای بهینه‌سازی بار و انرژی در شبکه‌های توزیع فعال است که علاوه بر کاهش هزینه‌ها، تلفات انرژی و افزایش بهره‌وری، به مسائل اقتصادی، اجتماعی و عدم‌اطمینان‌های موجود نیز توجه دارد. نوآوری این مدل در ترکیب هم‌زمان جنبه‌های فنی و غیرفنی مدیریت انرژی و استفاده از روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته در شرایط پویا و غیرقطعی است. این رویکرد می‌تواند چارچوبی پایدار و کارآمد برای مدیریت آینده شبکه‌های توزیع فراهم آورد. در این مدل، ابعاد اجتماعی از طریق بهبود شرایط اقتصادی پروسومرها و ارتقای مشارکت آن‌ها در فروش انرژی به شبکه مدل‌سازی شده است. شاخص‌هایی مانند تغییرات درآمد خالص، کاهش هزینه‌های خرید انرژی و سود حاصل از فروش به‌عنوان معیارهای کمی برای سنجش اثرات اجتماعی در نظر گرفته شده‌اند. این تحلیل در ساختار تابع هدف و متغیرهای اقتصادی لحاظ شده و موجب افزایش انگیزه مشارکت پروسومرها در بهره‌برداری بهینه از شبکه می‌گردد.

جدول ۱. مقایسه مقاله پیشنهادی با سایر مطالعات اخیر

مرجع	پروسومر	عدم قطعیت	الگوریتم‌های پیشرفته	جنبه‌های اقتصادی و اجتماعی	مدیریت تقاضا	کیفیت ولتاژ	تلفات انرژی	بهینه‌سازی هزینه‌ها
این مطالعه	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
[۱]	✓	×	✓	×	✓	×	✓	✓
[۲]	✓	×	×	✓	✓	×	×	✓
[۳]	✓	✓	✓	✓	✓	×	✓	✓
[۴]	✓	✓	×	✓	✓	×	×	✓
[۵]	✓	✓	✓	×	✓	×	✓	✓
[۶]	✓	×	✓	×	×	✓	✓	×
[۷]	✓	×	×	×	✓	×	×	✓
[۸]	✓	✓	✓	×	×	✓	✓	✓
[۹]	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓
[۱۰]	✓	×	✓	✓	✓	✓	×	✓
[۱۱]	✓	✓	✓	✓	✓	×	×	✓
[۱۲]	×	×	×	✓	×	×	×	✓
[۱۳]	×	✓	×	✓	×	✓	×	×
[۱۴]	✓	×	✓	×	×	✓	✓	✓
[۱۵]	×	✓	×	×	×	×	×	×
[۱۶]	×	×	×	✓	×	✓	×	✓
[۱۷]	✓	×	✓	×	×	✓	×	✓
[۱۸]	✓	✓	✓	✓	✓	×	✓	✓
[۱۹]	×	×	✓	×	✓	×	×	✓
[۲۰]	×	×	×	×	✓	×	×	✓
[۲۱]	✓	✓	✓	×	✓	×	✓	✓
[۲۲]	×	×	×	×	✓	×	×	✓

در جدول (۱)، مقایسه‌ای بین این مطالعه و مقالات مرجع بر اساس هشت شاخص تخصصی شامل بهینه‌سازی هزینه‌ها، کاهش تلفات انرژی، بهبود کیفیت ولتاژ، مدیریت تقاضا، جنبه‌های اقتصادی و اجتماعی، استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته، توجه به عدم‌اطمینان در منابع تجدیدپذیر و پروسومرها انجام شده است. مقاله پیشنهادی در تمام این شاخص‌ها عملکرد بهتری نسبت به مقالات مرجع دارد. این مقاله نه‌تنها به بهینه‌سازی فنی و کاهش هزینه‌ها و تلفات پرداخته، بلکه جنبه‌های اقتصادی و اجتماعی را نیز به‌طور جامع مدنظر قرار داده است. استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته و توجه به عدم‌اطمینان در منابع تجدیدپذیر، این مقاله را از نظر روش‌شناسی متمایز کرده است. در حالی که برخی مقالات مرجع در برخی شاخص‌ها عملکرد خوبی داشته‌اند، هیچ‌کدام به‌طور هم‌زمان تمام ابعاد مقاله پیشنهادی را پوشش نداده‌اند. این جامع‌بودن و نوآوری برتری مقاله را نشان می‌دهد. سایر بخش‌های مقاله به شرح زیر سازماندهی شده‌اند: بخش دوم به

فرمول‌بندی پیشنهادی و توضیحات آن پرداخته، بخش سوم نتایج شبیه‌سازی‌ها را تحلیل می‌کند و در نهایت، در بخش چهارم نتیجه‌گیری‌ها و پیشنهادات برای تحقیقات آینده آورده شده است.

رویکرد پیشنهادی

در این بخش، مدل و الگوریتم پیشنهادی برای بهینه‌سازی مدیریت منابع انرژی در شبکه‌های توزیع فعال معرفی می‌شود. این مدل با تمرکز بر منابع فتوولتائیک و سایر منابع، به تنظیم بهینه تولید و مصرف انرژی می‌پردازد. برای در نظر گرفتن عدم‌قطعیت تولید انرژی خورشیدی، از سناریوهای گسسته استفاده شده است تا اثر شرایط جوی بر عملکرد مدل تحلیل شود. دامنه تغییرات ±۲۰٪ برای بار و تولید، با استفاده از داده‌های تجربی شبکه‌های توزیع در شرایط واقعی انتخاب شده است و در مطالعات مشابه نیز رایج است. اگرچه تحلیل حساسیت نسبت به این دامنه در این مطالعه انجام نشده، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های بعدی بررسی گردد. ساختار مدل پیشنهادی به‌صورت ماژولار طراحی شده است، به‌طوری که افزودن منابع بادی یا سایر منابع تولید پراکنده تنها نیازمند تعریف پروفایل تولید و قیود مشخص برای رفتار آن‌ها می‌باشد. این امر تغییری در ساختار اصلی تابع هدف و روش حل ایجاد نمی‌کند و انعطاف‌پذیری مدل را در سناریوهای مختلف افزایش می‌دهد. در پایان، نتایج حاصل از سناریوهای مختلف بررسی و عملکرد مدل در مواجهه با عدم‌قطعیت ارزیابی می‌گردد. در این مطالعه، برای ساده‌سازی تحلیل، احتمال وقوع سناریوها برابر در نظر گرفته شده است. با این حال، مدل پیشنهادی از نظر ساختاری این قابلیت را دارد که به‌راحتی برای سناریوهای با احتمال نامساوی نیز توسعه یابد. کافی است احتمال هر سناریو به‌عنوان وزن در تابع هدف وارد شود.

مدل بهینه‌سازی پیشنهادی

در این مطالعه، یک تابع هدف چندگانه برای بهینه‌سازی مدیریت بار و انرژی در شبکه‌های توزیع فعال با حضور پروسومرها ارائه شده است. این تابع هدف کاهش هزینه‌های مربوط به برق مصرفی و تولیدی، تلفات انرژی، محدودیت توان فتوولتائیک و قطع بار را دنبال می‌کند. تمرکز اصلی بر کاهش هزینه‌های انرژی پروسومرها از طریق بهینه‌سازی بهره‌برداری از منابع تجدیدپذیر و ذخیره‌سازی انرژی است. این رویکرد با بهبود عملکرد کلی شبکه، موجب افزایش پایداری و کاهش مشکلات مالی و عملیاتی پروسومرها می‌شود.

$$F_1\left(\boldsymbol{P^b_{n,t}}, \boldsymbol{P^s_{n,t}}\right) = \sum_{n\in N}\sum_{t\in T}\left(c^b_t P^b_{n,t} - c^s_t P^s_{n,t}\right)\Delta T \qquad (۱)$$

تابع هدف دوم با هدف کاهش هزینه‌های ناشی از اتلاف انرژی در شبکه طراحی شده است. این اتلاف‌ها که عمدتاً ناشی از مقاومت خطوط و عوامل فنی هستند، باعث کاهش کارایی شبکه و افزایش هزینه‌های عملیاتی می‌شوند. کاهش این هزینه‌ها با بهینه‌سازی طراحی شبکه، مدیریت بار و بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته امکان‌پذیر است. این اقدام ضمن کاهش نیاز به تولید انرژی اضافی، فشار بر منابع تولید را کم کرده، پایداری شبکه را افزایش داده و آثار زیست‌محیطی را کاهش می‌دهد. همچنین، ارتقای کیفیت خدمات و بهبود بهره‌وری کلی سیستم از دیگر نتایج مثبت آن است.

$$F_2(\boldsymbol{B}) = \sum_{nm\in B}\sum_{t\in T} c^b_t\left(r_{nm} l_{nm,t}\right)\Delta T \qquad (۲)$$

تابع هدف سوم به کاهش هزینه‌های ناشی از محدود کردن توان تولیدی فتوولتائیک اختصاص دارد؛ اقدامی که برای حفظ تعادل شبکه یا جلوگیری از فشار بر آن انجام می‌شود. این محدودیت‌ها می‌توانند منجر به هزینه‌های فرصت، جبران

انرژی از منابع دیگر و پیامدهای مالی و زیست‌محیطی شوند. هدف این تابع، بهینه‌سازی مدیریت تولید فتوولتائیک و استفاده از تکنیک‌های پیشرفته برای هماهنگی بهتر تولید و مصرف است. همچنین، بهره‌گیری مؤثر از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی می‌تواند نیاز به اعمال این محدودیت‌ها را کاهش دهد. در نتیجه، بهره‌وری از انرژی‌های تجدیدپذیر افزایش یافته، وابستگی به سوخت‌های فسیلی کاهش می‌یابد و دستیابی به اهداف پایداری تسهیل می‌شود.

$$F_3\left(\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{n,t}}^{\boldsymbol{P}}\right) = \sum_{s\in S}\sigma_s\left(\sum_{n\in N}\sum_{t\in T}c_t^p\left(\overline{P}_{n,t,s}^{P} - P_{n,t}^{P}\right)\Delta T\right) \quad (۳)$$

تابع هدف چهارم بر کاهش هزینه‌های ناشی از قطع بار تمرکز دارد؛ اقدامی که معمولاً در شرایط بار اضافی یا مشکلات فنی اجرا می‌شود و منجر به خسارات مالی، اختلال در خدمات و نارضایتی مصرف‌کنندگان می‌گردد. این تابع با بهینه‌سازی مدیریت بار، بهبود پیش‌بینی تقاضا، تخصیص منابع و بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته، سعی در پیشگیری از قطع بار دارد. همچنین، اجرای برنامه‌های مدیریت تقاضا و تشویق مصرف‌کنندگان به کاهش مصرف در زمان‌های اوج، از راهکارهای مؤثر در این زمینه است. در نتیجه، کیفیت خدمات، بهره‌وری و پایداری شبکه بهبود یافته و هزینه‌های عملیاتی کاهش می‌یابد.

$$F_4\left(\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{n,t}}^{\boldsymbol{DR}}\right) = \sum_{s\in S}\sigma_s\left(\sum_{n\in N}\sum_{t\in T}c_t^{DR}\left(P_{n,t,s}^{L} - P_{n,t}^{DR}\right)\Delta T\right) \quad (۴)$$

در نتیجه، تابع هدف چندگانه مدل پیشنهادی در معادله (۵) و محدودیت‌های آن در معادلات (۶) تا (۲۴) ارائه شده‌اند. این مدل با هدف بهینه‌سازی همزمان جنبه‌های مختلف مدیریت بار و انرژی طراحی شده و شامل چهار بخش اصلی برای کاهش هزینه‌ها و ارتقای عملکرد شبکه است. محدودیت‌ها نیز شرایط ضروری برای تحقق بهینه‌سازی را مشخص می‌کنند. در این مدل، وزن‌دهی اهداف مختلف برابر فرض شده است تا سادگی مدل حفظ شود. با این حال، مدل پیشنهادی به‌صورت انعطاف‌پذیر قابلیت تنظیم وزن‌ها را دارد تا بسته به سیاست‌های اپراتور، بهینه‌سازی بر حسب اولویت‌های اقتصادی یا فنی صورت گیرد.

$$F_T = min(F_1 + F_2 + F_3 + F_4) \quad (۵)$$

محدودیت (۶) تضمین می‌کند که توان خریداری شده یا فروش رفته همیشه مثبت یا صفر باشد، که از نظر اقتصادی و عملیاتی منطقی است. همچنین، محدودیت (۷) بیان می‌کند که هزینه خرید انرژی باید حداقل برابر با هزینه فروش آن باشد، تا از ضرر مالی جلوگیری شده و اطمینان حاصل شود که هزینه‌های خرید انرژی از شبکه بیشتر از درآمد حاصل از فروش آن به شبکه نخواهد بود.

$$c_t^b \geq c_t^s \quad \forall t \in T \quad (۷)$$

محدودیت (۸) به‌طور مستقیم میزان تعادل میان خرید و فروش انرژی در هر باس n را مشخص می‌کند. این قید این اطمینان را ایجاد می‌کند که انرژی وارد شده به شبکه و انرژی صادر شده از آن در توازن کامل قرار داشته باشد، به طوری که هیچ‌گونه انحراف یا عدم تعادل در جریان انرژی سیستم وجود نداشته باشد. این امر به حفظ پایداری و عملکرد بهینه شبکه توزیع کمک می‌کند.

$$P_{n,t}^{G} = P_{n,t}^{b} - P_{n,t}^{s} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (۸)$$

محدودیت‌های (۹) و (۱۰) به توازن توان فعال و راکتیو در شبکه اشاره دارند. این قیدها تضمین می‌کنند که توان فعال و راکتیو به‌طور همزمان و متناسب در سیستم توزیع تنظیم شوند. رعایت این محدودیت‌ها برای حفظ پایداری شبکه ضروری است، زیرا عدم تعادل در توان‌ها می‌تواند باعث کاهش کارایی شبکه و بروز مشکلات عملیاتی شود.

$$P_{nm,t} = r_{nm} l_{nm,t} + P^{G}_{n,t} + \sum_{k \in N_k, k \neq n} P_{mk,t} \quad \forall nm \in B, t \in T \tag{۹}$$

$$Q_{nm,t} = x_{nm} l_{nm,t} + Q^{DR}_{n,t} + \sum_{k \in N_k, k \neq n} Q_{mk,t} \quad \forall nm \in B, t \in T \tag{۱۰}$$

محدودیت (۱۱) به تعریف ولتاژ مربعی در باس‌های شبکه مربوط است و برای تحلیل و بهینه‌سازی سیستم‌های قدرت اهمیت زیادی دارد. این قید محدوده ولتاژ هر باس را تعیین می‌کند تا پایداری و امنیت شبکه حفظ شود. ولتاژ باس‌ها تأثیر زیادی بر کیفیت توان و پایداری شبکه دارد، زیرا تغییرات غیرمجاز در ولتاژ می‌تواند منجر به مشکلاتی مانند افت یا اضافه ولتاژ و ناپایداری شبکه شود. بنابراین، رعایت این قید در مدل‌سازی شبکه‌های توزیع برای حفظ عملکرد صحیح و ثبات شبکه ضروری است.

$$v_{n,t} = v_{m,t} - 2\left(r_{nm} P_{nm,t} + x_{nm} Q_{nm,t}\right) + \left(r^2_{nm} + x^2_{nm}\right) l_{nm,t} \quad \forall nm \in B, t \in T \tag{۱۱}$$

محدودیت (۱۲) رابطه‌ای بین جریان توان، ولتاژهای باس و جریان‌های عبوری از خطوط انتقال برقرار می‌کند که برای تحلیل سیستم‌های قدرت ضروری است. این قید به ارتباط فنی میان ولتاژها و جریان‌ها اشاره دارد و به محاسبه صحیح جریان توان در شبکه کمک می‌کند. با توجه به اینکه توان الکتریکی از ضرب جریان و ولتاژ به‌دست می‌آید، این محدودیت برای توزیع صحیح توان در شبکه حیاتی است. در مسائل بهینه‌سازی، مانند پخش توان بهینه، این قید تضمین می‌کند که جریان‌ها و ولتاژها در محدوده مجاز باقی بمانند و بهره‌وری شبکه حفظ شود.

$$l_{nm,t} v_{n,t} \geq P^2_{nm,t} + Q^2_{nm,t} \quad \forall nm \in B, t \in T \tag{۱۲}$$

محدودیت (۱۳) مربوط به ولتاژ باس شبکه است که در آن حد بالایی و پایینی مربع ولتاژ باس به ترتیب برابر با ۱,۱ و ۰,۹ تعیین شده‌اند. این قید تضمین می‌کند که ولتاژ در شبکه در محدوده‌های مجاز باقی بماند و از تغییرات غیرمجاز ولتاژ که می‌تواند منجر به مشکلات فنی یا کاهش پایداری سیستم شود، جلوگیری می‌کند.

$$\underline{v}_n \leq v_{n,t} \leq \overline{v}_n \quad \forall n \in N, t \in T \tag{۱۳}$$

در این مدل، ولتاژها به‌صورت مقدار میانگین در بازه‌های یک‌ساعته محاسبه شده‌اند. نوسانات گذرای لحظه‌ای لحاظ نشده‌اند، چراکه هدف مطالعه، مدیریت بهره‌برداری در افق کوتاه‌مدت ساعتی است، و تحلیل پایداری گذرا مد نظر نیست.

محدودیت (۱۴) به توازن توان در ساختمان‌های پروسومر اشاره دارد و تضمین می‌کند که مجموع توان مصرفی و تولیدی در این ساختمان‌ها همواره در تعادل باشد. پروسومرها با استفاده از منابع تجدیدپذیر مانند پنل‌های خورشیدی هم انرژی تولید و هم مصرف می‌کنند. این قید موجب می‌شود که در صورت تولید توان اضافی، مازاد آن به شبکه تزریق شود و در صورت کمبود تولید، انرژی از شبکه تأمین گردد. سیستم‌های ذخیره‌سازی مانند باتری‌ها نیز به حفظ این تعادل کمک می‌کنند، که در نتیجه موجب پایداری شبکه و بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌های پروسومر می‌شود.

$$P^{G}_{n,t} = P^{DR}_{n,t} - P^{P}_{n,t} - P^{dis}_{n,t} + P^{ch}_{n,t} \quad \forall n \in N, t \in T \tag{۱۴}$$

محدودیت (۱۵) به استفاده بهینه از توان فتوولتائیک (PV) اختصاص دارد و هدف آن مدیریت تولید انرژی از منابع خورشیدی است. این قید به‌ویژه برای ساختمان‌های مجهز به پنل‌های خورشیدی طراحی می‌شود تا بهره‌برداری بهینه

از فتوولتائیک‌ها تضمین شود. با توجه به نوسانات تولید انرژی فتوولتائیک به دلیل تغییرات تابش خورشید، این قید تنظیم می‌شود تا تولید انرژی همواره با نیاز مصرفی هماهنگ باشد. در صورت تولید بیش از نیاز، مازاد انرژی به سیستم ذخیره‌سازی منتقل یا به شبکه بازگشت داده می‌شود و در صورت کمبود تولید، انرژی از شبکه تأمین می‌شود. این محدودیت کمک به حفظ پایداری شبکه و بهینه‌سازی مصرف انرژی می‌کند و هدف نهایی آن کاهش هزینه‌ها از طریق مدیریت هوشمند انرژی است.

$$0 \le P^{P}_{n,t} \le \bar{P}^{P}_{n,t,s} \;\; \forall n \in N, t \in T, s \in S \qquad (۱۵)$$

محدودیت (۱۶) به مدیریت انرژی ذخیره‌شده در باتری‌ها مربوط می‌شود. این قید سطح انرژی در باتری‌ها را محدود کرده و از تجاوز به حداقل یا حداکثر ظرفیت جلوگیری می‌کند. باتری‌ها انرژی اضافی را ذخیره کرده و در زمان‌های کمبود تولید یا افزایش مصرف، این انرژی را به کار می‌گیرند. با کنترل شارژ و دشارژ، این قید به بهینه‌سازی استفاده از باتری‌ها و کاهش هزینه‌ها کمک می‌کند و از پایداری شبکه حمایت می‌کند.

$$E^{B}_{n,t+1} = E^{B}_{n,t} + \left(\eta_{ch} P^{ch}_{n,t} - {}^{1}/_{\eta_{dis}} \times P^{dis}_{n,t}\right)\Delta T \;\forall n \in N, t \in T \qquad (۱۶)$$

محدودیت‌های ۱۷ و ۱۸ به مدیریت صحیح فرآیندهای شارژ و دشارژ باتری‌ها مربوط می‌شوند. محدودیت ۱۷ قدرت شارژ باتری را کنترل می‌کند تا از فشار بیش‌ازحد به سیستم و آسیب به باتری جلوگیری شود. محدودیت ۱۸ نیز میزان توان دشارژ شده از باتری را تنظیم می‌کند تا از افت ولتاژ و کاهش کارایی باتری جلوگیری شود. این دو قید با همکاری یکدیگر، فرآیند شارژ و دشارژ را به شکلی بهینه و هماهنگ انجام می‌دهند و عمر مفید باتری‌ها را افزایش می‌دهند. این محدودیت‌ها در سیستم‌های انرژی ترکیبی مانند ساختمان‌های پروسومر، به مدیریت انرژی و بهبود بهره‌وری سیستم کمک می‌کنند.

$$0 \le P^{ch}_{n,t} \le z^{B}_{n,t} X^{B}_{n} \;\; \forall n \in N, t \in T, z \in \{0,1\} \qquad (۱۷)$$

$$0 \le P^{dis}_{n,t} \le (1 - z^{B}_{n,t}) X^{B}_{n} \;\; \forall n \in N, t \in T, z \in \{0,1\} \qquad (۱۸)$$

در این مدل، نرخ تغییر توان (Ramp rate) برای عملیات شارژ و دشارژ باتری‌ها لحاظ نشده است. این تصمیم با هدف کاهش پیچیدگی مدل اتخاذ شده است، ولی در محیط‌هایی مانند ریزشبکه‌ها که کنترل دینامیکی توان اهمیت دارد، می‌توان با افزودن این قیود، دقت مدل را افزایش داد.محدودیت (۱۹) به کنترل انرژی ذخیره‌شده در باتری مربوط است و تضمین می‌کند که انرژی باتری در محدوده مجاز باقی بماند، از آسیب به باتری و کاهش عمر آن جلوگیری کند و انرژی کافی برای تأمین نیازهای مصرفی فراهم سازد. این قید به بهینه‌سازی شارژ و دشارژ باتری و کاهش هزینه‌های انرژی کمک می‌کند.

$$X^{B}_{n} \times d^{B}_{n,t} \le E^{B}_{n,t} \le X^{B}_{n} \;\; \forall n \in N, t \in T \qquad (۱۹)$$

محدودیت (۲۰) به مقدار انرژی ذخیره‌شده اولیه در باتری اشاره دارد و به تحلیل تغییرات ذخیره‌سازی انرژی، بهینه‌سازی شارژ و دشارژ، و ارزیابی کارایی سیستم کمک می‌کند. این قید برای پیگیری عملکرد سیستم و اتخاذ تصمیمات بهینه و پیش‌بینی رفتار سیستم در شبیه‌سازی‌ها ضروری است.

$$E^{B}_{n,t} = I^{B}_{n,t} X^{B}_{n} \;\; \forall n \in N, t = 1 \qquad (۲۰)$$

لازم به ذکر است که در مدل فعلی، تأثیر تخریب تدریجی باتری‌ها لحاظ نشده است. با این حال، افزودن هزینه‌های وابسته به چرخه‌های شارژ/دشارژ یا مدل‌سازی کاهش ظرفیت تدریجی باتری می‌تواند در توسعه‌های آتی مدل در نظر گرفته شود.

محدودیت‌های ۲۱ و ۲۲ به مدیریت تغییرات بار انعطاف‌پذیر در پاسخ به تقاضا مربوط می‌شوند. محدودیت ۲۱ تغییرات بار واقعی را برای تنظیم مصرف در پاسخ به تغییرات قیمت یا نیازهای شبکه تعیین می‌کند، در حالی که محدودیت ۲۲ دامنه تغییرات بار را مشخص می‌کند. این قیدها به کاهش پیک مصرف، بهبود پایداری شبکه و بهینه‌سازی هزینه‌ها کمک می‌کنند. در این مدل، فرض شده است که پاسخ بار به صورت آنی و بدون تأخیر اعمال می‌شود. هدف، سادگی مدل و حفظ سرعت محاسباتی در افق زمانی کوتاه‌مدت است. با این حال، می‌توان در توسعه‌های بعدی تأخیر زمانی پاسخ تقاضا را با افزودن متغیرهای دینامیکی لحاظ نمود.

$$\sum_{t\in T} P_{n,t}^{DR} \le \sum_{t\in T} P_{n,t,s}^{L} \quad \forall n \in N \tag{۲۱}$$

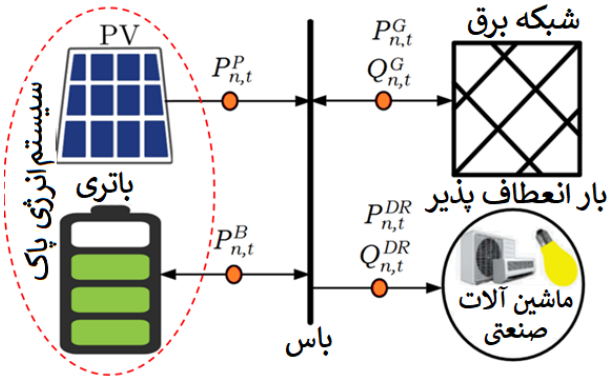
$$P_{n,t,s}^{L} - P_{n,t,s}^{L} \times \varepsilon \le P_{n,t}^{DR} \le P_{n,t,s}^{L} + P_{n,t,s}^{L} \times \varepsilon \quad \forall n \in N, t \in T, s \in S \tag{۲۲}$$

محدودیت‌های ۲۳ و ۲۴ به تغییرات بار راکتیو در پاسخ به تقاضا اشاره دارند. محدودیت ۲۳ تنظیم تغییرات بار راکتیو را برای حفظ پایداری ولتاژ در شبکه در شرایط نیاز به توان راکتیو بیشتر تضمین می‌کند، در حالی که محدودیت ۲۴ دامنه تغییرات بار راکتیو را مشخص می‌کند. این قیدها به بهبود کیفیت توان، کاهش نوسانات ولتاژ و افزایش پایداری شبکه کمک می‌کنند.

$$\sum_{t\in T} Q_{n,t}^{DR} \le \sum_{t\in T} Q_{n,t,s}^{L} \quad \forall n \in N \tag{۲۳}$$

$$Q_{n,t,s}^{L} - Q_{n,t,s}^{L} \times \varepsilon \le Q_{n,t}^{DR} \le Q_{n,t,s}^{L} + Q_{n,t,s}^{L} \times \varepsilon \quad \forall n \in N, t \in T, s \in S \tag{۲۴}$$

شکل ۱ مدل پیشنهادی برای مدیریت بار و انرژی در شبکه توزیع فعال را نشان می‌دهد که شامل پروسومرها، سیستم‌های فتوولتائیک (PV)، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی (ESS) و بارهای انعطاف‌پذیر است. هدف این مدل بهینه‌سازی مدیریت انرژی و بار در شبکه‌های توزیع برای افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها است. پروسومرها به‌عنوان مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان انرژی عمل کرده و انرژی تولیدی از منابع PV را به شبکه یا بارهای خود منتقل می‌کنند. سیستم‌های PV انرژی تجدیدپذیر تولید می‌کنند و می‌توانند آن را به بارها یا ESS ارسال کنند .ESS انرژی اضافی را ذخیره کرده و در زمان‌های نیاز تأمین می‌کند. بارهای انعطاف‌پذیر مصرف خود را بر اساس تقاضا و تغییرات تولید انرژی تنظیم می‌کنند. مدل به‌طور کلی به دنبال بهبود بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و پایداری بیشتر شبکه است. در این مدل، پروسومرها به‌صورت واحدهای مجزا با مشخصات متفاوت مدل‌سازی شده‌اند. هر پروسومر دارای پارامترهای خاص خود از جمله ظرفیت تولیدی، ذخیره‌سازی، و الگوی مصرف است و تفاوت در سیاست‌های خودمصرفی و فروش انرژی از طریق مقادیر ورودی مدل تعیین می‌شود.



شکل ۱. مدل پیشنهادی پرسومر با شبکه توزیع

روش حل پیشنهادی

حل مسائل برنامه‌ریزی عدد صحیح با محدودیت (SCIP) به عنوان یکی از پیشرفته‌ترین حل‌کننده‌ها برای مسائل MISOCP (برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط مخروطی مرتبه دوم) از ترکیبی از روش‌های عددی و تکنیک‌های اکتشافی استفاده می‌کند. این فرآیند شامل پیش‌پردازش، شاخه و کران، تولید برش، و حل زیرمسائل محدب با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مخروطی است. یک مسئله MISOCP به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{minimize } c^T x \tag{۲۵}$$

$$Ax \leq b, x \in \mathbb{R}^n, x_j \in \mathbb{Z}, \forall j \in \mathcal{I}, \tag{۲۶}$$

$$\|Q_i x + q_i\|_2 \leq d_i^T x + e_i, i = 1, \dots, m, \tag{۲۷}$$

که در آن، $x \in \mathbb{R}^n$ بردار متغیرها است، $\mathcal{I} \subseteq \{1, \dots, n\}$ مجموعه شاخص‌های متغیرهای عدد صحیح است، $A \in \mathbb{R}^{p \times n}$ و $b \in \mathbb{R}^p$ ماتریس و بردار محدودیت‌های خطی هستند، $Q_i \in \mathbb{R}^{k_i \times n}$، $q_i \in \mathbb{R}^{k_i}$، $d_i \in \mathbb{R}^n$ و $e_i \in \mathbb{R}$ پارامترهای مخروط‌های مرتبه دوم هستند. محدودیت‌های خطی و مخروطی، همراه با شرایط عدد صحیح برای برخی از متغیرها، ساختار کلی مسئله را تعریف می‌کنند. در مرحله پیش‌پردازش، SCIP مدل را برای کاهش پیچیدگی بازنویسی می‌کند. این شامل حذف متغیرها و محدودیت‌های زائد، ساده‌سازی فرم محدودیت‌های خطی، و تبدیل مخروط‌های مرتبه دوم به فرم استاندارد است.

$$\|y\|_2 \leq t, y = Q_i x + q_i, t = d_i^T x + e_i. \tag{۲۸}$$

در مرحله شاخه و کران، فضای جستجو به صورت بازگشتی به زیرمسائل تقسیم می‌شود. در هر گره از درخت، مسئله اصلی به یک مدل Relax شده تبدیل می‌شود که در آن شرایط عدد صحیح نادیده گرفته شده‌اند. مسئله Relax شده به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{minimize } c^T x, \tag{۲۹}$$

$$Ax \leq b, \|Q_i x + q_i\|_2 \leq d_i^T x + e_i. \tag{۳۰}$$

این یک مسئله محدب است که با استفاده از روش‌های نقطه داخلی حل می‌شود. روش نقطه داخلی شامل به حداقل رساندن یک تابع لاگرانژین اصلاح‌شده است که محدودیت‌های مخروطی را در نظر می‌گیرد:

$$\mathcal{L}(x,\lambda) = c^T x + \sum_{i=1}^{m} \lambda_i \left(\|Q_i x + q_i\|_2 - d_i^T x - e_i \right), \quad (۳۱)$$

که در آن $\lambda_i \geq 0$ ضرایب لاگرانژین هستند. اگر جواب Relax شده ناقض شرایط عدد صحیح باشد، SCIP از برش‌های تقویتی برای محدود کردن فضای جستجو استفاده می‌کند. این برش‌ها به صورت محدودیت‌های خطی معتبر تعریف می‌شوند که نواحی غیرمطلوب را حذف می‌کنند. یک نمونه برش معتبر برای محدودیت‌های مخروطی می‌تواند به صورت زیر باشد:

$$a^T x \leq b \quad (۳۲)$$

که در آن a و b با استفاده از تحلیل مخروط استخراج می‌شوند. در هر گره از درخت، مسئله محدب Relax شده با استفاده از روش‌های عددی حل می‌شود. محدودیت‌های مخروطی با استفاده از شرایط KKT به صورت سیستم معادلات زیر حل می‌شوند:

$$\nabla f(x) + \sum_{i=1}^{m} \lambda_i \nabla g_i(x) = 0, \quad (۳۳)$$

$$g_i(x) \leq 0, \lambda_i \geq 0, \lambda_i g_i(x) = 0. \quad (۳۴)$$

اینجا $f(x) = c^T x$ تابع هدف و $g_i(x) = \|Q_i x + q_i\|_2 - d_i^T x - e_i$ محدودیت‌های مخروطی هستند.

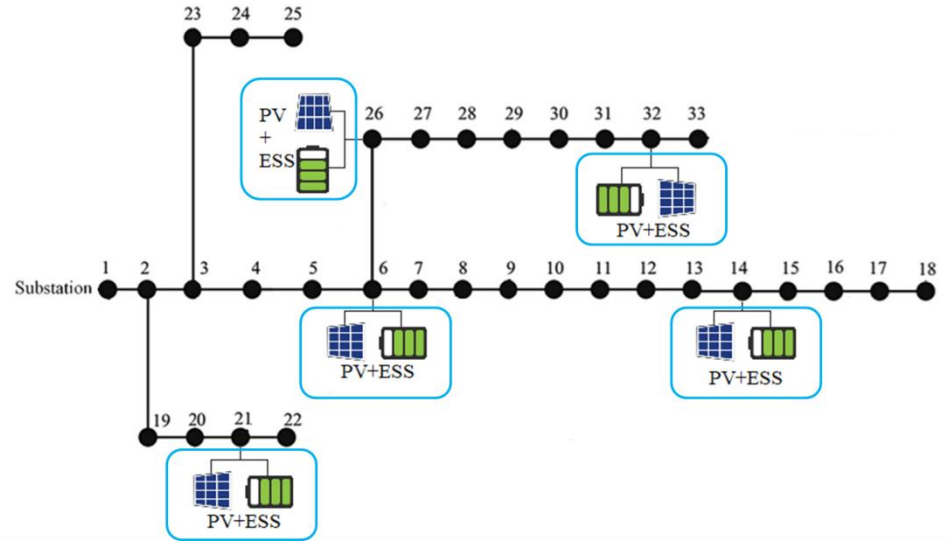
فرآیند شاخه و کران ادامه می‌یابد تا زمانی که یکی از شرایط زیر برآورده شود:

۱. تمامی گره‌های درخت پردازش شوند.
۲. یک جواب بهینه که تمامی شرایط را برآورده می‌کند، یافت شود.
۳. زمان محاسباتی یا تعداد گره‌های پردازش‌شده به حد تعیین‌شده برسد.

این روش‌ها، همراه با تکنیک‌های برش، کاهش فضای جستجو و بهینه‌سازی عددی، SCIP را به یک ابزار کارآمد برای حل مسائل پیچیده MISOCP تبدیل می‌کند. همگرایی الگوریتم با معیار gap کمتر از ۰٫۱٪ به‌عنوان شرط توقف تعریف گردید. در تمامی سناریوها، مدل یا به جواب بهینه همگرا شد یا در زمان مجاز حل با gap محدود متوقف شد. انتخاب حل‌کننده SCIP به دلیل پشتیبانی قدرتمند آن از مسائل MISOCP و قابلیت اعمال مستقیم قیود مخروطی صورت گرفته است. در مقیاس‌های کوچک، حل‌کننده‌هایی مانند CPLEX یا Gurobi نیز عملکرد قابل قبولی دارند؛ اما SCIP به دلیل ساختار منبع‌باز، انعطاف‌پذیری بالا در اعمال تنظیمات و بهینه‌سازی قیود غیرفلزی ترجیح داده شد.

نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، نتایج شبیه‌سازی شبکه توزیع ۳۳ شین با استفاده از الگوریتم مبتنی بر زبان Julia مورد تحلیل قرار می‌گیرد. شبیه‌سازی‌ها بر روی یک لپ‌تاپ با پردازنده ۱٫۸ گیگاهرتز و ۱۲ گیگابایت حافظه RAM اجرا شده است، که بهبود کارایی اجرای الگوریتم‌ها را فراهم می‌آورد. پروسومرها به‌طور استراتژیک در مکان‌های خاصی قرار داده شده‌اند که شامل بار، منابع فتوولتائیک (PV) و باتری‌ها می‌باشند. مدل پیشنهادی پیک مصرف را در سطح ساعتی مدیریت می‌کند. الگوی بار در طول ۲۴ ساعت به‌صورت ورودی لحاظ شده و پاسخ تقاضا و ذخیره‌سازی متناسب با ساعات اوج بهینه‌سازی می‌شوند. تحلیل فصلی در این مدل در نظر گرفته نشده است.



شکل ۲. شبکه پیشنهادی

عدم قطعیت‌های بار و PV با روش‌های تصادفی مبتنی بر سناریو و تغییرات ±۲۰٪ از سطح پایه مدیریت می‌شوند. بارها دارای توزیع یکنواخت هستند و ۵۰ سناریوی هم‌احتمال با احتمال برابر یک پنجاهم برای هر سناریو تولید شده است. شکل (۲) نمای شبکه پیشنهادی با پروسمورها را نشان می‌دهد.

این روش‌ها تحلیل رفتار سیستم در برابر تغییرات تصادفی را بهبود می‌بخشند. نتایج شبیه‌سازی در سه حالت مقایسه شده‌اند: حالت ۱ بدون مدیریت سمت تقاضا، حالت ۲ با مدیریت و تغییر بار ۵٪، و حالت ۳ با مدیریت و تغییر بار ۱۰٪. مقایسه این حالات تأثیر مدیریت سمت تقاضا بر بهینه‌سازی بار و عملکرد سیستم را نشان می‌دهد.

جدول ۲. مقایسه نتایج هر یک از حالت‌ها در شبکه ۳۳ شین

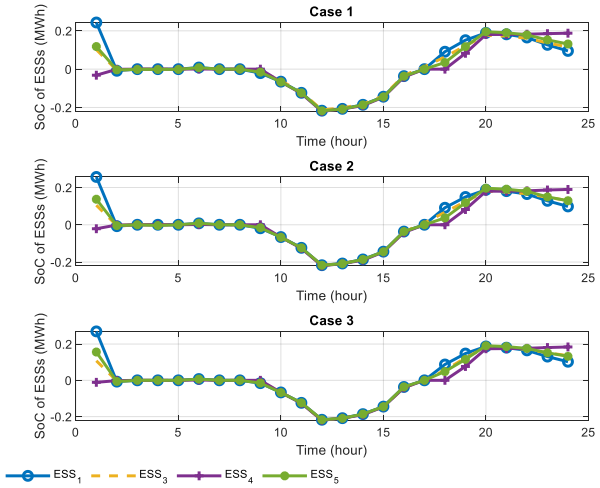
حالات	تلفات انرژی (MWh)	حداقل ولتاژ (p.u)	حداکثر ولتاژ (p.u)	پیک بار (MW)	زمان حل (s)
۱	۰,۱۹۵	۰,۹۷۶	۱,۰۴۰	۰,۴۲۰	۲۲
۲	۰,۱۶۷	۰,۹۷۷	۱,۰۳۶	۰,۳۹۹	۵۶
۳	۰,۱۴۳	۰,۹۷۹	۱,۰۳۲	۰,۳۷۸	۶۱

تحلیل جدول (۲) نتایج عملکرد سیستم را در سه حالت مختلف بررسی می‌کند که تأثیر مدیریت سمت تقاضا و تغییر بار را بر پارامترهای کلیدی شبکه توزیع ۳۳ شین نشان می‌دهد. حالت ۱ بدون مدیریت سمت تقاضا، تلفات انرژی ۰,۱۹۵ مگاوات‌ساعت است که بیشترین مقدار در میان سه حالت است. حداقل ولتاژ ۰,۹۷۶ (p.u) و حداکثر ولتاژ ۱,۰۴۰ (p.u) است. برق فروخته‌شده ۱,۳۸ مگاوات و برق خریداری‌شده ۱,۸۲ مگاوات است. پیک بار ۰,۴۲۰ مگاوات و زمان حل مسئله ۲۲ ثانیه است. حالت ۲ مدیریت سمت تقاضا با تغییر بار ۵ درصدی اعمال شده است. تلفات انرژی به ۰,۱۶۷ مگاوات‌ساعت کاهش یافته است. حداقل ولتاژ به ۰,۹۷۷ (p.u) و حداکثر ولتاژ به ۱,۰۳۶ (p.u) کاهش یافته‌اند.

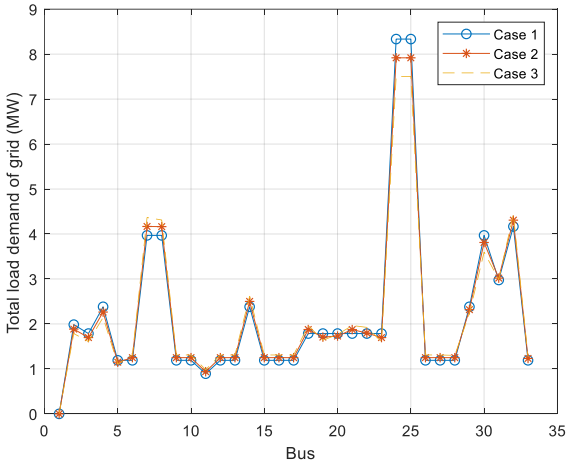
برق فروخته‌شده ۱,۳۹ مگاوات و برق خریداری‌شده ۱,۸۳ مگاوات است. پیک بار به ۰,۳۹۹ مگاوات کاهش یافته و زمان حل مسئله به ۵۶ ثانیه افزایش یافته است. حالت ۳ مدیریت سمت تقاضا با تغییر بار ۱۰ درصدی اعمال شده است. تلفات انرژی به ۰,۱۴۳ مگاوات‌ساعت کاهش یافته که کمترین مقدار است. حداقل ولتاژ به ۰,۹۷۹ (p.u) و حداکثر ولتاژ به ۱,۰۳۲ (p.u) رسیده است. برق فروخته‌شده ۱,۴۰ مگاوات و برق خریداری‌شده ۱,۸۴ مگاوات است. پیک بار به ۰,۳۷۸ مگاوات کاهش یافته و زمان حل مسئله به ۶۱ ثانیه افزایش یافته است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش تغییر بار تأثیر مثبتی بر کاهش تلفات انرژی، بهبود ولتاژ و کاهش پیک بار دارد، ولی زمان حل مسئله افزایش می‌یابد. با وجود افزایش زمان حل در حالات با مدیریت تقاضا، مدل پیشنهادی از نظر ساختاری قابلیت مقیاس‌پذیری دارد. استفاده از روش‌های بهبود زمان حل نظیر حذف متغیرهای غیرفعال، برش‌های معتبر و حل موازی سناریوها می‌تواند زمان حل را در شبکه‌های بزرگ‌تر به سطح مطلوب برساند.

مقایسه سه حالت نشان می‌دهد که مدیریت سمت تقاضا به‌طور مؤثری تلفات انرژی را کاهش داده، کیفیت ولتاژ را بهبود می‌بخشد و پیک بار را کاهش می‌دهد. با افزایش میزان تغییر بار، نتایج بهبود یافته اما زمان حل مسئله بیشتر می‌شود. بنابراین، انتخاب حالت بهینه بستگی به اهمیت کاهش تلفات انرژی و زمان حل دارد. سودآوری پروسومرها بر اساس تفاضل درآمد حاصل از فروش انرژی و هزینه خرید انرژی طی ۲۴ ساعت محاسبه شده و به‌صورت درصدی نسبت به حالت پایه (فاقد مدیریت سمت تقاضا) گزارش شده است. این شاخص معیاری ساده و مؤثر برای ارزیابی اثر اقتصادی مدل در سطح عملیاتی روزانه محسوب می‌شود.

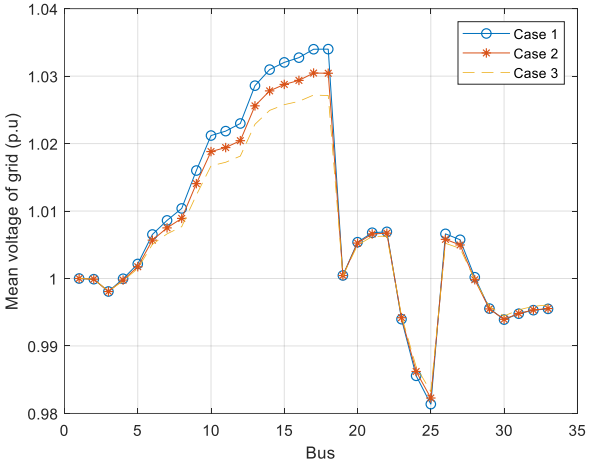
شکل (۳) الگوهای شارژ و دشارژ باتری‌های پروسومرها را نشان می‌دهد که به کاهش هزینه‌ها و فشار بر شبکه در ساعات اوج کمک می‌کند. پروسومرها می‌توانند در ساعات اوج انرژی را به شبکه بفروشند و در ساعات پایین تقاضا انرژی خریداری کنند، که به کاهش هزینه‌ها و بهبود عملکرد شبکه کمک می‌کند. شکل (۴) کاهش بار اوج در حالت مدیریت سمت تقاضا با تغییر بار ۱۰٪ را نشان می‌دهد که نه تنها نیاز به ظرفیت شبکه را کاهش می‌دهد، بلکه پایداری سیستم را بهبود می‌بخشد. همچنین، با توزیع بهینه بار، بهره‌وری منابع شبکه افزایش می‌یابد. در حالت با تغییر بار ۱۰٪، شکل (۵) نشان می‌دهد که ولتاژها بهبود می‌یابند و از عملکرد پایدارتر شبکه اطمینان حاصل می‌شود. شکل (۶) تعاملات انرژی پروسومرها را به نمایش می‌گذارد که به بهبود تعادل تولید و مصرف و افزایش مشارکت پروسومرها در مدیریت شبکه کمک می‌کند. رویکرد پیشنهادی با بهبود کیفیت ولتاژ، کاهش بار اوج و بهینه‌سازی تعاملات انرژی، پایداری و کارایی شبکه را ارتقا می‌دهد و هزینه‌ها را کاهش می‌دهد.



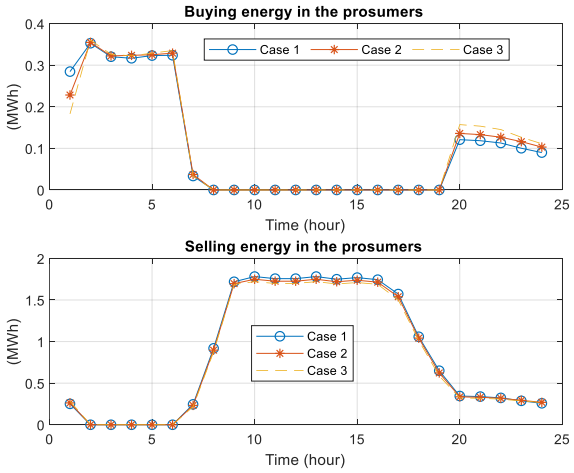
شکل ۳. مقایسه الگوهای شارژ و دشارژ باتری پروسومرها



شکل ۴. مقایسه بار کل تقاضای شبکه توزیع در ۲۴ ساعت به ازای هر باس در هر مورد



شکل ۵. مقایسه میانگین ولتاژهای شبکه توزیع در هر مورد



شکل ۶. مقایسه تراکنش‌های انرژی مصرف کنندگان در هر مورد. الف) خرید انرژی ب) فروش انرژی

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که بارهای انعطاف‌پذیر در بهینه‌سازی عملکرد شبکه توزیع نقش مهمی دارند. این بارها با مدیریت هوشمند مصرف انرژی، به کاهش بارهای اوج، بهبود پایداری ولتاژ و افزایش بهره‌وری سیستم کمک می‌کنند. همچنین، با تخصیص مناسب بارها، تعادل بهتری میان عرضه و تقاضا ایجاد می‌شود و هزینه‌های انرژی کاهش می‌یابد. بارهای انعطاف‌پذیر در معاملات انرژی پروسومرها تأثیرگذارند و به آن‌ها این امکان را می‌دهند که با تغییر مصرف خود در پاسخ به قیمت‌های انرژی یا شرایط شبکه، از فرصت‌های بازار بهره‌مند شوند. این مدیریت مصرف باعث می‌شود که پروسومرها انرژی مازاد خود را با کارایی بیشتری به شبکه عرضه کنند یا از شبکه خریداری نمایند. علاوه بر این، بارهای انعطاف‌پذیر با کاهش بار اوج، از اضافه‌بار تجهیزات جلوگیری کرده و پایداری ولتاژ شبکه را حفظ می‌کنند. این رویکرد باعث کاهش هزینه‌ها، بهبود تاب‌آوری شبکه در برابر تغییرات غیرمنتظره و افزایش بهره‌وری انرژی می‌شود. در

مجموع، بارهای انعطاف‌پذیر ابزاری کارآمد برای ایجاد یک شبکه توزیع اقتصادی، پایدار و متوازن هستند. مدل پیشنهادی این پتانسیل را دارد که به صورت یکپارچه پاسخ بار و مدیریت انرژی ذخیره‌شده را مدل‌سازی کند. در این صورت، تصمیمات مربوط به مصرف و ذخیره‌سازی انرژی به‌طور هم‌زمان بهینه‌سازی می‌شوند. با این حال، این کار منجر به افزایش بعد محاسباتی مدل و زمان حل خواهد شد. بررسی دقیق این موضوع برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌گردد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با ارائه یک مدل نوین بهینه‌سازی برای مدیریت بار و انرژی در شبکه‌های توزیع فعال با ویژگی پروسومرها، توانست رویکردی جامع و کارآمد برای بهبود عملکرد این شبکه‌ها ارائه دهد. هدف اصلی این مدل کاهش هزینه‌ها، تلفات انرژی و بارهای اوج، همراه با بهبود پایداری ولتاژ شبکه و بهره‌وری انرژی بود. با به‌کارگیری استراتژی‌های مدیریت سمت تقاضا و بهینه‌سازی توانایی‌های تولید و ذخیره‌سازی پروسومرها، مدل توانست نتایج قابل‌توجهی را در شرایط مختلف عملیاتی به‌دست آورد. نتایج شبیه‌سازی بر روی یک شبکه استاندارد ۳۳ شینه نشان داد که مدل پیشنهادی تلفات انرژی را تا ۱۴٫۵ درصد کاهش داده و بار اوج را تا ۱۰ درصد مدیریت کرده است. بهبود کیفیت ولتاژ شبکه در حالت‌های مختلف، نشان‌دهنده اثربخشی این مدل در افزایش پایداری شبکه بود. همچنین، مدیریت هوشمند بارها و تراکنش‌های انرژی پروسومرها باعث شد که سودآوری آن‌ها تا ۸ درصد افزایش یابد. این نتایج به‌طور مستقیم اثربخشی مدل در ارتقای بهره‌وری انرژی و کاهش هزینه‌های سیستم را تأیید می‌کنند. علاوه بر این، بهره‌گیری از الگوریتم‌های پیشرفته بهینه‌سازی مانند روش شاخه‌بندی و قید، باعث افزایش کارایی حل مسائل پیچیده شده و پتانسیل این مدل را برای کاربرد در شبکه‌های بزرگ‌تر نشان داده است. این مدل نه تنها به یکپارچگی بهتر منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه کمک کرده، بلکه امکان مدیریت هوشمند و پایدار انرژی را برای پاسخ به تغییرات سریع در تقاضا و تولید فراهم ساخته است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهند که مدیریت سمت تقاضا و استفاده از بارهای انعطاف‌پذیر می‌تواند نقش کلیدی در دستیابی به شبکه‌های توزیع پایدار و کارآمد ایفا کند. یکی از مسیرهای آتی توسعه مدل، بررسی اثر سیاست‌های قیمت‌گذاری پویا (مانند Time-of-Use یا Real-Time Pricing) بر رفتار اقتصادی پروسومرها است. این مکانیزم‌ها می‌توانند موجب پاسخ بار دینامیک‌تر و افزایش مشارکت اقتصادی در مدیریت انرژی شوند. پیشنهادها برای ادامه تحقیقات آینده به شرح زیر می‌تواند تعریف شود:

۱. **ادغام خودروهای الکتریکی و سناریوهای عدم‌قطعیت پیچیده‌تر**: با توجه به گسترش سریع خودروهای الکتریکی، مطالعه تأثیر آن‌ها بر مدیریت انرژی و عملکرد شبکه، به‌ویژه تحت سناریوهای پیچیده‌تر مانند تغییرات اقلیمی یا رفتار متغیر مصرف‌کنندگان، می‌تواند دیدگاه جامع‌تری ارائه دهد.
۲. **ارزیابی مدل در شرایط واقعی و شبکه‌های بزرگ‌تر**: پیاده سازی مدل در شبکه‌های واقعی یا با ابعاد بزرگ‌تر برای تحلیل کارایی آن در مقیاس‌های بزرگ‌تر و ارزیابی اثرات اقتصادی و عملی مدل در شرایط میدانی.

واژه‌نامه

مجموعه و شاخص‌ها:

مجموعه و فهرست شاخه های شبکه	B, nm
مجموعه و شاخص گره های شبکه	N, n
مجموعه و شاخص سناریوها	S, s

مجموعه و شاخص زمان	T, t
پارامترها:	
احتمال هر سناریو	σ_s
راندمان شارژ و دشارژ باتری	η_{ch}, η_{dis}
مقدار تغییرات بار	ε
فرآیند جهش j بعدی برای ذره i در جمعیت	ρ_{ij}
ضرایب بهای تمام شده مربوط به خرید و فروش انرژی	c_t^b, c_t^s
هزینه قطع برق فتوولتائیک.(PV)	c_t^p
هزینه قطع بار	c_t^{DR}
عوامل یادگیری	$, c_2(k)c_1^g(k)$
وزن اینرسی اولیه پس از جستجوی اولیه	d
عمق تخلیه (DoD) در باتری	$d_{n,t}^B$
درصد اولیه انرژی در باتری	$I_{n,t}^B$
حداکثر تعداد تکرار	k_{max}
تعداد تکرارهای فعلی	k
توان PV واقعی در هر سناریو	$\overline{P}_{n,t,s}^P$
تقاضای بار	$P_{n,t,s}^L$
مقاومت و راکتانس شاخه	r_{nm}, x_{nm}
اعداد تصادفی در محدوده {۰، ۱}	$,r_2, r_3r_1$
فضای جستجو	ss
مدت زمان اسلات که برابر با ۱ ساعت است	ΔT
وزن اینرسی	w
حداکثر و حداقل مقادیر ضریب وزن اینرسی.	$, w_{min}w_{max}$
مقدار شروع و پایان ضریب تمرین به ترتیب.	$c_{1,start}^g, c_{1,start}^g$
مقدار شروع و پایان ضریب تمرین به ترتیب.	$c_{2,start}, c_{2,end}$
متغیرها:	
انرژی باقی مانده در باتری	$E_{n,t}^B$
جریان خط مربعی	$l_{nm,t}$
خرید و فروش برق در ساختمان	$P_{n,t}^b, P_{n,t}^s$
توان بهره‌برداری شده PV	$P_{n,t}^P$
تغییر بار در برنامه پاسخ تقاضا	$P_{n,t}^{DR}$
تبادل توان اکتیو بین ساختمان در باس n و شبکه	$P_{n,t}^G$
جریان های توان اکتیو و راکتیو خط	$P_{nm,t}, Q_{nm,t}$
توان شارژ و دشارژ باتری	$P_{n,t}^{ch}, P_{n,t}^{dis}$
تعریف ولتاژ مربع شین شبکه	$v_{n,t}$
ظرفیت باتری و متغیر باینری وضعیت شارژ	$X_n^B, z_{n,t}^B$
سرعت	F_{ij}^k
بهترین شخصی	A_{ij}^k
بهترین های جهانی	D_{ij}^k

References

[1] Hu, J., Wu, J., Ai, X., & Liu, N. (2021). Coordinated energy management of prosumers in a distribution system considering network congestion. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *12*(1), 468-478. https://doi.org/10.1109/TSG.2020.3010260

[2] Ceccon, W. F., Freire, R. Z., Szejka, A. L., & Junior, O. C. (2021). Intelligent electric power management system for economic maximization in a residential prosumer unit. *IEEE Access*, *9*, 48713-48731. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3068751

[3] Ma, L., Liu, N., Zhang, J., & Wang, L. (2019). Real-time rolling horizon energy management for the energy-hub-coordinated prosumer community from a cooperative perspective. *IEEE Transactions on Power Systems*, *34*(2), 1227-1242. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2877236

[4] Cai, Y., Huang, T., Bompard, E., Cao, Y., & Li, Y. (2017). Self-sustainable community of electricity prosumers in the emerging distribution system. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *8*(5), 2207-2216. https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2518241

[5] MansourLakouraj, M., Sanjari, M. J., Javadi, M. S., Shahabi, M., & Catalão, J. P. S. (2021). Exploitation of microgrid flexibility in distribution system hosting prosumers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, *57*(4), 4222-4231. https://doi.org/10.1109/TIA.2021.3073882

[6] Petrou, K., Procopiou, A. T., Gutierrez-Lagos, L., Liu, M. Z., Ochoa, L. F., & Langstaff, T. (2021). Ensuring distribution network integrity using dynamic operating limits for prosumers. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *12*(5), 3877-3888. https://doi.org/10.1109/TSG.2021.3081371

[7] Ma, G., Lyu, J., Wang, Y., Zhang, J., & Xu, J. (2020). The prosumer energy management method based on smart load. *IEEE Access*, *8*, 117086-117095. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3004557

[8] Chen, L., Liu, N., Yu, S., & Xu, Y. (2022). A stochastic game approach for distributed voltage regulation among autonomous PV prosumers. *IEEE Transactions on Power Systems*, *37*(1), 776-787. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3097373

[9] Tziovani, L., Hadjidemetriou, L., Kolios, P., Astolfi, A., Kyriakides, E., & Timotheou, S. (2022). Energy management and control of photovoltaic and storage systems in active distribution grids. *IEEE Transactions on Power Systems*, *37*(3), 1956-1968. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3118785

[10] Saber, H., Ehsan, M., Moeini-Aghtaie, M., Ranjbar, H., & Lehtonen, M. (2022). A user-friendly transactive coordination model for residential prosumers considering voltage unbalance in distribution networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *18*(9), 5748-5759. https://doi.org/10.1109/TII.2022.3141784

[11] Zomorodi Moghadam, A., & Javidi, M. H. (2022). Designing a two-stage transactive energy system for future distribution networks in the presence of prosumers' P2P transactions. *Electric Power Systems Research*, *211*, 108202. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108202

[12] Li, H., Hou, J., Hong, T., & Nord, N. (2022). Distinguish between the economic optimal and lowest distribution temperatures for heat-prosumer-based district heating systems with short-term thermal energy storage. *Energy*, *248*, 123601. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123601

[13] Zhou, Y., Li, Z., & Yang, M. (2020). A framework of utilizing distribution power systems as reactive power prosumers for transmission power systems. *International*

Journal of Electrical Power & Energy Systems, *121*, 106139. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106139

[14] Sarfi, V., & Livani, H. (2020). Optimal Volt/VAR control in distribution systems with prosumer DERs. *Electric Power Systems Research*, *188*, 106520. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106520

[15] Yang, C., Liu, J., Liao, H., Liang, G., & Zhao, J. (2023). An improved carbon emission flow method for the power grid with prosumers. *Energy Reports*, *9*, 114-121. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.11.165

[16] Postnikov, I. (2023). Methods for the reliability optimization of district-distributed heating systems with prosumers. *Energy Reports*, *9*, 584-593. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.11.085

[17] Zabihinia Gerdroodbari, Y., Khorasany, M., & Razzaghi, R. (2022). Dynamic PQ operating envelopes for prosumers in distribution networks. *Applied Energy*, *325*, 119757. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119757

[18] Rajaei, A., Fattaheian-Dehkordi, S., Fotuhi-Firuzabad, M., Moeini-Aghtaie, M., & Lehtonen, M. (2021). Developing a distributed robust energy management framework for active distribution systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, *12*(4), 1891-1902. https://doi.org/10.1109/TSTE.2021.3070316

[19] Liu, B., Wu, W., Zhou, C., Mao, C., Wang, D., Duan, Q., & Sha, G. (2019). An AC–DC hybrid multi-port energy router with coordinated control and energy management strategies. *IEEE Access*, *7*, 109069-109082. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2933469

[20] Wang, Z., Gu, C., Li, F., Bale, P., & Sun, H. (2013). Active demand response using shared energy storage for household energy management. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *4*(4), 1888-1897. https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2258046

[21] Luo, E., Cong, P., Lu, H., & Li, Y. (2020). Two-stage hierarchical congestion management method for active distribution networks with multi-type distributed energy resources. *IEEE Access*, *8*, 120309-120320. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3005689

[22] Wu, W., Li, P., Wang, B., Liu, Y., Xu, T., Du, H., & He, Y. (2022). Integrated distribution management system: Architecture, functions, and application in China. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, *10*(2), 245-258. https://doi.org/10.35833/MPCE.2021.000600

[23] Sadeghi, S. (2023). Investigation of the effect of solar panel type on the design and operation of a grid-connected photovoltaic system using PVsyst software. *Karafan Journal*, *20*(1), 75-99. https://doi.org/10.48301/kssa.2023.346906.2163 (In Persian)

[24] Abdollahi, S. A., Ahrari, M., & Ghazizadeh Ahsaee, M. (2024). Modeling and optimization of hybrid energy systems using techno-economic and environmental characteristics. *Karafan Journal*, *21*(1), 183-215. https://doi.org/10.48301/kssa.2024.417983.2717. (In Persian)

[25] Shafiee, M. (2023). Economic design of a hybrid wind-solar power plant based on the energy storage system with consideration of the equivalent loss factor. *Karafan Journal*, *20*(3), 287-310. https://doi.org/10.48301/kssa.2023.398615.2564.(In Persian)