1-

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: https://modelling.semnan.ac.ir/

ISSN: 2783-2538

Semnan University



Research Article

A Bi-Level Optimization Framework for Multi-Objective Energy Management in Active Distribution Networks

UNCORRECTED PROOF

PAPER INFO

Paper history:

Received:
Revised:
Accepted:

Keywords:

Active Distribution Network;
Bi-Level Optimization;
Soft Open Point (SOP);
Smart Transformer;
Demand Response (DR);
Multi-Objective Energy Management;
Particle Swarm Optimization (PSO);
Renewable Energy Integration.

ABSTRACT

The increasing integration of renewable energy sources (RES) and electric vehicles (EVs) into distribution networks presents significant operational challenges, including voltage instability, power quality issues, and heightened power flow volatility. This paper proposes a novel bi-level optimization framework for multi-objective energy management in active distribution networks (ADNs). The upper level employs a Linear Programming (LP) model to optimally schedule Demand Response (DR) programs, managing flexible electrical loads and coordinated EV charging stations. The lower level utilizes a Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm to concurrently determine the optimal setpoints for Soft Open Points (SOPs) and Smart Transformers (STs), enabling precise control over active and reactive power flows. The framework simultaneously minimizes total operational cost, enhances voltage stability by maximizing the minimum Voltage Stability Index (VSI), minimizes the Average Voltage Deviation (AVD), and mitigates line congestion. A fuzzy-based membership function approach, combined with a minimum Euclidean distance criterion from the ideal point, is adopted to scalarize the multi-objective problem and obtain a compromised Pareto-optimal solution. The proposed algorithm is validated on a modified IEEE 69-bus radial distribution system, integrated with photovoltaic (PV) units, wind turbines, residential/public EV charging stations, and an SOP. Comparative simulation results across six operational scenarios demonstrate that the proposed multi-objective strategy achieves a 4.82% reduction in daily operational costs and a 15.09% improvement in the voltage stability index compared to the base case, while also reducing the average voltage deviation and maximum line loading by 9.80% and 0.97%, respectively. The results conclusively validate the efficacy of the bi-level framework in achieving a superior techno-economic trade-off, providing a robust tool for distribution system operators to navigate the complexities of modern, renewables-rich ADNs.

DOI:

© 2024 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

مقاله پژوهشی

*** Corresponding author.**
E-mail address:

How to cite this article:

یک چارچوب بهینه‌سازی دو سطحی برای مدیریت انرژی چندهدفه در شبکه توزیع فعال

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله:

بازنگری مقاله:

پذیرش مقاله:

واژگان کلیدی:

شبکه توزیع فعال،

بهینه‌سازی دو سطحی،

نقطه باز نرم(SOP)،

ترانسفورماتور هوشمند،

پاسخ به تقاضا(DR)،

مدیریت انرژی چندهدفه،

بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO).

چکیده

با گسترش فزاینده نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر (RES) و وسایل نقلیه الکتریکی (EVs) در شبکه‌های توزیع، چالش‌های عملیاتی جدیدی در زمینه کنترل ولتاژ، پایداری سیستم و مدیریت توان اکتیو و راکتیو پدیدار شده است. این مقاله یک چارچوب نوآورانه بهینه‌سازی دو سطحی را برای مدیریت انرژی چندهدفه در شبکه‌های توزیع فعال معرفی می‌کند. در سطح اول، یک مدل برنامه‌ریزی خطی (LP) برای زمان‌بندی بهینه برنامه‌های پاسخ به تقاضا (DR)[1] شامل بارهای الکتریکی انعطاف‌پذیر و ایستگاه‌های شارژ EVs طراحی شده است. در سطح دوم، از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) برای تنظیم همزمان نقاط تنظیم نقاط باز نرم (SOP)[2] و ترانسفورماتورهای هوشمند (ST) استفاده می‌شود. اهداف بهینه‌سازی شامل حداقل‌سازی هزینه عملیاتی، بهبود شاخص پایداری ولتاژ(VSI)، کاهش انحراف ولتاژ میانگین (AVD) و کاهش بارگیری خطوط هستند. برای حل مسئله چندهدفه و یافتن نقطه بهینه پارتو، از معیار حداقل فاصله اقلیدسی از نقطه ایده‌آل بهره گرفته شده است. کارایی چارچوب پیشنهادی بر روی یک شبکه توزیع شعاعی ۶۹ شینه IEEE اصلاح‌شده، که شامل واحدهای فتوولتائیک (PV)[3]، توربین‌های بادی، ایستگاه‌های شارژ EVs و یک SOP است، مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی در شش سناریوی مختلف نشان می‌دهد که راه‌حل چندهدفه پیشنهادی در مقایسه با حالت پایه، موجب کاهش ۴.۸۲ درصدی در هزینه عملیاتی روزانه و بهبود ۱۵.۰۹ درصدی در شاخص پایداری ولتاژ می‌شود. همچنین، انحراف ولتاژ میانگین و حداکثر بارگیری خط به ترتیب ۹.۸۰ درصد و ۰.۹۷ درصد کاهش می‌یابند. این بهبودها، اثربخشی چارچوب دو سطحی پیشنهادی را در دستیابی همزمان به اهداف اقتصادی و فنی، و ارائه یک راه‌حل عملی برای بهره‌برداری بهینه از شبکه‌های توزیع فعال مدرن تأیید می‌کند.

DOI:

© 2024 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

UNCORRECTED PROOF

* پست الکترونیک نویسنده مسئول:

۱. دانشکده مهندسی برق، واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران

[1] .Demand Response

[2]. Soft Open Point

[3] .Photovoltaic

استناد به این مقاله: نحوه استناد فارسی در اینجا درج گردد.

۱-مقدمه

با گسترش منابع انرژی تجدیدپذیر و بارهای منعطف، شبکه‌های توزیع سنتی با چالش‌هایی در زمینه کنترل ولتاژ، مدیریت بار و حفظ پایداری مواجه شده‌اند. در پاسخ به این چالش‌ها، چارچوب‌های مدیریت انرژی چندهدفه توسعه یافته‌اند که امکان هماهنگی بین اجزای مختلف شبکه را فراهم می‌سازند. در [۱] یک چارچوب سلسله‌مراتبی مبتنی بر قیمت برای پاسخ به تقاضا در شبکه‌های توزیع ارائه شده که رفتار مصرف‌کنندگان را مدل‌سازی کرده و زمان‌بندی بارها را بهینه می‌کند. در همین راستا، [۲] استراتژی پیشنهاد قیمت روز-قبل را با در نظر گرفتن عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر و پاسخ به تقاضا بررسی کرده است.

پاسخ به تقاضا به‌عنوان ابزاری مؤثر در مدیریت بار و کاهش هزینه‌های عملیاتی شناخته شده است. در [۳] در قالب یک مرور جامع، روش‌های قیمت‌گذاری و الگوریتم‌های بهینه‌سازی در برنامه‌های پاسخ به تقاضا طبقه‌بندی شده‌اند. در [۴] نیز به جای‌گذاری بهینه ذخیره‌سازهای انرژی در شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن کاهش ولتاژ و بارهای تصادفی پرداخته است.

نقاط باز نرم (SOP) به‌عنوان ادوات الکترونیک قدرت، نقش مهمی در افزایش انعطاف‌پذیری شبکه ایفا می‌کنند. در [۵] روش جبران عدم تعادل ولتاژ در فیدرهای توزیع با استفاده از SOP ارائه شده است. مرجع [۶] نیز استراتژی کنترلی دو لایه برای SOPها را با در نظر گرفتن ناحیه اقتصادی عملکرد ترانسفورماتورها توسعه داده است.

ترانسفورماتورهای هوشمند به‌عنوان ابزارهایی برای کنترل ولتاژ و توان راکتیو در شبکه‌های توزیع فعال شناخته شده‌اند. در [۷] به مدیریت انرژی در شبکه توزیع با حضور ترانسفورماتورهای هوشمند، SOP و ذخیره‌سازهای انرژی پرداخته شده است. [۸] نیز کنترل ولتاژ و توان راکتیو در حضور منابع فتوولتائیک را با استفاده از روش بهینه‌سازی مقاوم بررسی کرده است.

مدیریت انرژی چندمقیاسی در شبکه‌های توزیع فعال با SOPهای چندترمیناله در مرجع [۹] پیشنهاد شده است.

این روش امکان زمان‌بندی دقیق و انعطاف‌پذیر را فراهم می‌سازد. در [۱۰] نیز شاخص‌های پایداری ولتاژ در شبکه‌های شعاعی تحلیل شده‌اند.

تخصیص هماهنگ ذخیره‌سازهای انرژی و SOP در شبکه‌های با نفوذ بالای PV در [۱۱] بررسی شده است. در این مطالعه پاسخ به تقاضا و CVR نیز در مدل لحاظ شده‌اند. مرجع [۱۲] عملیات بهینه دو مرحله‌ای برای سیستم‌های انرژی یکپارچه با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و پاسخ به تقاضا ارائه داده است.

مدل‌سازی بازی‌های مشارکتی در مراکز انرژی هوشمند برای مدیریت سمت تقاضا در [۱۳] انجام شده است. این مدل‌ها با استفاده از نظریه بازی‌ها، رفتار مصرف‌کنندگان را در شرایط رقابتی تحلیل می‌کنند. در [۱۴] تکنیک‌های هوش محاسباتی در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری شبکه‌های هوشمند بررسی شده‌اند.

زیرساخت‌های اندازه‌گیری پیشرفته [۵](AMI) به‌عنوان پایه‌ای برای پیاده‌سازی شبکه‌های هوشمند شناخته شده‌اند. در [۱۵] به نقش AMI در مدیریت توزیع هوشمند پرداخته شده است. مرجع [۱۶] نیز توسعه زیرساخت‌های AMI در مقیاس بزرگ را بررسی کرده است. زیرساخت‌های اندازه‌گیری پیشرفته علاوه بر جمع‌آوری داده‌های مصرف، نقش مهمی در پیاده‌سازی پاسخ به تقاضا ایفا می‌کنند. در [۱۷] و در یک مرور جامع، کاربردهای AMI در شبکه‌های هوشمند بررسی شده است. مرجع [۱۸] نیز چالش‌های ارتباطی در پیاده‌سازی AMI را تحلیل کرده و راهکارهایی برای افزایش امنیت و قابلیت اطمینان ارائه داده است.

مدل‌سازی و اعتبارسنجی چارچوب‌های پاسخ به تقاضا در حضور انرژی بادی در [۱۹] انجام شده است. در این مطالعه از شبیه‌سازی‌های چندلایه برای ارزیابی عملکرد سیستم استفاده شده است. مرجع [۲۰] نیز بهینه‌سازی محدب را برای برنامه‌ریزی ذخیره‌سازهای انرژی در شبکه‌های شعاعی با نفوذ بالای PV پیشنهاد داده است.

در زمینه کنترل ولتاژ، [۲۱] به مرور روش‌های کاهش بار پیک و پاسخ به تقاضا در محیط‌های هوشمند پرداخته است. مرجع [۲۲] نیز فناوری‌های توانمندکننده منابع

* پست الکترونیک نویسنده مسئول:
۱. دانشکده مهندسی برق، واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران

5 . Advanced Metering Infrastructure

UNCORRECTED PROOF

تجدیدپذیر را بررسی و چالش‌های فنی در ادغام آن‌ها با شبکه‌های توزیع را تحلیل کرده است.

چالش‌های فنی در کاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر در [۲۳] بررسی شده است. در این پژوهش به محدودیت‌های فنی در پیاده‌سازی منابع بادی و خورشیدی در شبکه‌های توزیع اشاره شده است. مرجع [۲۴] نیز تأثیر منابع تجدیدپذیر بر کنترل ولتاژ را تحلیل کرده و راهکارهایی برای کاهش نوسانات ولتاژ ارائه داده است.

هماهنگی بین اینورترهای هوشمند و تجهیزات سنتی کنترل ولتاژ در [۲۵] بررسی شده است. در این پژوهش نشان داده شده که این هماهنگی می‌تواند منجر به صرفه‌جویی در هزینه و بهبود تنظیم ولتاژ شود. مرجع [۲۶] نیز بهینه‌سازی مشترک کنترل ولت/وار و زمان‌بندی ذخیره‌سازهای انرژی سیار را در حضور عدم قطعیت پیش‌بینی PV ارائه داده است.

روش‌های کنترل ولتاژ با استفاده از ترانسفورماتورهای OLTC در شبکه‌های دارای منابع تجدیدپذیر در [۲۷] مرور شده‌اند. مرجع [۲۸] نیز چارچوبی برای هماهنگی بین سیستم مدیریت انرژی خانگی و بهینه‌سازی ولت/وار در شبکه‌های نامتعادل ارائه داده است.

استراتژی‌های کنترل توان راکتیو با استفاده از بهینه‌سازی ازدحام ذرات در حضور ذخیره‌سازهای باتری در [۲۹] بررسی شده‌اند. مرجع [۳۰] نیز روش هماهنگ‌سازی OLTC و اینورترها را برای تنظیم ولتاژ در شبکه‌های با نفوذ بالای PV پیشنهاد داده است.

در شبکه‌های توزیع با نفوذ بالای منابع فتوولتائیک، هماهنگی بین تجهیزات کنترلی برای تنظیم ولتاژ اهمیت ویژه‌ای دارد. در [۳۱] به بررسی روش‌های کنترل ولتاژ در شبکه‌های آینده پرداخته شده و نقش تجهیزات هوشمند در کاهش نوسانات ولتاژ تحلیل شده است. مرجع [۳۲] نیز تکنیک‌های کاهش نوسانات ولتاژ در حضور منابع PV را بررسی کرده است.

روش‌های بازپیکربندی دینامیکی فیدر و سوئیچینگ خازن در سیستم‌های توزیع هوشمند در [۳۳] ارائه شده‌اند. در این پژوهش از الگوریتم‌های تطبیقی برای بهبود عملکرد شبکه استفاده شده است. مرجع [۳۴] نیز بهبود کیفیت توان با استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی و بانک‌های خازنی را بررسی کرده است.

الگوریتم سالپ چندهدفه‌ای برای بهبود عملکرد فنی-اقتصادی شبکه‌های توزیع در [۳۵] پیشنهاد شده است. مرجع [۳۶] نیز از الگوریتم جستجوی پروانه‌ای برای یکپارچه‌سازی بهینه منابع توزیع‌شده در کنار تنظیمات OLTC[6] استفاده کرده است.

هماهنگی خازن‌های قابل سوئیچ و بازپیکربندی شبکه برای بهبود عملکرد در حضور منابع تجدیدپذیر در [۳۷] بررسی شده است. مرجع [۳۸] نیز الگوریتم سالپ جهش‌یافته‌ای را برای تخصیص بهینه توان اکتیو و راکتیو در شبکه‌های شعاعی توسعه داده است.

کنترل تطبیقی ولتاژ در نیروگاه‌های خورشیدی بزرگ‌مقیاس با در نظر گرفتن عوامل واقعی در [۳۹] بررسی شده است. مرجع [۴۰] نیز تحلیل صرفه‌جویی انرژی در طرح‌های CVR با در نظر گرفتن بارهای ترموستاتیک را ارائه داده است.

ارزیابی فنی-اقتصادی گزینه‌های انعطاف‌پذیری در برابر توسعه شبکه در [۴۱] انجام شده است. مرجع [۴۲] نیز شبکه‌های توزیع ترکیبی AC/DC را برای ادغام گسترده منابع PV بررسی کرده است.

هماهنگی منابع راکتیو توزیع‌شده برای پشتیبانی ولتاژ در شبکه‌های انتقال در [۴۳] بررسی شده است. مرجع [۴۴] نیز کنترل ولتاژ توزیع‌شده در شبکه‌های فعال با استفاده از روش تقسیم‌بندی شبکه را پیشنهاد داده است.

تنظیم بهینه ولتاژ در شبکه‌های توزیع با استفاده از رگولاتورهای ولتاژ آبشاری در حضور نفوذ بالای PV در [۴۵] بررسی شده است و مرجع [۴۶] نیز کنترل هماهنگ OLTC و ذخیره‌ساز انرژی را برای تنظیم ولتاژ در شبکه‌های توزیع فعال پیشنهاد داده است.

با وجود پژوهش‌های گسترده در زمینه مدیریت انرژی شبکه‌های توزیع، هنوز جای کار در موضوعات زیر وجود دارد:

۱. هماهنگی چندسطحی: در مطالعات موجود تعداد بسیار اندکی به هماهنگی همزمان SOPها، ترانسفورماتورهای هوشمند و برنامه‌های پاسخ به تقاضا در قالب یک چارچوب بهینه‌سازی دو سطحی پرداخته‌اند.

۲. مدل‌سازی یکپارچه: مدل‌سازی هماهنگ بارهای انعطاف‌پذیر شامل بارهای معمولی و ایستگاه‌های شارژ

---

6 . On-Load Tap Changer

UNCORRECTED PROOF

وسایل نقلیه الکتریکی در چارچوب بهینه‌سازی چندهدفه نیاز به تحقیق بیشتری دارد.

۳. شاخص پایداری ولتاژ: تأثیر همزمان این راهکارها بر شاخص پایداری ولتاژ به اندازه کافی مورد بررسی قرار نگرفته است.

۴. روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته: کاربرد روش‌های بهینه‌سازی دو سطحی با ترکیب برنامه‌ریزی خطی و الگوریتم‌های فراکاوشی در این حوزه محدود است.

نوآوری اصلی این مقاله در ارائه یک چارچوب بهینه‌سازی دو سطحی برای مدیریت انرژی چندهدفه در شبکه‌های توزیع فعال است که هماهنگی همزمان عناصر زیر را در بر می‌گیرد:

- برنامه‌های پاسخ به تقاضا برای بارهای الکتریکی و ایستگاه‌های شارژ وسایل نقلیه الکتریکی
- نقاط باز نرم (SOP) برای کنترل توان اکتیو و راکتیو
- ترانسفورماتورهای هوشمند برای تنظیم ولتاژ
- منابع انرژی تجدیدپذیر شامل سیستم‌های فتوولتائیک و بادی

مطالعات اخیر نشان می‌دهد که SOP در هماهنگی با پاسخ به تقاضا می‌تواند تلفات توان اکتیو، انحراف ولتاژ متوسط و بارگیری خط را کاهش دهد و در نهایت شاخص پایداری ولتاژ و ظرفیت میزبانی سیستم توزیع را افزایش دهد. در این مقاله، یک طرح مدیریت انرژی چندهدفه را برای به حداقل رساندن همزمان هزینه، بهبود شاخص پایداری ولتاژ، کاهش انحراف ولتاژ میانگین و به حداقل رساندن بارگیری جریان خط در شبکه توزیع برق با در نظر گرفتن منابع انرژی تجدیدپذیر و بارهای خودروی برقی قابل اتصال به شبکه پیشنهاد می‌شود. مسئله بهینه‌سازی چندهدفه با قیود چندگانه با استفاده از بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) حل می‌شود.

ساختار مقاله به این صورت است: بخش ۲ به مدل‌سازی ریاضی سیستم و فرمول‌بندی مسئله می‌پردازد. بخش ۳ روش حل دو سطحی پیشنهادی را شرح می‌دهد. بخش ۴ شبکه مورد مطالعه و سناریوهای شبیه‌سازی را معرفی می‌کند. بخش ۵ نتایج شبیه‌سازی و تحلیل آن‌ها را ارائه می‌دهد و نهایتاً بخش ۶ به نتیجه‌گیری می‌پردازد.

نوآوری‌های کلیدی این مقاله عبارتند از:

۱. ارائه یک چارچوب بهینه‌سازی دو سطحی یکپارچه که به‌طور همزمان برنامه‌های پاسخ به تقاضا شامل بارهای الکتریکی،خودروهای برقی، نقاط باز نرم(SOP) ، ترانسفورماتورهای هوشمند و منابع تجدیدپذیر را هماهنگ می‌کند.

۲. مدل‌سازی چندهدفه همزمان هزینه، شاخص پایداری ولتاژ(VSI) ، انحراف ولتاژ میانگین (AVD) و بارگیری خط در یک چارچوب فازی-اقلیدسی

۳. استفاده از ترکیب برنامه‌ریزی خطی برای برنامه‌ریزی DRو الگوریتم PSO برای تنظیم SOP و ST در یک چارچوب دو سطحی که در ادبیات کمتر به آن پرداخته شده است.

۴. ارزیابی جامع اثرات تجهیزات فعال بر عملکرد فنی-اقتصادی شبکه در شرایط نفوذ بالای PV و EV

۲-مدل‌سازی ریاضی

شبکه‌ی توزیع مورد مطالعه شامل منابع انرژی تجدیدپذیر (سیستم‌های فتوولتائیک و بادی)، بارهای الکتریکی، یک نقطه‌ی باز نرم، و ایستگاه‌های شارژ عمومی و مسکونی برای وسایل نقلیه‌ی الکتریکی است. بخشی از بارهای الکتریکی و ایستگاه‌های شارژ در برنامه‌ی پاسخ به تقاضا مشارکت دارند و انعطاف‌پذیری لازم را برای بهره‌بردار شبکه فراهم می‌کنند. اتصال این شبکه به شبکه‌ی بالادست از طریق یک ترانسفورماتور هوشمند صورت می‌گیرد. وجود ترانسفورماتور هوشمند وSOP، درجه‌ی آزادی عمل و انعطاف بیشتری را در بهره‌برداری از شبکه ایجاد می‌کند. بهره‌بردار شبکه، اطلاعات مربوط به قیمت ساعتی برق و همچنین قیمت مشارکت در برنامه‌ی پاسخ به تقاضا را از بازار انرژی روز آینده دریافت می‌کند. سپس از یک طرح بهینه‌ی مدیریت انرژی برای دستیابی به اهداف مختلفی شامل کاهش هزینه‌ی کل عملیات، بهبود پایداری ولتاژ، کاهش انحراف ولتاژ متوسط و کاهش بار خطوط استفاده می‌شود.

از آنجا که تابع هدف این مسأله از چندین زیرهدف ناهمگن تشکیل شده است، برای یکپارچه‌سازی و قیاس‌پذیر کردن آن‌ها، از توابع عضویت فازی استفاده می‌شود. در این روش، به هر هدف یک تابع عضویت فازی اختصاص می‌یابد. مقدار این تابع بین صفر و یک است؛

UNCORRECTED PROOF

به‌طوری که عدد یک نشان‌دهنده‌ی رضایت کامل از نتیجه‌ی آن هدف و عدد صفر بیانگر عدم رضایت است. بنابراین، هرچه مقدار تابع عضویت فازی برای یک هدف بالاتر باشد، نشان می‌دهد که آن هدف به‌صورت بهتری محقق شده است. در ادامه، مسأله‌ی بهینه‌سازی چندهدفه همراه با قیود آن به‌تفصیل بیان می‌شود.

۲-۱- تابع هدف

هر یک از توابع هدف به‌صورت زیر تعریف می‌شوند.

- **کاهش هزینه عملیاتی کل**: هزینه‌ی کل عملیات مطابق رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$\kappa = \sum_{t\in\Omega_t} \kappa^t = \sum_{t\in\Omega_t} \lambda_g^t P_g^t + \lambda_{dr}^t \sum_{m2\in\Omega_b} ((P_l^{0t}(m2) + P_{rev}^{0t}(m2) + P_{rev}^{0t}(m2)) - (P_l^t(m2) + P_{rev}^t(m2) + P_{pev}^t(m2))) \quad (۱)$$

عبارت اول در سمت راست رابطه‌ی (۱) نشان‌دهنده‌ی هزینه‌ی انرژی خریداری‌شده از شبکه است، در حالی که عبارت دوم بیانگر هزینه‌ی اجرای برنامه‌ی پاسخ به تقاضا می‌باشد. متغیر t نمایانگر پنجره‌ی زمانی است که در این پژوهش برابر با یک ساعت در نظر گرفته شده است. مجموعه‌ی Ω_t نیز شامل تمامی این بازه‌های یک‌ساعته در دوره‌ی مطالعه (یعنی ۲۴ ساعت یک روز) می‌باشد. بالانویس t برای هر متغیر، مقدار آن در زمان t را نشان می‌دهد.

در این رابطه:

- λ_g^t: قیمت برق خریداری‌شده از شبکه در زمان t.
- P_g^t: توان دریافتی از شبکه‌ی اصلی در زمان t.
- λ_{dr}^t: قیمت مشارکت در برنامه‌ی پاسخ به تقاضا در بازه‌ی t.
- P_l^t/P_l^{0t}: نسبت بار الکتریکی پس از اجرای برنامه‌ی پاسخ به تقاضا به بار قبل از اجرا در زمان t.
- P_{rev}^t/P_{rev}^{0t}: نسبت بار خودروی برقی مسکونی پس از اجرای برنامه‌ی پاسخ به تقاضا به بار قبل از اجرا در زمان t.
- P_{pev}^t/P_{pev}^{0t}: نسبت بار خودروی برقی عمومی پس از اجرای برنامه‌ی پاسخ به تقاضا به بار قبل از اجرا در زمان t.

شاخص $m2$ یک باس در سیستم را نشان می‌دهد و Ω_b نیز مجموعه‌ی تمام باس‌های سیستم است. تابع عضویت فازی زیر برای هدف تعریف‌شده در معادله $(t \in \Omega_t)$ در نظر گرفته می‌شود.

$$\mu_1^t = \begin{cases} \dfrac{\kappa_{max}^t - \kappa^t}{\kappa_{max}^t - \kappa_{min}^t} & \kappa_{min}^t \le \kappa^t \le \kappa_{max}^t \\ 1 & \kappa^t < \kappa_{min}^t \\ 0 & \kappa^t > \kappa_{max}^t \end{cases} \quad (۲)$$

در این رابطه، κ_{max}^t و κ_{min}^t به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی آستانه‌ی بالا و پایین κ^t هستند. هرگاه $\kappa^t \le \kappa_{min}^t$ باشد، مقدار تابع عضویت فازی به حداکثر خود، یعنی ۱، می‌رسد. در مقابل، اگر $\kappa^t \ge \kappa_{max}^t$ باشد، مقدار این تابع به حداقل، یعنی صفر، کاهش می‌یابد. برای مقادیر κ^t بین این دو آستانه، تابع عضویت فازی به‌صورت خطی کاهش می‌یابد. در نتیجه، با کاهش هزینه‌ی عملیاتی کل، مقدار تابع عضویت فازی افزایش خواهد یافت.

- **بهبود شاخص پایداری ولتاژ**

شاخص پایداری ولتاژ برای باس $m2$، که با $v^t(m2)$ نشان داده می‌شود، در یک شبکه‌ی توزیع شعاعی از طریق رابطه (۳) محاسبه می‌گردد:

$$v^t(m2) = (|V^t(m1)|^4 - 4(P^t(m2)x_l - Q^t(m2)r_l)^2 - 4(P^t(m2)r_l + Q^t(m2)x_l))(|V^t(m1)|)^2 \quad (۳)$$

در این رابطه، $m1$ و $m2$ به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی باس‌های ابتدایی و انتهایی خط l هستند که مقادیر مقاومت و راکتانس آن‌ها به‌ترتیب r_l و x_l می‌باشد. $P(m2)$ و $Q(m2)$ نیز کل توان اکتیو و راکتیو تأمین‌شده برای باس $m2$ را نشان می‌دهند. $|V(m2/m1)|$ بیانگر دامنه‌ی ولتاژ در باس m نسبت به باس $m1$ است.

در این پژوهش، هدف بر بیشینه‌سازی شاخص پایداری ولتاژ (VSI) برای باسی است که بیشترین آسیب‌پذیری را در سیستم دارد. به‌عبارت دیگر، هدف اصلی، حداکثر کردن حداقل مقدار شاخص VSI در کل سیستم است که مطابق با رابطه (۴) تعریف می‌شود

UNCORRECTED PROOF

$$v^t = \min_{m2}\{v^t(m2)\}\ \ m2 \in \Omega_b \backslash 1 \qquad (۴)$$

پارامتر Ω_b نشان‌دهنده‌ی مجموعه‌ی تمام باس‌های سیستم است. هدف، بهبود مقدار شاخص پایداری ولتاژ است؛ به این ترتیب که مقدار بالاتر این شاخص، باید منجر به مقدار بزرگ‌تری برای تابع عضویت فازی گردد. بر این اساس، تابع عضویت فازی مطابق با رابطه (۵) به این هدف اختصاص داده می‌شود.

$$\mu_2^t = \begin{cases} \dfrac{v^t - v_{min}^t}{v_{max}^t - v_{min}^t} & v_{min}^t \le v^t \le v_{max}^t \\ 0 & v^t < v_{min}^t \\ 1 & v^t > v_{max}^t \end{cases} \qquad (۵)$$

در این رابطه، v_{min}^t و v_{max}^t به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی آستانه‌ی بالا و پایین v^t هستند.

- **کاهش انحراف ولتاژ میانگین**

مقدار انحراف ولتاژ میانگین $AVD(\eta^t)$ برای یک شبکه، مطابق رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$\eta^t = \frac{1}{\#\Omega_b}\sum_{b\in\Omega_b}|(0.1\text{-}|V^t(b)|)| \qquad (۶)$$

در این پژوهش، دامنه ولتاژ نامی (ایده‌آل) برابر با یک پریونیت (per-unit) در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه هدف، کاهش انحراف ولتاژ میانگین است، تابع عضویت فازی مطابق رابطه (۷) به این هدف اختصاص می‌یابد.

$$\mu_3^t = \begin{cases} \dfrac{\eta_{max}^t - \eta^t}{\eta_{max}^t - \eta_{min}^t} & \eta_{min}^t \le \eta^t \le \eta_{max}^t \\ 1 & \eta^t < \eta_{min}^t \\ 0 & \eta^t > \eta_{max}^t \end{cases} \qquad (۷)$$

در این رابطه، η_{min}^t و η_{max}^t به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی آستانه‌ی بالا و پایین η^t هستند.

- **کاهش بارگیری خط**

یکپارچه‌سازی خودروهای برقی و منابع انرژی تجدیدپذیر می‌تواند منجر به اضافه‌بار فیدر شود. بنابراین، یکی از اهداف مهم، به حداقل رساندن بارگیری فیدر است. در این پژوهش، هدف، کمینه‌سازی درصد بارگیری فیدری است که بیشترین میزان بار را دارد(ψ^t)، که این هدف مطابق رابطه (۸) تعریف می‌شود.

$$\psi^t = \max_l\left\{\frac{|I^t(l)|}{I^{rat}(l)} \times 100\right\}\ \ l \in \Omega_l \qquad (۸)$$

در این رابطه، $|I(l)|$ و $|I^{rat}(l)|$ به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی دامنه جریان واقعی و جریان نامی خط l هستند. همچنین Ω_l بیانگر مجموعه تمام فیدرهای سیستم است. با توجه به اینکه هدف، کمینه‌سازی این شاخص است، تابع عضویت فازی مطابق رابطه (۹) به آن تخصیص داده می‌شود.

$$\mu_4^t = \begin{cases} \dfrac{\psi_{max}^t - \psi^t}{\psi_{max}^t - \psi_{min}^t} & \psi_{min}^t \le \psi^t \le \psi_{max}^t \\ 1 & \psi^t < \psi_{min}^t \\ 0 & \psi^t > \psi_{max}^t \end{cases} \qquad (۹)$$

- **تابع هدف ترکیبی**

بهینه‌سازی چندهدفه شامل دستیابی همزمان به چندین هدف و یافتن راه‌حلی است که میان این اهداف مصالحه برقرار کند. اگر تنها هدفi-ام در طرح مدیریت انرژی مدنظر قرار گیرد، مقدار $\mu_i = 1$ خواهد بود. بر این اساس، نقطه‌ی آرمانی برای هر هدف، مقدار ۱ در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش، راه‌حل مصالحه با کمینه‌سازی فاصله اقلیدسی تا نقاط آرمانی هر هدف و مطابق با رابطه (۱۰) به‌دست می‌آید.

$$min\Delta^t = \sqrt{\sum_{i=1}^{4}(1-\mu_i)^2}\ ;i = \{1.2.3.4\} \qquad (۱۰)$$

مرزهای بالا و پایین هر تابع عضویت با حل چهار مسئله تک‌هدفه به‌دست می‌آیند. در هر مورد، یکی از اهداف بهینه‌سازی شده و سایر اهداف بدون اعمال قید خاصی محاسبه می‌شوند. این روش، راهی شناخته‌شده در ادبیات بهینه‌سازی چندهدفه است [۳۵- ۳۶].

- **قیود مسئله**

قیود مسئله‌ی بهینه‌سازی در روابط (۱۱) تا (۲۳) بیان شده‌اند.

$$P_s^t(m1) + P_w^t(m1) + P_{sop}^t(m1) - (P_l^t(m1) + P_{rev}^t(m1) + P_{pev}^t(m1) = |V^t(m1)|\sum_{m2\in\Omega_b}|V^t(m2)||Y(m1)(m2)|\cos(\delta^t(m - \delta^t(m2) - \theta^t(m1)(m2)) : m1 \in \Omega_b\backslash 1;\ m2 \in \Omega_b \qquad (۱۱)$$

UNCORRECTED PROOF

$$Q_s^t(m1) + Q_w^t(m1) + Q_{sop}^t(m1) - (Q_l^t(m1) + Q_{rev}^t(m1) + Q_{pev}^t(m1) = |V^t(m1)| \sum_{m2\in\Omega_b} |V^t(m2)||Y(m1)(m2)|\sin(\delta^t(m - \delta^t(m2) - \theta^t(m1)(m2)) : m1 \in \Omega_b\backslash 1;\ m2 \in \Omega_b \quad (۱۲)$$

$$P_g^t = |V^t(1)| \sum_{m2\in\Omega_b} (|V^t(m2)||Y(1)(m2)|\cos(\delta^t(1) - \delta^t(m2) - \theta^t(1)(m2))) ; m2 \in \Omega_b \quad (۱۳)$$

$$Q_g^t = |V^t(1)| \sum_{m2\in\Omega_b} (|V^t(m2)||Y(1)(m2)|\sin(\delta^t(1) - \delta^t(m2) - \theta^t(1)(m2))): m2 \in \Omega_b \quad (۱۴)$$

$$|I^t(l)| \le |I^{rat}(l)| ; t \in \Omega_t; l \in \Omega_l \quad (۱۵)$$

$$|V_{min}^t| \le |V^t(m2)| \le |V_{max}^t| \quad (۱۶)$$

$$\sqrt{(P_g^t)^2 + (Q_g^t)^2} \le S_{stmax} \quad (۱۷)$$

$$0.95 \le |V^t(1)| \le 1.05 \quad t \in \Omega_t \quad (۱۸)$$

$$\begin{cases} \sum_{t\in\Omega_t} P_l^t(m2) = \sum_{t\in\Omega_t} P_l^{0t}(m2) & m2 \in \Omega_b\backslash 1 \\ \sum_{t\in\Omega_t} P_{rev}^t(m2) = \sum_{t\in\Omega_t} P_{rev}^{0t}(m2) & m2 \in \Omega_b\backslash 1 \\ \sum_{t\in\Omega_t} P_{pev}^t(m2) = \sum_{t\in\Omega_t} P_{pev}^{0t}(m2) & m2 \in \Omega_b\backslash 1 \end{cases} \quad (۱۹)$$

$$\begin{cases} (1-\lambda_l^t)P_l^{0t}(m2) \le P_l^t(m2) \le (1+\lambda_l^t)P_l^{0t}(m2) \\ (1-\lambda_{rev}^t)P_{rev}^{0t}(m2) \le P_{rev}^t(m2) \le (1+\lambda_{rev}^t)P_{rev}^{0t}(m2) \\ (1-\lambda_{pev}^t)P_{pev}^{0t}(m2) \le P_{pev}^t(m2) \le (1+\lambda_{pev}^t)P_{pev}^{0t}(m2) \end{cases} \quad (۲۰)$$

$$P_{sop}^t(m1) + (1-k_{sop})P_{sop}^t(m2) = 0 ; (m1,m2) \in \Omega_{sop(\zeta)} \quad (۲۱)$$

$$\sqrt{(P_{sop}^t(m1))^2 + (Q_{sop}^t(m1))^2} \le S_{sop}(m1) \quad (۲۲)$$

$$\sqrt{(P_{sop}^t(m2))^2 + (Q_{sop}^t(m2))^2} \le S_{sop}(m2) \quad (۲۳)$$

موازنه‌ی توان اکتیو و راکتیو در باس‌های سیستم، از جمله باس پست، در روابط (۱۱) تا (۱۴) ارائه شده است. در این روابط، $P_s(m1)/Q_s(m1)$، $P_w(m1)/Q_w(m1)$ و $P_{sop}(m1)/Q_{sop}(m1)$ به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی توان اکتیو و راکتیو تزریقی به باس $m1$ توسط سیستم فتوولتائیک، توربین بادی و SOP هستند. همچنین، $Y(m1)(m2)$ و $\theta(m1)(m2)$ به‌ترتیب بیانگر دامنه و زاویه‌ی درایه‌ی سطر m1 و ستون m2 در ماتریس ادمیتانس هستند و $\delta(m1)$ زاویه‌ی فاز باس m1 را نشان می‌دهد. مقادیر P_g و Q_g نیز به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی تزریق توان اکتیو و راکتیو به شبکه‌ی توزیع از سمت مبدل بار ترانسفورماتور هوشمند هستند.

محدودیت جریان نامی فیدرها در رابطه‌ی (۱۵) بیان شده است. محدودیت مجاز برای ولتاژ باس‌ها نیز توسط رابطه‌ی (۱۶) تعیین می‌شود که در آن $|V_{min}|$ و $|V_{max}|$ به‌ترتیب حداقل و حداکثر مقادیر مجاز ولتاژ هستند.

محدودیت توان ظاهری نامی ترانسفورماتور هوشمند در رابطه (۱۷) آورده شده که در آن S_{stmax}، توان ظاهری نامی مبدل سمت بار ترانسفورماتور هوشمند است. رابطه‌ی (۱۸) نشان می‌دهد که ولتاژ مبدل سمت بار این ترانسفورماتور می‌تواند در محدوده‌ی ۰.۹۵ تا ۱.۰۵ پریونیت تنظیم شود. ترانسفورماتور هوشمند امکان تنظیم ولتاژ سمت بار را در محدوده ۰.۹۵ تا ۱.۰۵ پریونیت فراهم می‌کند تا ولتاژ شبکه تحت کنترل باشد و بارگیری خط کاهش یابد.

رابطه‌ی (۱۹) بیان می‌کند که انرژی کل بارهای پاسخگو (شامل بارهای الکتریکی، خودروهای برقی مسکونی و عمومی) در طول دوره‌ی بهره‌برداری نمی‌تواند کاهش یابد و تنها امکان جابجایی زمانی برای آن‌ها وجود دارد. انرژی کل مصرفی هر نوع بار پاسخگو الکتریکی، EVخانگی، EVعمومی در طول ۲۴ ساعت ثابت باقی می‌ماند.

رابطه (۲۰) نیز محدوده‌ی مجاز برای جابجایی این بارها را مشخص می‌کند. در این رابطه، پارامترهای λ_l، λ_{pev} و λ_{rev} به‌ترتیب میزان مجاز جابجایی بار را برای مشتریان مختلف (بارهای الکتریکی، خودروهای برقی عمومی و

UNCORRECTED PROOF

خودروهای برقی مسکونی) تعیین می‌کنند. در عین حال، میزان جابه‌جایی ساعتی بار محدود است

موازنه‌ی توان در SOP با رابطه (۲۱) با $sop(\zeta)$ مدل شده و k_{sop} ضریب تلفات آن را نشان می‌دهد. مجموعه‌ی Ω_{sop} نیز نمایانگر تمامی SOP های موجود در شبکه است. در نهایت، محدودیت توان ظاهری SOP توسط روابط (۲۲) و (۲۳) اعمال می‌شود که در آن $S_{sop}(m1)$ بیانگر توان ظاهری نامی مبدل منبع ولتاژ SOP متصل به باس m1 است SOP با توان نامی ۲ مگاولت‌آمپر و تلفات داخلی ۲٪، امکان کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو را فراهم می‌کند. محدودیت توان ظاهری آن در روابط (۲۲) و (۲۳) اعمال شده است

۲-۱-روش حل

مسئله‌ی بهینه‌سازی در دو سطح حل می‌شود. در سطح اول، برنامه‌ی پاسخ به تقاضا با استفاده از برنامه‌ریزی خطی پیاده‌سازی شده و مسئله‌ی بهینه‌سازی رابطه (۲۴) با در نظر گرفتن قیود تعادل انرژی و محدودیت‌های جابجایی بار (۱۹) و (۲۰) حل می‌گردد.

$$\min \kappa \quad (۲۴)$$

پارامتر P_g^t در این مرحله و با صرف‌نظر از تلفات سیستم محاسبه می‌گردد؛ به این ترتیب که P_g^t از تفاضل کل تولید منابع انرژی تجدیدپذیر از کل بار مؤثر (شامل بارهای الکتریکی، خودروهای برقی مسکونی و عمومی) به‌دست می‌آید. متغیرهای کنترل در این سطح P_l^t، P_{rev}^t و P_{pev}^t هستند. مقادیر بهینه‌ی $\{P_l^t, P_{rev}^t$ و $P_{pev}^t\}$ به مرحله‌ی دوم اعمال می‌شوند.

در سطح دوم، از الگوریتم PSO برای بهینه‌سازی تنظیمات SOP و ترانسفورماتور هوشمند استفاده می‌شود. بنابراین، متغیرهای کنترل در این سطح مجموعه‌ی $\{P_{sop}^t(m1), Q_{sop}^t(m1), Q_{sop}^t(m2), |V^t(1)|\}$ می‌باشند. در این مرحله، قیود تساوی با اجرای یک الگوریتم پخش بار توزیع برآورده می‌شوند که در آن تلفات سیستم در نظر گرفته می‌شود. اگر هر یک از متغیرهای کنترل به مرز پایین یا بالای خود برسند، مقدار آن متغیر بر روی همان مرز ثابت نگه داشته می‌شود. همچنین، قیود نابرابری با به‌کارگیری روش تابع جریمه اعمال می‌گردند. مرزهای بالا و پایین مورد استفاده در توابع عضویت فازی از نتایج بهینه‌سازی تک‌هدفه به‌دست می‌آیند. الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده در این پژوهش به‌صورت زیر تشریح می‌شود و شکل(۱) فلوچارت الگوریتم و روش حل پیشنهادی را نشان می دهد:

- **سطح اول. حل مسئله با استفاده از برنامه‌ریزی خطی**

داده‌ها: $P_l^{0t}(m2)$، $P_{rev}^{0t}(m2)$، $P_{pev}^{0t}(m2)$، λ_g^t و λ_{dr}^t

هدف: به حداقل رساندن κ با استفاده از (۱۹) و (۲۰)

نتایج: $P_l^t(m2)$، $P_{rev}^t(m2)$ و $P_{pev}^t(m2)$

- **سطح دوم: حل مسئله با PSO**

داده‌ها: نتایج مرحله اول، اطلاعات شبکه، اطلاعات SOP و ترانسفورماتور هوشمند.

الگوریتم:

۱. با قرار دادن t = 1 ضمن اینکه $t \leq 24$ است، مراحل زیر را انجام بده.
۲. با قرار دادن i = 1 و نیز $i \leq 24$ مراحل زیر را انجام بده.
۳. اگر i = 1، آنگاه κ^t را با توجه به قیود مرتبط کمینه کن.
۴. در غیر این‌صورت، اگر i = 2، آنگاه v^t را با در نظر گرفتن قیود مرتبط بیشینه کن.
۵. در غیر این‌صورت، اگر i = 3، آنگاه η^t را با در نظر گرفتن قیود مرتبط، کمینه کن.
۶. در غیر این‌صورت، اگر i = 4، آنگاه ψ^t را با در نظر گرفتن قیود مرتبط کمینه کن.
۷. از PSO برای بهینه‌سازی استفاده کن و تمام مقادیر هدف را ثبت کن.

- **یافتن کران بالا و پایین هدف‌ها**

$$\kappa_{min}^t = min_i \kappa^t; \quad \kappa_{max}^t = max_i \kappa^t;$$
$$v_{min}^t = min_i v^t; \quad v_{max}^t = max_i v^t;$$
$$\eta_{min}^t = min_i \eta^t; \quad \eta_{max}^t = max_i \eta^t;$$
$$\psi_{min}^t = min_i \psi^t; \quad \psi_{max}^t = max_i \psi^t;$$

- **اجرای برنامه PSO برای به حداقل رساندن Δ^t با در نظر گرفتن قیود مرتبط**
- **استفاده از کران‌های بالا و پایین اهداف برای تابع عضویت فازی**
- **نتایج**

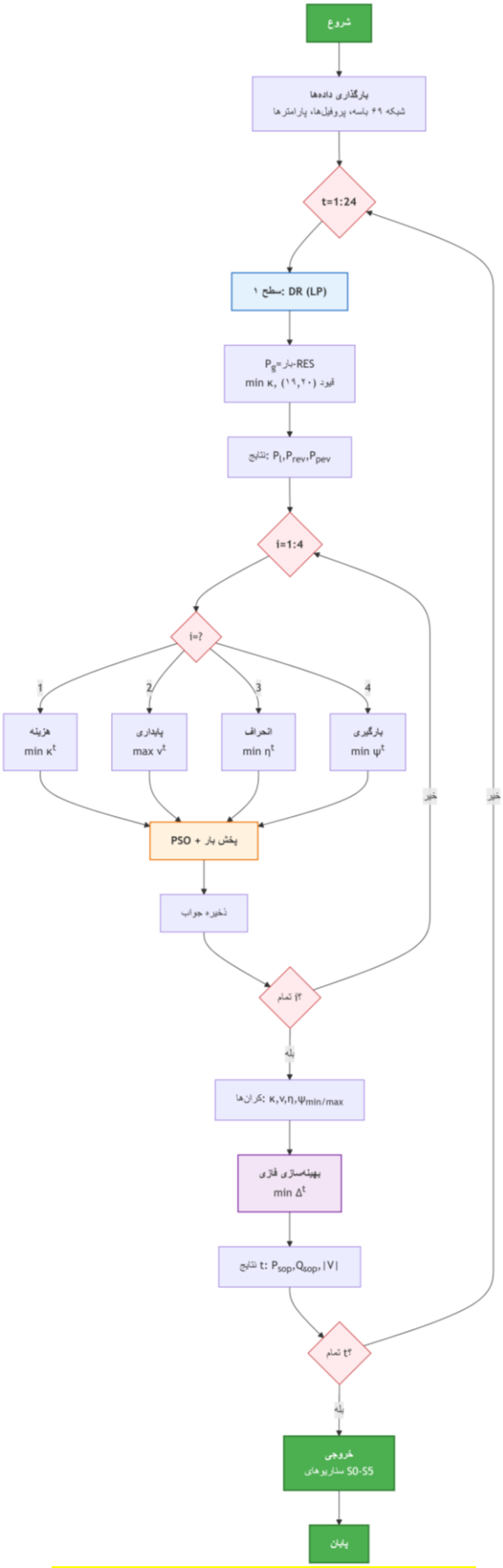
$P_{sop}^t(m1), Q_{sop}^t(m1), Q_{sop}^t(m2), |V^t(1)|$

UNCORRECTED PROOF

۲-۲-شبکه‌ی مورد مطالعه

در این مقاله، برای ارزیابی اولیه عملکرد چارچوب پیشنهادی، از پروفایل‌های قطعی برای تولید منابع تجدیدپذیر استفاده شده است. با این حال، مدل‌سازی عدم قطعیت (مثلاً با روش‌های مبتنی بر سناریو یا بازه‌های اطمینان) در آینده در نظر گرفته خواهد شد تا چارچوب در برابر نوسانات ذاتی منابع خورشیدی و بادی مقاوم‌تر شود.

مطالعات عددی در این پژوهش بر روی یک شبکه‌ی توزیع شعاعی فشارمتوسط ۶۹ باسه انجام شده است. ساختار این شبکه به منظور تجهیز به منابع انرژی تجدیدپذیر و ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی (هم خانگی و هم عمومی) اصلاح گردیده است. ولتاژ و توان پایه‌ی این سیستم به ترتیب ۱۲.۶۶ کیلوولت و ۱ مگاولت‌آمپر در نظر گرفته شده‌اند. در سرتاسر شبکه، ۴۸ واحد تولید پراکنده فتوولتائیک با ظرفیت نامی ۴۸ کیلووات و ۴۸ واحد توربین بادی با ظرفیت نامی ۲۰۰ کیلووات مستقر شده‌اند. همچنین، ۳۰ ایستگاه شارژ خانگی خودروی برقی در شبکه پیش‌بینی شده است. هر یک از این ایستگاه‌ها مجهز به شارژرهای تیپ ۲ با ۱۰ پریز مجزا بوده که ظرفیت هر پریز ۲۲ کیلووات است. بنابراین، ظرفیت کلی هر ایستگاه خانگی معادل ۲۲۰ کیلووات می‌باشد. از سوی دیگر، هر ایستگاه عمومی شارژ خودروهای برقی از شارژر سریع ۵۰ کیلوواتی بهره می‌برد و با داشتن ۶ خروجی، ظرفیت کلی ۳۰۰ کیلووات را فراهم می‌کند. در مجموع، ۱۷ ایستگاه عمومی شارژ در شبکه توزیع موجود است. یک نقطه‌ی نرم‌باز (SOP) با توان نامی ۲ مگاولت‌آمپر نیز بین باس‌های ۶۵ و ۲۷ نصب گردیده است. شکل (۲) پیکربندی شبکه‌ی مورد مطالعه و موقعیت مکانی ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی را نشان می‌دهد. پروفیل ساعتی تقاضای بار الکتریکی، توان تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر، و الگوی بار ایستگاه‌های عمومی و خانگی شارژ خودروهای برقی مشخص فرض شده‌اند. قیمت ساعتی برق شبکه و نرخ مشارکت در برنامه‌ی پاسخ به تقاضا نیز در شکل (۳) ارائه شده است. در این پژوهش، ۱۰ درصد از کل بارها، انعطاف‌پذیر در نظر گرفته شده‌اند. تلفات توان در SOP نیز ۲ درصد فرض شده است. خطوط شماره‌ی ۱، ۸، ۱۷، ۲۳، ۳۱، ۳۹، ۵۲ و ۵۷ دارای جریان



شکل ۱- فلوچارت الگوریتم و روش حل پیشنهادی

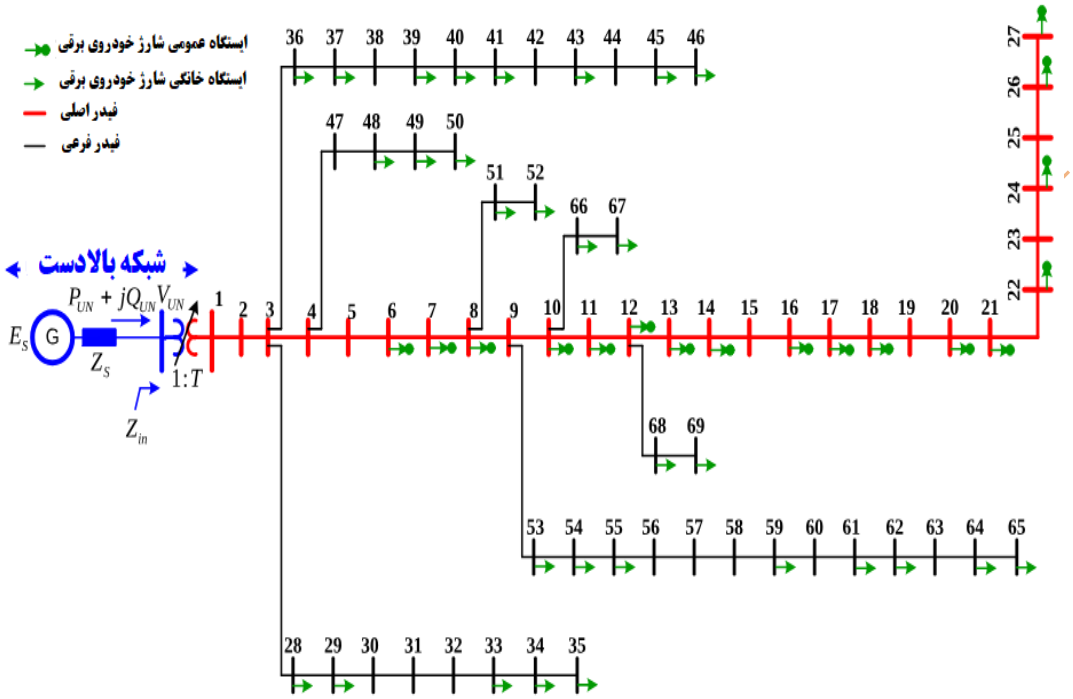
UNCORRECTED

نامی ۳۳۷.۵ آمپر و مابقی خطوط از جریان نامی ۲۶۰ آمپر برخوردار هستند.

SOP بین باس‌های ۶۵ و ۲۷ نصب شده است تا ولتاژ در دو بخش ضعیف شبکه هماهنگ شود

ترانسفورماتور هوشمند در شین ۱ (سرتاسری شبکه) قرار دارد و ولتاژ ورودی را به شبکه‌ی ۶۹ باسه کنترل می‌کند .

واحدهای فتوولتائیک در باس‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ و توربین‌های بادی در باس‌های ۱۵، ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۵ نصب شده‌اند.



شکل ۲- نمودار شبکه مورد مطالعه

۳- نتایج شبیه‌سازی

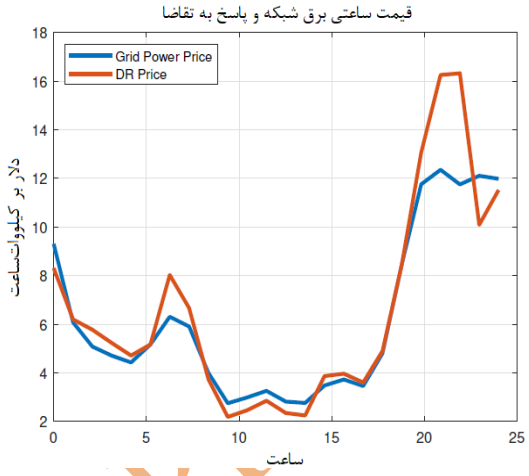
سناریوهای زیر برای ارزیابی عملکرد سیستم در نظر گرفته شده‌اند:

- **سناریوی صفر (حالت پایه)**: در این سناریو، برنامه‌ی پاسخ به تقاضا و کنترل SOP و ترانسفورماتور هوشمند فعال نیستند. کلیه‌ی سناریوهای دیگر با این حالت پایه مقایسه خواهند شد.
- **سناریوی یکم:** هدف این سناریو، کمینه‌سازی هزینه‌ی روزانه‌ی بهره‌برداری از طریق هماهنگی پاسخ به تقاضا، SOP و ترانسفورماتور هوشمند است.
- **سناریوی دوم :**هدف این سناریو، بهبود شاخص پایداری ولتاژ با استفاده از هماهنگی پاسخ به تقاضا، SOP و ترانسفورماتور هوشمند می‌باشد.
- **سناریوی سوم:** در این سناریو، هدف به حداقل رساندن انحراف ولتاژ میانگین با به‌کارگیری هماهنگی پاسخ به تقاضا، SOP و ترانسفورماتور هوشمند است.
- **سناریوی چهارم:** هدف، کمینه‌سازی بارگیری خطوط با استفاده از هماهنگی پاسخ به تقاضا، SOP و ترانسفورماتور هوشمند است.
- **سناریوی پنجم:** در این سناریو، یک تابع هدف ترکیبی با استفاده از هماهنگی پاسخ به تقاضا، SOP و ترانسفورماتور هوشمند به کار گرفته می‌شود.

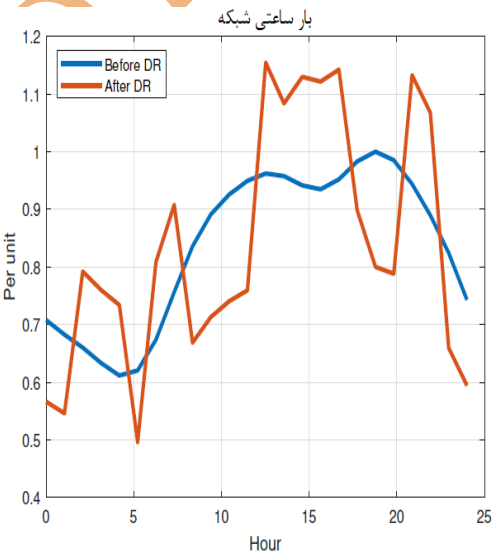
نتایج حاصل از سناریوهای مختلف در جدول (۱) خلاصه شده‌اند. همچنین، تنظیمات بهینه‌ی SOP و

UNCORRECTED

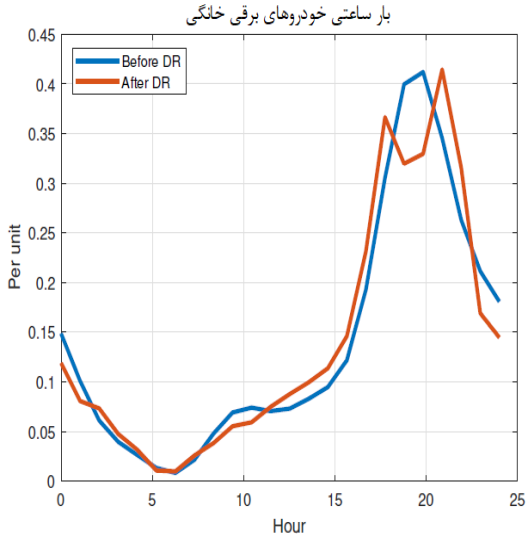
ترانسفورماتور هوشمند در سناریوهای مختلف به ترتیب در شکل‌های (۳) تا (۱۱) ارائه شده‌اند. شکل (۱۲) نیز موقعیت نصب SOP در شبکه‌ی توزیع ۶۹ باسه‌ی IEEE را نشان می‌دهد.



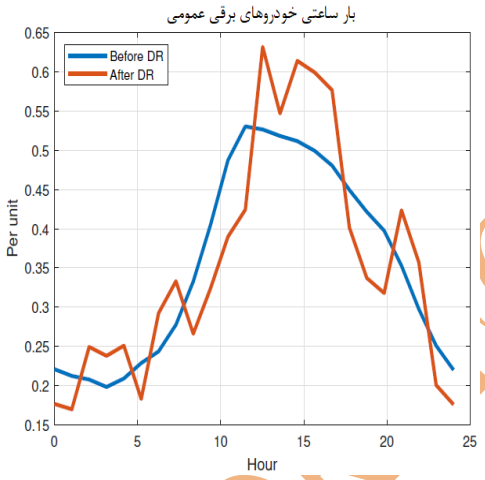
شکل ۳- قیمت ساعتی برق شبکه و پاسخ به تقاضا



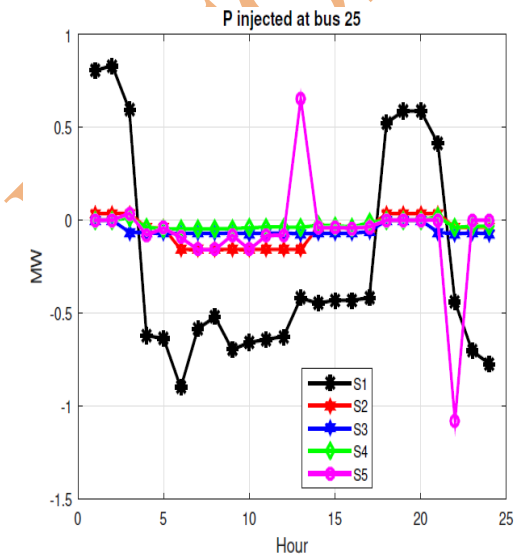
شکل ۴- بار ساعتی شبکه



شکل ۵- بار ساعتی خودروهای برقی خانگی

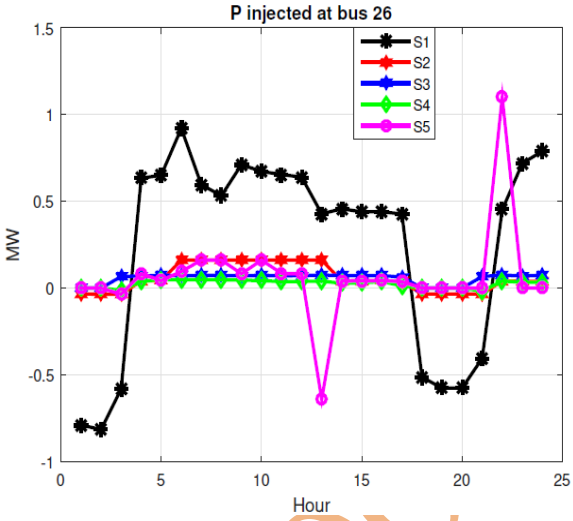


شکل ۶- بار ساعتی خودروهای برقی عمومی

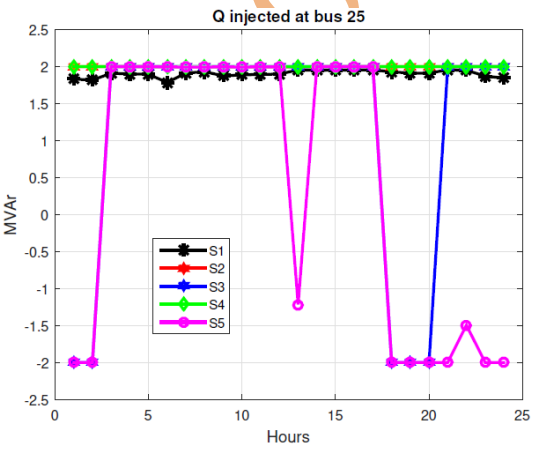


شکل ۷- توان اکتیو تزریق شده به شین ۲۵

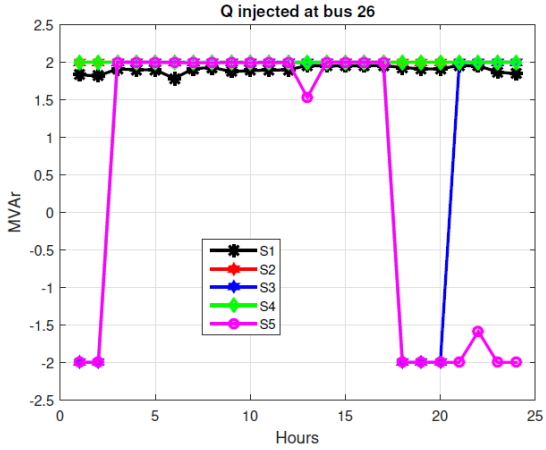
استناد به این مقاله: نحوه استناد فارسی در اینجا درج گردد.



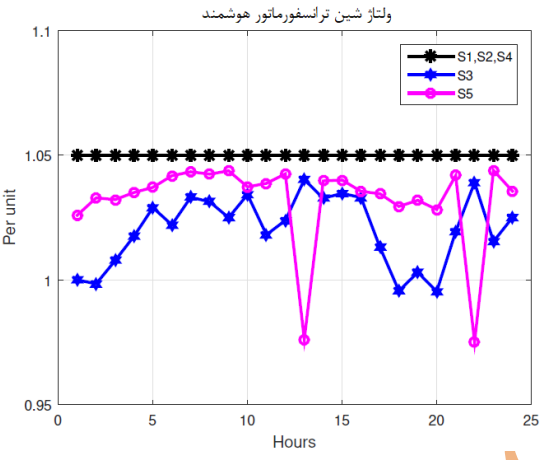
شکل ۸- توان اکتیو تزریق شده به شین ۲۶



شکل ۹- توان راکتیو تزریق شده به شین ۲۵



شکل ۱۰- توان راکتیو تزریق شده به شین ۲۶



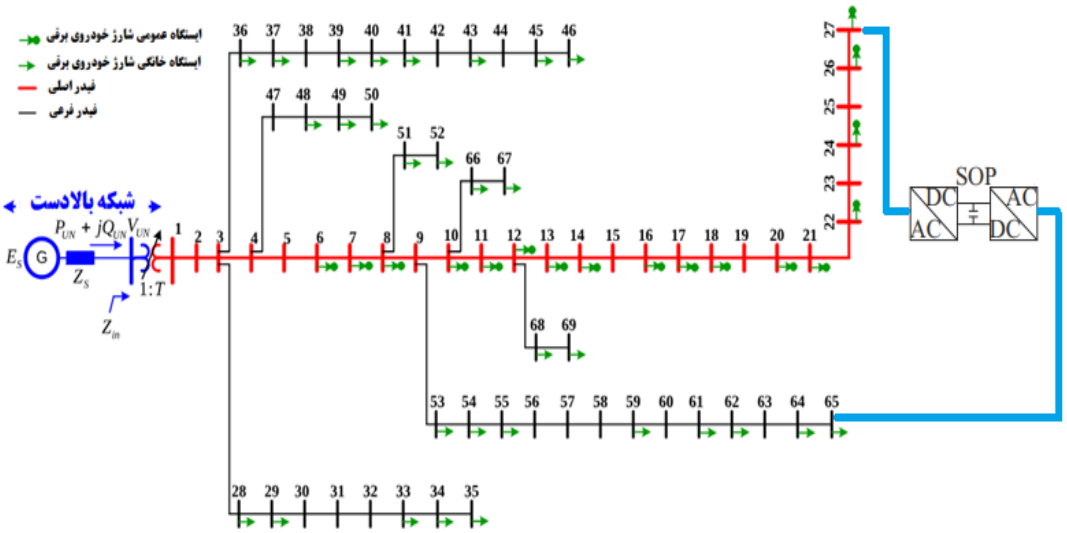
شکل ۱۱- تنظیمات ترانسفورماتور هوشمند

پروفایل ساعتی بار الکتریکی و بار ایستگاه‌های خانگی و عمومی شارژ خودروهای برقی، قبل و پس از اجرای برنامه‌ی پاسخ به تقاضا، به ترتیب در شکل‌های (۲) تا (۴) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پروفیل تقاضای بار و الگوی شارژ ایستگاه‌های عمومی به بازه‌ی زمانی بین ساعات ۱۱ تا ۱۷ انتقال یافته است. همچنین، اوج مصرف ایستگاه‌های خانگی شارژ خودروهای برقی در ساعات ۱۸ تا ۲۲ رخ می‌دهد.

بر اساس داده‌های جدول (۱)، کاهش هزینه‌ی عملیاتی روزانه در سناریوی اول (S1) معادل ۶.۳۲ درصد است. بهبودهای مشابهی نیز در سناریوی دوم (S2) برای شاخص پایداری ولتاژ و در سناریوی چهارم (S4) برای کاهش بارگیری خطوط حاصل شده است. این مقدار کاهش هزینه در سناریوی سوم (S3) که بر کاهش انحراف ولتاژ میانگین متمرکز است، برابر با ۵.۹۱ درصد می‌باشد.

در سناریوهای S1، S2 و S4، مبدل سمت بار ترانسفورماتور هوشمند بر روی ۱.۰۵ پری‌واحد تنظیم شده است. در نتیجه، شبکه‌ی توزیع از سطوح ولتاژ بالاتری در باس‌ها برخوردار می‌شود که این امر منجر به کاهش جریان خطوط، کاهش تلفات توان و بهبود شاخص پایداری ولتاژ می‌گردد. از آن‌جا که تلفات توان اکتیو کاهش می‌یابد، توان دریافتی از باس پست نیز کمتر شده و در نهایت هزینه‌ی انرژی کمتری را به همراه خواهد داشت.

UNCORRECTED



شکل ۱۲- محل قرارگیری SOP در شبکه ۶۹ شینه مورد مطالعه

درصدهای بهبود در شاخص‌ها نسبت به سناریوی پایه (S0) با استفاده از رابطه محاسبه شده‌اند، که در آن نماینده هر یک از شاخص‌های هزینه، VSI، AVD یا بارگیری خط است.

جدول ۱- خلاصه نتایج

جزئیات	سناریوها					
	سناریوی صفر (S0)	سناریوی ۱ (S1)	سناریوی (S2) ۲	سناریوی (S3) ۳	سناریوی (S4)۴	سناریوی (S5) ۵
تلفات روزانه انرژی (MWh)	۴/۰۱۸	۳/۸۸۸	۳/۸۸۸	۴/۱۰۳	۳/۸۸۸	۴/۰۹۵
هزینه عملیاتی روزانه ($)	۳/۱	۲/۹۰۴	۲/۹۰۴	۲/۹۱۷	۲/۹۰۴	۲/۹۱۷
میانگین حداقل شاخص پایداری ولتاژ در یک روز (پریونیت)	۰/۷۶۵	۰/۹۵۸	۰/۹۵۸	۰/۸۳۷	۰/۹۵۸	۰/۸۸۸
میانگین انحراف ولتاژ متوسط در یک روز (پریونیت)	۰/۰۲۳	۰/۰۳۶	۰/۰۳۶	۰/۰۲۱	۰/۰۳۶	۰/۰۳
میانگین حداکثر بارگیری خط در یک روز (درصد)	۵۱/۹۷	۵۱/۴۶	۵۱/۴۶	۵۲/۹۶	۵۱/۴۶	۵۲/۶

همان‌طور که در جدول (۱) نشان داده شده است، مقادیر تلفات انرژی، هزینه عملیاتی و شاخص پایداری ولتاژ در سناریوهای S1، S2 و S4 مشابه هستند. این نتیجه حاکی از آن است که اهداف این سه سناریو در یک راستا قرار دارند و بهبود در هر یک از آن‌ها، دو هدف دیگر را نیز ارتقا می‌دهد. در مقایسه با سناریوی پایه (S0)، سناریوهای S1، S2 و S4 موجب کاهش تلفات به میزان ۲۳.۳ تا ۲۴.۳ درصد، بهبود شاخص پایداری ولتاژ به میزان ۳۲.۶ درصد و کاهش بارگیری خط به میزان ۰.۹۷ درصد شده‌اند.

از آن‌جا که مبدل سمت بار ترانسفورماتور هوشمند در این سناریوها بر روی ۱.۰۵ پریونیت تنظیم شده است، ولتاژ بسیاری از باس‌ها از مقدار نامی ۱.۰۰ پریونیت فراتر رفته است. در نتیجه، میانگین انحراف ولتاژ در سناریوهای S1، S2 و S4 در مقایسه با سناریوی پایه افزایش یافته است. این موضوع نشان می‌دهد که تلاش برای کاهش هزینه،

UNCORRECTED PROOF

استناد به این مقاله: نحوه استناد فارسی در اینجا درج گردد.

بهبود پایداری ولتاژ یا کاهش بارگیری خط، منجر به افزایش انحراف ولتاژ میانگین می‌شود.

در سناریوی S3 که هدف آن کمینه‌سازی انحراف ولتاژ میانگین (نگهداری ولتاژ باس‌ها نزدیک به ۱.۰۰ پریونیت) است، تنظیمات ترانسفورماتور هوشمند به صورت پویا و ساعتی تغییر می‌کند و هرگز به مقدار ۱.۰۵ پریونیت نمی‌رسد. در نتیجه، سطوح ولتاژ در این سناریو پایین‌تر بوده که این امر منجر به افزایش بارگیری خطوط، تلفات توان اکتیو و هزینه‌های انرژی شده و همچنین شاخص پایداری ولتاژ را تضعیف می‌کند. با این حال، انحراف ولتاژ میانگین در این سناریو حدود ۹.۸۰ درصد نسبت به حالت پایه کاهش می‌یابد. بنابراین، هدف S3 در تضاد با اهداف سناریوهای S1، S2 و S4 قرار دارد و تلاش برای کاهش انحراف ولتاژ میانگین، موجب افزایش هزینه عملیاتی و بارگیری خط و کاهش شاخص پایداری ولتاژ می‌شود.

سناریوی S5 با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه و با هدف دستیابی همزمان به تمامی اهداف طراحی شده است. نتایج این سناریو که یک راه‌حل مصالحه را ارائه می‌دهد، نشان می‌دهد که کاهش هزینه معادل ۴.۸۲ درصد و بهبود شاخص پایداری ولتاژ ۱۵.۰۹ درصد است، در حالی که انحراف ولتاژ میانگین و بارگیری خط نسبت به سایر سناریوها اندکی تنزل می‌یابند.

۴-نتیجه گیری

در این مقاله، یک طرح مدیریت انرژی چندهدفه برای یک شبکه‌ی توزیع فعال ارائه شده است که به‌طور همزمان به کمینه‌سازی هزینه‌ی بهره‌برداری، انحراف ولتاژ میانگین و بارگیری خطوط، و همچنین بهبود پایداری ولتاژ می‌پردازد. شبکه‌ی توزیع مورد مطالعه، شامل واحدهای تولید پراکنده فتوولتائیک و بادی، یک ترانسفورماتور هوشمند و یک نقطه‌ی نرم‌باز است. علاوه بر این، ایستگاه‌های شارژ خانگی و عمومی خودروهای برقی نیز از این شبکه تغذیه می‌کنند. بخشی از بارهای الکتریکی و ایستگاه‌های شارژ با مشارکت در برنامه‌ی پاسخ به تقاضا، انعطاف‌پذیری لازم را در اختیار بهره‌بردار شبکه قرار می‌دهند. در این راستا، زمان‌بندی پاسخ به تقاضا با تنظیمات بهینه‌ی SOP و ترانسفورماتور هوشمند هماهنگ شده است تا اهداف از پیش تعیین شده محقق گردند. مسأله‌ی بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از منطق فازی فرمول‌بندی و با معیار کمینه‌سازی فاصله‌ی اقلیدسی از نقطه‌ی آرمانی حل شده است. فرآیند بهینه‌سازی در دو مرحله‌ی برنامه‌ریزی خطی و بهینه‌سازی ازدحام ذرات انجام پذیرفته است.

الگوریتم پیشنهادی بر روی نسخه‌ی اصلاح‌شده‌ی شبکه‌ی توزیع شعاعی ۶۹ باسه‌ی IEEE مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با اجرای این طرح، هزینه‌ی بهره‌برداری تا ۴.۸۲ درصد کاهش و شاخص پایداری ولتاژ تا ۱۵.۰۹ درصد بهبود می‌یابد. با این حال، این بهبودها با اندکی افزایش در بارگیری خطوط و انحراف ولتاژ میانگین همراه بوده است.

اگرچه چارچوب پیشنهادی عملکرد مناسبی در شرایط قطعی دارد، محدودیت‌هایی نیز وجود دارد: (۱) عدم در نظر گرفتن عدم قطعیت در منابع تجدیدپذیر و بار، (۲) فرض ساده از الگوهای EV بدون در نظر گرفتن رفتار راننده، و (۳) محدودیت محاسباتی الگوریتم PSO در مقیاس‌های بزرگ.

کارهای آینده شامل: (۱) توسعه چارچوب برای شبکه‌های چندفیدری، (۲) ادغام مدل‌های رفتاری دقیق‌تر مصرف‌کننده، (۳) استفاده از الگوریتم‌های چندهدفه پیشرفته‌تر مانند NSGA-II، و (۴) بسط مدل به محیط‌های عدم قطعیت با استفاده از روش‌های تصادفی یا تطبیقی است.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می کنند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

تاییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده اند.

منابع مالی

در انجام این پژوهش و نگارش مقاله حاصل از هیچ منبع مالی استفاده نشده است.

UNCORRECTED PROOF

مراجع

[1] Pandey, V. C., and et al. 2021. "A Hierarchical Price-Based Demand Response Framework in Distribution Network." *IEEE Transactions on Smart Grid* 13 (2): 1151–1164.

[2] Das, S., and M. Basu. 2020. "Day-Ahead Optimal Bidding Strategy of Microgrid with Demand Response Program Considering Uncertainties and Outages of Renewable Energy Resources." *Energy* 190: 116441.

[3] Vardakas, J. S., and et al. 2014. "A Survey on Demand Response Programs in Smart Grids: Pricing Methods and Optimization Algorithms." *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 17 (1): 152–178.

[4] Zhang, Y., and et al. 2017. "Optimal Placement of Battery Energy Storage in Distribution Networks Considering Conservation Voltage Reduction and Stochastic Load Composition." *IET Generation, Transmission & Distribution* 11 (15): 3862–3870.

[5] You, R., and X. Lu. 2022. "Voltage Unbalance Compensation in Distribution Feeders Using Soft Open Points." *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*.

[6] Wang, X., and et al. 2022. "A Two-Layer Control Strategy for Soft Open Points Considering the Economical Operation Area of Transformers in Active Distribution Networks." *IEEE Transactions on Sustainable Energy*: 1–12.

[7] Singh, A., and A. Maulik. 2022. "Energy Management of Distribution Network in the Presence of Smart Transformers, Soft Open Points, and Battery Energy Storage System." In *Proceedings of the 2022 International Conference on Power Energy Systems and Applications (ICoPESA)*, 437–442.

[8] Jabr, R. A. 2019. "Robust Volt/Var Control with Photovoltaics." *IEEE Transactions on Power Systems* 34 (3): 2401–2408.

[9] Sun, F., and et al. 2021. "A Multi-Time Scale Energy Management Method for Active Distribution Networks with Multiple Terminal Soft Open Point." *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 128: 106767.

[10] Chakravorty, M., and D. Das. 2001. "Voltage Stability Analysis of Radial Distribution Networks." *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 23 (2): 129–135.

[11] Pamshetti, V. B., and S. P. Singh. 2022. "Coordinated Allocation of BESS and SOP in High PV Penetrated Distribution Network Incorporating DR and CVR Schemes." *IEEE Systems Journal* 16 (1): 420–430.

[12] Li, T., and et al. 2021. "Two-Stage Optimal Operation of Integrated Energy System Considering Multiple Uncertainties and Integrated Demand Response." *Energy* 225: 120256.

[13] Sheikhi, A., and et al. 2015. "Integrated Demand Side Management Game in Smart Energy Hubs." *IEEE Transactions on Smart Grid* 6 (2): 675–683.

[14] Verma, P., and et al. 2018. "Computational Intelligence Techniques in Smart Grid Planning and Operation: A Survey." In *Proceedings of the 2018 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia)*, 891–896.

[15] Li, Z., and et al. 2013. "Toward Smart Distribution Management by Integrating Advanced Metering Infrastructure." *Electric Power Systems Research* 105: 51–56.

[16] López, G., and et al. 2015. "Paving the Road Toward Smart Grids Through Large-Scale Advanced Metering Infrastructures." *Electric Power Systems Research* 120: 194–205.

[17] Mohassel, R. R., and et al. 2014. "A Survey on Advanced Metering Infrastructure and Its Application in Smart Grids." In *Proceedings of the 2014 IEEE 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, 1–8.

[18] Bouhafs, F., and et al. 2014. *Communication Challenges and Solutions in the Smart Grid*. Springer.

[19] Broeer, T., and et al. 2014. "Modeling Framework and Validation of a Smart Grid and Demand Response System for Wind Power Integration." *Applied Energy* 113: 199–207.

[20] Li, Q., and et al. 2016. "Convex Optimization for DES Planning and Operation in Radial Distribution Systems with High Penetration of Photovoltaic Resources." *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 7 (3): 985–995.

[21] Silva, B. N., and et al. 2020. "Futuristic Sustainable Energy Management in Smart Environments: A Review of Peak Load Shaving and Demand Response Strategies, Challenges, and Opportunities." *Sustainability* 12 (14): 5561.

[22] Ellabban, O., and et al. 2014. "Renewable Energy Resources: Current Status, Future Prospects and Their Enabling Technology." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39: 748–764.

استناد به این مقاله: نحوه استناد فارسی در اینجا درج گردد.

[23] Lehtola, T., and A. Zahedi. 2020. "Technical Challenges in the Application of Renewable Energy: A Review." *International Journal of Smart Grid and Clean Energy* 9 (3): 689–699.
[24] Petinrin, J. O., and M. Shaaban. 2016. "Impact of Renewable Generation on Voltage Control in Distribution Systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 65: 770–783.
[25] Pamshetti, V. B., and S. P. Singh. 2019. "Optimal Coordination of PV Smart Inverter and Traditional Volt-VAR Control Devices for Energy Cost Savings and Voltage Regulation." *International Transactions on Electrical Energy Systems* 29 (7): e12042.
[26] Jeon, S., and D.-H. Choi. 2022. "Joint Optimization of Volt/VAR Control and Mobile Energy Storage System Scheduling in Active Power Distribution Networks under PV Prediction Uncertainty." *Applied Energy* 310: 118488.
[27] Sarimuthu, C. R., and et al. 2016. "A Review on Voltage Control Methods Using On-Load Tap Changer Transformers for Networks with Renewable Energy Sources." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 62: 1154–1161.
[28] Mak, D., and D.-H. Choi. 2020. "Optimization Framework for Coordinated Operation of Home Energy Management System and Volt-VAR Optimization in Unbalanced Active Distribution Networks Considering Uncertainties." *Applied Energy* 276: 115495.
[29] Prabpal, P., and et al. 2021. "Optimal Battery Energy Storage System Based on VAR Control Strategies Using Particle Swarm Optimization for Power Distribution System." *Symmetry* 13 (9): 1692.
[30] Liu, J., and et al. 2019. "An OLTC-Inverter Coordinated Voltage Regulation Method for Distribution Network with High Penetration of PV Generations." *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 113: 990–1001.
[31] Murray, W., and et al. 2021. "Voltage Control in Future Electrical Distribution Networks." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 146: 111100.
[32] Chaudhary, P., and M. Rizwan. 2018. "Voltage Regulation Mitigation Techniques in Distribution System with High PV Penetration: A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82: 3279–3287.
[33] Ameli, A., and et al. 2017. "A Dynamic Method for Feeder Reconfiguration and Capacitor Switching in Smart Distribution Systems." *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 85: 200–211.
[34] Islam, F. R., and et al. 2020. "Power Quality Improvement of Distribution Network Using BESS and Capacitor Bank." *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy* 9 (3): 625–632.
[35] Shaheen, A. M., and R. A. El-Sehiemy. 2020. "A Multiobjective Salp Optimization Algorithm for Techno-Economic-Based Performance Enhancement of Distribution Networks." *IEEE Systems Journal* 15 (1): 1458–1466.
[36] Singh, P., and et al. 2019. "Moth Search Optimization for Optimal DERs Integration in Conjunction to OLTC Tap Operations in Distribution Systems." *IEEE Systems Journal* 14 (1): 880–888.
[37] Borjali-Navesi, R., and et al. 2022. "Switchable Capacitor Bank Coordination and Dynamic Network Reconfiguration for Improving Operation of Distribution Network Integrated with Renewable Energy Resources." *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology* 12 (48): 43–59. (in Persian)
[38] Gholami, K., and M. H. Parvaneh. 2019. "A Mutated Salp Swarm Algorithm for Optimum Allocation of Active and Reactive Power Sources in Radial Distribution Systems." *Applied Soft Computing* 85: 105833.
[39] Karbouj, H., and et al. 2020. "Adaptive Voltage Control for Large Scale Solar PV Power Plant Considering Real Life Factors." *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 12 (2): 990–998.
[40] Wang, J. 2018. "Analysis of Energy Savings of CVR Including Thermostatic Loads in Distribution Systems." In *Proceedings of the 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*.
[41] Resch, M., and et al. 2021. "Techno-Economic Assessment of Flexibility Options Versus Grid Expansion in Distribution Grids." *IEEE Transactions on Power Systems* 36 (5): 3830–3839.
[42] Gao, S., and et al. 2019. "Techno-Economic Evaluation of Mixed AC and DC Power Distribution Network for Integrating Large-Scale Photovoltaic Power Generation." *IEEE Access* 7: 105019–105029.
[43] Valverde, G., and et al. 2019. "Coordination of Distributed Reactive Power Sources for Voltage Support of Transmission Networks." *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 10 (3): 1544–1553.
[44] Ruan, H., and et al. 2020. "Distributed Voltage Control in Active Distribution Network Considering Renewable Energy: A Novel Network Partitioning Method." *IEEE Transactions on Power Systems* 35 (6): 4220–4231.

[45] Chamana, M., and B. H. Chowdhury. 2018. "Optimal Voltage Regulation of Distribution Networks with Cascaded Voltage Regulators in the Presence of High PV Penetration." *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 9 (3): 1427–1436.
[46] Tewari, T., and et al. 2020. "Coordinated Control of OLTC and Energy Storage for Voltage Regulation in Distribution Network with High PV Penetration." *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 12 (1): 262–272.

UNCORRECTED PROOF

استناد به این مقاله: نحوه استناد فارسی در اینجا درج گردد.