

Optimal Charging of Electric Vehicles in Smart Stations and Its Effects on the Distribution Network Using the Particle Swarm Optimization Algorithm

Alireza Kashki¹, Azita Azarfar², Mahmoud Samiei Moghaddam³, Reza Davarzani⁴, Nasrin Salehi⁵

^{1,2,4,5} Department of Electrical Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran

³ Department of Electrical Engineering, Damghan Branch, Islamic Azad University, Damghan, Iran

Abstract

The proliferation of electric vehicles (EVs) presents both a significant challenge and opportunity for the energy sector. This study proposes a novel approach to optimizing EV charging in smart stations, considering its impact on the distribution network. Using the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, we address the complex optimization problem of balancing EV charging demands with network constraints. Navigating the complexities of energy management in the distribution network, including renewable resources and dynamic demand, is challenging. We introduce a sophisticated optimization model designed for network operations, featuring precise formulations for energy management. This model optimizes battery usage, EV energy management, compensator utilization, and distributed generation distribution. Through extensive simulations, we demonstrate the effectiveness of this approach in minimizing charging costs, reducing network congestion, and enhancing overall system performance. The multi-objective performance minimizes energy losses, electricity purchases, load reduction, distributed generation, and battery/EV costs over 24 hours. Simulations confirm a significant reduction in the operational costs of the distribution network. This research highlights the potential of advanced optimization techniques in smart charging infrastructure to facilitate widespread EV adoption while ensuring network reliability and efficiency. Incorporating EVs into the system results in significant improvements in performance indices compared to scenarios without electric vehicles. The results indicate a 14% reduction in the objective function value, with a notable 60% reduction in energy purchases and a 40% decrease in energy losses. Additionally, load reduction decreases by approximately 60%, while voltage deviation reduces by around 20%. Importantly, no reduction in PV or WD is observed with EV integration, indicating its compatibility with renewable energy generation profiles and emphasizing its potential to enhance system efficiency, reliability, and sustainability.

Keywords: Distribution network, PSO optimization algorithm, demand response, storage, electric vehicle

Submit date: 2024/05/26

Accepted date: 2024/10/05

Corresponding author's name: Mahmoud Samiei Moghaddam

Corresponding author's address: Department of Electrical Engineering, Damghan Branch, Islamic Azad University, Damghan, Iran

شارژ بهینه وسایل نقلیه الکتریکی در ایستگاه‌های هوشمند و اثرات آن بر شبکه توزیع با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

نوع مطالعه: پژوهشی

علیرضا کاشکی^۱، دانشجوی دکتری، آریتا آذرفر^۱، استادیار، محمود سمیعی مقدم^{۲*}، استادیار، رضا داورزنی^۱، استادیار، نسرين صالحی^۳، دانشیار

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

چکیده: گسترش وسایل نقلیه الکتریکی (EVs) یک چالش و فرصت مهم برای بخش انرژی است. این مطالعه یک رویکرد جدید برای بهینه‌سازی شارژ EV در ایستگاه‌های هوشمند با توجه به تأثیر آن بر شبکه توزیع پیشنهاد می‌کند. با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات یا PSO به مشکل بهینه‌سازی پیچیده متعادل کردن تقاضاهای شارژ EV با محدودیت‌های شبکه می‌پردازیم. پیمایش پیچیدگی‌های مدیریت انرژی شبکه توزیع، از جمله منابع تجدیدپذیر و تقاضای پویا، چالش برانگیز است. ما یک مدل بهینه‌سازی پیچیده را معرفی می‌کنیم که برای عملیات شبکه طراحی شده است، که دارای فرمول‌های دقیق برای مدیریت انرژی است. این مدل استفاده از باتری، مدیریت انرژی EV، استفاده از جبران کننده، و توزیع تولید پراکنده را بهینه می‌کند. از طریق شبیه‌سازی‌های گسترده، اثربخشی این رویکرد را در به حداقل رساندن هزینه‌های شارژ، کاهش تراکم شبکه و افزایش عملکرد کلی سیستم نشان می‌دهیم. عملکرد چند هدفه تلفات انرژی، خرید برق، کاهش بار، تولید توزیع شده و هزینه باتری EV را در ۲۴ ساعت به حداقل می‌رساند. شبیه‌سازی‌ها کاهش قابل توجهی در هزینه عملیاتی شبکه توزیع را تایید می‌کند. این تحقیق پتانسیل تکنیک‌های بهینه‌سازی پیشرفته در زیرساخت‌های شارژ هوشمند را برای تسهیل پذیرش گسترده EV و در عین حال اطمینان از قابلیت اطمینان و کارایی شبکه، برجسته می‌کند. گنجاندن وسایل نقلیه الکتریکی (EVs) در سیستم باعث بهبود قابل توجهی در شاخص‌های عملکرد در مقایسه با سناریوهای بدون خودروهای الکتریکی می‌شود. نتایج حاکی از کاهش ۱۴ درصدی در مقدار تابع هدف، با کاهش قابل توجه ۶۰ درصدی در خرید انرژی و کاهش ۴۰ درصدی در تلفات انرژی است. علاوه بر این، کاهش بار تقریباً ۶۰٪ کاهش می‌یابد، در حالی که انحراف ولتاژ حدود ۲۰٪ کاهش می‌یابد. نکته مهم، کاهش PV یا WD با ادغام EV مشاهده نمی‌شود، که سازگاری آن را با پروفایل‌های تولید انرژی تجدیدپذیر نشان می‌دهد و بر پتانسیل آن برای افزایش کارایی، قابلیت اطمینان و پایداری سیستم تاکید می‌کند.

کلیدواژه‌ها: شبکه توزیع، الگوریتم بهینه‌سازی PSO، پاسخ به تقاضا، ذخیره‌سازی، وسیله نقلیه الکتریکی.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۱۴

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمود سمیعی مقدم

نشانی نویسنده‌ی مسئول: گروه مهندسی برق - واحد دامغان، دانشگاه آزاد اسلامی، دامغان، ایران

نشریه علمی - پژوهشی کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران سال سیزدهم شماره ۲ شماره پیاپی ۳۵ تابستان ۱۴۰۳

شارژ است و در غیر این صورت نشان دهنده وضعیت دشارژ است.

خود را در به حداقل رساندن هزینه‌های شارژ، کاهش تراکم شبکه و افزایش عملکرد کلی سیستم نشان می‌دهیم. یکی از ویژگی‌های متمایز تحقیق ما در فرمول‌بندی یک تابع چند هدفه است که به اهداف بهینه‌سازی متنوع در یک دوره ۲۴ ساعته می‌پردازد. با به حداقل رساندن تلفات انرژی، خرید برق، کاهش بار، تولید پراکنده و هزینه‌های باتری/EV، مدل ما به دنبال دستیابی به یک استراتژی شارژ متعادل و کارآمد است. نتایج شبیه‌سازی‌های گسترده کاهش قابل توجهی در هزینه‌های عملیاتی شبکه توزیع را تأیید می‌کند، که بر پتانسیل تکنیک‌های بهینه‌سازی پیشرفته در شکل‌دهی به آینده زیرساخت شارژ هوشمند تأکید می‌کند. به طور خلاصه، این مقاله پتانسیل تغییردهنده روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته را در تسهیل پذیرش گسترده EVs در عین حصول اطمینان از قابلیت اطمینان و کارایی شبکه روشن می‌کند. با ادغام تکنیک‌های پیشرفته با محدودیت‌های شبکه در دنیای واقعی، رویکرد ما گامی مهم به سوی تحقق آینده انرژی پایدار و انعطاف‌پذیر است.

۱-۱- پیشینه تحقیق

مرجع [۱] یک استراتژی پویا به نام کنترل انرژی تطبیقی و تئوری اجزای همزمان پیشرفته را برای مقابله با موانعی که در شبکه‌های توزیع باتری PV-بادی مواجه می‌شوند، معرفی می‌کند، و به طور موثر چالش‌هایی مانند کیفیت توان پایین و غیرقابل پیش‌بینی شبکه را کاهش می‌دهد. در ادبیات، [۲] بینشی از یک رویکرد تصفیه شده به نام مدیریت بار هارمونیک بهینه ارائه می‌کند که برای مدیریت جریان روزانه انرژی در شبکه‌های توزیع به هم پیوسته طراحی شده است، بنابراین مشکلات کیفیت توان ناشی از دستگاه‌های الکترونیکی و توزیع ناهموار بار را برطرف می‌کند. محققان در [۳] یک چارچوب بهینه‌سازی با تمرکز دوگانه جدید را پیشنهاد می‌کنند که ریشه در مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح

۱- مقدمه

گسترش سریع وسایل نقلیه الکتریکی (EVs) در سال‌های اخیر، عصر جدیدی از حمل و نقل را آغاز کرده است که نویدبخش مزایای زیست محیطی و چالش‌هایی برای بخش انرژی است. از آنجایی که تعداد خودروهای برقی در جاده‌ها همچنان در حال افزایش است، بهینه‌سازی فرآیندهای شارژ آنها برای اطمینان از پایداری شبکه، به حداقل رساندن هزینه‌ها و به حداکثر رساندن کارایی بسیار مهم می‌شود. این مقاله یک رویکرد پیشگامانه را برای مقابله با این چالش بهینه‌سازی در چارچوب ایستگاه‌های هوشمند، با هدف کاهش تاثیر بر شبکه توزیع و در عین حال افزایش عملکرد کلی سیستم، بررسی می‌کند. در این مطالعه، ما یک روش بهینه‌سازی جدید را معرفی می‌کنیم که از قدرت الگوریتم بهینه‌سازی (PSO) برای رسیدگی به تعادل پیچیده بین تقاضاهای شارژ EV و محدودیت‌های شبکه استفاده می‌کند. برخلاف تکنیک‌های بهینه‌سازی مرسوم، PSO یک مزیت منحصر به فرد در پیمایش پیچیدگی‌های مدیریت انرژی شبکه توزیع، از جمله منابع تجدیدپذیر و الگوهای تقاضای پویا ارائه می‌دهد. با استفاده از PSO، ما یک مدل بهینه‌سازی پیچیده را توسعه می‌دهیم که به طور خاص برای عملیات شبکه طراحی شده است، که دارای فرمول‌های دقیق برای مدیریت انرژی است. محور اصلی مدل بهینه‌سازی ما، بررسی جامع عوامل مختلفی است که بر پویایی شارژ EV در ایستگاه‌های هوشمند تأثیر می‌گذارد. ما در بهینه‌سازی مصرف باتری، مدیریت انرژی EV، استفاده از جبران‌کننده و استراتژی‌های ارسال برای تولید پراکنده تحقیق می‌کنیم. ما از طریق فرمول‌بندی دقیق و شبیه‌سازی‌های دقیق، اثربخشی رویکرد

برای بهینه‌سازی عملکرد شبکه‌های توزیع ایزوله که عمدتاً توسط منابع تجدیدپذیر تغذیه می‌شوند، ابداع کردند، و یک راه‌حل ذخیره‌سازی فصلی باتری ترکیبی را در خود جای داد. در همین حال، [۱۱] یک مدل عملیات اقتصادی پیشرفته Peer-to-Peer (P2P) را معرفی می‌کند که برای شبکه‌های چند توزیعی، مبتنی بر تئوری چانه زنی نش طراحی شده است. این مدل پیچیدگی‌های هماهنگی بین سه روش انرژی (برق، گرما و گاز) را در نظر می‌گیرد، عدم قطعیت‌های ذاتی در عرضه و تقاضای انرژی را بررسی می‌کند، و اهداف عملیاتی کم کربن را در اولویت قرار می‌دهد. در داخل [۱۲]، محققان یک رویکرد پیشگام را ارائه کردند که شامل یک مدل دولایه از نظر توزیع قوی برای افزایش کارایی طراحی و عملیاتی سیستم‌های شبکه چند توزیعی جدا شده است. این روش از تکنیک تولید ستون و محدودیت برای بهینه‌سازی استفاده می‌کند. در همین حال، در [۱۳]، پیشنهاد قابل توجهی برای مهار پلت فرم‌های دیجیتال برای خودکارسازی ارزیابی‌های قابلیت اطمینان در مورد میکروسیستم‌ها در فناوری‌های انرژی معاصر وجود دارد. این مستلزم استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین، با استفاده از دو الگوریتم مجزا است که برای بررسی دقیق شاخص‌های رژیم و ارزیابی جنبه‌های قابلیت اطمینان طراحی شده‌اند. مرجع [۱۴] یک مدل محدب ابتکاری را که ریشه در تجزیه و تحلیل داده‌ها دارد، برای ارزیابی کارایی شبکه‌های توزیع ترکیبی AC/DC که مبدل‌های دو طرفه (BDCs) دارند، معرفی می‌کند. این مدل از روش تقریب حداقل مربعات در کنار توابع وزن مبتنی بر داده برای ساده‌سازی توصیف کارایی BDC استفاده می‌کند. در همین حال، در [۱۵]، محققان از یک استراتژی تخصصی که برای برنامه‌ریزی و مدیریت شبکه‌های توزیع، به‌ویژه شبکه‌های مجهز به سیستم‌های ذخیره‌سازی هیدرولیک پمپ‌دار طراحی شده است، دفاع می‌کنند. مرجع [۱۶] یک مدل بهینه‌سازی توان نوآورانه را که برای شبکه‌های توزیع

مختلط (MINLP) دارد، با هدف تقویت انعطاف‌پذیری شبکه توزیع از طریق ادغام تولید برق مبتنی بر هیدروژن، در نتیجه امکان عملیات خودکفا را فراهم می‌کند. علاوه بر این، [۴] یک چارچوب عملیاتی غیرمتمرکز جامع را معرفی می‌کند، که به طور خاص برای تامین استقلال و تنوع ذاتی عوامل فردی که در شبکه‌های توزیع فعال با شبکه‌های چندگانه فعالیت می‌کنند، طراحی شده است. در [۵]، محققان از یک استراتژی جدید مبتنی بر چارچوب بازی Stackelberg برای اطمینان از توزیع انرژی انعطاف‌پذیر در شبکه‌ها، با در نظر گرفتن مشارکت مشتریان و ایستگاه‌های شارژ وسایل نقلیه الکتریکی و در عین حال پرداختن به عدم قطعیت‌های پیرامون انرژی‌های تجدیدپذیر، راه‌حل‌های ذخیره‌سازی، و نوسانات بار حمایت می‌کنند. در [۶]، یک مدل پیشگام MINLP ظاهر می‌شود که بینش‌هایی را در مورد موقعیت‌یابی بهینه، انتخاب‌های فناوری، و استراتژی‌های عملیاتی برای سیستم‌های ذخیره انرژی باتری مستقر در شبکه‌های توزیع ارائه می‌دهد. این مدل با استفاده از یک روش نوآورانه که توسط الگوریتم ژنتیک موازی چو و بی‌زلی هدایت می‌شود، در تغییرپذیری تولید پراکنده و مصرف انرژی مؤثر است. مرجع [۷] یک استراتژی پیشگام را با هدف کاهش ردپای کربن در شبکه‌های توزیع، با تمرکز بر کاهش انتشار کربن بالا با در نظر گرفتن واحدهای اتصال انرژی-کربن مانند ژنراتورهای توزیع شده و بارهای صنعتی ارائه می‌دهد. در [۸]، محققان روش جدیدی را برای توزیع بهینه خازن در شبکه‌های توزیع ایزوله با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی ابتکاری معرفی کردند. در همین حال، [۹] یک استراتژی اقتصادی کم کربن نوآورانه را که برای شبکه‌های توزیع یکپارچه انرژی طراحی شده است، با استفاده از مدل بازی دولایه Stackelberg برای بهینه‌سازی کارایی عملیاتی، پرده برداری می‌کند. در [۱۰]، محققان چارچوب جدیدی را با محوریت تنظیمات زمان‌بندی مبتنی بر داده

عملیات پایدار را روشن می‌کند. در [۲۱] یک الگوریتم بهینه-سازی جدید برای بهینه‌سازی شبکه توزیع به همراه خودروهای برقی ارائه شده است. در [۲۲] زمان‌بندی شارژ و دشارژ بهینه خودروهای برقی در مواقع اضطراری با در نظر گرفتن کاهش پیک بار شبکه ارائه شده است. در [۲۳] محققین مکان‌یابی خط‌های دوفاز در ریزشبکه‌ها با حضور خودرو برقی و استفاده از مدل گسترده خط را پیشنهاد کرده‌اند. این مقاله یک رویکرد پیشگام برای بهینه‌سازی شارژ EV در ایستگاه‌های هوشمند معرفی می‌کند و از PSO برای متعادل کردن تقاضاهای شارژ با محدودیت‌های شبکه استفاده می‌کند. از طریق فرمول‌بندی دقیق و شبیه‌سازی‌های گسترده، این مطالعه کاهش قابل‌توجهی در هزینه‌های شارژ و هزینه‌های عملیاتی شبکه توزیع را نشان می‌دهد، و پتانسیل تکنیک‌های بهینه‌سازی پیشرفته را در تقویت پذیرش گسترده EV و در عین حال اطمینان از قابلیت اطمینان و کارایی شبکه برجسته می‌کند. در جدول (۱) مقایسه‌ای بین الگوریتم و مدل پیشنهادی این مقاله با سایر مطالعات پیشین انجام شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، اغلب مقالات دارای کاستی‌هایی در مدل‌سازی هستند، که سعی شده است در این مطالعه بر طرف گردد.

متصل به شبکه طراحی شده است، معرفی می‌کند و بر ادغام زیرساخت شبکه توزیع با یکپارچه‌سازی خودروهای الکتریکی تأکید می‌کند. این مدل از یک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام چند ذره متقاطع تطبیقی برای عملکرد بهبودیافته استفاده می‌کند. در همین حال، در [۱۷]، محققان به بررسی ظرفیت کم استفاده شبکه‌های توزیع چند انرژی برای عملکرد به عنوان نیروگاه مجازی در بازارهای خدمات کمکی می‌پردازند. این کاوش شامل استفاده از نظریه بازی استکلبرگ در ارتباط با مکانیسم‌های پاسخ تقاضای یکپارچه می‌شود. مرجع [۱۸] یک رویکرد جدید را با محوریت تاکتیک‌های مبتنی بر قیمت برای هماهنگ کردن عملکرد فزاینده الکتریکی در شبکه‌های توزیع، با تأکید کلیدی بر اعمال نفوذ بارهای هوشمند برای منافع اقتصادی، معرفی می‌کند. در همین حال، در [۱۹]، محققان یک استراتژی بهینه‌سازی چندهدفه تصادفی ابتکاری را با هدف افزایش کارایی و هماهنگی هاب‌های انرژی، منابع انرژی تجدیدپذیر، و وسایل نقلیه الکتریکی متصل به شبکه‌های توزیع هوشمند پیشنهاد کردند. در نهایت، مرجع [۲۰] بررسی عمیقی از ادبیات موجود مربوط به جنبه مدیریت انرژی سیستم‌های کنترل شبکه توزیع انجام می‌دهد و چالش‌های مختلف مرتبط با حفظ کنترل کلی و اطمینان از

جدول (۱) مقایسه این مطالعه با سایر مقالات پیشین

انرژی نو	بار-راکتیو	پاسخ-تقاضا	جبران‌ساز	باتری خودرو برقی	چند-هدفه	الگوریتم	مراجع
✓	✓	✓	✓	✓	✓	PSO	این مطالعه
✓	✓	-	-	✓	-	-	[۱]
✓	✓	✓	-	✓	✓	اکتشافی	[۲]
✓	✓	-	-	-	✓	بندرز	[۳]
✓	✓	-	-	✓	✓	پیش‌بینی	[۴]
✓	-	✓	-	✓	-	استاکلبرگ	[۵]
-	-	-	-	✓	✓	اکتشافی	[۶]
✓	✓	-	-	✓	-	-	[۷]
-	✓	✓	✓	-	-	تکاملی	[۸]

[۹]	استاکلبرگ	-	-	✓	-	-	-	✓
[۱۰]	داده-محور	-	-	✓	-	-	-	✓
[۱۱]	پیش‌بینی	-	-	-	-	-	-	✓
[۱۲]	تولید ستون و محدودیت	-	-	-	-	-	-	✓
[۱۳]	یادگیری ماشین	-	-	✓	-	-	-	✓
[۱۴]	داده-محور	-	-	-	-	-	✓	✓
[۱۵]	اکتشافی	-	-	✓	-	-	-	✓
[۱۶]	تکاملی	✓	✓	✓	-	-	-	✓
[۱۷]	استاکلبرگ	✓	-	✓	-	✓	-	✓
[۱۸]	اکتشافی	✓	-	✓	-	✓	-	✓
[۱۹]	تکاملی	✓	✓	✓	-	✓	-	✓

۲-۱-انگیزه تحقیق

پایدار و کارآمد را ایجاد کند که بتواند نیازهای در حال تحول حمل‌ونقل مدرن را برآورده کند و در عین حال قابلیت اطمینان و پایداری شبکه را تضمین کند.

انگیزه اصلی این تحقیق از نیاز حیاتی برای پرداختن به تأثیر رو به رشد EV ها بر شبکه های توزیع ناشی می شود. با افزایش استقبال از EV، فرآیندهای شارژ و تخلیه این وسایل نقلیه فشار قابل توجهی بر شبکه توزیع وارد می کند که منجر به چالش هایی مانند تراکم شبکه، افزایش تقاضای انرژی و فشار بالقوه زیرساخت می شود. درک و کاهش این اثرات برای اطمینان از قابلیت اطمینان، پایداری و کارایی شبکه توزیع در میان انتقال به یک سیستم حمل‌ونقل برقی تر بسیار مهم است. با بررسی استراتژی‌های شارژ و تخلیه بهینه خودروهای الکتریکی در ایستگاه‌های هوشمند، این تحقیق با هدف مقابله با تعامل پیچیده بین عملیات EV و دینامیک شبکه توزیع انجام می‌شود. هدف کلی توسعه راه حل های نوآورانه است که نه تنها فرآیندهای شارژ EV را بهینه می کند، بلکه اثرات نامطلوب آنها را بر شبکه توزیع نیز به حداقل می رساند. از طریق تجزیه و تحلیل دقیق و تکنیک‌های بهینه‌سازی پیشرفته، ما به دنبال افزایش انعطاف‌پذیری شبکه، کاهش هزینه‌های عملیاتی و هموار کردن راه برای ادغام یکپارچه خودروهای الکتریکی در اکوسیستم انرژی گسترده تر هستیم. در نهایت، این تحقیق در تلاش است تا یک زیرساخت انرژی

۳-۱-نوآوری تحقیق

نوآوری اصلی مقاله به شرح زیر است:

- معرفی یک رویکرد جدید برای بهینه‌سازی شارژ EV در ایستگاه‌های هوشمند: این مقاله یک روش جدید برای بهینه‌سازی شارژ خودروی الکتریکی (EV) در ایستگاه‌های هوشمند، با توجه به تأثیر آن بر شبکه توزیع ارائه می‌کند. این رویکرد برای رسیدگی به چالش‌ها و فرصت‌های ارائه شده توسط تکثیر خودروهای الکتریکی در بخش انرژی طراحی شده است.
- استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات پیشرفته: این مطالعه از الگوریتم بهینه‌سازی (PSO) برای مقابله با مشکل بهینه سازی پیچیده متعادل کردن تقاضاهای شارژ EV با محدودیت های شبکه استفاده می کند. این الگوریتم برای پیمایش پیچیدگی‌های مدیریت

انرژی شبکه توزیع، از جمله منابع تجدیدپذیر و تقاضای پویا، استفاده می‌شود.

- توسعه یک مدل بهینه سازی پیچیده متناسب با عملیات شبکه: این مقاله یک مدل بهینه سازی پیچیده را معرفی می‌کند که به طور خاص برای عملیات شبکه طراحی شده است. این مدل دارای فرمول‌بندی‌های دقیقی برای مدیریت انرژی، بهینه‌سازی جنبه‌های مختلف مانند استفاده از باتری، مدیریت انرژی EV، استفاده از جبران‌کننده، و توزیع تولید پراکنده است.

۴-۱- سازماندهی تحقیق

در بخش‌های آتی این دست‌نوشته، چارچوب مفهومی پیش‌بینی شده را معرفی خواهیم کرد، که با توضیح رویکرد اتخاذ شده برای پرداختن به مشکل پژوهشی موفق شد. پس از این، ما نتایج شبیه‌سازی‌های خود را قبل از رسیدن به نتیجه‌گیری، همراه با توصیه‌هایی برای راه‌های بالقوه تحقیقات آینده بررسی می‌کنیم.

۲- مدل پیشنهادی

چالش بهینه سازی در دست به قلمرو پیچیده حاکمیت انرژی کل نگر در شبکه های توزیع می پردازد، با در نظر گرفتن عوامل بی شماری از جمله، اما نه محدود به، عملکرد بهینه سیستم های باتری، مدیریت کارآمد مصرف انرژی وسایل نقلیه الکتریکی (EV)، عاقلانه. استفاده از جبران کننده ها و تخصیص استراتژیک منابع تولید پراکنده (DG). یک تابع هدف چند وجهی با هدف کلی به حداقل رساندن هزینه‌های مرتبط با اتلاف انرژی، خرید نیرو، کاهش بار، عملیات DG، و هزینه‌های باتری/EVs در طول ۲۴ ساعت ابداع شده است. این مدل با مجموعه‌ای از معادلات و نابرابری‌ها غنی شده است که با دقت طراحی شده است تا تعادل ظریف بین توان واقعی

و راکتیو، محدودیت‌های جذب توان از شبکه‌های بالادست، محدودیت‌های مربوط به مدیریت سمت تقاضا، ملاحظات بارهای قابل انطباق، تنظیم دقیق خروجی های توان اکتیو و راکتیو، پایبندی به آستانه ولتاژ، مدل سازی دقیق سیستم های ذخیره انرژی، محدودیت های عملیاتی در منابع تجدیدپذیر، محدودیت در عملیات خازن و راکتور شنت، و پیکربندی بهینه تعویض کننده تپ در بار (OLTC) و تنظیم کننده ولتاژ مرحله ای (تنظیمات SVR) علاوه بر این، این فرمول امکان‌ات محدودسازی را برای بارهای فعال و راکتیو، محدودیت‌های تحمیلی نرخ رمپ بر واحدهای DG و مدل‌سازی دقیق مورد نیاز برای فرآیندهای شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی را در نظر می‌گیرد. مسئله بهینه سازی موجود به جنبه های مختلف مدیریت انرژی در شبکه توزیع می پردازد. این شامل بهینه‌سازی شارژ و دشارژ باتری‌ها، ساده‌سازی مصرف انرژی خودروهای الکتریکی (EV)، به حداکثر رساندن راندمان جبران‌کننده، مدیریت تاکتیکی SVR و OLTC، و ارسال ماهرانه منابع DG است. علاوه بر این، نوسانات بار در مدل در نظر گرفته شده است. تابع هدفی که در معادله (۱) آمده است، با هدف بهینه‌سازی عملکرد سیستم قدرت و مدیریت بهینه منابع انرژی طراحی شده است. این تابع شامل چندین جزء هزینه‌ای است که هر کدام به نوعی به بهره‌برداری بهینه از منابع انرژی، کاهش هزینه‌ها و بهبود عملکرد کلی سیستم کمک می‌کنند. اجزای اصلی تابع هدف عبارت‌اند از هزینه‌های اتلاف انرژی که به حداقل رساندن هزینه‌های ناشی از اتلاف انرژی در خطوط انتقال و توزیع می‌پردازد. در این معادله، توان حقیقی و راکتیو انتقال‌یافته در خطوط و مقاومت خطوط به عنوان متغیرهای کلیدی در نظر گرفته شده‌اند. کاهش این هزینه‌ها باعث افزایش کارایی شبکه و کاهش اتلاف انرژی می‌شود. همچنین هزینه‌های قدرت خرید از شبکه بالادستی شامل هزینه‌هایی است که از خرید برق از شبکه‌های بالادستی متحمل می‌شود

و کاهش این هزینه‌ها می‌تواند به سودآوری بیشتر و بهره‌برداری اقتصادی‌تر از شبکه کمک کند. در مواقعی که تقاضای برق بالاست یا مشکلاتی در تأمین انرژی وجود دارد، کاهش بار یکی از راهکارهاست. این بخش از تابع هدف به حداقل رساندن هزینه‌های مرتبط با کاهش بار می‌پردازد. همچنین هزینه‌های عملیاتی تولید پراکنده شامل هزینه‌های مربوط به بهره‌برداری از واحدهای تولید پراکنده است که شامل هزینه‌های سوخت، تعمیر و نگهداری و سایر هزینه‌های عملیاتی مرتبط با این واحدها می‌باشد. بخش دیگر هزینه‌های مرتبط با باتری‌ها و خودروهای برقی است که هزینه‌های مربوط به شارژ و دشارژ باتری‌ها و همچنین هزینه‌های مرتبط با بهره‌برداری از خودروهای برقی را به حداقل می‌رساند. با توجه به افزایش استفاده از خودروهای برقی، بهینه‌سازی این هزینه‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. این تابع هدف به این دلیل انتخاب شده است که تمام عوامل کلیدی و هزینه‌بر در بهره‌برداری از سیستم قدرت را در نظر می‌گیرد. با توجه به پیچیدگی‌های موجود در مدیریت شبکه‌های برق، به‌ویژه با توجه به نفوذ روزافزون منابع تولید پراکنده و خودروهای برقی، انتخاب این تابع هدف به گونه‌ای است که امکان بهینه‌سازی هم‌زمان این عوامل را فراهم می‌کند. این رویکرد باعث می‌شود که شبکه در عین حفظ کارایی و کاهش اتلاف انرژی، از نظر اقتصادی نیز بهینه عمل کند. همچنین، با توجه به فشارهای روزافزون بر شبکه‌های برق به دلیل افزایش تقاضا و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، این تابع هدف به‌طور موثری به مدیریت بهتر منابع و بهینه‌سازی هزینه‌ها کمک می‌کند.

معادلات (۲) و (۳) تعادل بین توان واقعی و راکتیو در شبکه توزیع را نشان می‌دهد. نابرابری‌های (۴) و (۵) به ترتیب محدودیت‌های استفاده از توان اکتیو و راکتیو از شبکه بالادستی را برجسته می‌کنند. معادلات (۶) و (۷) مرزهای بارهای فعال و راکتیو کل را تحت ابتکار مدیریت سمت تقاضا

مشخص می‌کند. این اتصالات نشان می‌دهد که تحت ابتکار مدیریت سمت تقاضا، بار کلی در شبکه توزیع ممکن است کمتر از بارهای اولیه شبکه باشد. اساساً، این بر گنجاندن بارهای سازگار در این تحقیق تأکید می‌کند. نابرابری‌های (۸) و (۹) به ترتیب میزان تغییرات فعال و واکنشی را که در استراتژی مدیریت سمت تقاضا در نظر گرفته شده است، نشان می‌دهند. محدودیت‌های (۱۰) و (۱۱) به ترتیب مرزهای حاکم بر جریان توان اکتیو و راکتیو در شبکه توزیع را مشخص می‌کنند. معادلات (۱۲) و (۱۳) به ترتیب آستانه ولتاژ را برای شبکه توزیع و شین مرجع تعیین می‌کنند. مهم است که مشخص شود که مقاله مربع ولتاژ است. معادله (۱۴) محدودیت در استفاده از توان واقعی از DG ها را روشن می‌کند. معادلات (۱۵) تا (۱۹) مدل سازی سیستم‌های ذخیره انرژی تعبیه شده در شبکه توزیع را در بر می‌گیرد. معادله (۱۵) آستانه قدرت تخلیه را تعیین می‌کند، در حالی که معادله (۱۶) حداکثر توان را برای شارژ مشخص می‌کند. معادله (۱۷) سطح انرژی فعلی ذخیره شده در باتری را در کنار رابطه (۱۸) نشان می‌دهد که انرژی اولیه باتری را مشخص می‌کند. در نهایت، معادله (۱۹) سقف انرژی باتری را مشخص می‌کند. با حرکت رو به جلو، معادله (۲۰) مربع ولتاژ را در شبکه توزیع ترسیم می‌کند که در یک چارچوب مدل سازی محدب نشان داده شده است. به دنبال این، معادله (۲۱) مرز عملیاتی را برای دارایی‌های انرژی تجدیدپذیر در شبکه توزیع تحمیل می‌کند که منابعی مانند تاسیسات بادی و PV را پوشش می‌دهد. محدودیت‌های (۲۲) و (۲۳) به ترتیب آستانه‌های عملیاتی را برای خازن و راکتور شنت تعبیه شده در شبکه توزیع تعریف می‌کنند. معادلات (۲۴) تا (۲۶) فرآیند تعیین پیکربندی تپ OLTC و میزان تنظیمات تپ را روشن می‌کند. به طور مشابه، همبستگی‌های (۲۷) تا (۲۹) برای SVR استفاده می‌شود. توجه به این نکته مهم است که تنظیم تپ OLTC بر نقطه مرجع شبکه توزیع تأثیر می‌

$$D_{n,t}^{p,INI} - D_{n,t}^{p,INI} \times \gamma \leq D_{n,t}^{p,DSM} \quad (8)$$

$$\leq D_{n,t}^{p,INI} + D_{n,t}^{p,INI} \times \gamma \quad \forall n \in N, t \in T$$

$$D_{n,t}^{q,INI} - D_{n,t}^{q,INI} \times \gamma \leq D_{n,t}^{q,DSM} \quad (9)$$

$$\leq D_{n,t}^{q,INI} + D_{n,t}^{q,INI} \times \gamma \quad \forall n \in N, t \in T$$

$$-\bar{F}_{nm,t}^p \leq F_{nm,t}^p \leq \bar{F}_{nm,t}^p \quad \forall t \in T, nm \in B \quad (10)$$

$$-\bar{F}_{nm,t}^q \leq F_{nm,t}^q \leq \bar{F}_{nm,t}^q \quad \forall t \in T, nm \in B \quad (11)$$

$$\underline{V}_n \leq V_{n,t} \leq \bar{V}_n \quad \forall n \in N, t \in T \quad (12)$$

$$V_{n,t} = 1 \quad \forall n = ref \quad (13)$$

$$\underline{P}_n^{DG} \leq P_{n,t}^{DG} \leq \bar{P}_n^{DG} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (14)$$

$$\cdot \leq P_{n,t}^{ess,dis} \leq C_n^{ess} (1 - z_{n,t}) \quad \forall n \in N, t \in T, z \in \{0,1\} \quad (15)$$

$$\cdot \leq P_{n,t}^{ess,ch} \leq C_n^{ess} (z_{n,t}) \quad \forall n \in N, t \in T, z \in \{0,1\} \quad (16)$$

$$E_{n,t+1}^{ess} = E_{n,t}^{ess} + P_{n,t}^{ess,ch} \eta^{ess,ch} - P_{n,t}^{ess,dis} \eta^{ess,dis} \quad \forall n \in N, t \in T, z \in \{0,1\} \quad (17)$$

$$E_{n,t}^{ess} = \cdot \quad \forall n \in N, t = 1 \quad (18)$$

$$\underline{SOC}_n^{ess} C_n^{ess} \leq E_{n,t}^{ess} \leq \overline{SOC}_n^{ess} C_n^{ess} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (19)$$

$$V_{n,t} = V_{m,t} - \gamma (R_{nm} f_{nm,t}^p + X_{nm} f_{nm,t}^q) \quad \forall nm \in B, t \in T, n \in N \quad (20)$$

$$\cdot \leq P_{n,t}^{RE} \leq \bar{P}_{n,t}^{RE} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (21)$$

$$\cdot \leq Q_{n,t}^{sc} \leq \bar{Q}_{n,t}^{sc} \varphi_{n,t} \quad \forall n \in N, t \in T, \varphi \in \{0,1\} \quad (22)$$

$$\cdot \leq Q_{n,t}^{ShR} \leq \bar{Q}_n^{ShR} (1 - \varphi_{n,t}) \quad \forall n \in N, t \in T, \varphi \in \{0,1\} \quad (23)$$

$$V_{n,t} = 1 \times \nabla_{n,t,m}^{oltc} \quad \forall n \in \Omega^{OLTC}, t \in T, m \in M \quad (24)$$

$$\nabla_{n,t,m}^{oltc} = \sum_{m \in M} A_m \times \theta_{m,t}^{oltc} \quad \forall n \in \Omega^{OLTC}, t \in T, m \in M, \theta \in \{0,1\} \quad (25)$$

$$\sum_m \theta_{m,t}^{oltc} \leq 1 \quad \forall t \in T \quad (26)$$

$$V_{n,t} = V_{m,t} \times \nabla_{n,t,m}^{SVR} - \gamma (R_{nm} F_{nm,t}^p + X_{nm} F_{nm,t}^q) \quad \forall n, m \in \Omega^{SVR}, t \in T, nm \in B \quad (27)$$

گذار، در حالی که تپ SVR بر دیفرانسیل ولتاژ بین دو گره تأثیر می‌گذارد. معادلات (۳۰) و (۳۱) به ترتیب کاهش بارهای فعال و راکتیو در شبکه توزیع را تشریح می‌کنند. حد بالا و پایین برای نرخ تغییر در توان خروجی برای DGها بر این اساس در معادلات (۳۲) و (۳۳) نشان داده شده است. در نهایت، معادلات (۳۴) تا (۳۷) رویکرد بهینه را برای مدیریت شارژ و دشارژ وسایل نقلیه الکتریکی ترسیم می‌کند.

$$\min \sum_{nm \in B} \sum_{t \in T} c_t^{loss} R_{nm} (F_{nm,t}^p + F_{nm,t}^q) T \quad (1)$$

$$+ \sum_{t \in T} c_t^{sub} (P_t^{sub} + Q_t^{sub})$$

$$+ \sum_{n \in N} \sum_{t \in T} c_t^{shed} (D_{n,t}^{p,shed} + D_{n,t}^{q,shed})$$

$$+ \sum_{n \in N} \sum_{t \in T} c_t^{DG} (P_{n,t}^{DG})$$

$$+ \sum_{n \in N} \sum_{t \in T} c_t^{ess} (P_{n,t}^{ess,ch} + P_{n,t}^{ess,dis})$$

$$+ \sum_{n \in N} \sum_{t \in T} c_t^{ev} (P_{n,t}^{EV})$$

$$P_t^{sub} + P_{n,t}^{ess,dis} - P_{n,t}^{ess,ch} + \sum_{nm \in B(n)} F_{nm,t}^p \quad (2)$$

$$- \sum_{nm \in B(n)} F_{nm,t}^p + P_{n,t}^{DG}$$

$$+ P_{n,t}^{RE} + D_{n,t}^{p,shed} - D_{n,t}^{p,DSM} + P_{n,t}^{EV} = \cdot \quad \forall n \in N, t \in T, nm \in B$$

$$Q_t^{sub} + \sum_{nm \in B(n)} F_{nm,t}^q - \sum_{nm \in B(n)} F_{nm,t}^q \quad (3)$$

$$+ \rho \times P_{n,t}^{DG} + D_{n,t}^{q,shed} - D_{n,t}^{q,DSM} + Q_{n,t}^{sc} - Q_{n,t}^{ShR} = \cdot \quad \forall n \in N, t \in T, b \in B$$

$$\underline{P}^{sub} \leq P_t^{sub} \leq \bar{P}^{sub} \quad \forall t \in T \quad (4)$$

$$\underline{Q}^{sub} \leq Q_t^{sub} \leq \bar{Q}^{sub} \quad \forall t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{n \in N} D_{n,t}^{p,DSM} \leq \sum_{n \in N} D_{n,t}^{p,INI} \quad \forall t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{n \in N} D_{n,t}^{q,DSM} \leq \sum_{n \in N} D_{n,t}^{q,INI} \quad \forall t \in T \quad (7)$$

خودروی الکتریکی ($e_{n,t}^{ev}$) نشان داده شده است، که در آن $dr_{n,t}^{ev}$ بیانگر انرژی مورد نیاز وسایل نقلیه الکتریکی در باس n و زمان t است. در رابطه (۴۰)، مرز ظرفیت انرژی باتری در خودروهای الکتریکی نشان داده شده است که باید در محدوده حداقل $e_{n,t}^{ev}$ و حداکثر ($\bar{e}_{n,t}^{ev}$) قرار گیرد. معادلات (۴۱) و (۴۲) انرژی خالص مربوط به شارژ و دشارژ باتری های خودروهای الکتریکی را در کنار انرژی قابل دسترس درون باتری در ساعات اولیه و پایانی محاسبه می کنند. معادلات (۴۳) تا (۴۵) منحنی هزینه مرتبط با شارژ و دشارژ باتری خودروهای الکتریکی را نشان می دهند. در این زمینه، $C_{n,t}^{ev}$ هزینه های عملیاتی خودروهای الکتریکی را نشان می دهد، $\beta_{k,n}^{ev}$ نشان دهنده گرادیان بخش k th است که برای خطی سازی منحنی هزینه استفاده می شود، و $p_{k,n,t}^{ev}$ قدرت مربوط به بخش k ام خودروهای الکتریکی را نشان می دهد. در نهایت، $\bar{p}_{k,t}^{ev}$ نشان دهنده حداکثر توان در نظر گرفته شده برای قطعه k در خطی سازی است، جایی که k به عنوان شاخص مقادیر بخش های منحنی عمل می کند، و K مجموعه آن را نشان می دهد.

$$e_{n,t}^{net-ev} = p_{n,t}^{dis-ev} - \eta_n^{ev} p_{n,t}^{ch-ev} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (34)$$

$$p_{n,t}^{EV} = p_{n,t}^{dis-ev} - p_{n,t}^{ch-ev} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (35)$$

$$I_{n,t}^{dis-ev} + I_{n,t}^{ch-ev} = n_{n,t}^{ev} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (36)$$

$$I_{n,t}^{ch-ev} \underline{p}_n^{ch-ev} \leq p_{n,t}^{ch-ev} \leq I_{n,t}^{ch-ev} \bar{p}_n^{ch-ev} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (37)$$

$$I_{n,t}^{dis-ev} \underline{p}_n^{dis-ev} \leq p_{n,t}^{dis-ev} \leq I_{n,t}^{dis-ev} \bar{p}_n^{dis-ev} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (38)$$

$$e_{n,t}^{ev} = e_{n,t-1}^{ev} - e_{n,t}^{net-ev} - (1 - n_{n,t}^{ev}) dr_{n,t}^{ev} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (39)$$

$$\nabla_{n,t,m}^{SVR} = \sum_{m \in M} B_m \times \theta_{m,t}^{SVR} \quad \forall n \in \Omega^{SVR}, t \in T, m \in M, \theta \in \{0,1\} \quad (28)$$

$$\sum_m \theta_{m,t}^{SVR} \leq 1 \quad \forall t \in T \quad (29)$$

$$0 \leq D_{n,t}^{p,shed} \leq D_{n,t}^{p,DSM} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (30)$$

$$0 \leq D_{n,t}^{q,shed} \leq D_{n,t}^{q,DSM} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (31)$$

$$P_{n,t+1}^{DG} - P_{n,t}^{DG} \leq r^{up} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (32)$$

$$P_{n,t}^{DG} - P_{n,t+1}^{DG} \leq r^{dw} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (33)$$

رابطه های (۳۴) تا (۴۵) ادغام وسایل نقلیه الکتریکی را در تحقیقات مربوط به تأثیر بر شبکه توزیع نشان می دهد.

در شین n و زمان t ، هجوم و خروج انرژی کلی باتری ($e_{n,t}^{net-ev}$) در وسایل نقلیه الکتریکی بر اساس کارایی هر باتری همانطور که در رابطه (۳۴) مشخص شده است، ارائه می شود. در این رابطه، $p_{n,t}^{dis-ev}$ به $p_{n,t}^{ch-ev}$ ترتیب دشارژ و توان شارژ باتری های وسایل نقلیه الکتریکی در شین n و زمان t را نشان می دهد. علاوه بر این، η_n^{ev} کارایی شارژ باتری های خودروهای الکتریکی را نشان می دهد. معادله (۳۵) جریان برق به داخل یا خارج از شبکه توسط وسایل نقلیه الکتریکی در شین n و زمان t را نشان می دهد که با نرخ شارژ و دشارژ باتری تعیین می شود. شرایط شارژ و دشارژ وسایل نقلیه الکتریکی در معادله (۳۶) به تفصیل آمده است، جایی که $I_{n,t}^{dis-ev}$ وضعیت دشارژ و $I_{n,t}^{ch-ev}$ شارژ را به ترتیب در شین n و زمان t نشان می دهد. علاوه بر این، $n_{n,t}^{ev}$ وضعیت اتصال وسایل نقلیه الکتریکی به شبکه را نشان می دهد. اگر برابر با ۱ باشد، وسیله نقلیه به شبکه متصل است، در غیر این صورت، قطع می شود. معادلات (۳۷) و (۳۸) محدودیت های قدرت برای شارژ و دشارژ وسایل نقلیه الکتریکی را به ترتیب مشخص می کنند. \underline{p}_n^{ch-ev} و \bar{p}_n^{ch-ev} حداقل و حداکثر توان شارژ خودروهای برقی را نشان می دهد، در حالی که \underline{p}_n^{dis-ev} حداقل و \bar{p}_n^{dis-ev} حداکثر توان تخلیه خودروهای برقی را نشان می دهد. در رابطه (۳۹)، وضعیت انرژی باتری

می‌دهد. در رابطه (۴۷)، r اعداد تصادفی در محدوده $\{0, 1\}$ را نشان می‌دهد. وزن اینرسی w از (۴۹) محاسبه می‌شود. در (۴۹) w_{min} و w_{max} به ترتیب حداقل و حداکثر مقادیر ضریب وزن اینرسی هستند، t تعداد تکرارها، d وزن اینرسی اولیه پس از جستجوی اولیه، و به ترتیب $l_1(t)$ و $l_2(t)$ یک تابع غیر خطی و یک تابع خطی می‌باشد. مقادیر $l_1(t)$ و $l_2(t)$ از (۵۰) و (۵۱) محاسبه می‌شوند، که حداکثر تعداد تکرار است. پارامترهای $c_1^g(t)$ و $c_2(t)$ به صورت پویا با استفاده از تابع مماس (۵۲) و (۵۳) تنظیم می‌شوند تا بین جستجوهای سراسری و محلی تعادل بهتری برقرار کنند [۲۴].

$$F_{mn}^k = 0, X_{mn}^k = rand\{ss\} \quad (46)$$

$$F_{mn}^{k+1} = wF_{mn}^k + c_1^g r_1 (A_{mn}^k - X_{mn}^k) + c_1^b r_2 (X_{mn}^k - B_{mn}^k) + c_2 r_3 (D_{mn}^k - X_{mn}^k) \quad (47)$$

$$X_{mn}^{k+1} = X_{mn}^k + F_{mn}^{k+1} \quad (48)$$

$$w = \begin{cases} w_{min} + (w_{max} - w_{min}) \times l_1(t), & t < k \\ 2w_{min} + 2(d - w_{min}) \times l_2(t), & t \geq k \end{cases} \quad (49)$$

$$l_1(t) = e^{-30 \times (t/t_{max})^{15}} \quad (50)$$

$$l_2(t) = -\frac{t}{t_{max}} \quad (51)$$

$$c_1^g(t) = (c_{1,start}^g - c_{1,end}^g) \times \tan\left(0.875 \times \left(1 - \left(\frac{t}{N}\right)^{0.6}\right)\right) + c_{1,end}^g \quad (52)$$

$$e_{n,t}^{ev} \leq e_{n,t}^{ev} \leq \bar{e}_{n,t}^{ev} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (40)$$

$$e_{n,t=1}^{ev} = e_{n,t=24}^{ev} \quad \forall n \in N \quad (41)$$

$$e_{n,t=1}^{net, ev} = e_{n,t=24}^{net, ev} \quad \forall n \in N \quad (42)$$

$$c_{n,t}^{ev} = n_{n,t}^{ev} \sum_{k=1}^K \beta_{k,n}^{ev} p_{k,n,t}^{ev} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (43)$$

$$n_{n,t}^{ev} (e_{n,t}^{ev} - e_{n,t-1}^{ev}) \quad (44)$$

$$\geq - \sum_{k=1}^K p_{k,n,t}^{ev}, \quad n_{n,t}^{ev} (e_{n,t}^{ev} - e_{n,t-1}^{ev})$$

$$\leq \sum_{k=1}^K p_{k,n,t}^{ev} \quad \forall n \in N, t \in T$$

$$\cdot \leq p_{k,n,t}^{ev} \leq \bar{p}_{k,t}^{ev} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (45)$$

۳- الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات پیشرفته (PSO)

در این مقاله، متغیرهای تصمیم برابر با ظرفیت‌های بهینه SC/ShR و تپ OLTC و SVR در حضور منابع PV و EVCSs به همراه ولتاژ و جریان شاخه‌ها می‌باشد. این متغیرها با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات اصلاح شده (PSO) محاسبه می‌شوند. در این مقاله از الگوریتم PSO به دلیل پتانسیل زیاد آن برای یافتن راه حل بهینه برای مسائل غیرخطی استفاده شده است. این الگوریتم اصلاح شده بدترین موقعیت (B_{mn}^k) را در هر جستجو پیدا می‌کند و الگوریتم را قادر می‌سازد در تکرارهای بعدی از این موقعیت-ها اجتناب کند [۲۰]. در نتیجه، راه حل بهینه ممکن سریعتر با تکرارهای کمتر پیدا می‌شود. رابطه (۴۶) مقدار اولیه سرعت ذره n و بعد m را در تکرار جریان F_{mn}^k نشان می‌دهد. برای $k = 1$ ، سرعت اولیه طبق رابطه (۴۷) صفر است و موقعیت اولیه به طور تصادفی از فضای جستجو (SS) انتخاب می‌شود. رابطه (۴۸) رابطه به روز رسانی سرعت در تکرار $k + 1$ است. رابطه (۴۹) نیز موقعیت جدید ذرات را در تکرار $k + 1$ نشان

$$c_2(t) = (c_{2,start} - c_{2,end}) \times \arctan\left(2.8 \times \left(1 - \left(\frac{t}{N}\right)^{0.4}\right)\right) + c_{2,end} \quad (53)$$

۱. سرعت همگرایی بالا: PSO در سرعت همگرایی با الگوریتم‌های بهینه‌سازی دیگر رقابت می‌کند و برخی مطالعات نشان داده است که در بسیاری از حالات، سرعت همگرایی PSO بیشتر از الگوریتم‌های دیگر است.

۲. بالا بودن بهبود، پیشرفت و عملکرد: PSO به دلیل تعامل بین ذرات، از نظر بهبود، پیشرفت و عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی دیگر بالاتر است.

۳. ساده بودن الگوریتم: PSO نسبتاً ساده است و برای بسیاری از مسائل قابل استفاده است. همچنین، پیاده‌سازی آن نیز نسبتاً آسان است.

۴. کاربرد گسترده: PSO در بسیاری از مسائل بهینه‌سازی مانند بهینه‌سازی عددی، برنامه‌ریزی خطی و غیر خطی، بهینه‌سازی چند معیاره و غیره کاربرد دارد.

در بخش بعدی نتایج مربوط به شبیه‌سازی ارائه می‌گردد.

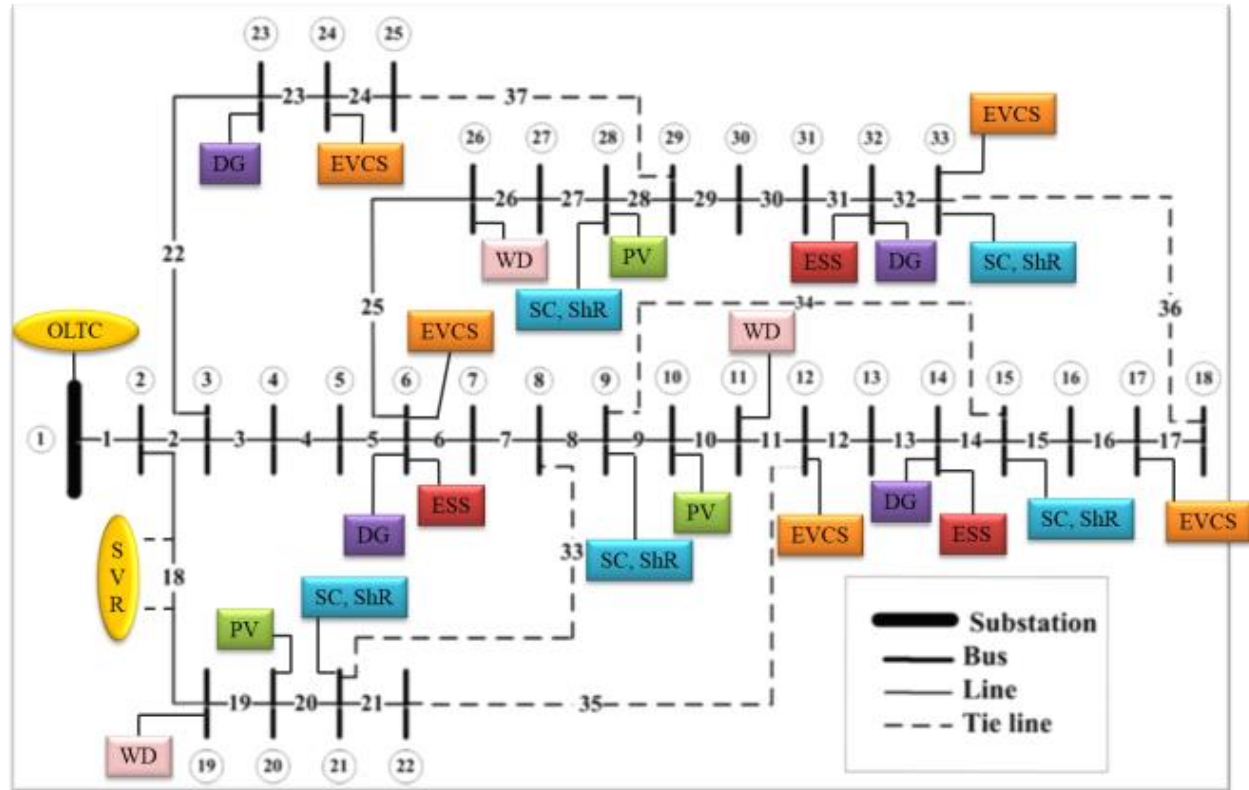
۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، مدل و رویکرد پیشنهادی از طریق بررسی شبکه توزیع ۳۳ شینه مورد تایید قرار می‌گیرند. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از یک لپ‌تاپ مجهز به ۲.۴ CPU گیگاهرتز و ۱۲ گیگابایت رم، با استفاده از زبان برنامه‌نویسی جولیا اجرا می‌شوند. شکل ۱ یک نمای کلی نموداری از شبکه توزیع را نشان می‌دهد که بر عناصر حیاتی مانند ایستگاه‌های شارژ وسایل نقلیه الکتریکی (EVCS)، سیستم‌های ذخیره انرژی (ESS)، تأسیسات تولید پراکنده (DG) و منابع انرژی تجدیدپذیر (WD/PV) تأکید می‌کند. قابل توجه این است که مدل تغییرات در تقاضای فعال و واکنشی را در نظر می‌گیرد که حداکثر انحراف مجاز ۲۰٪ را مجاز می‌کند. در این تحقیق،

بر خلاف الگوریتم‌های بهینه‌سازی سنتی، PSO فقط برای دیدن نقطه بهینه نمی‌رود. به جای آن، در یک فضای جستجو دو بعدی به دنبال بهینه‌سازی به صورت هماهنگ و تعاملی بین پارامترهای عددی رفتار می‌کند. به این ترتیب، ویژگی اصلی PSO تعاملی بودن بین ذرات است. یکی از برتری‌های PSO در مقایسه با الگوریتم‌های بهینه‌سازی دیگر، سرعت همگرایی آن است. با توجه به تعامل و هماهنگی بین ذرات، الگوریتم PSO به سرعت به نقطه بهینه همگرا می‌شود. این در حالی است که الگوریتم‌های بهینه‌سازی دیگر معمولاً توسط مشکلات مانند بدون خروج از گرفتاری و یا به اشتراک گذاشتن نقطه بهینه بین جمعیت در جایگاه الکتروودینامیکی خاص خود کاهش سرعت همگرایی خود را تجربه می‌کنند. همچنین، PSO می‌تواند برای مسائل بهینه‌سازی گسترده به کار برود، چرا که کارایی و کاربرد آن برای بهبود بهینه‌سازی در بسیاری از مسائل کاربرد دارد. همچنین، PSO نسبتاً ساده است در حالی که الگوریتم‌های بهینه‌سازی دیگر مثل الگوریتم‌های ژنتیک و سیموله‌شده، پیاده‌سازی و استفاده آن‌ها دشوارتر است. در کل، برتری PSO در الگوریتم‌های بهینه‌سازی دیگر به دلیل سرعت همگرایی، قابلیت کاربرد گسترده، سادگی و کاربردی بودن آن می‌باشد. در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های بهینه‌سازی، الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) دارای برخی مزایا و معایب است. در زیر به برخی از برتری‌های PSO در مقایسه با الگوریتم‌های بهینه‌سازی دیگر اشاره شده است.

۱ نشان داده شده است، شامل ۳۲ خط است که بر تنوع اجزا از جمله منابع PV، WD، EVCS، ESS، SC، ShR و OLTC، SVR، DG و OLTC تاکید دارد.

سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و باتری‌های وسایل نقلیه الکتریکی مبتنی بر لیتیوم فرض می‌شوند که دارای رتبه بازده عملیاتی ۹۵٪ هستند. شبکه توزیع ۳۳ گره ای که در شکل



شکل (۱) شماتیک شبکه توزیع پیشنهادی [۲۱]

کمتراست. این نتایج ممکن است به دلیل محدودیت تعداد وسایل نقلیه الکتریکی و در نتیجه کاهش تأثیرات آنها بر شبکه توزیع باشد. به طرف دیگر، در سناریو ۲ که تمام وسایل نقلیه غیر الکتریکی را در نظر می‌گیریم، هدف مالی بیشتر و نیاز به خرید بیشتری از انرژی وجود دارد. همچنین، مقدار تلفات انرژی، کاهش بار، و انحراف ولتاژ در این سناریو بیشتر است که ممکن است به دلیل بار زیاد وسایل نقلیه غیر الکتریکی و افزایش تنوع در شبکه توزیع باشد. در همین راستا، می‌توان نتیجه گرفت که معرفی وسایل نقلیه الکتریکی به شبکه توزیع می‌تواند به کاهش تلفات انرژی، انحراف ولتاژ، و کاهش بار کمک کند، اما نیازمند بررسی دقیق‌تر و شناخت عمیق‌تری از

برای نشان دادن تأثیر ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی بر شبکه توزیع، دو سناریو زیر را بررسی کرده ایم:

سناریو (۱) ترکیب وسایل نقلیه الکتریکی.

سناریو (۲) به استثنای وسایل نقلیه الکتریکی.

با داشتن دو سناریو مختلف برای تأثیر ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی بر شبکه توزیع، می‌توانیم از جدول ارائه شده برای بررسی مواردی مانند هدف مالی، مصرف انرژی، تلفات انرژی، و تغییرات در بار و ولتاژ استفاده کنیم. در سناریو ۱، که ترکیب وسایل نقلیه الکتریکی را در نظر گرفته‌ایم، هدف مالی کمتر و میزان خرید انرژی، تلفات انرژی، و کاهش بار نیز

درصد است. این نشان می‌دهد که در سناریو ۲ نیاز به مصرف بیشتری از انرژی وجود دارد که ممکن است به دلیل حضور وسایل نقلیه غیر الکتریکی باشد که نیاز به سوخت دارند. همچنین، در سناریو ۲ میزان تلفات انرژی نیز افزایش یافته و از 0.254 MWh در سناریو ۱ به 0.542 MWh افزایش یافته است که افزایش حدود 113.39 درصدی را نشان می‌دهد. این مقدار نشان‌دهنده افزایش تلفات انرژی در شبکه است که ممکن است به دلیل افزایش تقاضا و بار در شبکه باشد. به علاوه، مقدار کاهش بار نیز در سناریو ۲ به 0.19 MWh افزایش یافته است که افزایش حدود 216.67 درصدی را نشان می‌دهد. این نشان‌دهنده افزایش بار در شبکه است که ممکن است به دلیل حضور وسایل نقلیه غیر الکتریکی و افزایش تقاضا باشد. با این تفاسیر، می‌توان نتیجه گرفت که در سناریو ۲، با حضور وسایل نقلیه غیر الکتریکی، افزایش‌های قابل توجهی در هدف مالی، مصرف انرژی، تلفات انرژی، و بار در شبکه رخ داده است که نشان‌دهنده اهمیت مدیریت منابع انرژی و بهینه‌سازی شبکه توزیع است.

جدول (۱) نتایج شبیه سازی

	سناریو ۱	سناریو ۲
تابع هدف (\$) (\$)	۵۸۴۲۱	۷۲۵۸۹
خرید انرژی (MWh)	۰.۱۶۷	۰.۶۸۷
تلفات انرژی (MWh)	۰.۲۵۴	۰.۵۴۲
کاهش بار (MWh)	۰.۰۶	۰.۱۹
انحراف ولتاژ (pu)	۰.۰۴۱	۰.۰۶۱
قطع PV (MWh)	۰	۰.۰۷
قطع WD (MWh)	۰	۰.۰۲۵

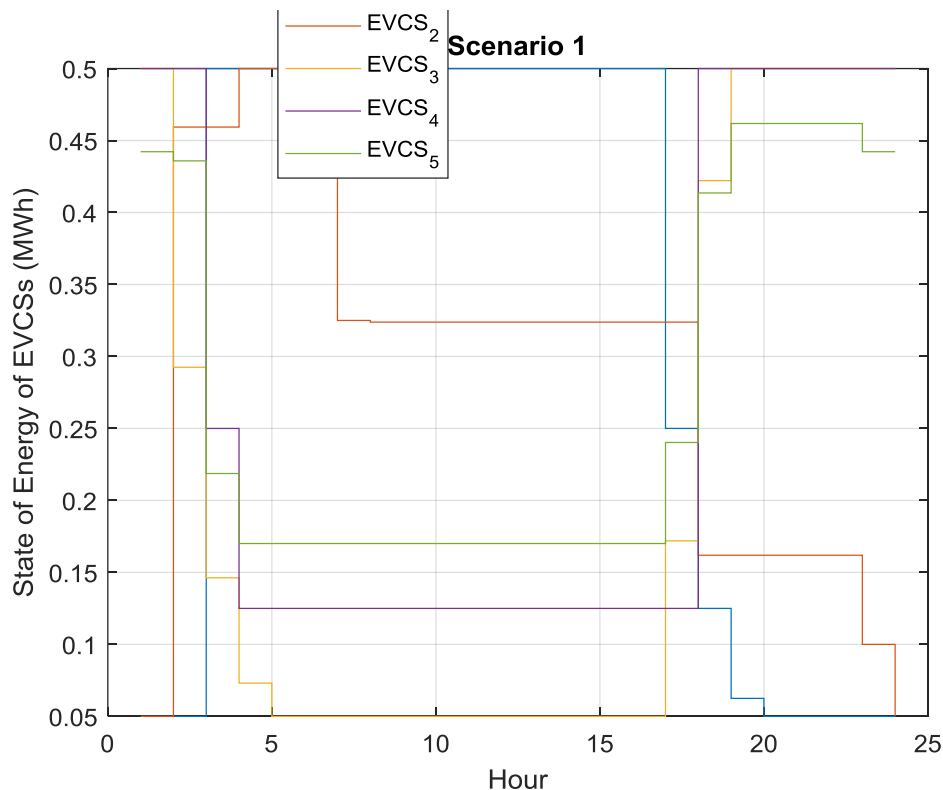
بهبوده‌های مشاهده‌شده در شاخص‌های عملکرد را می‌توان به اثربخشی الگوریتم پیشنهادی در بهینه‌سازی ادغام خودروی الکتریکی (EV) در سیستم نسبت داد. با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی پیشرفته، مانند الگوریتم بهینه‌سازی (PSO)، این الگوریتم به طور مؤثری تقاضاهای شارژ EV را

تأثیرات احتمالی بر شبکه است. بنابراین، مطالعات بیشتر و شبیه‌سازی‌های دقیق‌تر می‌تواند به ارائه تصمیمات بهینه‌تر در زمینه انتقال و مدیریت انرژی در شبکه‌های توزیع کمک کند. در سناریو ۱، هدف مالی کمتر از سناریو ۲ است و این نشان می‌دهد که در این حالت، تأثیر وسایل نقلیه الکتریکی که در شبکه توزیع حضور دارند، کمتر از تأثیر وسایل نقلیه غیر الکتریکی است. مصرف انرژی در این سناریو نیز کمتر است که ممکن است به دلیل کاهش تعداد وسایل نقلیه غیر الکتریکی و بهینه‌سازی مصرف انرژی باشد. همچنین، تلفات انرژی و مقدار کاهش بار در شبکه نیز کمتر از سناریو ۲ است، که نشان می‌دهد که حضور وسایل نقلیه الکتریکی می‌تواند به بهبود کارایی و بهینه‌سازی شبکه توزیع کمک کند. اما در سناریو ۲، هدف مالی بیشتر است و این ممکن است به دلیل وجود تعداد بیشتری از وسایل نقلیه غیر الکتریکی باشد که نیاز به انرژی بیشتر و در نتیجه هزینه بیشتری دارند. مصرف انرژی، تلفات انرژی، و مقدار کاهش بار نیز در این سناریو بیشتر است، که ممکن است به دلیل بار زیاد وسایل نقلیه غیر الکتریکی باشد که نیازمند انرژی بیشتری هستند. همچنین، انحراف ولتاژ در سناریو ۲ بیشتر از سناریو ۱ است که ممکن است نشان‌دهنده عدم استحکام و عملکرد ضعیف‌تر شبکه در مواجهه با بارهای زیاد باشد. در مجموع، مقادیر مختلف در سناریو ۲ نسبت به سناریو ۱ بیشتر است که نشان می‌دهد وجود وسایل نقلیه غیر الکتریکی در شبکه توزیع می‌تواند به چالش‌های بیشتری برای مدیریت انرژی و بهره‌وری شبکه منجر شود. در سناریو ۱، هدف مالی 58421 دلار بوده و در سناریو ۲ این مقدار به 72589 دلار افزایش یافته است که نشان‌دهنده افزایش حدود 24.29 درصدی هدف مالی است. این افزایش ممکن است ناشی از مواردی مانند افزایش تقاضا برای انرژی یا افزایش قیمت انرژی باشد. از طرفی، میزان خرید انرژی از 0.167 MWh در سناریو ۱ به 0.687 MWh در سناریو ۲ افزایش یافته است که افزایش آن حدود 311.98

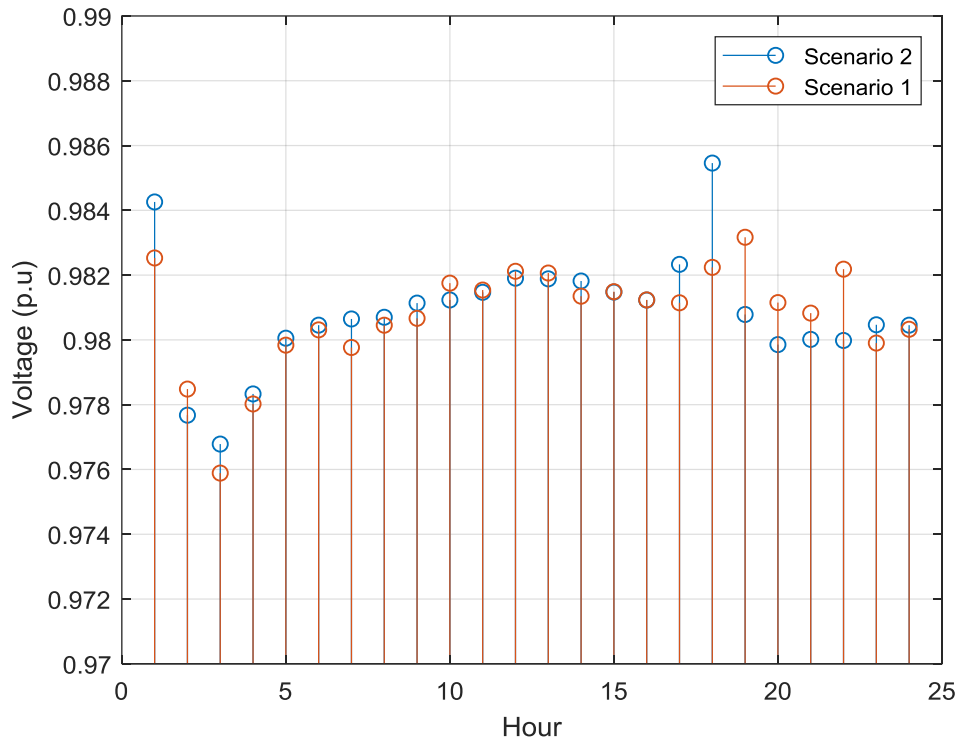
منابع انرژی پاک را به حداکثر می‌رساند. به طور کلی، نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده کارایی الگوریتم پیشنهادی در بهینه‌سازی یکپارچه‌سازی EV و بهبود عملکرد سیستم در معیارهای مختلف است.

شکل (۲) وضعیت انرژی ایستگاه‌های شارژ وسایل نقلیه الکتریکی (EVCS) را در شبکه توزیع ۳۳ گره نشان می‌دهد. این شکل دینامیک انرژی و الگوهای استفاده از EVCS را در گره‌های مختلف در شبکه توزیع ارائه می‌دهد. با تجزیه و تحلیل این رقم، دینفعان می‌توانند درک جامعی از نحوه توزیع و مصرف انرژی در شبکه به ویژه در رابطه با فعالیت‌های شارژ EV به دست آورند.

با محدودیت‌های شبکه متعادل می‌کند و در نتیجه کارایی و قابلیت اطمینان سیستم را افزایش می‌دهد. به طور خاص، این الگوریتم برنامه‌های شارژ EV را برای به حداقل رساندن خرید و تلفات انرژی بهینه می‌کند و در نتیجه هزینه‌های عملیاتی کلی سیستم را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، این الگوریتم با تخصیص استراتژیک منابع و اولویت‌بندی شارژ EV در ساعات غیر اوج بار، کاهش بار را به طور مؤثر مدیریت می‌کند و نیاز به کاهش بار در دوره‌های اوج تقاضا را به حداقل می‌رساند. علاوه بر این، الگوریتم با تنظیم نرخ شارژ EV بر اساس شرایط شبکه بلادرنگ، کاهش انحرافات ولتاژ و بهبود عملکرد شبکه، پایداری ولتاژ را تضمین می‌کند. فقدان محدودیت PV یا WD بر توانایی الگوریتم برای ادغام یکپارچه شارژ EV با تولید انرژی تجدیدپذیر تاکید می‌کند و حداکثر استفاده از



شکل (۲) وضعیت انرژی EVCS در شبکه توزیع ۳۳ گره



شکل (۳) مقایسه تاثیر خودروهای الکتریکی بر ولتاژ شبکه توزیع ۳۳ گره

سنتی را کاهش می دهد و به ایجاد یک شبکه توزیع متعادل تر و انعطاف پذیرتر کمک می کند. علاوه بر این، اجرای الگوریتم پیشنهادی، کارایی و قابلیت اطمینان شبکه را بیشتر می کند. با بهینه سازی برنامه های شارژ EV و متعادل کردن محدودیت های شبکه، این الگوریتم به طور موثر تقاضای انرژی را مدیریت می کند، تلفات را به حداقل می رساند و ثبات ولتاژ را تضمین می کند. این بهینه سازی نه تنها عملکرد ایستگاه های EV را بهبود می بخشد، بلکه عملکرد کلی شبکه را نیز افزایش می دهد. با ادغام تکنیک های بهینه سازی پیشرفته، الگوریتم پیشنهادی ادغام یکپارچه خودروهای برقی را در شبکه توزیع تسهیل می کند و یک اکوسیستم انرژی پایدارتر و کارآمدتر را تقویت می کند.

۵- نتیجه گیری

شکل ۳ تجزیه و تحلیل مقایسه ای از تاثیر وسایل نقلیه الکتریکی (EVs) بر سطوح ولتاژ در شبکه توزیع ۳۳ گره را نشان می دهد. این تجسم بینش هایی را در مورد اینکه چگونه ادغام EV ها بر ثبات و تنظیم ولتاژ در ساعات مختلف در شبکه تأثیر می گذارد ارائه می دهد. با مقایسه سطوح ولتاژ با و بدون EV، ذینفعان می توانند میزان انحرافات ولتاژ مربوط به فعالیت های شارژ EV را ارزیابی کنند. ادغام ایستگاه های وسایل نقلیه الکتریکی (EV) تغییرات قابل توجهی در شبکه توزیع ایجاد کرده است. ایستگاه های EV نه تنها به عنوان نقاطی برای شارژ وسیله نقلیه، بلکه به عنوان مشارکت کنندگان پویا در اکوسیستم انرژی شبکه عمل می کنند. با ترکیب ایستگاه های EV، شبکه توزیع مجدد تقاضای فعال را تجربه می کند و بخشی از بار در حال حاضر توسط این ایستگاه ها تامین می شود. این تغییر فشار کلی بر منابع انرژی

این مطالعه تأثیر چشمگیر وسایل نقلیه الکتریکی (EVs) بر بخش انرژی و کارایی رویکرد بهینه‌سازی پیشنهادی را در مواجهه با چالش‌ها و فرصت‌های مرتبط با گسترش آن‌ها نشان می‌دهد. با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSO و معرفی مدلی پیچیده که برای مدیریت عملیات شبکه طراحی شده است، ما به‌طور موفقیت‌آمیزی پیچیدگی‌های تعادل تقاضاهای شارژ EV با محدودیت‌های شبکه را بررسی کرده‌ایم. شبیه‌سازی‌های گسترده نشان می‌دهند که این رویکرد به‌طور مؤثری هزینه‌های شارژ را کاهش داده، تراکم شبکه را کم کرده و عملکرد کلی سیستم را بهبود می‌بخشد؛ این به‌ویژه از طریق کاهش قابل توجه در هزینه‌های عملیاتی شبکه توزیع مشهود است. تابع چند هدفه مورد استفاده در مدل بهینه‌سازی، نه تنها تلفات انرژی، هزینه خرید برق، کاهش بار، تولید پراکنده و هزینه‌های باتری/ EV را در یک دوره ۲۴ ساعته به حداقل می‌رساند، بلکه قابلیت اطمینان و کارایی شبکه را نیز تضمین می‌کند. ادغام خودروهای الکتریکی در سیستم منجر به بهبودهای قابل توجهی در شاخص‌های عملکرد مختلف شده است، از جمله کاهش ۱۴ درصدی در مقدار تابع هدف، کاهش ۶۰ درصدی در هزینه خرید انرژی، کاهش ۴۰ درصدی در تلفات انرژی، کاهش ۶۰ درصدی در افت بار و کاهش ۲۰ درصدی در انحراف ولتاژ. علاوه بر این، سازگاری ادغام EV با پروفایل‌های تولید انرژی تجدیدپذیر، پتانسیل آن را برای افزایش پایداری سیستم برجسته می‌کند. برای ادامه مسیر این تحقیق، دو پیشنهاد ارائه می‌شود:

۱. استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای بهینه‌سازی مدیریت شارژ خودروهای الکتریکی: پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده، الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای بهینه‌سازی فرآیند شارژ خودروهای الکتریکی مورد بررسی قرار گیرند. این الگوریتم‌ها می‌توانند با تحلیل داده‌های گذشته و

شرایط فعلی، الگوهای بهینه شارژ را شناسایی کرده و به کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی شبکه کمک کنند. به‌ویژه، استفاده از مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر یادگیری ماشین می‌تواند در مدیریت بهتر تقاضا و توزیع بار مؤثر باشد.

۲. مدل‌سازی و تحلیل سناریوهای بلندمدت: پیشنهاد می‌شود که مدل‌سازی‌های پیچیده‌تری با در نظر گرفتن سناریوهای بلندمدت انجام شود تا بتوان تأثیرات بلندمدت ادغام خودروهای الکتریکی و منابع انرژی تجدیدپذیر را بر پایداری شبکه و هزینه‌های کل سیستم بررسی کرد. این سناریوها می‌توانند شامل تغییرات در تولید انرژی تجدیدپذیر، رشد تقاضای وسایل نقلیه الکتریکی و پیشرفت‌های تکنولوژیکی در سیستم‌های شارژ و ذخیره‌سازی انرژی باشند.

مراجع

- [1] V. Gali, P. K. Jamwal, N. Gupta, A. Kumar, "An adaptive dynamic power management approach for enhancing operation of microgrid with grid ancillary services," *Renewable Energy*, Volume 219, Part 1, 119413, 2023.
- [2] F. N. Budiman, M. A.M. Ramli, H. R.E.H. Boucekara, A. H. Milyani, "Optimal scheduling of a microgrid with power quality constraints based on demand side management under grid-connected and islanding operations," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 155, Part B, 109650, 2024.
- [3] V. Shahbazbegian, M. Shafie-khah, H. Laaksonen, G. Strbac, H. Ameli, "Resilience-oriented operation of microgrids in the presence of power-to-hydrogen systems," *Applied Energy*, Volume 348, 121429, 2023.
- [4] X. Chen, J. Zhai, Y. Jiang, C. Ni, S. Wang, P. Nimmegheers, "Decentralized coordination between active distribution network and multi-microgrids through a fast decentralized adjustable robust operation framework," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, Volume 34, 101068, 2023.
- [5] Özge Erol, Ümmühan Başaran Filik, "A Stackelberg game-based dynamic pricing and robust optimization strategy for microgrid operations," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 155, Part B, 109574, 2024.
- [6] B. Cortés-Caicedo, L. F. Grisales-Noreña, O. D. Montoya, R. I. Bolaños, "Optimization of BESS placement, technology

- Stochastic Approach,” IEEE Access, vol. 11, pp. 58470-58490, 2023.
- [20] Sidong Xian, Xu Feng, "Meerkat optimization algorithm: A new meta-heuristic optimization algorithm for solving constrained engineering problems," Expert Systems with Applications, Volume 231, 120482, 2023.
- [21] Alireza Kashki, Azita Azarfar, Mahmoud Samiei Moghaddam, Reza Davarzani, Optimal charging of electric vehicles in smart stations and its effects on the distribution network using meerkat optimization algorithm, Energy Reports, Volume 12, Pages 1936-1946, 2024.
- [22] Habibidoost M, Bathaee S M T. Electric vehicle charging schedule considering their role for self-healing process in smart grid. *ieijqp* 2017; 6 (1) :64-70.
- [23] Daisy M, Hosseini Aliabadi M, javadi S, meyar naimi H. Double phase fault location in microgrids with the presence of electric vehicles and Distributed parameters line model. *ieijqp* 2023; 12 (1) :11-21.
- selection, and operation in microgrids for minimizing energy losses and CO2 emissions: A hybrid approach,” Journal of Energy Storage, Volume 73, Part B, 108975, 2023.
- [7] Z. Li, B. Zhao, Z. Chen, C. Ni, J. Yan, X. Yan, X. Bian, N. Liu, “Low-carbon operation method of microgrid considering carbon emission quota trading,” Energy Reports, Volume 9, Supplement 2, Pages 379-387, 2023.
- [8] M. H. Parvaneh, M. H. Moradi, S. M. Azimi, “The advantages of capacitor bank placement and demand response program execution on the optimal operation of isolated microgrids,” Electric Power Systems Research, Volume 220, 109345, 2023.
- [9] Y. Li, X. Zhang, Y. Wang, X. Qiao, S. Jiao, Y. Cao, Y. Xu, M. Shahidehpour, Z. Shan, “Carbon-oriented optimal operation strategy based on Stackelberg game for multiple integrated energy microgrids,” Electric Power Systems Research, Volume 224, 109778, 2023.
- [10] Z. Guo, W. Wei, J. Bai, S. Mei, “Long-term operation of isolated microgrids with renewables and hybrid seasonal-battery storage,” Applied Energy, 121628, Volume 349, 2023.
- [11] J. Xu, Y. Yi, “Multi-microgrid low-carbon economy operation strategy considering both source and load uncertainty: A Nash bargaining approach,” Energy, Volume 263, Part B, 125712, 2023.
- [12] Z. Shi, T. Zhang, Y. Liu, Y. Feng, R. Wang, S. Huang, “Optimal design and operation of islanded multi-microgrid system with distributionally robust optimization,” Electric Power Systems Research, Volume 221, 109437, 2023.
- [13] D. Krupenev, N. Komendantova, D. Boyarkin, D. Iakubovskii, “Digital platform of reliability management systems for operation of microgrids,” Energy Reports, Volume 10, Pages 2486-2495, 2023.
- [14] Z. Liang, Z. Dong, C. Li, C. Wu and H. Chen, “A Data-Driven Convex Model for Hybrid Microgrid Operation With Bidirectional Converters,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 14, no. 2, pp. 1313-1316, March 2023.
- [15] O. M. Adeyanju, P. Siano and L. N. Canha, “Dedicated Microgrid Planning and Operation Approach for Distribution Network Support With Pumped-Hydro Storage,” IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 19, no. 7, pp. 8229-8241, July 2023.
- [16] L. Tang, E. Shang, X. Chen, L. Li and S. Zou, “Optimization Effect Analysis of ACM-PSO Integrating Individual Adjustment and Cross Operation on Microgrid DG Technology,” IEEE Access, vol. 11, pp. 59954-59967, 2023.
- [17] Y. Wang et al., “Optimal Operation Strategy for Multi-Energy Microgrid Participating in Auxiliary Service,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 14, no. 5, pp. 3523-3534, Sept. 2023.
- [18] D. A. Quijano, M. Vahid-Ghavidel, M. S. Javadi, A. Padilha-Feltrin and J. P. S. Catalão, “A Price-Based Strategy to Coordinate Electric Springs for Demand Side Management in Microgrids,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 14, no. 1, pp. 400-412, Jan. 2023.
- [19] G. Abdunnasser, A. Ali, M. F. Shaaban and E. E. M. Mohamed, “Optimizing the Operation and Coordination of Multi-Carrier Energy Systems in Smart Microgrids Using a