



Evaluating the Impact of V2G Technology and Renewable Resources on Reducing Operational Costs of Distribution Networks Using a Mixed-Integer Second-Order Cone Programming Approach

Mehdi Shafiee¹ 

¹ Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 2025.05.01

Revised: 2025.06.22

Accepted: 2026.14.02

Keyword:

Electric Vehicles
Distribution Network
Distributed Production
Resources
Renewable Resources

*Corresponding Author:

Mehdi Shafiee

Email: m-shafiee@tvu.ac.ir

ABSTRACT

Optimal energy and load management in distribution networks is a key issue in power systems aimed at reducing investment and operational costs. With technological advancements, new resources such as electric vehicles (EVs) with bidirectional charging and discharging capabilities (V2G) have emerged as effective tools for reducing dependency on fossil-fuel-based generation and for managing load. In this paper, a convex optimization model is proposed to determine the optimal location and capacity of distributed generation (DG) units while accurately modeling the behavior of electric vehicles. The proposed model is formulated as a Mixed-Integer Second-Order Cone Programming (MISOCP) problem, enabling precise solutions with guaranteed global optimality. The nonlinear behavior of EVs is modeled using the Big-M linearization method. The objective function includes the total costs of investment, operation, energy procurement from the upstream grid, and energy losses. Operational constraints such as voltage limits, line flow capacities, and technical restrictions of resources are also considered. The model is simulated on the standard IEEE 33-bus distribution network, and the results of various scenarios show that the integration of V2G technology leads to significant reductions in total cost and energy losses. Moreover, sensitivity analysis with respect to key parameters confirms the structural robustness of the model. The proposed approach can serve as an effective tool for intelligent distribution network planning.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The integration of distributed generation (DG) and renewable energy sources (RES) into distribution networks has become a key focus for reducing costs and losses. Researchers have proposed various methods to address these challenges, including multi-objective optimization strategies, resilience planning, and active distribution network (ADN) frameworks. The paper reviews these methods and highlights the importance of modeling the behavior of EVs and RES to optimize their placement and capacity in distribution networks. The proposed model aims to provide a comprehensive solution for minimizing operational costs while integrating EVs and RES into the grid.

Modelling

The proposed model is designed to minimize the total cost, which includes investment costs, energy purchase costs, energy loss costs, and operational costs of distributed generation resources. The model incorporates several constraints:

- **Budget Constraints:** The total investment in distributed generation resources must not exceed a predefined budget.
- **Power Balance Constraints:** The model ensures that the power generated by distributed generation resources, renewable energy sources, and EVs matches the power demand in the network.
- **Voltage Constraints:** The voltage levels at each bus must remain within acceptable limits to ensure network stability.
- **Operational Constraints:** The model includes constraints on the maximum power flow in lines, the operational limits of distributed generation resources, and the charging/discharging behavior of EVs.

The nonlinear equations related to EV charging and discharging are linearized using the Big-M method, which allows the problem to be solved using the Gurobi solver. This linearization ensures that the model can be efficiently solved while maintaining accuracy.

Case study

The proposed model is tested on the IEEE 33-bus distribution network to evaluate its performance. Four scenarios are considered:

- Scenario 1: A budget of \$300,000 with EVs and RES connected to the network.
- Scenario 2: A budget of \$400,000 with EVs and RES connected to the network.
- Scenario 3: A budget of \$300,000 without RES (only EVs connected).
- Scenario 4: A budget of \$300,000 without EVs (only RES connected).

Case study

Scenario 1: With a budget of \$300,000, the model achieves a total energy purchase of 96 MVAh and energy losses of 361 kVAh. The optimal locations for DG installation are buses 17, 18, 32, and 33, with capacities of 25, 57, 88, and 45 kVA, respectively.

Scenario 2: Increasing the budget to \$400,000 reduces energy purchases to 93 MVAh and energy losses to 325 kVAh. The optimal DG locations are buses 17, 18, 31, 32, and 33, with capacities of 44, 50, 22, 125, and 39 kVA, respectively.

Scenario 3: Without RES, energy purchases increase to 100 MVAh, and energy losses rise to 377 kVAh. The optimal DG locations are buses 17, 18, 32, and 33, with capacities of 20, 54, 90, and 45 kVA, respectively.

Scenario 4: Without EVs, energy purchases increase slightly to 98.1 MVAh, and energy losses rise to 373 kVAh. The optimal DG locations are buses 17, 18, 32, and 33, with capacities of 24, 53, 87, and 44 kVA, respectively.

The results demonstrate that increasing the budget reduces energy losses and purchase costs. The absence of RES or EVs leads to higher energy losses and increased purchase costs. The optimal locations for DG installation are consistent across scenarios, with slight variations in capacity.

Discussion

The study highlights several key findings:

- **Impact of Budget:** Increasing the budget for distributed generation investment directly reduces energy losses and the need to purchase energy from the upstream grid.
- **Role of Renewable Energy Sources:** The absence of RES leads to higher energy losses and increased costs, emphasizing the importance of integrating renewable energy into the distribution network.
- **Role of Electric Vehicles:** The optimal charging and discharging of EVs significantly reduce energy losses and purchase costs. Removing EVs from the network increases these costs, highlighting the importance of V2G technology.
- **Optimal DG Placement:** The optimal locations for DG installation remain consistent across scenarios, with minor variations in capacity, indicating the robustness of the proposed model.

Conclusion

This paper presents a mixed-integer second-order cone programming (MISOCP) model for optimal investment in distributed generation resources, aiming to reduce energy losses, electricity purchase costs, and operational costs. The model incorporates the optimal charging and discharging of EVs and renewable energy sources, with nonlinear EV equations linearized using the Big-M method. The model is validated using the IEEE 33-bus network, and the results demonstrate that increasing the budget reduces energy losses and purchase costs, while the absence of RES or EVs increases these costs. The proposed model provides a robust framework for optimizing the integration of distributed generation and EVs in distribution networks, offering valuable insights for system operators and planners.



ارزیابی تأثیر فناوری V2G و منابع تجدیدپذیر در کاهش هزینه‌های بهره‌برداری شبکه‌های توزیع با رویکرد برنامه‌ریزی مخروطی مرتبه دوم

مهدی شفیعی^۱

۱- گروه مهندسی برق، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۱۱

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۱۱/۲۵

کلید واژگان:

خودروهای برقی
شبکه توزیع
منابع تولید پراکنده
منابع تجدیدپذیر

*نویسنده مسئول: مهدی شفیعی

پست الکترونیکی:

m-shafiee@tvu.ac.ir

مدیریت بهینه انرژی و بار در شبکه‌های توزیع به‌منظور کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری، از موضوعات مهم در سیستم‌های قدرت محسوب می‌شود. با توسعه فناوری، منابع نوینی همچون خودروهای برقی با قابلیت شارژ و دشارژ دوطرفه (V2G) به‌عنوان ابزار مؤثر در کاهش وابستگی به تولید فسیلی و مدیریت بار مطرح شده‌اند. در این مقاله، یک مدل بهینه‌سازی محدب برای تعیین مکان و ظرفیت منابع تولید پراکنده (DG) با در نظر گرفتن رفتار دقیق خودروهای برقی پیشنهاد شده است. مدل ارائه‌شده به‌صورت برنامه‌ریزی مخروطی مرتبه دوم عدد صحیح مختلط (MISOCP) فرمول‌بندی شده و امکان حل دقیق و تضمین بهینگی سراسری را فراهم می‌کند. رفتار غیرخطی خودروهای برقی با استفاده از روش خطی‌سازی Big-M مدل‌سازی شده است. تابع هدف شامل مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری، خرید انرژی از شبکه بالادست و تلفات انرژی است و قیود عملیاتی همچون ولتاژ، توان خطوط و محدودیت‌های فنی منابع در نظر گرفته شده‌اند. مدل روی شبکه استاندارد ۳۳ باسه IEEE شبیه‌سازی شده و نتایج سناریوهای مختلف نشان می‌دهند که استفاده از فناوری V2G موجب کاهش قابل توجه در هزینه کل و تلفات انرژی شده است. همچنین تحلیل حساسیت مدل نسبت به پارامترهای کلیدی، پایداری ساختار مدل را تأیید می‌کند. مدل پیشنهادی می‌تواند ابزاری مؤثر برای برنامه‌ریزی هوشمند شبکه‌های توزیع باشد.



مقدمه

مسئله سرمایه گذاری منابع تولید پراکنده در کنار تعیین ظرفیت و مکان بهینه آنها یکی از مسائل مهمی است که به منظور اهداف مختلفی مثل کاهش هزینه [۱]، کاهش تلفات [۲] و ... توسط محققان با روش‌ها مختلف پیشنهاد شده است. در ادامه به بررسی برخی از این روش‌ها می‌پردازیم.

در مرجع [۳]، با فرض اینکه اپراتور سیستم توزیع (DSO) مالکیت و بهره برداری از واحدهای DG و منابع توان راکتیو (RPS) را در اختیار دارد، یک استراتژی برنامه ریزی جدید برای تعیین محل و تعداد بهینه واحدهای DG و RPSها پیشنهاد شده است. این استراتژی بر چالش تناوب تولید تجدیدپذیر غلبه می‌کند تا این برنامه ریزی به اپراتورهای سیستم در تعریف استراتژی‌های یکپارچه سازی بهتر سیستم‌های انرژی شرکتی و متناوب و منابع توان راکتیو در شبکه‌های توزیع کمک کند. برنامه ریزی پیشنهادی مبتنی بر بهینه سازی چند هدفه شامل کاهش تلفات انرژی سیستم، حاشیه پایداری ولتاژ می‌باشد.

در [۴] یک روش جدید برای ارزیابی یک طرح مقاوم سازی برای تنظیم مجدد حفاظت ضد جزیره ای منابع انرژی توزیع شده (DER) با تمرکز بر پایداری سیستم‌های قدرت ارائه شده است. هدف رویکرد پیشنهادی کاهش قطع شدن آبشاری DERها در طول اغتشاشات عمده در شبکه‌های انتقال است. روش پیشنهادی مبتنی بر ارزیابی مناطق امنیتی پویا با ادغام یک مدل‌سازی ساده شده برای نشان دادن قطع ارتباط آبشاری DER است. در این مطالعه در ابتدا، تأثیر قطع اتصال DERها بر سیستم‌های برق بهم پیوسته برزیل نشان داده شده و اهمیت مدل‌سازی چنین تأثیری در مطالعات پایداری نشان داده شده است. سپس، روش پیشنهادی برای سیستم‌های برق بهم پیوسته برزیل اعمال شده و مزایای آن را با مشخص کردن حداقل مقدار DERهایی که باید به یک طرح مقاوم سازی ارائه شود تا سطح مناسبی از امنیت تضمین شود، نشان داده شده است.

مرجع [۵] علاوه بر مدیریت فعال انرژی، برنامه ریزی فعال را به عنوان یکی دیگر از ویژگی‌های حیاتی شبکه‌های توزیع فعال (ADN) پیشنهاد می‌کند. از این رو برای توسعه این مجموعه از وظایف، یک چارچوب برنامه ریزی فعال سه لایه متشکل از یک لایه فیزیکی، لایه سایبری و لایه اجتماعی-اقتصادی را معرفی می‌کند. علاوه بر این، یک استراتژی توسعه سه مرحله ای برای ADNها بر اساس یک ریز شبکه مجازی (VM) ارائه شده است. در مرحله اول، مرزهای VM بر اساس ویژگی‌های یک ساختار شبکه تعیین می‌شود. با استفاده از مرزهای VM شناسایی شده به عنوان محدودیت، یک روش بهینه سازی سه مرحله‌ای دو سطحی برای تعیین تخصیص بهینه DG در مرحله دوم اعمال می‌شود. روش پیشنهادی در شبکه توزیع ۶۹ باسه تأیید شده است.

با توسعه و بکارگیری منابع تولید پراکنده در مقیاس بزرگ در کنار وسایل نقلیه الکتریکی و تصادفی بودن آنها چالش‌های عظیمی در بهره برداری و برنامه ریزی شبکه‌های توزیع روی داده است. مرجع [۶] یک استراتژی را از دیدگاه DSO ارائه می‌کند که هدف آن تعیین همزمان حداکثر سطوح نفوذ تولید پراکنده مبتنی بر تجدیدپذیر در کنار وسایل نقلیه الکتریکی (EVs) است. برای تعیین چنین ظرفیتی، می‌توان با کاهش تولید، ویژگی قابل کنترل EVها را مدیریت کرد تا از عملکرد ایمن سیستم توزیع برق اطمینان حاصل شود و از شرایط عملیاتی غیرممکن جلوگیری شود. در این مقاله الگوهای رانندگی صاحبان EV و نیازهای انرژی EVs، با استفاده از توابع چگالی احتمال در نظر گرفته شده است. جهت حل مسئله از الگوریتم مبتنی بر جستجوی تصادفی تطبیقی حریصانه فراابتکاری و جستجوی تابو (GRASP-TS) استفاده شده است. کاربرد استراتژی برنامه‌ریزی پیشنهادی بر روی یک شبکه ۳۳ باسه تحت شرایط مختلف ارزیابی شده است. نتایج عددی نشان می‌دهد که نفوذ بیشتر EVs و DGهای مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر را می‌توان بدون تأثیر بر عملکرد ایمن سیستم توزیع برق تطبیق داد. همچنین با کنترل مصرف برق توسط جمع‌کننده‌های EV، افزایش ۹ درصدی در ظرفیت نصب شده DGها در مقایسه با حالت شارژ کنترل نشده EVs به دست آورد.

مرجع [۷] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای مسئله برنامه‌ریزی توسعه سیستم توزیع (DSEP) را در نظر گرفتن واحدهای DG، سیستم‌های ذخیره انرژی (ESSs) و ایستگاه‌های شارژ EV پیشنهاد می‌کند، در این مقاله اثرات زیست‌محیطی و عدم قطعیت‌های مرتبط با تقاضا و تولید منابع انرژی تجدیدپذیر در نظر گرفته شده است. رویکرد مدل پیشنهاد شده بهینه‌سازی همزمان سرمایه‌گذاری در کنار کاهش انتشار CO2 می‌باشد. روش بهینه‌سازی در زبان مدل‌سازی AMPL توسعه یافته و از روش CPLEX حل شده است. نتایج اثربخشی روش پیشنهادی را به عنوان ابزاری ارزشمند که می‌تواند به برنامه‌ریزان سیستم توزیع برق در یکپارچه‌سازی منابع انرژی توزیع‌شده کمک کند را نشان می‌دهد.

نویسندگان در مرجع [۸] یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای برای سیستم‌های انتقال و DERها با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری سیستم قدرت پیشنهاد می‌دهند. در این مدل شرایط عادی و اضطراری و همچنین مدت زمان هر شرایط در نظر گرفته شده است. مدل پیشنهادی به عنوان یک برنامه خطی مختلط عدد صحیح برای به حداقل رساندن کل هزینه سرمایه‌گذاری خطوط انتقال و DERها، هزینه عملیاتی ژنراتورها در شرایط عادی و اضطراری و هزینه کاهش بار در شرایط اضطراری فرموله شده است. برای حل مسئله بهینه‌سازی از تکنیک تجزیه بندرز استفاده شده است. نتایج عددی بر اساس سیستم تست ۱۱۸ باسه نشان داده شده است.

در [۹]، دو روش فراابتکاری، الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات، برای تعیین مکان، اندازه و ضریب توان واحدهای تولید پراکنده پیشنهاد شده است. در راستای برآورده شدن هدف کربن صفر، ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر توزیع شده مانند پانل‌های فتوولتائیک و توربین‌های بادی در سیستم توزیع با سطح نفوذ بالا در نظر گرفته شده است. برنامه‌ای با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های فصلی تولید و مصرف برای به حداقل رساندن تلفات انرژی سالانه و انحرافات ولتاژ شبکه توزیع انجام شده و علاوه بر این، منابع متعارف قابل توزیع، قابل کنترل و مبتنی بر سوخت برای مقایسه سهم منابع تجدیدپذیر در نظر گرفته شده است. این مطالعات برای شبکه توزیع شعاعی ۳۳ باسه اعمال شده و نتایج نشان می‌دهند که کاربرد فتوولتائیک بدون فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی به دلیل توزیع نابرابر روزانه تابش خورشید، به ویژه تابش ناکافی در عصر و تابش بیش از حد در ظهر، کارآمد نمی‌باشند. با این حال، کاربردهای انرژی بادی قابل اعتمادتر و امکان‌پذیرتر می‌باشند.

انعطاف‌پذیری شبکه‌های برق در برابر حوادث نادر اما به شدت مخرب، مانند بلایای طبیعی، در سال‌های اخیر به عنوان یک جنبه مهم در برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت ظاهر شده است. توسعه تکنیک‌های تاب‌آوری به دلیل محدودیت‌های روش‌های قابلیت اطمینان در رسیدگی به خاموشی‌های غیرمنتظره بزرگ مورد نیاز است. در مرجع [۱۰]، یک مدل برنامه‌ریزی هماهنگ دوسطحی جدید که مسئله برنامه‌ریزی کوتاه مدت را با مسئله برنامه‌ریزی بلندمدت ترکیب می‌کند، پیشنهاد شده است. در سطح بالا، منبع پاسخگویی تقاضا (DR)، با یک منبع برنامه‌ریزی مؤثر که با قیمت انرژی بالا و مدت قرارداد کوتاه مشخص می‌شود، با پیکربندی خطوط و ESSs بهینه‌سازی شده است. برای دستیابی به مبادله اقتصادی بین هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه عملیات تحت سناریو به شدت محدود شده (SRS) در سطح پایین، با طرح برنامه‌ریزی به دست آمده از سطح بالا، مسئله به حداقل رساندن هزینه عملیات روزانه بهینه می‌شوند و SRSها از طریق یک روش غربالگری سناریو مبتنی بر قیمت سایه، که فرایند بازخورد اطلاعات برنامه‌ریزی را از اپراتورهای ADN به برنامه‌ریزان ADN شبیه‌سازی می‌کند، به سطح بالایی ارائه شده است. مطالعات موردی بر روی یک سیستم توزیع ۶۲ باسه در منطقه جدید چین، اثربخشی مدل برنامه‌ریزی هماهنگ دو سطحی پیشنهادی را با در نظر گرفتن منابع DR و SRSها نشان می‌دهد.

در [۱۱]، از الگوریتم تکاملی مبتنی بر تجزیه بهبود یافته (I-DBEA) برای انتخاب تعداد، ظرفیت و مکان بهینه DG به منظور به حداقل رساندن تلفات توان و انحراف ولتاژ و به حداکثر رساندن شاخص پایداری ولتاژ استفاده شده است. روش پیشنهادی I-DBEA توانایی ترکیب مسائل متغیر غیر خطی، غیر محدب و اعداد صحیح مختلط را دارد و

مستقل از تله‌گذاری‌های افراطی محلی عمل می‌کند. به منظور اعتبار سنجی اثربخشی روش پیشنهادی، شبکه‌های توزیع شعاعی استاندارد ۳۳، ۶۹ و ۱۱۹ با سه در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی توانایی بهینه سازی چندهدفه توابع مختلف هدف متضاد با مقادیر بهینه جهانی به همراه کوچکترین اندازه DGها را دارد.

کنترل توان اکتیو و راکتیو در سیستم‌های توزیع تاثیر زیادی بر عملکرد آنها دارد. قرار دادن DGها و خازن‌های شنت (SCs) محبوب‌ترین مکانیسم‌ها جهت بهبود عملکرد سیستم توزیع هستند. در این راستا، در [۱۲] تحلیل اقتصادی سیستم ترکیبی شامل پیل سوختی و توربین بادی برای تأمین تقاضای بار الکتریکی منطقه‌ای از کشور ایران با فراوانی بادهای موسمی مورد بررسی قرار گرفته و اتلاف انرژی و امکان کاستن از آن نیز مورد توجه قرار گرفته است. در این مطالعه، با توجه به اطلاعات باد منطقه مورد نظر مدلی طراحی شده است که بتواند مازاد یا کمبود توان و میزان انرژی تولیدی در هر بازه از سال را برآورد کند. نتایج نشان می‌دهند که در منطقه مورد بررسی (ابرقوه)، با توجه به مدل توسعه داده شده ۵۶ درصد از تقاضای بار توسط توربین بادی و ۴۴ درصد توسط پیل سوختی تأمین می‌گردد. نویسندگان در مرجع [۱۳] به اندازه یابی و جایابی بهینه منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع شعاعی ۳۳ با سه و ۶۹ با سه مبتنی بر الگوریتم سنیوس-کسینوس پرداخته اند. در این مقاله هدف مینیم کردن توان اکتیو و بهبود پروفیل ولتاژ در کنار بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان بوده است. نتایج نشان دهنده کاهش ۶۵ درصدی و ۶۹ درصدی تلفات اکتیو در سیستم‌های مذکور بوده است. مرجع [۱۴] به اندازه یابی و جایابی بهینه سیستم هیبرید فتوولتائیک-بادی، در ۵ شهر مربوط به کشور استرالیا پرداخته است. در این مطالعه جهت مقایسه نتایج، ۱۰ نوع مختلف ساختمان (کلینیک، سوپرمارکت، آپارتمان، هتل و ...) در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد انجام مطالعات صورت گرفته می‌تواند به عنوان یک نقشه راه جهت تأمین توان مورد نیاز کشور استرالیا مورد استفاده قرار گیرد. در مرجع [۱۵] به اندازه یابی و جایابی بهینه منابع تولید پراکنده برای ۲ شبکه تست ۶۹ با سه و ۱۱۸ با سه IEEE با در نظر گرفتن اهدافی همچون کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ و بهبود پایداری با معرفی یک شاخص جدید پایداری مبتنی بر امیدانس تونن شبکه پرداخته است. در این مقاله از الگوریتم ژنتیک جهت حل مسئله بهینه سازی کمک گرفته شده و در نهایت نتایج با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است. برای انجام مطالعات منابع تولید پراکنده با ضریب توان‌های مختلف در نظر گرفته شده اند. نتایج نشان دهنده عملکرد بهتر روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌های مطرح شده در مقاله می‌باشد. همچنین استفاده از ظرفیت توان راکتیو منابع تولید پراکنده باعث بهبود بیشتر تلفات شبکه، پروفیل ولتاژ و شاخص پایداری شبکه شده است.

نویسندگان در [۱۶] به تجزیه و تحلیل فنی-اقتصادی سیستم هیبرید مبتنی بر ذخیره ساز باتری و هیدروژن پرداخته اند. در این مطالعه مسئله خرابی تجهیزات در کنار تغییر هزینه‌های انرژی برای یک افق مطالعاتی ۲۵ ساله در نظر گرفته شده است. در این مقاله جهت نشان دادن استحکام و تطبیق پذیری روش بهینه سازی نتایج برای دو منطقه مکانی با آب و هوای گرمسیری و معتدل مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که سیستم هیبرید در منطقه گرمسیری همیشه در مقایسه با سیستم مشابه در منطقه معتدل به دلیل منابع خورشیدی فراوان، بازده بیشتری را ارائه می‌دهد. مقایسه سیستم هیبرید با ذخیره ساز باتری در مقایسه با سیستم هیبرید با ذخیره ساز هیدروژنی در بسیاری از مواقع عملکرد مناسب تری از نقطه نظر میزان خودکفایی و ارزش خالص فعلی از خود نشان می‌دهد. با این حال، اگر تغییرات فصلی زیاد و نیاز زیاد برای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر وجود داشته باشد (نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر بیش از ۸۰ درصد)، استفاده از هیدروژن به عنوان سیستم ذخیره انرژی مفیدتر می‌باشد. علاوه بر این، سیستم ذخیره ساز هیبریدی (یعنی ترکیب باتری و هیدروژن) عملکرد بهتری نسبت به سیستم‌های ذخیره ساز فقط باتری و فقط هیدروژنی دارد. این مطالعه همچنین نشان می‌دهد که ذخیره‌سازی هیدروژن در یک استراتژی بلند مدت می‌تواند درصد خرابی تجهیزات را کاهش، کارایی را افزایش و عملکرد اقتصادی کل را افزایش دهد.

مرجع [۱۷] به بررسی اندازه بهینه و کنترل بلادرنگ منابع تولید پراکنده در ساختمان‌های هوشمند پرداخته است. از این رو جهت انجام مطالعات در ابتدا یک سیستم جامع شامل منابع الکتریکی و حرارتی در نظر گرفته و سپس اندازه بهینه منابع تولید انرژی با هدف کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری کل، هزینه جایگزینی و هزینه بهره‌برداری و مدیریت بدست آمده است. نتایج نشان می‌دهد الگوریتم پیشنهادی می‌تواند قبض مصرف انرژی ماهانه مشتریان را تا ۲۰٫۵۳ درصد کاهش دهد. مرجع [۱۸] به جایابی و اندازه‌یابی بهینه منابع تولید پراکنده مبتنی بر الگوریتم منحصر به فرد نهنگ پرداخته است. به منظور بررسی میزان اثربخشی، روش پیشنهادی بر روی شبکه‌های توزیع شعاعی ۳۳ باسه و ۶۳ باسه IEEE پیاده‌سازی شده است. نتایج نشان از عملکرد مطلوب الگوریتم پیشنهادی در بهبود تلفات شبکه، بهبود پروفیل ولتاژ نسبت به سایر الگوریتم‌های ارایه شده در مقاله دارد. مرجع [۱۹] به جایابی بهینه منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر با استفاده از الگوریتم مرغ مگس خوار پرداخته است. نوآوری اصلی این مقاله، پیشنهاد یک تکنیک کارآمد و جدید برای اندازه‌یابی و قرارگیری بهینه منابع تجدیدپذیر در سیستم‌های توزیع شعاعی با در نظر گرفتن عدم قطعیت در میزان بارگذاری و توان خروجی منابع تجدیدپذیر بوده است. از این رو با استفاده از روش مونت کارلو و الگوریتم کاهش به عقب ۱۲ سناریو مدل شده است. از الگوریتم مرغ مگس خوار جهت حل مسئله چند هدفه شامل حداقل کردن هزینه کل، میزان انتشار آلاینده‌گی، انحرافات ولتاژ و پایداری ولتاژ استفاده شده است. تکنیک مطرح شده بر روی شبکه ۳۳ باسه IEEE و یک شبکه ۹۴ باسه واقعی در کشور پرتغال پیاده‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد روش پیشنهادی به طور موثری مسئله جایابی منابع تولید پراکنده با در نظر گرفتن اهداف مطرح شده را حل می‌کند.

در مرجع [۲۰] مکانیابی و اندازه‌یابی بهینه منابع تولید پراکنده با استفاده از الگوریتم MOPSO در کنار جعبه ابزار MATPOWER برای شبکه تست ۳۳ باسه و ۶۹ باسه IEEE برای سناریوهای مختلف انجام شده است. نوآوری این مقاله پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی برای شبکه واقعی توزیع برق تونس (ASHTART) بوده است. نتایج نشان از استحکام و اثربخشی الگوریتم بهبود یافته MOPSO در کاهش تلفات اکتیو کل، به حداکثر رساندن درصد بهبود حداقل ولتاژ، بهبود پروفیل ولتاژ و حداکثرسازی شاخص پایداری ولتاژ دارد. مرجع [۲۱] به اندازه‌یابی بهینه یک سیستم ترکیبی شامل فتوولتائیک، باد و باتری برای یک منطقه روستایی در شمال کامرون پرداخته است. ادغام باتری به سیستم اجازه می‌دهد تا تصحیح ضریب توان و تولید توان اکتیو و راکتیو را داشته باشد. نتایج نشان از استحکام و قابلیت اطمینان بالای روش پیشنهادی در کنار کاهش هزینه‌های کل برای افق ۲۰ ساله برنامه ریزی شده دارد. نمودار همگرایی تابع هدف نشان می‌دهد که هزینه تولید و تلفات توان سیستم بر اساس نوع و تعداد DG ها افزایش می‌یابد. نویسندگان در مرجع [۲۲] به جایابی منابع تولید پراکنده با معرفی یک شاخص جدید برای تنظیم ولتاژ با هدف کاهش تلفات انرژی کل با در نظر گرفتن مسئله برنامه ریزی بصورت یک مسئله غیرخطی پرداخته اند. از پخش بار اقتصادی AC جهت حل مسئله برنامه ریزی در کنار قیود بهره‌برداری شبکه، عدم قطعیت در بار و میزان تولید منابع تجدیدپذیر استفاده شده است. جهت تست روش پیشنهادی از شبکه ۳۳ باسه IEEE و شبکه توزیع واقعی ۴۰۴ باسه در کشور کانادا استفاده شده است. مرجع [۲۳] روشی را با استفاده از ترکیب تجدید ساختار شبکه و جایابی بهینه منابع تولید پراکنده با اندازه بهینه با هدف کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ در یک شبکه انتقال عملی برای یک سناریو با تقاضای بار بالا برای یک دوره ده ساله معرفی می‌کند. در این مقاله ۴ سناریو مختلف برای شبکه تست در نظر گرفته شده است. شاخص کاهش تلفات اکتیو و راکتیو و شاخص کاهش مجموع انحرافات ولتاژ گره جهت ارزیابی سیستم معرفی شده است. نتایج نشان می‌دهد ترکیب بازسازی شبکه و جایابی منابع تولید پراکنده با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی مبتنی بر پارامتر شبکه برای پاسخگویی به افزایش تقاضای بار برای دوره زمانی ده ساله با هدف کاهش تلفات و بهبود پروفایل ولتاژ موثر است. همچنین سرمایه‌گذاری انجام شده در بازسازی شبکه و جایابی واحدهای DG در یک دوره زمانی ۴ ساله بازیابی خواهد شد. در مرجع [۲۴] یک استراتژی مدیریت پخش بار اقتصادی با هدف جایابی و

اندازه یابی بهینه منابع تولید پراکنده مبتنی بر سیستم فئولتائیک در کنار باتری به عنوان سیستم ذخیره انرژی پیشنهاد گردیده است. برای پیاده سازی این مسئله به عنوان یک مسئله بهینه سازی، از یک الگوریتم ترکیبی جدید مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و various chaotic maps در کنار کاهش تلفات توان اکتیو کل به عنوان تابع هدف استفاده شده است. برای آزمایش استحکام و کاربرد روش پیشنهادی، توابع معیار مختلف و شبکه توزیع ۱۴ باسه IEEE تحت پروفایل بار ثابت و متناوب مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که تلفات کل سیستم به میزان ۲۰,۱۴ درصد در هنگام اعمال استراتژی مدیریتی پیشنهادی کاهش می یابد.

در بخش قبل سعی شد به بررسی مقالات در زمینه جابایی و اندازه یابی منابع تولید پراکنده با اهداف مختلف پرداخته شود. در ادامه به منظور جمع بندی در ابتدا به بیان نقاط ضعف مقالات پیشین در قالب سه دسته کلی و در نهایت، خلا پژوهشی و نوآوری مقاله آورده شده است.

- مطالعاتی همچون [۱۳]، [۱۵]، [۲۰]، [۲۲] و [۲۳] به طراحی مکان و اندازه بهینه DG با اهدافی مانند کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ و افزایش شاخص پایداری پرداخته اند. الگوریتم های متنوعی از جمله الگوریتم ژنتیک، PSO، گرگ خاکستری و MOPSO در این مطالعات استفاده شده است. هرچند این مقالات به جابایی دقیق DG توجه داشته اند، اما موضوع خودروهای برقی و فناوری V2G را در نظر نگرفته اند و معمولاً مدل های غیرمحدب و مبتنی بر روش های فراابتکاری را به کار برده اند.

- مراجع [۶]، [۹]، [۱۷]، [۱۸] و [۲۱] به بررسی ترکیب EV ها و DG در شبکه پرداخته و از الگوریتم های فرا ابتکاری برای تخصیص بهینه ظرفیت بهره برده اند. مرجع [۶] به بررسی میزان نفوذپذیری مجاز DG و EV در شرایط عدم قطعیت پرداخته و از الگوریتم GRASP-TS استفاده کرده است. مرجع [۲۱] نیز اثر افزودن باتری به سیستم ترکیبی را در بهبود توان راکتیو، خودکفایی و قابلیت اطمینان بررسی کرده است. همچنین در [۱۷] مدل بهینه منابع در ساختمان های هوشمند با حضور منابع تولید و ذخیره انرژی توسعه یافته است. در حالی که مدل های این مطالعات، به دلیل روش حل غیردقیق، نمی توانند تضمینی برای بهینگی سراسری فراهم کنند.

- برخی مطالعات مانند [۷]، [۸]، [۱۶]، [۱۹]، [۲۲] و [۲۵] مدل سازی عدم قطعیت بار، تولید انرژی تجدیدپذیر یا تقاضای EV را لحاظ کرده اند. این مطالعات اغلب با رویکرد تصادفی یا سناریو محور انجام شده و مزیت آن ها لحاظ واقعیت های محیطی است. با این حال، پیچیدگی محاسباتی زیاد و استفاده از مدل های خطی یا غیرمحدب محدودیت هایی را برای تعمیم پذیری ایجاد کرده است.

با توجه به بررسی های صورت گرفته می توان گفت در مطالعات پیشین یا مدل غیرمحدب بوده، یا ترکیب V2G و DG با در نظرگیری دقیق قیود بهره برداری صورت نگرفته و یا مدل حل دقیقی ارائه نشده است. مقاله حاضر با ارائه یک مدل MISOCP محدب، همزمان موارد زیر را در نظر می گیرد.

- مکان یابی و اندازه یابی DG ها
- در نظر گرفتن شارژ/دشارژ خودروها (V2G)
- لحاظ همزمان هزینه های سرمایه گذاری، بهره برداری، تلفات و خرید انرژی از شبکه بالادست
- امکان حل سراسری با تضمین بهینگی توسط حل کننده SeDuMi

در ادامه مقاله پیشرو به چهار بخش اصلی تقسیم شده است. در بخش اول در قسمت مقدمه به ادبیات موضوع، مرور مقالات و نوآوری ها پرداخته شده است. در بخش دوم مدل پیشنهادی برای تعیین ظرفیت بهینه منابع تولید پراکنده به همراه خودروهای برقی ارائه می شود. در بخش سوم شبکه مورد مطالعه معرفی و نتایج شبیه سازی تجزیه و تحلیل می شوند. در پایان نتیجه گیری کلی ارائه شده است. در ادامه به مدل سازی و بیان مسئله بهینه سازی مدنظر و روش حل این مسئله پرداخته شده است.

مدلسازی

در این بخش به مدلسازی مسئله پرداخته شده است. از این رو شاخص باس شبکه با n و m مجموعه آن با N ، شاخص زمانی با t و مجموعه آن با T و شاخص خطوط شبکه با nm و مجموعه آن با B نشان داده شده است. تابع هدف مسئله به صورت رابطه (۱) در نظر گرفته شده است. در این رابطه جمله اول نشان‌دهنده هزینه سرمایه‌گذاری منابع تولید پراکنده است، که $\tilde{c}_n^{inv-DG}$ برابر هزینه سرمایه‌گذاری سالیانه و X_n برابر ظرفیت تولید پراکنده نصب شده می‌باشد. جمله دوم هزینه خرید انرژی از پست فوق توزیع یا شبکه بالادست را نشان می‌دهد. در اینجا c_t^{grid} هزینه خرید انرژی از شبکه بالادست و p_t^{grid} و q_t^{grid} به ترتیب توان اکتیو و راکتیو خریداری شده از شبکه بالادست را نشان می‌دهد. جمله سوم هزینه تلفات انرژی شبکه توزیع را نشان می‌دهد. در اینجا c_t^l هزینه تلفات انرژی و $h_{t,nm}$ یک متغیر کمکی متناسب با مجذور جریان خط و r_{nm} برابر با مقاومت خط می‌باشد. جمله آخر مربوط به هزینه بهره‌برداری منابع تولید پراکنده نصب شده می‌باشد، در اینجا c_n^{DG} برابر هزینه بهره‌برداری تولید پراکنده و $p_{t,n}^{DG}$ و $q_{t,n}^{DG}$ به ترتیب برابر توان اکتیو و راکتیو تولید شده تولید پراکنده می‌باشد.

$$\begin{aligned} \min \sum_{n \in N} \tilde{c}_n^{inv-DG} X_n + 8760 \\ \times \left(\sum_{t \in T} c_t^{grid} (p_t^{grid} + q_t^{grid}) \right. \\ \left. + \sum_{t \in T} \sum_{nm \in B} c_t^l (r_{nm} \cdot h_{t,nm}) \right. \\ \left. + \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} c_n^{DG} (p_{t,n}^{DG} + q_{t,n}^{DG}) \right) \end{aligned} \quad (1)$$

در ادامه محدودیت‌های مسئله آورده شده است:

- محدودیت تلفات خطوط

محدودیت مربوط به تابع تلفات خطوط، به فرم مخروط مرتبه دوم در رابطه (۲) آورده شده است. در اینجا $p_{t,nm}^f$ و $q_{t,nm}^f$ به ترتیب برابر با شار توان اکتیو و شار توان راکتیو عبوری از خط می‌باشند.

$$\|p_{t,nm}^f, q_{t,nm}^f\|_2 \leq h_{t,nm} \quad (2)$$

- محدودیت بودجه سرمایه‌گذاری

محدودیت بودجه سرمایه‌گذاری برای نصب منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع با رابطه (۳) نشان داده شده است. در اینجا c_n^{DG} برابر هزینه سرمایه‌گذاری برای نصب DG و Ψ برابر حداکثر بودجه در نظر گرفته شده می‌باشد.

$$\sum_{n \in N} c_n^{DG} X_n \leq \Psi \quad (3)$$

- محدودیت تعادل توان اکتیو و راکتیو

محدودیت تعادل توان اکتیو و راکتیو در شبکه توزیع با روابط (۴) و (۵) مدل‌سازی شده است. در اینجا $p_{t,n}^r$ برابر توان منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر مثل بادی و یا خورشیدی است. همچنین $p_{t,n}^{ev}$ و $p_{t,n}^d$ به ترتیب نشان‌دهنده میزان شارژ یا دشارژ خودروهای برقی و بار اکتیو شبکه توزیع می‌باشد. به همین صورت $q_{t,n}^d$ نیز میزان بار راکتیو شبکه توزیع است.

$$p_t^s + p_{t,n}^{DG} + p_{t,n}^r + p_{t,n}^{ev} + \sum_{nm \in R} p_{t,nm}^f - \sum_{mn \in R} p_{t,mn}^f = p_{t,n}^d \quad (4)$$

$$q_t^s + q_{t,n}^{DG} + \sum_{nm \in R} q_{t,nm}^f - \sum_{mn \in R} q_{t,mn}^f = q_{t,n}^d \quad (5)$$

- محدودیت ولتاژ شبکه توزیع

رابطه (۶) ولتاژ شبکه توزیع و رابطه (۷) محدودیت آن را نشان می‌دهد. در اینجا $v_{t,n}$ برابر ولتاژ مربعی باس شبکه توزیع و x_{nm} برابر راکتانس خط می‌باشد. همچنین v_n^{min} و v_n^{max} برابر حداقل و حداکثر ولتاژ باس می‌باشد.

$$v_{t,n} = v_{t,n} - 2(r_{nm}p_{t,nm}^f + x_{nm}q_{t,nm}^f) \quad (6)$$

$$v_n^{min} \leq v_{t,n} \leq v_n^{max} \quad (7)$$

- محدودیت بهره برداری از پست فوق توزیع

رابطه (۸) و (۹) محدودیت بهره‌برداری از پست فوق توزیع (شبکه بالادست) را برای خرید توان اکتیو و راکتیو نشان می‌دهد. در اینجا $\overline{p_t^{grid}}$ و $\overline{q_t^{grid}}$ به ترتیب حداکثر توان اکتیو و راکتیو در پست فوق توزیع را نشان می‌دهد. در این مطالعه باس یک به شبکه بالادست متصل می‌باشد.

$$0 \leq p_t^{grid} \leq \overline{p_t^{grid}} \quad (8)$$

$$0 \leq q_t^{grid} \leq \overline{q_t^{grid}} \quad (9)$$

- محدودیت حداکثر شار توان اکتیو و راکتیو خطوط

رابطه (۱۰) و (۱۱) به ترتیب حداکثر شار توان اکتیو و راکتیو خطوط را نشان می‌دهد. در اینجا $\overline{p_{t,nm}^f}$ نشان‌دهنده حداکثر شار توان حقیقی خط و $\overline{q_{t,nm}^f}$ حداکثر شار راکتیو خط می‌باشد.

$$-\overline{p_{t,nm}^f} \leq p_{t,nm}^f \leq \overline{p_{t,nm}^f} \quad (10)$$

$$-\overline{q_{t,nm}^f} \leq q_{t,nm}^f \leq \overline{q_{t,nm}^f} \quad (11)$$

- محدودیت بهره برداری توان اکتیو و راکتیو منابع تولید پراکنده

رابطه (۱۲) و (۱۳) به ترتیب محدودیت بهره‌برداری توان اکتیو و راکتیو منابع تولید پراکنده نصب شده را نشان می‌دهد.

$$0 \leq p_{t,n}^{DG} \leq X_n \quad (12)$$

$$0 \leq q_{t,n}^{DG} \leq X_n \quad (13)$$

- محدودیت تعیین ظرفیت منابع تولید پراکنده

رابطه (۱۴) نیز محدودیت تعیین ظرفیت منابع تولید پراکنده را نشان می‌دهد. در اینجا $\overline{X_n}$ برابر حداکثر ظرفیت در نظر گرفته شده برای نصب منابع تولید پراکنده می‌باشد.

$$0 \leq X_n \leq \overline{X_n} \quad (14)$$

رابطه (۱۵) ولتاژ شین مرجع را در شبکه توزیع نشان می‌دهد که برابر ولتاژ اسمی شبکه یا ۱ پیرونیت در نظر گرفته شده است.

$$v_{t,n} = 1 \quad \forall n = 1 \quad (15)$$

روابط (۱۶) تا (۲۷) مدل‌سازی خودروهای برقی را در شبکه توزیع نشان می‌دهد. انرژی خالص شارژ و دشارژ باتری در خودروهای برقی با توجه به راندمان هر باتری در (۱۶) نشان داده شده است. در رابطه (۱۶) $p_{t,n}^{dis-ev}$ و $p_{t,n}^{ch-ev}$ به ترتیب برابر میزان دشارژ و شارژ باتری خودروهای برقی می‌باشد، همچنین η_n^{ev} نشان‌دهنده راندمان شارژر باتری خودروهای برقی می‌باشد.

$$e_{t,n}^{net,ev} = p_{t,n}^{dis,ev} - \eta_n^{ev} p_{t,n}^{ch,ev} \quad (۱۶)$$

رابطه (۱۷) مقدار توان تزریقی و دریافتی از شبکه توسط خودروهای برقی را نشان می‌دهد که توسط نرخ شارژ و دشارژ باتری محاسبه می‌شود.

$$p_{t,n}^{ev} = p_{t,n}^{dis,ev} - p_{t,n}^{ch,ev} \quad (۱۷)$$

وضعیت شارژ و دشارژ خودروهای برقی در (۱۸) نشان داده شده است، که به ترتیب $I_{t,n}^{dis,ev}$ و $I_{t,n}^{ch,ev}$ نشان‌دهنده وضعیت شارژ و دشارژ خودروهای برقی می‌باشد، همچنین $n_{t,n}^{ev}$ برابر وضعیت اتصال به شبکه خودروهای برقی می‌باشد، که اگر برابر ۱ باشد خودرو به شبکه متصل در غیر اینصورت قطع می‌باشد.

$$I_{t,n}^{dis,ev} + I_{t,n}^{ch,ev} = n_{t,n}^{ev} \quad (۱۸)$$

رابطه (۱۹) و (۲۰) به ترتیب محدودیت توان شارژ و دشارژ خودروهای برقی را نشان می‌دهد. به ترتیب $\underline{p}_n^{ch,ev}$ و $\bar{p}_n^{ch,ev}$ برابر حداقل و حداکثر توان شارژ خودروهای برقی و $\underline{p}_n^{dis,ev}$ و $\bar{p}_n^{dis,ev}$ به ترتیب برابر حداقل و حداکثر توان دشارژ خودروهای برقی می‌باشد.

$$I_{t,n}^{dis,ev} \underline{p}_n^{dis,ev} \leq p_{t,n}^{dis,ev} \leq I_{t,n}^{dis,ev} \bar{p}_n^{dis,ev} \quad (۱۹)$$

$$I_{t,n}^{dis,ev} \underline{p}_n^{dis,ev} \leq p_{t,n}^{dis,ev} \leq I_{t,n}^{dis,ev} \bar{p}_n^{dis,ev} \quad (۲۰)$$

رابطه (۲۱) سطح انرژی در باتری خودروهای برقی را نشان می‌دهد که با $(e_{t,n}^{ev})$ معرفی شده است، در اینجا $dr_{t,n}^{ev}$ نشان‌دهنده انرژی تقاضا شده خودروهای برقی برای سواری می‌باشد.

$$e_{t,n}^{ev} = e_{t-1,n}^{ev} - e_{t,n}^{net,ev} - (1 - n_{t,n}^{ev}) dr_{t,n}^{ev} \quad (۲۱)$$

رابطه (۲۲) محدودیت ظرفیت انرژی باتری در خودروهای برقی را نشان می‌دهد، که می‌بایست بین حداقل $(e_{t,n}^{ev})$ و حداکثر $(\bar{e}_{t,n}^{ev})$ باشد.

$$e_{t,n}^{ev} \leq e_{t,n}^{ev} \leq \bar{e}_{t,n}^{ev} \quad (۲۲)$$

رابطه (۲۳) و (۲۴) انرژی خالص شارژ و دشارژ باتری خودروهای برقی و انرژی در دسترس باتری خودروهای برقی را در ساعت اول و آخر برابر با هم در نظر می‌گیرد.

$$e_{t=1,n}^{ev} = e_{t=24,n}^{ev} \quad (۲۳)$$

$$e_{t=1,n}^{net,ev} = e_{t=24,n}^{net,ev} \quad (۲۴)$$

معادلات (۲۵) تا (۲۷) نشان‌دهنده منحنی هزینه شارژ و دشارژ باتری خودروهای برقی می‌باشد. در اینجا $c_{t,n}^{ev}$ برابر هزینه بهره‌برداری خودروهای برقی، $\beta_{t,n}^{ev}$ برابر شیب تکه k ام برای خط‌سازی منحنی هزینه و $p_{t,n,k}^{ev}$ برابر توان تکه k ام خودروهای برقی می‌باشد. در نهایت $\bar{p}_{t,k}^{ev}$ برابر حداکثر توان در نظر گرفته شده برای تکه k ام در خطی‌سازی می‌باشد، همچنین k شاخص مقدار تکه‌های منحنی و K مجموعه آن می‌باشد.

$$c_{t,n}^{ev} = n_{t,n}^{ev} \sum_{k=1}^K \beta_{n,k}^{ev} p_{t,n,k}^{ev} \quad (۲۵)$$

$$n_{t,n}^{ev} (e_{t,n}^{ev} - e_{t-1,n}^{ev}) \geq - \sum_{k=1}^K p_{t,n,k}^{ev} , \quad (۲۶)$$

$$n_{t,n}^{ev}(e_{t,n}^{ev} - e_{t-1,n}^{ev}) \leq \sum_{k=1}^K p_{t,n,k}^{ev} \quad (27)$$

$$0 \leq p_{t,n,k}^{ev} \leq \bar{p}_{t,k}^{ev} \quad (28)$$

همانطور که مشاهده می‌شود روابط (۲۵) و (۲۶) غیر خطی می‌باشند. برای خطی‌سازی این دو معادله از روش Big-M استفاده می‌کنیم. به این صورت که با تعریف متغیر جدید و یک پارامتر بزرگ مثل M (پارامتر M بر اساس بیشینه‌توان شارژ/دشارژ خودروهای برقی انتخاب شده است) محدودیت‌های جدیدی را به مدل اضافه می‌کنیم. بدین منظور مدل خطی رابطه (۲۵) به صورت زیر می‌باشد. توجه شود که $\alpha_{t,n}$ نشان‌دهنده ضرب دو جمله $n_{t,n}^{ev}$ و $\sum_{k=1}^K \beta_{n,k}^{ev} p_{t,n,k}^{ev}$ می‌باشد.

$$c_{t,n}^{ev} = \alpha_{t,n} \quad (28)$$

$$\alpha_{t,n} \leq M \times n_{t,n}^{ev} \quad (29)$$

$$\alpha_{t,n} \leq \sum_{k=1}^K \beta_{n,k}^{ev} p_{t,n,k}^{ev} \quad (30)$$

$$\alpha_{t,n} \geq \sum_{k=1}^K \beta_{n,k}^{ev} p_{t,n,k}^{ev} - (1 - n_{t,n}^{ev}) \times M \quad (31)$$

$$\alpha_{t,n} \geq 0 \quad (32)$$

همانطور که مشاهده می‌شود روابط (۲۸) تا (۳۲) کاملاً خطی می‌باشد و جایگزین معادله (۲۵) می‌شود. به همین ترتیب و با همین روش معادله (۲۶) را می‌توان خطی نمود. یعنی با تعریف یک متغیر جدید و یک پارامتر عددی بزرگ به این صورت که $Z_{t,n}$ برابر متغیر جدید برای تعریف ضرب دو جمله $(e_{t,n}^{ev} - e_{t-1,n}^{ev})$ و $n_{t,n}^{ev}$ می‌باشد.

$$z_{t,n} \geq - \sum_{k=1}^K p_{t,n,k}^{ev} \quad (33)$$

$$z_{t,n} \leq \sum_{k=1}^K p_{t,n,k}^{ev} \quad (34)$$

$$z_{t,n} \leq n_{t,n}^{ev} \times M \quad (35)$$

$$z_{t,n} \leq (e_{t,n}^{ev} - e_{t-1,n}^{ev}) \quad (36)$$

$$z_{t,n} \geq (e_{t,n}^{ev} - e_{t-1,n}^{ev}) - (1 - n_{t,n}^{ev}) \times M \quad (37)$$

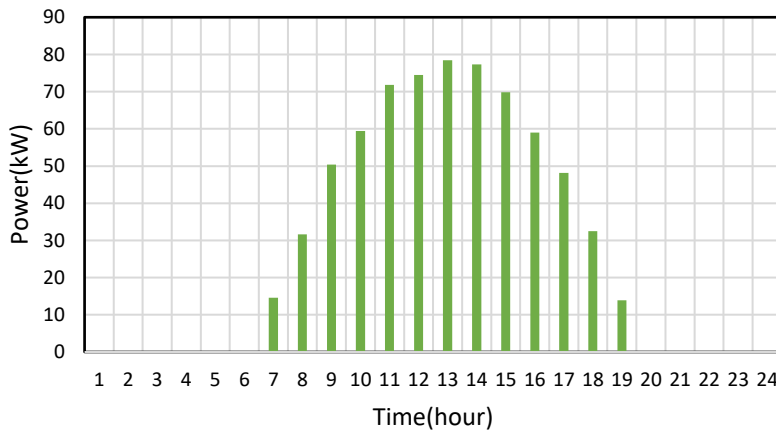
$$z_{t,n} \geq 0 \quad (38)$$

همانطور که مشاهده شد فرم خطی رابطه (۲۶) به صورت معادلات (۳۳) تا (۳۸) می‌باشد. لذا با جایگزینی رابطه (۲۶) با معادلات (۳۳) تا (۳۸) تمامی معادلات به فرم محدب شده و می‌توان آنها را توسط حل‌کننده قدرتمند SeDuMi حل نمود و جواب‌های بهینه سراسری را بدست آورد.

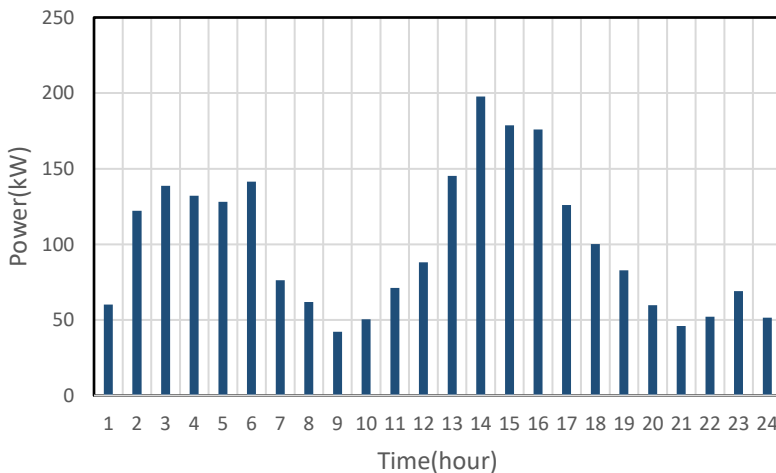
مطالعه موردی

برای نشان دادن تاثیر مدل پیشنهادی شبکه توزیع استاندارد ۳۳ باسه IEEE [۲۵] در نظر گرفته شده است. در اینجا نرخ بهره برابر ۷٫۵ درصد و دوره سرمایه‌گذاری برابر ۵ سال در نظر گرفته شده است. پارکینگ خودروهای برقی در

باس‌های ۱۴، ۲۴ و ۳۲ می‌باشد. راندمان باتری‌های موجود در خودروهای برقی ۹۹ درصد در نظر گرفته شده است. منابع تولید پراکنده از نوع میکروتوربین برای سرمایه‌گذاری انتخاب شده و هزینه بهره‌برداری آن برابر ۱۷ سنت به ازاء هر کیلوولت آمپر و ۱۰۰۰ دلار به ازاء هر کیلوولت آمپر ظرفیت سرمایه‌گذاری شده در نظر گرفته شده است. همچنین یک واحد بادی در باس ۳۰ با ظرفیت ۳۰۰ کیلووات و یک واحد خورشیدی در باس ۱۴ با ظرفیت ۱۲۰ کیلووات در نظر گرفته شده است. منحنی توان تولیدی واحد خورشید در طول روز در شکل (۱) و منحنی توان تولیدی واحد باد در طول روز در شکل (۲) نشان داده شده است.

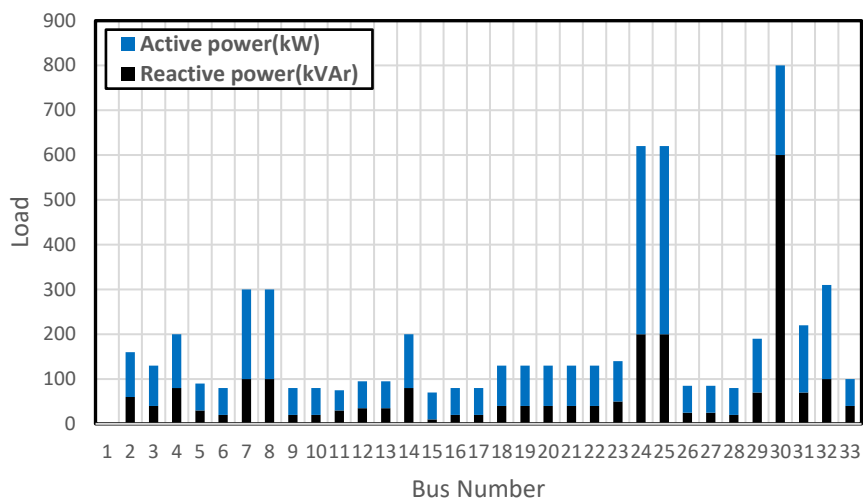


شکل ۱. توان تولیدی روزانه واحد خورشیدی

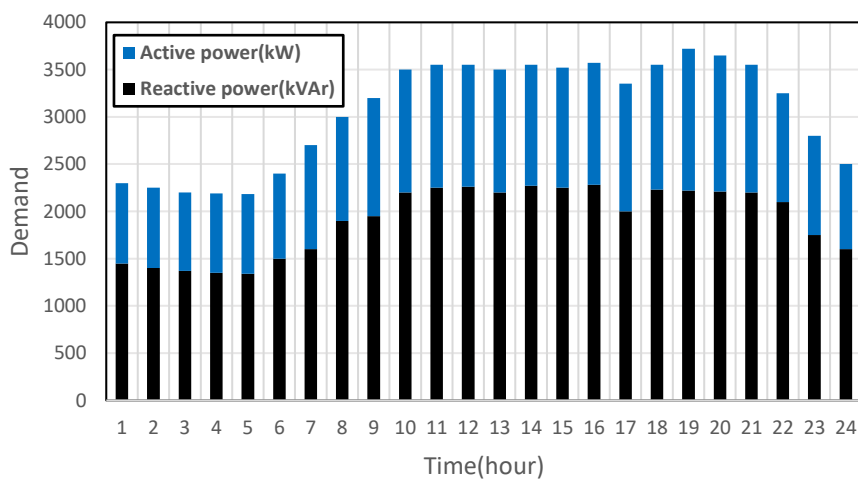


شکل ۲. توان تولیدی روزانه واحد بادی

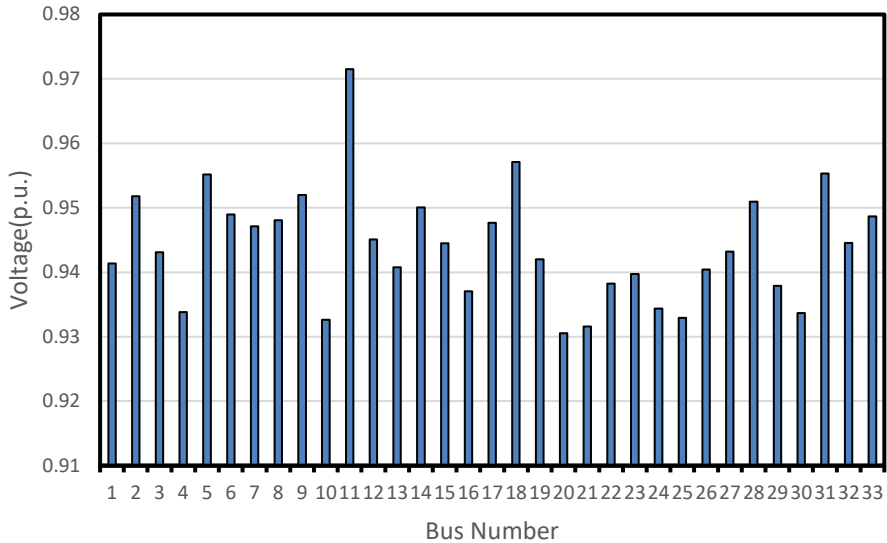
بار اکتیو و راکتیو در هر باس در شکل (۳)، بار روزانه اکتیو و راکتیو در شکل (۴) و پروفیل ولتاژ شبکه در شکل (۵) نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود مطابق شکل (۳) باس ۲۵ و ۳۰ دارای بیشترین بار و طبق شکل (۴) پیک بار در ساعت ۱۹ و ۲۰ اتفاق می‌افتد.



شكل ۳. بار اکتیو و راکتیو هر باس



شكل ۴. بار اکتیو و راکتیو روزانه



شکل ۵. پروفیل ولتاژ شبکه

در ادامه جهت بررسی عملکرد مدل پیشنهادی مطالعات برای ۴ سناریو به شرح زیر انجام شده است:

- در نظر گرفتن ۳۰۰ هزار دلار به عنوان حداکثر بودجه سرمایه گذاری.
- در نظر گرفتن ۴۵۰ هزار دلار به عنوان حداکثر بودجه سرمایه گذاری.
- در نظر گرفتن ۳۰۰ هزار دلار به عنوان حداکثر بودجه سرمایه گذاری بدون حضور منابع انرژی تجدیدپذیر.
- در نظر گرفتن ۳۰۰ هزار دلار به عنوان حداکثر بودجه سرمایه گذاری بدون در نظر گرفتن خوردهای برقی.

بحث و بررسی

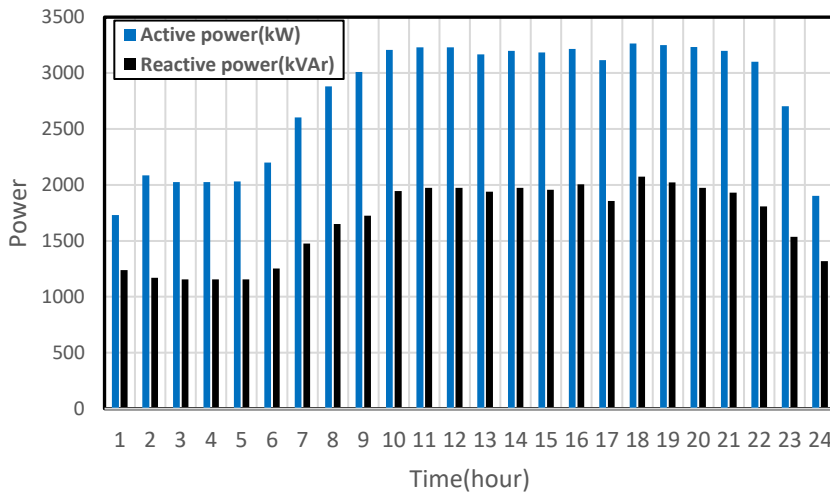
در جدول (۱) نتایج مربوط به شبیه سازی سناریوهای مختلف آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود خرید انرژی، تلفات، بودجه و همچنین میزان منبع تولید پراکنده سرمایه گذاری شده در هر سناریو آورده شده است.

جدول ۱. نتایج شبیه سازی سناریوهای مختلف

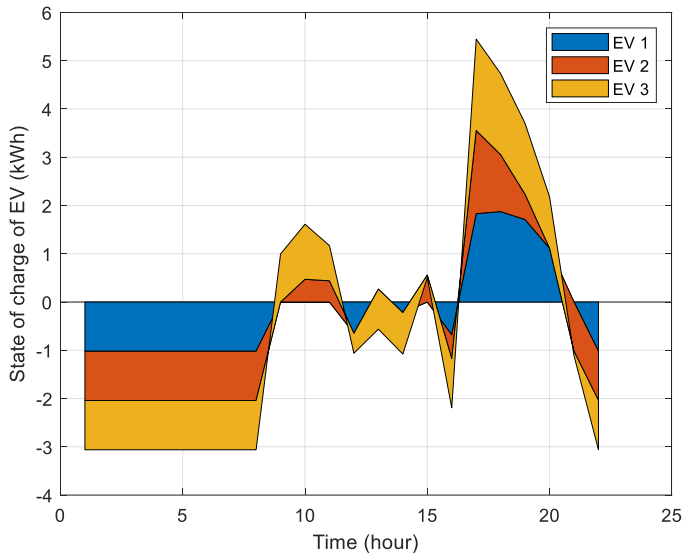
سناریو اول	سناریو دوم	سناریو سوم	سناریو چهارم
۳۰۰	۴۰۰	۳۰۰	۳۰۰
بودجه مورد نیاز (هزار دلار)			
۹۶	۹۳	۱۰۰	۹۸٫۱
خرید انرژی (مگاوات آمپر ساعت)			
۳۶۱	۳۲۵	۳۷۷	۳۷۳
تلفات انرژی (کیلووات آمپر ساعت)			
۱۷	۱۷	۱۷	۱۷
۱۸	۱۸	۱۸	۱۸
مکان بهینه تولید پراکنده			
۳۲	۳۱	۳۲	۳۲
۳۳	۳۲	۳۳	۳۳
ظرفیت بهینه تولید پراکنده (کیلووات آمپر)			
۲۵	۴۴	۲۰	۲۴

۵۳	۵۴	۵۰	۵۷
۸۷	۹۰	۲۲	۸۸
۴۴	۴۵	۱۲۵	۴۵
		۳۹	

برای سناریو اول که بودجه ۳۰۰ هزار دلار در نظر گرفته شده و خودروهای برقی و منابع تجدیدپذیر به شبکه متصل می باشند خرید انرژی (اکتیو و راکتیو) از پست فوق توزیع برابر با ۹۶ مگاوات آمپر و تلفات انرژی (اکتیو و راکتیو) برای یک دوره ۲۴ ساعته برابر ۳۶۱ کیلووات آمپر بدست آمده است. برای سناریو اول مکان بهینه منابع تولید پراکنده به ترتیب باس های ۱۷، ۱۸، ۳۲ و ۳۳ با ظرفیت های بهینه ۲۵، ۵۷، ۸۸ و ۴۵ کیلووات آمپر بدست آمده است. شکل (۶) و (۷) خرید انرژی و میزان شارژ و دشارژ خودروها (نمودار منفی نشان دهنده شارژ و نمودار مثبت نشان دهنده دشارژ) در پارکینگ ها را نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود بیشترین میزان خرید انرژی مربوط به زمان پیک بار یعنی ساعات ۱۹ الی ۲۱ می باشد. در این ساعات خودروهای برقی شروع به دشارژ شدن می کنند و در ساعات ارزانی قیمت انرژی، شارژ خودروهای الکتریکی صورت گرفته است.

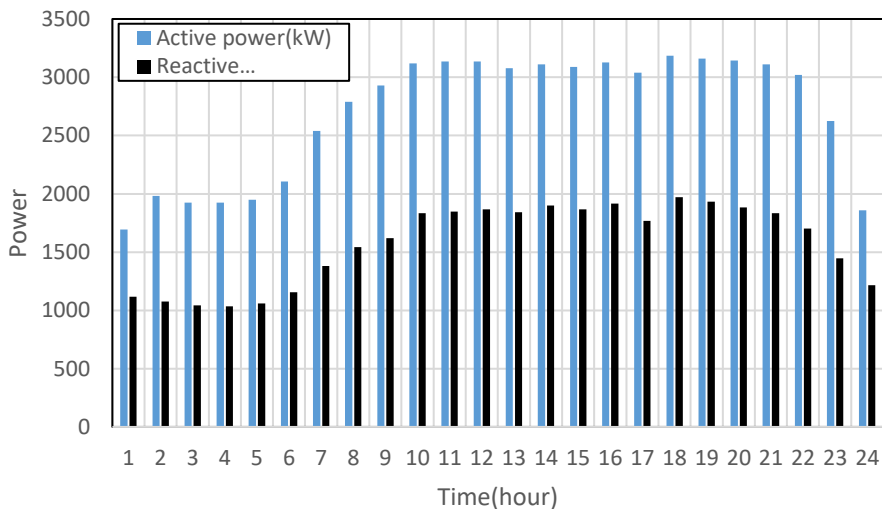


شکل ۶. توان اکتیو و راکتیو خریداری شده از شبکه بالادستی - سناریو اول

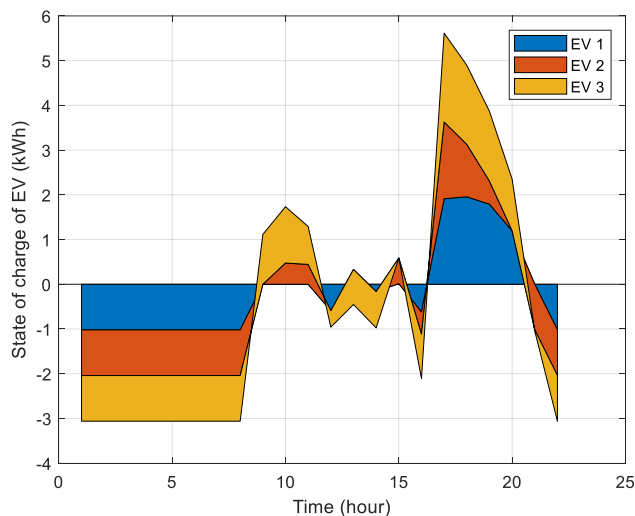


شکل ۷. منحنی شارژ و دشارژ بهینه خودروهای برقی - سناریو اول

در سناریو دوم بودجه به میزان ۳۴ درصد افزایش یافته و از ۳۰۰ هزار دلار به ۴۰۰ هزار دلار رسیده است. مشاهده می شود که شاخص هایی مثل خرید انرژی و تلفات نیز کاهش یافته است. به همین ترتیب در این سناریو خرید انرژی به ۹۳ مگاوات آمپر کاهش یافته و تلفات انرژی برای یک روز به ۳۲۵ کیلووات آمپر رسیده است. در این سناریو تعداد منابع تولید پراکنده میکروتوربین بیشتری در شبکه سرمایه گذاری شده است. مکان بهینه منابع تولید پراکنده بدست آمده عبارتست از باس های ۱۷، ۱۸، ۳۱، ۳۲ و ۳۳ که به ترتیب ظرفیت بهینه آن ها برابر با ۴۴، ۵۰، ۲۲، ۱۲۵ و ۳۹ کیلووات آمپر بدست آمده است. شکل (۸) و (۹) خرید انرژی و میزان شارژ و دشارژ خودروها در پارکینگ ها را نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود بیشترین میزان خرید انرژی مربوط به زمان پیک بار یعنی ساعات ۱۹ الی ۲۱ می باشد. در این ساعات خودروهای برقی شروع به دشارژ شدن می کنند و در ساعات ارزانی قیمت انرژی شارژ خودروهای الکتریکی صورت گرفته است.



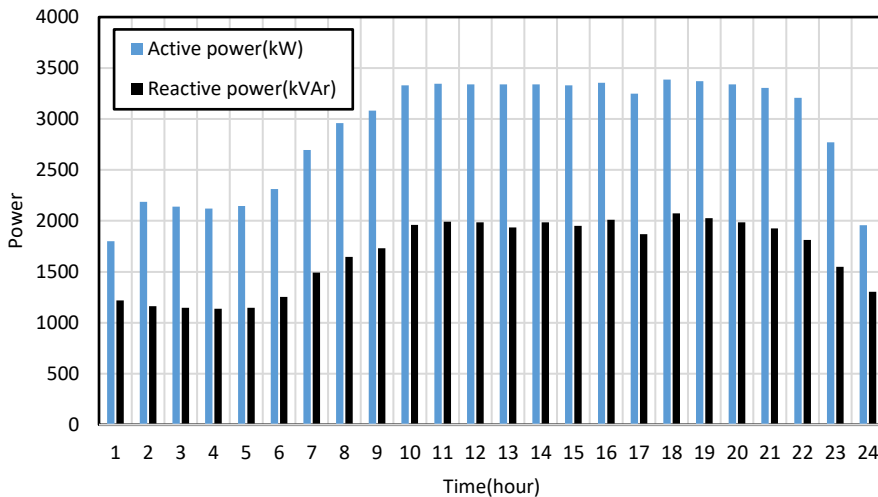
شکل ۸. توان اکتیو و راکتیو خریداری شده از شبکه بالادستی - سناریو دوم



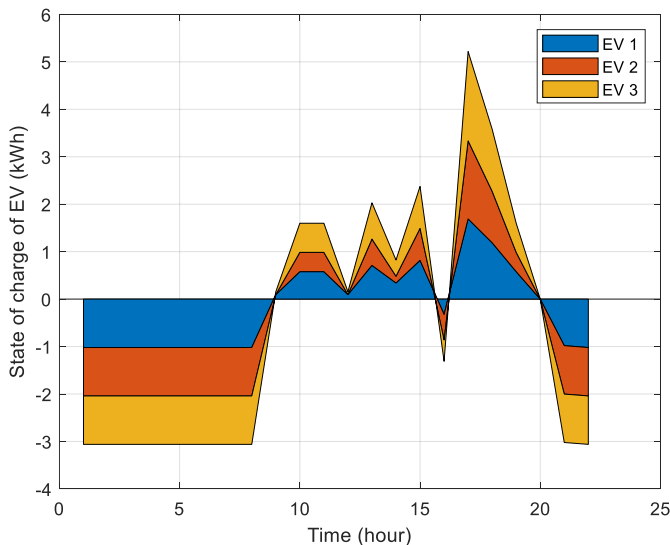
شکل ۹. منحنی شارژ و دشارژ بهینه خودروهای برقی - سناریو دوم

در سناریو سوم از منابع تجدید پذیر بادی و خورشیدی صرف نظر شده است، لذا تولید توان آن ها در طول روز برابر با ۰ کیلووات می باشد. برای این سناریو تلفات انرژی و خرید انرژی از شبکه بالا دستی افزایش یافته است. به همین ترتیب خرید انرژی به ۱۰۰ مگاوات آمپر افزایش و تلفات انرژی برای یک دوره ۲۴ ساعته به ۳۷۷ کیلووات آمپر رسیده است. مکان بهینه منابع تولید پراکنده در این سناریو باس های ۱۷، ۱۸، ۳۲ و ۳۳ که به ترتیب ظرفیت بهینه آن ها برابر است با ۲۰، ۵۴، ۹۰ و ۴۵ کیلووات آمپر بدست آمده است. شکل (۱۰) و (۱۱) خرید انرژی و میزان شارژ و دشارژ خودروها در پارکینگ ها را نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود بیشترین میزان خرید انرژی مربوط به زمان

پیک بار یعنی ساعات ۱۹ الی ۲۱ می باشد. در این ساعات خودروهای برقی شروع به دشارژ شدن می کنند و در ساعات ارزانی قیمت انرژی شارژ خودروهای الکتریکی صورت گرفته است.



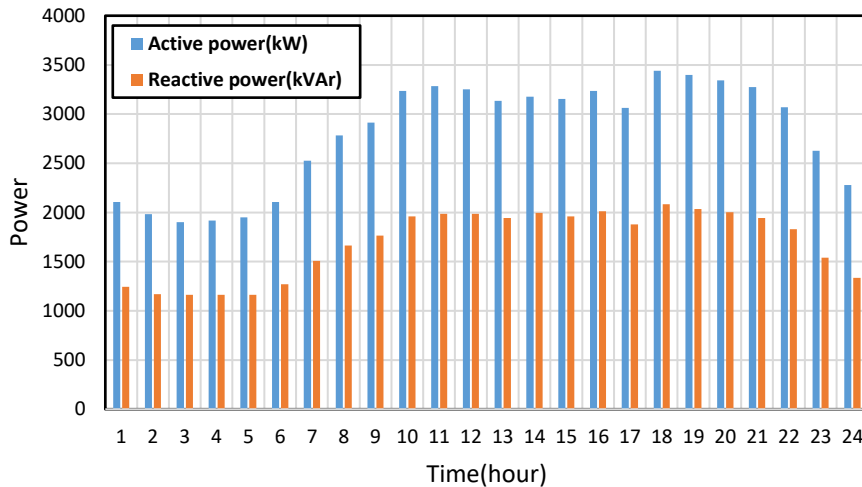
شکل ۱۰. توان اکتیو و راکتیو خریداری شده از شبکه بالادستی - سناریو سوم



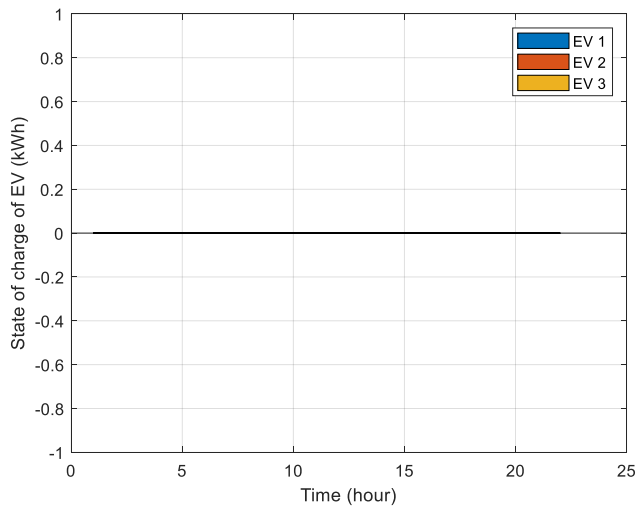
شکل ۱۱. منحنی شارژ و دشارژ بهینه خودروهای برقی - سناریو سوم

در سناریو چهارم تأثیر حذف خودروهای برقی در شبکه توزیع در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر شارژ و دشارژ بهینه خودروهای برقی در این سناریو در نظر گرفته نشده اما منابع انرژی تجدیدپذیر در این سناریو وجود دارند. خرید انرژی در حدود ۲,۱ مگاوات آمپر نسبت به سناریو اول افزایش یافته و تلفات انرژی نیز به مقدار ۱۲ کیلووات آمپر نسبت به سناریو اول بیشتر شده است. لذا تأثیر شارژ و دشارژ بهینه خودروهای برقی کاملاً مشهود می باشد. در این سناریو

خرید انرژی برابر ۹۸،۱ مگاوات آمپر و تلفات انرژی برابر ۳۷۳ کیلووات آمپر برای ۲۴ ساعت بدست آمده است. مکان بهینه منابع تولید پراکنده به ترتیب باس های ۱۷، ۱۸، ۳۲ و ۳۳ با ظرفیت های بهینه ۲۴، ۵۳، ۸۷ و ۴۴ کیلووات آمپر می باشد. شکل (۱۲) و (۱۳) خرید انرژی و میزان شارژ و دشارژ خودروها در پارکینگ ها را نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود بیشترین میزان خرید انرژی مربوط به زمان پیک بار یعنی ساعات ۱۹ الی ۲۱ می باشد. در این ساعات خودروهای برقی شروع به دشارژ شدن می کنند و در ساعات ارزانی قیمت انرژی شارژ خودروهای الکتریکی صورت گرفته است.



شکل ۱۲. توان اکتیو و راکتیو خریداری شده از شبکه بالادستی - سناریو چهارم



شکل ۱۳. منحنی شارژ و دشارژ بهینه خودروهای برقی - سناریو چهارم

آنالیز حساسیت

در راستای نشان دادن استحکام مدل پیشنهادی و ارزیابی عملکرد آن در شرایط مختلف، آنالیز حساسیت برای پارامترهای کلیدی همچون بودجه سرمایه‌گذاری، راندمان باتری خودروهای برقی و روش‌های فراابتکاری انجام شد که در ادامه به بیان نتایج بدست آمده پرداخته می‌شود.

- تأثیر بودجه سرمایه‌گذاری: برای تحلیل حساسیت نسبت به بودجه سرمایه‌گذاری، بازه بودجه از ۲۰۰ هزار دلار تا ۵۰۰ هزار دلار تغییر داده شد. نتایج نشان می‌دهند، افزایش بودجه، کاهش غیرخطی در خرید انرژی و تلفات را به همراه دارد، که نشان‌دهنده اثر اشباع در بازه سرمایه‌گذاری است.
- تأثیر راندمان باتری خودروهای برقی: راندمان باتری از ۹۰ درصد تا ۱۰۰ درصد تغییر داده شد و اثر آن بر هزینه بهره‌برداری بررسی گردید. نتایج نشان می‌دهند، افزایش راندمان باتری تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مصرف شبکه دارد. این نکته در طراحی مدل و مدیریت شارژ باید لحاظ شود.
- مقایسه با روش‌های فراابتکاری: برای سناریوی پایه، مدل پیشنهادی با یک الگوریتم ژنتیک (GA) مجدداً پیاده‌سازی شد. نتایج نشان می‌دهند، مدل پیشنهادی مبتنی بر MISOCIP با حل‌کننده SeDuMi در زمان کمتر، جواب بهینه‌تر را سری را تضمین می‌کند، در حالی که روش فراابتکاری مانند GA نیاز به زمان بیشتر داشته و جواب فقط نزدیک به بهینه است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله مسئله سرمایه‌گذاری بهینه منابع تولید پراکنده انرژی (توان اکتیو و راکتیو) در شبکه توزیع با هدف کاهش هزینه‌های تلفات انرژی، خرید برق از شبکه بالادست، نصب و بهره‌برداری از مدل برنامه‌ریزی مخروطی مرتبه دوم عدد صحیح مختلط ارائه گردید. جهت حل مسئله از مدل غیرخطی برای شارژ و دشارژ بهینه خودروهای برقی به همراه منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر استفاده شد. معادلات غیرخطی خودروهای برقی به کمک روش Big-M به معادلات خطی باینری تبدیل و برای صحت‌سنجی مدل پیشنهادی از شبکه استاندارد ۳۳ باسه IEEE تحت نرم افزار MATLAB و حل‌کننده قدرتمند SeDuMi استفاده شد. طی مطالعات صورت گرفته با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف می‌توان به موارد زیر به عنوان نتایج بدست آمده اشاره نمود:

- افزایش بودجه تأثیر مستقیمی در کاهش تلفات و خرید انرژی از شبکه بالادستی دارد (بر اساس جدول (۱)، افزایش ۳۴ درصدی بودجه منجر به کاهش ۳،۱ درصدی خرید انرژی از شبکه بالادست و کاهش ۱۰ درصدی تلفات انرژی شده است، که به وضوح اثر منفی حذف این منابع را بر عملکرد شبکه توزیع را نشان می‌دهد).
- افزایش بودجه امکان نصب ظرفیت‌های بیشتر تولید پراکنده را فراهم کرده است (مثلاً بر اساس جدول (۱) افزایش ۳۴ درصدی بودجه سناریو ۲ نسبت به سناریو ۱، باعث استفاده بیشتر از منابع تولید پراکنده، که این موضوع به شکل مستقیم باعث کاهش وابستگی به شبکه بالادست و بهبود بهره‌وری انرژی شده است).
- حذف منابع انرژی تجدیدپذیر از شبکه توزیع می‌تواند منجر به افزایش تلفات انرژی و هزینه خرید انرژی از شبکه بالادست شود (مقایسه سناریو ۱ و ۳: حذف منابع تجدیدپذیر منجر به افزایش ۴،۲ درصدی خرید انرژی از شبکه بالادست و افزایش ۴،۴ درصدی تلفات انرژی شده است، که به وضوح اثر منفی حذف این منابع را بر عملکرد شبکه توزیع نشان می‌دهد).
- شارژ و دشارژ بهینه خودروهای برقی تأثیر مستقیمی بر کاهش تلفات و خرید انرژی از شبکه بالادست دارد لذا حذف آن‌ها از شبکه منجر به افزایش تلفات و خرید انرژی از شبکه بالادست می‌شود (مقایسه سناریو ۱

و ۴: حذف فناوری V2G باعث افزایش ۳,۳ درصدی تلفات شبکه و افزایش ۲,۲ درصدی خرید انرژی از شبکه بالادست شده است).

- حضور همزمان منابع تولید پراکنده و خودروهای الکتریکی باعث بیشترین کاهش هزینه و بهبود شاخص‌های عملکردی می‌شود.
- تقریباً مکان بهینه بدست آمده برای نصب منابع تولید پراکنده در تمام سناریوها با بودجه برابر یکسان بدست آمده و تقریباً ظرفیت‌های بهینه بدست آمده کمی باهم متفاوت می‌باشد.
- نتایج تأکید دارند که مدل پیشنهادی نه تنها از نظر ریاضی دقیق و محدب است، بلکه از نظر محاسباتی نیز کارآمدتر از روش‌های فراابتکاری رایج عمل می‌کند.
- با توجه به آنالیز حساسیت می‌توان گفت، مدل پیشنهادی در برابر تغییرات پارامترهای کلیدی پایدار و قابل اعتماد است.

جهت پیشنهادهای آتی می‌توان برای مدلسازی خودروهای الکتریکی، تأثیر تخریب تدریجی باتری‌ها (افزودن هزینه‌های وابسته به چرخه‌های شارژ/دشارژ یا مدلسازی کاهش ظرفیت تدریجی باتری) لحاظ شود. همچنین برای مدلسازی دقیقتر منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر جهت دستیابی به نتایج دقیق تر، عدم قطعیت در تولید (با استفاده از روش‌های تصادفی همچون مونت کارلو) در نظر گرفته شود.

References

- [1] Shafiee, M. (2023). *Economic Design of a Hybrid Wind-solar Power Plant Based on the Energy Storage System with Consideration of the Equivalent Loss Factor*. Karafan Journal, 20(3), 287-310. <https://doi.org/10.48301/kssa.2023.398615.2564>
- [2] Alimohamadi, H., Zeinali Davarani, R., & Shafiee, M. (2023). *Investigating the Feasibility of Increasing the Participation of Solar Power Plants in Supplying Load during the Peak Hours of the Day*. Karafan Journal, 20(1), 13-30. <https://doi.org/10.48301/kssa.2023.365108.2313>
- [3] Niazi, Y., Golshan, M. E. H., & Alhelou, H. H. (2021). *Combined firm and renewable distributed generation and reactive power planning*. IEEE Access, 9, 133735-133745. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3115151>
- [4] Mourinho, F. A., & Assis, T. M. L. (2022). *A new approach to retrofit plans for distributed energy resources to mitigate adverse impacts on bulk power systems stability*. IEEE Latin America Transactions, 20(4), 669-676. <https://doi.org/10.1109/TLA.2022.9675473>
- [5] Xu, X., Xue, F., Wang, X., Lu, S., Jiang, L., & Gao, C. (2020). *Upgrading conventional distribution networks by actively planning distributed generation based on virtual microgrids*. IEEE Systems Journal, 15(2), 2607-2618. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.2999560>
- [6] Da Silva, E. C., Melgar-Dominguez, O. D., & Romero, R. (2021). *Simultaneous distributed generation and electric vehicles hosting capacity assessment in electric distribution systems*. IEEE Access, 9, 110927-110939. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3102684>
- [7] De Lima, T. D., Franco, J. F., Lezama, F., & Soares, J. (2022). *A specialized long-term distribution system expansion planning method with the integration of distributed energy resources*. IEEE Access, 10, 19133-19148. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3146799>

- [8] Ranjbar, H., Hosseini, S. H., & Zareipour, H. (2021). *Resiliency-oriented planning of transmission systems and distributed energy resources*. IEEE transactions on power systems, 36(5), 4114-4125. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3065395>
- [9] Purlu, M., & Turkay, B. E. (2022). *Optimal allocation of renewable distributed generations using heuristic methods to minimize annual energy losses and voltage deviation index*. IEEE Access, 10, 21455-21474. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3153042>
- [10] Huang, Y., Lin, Z., Liu, X., Yang, L., Dan, Y., Zhu, Y., Ding, Y., & Wang, Q. (2021). *Bi-level coordinated planning of active distribution network considering demand response resources and severely restricted scenarios*. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 9(5), 1088-1100. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2020.000335>
- [11] Ali, A., Keerio, M., & Laghari, J. (2020). *Optimal site and size of distributed generation allocation in radial distribution network using multi-objective optimization*. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 9(2), 404-415. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2019.000055>
- [12] Habibi Saraskanroud, K., & Zahedi, A. (2023). *Techno-Economic Analysis of a Stand-Alone Hybrid Wind Energy System with Fuel Cell Case Study: Kouhin Region in Qazvin*. Energy Engineering and Management, 8(1), 30-39. <https://doi.org/10.22052/8.1.30>
- [13] Halve, S. S., Arya, R., & Koshti, A. (2023). *Locating, optimal sizing and reliability analysis of solar based DGs in radial distribution system*. Journal of The Institution of Engineers (India): Series B, 104(1), 201-213. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3102684>
- [14] Rahimi, I., Nikoo, M. R., & Gandomi, A. H. (2023). *Techno-economic analysis for using hybrid wind and solar energies in Australia*. Energy Strategy Reviews, 47, 101092. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101092>
- [15] Gümüş, T. E., Emiroglu, S., & Yalcin, M. A. (2023). *Optimal DG allocation and sizing in distribution systems with Thevenin based impedance stability index*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 144, 108555. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108555>
- [16] Le, T. S., Nguyen, T. N., Bui, D.-K., & Ngo, T. D. (2023). *Optimal sizing of renewable energy storage: A techno-economic analysis of hydrogen, battery and hybrid systems considering degradation and seasonal storage*. Applied Energy, 336, 120817. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120817>
- [17] Ahmad, A., & Khan, J. Y. (2022). *Optimal sizing and management of distributed energy resources in smart buildings*. Energy, 244, 123110. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123110>
- [18] Subbaramaiah, K., & Sujatha, P. (2023). *Optimal DG unit placement in distribution networks by multi-objective whale optimization algorithm & its techno-economic analysis*. Electric Power Systems Research, 214, 108869. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108869>
- [19] Ramadan, A., Ebeed, M., Kamel, S., Ahmed, E. M., & Tostado-Véliz, M. (2023). *Optimal allocation of renewable DGs using artificial hummingbird algorithm under uncertainty conditions*. Ain Shams Engineering Journal, 14(2), 101872. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101872>

- [20] Sellami, R., Farooq, S., & Rafik, N. (2022). *An improved MOPSO algorithm for optimal sizing & placement of distributed generation: A case study of the Tunisian offshore distribution network (ASHTART)*. Energy Reports, 8, 6960-6975. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.05.049>
- [21] Djidimbélé, R., Ngoussandou, B.-P., Kidmo, D. K., Bajaj, M., & Raidandi, D. (2022). *Optimal sizing of hybrid Systems for Power loss Reduction and Voltage improvement using PSO algorithm: Case study of Guissia Rural Grid*. Energy Reports, 8, 86-95. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.06.093>
- [22] Shawon, S. M. R. H., Liang, X., & Janbakhsh, M. (2023). *Optimal placement of distributed generation units for microgrid planning in distribution networks*. IEEE Transactions on Industry Applications, 59(3), 2785-2795. <https://doi.org/10.1109/TIA.2023.3236363>
- [23] Kumar, P., Swarnkar, N. K., Ali, A., Mahela, O. P., Khan, B., Anand, D., & Brito Ballester, J. (2023). *Transmission network loss reduction and voltage profile improvement using network restructuring and optimal dg placement*. Sustainability, 15(2), 976. <https://doi.org/10.3390/su15020976>
- [24] Khenissi, I., Guesmi, T., Marouani, I., Alshammari, B. M., Alqunun, K., Albadran, S., Rahmani, S., & Neji, R. (2023). *Energy Management Strategy for Optimal Sizing and Siting of PVDG-BES Systems under Fixed and Intermittent Load Consumption Profile*. Sustainability, 15(2), 1004. <https://doi.org/10.3390/su15021004>
- [25] <https://iee-dataport.org/keywords/33-bus>.