Journal of **N**ovel **R**esearches on **S**mart **P**ower **S**ystems - Vol. 14 - No. 1 – Spring 2025
P-ISSN: 2322-2468, E-ISSN: 2981-0272, https://jeps.dezful.iau.ir/

Research Article

The Strategy of Managing the Influence of Electric Vehicles along with Demand Response Loads in the Electricity Distribution Network with the Aim of Reducing Operating Costs and Improving Network Losses and Voltage Drop

Hamed Niahosseini[1], *PhD student,* Mohammad JafariFar[2], *Assiastant Professor*

[1] Department of Electrical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran
Hamednh5054@gmail.com
[2] Department of Electrical Engineering, Andimeshk Branch, Islamic Azad University, Andimeshk, Iran
Mohammad.jafarifar@gmail.com

Abstract

The advancement of technology, especially battery technology, on the one hand, and the pollution of big cities and the depletion of fossil fuels, on the other hand, have caused the world's major automobile companies to pay more attention to electric vehicles. Electricity distribution networks are not designed to connect this amount of electric vehicles. Therefore, the high penetration of electric vehicles in the distribution network not only increases the energy supply cost of the network user, but also negatively affects various parameters of the network, including losses and voltage drop. In this paper, an optimal management strategy is proposed which turns this challenge into an opportunity for the operator of the distribution network. In other words, with the two tools of responsive load management and electric vehicle charging and discharging strategy management proposed in this paper, not only the penetration level of electric vehicles in the distribution network has increased and the need for network development has been postponed, but also the management of this Cars have reduced losses and improved voltage drop in the network. The proposed strategy has been applied by Games software on IEEE standard network and its results have been evaluated.

Keywords: electric vehicle management, power distribution network, energy loss, optimization, voltage drop, responsive loads

Received: 1 Jan. 2025
Revised: 8 Apr. 2025
Accepted: 13 Apr. 2025

*** Corresponding Author:** Dr. Mohammad Jafarifar

Citation: H. Nia Hosseini, M, Jafari Far, "The Strategy of Managing the Influence of Electric Vehicles along with Demand Response Loads in the Electricity Distribution Network with the Aim of Reducing Operating Costs and Improving Network Losses and Voltage Drop", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 14, no. 1, 9-32, June 2025 (in Persian).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.519]

مقاله پژوهشی

استراتژی مدیریت نفوذ خودروهای الکتریکی در کنار بارهای پاسخگو در شبکه توزیع برق با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و بهبود تلفات و افت ولتاژ شبکه

حامد نیاحسینی[۱]، محمد جعفری‌فر[۲]

۱- دانشکده مهندسی برق، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران, Hamednh5054@gmail.com
۲- دانشکده مهندسی برق، واحد اندیمشک، دانشگاه آزاد اسلامی، اندیمشک، ایران, mohammad.jafarifar@gmail.com

چکیده: پیشرفت تکنولوژی به‌ویژه تکنولوژی باتری‌ها از یک سو و آلودگی کلان‌شهرها و رو به پایان بودن سوخت‌های فسیلی از سوی دیگر باعث توجه بیش از پیش شرکت‌های بزرگ خودروسازی دنیا به خودروهای الکتریکی شده است. شبکه‌های توزیع برق برای اتصال این حجم از خودروهای الکتریکی طراحی نشده‌اند. لذا نفوذ بالای خودروهای الکتریکی در شبکه توزیع نه تنها باعث افزایش هزینه تأمین انرژی بهره‌بردار شبکه می‌شود، بلکه پارامترهای مختلف شبکه از جمله تلفات و افت ولتاژ را نیز تحت تأثیر منفی قرار می‌دهد. در این مقاله یک استراتژی مدیریتی بهینه پیشنهاد شده است که این چالش را به فرصتی برای بهره‌بردار شبکه توزیع تبدیل می‌کند. به عبارت دیگر، با دو ابزار مدیریت بارهای پاسخگو و مدیریت استراتژی شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی که در این مقاله پیشنهاد شده است، نه تنها سطح نفوذ خودروهای الکتریکی در شبکه توزیع افزایش یافته است و نیاز به توسعه شبکه به تعویق افتاده، بلکه مدیریت این خودروها باعث کاهش تلفات و بهبود افت ولتاژ در شبکه نیز شده است. استراتژی پیشنهادی توسط نرم افزار گمز بر روی شبکه استاندارد IEEE اعمال و نتایج آن مورد ارزیابی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: مدیریت خودروهای الکتریکی، شبکه توزیع برق، تلفات انرژی، بهینه‌سازی، افت ولتاژ، بارهای پاسخگو

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱/۲۵

* **نام نویسنده مسئول:** دکتر محمد جعفری‌فر
نشانی نویسنده مسئول: اندیمشک-بلوار دانشجو- دانشگاه آزاد اسلامی واحد اندیمشک-گروه مهندسی برق

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.519]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

۱- مقدمه

صنعت خودروسازی یکی از صنایع پیشرو در دنیا است که نقش قابل توجهی در افزایش رفاه اجتماعی بشر دارد. هر ساله میلیون‌ها خودرو توسط شرکت‌های بزرگ خودروسازی در دنیا ساخته می‌شود که دارای موتور احتراق داخلی بوده و توسط سوخت‌های فسیلی انرژی خود را تأمین می‌کنند. لذا این خودروها موجب انتشار گازهای گلخانه‌ای و تشدید آلودگی هوا و بحث مربوط به گرمایش کره زمین می‌شوند. بخش قابل توجهی از آلودگی ایجاد شده در کلان‌شهرها مربوط به بخش حمل و نقل است. جایگزینی موتورهای احتراق داخلی با موتورهای الکتریکی و ساخت خودروهای برقی از مهم‌ترین راهکارهای بخش حمل و نقل برای برون رفت از مشکلات بیان شده است. خودروهای الکتریکی (EVs) انرژی را در باتری خود ذخیره می‌کنند و توسط موتور الکتریکی، آن را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند. با استفاده از مبدل‌های دو طرفه امکان فعالیت EVs در چهار ربع توان ممکن است. به بیان دیگر EVs می‌توانند انرژی را از شبکه دریافت کرده و بصورت اتصال شبکه به خودرو[1] (G2V) کار کنند و هم‌چنین امکان تزریق توان به شبکه و عملکرد به صورت خودرو به شبکه[2] (V2G) را دارند [۱].

نفوذ EVs با همه مزایایی که دارند، مشکلات بزرگی را برای شبکه‌های توزیع بوجود آورده است. از آن‌جایی‌که زمان شارژ EVs در شبکه توزیع با پیک شبکه هم‌پوشانی دارد و شبکه‌های توزیع نیز برای این بار جدید طراحی نشده‌اند، نفوذ مدیریت نشده EVs موجب پرشدگی خطوط و ترانسفورماتورها، افزایش هزینه تأمین انرژی، افزایش تلفات، افزایش افت ولتاژ و ... می‌شود. با توجه به روبه رشد بودن استفاده از EVs، در صورتی‌که راهکار مناسبی برای مدیریت این بارهای جدید در شبکه توزیع در نظر گرفته نشود، شبکه توزیع قطعاً با مشکلات جدی پایداری مواجه می‌شود [۲].

در بسیاری از مقالات راهکارهایی به‌منظور حل این چالش‌ها ارائه شده است. شارژ EVs، با هدف کاهش واریانس بار شبکه توزیع در مقاله [۳] بیان شده است. عدم قطعیت خطای پیش‌بینی بار نیز در این مقاله در نظر گرفته شده است و این طرح تا حدودی اثرات شارژ مدیریت نشده را کاهش داده و شارژ خودروها را به زمان کم‌باری شبکه منتقل می‌کند. بررسی تاثیر نفوذ EVs در شبکه توزیع و اثر آن بر تلفات و مشخصه ولتاژ در مقاله [۴] بیان شده است. در این مقاله نشان داده شده است که عدم هماهنگی در شارژ EVs تأثیر قابل توجهی بر قابلیت اطمینان عرضه توان در شبکه توزیع دارد. استفاده از تولیدات توزیع شده در کنار پارکینگ‌های شارژ EVs در مرجع [۵] مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش برای رفع مشکلات ایجاد شده از نفوذ EVs، استفاده از منابع تولید پراکنده پیشنهاد شده است. این طرح علی‌رغم کاهش افت ولتاژ، نیاز به طرح توسعه شبکه با جایابی تولیدات پراکنده دارد و ضمناً هزینه تأمین انرژی را نیز افزایش می‌دهد. بررسی شارژ EVs در یک ائتلافی از شبکه‌های هوشمند و بررسی اثر آن‌ها بر افت ولتاژ شبکه در مقاله [۶] مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله نشان داده است که شارژ مدیریت شده اثر قابل توجهی بر تجارت انرژی در ائتلاف دارد و افت ولتاژ را نیز کاهش می‌دهد. در مرجع [۷] رابطه بین تلفات شبکه، واریانس بار و میزان انرژی دریافتی توسط EVs مورد مطالعه قرار گرفته است. قیمت‌گذاری پویا برای مشارکت بارهای پاسخگو (DR)[3] در کنار منابع ذخیره‌ساز انرژی در یک شبکه خانگی در مرجع [۸] پیشنهاد شده است. در این طرح، یک مدل خطی آمیخته با عدد صحیح معرفی و مدل‌سازی منابع ذخیره‌ساز و DR معرفی شده است. طرح مدیریت شارژ در پارکینگ‌های عمومی خودروهای الکتریکی در [۹] ارائه شده است. این طرح با هدف حداقل کردن هزینه تأمین انرژی برای صاحب پارکینگ توسعه یافته است. بر اساس نتایج، به حداکثر رساندن تعداد خودورها برای شارژ که با موقعیت‌یابی مناسب پارکینگ محقق می‌شود موجب به حداقل رساندن هزینه‌های پولی می‌شود. یک مدل کنترلی مبتنی بر کنترل‌کننده پیش‌بین برای اتصال و برنامه‌ریزی EVs در مقاله [۱۰]، بیان شده است. در این مقاله هزینه شارژ و هزینه تولید انرژی مورد توجه قرار گرفته است. در مرجع [۱۱]، یک کار متفاوت برای یافتن ایستگاه شارژ بهینه توسط یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه مطرح شده است. در این مقاله، هدف یافتن ایستگاه با کم‌ترین زمان شارژ، کم‌ترین زمان

[1] Grid to Vehicle
[2] Vehicle to Grid
[3] Demand Response

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.519]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

سفر و کم‌ترین هزینه انرژی است. مطابق نتایج راهکار بیان شده به میزان قابل توجهی زمان انتظار و هزینه شارژ را کاهش می‌دهد. استراتژی برای مشارکت DR در شبکه هوشمند در [۱۲] بیان شده است. در این مقاله مفهوم قیمت‌گذاری تجمعی از طریق ارتباط آنلاین مشترکین برای اطلاع‌رسانی قیمت برق و مشارکت مشترکین در برنامه‌های پاسخگویی بار پیشنهاد شده است. روش هوشمندی برای کاهش هزینه شارژ خودروهای الکتریکی و پیک‌سایی شبکه در مرجع [۱۳] پیشنهاد شده است. در این طرح روابط بین توان قابل قبول برای شارژ و درصدی از باتری که شارژ شده است (وضعیت شارژ[4]) مدنظر قرار گرفته است. مدیریت انرژی دوسطحی برای مدیریت EVs متصل شده به شبکه توزیع در مرجع [۱۴] معرفی شده است. این طرح از یکپارچه‌سازی EVs در جهت پشتیبانی توان اکتیو و راکتیو شبکه استفاده می‌کند.

افزایش استفاده از خودروهای الکتریکی (EVs) در دهه اخیر، به‌دلیل مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی، به یکی از روندهای اصلی در صنعت حمل‌ونقل تبدیل شده است. با این‌حال، نفوذ بالای خودروهای الکتریکی چالش‌های قابل‌توجهی برای شبکه‌های توزیع برق ایجاد کرده است، از جمله اضافه‌بار شبکه، افزایش تلفات انرژی، افت ولتاژ، و نامتعادلی فازها. این چالش‌ها می‌توانند پایداری و کارایی شبکه را تهدید کنند، به‌ویژه در شبکه‌های توزیع شهری با ظرفیت محدود. برای مقابله با این مشکلات، استراتژی‌های مدیریت تقاضا (DR) به‌عنوان ابزاری مؤثر برای تنظیم الگوهای مصرف بارهای مسکونی و کاهش پیک بار پیشنهاد شده‌اند. علاوه بر این، مدیریت شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی (Grid-to-Vehicle, G2V و Vehicle-to-Grid, V2G) امکان استفاده از باتری‌های خودروها به‌عنوان منابع ذخیره‌سازی انرژی را فراهم می‌کند، که می‌تواند پایداری شبکه را بهبود بخشد.

این مقاله یک استراتژی ترکیبی را پیشنهاد می‌کند که با ترکیب مدیریت بارهای پاسخگو و شارژ/دشارژ بهینه خودروهای الکتریکی، نه‌تنها هزینه‌های بهره‌برداری شبکه را کاهش می‌دهد، بلکه تلفات انرژی، افت ولتاژ و نامتعادلی فازها را بهبود می‌بخشد. این استراتژی با استفاده از بهینه‌سازی چند هدفه و روش پارتو طراحی شده و بر روی شبکه استاندارد ۳۷ باس IEEE پیاده‌سازی شده است. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که بهینه‌سازی توان راکتیو در شبکه‌های توزیع با بارهای پویا می‌تواند به کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ کمک کند [۱۵]. هم‌چنین، برنامه‌ریزی توان با در نظرگرفتن عدم‌قطعیت‌های بار و استفاده از روش‌های بهینه‌سازی چند هدفه، رویکردی مؤثر برای مدیریت شبکه‌های توزیع مدرن است [۱۶]. علاوه بر این، تحلیل پایداری شبکه‌های توزیع با نفوذ بالای منابع تولید پراکنده و مدیریت تقاضا نشان‌دهنده اهمیت هماهنگی بین منابع مختلف برای حفظ پایداری شبکه است [۱۷].

در این مقاله استراتژی مدیریتی بهینه برای حل مشکلات نفوذ EVs در شبکه توزیع پیشنهاد می‌شود. این طرح بدون نیاز به صرف هزینه‌های بالا برای ارتقا شبکه، امکان اتصال EVs به شبکه توزیع را فراهم می‌کند. علاوه بر این، طرح پیشنهادی به‌گونه‌ای مدل‌سازی می‌شود که با مدیریت صحیح V2G و G2V خودروهای الکتریکی در کنار DR، امکان بهبود پارامترهای اقتصادی و فنی شبکه را نیز فراهم سازد. به بیان ساده‌تر، چالش حضور EVs را به فرصت برای ارتقا شبکه توزیع از جنبه‌های مختلف تبدیل می‌کند. از آن‌جایی‌که خودروهای در پارکینگ‌های خانگی و تک فاز به شبکه متصل می‌شوند، نامتعادلی ولتاژ بین فازهای مختلف را بوجود می‌آورند. این نامتعادلی با طرح پیشنهادی کاهش یافته و در کنار آن افت ولتاژ شبکه به ویژه در باس‌های انتهایی نیز علی‌رغم اتصال خودروهای بیش‌تر به شبکه، بهبود می‌یابد. مسطح کردن منحنی بار و در نتیجه کاهش پیک شبکه، کاهش تلفات و کاهش هزینه بهره‌برداری نیز از دیگر اهداف مهمی است که در مدل پیشنهادی محقق خواهد شد.

۲- طرح مدیریت شارژ و دشارژ EVs و DR

برای ارائه راهکار مناسب، در ابتدا تابع هدف و محدودیت‌های مسئله باید به‌صورت پارامتری بیان شود. در ساختار پیشنهادی، بخش‌های مختلف شبکه، DR و EVs در ذیل مسئله بهینه‌سازی مدل شده‌اند. متغیرهای تصمیم در نهایت به‌گونه‌ای انتخاب می‌شوند که تابع هدف کیمنه شده و تمام محدودیت‌های مسئله نیز برآورده شوند. برای مسطح کردن منحنی بار و پیک سایی در روش پیشنهادی در کنار استراتژی مدیریت V2G و G2V خودروهای الکتریکی، مدیریت DR نیز مورد توجه قرار گرفته است. این مدل

[4] State of Charge

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.519]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

به بارهای این فرصت را می‌دهد تا در قبال دریافت مشوق‌هایی میزان مصرف خود را به‌منظور بهبود پارامترهای شبکه، کاهش یا به ساعات دیگر منتقل کنند. برای ارائه استراتژی مدیریت V2G و G2V خودروهای الکتریکی، فرض‌های زیر مدنظر قرار گرفته است:

۱. EVs در مالکیت مشترکین شبکه هستند و برای شارژ و دشارژ در پارکینگ‌های خانگی به شبکه توزیع متصل می‌شوند.
۲. مالکین، پس از استفاده از EVs، آن‌ها را به پارکینگ‌ها انتقال داده و به شبکه متصل می‌کنند.
۳. خودروها در طول یک شبانه روز تنها یک مرتبه به شبکه توزیع متصل شده و آماده شارژ یا دشارژ می‌شوند.

۲-۱ تابع هدف مسئله بهینه‌سازی

چهار هدف اصلی برای ساختار مدیریتی پیشنهادی موردتوجه است که در ادامه بیان شده است:

۱. مینیمم کردن هزینه تأمین انرژی الکتریکی مشترکین در شبکه توزیع
۲. مینیمم کردن هزینه تأمین انرژی EVs
۳. مینیمم کردن هزینه تلفات شبکه
۴. مینیمم کردن انحراف دامنه ولتاژ هر فاز از مقدار اسمی

مدل ریاضی تابع هدف با توجه به اهداف فوق به دو بخش اقتصادی و فنی تقسیم می‌شود.

۲-۱-۱ تابع هدف اقتصادی

مدل ریاضی تابع هدف اقتصادی (EOC) در رابطه (۱) بیان شده است:

$$EOF = \sum_{t\in N_t}\left[\sum_{l\in N_L}\tau^t * P_L^{t,l} + \sum_{e\in N_e}\tau^t * P_{EV}^{t,e} + \tau^t * P_{Loss}^t + \sum_{l\in N_l}\rho^t * P_{DR}^{t,l}\right] \quad (۱)$$

EOF، شامل چهار بخش اصلی است. بخش اول هزینه تأمین بار خالص مصرفی مشترکین است. این بخش به میزان توان مصرفی خالص هر مشترک بعد از مشارکت در برنامه DR و قیمت برق وابسته است. بخش دوم تابع هدف EOF، هزینه تأمین توان الکتریکی موردنیاز برای شارژ EVs است. این بخش از تابع هدف می‌تواند مثبت یا منفی باشد. به‌عبارت دیگر، اگر خودروی الکتریکی در حالت G2V باشد، لذا در حال شارژ و دریافت توان از شبکه است و این ترم از تابع هزینه مثبت است. اما اگر خودروی الکتریکی در حالت V2G باشد و به شبکه توان تزریق کند، این بخش از تابع هزینه منفی می‌شود. بخش سوم تابع هدف EOF، هزینه تلفات سیستم است. که وابسته به میزان تلفات شبکه و قیمت برق است. در نهایت بخش آخر EOF هزینه تشویقی پرداختی به مشترکین برای مشارکت در برنامه DR است که وابسته به میزان مشارکت هر مشترک در برنامه پاسخگویی بار است. حالت V2G خودروهای الکتریکی برای استفاده از انرژی ذخیره شده در EVs متصل به شبکه در جهت کاهش هزینه تأمین انرژی و افزایش سطح نفوذ خودروها استفاده شده است. با توجه به پخش بار شبکه، میزان تلفات کل سیستم از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$P_{Loss}^t = \sum_{ph\in N_{ph}}\sum_{n\in N_n}(P_G^{n,pht} - P_D^{n,pht}) \quad (۲)$$

۲-۱-۲- تابع هدف فنی

این بخش از تابع هدف به‌منظور بهبود افت ولتاژ باس‌ها و نامتعادلی بین فازهای مختلف با نزدیک کردن مقدار دامنه هر فاز به مقدار نامی است. این تابع هدف می‌کوشد که تا حد امکان مقدار انحراف ولتاژ باس‌ها از مقدار نامی را کاهش دهد. تابع هدف فنی سیستم در (۳) بیان شده است:

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.519]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No.1- Spring2025

$$VOF = \sum_{t\in N_t}\sum_{\varphi\in N_{ph}}\sum_{n\in N_n}\left|V^{n,ph,t} - V_{ref}\right| \quad (۳)$$

۲-۲- محدودیت‌های اعمال شده در مدل پیشنهادی

پاسخ بهینه در صورتی معتبر است که کلیه قیود شبکه را نیز برآورده کند. این محدودیت‌ها در ادامه شرح داده شده اند.

۲-۲-۱- قیود پخش توان در هر یک از باس‌های شبکه

اصل پایدای در شبکه قدرت تعادل بین تولید و مصرف در شبکه است. در شبکه‌ها چندین ناحیه‌ای، این تعادل باید در هر باس شبکه برقرار باشد. توان اکتیو و راکتیو عبوری از باس n به باس m از روابط (۴) و (۵) محاسبه می‌شود [۱۸]:

$$P^{nm} = V^n V^m (G^{nm}\cos(\varphi^n - \varphi^m) + B^{nm}\sin(\varphi^n - \varphi^m)) \quad (۴)$$

$$Q^{nm} = V^n V^m (G^{nm}\sin(\varphi^n - \varphi^m) - B^{nm}\cos(\varphi^n - \varphi^m)) \quad (۵)$$

G^{nm} و B^{nm} به ترتیب درایه سطر nام و ستون mام ماتریس کندوکتانس و سوسپتانس شبکه توزیع است. توان مبادلاتی بین باس مورد مطالعه (n) با سایر باس‌هایی که به باس n متصل هستند به‌صورت روابط (۶) و (۷) محاسبه می‌شود:

$$P^{n,ph,t} = \sum_{\substack{m\in N_m\\ m\neq n}} V^{n,ph,t}\, V^{m,ph,t}\left(G^{n,m}\cos\left(\varphi^{n,ph,t} - \varphi^{m,ph,t}\right) + B^{n,m}\sin\left(\varphi^{n,ph,t} - \varphi^{m,ph,t}\right)\right) \quad (۶)$$

$$Q^{n,ph,t} = \sum_{\substack{m\in N_m\\ m\neq n}} V^{n,ph,t}\, V^{m,ph,t}\left(G^{n,m}\sin\left(\varphi^{n,ph,t} - \varphi^{m,ph,t}\right) - B^{n,m}\cos\left(\varphi^{n,ph,t} - \varphi^{m,ph,t}\right)\right) \quad (۷)$$

با محاسبه توان مبادلاتی بین باس‌ها، قید تعادل توان برای هر باس شبکه بصورت روابط (۸) و (۹) مدل می‌شود.

$$P^{n,ph,t} = P_G^{n,ph,t} - P_L^{n,ph,t} \quad (۸)$$

$$Q^{n,ph,t} = Q_G^{n,ph,t} - Q_L^{n,ph,t} \quad (۹)$$

مجموع مقدار توان موردتقاضا، مقدار توان مبادله شده بین شبکه و خودرو و میزان مشارکت بار در برنامه DR، مقدار مصرف هر باس را مشخص می‌کند که در روابط (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. مشترکین در کل باس‌های شبکه می‌توانند در برنامه DR شرکت کنند و در این باره محدودیتی ندارند.

$$P_L^{n,ph,t} = P_D^{n,ph,t} - P_{DR}^{n,ph,t} + \sum_{e\in N_e}\Lambda_1\Lambda_2 P_{EV}^{e,t} \quad (۱۰)$$

$$Q_L^{i,\varphi,t} = Q_D^{n,ph,t} - Q_{DR}^{n,ph,t} \quad (۱۱)$$

Λ_1 و Λ_2 به‌ترتیب ماتریس تلاقی فاز و خودروی الکتریکی و ماتریس تلاقی باس‌ها و EVs هستند.

۲-۲-۲- قیود خودرو الکتریکی

محدودیت‌های EVs به سه دسته تقسیم می‌شوند [۱۹]:

۱.محدودیت توان مبادله شده بین خودرو و شبکه که وابسته به مبدل بین خودرو و شبکه است.

۲.محدودیت فنی باتری خودرو الکتریکی که وابسته به مشخصات خودرو است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.519]

۳.تغییرات انرژی ذخیره شده در باتری EVs در ساعات مختلف بهره‌برداری که وابسته به میزان انرژی تزریق شده یا برداشت شده از باتری در هر ساعت است.

مقدار توان مبادله شده بین خودرو و شبکه برابر مقدار توان دریافتی از باتری خودرو منهای میزان تلفات مبدل است که به‌صورت رابطه (۱۲) بیان شده است.

$$P_{EV}^{e,t} = P_{batt}^{e,t} - P_{LE}^{e,t} \quad (۱۲)$$

P_{EV} توان مبادله شده بین خودرو و شبکه (ورودی مبدل) و P_{batt} توان خاص تزریق یا دریافت شده از باتری خودروی الکتریکی و P_{LE} تلفات مبدلی بین خودرو و شبکه است. توجه داشته باشید که $P_{EV}^{e,t}$ اگر خودروی الکتریکی در وضعیت شارژ باشد، به‌صورت P_{G2V} و اگر در وضعیت دشارژ باشد به‌صورت P_{V2G} است. لذا در هر ساعت برای هر خودرو همان‌طور در رابطه (۱۳) نشان داده شده است، داریم:

$$P_{EV}^{e,,t} = P_{G2V}^{e,t} - P_{V2G}^{e,t} \quad (۱۳)$$

با توجه به راندمان بین خودرو و شبکه (η_{EV})، میزات تلفات آن به‌صورت رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود:

$$P_{LE}^{E,t} = (1 - \eta_{EV})(P_{G2V}^{e,t} - P_{V2G}^{e,t}) \quad (۱۴)$$

با توجه به ظرفیت مبدل بین باتری و شبکه (ایستگاه شارژ)، حداکثر میزان توان مبادله شده توسط رابطه (۱۵) مدیریت می‌شود:

$$CE_{min}^{e} \le P_{batt}^{e,t} \le CE_{max}^{e} \quad (۱۵)$$

متغیر باینری $u_{EV}^{e,t}$ برای نشان دادن وضعیت V2G یا G2V خودرو در نظر گرفته شده است. این مقدار اگر یک باشد خودرو در وضعیت دشارژ و اگر صفر باشد در وضعیت شارژ قرار دارد.

$$0 \le P_{G2V}^{e,t} \le CB_{max}^{e}(1 - u_{EV}^{E,t}) \quad (۱۶)$$

$$0 \le P_{V2G}^{e,t} \le CB_{max}^{e}(u_{EV}^{E,t}) \quad (۱۷)$$

قیود مرتبط با تعادل انرژی در خودرو به صورت روابط (۱۸) و (۱۹) است. با توجه به این روابط، در صورتی‌که خودروی الکتریکی در حالت G2V باشد، میزان $W_{EV}^{e,t}$ در ساعت بعد افزایش می‌یابد و در طرف مقابل اگر در حالت V2G باشد، مقدار این انرژی کاهش می‌یابد.

$$W_{EV}^{e,t} = W_{EV}^{0} + P_{batt}^{e,t} \quad (۱۸)$$

$$W_{EV}^{e,t} = W_{EV}^{e,t-1} + P_{batt}^{e,t} \quad (۱۹)$$

بر اساس محدودیت‌های باتری، مقدار این انرژی در یک محدوده حداقل تا حداکثر قرار دارد که توسط رابطه (۲۰) بیان شده است:.

$$W_{min}^{e} \le W_{EV}^{E,t} \le CB_{max}^{e} \quad (۲۰)$$

۲-۲-۳- قیود برنامه پاسخگویی بار

در این مقاله، دو نوع برنامه پاسخگویی بار حساس به تغییرات قیمت ($P_{DR_trans}^{l,t}$) و حساس به تغییرات ولتاژ ($P_{DR_cut}^{l,t}$) در نظر گرفته شده است. در بار حساس به قیمت، در صورت بالا بودن قیمت در ساعت t (با توجه به الاستیسیته بار به تغییرات قیمت برق)، میزانی از بار الکتریکی (تا جایی‌که مدل اجازه می‌دهد) در آن ساعت به ساعات با قیمت پایین‌تر (t') منتقل می‌شود [۲۰]. بار حساس

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.519]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

به ولتاژ به‌صورت بار قطع شونده در نظر گرفته شده است. در صورت کاهش ولتاژ در باس قرارگیری بار پاسخگو، با توجه به میزان انحراف ولتاژ از مقدار نامی، بار الکتریکی (تا جایی که مدل اجازه می‌دهد) کاهش می‌یابد.

$$P_L^{l,t} = (1-\gamma_l)P_{DR0}^{l,t} + \gamma_l \left(\sum_{\substack{t' \in N_t \\ t \neq t'}} E_{DR}^{t\,t'} \frac{P_{DR0}^{l,t}}{\tau^{t'}} \left(\tau^t - \tau^{t'}\right) * k1 + \left(V^{l,t} - V_{ref}\right) * k2 \right) \quad (۲۱)$$

در رابطه (۲۱)، γ_l میزان پتانسیل پیاده‌سازی برنامه DR در بار l است. متغیرهای باینری $k2$ و $k1$ به‌ترتیب نوع بار پاسخگوی حساس به قیمت و حساس به ولتاژ را نشان می‌دهند. همان‌طور که توضیح داده شده، برنامه پاسخگویی بار شامل دو نوع بار قابل انتقال به ساعات دیگر (بر اساس تغییرات قیمت) و قابل قطع (بر اساس تغییرات ولتاژ) است. مقدار بار قابل انتقال و قابل قطع در هر بار وابسته به نوع بار و زیرساخت‌های هر مشترک است. لذا مقدار بار قابل انتقال و قابل قطع در هر مشترک برای هر ساعت از برنامه ریزی توسط روابط (۲۲) و (۲۳) محدود می‌شود.

$$P_{tmin}^{l,t} \leq P_{DR_trans}^{l,t} \leq P_{tmax}^{l,t} \quad (۲۲)$$

$$P_{cmin}^{l,t} \leq P_{DR_cut}^{l,t} \leq P_{cmin}^{l,t} \quad (۲۳)$$

علاوه بر محدودیت بار پاسگخو برای هر مشترک، کل بار پاسخگوی شبکه نیز مقدار محدودی است. لذا پتانسیل DR باید به ساعت‌ها و مشترکینی اختصاص یابد که بازدهی بیش‌تری دارند. محدودیت بار پاسخگوی کل شبکه در روابط (۲۴) و (۲۵) مشخص شده است.

$$\sum_{l \in N_L} P_{DR_trans}^{l,t} \leq P_{tmax}^{total} \quad (۲۴)$$

$$\sum_{l \in N_L} P_{DR_cut}^{l,t} \leq P_{cmax}^{total} \quad (۲۵)$$

۲-۲-۴- محدودیت‌های فنی شبکه

این قیود بر اساس محدودیت‌های شبکه توزیع مورد مطالعه تعیین می‌شوند. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به حد مجاز ولتاژ باس‌ها و مقدار ظرفیت خطوط اشاره کرد که در روابط (۲۶) و (۲۷) مدل شده است.

$$V_{min}^n \leq V^{n,ph,t} \leq V_{min}^n \quad (۲۶)$$

$$\sqrt{(P^{nm,ph,t})^2)^2 + (Q^{nm,ph,t})^2} \leq CL_{max}^{nm} \quad (۲۷)$$

با توجه به توزیع تصادفی بار بین فازهای مختلف، برای جلوگیری از ناپایداری و کاهش نامتعادلی ولتاژ بین فازهای مختلف در طرح پیشنهادی، از محدودیت اختلاف ولتاژ بین فازها استفاده شده است. به عبارت دیگر اختلاف ولتاژ بین سه فاز a و b و c در شبکه توزیع سه فاز، بصورت روابط (۲۸) تا (۳۰) مدیریت می‌شود:

$$-\Delta_{ph} \leq \left|V^{n,a,t} - V^{n,b,t}\right| \leq \Delta_{ph} \quad (۲۸)$$

$$-\Delta_{ph} \leq \left|V^{n,a,t} - V^{n,c,t}\right| \leq \Delta_{ph} \quad (۲۹)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.519]

$$-\Delta_{ph} \le \left|V^{n,b,t} - V^{n,c,t}\right| \le \Delta_{ph} \quad (۳۰)$$

۲-۲-۵- محدودیت ظرفیت پست‌های شبکه توزیع

ظرفیت پست‌های موجود در شبکه توزیع که توان الکتریکی را از شبکه بالادست به شبکه توزیع منتقل می‌کنند، با توجه به ظرفیت تجهیزات آن‌ها مقدار محدودی است که توسط رابطه (۳۱) مدیریت می‌شود.

$$\sqrt{(P_G^{n,ph,t})^2 + (Q_G^{n,ph,t})^2} \le CG_{max}^{n,ph} \quad (۳۱)$$

۲-۳- روش حل دو مرحله‌ای مسئله پیشنهادی

روش پیشنهادی شامل دو مرحله است. در مرحله اول با استفاده از تکنیک قیود اپسیلونی و ایجاد یک مسئله بهینه سازی تک هدفه و در نظر گرفتن تابع هدف‌های دیگر به‌عنوان قیود تابع هدف اصلی، جواب‌های بهینه پارتو بدست می‌آیند. در مرحله دوم الگورتیم فازی بیشینه-کمینه برای سبک سنگین کردن جواب‌های به‌دست آمده به‌کار برده می‌شود. هر دو مرحله در ادامه مدل شده‌اند.

۲-۳-۱- مرحله اول (پیدا کردن جواب بهینه پارتو)

در مسائل چند هدفه، روش بهینگی پارتو برای بهینه‌سازی هم‌زمان تمامی تابع هدف‌ها استفاده می‌شود. روش قیود اپسیلونی یکی از روش‌های بهینه برای به‌دست آوردن جواب‌های بهینه پارتو است. در این تکنیک، با درنظر گرفتن یک تابع هدف به‌عنوان تابع هدف اصلی و قراردادن دیگر تابع هدف‌ها به‌عنوان قیود تابع هدف اصلی، جواب‌های بهینه پارتو بدست می‌آید [۲۱]. همان‌طور که گفته شد، تابع هدف دو سطحی شامل تابع هدف اقتصادی و تابع هدف فنی در این مقاله ارائه شده است. مدل‌سازی این تابع هدف دوسطحی به‌عنوان یک تابع هدف تک سطحی با استفاده از تکنیک قیود اپسیلونی در ادامه بیان شده است:

$$\begin{aligned} &OF = \min(EOF) \\ &s.t \\ &\begin{cases} VOF < \varepsilon \\ \text{تمام قیود مساوی و نامساوی} \end{cases} \end{aligned} \quad (۳۲)$$

۲-۳-۲- مرحله دوم (انتخاب بهترین جواب)

نکته مهم این است که یک جواب بهینه برای یک تابع هدف ممکن است برای دیگر تابع هدف‌ها جواب بهینه نباشد. برای سبک سنگین کردن بین تمامی جواب‌های به‌دست آمده روش فازی بیشنه-کمینه در ادامه توضیح داده شده است [۲۲]:

در ابتدا یک تابع عضویت $\mu^{f_k(X_n)}$ برای هر جواب پارتو (X_n) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu^{f_k(X_n)} = \begin{cases} 0 & f_k(X_n) > f_k^{max} \\ \dfrac{f_k^{min} - f_k(X_n)}{f_k^{min} - f_k^{max}} & f_k^{min} < f_k(X_n) < f_k^{max} \\ 1 & f_k(X_n) < f_k^{min} \end{cases} \quad (۳۳)$$

سپس به‌منظور حداکثر کردن حداقل رضایت میان تمام تابع هدف‌ها، رابطه زیر درنظر گرفته می‌شود.

$$max_{N=1}^{N_p}\left(min_{k=1}^{N_o}\left(\mu^{f_k(X_n)}\right)\right) \quad (۳۴)$$

مراحل یافتن پاسخ معادله فوق برای کمینه کردن دو تابع هدف EOF و VOF در ادامه شرح داده شده است.

گام اول: مقدار کمینه و بیشینه EOF و VOF در نظر گرفته می‌شود.

گام دوم: EOF به عنوان تابع هدف اصلی در نظر گرفته می‌شود.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.519]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

گام سوم: VOF به عنوان قید تابع هدف اصلی تعریف می‌شود.
گام چهارم: VOF از مقدار بیشینه خود تا مقدار کمینه تغییر می‌کند.
گام پنجم: با تغییر VOF، EOF نیز تغییر می‌کند.
گام ششم: جواب بهینه پارتو بدست می‌آید.
گام هفتم: VOF و EOF تنظیم می‌شوند.
گام هشتم: در هر تکرار کمترین مقدار VOF و EOF تعیین می‌شود.
گام نهم: بیشترین تکرار از کمترین جواب‌های بدست آمده، جواب مسئله است.

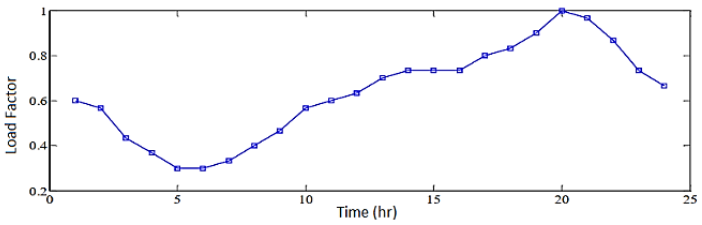
۳- شبیه سازی و نتایج عددی

این بخش، استراتژی پیشنهادی برای مدیریت نفوذ خودروهای الکتریکی (EVs) و بارهای پاسخگو (DR) را با استفاده از شبکه توزیع استاندارد ۳۷ باس IEEE اعتبارسنجی می‌کند. شبکه موردنظر با ولتاژ نامی ۴۰۰ ولت، توان پایه ۱۰۰ کیلوولت‌آمپر، و اتصال به شبکه بالادست از طریق یک پست با ظرفیت نامی ۸۰۰ کیلوولت‌آمپر طراحی شده است. محدوده مجاز ولتاژ باس‌ها بین ۰/۹ تا ۱/۰۵ پریونیت تعریف شده و بارهای مسکونی به‌صورت نامتعادل در فازهای سه‌گانه (a، b، c) توزیع شده‌اند، که منجر به نامتعادلی ولتاژ و افزایش افت ولتاژ در باس‌های انتهایی می‌شود. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار GAMS انجام شده و نتایج در سه سناریو مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. این نتایج از منظر پارامترهای فنی (افت ولتاژ، تلفات انرژی، و نامتعادلی فازها) و اقتصادی (هزینه تأمین انرژی) تحلیل شده‌اند.

۳-۱- معرفی شبکه تست

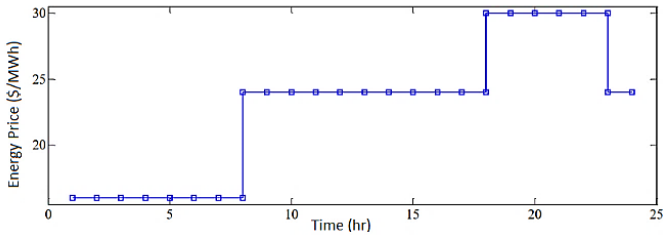
شبکه تست ۳۷ باس IEEE، که در شکل (۳) نشان داده شده است، شامل بارهای مسکونی با پارکینگ‌های خانگی برای اتصال خودروهای الکتریکی (EVs) است. ضریب بار ۲۴ ساعته شبکه در شکل (۱) ارائه شده است [۲۳]. ولتاژ نامی شبکه توزیع برابر ۴۰۰ ولت و توان مبنای آن 100kVA در نظر گرفته شده است. همان‌طورکه در شکل مشخص است، شبکه توسط یک پست با ظرفیت نامی 800 kVA به شبکه بالادست خود متصل شده است. محدوده بالا و پایین مجاز ولتاژ به‌ترتیب ۰/۹ پریونیت و ۱/۰۵ پریونیت درنظر گرفته شده است. بارهای مسکونی در این شبکه مطابق مرجع [۲۳] در باس‌های مختلف شبکه، توزیع شده‌اند. هر کدام از این بارهای مسکونی دارای پارکینگ‌های EVs هستند؛ خودروها از طریق این پارکینگ‌ها به شبکه توزیع متصل می‌شوند. بارها به‌صورت نامتعادل در فازهای مختلف توزیع شده‌اند که همین امر باعث نامتعادل شدن شبکه توزیع و افزایش نامتعادلی ولتاژ می‌شود.

پروفیل بار: در شکل ۱) ضریب بار در ۲۴ ساعت شبانه روز را نشان داده است. تأثیر هر دو تابع هدف با وزن یکسان درنظر گرفته شده است به‌عبارت دیگر در بهینگی پارتو مقدار رضایت‌مندی $\mu^{OF_1(X_n)} = 0.5$ و $\mu^{OF_2(X_n)} = 0.5$ است.



شکل ۱: ضریب بار ۲۴ ساعته شبکه مسکونی مورد مطالعه
Figure (1): 24-hour load factor of the residential network under study

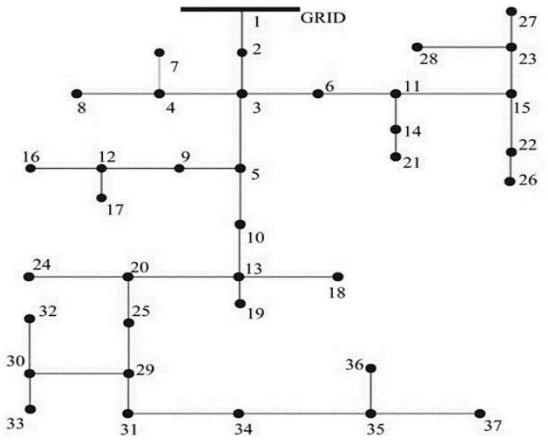
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.519]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025



شکل ۲: قیمت ساعتی خرید انرژی از شبکه بالادست

Figure (2): Hourly price of purchasing energy from the upstream network

قیمت‌گذاری انرژی: قیمت ساعت به ساعت خرید انرژی از شبکه بالا دست نیز در شکل ۲) مشخص شده است. مطابق این شکل، هرچه به ساعات پیک نزدیک‌تر می‌شویم قیمت خرید انرژی از شبکه بالادست افزایش می‌یابد. بار به سه تعرفه کم‌باری، پرباری و میان‌باری تقسیم شده است. لازم به‌ذکر است که قیمت انرژی بر اساس $/MWh است.



شکل ۳: ساختار شبکه تست ۳۷ باس استاندارد IEEE

Figure (3): structure of the IEEE standard 37-bus test network

ساختار شبکه: شکل (۳) توپولوژی شعاعی شبکه و اتصال آن به پست بالادست را نمایش می‌دهد.

وزن‌دهی اهداف: بهینه‌سازی با وزن برابر برای تابع هدف اقتصادی (EOF) و تابع هدف فنی (VOF) انجام شده تا تعادل بین کاهش هزینه‌ها و بهبود پارامترهای فنی حفظ شود.

۳-۲- معرفی خوردوهای الکتریکی

اطلاعات پیرامون EVs در شبکه تست در ادامه بصورت تفکیک شده بیان شده است.

۳-۲-۱- تعداد خودروها در شبکه توزیع

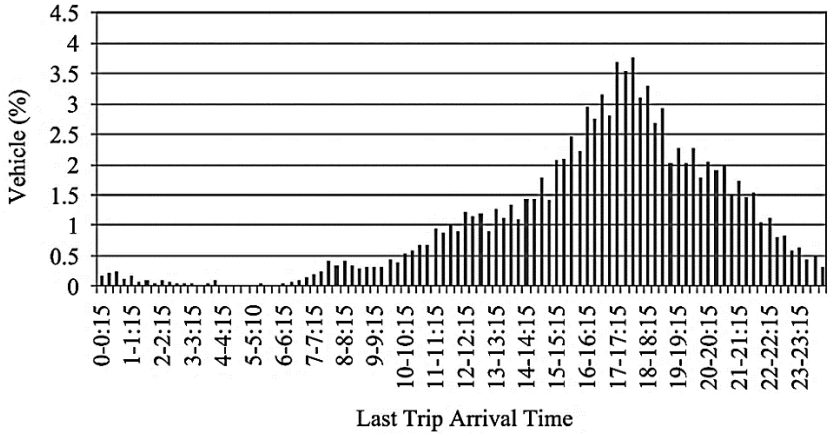
هر یک از ۲۵ باس دارای بار در شبکه، مجهز به دو خودروی الکتریکی است، که در مجموع ۱۵۰ خودروی الکتریکی را شامل می‌شود. این خودروها در پارکینگ‌های مسکونی توزیع شده‌اند و نشان‌دهنده یکپارچه‌سازی غیرمتمرکز در محیط‌های شهری هستند.

۳-۲-۲- ساعات اتصال EVs به شبکه

زمان ورود و خروج EVs به شبکه توزیع، وابسته به رفتار صاحبان این خودروهاست. برای به‌دست آوردن الگوی مناسب از زمان اتصال خودروها به شبکه با توجه به مرجع [۲۴] فرض شده است که در طول شبانه روز هر خودرو پس از آخرین استفاده به شبکه متصل می‌شود. این رفتار به‌صورت تصادفی مدل شده است. تابع چگالی احتمال مورد استفاده برای مدل‌سازی عدم قطعیت ورود و

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.519]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

خروج EVs، تابع چگالی احتمال نرمال است که در شکل ۴) نشان داده شده است. بر اساس این شکل اوج حضور EVs در شبکه با پیک شبکه هم‌پوشانی کامل دارد و زمان بیش‌ترین خروج EVs از شبکه از ساعت ۵ صبح تا ۱۰ صبح است.



شکل ۴: الگوی رفتاری از زمان ورود و خروج EVs در طول روز [۲۱]

Figure (4): A behavioral pattern of EVs entering and leaving during the day [21]

۳-۲-۳- مقدار انرژی مصرفی EVs در طول شبانه روز

مصرف انرژی خودروهای الکتریکی به مسافت طی‌شده وابسته است و با روابط (۳۵) و (۳۶) محاسبه می‌شود. وضعیت شارژ (SOC) انرژی موجود در باتری را نشان می‌دهد. به‌طور میانگین، هر خودرو روزانه ۲۰ تا ۳۰ مایل مسافت طی می‌کند، که با توزیع احتمال نرمال مدل‌سازی شده است [۲۱].

$$SOC = (1 - \frac{d}{Md}) \quad (۳۵)$$

$$\mathrm{EC} = (1 - \mathrm{SOC}).CE^{e}_{max} \quad (۳۶)$$

در این روابط d مقدار مسافت طی شده EVs و Md حداکثر مسافتی است که خودروی الکتریکی می‌تواند با یک بار شارژ کردن، طی کند. CE^{e}_{max} ظرفیت باتری و SOC وضعیت شارژ خودروی الکتریکی است که مقدار انرژی الکتریکی موجود در باتری خودرو را برای هر لحظه بیان می‌کند.

همان‌طورکه بیان شد، میزان انرژی الکتریکی در باتری خودروها وابسته به مسافت طی شده است. این مسافت نیز یکی از داده‌هایی است که به رفتار صاحبان خودروها وابسته است و توسط چگالی احتمال نرمال در مرجع [۲۱] مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق این مرجع هر خودروی الکتریکی به طور میانگین بین ۲۰ تا ۳۰ مایل را در طول شبانه روز طی می‌کند.

۳-۲-۴- اطلاعات باتری EVs

جدول (۱) مشخصات باتری شامل راندمان، ظرفیت، و حداکثر نرخ شارژ را ارائه می‌دهد. این پارامترها بر قابلیت‌های شارژ و دشارژ در استراتژی‌های G2V و V2G تأثیر می‌گذارند.

Table (1): EVs battery information [21]

جدول ۱: اطلاعات مربوط به باتری EVs [۲۱]

حداکثر نرخ شارژ EV	4.650 kVA
راندمان شارژ	0.92
ظرفیت باتری بر اساس مدل خودروها	15-35 kW
مدت زمان شارژ کامل	4.2 h

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.519]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

۳-۳- اطلاعات مربوط به بارهای پاسخگوی شبکه

جدول (۲) الاستیسیته قیمت و هزینه‌های تشویقی برای مشارکت در برنامه DR را به واحد دلار نشان می‌دهد. دو نوع DR در نظر گرفته شده است:

DR حساس به قیمت: انتقال بار از ساعات با قیمت بالا به ساعات کم‌باری بر اساس الاستیسیته قیمت.

DR حساس به ولتاژ: قطع بار در شرایط ولتاژ پایین برای حفظ پایداری شبکه.

Table (2): Cost of participating in the DR program (in $)

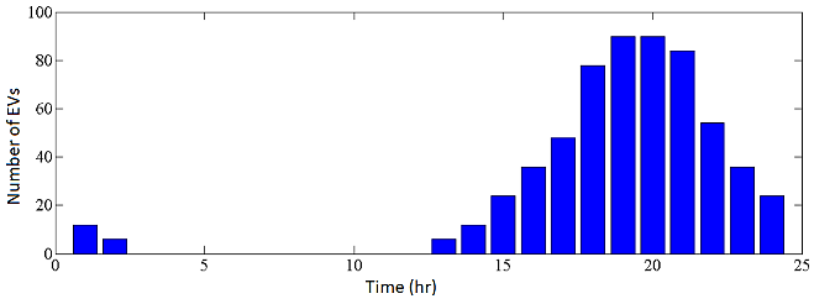
جدول ۲: هزینه مشارکت در برنامه DR (بر حسب $)

بازه انتقال بار	دوره پرباری	دوره میان باری	دوره کم باری
دوره پرباری	-0.101	0.160	0.123
دوره میان باری	0.162	-0.12	0.0101
دوره کم باری	0.122	0.013	-0.11

۳-۴- سناریوی اول: نفوذ مدیریت نشده خودروهای الکتریکی

این سناریو تأثیر نفوذ خودروهای الکتریکی را بدون مدیریت بررسی می‌کند و به‌عنوان مبنای مقایسه عمل می‌کند.

در این سناریو اثر نفوذ EVs در شبکه توزیع بدون درنظرگرفتن استراتژی پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است. براساس مشخصات باتری، هر خودرو پس از ۴ ساعت به‌طور کامل شارژ می‌شود. شکل زیر تعداد خودروهای متصل به شبکه را در ساعات مختلف نشان می‌دهد. قابل ذکر است که این تست بدون در نظر گرفتن شارژ و دشارژ خودروها و مدیریت DR انجام شده است.

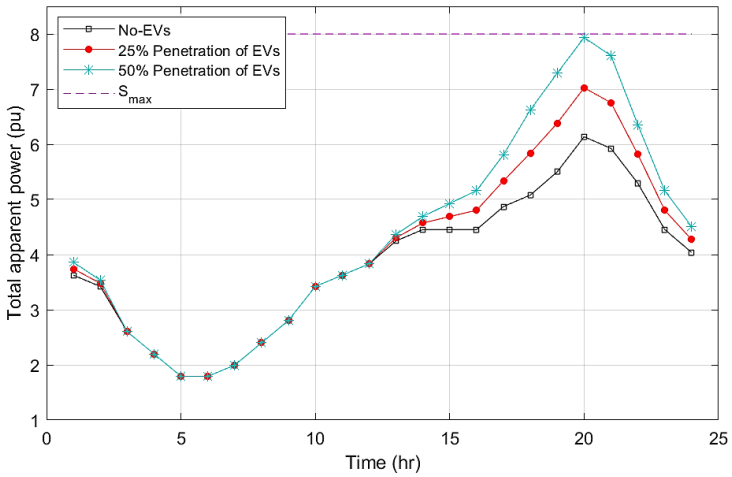


شکل ۵: تعداد خودرو متصل به شبکه در ساعات مختلف

Figure (5): Number of vehicles connected to the network at different times

در شکل (۶) میزان توان دریافتی شبکه توزیع از شبکه بالادست برای تأمین بار مصرفی و انرژی موردنیاز برای شارژ EVs در سه سطح نفوذ صفردرصد، ۲۵درصد و ۵۰درصد خودروها نشان داده شده است. براساس این شکل، از آن‌جایی‌که زمان حضور EVs در شبکه با پیک شبکه هم‌پوشانی دارد، در صورت عدم مدیریت نفوذ این خودروها و با توجه به محدودیت ظرفیت پست بالادست امکان اتصال تمام خودروها به شبکه وجود ندارد. به‌عبارت دیگر با توجه به ظرفیت پست بالادست (80 pu)، حداکثر ۷۵ خودرو در این سناریو می‌توانند به شبکه متصل شوند. همان‌طورکه در شکل ۶) مشخص است در ضریب نفوذ ۵۰درصدی EVs، کل ظرفیت شبکه پر شده است و این بدین معناست که با کوچک‌ترین تغییرات بار شبکه در آستانه خطر قرار می‌گیرد و در نتیجه قابلیت اطمینان بسیار کاهش می‌یابد. لذا در صورت عدم استفاده از استراتژی پیشنهادی از دید سطح نفوذ، امکان اتصال نیمی از خودروها به شبکه وجود ندارد و ظرفیت شبکه نیز به‌طور کامل پر شده می‌شود. برای اتصال خودروی الکتریکی بیش‌تر یا افزایش مقدار بار، لازم است ظرفیت شبکه ارتقا یابد که این امر مستلزم هزینه زیاد و صرف زمان کافیست.

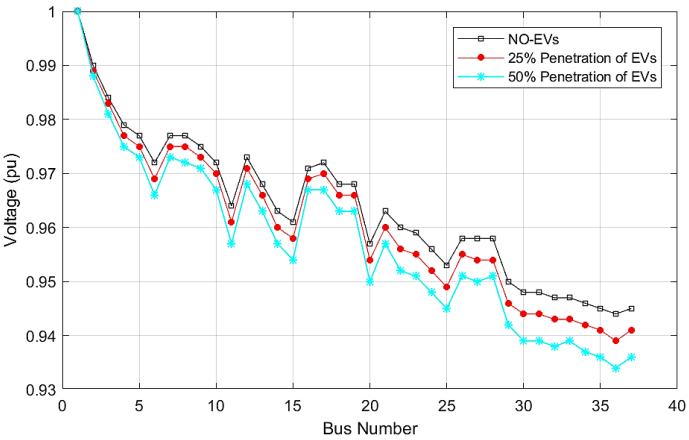
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.519]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025



شکل ۶: میزان توان دریافتی شبکه از شبکه بالادست در ضریب نفوذهای مختلف EVs

Figure (6): The amount of power received from the upstream network at different EV penetration rates

مطابق شکل ۶) با افزایش پیک شبکه و در نتیجه افزایش جریان عبوری از فیدرها انتظار می‌رود افت ولتاژ در باس‌های مختلف نیز افزایش یابد. اثر نفوذ EVs بر ولتاژ شبکه در باس‌های مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. لازم به‌ذکر است، باس شماره یک به‌عنوان باس اسلک در نظر گرفته شده است و ولتاژ آن یک پریونیت است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، افت ولتاژ با افزایش سطح نفوذ EVs به ویژه در باس‌های انتهایی بسیار بیش‌تر شده است به‌طوری‌که در بسیاری از باس‌ها از حداقل مجاز خارج شده است.



شکل ۷: مقدار پریونیت ولتاژ باس‌های مختلف شبکه در ضریب نفوذهای مختلف EVs

Figure (7): Per-unit voltage value of different network buses at different penetration rates of EVs

همان‌طورکه بیان شد، توزیع بارها در فازهای مختلف به‌صورت نامتعادل است. این نامتعادلی بارها، باعث نامتعادلی ولتاژ در فازهای مختلف می‌شود. شکل ۸)، مقدار دامنه ولتاژ فازهای مختلف در هر باس را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷) و شکل ۸) همان‌طورکه انتظار می‌رود بیش‌ترین افت ولتاژ مربوط به باس انتهای شبکه یعنی باس شماره ۳۶ است که از پست تغذیه بیش‌ترین فاصله را دارد.

در Table (3): Voltage imbalance between different phases on bus 36 at different vehicle penetration rates)

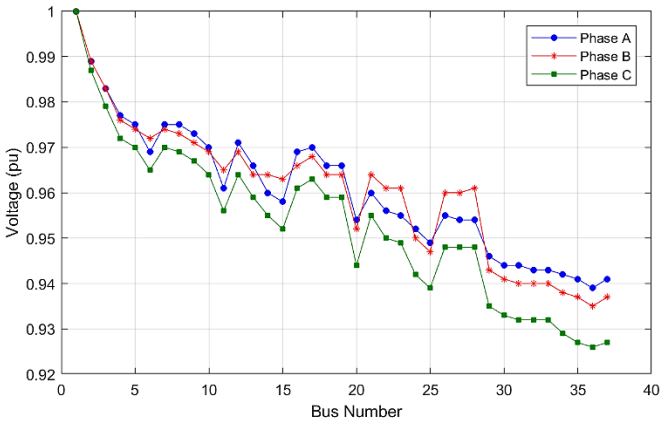
جدول ۳) اختلاف ولتاژ فازهای مختلف در باس شماره ۳۶ (بدترین باس) برای ضریب نفوذهای مختلف EVs نشان داده شده است. لازم به‌ذکر است در ادامه، این باس به‌عنوان باس مرجع برای بررسی اثر EVs بر شبکه مورداستفاده قرار می‌گیرد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.519]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

Table (3): Voltage imbalance between different phases on bus 36 at different vehicle penetration rates)

جدول ۳: نامتعادلی ولتاژ بین فازهای مختلف در باس ۳۶ در ضریب نفوذهای مختلف خودروها

اختلاف ولتاژ (V)	نفوذ 0%	نفوذ 25%	نفوذ 50%
AB	2.11	1.73	1.31
AC	5.212	5.35	5.70
BC	3.31	3.70	4.49



شکل ۸: دامنه ولتاژ در فازهای مختلف در هر یک از باس‌های شبکه

Figure (8): Voltage amplitude in different phases in each of the network buses

مقدار انرژی تلف شده در فیدرهای شبکه توزیع برای یک شبانه روز در جدول ۴) نشان داده شده است. مطابق این جدول و طبق انتظاری که می‌رفت، با افزایش سطح نفوذ EVs و در نتیجه افزایش جریان عبوری از فیدرها، تلفات انرژی نیز به‌میزان قابل توجهی افزایش یافته است.

Table (4): Total energy wasted (kWh) in the feeder over all hours of the day at different penetration rates of EVs

جدول ۴: مجموع انرژی تلف شده (kWh) در فیدر در کل ساعات شبانه روز در ضریب نفوذهای مختلف EVs

نفوذ 0%	نفوذ 25%	نفوذ 50%
39.10	47.82	58.03

با توجه به قیمت انرژی در ساعات مختلف برای تأمین انرژی موردنیاز بارهای مصرفی و انرژی موردنیاز EVs، بهره‌بردار شبکه باید از شبکه بالادست انرژی موردنیاز را خریداری کند. قاعدتاً با افزایش سطح نفوذ EVs میزان هزینه پرداختی بهره‌بردار نیز افزایش می‌یابد. از آن‌جایی‌که در حالت مدیریت نشده، اکثر EVs در ساعات اوج مصرف که قیمت انرژی در بیش‌ترین مقدار خود است اقدام به شارژ می‌کنند، هزینه تأمین بار نیز با افزایش سطح نفوذ خودروها مطابق جدول زیر به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

Table (5): Cost of purchasing energy from the upstream grid ($)

جدول ۵: هزینه خرید انرژی از شبکه بالادست ($)

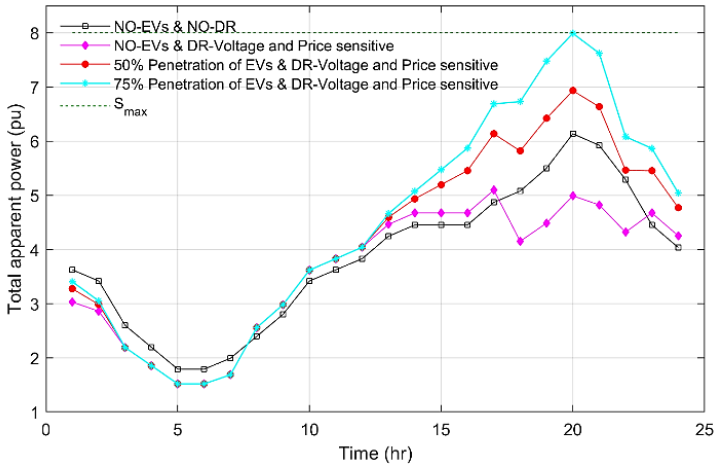
نفوذ 0%	نفوذ 25%	نفوذ 50%
198.63	214.27	230.61

۳-۵- سناریوی دوم: مدیریت تنها بارهای پاسخگو

این سناریو با محوریت DR انجام شده است. به‌عبارت دیگر در این تست، مدیریت DR حساس به قیمت و ولتاژ بدون درنظرگرفتن مدیریت شارژ و دشارژ EVs مورد ارزیابی قرار گرفته است. میزان توان مورد تقاضای شبکه که از مجموع بارهای مصرفی و توان شارژ

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.519]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

EVs در سطح نفوذهای مختلف به دست می‌آید، در شکل ۹) نشان داده شده است؛ با توجه به این شکل، نسبت به سناریوی اول، مدیریت DR اثر قابل توجهی بر آزادسازی ظرفیت شبکه توزیع دارند و این مدیریت حدود ۲۵درصد مقدار ضریب نفوذ EVs را افزایش داده است اما علی‌رغم این افزایش هم‌چنان کمبود ظرفیت و عواقب ناشی از این کمبود در شبکه وجود دارد. لذا می‌توان گفت مدیریت تنهای DR برای ارتقا سطح نفوذ شبکه و بهبود پارامترهای آن کافی نیست و حتماً باید شارژ و دشارژ EVs نیز در کنار DR مدیریت شود.



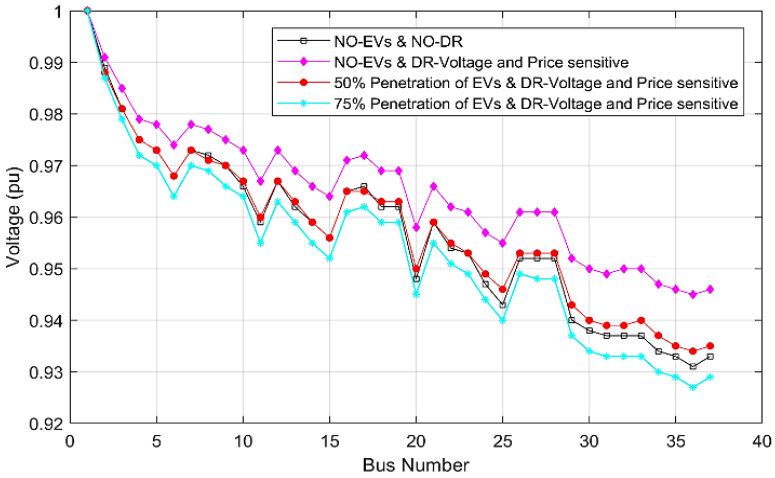
شکل ۹: میزان توان دریافتی شبکه از شبکه بالادست در ضریب نفوذهای مختلف EVs

Figure (9): The amount of power received from the upstream network at different EV penetration rates

در شکل ۱۰) افت ولتاژ در باس‌های مختلف شبکه در ضریب نفوذ بالای EVs با درنظرگرفتن مدیریت DR نشان داده شده است. به‌منظور بررسی دقیق‌تر اختلاف ولتاژ باس‌های مختلف برای باس ۳۶ نیز در ضریب نفوذ مختلف EVs، در جدول ۶) و میزان انرژی تلف شده در کل باس‌های شبکه برای تمام شبانه‌روز در

Table (7): Total energy wasted (kWh) in the feeder over all hours of the day at different penetration rates of EVs

جدول ۷) بیان شده است.



شکل ۱۰: مقدار پریونیت ولتاژ باس‌های مختلف شبکه در ضریب نفوذهای مختلف EVs

Figure (10): Per-unit voltage value of different network buses at different penetration rates of EVs

Table (6): Voltage imbalance between different phases on bus 36 at different vehicle penetration rates

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.519]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

جدول ۶: نامتعادلی ولتاژ بین فازهای مختلف در باس ۳۶ در ضریب نفوذهای مختلف خودروها

نامتعادلی ولتاژ (V)	ضریب نفوذ 0%	ضریب نفوذ 50%	ضریب نفوذ 75%
AB	1.22	0.81	0.140
AC	3.71	4.42	5.23
BC	2.42	42	4.804

Table (7): Total energy wasted (kWh) in the feeder over all hours of the day at different penetration rates of EVs

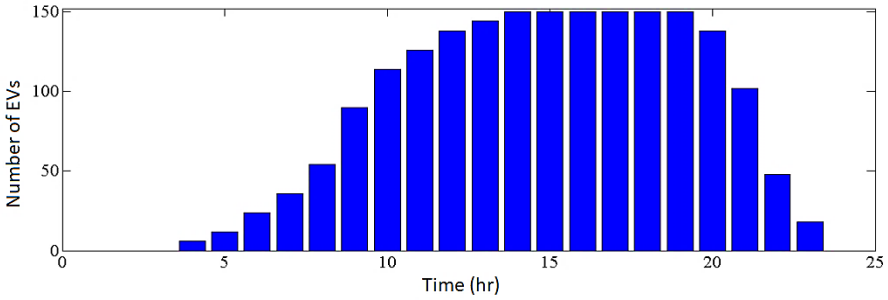
جدول ۷: مجموع انرژی تلف شده (kWh) در فیدر در کل ساعات شبانه روز در ضریب نفوذهای مختلف EVs

ضریب نفوذ 0%	ضریب نفوذ 50%	ضریب نفوذ 75%
33.02	50.1	61.02

برای مقایسه بهتر نتایج مدیریت DR با سناریوی اول، در سطح نفوذ ثابت ۵۰درصد برای EVs انجام شده است. مطابق نتایج مدیریت هم‌زمان بارهای پاسخگو حساس به قیمت و حساس به ولتاژ، مقدار پیک شبکه توزیع حدود ۱۴/۱درصد کاهش می‌یابد که این کاهش، سبب افزایش سطح نفوذ ۲۵درصدی EVs در شبکه توزیع شده است. از سوی دیگر، مقدار تلفات کل نیز در حدود ۱۳درصد کاهش یافته است. مقدار افت ولتاژ در باس‌های شبکه و نامتعادلی ولتاژ بین فازهای مختلف نیز نسبت به سناریوی اول کاهش یافته است. نامتعادلی ولتاژ بین فازها در حدود ۲۱/۲درصد نسبت به سناریوی اول بهبود یافته است.

۳-۶- سناریوی سوم: مدیریت ترکیبی DR و شارژ/دشارژ خودروهای الکتریکی

در این سناریو استراتژی مدیریت همزمان DR در کنار مدیریت شارژ و دشارژ EVs مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این سناریو برخلاف دو سناریوی قبل خودروی الکتریکی بلافاصله پس از اتصال به شبکه شارژ نمی‌شود و عملیات شارژ و دشارژ آن توسط بهره‌بردار با توجه به پارامترهای مختلف شبکه و اهداف بیان شده در بخش قبل مدیریت می‌شود. از آن‌جایی‌که این مدیریت منوط به اتصال خودرو الکتریکی به شبکه است، ممکن است در ساعات خاصی علی‌رغم پایین بودن مقدار بار و قیمت انرژی خودروی الکتریکی به شبکه متصل نباشد تا عملیات شارژ انجام شود. همان‌طورکه در قبل توضیح داده شد، اکثر خودروها در ساعات ۵ صبح تا ۱۰ صبح به شبکه متصل نیستند. شکل ۱۱) با توجه به ضریب نفوذ ٪۱۰۰ (کل ۱۵۰ خودروی الکتریکی) و مدل تابع چگالی احتمال نرمال، تعداد کل خودرو های الکتریکی متصل به شبکه در ساعات مختلف شبانه روز را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در این سناریو شبیه‌سازی از ساعت ۱۰ صبح شروع می‌شود.



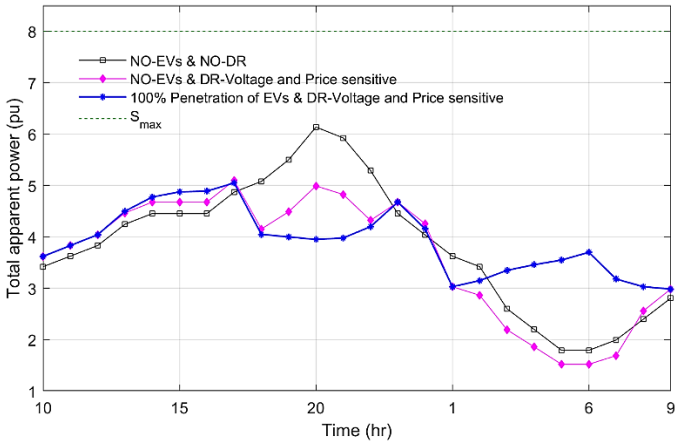
شکل ۱۱: تعداد EVs متصل به شبکه در ساعات مختلف شبانه روز

Figure (11): Number of EVs connected to the grid at different times of the day

شکل ۱۲) منحنی بار شبکه توزیع را با استراتژی مدیریت همزمان DR و EVs نشان می‌دهد مطابق این شکل برخلاف دو سناریوی قبل، نه‌تنها امکان اتصال تمام EVs به شبکه وجود دارد بلکه مقدار قابل توجهی از ظرفیت شبکه نیز به واسطه کاهش پیک بار، آزاد شده است و قابلیت اطمینان عرضه توان به خصوص در ساعات پیک افزایش یافته است. به‌عبارت دیگر، در سطح نفوذ ۱۰۰درصدی

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.519]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

EVs هم‌چنان ظرفیت آزاد برای اتصال بارهای بیش‌تر به شبکه بدون افزایش ظرفیت پست بالادست وجود دارد لذا می‌توان گفت استراتژی پیشنهادی باعث مسطح شدن منحنی بار شبکه توزیع شده است.



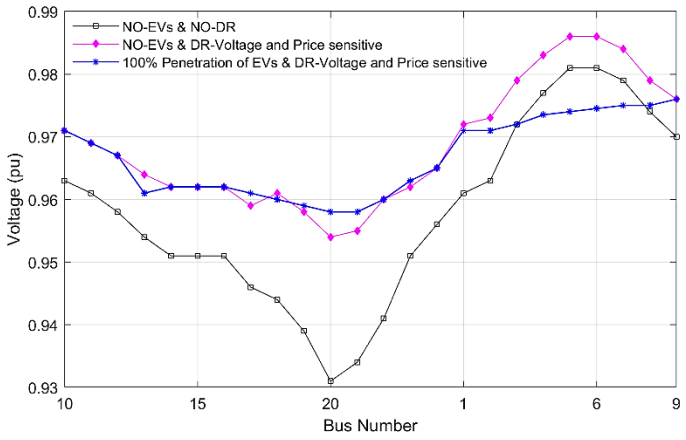
شکل ۱۲: مشخصه بار ساعتی در ضریب نفوذ صددرصد خودروهای برقی

Figure (12): Hourly load characteristic at 100% penetration rate of electric vehicles

Table (8): Imbalance between phases at peak load hour (8pm) and total network losses

اختلاف ولتاژ فازها برای باس ۳۶ در ساعت ۲۰ و هم‌چنین میزان تلفات انرژی کل شبکه در ضریب نفوذ ۱۰۰٪ در **جدول ۸)** مشخص شده است علاوه‌براین مقدار دامنه ولتاژ در باس‌های مختلف در سناریوهای انجام شده در شکل ۱۳) نمایش داده شده است.

مطابق نتایج، علی‌رغم اضافه شدن بار به شبکه با نفوذ ۱۰۰درصدی EVs، نه‌تنها پارامترهای شبکه از محدوده مجاز خارج نشده است، بلکه میزان تلفات، مقدار افت ولتاژ و نامتعادلی بین فازها کاهش یافته است.



شکل ۱۳: مقدار دامنه ولتاژ در باس‌های شبکه توزیع در ضرایب مختلف نفوذ EVs

Figure (13): Voltage amplitude value in distribution network buses at different EV penetration coefficients

Table (8): Imbalance between phases at peak load hour (8pm) and total network losses

جدول ۸: نامتعادلی بین فازها در ساعت اوج بار (ساعت ۲۰) و تلفات کل شبکه

نامتعادلی ولتاژ (V)	فاز به فاز			تلفات کل شبکه(kWh)
	AB	AC	BC	
	1.20	3.2	1.51	40.1

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.519]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

مطابق نتایج جدول فوق در سناریوی اول که هیچ خودروی الکتریکی به شبکه متصل نبود، میزان تلفات شبکه حدود ۳۹کیلو وات ساعت است با اضافه شدن ۱۵۰ خودرو به شبکه میزان تلفات حدود ۱کیلو وات ساعت افزایش پیدا کرده است که این کارآمدی روش پیشنهادی در مدیریت تلفات شبکه را نشان می‌دهد. علاوه بر تلفات کل شبکه نامتعادلی ولتاژ بین فازها نیست در این سناریو نسبت به سناریوی اول بسیار بهبود یافته است.

این سناریو برتری استراتژی پیشنهادی را در تبدیل چالش نفوذ بالای خودروهای الکتریکی به فرصت نشان می‌دهد. مسطح‌سازی منحنی بار از طریق مدیریت DR و V2G/G2V، فشار بر پست را کاهش داده و ظرفیت اضافی برای بارهای آینده ایجاد می‌کند. استفاده از V2G امکان تزریق توان ذخیره‌شده در باتری‌های خودروها به شبکه در ساعات اوج را فراهم می‌کند، که نه‌تنها هزینه‌ها را کاهش می‌دهد، بلکه پایداری شبکه را بهبود می‌بخشد. بهینه‌سازی دوسطحی (اقتصادی و فنی) با استفاده از روش پارتو و فازی بیشینه-کمینه، راه‌حلی متعادل ارائه می‌دهد که چندین هدف را هم‌زمان برآورده می‌کند. این استراتژی در برابر عدم‌قطعیت‌های رفتاری مالکان خودروها (مانند زمان اتصال و مسافت طی‌شده) مقاوم است، که کاربرد عملی آن را در شبکه‌های واقعی تقویت می‌کند.

۳-۷- تحلیل مقایسه‌ای

جدول (۹) مقایسه جامعی بین سه سناریو ارائه می‌دهد:

- **سناریوی اول (مدیریت‌نشده)**: در نفوذ ۵۰٪، ظرفیت پست پر می‌شود، تلفات ٪۳۳/۳ افزایش می‌یابد، ولتاژها از حد مجاز خارج می‌شوند، و هزینه‌ها به ۱۲۵۰ دلار می‌رسند. این سناریو آسیب‌پذیری شبکه بدون مدیریت را نشان می‌دهد.
- **سناریوی دوم (DR به‌تنهایی)**: مدیریت DR پیک بار را ٪۱۴/۱، تلفات را ۱۳٪، و نامتعادلی ولتاژ را ٪۲۱/۲ کاهش می‌دهد، اما نمی‌تواند از نفوذ ۱۰۰٪ پشتیبانی کند، که محدودیت‌های آن را نشان می‌دهد.
- **سناریوی سوم (مدیریت ترکیبی)**: این استراتژی نفوذ ۱۰۰٪ (۱۵۰ خودرو) را امکان‌پذیر می‌کند، پیک بار را ٪۱۸/۵، تلفات را به ۴۰کیلووات‌ساعت (افزایش تنها ۱ کیلووات‌ساعت)، نامتعادلی ولتاژ را به ٪۴/۲ (٪۵۰/۶ بهبود)، و هزینه‌ها را به ۱۰۵۲ دلار (٪۱۵/۸ کاهش) می‌رساند. این نتایج برتری استراتژی پیشنهادی را در بهبود عملکرد شبکه و کاهش هزینه‌ها تأیید می‌کند.

مقایسه سناریوها در جدول (۹) نشان می‌دهد که مدیریت ترکیبی DR و V2G/G2V نه‌تنها چالش‌های نفوذ بالای خودروهای الکتریکی را برطرف می‌کند، بلکه فرصت‌هایی برای بهبود کارایی و پایداری شبکه ایجاد می‌کند. آزادسازی ٪۲۲ ظرفیت پست، امکان افزودن بارهای جدید (مانند خودروهای الکتریکی اضافی یا سایر مصارف) را بدون نیاز به سرمایه‌گذاری‌های پرهزینه فراهم می‌کند. این استراتژی با استفاده از بهینه‌سازی پارتو، تعادل بین اهداف اقتصادی و فنی را حفظ کرده و با مدل‌سازی عدم‌قطعیت‌ها، کاربرد آن را در سناریوهای واقعی تقویت می‌کند.

Table (9): Comparison of different scenarios performed

جدول ۹: مقایسه سناریوهای مختلف انجام شده

	درصد بیشینه نفوذ EVs	هزینه تأمین انرژی الکتریکی ($)	پیک بار شبکه توزیع (pu)
(سناریو اول) بدون استراتژی پیشنهادی	50% 75 EVs	231.61	8.0
(سناریو دوم) مدیریت DR	75% 112 EVs	242.1	8.0
(سناریو سوم) مدیریت هم‌زمانEVs و DR	100% 150 EVs	184	5.049

۴- نتیجه‌گیری

استراتژی پیشنهادی در این پژوهش با تمرکز بر مدیریت هم‌زمان بارهای پاسخگو (DR) و شارژ/دشارژ خودروهای الکتریکی (V2G و G2V) توانسته است چالش‌های ناشی از نفوذ بالای EVs در شبکه توزیع را به فرصتی برای بهبود عملکرد فنی و اقتصادی شبکه تبدیل کند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که در سناریوی اول (بدون مدیریت)، نفوذ ٪۵۰ EVs (۷۵ خودرو) باعث پرشدن کامل

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.519]

ظرفیت پست بالادست، افزایش ٪۳۳/۳ تلفات انرژی (از ۳۹ به ۵۲ کیلووات‌ساعت)، و افت ولتاژ فراتر از حد مجاز (۰/۸۵ پریونیت در باس ۳۶) می‌شود. این امر پایداری شبکه را تهدید کرده و هزینه تأمین انرژی را به ۱۲۵۰ دلار افزایش می‌دهد.

در سناریوی دوم، مدیریت DR به‌تنهایی توانست پیک بار را ٪۱۴/۱ کاهش دهد و سطح نفوذ EVs را تا ۷۵ خودرو افزایش دهد. هم‌چنین، تلفات انرژی ٪۱۳/۵ و نامتعادلی ولتاژ ٪۲۱/۲ بهبود یافت، اما این رویکرد برای پشتیبانی از نفوذ ٪۱۰۰ EVs ناکافی بود.

در سناریوی سوم، استراتژی پیشنهادی با استفاده از بهینگی پارتو و مدیریت دوسطحی (اقتصادی و فنی)، امکان اتصال ٪۱۰۰ EVs (۱۵۰ خودرو) را بدون نیاز به ارتقای زیرساخت فراهم کرد. این استراتژی با مسطح کردن منحنی بار، کاهش ٪۱۸/۵ پیک بار، و آزادسازی ٪۲۲ از ظرفیت پست بالادست، قابلیت اطمینان شبکه را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داد.

از منظر فنی، افت ولتاژ در باس‌های انتهایی به ۰/۹۲ پریونیت بهبود یافت و نامتعادلی ولتاژ بین فازها به ٪۴/۲ کاهش یافت (بهبود ٪۵۰/۶ نسبت به سناریوی اول). تلفات انرژی نیز تنها ۱ کیلووات‌ساعت نسبت به حالت بدون EVs افزایش یافت، که نشان‌دهنده کارایی بالای استراتژی در مدیریت تلفات است. از منظر اقتصادی، هزینه تأمین انرژی به ۱۰۵۲ دلار کاهش یافت، که ٪۱۵/۸ کم‌تر از سناریوی اول است. این کاهش نتیجه انتقال بار و انرژی EVs به ساعات کم‌بار و استفاده از حالت V2G برای تزریق توان به شبکه در ساعات پیک است.

از منظر عملی، این استراتژی نه‌تنها نیاز به سرمایه‌گذاری‌های پرهزینه برای توسعه شبکه را به تعویق می‌اندازد، بلکه با بهبود پارامترهای فنی و اقتصادی، پایداری و کارایی شبکه توزیع را ارتقا می‌دهد. تحلیل حساسیت نیز نشان داد که این روش در برابر عدم‌قطعیت‌های رفتاری مالکان EVs مقاوم است و می‌تواند در سناریوهای واقعی عملکرد مؤثری داشته باشد. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، اثر ادغام منابع تجدیدپذیر (مانند انرژی خورشیدی و بادی) با این استراتژی بررسی شود تا پتانسیل آن در شبکه‌های هوشمند آینده ارزیابی گردد. هم‌چنین، مدل‌سازی دقیق‌تر عدم‌قطعیت‌های پیش‌بینی بار و رفتار مالکان EVs می‌تواند به بهبود کارایی این استراتژی در شرایط عملیاتی پیچیده‌تر کمک کند.

ضمیمه

فهرست علائم و پارامترهای مورداستفاده در مدل پیشنهادی به‌شرح ذیل است:

اندیس‌های مدل:

t	اندیس دوره زمانی برنامه ریزی	l	اندیس مشترکین شبکه	n, m	اندیس شماره باس‌های شبکه

مجموعه‌های مدل:

N_t	مجموعه افق زمانی مورد مطالعه	N_n	مجموعه باس‌های شبکه	N_e	مجموعه خودروهای برقی مورد مطالعه
N_L	مجموعه مشترکین شبکه	N_{ph}	مجموعه فازهای شبکه		

پارامترهای مدل:

V_{ref}	مقدار مرجع ولتاژ باس‌ها	P_{tmin}	کم‌ترین میزان مشارکت بار مورد نظر در برنامه DR از نوع حساس به قیمت
G	ماتریس کندوکتانس شبکه توزیع	P_{tmax}	بیش‌ترین میزان مشارکت بار موردنظر در برنامه DR از نوع حساس به قیمت
B	ماتریس سوسپتانس شبکه توزیع	P_{cmin}	حداقل مشارکت هر مشترک در برنامه DR حساس به ولتاژ
τ	قیمت تبادل انرژی الکتریکی	P_{cmax}	حداکثر مشارکت هر مشترک در برنامه DR حساس به ولتاژ

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.519]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

ρ	تشویقی پرداختی به مشترکین برای شرکت در برنامه DR	P_{tmax}^{total}	بیش‌ترین میزان مشارکت در برنامه DR از نوع حساس به قیمت در کل شبکه توزیع
CE_{max}	بیشینه ظرفیت قابل تبادل بین شبکه و خودروی الکتریکی	P_{cmax}^{total}	بیشترین میزان مشارکت در برنامه DR از نوع حساس به ولتاژ در کل شبکه توزیع
CB_{max}	ظرفیت باتری خودروی برقی	V_{min}	حد پایین ولتاژ باس های شبکه
CE_{min}	کمینه ظرفیت قابل قبول برای تبادل توان بین خودرو و شبکه	V_{max}	حد بالای ولتاژ باس‌های شبکه
W_{min}	حداقل انرژی قابل ذخیره‌سازی در باتری خودرو الکتریکی	CL_{max}	حداکثر ظرفیت خطوط شبکه
E_D	مقدار الاستیسیته بار برای شرکت در برنامه DR	CG_{max}	حداکثر ظرفیت پست‌های شبکه
Δ_{ph}	حداکثر نامتعادلی ولتاژ (اختلاف بین دامنه ولتاژ دو فاز)		

متغیرهای مدل:

P_{DR}	بار پاسخگوی اکتیو شبکه	Q_G	توان راکتیو دریافتی از شبکه بالادست
P_{Loss}	میزان تلفات خطوط شبکه	P_D	مجموع بار اکتیو در هر باس
P_{EV}	توان اکتیو کل مبادلاتی با خودرو الکتریکی	Q_D	مجموع بار راکتیو در هر باس
P_{V2G}	توان اکتیو مبادلاتی از خودرو الکتریکی به شبکه (حالت دشارژ)	P_{batt}	توان دریافتی باتری خودروی الکتریکی
P_{G2V}	توان اکتیو مبادلاتی از شبکه به خودرو الکتریکی (حالت شارژ)	P_{LE}	توان اتلاف شده در مبدل بین شبکه و خودرو
V	ولتاژ باس‌های شبکه	W_E	انرژی ذخیره شده در باتری خودروی الکتریکی
P_{nm}	توان اکتیو عبوری از خط بین باس n و باس m	u_{EV}	متغیر باینری برای بیان حالت شارژ یا دشارژ خودروی الکتریکی
P_{nm}	توان راکتیو عبوری از خط بین باس n و باس m	k_1, k_2	متغیرهای باینری برای بیان نوع برنامه DR مورد مطالعه
φ	زاویه فاز باس‌ها	P_{DR0}	توان اکتیو بار باس مورد مطالعه قبل از مشارکت در برنامه DR
P_G	توان اکتیو دریافتی از شبکه بالادست	Q_G	توان راکتیو دریافتی از شبکه بالادست

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.519]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

References

[1] Y. Wu et al., "Hierarchical Operation of Electric Vehicle Charging Station in Smart Grid Integration Applications—An Overview", International Journal of Electrical Power Energy Systems, vol. 139, p. 108005, 2022.

[2] F. Ahmad, A. Iqbal, I. Ashraf, and M. J. E. R. Marzband, "Optimal location of electric vehicle charging station and its impact on distribution network: A review", Energy Reports, vol. 8, pp. 2314-2333, 2022.

[3] R. Mehta, D. Srinivasan, A. M. Khambadkone, J. Yang, and A. J. I. T. o. S. G. Trivedi, "Smart charging strategies for optimal integration of plug-in electric vehicles within existing distribution system infrastructure", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 9, no. 1, pp. 299-312, 2018.

[4] C. Dharmakeerthi, N. Mithulananthan, T. J. I. J. o. E. P. Saha, and E. Systems, "Impact of electric vehicle fast charging on power system voltage stability", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 57, pp. 241-249, 2014.

[5] F. Teng, Y. Mu, H. Jia, J. Wu, P. Zeng, and G. J. A. e. Strbac, "Challenges on primary frequency control and potential solution from EVs in the future GB electricity system", Applied energy, vol. 194, pp. 353-362, 2017.

[6] M. J. Salehpour and S. M. Tafreshi, "Contract-based utilization of plug-in electric vehicle batteries for day-ahead optimal operation of a smart micro-grid", Journal of Energy Storage, vol. 27, p. 101157, 2020.

[7] C. Wenge, B. Arendarski, K. Haensch, A. Naumann, and P. Komarnicki, "Electric vehicle simulation models for power system applications", in Power and Energy Society General Meeting, IEEE, pp. 1-6: 2012.

[8] C. Wang, Y. Zhou, J. Wu, J. Wang, Y. Zhang, and D. J. I. T. o. S. G. Wang, "Robust-index method for household load scheduling considering uncertainties of customer behavior", IEEE transactions on smart grid, vol. 6, no. 4, pp. 1806-1818, 2015.

[9] L. Yao, W. H. Lim, and T. S. J. I. T. o. S. G. Tsai, "A real-time charging scheme for demand response in electric vehicle parking station", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 8, no. 1, pp. 52-62, 2017.

[10] Y. Shi, H. D. Tuan, A. Savkin, T. Q. Duong, and H. V. J. I. T. o. S. G. Poor, "Model predictive control for smart grids with multiple electric-vehicle charging stations", IEEE Transactions on Smart Grid, 2018.

[11] Z. Moghaddam, I. Ahmad, D. Habibi, and Q. V. J. I. T. o. T. E. Phung, "Smart Charging Strategy for Electric Vehicle Charging Stations", IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 4, no. 1, pp. 76-88, 2018.

[12] F. Momen, K. Rahman, and Y. Son, "Electrical propulsion system design of Chevrolet Bolt battery electric vehicle", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, no. 1, pp. 376-384, 2019.

[13] S. Wahid, "Assessing electric vehicles charging via packetized management systems", 2019.

[14] R. Mehta, P. Verma, D. Srinivasan, and J. J. A. e. Yang, "Double-layered intelligent energy management for optimal integration of plug-in electric vehicles into distribution systems", Applied energy, vol. 233, pp. 146-155, 2019.

[15] A. Rezaei and S. Mohammadi, "Reactive power optimization in distribution networks using intelligent algorithms considering dynamic loads", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, Islamic Azad University, Dezful Branch, vol. 5, no. 1, pp. 12–25, 2020.

[16] R. Ahmadi and H. Karami, "Power planning in distribution networks considering load uncertainties using multi-objective optimization methods", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, Islamic Azad University, Dezful Branch, vol. 6, no. 3, pp. 33–47, 2021.

[17] A. Mohammadinejad and M. Abbasi, "Stability analysis of distribution networks with high penetration of distributed generation and demand management", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, Islamic Azad University, Dezful Branch, vol. 7, no. 2, pp. 19–32, 2022.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.519]

[18] M. A. Khan, I. Husain, and Y. J. I. T. o. P. E. Sozer, "Integrated electric motor drive and power electronics for bidirectional power flow between the electric vehicle and DC or AC grid", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 12, pp. 5774-5783, 2013.
[19] N. Rezaei, A. Khazali, M. Mazidi, and A. J. E. Ahmadi, "Economic energy and reserve management of renewable-based microgrids in the presence of electric vehicle aggregators: A robust optimization approach", Applied Energy, vol. 201, p. 117629, 2020.
[20] M. Vahedipour-Dahraie, H. R. Najafi, A. Anvari-Moghaddam, and J. M. J. A. S. Guerrero, "Study of the effect of time-based rate demand response programs on stochastic day-ahead energy and reserve scheduling in islanded residential microgrids", Applied Sciences, vol. 7, no. 4, p. 378, 2017.
[21] J. Aghaei et al., "Optimal robust unit commitment of CHP plants in electricity markets using information gap decision theory", IEEE transactions on smart grid, vol. 8, no. 5, pp. 2296-2304, 2016.
[22] M. Nazari-Heris, S. Abapour, and B. J. A. T. E. Mohammadi-Ivatloo, "Optimal economic dispatch of FC-CHP based heat and power micro-grids", vol. 114, pp. 756-769, 2017.
[23] D. Singh, D. Singh, and K. J. I. t. o. p. s. Verma, "Multiobjective optimization for DG planning with load models", IEEE transactions on power systems, vol. 24, no. 1, pp. 427-436, 2009.
[24] S. Shafiee, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. J. I. T. o. S. G. Rastegar, "Investigating the impacts of plug-in hybrid electric vehicles on power distribution systems", IEEE transactions on smart grid, vol. 4, no. 3, pp. 1351-1360, 2013.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.519]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025