



Optimum Placement of Electric Vehicle Battery Replacement Stations for Energy Management of Distribution Networks in the Presence of Renewable Energy Sources

Mohammad Hasan Hemmatpour^{1*}, Mohsen Bahreini²

^{1,2}Member Faculty, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Jahrom University, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 06.24.2023

Revised: 07.29.2023

Accepted: 09.09.2023

Keyword:

Commercial Load
Residential Load
Energy Management
Battery Exchange
Wind Turbine
Electric Vehicles
Solar Cells

*Corresponding Author:

Mohammad Hasan Hemmatpour

Email:

m.h.hematpour@jahromu.ac.ir

ABSTRACT

Due to the growth of technology and changes in government policies to reduce fossil fuel consumption, the tendency to use electric vehicles by private enterprises and public transportation (including taxis and buses), and vehicles providing public services (such as ambulances and police cars) has increased. Since these cars need to charge their batteries, a new electrical load is imposed on the network. Therefore, according to their increasing growth, various network issues including energy management need to be studied and investigated. On the other hand, the government's policy favours the use of renewable resources such as wind turbine farms and solar cells. Wind turbines have been located in pre-studied locations and photovoltaic cells are used on residential and commercial roofs with underutilized generation capacity. These sources can compensate for the power required by electric vehicles. In the present research, the impact of different electric vehicle charging methods and the random nature of power generation by wind turbines and photovoltaic cells were studied in a 33-bus distribution system, and energy management was carried out. For this purpose, a new method was proposed and the energy management problem was performed by the Harmony algorithm. Finally, the obtained results from the simulation studies indicated the effectiveness of the proposed algorithm.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Recently, a great deal of attention has been paid to renewable energy sources (RESs) due to the growing concerns about greenhouse gas emissions. It should be noted that the electrical energy generated by WTs and PVs is an uncertain variable, which is out of control and can create challenges for grid operators. On the other hand, to decrease dependency on fossil fuels and environmental pollution, almost all countries plan to invest more in electric vehicles (EVs). The power required by EVs, can be compensated by WTs and PVs. This would generate a considerable charging demand with uncertainties that along with the random nature of power generation by WTs and PVs may create a significant challenge to new distribution systems.

Based on geographical conditions, network design and network infrastructure growth, two types of structures are suggested for charging cars. In the first structure, there is a place to charge EVs in public parking lots. In the second structure, the charging stations are widely distributed in residential, commercial and administrative areas, in contrast to the first structure, where the EV charging stations are concentrated in parking lots. The latter structure was used in this study. In the second structure, two methods are used to charge EVs, one is the widespread use of home and commercial chargers and the other is the battery swapping method, in which a depleted EV battery is removed from the vehicle and replaced with a fully charged one. Therefore, battery exchange parking lots (BX) that consume a great deal of power should be appropriately located to minimize the present value of the overall generation and distribution costs.

Methodology

Currently, distribution networks face the challenge of integrating distributed generation sources such as PVs and WTs, along with emerging electric loads like EVs. This article focuses on investigating the impact of these RES and the associated electric loads on distribution networks. The electric load from EVs encompasses various charging methods for their batteries. Apart from normal and fast charging, the BX method is also examined. This paper employs beta and Weibull probability distribution functions to simulate scenarios of solar radiation and wind speed.

The grid load resulting from these vehicles depends on various charging strategies, such as fast charging, normal charging, battery replacement strategy, different driving strategies, and the initial state of charge (SOC). There are two approaches for charging car batteries: the first one is Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV), which involves common methods of fast and normal charging. The second approach is BX. This article categorizes cars into four groups: taxis, buses, public service cars, and personal cars. Based on the NHTS report, the daily distance travelled follows a log-normal distribution function. SOC is considered to be completely random and is influenced by the time elapsed since the previous charge and the distance covered between two consecutive charges.

To calculate the charging power of a car, it is necessary to first determine the model for the distance travelled by the car. Subsequently, the charging start time and charging type are

determined based on the car's usage. By calculating the total charging load of EVs, the imposed charging load of cars can be derived easily.

Results and discussion

It is assumed that the placement of WTs based on geographical locations and technical limitations of the network has already been done. Car charging stations are widely available in the city. It is also assumed that PVs are widely installed on the roofs of residential and commercial areas. Therefore, the power consumed by car charging stations and the power produced by PVs is equally divided between the buses. In this paper, the optimization of electrical energy consumption in the network is done using optimal placement of BX stations.

The proposed algorithm was tested on the IEEE 33-bus distribution system. Considering some assumptions, the voltage profile of the network load distribution results only by considering different load levels is shown in Figure 1-a, which is within the acceptable range ($0.9 \leq V_i(t) \leq 1.1$). The voltage profile considering PVs, WTs and EV/FC is also shown in Figure 1-b, which is not within the acceptable voltage range. It is worth noting that power consumption by BX increases the voltage drop in the network and as a result makes the network voltage situation worse than in Figure 1-b.

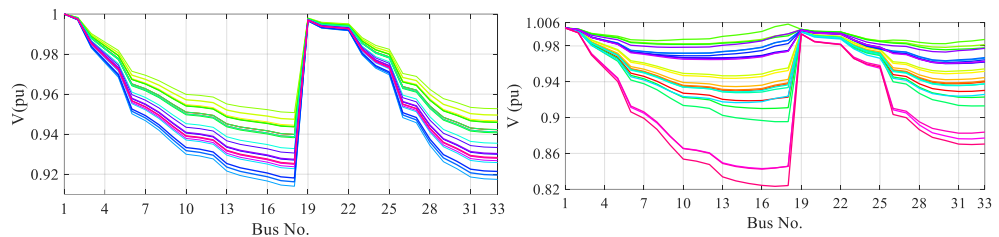


Figure 1. The network voltage profile in the IEEE 33-bus.

Therefore, in addition to proper placement for BX, transformer tap should also be appropriately used to optimize the objective function. For this purpose, the proposed method was implemented by HSA and the results of the algorithm are shown in Table 1.

Table 1. Results obtained of the proposed algorithm.

Number of BX	Location of BX (Bus)	Tap	Objective function (Mj)
1	1	+2	992
2	3 and 19	+3	986
3	1, 4 and 21	+3	1006
4	1, 2, 11 and 22	+3	877

The voltage profile corresponding to the optimal simulation states reported in Table 1 can be seen in Figure 2. As it is clear from the results, only in the case where the number of BX is equal to two, the voltage limits are well achieved. It can be concluded that the best solution to the problem is two BX stations in buses 3 and 19 with tap +3.

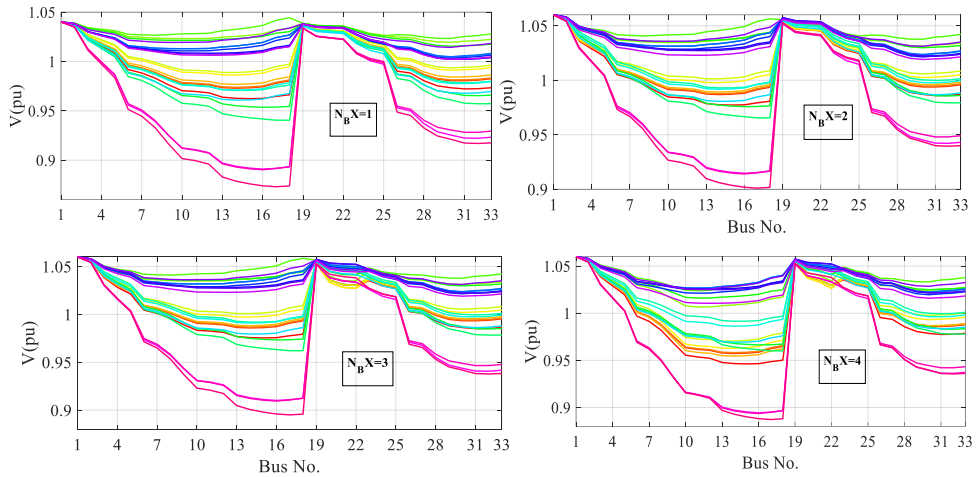


Figure 2. The network voltage profile of Table 1.

To demonstrate the efficiency of the proposed algorithm, the considered problem with two BX was solved using the Particle Swarm Optimization (PSO) method. The PSO results validate the HAS results.

Conclusion

This paper investigates the minimization of daily energy import from the upstream network in the distribution network with the integration of WTs, PVs, and EVs. To achieve this objective, the study focused on the control of transformer tap and the optimal placement of BX stations.

جایابی بهینه ایستگاه‌های تعویض باتری خودروهای برقی در راستای مدیریت انرژی شبکه‌های توزیع با حضور منابع تولید پراکنده

محمدحسن همت‌پور^{۱*}، محسن بحرینی^۲ 

۱ و ۲- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جهرم، جهرم، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

باتوجه به رشد تکنولوژی و تغییر سیاست‌های دولت‌ها در جهت کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، گرایش به استفاده از خودروهای الکتریکی توسط مؤسسات خصوصی، حمل و نقل عمومی (شامل تاکسی‌ها و اتوبوس‌ها) و خودروهای ارائه‌کننده خدمات عمومی (نظیر آمبولانس‌ها و ماشین‌های پلیس) افزایش یافته است. از آنجا که این خودروها نیاز به شارژ باتری خود دارند، بار الکتریکی جدیدی به شبکه تحمیل می‌کنند. بنابراین با توجه به رشد روزافزون آنها، مسائل گوناگون شبکه از جمله مدیریت انرژی نیاز به مطالعه و بررسی دارند. از طرف دیگر سیاست دولت‌ها به سمت استفاده از منابع تجدیدپذیر نظیر مزارع توربین‌های بادی و سلول‌های خورشیدی برای تولید توان است. توربین‌های بادی در محل‌های از قبل مطالعه شده جایابی شده و سلول‌های خورشیدی به صورت گسترده‌ای بر روی پشت‌بام‌های منازل مسکونی و تجاری با توان‌های تولید کم مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. این منابع می‌توانند بخشی از توان موردنیاز خودروهای الکتریکی را جبران کنند. در این مقاله تأثیر روش‌های مختلف شارژ خودرو الکتریکی و ماهیت تصادفی تولید توان توسط توربین بادی و سلول خورشیدی در شبکه ۲۳ شینه توزیع مورد مطالعه قرار گرفته و مدیریت انرژی انجام می‌شود. برای این منظور یک روش پیشنهادی ارائه شده و مدیریت انرژی توسط الگوریتم هارمونی انجام شده است. در انتها نتایج به دست آمده از مطالعات شبیه‌سازی حاکی از کارایی الگوریتم پیشنهادی است.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۰۳

بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۰۷

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۱۸

کلید واژگان:

بار تجاری
بار مسکونی
پارکینگ تعویض باتری
توربین بادی
خودروهای برقی
سلول خورشیدی
مدیریت انرژی

*نویسنده مسئول: محمدحسن همت‌پور

پست الکترونیکی:

m.h.hematpour@jahromu.ac.ir

مقدمه

انگیزه‌های بیان مسئله

یکی از نگرانی‌های همیشگی در زنجیره تولید - مصرف انرژی الکتریکی، بررسی آلاینده‌ها و انتشار گازهای گلخانه‌ای است. دولت‌ها در سطوح مختلف سیاست‌های اقلیمی را با هدف به حداکثر رساندن استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر اتخاذ کرده‌اند. افزایش مالیات کربن، استفاده گسترده از منابع انرژی تجدیدپذیر (RES) نظیر توربین‌های بادی (WT) و سلول‌های خورشیدی (PV)، ممنوعیت استفاده از سوخت‌های فسیلی برای حمل و نقل جاده‌ای و استفاده از وسایل نقلیه الکتریکی بدون آلاینده‌گی، برخی از سیاست‌های اخیر حفاظت از محیط‌زیست است که توسط دولت‌ها اجرا شده است [۱]. WT و PV یکی از پرکاربردترین RESها است که برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و جایگزینی نیروگاه‌های فسیلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تولید توان توسط WT و PV وابسته به سرعت باد و تشعشع خورشید است که مشکلات و چالش‌های جدیدی را برای مدیریت و بهره‌برداری بهینه سیستم توزیع ایجاد می‌کند. به بیان دیگر برخی از RESها مانند نیروگاه‌های بیوگاز دارای توان خروجی قابل کنترل بوده، اما تولید توان توسط WT و PV به‌عنوان یکی از متداول‌ترین RESها، غیرقابل کنترل هستند. براین اساس، ادغام آنها در سیستم توزیع ممکن است باعث ایجاد چالش‌های فنی برای اپراتور سیستم توزیع شده که باید در مسائل مختلف مورد مطالعه قرار گیرد [۲].

با تشدید آلودگی‌های زیست‌محیطی و کمبود انرژی فسیلی و درخواست‌ها برای کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، توسعه وسایل نقلیه با انرژی جدید بیش از پیش ضروری است؛ بنابراین از وسایل نقلیه الکتریکی (EVs) به طور گسترده در جهان استفاده می‌شود [۳]. همچنین، تعداد خودروهای برقی احتمالاً در سال‌های آینده در ایران نیز رشد قابل توجهی خواهد داشت که سبب افزایش بار به شبکه توزیع شده و بر شبکه تولید و انتقال تأثیر می‌گذارد. بنابراین، تجزیه و تحلیل و به دست آوردن مدل احتمالاتی سفر و عملکرد EV و نحوه شارژ این خودرو بسیار حائز اهمیت است.

مروری بر مطالعات انجام شده در این زمینه

در مقالات مختلف به تأثیر RESها به‌ویژه WT و PV بر مباحث مختلف بهره‌برداری و مدیریت شبکه توزیع پرداخته شده که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود. در [۴] جایابی و به‌دست‌آوردن اندازه بهینه WT به همراه منابع ذخیره‌ساز انرژی در سیستم توزیع در جهت کاهش تلفات اهمی و آلاینده‌گی فلیکر مورد مطالعه قرار گرفته است. کاهش تلفات توان اکتیو و انحرافات ولتاژ در سیستم‌های توزیع، هدف مطالعه نویسندگان در مرجع [۵] است. این هدف با جایابی WT توسط الگوریتم میدان الکتریکی مصنوعی چندهدفه، تحقق می‌یابد. در [۶] مسئله افزایش انعطاف‌پذیری یک سیستم توزیع ۳۳ شینه IEEE اصلاح‌شده با جایابی بهینه WT و سوئیچ‌های مقطعی مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۲] یک راه‌حل پیشنهادی با در نظر گرفتن برنامه‌های DR به‌منظور به‌حداقل رساندن هزینه کل انرژی و ذخیره مورد نیاز برای مقابله با ماهیت تصادفی تولید توان توسط WT و مصرف بار ارائه شده است. در [۷] بررسی استراتژی‌های کنترل ولتاژ در راستای توسعه ظرفیت PV در سیستم‌های توزیع مورد مطالعه قرار می‌گیرد. استراتژی‌های عملیاتی مورد بررسی بر اساس قابلیت‌های کنترل توان اکتیو و راکتیو سیستم‌های PV و همچنین تنظیم تپ چنجر ترانسفورماتورها است. نویسندگان در [۸] یک مسئله بهینه‌سازی به‌منظور افزایش ظرفیت PV در سیستم‌های توزیع با به‌دست‌آوردن نقطه تنظیم بهینه اینورتر PV ارائه کرده‌اند. در راستای کاهش تلفات اکتیو و حذف کامل دریافت توان از شبکه فوق توزیع، در سیستم‌های توزیع IEEE جایابی بهینه خازن‌های موازی و نفوذ بالای PV به همراه جایابی آن در [۹] مورد مطالعه قرار گرفته است. نویسندگان در [۱۰] تأثیر PV بر مسئله کنترل ولتاژ را مورد بررسی قرار داده‌اند. برای این منظور، توان تولیدی PV به عنوان تابعی از شرایط مختلف آب و هوایی مدل شده و سپس به کمک اینورترهای هوشمند، مسئله کنترل ولتاژ با حداقل هزینه، انجام می‌شود. نفوذ روزافزون خودروهای برقی هیبریدی (PHEV) سبب افزایش اضافه

باری در شبکه‌های توزیع و ایجاد چالش‌های جدیدی به دلیل بدتر شدن عدم تعادل بارها، افزایش تلفات اهمی و افزایش احتمال خاموشی می‌شود. برای غلبه بر این چالش‌ها، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای شارژ هماهنگ ارائه شده است [۱۱]. افزایش نفوذ خودروهای برقی و خودروهای گازسوز، عملکرد ایمن و پایدار شبکه توزیع برق - گاز را به خطر می‌اندازد. سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی ابزارهای مؤثری برای مقابله با افزایش تقاضای شارژ ناشی از این خودروها بوده و افزایش قابلیت اطمینان عرضه انرژی را به همراه دارند. این امر امکان بهینه‌سازی پیکربندی سیستم‌های ذخیره‌سازی برق و گاز و جلوگیری از سرمایه‌گذاری را بیش از حد که معمولاً در برنامه‌ریزی‌های جداگانه صورت می‌گیرد ممکن و ضروری می‌کند که در مرجع [۱۲] مورد مطالعه قرار گرفته است.

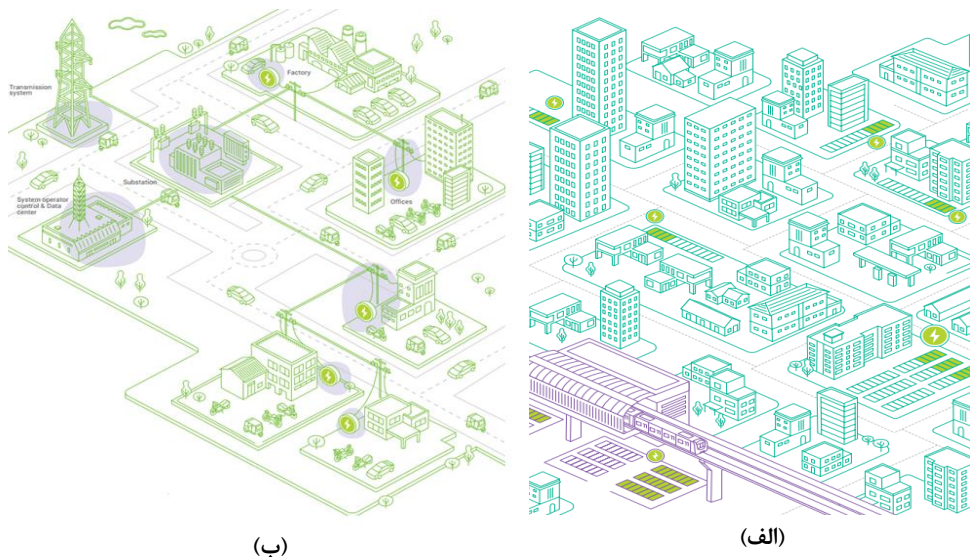
نوآوری در موضوع

براساس شرایط جغرافیایی، طراحی شبکه و رشد زیر ساخت‌های شبکه، دو نوع ساختار برای شارژ خودروها پیشنهاد می‌شود [۱۳]. ساختار اول که در شکل ۱-الف و مرجع [۳] نیز گزارش شده، در پارکینگ‌های عمومی، محلی برای شارژ EVs وجود دارد. بنا به هدف بهره‌برداری از شبکه، قوانینی برای پارکینگ‌ها وضع می‌شود که تحت این قوانین، خودروها می‌توانند وارد پارکینگ شوند. در ساختار دوم برخلاف ساختار اول، که مراکز شارژ EVs به طور متمرکز در پارکینگ‌ها در نظر گرفته شده، ایستگاه‌های شارژ به طور گسترده در مناطق مسکونی، تجاری و اداری توزیع شده‌اند. این ساختار که مدنظر مقاله است، در شکل ۱-ب نشان داده شده است.

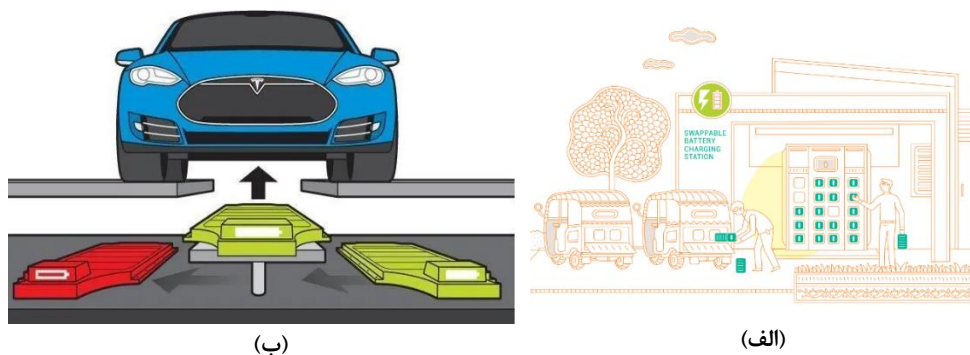
در ساختار دوم، دو روش استفاده گسترده از شارژرهای خانگی و تجاری و دیگری روش تعویض باتری، برای شارژ EVs استفاده می‌شود. لذا با توجه به اهداف بهره‌برداری شبکه، پارکینگ‌های تعویض باتری (BX) که مصرف کننده زیاد توان هستند، باید جایابی شوند. از طرفی دیگر با توجه به سیاست‌های حمایتی دولت‌ها، رشد PVs بر روی سقف منازل افزایش یافته و سیاستمداران نیز سعی در توسعه WTs به صورت مزارع بادی دارند. لذا با افزایش و نفوذ این منابع، چالش‌های جدیدی در شبکه توزیع به وجود می‌آید که یکی از این چالش‌ها مدیریت مصرف انرژی است. بنابراین در این مقاله، مدیریت مصرف انرژی با در نظر گرفتن حالت‌های احتمالاتی شارژ EVs و تولید توان احتمالاتی توسط PV و WT مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این مسئله بهینه‌سازی به گونه‌ای تعریف شده است که با جایابی بهینه BXها، عملکرد بهینه روزانه شبکه توزیع از نقطه نظر بهره‌برداری تضمین شود. از آنجا که در این مقاله از پخش بار غیر خطی برای به دست آوردن مقادیر پخش بار استفاده می‌شود، لذا نمی‌توان از مدل‌سازی خطی و روش‌های قطعی ریاضی برای حل این مسئله استفاده کرد. بنابراین برای حل تابع هدف پیشنهادی و مسئله مدل‌سازی شده از روش الگوریتم هارمونی (HSA) استفاده می‌شود. استفاده از الگوریتم‌های هوشمند در حل مسائل مهندسی بسیار مرسوم است. مثلاً در مرجع [۱۴]، ضرایب PI کنترلر مبدل‌های قدرت، توسط الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی بهینه شده است. به کمک این روش، پایداری سیستم کنترل غیرمتمرکز مبدل‌های دوطرفه در یک ریزشبه DC متصل به شبکه افزایش می‌یابد. در مقاله [۱۵] از دو الگوریتم تکامل تفاضلی و کرم شتاب به‌عنوان معیارهای عملکرد موتور رلوکتانس سوئیچی در یک نیروگاه هسته‌ای استفاده شده است. این کار، با هدف غلبه و بهبود بخشیدن بر نقطه ضعف قابل توجه موتور رلوکتانس سوئیچی که دارای گشتاور موج‌دار است، انجام می‌شود. برنامه‌ریزی بهره‌برداری چند هدفه از شبکه توزیع به‌منظور بهبود عوامل اقتصادی و تاب‌آوری شبکه با در نظر گرفتن شرایط جوی برای به حداقل رساندن هزینه‌های بهره‌برداری از شبکه، هزینه‌های انرژی تأمین نشده و حداکثر کردن مزایای مشارکت صاحبان منبع انرژی پراکنده و ذخیره‌سازهای انرژی در [۱۶] تعریف شده است. این مسئله به کمک الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و روش محدودیت اسیلون با تصمیم‌گیرنده فازی حل می‌شود.

ایستگاه‌های تعویض باتری به دو گروه ایستگاه‌های دستی و اتوماتیک دسته‌بندی می‌شوند. ایستگاه‌های دستی برای باتری‌ها با ظرفیت کم و ایستگاه‌های اتوماتیک برای باتری‌ها با ظرفیت بالا قابل استفاده است. طرحواره مفهومی این

ایستگاه‌ها در شکل ۲ آمده است. در ایستگاه‌های دستی، باتری‌های کوچک سبک قابل حمل توسط یک نفر، شارژ می‌شوند. این ایستگاه‌ها به فضای کم نیاز دارند و معمولاً برای موتورها و ماشین‌های با ظرفیت باتری کم استفاده می‌شوند [۱۷]. در ایستگاه‌های اتوماتیک با توجه به سنگین بودن باتری‌ها، یک بازوی رباتیک برای تعویض باتری‌ها استفاده می‌شود. این روش برای خودروهای با ظرفیت باتری زیاد و اتوبوس‌الکترونیکی استفاده می‌شود. این ایستگاه‌ها فضای بزرگتری را به خود اختصاص می‌دهند [۱۸]. در ادامه به اختصار، نوآوری‌های مقاله آورده می‌شود:



شکل ۱. الف- ساختار یک توزیع ایستگاه‌های برقی ب- ساختار دو توزیع ایستگاه‌های برقی.



شکل ۲. طرح مفهومی ایستگاه‌های تعویض باتری (الف) - دستی (ب) - اتوماتیک.

این مقاله راه حلی برای بررسی تأثیر جایابی BXها بر بهره‌برداری شبکه با در نظر گرفتن PV و WT، EVs در سیستم‌های توزیع قدرت پیشنهاد می‌کند.

- متفاوت از مقالات گذشته، اثر توزیع گسترده پارکینگ‌های شارژ EVs به صورت خانگی و تجاری در کنار منابع تولید توان احتمالاتی بر بحث مدیریت انرژی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در مرجع [۳] تاثیر پارکینگ‌ها به صورت متمرکز و با وضع قوانین بر آنها براساس هدف مسئله در نظر گرفته شده است. در مرجع [۱۹] تنها اثر توزیع گسترده EVs و پارکینگ‌های BX بر روی بار مصرفی مورد مطالعه قرار گرفته است، این در حالی است در این مقاله نشان داده می‌شود که چنانچه جایابی بهینه BX انجام نشود، قیود فنی بهره‌برداری شبکه (سطح ولتاژ) برآورده نمی‌شود. بنابراین در این مقاله جایابی BX در راستای هدف مدیریت انرژی با در نظر گرفتن اثر توزیع گسترده EVs، تأثیر مزارع WT و توزیع گسترده PV و قیود بهره‌برداری مورد مطالعه قرار می‌گیرد.
- در این مقاله فرضیات و مدل جدیدی برای حل مسئله یاد شده ارائه شده است.

ساختار مقاله

در بخش دوم، ساختار شبکه‌های توزیع امروزی شامل مدل منابع تولید پراکنده و EVs به همراه قوانین و روابط حاکم بر آنها آمده است. در بخش سوم، مسئله بهینه سازی به همراه اهداف و قیود و در بخش چهارم و پنجم به ترتیب، پیاده‌سازی الگوریتم بر شبکه و تحلیل آن به همراه نتایج بیان شده است.

ساختار شبکه‌های توزیع امروزی

امروزه به شبکه‌های توزیع، منابع تولید پراکنده همچون PV و WT و همچنین بارهای الکتریکی بروزی نظیر EV تحمیل شده است. در این مقاله تأثیر منابع تولید تجدیدپذیر یاد شده و بارهای الکتریکی تحمیلی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بار الکتریکی EV شامل روش‌های شارژ باتری‌های این خودروها است. در این مقاله علاوه بر روش‌های شارژ متداول و سریع که شامل اتصال مستقیم EV به برق است، BX نیز مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این روش در ایستگاه‌های جایابی شده برای این منظور، باتری‌های خودروها شارژ شده و با باتری EV جایگزین می‌گردد. در ادامه نحوه تولید توان توسط RES و روابط حاکم بر آن، همچنین قوانین حاکم بر نحوه شارژ EV شامل PHEV و BX مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

مدل منابع تولید پراکنده و روابط ریاضی حاکم بر آنها

در این مقاله سناریوهای تشعشع خورشید و سرعت باد به‌وسیله تابع‌های توزیع احتمالاتی بتا و ویبل شبیه‌سازی می‌شود. در ادامه به بررسی این روابط پرداخته می‌شود.

تولید توان در توربین بادی

در این مقاله سرعت روزانه باد از محاسبه میانگین سرعت باد در شهر ماهان استان کرمان استخراج شده که در شکل ۳- الف آمده است [۲۰]. این اطلاعات در جدول ۱ خلاصه شده‌اند.

جدول ۱. مشخصات سرعت باد در ساعات مختلف براساس شکل ۳- الف.

ساعت	v(m/s)	ساعت	v(m/s)	ساعت	v(m/s)	ساعت	v(m/s)	ساعت	v(m/s)	ساعت	v(m/s)
۱	۱۱	۵	۱۵	۹	۱۰	۱۳	۱۴	۱۷	۱۸	۲۱	۱۲
۲	۲۰	۶	۲۳	۱۰	۸	۱۴	۱۸	۱۸	۱۱	۲۲	۱۲
۳	۲۴	۷	۱۱	۱۱	۶	۱۵	۲۰	۱۹	۱۱	۲۳	۱۳
۴	۲۳	۸	۱۵	۱۲	۱۲	۱۶	۲۰	۲۰	۱۶	۲۴	۱۰

میزان توان تولیدی توسط WT که تابعی از سرعت باد در محل توربین است به کمک رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$P_{WT}(t) = N_{WT} P_{WT}^r \begin{cases} 0 & v(t) < v_{ci} \text{ \& } v(t) \geq v_{co} \\ \frac{v(t) - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} & v_{ci} \leq v(t) \leq v_r \\ 1 & v_r \leq v(t) \leq v_{co} \end{cases} \quad (1)$$

که در آن N_{WT} تعداد توربین بادی، P_{WT}^r میزان توان نامی WT، v_{ci} ، v_r و v_{co} سرعت باد ورودی، نامی و خروجی WT بوده که به ترتیب ۳، ۱۳.۵ و ۲۵ متر بر ثانیه است [۲۱]. سرعت باد ورودی، حداقل سرعتی است که WT می‌تواند تولید توان داشته باشد. همچنین سرعت باد خروجی، سرعتی است که مشخصات دینامیکی WT دیگر قادر به تحمل آن نیست و نمی‌تواند با سرعت بیش‌تر از آن بچرخد. لذا WT در جهتی می‌چرخد که پره‌های آن دیگر حرکت نکنند.

تولید توان در سلول‌های خورشیدی

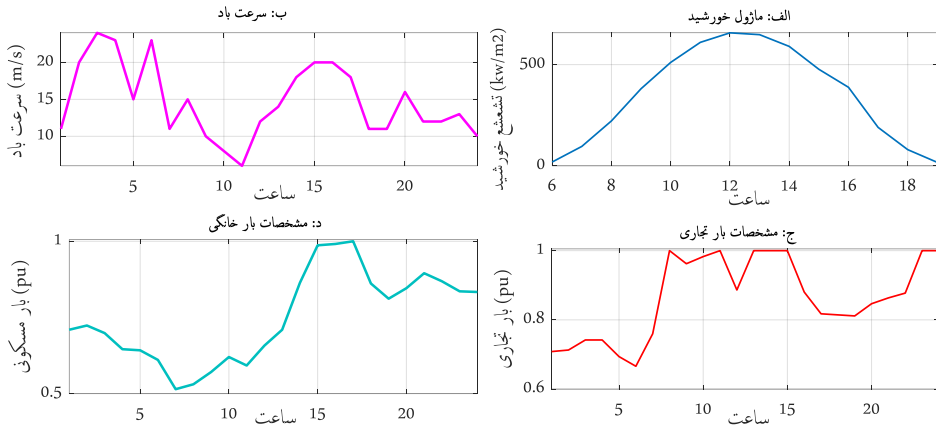
تابع چگالی احتمال (PDF) تشعشع خورشید توسط رابطه (۲) بیان می‌شود [۲۲]. این مدل تابعی با چگالی توزیع بتا است.

$$g(s) = \begin{cases} \frac{1}{B(\alpha, \beta)} s^{\alpha-1} (1-s)^{\beta-1} & 0 \leq s \leq 1, (\alpha, \beta) \geq 0 \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (2)$$

$g(s)$ تابعی از s ، α و β بوده که s مقدار تشعشع خورشید بر حسب kw/m^2 و α و β توابعی از μ مقدار میانگین و σ مقدار انحراف استاندارد هستند. این پارامترها توسط رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\beta = (1-\mu) \left(\frac{\mu(1+\mu)}{\sigma^2} - 1 \right), \alpha = \frac{\mu\beta}{1-\mu} \quad (3)$$

هدف از تعریف مقادیر α و β که تابعی از مقدار میانگین تشعشع خورشید و انحراف ولتاژ آن در یک ساعت مشخص است، برای بیان راحت‌تر و نمایش ساده‌تر، تابع چگالی توزیع بتا (رابطه (۲)) است. لذا صرفاً یک عبارت ریاضی بوده و مفهوم و تعریف فیزیکی ندارد.



شکل ۳. اطلاعات ساعتی سرعت باد، تشعشع خورشید و بار مسکونی و تجاری.

اطلاعات میزان تشعشع خورشید در جدول ۲ آمده است [۲۳]. بر پایه این جدول، مقدار میانگین تشعشع خورشید به دست آمده در هر ساعت توسط رابطه (۳)، محاسبه شده و نتایج آن در شکل ۳-ب گزارش شده است. در ادامه می‌توان میزان توان تولیدی توسط PV را به عنوان تابعی از تشعشع به کمک رابطه (۴) محاسبه کرد.

$$P_{PV}(t) = N_{PV} f_{PV} P_{PV}^r \left(\frac{g(t)}{g^{st}} \right) \left(1 + R_{PV} [T^c(t) - T^{st}] \right) \quad (4)$$

جدول ۲. مشخصات تشعشع خورشید در ساعات مختلف.

ساعت	$\mu(\text{kw/m}^2)$	$\sigma(\text{kw/m}^2)$	ساعت	$\mu(\text{kw/m}^2)$	$\sigma(\text{kw/m}^2)$	ساعت	$\mu(\text{kw/m}^2)$	$\sigma(\text{kw/m}^2)$
۶	۰.۰۱۹	۰.۰۳۵	۱۱	۰.۶۱۰	۰.۲۷۳	۱۶	۰.۳۸۸	۰.۲۰۴
۷	۰.۰۹۶	۰.۱۱۰	۱۲	۰.۶۵۷	۰.۲۸۴	۱۷	۰.۱۹۰	۰.۱۶۳
۸	۰.۲۲۲	۰.۱۸۲	۱۳	۰.۶۴۸	۰.۲۸۲	۱۸	۰.۰۸۰	۰.۰۹۸
۹	۰.۳۸۱	۰.۲۱۷	۱۴	۰.۵۹۰	۰.۲۶۵	۱۹	۰.۰۱۷	۰.۰۳۲
۱۰	۰.۵۱۱	۰.۲۵۳	۱۵	۰.۴۷۷	۰.۲۳۷			

که در آن N_{PV} تعداد پنل خورشیدی، f_{PV} ضریب کاهشی، P_{PV}^r توان نامی، $g(t)$ و g^{st} تشعشع خورشید در لحظه t و تشعشع خورشید استاندارد (1000 w/m^2)، R_{PV} بیانگر ضریب دمایی، $T^c(t)$ و T^{st} بیانگر دمای پنل در لحظه t و دمای پنل تحت شرایط استاندارد (27°C) برای PV است.

بارهای الکتریکی در سیستم توزیع

عمده بارهای الکتریکی در شبکه توزیع امروزی علاوه بر بارهای تجاری و مسکونی، بارهای شارژ باتری EV هستند، لذا در این مقاله ضمن بررسی پروفیل بار روزانه تجاری و مسکونی که با توجه به میانگین اطلاعات اندازه‌گیری شده از بار

مصرفی در یک منزل مسکونی و یک مرکز تجاری به دست آمده است، به مطالعه بار الکتریکی ناشی از EV پرداخته شده است. نتایج اندازه‌گیری بارهای تجاری و مسکونی در شکل ۳-ج و ۳-د گزارش شده است.

مدل احتمالاتی EV و روابط حاکم بر آنها

خودروهای هیبریدی، خودروهایی هستند که دارای دو حالت عملکردی CD (تأمین انرژی از باتری) و CS (تأمین انرژی از سوخت فسیلی، بعد از تخلیه کامل باتری) هستند. نفوذ بالای این خودروها و تأمین توان شارژ آنها باعث شده است که لزوم مطالعه آنها در تمام مسائل شبکه‌های برق با اهمیت باشد. بار احتمالی این خودروها به شبکه تابعی از استراتژی‌های مختلف شارژ شامل شارژ سریع و شارژ معمولی، استراتژی جایگزینی باتری، استراتژی‌های مختلف رانندگی و مقدار اولیه SOC (شارژ اولیه خودرو) است [۱۹]. دو روش برای شارژ باتری خودروها وجود دارد، یکی PHEV که شامل روش‌های متداول شارژ سریع و معمولی خودروها در ایستگاه شارژ به وسیله شارژرها است و دیگری BX که روش جایگزینی باتری خودرو با باتری‌های از قبل شارژ شده در ایستگاه‌های طراحی شده برای این هدف است. مدل‌های ریاضی و مفاهیم این استراتژی‌ها در ادامه مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

مدل‌های احتمالاتی شارژ اولیه و زمان شارژ خودروها

مسافت روزانه طی شده توسط خودروها (d_p) وابسته به نوع کاربرد خودروها است. در این مقاله خودروها به چهار دسته تاکسی، اتوبوس، خودروهای خدمات عمومی (خصوصی) و خودروهای خصوصی دسته‌بندی می‌شوند. بر اساس گزارش NHTS، d_p از تابع توزیع لاگ نرمال (رابطه (۵)) تبعیت می‌کند [۲۴]:

$$f_{d_p}(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi}\delta} e^{-\frac{(\ln x - \mu)}{2\delta^2}} \quad (5)$$

که μ و δ^2 میانگین و واریانس تابع چگالی لاگ نرمال است که طبق روابط زیر به دست می‌آید:

$$\mu = \ln(E(x)) - 0.5 \times \ln\left(1 + \left(\frac{D(x)}{E(x)}\right)^2\right) \quad (6)$$

$$\delta^2 = \ln\left(1 + \left(\frac{D(x)}{E(x)}\right)^2\right) \quad (7)$$

$D(x)$ و $E(x)$ میانگین و واریانس اطلاعات نمونه‌برداری شده در مرکز NHTS بوده که در خودروهای مختلف متفاوت است. این اطلاعات در جدول ۳ آمده است.

مقدار SOC خودروها نیز کاملاً تصادفی بوده و بر مبنای زمان شارژ قبلی و مسافت طی شده بین دو شارژ است. فرض می‌شود که شروع رانندگی بعد از شارژ کامل باشد و مقدار اولیه شارژ بر اساس رابطه (۸) به دست می‌آید:

$$SOC = \left(1 - \frac{\alpha h d}{\eta E_n}\right) \times 100\% \quad (8)$$

در این رابطه α تعداد روزها بین شارژها است. تاکسی‌ها در هر روز ۲ بار ($\alpha=0.5$)، اتوبوس‌ها یک بار در روز ($\alpha=1$) و ماشین‌های خصوصی و دولتی، یک بار در دو روز ($\alpha=2$) شارژ می‌شوند. در اینجا $\eta = 0.672$ ثابت ضریب رانندگی EV است. h انرژی مصرفی در هر کیلومتر و d مسافت طی شده است. d نیز یک تابع تصادفی بوده که توسط رابطه (۵) و اطلاعات جدول ۳ به دست می‌آید. h انرژی مصرفی در هر کیلومتر بوده که طبق مراجع [۲۵] مقدار آن برای اتوبوس‌ها برابر 0.1205 و برای سایر کارایی‌ها ذکر شده در جدول ۳ برابر 0.1193 است. همچنین طبق مراجع فوق E_n (ظرفیت نامی انرژی ذخیره‌سازی شده) برای اتوبوس‌ها برابر 165 kWh و برای سایر کارایی‌ها برابر 80 kWh است.

جدول ۳. میانگین و واریانس اطلاعات نمونه‌برداری شده در مرکز NHTS.

نوع کارایی	$E(x)$	$\sqrt{D(x)}$	نوع کارایی	$E(x)$	$\sqrt{D(x)}$
اتوبوس	۶۸۳	۲۰/۲	خودروی خدمات عمومی (دولتی)	۶۸۳	۲۰/۲
تاکسی	۱۴۳	۳۱/۳	خودروی خصوصی	۱۴۳	۳۱/۳

مدل احتمالاتی زمان شروع شارژ

زمان شروع شارژ وابسته به کارایی خودروها، شرایط شارژ و نوع باتری آن است. اتوبوس‌ها و تاکسی‌ها علاوه بر شارژ در زمان‌های قبل از شروع به کار (T_{on}) و بعد از اتمام کار در شب (T_{off})، در زمان استراحت ظهر ($[T_{m1}, T_{m2}]$) نیز تنها در حالت شارژ سریع می‌توانند شارژ شوند. زمان شروع و پایان کار تمام خودروها با T_{on} و T_{off} نشان داده می‌شود. مدت زمان استراحت ظهر برای تاکسی‌ها و اتوبوس‌ها $[T_{m1}, T_{m2}]$ است. از آنجاکه مدت زمان شارژ ظهر کوتاه است، برخی از EVs نمی‌توانند شارژ کامل شوند. برای اطمینان از اینکه EVs سفرشان را با شارژ کامل شروع کند، لازم است که در شب شارژ شوند. زمان کارکرد خودروها در جدول ۴ آمده است [۲۶].

جدول ۴. زمان شروع، پایان و استراحت خودروها.

	T_{on}	T_{off}	T_{m1}	T_{m2}	T_{on}	T_{off}
تاکسی	۴	۲۳	۱۱	۱۴	۸	۲۰
اتوبوس	۶	۲۱	۱۰	۱۲	۸	۱۸

تابع توزیع احتمالاتی نرمال برای زمان شروع شارژ ارائه شده که برای خودروهای خصوصی و خدمات عمومی در رابطه (۹) و این تابع برای تاکسی‌ها و اتوبوس‌ها در رابطه (۱۰) آمده است. در این روابط T_c حداکثر مدت زمان مورد نیاز برای شارژ کامل خودروها و T_{on} زمان شروع شارژ خودرو است. f_{ts} بیانگر تابع توزیع احتمال است.

$$if \ T_{on} \leq T_c : f_{ts}(x) = \begin{cases} \frac{1}{24 - (T_c - T_{on}) - T_{off}} & T_{off} \leq x \leq 24 - (T_c - T_{on}) \\ 0 & else \end{cases}$$

(۹)

$$if \ T_{on} > T_c : f_{ts}(x) = \begin{cases} \frac{1}{24 + (T_{on} - T_c) - T_{off}} & 0 \leq x \leq T_{on} - T_c \ \& \ T_{off} \leq x \leq 24 \\ 0 & else \end{cases}$$

$$\text{if } T_{on} \leq T_c : f_{ts}(x) = \begin{cases} \frac{1}{24 + (T_{on} - T_{off}) - 2T_c + (T_{m2} - T_{m1})} & T_{m1} \leq x \leq T_{m2} - T_c \\ \frac{1}{(T_{on} - T_{off}) - 2T_c + (T_{m2} - T_{m1})} & T_{off} \leq x \leq T_{on} - T_c + 24 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{if } T_{on} > T_c : f_{ts}(x) = \begin{cases} \frac{1}{24 + (T_{on} - T_{off}) - 2T_c + (T_{m1} - T_{m2})} & 0 \leq x \leq T_{on} - T_c \ \& \ T_{off} \leq x \leq 24 \\ \frac{1}{24 + (T_{on} - T_{off}) - 2T_c + (T_{m1} - T_{m2})} & T_{m1} \leq x \leq T_{m2} - T_c \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

مدل احتمالاتی تعویض باتری

یکی دیگر از روش‌های شارژ باتری خودروها، روش تعویض باتری است. در این روش برای افزایش طول عمر باتری و کاهش هزینه شارژ، باتری‌ها جداگانه شارژ شده و جایگزین باتری خودرو می‌گردند. در این جا محدودیت شارژ کامل برای خودروها قبل از هر حرکت برداشته شده، اما زمان شروع شارژ آن تحت کنترل رانندگان نیست. اگر دوره شارژ باتری‌های در بازه $[T_{a1}, T_{a2}]$ ، $[T_{b1}, T_{b2}]$ و $[T_{c1}, T_{c2}]$ تعریف شده باشد، آنگاه تابع توزیع احتمال نرمال برای زمان شروع شارژ به روش BX عبارت است از:

$$f_{ts}(x) = \begin{cases} \frac{\eta_a}{T_{a2} - T_{a1}} & T_{a1} \leq x \leq T_{a2} \\ \frac{\eta_b}{T_{b2} - T_{b1}} & T_{b1} \leq x \leq T_{b2} \\ \frac{\eta_c}{T_{c2} - T_{c1}} & T_{c1} \leq x \leq T_{c2} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (11)$$

η_a ، η_b و η_c به ترتیب احتمال شارژ در بازه a، b و c است؛ که در آن $\eta_a + \eta_b + \eta_c = 1$. چند الگوی نمونه زمان تعویض شارژ به همراه احتمال آن در جدول ۵ آمده است [۲۴]:

جدول ۵. اطلاعات زمان شارژ تعویض باتری.

الگوها	احتمال %	$[T_{a1}, T_{a2}]$, η_a , $[T_{b1}, T_{b2}]$, η_b , $[T_{c1}, T_{c2}]$, η_c
الگوی ۱	۱۸	$[4, 9.5]$, 0.54, $[13, 14]$, 0.08, $[20, 23]$, 0.38
الگوی ۲	۱۲	$[0, 5]$, 0.4, $[5, 8]$, 0.1, $[17, 24]$, 0.5

الگوها	احتمال %	$[T_{a1}, T_{a2}], \eta_a, [T_{b1}, T_{b2}], \eta_b, [T_{c1}, T_{c2}], \eta_c$
الگوی ۳	۸	$[0, 9], 0.75, [12, 17], 0.1, [21, 24], 0.15$
الگوی ۴	۲۶	$[1, 7], 0.75, [9, 11], 0.05, [14, 17], 0.2$
الگوی ۵	۳۶	$[1, 9], 0.9, [20, 24], 0.1$

شبیه‌سازی احتمالاتی بار تحمیلی ناشی از EV به شبکه توزیع

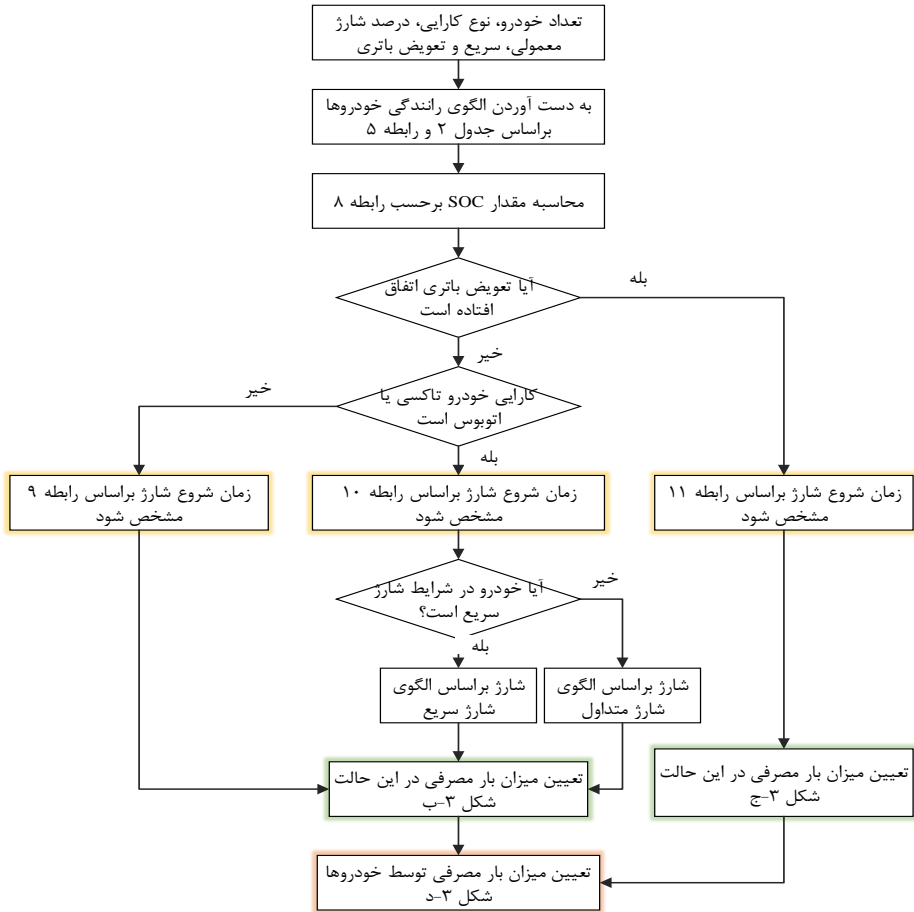
برای محاسبه توان شارژ یک خودرو، ابتدا باید مدل مسافت طی شده توسط خودرو را استخراج کرده، سپس زمان شروع شارژ و نوع شارژ براساس کارایی خودرو محاسبه گردد. بعد از محاسبه مجموع بار شارژ EV ها به راحتی بار تحمیلی شارژ خودروها به دست می‌آید. برای افزایش طول عمر باتری‌ها، در این مطالعه فرض می‌گردد که تاکسی‌ها و اتوبوس‌ها در طول زمان استراحت ظهر تنها مجاز به شارژ خودرو به صورت سریع هستند. در این حالت براساس مقدار اولیه SOC، چنانچه مدت زمان استراحت کمتر از شارژ متداول (T_{cn}) و بیشتر از مدت زمان شارژ سریع (T_{cr}) باشد $T_{cr} \leq T_{m2} - T_{m1} \leq T_{cn}$ آنگاه رانندگان می‌توانند خودرو خود را در حالت شارژ سریع، شارژ کنند. طبق مرجع [۳]، باتری خودرو بدون شارژ اولیه، با شارژ سریع در ۱ ساعت و با شارژ معمولی در ۴ ساعت کاملاً شارژ می‌شود. برای درک بهتر این مطلب، الگوریتم شارژ خودروها در شکل ۴ آمده است.

به کمک الگوریتم پیشنهادی، الگوریتم شارژ خودرو در یک شبکه نمونه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در شبکه تحت مطالعه مقاله (شبکه ۳۳ شینه استاندارد) فرض می‌شود که EV ۳۵۴۰ وجود دارد [۱۹] که اطلاعات آن در جدول ۶ آمده است.

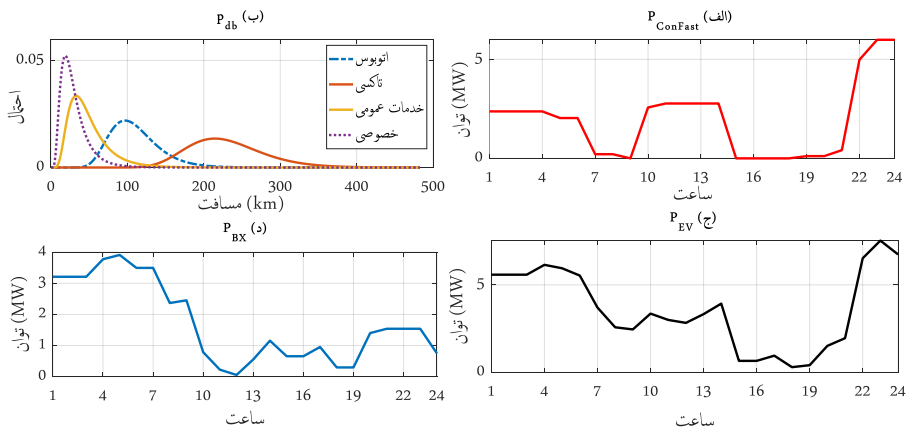
جدول ۶. اطلاعات EV موجود در شبکه ۳۳ شینه.

درصد روش‌های شارژ مختلف			درصد کارایی EV مختلف			
اتوبوس	تاکسی	خودروهای خدمات عمومی	خودرو خصوصی	شارژ معمولی	شارژ سریع	تعویض باتری
۵۰	۲۰	۲۰	۱۰	۶۰	۳۰	۱۰
درصد						

نتایج شبیه‌سازی الگوریتم شکل ۴ در شکل ۵ آمده است. شکل ۵-الف تابع چگالی احتمال مقدار مسافت طی شده خودروها با کاربردهای مختلف را نشان می‌دهد، شکل ۵-ب و ۵-ج به ترتیب مجموع توان مصرفی توسط خودروها در حالت شارژ سریع و معمولی و مجموع توان مصرفی توسط ایستگاه‌های طراحی شده برای



شکل ۴. شبیه‌سازی احتمالاتی بار تحمیلی EV به شبکه توزیع.



شکل ۵. نتایج شبیه‌سازی الگوریتم شکل (۴).

تعویض باتری‌ها را نشان می‌دهد. مجموع توان‌های مصرفی در شکل ۵-ب و ۵-ج در شکل ۵-د نشان داده شده است.

مسئله بهینه‌سازی مدیریت انرژی

در این مقاله فرض می‌گردد که جایابی توربین‌های بادی بر اساس موقعیت‌های جغرافیایی، شرایط آب و هوایی و محدودیت‌های فنی شبکه انجام شده است. ایستگاه‌های شارژ خودروها در سطح شهر در محل کار و خانه به صورت گسترده وجود دارد. همچنین فرض می‌گردد که سلول‌های خورشیدی به صورت گسترده بر روی پشت‌بام مناطق مسکونی و تجاری نصب شده است؛ بنابراین توان مصرفی توسط ایستگاه‌های شارژ خودروها و توان تولیدی توسط PV به طور مساوی بین شین‌ها تقسیم می‌شود. در این مقاله مدیریت انرژی مصرفی در شبکه به کمک جایابی مناسب ایستگاه‌های BX به همراه مشخص کردن تپ ترانسفورماتور فوق توزیع انجام می‌شود. بنابراین هدف مسئله، بهینه‌سازی مصرف انرژی الکتریکی در شبکه است. از آنجا که پارکینگ‌های BX مصرف کننده توان اکتیو و راکتیو هستند، لذا سطح پروفیل ولتاژ با افزایش توان مصرفی کاهش می‌یابد، بنابراین استفاده از تپ ترانسفورماتور فوق توزیع می‌تواند پروفیل ولتاژ را بهبود بخشد، بهبود پروفیل ولتاژ سبب کاهش تلفات انرژی در شبکه و در نتیجه سبب بهبود مدیریت انرژی می‌شود. با تعیین تعداد و محل پارکینگ‌های BX نیز می‌توان پروفیل ولتاژ و در نتیجه انرژی مصرفی را مدیریت کرد. براساس مطالب بیان شده، متغیرهای مسئله (رابطه ۱۱) و تابع هدف (رابطه ۱۲) تعریف می‌گردد.

بنابراین در مسئله بهینه‌سازی علاوه بر جایابی و تعیین تعداد پارکینگ BX، تپ ترانسفورماتور فوق توزیع در راستای مدیریت انرژی و ارضا قیود آن نیز تعیین می‌گردد. تابع هدف مسئله که مدیریت انرژی مصرفی در شبکه است در رابطه (۱۲) آمده است:

$$\min |E_{com}| = \sum_{t=1}^{24} \sum_{n=1}^{N_{bus}} \left[\begin{array}{l} P_d^n(t) \sqrt{(1+tg^2(\theta_d))} - \xi_{PV}^n P_{PV}^n(t) \sqrt{(1+tg^2(\theta_{PV}))} \\ - \xi_{WT}^n P_{WT}^n(t) \sqrt{(1+tg^2(\theta_{WT}))} + \xi_{EV/CF}^n P_{EV/CF}^n(t) \sqrt{(1+tg^2(\theta_{EV/CF}))} \\ + \xi_{EV/BX}^n P_{EV/BX}^n(t) \sqrt{(1+tg^2(\theta_{EV/BX}))} + \sqrt{(P_{loss}(t))^2 + (Q_{loss}(t))^2} \end{array} \right] \quad (12)$$

طبق مرجع [۲۷] ضریب توان برای WT $(\cos(\theta_{WT}))$ ، PV $(\cos(\theta_{PV}))$ و ایستگاه‌های شارژ و تعویض باتری EV $(\cos(\theta_{EV/FC}))$ به ترتیب برابر ۰/۹۵، ۰/۹ و ۰/۹۵ پس فاز است. که در آن EV/CF بیانگر خودروها با حالت شارژ متداول و سریع و EV/BX بیانگر ایستگاه‌های شارژ باتری خودروها برای روش تعویض باتری است. ξ_{WT}^n ، ξ_{PV}^n ، $\xi_{EV/CF}^n$ و $\xi_{EV/BX}^n$ یک عدد باینری است که بیانگر وجود (۱) یا عدم وجود (۰) منابع PV، WT، ایستگاه شارژ باتری به روش متداول و معمولی (EV/CF) و ایستگاه‌های تعویض باتری (EV/BX) در شین n ام است. در این مسئله، هدف جایابی ایستگاه‌های تعویض باتری است به گونه‌ای که تابع هدف (۱۲) حداقل شود. قیود مسئله بهینه‌سازی شامل محدودیت‌های بهره‌برداری شبکه توزیع است که در روابط (۱۳) و (۱۴) به آن می‌پردازد و دیگر محدودیت‌های مسئله، محدودیت‌های WT، PV و EV هستند که در قسمت (۲) روابط (۵) - (۱۱)، جداول (۳) - (۶) و شکل (۴) - (۵) آمده است.

ولتاژ در هر شین $(V_i(t))$ باید در محدوده مد نظر خود یعنی بین حد پایین ولتاژ $(V_{min} = 0.9)$ تا حد بالای ولتاژ $(V_{max} = 1.1)$ باشد.

$$V_{min} \leq V_i(t) \leq V_{max} \quad (13)$$

همچنین جریان عبوری از خطوط ($I_l(t)$) نمی تواند از حد حرارتی آن (I_{max}) بیشتر باشد.

$$I_l(t) \leq I_{max} \quad (14)$$

در این مقاله برای به دست آوردن جواب بهینه از ویژگی ها و توانایی های، HSA استفاده می شود. HSA برای بهینه سازی مسائل از پدیده موسیقی در یافتن یک حالت خارق العاده از هارمونی، الهام می گیرد. این الگوریتم دارای پنج مرحله، مقدار دهی اولیه پارامترهای مسئله، مقدار دهی اولیه حافظه هارمونی، ایجاد یک هارمونی جدید از حافظه هارمونی، به روز رسانی حافظه هارمونی و بررسی شرط توقف، تشکیل شده که جزئیات آن در [۲۷] آمده است. هارمونی مدنظر مسئله (رابطه (۱۵)) عبارت است از تعداد و محل پارکینگ های BX و تعداد تپ ترانسفورماتور فوق توزیع به علاوه تابع هدف مسئله (OF) که در رابطه (۱۲) آمده است. محل پارکینگ i ام با P_{BXi} و تعداد آن با اندیس n مشخص می شود.

$$HM_i = [n_{tap} \quad P_{BX1} \quad \dots \quad P_{BXn} \quad OF] \quad (15)$$

شبیه سازی و تحلیل نتایج

الگوریتم پیشنهادی بر روی یک شبکه ۳۳ شینه توزیع اجرا شده است [۲۸]. لازم به ذکر است که در شبیه سازی الگوریتم از نرم افزار متلب استفاده شده است که انرژی مصرفی روزانه (رابطه (۱۲)) با جایابی مناسب پارکینگ های BX، به دست آوردن تعداد آن و تعیین تپ ترانسفورماتور فوق توزیع را بهینه می کند. در این شبکه فرض می گردد که:

- ۱- طبق مرجع [۲۹] دو WT با ظرفیت ۵۰۰ کیلووات و ضریب توان ۰/۹ پس فاز در شین ۱۸ و ۳۳ قرار دارد.
- ۲- از آنجا که در حوزه سیستم های توزیع PV به صورت گسترده و بر روی سقف مناطق مسکونی و تجاری با ظرفیت محدود نصب می شود، لذا در این مقاله فرض می گردد که در شبکه تحت مطالعه ۱۰۰ سلول خورشیدی با ظرفیت ۵ کیلووات نصب شده است. ضریب توان این منابع ۰/۹۵ پس فاز است [۲۱]؛ لذا این ظرفیت به طور یکسان بر روی تمام شین های شبکه تقسیم می شود.
- ۳- از طرفی دیگر از آنجا که ادارات و منازل دارای ایستگاه های شارژ CF هستند، لذا در این مقاله فرض می گردد توان مصرفی برای شارژ خودروها به روش CF روی شین ها به طور مساوی تقسیم می شود. ضریب توان مصرفی این منابع ۰/۹۵ پس فاز است [۲۹].
- ۴- از آنجا که در سیستم توزیع هر شین شامل بارهای الکتریکی مسکونی و تجاری است؛ لذا در این مقاله فرض می گردد که بار الکتریکی مسکونی موجود روی هر شین شامل ۷۰ الی ۸۰ درصد بار الکتریکی به علاوه ۲۰ الی ۳۰ درصد بار تجاری است. این اعداد برای هر شین به صورت رندوم طبق رابطه زیر محاسبه می شود:

$$P_d^n(t) = \alpha^n(t) \times P_d^{Com,n}(t) + \beta^n(t) \times P_d^{Res,n}(t) \quad (16)$$

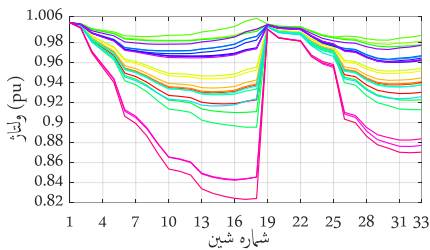
$P_d^{Res}(t)$ و $P_d^{Com}(t)$ به ترتیب مقدار بار تجاری و مسکونی در لحظه t در شین n ام است. $\alpha^n(t)$ و $\beta^n(t)$ ضرایب مربوط به هر بار است به قسمی که در آن $\alpha^n(t) + \beta^n(t) = 1$ و داریم:

$$\begin{cases} \alpha^n(t) = \text{rand}(0.7, 0.8) \\ \beta^n(t) = 1 - \alpha^n(t) \end{cases} \quad (17)$$

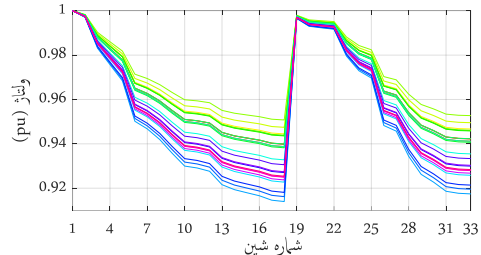
۵- تپ ترانسفورماتور فوق توزیع می‌تواند با بازه‌های ۰/۰۲ پر یونیت و تا سه تپ مثبت تغییر کند. این تپ، ولتاژ شین فوق توزیع را طبق رابطه (۱۸) تغییر دهد.

$$V_i = (1 + 0.02 \times n_{tap}) \times V^{rated} \quad n_{tap} = 0, 1, 2, 3 \quad (18)$$

پروفیل ولتاژ نتایج پخش بار شبکه تنها با در نظر گرفتن سطوح مختلف بار در شکل ۶-الف نشان داده است که در محدوده قابل قبول رابطه (۱۳) قرار دارد. این پروفیل با در نظر گرفتن WT، PV و EV/FC نیز در شکل ۶-ب نشان داده است که در محدوده قابل قبول ولتاژ نمی‌باشد.



(ب)



(الف)

شکل ۶. الف-پروفیل ولتاژ شبکه تحت سطوح مختلف بار، ب-پروفیل ولتاژ شبکه تحت سطوح مختلف بار و بانوذ EV/FC و WT، PV

از شکل ۵ می‌توان نتیجه گرفت که P_{BX} در برخی ساعات بیشتر از توان مصرفی $P_{ConFast}$ توسط است، بنابراین مصرف توان توسط پارکینگ‌های BX، وضعیت ولتاژ شبکه را بدتر از شکل ۶-ب می‌کند. علت این مسئله آن است که BX ها مصرف کننده انرژی بوده و باعث افزایش افت ولتاژ در شبکه می‌شود. لذا برای این که این مشکل رخ ندهد، علاوه بر این که باید جایابی مناسب برای پارکینگ‌های BX انجام شود، بایستی از تپ ترانسفورماتور توزیع برای بهینه کردن هدف و برقراری محدودیت‌ها بهره گرفت.

برای این منظور الگوریتم پیشنهادی توسط HSA اجرا شده و نتایج حاصل از الگوریتم در جدول ۷ آمده است. در این جدول تعداد پارکینگ‌های BX مدنظر در ستون اول، محل پارکینگ‌ها در ستون دوم، تپ ترانسفورماتور در ستون سوم و مقدار تابع هدف (انرژی مصرفی روزانه دریافتی از شبکه بالادستی بر حسب مگاژول) در ستون چهارم آمده است. باید در نظر داشت که تعداد پارکینگ‌ها و محل پارکینگ‌ها به همراه تپ ترانسفورماتور جز خروجی مسئله بهینه‌سازی است.

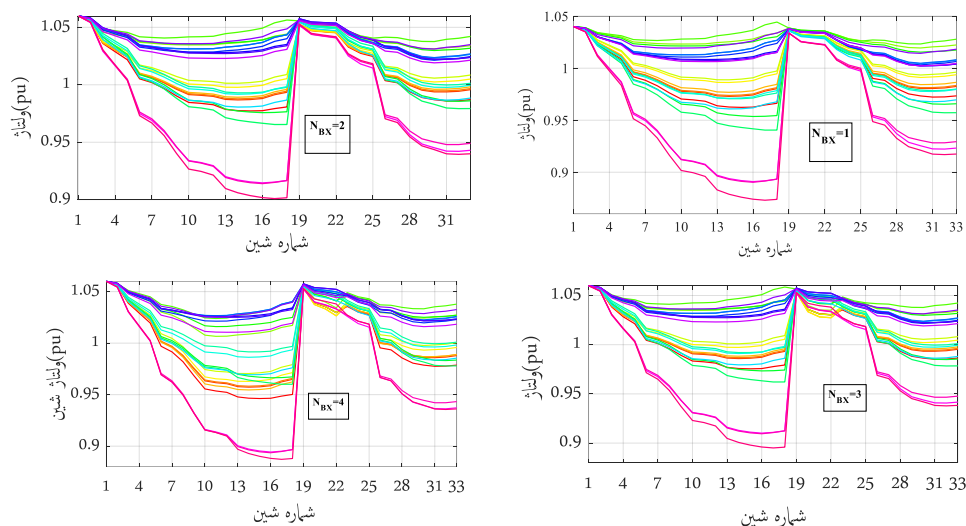
پروفیل ولتاژ مربوط به حالات بهینه شبیه‌سازی که در جدول ۷ گزارش شده، در شکل ۷ دیده می‌شود. همان‌طور که از نتایج مشخص است، تنها در حالتی که تعداد پارکینگ‌های BX برابر دو است، حدود ولتاژ به‌خوبی رعایت می‌گردد، و در سایر حالت‌ها پروفیل ولتاژ در برخی از شین‌ها در برخی از سطوح بار کمتر از ۰/۹ است که جواب مسائل قابل قبول نیست؛ بنابراین بهترین جواب مسئله، دو پارکینگ BX در شین‌های ۳ و ۱۹ با تپ +۳ است. باید در نظر داشت که در

حالتی که سطح ولتاژ از ۰/۹ کمتر است، امکان اصلاح سطح ولتاژ با تغییر تپ یا جابجایی مجدد BX وجود ندارد، به عبارتی دیگر شبکه قادر به تأمین ولتاژ در سطح قابل قبول نیست.

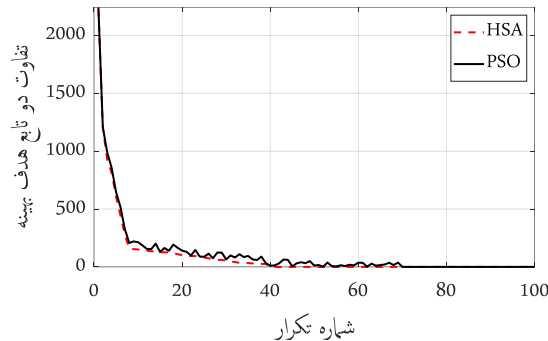
جدول ۷. نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی.

تعداد پارکینگ	محل پارکینگ‌ها	تپ	OF(Mj)	تعداد پارکینگ	محل پارکینگ‌ها	تپ	OF(Mj)
۱	۱	+۲	۹۹۲	۲	۳ و ۱۹	+۳	۹۸۶
۳	۱، ۴ و ۲۱	+۳	۱۰۰۶	۴	۱، ۲، ۱۱ و ۲۲	+۳	۸۷۷

از آنجا که تاکنون مسئله مشابهی در مقالات دیگر انجام نشده که بتوان نتایج را با آن مقایسه کرد، بنابراین به منظور اعتبارسنجی و مقایسه بهتر نتایج و کارایی الگوریتم پیشنهادی، مسئله پیشنهادی با دو پارکینگ با استفاده از PSO (روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات) نیز حل شده است. مشخص شد که نتیجه بهینه به دست آمده از PSO مشابه نتیجه به دست آمده از HSA است. با این حال، HSA در این مثال از نظر سرعت همگرایی عملکرد بهتری دارد. مطابق شکل ۸، سرعت همگرایی الگوریتم HSA پیشنهادی سریعتر از الگوریتم PSO است (HSA در تکرار پنجاه همگرا می‌شود در حالی که PSO در تکرار هفتاد همگرا می‌شود). محور افقی نمودار شماره تکرار را نشان می‌دهد و محور عمودی نمودار شکل ۸، اختلاف بین جواب بهینه دو تکرار را نشان می‌دهد.



شکل ۷. پروفیل ولتاژ شبکه مربوط به جدول ۷.



شکل ۸. مقایسه نتایج HAS و PSO.

نتیجه گیری

در این مقاله حداقل‌سازی انرژی روزانه دریافتی از شبکه بالادستی در سیستم توزیع در حضور PV، WT و بانفوذ بالای EV مورد مطالعه قرار گرفت. این هدف به وسیله کنترل تپ ترانسفورماتور فوق توزیع و جایابی بهینه ایستگاه‌های BX انجام گرفت. در جایابی بهینه ایستگاه‌های BX، محل و تعداد ایستگاه‌ها مشخص می‌شود. در اینجا کارایی مختلف EV از جمله استفاده به صورت تاکسی، اتوبوس، خودروهای خدمات عمومی و خصوصی و مسافت طی شده و SOC کاملاً احتمالاتی مورد مطالعه قرار گرفته است. برای تمام کارایی EVها بازه زمانی مورد استفاده و برای اتوبوس‌ها و تاکسی‌ها، زمان استراحت ظهر در نظر گرفته شده است. این EVها می‌توانند در زمان استراحت ظهر از شارژ سریع استفاده کنند. همچنین بارهای الکتریکی از جمله بارهای الکتریکی مسکونی و تجاری در شین‌های مختلف شبیه‌سازی شده است. با استفاده از اطلاعات شبکه و منابع RES، بارها و EVها به عنوان ورودی الگوریتم جستجوی هارمونی، تعداد پارکینگ‌های BX، محل آنها و وضعیت تپ ترانسفورماتور فوق توزیع در راستای هدف بهینه‌سازی مشخص می‌شود.

References

- [1] Rahnama, A., Shayeghi, H., Dejamkhooy, A., & Bizon, N. (2022). A cost-technical profit-sharing approach for optimal energy management of a multi-microgrid distribution system. *Energy*, 261, 125057. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125057>
- [2] Ghahramani, M., Nazari-Heris, M., Zare, K., & Mohammadi-Ivatloo, B. (2019). Energy and reserve management of a smart distribution system by incorporating responsive-loads /battery/wind turbines considering uncertain parameters. *Energy*, 183, 205-219. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.085>
- [3] Hemmatpour, M. H., Rezaeian Koochi, M. H., Dehghanian, P., & Dehghanian, P. (2022). Voltage and energy control in distribution systems in the presence of flexible loads considering coordinated charging of electric vehicles. *Energy*, 239(3), 121880. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121880>
- [4] Ghaffari, A., Askarzadeh, A., & Fadaeinedjad, R. (2022). Optimal allocation of energy storage systems, wind turbines and photovoltaic systems in distribution network considering flicker mitigation. *Applied Energy*, 319(2), 119253. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119253>

- [5] Naderipour, A., Abdul-Malek, Z., Mustafa, M. W. B., & Guerrero, J. M. (2021). A multi-objective artificial electric field optimization algorithm for allocation of wind turbines in distribution systems. *Applied Soft Computing*, 105(1), 107278. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107278>
- [6] Nourian, S., & Kazemi, A. (2022). Resilience enhancement of active distribution networks in the presence of wind turbines and energy storage systems by considering flexible loads. *Journal of Energy Storage*, 48C(2), 104042. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104042>
- [7] Abad, M. S. S., & Ma, J. (2021). Photovoltaic Hosting Capacity Sensitivity to Active Distribution Network Management. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Power Systems*, 36(1), 107-117. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.3007997>
- [8] Jaramillo-Leon, B., Zambrano-Asanza, S., Franco, J. F., & Leite, J. B. (2023). Simulation-based optimization framework to increase distribution system photovoltaic hosting capacity through optimal settings of smart inverter Volt-VAr control function. *Electric Power Systems Research*, 215, 108971. <https://doi.org/10.1016/j.epr.2022.108971>
- [9] Chi Kien, L., Thanh Nguyen, T., Minh Phan, T., & Trung Nguyen, T. (2022). Maximize the penetration level of photovoltaic systems and shunt capacitors in distribution systems for reducing active power loss and eliminating conventional power source. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102253. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102253>
- [10] Pan, W., Mao, M., Zhou, Y., Quan, X., & Li, Y. (2021). The impact of extreme weather condition on the voltage regulation in distribution systems with high penetration of rooftop photovoltaic. *Energy Reports*, 7, 320-331. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.041>
- [11] Moghaddam, S. Z., & Akbari, T. (2022). A Mixed-integer Linear Programming Model for the Plug-in Electric Vehicle Charging Problem in Unbalanced Low Voltage Electrical Distribution Systems Considering Neutral Conductor. *Electric Power Systems Research*, 209(3), 108049. <https://doi.org/10.1016/j.epr.2022.108049>
- [12] Gu, C., Zhang, Y., Wang, J., & Li, Q. (2021). Joint planning of electrical storage and gas storage in power-gas distribution network considering high-penetration electric vehicle and gas vehicle. *Applied Energy*, 301, 117447. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117447>
- [13] Kant, A., Singh, R., Kassi, S. K., Sharma, A., Mubashir, S., Sharma, A., Kanuri, C., Das, S., & Mulukutla, P. (2021). *Handbook of electric vehicle charging infrastructure implementation*. National Institution for Transforming India Aayog. <https://efastindia.org/handbook-electric-vehicle-charging-infrastructure-implementation>
- [14] Dashtaki, A., Hakimi, S. M., Hasankhani, A., Derakhshani, G., & Abdi, B. (2023). Optimal management algorithm of microgrid connected to the distribution network considering renewable energy system uncertainties. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 145(11), 108633. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108633>
- [15] Abbasi, S. M., Nafar, M., & Simab, M. (2021). Decentralized Control of Bidirectional Converters in a Grid-connected DC Microgrid to Increase System Stability Using a Genetic-Neural Algorithm. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 18(3), 187-205. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.261332.1319>
- [16] Mohammadi, F., Molaei, M., & Afra, O. (2021). Optimization of Nuclear Reactor Power with Control Rods Driven by Switched Reluctance Motor (SRM) With Differential

- Evolution and Firefly Algorithms. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 17(4), 81-97. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.128397>
- [17] Khodadadi, A., Abedinzadeh, T., Alipour, H., & Pouladi, J. (2022). Multi-Objective Operation Planning for a Distribution Network to Improve Economic Parameters and Network Resilience Considering Weather Conditions. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 19(3), 305-331. <https://doi.org/10.48301/kssa.2022.346042.2144>
- [18] Zhong, L., & Pei, M. (2020). Optimal Design for a Shared Swap Charging System Considering the Electric Vehicle Battery Charging Rate. *Energies*, 13(5), 1213. <https://doi.org/10.3390/en13051213>
- [19] Adegbobun, F., Von Jouanne, A., & Lee, K. Y. (2019). Autonomous Battery Swapping System and Methodologies of Electric Vehicles. *Energies*, 12(4), 667. <https://doi.org/10.3390/en12040667>
- [20] Hung, D. Q., Mithulananthan, N., & Lee, K. Y. (2014). Determining PV Penetration for Distribution Systems With Time-Varying Load Models. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Power Systems*, 29(6), 3048-3057. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2314133>
- [21] Palahalli, H., Maffezzoni, P., Daniel, L., & Grusso, G. (2022). Statistical analysis of PV penetration impact on residential distribution grids. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 32(5), 100949. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2022.100949>
- [22] Sharma, V., Aziz, S. M., Haque, M. H., & Kauschke, T. (2020). Effects of high solar photovoltaic penetration on distribution feeders and the economic impact. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 110021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110021>
- [23] Zhou, N., Xiong, X., & Wang, Q. (2014). Probability Model and Simulation Method of Electric Vehicle Charging Load on Distribution Network. *Electric Power Components and Systems*, 42(9), 879-888. <https://doi.org/10.1080/15325008.2014.903537>
- [24] Qian, K., Zhou, C., Allan, M., & Yuan, Y. (2011). Modeling of Load Demand Due to EV Battery Charging in Distribution Systems. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Power Systems*, 26(2), 802-810. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2057456>
- [25] Majumder, S., De, K., Kumar, P., Sengupta, B., & Biswas, P. K. (2021). Techno-commercial analysis of sustainable E-bus-based public transit systems: An Indian case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144(e560), 111033. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111033>
- [26] Mendoza, A., & Argueta, J. (2000). *Performance characterization—GM EV1 Panasonic lead acid battery*. Southern California Edison. <https://avt.inl.gov/sites/default/files/pdf/fsev/2000panpbaev1report.pdf>
- [27] Hemmatpour, M. H. (2019). Optimum Interconnected Islanded Microgrids Operation with High Levels of Renewable Energy. *Smart Science*, 7(1), 47-58. <https://doi.org/10.1080/23080477.2018.1540379>
- [28] Hemmatpour, M. H., & Koochi, M. H. R. (2022). Efficient Wind Turbine Generation Planning for Decreasing Distribution System Company Payments in Real Applications. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 10(1), 81-90. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2019.000421>
- [29] Silva, L. E. S. E., Vieira, J. P. A., Medeiros, R. L. P., Veroneze, G. D. M., Freitas, P. R. R. D., Ayres Júnior, F. A. D. C., & Lopes, A. D. C. (2023). Probabilistic operational costs assessment of combined PV-PEV connections in LV distribution networks. *Electric Power Systems Research*, 214(3), 108906. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108906>