



Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System

Research Article

(2025) 4(2):67-87

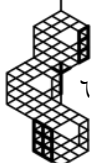
Optimal Placement of Electric Vehicle Charging and Discharging Stations-Connected to Electrical Distribution Networks in the Presence of Renewable Energy Sources Considering Price-Based Demand Response Programs

Majid Farjamipour¹, *PhD Student*, Mojtaba Shivaie¹, *Associate Professor*¹ Department of Electrical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Abstract:

In today's industrial world, the development of electric vehicles has made energy storage resources play a significant role in the efficient operation of electrical distribution networks. On this basis, the optimal placement of charging and discharging stations associated with electric vehicles has emerged as a technical challenge for network operators. In this paper, therefore, with a new perspective, the placement problem of charging and discharging stations pertaining to electric vehicles in the presence of renewable energy sources is modeled. In the proposed model, technical objectives including minimization of losses and voltage drop, as well as economic objectives comprising minimization of the cost of power purchased from the network and maximization of the profit derived from selling power to the network by electric vehicles are taken into account. In addition to this, existing limitations at the capacity of charging stations and the total power that can be charged and discharged at any moment are applied as constraints of the proposed model. The model also considers a peak-shaving strategy for load management on the consumer-side according to price-based demand response programs. The nonlinear power consumption problem and the participation of electric vehicles in providing network power are formulated as a mixed-integer problem and are solved using an improved genetic algorithm, as well as the results obtained are compared with those determined by a particle swarm optimization algorithm. The simulation of the proposed model is conducted using MATLAB software on a standard 69-node network, and the calculated results demonstrate its effectiveness and profitability.

Keywords: Charging and discharging stations, Electric vehicle, Improved genetic algorithm, Price-based demand response programs, Renewable energy sources.

Received: 30 April 2024**Revised:** 19 July 2024**Accepted:** 13 August 2024**Corresponding Author:** Dr. Mojtaba Shivaie, shivaie@shahroodut.ac.irDOI: <http://dx.doi.org/10.30486/TEEGES.2025.1118593>



جایابی بهینه ایستگاه‌های شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی متصل به شبکه توزیع انرژی الکتریکی در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر با در نظر گرفتن برنامه‌های پاسخگویی تقاضا مبتنی بر قیمت

مجید فرجامی‌پور^۱، دانشجوی دکتری، مجتبی شیوایی^۱، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده: در دنیای صنعتی امروز، توسعه صنعت خودروهای الکتریکی، سبب شده است تا منابع ذخیره‌ساز انرژی نقش بسزایی در بهره‌برداری کارآمد از شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی داشته باشد. بر این اساس، جایابی بهینه ایستگاه‌های شارژ و دشارژ مرتبط با خودروهای الکتریکی به عنوان یک چالش فنی پیش‌روی بهره‌برداران شبکه قرار گرفته است. لذا، در این مقاله، با رویکردی جدید، مسئله جایابی ایستگاه‌های شارژ و دشارژ مرتبط با خودروهای الکتریکی در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر مدل‌سازی می‌گردد. در مدل پیشنهادی، اهداف فنی شامل کمینه‌سازی تلفات و افت ولتاژ و همچنین، اهداف اقتصادی شامل کمینه‌سازی هزینه توان خریداری شده از شبکه و بیشینه‌سازی سود حاصل از فروش توان به شبکه توسط خودروهای الکتریکی در نظر گرفته می‌شوند. علاوه بر این، محدودیت‌های موجود در ظرفیت ایستگاه‌های شارژ، مجموع توان قابل شارژ و دشارژ در هر لحظه نیز به عنوان قیود مدل پیشنهادی لحاظ می‌گردد. از طرفی، در این مقاله، برای مدیریت بار در سمت مصرف‌کنندگان، راهبرد پیک‌سایبی منحنی بار براساس برنامه‌های پاسخگویی تقاضا مبتنی بر قیمت اعمال می‌شود. مسئله غیرخطی مصرف توان و مشارکت خودروهای الکتریکی در تأمین توان شبکه، مختلط با اعداد صحیح که با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهبودیافته حل شده و نتایج بدست آمده با الگوریتم اجتماع ذرات مقایسه می‌گردند. شبیه‌سازی مدل پیشنهادی توسط نرم‌افزار MATLAB و بر روی شبکه ۶۹ گره استاندارد انجام شد و نتایج نشان‌دهنده اثربخشی و سودمندی آن است.

واژه‌های کلیدی: ایستگاه‌های شارژ و دشارژ، خودروی الکتریکی، الگوریتم ژنتیک بهبود یافته، برنامه‌های پاسخگویی تقاضا مبتنی بر قیمت، منابع تجدیدپذیر انرژی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۱۱

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۲۳

نویسنده مسئول: دکتر مجتبی شیوایی، shivaie@shahroodut.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/TEEGES.2025.1118593>

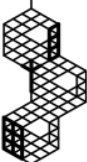


در دنیای صنعتی امروز، تأمین انرژی الکتریکی بطوریکه دارای حداقل افت ولتاژ و تلفات باشد، یکی از دغدغه‌های بهره‌برداران شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی بوده است. بر این اساس، شرکت‌های توزیع به صورت مداوم در حال بررسی طرح‌های نوآورانه و توسعه‌ی امکانات و زیرساخت‌های خود می‌باشند تا چالش‌های مذکور را به حداقل برسانند. از گذشته تا به امروز، راهبردهای متعددی از قبیل استفاده از جبران‌سازهای توان راکتیو و بهره‌برداری از منابع تولید پراکنده برای نیل به این هدف مورد استفاده قرار گرفته است [۱]. اما با پیدایش و گسترش روزافزون خودروهای الکتریکی^۱، استفاده از پتانسیل این منابع در ذخیره‌سازی توان الکتریکی برای بهبود شاخص‌های فنی-اقتصادی شبکه، بیش‌ازپیش مورد توجه قرار گرفت [۲]. از آنجایی که خودروهای الکتریکی در طول روز، مدت زمان قابل توجهی را در حالت پارک هستند، از ظرفیت ذخیره‌سازی باتری این خودروها می‌توان در ساعات کم باری برای ذخیره‌سازی توان الکتریکی استفاده کرد تا در ساعات پرباری با تزریق توان ذخیره شده در باتری خودروهای الکتریکی به شبکه، از آن‌ها همانند منابع تولید پراکنده برای مشارکت در تأمین توان شبکه استفاده کرد [۳]. به همین منظور با جایابی بهینه‌ی ایستگاه‌های شارژ و دشارژ هوشمند خودروهای الکتریکی، که همانند منابع تولید پراکنده در شبکه ایفای نقش می‌نمایند [۴]، می‌توان به اهداف مهمی از بعد فنی از جمله کاهش تلفات شبکه و به طبع آن کم شدن توان کل مصرفی، کمینه شدن افت ولتاژ و بهبود پروفیل ولتاژ و همچنین افزایش قابلیت اطمینان شبکه دست یافت و از دیدگاه اقتصادی نیز با ذخیره‌ی توان در باتری خودروهای الکتریکی در هنگام کم باری که بهای هر کیلووات توان کمینه می‌باشد و تزریق همان توان ذخیره شده به شبکه در هنگام پرباری که بهای توان در بیشینه حالت ممکن خود قرار دارد، سود قابل توجهی را عاید مالکان این خودروها نمود [۵]. علاوه بر آن از نقطه نظر کلان اقتصادی نیز با رفع نیاز به احداث نیروگاه و زیرساخت جدید برای تأمین توان در زمان پرباری، می‌توان از صرف منابع مالی در این راستا جلوگیری کرد [۶]. مرجع [۷]، بارها و منابع تولید انرژی یک منطقه از قبیل منابع تولید پراکنده را به عنوان یک ریزشکه^۲ مستقل در نظر گرفته است، و سپس به بررسی و تجزیه و تحلیل آن ریزشکه پرداخته است تا در نهایت به پارامترهای بهینه‌ی سیستم دست یابد. علاوه بر تعیین پارامترهای مناسب برای سیستم، جایابی بهینه‌ی ایستگاه‌های شارژ و دشارژ هوشمند و منابع تجدیدپذیر^۳ برای دستیابی به نقطه‌ی بهینه امری ضروری است چرا که تعیین مکان و یا ظرفیت نامناسب آن ایستگاه‌ها، باعث به وجود آمدن مشکلات جدیدی در شبکه از قبیل افزایش بار ترافیک شهری، افزایش تلفات توان شبکه، کاهش درجه پروفایل ولتاژ، افزایش هزینه‌های ناخواسته در شبکه و سایر موارد خواهد شد [۸]. بنابراین در اجرای طرح مشارکت خودروهای الکتریکی در تأمین بار شبکه تعیین پارامترهای ایستگاه‌های شارژ و دشارژ هوشمند از قبیل اندازه‌ی ظرفیت آن ایستگاه‌ها، تعداد آن‌ها، اندازه و تعداد منابع تجدیدپذیر و جایابی مناسب آن‌ها بسیار حائز اهمیت خواهد بود که در این مقاله به بررسی آن‌ها پرداخته شده است. در [۹]، پروفایل شارژ بهینه برای افزایش مصرف در ساعات کم باری بررسی شده است. همچنین به بررسی تأثیر پروفایل شارژ بر شبکه توزیع پرداخته است و نیز جایابی بهینه پارکینگ خودروهای الکتریکی با در نظر گرفتن قیود تلفات و قابلیت اطمینان^۴ به صورت قیود اقتصادی پیاده سازی شده است. در مرجع [۱۰]، به بیان یک الگوریتم چند هدفه پرداخته شده که با پیاده‌سازی آن تعداد پارکینگ خودروهای الکتریکی، محل و ظرفیت این پارکینگ‌ها در شبکه توزیع تعیین گردد. در [۱۱]، یک مدل ابتکاری دوگانه برای اختصاص بهینه‌ی ایستگاه‌های خودروی الکتریکی ارائه شده است. در گام اول، یک مدل جدید برای ایستگاه‌های شارژ و دشارژ هوشمند خودروهای الکتریکی ارائه کرده است که در آن ویژگی‌های خودروهای الکتریکی را به شیوه‌ای دقیق در نظر گرفته است. در گام دوم، یک مدل جدید برای اطمینان حاصل کردن از اینکه محدودیت‌های فنی در شبکه توزیع در حالی در نظر گرفته شده که هزینه‌های کلی سیستم افزایش یافته است. همچنین احداث منابع تجدیدپذیر انرژی از قبیل منابع فتوولتائیک^۵ و منابع بادی را هم مورد بررسی قرار داده است. در مرجع [۱۲]، برای از بین بردن مشکلات حاصل از عدم تعادل انرژی، سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر با سیستم‌های ذخیره کننده انرژی ترکیب شده‌اند. در مرجع [۱۳]، جایابی بهینه ایستگاه‌های شارژ و دشارژ هوشمند خودروهای الکتریکی با استفاده از یک شیوه‌ی بهینه‌سازی دو مرحله‌ای ارائه شده است. طبق مدل ارائه شده، در مرحله اول محل بهینه‌ی ایستگاه‌های هوشمند با توجه به شاخص‌های محیطی و شعاع سرویس دهی تعیین می‌شود و در مرحله دوم، ظرفیت بهینه این ایستگاه‌ها از طریق کمینه‌سازی هزینه‌های متداول ایستگاه‌ها از قبیل هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه نگهداری، هزینه بهره‌برداری و هزینه تلفات برنامه‌ریزی می‌شود. در مرجع [۱۴]، با توجه به افزایش استفاده و استقبال در جوامع شهری از خودروهای الکتریکی، محققان و پژوهشگران به بررسی طرح‌های تقاضای شارژ خودروهای الکتریکی پرداخته‌اند. در مرجع [۱۵]، محققان جنبه‌ی زمان-فضا برای قرارگیری و جایابی ایستگاه‌های شارژ را با استفاده از



داده‌ی واقعی ترافیکی تخمین زده‌اند. در [۱۶]، مسئله مدلسازی پارکینگ‌های هوشمند از دیدگاه یکپارچه‌ساز خودروهای الکتریکی در راستای بیشینه‌سازی سود خود حل شده است. در مدل ارائه شده چندین شاخص اقتصادی و فنی به همراه قیود امنیتی سیستم در نظر گرفته شده است. در مرجع [۱۷]، با در نظر گرفتن چشم اندازی بلند مدت، با هدف توسعه‌ی پایدار انرژی‌های مختلف به دلیل افزایش چشمگیر تقاضا برای انرژی‌های تجدیدپذیر، به بررسی منابع مختلف انرژی پرداخته شده است. به دلیل مدیریت و کاهش آلودگی‌های محیط زیستی و محدودیت در استخراج و استفاده از سوخت‌های فسیلی^۱ از میان کل منابع انرژی، منابع تجدیدپذیر انرژی بیشتر مورد توجه و مطالعه قرار گرفته‌اند. منابع انرژی تجدیدپذیر را نیز می‌توان از جنبه‌های مختلف بررسی و تجزیه و تحلیل نمود که در این مقاله به ارزیابی چرخه عمر منابع انرژی تجدیدپذیر پرداخته شده است. در مرجع [۱۸]، یک روش بهینه‌سازی بر مبنای اعداد صحیح مختلط ارائه شده است که هدف آن برنامه‌ریزی بهینه جهت حضور منابع تولید پراکنده در شبکه‌ی توزیع با هدف تأمین اقتصادی انرژی با قابلیت اطمینان و پایداری^۲ بالا می‌باشد. در [۱۹]، به مطالعه و بررسی ریزش‌بکه، شبکه‌های هوشمند الکتریکی، منابع تولید پراکنده و ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی که خودروهای الکتریکی مدرن را می‌توان نمونه‌ای از آن‌ها دانست پرداخته شده است. در این مقاله با توجه به قیمت بازار انرژی^۳، قیمت خودروهای الکتریکی و قیمت پیشنهادی توسط منابع تولید پراکنده به مدیریت انرژی ارائه شده توسط منابع تولید و یا ذخیره انرژی برای استفاده در آینده پرداخته شده است. در مرجع [۲۰]، به مطالعه‌ی استفاده همزمان از منابع تجدیدپذیر و خودروهای الکتریکی و همچنین همراه آن‌ها ذخیره‌سازهای انرژی به جهت کاهش اثرات نامطلوب آن‌ها پرداخته شده است. در مرجع [۲۱]، به ارائه‌ی مدلی جهت مدیریت سیستم شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی متصل به شبکه با در نظر گرفتن منابع تجدیدپذیر متشکل از دو واحد بادی و یک واحد خورشیدی پرداخته شده است. در این راستا خودروهای الکتریکی را به چهار کلاس تقسیم بندی کرده است. تعداد خودروها در هر کلاس و سهم هر کلاس در مشارکت برای تأمین توان شبکه با استفاده از تابع توزیع نرمال مشخص شده است. هزینه‌ی تلفات سالیانه و هزینه‌ی بهره‌برداری از منابع تولید پراکنده، بار شبکه و تأثیرات آن بر توابع فنی و اقتصادی شبکه نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

در نهایت، این مقاله به مطالعه و بررسی ابعاد مختلف طرح مشارکت خودروهای الکتریکی در تأمین بار شبکه پرداخته است. به طوریکه در این پژوهش دو ایستگاه شارژ و دشارژ هوشمند خودروهای الکتریکی و دو منبع تجدیدپذیر تولیدتوان الکتریکی در نظر گرفته شده‌اند شبیه‌سازی در محیط نرم افزار متلب و شبکه مورد مطالعه از نوع ۶۹ گره استاندارد IEEE می‌باشد. توابع هدف در این پژوهش تلفات شبکه، پروفایل ولتاژ و آیتم اقتصادی طرح می‌باشد که به جهت حصول نتایج قابل اعتمادتر و واقعی‌تر سعی شده است که تا حد امکان عوامل تأثیرگذار بر توابع هدف را در نظر بگیریم و توابع هدف را در وضعیت‌های مختلف مورد بررسی قرار دهیم تا با قیاس نتایج حاصل از آن‌ها امکان ارزیابی جامع فراهم آید، به این منظور پس از در نظر گرفتن مقادیر و متغیرهای اولیه‌ی شبکه، برنامه پاسخگویی بار^۴ با محوریت قیمت را اجرا کرده و سپس با تعریف دو سناریو مختلف با شرایط اولیه‌ی یکسان، نتایج بدست آمده را مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار داده‌ایم. دو سناریو تعریف شده دارای شرایط اولیه مشابه بوده و صرفاً در ظرفیت ایستگاه‌های شارژ و دشارژ با یکدیگر تفاوت دارند بطوریکه در سناریو اول دو ایستگاه شارژ و دشارژ هوشمند خودروهای الکتریکی به ظرفیت هر ایستگاه ۱۵۰۰ کیلووات و در سناریو دوم، دو ایستگاه شارژ و دشارژ هوشمند خودروهای الکتریکی به ظرفیت هر ایستگاه ۳۰۰۰ کیلووات موجود است. از آنجایی که در ایستگاه‌های شارژ و دشارژ هوشمند در طول ۲۴ ساعت شبانه روز عمل شارژ و دشارژ به صورت مکرر و متوالی در حال انجام است، این امر خود باعث ایجاد اعوجاج و هارمونی در شبکه می‌شود که در نتیجه‌ی آن کیفیت توان^۵ تحویلی به مصرف‌کنندگان کاهش خواهد یافت و حتی باعث وارد آمدن خسارات مالی به تجهیزات خواهد شد [۲۲]؛ از این سو با اجرای برنامه‌ی پاسخگویی بار و احداث منابع تجدیدپذیر تولید توان الکتریکی در کنار ایستگاه‌های شارژ و دشارژ هوشمند، سعی در مرتفع نمودن مشکل فوق و افزایش بهره‌وری و قابلیت اطمینان شبکه شده است. هر منبع تجدیدپذیر تولید توان الکتریکی، از یک واحد فتوولتائیک و یک توربین بادی تشکیل شده است، واحد فتوولتائیک و یا توربین بادی به تنهایی تولید توان یکنواختی ندارند از این رو با قرار دادن آن دو در کنار یکدیگر در یک واحد تولیدی از نوع تجدیدپذیر، سعی شده است قابلیت اطمینان و همچنین میزان توان تولیدی واحد افزایش یابد [۲۳]. به منظور قیاس بهتر دستاوردهای این مقاله با دیگر پژوهش‌ها که در این حوزه انجام شده است، در جدول (۱) نتایج حاصل از این مقاله در کنار دیگر مقالات ارائه گردیده است.



جدول (۱): مقایسه پژوهش‌های پیشین با این مقاله

مرجع	برنامه پاسخگویی بار	مکان یابی بهینه ایستگاه‌های شارژ خودرو الکتریکی	مکان یابی بهینه منابع تجدیدپذیر	توابع هدف		
				سود مالکان خودرو الکتریکی	هزینه توان کل مصرفی	افت ولتاژ تلفات
[۲]	x	✓	x	x	x	✓
[۵]	✓	✓	x	x	✓	✓
[۶]	✓	x	✓	✓	✓	x
[۹]	x	x	✓	x	x	✓
[۱۰]	x	✓	x	✓	x	✓
[۱۴]	x	x	x	✓	x	x
[۲۲]	✓	✓	✓	x	x	x
[۲۴]	x	✓	✓	x	x	✓
این مقاله	✓	✓	✓	✓	✓	✓

از آنجایی که ابعاد فنی و اقتصادی این طرح بر یکدیگر اثر متقابل می‌گذارند و نیز در نظر گرفتن چند تابع هدف با یکاهای متفاوت و همچنین توجه به ماهیت غیرخطی و نامحدب مسئله‌ی بهینه‌سازی، پیدا کردن نقطه‌ی کار بهینه برای سیستم امری دشوار است بطوریکه با روش‌های بهینه‌سازی مرسوم قابل انجام نیست چرا که بهینه شدن یک تابع موجب بدتر شدن تابع دیگر ممکن است بشود. به همین دلیل در این پژوهش، از الگوریتم بهبودیافته‌ی ژنتیک^{۱۱} برای غلبه بر پیچیدگی‌های این مسئله استفاده شده، بطوریکه در الگوریتم پیشنهادی از روش مبتنی بر فازی برای حل مسئله در قالب چند هدفه استفاده گردیده است. به طور خلاصه نوآوری‌های این پژوهش به شرح زیر می‌باشند:

- ارزیابی همزمان ابعاد فنی و اقتصادی طرح مشارکت خودروهای الکتریکی در تأمین بار شبکه با در نظر گرفتن برنامه پاسخگویی تقاضا با محوریت قیمت.
- ایجاد سازوکارهای مقایسه‌ای تحت سناریوهای مختلفی با هدف درک عمیق‌تر تأثیرات آن‌ها بر توابع هدف به کمک الگوریتم ژنتیک- فازی بهبودیافته.

این مقاله در ۵ بخش سازماندهی شده است. به طوریکه در بخش ۲، مدل‌سازی ریاضی پژوهش، بخش ۳، روش حل مسئله‌ی پیشنهادی، بخش ۴، نتایج شبیه‌سازی و در بخش ۵، نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲- مدل‌سازی ریاضی

با توجه به ماهیت مدل پیشنهادی در این مقاله و ابعاد مختلف آن که نادیده گرفته شدن هر کدام بر روند حل مسئله تأثیر می‌گذارد و باعث انحراف نتایج از مقادیر مطلوب خود می‌شود، این بخش در سه قسمت شامل توابع هدف، قیود مسئله و استراتژی پاسخگویی بار بررسی شده است.

۲-۱- توابع هدف

تابع هدف اصلی در این مقاله به صورت رابطه‌ی (۱) می‌باشد که خود متشکل از چهار تابع دیگر است که ماهیتی اقتصادی و فنی دارند. همچنین به دلیل ماهیت متفاوت توابع تشکیل دهنده تابع هدف اصلی، با استفاده از ضرایبی معین، یکاهای هر تابع از بین برده شده است تا با بی‌واحد شدن آن‌ها امکان جمع کردن آن توابع فراهم آید. به این ترتیب نقطه‌ی کار بهینه‌ی سیستم هنگامی است که رابطه (۱) کم‌ترین مقدار ممکن را اختیار کند.

$$\text{Min: } OF = \{K_1 \cdot f_1 + K_2 \cdot f_2 + K_3 \cdot (f_4 + f_5)\} \quad (1)$$

شایان ذکر است که در جدول (۲)، فهرست علائم ریاضی مورد استفاده در این مقاله به همراه توضیح هر مورد ارائه شده است.





جدول (۲): فهرست علائم

علائم	توضیحات
C_t	بهای هر کیلووات توان
f_1	تابع تلفات شبکه در طول ۲۴ ساعت بر حسب مگاوات
f_2	تابع افت ولتاژ بر حسب پریونیت
f_3	تابع هزینه بر حسب دلار
f_4	هزینه‌ی توان کل مصرف شده به دلار
f_5	سود مالکان خودروهای الکتریکی از بابت فروش توان به شبکه به دلار
F_{max}	حداکثر تابع هدف λ ام در میان تمامی جواب‌های نامغلوب
F_{min}	حداقل تابع هدف λ ام در میان تمامی جواب‌های نامغلوب
I_i^{max}	حداکثر جریان فیدر λ ام
I_i^t	دامنه‌ی جریان در زمان λ ام
I_{line}	جریان خط λ ام در ساعت λ ام
$I_{rms,i}^{max}$	حداکثر جریان قابل قبول ترانسفورماتور λ ام
$I_{rms,i}^t$	دامنه‌ی جریان در زمان λ ام
K_1	ضریب وزنی تابع تلفات
K_2	ضریب وزنی تابع افت ولتاژ
K_3	ضریب وزنی تابع هزینه
$P_{ch,k,t}$	مجموع توان مصرف شده بابت شارژ خودروهای الکتریکی در ایستگاه k ام در ساعت λ ام
$P_{dich,k,t}$	مجموع توان دشارژ شده از خودروهای الکتریکی به شبکه در ایستگاه k ام در ساعت λ ام
$P_{d,i,t}$	توان مصرفی در گره λ ام در ساعت λ ام
P^{INI}	مقدار دیماند اولیه در فیدر λ ام در زمان λ ام
P_j^t	توان اکتیو تزریقی شبکه به گره λ ام در زمان λ ام
P_{loss}	تلفات در خط λ ام در ساعت λ ام
$pMDF$	مقدار دیماند اصلاحی فیدر λ ام در زمان λ ام
$P_{pv,t}$	توان تولیدی توسط منبع فتوولتائیک در ساعت λ ام
P_{sub}	مجموع کل توان ارسال شده به شبکه توسط شرکت توزیع
$pTOU$	افزایش یا افت بار
$P_{wind,t}$	توان تولیدی توسط توربین بادی در ساعت λ ام
Q_j^t	توان راکتیو تزریقی شبکه به گره λ ام در زمان λ ام
R_{line}	مقاومت خط λ ام در ساعت λ ام
TOU^{max}	حداکثر سرعت افزایش یا ریزش بار
V_i^t	دامنه ولتاژ گره λ ام در زمان λ ام
V_{max}	حداکثر مقدار مجاز ولتاژ گره λ ام در زمان λ ام
V_{min}	حداقل مقدار مجاز ولتاژ گره λ ام در زمان λ ام
X	راکتانس
x_i'	بردار جهش یافته جدید
x_{r1} و x_{r2} و x_{r3}	سه بردار تصادفی از بین جمعیت اولیه
Y_{ij}	اندازه ادمیتانس شاخه بین گره‌های i و j
θ_i	زاویه‌ی ولتاژ گره λ ام در زمان λ ام

در رابطه (۱) متغیرهای K_1 و f_1 و K_2 و f_2 و K_3 و f_3 به ترتیب ضریب وزنی تابع تلفات، مجموع تلفات شبکه در طول ۲۴ ساعت، ضریب وزنی تابع افت ولتاژ، تابع افت ولتاژ، ضریب وزنی تابع هزینه و تابع هزینه می‌باشند. مقادیر ضرایب وزنی و یکاهای هر کدام در روابط (۲) و (۳) و (۴) تعریف شده‌اند:



$$K_1 = \frac{1}{KW} \quad (2)$$

$$K_2 = \frac{1}{V} \quad (3)$$

$$K_3 = \frac{1}{Dollar} \quad (4)$$

تابع تلفات که بیانگر مجموع کل تلفات شبکه در ۲۴ ساعت شبانه روز بر حسب کیلووات می‌باشد به صورت رابطه (۵) تعریف شده است:

$$f_1 = \sum_{t=1}^{24} \left(\sum_{i=1}^{N.line} R_{line_i} |I_{line_i,t}| \right) \quad (5)$$

در رابطه (۵) متغیرهای R_{line} و I_{line} به ترتیب مقاومت خط l_m در ساعت t_m و جریان خط l_m در ساعت t_m می‌باشند. در رابطه (۱) تابع f_2 بیانگر مجموع آفت ولتاژ در کل شبکه در ۲۴ ساعت شبانه روز می‌باشد. تابع آفت ولتاژ به صورت رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$f_2 = \sum_{t=1}^{24} \left(\sum_{i=1}^{N.bus} |1 - V| \right) \quad (6)$$

در رابطه (۶) متغیر $V_{i,t}$ بیانگر ولتاژ گره l_m در ساعت t_m می‌باشد. سومین تابع تأثیرگذار در تابع هدف اصلی، تابع f_3 است. این تابع ماهیتی اقتصادی دارد و بیان کننده‌ی مجموع هزینه‌ی انرژی مصرف شده در شبکه در یک بازه‌ی زمانی ۲۴ ساعته می‌باشد. تابع f_3 که خود متشکل از دو تابع دیگر است طبق رابطه (۷) بیان می‌شود:

$$f_3 = f_4 + f_5 \quad (7)$$

در رابطه (۷) توابع f_4 و f_5 به ترتیب هزینه‌ی توان کل مصرف شده و سود مالکان خودروهای الکتریکی از بابت فروش توان به شبکه می‌باشند. تابع f_4 در رابطه (۸) تعریف شده است:

$$f_4 = \sum_{t=1}^{24} (P_{sub} \cdot C_t) \quad (8)$$

در رابطه (۸) متغیرهای P_{sub} و C_t به ترتیب بیانگر مجموع کل توان ارسال شده به شبکه توسط شرکت توزیع و بهای هر کیلووات توان در ساعات مختلف روز است. در رابطه (۸) مجموع توان ارسالی به شبکه توسط شرکت توزیع توسط رابطه (۹) قابل محاسبه است:

$$P_{sub} = \sum_{i=1}^{N.bus} P_{d,i} + \sum_{j=1}^{N.bus} P_{loss_j} + \sum_{k=1}^{N.station} P_{ch_k} - \sum_{k=1}^{N.station} P_{dich_k} - \sum_{k=1}^{N.station} (P_{pv} + P_{wind}) \quad (9)$$

در رابطه (۹) متغیر P_{sub} مجموع توان ارسالی به شبکه توسط شرکت توزیع، $P_{d,i,t}$ توان مصرفی در گره l_m در ساعت t_m ، تلفات P_{loss} در خط l_m در ساعت t_m ، $P_{ch,k,t}$ مجموع توان مصرف شده بابت شارژ خودروهای الکتریکی در ایستگاه k_m در ساعت t_m ، $P_{dich,k,t}$ مجموع توان دشارژ شده از خودروهای الکتریکی به شبکه در ایستگاه k_m در ساعت t_m ، $P_{pv,t}$ توان تولیدی توسط منبع فتوولتائیک در



ساعت t ام و $P_{wind,t}$ بیانگر توان تولیدی توسط توربین بادی در ساعت t ام می‌باشند. تابع f_5 در رابطه (۷) بیانگر سود حاصل از خرید و فروش توان به شبکه توسط مالکان خودروهای الکتریکی می‌باشد که خود آن تابع با استفاده از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود:

$$f_5 = \sum_{t=1}^{24} [C_t \cdot \sum_{k=1}^{N.station} P_{ch,k,t} - ((1.2) \cdot C_t \cdot \sum_{k=1}^{N.station} P_{disch,k,t})] \quad (10)$$

در رابطه (۱۰) $P_{ch,k,t}$ مجموع توان شارژ شده در ایستگاه k ام در ساعت t ام و $P_{disch,k,t}$ مجموع توان دشارژ شده در ایستگاه k ام در ساعت t ام و C_t بیانگر بهای هر کیلووات توان مصرفی در ساعات مختلف شبانه روز می‌باشد. در رابطه (۱۰) ضریبی $1/2$ برای مجموع بهای توان دشارژ شده در نظر گرفته شده است که علت وجود این ضریب در نظر گرفتن 20% درصد سود حاصل از فروش توان توسط مالکان خودروهای الکتریکی به شبکه می‌باشد، به عبارت دیگر بهایی که مالک خودرو الکتریکی بابت فروش هر کیلووات توان به شبکه دریافت می‌کند به مقدار 20% بیشتر از بهایی است که توسط همان مالک بابت خرید توان در همان ساعت به شبکه پرداخت می‌شود که هدف از این کار ترغیب افراد به خرید خودروهای الکتریکی و تشویق مالکان خودروهای الکتریکی به عقد قرارداد با ایستگاه‌های شارژ هوشمند برای مشارکت در تأمین توان شبکه می‌باشد [۲۴]. با توجه به متغیر بودن میزان مصرف برق در ساعات مختلف شبانه روز، شرکت توزیع با در نظر گرفتن بازه‌های زمانی مختلف، تعرفه‌های متفاوتی را با احتساب میزان مصرف در هر بازه‌ی زمانی از مشترکان دریافت می‌کند (در این مقاله میزان مصرف برق در فصول مختلف سال یکسان فرض شده است و همچنین تأثیر موقعیت جغرافیایی، آب و هوا و سایر موارد در میزان مصرف برق نیز مورد مطالعه قرار نگرفته است). به منظور در نظر گرفتن اثرات میزان تقاضا بر قیمت برق، در این پژوهش سه دوره‌ی زمانی مختلف برای میزان تقاضا و مصرف مشترکان و به طبع آن بهای توان مصرفی، تعریف شده است که در جدول (۳) ارائه گشته است:

جدول (۳): نرخ خرید و فروش توان الکتریکی بر حسب دلار

کم باری	میان باری	پر باری	
۱	۲	۳	بهای فروش توان توسط شرکت توزیع به مشترکان بهای خرید توان از مالکان خودرو الکتریکی
۱/۲	۲/۴	۳/۶	

۲-۲-۲- قیود مسئله

قیود مسئله در این مطالعه به شرح زیر در نظر گرفته شده اند:

- معادلات پخش بار:

$$P_j^t = \sum_{i=1}^{N.bus} [V_i^t V_j^t Y_{ij} \cdot \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (11)$$

$$Q_j^t = \sum_{i=1}^{N.bus} [V_i^t V_j^t Y_{ij} \cdot \sin(\theta_i - \theta_j)] \quad (12)$$

P_j^t و Q_j^t به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی شبکه به گره i ام در زمان t ام هستند. V_i^t و θ_i به ترتیب دامنه و زاویه ولتاژ گره i ام در زمان t ام می‌باشند. Y_{ij} بیانگر اندازه ادمیتانس^{۱۲} شاخه بین گره‌های i و j هستند. در شبکه‌های توزیع شعاعی، مسیری منحصر به فرد از هر گره در سیستم به سمت پست وجود دارد و یکی از ویژگی‌های مهم و بارز شبکه‌های توزیع شعاعی است. در شبکه‌های توزیع شعاعی، نسبت R به X بزرگ باعث ایجاد مشکلاتی در رسیدن به همگرایی الگوریتم‌های پخش بار معمولی خواهد شد. به این جهت، در این پژوهش از روش پسر-پیشرو، برای تحلیل جریان و توان استفاده شده است.

- محدوده مربوط به ولتاژ گره‌ها:

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

V_{max} و V_{min} بیانگر حداقل و حداکثر مقدار مجاز ولتاژ گره i ام در زمان t ام هستند.



$$|I_i^t| \leq I_i^{\max}; i = 1, 2, 3, \dots, N_{feeder} \quad (14)$$

I_i^{\max} و I_i^t به ترتیب دامنه‌ی جریان در زمان t ام و حداکثر جریان فیدر t ام می‌باشند

• محدودیت ترانسفورماتور:

$$|I_{rms,i}^t| \leq I_{rms,i}^{\max}; i = 1, 2, 3, \dots, N_{transformator} \quad (15)$$

$I_{rms,i}^{\max}$ و $I_{rms,i}^t$ به ترتیب دامنه‌ی جریان در زمان t ام و حداکثر جریان قابل قبول ترانسفورماتور t ام می‌باشند.

• قید میزان شارژ/ قید میزان دشارژ:

یکی از موارد مهم در طراحی هر سیستمی توجه به ظرفیت‌های آن سیستم است. در طرح مورد نظر باید میزان کل توان شارژ شده و دشارژ شده در هر لحظه، از ظرفیت نامی ایستگاه مورد نظر کوچک‌تر باشد. در این پژوهش ظرفیت نامی ایستگاه‌های شارژ و دشارژ هوشمند را به ترتیب در سناریو اول ۱/۵ و در سناریو دوم ۳ مگاوات در نظر گرفته‌ایم.

• قید مجموع شارژ و دشارژ:

در هر ایستگاه شارژ هوشمند خودروه‌های الکتریکی باید مجموع شارژ و دشارژ در هر ساعت از ظرفیت نامی ایستگاه کوچک‌تر باشد. ظرفیت ایستگاه‌های شارژ هوشمند در سناریو اول ۱/۵ مگاوات و در سناریو دوم ۳ مگاوات می‌باشد.

۲-۳- استراتژی پاسخگویی بار

استراتژی پاسخگویی بار یا به طور خلاصه پاسخگویی بار، به مجموعه‌ای از اقدامات که به جهت تغییر الگوی مصرف با هدف افزایش قابلیت اطمینان شبکه و کاهش بهای توان مصرفی به خصوص در ساعات پیک بار انجام می‌گیرد، گفته می‌شود. مشترکانی که در برنامه پاسخگویی بار شرکت دارند لزوماً کاهش مصرف توان هدف اصلی آن‌ها نخواهد بود، بلکه تغییر الگوی مصرفی که در نتیجه‌ی آن کاهش هزینه توان مصرفی و همچنین افزایش قابلیت اطمینان شبکه را به دنبال داشته باشد، هدف اصلی آن‌ها می‌باشد. پایه و اساس تمام برنامه‌های پاسخگویی بار بر دو مورد استوار است؛ مورد اول برنامه‌های انگیزشی و دومین مورد برنامه‌های مبتنی بر قیمت و هزینه [۲۵]. در این پژوهش از گونه‌ای از برنامه پاسخگویی بار تحت عنوان مکانیزم زمان استفاده شده است. بر اساس مکانیزم زمان، انرژی تغییر یافته در حالت کلی نمی‌تواند از میزان مشخصی فراتر رود و باید بین افزایش توان و افت توان در طول یک دوره‌ی زمانی خاص ارتباط و تعادل برقرار شود. مدل‌سازی ریاضی مکانیزم زمان در روابط (۱۶) تا (۱۸) ارائه شده است.

$$P_{t,i}^{MDF} = P_{t,i}^{TOU} + P_{t,i}^{INI} \quad (16)$$

$$|P_{t,i}^{TOU}| \leq (TOU^{\max}) \cdot (P_{t,i}^{INI}) \quad (17)$$

$$\sum_{t=1}^T P_{t,i}^{TOU} = 0 \quad (18)$$

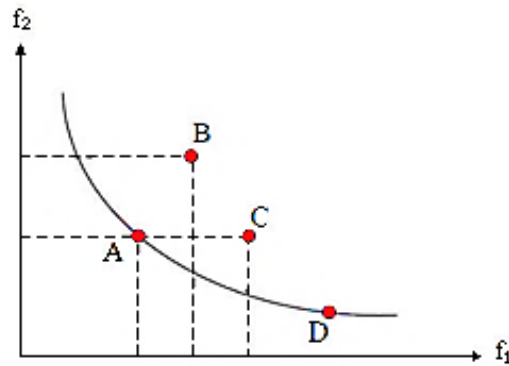
در رابطه (۱۶) تا (۱۸)، متغیرهای $P_{t,i}^{MDF}$ مقدار دیمانداصلحی فیدر t ام در زمان t ام بعد از مکانیزم زمان، $P_{t,i}^{TOU}$ و $P_{t,i}^{INI}$ نیز به ترتیب افزایش یا افت بار در این مکانیزم و مقدار دیماندا اولیه در فیدر t ام در زمان t ام بدون مکانیزم زمان و TOU^{\max} حداکثر سرعت افزایش یا ریزش بار در این مکانیزم است.

۳- الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب بهبودیافته

در شبیه‌سازی‌های انجام شده در این مقاله از الگوریتم ژنتیک چندهدفه‌ی نامغلوب بهبودیافته استفاده شده است تا به جواب و نقطه‌ی کار بهینه سیستم برسیم. الگوریتم ژنتیک مدلی محاسباتی است که ماهیت خود را از طبیعت و اصول بقای نسل در طبیعت الهام گرفته است. این الگوریتم راه حل‌ها و جواب‌ها را به صورت کروموزوم‌هایی^{۱۳} کدگذاری کرده و سپس عملگرهای جهش^{۱۴}، تقاطع^{۱۵} و سایر موارد

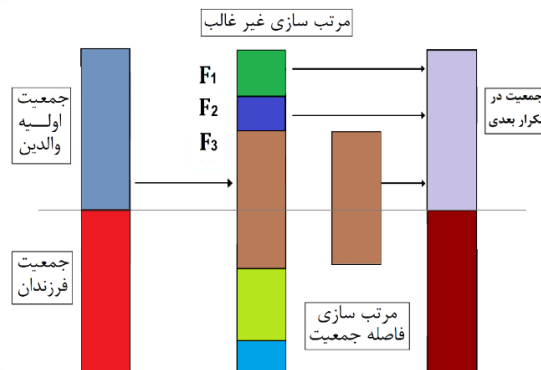


را بر آن‌ها اعمال می‌کند تا به این صورت نسل‌های بعدی به وجود آیند و این چرخه‌ی تولید نسل ادامه یابد. به طور کلی الگوریتم‌های بهینه‌سازی به دو گروه تک‌هدفه و چندهدفه تقسیم می‌شوند. در الگوریتم‌های چندهدفه به دنبال بهینه کردن یک مجموعه جواب که پارتو^{۱۶} نامیده می‌شود، هستیم. به طور خلاصه برای درک بهتر این مطلب به شکل (۱) توجه کنید، در شکل (۱) بر اساس دو تابع هدف f_1 و f_2 در مجموع تعداد چهار جواب بهینه که به ترتیب A و B و C و D نام گرفته‌اند، توسط الگوریتم چندهدفه ایجاد شده است. با توجه به شکل (۱) می‌توان دریافت که A نسبت به B دارای مقادیر کمتری در هر دو تابع هدف f_1 و f_2 می‌باشد همچنین A نسبت به C دارای مقدار مساوی از f_2 است و با این حال A در قیاس با D دارای مقدار کمتری از f_1 است. به اینگونه مقایسه‌ها، مغلوب‌سازی پاسخ‌ها گویند [۲۶].



شکل (۱): مغلوب‌سازی پاسخ‌ها

در مسائل بهینه‌سازی دو هدف مهم وجود دارد؛ هدف اول پیدا کردن پاسخ‌های بهینه و هدف دوم پیدا کردن مجموعه‌ای از پاسخ‌ها (پارتو) که دارای توزیع مناسب هستند. به این منظور از دو عمل نخبه‌گرایی^{۱۷} و مقایسه فاصله‌ی جواب‌ها، با هدف یافتن بهترین پاسخ‌ها می‌توان استفاده کرد. اساس این روش در شکل (۲) نشان داده شده است. ابتدا براساس دو عملگر ترکیب و جهش از جمعیت والد^{۱۸} جمعیت جدیدی از فرزندان^{۱۹} ایجاد خواهد شد سپس با ترکیب والدین و فرزندان جمعیتی به اندازه‌ی دو برابر N (دو برابر جمعیت اولیه) شکل می‌گیرد و پس از آن از مرتب‌سازی نامغلوب برای طبقه‌بندی جمعیت ایجاد شده و شکل‌گیری جمعیت جدیدی که دارای جبهه‌های مختلفی در هر زمان است، استفاده می‌شود. روند مغلوب‌سازی جواب‌ها به گونه‌ای انجام می‌پذیرد که هر جواب در این جبهه‌ها دارای مقدار مشخصی از برازندگی باشد. علاوه بر برازندگی، فاصله‌ی بین هر جواب از جواب‌های مجاور آن نیز تعیین می‌شود تا توزیع مناسب جواب‌ها مشخص شود. جمعیت والد در تکرار بعدی با توجه به مقدار برازندگی و فاصله جواب‌ها تعیین می‌شود، سپس این مراحل تکرار شده تا در نهایت جمعیتی شکل گیرد که توسط سایر جبهه‌ها و جواب‌ها مغلوب نشود.



شکل (۲): شماتیک کلی الگوریتم ژنتیک چندهدفه نامغلوب بهبودیافته

مهم‌ترین عملگر در الگوریتم ژنتیک عملگر ترکیب است. در این عملگر نسلی قدیمی از کروموزوم‌ها با یکدیگر ترکیب شده تا نسل جدیدی از کروموزوم‌ها به وجود آید. مطابق شکل (۳) ابتدا دو عضو از جمعیت اولیه به صورت تصادفی انتخاب شده که P_1 و P_2 نامیده شده و پس از آن، دو عدد r_1 و r_2 به صورت تصادفی ایجاد شده که در این پژوهش ۱ و ۲ مفروض هستند. در نهایت اطلاعات کروموزوم‌های





P_1 و P_2 با توجه به مقادیر تصادفی r_1 و r_2 تغییر پیدا کرده و در واقع کروموزومها، ژنهای خود را به اشتراک می‌گذارند و به این ترتیب دو جمعیت جدید که b_1 و b_2 نامیده می‌شوند به وجود خواهند آمد.

			$r_1=2$		$r_2=1$	
(p1)	3	7	10	95.5	33.1	70.7
(p2)	20	32	37	10.8	22.5	15.6
(b1)	3	7	37	95.5	22.5	15.6
(b2)	20	32	10	10.8	33.1	70.7

شکل (۳): نحوه ی انجام عملگر ترکیب

الگوریتم ژنتیک دارای سه عملگر اصلی یعنی انتخاب، آمیزش یا ترکیب و جهش می‌باشد. با انجام جهش ممکن است ژنی حذف و یا ژن جدیدی به وجود آید. برای مسئله ی مشارکت خودروهای الکتریکی در تأمین بار شبکه، هنگام عملگر جهش، یک کروموزوم به تصادف انتخاب می‌شود و سپس یکی ژن مربوط به محل احداث ایستگاه‌های شارژ هوشمند، انتخاب و عدد متناظر با آن با یک عدد صحیح تصادفی جایگزین می‌شود. همچنین یکی از ژنهای مربوط به بخش ظرفیت ایستگاه‌های شارژ هوشمند خودروهای الکتریکی برای تغییر انتخاب می‌شود و بر اساس رابطه (۱۹) مقدار آن تغییر می‌کند.

$$x'_i = x_{r_1} + [F \cdot (x_{r_3} - x_{r_1})] \quad (19)$$

در رابطه (۱۹)، x'_i بردار جهش یافته جدید، x_{r_1} و x_{r_2} سه بردار تصادفی از بین جمعیت اولیه و F مقدار ثابت از پیش تعیین شده است. با استفاده از این نوع ترکیب و جهش می‌توان متغیرها را در محدوده ی مجاز آنها حفظ کرد. با این وجود، اگر تغییری کمتر یا بیشتر از مقدار مجاز آنها انتخاب شود به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار موجود در بازه ی آن انتخاب خواهد شد. به این ترتیب می‌توان تضمین کرد که از طریق ترکیب و جهش، مقادیر ژنهای هر کروموزوم در بازه ی مجاز قرار می‌گیرند.

روند مرتب‌سازی جبهه‌ها براساس برزندگی و فاصله تا مرحله ی بعدی می‌باشد، بر این اساس روند مرتب‌سازی جبهه‌ها آغاز شده و جبهه‌ها با رتبه‌های مختلف مرتب می‌شوند و بدترین جبهه‌ها از این بین حذف خواهند شد، مابقی جبهه‌ها مرتب‌سازی شده تا جبهه‌ای از جواب‌ها که توسط جبهه‌های دیگر مغلوب نشده است مشخص شده و در نهایت به عنوان جمعیت جدید والد در تکرار بعدی معرفی شود. شرط توقف الگوریتم اتمام تعداد تکرار آن است. پس از رسیدن الگوریتم به شرط توقف، جواب‌ها که شامل مجموعه جوابی از قبیل مکان احداث ایستگاه‌های شارژ و دشارژ هوشمند خودروهای الکتریکی و توابع هدف می‌باشند، نشان داده می‌شوند. از بین این جواب‌ها بهترین پاسخ به روش فازی محاسبه می‌شود که برای این منظور تابع عضویت τ_i برای k امین پاسخ به ازای تابع هدف F_i مطابق رابطه (۲۰) محاسبه می‌گردد:

$$\tau_i^k = \frac{F_i^{\max} - F_i^k}{F_i^{\max} - F_i^{\min}} \quad (20)$$

در رابطه (۲۰)، متغیرهای F_i^{\max} و F_i^{\min} به ترتیب بیانگر حداکثر و حداقل تابع هدف F_i در میان تمامی جواب‌های نامغلوب می‌باشند. در این پژوهش عملگر تقاطع چند سطحی بر روی ۷۵ درصد از اعضای هر نسل، عملگر جهش بر روی ۳۵ درصد از اعضای هر نسل و همچنین بر روی ۲۵ درصد از بیت‌های هر کروموزوم اعمال شده است.

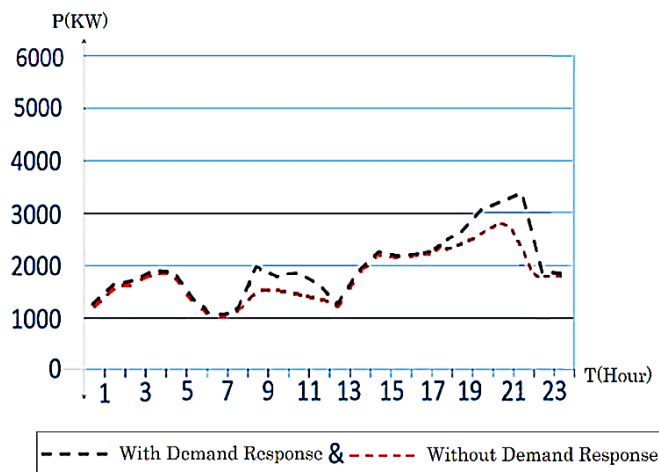
۴- شبیه‌سازی و نتایج عددی

در مطالعه ی پیش رو، شبیه‌سازی در محیط نرم افزار متلب و بر روی شبکه ۶۹ گره استاندارد IEEE انجام پذیرفته است. همچنین به جهت حل مسئله از الگوریتم فراابتکاری بهبود یافته ژنتیک، برای یافتن پاسخ بهینه استفاده شده است. برای بررسی بهتر و امکان مقایسه ی





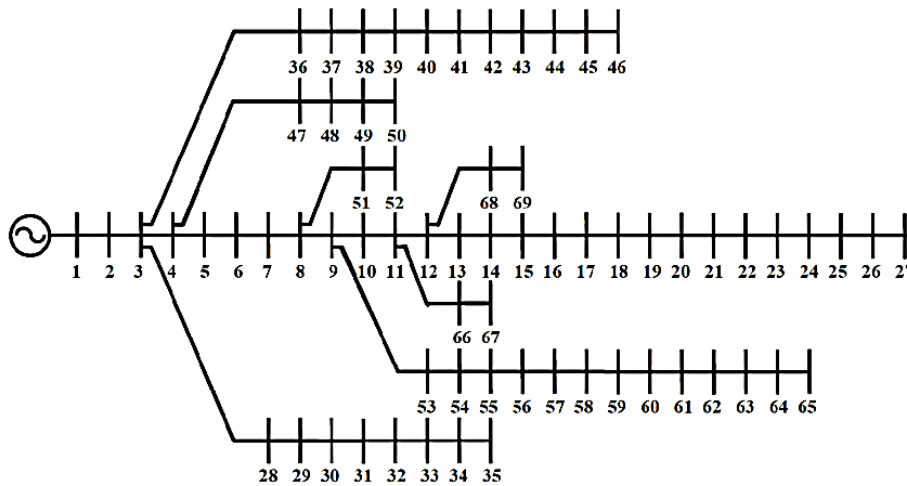
نتایج، دو سناریو تعریف کرده و توابع هدف را برای هر یک جداگانه محاسبه و در نهایت با مقایسه‌ی آن‌ها اقدام به نتیجه‌گیری می‌کنیم. در هر دو سناریو دو ایستگاه شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی و دو منبع تجدیدپذیر تولید توان به ظرفیت نامی هر منبع ۱ مگاوات داریم. تفاوت دو سناریو در ظرفیت ایستگاه‌های شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی می‌باشد به طوری که در سناریو اول ظرفیت هر یک از دو ایستگاه ۱/۵ مگاوات ولی در سناریو دوم ظرفیت هر یک از دو ایستگاه ۳ مگاوات خواهد بود. لازم به ذکر است هر کدام از منابع تجدیدپذیر تولید توان خود متشکل از یک واحد فتوولتائیک و یک توربین بادی می‌باشند. با توجه به اینکه توان تولیدی منابع فتوولتائیک و بادی تابع عوامل متعددی از جمله زاویه تابش، مدت زمان تابش، شدت تابش، سرعت باد، ارتفاع توربین بادی، شعاع پره‌های توربین بادی و سایر می‌باشد برای تمرکز بیشتر بر موضوع اصلی، در این پژوهش از عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر صرف نظر شده است. در شبکه مفروض، دو ایستگاه شارژ و دشارژ هوشمند با بستن قرارداد مشارکت با شرکت توزیع، هنگام کم باری اقدام به شارژ باتری خودروهای الکتریکی پارک شده در ایستگاه‌ها می‌نمایند و در مواقع پیک بار با دشارژ کردن باتری خودروهای الکتریکی موجود در ایستگاه‌ها، اقدام به تزریق توان به شبکه می‌کنند. شکل (۴) بیانگر منحنی مصرف توان شبکه در ۲۴ ساعت می‌باشد. بر اساس این منحنی مصرف توان در شبکه در ساعاتی دچار جهش‌ها و پیک‌هایی می‌باشد که اگر مصرف توان در شبانه‌روز را به سه بازه‌ی زمانی تقسیم کنیم این پیک‌ها بیانگر همان ساعات پرباری هستند. با اجرای طرح مشارکت و برنامه‌ی پاسخگویی بار مشاهده می‌شود که در مواقع پیک بار مصرف توان شبکه کاهش یافته و منحنی بار شبکه هموارتر شده است. به جهت مقایسه‌ی نتایج و تحلیل عملکرد سیستم شبکه ۶۹ گره مورد مطالعه را در دو وضعیت کلی مورد بررسی قرار می‌دهیم؛ ابتدا بدون اجرای برنامه پاسخگویی بار، پس از آن با اجرای طرح مشارکت خودروهای الکتریکی در تأمین بار شبکه و برنامه پاسخگویی بار قیمت محور. با دقت در شکل (۴) می‌توان پی به موفقیت طرح پیشنهادی در نائل شدن به هدف خود، مبنی بر کاهش مصرف در مواقع پیک بار را مشاهده کرد.



شکل (۴): منحنی مصرف توان شبکه در ۲۴ ساعت بر کیلووات

لازم به ذکر است زمان ورود و خروج خودروهای الکتریکی به ایستگاه‌های شارژ و دشارژ هوشمند به صورت تصادفی انتخاب می‌گردد و حضور خودروهای الکتریکی در ایستگاه‌های شارژ و دشارژ هوشمند، با ضریب نفوذ ۲۵ درصد در نظر گرفته شده است. همچنین مجموع توان مصرف شده به ازای تمام خودروهای الکتریکی در شبکه، در هر ساعت مشخص بوده و جزو داده‌های مسئله می‌باشد. دو منبع تجدیدپذیر با ظرفیت تولید نامی هر کدام ۱ مگاوات در گره‌های ۲۱ و ۵۸ قرار دارند. هر منبع خود متشکل از یک واحد فتوولتائیک و یک توربین بادی به ظرفیت تولید نامی هر کدام ۵۰۰ کیلووات می‌باشد. در ادامه با طرح دو سناریو مختلف، به بررسی تأثیر میزان ظرفیت نامی ایستگاه‌های شارژ و دشارژ هوشمند خودروهای الکتریکی بر توابع شبکه می‌پردازیم. بستر مورد مطالعه در این پژوهش، شبکه‌ی ۶۹ گره استاندارد می‌باشد که شماتیک مداری آن را در شکل (۵) می‌توان مشاهده کرد.





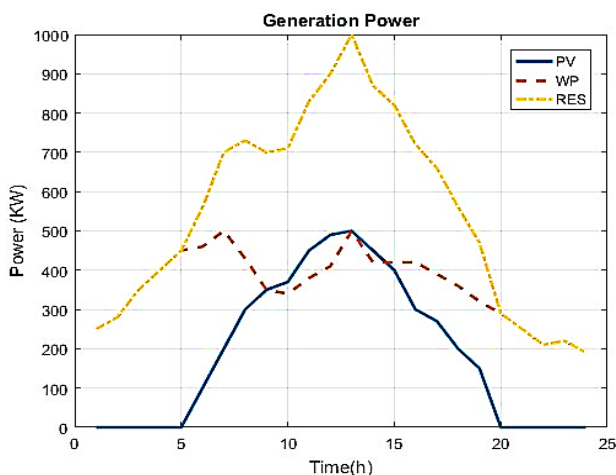
شکل (۵): شماتیک شبکه ۶۹ گره استاندارد IEEE

۴-۱- سناریو اول؛ ظرفیت هر ایستگاه شارژ ۱/۵ مگاوات

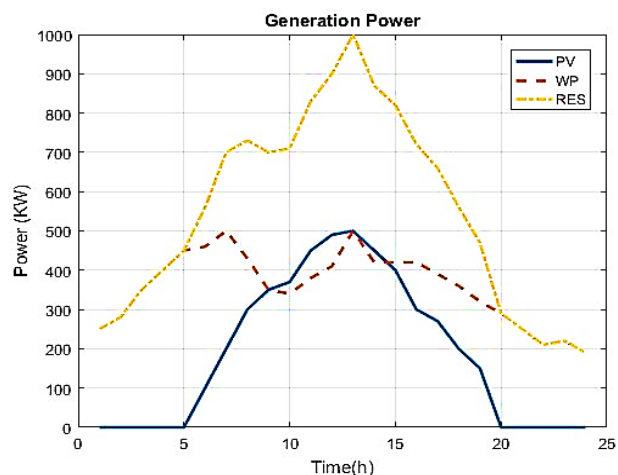
در سناریو اول شبکه دارای دو ایستگاه شارژ و دشارژ هوشمند خودروهای الکتریکی با ظرفیت نامی هر ایستگاه ۱/۵ مگاوات می‌باشد. همچنین دو منبع تجدیدپذیر تولید توان الکتریکی به ظرفیت نامی هر منبع ۱ مگاوات در گره‌های ۲۱ و ۵۸ موجود می‌باشند، به گونه‌ای که هر منبع تجدیدپذیر خود متشکل از یک واحد فتوولتائیک و یک توربین بادی به ظرفیت تولید توان نامی هر واحد ۵۰۰ کیلووات می‌باشد. تمام متغیرهای شبکه و پارامترهای دیگر به جهت یکسان‌سازی شرایط اولیه در دو سناریو همسان خواهد بود.

۴-۲- سناریو دوم؛ ظرفیت هر ایستگاه شارژ ۳ مگاوات

در سناریو دوم شبکه دارای دو ایستگاه شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی با ظرفیت نامی هر ایستگاه ۳ مگاوات می‌باشد. همچنین دو منبع تجدیدپذیر تولید توان الکتریکی به ظرفیت نامی هر منبع ۱ مگاوات در شبکه موجود می‌باشد. لازم به ذکر است در سناریو دوم نیز همانند سناریو اول منابع تجدیدپذیر تولید توان الکتریکی، خود متشکل از یک واحد فتوولتائیک و یک توربین بادی به ظرفیت تولید توان نامی هر واحد ۵۰۰ کیلووات می‌باشند که در گره‌های ۲۱ و ۵۸ در شبکه ۶۹ گره استاندارد، مکان‌یابی شده‌اند. همچنین مکان احداث ایستگاه‌های شارژ و دشارژ هوشمند خودروهای الکتریکی در هر دو سناریو در گره‌های ۴۱ و ۵۲ تعیین شده است. در ادامه نتایج حاصل از دو سناریو مورد بررسی قرار خواهند گرفت. از اصل عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر، ایستگاه‌های شارژ و دشارژ و دیگر تجهیزات شبکه صرف نظر شده است چرا که در نظر گرفتن آن بر پیچیدگی مسئله می‌افزاید و روند حل مسئله را تحت شعاع قرار خواهد داد و آن را دچار بیش‌برازش خواهد کرد. منحنی تولید توان الکتریکی منابع تجدیدپذیر طبق اشکال (۶) و (۷) حاصل شده است.



شکل (۷): منحنی تولید توان منبع تجدیدپذیر در سناریو دوم

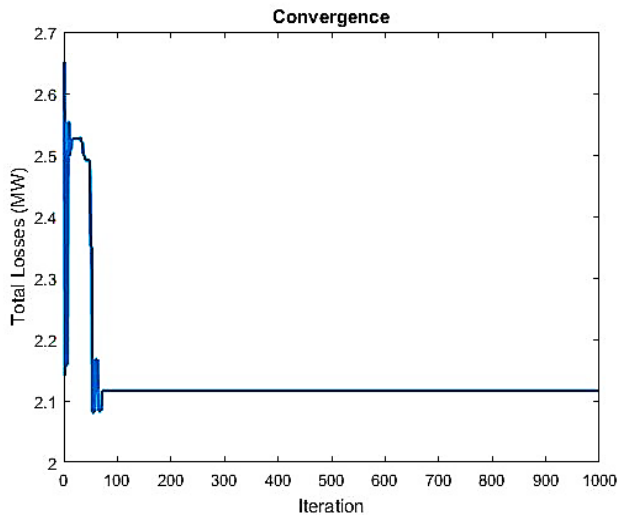


شکل (۶): منحنی تولید توان منبع تجدیدپذیر در سناریو اول

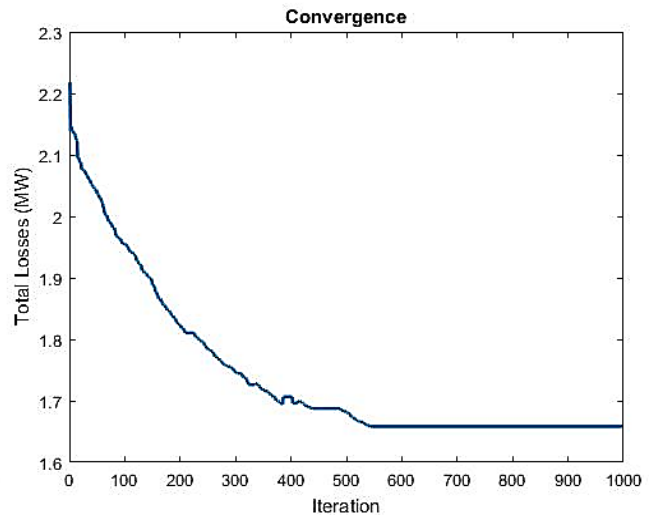
با توجه به یکسان بودن ظرفیت منابع تجدیدپذیر و تشابه منحنی تولید توان الکتریکی آن‌ها، در هر دو سناریو ظرفیت تولیدی این منابع برابر و همسان می‌باشد. همچنین با دقت در شکل (۶) و (۷) مشاهده می‌شود منابع فتوولتائیک از بامداد تا ۵ صبح و همچنین از ساعت



۲۰ الی نیمه شب به دلیل عدم تابش خورشید هیچگونه تولید توانی ندارند به همین منظور است که در منابع تجدیدپذیر از ترکیب واحد فتوولتائیک در کنار توربین بادی استفاده شده است، تا با توجه به ماهیت کاری خود واحدها به صورت مکمل برای یکدیگر عمل کنند. اینگونه می‌توان قابلیت اطمینان بهتری از ترکیب آن‌ها حاصل کرد. باید توجه داشت که منحنی تولید توان واحد فتوولتائیک خود وابسته به موقعیت جغرافیایی محل احداث پنل‌های فتوولتائیک، زاویه تابش، شدت تابش خورشید، تعداد ساعات تابش خورشید و عوامل متعدد بسیار دیگری می‌باشد و به همین ترتیب برای توربین بادی نیز عواملی از قبیل موقعیت جغرافیایی، شدت وزش باد، زاویه وزش باد، مساحت دهانه‌ی پره‌های توربین، نوع خود توربین بادی (محور عمودی یا محور افقی) و دیگر عوامل مؤثر خواهد بود که به دلیل پرهیز از پیچیدگی از پرداختن به این موارد صرف نظر شده است. شکل‌های (۸) و (۹) منحنی تلفات شبکه را برای دو سناریو نشان می‌دهند.



شکل (۹): تلفات شبکه در سناریو دوم

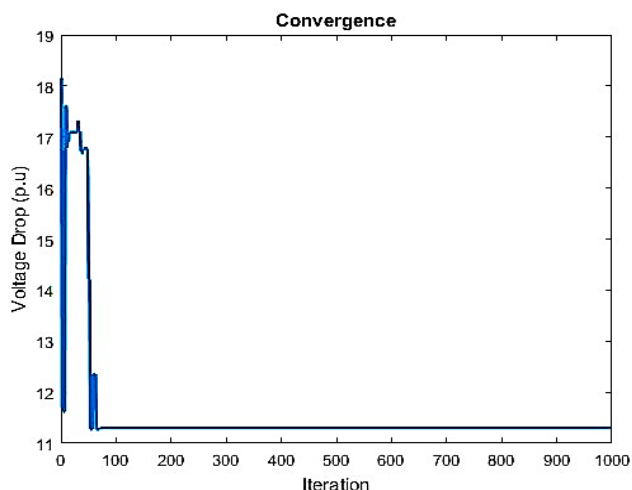


شکل (۸): تلفات شبکه در سناریو اول

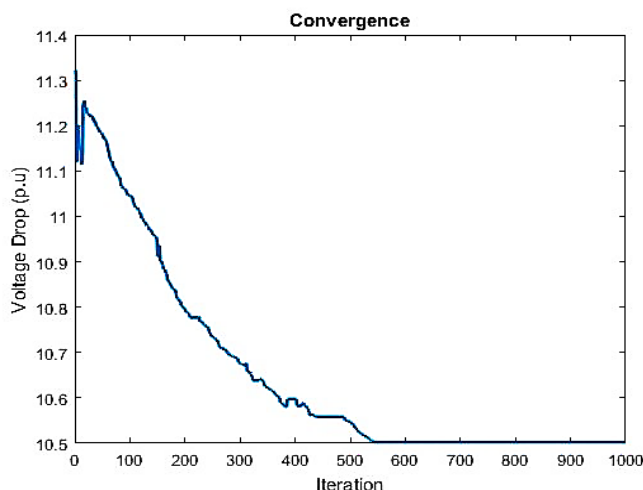
با دقت در اشکال (۸) و (۹) مشاهده می‌شود که در هر دو سناریو منحنی تلفات به همگرایی می‌رسد با این تفاوت که در سناریو دوم نسبت به سناریو اول میزان تلفات شبکه افزایش یافته است. افزایش تلفات شبکه در سناریو دوم نسبت به سناریو اول را اینگونه می‌توان توجیه کرد که با افزایش ظرفیت ایستگاه‌های شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی به طور قطع میزان شارژ و دشارژ هر ایستگاه در طول شبانه‌روز افزایش می‌یابد و از آنجایی که ظرفیت ذخیره‌سازی باتری خودروهای الکتریکی در هر دو سناریو یکسان فرض شده است (جزو داده‌های مسئله و معلوم می‌باشد و برای تمام خودروهای الکتریکی برابر فرض شده است) می‌توان اینگونه استدلال کرد که با افزایش ظرفیت ایستگاه‌های شارژ و دشارژ هوشمند خودروهای الکتریکی تعداد خودروهایی که در شبانه‌روز به این ایستگاه‌ها جهت عمل شارژ یا دشارژ مراجعه می‌کنند افزایش می‌یابد. پر واضح است که با افزایش تعداد مراجعات خودروهای الکتریکی به ایستگاه‌های شارژ و دشارژ، تعداد سیکل‌های شارژ و دشارژ در شبانه‌روز افزایش می‌یابد. از آن سو با افزایش تعداد سیکل‌های شارژ و دشارژ در شبانه‌روز میزان تلفات شبکه افزایش خواهد یافت (یکی از دلایل آن افزایش تلفات مسی در شبکه و همچنین افزایش تلفات هیستریسیس و فوکو در ترانسفورماتورهای ایستگاه‌های شارژ می‌باشد). در نتیجه می‌توان گفت با افزایش ظرفیت ایستگاه‌های شارژ و دشارژ هوشمند خودروهای الکتریکی، میزان تلفات در شبکه افزایش می‌یابد.

در نهایت با مطالعه و بررسی دقیق شکل‌های (۸) و (۹) می‌توان عنوان داشت که میزان تلفات شبکه به ترتیب از مقدار ۱/۶۶ مگاوات در سناریو اول به مقدار ۲/۱۱ مگاوات در سناریو دوم افزایش یافته است. با توجه به میزان تلفات در سناریو اول و دوم می‌توان دریافت میزان افزایش تلفات در سناریو دوم نسبت به سناریو اول مقدار ۰.۴۵ مگاوات بوده است که در مقایسه با مقدار تلفات در سناریو اول این میزان، بیانگر افزایش زیادی بوده است. میزان افزایش تلفات را اگر به صورت تابعی از درصد بخواهیم بیان کنیم، نسبت به سناریو اول ۲۷ درصد تلفات شبکه افزایش داشته است.



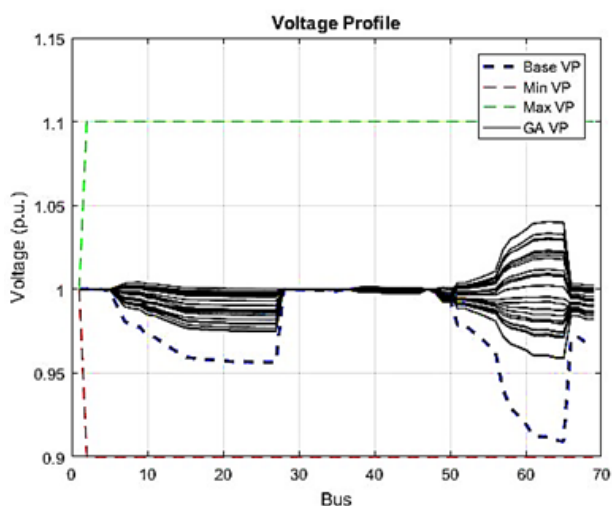


شکل (۱۱): افت ولتاژ در شبکه در سناریو دوم

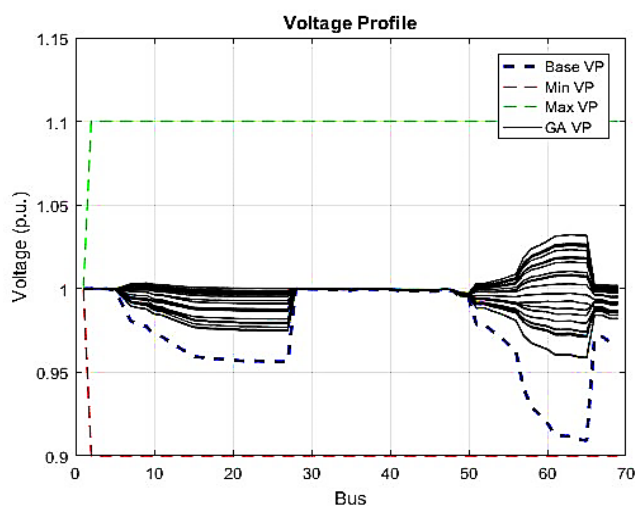


شکل (۱۰): افت ولتاژ در شبکه در سناریو اول

اشکال (۱۰) و (۱۱) نشان دهنده افت ولتاژ شبکه می‌باشند، با بررسی آن‌ها می‌توان دریافت که افت ولتاژ در سناریو دوم نسبت به سناریو اول افزایش یافته است. میزان افت ولتاژ در سناریو اول $10/5$ پریونیت بوده که با روندی افزایشی در سناریو دوم به $11/4$ پریونیت رسیده است، به عبارتی با افزایش ظرفیت ایستگاه‌های شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی، افت ولتاژ به میزان $0/9$ پریونیت افزایش یافته است. در بیان علت افزایش افت ولتاژ در سناریو دوم نسبت به سناریو اول، استدلالی همانند آنچه برای افزایش تلفات بیان گشت، می‌توان ارائه داد. به طور خلاصه افزایش ظرفیت ایستگاه‌های شارژ و دشارژ هوشمند خودروهای الکتریکی، باعث افزایش تعداد سیکل‌های شارژ و دشارژ می‌شود که این امر رابطه‌ای مستقیم با افزایش تلفات و افت ولتاژ سیستم دارد. برای بررسی دقیق‌تر باید منحنی پروفایل ولتاژ در دو سناریو را با حالت اولیه شبکه، یعنی در نبود طرح مشارکت خودروهای الکتریکی و عدم اجرای برنامه پاسخگویی بار مقایسه کنیم تا بتوانیم بهبود و یا عدم بهبود اوضاع را تعیین کنیم. به این منظور در ادامه اشکال (۱۲) و (۱۳) منحنی پروفایل ولتاژ برای هر دو سناریو را نشان خواهند داد، با دقت در آن‌ها می‌توان گفت با اجرای طرح مشارکت، پروفایل ولتاژ نسبت به حالت اولیه شبکه بهبود یافته است و این امر برای هر دو سناریو صادق می‌باشد. در مقام مقایسه نیز می‌توان بیان کرد پروفایل ولتاژ در سناریو اول به میزان اندکی از سناریو دوم مطلوب‌تر است.



شکل (۱۳): منحنی پروفایل ولتاژ در سناریو دوم



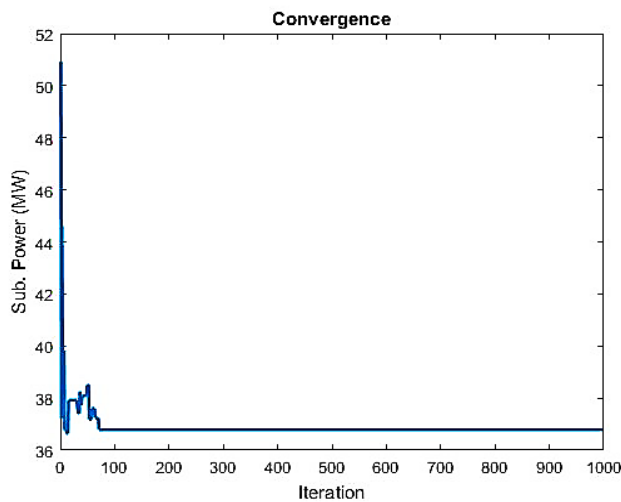
شکل (۱۲): منحنی پروفایل ولتاژ در سناریو اول

با مطالعه‌ی شکل‌های (۱۲) و (۱۳) می‌توان اینگونه بیان کرد که در سناریو اول پروفایل ولتاژ نسبت به سناریو دوم مطلوب‌تر است (چرا که پروفایل ولتاژ سناریو اول به مقدار ۱ پریونیت نزدیک‌تر است و نسبت به سناریو دوم مرکزیت بیشتری دارد). در مجموع پروفایل ولتاژ

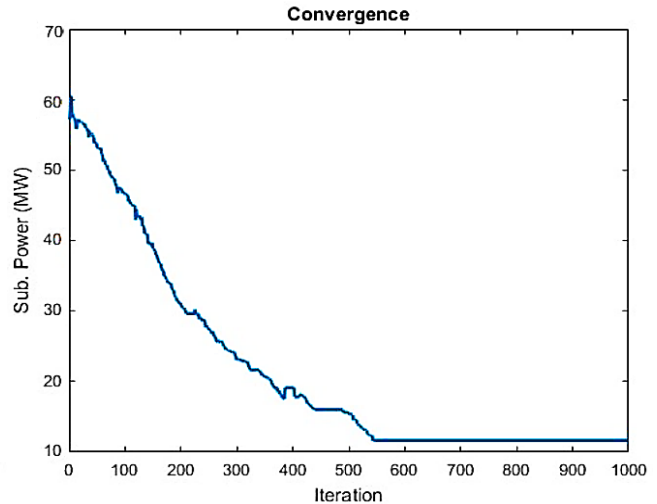


با اجرای طرح مشارکت و برنامه پاسخگویی تقاضا، نسبت به قبل از اجرای آن طرح، بهبود قابل توجهی یافته است. همچنین پس از اجرای طرح مشارکت، به جهت مقایسه می‌توان گفت پروفایل ولتاژ سناریو اول مطلوب‌تر از پروفایل ولتاژ سناریو دوم است. با افزایش ظرفیت ایستگاه‌های شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی پروفایل ولتاژ نامطلوب‌تر می‌شود که دلیل آن ارتباطی است که بین تلفات شبکه، افت ولتاژ شبکه و پروفایل ولتاژ شبکه وجود دارد، به گونه‌ای که افزایش افت ولتاژ، بر بدتر شدن پروفایل ولتاژ تأثیرگذار است. از طرف دیگر با افزایش دوبرابری ظرفیت ایستگاه‌های شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی، در هنگام شارژ میزان باری که به شبکه اضافه می‌شود افزایش می‌یابد که با توجه به یکسان بودن تولید و ساختار شبکه با سناریو اول، این افزایش یا کاهش ناگهانی بار مستقیم بر شکل موج ولتاژ تأثیر می‌گذارد.

اشکال (۱۴) و (۱۵) منحنی مربوط به مجموع توان مصرفی شبکه در یک شبانه‌روز را نشان می‌دهد.



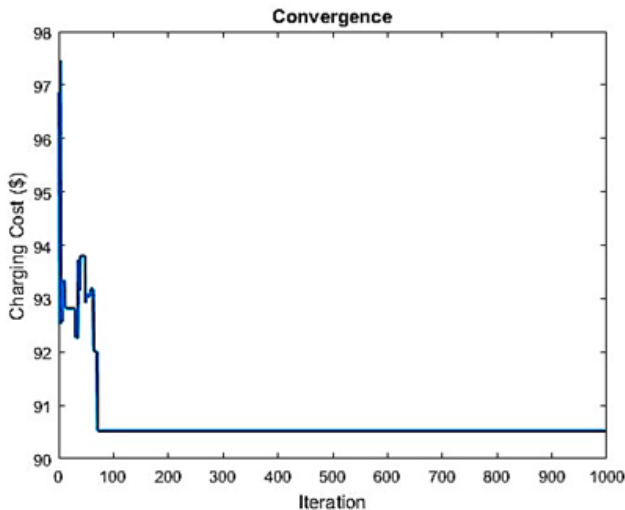
شکل (۱۵): مجموع توان مصرفی شبکه در سناریو دوم



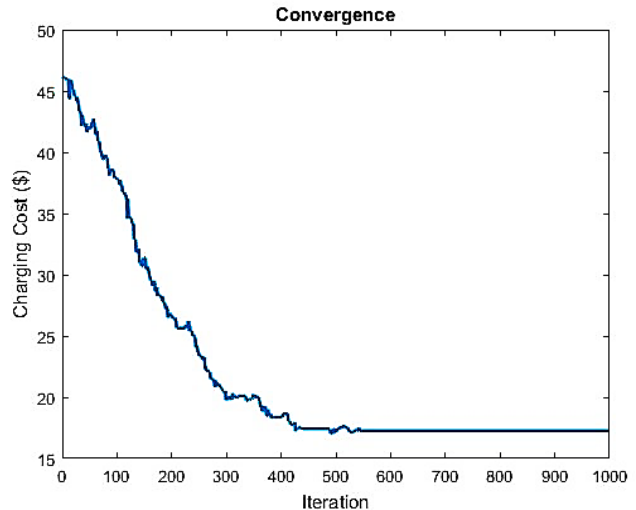
شکل (۱۴): مجموع توان مصرفی شبکه در سناریو اول

همان‌طور که در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) مشاهده می‌توان کرد مجموع توان مصرفی در شبکه در سناریو اول ۱۰/۱۸ مگاوات و در سناریو دوم ۳۶/۸ مگاوات می‌باشد. با افزایش ظرفیت ایستگاه‌های شارژ و دشارژ هوشمند خودروهای الکتریکی میزان توان کل مصرفی شبکه افزایش می‌یابد که از دلایل آن می‌توان به افزایش تعداد سیکل‌های شارژ و دشارژ و همچنین افزایش تلفات شبکه اشاره کرد. به‌طور کلی مجموع توان مصرفی در شبکه تابع متعددی از قبیل میزان مصرف در شبکه، تلفات شبکه و سایر موارد می‌باشد که با اجرای طرح پیشنهادی در سناریو دوم نسبت به سناریو اول، میزان کل توان مصرفی شبکه افزایش یافته است. در تشریح دلیل این امر می‌توان گفت که با افزایش ظرفیت ایستگاه‌های شارژ و دشارژ هوشمند خودروهای الکتریکی تعداد مراجعات خودروها جهت عمل شارژ بیشتر می‌شود و بنابراین با افزایش تعداد سیکل‌های شارژ، میزان کل توان مورد استفاده جهت شارژ خودروهای الکتریکی نیز افزایش می‌یابد که این امر به‌طور مستقیم بر افزایش میزان کل توان مصرفی شبکه تأثیرگذار خواهد بود. با نگاهی عمیق‌تر به این مسئله می‌توان به ارتباطی که بین توابع مختلف شبکه وجود دارد، پی برد. به‌طور مثال افزایش ظرفیت ایستگاه‌های شارژ و دشارژ هوشمند خودروهای الکتریکی خود منجر به افزایش تلفات شبکه می‌شود، از طرف دیگر افزایش تلفات خود بر افزایش توان کل مصرفی شبکه (کل توانی که شرکت توزیع به شبکه داده است) تأثیرگذار است و رابطه‌ای مستقیم با آن دارد چراکه توان کل مصرفی شبکه بر طبق رابطه (۹) از جمع تلفات و دیگر متغیرها حاصل می‌شود. در نهایت به صورت کمی می‌توان بیان داشت، میزان افزایش توان کل مصرفی شبکه در سناریو دوم نسبت به سناریو اول، مقدار ۲۶.۶۲ مگاوات بوده است، که افزایش ۲۶۱ درصدی نسبت به میزان توان کل مصرفی در سناریو اول داشته است. در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) منحنی هزینه‌ی شارژ خودروهای الکتریکی در یک شبانه‌روز برای سناریو اول و دوم نشان داده شده است.



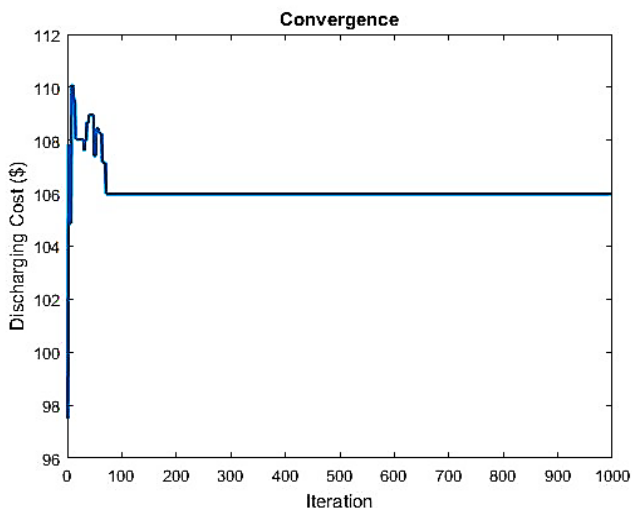


شکل (۱۷): هزینه شارژ در سناریو دوم

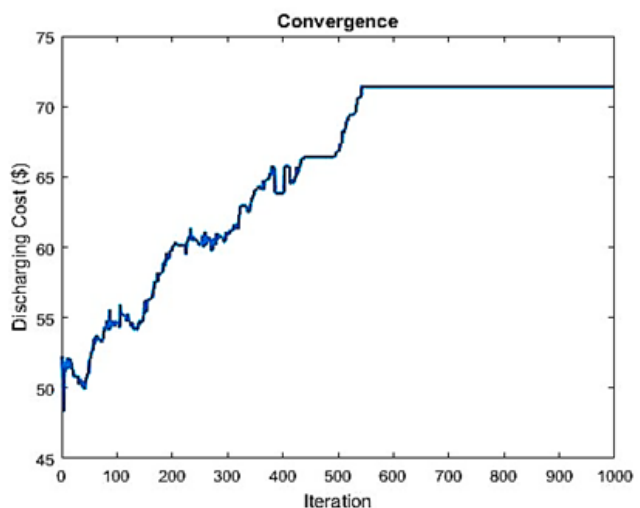


شکل (۱۶): هزینه شارژ در سناریو اول

با دقت در اشکال (۱۶) و (۱۷) مشاهده می‌شود که در سناریو اول هزینه شارژ روزانه به ۱۷/۵ دلار و در سناریو دوم هزینه شارژ روزانه به ۹۰/۶ دلار همگرا شده است. به بیان دیگر با افزایش ظرفیت ایستگاه‌های شارژ و دشارژ و بیشتر شدن تعداد سیکل‌های شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی میزان هزینه‌ی شارژ برای آن‌ها نیز افزایش می‌یابد که امری بدیهی است. در تفسیر این امر می‌توان اینگونه بیان داشت که با افزایش ظرفیت ایستگاه‌های شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی، تعداد خودروهایی که روزانه در این ایستگاه‌ها اقدام به شارژ باتری‌های خود می‌کنند افزایش می‌یابد و به این ترتیب مجموع توانی که در باتری این خودروها ذخیره می‌شود افزایش خواهد یافت. قطعاً با افزایش مجموع توانی که صرف شارژ شدن باتری خودروهای الکتریکی می‌شود، بهایی که مالکان آن خودروها باید بپردازند نیز افزایش خواهد یافت. در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) منحنی هزینه دشارژ خودروهای الکتریکی در سناریو اول و دوم نمایش داده شده است.



شکل (۱۹): منحنی هزینه دشارژ در سناریو دوم



شکل (۱۸): منحنی هزینه دشارژ در سناریو اول

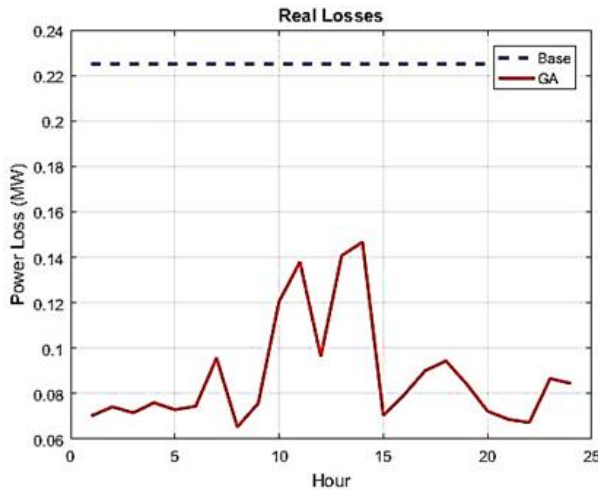
هزینه دشارژ همان طور که در رابطه (۱۰) بیان شده بود، به ازای هر کیلووات ۲۰ درصد بیشتر از هزینه شارژ در نظر گرفته شده است. با دقت در اشکال (۱۸) و (۱۹) می‌توان دریافت هزینه دشارژ خودروهای الکتریکی در سناریو اول ۷۲ دلار در شبانه‌روز و در سناریو دوم ۱۰۶ دلار در شبانه‌روز است. به بیان دیگر افزایش ظرفیت ایستگاه‌های شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی باعث بیشتر شدن تعداد سیکل‌های دشارژ شده که این امر خود منجر به افزایش مشارکت این خودروها در تأمین توان شبکه شده است. با افزایش مشارکت خودروهای الکتریکی در تأمین توان شبکه، میزان توان تزریقی توسط این خودروها به شبکه زیاده‌تر می‌شود و در نتیجه‌ی آن، بهای کل



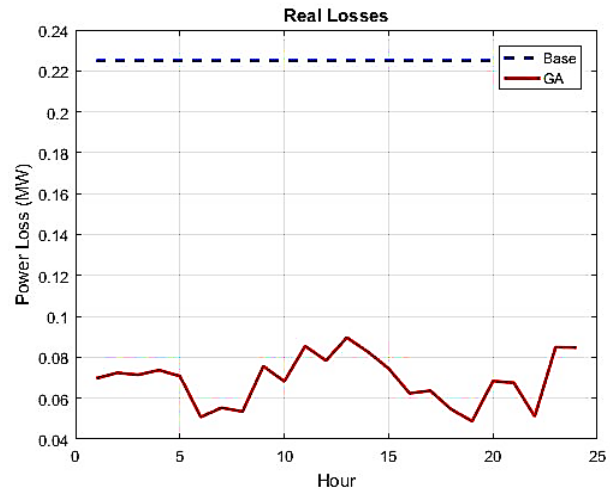


توان دشارژ شده در شبانه‌روز نیز افزایش می‌یابد. به بیان دیگر با افزایش هزینه‌ی دشارژ، پول دریافتی توسط مالکان خودروهای الکتریکی بابت فروش توان به شبکه نیز بیشتر خواهد شد.

در شکل‌های (۲۰) و (۲۱) نمودار تلفات شبکه در ساعات مختلف شبانه‌روز برای سناریو اول و دوم ارائه گشته است. با دقت در نمودارهای خط شکسته ارائه شده در شکل‌های (۲۰) و (۲۱) می‌توان دریافت که در ۲۴ ساعت شبانه‌روز، چه ساعت‌هایی تلفات شبکه بیشتر بوده است. این موضوع هنگامی اهمیت پیدا می‌کند که به علت بیشتر بودن تلفات در این ساعات از شبانه‌روز بپردازیم. لازم به ذکر است این نمودارها با منحنی‌های ارائه شده در اشکال (۸) و (۹) متفاوت هستند چرا که در این نمودارها تلفات به تفکیک هر ساعت از شبانه‌روز مشخص شده است.

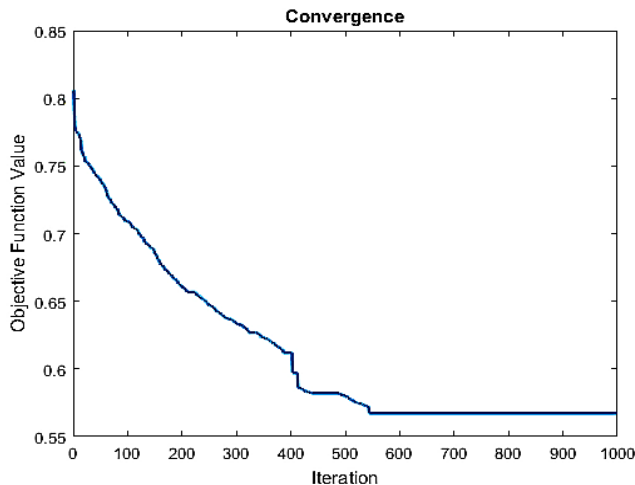


شکل (۲۱): تلفات در ۲۴ ساعت در سناریو دوم

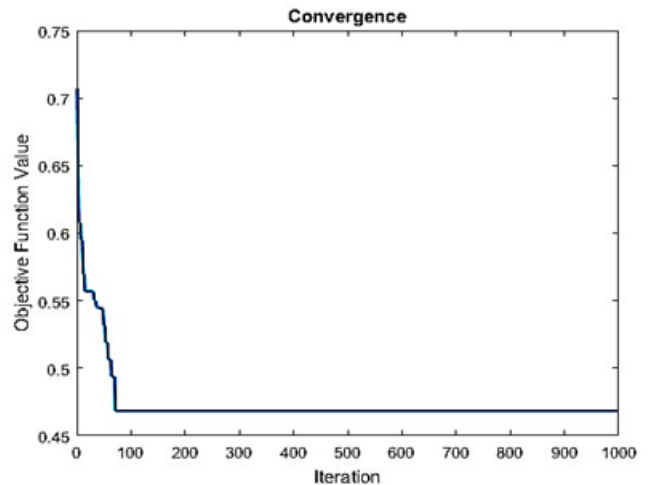


شکل (۲۰): تلفات ۲۴ ساعت در سناریو اول

بر اساس اشکال (۲۰) و (۲۱)، در سناریو اول منحنی تلفات هموارتر و مجموعاً در یک شبانه‌روز مقدار کمتری را اختیار کرده است، که این امر با نتایج حاصل از شکل‌های (۸) و (۹) که بیانگر مقدار کل تلفات شبکه در یک شبانه‌روز بودند مطابقت دارد و به نوعی تصدیق کننده‌ی آن‌ها است. مسئله‌ی مهم دیگر وجود دو افزایش ناگهانی در منحنی تلفات در ساعات ۱۰ الی ۱۵ در سناریو دوم است که دلیل آن افزایش تعداد سیکل‌های دشارژ خودروهای الکتریکی برای تأمین بار پیک شبکه در آن ساعات است. با افزایش تعداد سیکل‌های دشارژ تلفات مسی شبکه و تلفات هیستریزس و فوکو مربوط به ترانسفورماتورهای ایستگاه‌های شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی بیشتر می‌شود. شکل‌های (۲۲) و (۲۳) بیانگر تابع هدف اصلی شبکه هستند که بر اساس رابطه‌ی (۱) محاسبه می‌شود.



شکل (۲۳): تابع هدف اصلی سناریو دوم



شکل (۲۲): تابع هدف اصلی سناریو اول





با توجه به رابطه (۱) می‌توان بیان داشت که تابع هدف اصلی مجموعی از سه تابع دیگر است که ماهیت‌هایی متفاوت دارند، توابعی که از جنس تلفات، افت ولتاژ و هزینه هستند در تحلیل رفتار منحنی‌های حاصل از رابطه (۱) می‌توان بیان داشت حالت بهینه برای تابع هدف اصلی هنگامی اتفاق می‌افتد که کم‌ترین مقدار خود را اختیار کند. مقدار همگرایی تابع هدف اصلی در سناریو اول ۰/۴۷ پرونیت و در سناریو دوم ۰/۵۷ پرونیت است. یعنی مقدار تابع هدف اصلی در سناریو دوم بیشتر از سناریو اول می‌باشد که دلیل آن بیشتر بودن تلفات و افت ولتاژ و هزینه‌ی شارژ در سناریو دوم نسبت به سناریو اول بیان می‌گردد.

۴-۳- نتایج دو سناریو مورد مطالعه

به جهت مقایسه‌ی راحت‌تر نتایج و جمع‌بندی و تحلیل داده‌های حاصل از منحنی‌ها، مقادیر حاصل از توابع هدف از هر دو سناریو در جدول (۴) ارائه گشته است.

جدول (۴): مقادیر توابع هدف

سناریو دوم	سناریو اول	توابع هدف
۰/۵۷	۰/۴۷	تابع هدف اصلی
۲/۱۱	۱/۶۶	تلفات در ۲۴ ساعت (MW)
۳۶/۸	۱۰/۱۸	مجموع توان مصرفی (MW)
۱۱/۴	۱۰/۵	افت ولتاژ
۹۰/۶	۱۷/۵	هزینه شارژ در ۲۴ ساعت (دلار)
۱۰۶	۷۲	هزینه دشارژ در ۲۴ ساعت (دلار)
۱۵/۴	۵۴/۵	سود مالک از فروش توان

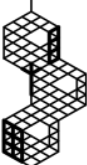
۵- نتیجه گیری

با بررسی نتایج و مقادیر موجود در جدول (۴) می‌توان اینگونه بیان داشت که در یک شبکه ۶۹ گره با متغیرهای یکسان و تقاضای برابر و شرایط اولیه مشابه، در صورت افزایش ظرفیت ایستگاه‌های شارژ و دشارژ هوشمند خودروهای الکتریکی نه تنها توابع شبکه بهبود پیدا نمی‌کنند بلکه ممکن است شبکه از نقطه‌ی کار بهینه‌ی خود نیز خارج شود. به اختصار می‌توان گفت در شبکه ۶۹ گره مورد مطالعه، با وجود دو منبع تجدیدپذیر با ظرفیت ۱ مگاوات و دو ایستگاه شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی، اگر ظرفیت این ایستگاه‌های شارژ و دشارژ از ۱/۵ مگاوات به ۳ مگاوات یعنی دو برابر افزایش پیدا کند، بدون اینکه دیگر پارامترهای شبکه تغییر کند یا اندازه مصرف‌کنندگان شبکه افزایش یابد و یا دیگر اجزای شبکه دستخوش تغییر شود؛ افت ولتاژ، تلفات توان، توان کل مصرفی و هزینه‌ی شارژ و هزینه‌ی دشارژ افزایش می‌یابد و مالک خودرو الکتریکی نیز سود کمتری از فروش توان عایدش می‌شود. به بیان دیگر به تنهایی افزایش ظرفیت ایستگاه‌های شارژ و دشارژ هوشمند خودروهای الکتریکی در یک شبکه مشخص با تعداد و میزان مصرف‌کنندگان معین، باعث به وجود آمدن ناترازی بین تولید و مصرف می‌شود و شبکه را از حالت تعادل خارج می‌کند. بنابراین این مطالعه به این نتیجه‌ی مهم می‌رسد که صرفاً افزایش ظرفیت ایستگاه‌های شارژ و دشارژ هوشمند خودروهای الکتریکی باعث بهبود توابع شبکه نمی‌شود و حتی بلعکس افزایش ظرفیت حساب نشده و ایجاد تغییراتی که مورد مطالعه و ارزیابی دقیق و کارشناسانه قرار نگرفته‌اند، ممکن است باعث بدتر شدن اوضاع شوند و با خارج کردن شبکه از حالت تعادل، سیستم را متحمل هزینه‌های غیر ضروری نماید به بیان دیگر هنگامی که میزان تولید و مصرف در شبکه متناسب باشد و ناترازی در تولید و مصرف وجود نداشته باشد میزان تلفات، افت ولتاژ، توان کل مصرفی در کمترین میزان خود قرار خواهد داشت. در نتیجه میزان ظرفیت ایستگاه‌های شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی و همچنین ظرفیت منابع تجدیدپذیر باید متناسب با پتانسیل شبکه و تقاضای موجود در آن محاسبه و انتخاب شود تا شبکه در حالت بهینه به کار خود ادامه دهد.





- [1] M. N. Azghandi, A. Shojaei, S. Toosi, and H. Lotfi, "Optimal reconfiguration of distribution network feeders considering electrical vehicles and distributed generators," *Evolutionary Intelligence*, vol. 16, Feb. 2023, doi: 10.1007/s12065-021-00641-7.
- [2] A. F. Guven, S. B. Akbasak, "DC fast charging station modeling and control for electric vehicles," *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 11, Dec. 2021, doi: 10.31466/kfbd.986040.
- [3] O. Lugovoy, S. Gao, J. Gao and K. Jiang, "Feasibility study of China's electric power sector transition to zero emissions by 2050," *Energy Economics*, vol. 96, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.eneco.2021.105176.
- [4] N. Bhusal, M. Abdelmalak, M. Kamruzzaman, and M. Benidris, "Power system resilience: Current practices, challenges, and future directions," *IEEE Access*, vol. 8, Jan. 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2968586.
- [5] K. Clement-Nyns, E. Hn, and J. Driesen, "The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, Feb. 2010, doi: 10.1109/TPWRS.2009.2036481.
- [6] M. H. Moradi, S. R. Tousi, and S. M. Hosseinian, "Optimal siting and sizing of renewable energy sources and charging stations simultaneously based on Differential Evolution algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 73, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.06.029.
- [7] K. Subramaiah, P. Sujatha, "Optimal DG unit placement in distribution networks by multiobjective whale optimization algorithm & its techno-economic analysis," *Electric Power Systems Research*, vol. 214, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2022.108869.
- [8] M. Shivaie, M. Kiani-Moghaddam, and P. D. Weinsier, "Resilience-based tri-level framework for simultaneous transmission and substation expansion planning considering extreme weather-related events," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 14, Aug. 2020, doi: 10.1049/iet-gtd.2019.1512.
- [9] M. Aman, G. B. Jasmon, H. Mokhlis, and A. H. A. Bakar, "Optimal placement and sizing of a dg based on a new power stability index and line losses," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 43, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.ijepes.2012.05.053.
- [10] M. Zand, A. Nasab, A. Hatami, M. Kargar, and H. R. Chamorro, "Using adaptive fuzzy logic for intelligent energy management in hybrid vehicles," *Iranian Conference on Electrical Engineering, Tabriz, Iran*, Aug. 2020, doi: 10.1109/ICEE50131.2020.9260941.
- [11] M. Jiang, J. Wang, Y. Han, and Q. Zhao, "Coordination dispatch of electric vehicles charging/discharging and renewable energy resources power in microgrid," *Procedia Computer Science*, vol. 107, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.procs.2017.03.072.
- [12] M. H. Moradi, M. Abedini, S. M. R. Tousi, and S. M. Hosseinian, "Optimal siting and sizing of renewable energy sources and charging stations simultaneously based on Differential Evolution algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 73, pp. 1015-1024, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.06.029.
- [13] J. A. Martín García and A. J. Gil Mena, "Optimal distributed generation location and size using a modified teaching-learning based optimization algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 50, pp. 65-75, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.ijepes.2013.02.023.
- [14] M. H. Moradi, M. Abedini, "A combination of genetic algorithm and particle swarm optimization for optimal DG location and sizing in distribution systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 34, no. 1, pp. 66-74, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.ijepes.2011.08.023.
- [15] A. Najafi Tari, M. S. Sepasian, and M. Tourandaz Kenari, "Resilience assessment and improvement of distribution networks against extreme weather events," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 125, p. 106414, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106414.
- [16] J. Aghaei, E. Bagheri, A. Heidari, G. J. Osório, M. Shafie-Khah, J. M. Lujano-Rojas, J. P. S. Catalão "Investigation of smart distribution network response to operation performance of plug-in hybrid electric vehicles," *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, Turin, Italy*, Jan. 2018, doi: 10.1109/ISGTEurope.2017.8260304.
- [17] A. Shahbazi, J. Aghaei, S. Pirouzi, T. Niknam, M. Shafie-khah, and J. P. S. Catalão, "Effects of resilience-oriented design on distribution networks operation planning," *Electric Power Systems Research*, vol. 191, p. 106902, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106902.





- [18] M. H. K. Tushar, C. Assi, M. Maier, and M. F. Uddin, "Smart microgrids: Optimal joint scheduling for electric vehicles and home appliances," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, Jan. 2014, doi: 10.1109/TSG.2013.2290894.
- [19] P. Aliasghari, B. Mohammadi-Ivatloo, M. Alipour, M. Abapour, and K. Zare, "Optimal scheduling of plug-in electric vehicles and renewable micro-grid in energy and reserve markets considering demand response program," *Journal of Cleaner Production*, vol. 186, pp. 293-303, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.03.058.
- [20] M. J. Shahriary, I. Goroohi-Sardou, "Power system probabilistic scheduling with electric vehicles considering renewable energy sources uncertainties," *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, vol. 11, Nov. 2020, doi: 10.22108/isee.2019.118470.1264.
- [21] A. Kavousi-Fard, T. Niknam, and M. Fotuhi-Firuzabad, "Stochastic Reconfiguration and Optimal Coordination of V2G Plug-in Electric Vehicles Considering Correlated Wind Power Generation," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, no. 3, pp. 822-830, Jul. 2015, doi: 10.1109/TSTE.2015.2409814.
- [22] H. Hashemi-Dezaki, M. Hamzeh, H. Askarian-Abyaneh, and H. Haeri-Khiavi, "Risk management of smart grids based on managed charging of PHEVs and vehicle-to-grid strategy using Monte Carlo simulation," *Energy Conversion and Management*, vol. 100, pp. 262-276, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.05.015.
- [23] S. B. Peterson, J. F. Whitacre, and J. Apt, "The economics of using plug-in hybrid electric vehicle battery packs for grid storage," *Journal of Power Sources*, vol. 195, no. 8, pp. 2377-2384, Apr. 2010, doi: 10.1016/j.jpowsour.2009.09.070.
- [24] M. Ahmadi, S. H. Hosseini, "Optimal location and operation planning of charging and discharging stations of electric vehicles using metaheuristic algorithms," *Iranian Electric Industry Journal Quality & Productivity*, vol. 10, Sep. 2021, doi: 20.1001.1.23222344.1400.10.3.8.7.
- [25] M. Shivaie, M. T. Ameli, M. S. Sepasian, P. D. Weinsier, and V. Vahidinasab, "A multistage framework for reliability-based distribution expansion planning considering distributed generations by a self-adaptive global-based harmony search algorithm," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 139, pp. 68-81, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.res.2015.03.001.
- [26] M. Kühnbach, A. Bekk, and A. Weidlich, "Prepared for regional self-supply? On the regional fit of electricity demand and supply in Germany," *Energy Strategy Reviews*, vol. 34, p. 100609, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.esr.2020.100609.

زیر نویسها

-
- 1 Electric vehicle
 - 2 Microgrid
 - 3 Renewable resources
 - 4 Reliability
 - 5 Photovoltaic resources
 - 6 Fossil fuels
 - 7 Stability
 - 8 Energy market
 - 9 Demand response
 - 10 Power quality
 - 11 Improved genetic algorithm
 - 12 Admittance
 - 13 Chromosome
 - 14 Mutation
 - 15 Crossover
 - 16 Pareto
 - 17 Elitism
 - 18 Parent
 - 19 Offspring

