

Optimal Multi-objective Development Scheduling of Electric Vehicles in Distribution Network using Particle Swarm Optimization

Iman Goroohi Sardou¹

¹ Dept. of Electrical and Computer Engineering, University of Jiroft, Jiroft, Iran

Abstract:

The use of the electric energy stored in batteries of electric vehicles connected to the grid (V2G) will play a significant role in the development of distribution systems in the future. Electric vehicles (EVs) are able to charge during base load hours and inject energy into the grid during peak hours. Besides, the grid-connected EVs increase the system reliability under the outages. In this paper, Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm is employed to solve the multi-objective problem of development scheduling of electric vehicles in the distribution network. ϵ -constraint method is employed to solve the proposed multi-objective problem. Besides, a fuzzy decision making approach is employed to determine the most compromise solution among the Pareto solutions obtained by the solving the sub-problems generated by the ϵ -constraint method. Decision variables include the location, and charge and discharge capacity of the smart parking lots of the EVs. IEEE 54-bus distribution test system is employed as the studied test network. Operation costs of the distribution network are compared in both states of with or without EVs. The results demonstrate the effectiveness of the proposed method for EVs' development scheduling in the distribution network.

Keywords: Particle Swarm Optimization, Electric Vehicle Development Planning, Distribution Network operation, Parking Lots of Electric Vehicles.

برنامه‌ریزی بهینه چندهدفه توسعه خودروهای برقی در شبکه توزیع با استفاده

از الگوریتم تجمعی ذرات

ایمان گروهی ساردو

استادیار، گروه مهندسی برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه جیرفت - جیرفت - ایران

imangoroohi@ujiroft.ac.ir

چکیده: استفاده از انرژی الکتریکی ذخیره‌شده در باتری خودروهای متصل به شبکه (V2G) در آینده نقش مهمی در توسعه سیستم‌های توزیع دارد. خودروهای متصل به شبکه در زمان‌های کم‌باری شبکه، شارژ و در زمان‌های پیک بار انرژی به شبکه تزریق می‌شوند. همچنین خودروهای متصل به شبکه در هنگام قطع برق قابلیت اطمینان شبکه را افزایش می‌دهند. در این مقاله با استفاده از الگوریتم تجمعی ذرات (PSO) به حل مسئله برنامه‌ریزی بهینه چندهدفه توسعه پارکینگ‌های هوشمند مجتمع خودروهای برقی در سطح شبکه توزیع پرداخته می‌شود. از روش مقید-ε برای حل مسئله چندهدفه پیشنهادی استفاده می‌شود. همچنین از روش تصمیم‌گیرنده فازی برای انتخاب بهترین جواب بهینه پرتو از میان جواب‌های پرتو به دست آمده از حل مسائل تک‌هدفه حاصل از روش مقید-ε استفاده می‌شود. متغیرهای تصمیم شامل محل و ظرفیت شارژ و دشارژ پارکینگ‌های هوشمند خودروهای برقی‌اند. شبکه نمونه توزیع ۵۴ باسه استاندارد IEEE شبکه مورد مطالعه در نظر گرفته شده و طرح‌های توسعه شبکه در دو حالت با و بدون حضور خودروهای برقی با یکدیگر مقایسه می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده کارایی طرح پیشنهادی برنامه‌ریزی توسعه خودروهای برقی در شبکه توزیع‌اند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم تجمعی ذرات، برنامه‌ریزی توسعه خودروهای برقی، بهره‌برداری شبکه توزیع، پارکینگ‌های

مجتمع خودروهای برقی

۱- مقدمه

لحاظ کردن تمام محدودیت‌ها پیش‌بینی کند [۱]. همچنین اطلاعات درخور قبولی از قطع برق هر مشتری باید به سیستم داده شود تا موجب افزایش قابلیت اطمینان سیستم شود و اطمینان مشتریان افزایش یابد [۲]. برنامه‌ریزی توسعه سیستم‌های توزیع مسئله بسیار پیچیده است که راه‌حل‌ها بیشتر شامل استفاده از مدل‌های ریاضیات پیشرفته و محاسبات عددی می‌شوند. طرح‌های توزیع سیستم‌های قدرت باید شامل سهولت نصب و قابلیت ارتقا آسان باشد. مشکل اساسی در استفاده از این روش‌ها به دام افتادن در جواب بهینه محلی است که تقریب مناسبی از جواب بهینه واقعی را ارائه نمی‌دهد [۳]. همچنین هنگام بزرگ‌شدن اندازه سیستم، تعداد جواب‌ها به صورت انفجاری رشد می‌کند. برنامه‌ریزی توسعه سیستم‌های توزیع عمدتاً به دو

برنامه‌ریزی توسعه سیستم‌های توزیع، یکی از بزرگ‌ترین فعالیت‌های واحدهای توزیع برای رفع نیاز تقاضای روبه‌رشد انرژی الکتریکی است. برنامه‌های توسعه سیستم‌های توزیع شامل راحتی نصب و تقویت سیستم است؛ بنابراین سیستم باید تقاضا را در پایین‌ترین هزینه با

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۳۰

نام نویسنده مسئول: ایمان گروهی ساردو

نشانی نویسنده مسئول: ایران - جیرفت - دانشگاه جیرفت - دانشکده فنی و مهندسی - گروه مهندسی برق

به صورت هم‌زمان هم بار و هم تولیدکننده می‌بیند که موجب افزایش خطا در نتیجه‌گیری می‌شود. در مرجع [۱۰] مدل ریاضی برای تعیین بهره‌برداری بهینه و برنامه‌ریزی شارژ هوشمند ایستگاه‌های شارژ خودرو برقی با در نظر گرفتن اهداف شرکت‌های توزیع محلی و همچنین مالکان ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی ارائه شده است. مرجع [۱۱] الگوریتم تنومند^۳ را برای مشارکت دادن بارهای انعطاف‌پذیر در بهره‌برداری شبکه توزیع ارائه می‌کند. در الگوریتم ارائه‌شده، مشارکت در برنامه‌های پاسخگویی تقاضا^۴ با در نظر گرفتن خودروهای برقی، عدم قطعیت قیمت و طول عمر باتری‌ها انجام می‌شود. در مرجع [۱۲] ساختاری مبتنی بر شبیه‌سازی‌های ترتیبی مونت‌کارلو برای تعیین ظرفیت ذخیره پارکینگ خودروهای برقی برای بهبود قابلیت اطمینان سیستم توزیع پیشنهاد شده است. در مقاله حاضر به مسئله تعیین محل و ظرفیت بهینه خودروهای برقی در سطح شبکه توزیع پرداخته می‌شود. بدین منظور کمینه‌کردن هزینه بهره‌برداری شبکه توزیع و همچنین تلفات شبکه، توابع هدف مسئله در نظر گرفته شده‌اند. نوآوری‌های این مقاله نسبت به مراجع مرتبط به صورت زیر بیان می‌شوند:

- ۱- ارائه مدل جامع چندهدفه برای بهینه‌سازی مسئله تعیین محل و ظرفیت ایستگاه‌های شارژ خودروهای برق با در نظر گرفتن معیارهای اقتصادی سیستم؛
 - ۲- استفاده از ترکیب روش مقید-E و روش تصمیم‌گیرنده فازی برای تعیین جواب بهینه پرتو؛
 - ۳- بررسی اثرات حضور خودروهای برقی بر مسئله برنامه‌ریزی توسعه سیستم‌های توزیع.
- درحقیقت از روش تصمیم‌گیرنده فازی برای انتخاب بهترین جواب بهینه پرتو از میان جواب‌های پرتو به دست آمده از حل مسائل تک‌هدفه حاصل از روش مقید-E استفاده می‌شود. از روش الگوریتم PSO به منزله ابزار بهینه‌سازی برای حل مسائل تک‌هدفه به دست آمده از روش مقید-E، استفاده و شبکه توزیع نمونه ۵۷-باسه IEEE، شبکه نمونه مورد مطالعه در نظر گرفته می‌شود. طرح‌های توسعه شبکه در دو حالت با و بدون حضور خودروهای برقی با یکدیگر مقایسه می‌شوند. در ادامه مقاله در بخش ۲ به بیان

روش انجام می‌گیرد: (۱) روش تک‌مرحله‌ای؛ (۲) روش چند مرحله‌ای. آینده برنامه‌ریزی برای شبکه توزیع باید شامل شارژ و دشارژ خودروهای برقی (EVها) باشد [۴]؛ بنابراین در کنار ملاحظه تقاضای شبکه توزیع، باید ایستگاه‌های شارژ EVها مدنظر قرار گیرند تا برنامه‌ریزی کامل شود. موضوعات فنی ایستگاه‌های شارژ شامل تعیین ظرفیت ایستگاه‌های شارژ، انتخاب مکان ایستگاه‌های شارژ و برنامه‌ریزی پست‌ها و فیدرهایی است که ایستگاه‌های شارژ و دشارژ به آن‌ها متصل است [۵]. در بهینه‌سازی محل و اندازه ایستگاه‌های شارژ سه مسئله دسترسی آسان، ترافیک خودروهای برقی و هزینه ایجاد پارکینگ‌ها باید در نظر گرفته شوند تا مدل بهینه شارژ از بین دیگر حالت‌های ممکن انتخاب شود [۶]. در روشی که مبتنی بر فاکتورهای جغرافیایی و فاصله تا ایستگاه بعدی شارژ است، تأثیر تعداد باتری‌ها بر شبکه قدرت به منظور ایجادکردن ایستگاه‌های شارژ با در نظرگیری مکان و ظرفیت ایستگاه‌ها است. در هنگام عملکرد این حالت که شارژ مرکزی - توزیع متحد^۲ نام دارد، مدل ایستگاه شارژ مرکزی ساخته می‌شود تا تصمیم بگیرد ظرفیت و مکان هر خط انتقال چقدر باشد. سهولت و مسائل اقتصادی هر دو برای بهینه‌سازی ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی و مدل‌سازی سیستم‌های شعاعی لحاظ شده‌اند. در مقاله [۷] نیز از روش «شارژ مرکزی - توزیع متحد» استفاده شده است، اما سهولت و مسائل اقتصادی را در نتیجه‌گیری خود لحاظ نکرده است. در تمام موارد بالا با EVها تنها به منزله بار رفتار می‌شود. زمانی که مشکلات مربوط به مکان، اندازه و تأثیر EVها بر شبکه توزیع ارزیابی می‌شود، مشخصه‌های EVها را می‌توان هم بار و هم تولیدکننده در نظر گرفت. همچنین توانایی‌های مختلف EVها برای شارژ شدن و چندین نوع طرح متصل شده به شبکه EVها بررسی شده‌اند. این مقاله تأثیر EVهایی که به صورت تصادفی به شبکه متصل می‌شوند را بر تمام شبکه توزیع تحلیل نمی‌کند. به علاوه واضح است این مشکل را می‌توان با در نظرگیری تأثیر EVها به منزله بار و منبع بر شبکه توزیع به طور جداگانه تحلیل کرد. در مراجع [۸] و [۹] نیز چندین نوع طرح برای اتصال خودروهای برقی به شبکه پیشنهاد می‌شوند؛ اما خودروهای برقی را

اطلاعات تراکم بار در این مقاله شامل اطلاعاتی است که به روش تجربی از تراکم بار کاربران مسکونی حاصل شده است. برای پیش‌بینی تراکم بار هر منطقه S_i ($i=1,2,\dots,N$) و شکل کلی بار S_{Total} از روش تراکم بار استفاده می‌شود. درحقیقت S_i میزان بار در هر منطقه عملیاتی را نشان می‌دهد. برای سهولت شارژشدن EVها باید طراحی نرخ ظرفیت ایستگاه شارژ متناسب با تعداد EVها باشد. مجموع EVها را با N_{car} نشان می‌دهیم. فرمول ظرفیت ایستگاه شارژ خودوهای برقی EVها عبارت است از:

$$S_{csi} = kN_{car}P_{charge} \frac{S_i}{S_{Total}} \quad (1)$$

K نشان‌دهنده تعداد EVهایی است که به‌صورت هم‌زمان در حال شارژند که می‌توان آن را با روش‌های آماری از نسبت EVهای شارژشونده به کل EVها به دست آورد و P_{charge} نشان‌دهنده متوسط قدرت شارژکردن است.

۲-۳- توابع هدف

مسئله برنامه‌ریزی بهینه خودروهای برقی در شبکه توزیع شامل دو تابع هدف است. تابع هدف نخست، مسئله کمینه‌کردن هزینه برنامه‌ریزی شبکه شامل هزینه بهره‌برداری شبکه و هزینه سرمایه‌گذاری خودروهای برقی است که در رابطه (۲) نمایش داده شده‌اند. آنگونه که از این رابطه مشخص است هزینه کل بهره‌برداری شبکه توزیع به‌صورت هزینه برق دریافتی از شبکه بالادست محاسبه شده است. تابع هدف دوم تلفات توان اکتیو در شبکه است که در رابطه (۳) نمایش داده شده‌اند.

$$F_1 = OC = \sum_{t=1}^{N_T} P_{USN} \rho_{USN} + \sum_{j=1}^{N_{CAR}} P_j^{CAR} \rho_j^{CAR} \quad (2)$$

$$F_2 = P_{Loss} = \sum_{L=1}^{N_L} R_L I_L^2 \quad (3)$$

۲-۴- قیود مسئله

قیود مسئله با توجه به شرایط شبکه‌های توزیع شعاعی و ایستگاه‌های شارژ تعریف می‌شوند. در کنار رعایت قیود مربوط به ایستگاه‌های شارژ مدل برنامه‌ریزی همچنین باید الزامات مربوط به محدودیت ظرفیت و افت ولتاژ

مدلسازی ریاضی مسئله پرداخته می‌شود. همچنین مدل پیشنهادی برای ایستگاه‌های خودروهای برقی در این قسمت ارائه می‌شود. روش حل پیشنهادی در بخش ۳ ارائه شده است. بخش ۴ به مطالعه عددی و اعتبارسنجی روش پیشنهادی می‌پردازد. درنهایت، نتیجه‌گیری مقاله در بخش ۵ ارائه شده است.

۲- توصیف مسئله

در این قسمت مدل ریاضی ارائه‌شده برای مسئله برنامه‌ریزی توسعه خودروهای برقی در شبکه توزیع ارائه می‌شود. همچنین روابط مربوطه شامل توابع هدف و قیود نمایش داده می‌شوند.

۲-۱- مدلسازی ایستگاه‌های خودرو برقی

تکنولوژی $V2G^0$ می‌تواند مشکلات کمبود عرضه ریزشکه‌ها و نوسانات انرژی‌های تجدیدپذیر را حل کند. همچنین موجب سود برای مالکان EVها شود. همچنین متخصصین اعتقاد دارند تکنولوژی $V2G$ عملکرد شبکه قدرت سنتی را به سوی تغییر بزرگ سوق خواهد داد. $V2G$ به EVها اجازه می‌دهد انرژی را به شبکه برگردانند. در طول دوره پیک مصرف، انرژی ذخیره‌شده در EVها به شبکه باز گردانده می‌شود. در عوض EVها انرژی برق اضافی را در زمان‌های مصرف کم ذخیره می‌کنند. وقتی تعداد زیادی از EVها به شبکه قدرت متصل شوند، تغییرات زیادی در بسیاری از جوانب حاصل می‌شود؛ برای مثال، EVها می‌توانند به منبع اصلی توان در شبکه تبدیل شوند، شبکه از میان برداشته می‌شود و قابلیت اطمینان تأمین برق افزایش می‌یابد؛ بنابراین الزامات جدیدی برای ساختار شبکه توزیع به وجود می‌آید. در این مقاله ویژگی‌های $V2G$ لحاظ می‌شوند تا زمانی که برنامه‌ریزی شبکه توزیع برای شارژ EVها کامل شود.

۲-۲- اندازه ایستگاه‌های شارژ

در روش پیش‌بینی تراکم بار برای انطباق تصمیم‌گیری برای ظرفیت شارژ ایستگاه ابتدا ناحیه بررسی شده باید به N ناحیه عملیاتی مطابق با پارامترهای واقعی تقسیم شود.

۳- روش حل مسئله

چالش اصلی حل مسائل چندهدفه تعیین جوابی است که به صورت هم‌زمان همه توابع هدف را بهینه می‌کند. با توجه به وجود تناقض میان توابع هدف معمولاً یافتن چنین جوابی دشوار است؛ بنابراین روش چندهدفه کارا روشی است که به تعادل مناسب میان توابع هدف ختم می‌شود.

۳-۱- روش چندهدفه مقید- ε

در روش مقید- ε [۱۵]، با توجه به رابطه (۱۲)، یکی از توابع هدف را کمینه کرده است؛ در حالی که سایر توابع هدف به صورت قید در نظر گرفته می‌شوند.

$$\min f_h(x), \text{ s.t. } f_p(x) \leq \varepsilon_p, p \in \{1, \dots, P\} \setminus \{h\} \quad x \in X \quad (12)$$

کـــ در آن $(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{h-1}, \varepsilon_{h+1}, \dots, \varepsilon_p) \in R^{P-1}$ و $h \in \{1, 2, \dots, p\}$.

در حقیقت در روش مقید- ε با تغییر مقدار ε در محدوده تغییرات تابع هدف دوم و تعریف آن به صورت قید تعداد محدودی زیر مسئله تک‌هدفه ایجاد می‌شود که با حل هریک از این زیرمسائل، جواب بهینه پرتو به دست می‌آید. سپس با استفاده از روش تصمیم‌گیرنده فازی بهترین جواب بهینه پرتو با توجه به ترجیحات برنامه‌ریز شبکه تعیین می‌شود [۱۶].

۳-۲- روش تصمیم‌گیرنده فازی^۷

با استفاده از روش مقید- ε تعداد مشخصی جواب بهینه پرتو به دست می‌آید که با استفاده از روش تصمیم‌گیرنده فازی و با توجه به مقدار ضرایب وزنی تعیین شده بهترین جواب بهینه پرتو تعیین می‌شود. در این روش در ابتدا با استفاده از تابع عضویت فازی نشان داده شده در رابطه (۱۳) درجه مطلوبیت هر تابع هدف مربوط به هر جواب بهینه پرتو به دست می‌آید. سپس با استفاده از رابطه (۱۴) درجه مطلوبیت کلی هر جواب بهینه پرتو به دست می‌آید. جواب بهینه پرتو با درجه مطلوبیت بیشتر، جواب نهایی مسئله چندهدفه در نظر گرفته می‌شود [۱۶]. ضرایب وزنی ω_p دارای مجموع واحد است و با توجه به ترجیحات برنامه‌ریز شبکه تعیین می‌شوند.

ایستگاه‌های شارژ را رعایت کند تا از عملکرد صحیح شبکه قدرت اطمینان حاصل شود. قید رابطه (۴) محدودیت ظرفیت ایستگاه‌های شارژ را نشان می‌دهد. قیود نشان داده شده در روابط (۵)–(۷) مربوط به پخش بار پسرو – پیشرو در شبکه‌های توزیع شعاعی‌اند. رابطه (۸) قید مربوط به تعادل توان اکتیو در شبکه توزیع را نشان می‌دهد. محدودیت‌های امنیتی سیستم شامل امنیت ولتاژ گره‌های شبکه توزیع و همچنین بارگذاری خطوط در روابط (۹) و (۱۰) ارائه شده‌اند. مواقعی که V_i مقدار ولتاژ هر گره بار در نظر گرفته می‌شود V_{imin} و V_{imax} به ترتیب مینیمم و لتاز و ماکسیمم ولتاژ هر گره در نظر گرفته می‌شوند. در شبکه توزیع، نسبت R بر X عددی بزرگ است. در مواقعی که ایستگاه‌های شارژ به منزله بار رفتار می‌کنند در روش جانشینی پسرو – پیشرو (Backward/Forward) با محاسبه شار قدرت، این ایستگاه‌ها با شبکه توزیع هماهنگ می‌شوند. در مقام مقایسه در روش نیوتن رافسون محاسبه شار زمانی درخواست می‌شود که ایستگاه شارژ، تأمین‌کننده قدرت است [۱۴–۱۳]. این روش، مناسب زمانی است که شار چند ژنراتور قدرت در شبکه لحاظ شود. رابطه (۱۱) قید مربوط به ظرفیت پست‌ها را نشان می‌دهد. مواقعی که S_i^{Post} ظرفیت پست‌ها، فیدرها یا ایستگاه‌های شارژ در نظر گرفته شود، ماکسیمم ظرفیتی که به صورت برابر به پست‌ها، فیدرها یا ایستگاه‌های شارژ تخصیص داده می‌شود با $S_i^{max, Post}$ نشان داده می‌شود.

$$P_j^{CAR} < P_j^{CAR, max} \quad (4)$$

$$I_i = \frac{S_i^*}{V_i^*} \quad (5)$$

$$P_{USN} \leq P_{USN}^{max} \quad (6)$$

$$V_i = V_j - Z_{ij} \cdot I_{ij} \quad (7)$$

$$P_{USN} + \sum_{j=1}^{N_{CAR}} P_j^{CAR} = P_D + P_{Loss} \quad (8)$$

$$|V_{i min}| \leq |V_i| \leq |V_{i max}| \quad (9)$$

$$|S_L| \leq |S_{L max}| \quad (10)$$

$$S_i^{Post} \leq S_i^{max, Post} \quad (11)$$

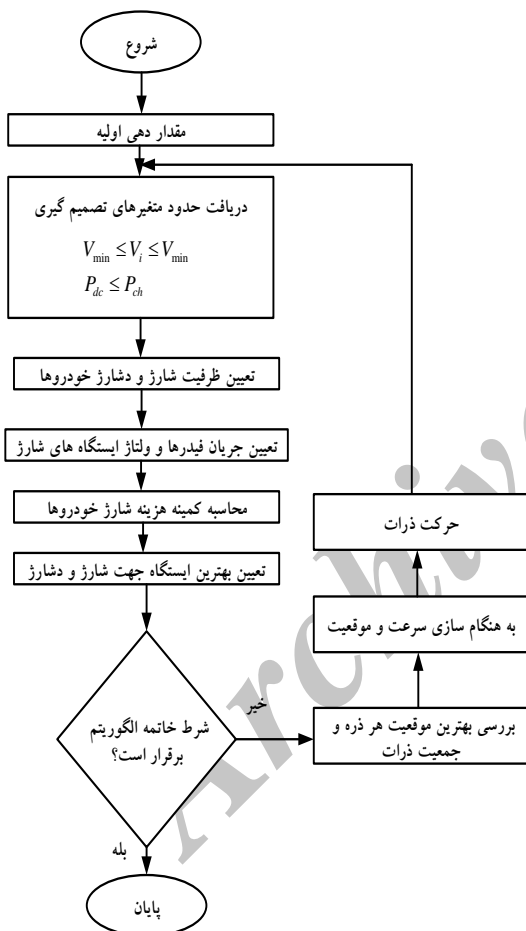
همراه محل بهینه این پارکینگ‌ها - که متغیر تصمیم‌گیری مسئله را تشکیل می‌دهند - موقعیت ذرات در الگوریتم PSO در نظر گرفته شده‌اند. در این الگوریتم برای تعیین جریان فیدرها و ولتاژ ایستگاه‌های شارژ از روش پخش بار پسر و - پیشرو استفاده می‌شود. در پایان بیشترین مقدار درجه مطلوبیت کلی به‌دست آمده از رابطه (۱۴) مقدار برازندگی مربوط به هر موقعیت ذرات در نظر گرفته می‌شود و موقعیت و سرعت ذرات با عملگرهای الگوریتم به‌روزرسانی می‌شوند.

$$\mu_p^k = \begin{cases} 1 & F_p^k \leq \text{Min}(F_p) \\ \frac{\text{Max}(F_p) - F_p^k}{\text{Max}(F_p) - \text{Min}(F_p)} & \text{Min}(F_p) \leq F_p^k \leq \text{Max}(F_p) \\ 0 & F_p^k \geq \text{Max}(F_p) \end{cases} \quad (13)$$

$$\mu^k = \frac{\sum_{p=1}^P \omega_p \mu_p^k}{\sum_{k=1}^M \sum_{p=1}^P \omega_p \mu_p^k} \quad (14)$$

۳-۳- الگوریتم پیشنهادی حل مسئله

یکی از چالش‌های اصلی بهینه‌سازی خودروهای متصل به شبکه، تعیین ضرایب وزنی هر یک از عوامل دخیل در نتیجه‌گیری است. همچنین مدل‌سازی واقعی مسئله از دیگر چالش‌های بهینه‌سازی خودروهای متصل به شبکه است؛ به گونه‌ای که تقریب بسیار دقیقی از جوابی را به دست آوریم که در واقعیت با آن مواجهیم. در این مقاله به علت ساختار ساده و همگرایی سریع الگوریتم تجمعی ذرات (PSO) در مقایسه با سایر روش‌های فراابتکاری از این الگوریتم برای حل مسئله تک‌هدفه برنامه‌ریزی توسعه خودروهای برقی در شبکه توزیع استفاده شده است. همچنین الگوریتم PSO در مقایسه با الگوریتم ژنتیک باینری از مقدار واقعی متغیرها به‌عنوان اعضای جمعیت استفاده می‌کند و در نتیجه، حجم محاسباتی مسئله کاهش می‌یابد. با استفاده از الگوریتم تجمعی ذرات می‌توان تصمیم‌گیری چندهدفه را در آن دخالت داد و با وزندهی مناسب عناصر کمی و کیفی، می‌توان تحلیل جامع به دست آورد. در این مقاله ضریب آدرس ایستگاه‌های کاندید با الگوریتم تجمعی ذرات تعیین می‌شود. در مدل برنامه‌ریزی شبکه، ضریب وزنی، ضریب هزینه ایستگاه‌های شارژ در نظر گرفته شده است. در برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ نباید فقط به بهینه‌سازی اقتصادی توجه کرد؛ بلکه باید پارامترهای امنیتی شبکه را نیز در نظر گرفت. این، مسئله تصمیم‌گیری با دو نوع عامل مختلف است که با روش ترکیبی الگوریتم تجمعی ذرات و وزندهی پارامترهای مختلف با استفاده از روش مقید-ε حل شدنی است.

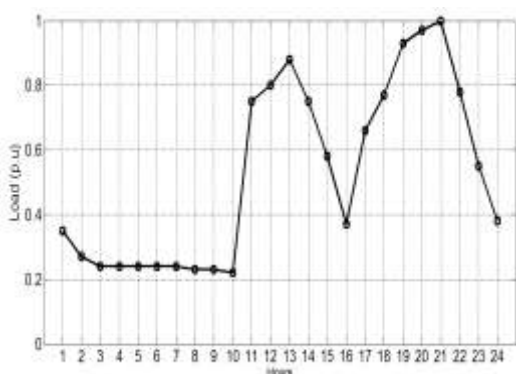


شکل (۱): فلوچارت روش پیشنهادی برای برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ بر مبنای الگوریتم PSO

۴- شبیه‌سازی

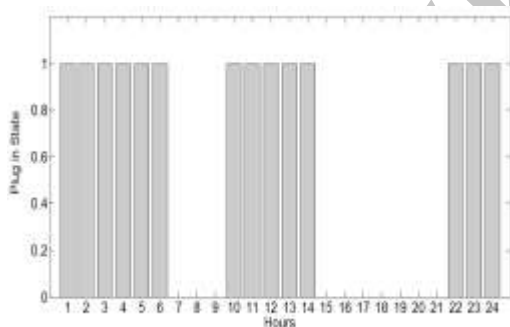
شبکه نمونه مورد مطالعه شبکه استاندارد توزیع ۵۴ باسه IEEE است که در شکل (۲) تپولوژی نخستین آن رسم شده است [۱۷]. در این شکل خطوط پیوسته نشان‌دهنده فیدرهای شبکه شعاعی و خط چین‌ها نشان‌دهنده مکان‌های

فلوچارت روش پیشنهادی برای برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ بر مبنای الگوریتم PSO در شکل (۱) نمایش داده شده است. آنگونه که از این شکل مشخص است ظرفیت شارژ و دشارژ پارکینگ‌های مجتمع هوشمند خودروهای برقی به



شکل (۳): پروفیل ساعتی بار مصرفی شبکه

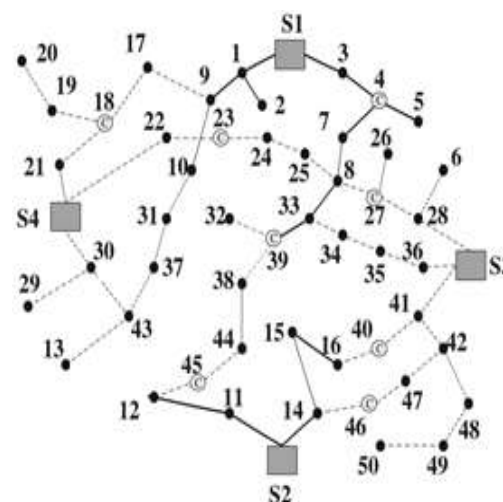
مقادیر مبنای ولتاژ و توان شبکه به ترتیب برابر 12.66KV و 1MW در نظر گرفته شده‌اند. شکل (۴) وضعیت فرضی اتصال خودروهای برقی به شبکه را نشان می‌دهد. آنگونه که در این شکل نمایش داده شده است خودروهای برقی در ساعت‌های ۲۲ شب تا ۶ صبح در پارکینگ‌های هوشمند واقع در منطقه مسکونی به برق متصل‌اند و قابلیت شارژ و دشارژ با شبکه را دارند. همچنین در ساعت‌های ۱۰-۱۴ روز در پارکینگ‌های هوشمند قرار گرفته در محل کار به شبکه متصل‌اند و قابلیت شارژ و دشارژ با شبکه را دارند.



شکل (۴): وضعیت اتصال خودروها به شبکه

با اعمال روش مقید- ϵ و تقسیم بازه حدود تابع هدف دوم به ۲۰ قسمت مساوی تعداد ۲۱ زیرمسئله تک‌هدفه به دست می‌آید که از حل هر یک از آنها یک جواب برای مسئله به دست می‌آید؛ البته با توجه به اینکه روش الگوریتم PSO خاصیت تصادفی دارد و ممکن است با وجود تمهیدات در نظر گرفته شده به جواب‌های بهینه محلی همگرا شود، باید کنترل کرد ۲۰ جواب به دست آمده به هم‌دیگر غلبه نکنند. در این مورد تعداد ۴ جواب به دست آمده با سایر جواب‌ها مغلوب می‌شوند؛ بنابراین

احتمالی برای توسعه سیستم‌اند؛ مربع‌های S_1 و S_2 نشان‌دهنده پست‌های موجود و مربع‌های S_3 و S_4 نشان‌دهنده پست‌های در حال احداث‌اند. پست‌های در دست احداث در شبیه‌سازی در حالت متصل به شبکه بالادست در نظر گرفته نمی‌شوند؛ بنابراین قابلیت تبادل توان با شبکه بالادست در این پست‌ها وجود ندارد. در حقیقت شبکه نمونه دو پست فوق توزیع 115KV/12.66KV (S_1) و S_2 و ۵۰ نقطه بار دارد. ظرفیت پست‌ها برابر 7MVA برای تأمین بار کل برابر 5.1MW است. ولتاژ پست‌ها برابر 1p.u (12.66KV) انتخاب شده است و سایر گره‌ها می‌توانند ولتاژی بین 0.95p.u تا 1.05p.u داشته باشند. ظرفیت شارژ و دشارژ پارکینگ‌های هوشمند به ترتیب برابر $0.6/1$ و $1/3$ پریونیت انتخاب شده‌اند. برای نمونه در این مقاله مقدار ضرایب وزنی توابع هدف برابر $0.75/0$ و $0.25/0$ در نظر گرفته شده‌اند؛ یعنی اهمیت تابع هدف هزینه برنامه‌ریزی سیستم برای برنامه‌ریز شبکه توزیع سه برابر تابع هدف کمینه‌کردن تلفات است.



شکل (۲): شبکه استاندارد توزیع ۵۴ باسه IEEE

هدف مسئله، انتخاب محل و ظرفیت بهینه ایستگاه شارژ و دشارژ مربوط به پارکینگ‌های هوشمند خودروهای برقی است. همچنین مطابق استانداردهای صنعتی نرخ شارژ هم‌زمان $0.1/1$ است [۱]. پروفیل بار روزانه شبکه توزیع مطابق شکل (۳) فرض شده است.

برای بررسی کارایی روش چندهدفه پیشنهادی و برنامه‌ریزی توسعه خودروهای برقی در شبکه توزیع چهار حالت زیر، تعریف و نتایج آنها با هم مقایسه شده‌اند:

حالت ۱: برنامه‌ریزی چندهدفه توسعه خودروهای برقی در شبکه توزیع - الگوریتم PSO.

حالت ۲: بهره‌برداری شبکه توزیع بدون حضور خودروهای برقی - الگوریتم PSO.

حالت ۳: برنامه‌ریزی تک‌هدفه توسعه خودروهای برقی در شبکه توزیع - الگوریتم PSO.

حالت ۴: برنامه‌ریزی چندهدفه توسعه خودروهای برقی در شبکه توزیع - الگوریتم ژنتیک.

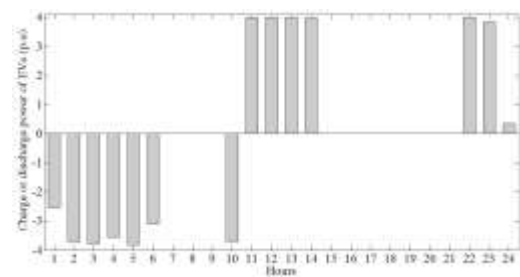
۴-۱- تأثیر حضور خودرها بر برنامه‌ریزی شبکه

نتایج مربوط به شاخص‌های اقتصادی و تلفات شبکه برای چهار حالت ۱، ۲، ۳ و ۴ در جدول (۲) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در این جدول درحقیقت حالت‌ها از این نظر مقایسه می‌شوند که طرح برنامه‌ریزی توسعه حاصل از کدام حالت بهینه‌تر و به شاخص‌های توابع هدف مناسب‌تری منتج می‌شود. در این جدول، درجه مطلوبیت مربوط به هر تابع هدف در داخل پرانتز نمایش داده شده است. همچنین مقدار درجه مطلوبیت کلی جواب هر حالت در این جدول نمایش داده شده است. با توجه به مقایسه نتایج حالت ۱ و حالت ۳ در جدول (۲)، حضور خودروهای برقی در شبکه توزیع سبب کاهش ۹/۹۶ درصدی هزینه بهره‌برداری شبکه توزیع و همچنین سبب کاهش ۳۵/۹۷ درصدی تلفات شبکه می‌شود؛ این موضوع کارایی توزیع ایستگاه‌های خودروهای برقی در شبکه توزیع را نشان می‌دهد. شکل (۶) پروفیل بار را قبل و بعد جایگذاری پارکینگ‌های هوشمند خودروهای برقی در شبکه نشان می‌دهد. آنگونه که از این شکل مشخص است حضور پارکینگ‌های خودروهای برقی سبب نرم‌شدن منحنی بار و کاهش به اصطلاح دره‌ها و برآمدگی‌های آن شده است. این موضوع علاوه بر تسهیل مدیریت بهره‌برداری شبکه توزیع به دلیل کاهش هزینه‌های راه‌اندازی و خاموش کردن واحدها و همچنین کاهش هزینه‌های رزرو سبب کاهش

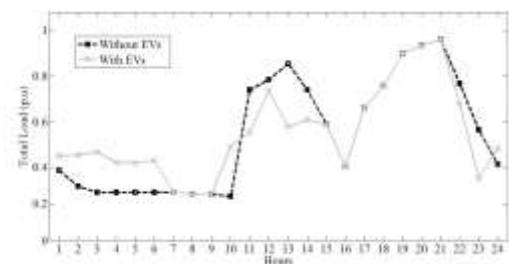
در نهایت تعداد ۱۷ جواب بهینه پرتو به دست آمده است. سپس با استفاده از روش تصمیم‌گیرنده فازی و با توجه به مقدار ضرایب وزنی تعریف‌شده مطلوب‌ترین جواب بهینه پرتو مسئله از میان ۱۷ جواب پرتو به دست آمده تعیین می‌شود. اطلاعات مربوط به طرح توسعه پیشنهادی شامل محل و ظرفیت شارژ و دشارژ پارکینگ‌های هوشمند خودروهای برقی در جدول (۱) نمایش داده شده است. همچنین شکل ۵ توزیع ساعتی شارژ و دشارژ ایستگاه‌های خودروهای برقی را نشان می‌دهد. مقادیر مثبت در این شکل مربوط به مجموع توان تولیدی (شارژ) ایستگاه‌های خودرو برقی و مقادیر منفی مقدار توان مصرفی (دشارژ) ایستگاه‌های خودروهای برقی را نشان می‌دهند.

جدول (۱): طرح برنامه‌ریزی احداث پارکینگ‌های هوشمند خودروهای برقی

شماره ایستگاه	شماره گره محل ایستگاه	ظرفیت شارژ (p.u)	ظرفیت دشارژ (p.u)
۱	۹	۰/۷۲	۰/۵۲
۲	۱۴	۰/۸۴	۰/۳۸
۳	۲۶	۰/۹۴	۰/۴۴
۴	۳۱	۰/۶۶	۰/۶
۵	۴۲	۱/۰۴	۰/۴۷
۶	۵۰	۰/۸۱	۰/۷۲



شکل (۵): توزیع ساعتی شارژ و دشارژ ایستگاه‌های خودروهای برقی



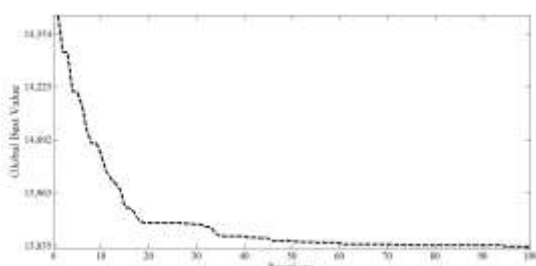
شکل (۶): مقایسه پروفیل بار قبل و بعد از حضور

پارکینگ‌های هوشمند خودروهای برقی

جدول (۲): مقایسه شاخص اقتصادی و تلفات سیستم برای

حالت‌های مختلف

حالت	هزینه بهره‌برداری شبکه (\$)	تلفات (p.u)	مقدار کلی مطلوبیت جواب (μ^k)
حالت ۱	4957.42 (0.97)	0.073 (0.74)	0.912
حالت ۲	5506.37 (0.71)	0.114 (0.2)	0.582
حالت ۳	4901.66 (1)	0.095 (0.44)	0.86
حالت ۴	5163.48 (0.918)	0.043 (0.83)	0.896



شکل (۷): منحنی همگرایی الگوریتم PSO

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه خودروهای برقی در شبکه توزیع پرداخته شد. هدف مسئله، تعیین محل بهینه و ظرفیت شارژ و دشارژ خودروهای برقی در شبکه توزیع و با هدف کمینه‌کردن هزینه بهره‌برداری شبکه و همچنین کمینه‌کردن تلفات توان اکتیو در شبکه است. از روش چندهدفه مقید-E برای حل مسئله چندهدفه پیشنهادی استفاده می‌شود. الگوریتم PSO، ابزار بهینه‌سازی برای حل زیرمسائل تک‌هدفه به‌دست‌آمده از روش مقید-E به کار گرفته شده است. کارایی روش پیشنهادی چندهدفه برنامه‌ریزی خودروهای برقی در شبکه توزیع در مقابل روش تک‌هدفه تنها با در نظر گرفتن تابع هدف هزینه برنامه‌ریزی و همچنین در مقابل بهره‌برداری شبکه توزیع بدون حضور خودروهای برقی ارزیابی شده است. نتایج حاصل اثبات می‌کند حضور خودروهای برقی سبب بهبود شاخص‌های اقتصادی سیستم می‌شود. همچنین روش چندهدفه در مقابل روش تک‌هدفه اگرچه به هزینه بهره‌برداری بیشتری منتج می‌شود؛ اما تلفات را به

هزینه‌های کلی بهره‌برداری شبکه می‌شود و میزان تلفات سیستم را نیز کاهش می‌دهد.

۴-۲- روش چندهدفه در مقابل روش تک‌هدفه

از مقایسه نتایج حاصل از روش چندهدفه پیشنهادی (حالت ۱) با روش تک‌هدفه تنها با در نظر گرفتن تابع هدف هزینه برنامه‌ریزی (حالت ۳) در جدول (۲)، نتیجه می‌گیریم اگرچه مقدار هزینه بهره‌برداری شبکه در حالت ۳ نسبت به حالت ۱ تا حدودی بهبود یافته است، تلفات شبکه در حالت ۳ بسیار بیشتر از تلفات شبکه در حالت ۱ است. این به گونه‌ای است که مقدار کلی مطلوبیت جواب در حالت ۱ نسبت به حالت ۳، ۶/۰۴ درصد بهبود یافته است که این موضوع کارایی روش چندهدفه پیشنهادی نسبت به روش تک‌هدفه را نشان می‌دهد.

۴-۳- الگوریتم PSO در مقابل الگوریتم ژنتیک

از مقایسه نتایج حاصل از روش پیشنهادی برنامه‌ریزی توسعه خودروهای برقی در شبکه مبتنی بر الگوریتم PSO (حالت ۱) با مبتنی بر الگوریتم ژنتیک (حالت ۴) در جدول (۲)، نتیجه می‌گیریم روش مبتنی بر الگوریتم PSO در مقایسه با الگوریتم ژنتیک، جواب‌های بهینه‌تری داده است. این به گونه‌ای است که مقدار کلی مطلوبیت جواب در حالت ۱ نسبت به حالت ۴، ۱/۷۸ درصد بهبود یافته است. درحقیقت روش مبتنی بر الگوریتم ژنتیک به تعداد ۱۴ جواب بهینه پرتو ختم می‌شود که در مقایسه با روش مبتنی بر الگوریتم ژنتیک (۱۷ جواب بهینه پرتو) کاهش داشته است که این مسئله نیز کارایی بیشتر روش مبتنی بر الگوریتم PSO در مقایسه با روش مبتنی بر الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد. منحنی همگرایی الگوریتم PSO در شکل ۷ نمایش داده شده است. این منحنی بهبود مقدار تابع هدف را در طول تکرارهای الگوریتم نشان می‌دهد.

مراجع

- [1] K. Clement-Nyns, E. Haesen, J. Driesen, "The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 25, No. 1, pp. 371-380, Feb. 2010.
- [2] T.U. Diam, X. Wang, et al, "Technology roadmap for smart electric vehicle-to-grid (V2G) of residential chargers", Journal of Innovation and Entrepreneurship, Vol. 5, No. 15, pp. 1-13 Dec. 2016.
- [3] H. Falaghi, C. Singh, et al., "DG integrated multistage distribution system expansion planning", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 33, No. 8, pp. 1489-1497, Oct. 2011.
- [4] G. Fabbri, G. Tarquini, et al., "Impact of V2G/G2V Technologies on Distributed Generation Systems", 23rd IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Istanbul, Turkey, 1-4 June 2014.
- [5] Q. Gong, Y. Li, Z.R. Peng, "Trip-based optimal power management of plug-in hybrid electric vehicles", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 57, No. 6, pp. 3393-3401, Nov. 2008.
- [6] C. Guille, G. Gross, "A conceptual framework for the vehicle-to-grid (V2G) implementation", Energy Policy, Vol. 37, No. 11, pp. 4379-4390, Nov. 2009.
- [7] S. Haffner, L. Fernando, et al., "Multistage model for distribution expansion planning with distributed generation-part I: problem formulation", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 2, pp. 915 - 923, Apr. 2008.
- [8] Z. Liu, F. Wen, G. Ledwich, "Optimal planning of electric-vehicle charging stations in distribution systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 28, No. 1, pp. 102 - 110, Jan. 2013.
- [9] B. Lunz, H. Walz, D.U. Sauer, "Optimizing vehicle-to-grid charging strategies using genetic algorithms under the consideration of battery aging", Vehicle Power and Propulsion IEEE Conference (VPPC), Chicago, IL, USA, 6-9 Sep. 2011.
- [10] O. Hafez, K. Bhattacharya, "Integrating EV charging stations as smart loads for demand response provisions in Distribution Systems", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 9, No. 2, pp. 1096-1106, 2018.
- [11] D.F. Recalde Melo, A. Trippe, H.B. Gooi, T. Massier, "Robust electric vehicle aggregation for ancillary service provision considering battery aging", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 9, No. 3, pp. 1728-1738, 2018.
- [12] S. Guner, A. Ozdemir, "Stochastic energy storage capacity model of EV parking lots", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 11, No. 7, pp. 1754 - 1761, 2017.
- [13] M. Rabie, "Performance of hybrid MSE/Soil Nail walls using numerical analysis and limit equilibrium approaches, HBRC Journal, Vol. 12, No. 1, pp. 63-70, Apr. 2016.
- [14] K. Thirugnanam, H. Saini, P. Kumar, "Mathematical modeling of li-ion battery for

شدت کاهش می‌دهد و در نتیجه، به جوابی با مطلوبیت بیشتر ختم می‌شود.

تعریف پارامترها

پارامتر	تعریف
S	توان
V_i	ولتاژ باس
P_{Loss}	تلفات
USN	شبکه بالادست
N_T	تعداد ساعت
N_L	تعداد خطوط
R_L	مقاومت خط
I_L	جریان خط
P_{USN}	توان دریافتی از شبکه بالادست
ρ_{USN}	قیمت برق شبکه بالادست
N_{CAR}	تعداد خودروهای برقی
P_j^{CAR}	توان خودروهای برقی
ρ_j^{CAR}	هزینه سرمایه‌گذاری خودروهای برقی
$P_j^{CAR,max}$	ظرفیت خودروهای برقی
P_{USN}^{max}	ماکزیم توان دریافتی از شبکه بالادست
P_D	بار کل مصرفی شبکه
$V_{i min}$	مینیمم ولتاژ باس
$V_{i max}$	ماکزیمم ولتاژ باس
S_L	فلوی عبوری خط
$S_{L,max}$	ظرفیت خط
S_i^{Post}	ظرفیت پست یا ایستگاه شارژ
$S_i^{max,Post}$	ماکزیمم ظرفیت پست یا ایستگاه شارژ
$f_p(x)$	تابع هدف p ام
P	تعداد توابع هدف
$Min(F_p)$	مینیمم تابع هدف
$Max(F_p)$	ماکزیمم تابع هدف
μ_p^k	درجه مطلوبیت هر تابع هدف هر جواب بهینه پرتو
M	تعداد جواب‌های بهینه پرتو
ω_p	ضریب وزنی هر تابع هدف
μ^k	درجه مطلوبیت کلی هر جواب بهینه پرتو

- energy and reserves auctions ensuring power system security”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, No. 4, pp. 1841-1854, Nov. 2009.
- [17] R. Ranjan, B. Vekatesh, D. Das, “A new algorithm for power distribution system planning,” Electric Power Systems Research, Vol. 62, no. 1, pp. 55-65, 2002.
- charge/discharge rate and capacity fading characteristics using genetic algorithm approach”, Transportation Electrification IEEE Conference and Expo (ITEC), Dearborn, MI, USA, 18-20 Jun. 2012.
- [15] V. Chankong, Y. Haimes. Multiobjective decision making theory and methodology. New York: Dover, 1983.
- [16] N. Amjady, J. Aghaei, H.A. Shayanfar, “Stochastic multiobjective market clearing of joint

¹ Electric vehicles

² Central integrated distributed charging

³ Robust

⁴ Demand Responsive

⁵ Vehicle to grid

⁶ ϵ -constraint method

⁷ Fuzzy decision maker

⁸ Particle Swarm Optimization

Archive of SID