تعیین زمان شارژ خودروهای الکتریکی با احتساب نقش آن‌ها در خودترمیمی شبکه هوشمند

مهدی حبیبی دوست[1] ، دانشجوی دکتری، سید محمد تقی بطحائی[2]، دانشیار
۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی- تهران- ایران
m.habibidoost@gmail.com –
۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی- تهران- ایران
bathaee@kntu.ac.ir –

چکیده: تداوم برق رسانی بارهای مهم یکی از مهم‌ترین رویکردهای توانایی خودترمیمی یک شبکه هوشمند است. استفاده از خودروهای برقی به این منظور می‌تواند چالش برانگیز باشد. از طرفی مطلوب است که باتری خودروهای برقی به محض دسترسی به شبکه شارژ شود تا در مواقع اضطراری شارژ بیشتری داشته باشند؛ اما این روش می‌تواند منحنی بار را خراب کند، و مشکلات دیگری را در پی داشته باشد. لذا یک تابع هدف تعریف شده است تا زمان شارژ خودروهای برقی در یک شبکه هوشمند را با دو هدف مشخص کند: حداکثر سازی انرژی ذخیره شده در باتری خودرو برقی، حداقل سازی انحراف معیار منحنی بار شبکه با احتساب بار شارژ خودروها. در این مقاله نامعینی در زمان عزیمت و زمان رسیدن و مقدار سطح شارژ در زمان رسیدن در رفتار خودروهای برقی در نظر گرفته شده است. برای کاهش تعداد متغیرهای تابع بهینه سازی در شرایط نفوذ بالای خودروهای الکتریکی، با کمک روش‌های آماری خودروها دسته بندی شده‌اند. روش بهینه‌سازی تابع هدف بر اساس الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی است. شبیه‌سازی بر روی شبکه استاندارد IEEE ۳۷ باس توسط الگوریتم ذکر شده و الگوریتم ژنتیک اجرا شده و نتایج آن با یکدیگر مقایسه شده است و موفقیت الگوریتم پیشنهاد شده را تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: شارژ هماهنگ، خودروی الکتریکی، شبکه هوشمند، خودترمیمی، الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۵/۱۲/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۶/۰۲/۳۱

نام نویسنده‌ی مسئول : مهدی حبیبی دوست

نشانی نویسنده‌ی مسئول : تهران – خیابان شریعتی – سید خندان – دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی – آزمایشگاه بررسی سیستم های قدرت

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.10.7]

۱. مقدمه

آلودگی محیط زیست و نیاز به کاهش مصرف سوخت باعث شده است تا تمایل به خودروهای الکتریکی آن قدر زیاد شود که هم اکنون به تولید انبوه رسیده‌اند. اما آن‌ها برای شارژ باتری‌های خود، بار زیادی حتی بیشتر از بار یک منزل مسکونی را می‌توانند به شبکه برق تحمیل کنند [۱]. به همین دلیل شارژ هماهنگ در هنگام افزایش نفوذ آن‌ها باید در نظر گرفته شود.

در سال‌های اخیر اتوماسیون سیستم‌های توزیع به طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته و تمرکز بیشتری بر روی قابلیت اطمینان سیستم‌های توزیع انجام شده است. خودترمیمی توانایی سیستم برای تشخیص و تعمیر سیستم در هنگام مواجهه با یک یا چند اتفاق تصادفی به صورت خودکار است. این خصوصیت در سیستم‌های هوشمند نقش مهمی دارد. عارفی‌فر و دیگران الگوریتمی را برای تقسیم کردن یک سیستم توزیع به چند ریزشبکه و جایابی بهینه منابع تولید پراکنده و منابع انرژی پراکنده و منابع انرژی راکتیو پراکنده در مرحله برنامه ریزی به منظور اهداف خودترمیمی پیشنهاد کرده‌اند [۲]. بازآرایی سیستم‌های توزیع، توان خروجی منابع تولید پراکنده و کاهش بار، سه عملیات خودترمیمی است که در حالت وقوع انواع خطاها به صورت بهینه انجام می‌شود. در [۳]، بازآرایی و کاهش بار روش‌های خودترمیمی هستند که به ترتیب در دو مرحله به کار گرفته شده‌اند.

یکی از راه کارهای خودترمیمی بهره بردن از انرژی ذخیره شده در باتری خودروهای الکتریکی است. معمولا مدت زمان تعمیر پس از وقوع یک خطا در شبکه توزیع بیشتر از چند ساعت نیست [۴]. هنگام قطعی برق، می‌توان بارهای مهم را با انرژی ذخیره شده در خودروهای الکتریکی برق‌دار کرد. محمدی حسین نژاد و دیگران الگوریتمی برای یافتن مکان و سایز پارکینگ خودروی برقی پیشنهاد کرده‌اند تا عملیات خودترمیمی را تقویت کند [۵]. این مقالات و مقالات مشابه اگرچه روش‌های مفیدی را پیشنهاد کرده‌اند، اما تا آنجا که نویسندگان جستجو کرده‌اند، مقاله‌ای به منظور استفاده از خودروهای الکتریکی برای اهداف خودترمیمی در زمان بهره‌برداری پیدا نکرده‌اند.

در این مقاله ابتدا مسأله بهینه سازی زمان شارژ خودروها برای حداکثر کردن انرژی ذخیره شده در خودروها و حداقل کردن انحراف معیار منحنی بار روزانه شبکه با احتساب بار شارژ باتری خودروها توضیح داده شده است. سپس به منظور کاهش تعداد متغیرهای مسألهٔ بهینه سازی، خودروها با توجه به پارامترهای تابع چگالی احتمال متغیرهای تصادفی آن‌ها دسته‌بندی شده‌اند. در نهایت این مسأله به وسیلهٔ الگوریتم ژنتیک (GA) و الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی (AISA) به وسیله برنامه نویسی در محیط Octave حل شده است. روش پیشنهاد شده بر روی یک سیستم توزیع نمونه اعمال شده است و نتایج شبیه سازی به وسیله دو الگوریتم با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

۲. مدلسازی مسأله

در این بخش، به توضیح مدلسازی مسأله، فرض‌های در نظر گرفته شده و روش حل پرداخته می‌شود.

۲-۱- اهداف مسأله

یکی از مهم‌ترین شاخص‌های قابلیت اطمینان، انرژی تأمین نشده است که از رابطه‌های (۱) و (۲) محاسبه می‌شود:

$$ENS = \sum_{i=1}^{n} L_i.U_i \qquad (۱)$$

$$U_i = \lambda_i.r_i \qquad (۲)$$

که در آن λ_i نرخ خرابی، r_i میانگین زمان لازم برای تعمیر و L_i میانگین بار در نقطه i-ام است. شاخص ENS به معنی مقدار انرژی است که به مشترکین فروخته نشده است. در یک شبکه مطلوب است که این شاخص حداقل شود و در این مقاله اثر خودروهای الکتریکی برای کمینه سازی این شاخص مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور لازم است تا زمانی که خودروها به شبکه متصل هستند، حداکثر انرژی در باتری آن‌ها ذخیره شده باشد تا در مواقع اضطراری بتوان از آن انرژی استفاده کرد. انرژی ذخیره شده در باتری‌ها را می‌توان از رابطه (۳) محاسبه کرد:

$$E = \sum_{i=1}^{Nev} \sum_{j=1}^{24} C_i.SOC_{i,j} \qquad (۳)$$

که در آن E مجموع انرژی ذخیره شده در باتری‌ها در هر ساعت است، Nev تعداد خودروهای الکتریکی، Ci ظرفیت باتری خودروی i-ام و $SOCi,j$ سطح شارژ باتری خودروی i-ام در ساعت j-ام است.

از آنجا که می‌خواهیم تابع هدفی تعریف شود که آن را کمینه کنیم، به جای استفاده از بیشینه کردن E، مقدار معکوس انرژی ضرب در صد برابر تعداد خودروهای الکتریکی استفاده شده است تا مقدار تابع هدف دوم با مقدار تابع هدف اول قابل مقایسه باشد. مقدار تابع هدف دوم از رابطهٔ (۵) به دست می‌آید.

$$f_1 = \frac{Nev \times 100}{E} \qquad (۵)$$

به منظور جلوگیری از خراب شدن منحنی بار شبکه و مشکلات ناشی از آن، انحراف معیار بارهای شبکه شامل بار شارژ کردن خودروها و دیگر بارها به عنوان تابع هدف دیگر تعریف شده است.

$$f_2 = SD(L) \qquad (۴)$$

که در آن L آرایه‌ای شامل بارهای شبکه در ساعات مختلف است. هر چه انحراف معیار کمتر باشد، منحنی بار صاف‌تر است.

تابع هدف نهایی یک مدل ریاضی چند هدفه با دو هدف بالا است که در رابطه (۶) آمده است و باید این تابع کمینه شود.

$$f_t = w_1.f_1 + w_2.f_2 \qquad (۶)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.10.7]

که در آن w_i وزن مربوط به هر تابع هدف است و توسط اپراتور شبکه هوشمند مشخص می‌شود. در صورتی که در یک شبکه تعداد خودروها به منظور خود-ترمیمی کم باشد باشد و یا این که بارهای مهم مقدار زیادی داشته باشند، وزن تابع هدف انرژی بیشتر و وزن تابع هدف انحراف معیار کمتر در نظر گرفته می شود. اما اگر تعداد خودروهای برقی زیاد و یا بارهای مهم کم باشند و یا این که تخریب منحنی بار از اهمیت بیشتری برخوردار باشد، در نتیجه وزن تابع هدف انرژی باید کمتر و وزن تابع هدف انحراف معیار بیشتر در نظر گرفته شود.

۲-۲- دسته بندی خودروها

اگر تعداد خودروهای برقی خیلی کم باشد، نیازی به بهینه سازی نیست و اگر به منظور خود-ترمیمی هم به کار روند، می‌توانند در زمانی که دسترسی به شبکه پیدا می‌کنند شروع به شارژ کنند تا زمانی که پر شوند. اما اگر تعداد آن‌ها قابل توجه باشد، برای جلوگیری از آثار نامطلوبی که چنین روش شارژی در شبکه پدید می‌آورد، لازم است تا بهینه سازی زمان شارژ انجام پذیرد. در صورتی که تعداد خودروهای الکتریکی خیلی زیاد باشد و نفوذ آنها در شبکه بالا باشد، مسأله ذکر شده دارای تعداد متغیرهای زیادی خواهد شد، زیرا زمان شارژ هر خودرو را در مدتی که به شبکه دسترسی دارد، باید مشخص کند. برای این که در این شرایط حل مسأله امکان پذیر باشد لازم است تا تعداد متغیرها کاهش پیدا کند.

برای دسته بندی خودروها از زمان ورود و خروج میانگین آن‌ها می‌توان استفاده کرد. حداکثر تعداد دسته‌ها با در نظر گرفتن بازه زمانی یک ساعت، برابر ۲۴×۲۴=۵۷۶ دسته است. اما با توجه به این که زمان ورود به پارکینگ شارژ برای اکثر خودروهای برقی بین ساعت ۶ تا ۱۱ صبح و زمان خروج بین ساعت ۱۴ تا ۲۰ بعد از ظهر است، تعداد دسته‌ها برابر ۶×۷=۴۲ خواهد شد.

زمان ورود و خروج هر دسته برابر میانگین زمان ورود و خروج خودروهای آن دسته است. هم چنین ظرفیت باتری‌های هر دسته برابر مجموع ظرفیت باتری‌های خودروهای آن دسته است و سطح شارژ در زمان ورود دسته نیز از رابطه (۷) به دست می‌آید. میانگین و واریانس متغیرهای تصادفی ذکر شده نیز برای هر دسته بر اساس معادلات آماری محاسبه می‌شود.

$$SOC = \frac{\sum_{i=1}^{N} C_i . SOC_i}{\sum_{i=1}^{N} C_i} \qquad (۷)$$

پس از این که تعداد دسته‌ها و مشخصات و توابع توزیع احتمالاتی هر دسته مشخص شد، مسأله بهینه سازی طبق بخش بعدی برای روز بعد حل شده و زمان شارژ هر دسته مشخص می‌شود و به آن‌ها اعلام می‌شود.

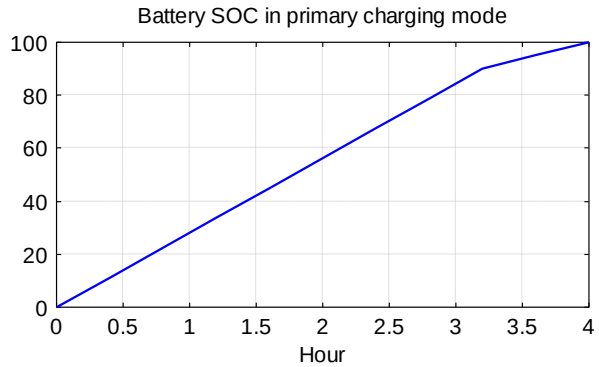
۲-۳- تخمین سطح شارژ

تخمین سطح شارژ باتری خودروهای الکتریکی در هنگام اتصال به شبکه در ساعت‌های مختلف بستگی چندین عامل دارد: سطح شارژ باتری اولیه در هنگام اتصال به شبکه، شروع زمان شارژ و نوع شارژ. سطح شارژ اولیه به سیکل رانندگی و سطح شارژ در هنگام جدا شدن از شبکه دارد. زمان شروع شارژ طبعاً پس از زمان رسیدن است. فرضی ساده‌سازی که با توجه به زیرساخت شبکه هوشمند در نظر گرفته شده، این است که مالکان خودروهای قابل اتصال به شبکه خودروی خود را در هنگام رسیدن به شبکه متصل می‌کنند، اما زمانی که شبکه هوشمند به آن اجازه دهد، شارژ شدن شروع می‌شود و تا زمانی که به طور کامل شارژ شوند، ادامه می‌یابد.

سه نوع استاندارد برای شارژ باتری خودروهای الکتریکی وجود دارد: سطح ۱، سطح ۲ و شارژ جریان مستقیم سریع. خصوصیات این سه نوع در جدول ۱ آمده است. در این مقاله بر روی سطح شارژ ۲ تمرکز شده است و فرض شده که مالکان خودرو از این نوع شارژ استفاده می‌کنند، زیرا شارژ خودروها در ایستگاه شارژ در نظر گرفته شده است. سطح شارژ باتری در مدت زمان شارژ شدن بر اساس شکل ۱ می‌تواند تخمین زده شود [۶].

جدول ۱: مشخصات انواع شارژ استاندارد

	سطح ۱	سطح ۲	شارژ جریان مستقیم سریع
ولتاژ	۱۲۰ ولت متناوب	۲۰۸/۲۴۰ ولت متناوب	تا ۵۰۰ ولت مستقیم
توان خروجی نوعی	۱.۴kW	۷.۲/۳.۶kW	۵۰kW
حداکثر توان خروجی	۱.۹kW	۱۹.۲kW	۵۰kW



شکل ۱: سطح شارژ باتری لیتیومی هنگام شارژ شدن با سطح ۲

۲-۴- الگوریتم پیشنهاد شده

معماری فرض شده شبکه هوشمند به این شکل است که اپراتور سیستم قدرت با استفاده از وسایل و ابزار اندازه‌گیری و زیر ساخت شبکه هوشمند، می‌تواند شبکه توزیع را آنالیز و رصد کند. با توجه به زیرساخت و ساختار شبکه هوشمند توزیع، اپراتور می‌تواند توابع هدف

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.10.7]

متفاوتی را تعریف کند و آن را توسط عملیات گوناگونی بهینه کند. عملیات گوناگون شامل بازآرایی، مدیریت و کنترل بارهای پاسخگو به صورت کنترل مستقیم بار یا کنترل بار بر اساس قیمت اعلام شده به آن، و همچنین کنترل تولید توان اکتیو و راکتیو مولدهای پراکنده است. برای استفادهٔ بهینه از خودروهای برقی متصل به شبکه به عنوان سیستم ذخیره انرژی برای برق دار کردن بارهای ضروری در هنگام قطعی برق نیز شبکه هوشمند می‌تواند زمان شارژ را به گونه‌ای مشخص کند که انرژی لازم هنگام قطعی در آن‌ها وجود داشته باشد.

در شکل ۲ فلوچارت الگوریتم پیشنهادی را مشاهده می‌کنید. در شبکه هوشمند، داده‌های بارها و خودروهای برقی در اتاق کنترل قابل مشاهده است. اگر خطایی رخ دهد، فیدر مرتبط با آن قطع خواهد شد و اپراتور آن را ملاحظه می‌کند و با کمک خودروهای برقی بارهای مهم را می‌تواند برق‌دار کند.

۲-۴-۱- روش حل مسأله

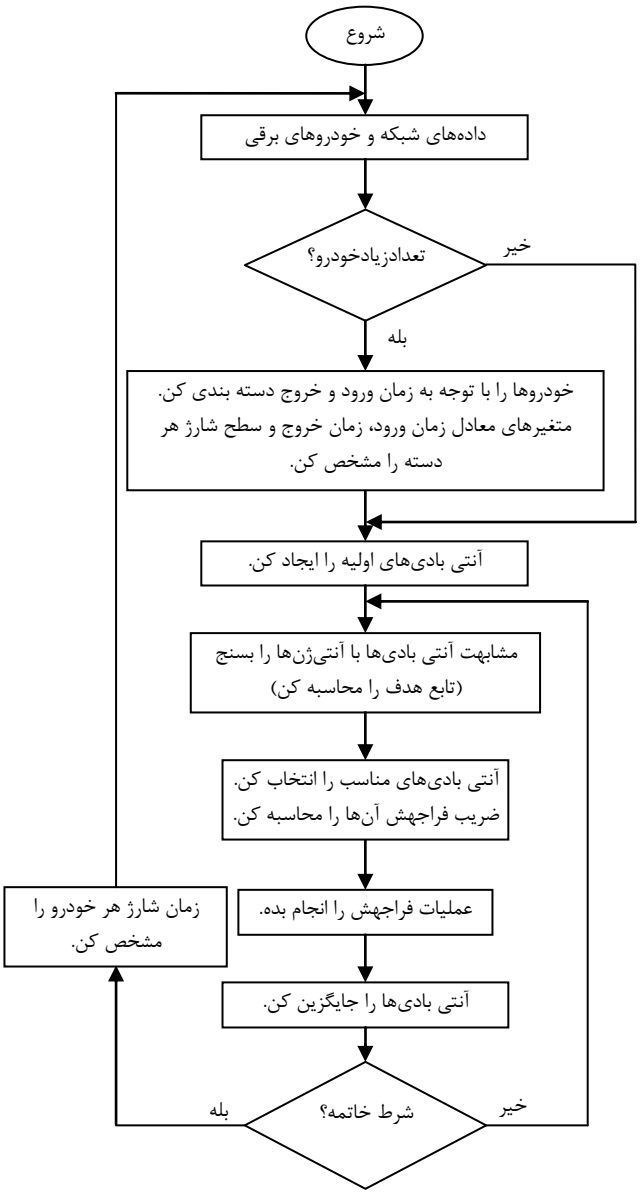
سیستم ایمنی بدن سیستمی هوشمند است که بدن را در مقابل هجوم آنتی ژن‌ها، یعنی سموم و مواد خارجی محافظت می‌کند. هنگامی که یک آنتی‌ژن وارد بدن می‌شود، سیستم ایمنی تحریک می‌شود تا آنتی بادی مناسب را تولید کند تا در مقابل آن دفاع کند. تولید آنتی بادی مناسب روندی هوشمندانه است که به طوری بهینه شده است که با آنتی ژن تطابق داشته باشد. الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی یک الگوریتم بهینه سازی است که بر اساس مدلسازی ریاضی تولید آنتی بادی مناسب پیشنهاد شده است. اگرچه این الگوریتم مشابهت‌هایی با الگوریتم ژنتیک دارد، به نظر می‌رسد که نقطه بهینه کلی را بهتر می‌تواند پیدا کند.

فراجهش و تصحیح گیرنده دو خاصیت قابل توجه در سیستم ایمنی هستند. آن‌ها با استفاده از خاصیت حافظهٔ این الگوریتم، در تکامل آنتی بادی‌های جدید که دارای میل ترکیبی بیشتری از آنتی بادی‌های قبلی با آنتی ژن‌ها هستند کمک می‌کنند. فراجهش شبیه به عملگر جهش در الگوریتم ژنتیک است، از آن رو که هر دو تغییرات تصادفی را برای متنوع ساختن فضای جستجو معرفی می‌کنند. اما تفاوت آن‌ها در نرخ تعدیل نهفته است که بستگی به میل ترکیبی آنتی‌ژنی دارد.

به طور کلی آنتی‌بادی‌های دارای میل ترکیبی پایین با آنتی‌ژن در یک نرخ بیشتر در مقایسه با آنتی‌بادی‌های دارای میل ترکیبی بالا با آنتی‌ژن، فراجهش پیدا می‌کنند. این پدیده به عنوان تصحیح گیرنده شناخته می‌شود و فراجهش را اداره می‌کند. این عملگر طبق رابطهٔ (۱۲) بیان می‌شود.

$$X = X + (\beta.e^{-f^*}).N(0,1) \qquad (۱۲)$$

که در آن X مقدار حقیقی متغیرهای یک آنتی بادی، β یک ضریب ثابت برای قدم جهش است که معمولا بین صفر و یک انتخاب می‌شود، f^* مقدار نرمال شده‌ی f (مقدار شایستگی آنتی بادی‌ها) است، و $N(0,1)$ مقداری تصادفی است که از تابع چگالی احتمال نرمال با میانگین صفر و انحراف استاندارد ۱ پیروی می‌کند. مقدار f^* از رابطهٔ (۱۳) به دست می‌آید.



شکل ۲: الگوریتم پیشنهاد شده برای مشخص کردن زمان شارژ خودروهای برقی

$$f^* = \frac{f - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \qquad (۱۳)$$

که در آن f_{max} و f_{min} به ترتیب مقدار بیشینه و کمینه‌ی شایستگی در این نسل است. در واقع با این نرمال سازی به هر آنتی بادی یک شایستگی نسبت می‌دهیم که بین صفر و یک می‌تواند تغییر کند. این شایستگی نرمال شده برای آنتی بادی‌هایی که کمترین شایستگی را دارند برابر صفر و برای آن‌ها که بیشترین شایستگی را دارند برابر یک خواهد شد. همان طور که از (۱۲) دیده می‌شود هر چه

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.10.7]

شایستگی آنتی بادی بیشتر باشد، قدم جهش برای آن کمتر خواهد بود.

۲-۴-۲- معیار پایان الگوریتم پیشنهادی

به طور کلی معیار خاص و معینی جهت پایان یک برنامه بهینه سازی با استفاده از این الگوریتم پیشنهادی وجود ندارد. بنا به تشخیص اپراتور معیار اتمام الگوریتم می‌تواند زمان اجرای برنامه، تعداد تکرار الگوریتم یا حداکثر مقدار تابع هدف انتخاب شود. معیار زمان یعنی با گذشت مدت زمان مشخصی از انجام این الگوریتم، برنامه خاتمه یابد. در مورد این معیار باید توجه کرد که اگر مدت زمان کمی در نظر گرفته شود ممکن است پیش از رسیدن به جواب مطلوب، به نقطه پایان الگوریتم برسیم. در معیار حداکثر مقدار، هنگامی که پاسخی پیدا شود که مقدار تابع هدف محاسبه شده برای آن کمتر از مقدار مشخص شده باشد، برنامه خاتمه می‌یابد. در این مقاله از هر دو معیار تعداد تکرار حلقه بهینه سازی و حداکثر مقدار تابع هدف استفاده کردیم.

۳. شبیه سازی

تابع هدف توضیح داده شده برای شبکه استاندارد ۳۷ باسه IEEE [۷] تعریف شده و توسط الگوریتم ژنتیک و الگوریتم سیستم ایمنی بدن اجرا شده و نتایج مقایسه شده‌اند. این شبکه دارای ۳۵ باس ۴.۸ کیلوولت، یک باس ۲۳۰ کیلوولت و یک باس ۰.۴۸ کیلوولت است. مقدار توان اکتیو و راکتیو بارهای سیستم به ترتیب ۲۴۵۷ کیلووات و ۳۰ کیلووار است.

برای شبیه سازی خودروهای الکتریکی در شبکه، فرض کردیم ۱۰۰۰ خودرو به صورت تصادفی در ۳ پارکینگ پخش شده است. محل پارکینگ‌ها در شبکه مشابه مرجع [۸] در نظر گرفته شده است. ظرفیت باتری هر خودرو نیز به صورت تصادفی از بین سه نوع باتری لیتیوم-یون ۱۲ و ۱۶ و ۲۴ کیلووات انتخاب شده است. مقادیر پارامترهای تابع توزیع مربوط به متغیرهای مختلف خودرو از توابع توزیع ذکر شده در جدول ۲ انتخاب شده‌اند.

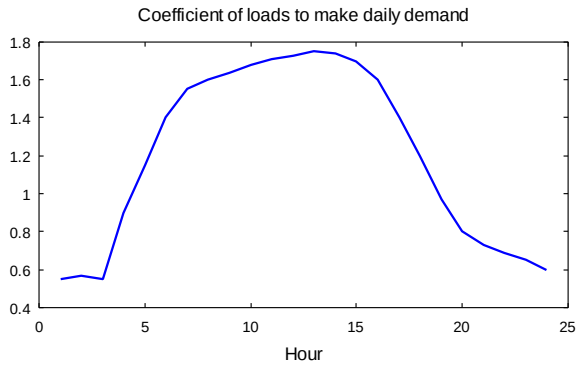
جدول ۲: تابع توزیع مقادیر انتخاب شده برای پارامترهای تابع توزیع مربوط به متغیرهای مختلف خودرو

	میانگین	انحراف استاندارد
زمان رسیدن	N(8.5,0.5)	N(0.5,0.1)
سطح شارژ هنگام رسیدن	N(0.5,0.1)	N(0.05,0.02)
زمان رفتن	N(17,1)	N(1,0.5)

برای شبیه سازی یک روز نوعی، نمونه‌های زمان رسیدن، سطح شارژ هنگام رسیدن، و زمان رفتن بر اساس رفتار هر خودروی الکتریکی انتخاب شده است.

همان طور که گفته شد، زمان شارژ پس از زمان رسیدن در هنگامی که شبکه هوشمند اجازه دهد شروع می‌شود. افزایش سطح شارژ در هنگام شارژ شدن ۲۲٪ به ازای هر ساعت تا زمان شارژ کامل در نظر گرفته شده است. این فرض با توجه به شکل ۲ معقول است در حالتی که سطح شارژ از ۹۰٪ بیشتر نباشد.

برای مطالعه بر روی تقاضای بار روزانه، فرض شده است که بار روزانه شبکه به جز بار شارژ خودروهای الکتریکی در ضریبی ضرب می‌شوند تا در هر ساعت بار مشخص شود. ضریب هر ساعت در شکل ۳ نشان داده شده است. ساعت پیک در این شکل ساعت ۱۴ است و پس از ساعت ۱۵ مقدار بار رو به کاهش می‌گذارد.



شکل ۳: ضریب بار شبکه (به جز بار شارژ خودروها) در ساعات مختلف

تابع هدف پیشنهاد شده توسط الگوریتم ژنتیک و الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی بهینه شده است. این دو الگوریتم به دلیل مشابهت در چندین جنبه انتخاب شده‌اند. تعداد تکرار در هر دو الگوریتم ۵۰ در نظر گرفته شده است. تعداد جمعیت ژن‌ها در الگوریتم ژنتیک و تعداد جمعیت آنتی بادی‌ها در الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی یکسان و برابر ۵۰ انتخاب شده است.

بهترین پاسخ‌های به دست آمده توسط الگوریتم ژنتیک و الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی به ترتیب در شکل ۴ (a) و (b) نشان داده شده است. این شکل‌ها توزیع ساعتی بار شبکه در باس‌های مختلف در ساعات شبانه روز را نشان می‌دهد.

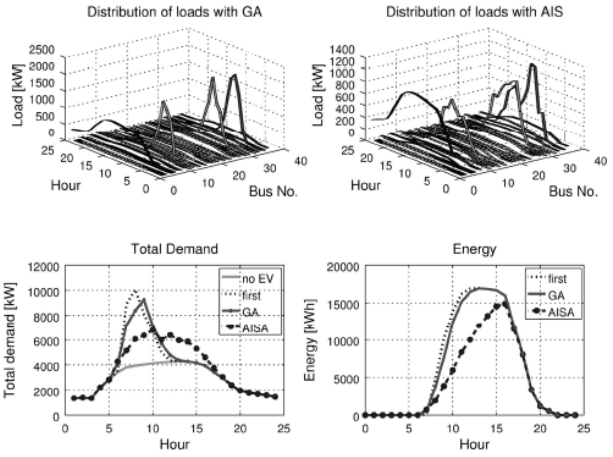
شکل ۴ (c) منحنی بار را در چهار حالت نشان می‌دهد: بدون حضور خودرو، بدون بهینه سازی، بهینه سازی شده توسط الگوریتم ژنتیک و بهینه سازی شده توسط الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی. از آنجا که خودروها اکثراً بین ساعات ۶ تا ۲۰ در پارکینگ حضور دارند و در همین زمان هم باید شارژ شوند، و از طرف دیگر پیک بار شبکه نیز حدود ساعت ۱۵ است، لذا در هر صورت پیک بار شبکه با در نظر گرفتن بار شارژ افزایش می‌یابد. با این حال، مزیت بهینه سازی با الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی نسبت به حالت بدون بهینه سازی یا بهینه سازی توسط الگوریتم ژنتیک در آن است که بار شارژ به صورت تقریباً یکنواخت در این مدت پخش شده است و مسطح کردن منحنی بار به صورت بیشتری دیده می‌شود. توجه به بازهٔ اعداد محور عمودی که محور بار است در شکل ۴ (a) و (b) نیز این نکته را نشان می‌دهد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.10.7]

با توجه به شکل ۴ (c)، پیک بار با کمک بهینه سازی توسط الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی نسبت به حالت بدون بهینه سازی ۳۰٪ بهبود پیدا کرده است و نسبت به حالت بهینه سازی با الگوریتم ژنتیک ۲۲٪ بهتر شده است. در نتیجه بهینه سازی با کمک الگوریتم ایمنی مصنوعی باعث شده است تا منحنی بار نسبت به حالت‌های بدون بهینه سازی و یا با کمک الگوریتم ژنتیک بسیار بهتر باشد.

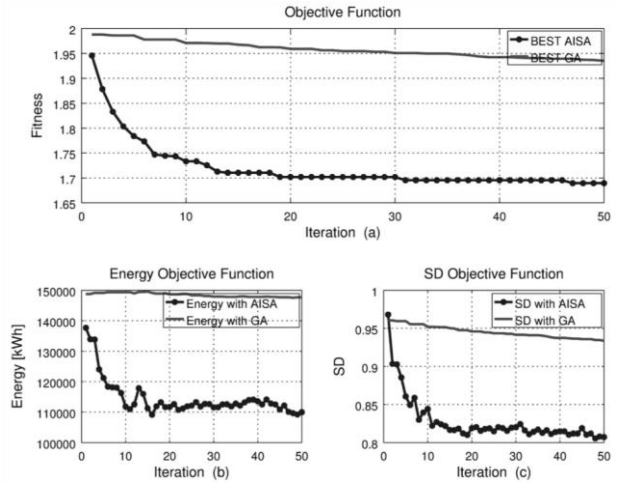
انرژی ذخیره شده در خودروهای متصل به شبکه در سه حالت نیز در شکل ۴ (d) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که انرژی ذخیره شده توسط الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی از دو حالت دیگر کمتر است. دلیل آن این است که در ساعات دیرتری اقدام به شارژ خودروها شده است. این نشان می‌دهد که در صورت قطعی برق بین ساعات ۷ تا ۱۶، انرژی کمتری در اختیار است تا بتوان از آن به منظور خودترمیمی استفاده کرد، در عوض منحنی بار پیک خیلی کمتری نسبت به دو حالت دیگر دارد.



شکل ۴: (a) توزیع بار شبکه با GA، (b) توزیع بار شبکه با AISA، (c) منحنی بار شبکه در حالت‌های: بدون خودرو، بدون بهینه سازی، بهینه سازی با GA، بهینه سازی با AISA، (d) انرژی ذخیره شده در باتری‌ها در حالت‌های: بدون بهینه سازی، بهینه سازی با GA، بهینه سازی با AISA

شکل ۵ تغییرات متغیرهای توابع هدف در تکرارهای مختلف را نشان می‌دهند. همان طور که ذکر شد، دو تابع هدف تعریف شده است: حداکثر کردن انرژی برای کاهش انرژی تأمین نشده و حداقل کردن انحراف معیار بار. تابع هدف کلی مجموع وزن دار انحراف معیار بار کل روزانه و صد برابر تعداد خودروها تقسیم بر مجموع انرژی ذخیره شده در باتری‌ها در مدت اتصال به شبکه تعریف شده است. مقدار معکوس انرژی از آنجا استفاده شد که با حداقل کردن آن، مقدار انرژی ذخیره شده حداکثر شود. در اینجا مقدار وزن اختصاص داده شده به هر دو تابع هدف برابر در نظر گرفته شده است.

شکل ۵ (a) مقدار تابع هدف کلی را نشان می دهد و شکل ۵ (b) و (c) به ترتیب توابع هدف انرژی و انحراف استاندارد را با دو الگوریتم نشان می‌دهند. با توجه به رفتار مشابه دیده شده در دو شکل ۵ (b) و (c) مشخص است که هر چه مقدار انرژی بیشتر باشد، انحراف معیار بار نیز بیشتر خواهد شد. در شکل ۵ (c) دیده می‌شود که مقدار انحراف معیار با هر دو الگوریتم کم می‌شود. این به معنی این است که تابع هدف تعریف شده برای انحراف استاندارد از اهمیت بیشتری نسبت به تابع هدف دیگر برخوردار است. البته با مشخص اهمیت کردن دو تابع هدف در شبکه‌ها و وضعیت‌های مختلف می‌توان وزن‌های اختصاص داده شده آن‌ها را تغییر داد.



شکل ۵: (a) تغییرات تابع هدف کلی با دو الگوریتم، (b) تغییرات تابع هدف انرژی با دو الگوریتم، (c) تغییرات تابع هدف انحراف معیار بار با دو الگوریتم

تفسیر دیگری که از این موضوع می‌توان داشت این است که انرژی لازم برای شارژ باتری‌ها آن قدر زیاد است که باعث می‌شود میزان خراب شدن منحنی بار نسبت به انرژی ذخیره شده بیشتر باشد. لذا اگر تعداد خودروها را کمتر در نظر بگیریم، به حالت بدون بهینه سازی نزدیک خواهیم شد.

۴. نتیجه گیری

در این مقاله الگوریتم جدیدی برای شبکه هوشمند پیشنهاد شده تا زمان شارژ خودروهای الکتریکی را با توجه به حداقل کردن انرژی تأمین نشده و انحراف معیار منحنی بار روزانه، به صورت بهتری مدیریت و کنترل کند. این الگوریتم رفتار احتمالاتی هر خودروی الکتریکی شامل زمان رسیدن، زمان رفتن و سطح شارژ در هنگام رسیدن را در نظر می‌گیرد. در صورتی که تعداد خودروها زیاد باشد، با روش‌های آماری تعداد متغیرها کم شده است تا زمان اجرای الگوریتم خیلی زیاد نباشد. بهینه سازی انجام شده بر اساس الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی است که از سیستم ایمنی بدن الگو گرفته شده است. شبیه سازی بر روی شبکه توزیع شعاعی استاندارد IEEE دارای ۳۷ باس با الگوریتم پیشنهاد شده و الگوریتم ژنتیک اجرا شده است. نتایج

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.10.7]

با یکدیگر مقایسه شده‌اند و نشان می‌دهند که الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی مقدار پیک بار را نسبت به حالت بدون بهینه سازی حدود ۳۰٪ و نسبت به الگوریتم ژنتیک ۲۲٪ کاهش داده است.

۵. مراجع

[1] Rong-Ceng Leou, Jen-Hao Teng, and Chun-Lien Su. Modelling and verifying the load behaviour of electric vehicle charging stations based on field measurements. *IET Generation, Transmission & Distribution* 2015; 9 (11): 1112–1119.

[2] Seyed Ali Arefifar, Yasser Abdel-Rady I. Mohamed, and Tarek H. M. EL-Fouly, "*Comprehensive Operational Planning Framework for Self-Healing Control Actions in Smart Distribution Grids*", IEEE Transactions on Power Systems, 28, (4), pp. 4192-4200, 2013.

[3] Patricia L. Cavalcante, Juan Camilo López, John F. Franco, Marcos J. Rider, Ariovaldo V. Garcia, Marcos R. R. Malveira, Luana L. Martins, and Luiz Carlos M. Direito,"*Centralized Self-Healing Scheme for Electrical Distribution Systems*",IEEE Transactions On Smart Grid, VOL. 7, NO. 1, pp 145-155, JANUARY 2016.

[4] M. Eriksson, M. Armendariz, O. Vasilenko, A. Saleem, and L. Nordström, "*Multi-Agent Based Distribution Automation Solution for Self-Healing Grids*", IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 62, No. 4, pp. 2620-2628, 2015.

[5] S. Mohammadi-Hosseininejad, A. Fereidunian, A. Shahsavari and H. Lesani, "A Healer Reinforcement Approach to Self-healing in Smart Grid by PHEVs Parking Lot Allocation", IEEE Transactions on Industrial Informatics, pp. 1-1, 2016.

[6] Qian, K.; Zhou, C.; Allan, M.; Yuan, Y. "Modeling of load demand due to EV battery charging in distribution systems." IEEE Transaction on Power Systems, 26, pp 802–810, 2011.

[7] Radial Test Feeders – IEEE Distribution System Analysis Subcommittee, [Online]. http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders.html

[8] Pang Chengzong, Papiya Dutta, Mladen Kezunovic. BEVs/PHEVs as dispersed energy storage for V2B uses in the smart grid. IEEE Transactions on Smart Grid 2012; 3 (1): 473-482.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.10.7]