

<https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223871.1403.15.58.9.0>

Research Article

Multi-Objective Optimization of Consumer's Profit and Distribution Transformer Aging Considering Electric Vehicles

**Hamidreza Allafiyeh, M.Sc., Hosein Mohammadnezhad Shourkaei, Assistant Professor,
Soleymani Morcheh Khorti, Professor**

Faculty of Mechanics, Electrical Power and Computer- Science and Research Branch, Islamic Azad University,
Tehran, Iran

hamidreza.allafieh@gmail.com, h-mohamadnejad@srbiau.ac.ir, s.soleymani@srbiau.ac.ir

Abstract

The development of electric vehicles (EVs) will increase power transmitted through the distribution grid. Such an effect leads to accelerated aging in grid equipment, including pole-top distribution transformers. In the form of preventive and corrective measures, it is possible to centrally manage the charging operations of a group of electric vehicles connected to a specific pole-top transformer (through the distribution system operator or an independent aggregator). This paper presents a centralized model to co-optimize transformer loss-of-life with benefits for charging and discharging management of consumers' electric vehicles. The proposed model is compared to the decentralized model, in which EV owners optimize their benefits without considering the damages to the transformers. The centralized and decentralized strategies were applied to a small local grid with a maximum number of 6 EVs connected to a local pole-top transformer and implemented and solved using GAMS software. The results show the benefits of the centralized strategy in balancing the grid assets, while consumers' arbitrage benefits are slightly reduced.

Keywords: aggregator, arbitrage, centralized strategy, decentralized strategy, electric vehicle, transformer

Received: 20 September 2022

Revised: 11 December 2022

Accepted: 17 January 2023

Corresponding Author: Dr. Hosein Mohammadnezhad Shourkaei

Citation: H. Allafiyeh, H. Mohammadnezhad-Shourkaei, S. Soleymani, "Multi-objective optimization of consumer's profit and distribution transformer aging considering electric vehicles", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 15, no. 58, pp. 121-142, September 2024 (in Persian).

<https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223871.1403.15.58.9.0>

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی چندهدفی استهلاک ترانسفورماتور توزیع و سود مصرف‌کننده با در نظر گرفتن خودروهای برقی

حمیدرضا علافیه، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، حسین محمدنژاد شورکائی، استادیار، سودابه سلیمانی مورچه خورتی، استاد

دانشکده مکانیک، برق و کامپیوتر - دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران
hamidreza.allafieh@gmail.com, h-mohamadnejad@srbiau.ac.ir, s.soleymani@srbiau.ac.ir

چکیده: ظهور خودروهای برقی منجر به افزایش توان انتقال یافته از طریق شبکه‌های توزیع برق شده است. استفاده از این خودروها با میزان نفوذ بالا، تاثیرات زیان‌باری بر دارایی‌های شبکه توزیع خواهد داشت. یکی از مهم‌ترین تاثیرات منفی، کاهش عمر سریع‌تر در تجهیزات شبکه از جمله ترانسفورماتورهای توزیع است. این مقاله در راستای حفظ عمر ترانسفورماتور، یک استراتژی مدیریت شارژ و دشارژ متمرکز را معرفی می‌کند. این استراتژی از طریق اپراتور سیستم توزیع و یا نهاد تجمیع‌کننده مستقل، اجرا می‌شود. مدل متمرکز در این مطالعه، کاهش عمر ترانسفورماتور و سود حاصل از مدیریت شارژ و دشارژ خودروهای برقی را به صورت همزمان بهینه‌سازی می‌کند. این استراتژی در ازای کاهش مختصر از سود خرید و فروش انرژی (معامله‌گری) مصرف‌کننده‌ها، عمر ترانسفورماتور را حفظ می‌کند و سود کاهش یافته مصرف‌کننده‌ها نیز توسط نهاد تجمیع‌کننده جبران می‌شود. مدل متمرکز در مقابل مدل غیرمتمرکز قرار می‌گیرد. در مدل غیرمتمرکز مصرف‌کننده‌ها شارژ خودروهای برقی خود را بدون در نظر گرفتن آسیب‌های وارد به ترانسفورماتور و صرفاً برای سود خود بهینه‌سازی می‌کنند. در این مطالعه، هر دو مدل متمرکز و غیرمتمرکز در یک شبکه کوچک محلی با تعداد ۶ خودروی برقی پیاده‌سازی شده که خودروها متصل به یک ترانسفورماتور محلی هستند. مدل‌های متمرکز و غیرمتمرکز با استفاده از نرم‌افزار گمز (GAMS) اجرا و حل می‌شوند. با مقایسه نتایج به‌دست آمده در استراتژی‌های متمرکز و غیرمتمرکز، مزایای استفاده از مدل متمرکز معرفی شده در متعادل‌سازی دارایی‌های شبکه دیده می‌شود.

کلمات کلیدی: استراتژی متمرکز، استراتژی غیرمتمرکز، ترانسفورماتور، خودروهای برقی، سود مصرف‌کننده، معامله‌گری، نهاد تجمیع‌کننده

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۶/۲۹

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۹/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۲۷

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر حسین محمدنژاد شورکائی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: تهران - حصارک - دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات - دانشکده مکانیک، برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

گرمایش جهانی و تغییرات آب و هوا همچنان از موضوع‌های داغ دنیا و بحث‌های مهم تحقیقاتی هستند. بنابراین موضوع انتشار گازهای گلخانه‌ای^۱ و استفاده از انرژی پاک در مرکز از سیاست‌های انرژی اکثر کشورها است. خودروهای موتور درون‌سوز^۲ از عوامل اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی شدید هوا، به ویژه در مناطق شهری هستند [۱]. این موضوع باعث وارد شدن فشار شدیدی به شرکت‌های خودروسازی شده است. بنابراین این شرکت‌ها برای کاهش آلودگی محلی و جهانی ناشی از خودروهای سوخت فسیلی^۳، خودروهای الکتریکی را معرفی کرده‌اند [۲]. خودروهای الکتریکی علاوه بر کمک به حفظ محیط-زیست، هم چالش‌ها و هم مزایای قابل توجهی برای شبکه قدرت دارند. از نظر شبکه قدرت، باتری خودروهای الکتریکی در سه حالت عمل می‌کند. در حالت شبکه به خودرو^۴ (G2V) با استفاده از توان شبکه شارژ می‌شود، انرژی خود را در حالت خودرو به خانه^۵ (V2H) به مدارهای خانه دشارژ می‌کند و در حالت خودرو به شبکه^۶ (V2G) به شبکه توزیع دشارژ می‌شود [۳]. مطابق پیش‌بینی‌ها تعداد خودروهای الکتریکی در سطح جهان تا سال ۲۰۳۰ به ۱۴۵ میلیون عدد خواهد رسید^۵. افزایش نفوذ خودروهای برقی باعث ایجاد چالش‌های جدیدی در مدیریت شارژ و دشارژ خواهد شد. مطابق انتظار، اکثریت خودروها در یک بازه‌ی زمانی مشخص به سیستم توزیع محلی وصل می‌شوند. بنابراین در صورت عدم مدیریت مناسب خودروهای الکتریکی، تأثیرات منفی و نامطلوبی را در تجهیزات شبکه توزیع محلی از جمله اضافه بار روی ترانسفورماتور، خواهیم داشت.

مطالعات مربوط به ارزیابی فنی و اقتصادی در مورد تأثیر افزایش تعداد خودروهای برقی بر روی شبکه‌های توزیع [۴،۵]، نشان دهنده‌ی تأثیر منفی عدم مدیریت شارژ خودروهای الکتریکی در عملکرد صحیح و کارآمد شبکه‌های توزیع هستند. همچنین مطالعات مربوط ترانسفورماتورها [۲،۶] و پایداری ولتاژ [۷،۸]، تأکید بر مدیریت مناسب خودروهای الکتریکی و حداقل امکان سرمایه‌گذاری برای افزایش ظرفیت در سیستم‌های توزیع جهت پوشش بار این خودروها دارند. انتظار داریم که مصرف‌کننده‌ها در بیشتر اوقات خودروها را در خانه‌های خود شارژ کنند [۹] و لذا اثرات منفی عمده‌ی شارژ خودروها در ترانسفورماتور محلی دیده می‌شود. این اثرات شامل استهلاک سریع‌تر و تعویض زود هنگام ترانسفورماتور محلی (برای پوشش پیک‌های فرعی بار خودروها) است.

در مطالعه‌های اخیر از جمله مرجع‌های [۱۰] و [۱۱]، تأثیر خودروهای برقی بر ترانسفورماتورها مطالعه شده است. در مرجع [۱۰] یک مدل احتمالاتی جهت تعیین ترانسفورماتورهایی ایجاد شده که بیشترین حساسیت را نسبت به اضافه بار ناشی از خودروها دارند. در این مرجع فرض می‌شود که ترانسفورماتور در صورت تحمل هرگونه اضافه بار مشخص، باید جایگزین شود که روشی بهینه نیست. در مرجع [۱۱] مدار معادلی از ترانسفورماتور جهت مطالعه تأثیر خودروهای برقی معرفی شده است. رویکردهای پساپردازشی^۸ معرفی شده در مرجع‌های [۱۰] و [۱۱]، به منظور آنالیز استفاده می‌شوند و شارژ خودروهای برقی را با هدف حداکثر کردن عمر ترانسفورماتور بهینه‌سازی نمی‌کنند. در مطالعات دیگر در مرجع‌های [۱۲] و [۱۳]، رفتار شارژ خودروهای برقی در دینامیک ترانسفورماتور اضافه شده و یک ارزیابی از کاهش عمر^۹ ترانسفورماتور انجام می‌شود. در مرجع [۱۲] روشی از شارژ خودرو بر اساس حرارت ایجاد شده و در ادامه جهت آنالیز تأثیر خودروها بر ترانسفورماتور استفاده شده است. با این حال این روش شارژ از آستانه‌های حرارتی از پیش تنظیم شده برای ترانسفورماتور استفاده می‌کند و برای تأثیرگذاری بیشتر نیاز به تجزیه و تحلیل دقیق‌تری دارد. در مرجع [۱۳] روشی بر مبنای قواعد مشخص توسعه داده شده و تأثیر آن بر کاهش عمر ترانسفورماتور مطالعه می‌شود. در این رویکرد جهت تخصیص دستورالعمل‌های شارژ و دشارژ برای خودروها، قوانین و قواعد از پیش تعیین شده به کار رفته‌اند و لزوماً بهینه نیستند. ضمناً در تمامی رویکردهای مرجع‌های [۱۰] الی [۱۳]، استراتژی غیرمتمرکز^{۱۰} در نظر گرفته شده است. در استراتژی غیرمتمرکز، مصرف‌کننده‌ها عملکرد خودروهای خود را مستقلاً مدیریت کرده و سپس مجموع مصرف آن‌ها برای آنالیز کاهش عمر ترانسفورماتور استفاده می‌شود. در برخی مطالعات دیگر، بهینه‌سازی چند هدفی متمرکز^{۱۱} به همراه خودروهای برقی انجام شده است. این بهینه‌سازی چند هدفی با در نظر گرفتن تلفات سیستم توزیع در مرجع [۱۴]، محدودیت‌های ولتاژ در مرجع‌های [۱۵] الی [۱۷] و مشارکت بازار در مرجع‌های [۱۸] و [۱۹] انجام شده است. ضمناً مطالعات محدودی نیز در مورد بهینه‌سازی چند هدفی استهلاک ترانسفورماتور و خودروهای برقی وجود دارند [۲۰-۲۲]. در مرجع [۲۰] یک استراتژی کنترل متمرکز معرفی شده که تعادل بارگذاری

ترانسفورماتور و کیفیت خدمات ارائه شده به مصرف‌کننده‌ها را حفظ می‌کند. بارگذاری متعادل دمای داخلی ترانسفورماتور به هر دو عامل بارگذاری و دمای محیط بستگی دارد؛ لذا کاهش عمر ترانسفورماتور نیمه بهینه است و به‌علاوه استراتژی معرفی شده هزینه تامین انرژی خودروها را در نظر نمی‌گیرد. در مرجع [۲۱] اثر پاسخ‌گویی بار^{۱۲} بر طول عمر ترانسفورماتور توزیع ثانویه (ولتاژ متوسط و ولتاژ پایین) با بهینه‌سازی دمای ترانسفورماتور ارزیابی شده و دینامیک‌های حرارتی نیز لحاظ گردیده است. هدف بهینه‌سازی در مرجع [۲۱] که کاهش مجموع دمای نقطه‌ی داغ ترانسفورماتور در طول یک روز توسط پاسخ‌گویی بار است، موثر نیست؛ زیرا جابجایی بار تنها در صورتی می‌تواند میانگین گرم‌ترین دما را تغییر دهد که تغییرات در دمای محیط زیاد باشد. در مرجع [۲۲] یک مدل متمرکز مبتنی بر محدودیت دما معرفی می‌شود. این مدل تغییرات بار (تجهیزات و نه خودروها) را در نظر می‌گیرد تا ضمن حفظ دمای ترانسفورماتور در میزان پایین‌تر از نقطه‌ی تنظیم شده، بار افزایش یافته‌ی آن را پوشش دهد. با این همه در مرجع [۲۲] هزینه‌ی آسیب ترانسفورماتور و سود معامله‌گری^{۱۳} پاسخ‌گویی بار در نظر گرفته نشده است. لذا نتایج به‌دست آمده از مرجع [۲۲] در مقایسه با بهینه‌سازی چند هدفی این مقاله، نیمه‌بهینه است.

در این مطالعه با توجه به اهمیت پیش‌بینی استهلاک ترانسفورماتور جهت درک کاهش عمر عملیاتی آن، از مدل معرفی شده در استاندارد IEEE C57.91-2011 استفاده شده است^{۱۴}. در این استاندارد مدلی از دمای داخلی، ضریب استهلاک^{۱۵} و کاهش عمر ترانسفورماتور شرح داده شده است. ارائه یک استراتژی بهینه مدیریت شارژ خودروهای برقی برای حداقل‌سازی استهلاک ترانسفورماتور، در صورتی ممکن است که مصرف‌کننده‌ها با تمایل و رضایت، کنترل شارژ و دشارژ خودروهای خود را در اختیار مالک ترانسفورماتور یا نهاد تجمیع‌کننده^{۱۶} قرار دهند. این مطالعه در این راستا یک استراتژی متمرکز از بهینه‌سازی چند هدفی کاهش عمر ترانسفورماتور و شارژ و دشارژ خودروهای برقی با هدف حداقل‌سازی هزینه کل عملیات معرفی می‌کند و مصرف‌کننده‌ها اجازه می‌دهند تا یک نهاد مدیریتی (مانند نهاد تجمیع‌کننده) برنامه‌ریزی زمانی شارژ و دشارژ خودروهایشان را انجام دهد. نهاد مدیریتی تلاش می‌کند تا هزینه تامین برق مصرف‌کنندگان را با استفاده از تعرفه‌ی قیمت انرژی جهت برنامه‌ریزی شارژ (G2V) و معامله‌گری انرژی (V2G) یا V2H به حداقل برساند. همچنین این نهاد با اطمینان از تامین انرژی مورد نیاز خودروها، به دنبال حداقل‌سازی خسارت‌ها و آسیب‌های وارده ناشی از شارژ خودروها به ترانسفورماتور است. با این کار نهاد تجمیع‌کننده به منظور حفظ عمر ترانسفورماتور، از مالک آن کسب درآمد می‌کند که سهمی از این درآمد به مشتریان جهت مشارکتشان تعلق می‌گیرد. به واسطه جبران سود کاهش یافته مصرف‌کننده‌ها، کلیه طرفین می‌توانند به لحاظ اقتصادی سود کنند. همچنین در این مقاله یک آنالیز از عمر مورد انتظار ترانسفورماتور^{۱۷} برای استراتژی متمرکز معرفی شده و استراتژی غیرمتمرکز انجام می‌شود. نوآوری‌های اصلی این مقاله به شرح زیر هستند:

- انجام بهینه‌سازی به‌صورت متمرکز با لحاظ همزمان کاهش عمر ترانسفورماتور و سود معامله‌گری انرژی خودروهای برقی که همزمان منافع طرف مالک ترانسفورماتور و مصرف‌کننده‌ها را در نظر می‌گیرد.
- تجزیه و تحلیل استفاده از خودروهای برقی در حالت‌های عملیاتی G2V، V2H و V2G، پیاده‌سازی استراتژی متمرکز معرفی شده در این حالت‌ها و در سطوح مختلف نفوذ خودروها جهت حداکثر نمودن عمر ترانسفورماتور.
- ارائه روش آنالیز هزینه‌ها و سودهای حاصل از تغییر استراتژی غیرمتمرکز به استراتژی متمرکز معرفی شده برای طرفین بهینه‌سازی به منظور ایجاد مورد تجاری قوی برای نهاد تجمیع‌کننده جهت مذاکره و توافق با طرفین.
- ساختار مقاله در ادامه به این شرح است. در بخش دوم مدل ترانسفورماتور ارائه شده است. بخش سوم مدل بهینه‌سازی غیرمتمرکز را اشاره می‌کند، در بخش چهارم مدل بهینه‌سازی چندهدفی متمرکز بیان شده است. نتایج شبیه‌سازی در بخش پنجم ارائه شده و در نهایت نتیجه‌گیری در بخش ششم بیان شده است.

۲- مدل ترانسفورماتور

استهلاک ترانسفورماتور وابسته به تاثیرات دمایی بارگذاری است. استاندارد IEEE C57.91 مدلی جهت تخمین دماهای مختلف ترانسفورماتور و مرتبط با ضریب استهلاک و کاهش عمر، معرفی می‌کند. به منظور تخمین دمای داغ‌ترین نقطه سیم‌پیچی ترانسفورماتور، از معادله زیر استفاده می‌شود:

$$\theta_t^{HST} = \theta_t^{HST} + \Delta\theta_t^{TO} + \Delta\theta_t^{HST} \quad \forall t \in T \quad (1)$$

مقدار اختلاف دمای روغن ترانسفورماتور و محیط در معادله (۱) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta\theta_t^{TO} = \left(\Delta\theta_t^{TO,U} - \Delta\theta_{t-1}^{TO} \right) \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau^{TO}}} \right) + \Delta\theta_{t-1}^{TO} \quad \forall t \in T \quad (2)$$

توجه شود که در معادله (۲) مقدار اختلاف دمای روغن ترانسفورماتور و محیط به مقدارش در بازه زمانی قبلی بستگی دارد. عبارت دمای داغ‌ترین نقطه‌ی سیم‌پیچی و دمای روغن ترانسفورماتور در معادله (۱) نیز به طریق زیر محاسبه می‌گردد:

$$\Delta\theta_t^{HST} = \left(\Delta\theta_t^{HST,U} - \Delta\theta_{t-1}^{HST} \right) \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau^{HST}}} \right) + \Delta\theta_{t-1}^{HST} \quad \forall t \in T \quad (3)$$

که در آن عبارت اختلاف دمای داغ‌ترین نقطه سیم‌پیچی و دمای روغن ترانسفورماتور به مقدارش در بازه‌ی زمانی قبلی وابسته است. معادلات زیر اختلاف دمای نهایی روغن ترانسفورماتور به ترتیب با محیط و داغ‌ترین نقطه سیم‌پیچی را محاسبه می‌کنند:

$$\Delta\theta_t^{TO,U} = \Delta\theta_t^{TO,R} \cdot \left(\frac{k_t^2 \cdot R + 1}{R + 1} \right)^n \quad \forall t \in T \quad (4)$$

$$\Delta\theta_t^{HST,U} = \Delta\theta_t^{HST,R} \cdot k_t^{2,m} \quad \forall t \in T \quad (5)$$

که در آن نسبت k_t به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$k_t = \frac{TX_t^{load}}{TX^{rating}} \quad \forall t \in T \quad (6)$$

در معادله‌های (۱) تا (۵) می‌توان دید که با افزایش نسبت بار k_t دمای ترانسفورماتور بالا می‌رود. معادله (۷) ضریب پیشرفت استهلاک ترانسفورماتور را در دمای داغ‌ترین نقطه‌ی سیم‌پیچی محاسبه می‌کند:

$$F_t^{AA} = \exp\left(\frac{1500}{383} - \frac{1500}{\theta_t^{HST} + 273} \right) \quad \forall t \in T \quad (7)$$

اگر مقدار ضریب پیشرفت استهلاک ترانسفورماتور بیشتر از ۱ باشد، ترانسفورماتور استهلاک سریع‌تری را تجربه می‌کند. با استفاده از این ضریب، می‌توان کاهش عمر ترانسفورماتور را بر اساس معادله‌ی (۸) مشخص نمود:

$$LOL_t = \frac{F_t^{AA} \cdot \Delta t}{\beta} \quad \forall t \in T \quad (8)$$

مطابق استاندارد IEEE، مقدار β باید حداقل ۱۸۰۰۰۰ ساعت (۲۰/۵ سال) باشد^{۱۴}. با توجه به معادله‌های (۱) تا (۸)، استهلاک ترانسفورماتور را با در نظر گرفتن بارگذاری، دما و مشخصات رفتاری آن می‌توان تخمین زد. به عنوان مثال اگر در Δt برابر ۱۵ دقیقه ترانسفورماتوری با مشخصات آمده در جدول (۱) با بارگذاری ۹۰ درصد در نظر گرفته شود، ترانسفورماتور ۷۵/۵ دقیقه از عمر عایق خود را از دست خواهد داد.

در شکل (۱) تاثیر تغییر k_t بر کاهش عمر ترانسفورماتور نشان داده شده که محور عمودی لگاریتمی است. همچنین ضریب پیشرفت استهلاک برای نسبت‌های k_t معین نیز قابل مشاهده است. با افزایش نسبت بارگذاری، ضریب استهلاک و کاهش عمر ترانسفورماتور در بارهای بالا به صورت نمایی افزایش می‌یابند. این مدل از ترانسفورماتور را که مبتنی بر دما است، می‌توان در یک چارچوب بهینه‌سازی جای داد که در بخش ۵ قسمت اول در این مورد بحث شده است.

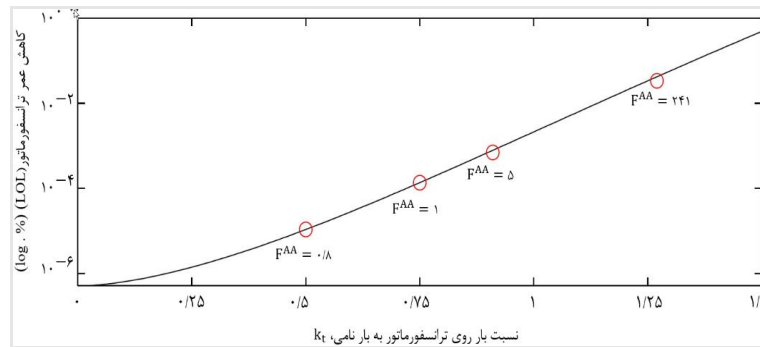
۳- استراتژی غیرمتمرکز (مدل بهینه‌سازی مصرف‌کننده)

فرض بر این است که مصرف‌کننده‌ها در یک خانه متصل به سیستم توزیع ساکن بوده و برق مورد نیاز خود را با تعرفه متغیر π_t تهیه می‌کنند. لذا انتظار داریم که مصرف‌کننده‌ها سعی کنند تا هزینه‌های انرژی خود با بهینه‌سازی مصرف‌شان تحت تعرفه π_t به حداقل برسانند. در اصل مصرف‌کننده‌ها مسئول استهلاک و فرسودگی روزانه‌ی تجهیزات سیستم توزیع، خصوصا ترانسفورماتورها نیستند. اپراتور سیستم توزیع^{۱۸} که در اکثر موارد همان شرکت برق است، نصب و نگهداری تجهیزات شبکه را به منظور تامین برق مصرف‌کننده‌ها به عهده دارد.

Table (1): Specimen transformer specifications to study insulation life

جدول (۱): مشخصات ترانسفورماتور نمونه برای بررسی عمر عایق

پارامتر	سمبل	مقدار
-	m	۰/۸
-	n	۰/۹
-	R	۶
°C	$\Delta\theta_t^{TO,R}$	۵۶
°C	$\Delta\theta_t^{HST,R}$	۸۰
دقیقه	τ^{TO}	۹۰
دقیقه	τ^w	۷
°C	θ_t^A	۲۴
°C	$\Delta\theta_{t-1}^{TO}$	۲۵
°C	$\Delta\theta_{t-1}^{HST}$	۲۰



شکل (۱): کاهش عمر ترانسفورماتور به صورت تابعی از بار روی ترانسفورماتور برای بازه زمانی ۱۵ دقیقه

Figure (1): Loss-of-life as a function of the loading on the transformer for $\Delta t=15\text{min}$ (y-axis is logarithmic)

همان‌طور که بیان شد، مصرف‌کننده‌ها مسئول استهلاک و آسیب‌های وارد به ترانسفورماتور نبوده و لذا بهینه‌سازی آنها تنها مدیریت تجهیزات خودشان را شامل می‌شود. مصرف‌کننده‌ها می‌توانند شارژ و دشارژ خودروهای خود را با نصب یک سیستم مدیریت انرژی یا سیستم شارژ هوشمند مدیریت کنند [۲۳، ۲۴]. سیستم مدیریت می‌تواند تعرفه‌ی برق، زمان‌بندی سفر خودروها و همچنین فاکتورهای دیگری جهت تامین انرژی با حداقل هزینه از طرف مصرف‌کننده را لحاظ کند. همچنین سیستم مدیریت از باتری خودروها را به منظور انجام معامله‌گری انرژی و صرفه‌جویی بیشتر در هزینه‌ها استفاده می‌کند. این روش معمولاً مستقل از شرکت برق بوده و لزومی به استفاده از یک نهاد مدیریتی ندارد. هدف مدل بهینه‌سازی مصرف‌کننده، حداقل کردن هزینه‌ی تامین انرژی بوده و تابع هدف آن به صورت رابطه‌ی (۹) تعریف می‌شود قیدهای (۱۰) الی (۱۵) در نظر گرفته می‌شود.

$$\min \quad \Delta t \cdot \sum_{t \in T} \sum_{v \in V} \pi_t \cdot (p_{t,v}^{\text{chg}} - \eta_v^{\text{dsg}} \cdot p_{t,v}^{\text{dsg}}) \quad (9)$$

$$\text{soc}_{t,v} = \text{soc}_{t-1,v} + \eta_v^{\text{chg}} p_{t,v}^{\text{chg}} \Delta t - p_{t,v}^{\text{dsg}} \Delta t - \xi_v \frac{S_{t,v}}{\sum_{(t \in T)} S_{t,v}} \quad \forall t \in T, v \in V \quad (10)$$

$$0 \leq p_{t,v}^{\text{chg}} \leq \alpha_{t,v} \cdot P_v^{\text{max}} \quad \forall t \in T, v \in V \quad (11)$$

$$0 \leq p_{t,v}^{\text{dsg}} \leq \alpha_{t,v} \cdot P_v^{\text{max}} \quad \forall t \in T, v \in V \quad (12)$$

$$\text{soc}_v^{\text{min}} \leq \text{soc}_{t,v} \leq \text{soc}_v^{\text{max}} \quad \forall t \in T, v \in V \quad (13)$$

$$\text{soc}_{t=[T],v} = \text{soc}_v^{\text{init}} \quad \forall v \in V \quad (14)$$

$$-P^{\text{limit}} \leq P_t^{\text{base}} + p_{t,v}^{\text{chg}} - p_{t,v}^{\text{dsg}} \leq P^{\text{limit}} \quad (15)$$

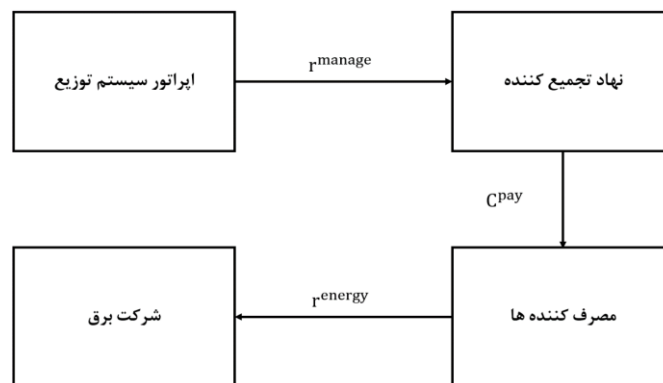
در قید (۱۰) متغیر سطح شارژ خودروی الکتریکی تابعی از حالت قبلی خود، بازده شارژ، توان شارژ، توان دشارژ، کل انرژی مورد نیاز جهت سفر و برنامه حرکت خودرو است. مؤلفه $\beta_{t,v}$ بر اساس مسافت کل (مایل) که انتظار می‌رود خودروی v طی کند، محاسبه شده و سپس به ضریب تبدیل کیلووات-ساعت بر مایل ضرب می‌شود تا مقدار کل انرژی مورد نیاز به دست آید. اگر خودرو در بازه زمانی t در حال حرکت باشد، $S_{t,v}$ برابر با ۱ بوده و در غیر این صورت صفر خواهد شد. همچنین در قید (۱۰) انرژی مورد نیاز جهت حرکت در بازه زمانی t ، در جمله آخر معادله محاسبه می‌شود. برای مثال اگر یک خودرو در طول سفر خود ۵ کیلووات-ساعت انرژی مصرف کرده و به تعداد ۵ بازه زمانی سفر کند، میزان مصرف انرژی خودروی مورد نظر در هر بازه زمانی t برابر با ۱ کیلووات-ساعت خواهد بود. عمل شارژ و دشارژ خودرو باید در محدوده حداکثر توان شارژ و دشارژ باشد. همچنین خودرو تنها زمانی می‌تواند شارژ شود که دسترسی به محل شارژ ممکن بوده و قابلیت اتصال به مدار خانه را داشته باشد که در قیدهای (۱۱) و (۱۲) بیان شده است. این قابلیت اتصال خودرو به شبکه توسط مؤلفه $\alpha_{t,v}$ تعریف می‌شود. توجه شود که مقدار $\alpha_{t,v}$ قبل از خروج و بعد از ورود به خانه برابر با ۱ و در غیر این صورت زمانی که خودرو در خانه نباشد، برابر با صفر خواهد بود. همچنین مطابق قید (۱۳)، سطح شارژ خودرو در تمامی بازه‌های زمانی باید بین محدوده حداقل و حداکثری آن باشد. قید (۱۴) بهینه‌سازی هر روز را از روز بعد آن جدا می‌کند. همچنین از تامین انرژی مصرفی خودرو و برابر بودن سطح شارژ باتری در آخر بهینه‌سازی با سطح اولیه آن در ابتدای روز، اطمینان حاصل می‌کند. در نهایت قید (۱۵) محدود شدن بار کل از جمله مصرف پایه را به محدوده توان خانه را تضمین می‌کند.

۴- استراتژی متمرکز (مدل بهینه‌سازی چند هدفی نهاد تجمیع‌کننده)

بهینه‌سازی‌های انجام یافته برای خودروها توسط مصرف‌کننده‌ها، می‌توانند منجر به افزایش خسارات وارد به ترانسفورماتوری شوند که خودروها به آن متصل هستند. مالک ترانسفورماتور (اپراتور سیستم توزیع یا شرکت برق)، این هزینه را در دو بخش متحمل می‌شود که عبارتند از از بین رفتن ترانسفورماتور نصب شده فعلی و سرمایه‌گذاری برای نصب ترانسفورماتور با ظرفیت بیشتر جهت پوشش بار افزایشی یافته توسط خودروها.

برای کاهش این هزینه‌ها، شارژ و دشارژ خودروها را می‌توان توسط مالک ترانسفورماتور یا یک نهاد مدیریتی مجزا (مانند نهاد تجمیع‌کننده) به روش متمرکز کنترل کرد. گردش پول مابین اپراتور سیستم توزیع، نهاد تجمیع‌کننده، مصرف‌کننده و شرکت برق را می‌توان در شکل (۲) مشاهده نمود.

اگر نهاد تجمیع‌کننده از مالک ترانسفورماتور مجزا باشد، باید از مبلغ پس‌انداز شده که از عدم نیاز به تعویض مکرر ترانسفورماتور به دست آمده است (r^{save})، سهمی را تحت عنوان (r^{manage}) به نهاد تجمیع‌کننده پرداخت کند. از طرف دیگر اگر مالک ترانسفورماتور به عنوان نهاد تجمیع‌کننده عمل کند، پس‌اندازها و صرفه‌جویی‌های انجام یافته مستقیماً در اختیار خود مالک ترانسفورماتور قرار می‌گیرد. همچنین مصرف‌کننده‌ها نیز قبض برق خود را تحت عنوان (r^{energy}) به شرکت برق پرداخت می‌کنند.



شکل (۲): دریافتی‌ها/پرداختی‌های نهاد تجمیع‌کننده از/به مصرف‌کننده و اپراتور سیستم توزیع
Figure (2): Revenue/payments by the aggregator from/to the consumer and DSO.

در این مقاله مدلی برای نهاد تجمیع‌کننده ایجاد شده که فقط بر مصرف‌کننده‌ها، خودروها و ترانسفورماتور متمرکز می‌شود که مصرف‌کننده‌ها به نهاد تجمیع‌کننده اجازه می‌دهند تا شارژ و دشارژ خودروهای‌شان را کنترل کند. نهاد تجمیع‌کننده به صورت چندهدفی هزینه آسیب وارد به ترانسفورماتور و هزینه انرژی (شامل هرگونه سود معامله‌گری) را بهینه‌سازی می‌کند تا پروفایل‌های شارژ و دشارژ را با پایین‌ترین هزینه کلی عملیات به دست آورد. در برابر، مصرف‌کننده‌ها مبلغ C^{pay} را به منظور جبران Δt^{energy} یعنی هزینه افزایش یافته تامین انرژی خود (در مقایسه با استراتژی غیرمتمرکز) دریافت می‌کنند. تمامی طرفین در صورتی که $\Delta t^{energy} > C^{pay} > t^{manage} > \Delta t^{save}$ باشد، سود خواهند کرد. در مدل بهینه‌سازی چندهدفی نهاد تجمیع-کننده، تابع هدف به صورت رابطه (۱۶) با در نظر گرفتن رابطه‌های (۱) الی (۵)، (۷) و (۸) و قیدهای (۱۰) الی (۱۵) تعریف می‌شود.

$$\min \quad TX^{\text{cost}} \sum_{t \in T} LOL_t + \sum_{t \in T} \sum_{v \in V} \pi_t \cdot (p_{t,v}^{\text{chg}} + \eta_v^{\text{dsg}} p_{t,v}^{\text{dsg}}) \quad (16)$$

$$k_t^+ - k_t^- = \frac{TX_t^{\text{base}} + \sum_{(v \in V)} (p_{t,v}^{\text{chg}} - p_{t,v}^{\text{dsg}})}{TX^{\text{rating}}} \quad \forall t \in T \quad (17)$$

$$\theta_t^{\text{HST}} \leq \overline{\theta_t^{\text{HST}}} \quad \forall t \in T \quad (18)$$

در معادله (۱۶) LOL_t در قیمت ترانسفورماتور ضرب می‌شود تا هزینه‌ی آسیب وارد به ترانسفورماتور به دست آید. قیمت ترانسفورماتور به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$TX^{\text{cost}} = TX^{\text{rating}} \cdot TX^{\text{price}} \quad (19)$$

برای مثال اگر یک ترانسفورماتور با ظرفیت ۲۵ کیلوولت-آمپر و هزینه ۱۶۶/۱ دلار بر کیلوولت-آمپر در نظر گرفته شود، قیمت کل آن برابر با ۴۱۵۲/۵ دلار خواهد بود. در این ترانسفورماتور با بارگذاری ۹۰ درصد و مقادیر مشخص شده برای پارامترها در مثال بخش دوم، هزینه‌ی آسیب وارد به ترانسفورماتور ۰/۰۳ دلار خواهد بود. توجه شود که جمله‌ی دوم معادله (۱۶) همان تابع هدف استراتژی غیرمتمرکز رابطه‌ی (۹) است، زیرا اکنون نهاد تجمیع‌کننده وظیفه‌ی مدیریت هزینه‌ی تامین انرژی خودروهای برقی را به عهده دارد و این مورد در تابع هدف لحاظ می‌شود. مصرف‌کننده‌ها نیز دخالتی در مدیریت شارژ و دشارژ خودروهای‌شان نخواهند داشت، زیرا از تامین انرژی مورد نیاز خودروهای خود اطمینان دارند و به علاوه سودی از بابت کمک به شبکه دریافت خواهند کرد. تابع هدف اپراتور مشروط بر معادلات مدل ترانسفورماتور (۵) تا (۱)، (۷)، (۸) و قیود خودرو (۱۵) تا (۱۰) است. در کنار این قیدها، قید (۱۷) نیز به محدودیت‌ها اضافه می‌شود. این قید با استفاده قیمت ترانسفورماتور و توان مصرفی خالص خودروها، بار مطلق ترانسفورماتور را تعریف می‌کند. توجه شود کل بار پایه مصرف‌کننده‌ها مجموع بار پایه تمامی مصرف‌کننده‌ها در هر یک از بازه‌های زمانی t است. همچنین در قید (۱۷) بار کل ممکن است منفی باشد که در نتیجه نسبت بار k_t نیز منفی خواهد بود. جهت اجتناب از این موضوع، دو متغیر غیرمنفی در قید (۱۷) ایجاد شده و شرط زیر نیز اضافه می‌گردد:

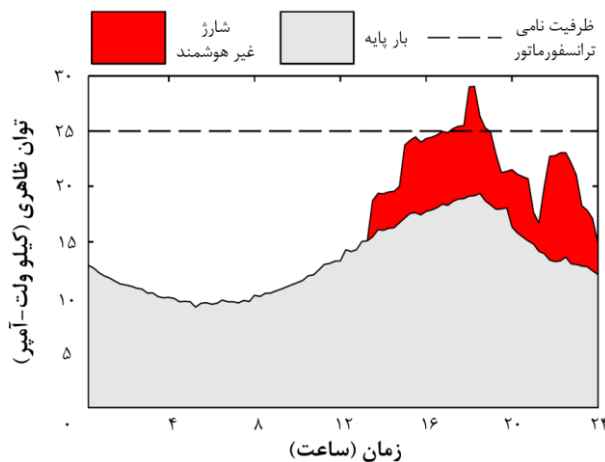
$$k_t = k_t^+ + k_t^- \quad (20)$$

این نوع معادله‌نویسی قدرمطلق نسبت بار را مدل‌سازی می‌کند. نهایتاً در قید (۱۸) دمای نقطه داغ به مقدار حداکثری آن محدود می‌شود تا از گاززدگی در عایق جامد و روغن ترانسفورماتور جلوگیری کند^{۱۴}. معادله‌های ترانسفورماتور (۴)، (۵) و (۷) غیرخطی هستند و در نتیجه مدل بهینه‌سازی نهاد تجمیع‌کننده نیز غیرخطی است.

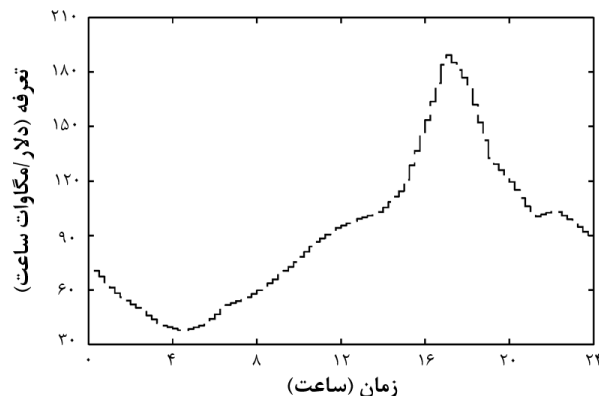
۵- نتایج شبیه‌سازی

استراتژی معرفی شده به یک ترانسفورماتور هوایی با ظرفیت نامی ۲۵ کیلوولت-آمپر اعمال شده که به شش مصرف‌کننده مسکونی با محدودیت توان ۱۵ کیلووات سرویس می‌دهد [۲۵]. پروفایل مصرف هر مصرف‌کننده از پایگاه داده‌های تجربی از مناطق سن‌دیگو ایالت کالیفرنیا و آستین ایالت تگزاس جمع‌آوری شده‌اند^{۱۹}. مقیاس‌بندی پروفایل‌های مصرف به صورتی هستند که پیک بارگذاری (بدون در نظر گرفتن خودروها) مشابه بارگذاری‌های فیدر غیرشهری است^{۲۰}. از نظرسنجی ملی سفر خانوار (NHTS) در سال ۲۰۰۹ جهت تعیین رفتار خودروهای برقی و تولید پروفایل شارژ غیرهوشمند استفاده شده است^{۲۱}.

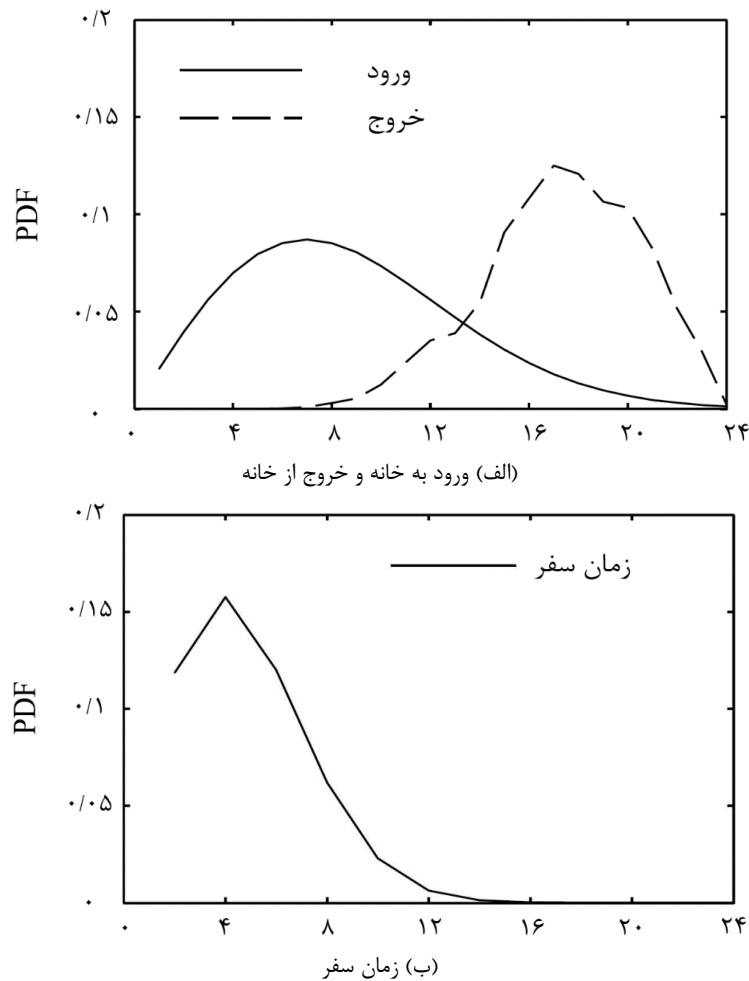
با این مجموعه داده‌ها، پروفایل‌های نمونه با استفاده از روش خوشه‌بندی k میانگین^{۲۲} ایجاد شده‌اند [۲۶]. شکل (۳) بار پایه و شارژ غیرهوشمند^{۲۳} را برای نفوذ ۱۰۰ درصد خودروها نشان می‌دهد. شکل (۴) نشان دهنده‌ی قیمت لحظه‌ای تعرفه انرژی (قیمت میانگین ۹۲/۷ دلار بر مگاوات-ساعت با بازه ۳۷/۶ تا ۱۹۸/۳ دلار بر مگاوات-ساعت و قیمت میانی ۹۲ دلار بر مگاوات-ساعت است که از تعرفه‌های شرکت ادیسون کالیفرنیا جنوبی^{۲۴} به‌دست آمده است. با استفاده از مجموعه داده NHTS، توابع توزیع احتمال^{۲۵} زمان ورود و خروج خودروها از خانه و نیز مدت زمان سفرشان ایجاد شده است. توابع توزیع احتمال در شکل (۵) نشان داده شده و جهت استخراج ویژگی خودروها استفاده شده‌اند. خودروها در طول بازه‌های زمانی قبل از خروج و بازه‌های بعد از ورود دوباره به خانه، برای شارژ و دشارژ در دسترس هستند. مطابق مرجع [۲۵]، نرخ توان شارژ و دشارژ در ۳/۳ کیلووات تنظیم شده و ظرفیت انرژی باتری خودروها ۲۴ کیلووات-ساعت است. ضمناً سطح شارژ خودروها باید به منظور ایمنی و محدودیت الکتروشیمیایی باتری، بین حداقل ۱۵ درصد و حداکثر ۹۵ درصد از ظرفیت باتری باشد^{۲۶}. بازده در سفر رفت و برگشتی ۹۰ درصد است [۲۵]. سطح شارژ اولیه نیز بین ۱۵ درصد و ۶۰ درصد از سطح شارژ حداکثر به صورت یکنواخت و تصادفی تولید شده است. جهت تبدیل کل مسافت طی شده به‌دست آمده از مجموعه داده NHTS به کل انرژی مورد نیاز برای حرکت، از ضریب تبدیل ۰/۳۳ کیلووات-ساعت بر مایل [۲۷] استفاده شده است. داده‌های تاریخی دمای محیط از ماه ژوئیه سال ۲۰۱۴ شهر سن‌دیگو در ایالت کالیفرنیا جمع‌آوری شده‌اند^{۲۷}. دمای محیط در تاریخ مذکور بین ۱۸/۹ الی ۲۵/۶ درجه سانتیگراد با میانگین دمای ۲۱/۷ درجه سانتیگراد است. دماهای اولیه ترانسفورماتور با انجام بهینه‌سازی و با استفاده از نتایج دمای آخر روز تنظیم شده است. حداکثر دمای نقطه داغ ترانسفورماتور ۱۴۰ درجه سانتیگراد است^{۱۴}.



شکل (۳): بار پایه و ظرفیت نامی ترانسفورماتور برای شارژ غیرهوشمند در نفوذ ۱۰۰ درصد خودرو (۶ عدد)
Figure (3): Dumb charging at 100% (6) EV penetration, base load, and transformer



شکل (۴): تعرفه لحظه‌ای برق
Figure (4): the real-time electricity tariff



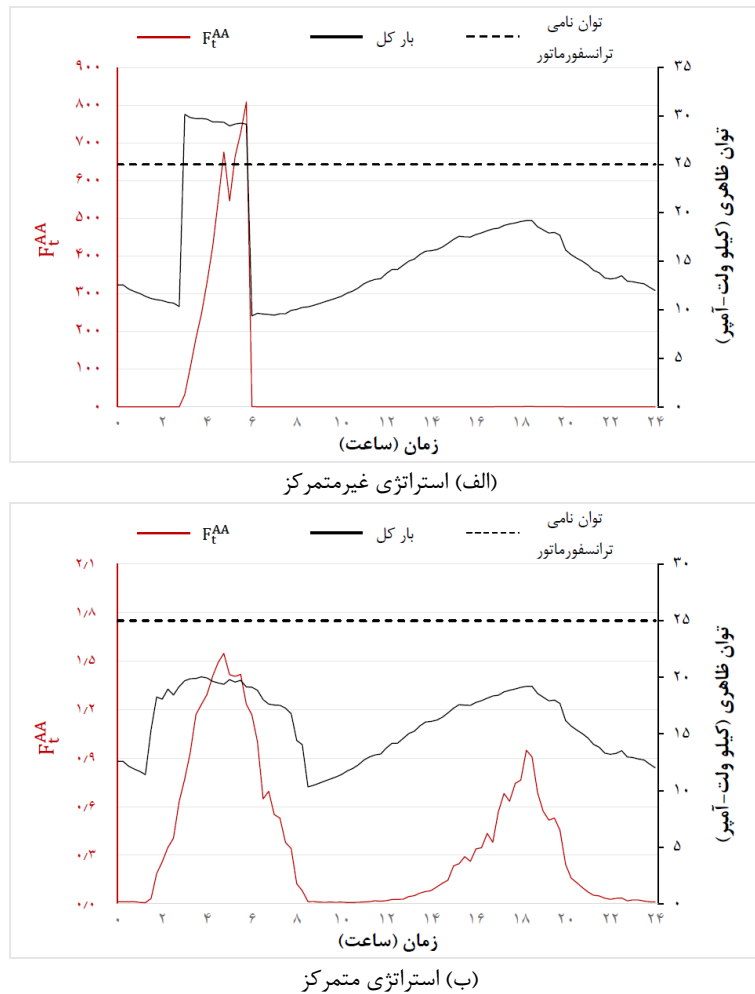
شکل (۵): توابع توزیع احتمال

Figure (5): PDFs of a) the arrival time to the home and departure time from the home, b) Trip travel time

از مقادیر مؤلفه‌های ترانسفورماتور در بخش ۲ و مرجع [۲۸] نیز استفاده می‌شود. هزینه جاگزینی ترانسفورماتور ۱۶۶/۱ دلار بر کیلوولت-آمپر است. مطابق مرجع [۲۹] این هزینه شامل هزینه‌های ثابت و متغیر در یک مؤلفه تلفیقی پریونیت از کیلوولت-آمپر می‌شود. مسئله بهینه‌سازی معرفی شده به صورت مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط^{۲۸} (MINLP) بوده، با استفاده از نرم‌افزار گمز (GAMS) اجرا و با حل‌کننده BONMIN حل شده است^{۲۹}.

۱-۵- بار کل و استهلاک ترانسفورماتور در استراتژی غیرمتمرکز و متمرکز

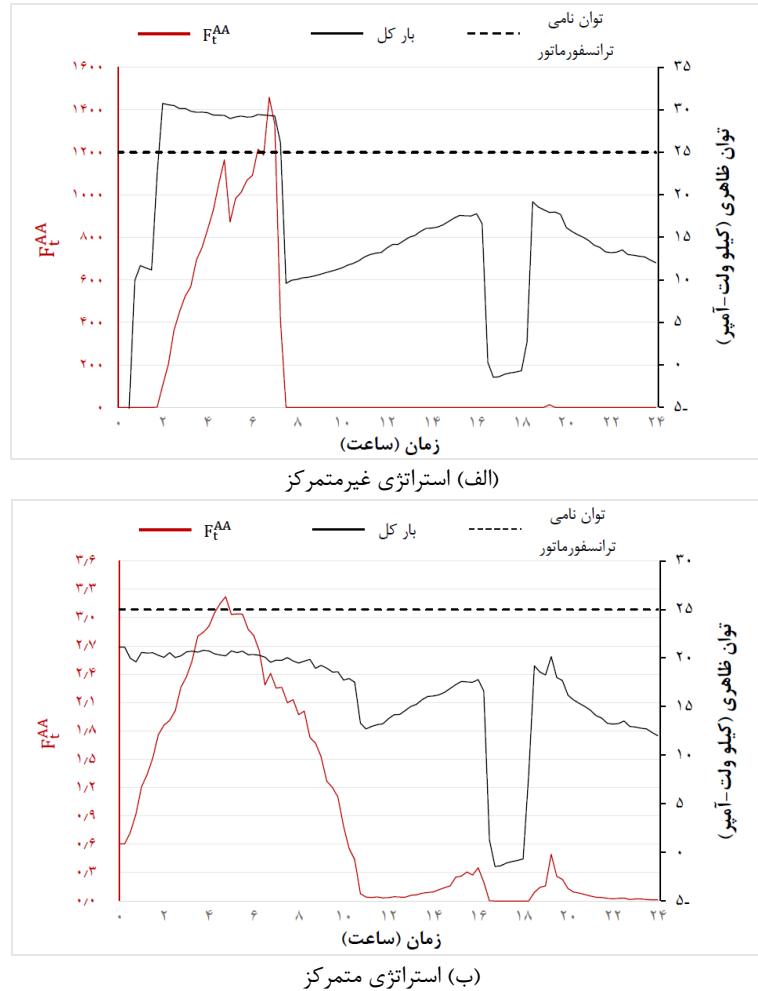
در این قسمت مدل استراتژی غیرمتمرکز و متمرکز در نفوذ ۱۰۰ درصد خودروها جهت به دست آوردن ضریب استهلاک و بار کل روی ترانسفورماتور (از جمله بار خودروها) اجرا می‌شود. کل بار، توان نامی ترانسفورماتور و ضریب پیشرفت استهلاک در حالت عملیاتی G2V، برای استراتژی غیرمتمرکز در شکل (۶-الف) و متمرکز در شکل (۶-ب) قابل مشاهده است. از مقایسه شکل‌های (۶-الف) و (۵-ب) می‌توان دید که بار ترانسفورماتور پیک‌های بالاتری را در استراتژی غیرمتمرکز دارد؛ زیرا هر یک از مصرف‌کننده‌ها مستقلاً فقط هزینه‌های عملیات خود را حداقل می‌کنند. چنین اقدامی باعث همزمان شدن مصرف برق در بازه‌هایی می‌شود که قیمت انرژی در آن‌ها پایین است (مثلاً ساعت ۰۴:۰۰). در مقابل در استراتژی متمرکز، نهاد تجمیع‌کننده با در نظر گرفتن کاهش عمر ترانسفورماتور، خودروها را بهینه‌سازی می‌کند و در نتیجه شارژ خودروها در طول بازه‌های زمانی کم‌قیمت پخش می‌شود. این کار باعث کاهش پیک توان مصرفی در طول شب شده و استهلاک کل ترانسفورماتور را پایین می‌آورد. با این حال هر چند عمر ترانسفورماتور افزایش پیدا کرده اما هزینه تامین انرژی برای مصرف‌کننده نیز افزایش می‌یابد.



شکل (۶): ضریب استهلاک و بارگذاری ترانسفورماتور حالت فعال بودن G2V

Figure (6): Loading on the transformer and aging factor with G2V enabled for a) Decentralized case, b) Centralized case

همان طور که اشاره شد، برخی از خودروها توانایی دشارژ نیز دارند. این خودروها انرژی باتری‌های خود را جهت تامین انرژی مورد نیاز شبکه، مستقیماً به آن تزریق می‌کنند. شکل (۷) بار کل و ضریب استهلاک را برای استراتژی غیرمتمرکز در (الف) و متمرکز در (ب)، در حالت V2G نشان می‌دهد. در استراتژی غیرمتمرکز، خودروها در طول بازه‌های زمانی کم‌قیمت شارژ می‌شوند تا در بازه‌های زمانی با قیمت انرژی بالا دشارژ شوند. عمل دشارژ باعث منفی شدن بار کل ترانسفورماتور بین ساعت‌های ۱۶:۰۰ تا ۱۸:۳۰ می‌شود؛ زیرا تمامی خودروها بارهای پایه را جبران کرده و سپس به شبکه انرژی تزریق می‌کنند. اما عمل شارژ اضافی که به منظور پیاده کردن حالت V2G انجام می‌شود، باعث یک افزایش بزرگ در ضریب استهلاک کل می‌شود. نهایتاً این موضوع باعث کاهش عمر ترانسفورماتور خواهد شد. در مقابل همان‌طور که در شکل (۷-ب) آورده شده، مدیریت متمرکز نهاد تجمیع‌کننده در طول بازه‌های شبانه، بار ترانسفورماتور را به‌طور نسبی ثابت نگه می‌دارد که در نتیجه ضریب استهلاک کل کمتری خواهیم داشت. در این حالت نیز جهت رسیدن به ضریب استهلاک پایین، نهاد تجمیع‌کننده باید سود معامله‌گری مصرف‌کننده‌ها را کاهش دهد. آخرین حالت عملیاتی خودروها، حالت V2H است. در این حالت خودروها باتری خود را به منظور جبران بارهای پایه مصرف‌کننده دشارژ می‌کنند ولی توانایی تزریق توان به شبکه را ندارند. شکل (۸) بار کل و ضریب استهلاک را برای استراتژی‌های غیرمتمرکز و متمرکز به ترتیب در (الف) و (ب) نشان می‌دهد. عمل V2H مشابه عمل V2G است، با این تفاوت که در هر دو استراتژی متمرکز و غیرمتمرکز ضریب استهلاک کل پایین است. در حالت V2H خودرو فقط به اندازه مورد نیاز برای جبران بار دشارژ می‌شود، اما در حالت V2G خودروها آزادی بیشتری جهت بهره‌بردن از معامله‌گری انرژی را دارند.



شکل (۷): ضریب استهلاک و بارگذاری ترانسفورماتور برای حالت فعال بودن شبکه به خودرو

Figure (7): Loading on the transformer and aging factor with V2G enabled for, a) Decentralized case, b) Centralized case

اساساً حالت V2G در مقایسه با حالت V2H آسیب وارد بر ترانسفورماتور را کاهش نمی‌دهد؛ زیرا بازه‌های زمانی با قیمت بالا (بازه‌هایی که مصرف‌کننده تمایل دارد عمل دشارژ را در آن‌ها انجام دهد) ممکن است با بازه‌هایی که میزان بار زیاد است (بازه‌هایی که در آن‌ها ضریب استهلاک را می‌توان به صورت مؤثری کاهش داد)، همزمان نباشند. با صرف نظر از نوع استراتژی، حالت V2H در مقایسه با حالت V2G تأثیر کمتری بر استهلاک ترانسفورماتور دارد ولی نمی‌توان حداکثر سود معامله‌گری را در این حالت به دست آورد.

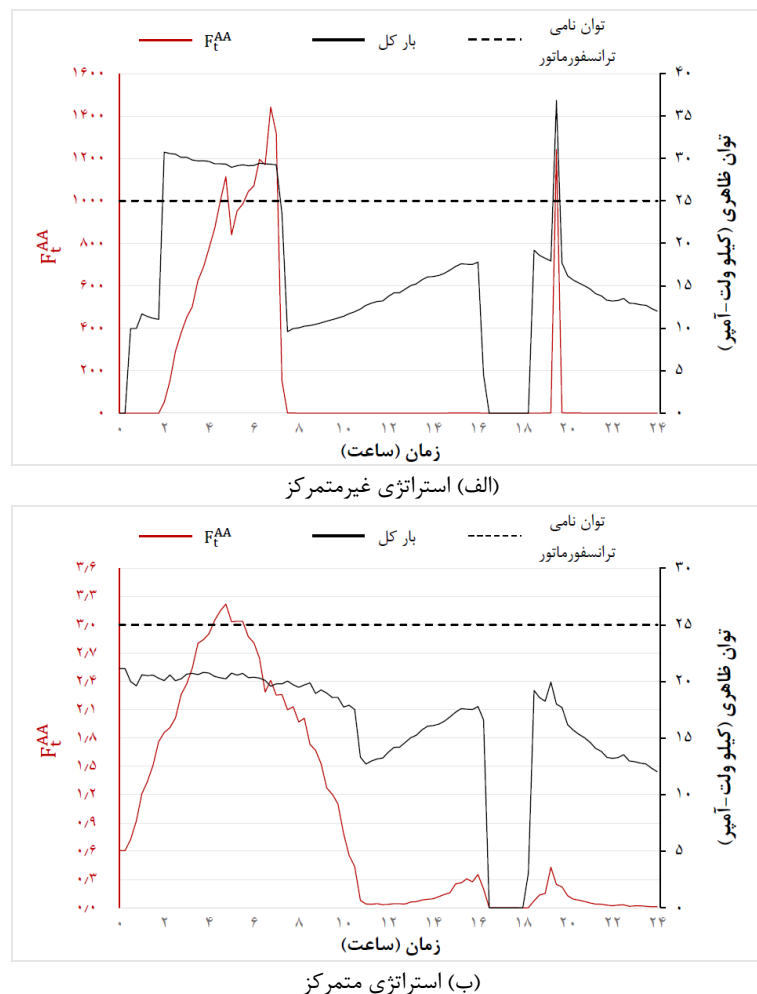
۲-۵- تأثیر مدل پیشنهادی متمرکز در عمر مورد انتظار ترانسفورماتور

استراتژی‌های متمرکز و غیرمتمرکز برای نفوذهای ۰ تا ۶ خودرو (یعنی صفر تا ۱۰۰ درصد) در یک بازه زمانی ۲۴ ساعته جهت مشاهده تأثیر آن بر عمر ترانسفورماتور و هزینه آسیب واردهی مرتبط به آن اجرا می‌شوند. برای انجام بررسی، در این قسمت فرض می‌شود آسیب وارد به ترانسفورماتور در یک مبنای روزانه اتفاق می‌افتد و با استفاده از معادله‌ی زیر یک مقدار تقریبی برای پیش‌بینی عمر ترانسفورماتور در مبنای سال به دست می‌آید:

$$TX^{life} = \frac{1}{365 \cdot \sum_{t \in T} LOL_t} \quad \forall t \in T \quad (21)$$

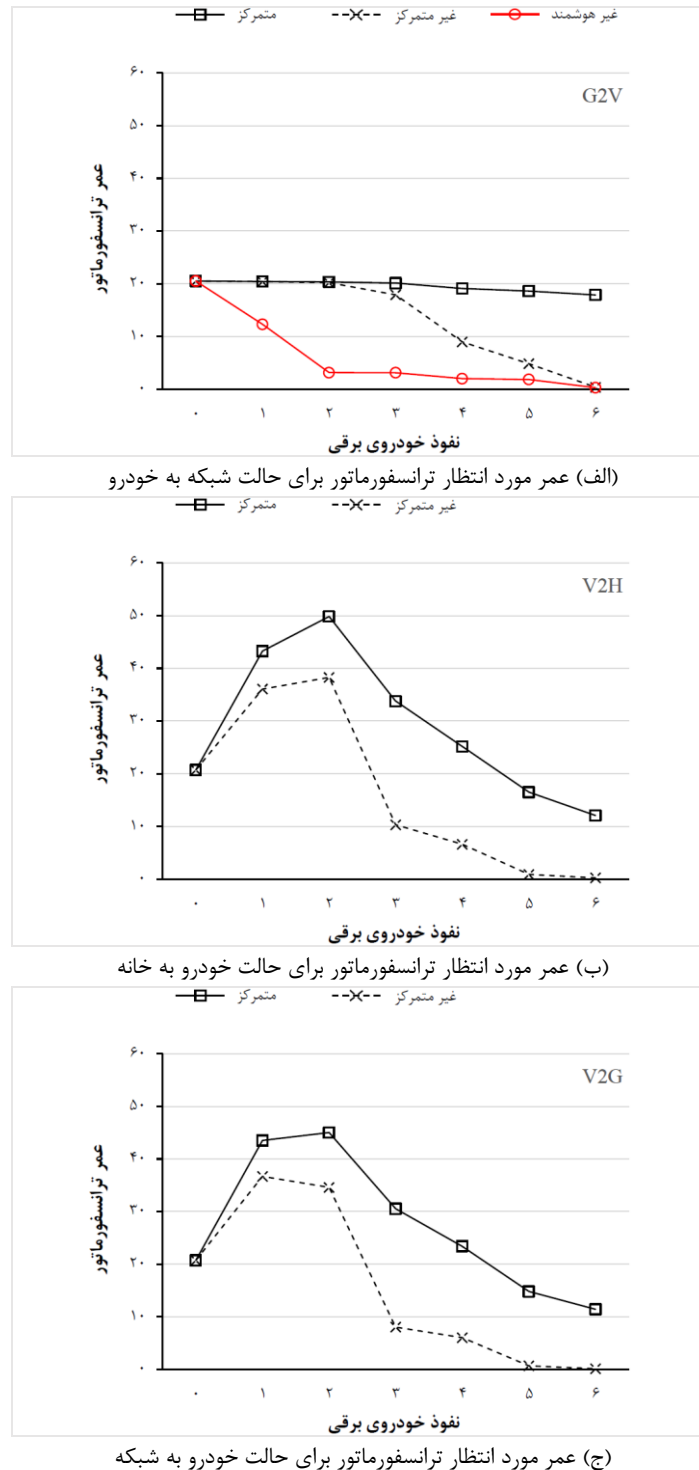
شکل (۹) عمر مورد انتظار ترانسفورماتور را برای حالت G2V در (الف)، حالت V2G در (ب) و حالت V2H در (ج) نشان می‌دهد. توجه شود که حالت G2V با شارژ غیرهوشمند، در شکل (۳) نشان داده شده که خودروها به محض ورود به خانه بدون

هیچگونه مدیریتی شارژ می‌شوند. با نفوذ خودروی صفر درصد، عمر مورد انتظار معمول طبق استاندارد IEEE C57.91، در عدد ۲۰/۵ سال پایدار است^{۱۴}. این موضوع در تمامی زیر مجموعه‌های شکل (۹) در نفوذ صفر درصدی خودرو قابل مشاهده است. در شکل (۹-الف) می‌توان دید که با افزایش نفوذ خودرو، عمر مورد انتظار ترانسفورماتور در شارژ غیرهوشمند به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد. زیرا همان‌طور که با رنگ قرمز در شکل (۳) نشان داده شده، خودروها توان شارژ خود را بر پیک بار پایه اضافه می‌کنند. در استراتژی غیرمتمرکز برای حالت G2V، عمر مورد انتظار معمول تا نفوذ ۵۰ درصد خودروها حفظ شده است؛ اما با افزایش میزان نفوذ، عمر ترانسفورماتور به شدت کاهش می‌یابد، زیرا در این استراتژی پیک بزرگی در بازه‌های زمانی کم‌قیمت ایجاد می‌شود [شکل (۶-الف)]. اما در استراتژی متمرکز با حالت G2V [شکل (۹-الف)]، عمر مورد انتظار ترانسفورماتور حتی با نفوذ بالای خودروها در نزدیکی ۲۰/۵ سال بوده و در نفوذ حداکثری، تنها به ۱۷/۸۷ سال کاهش پیدا می‌کند. عمر مورد انتظار برای حالت V2H در شکل (۹-ب) نشان داده شده است. از آنجایی که دشارژ در حالت V2H بارهای پایه را جبران می‌کند، در میزان نفوذ پایین عمر مورد انتظار ترانسفورماتور در هر دو استراتژی بیشتر از عمر معمول آن خواهد بود. این مسئله از این جهت سودمند است که مالک ترانسفورماتور افزایش طول عمر در تجهیزات خود را با هزینه‌ی غیربرگشتی دارد. با نفوذ بالاتر خودروها در استراتژی غیرمتمرکز، عمر ترانسفورماتور به دلیل شارژ اضافی خودروها در بازه‌های کم‌قیمت، شدیداً کاهش پیدا می‌کند [شکل (۹-ب)]. ولی در مقابل، در استراتژی متمرکز و با نفوذ ۱۰۰ درصد خودرو، عمر ترانسفورماتور ۱۲/۳۴ سال است. از مقایسه حالت V2G در شکل (۹-ج) با حالت V2H در شکل (۹-ب)، می‌توان دید که میزان افزایش عمر ترانسفورماتور در حالت V2H بیشتر است.



شکل (۸): ضریب استهلاک و بارگذاری ترانسفورماتور برای حالت فعال بودن خودرو به خانه

Figure (8): Loading on the transformer and aging factor with V2H enabled for, a) Decentralized case, b) Centralized case



شکل (۹): عمر مورد انتظار ترانسفورماتور در سه استراتژی متفاوت برای حالت‌های مختلف عملیاتی

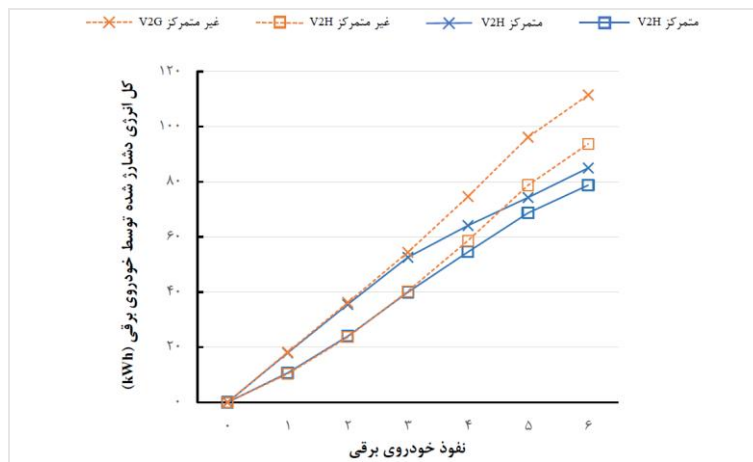
Figure (9): Transformer life expectancy in the dumb, centralized, and decentralized strategies under, a) G2V, b) V2H, c) V2G

زیرا حالت V2G در مقایسه با حالت V2H، بهره کامل از اختلاف قیمت در تعرفه برق را می‌برد و خودرو شارژ بیشتری در بازه‌های شبانه دریافت می‌کند. در استراتژی متمرکز تحت نفوذ ۱۰۰ درصد خودرو، عمر ترانسفورماتور ۱۱/۲۱ سال است که در مقایسه با V2H برای حداقل کردن هزینه آسیب وارد شده به ترانسفورماتور به‌صرفه نیست. با این حال حالت V2G بیشترین میزان سود معامله‌گری را برای مصرف‌کننده‌ها فراهم می‌کند و پایین‌ترین هزینه کلی عملیات را دارد. در شکل (۹-ب) و شکل (۹-ج) می‌توان دید که در بعضی از سطوح نفوذ، عمر ترانسفورماتور بیشتر از دو برابر شده است. این موضوع تحت شرایط

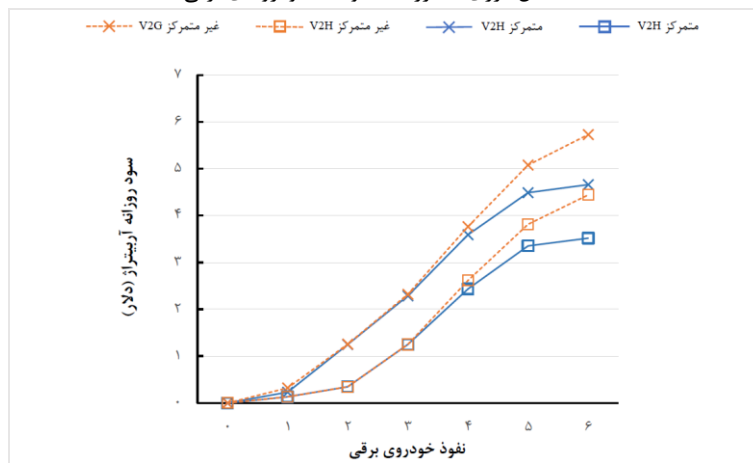
الکتريکی و ویژگی‌های دمایی ترانسفورماتور از نظر فنی امکان‌پذیر است. با این حال فاکتورهای خارجی دیگر نظیر طوفان، خوردگی و زنگ‌زدگی و ... ممکن است به عنوان یک فاکتور محدودکننده در این افزایش عمر عمل کنند که آنالیز این فاکتورها خارج از حوزه کاری این مقاله است.

۳-۵- تبادل میان آسیب وارد به ترانسفورماتور و سود مصرف‌کننده

در استراتژی متمرکز وجود تبادل بین حداکثر سود معامله‌گری مصرف‌کننده و حداقل هزینه خسارت وارد به ترانسفورماتور، کاملاً واضح است. شکل (۱۰) کل انرژی دشارژ توسط خودروها و سود و ضرر کلی برای حالت‌های عملیاتی V2H و V2G را نشان می‌دهد. سود کلی از کم کردن کل هزینه انرژی شارژ از سود کل دشارژ به دست می‌آید. همچنین شکل (۱۱) هزینه روزانه خسارت وارد به ترانسفورماتور را برای هر دو استراتژی با نفوذ مختلف خودروها نشان می‌دهد. در شکل (۱۰-الف) می‌توان دید که انرژی کل دشارژ شده توسط خودروها در استراتژی غیرمتمرکز نسبت به متمرکز بیشتر است. در نتیجه سود معامله‌گری نیز مطابق شکل (۱۰-ب)، در استراتژی غیرمتمرکز بیشتر است. دلیل این موضوع بهره‌گیری مصرف‌کننده‌ها از پتانسیل کامل معامله‌گری با چشم‌پوشی از ترانسفورماتور است. در نفوذهای پایین خودرو (کمتر از ۴ خودرو) استراتژی‌های غیرمتمرکز و متمرکز تفاوت ناچیزی در شارژ کل خودرو و سود معامله‌گری خواهند داشت، زیرا نهاد تجمیع‌کننده می‌تواند از خودروهای برقی کمتر متصل به ترانسفورماتور، جهت تهیه پروفایل شارژ و دشارژ استفاده کند.



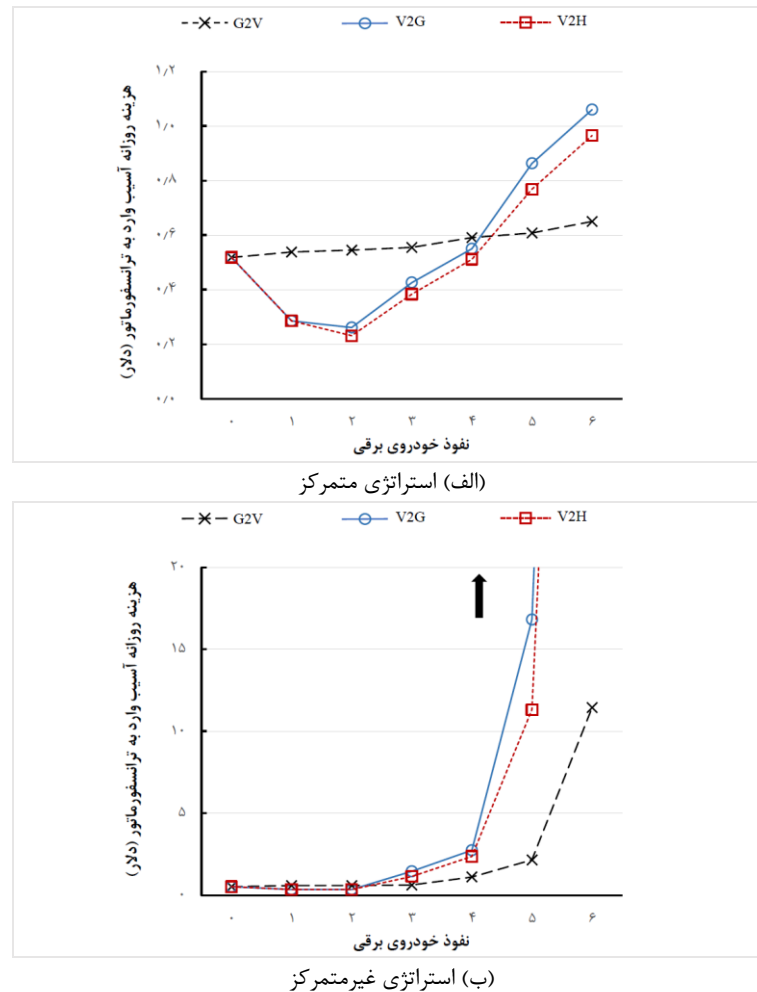
الف) کل انرژی دشارژ شده توسط خودروهای برقی



ب) سود و ضرر معامله‌گری روزانه

شکل (۱۰): کل انرژی دشارژ شده توسط خودروهای برقی و سود و ضرر معامله‌گری روزانه در استراتژی‌های غیرمتمرکز و متمرکز و برای حالت‌های عملیاتی خودرو به شبکه و خودرو به خانه

Figure (10): For different strategies and modes of operation (V2G, V2H), a) Total EV discharge, b) Arbitrage daily profit/loss



شکل (۱۱): هزینه روزانه آسیب وارد به ترانسفورماتور تحت میزان نفوذ مختلف خودروهای برقی

Figure (11): Daily transformer damage cost with varying EV penetration for the, a) Centralized strategy, b) Decentralized strategy

این کار هم سود معامله‌گری داشته و هم هزینه خسارت وارد به ترانسفورماتور را کاهش می‌دهد. به‌علاوه توانایی دشارژ خودرو در ساعت‌های پیک بار، هزینه آسیب وارد به ترانسفورماتور را به‌طور کلی در مقایسه با حالت G2V کاهش می‌دهد [شکل (۱۱)]. با این حال در استراتژی متمرکز با افزایش نفوذ، شارژ اضافی خودروها آسیب بیشتری به ترانسفورماتور وارد می‌کند. بنابراین این استراتژی شروع به محدود کردن فعالیت‌های معامله‌گری می‌کند که در شکل (۱۰-ب) نشان داده شده است. این محدودسازی دشارژ نهایتاً سود معامله‌گری را در عوض حفظ طول عمر ترانسفورماتور کاهش می‌دهد. تحت نفوذ ۱۰۰ درصد خودرو، سود کل معامله‌گری روزانه در حالت V2G و در استراتژی‌های غیرمتمرکز و متمرکز به ترتیب ۵/۷۲ دلار و ۴/۶۶ دلار هستند. همچنین انتظار از عمر ترانسفورماتور در دو استراتژی به ترتیب ۰/۱ سال و ۱۱/۴۱ سال هستند. حالت متمرکز می‌تواند در ازای کاهش ۱/۰۶ دلاری از سود معامله‌گری، افزایش دو رقمی در عمر مورد انتظار از ترانسفورماتور را ایجاد کند.

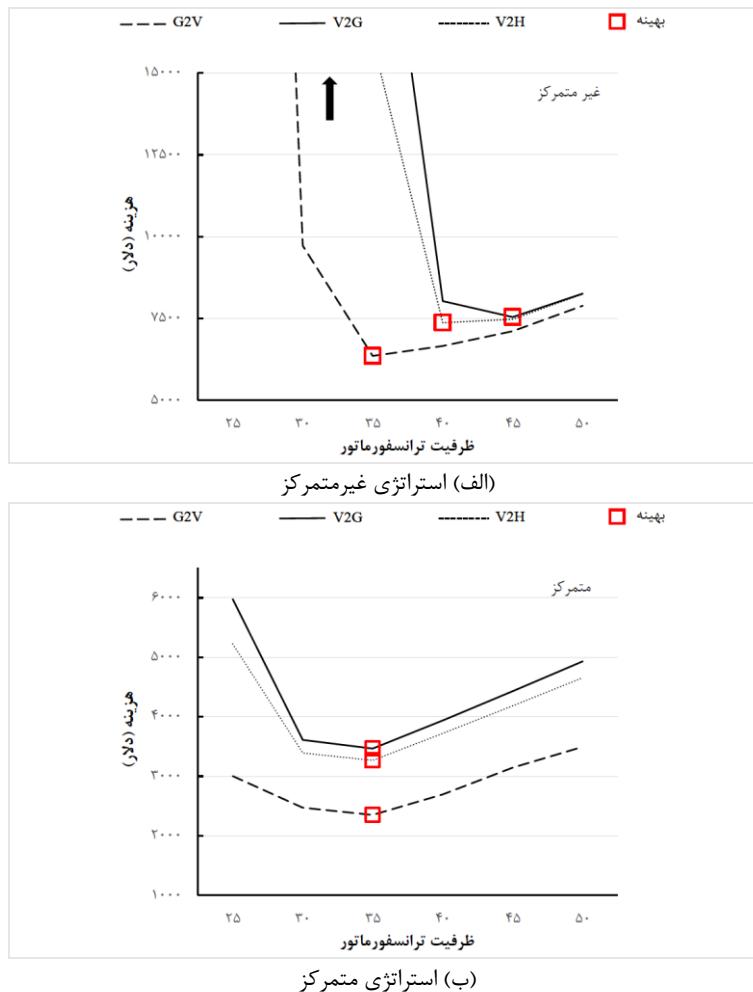
۴-۵- تعیین مقدار ظرفیت بهینه برای ترانسفورماتور جایگزین

زمانی که ترانسفورماتور ۲۵ کیلوولت-آمپر به آخر عمر خود می‌رسد، مالک ترانسفورماتور باید در مورد ظرفیت نامی ترانسفورماتور جایگزین تصمیم‌گیری کند. جهت این امر یک بهینه‌سازی روی ظرفیت‌های (S) برابر ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵ و ۶۰ کیلوولت-آمپر انجام می‌گیرد. هزینه زمان حال جایگزین دائمی ۳۰ با استفاده از ۵ درصد میزان سود سالانه محاسبه می‌شود [۳۰]. این رویکرد هزینه جایگزینی ترانسفورماتور و تعداد دفعات جایگزین کردن را متعادل می‌سازد. شکل (۱۲-الف) استراتژی غیرمتمرکز و شکل (۱۲-ب) استراتژی متمرکز را در حالت‌های عملیاتی G2V، V2G و V2H برای نفوذ ۱۰۰ درصد نشان می‌-

دهند. با در نظر گرفتن بارهای روی ترانسفورماتور [شکل‌های (۶) الی (۸)] و تغییر دادن ظرفیت آن، می‌توان دید که به علت عدم هماهنگی بین مصرف‌کننده‌ها، هزینه زمان حال جایگزینی دائمی ترانسفورماتور در استراتژی غیرمتمرکز بسیار بیشتر از متمرکز است. ظرفیت بهینه ترانسفورماتور بدون در نظر گرفتن حالت‌های عملیاتی در استراتژی متمرکز ۳۵ کیلوولت-آمپر و در استراتژی غیرمتمرکز بین ۳۵ کیلوولت-آمپر تا ۴۵ کیلوولت-آمپر تغییر کرده و در حالت V2G نیز نیاز به بیشترین ظرفیت را دارد.

۵-۵- تعیین سود بالقوه انتقال از استراتژی غیرمتمرکز به متمرکز

نهاد تجمیع‌کننده برای ایجاد یک مورد تجاری، باید میزان سود بالقوه انتقال از استراتژی غیرمتمرکز به متمرکز را تعیین کند. در شکل (۱۰-ب) می‌توان دید که مصرف‌کننده‌ها سود معامله‌گری بیشتری در استراتژی غیرمتمرکز در مقایسه با متمرکز به دست می‌آورند. در مقابل مالک ترانسفورماتور طول عمر بیشتری برای ترانسفورماتور در استراتژی متمرکز دارد. نهاد تجمیع‌کننده می‌تواند در مورد دریافت بخشی از سود حاصل افزایش طول عمر ترانسفورماتور و پرداخت سهمی از این سود به عنوان جبران سود کاهش‌ی معامله‌گری مصرف‌کننده، مذاکره کند. هزینه ترانسفورماتور با ظرفیت بهینه برای جایگزینی بر اساس عمر ترانسفورماتور ۲۵ کیلوولت-آمپر مطابق شکل (۹) و نرخ بهره ۵ درصد کاسته شده است.



شکل (۱۲): هزینه جایگزینی دائمی ترانسفورماتور در حالت‌های عملیاتی خودرو به شبکه، خودرو به خانه و شبکه به خودرو (نفوذ ۱۰۰ درصد خودرو - ۶ عدد خودرو)

Figure (12): Perpetual replacement cost of transformers for G2V, V2G, and V2H operations (100% Ev penetration- 6 EVs) in, a) Decentralized strategie, b) Centralized strategie

Table (2): Decentralized to centralized annualized benefits
جدول (۲): سود سالانه انتقال از استراتژی غیرمتمرکز به متمرکز

حالت عملیاتی	تعداد خودرو	سود حاصل از سرمایه‌گذاری معوق (دلار)	سود معامله‌گری مصرف‌کننده (دلار)	حداکثر سود بالقوه (دلار)
G2V	۱	۰/۱۶	-۰/۸	۰/۸
	۴	۲۷۱	-۲۱/۴	۲۴۹/۶
	۶	۶۴۰۲	۶۵	۶۳۳۷
V2H	۱	۱۰/۸	-۴/۱	۶/۷
	۴	۸۰۴	-۱۱۴	۶۹۰
	۶	۵۴۰۱۷	-۶۳۲	۵۳۳۸۵
V2G	۱	۸/۹	-۵/۶	۳/۳
	۴	۱۱۱۹	-۱۴۴	۹۷۸
	۶	۷۳۴۵۱	-۶۶۴	۷۲۷۸۷

برای مثال اگر ترانسفورماتور ۲۵ کیلوولت-آمپر در ۱۰ سال به آخر عمرش برسد، یک ترانسفورماتور جایگزین باید نصب گردد و هزینه حال آن ۶۱ درصد از هزینه زمان آینده خواهد بود. هزینه زمان حال در استراتژی متمرکز از غیرمتمرکز کم می‌شود تا سود حاصل از سرمایه‌گذاری معوق جهت انتقال به استراتژی متمرکز به دست آید. این کار سود مالک ترانسفورماتور را نشان می‌دهد. در مقابل نهاد تجمیع‌کننده باید میزان سود (در واقع هزینه) را برای مصرف‌کننده‌ها به منظور انتقال به استراتژی متمرکز تعیین کند. این سود با استفاده از تفاوت درآمد معامله‌گری سالانه در استراتژی متمرکز و غیرمتمرکز محاسبه می‌شود. در ستون اول و دوم جدول (۲)، این سودها برای حالت‌های مختلف عملیاتی و نفوذهای مختلف خودرو نشان داده شده‌اند. ستون آخر حداکثر سودی است که نهاد تجمیع‌کننده می‌تواند به دست آورد که از جمع سود مالک ترانسفورماتور و سود معامله‌گری مصرف‌کننده محاسبه می‌شود. سود سرمایه‌گذاری از طریق نشان دادن هزینه جایگزینی ترانسفورماتور قبلی با رویکرد پرداخت سالیانه معادل به صورت سالانه محاسبه می‌شود^{۳۰}. از جدول (۲) می‌توان دید که سود مالک ترانسفورماتور در حالت V2G و نفوذ ۱۰۰ درصد خودروها در بالاترین حد است. دلیل این مسئله این است که در استراتژی غیرمتمرکز مصرف‌کننده‌ها حداکثر قابلیت استفاده از خودرو جهت معامله‌گری را دارند که شدیداً به ترانسفورماتور آسیب می‌زند. در مقابل استراتژی متمرکز از اکثر این آسیب‌ها اجتناب می‌کند. لذا نهاد تجمیع‌کننده وضعیت بسیار بهتری برای مذاکره با صاحب ترانسفورماتور دارد. با این حال با نفوذهای پایین خودرو (۱ الی ۴ خودرو) سود سالانه حاصل از جایگزینی معوق، بسیار کمتر است. در این صورت با در نظر گرفتن هزینه کنترل و تجهیز کردن این خودروها جهت پیاده‌سازی استراتژی متمرکز، شاید نهاد تجمیع‌کننده مورد تجاری قوی در اختیار نداشته باشد. سود معامله‌گری مصرف‌کننده [ستون دوم جدول (۲)] در تمام موارد منفی می‌باشد. زیرا در استراتژی غیرمتمرکز مصرف‌کننده قادر به ایجاد سود بیشتری از معامله‌گری انرژی است. بنابراین مصرف‌کننده‌ها به دلیل کاهش سودشان، باید توسط نهاد تجمیع‌کننده جبران هزینه شوند. حداکثر پتانسیل سود (ستون آخر) نشان دهنده‌ی میزان پول در دسترس برای مورد تجاری نهاد تجمیع‌کننده است. سهمی از این مبلغ باید به مصرف‌کننده‌ها داده شود تا اجازه‌ی کنترل خودروهای خود را به سود نهاد تجمیع‌کننده بدهند. مالک ترانسفورماتور نیز تمایل به حفظ مقداری از سود خود خواهد داشت. با استفاده از یک تجزیه و تحلیل مانند نمونه‌ای که در جدول (۲) آورده شده، نهاد تجمیع‌کننده می‌تواند در مورد قراردادهایی با مالک تجهیزات ترانسفورماتور و مصرف‌کننده‌ها جهت سود تمامی طرفین مذاکره نماید.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل متمرکز ایجاد شده است که ضمن اطمینان از تامین انرژی مورد نیاز خودروها، بهینه‌سازی چندهدفی کاهش عمر ترانسفورماتور و معامله‌گری شارژ و دشارژ خودروها را انجام می‌دهد. این مدل را می‌توان توسط مالک ترانسفورماتور

(اپراتور سیستم توزیع یا یک نهاد سلسله مراتبی جداگانه) پیاده‌سازی کرد. این مدل دمای ترانسفورماتور، ضریب پیشرفت استهلاک و کاهش عمر ترانسفورماتور را لحاظ می‌کند. در مقابل جهت مقایسه‌ی نتایج، یک مدل غیرمتمرکز نیز معرفی شده است. مدل غیرمتمرکز توسط سیستم مدیریت مصرف‌کننده‌ها یا شارژر هوشمند اجرا شده و سود مصرف‌کننده‌ها را بدون در نظر گرفتن ترانسفورماتور بهینه‌سازی می‌کنند. بر اساس نتایج به‌دست آمده با افزایش نفوذ خودروها ترانسفورماتور کاهش عمر مرتبط کمتری را دارد، اگر و تنها اگر سیستم در تمامی حالت‌های عملیاتی به صورت متمرکز مدیریت شود. در مقابل و خصوصاً با نفوذ حداکثری خودروها در استراتژی غیرمتمرکز، تنها کسری از عمر ترانسفورماتور باقی می‌ماند و باید جایگزین شود. مصرف‌کنندگان در استراتژی غیرمتمرکز سود بیشتری از معامله‌گری انرژی در مقایسه با استراتژی متمرکز دریافت می‌کنند. نهاد تجمیع‌کننده در اصل معامله‌گری انرژی را به منظور حفظ و حتی افزایش طول عمر ترانسفورماتور محدود می‌کند و کاهش سود معامله‌گری مصرف‌کننده‌ها، بیش از آن توسط سود مالک ترانسفورماتور جبران می‌شود. بنابراین شرایطی ایجاد می‌شود که در آن نهاد مدیریتی تجمیع‌کننده می‌تواند هزینه‌های مصرف‌کننده‌ها و مالک ترانسفورماتور را به طور همزمان کاهش داده و همچنان یک مورد تجاری پایدار داشته باشد. اگر مالک ترانسفورماتور از مدیریت متمرکز صرف‌نظر کند، هر مصرف‌کننده خود بهینه‌سازی غیرمتمرکز را انجام داده و مالک ترانسفورماتور باید به صورت مکرر ترانسفورماتور را تعویض کند و یا ترانسفورماتور با ظرفیت بیشتر را نصب نماید.

سیاسگزاری

این مقاله مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد در دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از همکاران حوزه پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی و داوران محترم که ما را در انجام و ارتقای کیفی این مقاله یاری نموده‌اند، اعلام نمایند.

References

مراجع

- [1] S. Gaikwad, H. Mehta, "Investigation of effects of increasing EV penetration on distribution transformers in modi ganpati area, Pune", Peoceding of the IEEE/EPEC, pp. 1-5, Edmonton, AB, Canada, Nov. 2020 (doi: 10.1109/EPEC48502.2020.9319915).
- [2] A. Kriukov, M. Gavrilaş, O. Ivanov, G. Grigoraş, B.C. Neag, F. Scarlatache, "Novel decentralized voltage-centered EV charging control algorithm using DSRC system in low voltage distribution networks", IEEE Access, vol. 9, pp. 164770-164800, Dec. 2021 (doi: 10.1109/ACCESS.2021.3132419).
- [3] H. Cheng, H. Chen, Q. Wang, "An integrated drive power converter topology for plug-in hybrid electric vehicle with G2V, V2G and V2H functions", Proceeding of the IEEE/ICEMS, pp. 1-6, Harbin, China, Aug. 2019 (doi: 10.1109/ICEMS.2019.8921828).
- [4] V. Zdraveski, P. Krstevski, J. Vuletic, J. Angelov, A.K. Mateska, M. Todorovski, "Analyzing the impact of battery electric vehicles on distribution networks using nondeterministic model", Proceeding of the IEEE/EUROCON, pp. 1-7, Novi Sad, Serbia, July 2019 (doi: 10.1109/EUROCON.2019.8861984).
- [5] Y. Liu, X. Li, Y. Liang, S. Zeng, M. Li, "Assessment of impacts on integration of disorderly EV charging load to flexible distribution network", Proceeding of the IEEE/CPEEE, pp. 139-142, Shiga, Japan, Feb. 2021 (doi: 10.1109/CPEEE51686.2021.9383357).
- [6] M. Bunn, B.C. Seet, C. Baguley, D. Martin, "A thermally-based dynamic approach to the load management of distribution transformers", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 37, no. 6, pp. 5124-5132, Dec. 2022 (doi: 10.1109/TPWRD.2022.3171204).
- [7] A. Abaspahic, M. Saric, J. Hivziefendic, T. Konjic, "Impact of complementary integration of electric vehicle charging stations and photovoltaics on voltage quality and voltage stability", Proceeding of the IEEE/INFO-TEH, pp. 1-6, East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, Mar. 2021 (doi: 10.1109/INFO-TEH51037.2021.94-00695).
- [8] K. Prakash, M. Ali, M.R. Islam, H. Mo, D. Dong, H. Pota, "Optimal coordination of photovoltaics and electric vehicles for ancillary services in low voltage distribution networks", Proceeding of the IEEE/ICEMS, pp. 1-6, Gyeongju, Korea, Nov. 2021 (doi: 10.23919/ICEMS52562.2021.9634429).

- [9] J.E. Cardona, J.C. López, M.J. Rider, “Decentralized electric vehicles charging coordination using only local voltage magnitude measurements”, *Electric Power System Research*, vol. 161, pp. 139-151, Aug. 2018 (doi: 10.1016/j.epr.2018.04.003).
- [10] J.M. Sexauer, K.D. McBee, K.A. Bloch, “Applications of probability model to analyze the effects of electric vehicle chargers on distribution transformers”, *IEEE Trans. on Power System*, vol. 28, no. 2, pp. 847–854, May. 2013 (doi: 10.1109/EPEC.2011.6070213).
- [11] H. Turker, S. Bacha, D. Chatroux, A. Hably, “Low-voltage transformer loss-of-life assessments for a high penetration of plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs)”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 27, no. 3, pp. 1323–1331, July 2012 (doi: 10.1109/TPWRD.2012.2193423).
- [12] A.D. Hilshey, P.D.H. Hines, P. Rezaei, J.R. Dowds, “Estimating the impact of electric vehicle smart charging on distribution transformer aging”, *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 905–913, June 2013 (doi: 10.1109/TSG.2012.2217385).
- [13] H. Turker, S. Bacha, A. Hably, “Rule-based charging of plugin electric vehicles (PEVs): Impacts on the aging rate of low-voltage transformers”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 29, no. 3, pp. 1012–1019, June 2014 (doi: 10.1109/TPWRD.2013.2292066).
- [14] D. Kothona, A.S. Bouhouras, I. Skalidi, P. Gkaidatzis, N. Poulakis, G.C. Christoforidis, “EV flexibility contribution to distribution network operation”, *Proceeding of the IET/MEDPOWER*, pp. 348-353, Online Conference, Nov. 2020 (doi: 10.1049/icp.2021.1258).
- [15] O. Sundstrom, C. Binding, “Flexible charging optimization for electric vehicles considering distribution grid constraints”, *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 26–37, Mar. 2012 (doi: 10.1109/TSG.2-011.2168431).
- [16] H. Faria, H. Voos, “Heuristic procedure for the centralized control of EV charging in LV networks”, *IEEE Latin America Trans.*, vol. 17, no. 3, pp. 453–461, Mar. 2019 (doi: 10.1109/TLA.2019.8863316).
- [17] T. Rahman, Y. Xu, Z. Qu, “Continuous-domain real-time distributed ADMM algorithm for aggregator scheduling and voltage stability in distribution network”, *IEEE Trans. on Automation Science and Engineering*, vol. 19, no. 1, pp. 60–69, Jan. 2022 (doi: 10.1109/TASE.2021.3072932).
- [18] S. Cheng, C. Gu, S. Li, J. Li, R. Wei, Y. Zhu, “EV flexibility trading in the electricity market”, *Proceeding of the IET/CIREN*, Porto, Portugal, pp. 89-93, June 2022 (doi: 10.1049/icp.2022.0669).
- [19] R.J. Bessa, M.A. Matos, F.J. Soares, J.A.P. Lopes, “Optimized bidding of an EV aggregation agent in the electricity market”, *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 443–452, Mar. 2012 (doi: 10.1109/TSG-2011.2159632).
- [20] Q. Gong, S. Midlam-Mohler, V. Marano, G. Rizzoni, “Distribution of PEV charging resources to balance transformer life and customer satisfaction”, *Proceeding of the IEEE/IEVC*, Greenville, SC, USA, pp. 1–7, Mar. 2012 (doi: 10.1109/IEVC.2012.6183201).
- [21] J. Jargstorf, K. Vanthournout, T. De Rybel, and D. Van Hertem, “Effect of demand response on transformer lifetime expectation”, *Proceeding of the IEEE/ISGTE*, pp. 1–8, Berlin, Germany, Oct. 2012 (doi: 10.1109/ISGTEurope.2012.6465805).
- [22] M. Humayun, M.Z. Degefa, A. Safdarian, M. Lehtonen, “Utilization improvement of transformers using demand response,” *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 30, no. 1, pp. 202–210, Feb. 2015 (doi: 10.1109/TPWRD.2014.2325610).
- [23] O. Sadeghian, A. Oshnoei, B. Mohammadi-ivatloo, V. Vahidinasab, A. Anvari-Moghaddam, “A comprehensive review on electric vehicles smart charging: Solutions, strategies, technologies, and challenges”, *Journal of Energy Storage*, vol. 54, Article Number: 105241, Oct. 2022 (doi: 10.1016/j.est.2022.105241).
- [24] H.M. Abdullah, A. Gastli, L. Ben-Brahim, “Reinforcement learning based EV charging management systems– A review”, *IEEE Access*, vol. 9, pp. 41506–41531, Mar. 2021 (doi: 10.1109/ACCESS.2021.3064354).
- [25] M.R. Sarker, M.A. Ortega-Vazquez, D.S. Kirschen, "Optimal coordination and scheduling of demand response via monetary incentives", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 6, no. 3, pp. 1341–1352, May 2015 (doi: 10.1109/TSG.2014.2375067).
- [26] D. Arthur, S. Vassilvitskii, “k-means++: The advantages of careful seeding”, *Proceeding of the ACM-SIAM*, pp. 1027-1035, New Orleans, LA, USA, Jan. 2007.
- [27] K. Sun, M.R. Sarker, M. A. Ortega-Vazquez, “Statistical characterization of electric vehicle charging in different locations of the grid”, *Proceeding of the IEEE/PESGM*, pp. 1–5, Denver, CO, USA, July 2015 (doi: 10.1109/PESGM.2015.7285794).
- [28] M. Humayun, A. Safdarian, M.Z. Degefa, M. Lehtonen, “Demand response for operational life extension and efficient capacity utilization of power transformers during contingencies”, *IEEE Trans. on Power System*, vol. 30, no. 4, pp. 2160–2169, July 2015 (doi: 10.1109/TPWRS.2014.2358687).
- [29] P.J. Balducci, L.A. Schienbein, T.B. Nguyen, D.R. Brown, E.M. Fatherlrahman, “An examination of the costs and critical characteristics of electric utility distribution system capacity enhancement projects”, *Proceeding of the IEEE/PES*, pp. 78-86, Dallas, TX, USA, Oct. 2004 (doi: 10.1109/TDC.2006.1668461).

- [30] H.A. Gil, G. Joos, “On the quantification of the network capacity deferral value of distributed generation”, IEEE Trans. on Power System, vol. 21, no. 4, pp. 1592–1599, Nov. 2006 (doi: 10.1109/TPWRS-2006.881158).

ضمیمه

متغیرها و پارامترهای مدل

متغیر	تعریف
$\alpha_{t,v}$	در دسترس بودن و قابلیت اتصال خودروی الکتریکی به مدار خانه جهت شارژ یا دشارژ، $\alpha_{t,v} \in \{0,1\}$
β	عمر معمول عایق ترانسفورماتور
$\Delta\theta_t^{HST}$	اختلاف دمای داغ‌ترین نقطه‌ی سیم‌پیچی و دمای روغن ترانسفورماتور
$\Delta\theta_t^{HST,R}$	اختلاف دمای نقطه داغ و روغن ترانسفورماتور در توان نامی
$\Delta\theta_t^{HST,U}$	اختلاف دمای نهایی داغ‌ترین نقطه‌ی سیم‌پیچی و روغن ترانسفورماتور
$\Delta\theta_t^{TO}$	اختلاف دمای روغن ترانسفورماتور و محیط
$\Delta\theta_t^{TO,R}$	اختلاف دمای روغن ترانسفورماتور و محیط در بار نامی
$\Delta\theta_t^{TO,U}$	اختلاف دمای نهایی روغن ترانسفورماتور و دمای محیط
Δt	فاصله زمانی
η_v^{dsg} و η_v^{chg}	بازده شارژ و بازده دشارژ
θ_t^A	دمای محیط
θ_t^{HST}	دمای داغ‌ترین نقطه‌ی سیم‌پیچی ترانسفورماتور
θ_t^{HST}	حداکثر مقدار دمای داغ‌ترین نقطه‌ی سیم‌پیچی ترانسفورماتور
ξ_v	کل انرژی مورد نیاز جهت سفر و حمل و نقل خودروی الکتریکی
π_t	تعرفه برق
τ^{TO}	ثابت زمانی روغن ترانسفورماتور
τ^w	ثابت زمانی سیم‌پیچی
F_t^{AA}	ضریب پیشرفت استهلاک ترانسفورماتور
k_t	نسبت بارگذاری ترانسفورماتور
LOL_t	کاهش عمر ترانسفورماتور
m	پارامتر خنک‌سازی ترانسفورماتور که یک پارامتر تجربی می‌باشد
n	پارامتر خنک‌سازی ترانسفورماتور که یک پارامتر تجربی می‌باشد
P_t^{base}	مصرف پایه
$P_{t,v}^{dsg}$ و $P_{t,v}^{chg}$	توان شارژ و توان دشارژ
P^{limit}	محدوده‌ی توان خانه
P_v^{Max}	حداکثر توان شارژ و دشارژ خودروی الکتریکی
R	نسبت بین تلفات در ظرفیت نامی و بی‌باری ترانسفورماتور
$S_{t,v}$	برنامه حرکت خودروی الکتریکی $S_{t,v} \in \{0,1\}$
$soc_{t,v}$	سطح شارژ خودروی الکتریکی
soc_v^{init}	سطح شارژ اولیه‌ی خودروی الکتریکی
T	مجموعه‌ی کل بازه‌های زمانی
t	بازه زمانی
TX^{base}	کل بار پایه مصرف‌کننده‌ها
TX^{cost}	قیمت ترانسفورماتور
TX^{life}	عمر ترانسفورماتور
TX_t^{load}	بار روی ترانسفورماتور
TX^{price}	قیمت هر کیلو وات آمپر ترانسفورماتور
TX^{rating}	ظرفیت نامی ترانسفورماتور
V	مجموعه کل خودروهای الکتریکی
v	خودروی الکتریکی

1. Greenhouse gases
2. Internal combustion engine
3. Fossil fuel
4. Grid-to-vehicle
5. Vehicle-to-home
6. Vehicle-to-grid
7. "Global EV Outlook: Technology Report", Apr. 2021. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>
8. Post process
9. Loss-of-life
10. Decentralized
11. Centralized
12. Demand response
13. Arbitrage
14. IEEE Guide for loading mineral-oil-immersed transformers and step-voltage regulators, IEEE standard C57.91-2011, pp. 1-123, 2012.
14. Aging factor
15. Aggregator
16. Transformer life expectancy
17. Distribution system operator
18. Pecanstreet: Energy Dataport. <http://dataport.pecanstreet.org> (2015).
19. Gridlab-D Taxonomy Feeders, http://sourceforge.net/p/gridlab-d/code/HEAD/tree/Taxonomy_Feeders, 2015.
20. "National Household Travel Survey (NHTS) data", U.S. Dept. Transp., Federal Highway Admin., Nat. Household Travel Survey, Washington, DC, USA, Tech. Rep., 2009. www.nhts.ornl.gov
21. K-means
22. Dumb charging
23. Southern California Edison: Tariffs. www.sce.com/wps/portal/home/regulatory/tariff-books/rates-pricing-choices/business-rates, 2015.
24. Probability distribution function
26. D.H. Doughty, A. Pesaran, "Vehicle battery safety roadmap guidance", National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy, Washington, DC, USA, Tech. Rep. NREL/SR-5400-54404, 2012.
25. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). www.ncdc.noaa.gov/qclcd/QCLCD (2015).
26. Mixed integer nonlinear programming
29. Gams, Gams Documentation 38, Solver Manuals, Bonmin and BonminH. https://www.gams.com/latest/docs/S_BONMIN.html.
30. R.C. Moyer, J.R. McGuigan, R.P. Rao, Contemporary Financial Management. Stamford, CT, USA: Cengage Learn., 2014. books.google.com/books?id=pFQ8AwAAQBAJ.