ارائه روشی جدید به منظور بهینه‌سازی مدیریت شارژ و دشارژ PHEVها با هدف بهبود پارامترهای الکتریکی شبکه

رضا اسلامی[۱]، حامد نفیسی[۲] و سیدامیر حسینی[۳]

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی سهند تبریز-تبریز- ایران
eslami@sut.ac.ir
۲- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر-تهران- ایران
nafisi@aut.ac.ir
۳- گروه مهندسی برق- دانشکده فنی و مهندسی گلپایگان- اصفهان- ایران
hosseini.amir@gut.ac.ir

چکیده: **مشکلات مربوط به هزینه و آلایندگی سوخت‌های فسیلی موجب افزایش انگیزه در بهره‌برداری از خودروهای الکتریکی شده است. با این وجود، استفاده از این خودروها بدلیل بار الکتریکی مضاعفی که به شبکه برق تحمیل می‌کنند، با چالش همراه است. براین‌اساس در این مقاله روشی ارائه شده است که با مدیریت بهینه شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی هیبریدی (PHEV[1])، پارامترهای الکتریکی شبکه شامل تلفات و پروفیل ولتاژ بهبود یابند. مدیریت بهینه مدنظر مقاله حاضر، مدیریت همزمان توان اکتیو و راکتیو PHEVها را شامل می‌شود. بمنظور اجرای مدیریت بهینه، در این مقاله رفتار احتمالی مصرف‌کنندگان و PHEVها براساس فاکتورهای تاثیرگذار در آن‌ها مدلسازی شده است. با توجه به تعدد فاکتورهای مدنظر و عدم همگرایی مسئله توسط روش‌های عادی بهینه‌سازی، روش بهینه‌سازی دو مرحله‌ای پیشنهاد داده شده است که با مدیریت توان اکتیو و راکتیو PHEVها، امکان دستیابی به اهداف مدنظر را فراهم می‌کند. از مزیت‌های روش پیشنهادی می‌توان به کاهش حجم محاسبات با توجه به حل مساله در هر پله زمانی به صورت مستقل و در نتیجه کاهش زمان حل مساله بهینه‌سازی اشاره کرد. روش پیشنهادی با انجام تکرارهای مونت‌کارلو بر روی شش سناریوی مدیریت توان مختلف توسط نرم‌افزارهای GAMS و DIgSILENT بر روی شبکه واقعی ۲۰kV توزیع سیرجان در استان کرمان پیاده‌سازی شده است. نتایج حاصل از انجام سناریوهای مختلف نشان می‌دهند که مدیریت اعمالی بر شارژ و دشارژ PHEVها موجب صاف‌تر شدن پروفیل ولتاژ و کاهش تلفات شبکه گردیده است. بنابراین با استفاده از روش پیشنهادی، بار الکتریکی مضاعف تحمیل شده به شبکه توسط خودروهای برقی نه تنها باعث افزایش تلفات انرژی نخواهد شد، بلکه با مدیریت صحیح PHEVها، تلفات شبکه در مقایسه با عدم حضور آن‌ها کاهش خواهد یافت.**

واژه های کلیدی: تلفات انرژی- خودرو الکتریکی هیبریدی (PHEV)- ریزشبکه- مدیریت توان

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۷/۱۲/۲۶

نام نویسنده‌ی مسئول : رضا اسلامی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی سهند تبریز-تبریز- ایران

[1] Plug in Hybrid Electric Vehicle

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.6.7]

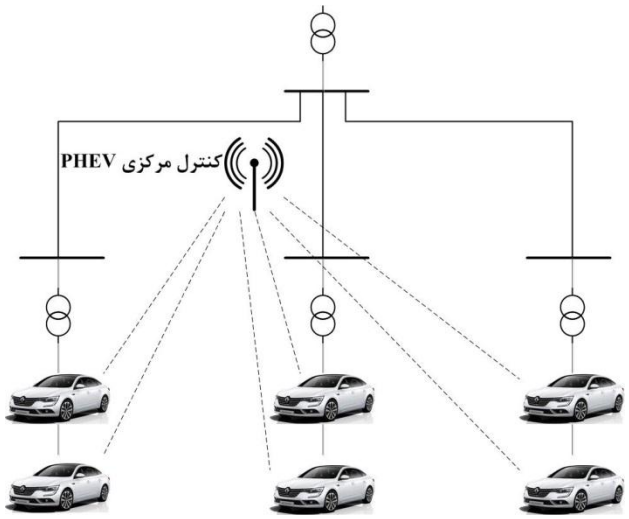
۱- مقدمه

سهم چشمگیر خودروهای شهری در آلودگی روز افزون شهرها، بالا بودن هزینه تامین و مصرف سوخت فسیلی برای این خودروها و همچنین پایین بودن بازده این نوع خودروها که تنها ۱۶ ٪ از انرژی ورودی خود را به انرژی حرکتی تبدیل می‌کنند، موجب شده است که خودروهای با سوخت فسیلی توجیه اقتصادی و زیست محیطی نداشته باشند. این مسائل از جمله مهمترین دلایل گرایش به سمت خودروهای الکتریکی است که در مقایسه با خودروهای دیزلی و بنزینی بسیار پربازده‌تر هستند [۱, ۲]. در واقع بررسی‌ها نشان می‌دهند که خودروهای برقی ۵۶٪ از انرژی ورودی را به انرژی حرکتی تبدیل می‌کنند. در این میان با توجه به رشد مصرف انرژی الکتریکی و افزایش هزینه‌های تولید آن، می‌بایست سازوکار کنترل و مدیریت این خودروها توسط صنعت برق حاکم شود [۳].

با توجه به افزایش استفاده از خودروهای الکتریکی هیبریدی (PHEV)، ضروری است که بستری فراهم شود تا هم از مواجه شدن شبکه قدرت با مشکلات ایجاد شده به دلیل حضور وسیع اینگونه بارها جلوگیری شود و هم امکان استفاده از این خودروها به عنوان بارهای کنترل‌پذیر جهت بهبود پارامترهای شبکه مهیا شود [۴]. پارامترهای مهمی که این خودروها در بهبود آن‌ها می‌توانند نقش بسزایی داشته باشند، کاهش تلفات شبکه و بهبود پروفیل ولتاژ است. در واقع اگرچه روش‌هایی چون انتخاب بهینه هادی‌ها [۵, ۶]، خازن‌گذاری [۷-۹]، جابایی تولیدات پراکنده [۱۰, ۱۱] و تغییر آرایش شبکه [۱۲, ۱۳] برای کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ در شبکه‌های توزیع و ریزشبکه‌ها پیشنهاد شده‌اند، اما در سالیان اخیر با پیشرفت تکنولوژی استفاده از PHEVها به عنوان بارهای قابل کنترل و ژنراتورهای کنترل‌پذیر، در رسیدن به این اهداف مدنظر قرار گرفته‌اند [۱۴].

دستیابی به اهداف بهبود پارامترهای شبکه (تلفات و پروفیل ولتاژ) با شارژ هماهنگ خودروهای الکتریکی محقق می‌گردد. در [۱۵] نشان داده شده است که شارژ غیر هماهنگ، نه‌تنها نمی‌تواند مزایای مدنظر را ایجاد نماید بلکه موجب افزایش پیک بار و تلفات شده و نیز ولتاژ و ضریب توان را کاهش می‌دهد. از سوی دیگر مدیریت بهینه شارژ با مدلسازی درست و دقیق مسئله و فاکتورهای تاثیرگذار بر آن ایجاد می‌شود. با این وجود تعدد فاکتورهای تاثیرگذار بر مدیریت بهینه شارژ موجب بزرگ شدن مسئله بهینه‌سازی و پیچیدگی آن می‌شود که با روش‌های عادی حل این مسائل، همگرا نخواهد شد. در [۱۶] روشی به منظور شارژ بهینه PHEV ارائه شده است که در آن با استفاده از مدل‌های واقعی باتری PHEV، نرخ مصرف برق توسط مشترکین در زمان‌های مختلف و داده های واقعی تقاضای خانوارها، مدلی برای سیستم در حالت عملکرد انتقال توان از خودرو به شبکه (V2G[1]) پیشنهاد شده است. همچنین در [۱۷] بهینه‌سازی هزینه شارژ خودروهای برقی اتصال به شبکه با درنظرگیری اثر پیری در حالت V2G انجام یافته است.

استفاده از مرکز کنترل مانند آنچه در شکل (۱) نشان داده شده است، راهکار پیشنهادی مطالعات [۱۸, ۱۹] برای حل مسئله کمینه کردن تلفات انرژی در یک شبکه وسیع با ضریب نفوذ بالای خودروها است. در این روش با توجه به آنکه تمامی خودروهای موجود در شبکه می‌بایستی با یک مرکز کنترل مرکزی در ارتباط باشند و تمامی اطلاعات مربوط به هر خودرو به این مرکز ارسال شود، بنابراین نیاز به یک شبکه مخابراتی بسیار گسترده با قابلیت ارسال و دریافت اطلاعات در ابعاد وسیع می‌باشد. همچنین در این مطالعات، مسئله بهینه‌سازی توسط روش‌های محدب حل می‌شود. با توجه به آنکه قیود مسئله ناشی از معادلات پخش بار، غیرمحدب می‌باشند، لذا امکان حل مسئله به کمک روش‌های محدب وجود ندارد.



شکل (۱): زیرساخت مخابراتی مورد نیاز برای کمینه کردن تلفات انرژی در روش‌های [۱۸, ۱۹]

براین‌اساس در این مقاله یک روش جدید بهینه‌سازی دو مرحله‌ای برای مدیریت بهینه شارژ و دشارژ PHEVها ارائه شده است. در این روش، مسئله بهینه‌سازی در دو مرحله حل می‌گردد. در مرحله اول مدیریت بهینه توان اکتیو این خودروها انجام می‌شود و در مرحله دوم مدیریت بهینه توان راکتیو آن‌ها انجام می‌شود. استفاده از روش بهینه‌سازی پیشنهادی، امکان ورود فاکتورهای تاثیرگذار بر مدیریت بهینه این خودروها را میسر می‌سازد که در مطالعات گذشته صورت پذیرفته در این حوزه، درنظر گرفته نشده‌اند. براین‌اساس در مقاله حاضر رفتار احتمالی مصرف‌کنندگان شبکه توزیع، رفتار احتمالی PHEVها، عملکرد در حالت V2G و عملکرد در حالت انتقال توان از شبکه به خودرو (G2V[2])، پیوسته در نظر گرفتن پارامترهای کنترلی خودروها شامل توان‌های اکتیو و راکتیو و قابلیت تزریق توان راکتیو به صورت همزمان در مدیریت بهینه شارژ PHEVها مدنظر قرار گرفته‌اند. روش جدید پیشنهادی بر روی شبکه ۲۰kV سیرجان در استان کرمان برای سناریوهای مختلف پیاده‌سازی شده است. نتایج حاصل از انجام

[1] Vehicle to Grid

[2] Grid to Vehicle

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.6.7]

سناریوهای مختلف نشان می‌دهند که مدیریت اعمالی بر شارژ و دشارژ PHEVها (توسط کنترل توان اکتیو و راکتیو آن‌ها)، موجب صاف‌تر شدن پروفیل ولتاژ و کاهش تلفات شبکه گردیده است.

ساختار این مقاله بدین شکل است. در بخش دوم، تابع هدف جدید پیشنهادی برای کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ با کنترل بهینه توان اکتیو و راکتیو PHEVها ارائه می‌شود. همچنین در این بخش روش بهینه‌سازی دو مرحله پیشنهادی جهت مدیریت بهینه شارژ و دشارژ این خودروها بمنظور نیل به هدف کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ ارائه خواهد شد. ارائه مدلی دقیق از بارهای شبکه و PHEVها با درنظر گرفتن عدم قطعیت‌های تاثیرگذار در آن‌ها از جمله دیگر موارد ارائه شده در بخش دوم مقاله حاضر است. در بخش سوم مقاله نیز، روش پیشنهادی بر روی یک شبکه نمونه در شش سناریوی مختلف پیاده‌سازی شده و نتایج مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته‌اند.

۲- روش پیشنهادی

۲-۱- تابع هدف پیشنهادی

همانطور که بیان شد هدف از ارائه مقاله حاضر بهینه نمودن مدیریت شارژ و دشارژ خودروهای برقی به منظور کاهش تلفات شبکه است. بدین منظور تابع هدف رابطه (۱) ارائه شده است.

$$Objective\ Function = \min imize(\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{J} R_j I_{j,t}^{\ 2}) \qquad (۱)$$

در این رابطه R_l مقاومت خط j ام، $I_{j,t}$ جریان خط j ام در زمان t، J تعداد خطوط شبکه و T بازه زمانی محاسبه تلفات انرژی است.

بمنظور دستیابی به تابع هدف رابطه (۱) لازم است قیود ارائه شده در روابط (۲) و (۳) که مرتبط با توان و جریان مجاز گره‌ها هستند، محقق شوند.

$$S_{m,t} = V_{m,t}\left(I_{m,t}\right)^{*}$$
$$\sum_{t} S_{m,t} = E_{Total,m} \qquad (۲)$$
$$S_{\min,m,t} \le S_{m,t} \le S_{\max,m,t}$$
$$I_{m,t} = I_{l,t} - I_{l+1,t} \qquad (۳)$$

در این روابط $S_{m,t}$ بار در گره m در زمان t، $S_{\min,m,t}$ حداقل بار مجاز در گره m در زمان t، $S_{\max,m,t}$ حداکثر بار مجاز در گره m در زمان t، $V_{m,t}$ ولتاژ در گره m ام در زمان t، $I_{m,t}$ جریان در گره m ام در زمان t و $E_{Total,m}$ انرژی کلی تحویل شده به گره m ام در بازه زمانی T می‌باشد. در رابطه (۲) حداکثر بار مجاز در هر گره از رابطه (۴) قابل استحصال است.

$$S_{\max,m,t} = S_{\min,m,t} + Presence_{PHEV,m} \times P_{\max_{PHEV},m,t} \qquad (۴)$$

در رابطه (۴) اگر PHEV در گره m وجود داشته باشد، $Presence_{PHEV,m}$ برابر یک است، در غیر اینصورت این مقدار برابر صفر است. لازم به ذکر است که در این رابطه $P_{\max_{PHEV},m,t}$ حداکثر توان کشیده شده از شبکه توسط PHEV در گره m ام می‌باشد.

برخلاف مطالعات گذشته، در روش پیشنهادی در مقاله حاضر، علاوه بر توان اکتیو، توان راکتیو خودروها نیز در هر لحظه به عنوان متغیرهای کنترلی در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین روابط کمینه کردن تلفات انرژی در شبکه توزیع در بازه زمانی T به صورت رابطه (۵) پیشنهاد می‌شود.

$$Objective\ Function = F(x) = minimize(\sum_{j\in J}\sum_{t\in T} R_j\left(I_{j,t}\right)^2)$$

$$Control\ Parameters: X = \begin{pmatrix} P^1_{PHEV,1} & Q^1_{PHEV,1} & P^2_{PHEV,1} & Q^2_{PHEV,1} & \cdots & P^{TS}_{PHEV,1} & Q^{TS}_{PHEV,1} \\ P^1_{PHEV,2} & Q^1_{PHEV,2} & P^2_{PHEV,2} & Q^2_{PHEV,2} & \cdots & P^{TS}_{PHEV,2} & Q^{TS}_{PHEV,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ P^1_{PHEV,n} & Q^1_{PHEV,n} & P^2_{PHEV,n} & Q^2_{PHEV,n} & \cdots & P^{TS}_{PHEV,n} & Q^{TS}_{PHEV,n} \end{pmatrix} \qquad (۵)$$

در این رابطه R_j مقاومت j امین خط، X ماتریس پارامترهای کنترلی تابع هدف، TS تعداد پله‌های زمانی در نظر گرفته شده در بازه زمانی T، N تعداد PHEVها و $P^{TS}_{PHEV,n}$ و $Q^{TS}_{PHEV,n}$ به ترتیب توان اکتیو و راکتیو مصرفی n امین PHEV در زمان TS می‌باشند.

برای حل تابع هدف رابطه (۵)، قیود بهینه‌سازی شامل روابط پخش بار غیر محدب در رابطه (۶)، قیود مربوط به منحنی‌های عملکردی PHEVها در رابطه (۷) و قید شارژ کامل PHEVها در انتهای بازه زمانی در رابطه (۸) آورده شده است.

$$p^t_{m'} = \sum_{m'\in N} V_m{}^t V^t_m Y_{m\,m} \mathrm{Cos}\left(\theta_{m\,m'} - \delta^t_m + \delta^t_{m'}\right) \quad \forall m \in M$$
$$q^t_{m'} = \sum_{m'\in N} V_m{}^t V^t_{m'} Y_{m\,m'} \mathrm{Sin}\left(\theta_{m\,m'} - \delta^t_m + \delta^t_{m'}\right) \quad \forall m \in M \qquad (۶)$$

$$p^t_m + jq^t_m = S^t_{customer} + S^t_{PHEV,n} \qquad \forall m \in N$$
$$p^t_{PHEV,n}{}^2 + Q^t_{PHEV,n}{}^2 \le S_{Rated,n}{}^2 \qquad \forall n \in V \qquad (۷)$$

$$\sum_{t\in T} P^t_{PHEV,n} = B_n \quad \forall m \in M \qquad (۸)$$

در این روابط M مجموعه گره‌های سیستم قدرت، m و m' شماره گره‌ها و t زمان است. براین‌اساس p^t_m توان اکتیو تزریقی در m امین گره در زمان t، q^t_m توان راکتیو تزریقی در m امین گره در زمان t، V^t_m دامنه ولتاژ در m امین گره در زمان t، δ^t_m زاویه ولتاژ در m

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.6.7]

امین گره در زمان t، $Y_{m'm}$ دامنه ادمیتانس بین m امین گره و m' امین گره، $\theta_{mm'}$ زاویه ادمیتانس بین m امین گره و m' امین گره، $S^t_{customer}$ مقدار بار مصرفی مشترکین متصل شده به m امین گره در زمان t (بدون بار PHEV)، $S^t_{PHEV,n}$ توان ظاهری مصرفی n امین PHEV در زمان t، $S_{Rated,n}$ توان نامی n امین PHEV و B_n ظرفیت باتری n امین PHEV می‌باشند.

۲-۲- روش بهینه‌سازی دو مرحله‌ای پیشنهادی

همانطور که در رابطه (۱) بیان شد، هدف از ارائه مقاله حاضر کاهش تلفات شبکه با استفاده از کنترل توان اکتیو و راکتیو PHEVها است (پارامتر کنترلی X). براین‌اساس اگر ولتاژ در تمامی نقاط شاخه ثابت در نظر گرفته شود، آنگاه تلفات توان ظاهری خط j ام در زمان tام، متناسب با مربع توان عبوری از شاخه j ام می‌باشد [۲۰]. بنابراین با اصلاح رابطه (۱)، تلفات توان ظاهری شاخه j ام در زمان tام ($Apparent\ Power^t_j$) به صورت رابطه (۹) خواهد بود.

$$Apparent\ Power^t_j = \frac{R_j\left(\left(P^t_j\right)^2+\left(Q^t_j\right)^2\right)}{V_M^2} = CR_j\left(\left(P^t_j\right)^2+\left(Q^t_j\right)^2\right) \quad (۹)$$

در این رابطه P^t_j توان اکتیو عبوری از شاخه j ام در زمان t، Q^t_j توان راکتیو عبوری از شاخه j ام در زمان t، V_M ولتاژ نامی شبکه قدرت و C ضریب ثابت می‌باشند.

تلفات انرژی شاخه j ام در بازه زمانی مشخص برابر است با انتگرال تلفات توان ظاهری در همان بازه (به عنوان مثال در بازه ۲۴ ساعته) و بنابراین می‌توان تلفات انرژی شاخه j ام در زمان T ($Energy\ Losses^T_j$) را به صورت رابطه (۱۰) محاسبه نمود.

$$Energy\ Losses^T_j = \sum_{t\in T} Apparent\ Power^t_j = CR_j \sum_{t\in T}\left(\left(P^t_j\right)^2+\left(Q^t_j\right)^2\right) \quad (۱۰)$$

مطابق رابطه (۱۰) می‌توان مسئله کمینه نمودن تلفات انرژی (مدیریت همزمان توان اکتیو و راکتیو PHEVها) را به دو مسئله مجزای بهینه-سازی شامل مدیریت توان اکتیو PHEVها به عنوان مرحله اول و مدیریت توان راکتیو PHEVها به عنوان مرحله دوم تبدیل نمود. این امر به دو دلیل میسر گردیده است. اولا توان اکتیو بارهای موجود در شبکه توزیع بزرگتر از توان راکتیو همان بارها در همان زمان می‌باشد. به عبارت دیگر توان اکتیو و راکتیو بارها دارای الگو یکسان بوده و ضریب توان بارهای موجود در شبکه عموما بیش از ۰/۸۵ می‌باشد. ثانیا باطری PHEVها در انتهای بازه زمانی می‌بایستی کاملا شارژ شود (طبق رابطه ۸).

بمنظور حل مسئله بهینه‌سازی مدیریت توان اکتیو و راکتیو PHEVها در قالب روش دو مرحله‌ای پیشنهادی، فلوچارت شکل (۲) ارائه شده است.

۲-۲-۱- مرحله اول: کاهش تلفات با مدیریت توان اکتیو PHEVها

مطابق رابطه (۷) مقدار بار هر گره می‌تواند شامل بار مصرف‌کننده و بار PHEV باشد. پروفیل بار مصرف‌کنندگان را می‌توان با روش‌های پیش‌بینی بار با خطای کمی پیش‌بینی نمود [۲۱, ۲۲]. به کمک روش ذکر شده در [۲۱, ۲۲] می‌توان مقدار توان اکتیو بارهای خانگی را در هر لحظه تعیین نمود اما در این روش‌ها، عدم قطعیت‌های موجود در بارها مدنظر قرار نگرفته است. براین‌اساس، مقاله حاضر استفاده از توزیع نرمال مستقل را برای مدلسازی بارها با توجه به عدم قطعیت-های موجود در آن‌ها در پیشنهاد داده است. این مدل در بخش ۲-۳-۱ ارائه شده است.

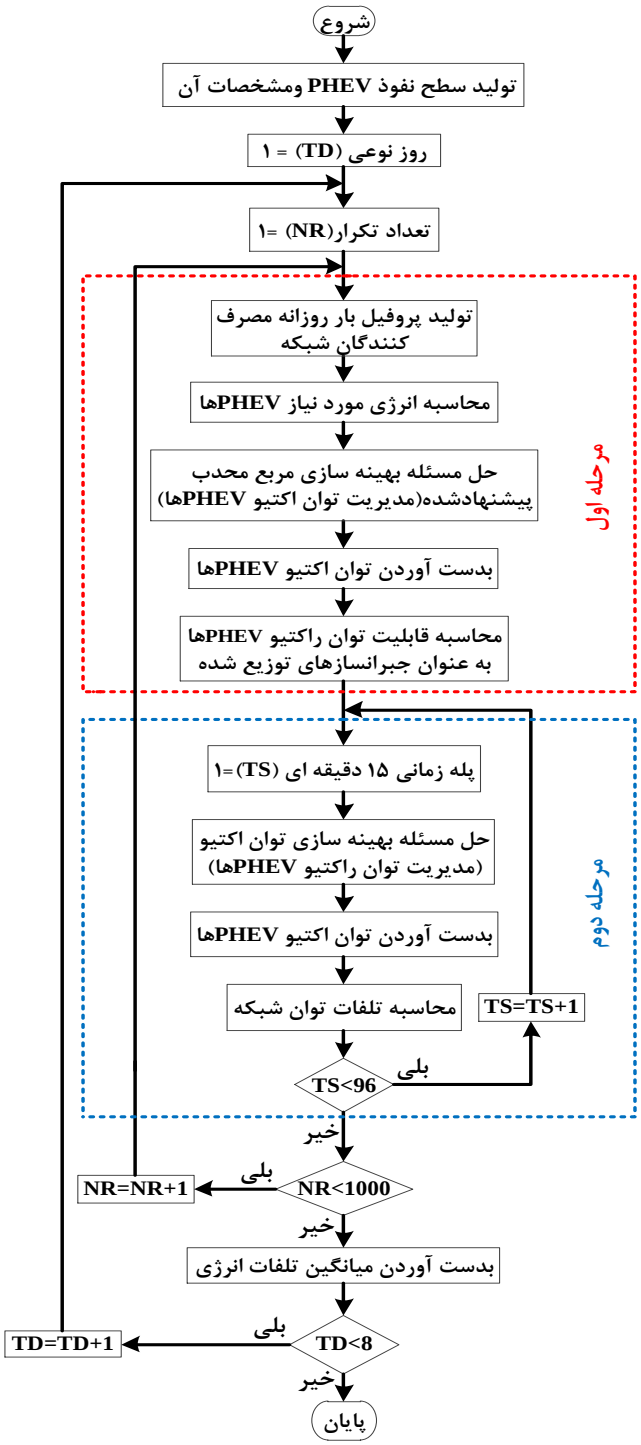
به همین ترتیب انرژی روزانه مورد نیاز PHEVها با توجه به روش‌های موجود و مدلسازی رفتار PHEVها قابل تخمین می‌باشد (که در بخش ۲-۳-۲ مقاله حاضر انجام شده است). بنابراین مقدار انرژی روزانه برای هر گره قابل پیش‌بینی بوده و با انتگرال‌گیری توان بارها در دوره ۲۴ ساعته مطابق رابطه (۱۱) قابل محاسبه می‌باشد.

$$Total\ Energy^T_m = \sum_{t=0}^{T} P^t_m = D \quad (۱۱)$$

که در آن $Total\ Energy^T_m$ انرژی مورد نیاز m امین گره در بازه زمانی T و D مقداری ثابت است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.6.7]



شکل (۲): فلوچارت روش پیشنهادی بهینه‌سازی دو مرحله‌ای

PHEVها به عنوان بارهای وقفه‌پذیر و کنترل‌پذیر در مد عملکردی G2V و به عنوان سیستم ذخیره انرژی کنترل‌پذیر در حالت V2G می‌توانند شکل منحنی بار را تغییر دهند. بنابراین با حضور PHEVها تعداد زیادی منحنی تقاضا را می‌توان ترسیم نمود که در رابطه (۱۱) صدق نماید. اما در میان آن‌ها، با توجه به معادله (۵) منحنی می‌بایست انتخاب شود که کمینه تلفات انرژی را تضمین نماید. در شرایط کلی و بدون در نظرگرفتن قیود دیگر مسئله، پاسخ یک خط صاف افقی می‌باشد. به عبارت دیگر، پاسخ تقاضای کامل منجر به کمینه کردن تلفات انرژی در سیستم قدرت خواهد شد. این مسئله به صورت زیر قابل اثبات می‌باشد. ابتدا تابعی به عنوان تلفات شبه انرژی به صورت رابطه (۱۲) تعریف می‌شود.

$$Coenergy\ Losses_m^T = \sum_{t\in T}\left(P_m^t - F\right)^2 \qquad (۱۲)$$

که در آن $Coenergy\ Losses_m^T$ تلفات شبه انرژی در m امین گره در طی بازه زمانی T و F مقداری ثابت است.

با بازکردن رابطه (۱۲) رابطه (۱۳) حاصل می شود.

$$Coenergy\ Losses_m^T = \sum_{t\in T}\left(P_m^t\right)^2 + \sum_{t\in T} F^2 - 2F\sum_{t\in T} P_m^t \qquad (۱۳)$$

و با جایگذاری رابطه (۱۱) در رابطه (۱۳)، رابطه (۱۴) بدست می‌آید.

$$Coenergy\ Losses_m^T = Energy\ Losses_j^T + T\times F^2 - 2F\times D \qquad (۱۴)$$

از معادله بالا کاملا واضح است که کمینه کردن تلفات انرژی خطوط یا به عبارت بهتر کمینه کردن تلفات شبکه به کمک مدیریت توان PHEVها، $Energy\ Losses_j^T$، منجر به کمینه کردن تلفات شبه انرژی خواهد شد. مطابق رابطه (۱۲) تلفات شبه انرژی زمانی کمینه خواهد شد که رابطه (۱۵) برقرار باشد.

$$P_m^t = F \qquad (۱۵)$$

به عبارت دیگر، تلفات شبکه با حضور بارهای کاملا کنترل‌پذیر زمانی حداقل خواهد شد که مقدار بار در طی بازه زمانی T کاملا ثابت باشد و منحنی بار در این حالت برابر با یک خط صاف خواهد شد. با جایگزینی رابطه (۱۵) در رابطه (۱۱)، رابطه (۱۶) حاصل می‌شود.

$$F = \frac{Total\ Energy_m^T}{T} \qquad (۱۶)$$

معادله بالا بدین معنی است که در صورتی که مقدار توان مورد نیاز هر گره در زمان t درطول بازه زمانی T ثابت بوده و برابر با میانگین انرژی مورد نیاز گره در همان بازه باشد، تلفات انرژی شبکه در آن بازه حداقل خواهد بود. با توجه به اینکه در واقعیت امکان کنترل تمامی بارهای موجود در شبکه وجود ندارد، بنابراین امکان دستیابی به پروفیل بار کاملا صاف و در پی آن کمینه کردن تلفات وجود نخواهد داشت. بنابراین لازم است تا روش ارائه شده با توجه به تمامی قیود موجود، تلفات شبکه را حداقل نماید. بر همین اساس رابطه مدیریت اکتیو PHEVها به عنوان مرحله اول بهینه‌سازی در بازه زمانی T به صورت رابطه (۱۷) خواهد بود.

$$Objective\ Function = G(Y) = minimize\left(\sum_{t\in T}\left(P_n^t - \frac{TE_n^T}{T}\right)\right) \quad \forall m\in M$$

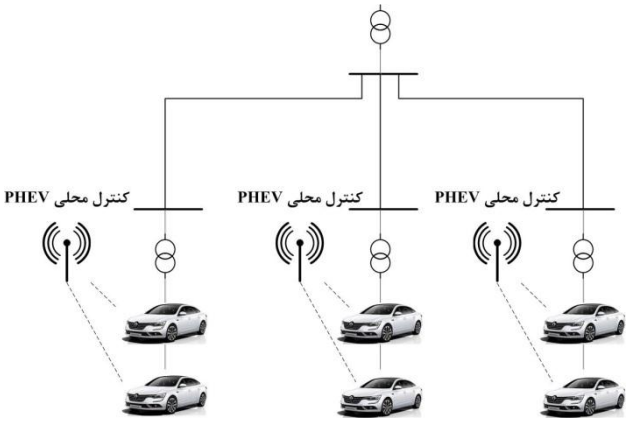
$$Y = \begin{pmatrix} P^1_{PHEV,1} & P^2_{PHEV,1} & \cdots & P^{TI}_{PHEV,1} \\ P^1_{PHEV,2} & P^2_{PHEV,2} & \cdots & P^{TI}_{PHEV,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P^1_{PHEV,n} & P^2_{PHEV,n} & \cdots & P^{TI}_{PHEV,n} \end{pmatrix} \qquad (۱۷)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.6.7]

قیود بهینه‌سازی تابع هدف رابطه (۱۷)، روابط (۷) و (۸) می‌باشد که در آن Y ماتریس پارامترهای کنترلی در این مسئله بهینه‌سازی می‌باشد.

از رابطه (۱۷) می‌توان دریافت که توان اکتیو PHEVها می‌تواند به صورت محلی در نظر گرفته شده مطابق شکل (۳) جهت دستیابی به تلفات انرژی کمینه شبکه مدیریت شود. در این حالت نیازی به ارتباط و وجود مرکز کنترل مرکزی نمی‌باشد بلکه کلیه خودروها از طریق لینک‌های مخابراتی با کنترل‌کننده‌های محلی خود در ارتباط بوده و فرآیند مدیریت شارژ آن‌ها توسط این کنترل‌کننده‌های محلی هدایت می‌شود. این امر بدین معنی است که زمان حل مسئله بهینه‌سازی متداول ذکر شده در بخش قبل به چندین مسئله بهینه‌سازی قابل حل به صورت موازی کاهش می‌یابد.



شکل (۳): زیرساخت مخابراتی مورد نیاز برای کمینه کردن تلفات شبکه توسط کنترل محلی PHEVها (گام اول مدیریت پیشنهادی)

استفاده از کنترل‌کننده محلی در مسئله بهینه‌سازی ارائه شده موجب می‌شود در این مسئله نیاز به حل پخش بار در شبکه نباشد. بنابراین مسئله بهینه‌سازی ارائه شده مستقل از توپولوژی شبکه خواهد بود ضمن آنکه عدم استفاده از پخش بار برای حل مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی موجب کاهش زمان حل این مسئله می‌گردد. علاوه بر این، تابع هدف پیشنهاد شده در مرحله اول یک تابع مربع محدب با قیود محدب در مقایسه با تابع هدف متداول با قیود غیر محدب می‌باشد. بنابراین مسئله بهینه‌سازی غیر محدب تبدیل به یک مسئله بهینه‌سازی محدب شده است. لازم به ذکر است که یکی از خاصیت‌های اصلی در مسئله‌های بهینه‌سازی محدب این است که نقاط بهینه محلی همان نقاط بهینه سراسری می‌باشد.

۲-۲-۲- مرحله دوم: کاهش تلفات با مدیریت توان راکتیو PHEVها

دراین مرحله از بهینه‌سازی، مدیریت توان راکتیو PHEVها جهت کاهش تلفات انجام خواهد گرفت. یکی از روش‌های کاهش تلفات در شبکه‌های قدرت استفاده از طرح‌های جبران‌سازی توان راکتیو می‌باشد [۲۳]. PHEVها امکان تزریق توان راکتیو را دارا هستند. در این حالت PHEVها مانند خازن‌های توزیع شده عمل کرده و تلفات شبکه را کاهش می‌دهند. بنابراین با توجه به مطالب ارائه شده، تابع هدف پیشنهادی جهت کاهش تلفات شبکه در مرحله دوم، مشابه توابع ارائه شده در مسائل متداول جایابی بهینه خازن در شبکه‌های توزیع می‌باشد. بنابراین تابع هدف در مرحله دوم جهت کاهش تلفات به کمک مدیریت توان PHEVها به صورت رابطه (۱۸) خواهد بود.

$$Objective\ Function = H(Z) =$$

$$minimize\left(\sum_{j\in L} R_j\left(I_j^t\right)^2\right) \quad \forall t \in T \tag{۱۸}$$

$$Z = \left[Q^t_{PHEV,1} \quad Q^t_{PHEV,2} \quad \cdots \quad Q^t_{PHEV,n} \right]$$

که در آن Z ماتریس پارامترهای کنترلی در این مسئله بهینه‌سازی می‌باشد.

همان طور که از رابطه (۱۸) قابل استنتاج است، حل مسئله بهینه‌سازی در مرحله دوم به توپولوژی شبکه وابسته بوده و در نتیجه لازم است که توان راکتیو به صورت غیر محلی و به صورت کلی در مرکز کنترل مرکزی مدیریت شود. از طرف دیگر، این مرحله از بهینه‌سازی مستقل از زمان بوده و جهت دستیابی به تلفات توان حداقل لازم است که بهینه‌سازی در هر پله زمانی انجام گیرد. بنابراین حجم محاسبات با توجه به حل مسئله در هر پله زمانی به صورت مستقل کاهش می‌یابد.

باتوجه به مطالب ذکر شده می‌توان ادعا نمود که روش پیشنهادی می‌تواند در عمل مورد استفاده قرار گیرد. بر همین اساس جهت دستیابی به تلفات انرژی حداقل در یک شبکه توزیع با استفاده از مدیریت توان اکتیو و راکتیو PHEVها، لازم است تا مرکز کنترل مرکزی در پست اولیه و مراکز کنترل محلی در پست های ثانویه تاسیس شوند. براین‌اساس جهت کنترل توان راکتیو خودروهای برقی در مرحله دوم مدیریت شارژ پیشنهادی، لازم است بسترهای گسترده مخابراتی ایجاد شود (مانند سیستم‌های وایرلس) تا از این طریق کلیه خودروها بتوانند با سرور مرکزی که در پست اولیه قرار دارد تبادل اطلاعات نموده و فرآیند کنترل توان راکتیو خود را از طریق فرمان‌های این سرور، بهینه نمایند.

بنابراین طبق فلوچارت نشان داده شده در شکل (۲)، پیشنهاد می‌گردد که مدیریت توان اکتیو PHEVها در مرحله اول به صورت محلی در مراکز کنترل محلی و با روش بهینه‌سازی مربع محدب برای بازه زمانی ۲۴ ساعته انجام گرفته و سپس برای هر پله زمانی و با توجه به اطلاعات بدست آمده از مرحله قبل، مدیریت توان راکتیو PHEVها در مرحله دوم به صورت کلی در مرکز کنترل مرکزی و با روش بهینه‌سازی غیر محدب انجام گیرد. در روش دو مرحله‌ای پیشنهادی نیاز به وجود لینک ارتباطی جهت تبادل اطلاعات بین مراکز محلی و مرکزی وجود دارد. مزیت اصلی روش پیشنهادی این است که کاهش تلفات در شبکه توزیع به کمک مدیریت اکتیو و راکتیوPHEVها دریک شبکه

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.6.7]

بزرگ با ضریب نفوذ بالای خودروها مسیر خواهد بود که به کمک روش‌های متداول میسر نمی‌باشد.

۲-۳- مدلسازی

همانطور که قبلا نیز اشاره شد، بمنظور پیاده‌سازی فلوچارت پیشنهادی شکل (۲)، لازم است مدل دقیقی از بارهای شبکه و PHEVها ایجاد شود. بدین منظور بارهای شبکه با استفاده از توزیع نرمال مدلسازی شده‌اند و در مدل ارائه شده برای PHEVها تاثیر فاکتورهای مختلف دخیل در این امر، لحاظ شده است. این مسئله موجب خواهد شد تا نتایج حاصل شده از حالت ایده‌آل دور شده و به واقعیت نزدیک‌تر باشند.

۲-۳-۱- مدل‌سازی بار مصرف‌کنندگان

تعیین توان مورد نیاز در شبکه توزیع به دلیل رفتار احتمالاتی مصرف-کنندگان، تغییرات فصلی و ... امری بسیار سخت است. در این مقاله از توزیع نرمال مستقل از زمان مطابق رابطه (۱۹) برای تخمین بار مصرف‌کنندگان استفاده شده است [۲۴].

$$f(P_{k,t}) = \frac{1}{\sigma_{k,t}\sqrt{2\pi}} \times e^{\frac{-(P_{k,t}-\overline{P_{k,t}})^2}{2\sigma_{k,t}^2}} \qquad (۱۹)$$

که در آن $P_{k,t}$ مقدار بار، $\overline{P_{k,t}}$ میانگین و $\sigma_{k,t}$ انحراف معیار استاندارد در هر پله زمانی t در ترانسفورماتور ثانویه k می‌باشد.

۲-۳-۲- مدل‌سازی PHEV

با توجه به تصادفی بودن زمان اتصال خودروها به شبکه، SOC[1] (درصد انرژی باقیمانده در باتری خودرو)، میزان مسافت پیموده شده در روز توسط خودرو و انرژی مورد نیاز خودروها برای دریافت از شبکه در طول روز یک مدل احتمالاتی برای PHEVها در نظر گرفته شده است.

از طرفی دیگر انواع PHEVها که در یک شهر تردد می‌کنند، در ۴ کلاس خودرو کوچک (کلاس ۱)، خودرو کم مصرف (کلاس ۲)، خودرو متوسط (کلاس ۳) و خودروهای سنگین (کلاس ۴) تقسیم بندی شده است که برای کلاس‌های مختلف رابطه (۲۰) را می‌توان نوشت.

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^{4} perc_{Class,i} &= perc_{Class,1} + perc_{Class,2} \\ &+ perc_{Class,3} + perc_{Class,4} \\ &= perc_{PHEV}\end{aligned} \qquad (۲۰)$$

که در آن $perc_{Class,i}$ درصد PHEVها در کلاس iام و $perc_{PHEV}$ درصد تعداد PHEVها از کل انواع خودروهاست. توزیع خودروها در هر کلاس به صورت جدول (۱) می‌باشد [۲۵].

جدول (۱): متوسط توزیع PHEVها در هر کلاس

شماره کلاس	۱	۲	۳	۴
$Average_{pers}^{Class}$	۰.۲	۰.۳	۰.۳	۰.۲

که در آن $Average_{pers}^{Class}$ میانگین تعداد PHEVها در هر کلاس است.

محدوده ظرفیت باتری‌ها در هر کلاس نیز در جدول (۲) آورده شده است [۲۶]. براساس این جدول، خودروهای کلاس iام می‌توانند دارای مقدار ظرفیت تصادفی بین حداقل ظرفیت ($Battery\,Capacity_{\min}^{Class,i}(kWh)$) و حداکثر ظرفیت ($Battery\,Capacity_{\max}^{Class,i}(kWh)$) باشند.

جدول (۲): محدوده ظرفیت باتری‌های استفاده شده در PHEVها

کلاس	$Battery\,Capacity_{\min}^{Class,i}$ (kWh)	$Battery\,Capacity_{\max}^{Class,i}$ (kWh)
۱	۸	۱۲
۲	۱۰	۱۴
۳	۱۷	۲۱
۴	۱۹	۲۳

جدول(۳): میزان انرژی مورد نیاز هرکدام از کلاس‌های PHEVها به ازای یک کیلومتر مسافت

شماره کلاس	۱	۲	۳	۴
$Required\,Energy_{1km}^{Class,i}$	۰.۱۹	۰.۲	۰.۲۲	۰.۲۴

از پارامترهای مهم دیگر تاثیرگذار در تعیین نحوه شارژ PHEVها، مسافت طی شده روزانه توسط این خودروهاست به طوریکه میزان مسافت طی شده به مقدار انرژی دریافتی توسط خودرو از شبکه بستگی دارد. بنابراین در جدول (۳) میزان انرژی مورد نیاز هرکدام از کلاس‌های PHEVها به ازای یک کیلومتر مسافت طی شده ($Required\,Energy_{1km}^{Class,i}$) آورده شده است که با استفاده از حاصلضرب مقادیر این جدول در میزان مسافت طی شده روزانه، میزان انرژی مورد نیاز خودرو در طی یک روز به دست می‌آید [۲۵].

SOC از دیگر پارامترهای موثر در مدل‌سازی و تعیین انرژی مورد نیاز PHEVها می‌باشد. لازم به ذکر است که برای رعایت الزامات ایمنی باتری خودروها در این مقاله، حد بالا و پایین SOC به ترتیب برابر ۸۰٪ و ۱۰٪ در نظر گرفته شده است. همچنین فرض بر آن است که خودروها از زمان ترک خانه ($SOC_{Leaving}$) تا برگشت مجدد به خانه ($SOC_{Arriving}$) در محل دیگری شارژ نمی‌شوند و هنگام ترک خانه با SOC کامل ($SOC_{Leaving}=0.8$ ۰.۸) از خانه خارج و با یک SOC تصادفی به خانه برمی‌گردند. رابطه (۲۱) ارتباط بین $SOC_{Leaving}$ و $SOC_{Arriving}$ را در همان روز نشان می‌دهد.

[1] State of charge

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.6.7]

$$SOC_{Arriving} = SOC_{Leaving} - \frac{Traveled\ dis\tan ce_{dayly} \times Required\ Energy_{1km}^{Class,i}}{Battery\ Capacity} + Fossil\ Fuels \quad (۲۱)$$

که در آن $Fossil\ Fuels$ درصد میزان سوخت فسیلی مصرف شده، $Traveled\ dis\tan ce_{dayly}$ مسافت طی شده روزانه و $Battery\ Capacity$ ظرفیت باتری PHEV می‌باشد.

در مدل‌سازی رفتاری PHEVها فرض برآن است که تمامی خودروها به محض بازگشت به خانه شارژ شوند. اگر قبل از بازگشت به خانه مقدار شارژ خودرو از حداقل مقدار $SOC_{Arriving}$ پایین‌تر آمد، خودرو تا رسیدن به خانه و انجام مجدد شارژ از سوخت‌های فسیلی استفاده می‌کند. این مسئله دلیل حضور متغیر $Fossil\ Fuels$ در رابطه (۲۱) است.

به منظور مدل‌سازی بهتر، توزیع در نظر گرفته شده برای زمان‌های ورود و خروج از خانه به صورت تابع توزیع نرمال در نظر گرفته شده است که در جدول (۴) پارامترهای توزیع نرمال استفاده شده در روزهای طول هفته و آخر هفته آورده شده است.

جدول (۴): توزیع نرمال در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی زمان‌های ورود و خروج از خانه PHEVها

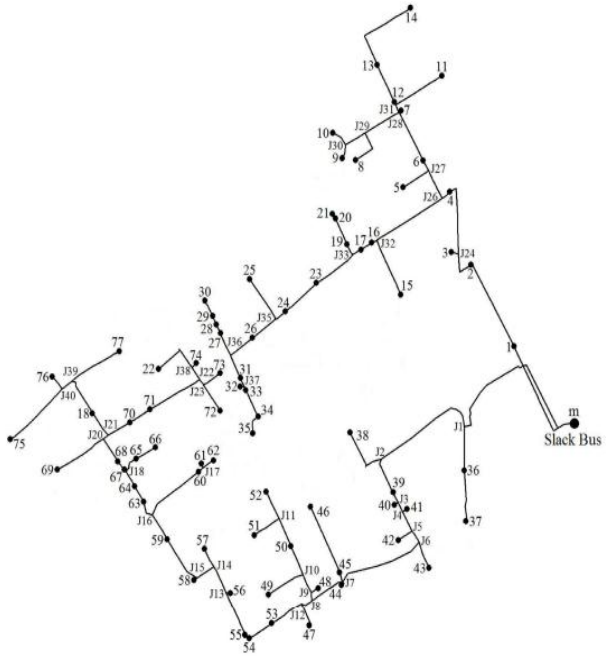
	زمان خروج (*Leaving Time*) (ساعت)		زمان ورود (*Arriving time*) (ساعت)	
	طول هفته	آخر هفته	طول هفته	آخر هفته
میانگین μ	۷	۹	۱۷	۱۵
واریانس σ^2	۱	۶	۲	۶

۳- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

۳-۱- شبکه نمونه و سناریوهای مورد بررسی

بمنظور ارزیابی روش پیشنهادی، این روش بر روی شبکه توزیع ۲۰ کیلوولت سیرجان در استان کرمان پیاده‌سازی شده است. دیاگرام تک خطی این شبکه در شکل (۴) آورده شده است. اطلاعات مربوط به خطوط و بارهای متصل به این شبکه در [۲۷] آورده شده است. این شبکه دارای ۱۲۳ خط و ۷۷ گره است که در تمامی گره‌ها ترانسفورماتورهایی برای تبدیل ۲۰kV به ۴۰۰V قرار دارند. در این شبکه از ۴ نوع هادی MINK، FOX، DOG و WEZEL استفاده شده است.

شبکه تحت مطالعه براساس فلوچارت شکل (۲) و برای ضریب نفوذهای مختلف از ۱۰٪ تا ۹۰٪ در پله‌های ۱۰ درصدی و با انجام ۱۰۰۰ تکرار مونت‌کارلو برای یک روز کاری تابستان مورد بررسی قرار گرفته است. برای حل مسائل بهینه‌سازی مراحل اول و دوم پیشنهادی از نرم‌افزار GAMS استفاده شده و در انتها برای محاسبات تلفات مقادیر خروجی نرم‌افزار GAMS در اختیار نرم‌افزار DIgSILENT قرار داده شده است. در این مقاله ۵ سناریو به همراه سناریو مرجع جهت انجام شبیه‌سازی و مقایسه نتایج در نظر گرفته شده است. این سناریوها در ادامه معرفی می‌شوند.



شکل (۴): شبکه توزیع سیرجان برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی

۳-۱-۱- سناریو مرجع

در این سناریو هیچ PHEVی به شبکه متصل نشده است. مطابق شبیه‌سازی انجام یافته، تلفات انرژی برای این سناریو برابر ۱.۰۸۹ مگاوات ساعت می‌باشد که بیشترین توان در ساعت ۲۱:۰۰ بوده و مقدار آن ۷۳.۹۲ کیلووات می‌باشد.

۳-۱-۲- سناریو شماره ۱

جدول(۵): تلفات توان در ۲۴ ساعت برای سناریو شماره ۱

زمان	تلفات توان (kW)	زمان	تلفات توان (kW)	زمان	تلفات توان (kW)	زمان	تلفات توان (kW)
۰۰:۰۰	۳۵.۷۷	۰۶:۰۰	۱۵.۶۵	۱۲:۰۰	۶۱.۰۰	۱۸:۰۰	۱۴۷.۰۱
۰۰:۳۰	۲۹.۸۲	۰۶:۳۰	۱۴.۸۲	۱۲:۳۰	۵۸.۰۷	۱۸:۳۰	۱۴۵.۳۶
۰۱:۰۰	۲۴.۴۸	۰۷:۰۰	۱۴.۰۳	۱۳:۰۰	۵۵.۲۸	۱۹:۰۰	۱۳۶.۸۸
۰۱:۳۰	۲۲.۰۹	۰۷:۳۰	۱۴.۸۶	۱۳:۳۰	۵۶.۵۳	۱۹:۳۰	۱۱۶.۷۵
۰۲:۰۰	۱۹.۸۶	۰۸:۰۰	۱۵.۷۴	۱۴:۰۰	۵۷.۸۳	۲۰:۰۰	۱۰۳.۲۷
۰۲:۳۰	۱۹.۸۲	۰۸:۳۰	۲۰.۰۱	۱۴:۳۰	۶۰.۱۷	۲۰:۳۰	۹۱.۸۸
۰۳:۰۰	۱۹.۷۹	۰۹:۰۰	۲۵.۴۱	۱۵:۰۰	۶۳.۱۹	۲۱:۰۰	۸۴.۰۹
۰۳:۳۰	۱۹.۱۵	۰۹:۳۰	۳۷.۰۵	۱۵:۳۰	۶۴.۶۱	۲۱:۳۰	۶۸.۴۶
۰۴:۰۰	۱۸.۵۳	۱۰:۰۰	۵۱.۰۸	۱۶:۰۰	۶۷.۶۹	۲۲:۰۰	۵۶.۰۶
۰۴:۳۰	۱۷.۴۵	۱۰:۳۰	۵۰.۲۷	۱۶:۳۰	۷۷.۱۵	۲۲:۳۰	۵۲.۰۳
۰۵:۰۰	۱۷.۱۶	۱۱:۰۰	۴۹.۴۷	۱۷:۰۰	۱۱۸.۹۲	۲۳:۰۰	۴۸.۷۹
۰۵:۳۰	۱۷.۰۴	۱۱:۳۰	۵۵.۰۶	۱۷:۳۰	۱۰۱.۷۷	۲۳:۳۰	۴۱.۹۹

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.6.7]

در این سناریو PHEVها بدون هیچ مدیریت شارژی در نظر گرفته شده‌اند. به عبارتی فرض شده است که خودروها به محض ورود به منزل به شبکه متصل می‌شوند. در این سناریو برای ضریب نفوذ ۹۰٪ PHEVها، تلفات توان در ۲۴ ساعت با پله‌های ۳۰ دقیقه‌ای در جدول (۵) آورده شده است. همانطور که از این جدول مشخص است، حداکثر تلفات توان در ساعت ۱۸:۰۰ رخ داده و مقدار آن ۱۴۷.۰۱ کیلووات می‌باشد، در حالیکه تلفات انرژی برای این سناریو ۱.۳۷۵ مگاوات ساعت می‌باشد که نسبت به سناریو مرجع ۲۶٪ افزایش یافته است.

۳-۱-۳- سناریو شماره ۲

در این سناریو تنها مدیریت شارژ توان اکتیو خودروها انجام گرفته است. در این حالت فرض شده است که قابلیت عملکرد در مد کاری V2G وجود ندارد. تلفات انرژی شبکه برای ضریب نفوذ ۹۰٪ PHEVها برابر ۱.۲۴۴ مگاوات ساعت می‌باشد که نسبت به سناریوی اول، ۱۰٪ کاهش داشته است.

۳-۱-۴- سناریو شماره ۳

در این سناریو تنها مدیریت شارژ و دشارژ توان اکتیو خودروها انجام گرفته است. در این حالت فرض شده است که قابلیت عملکرد در هر دو مد کاری G2V و V2G وجود دارد. تلفات انرژی شبکه برای ضریب نفوذ ۹۰٪ PHEVها برابر ۱.۲۴۰ مگاوات ساعت می‌باشد که نسبت به سناریوی شماره ۲، ۴ کیلووات کاهش داشته است.

۳-۱-۵- سناریو شماره ۴

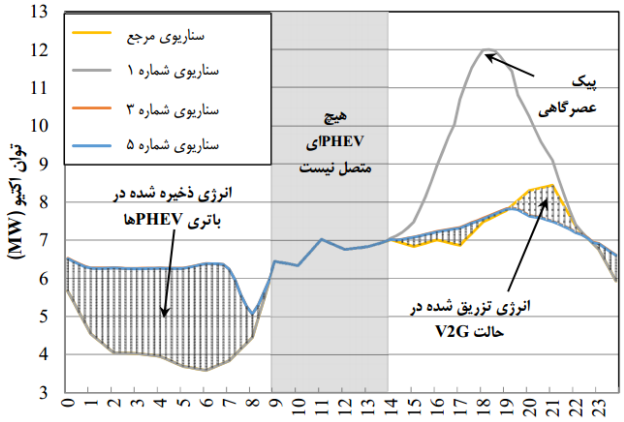
در این سناریو مدیریت شارژ توان اکتیو و راکتیو خودروها انجام گرفته است. در این حالت فرض شده است که قابلیت عملکرد در مد کاری V2G وجود ندارد. تلفات انرژی شبکه برای ضریب نفوذ ۹۰٪ PHEVها برابر ۱.۰۶۶ مگاوات ساعت می‌باشد که نسبت به سناریو ۲، ۱۷٪ کاهش داشته است.

۳-۱-۶- سناریو شماره ۵

در این سناریو مدیریت شارژ و دشارژ توان اکتیو و راکتیو خودروها انجام گرفته است. در این حالت فرض شده است که قابلیت عملکرد در هر دومد کاری G2V و V2G وجود دارد. تلفات انرژی شبکه برای ضریب نفوذ ۹۰٪ PHEVها برابر ۱.۰۶۶ مگاوات ساعت می‌باشد که نسبت به سناریو ۴، کاهشی نداشته است.

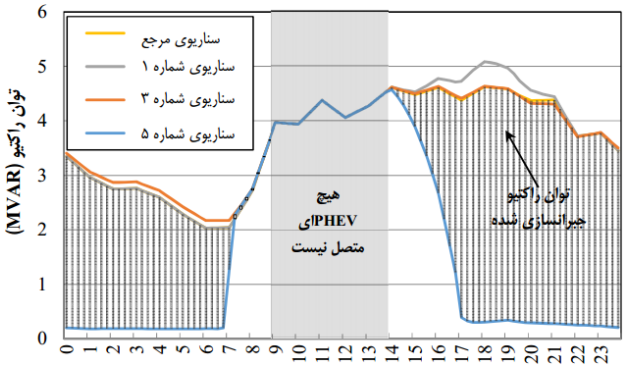
۳-۲- مقایسه و تحلیل نتایج

جهت مقایسه نتایج حاصل از اعمال سناریوهای مختلف توان‌های اکتیو، راکتیو و توان ظاهری برای سناریوهای مرجع، شماره۱، شماره۳ و شماره۵ در یک روز تابستانی با بیشترین سطح نفوذ PHEVها (۹۰٪) به ترتیب در شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) نشان داده شده است. با توجه به اینکه نتایج سناریوهای شماره ۲ و شماره ۴ بسیار نزدیک به نتایج حاصل از سناریوهای شماره ۳ و شماره ۵ بوده، بنابراین جهت پرهیز از اختلاط منحنی‌ها از ترسیم نتایج سناریوهای ۲ و۴ صرف نظر شده است.



شکل (۵): توان اکتیو شبکه برای سناریو های مختلف با ضریب نفوذ ۹۰٪ PHEVها

ازآنجاییکه PHEVها می‌توانند در دو مد کاری G2V و V2G در سناریوهای ۳ و ۵ کار کنند، توان اکتیو مربوط به سناریوهای ۳ و ۵ درساعات پیک کمتر از مقادیر مشابه در سناریوهای مرجع و شماره ۱ نشان داده شده در شکل (۵) می‌باشد.



شکل (۶): توان راکتیو شبکه برای سناریوهای مختلف با ضریب نفوذ ۹۰ ٪ PHEVها

همانطور که گفته شد در سناریوی ۵ فرض شده است که خودروها امکان تبادل توان راکتیو با شبکه دارند. بنابراین مطابق شکل (۶) توان راکتیو دریافتی از شبکه در مقایسه با سایر سناریوها کاهش می‌یابد.

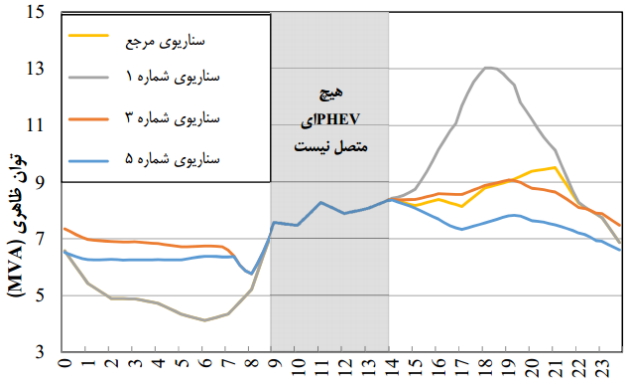
با توجه به شکل‌های (۵) و (۷) نتیجه می‌گیریم که با تحمیل بار شارژ PHEVها به پست‌های توزیع بدون اعمال مدیریت توان PHEVها (سناریو شماره ۱) پروفیل بار دارای پیک بزرگتری در مقایسه با دیگر سناریوها می‌شود که موجب پیک عصرگاهی خواهد شد. این پیک عصرگاهی به دلیل آن است که دارندگان PHEVها به محض ورود به منزل خودروی خود را جهت شارژ به پریز متصل می‌کنند.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.6.7]

باتوجه به شکل (۷) به راحتی می‌توان دریافت که حتی با ضریب نفوذ ۹۰ درصدی PHEVها در شبکه و با در نظرگیری امکان تبادل توان راکتیو خودروها با شبکه (در نظرگیری مدیریت توان هوشمند) نه تنها پروفیل بار در ساعات پیک افزایش پیدا نکرده بلکه باعث کاهش آن در ساعات پیک مصرف خواهد شد و همچنین موجب افزایش تقاضا در ساعات غیر پیک خواهد شد. به عبارت بهتر، مدیریت شارژ و دشارژ PHEVها یکی از روش‌های پاسخ تقاضا بوده که منجر به صاف‌تر شدن پروفیل بار و کاهش تلفات در شبکه خواهد شد.

جهت مقایسه کامل نتایج سناریوهای مختلف، تلفات انرژی روزانه برای تمامی ضریب نفوذهای مختلف PHEVها و تمامی سناریوهای در نظر گرفته شده در جدول (۶) آورده شده است.



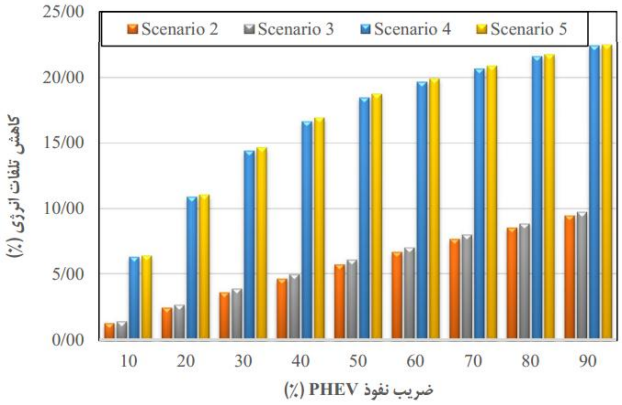
شکل (۷): توان ظاهری شبکه برای سناریوهای مختلف با ضریب نفوذ ۹۰٪ PHEVها

براساس جدول (۶)، تلفات ناشی از عملکرد سیستم در طول شبانه‌روز با اعمال سناریوهای مختلف بهره‌برداری از PHEVها در محدوده ۱.۰۰۰ تا ۱.۳۷۵ مگاوات ساعت برای ضریب نفوذهای مختلف PHEVها قرار می‌گیرد. نکته قابل توجه در جدول (۶) این است که بدون اعمال مدیریت شارژ (سناریو شماره ۱) افزایش قابل توجهی در اندازه تلفات انرژی با افزایش سطح نفوذ در مقایسه با سایر سناریوها مشاهده می‌شود. علاوه بر این، با مقایسه مقادیر مربوط به سناریوهای ۴ و ۵، مشاهده می‌شود که افزایش ضریب نفوذ به ۹۰٪ نه تنها باعث افزایش تلفات انرژی نخواهد شد، بلکه باعث کاهش آن در مقایسه با عدم حضور PHEVها خواهد شد. دلیل این امر تزریق توان راکتیو توسط PHEVها در سناریوهای ۴ و ۵ می‌باشد.

جدول(۶): تلفات انرژی روزانه برای سناریوهای مختلف

درصد نفوذ	تلفات انرژی (MWh)				
	سناریو شماره ۱	سناریو شماره ۲	سناریو شماره ۳	سناریو شماره ۴	سناریو شماره ۵
۰	۱.۰۸۹	۱.۰۸۹	۱.۰۸۹	۱.۰۸۹	۱.۰۸۹
۱۰	۱.۱۱۷	۱.۱۰۲	۱.۱۰۱	۱.۰۴۶	۱.۰۴۵
۲۰	۱.۱۴۴	۱.۱۱۶	۱.۱۱۴	۱.۰۱۹	۱.۰۱۸
۳۰	۱.۱۷۴	۱.۱۳۲	۱.۱۲۹	۱.۰۰۵	۱.۰۰۲
۴۰	۱.۲۰۳	۱.۱۴۸	۱.۱۴۴	۱.۰۰۳	۱.۰۰۰
۵۰	۱.۲۳۸	۱.۱۶۷	۱.۱۶۲	۱.۰۰۹	۱.۰۰۶
۶۰	۱.۲۶۹	۱.۱۸۴	۱.۱۷۹	۱.۰۱۹	۱.۰۱۶
۷۰	۱.۳۰۳	۱.۲۰۲	۱.۱۹۸	۱.۰۳۳	۱.۰۳۰
۸۰	۱.۳۳۸	۱.۲۲۳	۱.۲۱۹	۱.۰۴۹	۱.۰۴۷
۹۰	۱.۳۷۵	۱.۲۲۴	۱.۲۴۱	۱.۰۶۶	۱.۰۶۶

شکل (۸) درصد کاهش تلفات انرژی شبکه در مقایسه با سناریو شماره ۱ را برای سطح نفوذهای متفاوت با استراتژی‌های متفاوت مدیریت توان PHEVها نشان می‌دهد. مطابق شکل (۸) درصد کاهش تلفات با افزایش خودروها افزایش می‌یابد. به عنوان مثال سناریو ۵ منجر به بهترین کاهش تلفات خواهد شد که این مقدار برابر ۲۲.۵ ٪ است.



شکل (۸): تاثیر مدیریت توان PHEVها بر کاهش تلفات انرژی شبکه

۴- نتیجه‌گیری

شارژ PHEVها می‌تواند بار اضافی به شبکه تحمیل کند و تلفات شبکه را افزایش دهد. در این مقاله روش دو مرحله‌ای جهت مدیریت توان خودروها با رویکرد کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ پیشنهاد شد. در مرحله اول مدیریت توان اکتیو PHEV ها به صورت محلی و در مرحله دوم مدیریت توان راکتیو خودروها به صورت سراسری انجام گرفت. مسئله بهینه‌سازی در مرحله دوم بر خلاف مرحله اول، وابسته به ساختار شبکه بود. در این مرحله توان راکتیو به صورت غیر محلی و به صورت کلی مدیریت گردید. با ارزیابی روش پیشنهادی بر روی شبکه توزیع سیرجان، نشان داده شد که با استفاده از روش پیشنهادی امکان کمینه کردن تلفات انرژی در ریزشبکه با تعداد بالای PHEVها وجود دارد. مزیتی که در مابقی تحقیقات گذشته به آن پرداخته نشده است. همچنین نشان داده شد که تلفات انرژی در دو حالت مدیریت شارژ و دشارژ توان اکتیو و راکتیو خودروها و مدیریت شارژ توان اکتیو و راکتیو خودروها تفاوت اندکی با یکدیگر داشته و در موارد عملی می توان از مدیریت شارژ توان اکتیو و راکتیو خودروها جهت کمینه کردن تلفات استفاده نمود.

مراجع

[۱] B. Zhang, et al., "Electrical Vehicle Path Tracking Based Model Predictive Control with a Laguerre Function and Exponential Weight", IEEE Access, pp. 1-1, 2019.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.6.7]

[۱] M. Ye, et al., "A Novel Dynamic Performance Analysis and Evaluation Model of Series-parallel Connected Battery Pack for Electric Vehicles", IEEE Access, pp. 1-1, 2019.

[۲] J. Pahasa and I. Ngamroo, "Coordinated PHEV, PV, and ESS for Microgrid Frequency Regulation Using Centralized Model Predictive Control Considering Variation of PHEV Number", IEEE Access, vol. 6, pp. 69151-69161, 2018.

[۳] S. Han, et al., "Development of an Optimal Vehicle-to-Grid Aggregator for Frequency Regulation," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 1, pp. 65-72, 2010.

[۴] O. D. Montoya, et al., "Optimal Conductor Size Selection in Radial Distribution Networks Using a Mixed-Integer Non-Linear Programming Formulation", IEEE Latin America Transactions, vol. 16, pp. 2213-2220, 2018.

[۵] S. Manikandan, et al., "Analysis of optimal conductor selection for radial distribution systems using DPSO", 3rd International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES), pp. 96-101, 2016.

[۶] A. Ioaneş and R. Tîrnovan, "Optimum location and size of capacitor banks to reduce losses in power distribution networks using genetic algorithm", International Conference on Energy and Environment (CIEM), pp. 49-53, 2017.

[۷] Y. Xu, et al., "Optimal Capacitor Placement to Distribution Transformers for Power Loss Reduction in Radial Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, pp. 4072-4079, 2013.

[۸] Z. Yuan, J. Fu, Y. Yang, and J. Lin, "Research on optimal allocation of reactive power compensators in substation", IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), pp. 1-5, 2016.

[۹] D. Q. Hung and N. Mithulananthan, "Multiple Distributed Generator Placement in Primary Distribution Networks for Loss Reduction", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, pp. 1700-1708, 2013.

[۱۰] N. Jain, et al., "A Generalized Approach for DG Planning and Viability Analysis Under Market Scenario", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, pp. 5075-5085, 2013.

[۱۱] R. S. Rao, et al., "Power Loss Minimization in Distribution System Using Network Reconfiguration in the Presence of Distributed Generation", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, pp. 317-325, 2013.

[۱۲] A. A. M. Zin, et al., "Two Circular-Updating Hybrid Heuristic Methods for Minimum-Loss Reconfiguration of Electrical Distribution Network", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, pp. 1318-1323, 2013.

[۱۳] K. Clement-Nyns, et al., "The Impact of Charging Plug-In Hybrid Electric Vehicles on a Residential Distribution Grid", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 25, pp. 371-380, 2010.

[۱۴] B. Khushalani, et al., "Coordinated charging strategies for plug-in hybrid electric vehicles", North American Power Symposium (NAPS), pp. 1-5, 2017.

[۱۵] X. Wang and Q. Liang, "Energy Management Strategy for Plug-In Hybrid Electric Vehicles via Bidirectional Vehicle-to-Grid", IEEE Systems Journal, vol. 11, pp. 1789-1798, 2017.

[۱۶] A. Bocca, Y. Chen, A. Macii, E. Macii, and M. Poncino, "Aging and Cost Optimal Residential Charging for Plug-In EVs", IEEE Design & Test, vol. 35, pp. 16-24, 2018.

[۱۷] S. Gao, et al., "Optimal Control Framework and Scheme for Integrating Plug-in Hybrid Electric Vehicles into Grid", Journal of Asian Electric Vehicles, vol. 9, pp. 1473-1481, 2011.

[۱۸] S. Acha, et al., "Effects of optimised plug-in hybrid vehicle charging strategies on electric distribution network losses", IEEE PES T&D, pp. 1-6, 2010.

[۱۹] V. Farahani, et al., "Energy Loss Reduction by Conductor Replacement and Capacitor Placement in Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, pp. 2077-2085, 2013.

[۲۰] S. Arora and J. W. Taylor, "Short-Term Forecasting of Anomalous Load Using Rule-Based Triple Seasonal Methods", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, pp. 3235-3242, 2013.

[۲۱] E. Paparoditis and T. Sapatinas, "Short-Term Load Forecasting: The Similar Shape Functional Time-Series Predictor", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, pp. 3818-3825, 2013.

[۲۲] L. Wang, et al., "Multifunctional Hybrid Structure of SVC and Capacitive Grid-Connected Inverter (SVC//CGCI) for Active Power Injection and Nonactive Power Compensation", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, pp. 1660-1670, 2019.

[۲۳] S. Conti and S. Raiti, "Probabilistic load flow using Monte Carlo techniques for distribution networks with photovoltaic generators", Solar Energy, vol. 81, pp. 1473-1481, 2007.

[۲۴] S. W. Hadley and A. A. Tsvetkova, "Potential Impacts of Plug-in Hybrid Electric Vehicles on Regional Power Generation", The Electricity Journal, vol. 22, pp. 56-68, 2009.

[۲۵] S. Shao, et al., "Challenges of PHEV penetration to the residential distribution network," IEEE Power & Energy Society General Meeting, pp. 1-8, 2009.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.6.7]

[۲۷] ح. عسکریان. ابیانه, "انتخاب هادی‌ها، خازن‌ها و آرایش شبکه توزیع انرژی به منظور بهینه‌سازی تلفات در شرکت توزیع نیروی برق جنوب کرمان", ۱۳۸۹.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.6.7]