

Self-scheduling of electric vehicles aggregator in the energy market based on TOU pricing plan

Atena Tazikeh Lemeski¹, Reza Ebrahimi^{1*}, Alireza Zakariazadeh²

¹ Department of Electrical Engineering, Gorgan Branch, Islamic Azad University, Gorgan, Iran
a.tazikeh@gorganiau.ac.ir, r.ebrahimi@gorganiau.ac.ir

² Department of Electrical and Computer Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran
zakaria@mazust.ac.ir

Abstract

In recent years, the issue of air pollution caused by greenhouse gas emissions and rising energy prices have contributed to developing and increasing the number of electric vehicles. Despite the many advantages of these vehicles, their increasing number and consequently their simultaneous charging in the distribution network can have destructive effects such as increased peak load, increased losses, unauthorized voltage drop, etc. On the other hand, managing the charging of vehicles by aggregators and using them as flexible loads and, if there is vehicle-to-grid (V2G) capability, as distributed generation units distributed across the distribution network can bring many financial and technical opportunities for the network. Accordingly, managing and planning the charging and discharging of these vehicles from the view point of network operators, aggregators, or vehicle owners in a centralized and decentralized manner are among the interesting topics that many articles have dealt with so far. This paper presents, a new solution for self-scheduling the charging and discharging of the private aggregator of electric vehicles to increase their profitability in the distribution network. Given the private ownership of the aggregator, it is obvious that the only factor influencing planning is cost reduction or profit enhancement, so its effect is unknown and/or negative on network indicators such as losses and voltage profiles. To solve this problem, a Time of Use (TOU) pricing model has been proposed by the Distribution Network Operator (DSO), so the aggregator plans to charge and discharge vehicles so that it can improve indicators such as losses and voltage profiles of the network in addition to be profitable. Density functions might have been used to include the uncertainty of vehicle drivers' behavior and to model the possible parameters related to him/her. Finally, the proposed approach is applied to a 33-bus test network by a genetic optimization algorithm using a private aggregator. The simulation results show that, in addition to maximizing the aggregator gain, the proposed method smoothes the network load curve, which reduces losses and improves voltage profile. It seems that in the probabilistic environment of vehicle behavior, the combination of TOU in private aggregator planning, which has led to an increase in their profits and at the same time in terms of the use of improved technical indicators, has not been studied yet.

Keywords: Electric Vehicle Aggregator, Charging and Discharging Management, TOU Pricing, Energy Market

Received: 2021-02-13

Accepted: 2021-10-25

خودبرنامه‌ریزی تجمیع‌کننده خودروهای الکتریکی در بازار انرژی بر اساس طرح قیمت‌گذاری TOU

نوع مطالعه: پژوهشی

آتنا تازیکه لمسکی^۱، دانشجوی دکتری، رضا ابراهیمی^۲، استادیار، علیرضا ذکریازاده^۳، استادیار

۱ و ۲- گروه مهندسی برق، واحد گرگان، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان، ایران

a.tazikeh@gorganiau.ac.ir, r.abrahimi@gorganiau.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران

zakaria@mazust.ac.ir

چکیده: در این مقاله، راهکاری جدید جهت خودبرنامه‌ریزی شارژ و دشارژ تجمیع‌کننده‌ی خصوصی خودروهای الکتریکی باهدف افزایش سودآوری آن‌ها در شبکه توزیع ارائه شده است. با توجه به مالکیت خصوصی تجمیع‌کننده، بدیهی است که تنها عامل مؤثر در برنامه‌ریزی، کاهش هزینه و یا افزایش سود بوده که در نتیجه اثر آن بر شاخص‌های شبکه همچون تلفات و پروفیل ولتاژ نامشخص و یا منفی می‌باشد. جهت حل این مسئله، یک مدل قیمت‌گذاری تجاری بر اساس پاسخگویی بار زمان استفاده (TOU) توسط بهره‌بردار شبکه توزیع (DSO) ارائه شده که در نتیجه تجمیع‌کننده به‌گونه‌ای برای شارژ و دشارژ خودروها برنامه‌ریزی می‌کند تا ضمن سودآوری خود، بتواند شاخص‌هایی همچون تلفات و پروفیل ولتاژ شبکه را نیز بهبود بخشد. جهت در نظر گرفتن عدم قطعیت رفتار رانندگان خودروها و مدل کردن پارامترهای احتمالی مربوط به آن، از توابع چگالی احتمال استفاده شده است. در پایان، رویکرد پیشنهادی بر یک شبکه ۳۳ شینه نمونه توسط الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک با در نظر گرفتن یک تجمیع‌کننده‌ی خصوصی به اجرا درآمده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داده که روش پیشنهادی علاوه بر حداکثرسازی سود تجمیع‌کننده، منجر به هموار کردن منحنی بار شبکه شده که کاهش تلفات و بهبود ولتاژ مشترکین را به دنبال دارد.

واژه‌های کلیدی: تجمیع‌کننده‌ی خودروهای الکتریکی، مدیریت شارژ و دشارژ، قیمت‌گذاری TOU، بازار انرژی

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۹/۱۱/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۰/۰۸/۰۴

نام نویسنده‌ی مسئول: رضا ابراهیمی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: استان گلستان، گرگان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد گرگان، گروه مهندسی برق

۱- مقدمه

از دیگر موارد مهم در مدیریت و برنامه‌ریزی شارژ خودروها، عدم قطعیت پارامترها در مدل‌سازی رفتار رانندگان بوده که به‌طور معمول در مقالات در نظر گرفته نشده و خودروها به‌صورت بارهای ثابت فرض شده‌اند (Chen et al. 2012, Fan et al. 2012, Wen et al. 2012). در عمل پارامترهای تصادفی در برنامه‌ریزی خودروهای الکتریکی، زمان قطع و وصل شدن به شبکه و سطح شارژ اولیه باتری خودروها در لحظه اتصال به آن بوده که باید در نظر گرفته شوند. در (at el. 2016, Tan Kamankesh and Wang, 2014, Hashemi et al. 2018) برای مدل‌سازی عدم قطعیت از توابع چگالی احتمال و منطق فازی و در (Moghaddam and Akbari, 2018) از روش مونت‌کارلو استفاده شده است. روش مونت‌کارلو برای تولید داده‌های تصادفی از تابع چگالی احتمال به کار می‌رود. رویکرد بهینه‌سازی فازی زمانی استفاده می‌شود که هیچ داده تاریخی از پارامتر مدنظر وجود نداشته باشد و هیچ تابع احتمالی نتوان به آن پارامتر نسبت داد. در (Mohiti et al. 2019) برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ تجمیع‌کننده‌ها در شبکه توزیع باهدف کاهش هزینه‌ها ارائه شده است. نویسندگان جهت حفظ اطلاعات خصوصی واحدها از روش غیرمتمرکز استفاده کرده و همچنین عدم قطعیت برای قیمت انرژی بازار و تولید توان توربین‌های بادی در نظر گرفته شده است. در (Alipour et al. 2017) عملکرد بهینه تجمیع‌کننده خصوصی باهدف افزایش سودآوری آن با شرکت در بازار انرژی ارائه شده این در حالی است که در روش مفروض شاخص‌های شبکه در نظر گرفته نشده است. در این مقاله، روشی جهت خودبرنامه‌ریزی تجمیع‌کننده خصوصی بر اساس سیاست قیمت‌گذاری DSO^2 با در نظر گرفتن بهبود شرایط بهره‌برداری شبکه و باهدف افزایش سودآوری به کمک برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی ارائه شده است. از آنجایی که تجمیع‌کننده خصوصی مسئولیتی در برابر بهبود شرایط شبکه ندارد، یک مدل قیمت‌گذاری جدید بر مبنای روش قیمت‌گذاری برنامه پاسخگویی بار زمان استفاده (TOU^3) برای مشارکت تجمیع‌کننده در هموار ساختن منحنی بار شبکه و کاهش تلفات ارائه شده است. روش TOU یا زمان استفاده به تغییر قیمت انرژی مشتریان در زمان‌های مختلف برای تحقق اهداف خاصی در شبکه اطلاق می‌شود. این اهداف می‌تواند هموار کردن منحنی بار شبکه، کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ و غیره باشد. بر این اساس، از یک ضریب TOU برای قیمت‌گذاری توان مبادله شده بین تجمیع‌کننده و DSO استفاده شده است. در روش ارائه شده بهره‌بردار شبکه، برای خرید و فروش انرژی با تجمیع‌کننده، قیمت جدیدی تعریف کرده که بر اساس آن در صورت افزایش یا کاهش بار از مقدار متوسط، تجمیع‌کننده ملزم به پرداخت جریمه شده که همچنین کاهش سود را برای آن به دنبال خواهد داشت. بنابراین تجمیع‌کننده میزان شارژ و دشارژ خود را در ساعات‌های مختلف شبانه‌روز به نحوی

در سال‌های اخیر، مسئله آلودگی هوا در نتیجه‌ی انتشار گازهای گلخانه‌ای و همچنین افزایش قیمت حامل‌های انرژی، منجر به توسعه و افزایش تعداد خودروهای الکتریکی شده به‌نحوی که پیش‌بینی می‌شود حدود نیمی از سهم بازار خودرو را تا سال ۲۰۵۰ به خود اختصاص دهند (Liu et al. 2021 and Hashemi et al. 2019). با وجود مزیت‌های بسیار این خودروها، افزایش روزافزون تعداد و در نتیجه شارژ هم‌زمان آن‌ها در شبکه توزیع می‌تواند اثرات مخربی مانند افزایش پیک بار، افزایش تلفات، افت ولتاژ غیرمجاز و غیره برای شبکه به همراه داشته باشند (Moradi et al. 2015). از طرفی مدیریت شارژ خودروها توسط تجمیع‌کننده‌ها و استفاده از آن‌ها به‌عنوان بارهای انعطاف‌پذیر و نیز در صورت وجود قابلیت $V2G^1$ ، به‌عنوان واحدهای تولید پراکنده توزیع‌شده در سطح شبکه توزیع می‌تواند فرصت‌های مالی و فنی بسیاری برای شبکه به همراه داشته باشد (Mukherjee and Gupta, 2017). بر این اساس مدیریت و برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ این خودروها از نقطه‌نظر بهره‌بردار شبکه، تجمیع‌کننده‌ها و یا مالکان خودروها به‌صورت متمرکز و غیرمتمرکز، از موضوعات جذابی به شمار می‌رود که تاکنون مقالات بسیاری به آن پرداخته‌اند. در (Fan et al. 2018) برنامه‌ریزی شارژ خودروها توسط تجمیع‌کننده باهدف کاهش تلفات انرژی ارائه شده که برنامه‌ریزی شارژ به‌صورت غیرمتمرکز و با استفاده از الگوریتم توزیع‌شده انجام شده است. در (Chung et al. 2019) مدیریت شارژ و دشارژ خودروها توسط تجمیع‌کننده در ریزشبکه بررسی شده است. تابع هدف آن، کاهش هزینه‌های ایستگاه‌های شارژ و همچنین افزایش رضایتمندی مالکان خودروها در نظر گرفته شده است. در (Gan et al. 2013) هموارسازی منحنی بار شبکه با استفاده از برنامه‌ریزی مناسب شارژ و دشارژ خودروها انجام شده است. ابتدا خودروها اطلاعاتی مانند نوع وسیله نقلیه، ظرفیت باتری و میزان شارژ موردنیاز را به تجمیع‌کننده ارسال کرده و سپس تجمیع‌کننده بر اساس اطلاعات و محدودیت‌هایی مانند محدودیت پیمایش وسیله نقلیه و شرایط شبکه در هر ساعت میزان توان مشخصی را به هر خودرو تخصیص داده است. در (Clement-Nyans et al. 2010) تأثیر شارژ خودروهای الکتریکی در مکان‌های مسکونی بر شبکه توزیع از نقطه‌نظر تلفات توان و تغییرات ولتاژ بررسی شده است. نتایج نشان داده که، شارژ غیر هماهنگ منجر به بروز مشکلات شبکه شده و شارژ با برنامه‌ریزی خودروها می‌تواند تلفات را کاهش و ضریب بار شبکه را افزایش دهد. در (Liu et al. 2021) روشی جهت زمان‌بندی شارژ خودروهای الکتریکی ارائه شده که می‌تواند از توانایی خودروهای الکتریکی برای پشتیبانی محلی شبکه از طریق کنترل توان راکتیو استفاده کند.

گرفته شده است. به طور معمول در برنامه ریزی های خودروهای الکتریکی، مهم ترین پارامترها، سطح شارژ و وضعیت باتری خودروها است که باید به درستی مدل شود (Hashemi at el. 2018). در ادامه هر یک از این پارامترها بیان شده است.

۱-۲- مدل سازی الگوی رانندگی

ویژگی های اصلی که می توان بر اساس آن الگوی رانندگی مالکان خودروها را تحلیل کرد، مسافت طی شده روزانه و زمان قطع/وصل از شبکه می باشد. با توجه به پارامترهای تصادفی استخراج شده از NHTS (Santos at el. 2011) و منحنی های مربوط به آن ها، زمان رسیدن به ایستگاه شارژ، زمان خروج از ایستگاه و مسافت پیموده شده در طول روز را می توان به صورت توابع چگالی احتمال بر اساس Weibull، Lognormal و Gamma به ترتیب مدل کرده که به صورت زیر بیان می شوند:

$$F^a(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}, 0 < t < 24 \quad (1)$$

$$F^d(t) = \frac{1}{t\delta\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\delta^2}}, 0 < t < 24 \quad (2)$$

$$F^{dm}(t) = \frac{1}{b^a \Gamma(a)} d^{a-1} e^{-\frac{t}{d}}, d > 0 \text{ and } (3)$$

$$T(a) = \int_0^\infty t^{a-1} e^{-t} dt$$

در این روابط، F^d, F^a و F^{dm} به ترتیب توابع چگالی احتمال مربوط به زمان رسیدن، زمان ترک و مسافت طی شده می باشند (Hashemi at el. 2019).

۲-۲- مدل سازی باتری خودروها

در مدل سازی باتری، مهم ترین پارامتر سطح شارژ آن بوده که بر اساس نسبت انرژی ذخیره شده به ظرفیت باتری سنجیده می شود. زمانی که خودروی الکتریکی به شبکه متصل می شود، سطح شارژ باتری آن، بر اساس مسافت طی شده آن مطابق رابطه (۴) و (۵) به دست می آید (Hashemi at el. 2018). به طور معمول برای جلوگیری از فرسوده شدن باتری فرض می شود سطح شارژ آن کمتر از ۲۰٪ نشود.

$$SOC_d^{initial} = \begin{cases} \left(1 - \frac{M_d}{AER_d}\right) \times 100, & \forall d \in D \\ 20\%, & M_d > 0.8AER_d \end{cases} \quad (4)$$

$$AER_d = \frac{C_d^{batt}}{Cons_d}; \quad \forall d \in D \quad (5)$$

در رابطه (۴)، $SOC_d^{initial}$ سطح شارژ اولیه باتری خودروی d ام و مقدار AER_d کل مسافتی است که خودروی d ام می تواند در حالت الکتریکی طی کند (Hashemi at el. 2018).

تنظیم کرده که بتواند حداکثر منفعت اقتصادی را از آن استفاده کند. از این رو عنوان خودبرنامه ریزی برای آن ها برگزیده شده است. همچنین جهت کاربردی شدن، مسئله بهینه سازی به صورت یک برنامه ریزی تصادفی مدل شده و عدم قطعیت رفتار رانندگان به استفاده از توابع چگالی احتمال جهت مدل کردن پارامترهای غیرقطعی، بیان شده است.

به نظر می رسد که در فضای احتمالاتی TOU در برنامه ریزی تجمیع کننده ی خصوصی که در این مقاله به افزایش سود آن ها شده و به طور هم زمان از نظر بهره برداری و مسائل فنی ارتقا یافته تاکنون بررسی نشده و به عنوان نوآوری مقاله می باشد. ادامه مقاله به این صورت سازمان دهی شده است: در بخش دوم مدل سازی سیستم شامل مدل رفتار رانندگان خودروها و باتری های موجود آن ها ارائه شده است. در بخش سوم، روش پیشنهادی حل مسئله بهینه سازی همراه تابع هدف و قیود به صورت روابط ریاضی بیان شده است. نتایج عددی حاصل از شبیه سازی برای سناریوهای مختلف در بخش چهارم ارائه شده و در پایان، نتیجه گیری مقاله در بخش پنجم خواهد بود.

جدول (۱): معرفی نمادهای مورد استفاده در روابط ریاضی

نماد	توضیح
d	شاخص خودرو از ۱ تا D
t	شاخص زمان از ۱ تا T
M_d	میزان مسافت طی شده توسط خودروی d ام
AER_d	کل مسافت طی شده توسط خودروی d ام در حالت الکتریکی
C_d^{batt}	ظرفیت باتری خودروی d ام بر حسب کیلووات ساعت
$Cons_d$	میزان مصرف خودروی d ام بر حسب کیلووات ساعت بر مایل
$SOC_d^{initial}$	سطح شارژ اولیه خودروی d ام
SOC_d^{final}	سطح شارژ نهایی خودروی d ام
π^{Ave}	متوسط قیمت انرژی بازار
$P_{d,t}^{G2V}$	توان شارژ خودروی d ام در زمان t
$P_{d,t}^{V2G}$	توان دشارژ خودروی d ام در زمان t
Req_t^{Energy}	میزان درخواست انرژی در زمان t ام توسط تجمیع کننده در بازار انرژی
$\pi(t)$	قیمت انرژی بازار در زمان t
p	پارامتر ثابت رابطه قیمت
$Demand^t$	میزان بار شبکه در زمان t
$Demand^{ave}$	میزان متوسط بار شبکه
$SOC_{d,t}$	سطح شارژ باتری خودروی d ام در زمان t
SOC_d^{min}	حد پایین سطح شارژ باتری خودروی d ام
SOC_d^{max}	حد بالای سطح شارژ باتری خودروی d ام

۲- مدل سازی سیستم

در نظر گرفتن ماهیت تصادفی داده ها جهت رسیدن به راه حل های بهینه مقاوم تر، در شرایط مختلف برنامه ریزی ضروری است (Hashemi at el. 2019). از این رو، در این مقاله ماهیت تصادفی الگوی رانندگی هر خودرو، به عنوان منبع عدم قطعیت در نظر

۳- روش پیشنهادی حل مسئله

به‌طورمعمول، شارژ و دشارژ خودروها به دو صورت کنترل نشده و کنترل شده انجام می‌گیرد. در حالت شارژ کنترل نشده، عملیات شارژ خودروها بلافاصله پس از اتصال به شبکه شروع شده و تا زمانی که باتری شارژ کامل شود، ادامه دارد. در حالت شارژ کنترل شده، فرآیند شارژ خودروها توسط تجمیع کننده با توجه به در نظر گرفتن توابع هدف جهت تعیین برنامه بهینه بیان خواهد شد. روش پیشنهادی به‌عنوان یک مسئله برنامه‌نویسی خطی فرمول‌بندی شده که در ادامه بیان شده است.

۳-۱- تابع هدف

تابع هدف مسئله، افزایش سودآوری تجمیع کننده در نظر گرفته شده که به‌صورت رابطه (۶) فرمول‌بندی شده است:

$$f_{obj} = \text{MAX} \{ \text{Earn}_d^{\text{owner}} - \text{Cost}^{\text{market}} \} \quad (6)$$

بخش اول رابطه (۶) مربوط به درآمد تجمیع کننده از خریدوفروش انرژی به مالکان خودروها و بخش دوم به هزینه‌ی تجمیع کننده جهت مبادله انرژی با شبکه توزیع اشاره دارد. در ادامه، جزئیات تابع هدف شرح داده شده است (Hashemi et al. 2019).

تجمیع کننده با فروش انرژی به خودروها می‌تواند بر اساس اختلاف قیمت در خریدوفروش انرژی، درآمد داشته باشد. بدیهی است در صورت وجود قابلیت V2G خودروها، درواقع یک تجمیع کننده می‌تواند با برنامه‌ریزی مناسب شارژ و دشارژ سود خود را بیشینه نماید. رابطه (۷) چگونگی کسب درآمد تجمیع کننده را نشان می‌دهد:

$$\text{Earn}_d^{\text{owner}} = \sum_{t=1}^{T=24} \pi^{\text{Ave}} \times (P_{d,t}^{G2V} - P_{d,t}^{V2G}) \quad (7)$$

در نقطه مقابل، با خرید انرژی از شبکه مطابق قیمت بازار، تجمیع کننده متحمل هزینه شده که در طول شبانه‌روز مطابق رابطه (۸) محاسبه می‌گردد و می‌تواند مثبت یا منفی باشد.

$$\text{Cost}^{\text{market}} = \sum_{t=1}^{T=24} \lambda(t) \times \text{Req}_t^{\text{Energy}} \quad (8)$$

بر اساس رابطه (۸)، $\text{Req}_t^{\text{Energy}}$ مثبت به مفهوم خرید انرژی از بازار (هزینه) و $\text{Req}_t^{\text{Energy}}$ منفی به مفهوم فروش انرژی به بازار (درآمد) می‌باشد. $\lambda(t)$ قیمت لحظه‌ای انرژی شبکه است که بر اساس روش TOU تعریف شده و در رابطه (۹) آمده است.

$$\lambda(t) = \pi(t) + p \times 10^{\frac{\text{Demand}^t - \text{Demand}^{\text{ave}}}{\text{Demand}^{\text{ave}}}} \quad (9)$$

در رابطه (۹)، قیمت لحظه‌ای انرژی شبکه برای مشارکت تجمیع کننده در پیک زدایی بر اساس روش TOU تعریف شده است. لازم به ذکر است روش قیمت‌گذاری ارائه شده بسیار حساس به میزان بار شبکه بوده و در صورت افزایش بار به‌خصوص در زمان پیک بار، سود تجمیع کننده را به شدت کاهش می‌دهد.

۳-۲- قیدها

برای حل روش پیشنهادی، لازم است محدودیت‌های فنی شبکه و PEVها در نظر گرفته شود. قیود فنی و اقتصادی به شرح زیر ارائه شده است (Liu et al. 2021).

• توازن توان

$$\text{Req}_t^{\text{Energy}} = \sum_{d=1}^D (P_{d,t}^{G2V} - P_{d,t}^{V2G}) \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)، $\text{Req}_t^{\text{Energy}}$ مقدار درخواست انرژی در زمان t ام توسط تجمیع کننده در بازار انرژی بوده که باید برابر با اختلاف توان شارژ کل خودروها (خرید) از توان دشارژ (فروش) باشد.

• وضعیت سطح شارژ باتری‌ها در مدت زمان اتصال به شبکه

$$\text{SOC}_{d,t} = \text{SOC}_{d,t-1} + (P_{d,t}^{G2V} - P_{d,t}^{V2G}) \times 100 / C_d^{\text{batt}} \quad (11)$$

$$\text{SOC}_d^{\text{min}} < \text{SOC}_{d,t} < \text{SOC}_d^{\text{max}} \quad (12)$$

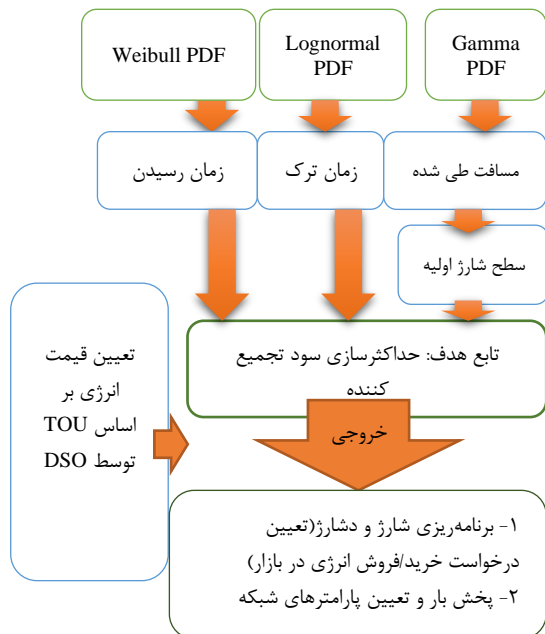
لازم به ذکر است وضعیت سطح شارژ باتری خودروها در هر پله زمانی به میزان انرژی تبدیلی با شبکه بستگی دارد.

• حداقل انرژی باتری خودروها در زمان قطع از شبکه

$$\text{SOC}_d^{\text{initial}} + \left(\sum_{t=1}^{T=24} (P_{d,t}^{G2V} - P_{d,t}^{V2G}) / C_d^{\text{batt}} \right) \times 100 \geq \text{SOC}_d^{\text{final}} \quad (13)$$

رابطه (۱۳) شرط برقراری سطح شارژ نهایی باتری خودروها در زمان قطع شدن از شبکه را بیان می‌کند.

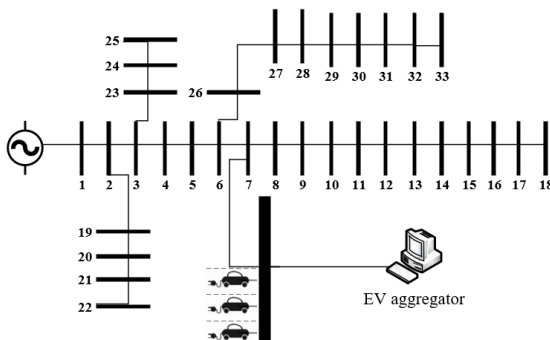
با توجه به ساختار مسئله پیشنهادی، یک چارچوب تصمیم‌گیری تصادفی برای مدل‌سازی خودبرنامه‌ریزی یک تجمیع کننده خصوصی در بازار انرژی، عملیاتی می‌شود. تجمیع کننده تصمیمات اساسی درباره درخواست‌های خرید/فروش انرژی را اتخاذ کرده و شارژ/دشارژ خودروی متصل به شبکه را بر اساس درخواست‌های موجود در بازار انرژی هماهنگ می‌کند. علیرغم این که یک تجمیع کننده خصوصی مسئولیتی در برابر شاخص‌های شبکه نداشته، اما مطالعه قابلیت‌های طراحی مکانیسمی جهت رفع



شکل (۱): چارچوب کلی مسأله بهینه‌سازی

جدول (۲): ویژگی‌های سناریوهای تعریف‌شده

حالت هماهنگ شارژ	در نظر گرفتن تابع هدف DSO	
سناریو ۱	×	×
سناریو ۲	×	✓
سناریو ۳	✓	✓



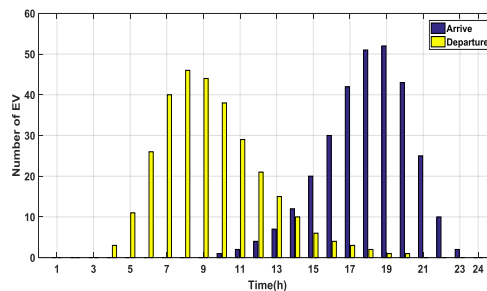
شکل (۲): شبکه ۳۳ شینه آزمایش IEEE به‌عنوان سیستم مورد مطالعه

چالش‌های احتمالی شبکه برحسب نفوذ بالای خودروها امری ضروری است. بنابراین، این مقاله به بررسی عملکرد تجمیع‌کننده پرداخته که علاوه بر افزایش سودآوری خود، عملکرد قابل‌اعتماد شبکه را نیز تضمین خواهد کرد. بر اساس مدل‌سازی، چارچوب روش پیشنهادی برای حل مسئله بهینه‌سازی مطابق شکل (۱) نشان داده شده است. بر اساس شکل (۱)، با استفاده از داده‌های ورودی و با توجه به ماهیت تصادفی مسئله، برنامه‌نویسی تصادفی، مسئله بهینه‌سازی به کمک الگوریتم ژنتیک و با استفاده از نرم‌افزار MATLAB، تهیه و تدوین شده است.

۴- شبیه‌سازی و نتایج عددی

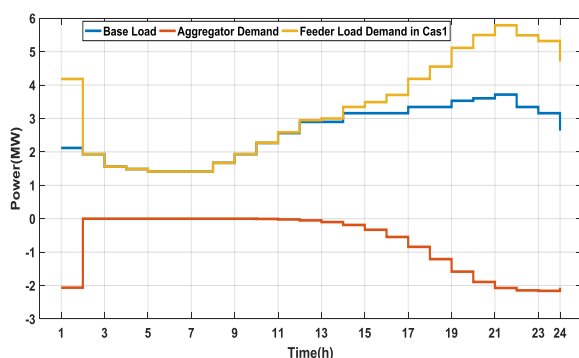
در ادامه، نتایج و تحلیل عددی ارائه شده و عملکرد روش پیشنهادی در قالب یک برنامه‌ریزی بهینه برای سناریوهای مختلف بررسی می‌گردد. با در نظر گرفتن ماهیت تصادفی رفتار رانندگان خودروها، تجمیع‌کننده باید بهترین شرایط لازم با بیشترین سودآوری را فراهم نماید. بر این اساس، مدل بهینه‌سازی، یک برنامه‌ریزی زمانی ۲۴ ساعته و تعیین‌کننده میزان بهینه شارژ/دشارژ خودروها در قالب تجمیع‌کننده خصوصی می‌باشد. در این بخش، جهت بررسی عملکرد روش پیشنهادی، برنامه تهیه شده بر روی شبکه آزمایشی ۳۳ باسه IEEE پیاده‌سازی شده است. شکل (۲) شبکه تست موردنظر را نشان می‌دهد (Mohiti at el. 2019). بر اساس شکل (۲)، فرض می‌شود تعداد خودروها برابر با ۳۰۰ بوده و توسط یک واحد تجمیع‌کننده خصوصی که در باس ۷ قرار دارد، کنترل می‌شوند. جهت نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، سناریوهای مختلف مطابق جدول (۲) در نظر گرفته می‌شود. بر اساس جدول (۲)، سناریوی ۱ جهت شارژ کنترل نشده خودروهای الکتریکی در نظر گرفته شده است. در حالت شارژ کنترل نشده و ناهماهنگ، هیچ کنترلی بر روی فرآیندهای شارژ وجود ندارد و خودروها بلافاصله پس از اتصال به شبکه، عملیات شارژ را آغاز کرده و تا زمان شارژ کامل باتری‌ها ادامه دارد. سناریوی ۲، شارژ کنترل شده بدون در نظر گرفتن پارامترهای شبکه توزیع و قیمت‌گذاری به روش TOU را ارائه می‌نماید. در این سناریو تجمیع‌کننده باهدف افزایش سودآوری خود، شارژ و دشارژ خودروها را مدیریت می‌کند. در سناریو ۳، شارژ کنترل شده با در نظر گرفتن هم‌زمان تابع هدف تجمیع‌کننده و تأثیر قیمت‌گذاری TOU بررسی می‌شود. باید توجه داشت، مدل‌سازی الگوی رانندگی وابسته به زمان ورود و خروج از پارکینگ است که این موضوع برای همه خودروهای الکتریکی با استفاده از توابع چگالی احتمال تعریف شده و در شکل ۳ نشان داده شده است. مقدار میانگین برای توابع چگالی احتمال مربوط به زمان رسیدن، زمان ترک و مسافت طی شده به ترتیب برابر با $5/9$ ، $2/2$ و $1/1$ و انحراف معیار آن‌ها به ترتیب برابر $18/9$ ، $0/3$ و $3/1$ در نظر گرفته شده است (Hashemi at el. 2019). بر اساس شکل (۳)، با توجه به تعداد خودروها، ورود به پارکینگ از ساعت ۲۳:۰۰-۱۰:۰۰ و خروج آن‌ها در ساعت ۲۰:۰۰-۴:۰۰ لحاظ شده است.

شده است. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، در سناریو ۱ بلافاصله پس از رسیدن خودروها به پارکینگ، عملیات شارژ آن‌ها بدون هیچ مدیریتی آغاز شده و تا زمان شارژ کامل باتری ادامه خواهد داشت. بر اساس شکل (۵)، بیشترین توان موردنیاز جهت شارژ خودروهای الکتریکی در ساعت ۲۳ و ۲۴ به مقدار ۲/۱۶ مگاوات بوده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داده که شارژ کنترل نشده باعث افزایش بار اوج شبکه در ساعت ۲۱ از ۳/۷ به ۵/۷۸ مگاوات شده که افزایش ۵۶/۲۲ درصدی را به همراه داشته است. با افزایش بار اوج شبکه، تلفات نیز بسیار افزایش می‌یابد که در شکل (۶) نشان داده شده است. بر اساس شکل (۶)، می‌توان مشاهده کرد که نتیجه افزایش بار پیک شبکه، افزایش قابل‌ملاحظه تلفات در این ساعات بوده است. بنابراین، تلفات شبکه در ساعات‌های ورود خودروها به ایستگاه شارژ، افزایش چشمگیری داشته است که حضور شارژ کنترل‌شده و هماهنگ احساس می‌شود. همچنین مطابق نتایج به‌دست‌آمده، تلفات شبکه با حضور خودروهای الکتریکی در طول یک شبانه‌روز برابر ۴/۰۵۹۱ مگاوات ساعت می‌باشد.

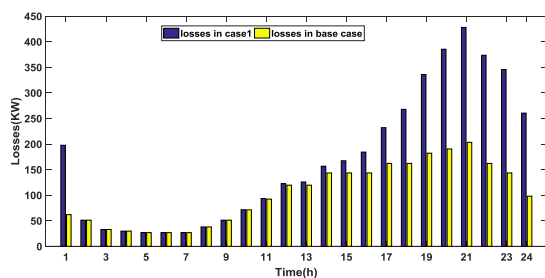


شکل (۳): تعداد خودروهای رسیده/خارج‌شده به/از پارکینگ‌های شارژ

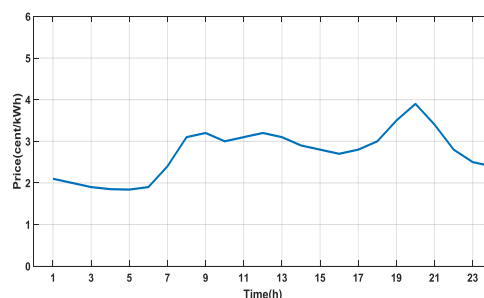
از این‌رو، با توجه به زمان قطع/وصل خودرو الکتریکی از/به شبکه و انرژی ذخیره‌شده از قبل، می‌توان میزان شارژ یا دشارژ خودروهای الکتریکی را به‌صورت بهینه تعیین نمود. سطح شارژ نهایی خودروها در زمان قطع شدن از شبکه برابر با ۸۰٪ ظرفیت باتری خودروها در نظر گرفته شده است. نرخ شارژ خودروها برابر با ۷/۲ کیلووات، ظرفیت باتری خودروها برابر با ۷۲ کیلووات ساعت و کل مسافتی که خودروها در حالت الکتریکی می‌توانند طی کنند (AER) برابر با ۲۱۲ مایل فرض شده است (Liu et al. 2021). بر اساس روش پیشنهادی شارژ/دشارژ خودروها را در بازه زمانی ۲۴ ساعت‌توری برنامه‌ریزی می‌کند که تابع هدف مسئله برآورده شود. قیمت انرژی در زمان واقعی در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق شکل (۴) بیشترین و کمترین قیمت انرژی به ترتیب برای ساعات ۲۰ و ۵ حاصل شده است. ضریب مؤثر در قیمت انرژی بر اساس TOU در این مقاله برابر با ۳ (cent/kWh) در نظر گرفته شده است. به‌منظور مشاهده عملکرد شبیه‌سازی برای روش پیشنهادی، منحنی بار قبل و بعد از مدیریت تجمیع‌کننده برای سناریوهای مختلف بررسی شده است.



شکل (۵): منحنی بار شبکه (سناریو ۱)



شکل (۶): مقایسه تلفات شبکه در ساعات مختلف (سناریو ۱)



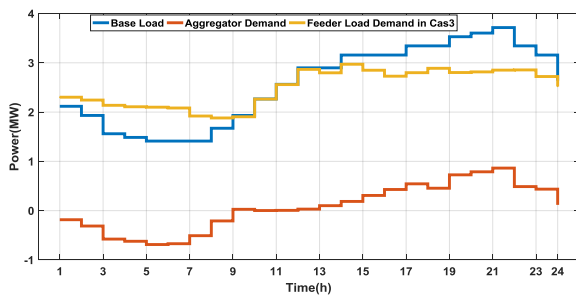
شکل (۴): قیمت زمان واقعی انرژی در بازار (Hashemi et al. 2019)

۱-۴-سناریو ۱

نتایج شبیه‌سازی در حالت شارژ کنترل‌نشده خودروها در شکل (۵) نشان داده شده است. بر این اساس، مقدار توان دریافتی از شبکه برای شارژ خودروها و منحنی بار شبکه با/بدون حضور خودروها رسم

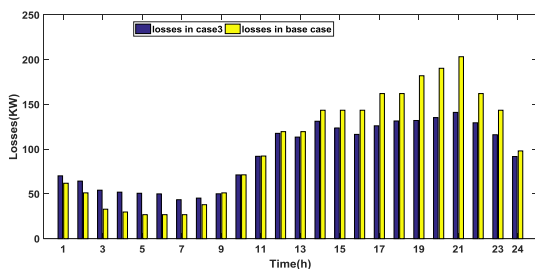
۲-۴-سناریو ۲

بر اساس نتایج سناریو ۱، عدم برنامه‌ریزی شارژ/دشارژ خودروها بر منحنی بار شبکه، تلفات و پروفیل ولتاژ تأثیر زیادی گذاشته که نتیجه آن نیاز به مدیریت بهینه است. شکل (۷) منحنی بار شبکه بدون/با حضور خودروها و میزان توان تجمیع‌کننده را نشان می‌دهد که هماهنگ‌سازی شارژ/دشارژ خودروها در سناریوی ۲ انجام شده است. مطابق شکل (۷)، از آن‌جایی که تابع هدف در سناریو ۲



شکل (۹): منحنی بار شبکه (سناریو ۳)

مطابق نتایج شکل (۹)، می‌توان مشاهده کرد که به دلیل کم باری در ساعات اولیه روز، مقدار زیادی از شارژ خودروها به آن ساعات منتقل شده است. در این سناریو، بر اساس نحوه قیمت‌گذاری DSO، شارژ/دشارژ خودروها توسط تجمیع‌کننده به صورت توزیع شده در طول شبانه‌روز و به طور هماهنگ اتفاق افتاده است. همچنین، منحنی بار شبکه مسطح شده و پیک منحنی بار در ساعت ۲۱ از ۳/۷ به ۲/۸۵ مگاوات، یعنی به میزان ۲۳ درصد کاهش یافته است. این راهکار از بارگیری بیش‌ازحد خطوط و ترانسفورماتورهای شبکه جلوگیری کرده و منحنی بار روزانه را با پر کردن دره‌های آن، مسطح می‌کند. اگرچه پیک بار شبکه در ساعت ۱۴ به میزان ۲/۹۷ مگاوات رسیده، اما این مقدار از پیک بار پایه کمتر بوده و نشان‌دهنده هماهنگی و برنامه‌ریزی مناسب توسط تجمیع‌کننده است. باید توجه داشت که در این سناریو نیز سود تجمیع‌کننده به ۱۸۰ دلار رسیده که نسبت به سناریو دوم تفاوت محسوسی ندارد. در سناریو سوم و بر اساس سیاست و نحوه قیمت‌گذاری DSO برای خرید/فروش انرژی از/به تجمیع‌کننده، پیاده‌سازی روش پیشنهادی، منجر به کاهش تلفات شبکه در طول زمان برنامه‌ریزی و مسطح شدن سطح و لثاژ شده است. شکل (۱۰) مقایسه تلفات شبکه در سناریو ۳ را نشان می‌دهد.



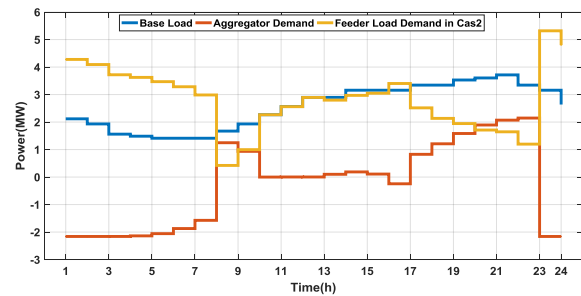
شکل (۱۰): مقایسه تلفات شبکه (سناریو ۳)

بر اساس شکل (۱۰)، تلفات در زمان‌های پیک بار کاهش زیادی داشته و در ساعات‌های کم‌باری افزایش یافته است. اما تلفات کلی در زمان برنامه‌ریزی کاهش یافته و به ۲/۴۹۷ مگاوات ساعت رسیده است.

۴-۴- مقایسه سناریوها

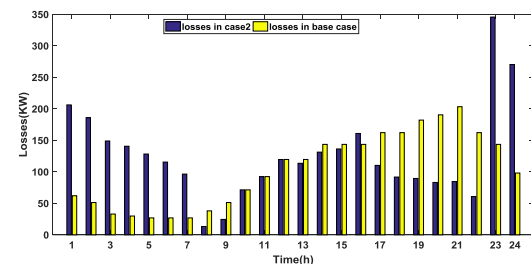
بر اساس نتایج به دست آمده از سناریوهای قبل، حضور خودروهای الکتریکی در شبکه، آن را با چالش‌هایی روبه‌رو می‌کند که با

افزایش سودآوری تجمیع‌کننده بوده، با فرض V2G خودروها با افزایش قیمت انرژی در ساعات ۲۲-۱۷ (مطابق شکل (۴))، دشارژ خودروها در این ساعات‌ها باعث سودآوری تجمیع‌کننده شده است.



شکل (۷): منحنی بار شبکه در حالت شارژ و دشارژ هماهنگ خودروها (سناریو ۲)

از آنجایی که این دشارژ در زمان پیک شبکه رخ داده، باعث کاهش پیک در منحنی بار نیز شده است. از طرفی دیگر، به دلیل کاهش قیمت انرژی در ساعات ابتدایی روز، تجمیع‌کننده با هدف سودآوری بیشتر خود، شارژ خودروها را به آن زمان انتقال داده و در نتیجه پیک جدیدی برای شبکه ایجاد کرده است. پیک شبکه در ساعت ۲۳ به میزان ۵/۳۱ مگاوات رخ داده و سود تجمیع‌کننده در این سناریو به ۱۸۰/۳ دلار رسیده است. اگرچه در این سناریو مدیریت شارژ/دشارژ توسط تجمیع‌کننده خصوصی با هدف افزایش سودآوری انجام شده، اما شاخص‌های شبکه نادیده گرفته شده است. این پیک جدید ایجاد شده روی شبکه، بر روی تلفات شبکه اثر گذاشته که در شکل (۸) برای سناریوی ۲ نشان داده شده است. بر اساس شکل (۸)، اگرچه تلفات در ساعات‌های پرباری کاهش یافته، اما تلفات کلی شبکه نسبت به حالت پایه، افزایش را نشان می‌دهد. در این سناریو، تلفات شبکه به ۳/۰۱۸۸ مگاوات ساعت رسیده است.



شکل (۸): مقایسه تلفات شبکه در ساعات مختلف (سناریو ۲)

۳-۴- سناریو ۳

در سناریو سوم، بر اساس سیاست و نحوه قیمت‌گذاری DSO برای خرید/فروش انرژی از/به تجمیع‌کننده، شارژ و دشارژ خودروها موجب مسطح شدن منحنی بار شبکه و همچنین کاهش تلفات شبکه شده است. بر این اساس، منحنی بار شبکه برای سناریو ۳ در شکل (۹) نشان داده شده است.

۲/۴۸۲۳	-	حالت پایه شبکه
۴/۰۵۹۱	-	سناریو ۱
۳/۰۱۸۸	۱۸۰/۳۵	سناریو ۲
۲/۲۴۹۷	۱۸۰/۰۱	سناریو ۳

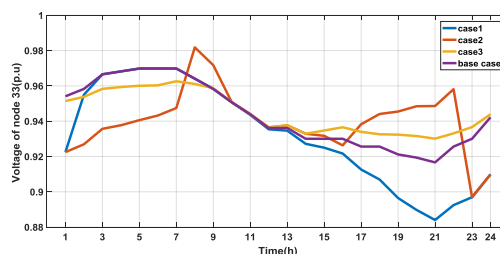
۵- نتیجه گیری

در این مقاله، روشی جهت خودبرنامهریزی شارژ و دشارژ تجمیع کننده‌ی خصوصی خودروهای الکتریکی با در نظر گرفتن مدل تصادفی آن‌ها به منظور حداکثر شدن سود تجمیع کننده و بهبود شاخص‌های فنی شبکه ارائه شده است. نتایج شبیه سازی نشان داده که عدم برنامهریزی مناسب شارژ و دشارژ خودروها، اگرچه می‌تواند سود تجمیع کننده را به دنبال داشته باشد، اما باعث افزایش تلفات و کاهش غیرقابل قبول ولتاژ شبکه خواهد شد. بنابراین، عدم توجه به چگونگی شارژ و دشارژ خودروها عملاً شرایط غیرقابل قبولی برای شبکه به وجود خواهد آورد. همچنین مطابق بررسی‌های انجام شده می‌توان مشاهده کرد که در برنامهریزی شارژ و دشارژ تجمیع کننده‌ها، توجه به پارامترهای شبکه علاوه بر تضمین سود تجمیع کننده، منجر به بهبود شاخص‌هایی همچون تلفات شبکه و پروفیل ولتاژ شده که نتیجه آن شرایط برد-برد برای بخش خصوصی و بهره‌بردار شبکه خواهد بود.

مراجع

- Alipour, M., Mohammadi-Ivatloo, B., Moradi-Dalvand, M., Zare, K., (2017). Stochastic scheduling of aggregators of plug-in electric vehicles for participation in energy and ancillary service markets, *Energy*, vol. 118, pp. 1168-1179.
- Chen, N., Quek, T. Q. S., Tan, C. W., (Nov, 2012). Optimal charging of electric vehicles in smart grid: Characterization and valley-filling algorithms, *nIEEE 3rd Int. Conf. Smart Grid Commun. (Smart Grid Comm)*, Tainan, Taiwan.
- Chung, H., Li, W., Yuen, C., Wen, C., Crespi, N., (2019). Electric Vehicle Charge Scheduling Mechanism to Maximize Cost Efficiency and User Convenience, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 3, pp. 3020-3030.
- Clement-Nyns, K., Haesen, E., Driesen, J., (2010). The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 1, pp. 371-380.
- Fan, H., Duan, C., Zhang, C., Jiang, L., Mao, C., Wang, D., (2018). ADMM-Based Multiperiod Optimal Power Flow Considering Plug-In Electric Vehicles Charging, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 4, pp. 3886-3897.
- Fan, Z., (2012). A distributed demand response algorithm and its application to PHEV charging in smart grids, *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 3, pp. 1280-1290.

مدیریت بهینه شارژ/دشارژ خودروها نه تنها می‌تواند اثرات مخرب را کاهش داد، بلکه می‌تواند شرایط مساعدی برای شبکه به وجود آورد. نتایج سناریو ۲ نشان داده که با مدیریت ناهماهنگ خودروها و بدون در نظر گرفتن شاخص‌های شبکه، موجب افزایش بار بر روی شبکه توزیع شده که نتایج نامطلوبی مانند افزایش تلفات، اشغال ظرفیت خطوط، و کاهش قابلیت اطمینان شبکه را به همراه خواهد داشت. جهت اجتناب از رخداد این مسائل، مطابق با روش پیشنهادی، مدیریت هماهنگ شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی با در نظر گرفتن شاخص‌های شبکه نیاز بوده که ضمن افزایش سود تجمیع کننده، مسطح شدن سطح ولتاژ و کاهش تلفات را به همراه خواهد داشت. شکل (۱۱) مقایسه پروفیل ولتاژ در شین ۳۳ که یکی از ضعیف‌ترین شین‌های از نظر سطح ولتاژ در این شبکه به شمار می‌رود را برای سناریوهای مختلف نشان می‌دهد. بر اساس شکل (۱۱)، در سناریو ۱، به دلیل شارژ ناهماهنگ خودروها به خصوص در زمان پرباری شبکه، سطح ولتاژ شبکه در مقایسه با بار پایه بسیار کاهش یافته به طوری که ولتاژ در شین ۳۳ به میزان ۰/۸۸۴ پرینویت رسیده است. در سناریو ۲ در ساعات ابتدایی روز که شارژ خودروها انجام می‌شود، بار شبکه افزایش یافته و موجب کاهش سطح ولتاژ نسبت به بار پایه شده است. در این سناریو، کمینه و بیشینه ولتاژ به ترتیب برابر ۸۹/۶۹ و ۹۸/۱۸ پرینویت بوده که حد پایین ولتاژ در محدوده مجاز قرار ندارد. در سناریو ۳، کمینه و بیشینه ولتاژ در شین ۳۳ به ترتیب به میزان ۰/۹۳ و ۰/۹۶۲ پرینویت رسیده، در حالی که در بار پایه به میزان ۰/۹۷ و ۰/۹۱۷ پرینویت بوده است. بر این اساس، برخلاف حالت شارژ ناهماهنگ، انحراف ولتاژ به میزان مطلوبی کاهش یافته که نشان دهنده کارایی روش پیشنهادی است. همچنین جهت مقایسه بیشتر، تلفات توان و سودآوری تجمیع کننده در سناریوهای مختلف در جدول (۳) ارائه شده است. بر اساس جدول (۳)، اگرچه سودآوری تجمیع کننده در سناریو ۳ تغییرات محسوسی نداشته اما تلفات توان نسبت به سناریوهای ۱ و ۲ به ترتیب به میزان ۴۴/۵۷ و ۲۵/۴۷ درصد کاهش داشته که کارایی روش پیشنهادی در کاهش تلفات را نمایان می‌سازد.



شکل (۱۱): مقایسه سطح ولتاژ در باس ۳۳ در سناریوهای مختلف

جدول (۳): مقایسه تلفات شبکه و سود تجمیع کننده در

سناریوهای مختلف

تلفات (MWh)	سود تجمیع کننده (\$)
-------------	----------------------

- Santos, A., McGuckin, N., Nakamoto, H. Y., Gray, D., Liss, S., (2011). Summary of travel trends: 2009 national household travel survey,” Tech. Rep.
- Tan, J., Wang, L., (2014). Integration of Plug-in Hybrid Electric Vehicles into Residential Distribution Grid Based on Two-Layer Intelligent Optimization, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1774-1784.
- Wen, C. K., Chen, J. C., Teng, J. H., Ting, P., (2012). Decentralized plug-in electric vehicle charging selection algorithm in power systems, *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 1779-1789.
- Gan, L., Topcu, U., Low, S. H., (2013). Optimal decentralized protocol for electric vehicle charging, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 940-951.
- Hashemi, B., Shahabi, M., Teimourzadeh-Baboli, P., (2018). A Novel Charging Plan for PEVs Aggregator Based on Combined Market and Network Driven Approach, *International Journal of Smart Electrical Engineering*, vol. 7, no. 2, pp. 43-50.
- Hashemi, B., Shahabi, M., Teimourzadeh-Baboli, P., (2019). Stochastic-Based Optimal Charging Strategy for Plug-In Electric Vehicles Aggregator Under Incentive and Regulatory Policies of DSO, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 4, pp. 3234-3245.
- Moradi, M. H., Abedini, M., Hosseinian, M., (2015). Improving operation constraints of microgrid using PHEVs and renewable energy sources, *Renewable Energy*, Volume 83, pp. 543-552.
- Mukherjee, J. C., Gupta, A., (2017). Distributed Charge Scheduling of Plug-In Electric Vehicles Using Inter-Aggregator Collaboration, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 1, pp. 331-341.
- Santos, A., McGuckin, N., Nakamoto, H. Y., Gray, D., Liss, S., (2011). Summary of travel trends: 2009 national household travel survey,” Tech. Rep.
- Tan, J., Wang, L., (2014). Integration of Plug-in Hybrid Electric Vehicles into Residential Distribution Grid Based on Two-Layer Intelligent Optimization, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1774-1784.
- Kamankesh, H. R., Agelidis, V. G., Kavousi-Fard, A., (2016). Optimal scheduling of renewable microgrids considering plug-in hybrid electric vehicle charging demand, *Energy*, vol. 100, pp. 285-297.
- Liu, D., Wang, L., Wang, W., Li, H., Liu M. and Xu, X., (2021). Strategy of Large-Scale Electric Vehicles Absorbing Renewable Energy Abandoned Electricity Based on Master-Slave Game, *IEEE Access*, vol. 9, pp. 92473-92482.
- Moghaddam, S. Z., Akbari, T., (2018). Network-constrained optimal bidding strategy of a plug-in electric vehicle aggregator: A stochastic/robust game theoretic approach, *Energy*, vol. 151, pp. 478-489.
- Mohiti, M., Monsef, H., Lesani, H., (2019). A decentralized robust model for coordinated operation of smart distribution network and electric vehicle aggregators, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 104, pp. 853-867.
- Moradi, M. H., Abedini, M., Hosseinian, M., (2015). Improving operation constraints of microgrid using PHEVs and renewable energy sources, *Renewable Energy*, Volume 83, pp. 543-552.
- Mukherjee, J. C., Gupta, A., (2017). Distributed Charge Scheduling of Plug-In Electric Vehicles Using Inter-Aggregator Collaboration, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 1, pp. 331-341.

زیر نویس ها

- ¹ Vehicle to grid
² Distribution network operator
³ Time of use
⁴ National Household Travel Survey