

**Voltage Control and Network Losses Reduction with Intelligent Charge and Discharge Management of Electric Vehicle Batteries Based on Vehicle-To-Grid Technology****Amin Nazarloo, Assistant Professor**Department of Electrical Engineering- Bonab Branch, Islamic Azad University, Bonab, Iran  
nazarloo@bonabiau.ac.ir**Abstract**

The use of electric vehicles (EVs), to reduce greenhouse gases and air pollution caused by the fossil fuel consumption, seems to be an inevitable solution. The increased penetration of EVs imposes a large variable load to the grid. However, the battery of EVs in an aggregator provides a large source of energy storage. Therefore, EVs depending on the charging or discharging modes can act as flexible loads or as flexible energy sources. Then, the proper coordination and control charging and discharging of EVs, using vehicle-to-grid (V2G) technology, not only can minimize the undesirable effects resulting from the increased penetration of EVs, but also can improve the voltage profile. In this paper, a new algorithm with variable-objective function is proposed to control variable quantities of generation and consumption. In the proposed method, the control of the point of common connection (PCC) voltage in a specific value of a determined permissible range, which depends on different operating conditions, can be considered as a variable-objective function. Moreover, there are constraints to state of charge (SOC) of electric vehicles (EVs) batteries and charging/discharging time. Other advantages of using the proposed method are the reduction of network losses in peak load hours and the establishment of an appropriate coordination between charging and discharging EVs. The simulations of the IEEE 14-Bus distribution system with V2G capabilities based on the proposed variable-objective function (VOF) algorithm are implemented for both charging and discharging modes using MATLAB/PSAT software and tested for the various scenarios. Finally, the results of the proposed method are compared with the traditional method and the merit of that is proved.

**Keywords:** distributed generation, electric vehicle, grid to vehicle, peak shaving, valley filling, vehicle to grid

**Received:** 20 November 2022

**Revised:** 20 January 2023

**Accepted:** 19 March 2023

**Corresponding Author:** Dr. Amin Nazarloo

**Citation:** A. Nazarloo, "Voltage control and network losses reduction with intelligent charge and discharge management of electric vehicle batteries based on vehicle-to-grid technology", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 16, no. 61, pp. 157-176, March 2025 (in Persian).

## مدیریت هوشمند شارژ و دشارژ باتری خودروهای برقی به منظور کنترل ولتاژ و کاهش تلفات شبکه بر اساس فناوری خودروی برقی به شبکه

امین نظرلو، استادیار

دانشکده مهندسی برق - واحد بناب، دانشگاه آزاد اسلامی، بناب، ایران  
nazarloo@bonabiau.ac.ir

**چکیده:** از جمله مسائل مهم و در عین حال نگران‌کننده، آلودگی‌های زیست‌محیطی و هدررفت منابع انرژی فسیلی است. به‌منظور کاهش گازهای گل‌خانه‌ای و آلودگی هوای ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی، استفاده از خودروهای برقی امری ناگزیر به‌نظر می‌رسد. با افزایش روزافزون خودروهای برقی و در نتیجه تحمیل بار بیش‌تر به شبکه قدرت، ارائه روشی جدید به‌منظور کنترل ولتاژ و مدیریت شارژ و دشارژ خودروهای برقی و حداقل‌سازی تلفات شبکه ضروری است. با این وجود، اجتماع خودروهای برقی در یک سیستم تجمع‌کننده و انرژی حاصل از باتری‌های آنها، یک منبع عظیم ذخیره انرژی را فراهم می‌نماید. هماهنگی و کنترل مناسب شارژ و دشارژ خودروهای برقی براساس تکنولوژی خودروبرقی به شبکه (V2G)، نه تنها می‌تواند اثرات نامطلوب ناشی از افزایش نفوذ خودروهای برقی را به حداقل برساند بلکه می‌تواند سبب بهبود پروفیل ولتاژ شبکه نیز شود. در این مقاله، به‌منظور کنترل کمیت‌های متغیر تولید و مصرف، یک الگوریتم جدید با تابع هدف متغیر پیشنهاد شده است. در روش پیشنهادی کنترل ولتاژ نقطه اتصالی (PCC) و مدت زمان شارژ/دشارژ در یک بازه معین، که بستگی به شرایط عملکردی مختلف دارد، به عنوان تابع هدف قابل تغییر در نظر گرفته شده است. همچنین، محدودیت‌هایی برای وضعیت شارژ (SOC) باتری خودروهای برقی در نظر گرفته شده است. کاهش تلفات شبکه در پیک بار و ایجاد هماهنگی مناسب بین شارژ و دشارژ که منجر به شارژ کامل خودروهای برقی در انتهای سیکل شارژ می‌شود، از دیگر مزایای استفاده از روش پیشنهادی هستند. شبیه‌سازی‌ها برای یک سیستم توزیع ۱۴ باسه IEEE مجهز به تکنولوژی خودروبرقی به شبکه براساس الگوریتم تابع هدف متغیر (VOF) پیشنهادی برای هر دو حالت شارژ و دشارژ با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی متلب انجام یافته و برای سناریوهای مختلفی ارائه شده است. در نهایت، نتایج حاصل از روش پیشنهادی با نتایج روش مرسوم مقایسه شده و برتری عملکرد آن به اثبات رسیده است.

**کلمات کلیدی:** پیک‌سای، تولید انرژی توزیع‌شده، خودروبرقی به شبکه، خودروبرقی، دره‌زدایی، شبکه به خودروبرقی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۸/۲۹

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۲۸

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر امین نظرلو

نشانی نویسنده‌ی مسئول: بناب - بلوار دانشگاه - دانشگاه آزاد اسلامی واحد بناب - دانشکده مهندسی برق - گروه قدرت

## ۱- مقدمه

یکی از مناسبترین روش‌های موجود برای جلوگیری از کاهش منابع فسیلی و همچنین مشکلات زیست محیطی حاصل از مصرف وسیع این سوخت‌ها، گسترش استفاده از خودروهای برقی است. بنابراین، مطالعه و بررسی پیامدهای افزایش بار ناشی از شارژ خودروهای برقی بر شبکه بسیار حائز اهمیت است [۱-۳]. در هر زمان و مکانی که خودروهای برقی برای شارژ به شبکه متصل شوند، سبب بروز اضافه بار بر روی شبکه محلی خواهند شد. لذا، با افزایش نفوذ خودروهای برقی به شبکه، ایجاد هماهنگی مناسب بین شبکه و خودروهای برقی ضروری به نظر می‌رسد، زیرا که شارژ کنترل نشده خودروهای برقی ممکن است منجر به فروپاشی ولتاژ<sup>۱</sup>، ناپایداری فرکانس، تزریق هارمونیک‌ها و ایجاد مشکلات بسیار دیگری در شبکه توزیع شود. بنابراین هماهنگی و کنترل شارش توان بین شبکه و باتری‌های خودروهای برقی از اهمیت بسیاری برخوردار است [۴،۵]. زمانی که خودروهای برقی در پارکینگ‌ها به شبکه قدرت متصل باشند، انرژی الکتریکی دریافت و ذخیره می‌نمایند. خودروهای برقی همچنین قادر هستند انرژی الکتریکی را مجدداً به شبکه تحویل دهند که این بیانگر مفهوم تکنولوژی خودروبرقی به شبکه<sup>۲</sup> (V2G) است. همچنین به‌کارگیری و فراهم نمودن چندین سرویس جانبی از جمله پشتیبانی و کنترل ولتاژ، پایداری فرکانس و تولید ذخایر گردان از ویژگی‌های متمایز مفهوم V2G هستند. به‌منظور ایجاد چنین سرویس‌هایی، هر خودرو برقی باید مجهز به تعدادی تجهیزات اضافی باشد از قبیل یک واسط الکتریکی برای اتصال به شبکه به‌منظور مبادلات انرژی الکتریکی کنترل شده، یک وسیله اندازه‌گیری و یک واسط مخابراتی دوطرفه با سیستم تجمیع‌کننده<sup>۳</sup> که چگونگی شارژ و دشارژ مجموعه خودروهای برقی را مدیریت و کنترل می‌نماید [۶-۸]. سیستم V2G به عنوان یک عامل مکمل برای منابع انرژی تجدیدپذیر، از قبیل انرژی‌های خورشیدی و بادی، نیز می‌تواند عمل نماید به این گونه که انرژی الکتریکی اضافی در شرایط جوی مناسب بادی برای توربین بادی و در طول روز برای سلول‌های خورشیدی می‌تواند در باتری‌های خودروهای برقی، که مجموعه‌ای از یک منبع عظیم ذخیره‌ساز انرژی را تشکیل می‌دهند، ذخیره شده و در زمان اوج مصرف، انرژی الکتریکی ذخیره شده به شبکه قدرت برگردانده شود و لذا سیستم V2G به‌طور مؤثری سبب پایداری توان حاصل از شرایط متغیر انرژی خورشیدی و بادی می‌گردد [۹-۱۲]. همچنین سیستم V2G قادر به افزایش پایداری و قابلیت اطمینان شبکه، جبران‌سازی کمبود توان، کاهش آلودگی هوا، بهبود بازده کلی سیستم است [۱۳-۱۷]. با توجه به این‌که ساختار سیستم‌های الکتریکی و شبکه قدرت مرسوم طوری طراحی شده‌اند که برای ماکزیمم تقاضای بار (دیماند) جوابگو باشند، لذا سیستم در طول زمان کم‌باری تحت شرایط پایین‌تر از ظرفیت نامی خود مورد بهره‌برداری قرار گرفته به‌طوری‌که در شهرهای صنعتی فاصله بین ماکزیمم و مینیمم مقدار دیماند<sup>۴</sup> به مقدار بالای ۴۰ تا ۵۰ درصد نیز رسیده است. بنابراین، فرآیند پیک‌سایی<sup>۵</sup> و دره‌زدایی<sup>۶</sup> در منحنی بار روزانه برای کاهش هزینه‌های ساختاری و بهبود بهره‌وری سیستم لازم و ضروری است. تکنولوژی V2G، در مقایسه با سایر روش‌های موجود برای پیک‌سایی و دره‌زدایی، می‌تواند راه‌حل اقتصادی و مؤثرتری بوده و شکاف بین تولید و تقاضا را کاهش دهد. بیان این مطلب که باتری‌های خودروهای برقی سریع‌تر از ژنراتورها قادر به پاسخگویی به تغییرات دیماند شبکه هستند (کمتر از چند ثانیه)، اهمیت سیستم V2G را بیش از پیش آشکار می‌نماید [۱۸-۲۰]. محققان در مورد به‌کارگیری خودروهای برقی برای پشتیبانی از شبکه به‌منظور کنترل ولتاژ، تنظیم فرکانس و به عنوان ذخیره‌ساز انرژی برای فرآیند پیک‌سایی و دره‌زدایی مطالعاتی انجام داده‌اند [۲۱-۲۴]. در مرجع‌های [۲۵] و [۲۶]، ذخیره انرژی در باتری‌های خودروهای برقی به‌منظور تأمین تقاضای پیک بار ارائه شده ولی در مورد کنترل مناسب ولتاژ ارزیابی گسترده‌ای انجام نیافته است. در مرجع [۲۷]، یک ایستگاه شارژ<sup>۷</sup> خودروهای برقی و همچنین در مرجع [۲۸] ایستگاه شارژ چندگانه<sup>۸</sup> خودروهای برقی به‌منظور تنظیم ولتاژ و پیک‌سایی با استفاده از کنترل‌کننده منطق فازی<sup>۹</sup> (FLC) مورد ارزیابی قرار گرفته است، با این وجود، در مراجع فوق، ولتاژ نقطه اتصالی<sup>۱۰</sup> (PCC)، بخصوص در شرایط شارژ، به نحو مناسبی کنترل نشده و تنظیم ولتاژ کاملاً صورت نگرفته است. بعلاوه روش کنترلی فازی مورد استفاده در مراجع فوق به لحاظ تعداد خودروهای برقی دارای محدودیت است به‌طوری‌که با افزایش نفوذ خودروهای برقی کنترل‌کننده فوق جوابگو نخواهد بود.

در این تحقیق، به‌منظور کنترل وضعیت شارژ<sup>۱۱</sup> (SOC) باتری خودروهای برقی<sup>۱۲</sup> در محدوده شارژ و دشارژ، که توسط مالک خودرو یا سیستم تجمیع‌کننده تعیین می‌شود، روشی بر پایه ظرفیت باتری ارائه شده است. همچنین با توجه به این‌که سیستم‌های تجمیع‌کننده خودروهای برقی چه به عنوان بار مصرفی، تحت شرایط شارژ و چه به عنوان منبع انرژی تحت شرایط دشارژ همیشه

دارای رفتار متغیر هستند لذا در این مقاله یک روش الگوریتمی جدید با تابع هدف متغیر<sup>۱۳</sup> (VOF) به منظور تنظیم مناسب ولتاژ نقطه اتصالی سیستم V2G به شبکه و براساس تعیین و کنترل توان مبادله شده بین شبکه و خودروهای برقی پیشنهاد شده است، به طوری که براساس انرژی کل موجود یا مورد نیاز تعیین شده توسط سیستم کنترل کننده SOC و با توجه به محدودیت‌های وضع شده برای SOC باتری خودروهای برقی، مدت زمان شارژ-دشارژ و ولتاژ نقطه اتصالی، حداقل نمودن اختلاف اندازه ولتاژ نقطه اتصالی از مقدار یک پریونیت به عنوان تابع هدف متغیر در نظر گرفته شده است. روش الگوریتمی پیشنهادی VOF برای یک شبکه ۱۴ باسه IEEE مورد بهره‌وری قرار گرفته و همچنین تأثیر خودروهای برقی متعدد متصل به شبکه با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری ارزیابی شده است. در نهایت جهت اثبات استحکام و دقت مناسب روش الگوریتمی پیشنهادی، نتایج حاصل از روش VOF با روش کنترل کننده منطق فازی مقایسه شده‌اند.

## ۲- مفاهیم مورد بحث برای تعریف مسئله

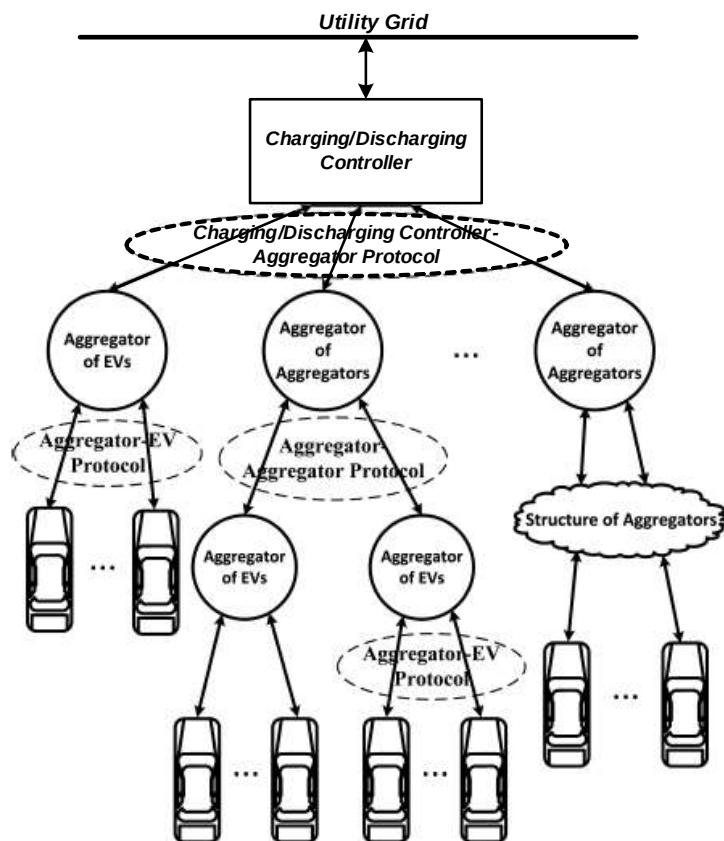
به منظور تعریف مسئله و بیان اهداف روش کنترلی پیشنهادی ارائه مباحثی در مورد مفاهیم سیستم V2G لازم به نظر می‌رسد که در این قسمت اشاره می‌شود.

### ۲-۱- ساختار اساسی و پایه سیستم خودروی برقی به شبکه

ساختار یک سیستم V2G چند سطحه که در شکل (۱) نشان داده شده است، شامل سه قسمت کنترل کننده شارژ-دشارژ<sup>۱۴</sup>، مجموعه تجمیع کننده‌ها و مجموعه خودروهای برقی است. برای سهولت، سیستم‌های تجمیع کننده‌ای که مستقیماً به خودروهای برقی متصل هستند را تجمیع کننده‌های خودروهای برقی<sup>۱۵</sup> و سایر سیستم‌های تجمیع کننده را تجمیع کننده، تجمیع کننده‌ها<sup>۱۶</sup> نامیده شده‌اند. برای نمونه، یک سیستم تجمیع کننده خودروهای برقی می‌تواند در یک جایگاه پارک یا در منطقه‌ای که تعداد زیادی خودروی برقی پارک شده‌اند، نصب گردد. یک سیستم تجمیع کننده تجمیع کننده‌ها نیز می‌تواند چندین جایگاه پارک خودروهای برقی را کنترل نماید. مطابق شکل (۱) سه نوع پروتکل عملکردی از قبیل پروتکل بین کنترل کننده شارژ-دشارژ با سیستم تجمیع کننده اصلی<sup>۱۷</sup>، پروتکل بین سیستم تجمیع کننده اصلی با سایر تجمیع کننده‌ها<sup>۱۸</sup> و پروتکل بین تجمیع کننده با خودروهای برقی<sup>۱۹</sup> قابل طرح هستند که هر پروتکل بین یک گره بالایی و گره‌های پایینی مرتبط عمل می‌نماید. این تحقیق بر روی دو پروتکل کنترل کننده شارژ-دشارژ با سیستم تجمیع کننده اصلی به منظور کنترل مناسب ولتاژ نقطه اتصالی با استفاده از کنترل توان شارش یافته بین شبکه و نقطه اتصالی و پروتکل سیستم تجمیع کننده با خودروهای برقی به جهت تعیین انرژی موجود و یا مورد نیاز برای عملکرد در حالت‌های شارش توان از خودرو برقی به شبکه و یا از شبکه به خودرو برقی<sup>۲۰</sup> (G2V)، متمرکز شده است.

### ۲-۲- کنترل کننده بر پایه کنترل وضعیت شارژ برای محاسبه انرژی مورد نیاز و یا موجود در حالت‌های شارژ و دشارژ

به طوری که بیان شد شرایط دشارژ V2G و شارژ G2V برای باتری خودروهای برقی، به ترتیب در پیک بار و کم‌باری انجام می‌گیرد. با این وجود تعدادی از خودروهای برقی ممکن است نه تنها انرژی مازاد برای تزریق توان و حمایت از شبکه نداشته باشند، بلکه با کمبود انرژی نیز مواجه شوند، لذا این تحقیق کنترل کننده‌ای بر پایه SOC ارائه کرده که در آن SOC هر باتری خودروی برقی بین دو مقدار حداقل و حداکثر که توسط مالک خودرو و یا سیستم تجمیع کننده تعیین می‌گردد، کنترل می‌شود. در این مقاله مانند مرجع [۲۷] حدود حداقل و حداکثر مقادیر SOC به ترتیب ۵۰ و ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شده‌اند تا نتایج حاصله با نتایج مرجع [۲۷] قابل مقایسه باشند. در حالت دشارژ اگر SOC باتری هر خودرو برقی از حداقل مقدار تعیین شده ( $SOC_{min}$ ) بیشتر باشد، انرژی مازاد می‌تواند برای تزریق توان به شبکه به منظور کنترل ولتاژ به کار گرفته شود ولی اگر کمتر از  $SOC_{min}$  باشد سیستم تجمیع کننده مربوطه انرژی کافی و مورد نیاز برای شارژ خودرو برقی تا حد  $SOC_{min}$  را تأمین می‌نماید. در رابطه‌های (۱) و (۲) کل انرژی موجود و مورد نیاز به ترتیب، برای عملکرد در شرایط دشارژ و شارژ به دست آمده‌اند.



شکل (۱): ساختار پایه سیستم خودروی برقی به شبکه [۲۴]

Figure (1): The structure of V2G [24]

$$E_{Tava} = \sum (SOC_i - SOC_{min}) \times Ec_i \quad (۱)$$

$$E_{Treq} = \sum (SOC_{max} - SOC_i) \times Ec_i \quad (۲)$$

که در آن  $SOC_{max}$  و  $SOC_i$  به ترتیب SOC کنونی و حداکثر مقدار تعیین شده SOC هستند.  $Ec_i$  ظرفیت انرژی باتری یک خودرو برقی،  $E_{Tava}$  انرژی کل موجود برای حمایت از شبکه در شرایط پیک بار و  $E_{Treq}$  انرژی کل مورد نیاز برای شارژ خودروهای برقی در شرایط کمباری هستند.

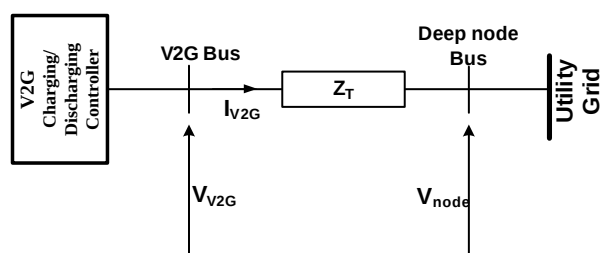
### ۳-۲- بهره‌وری از انرژی باتری خودرو برقی

دیگرام شماتیکی یک سیستم V2G، که توسط یک ترانسفورماتور توزیع ۱۱۰۰۰/۴۴۰ ولت و خط رابط به نقطه اتصالی یک شبکه توزیع متصل شده در شکل (۲) نشان داده شده است. توان ظاهری تحویلی توسط باتری خودروهای برقی به وسیله رابطه‌های (۳) و (۴) تعیین می‌شوند به‌طوری‌که  $S_{V2G}$  و  $I_{V2G}$  به ترتیب توان ظاهری و جریان تولید شده توسط باتری خودروی برقی هستند.  $|V_{V2G}|$  و  $|V_{node}|$  به ترتیب اندازه ولتاژهای ابتدا و انتهای خط رابط هستند. زاویه  $\delta$  معرف زاویه فاز بین  $V_{V2G}$  و  $V_{node}$  است.  $|Z_T|$  اندازه امپدانس خط رابط بین سیستم کنترل‌کننده شارژ-دشارژ و نقطه اتصالی شامل امپدانس ترانسفورماتور است. همچنین زاویه  $\theta$  بیانگر زاویه فاز امپدانس خط است.

$$S_{V2G} = V_{V2G} I_{V2G}^* \quad (۳)$$

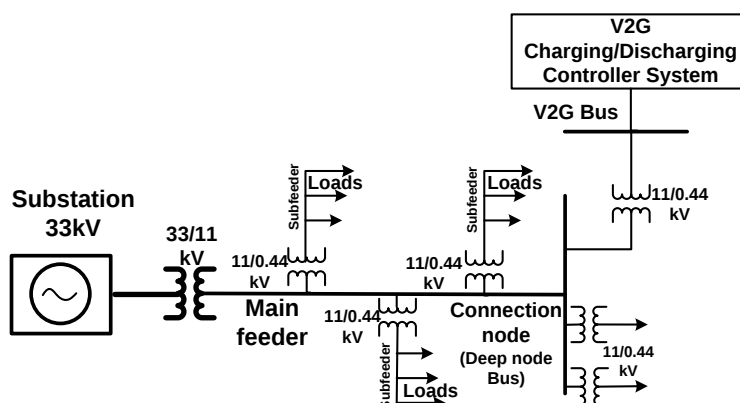
$$I_{V2G} = \frac{|V_{V2G}| \angle \delta - |V_{node}| \angle 0}{|Z_T| \angle \theta} \quad (۴)$$

با جای‌گذاری رابطه (۴) در (۳) و جداسازی قسمت‌های حقیقی و موهومی توان ظاهری، توان‌های اکتیو ( $P_{V2G}$ ) و راکتیو ( $Q_{V2G}$ ) حاصل می‌شوند.



شکل (۲): دیاگرام شماتیکی سیستم خودروی برقی متصل به شبکه [۱۱]

Figure (2): Diagram of the V2G system connected to the network [11]



شکل (۳): سیستم توزیع شعاعی نمونه [۱۶]

Figure (3): Typical distribution system [16]

$$S_{V2G} = \frac{|V_{V2G}|^2}{|Z_T|} \angle \theta - \frac{|V_{V2G}| \times |V_{node}|}{|Z_T|} \angle (\delta + \theta) \quad (5)$$

$$P_{V2G} = \frac{|V_{V2G}|^2 \cos(\theta) - |V_{V2G}| \times |V_{node}| \cos(\theta + \delta)}{|Z_T|} \quad (6)$$

$$Q_{V2G} = \frac{|V_{V2G}|^2 \sin(\theta) - |V_{V2G}| \times |V_{node}| \sin(\theta + \delta)}{|Z_T|} \quad (7)$$

معادله ولتاژ شین V2G در شکل (۲) به صورت زیر قابل بیان است:

$$V_{V2G}^2 = V_{node}^2 - 2(P_{V2G} r_T + Q_{V2G} x_T) + \left( \frac{P_{V2G}^2 + Q_{V2G}^2}{V_{node}^2} \right) (r_T^2 + x_T^2) \quad (8)$$

به طوری که  $r_T$  و  $x_T$  به ترتیب بیانگر خاصیت اهمی و سلفی خط رابط بین شین V2G و نقطه اتصالی هستند. مقدار تقریبی افزایش ولتاژ ناشی از تزریق انرژی خودرو برقی به نقطه اتصالی بر اساس رابطه زیر قابل حصول است [۲۹،۳۰]:

$$\Delta V_{V2G} = \frac{P_{V2G} r_T + Q_{V2G} x_T}{V_n} \quad (9)$$

که در آن  $V_n$  ولتاژ نامی خط است. اگر تنها تزریق توان راکتیو توسط باتری خودرو برقی مورد نیاز باشد، زاویه  $\delta$  صفر بوده و ولتاژهای  $V_{V2G}$  و  $V_{node}$  هم فاز خواهند شد و توان‌های اکتیو و راکتیو تحویلی به صورت زیر حاصل خواهند شد:

$$P_{V2G} = 0 \quad (10)$$

$$Q_{V2G} = \frac{|V_{V2G}|^2 - |V_{V2G}| \times |V_{node}|}{X_T} \quad (11)$$

برای تصحیح مقادیر بزرگ ولتاژ زاویه فاز نیز باید به منظور تزریق توان اکتیو به شبکه همانند توان راکتیو کنترل شود. از آنجا که هدف اصلی این مقاله ارائه مفهوم پشتیبانی از شبکه با استفاده از تزریق توان اکتیو توسط V2G است و همچنین با توجه به

این که بارهای مصرفی در ساعات پیک بار عمدتاً از نوع روشنایی و در نتیجه اهمی هستند، لذا مطابق مرجع [۲۷] و به منظور مقایسه با آن ضریب توان برای تمامی شرایط شارژ و دشارژ برابر ۰/۹ در نظر گرفته شده است.

### ۳- روش الگوریتمی پیشنهادی تابع هدف متغیر برای کنترل ولتاژ

یک سیستم توزیع شعاعی نوعی ۳۳ کیلوولت که توسط یک ترانسفورماتور ۳۳/۱۱ کیلوولت، یک فیدر اصلی ۱۱ کیلوولت را فراهم نموده است، مطابق شکل (۳) توسط ترانسفورماتورهای توزیع ۱۱۰۰۰/۴۴۰ ولت، ۵۰۰ کیلوولت-آمپر از طریق فیدرهای فرعی بارهای مختلف را تغذیه می‌نماید. نقطه ژرف این سیستم توزیع شعاعی، که ماکزیمم افت ولتاژ ناشی از اضافه بار در آن شین رخ می‌دهد، به عنوان نقطه اتصالی سیستم V2G به شبکه برای کنترل شارش توان بین نقطه اتصالی و سیستم کنترل کننده شارژ-دشارژ و به منظور کنترل مناسب ولتاژ نقطه اتصالی، در نظر گرفته شده است. هدف اصلی این تحقیق کنترل شارش توان بین شین V2G و نقطه اتصالی به منظور تنظیم دقیق ولتاژ نقطه اتصالی ( $V_{node}$ ) در مقدار یک پریونیت و یا در محدوده مجاز تعیین شده است. بنابراین باید مقدار اولیه برای ولتاژ شین خودروی برقی به شبکه ( $V_{V2G}$ ) و مقدار ولتاژ مرجع ( $V_{ref}$ ) تعیین گردند. لذا، مناسبترین مقدار اولیه برای  $V_{V2G}$  و مقدار ولتاژ مرجع به منظور دستیابی به هدف مورد نظر، برابر یک پریونیت در نظر گرفته شده‌اند. براساس رابطه (۱۲) که در آن مطابق شکل (۲)،  $I_{V2G0}$  جریان جاری بین نقطه اتصالی و شین V2G بوده که اندیس صفر در پارامترها بیانگر تکرار صفر ناشی از مقادیر اولیه و قبل از عملکرد سیستم کنترل کننده V2G است. همچنین امپدانس  $Z_T$  معادل ۰/۵۵ j پریونیت در نظر گرفته شده است. ولتاژ خروجی سیستم V2G و توان‌های اکتیو و راکتیو در اولین تکرار به صورت رابطه‌های (۱۳) الی (۱۶) حاصل می‌شوند که در آن  $P_{V2G}$  و  $Q_{V2G}$ ، به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو شارش یافته بین شین V2G و نقطه اتصالی هستند. بنابراین،  $V_{V2G}$ ،  $P_{V2G}$  و  $Q_{V2G}$  در شین V2G بسته به شرایط عملکرد (مد عملکردی دشارژ یا شارژ) به وسیله کنترل کننده شارژ-دشارژ تعیین و تولید شده و پخش بار نیوتن-رافسون بر روی شبکه قدرت با حضور تجهیز V2G انجام گرفته است.

$$I_{V2G0} = \frac{V_{V2G0} - V_{node0}}{Z_T} \quad (12)$$

$$V_{V2G1} = V_{V2G0} + \Delta V_{V2G0} \quad (13)$$

$$S_{V2G1} = V_{V2G1} I_{V2G0}^* \quad (14)$$

$$P_{V2G1} = \text{real}\{S_{V2G1}\} \quad (15)$$

$$Q_{V2G1} = \text{image}\{S_{V2G1}\} \quad (16)$$

حال، اگر  $V_{node}$  برابر  $V_{ref}$  باشد، مقادیر به دست آمده در این تکرار به عنوان مقادیر نهایی کمیت‌های فوق قابل استفاده خواهد بود و در غیر این صورت، برای تکرارهای بعدی مراحل مذکور به صورت معادلات (۱۷) لازم الاجرا هستند که اندیس i در پارامترها دلالت بر تعداد تکرارها دارد. این مراحل تا زمانی ادامه خواهند یافت که  $V_{node}$  برابر  $V_{ref}$  گردد و در نتیجه مقادیر نهایی برای  $V_{V2G}$ ،  $P_{V2G}$  و  $Q_{V2G}$  حاصل شوند. سپس مدت زمان دشارژ یا شارژ ( $t_{V2G}$ ) با توجه به مقدار انرژی موجود یا مورد نیاز ( $E_{V2G}$ ) مطابق رابطه (۱۸) به دست می‌آید.

$$\begin{cases} I_{V2Gi} = \frac{V_{V2Gi} - V_{nodei}}{Z_T} \\ V_{V2Gi+1} = V_{V2Gi} + \Delta V_{V2Gi} \\ S_{V2Gi+1} = V_{V2Gi+1} \times I_{V2Gi}^* \\ P_{V2Gi+1} = \text{real}\{S_{V2Gi+1}\} \\ Q_{V2Gi+1} = \text{image}\{S_{V2Gi+1}\} \end{cases} \quad (17)$$

$$t_{V2G} = \frac{E_{V2G}}{P_{V2G}} \quad (18)$$

حال اگر  $t_{V2G}$  حاصله در بازه  $t_{V2G\_min} \leq t_{V2G} \leq t_{V2G\_max}$  واقع شود، که  $t_{V2G\_min}$  حداقل زمان دشارژ و  $t_{V2G\_max}$  حداکثر زمان شارژ هستند که به ترتیب ۲ و ۸ ساعت در نظر گرفته شده‌اند، مقادیر حاصله به عنوان مقادیر نهایی انتخاب می‌شوند و در غیر این صورت  $t_{V2G}$  برابر مقادیر حد آستانه در نظر گرفته شده و  $V_{V2G}$  به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\text{if} \begin{cases} t_{V2G} < t_{V2G\_min} \rightarrow t_{V2G} = t_{V2G\_min} \\ t_{V2G} > t_{V2G\_max} \rightarrow t_{V2G} = t_{V2G\_max} \end{cases} \quad (19)$$

$$V_{V2G} = \frac{V_{node} + \left( V_{node}^2 + 4 \left( \frac{Z_T \times P_{V2G}}{\cos \phi} \right) \right)^{\frac{1}{2}}}{2} \quad (20)$$

بنابراین، بر اساس مقادیر به دست آمده، پخش بار نیوتن-رافسون بار دیگر برای کل شبکه قدرت همگرا شده و  $V_{node}$  محاسبه می‌شود. حال اگر  $V_{node}$  محاسبه شده ( $V_{node\_cal}$ ) در محدوده  $V_{node\_min} \leq V_{node\_cal} \leq V_{node\_max}$  قرار گیرد، که در اینجا  $V_{node\_min}$  و  $V_{node\_max}$  به ترتیب، برابر ۰/۹۸ و ۱/۰۲ پریونیت در نظر گرفته شده‌اند، مقادیر به دست آمده به عنوان مقادیر نهایی قابل قبول هستند، در غیر این صورت  $V_{node}$  برابر مقادیر حد آستانه در نظر گرفته شده و سایر پارامترها مطابق رابطه‌های زیر به دست می‌آیند:

$$\text{if} \begin{cases} V_{node\_cal} < V_{node\_min} \rightarrow V_{node} = V_{node\_min} \\ V_{node\_cal} > V_{node\_max} \rightarrow V_{node} = V_{node\_max} \end{cases} \quad (21)$$

$$\Delta V_{V2G} = V_{node} - V_{node\_cal} \quad (22)$$

$$V_{V2G\_result} = V_{V2G} + \Delta V_{V2G} \quad (23)$$

$$P_{V2G\_result} = \left( \frac{V_{V2G\_result}^2 - V_{node} \times V_{V2G\_result}}{Z_T} \right) \cos \phi \quad (24)$$

$$t_{V2G\_result} = \frac{E_{V2G}}{P_{V2G\_result}} \quad (25)$$

همان‌طور که بیان شد، در فلوچارت روش پیشنهادی VOF، که در شکل (۴) ارائه شده است، کنترل ولتاژ نقطه اتصال در یک مقدار مشخص از یک محدوده مجاز معین به عنوان تابع هدف متغیر در نظر گرفته شده و همچنین محدودیت‌هایی برای SOC باتری خودروهای برقی و مدت زمان شارژ-دشارژ وضع شده است. در نتیجه، به منظور دستیابی به تابع هدف متغیر، تأمین محدودیت‌های مربوطه، ایجاد هماهنگی مناسب بین شارژ و دشارژ و کاهش تلفات شبکه در پیک بار مقادیر مطلوب برای توان‌های مبادله شده بین سیستم V2G و شبکه قدرت تعیین و به شبکه اعمال می‌شوند.

در واقع در روش پیشنهادی، تابع هدف، کنترل ولتاژ در یک بازه معین همراه با کنترل مدت زمان شارژ/دشارژ در یک محدوده مشخص است و در عین حال قیودی نیز برای SOC باتری‌های خودروهای برقی در نظر گرفته شده است. با توجه به این‌که حداقل مقدار SOC باتری‌ها ۵۰ درصد در نظر گرفته شده است، لذا در حالت دشارژ خودروهایی که ظرفیت کمتر از ۵۰ درصد داشته باشند نه تنها انرژی مازادی برای تزریق به شبکه ندارند بلکه با کمبود انرژی نیز مواجه هستند به طوری که این کمبود انرژی با علامت منفی مشخص می‌شود و جبران این کمبود با انرژی مازاد سایر باتری‌ها که دارای بیشبود انرژی (به علت دارا بودن SOC بیش از ۵۰ درصد) هستند انجام می‌گیرد. در این روش، ابتدا بهترین حالت برای کنترل ولتاژ، که کنترل ولتاژ در مقدار یک پریونیت است، به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده و براساس مقدار انرژی موجود یا مورد نیاز به دست آمده، مدت زمان شارژ/دشارژ محاسبه می‌شود. در صورتی که مدت زمان شارژ/دشارژ خارج از محدوده تعیین شده قرار گیرد تابع هدف از تثبیت ولتاژ در مقدار یک پریونیت به کنترل مدت زمان شارژ/دشارژ در مقادیر آستانه تغییر یافته و ولتاژ در بازه معین خود کنترل می‌شود. از آنجا که تابع هدف با توجه به شرایط موجود می‌تواند تغییر نماید لذا روش پیشنهادی فوق به روش تابع هدف

متغیر نام‌گذاری شده است. همچنین، مطابق روش پیشنهادی، مدیریت شارژ و دشارژ خودروها به‌صورتی انجام می‌گیرد که در انتهای سیکل دشارژ میزان SOC باتری همه خودروهای برقی (حتی خودروهایی دارای SOC کمتر از ۵۰ درصد هستند) حداقل به میزان ۵۰ درصد رسیده و در انتهای سیکل شارژ نیز باتری همه خودروهای برقی تا مقدار ۱۰۰ درصد شارژ می‌شوند.

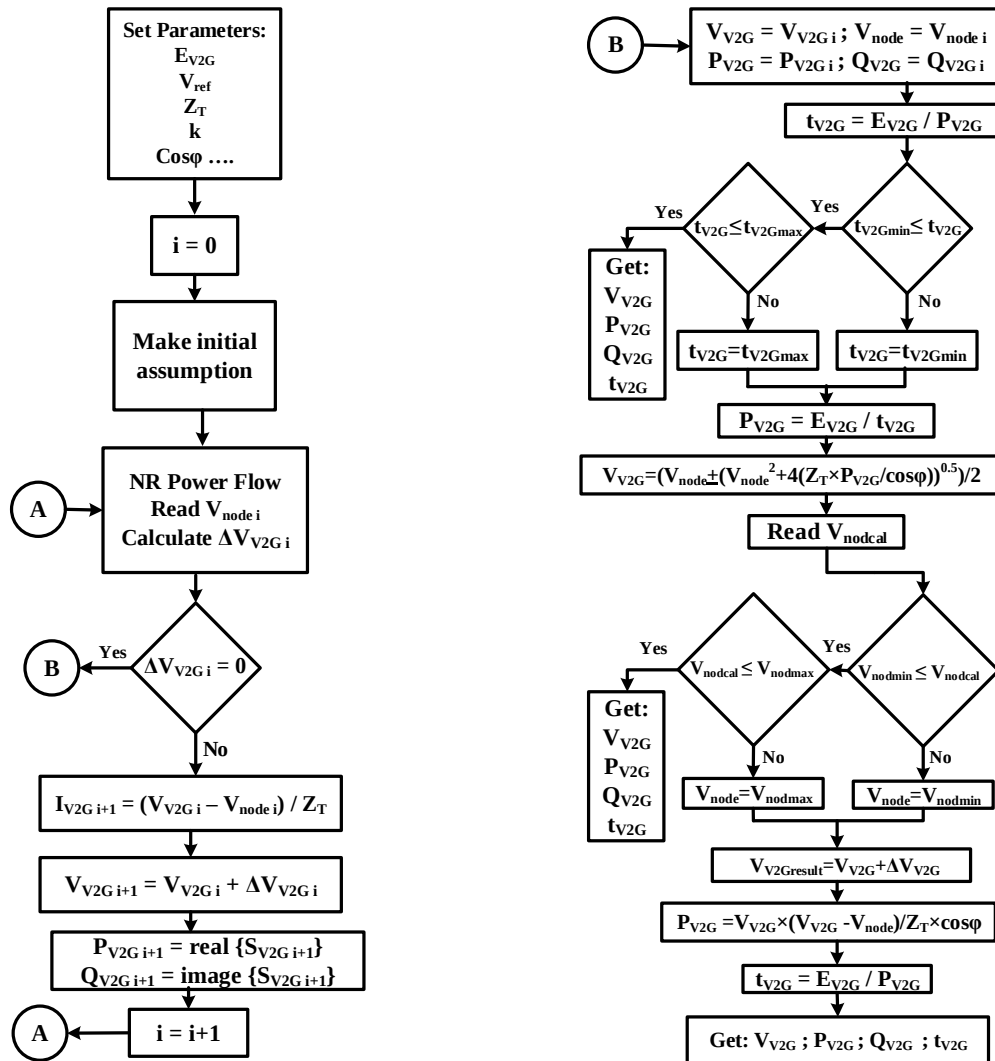
#### ۴- تحلیل حالت‌های عملکردی شارژ و دشارژ و نتایج شبیه سازی

به‌منظور تحلیل روش پیشنهادی یک سیستم توزیع شعاعی ۱۴ باسه IEEE مطابق شکل (۵) در نظر گرفته شده که کنترل‌کننده شارژ-دشارژ سیستم V2G به شین ۱۴، که در واقع نقطه ژرف سیستم توزیع شعاعی بوده، اتصال یافته است. مقادیر پایه ۵۰۰ کیلوولت-آمپر و ۰/۴۴ کیلوولت هستند. فرض می‌شود که شین مورد نظر دارای ۱۰۰ خودرو برقی است و نوع باتری‌های مورد استفاده در آن‌ها شامل سه نوع ظرفیت انرژی ۱۰ کیلووات-ساعت، ۱۶ کیلووات-ساعت و ۲۰ کیلووات-ساعت هستند [۲۷]. با توجه به این که خودروهای برقی با میزان SOC متفاوت به سیستم‌های تجمیع‌کننده متصل هستند، لذا با استفاده از کنترل‌کننده ارائه شده در قسمت (۲-۲)، مقدار انرژی موجود برای حالت دشارژ و مقدار انرژی مورد نیاز برای حالت شارژ به‌دست می‌آید. سه سناریو برای محاسبه انرژی موجود و مورد نیاز، به ترتیب، برای شرایط دشارژ و شارژ، مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. انرژی موجود ناشی از خودروهای برقی متصل به تجمیع‌کننده‌ها در سناریوهای ۱، ۲ و ۳ به ترتیب، برابر ۳۹۰، ۱۹۲ و ۹۹ کیلووات-ساعت بوده، همانطور که در جدول‌های (۱)، (۲) و (۳) مشاهده می‌شود، که جهت بررسی عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی تحت شرایط حمایت از شبکه (حالت دشارژ) توسط انرژی خودروهای برقی در نظر گرفته شده‌اند. به‌طوری‌که مطرح شد، با توجه به این که حداقل SOC باتری‌ها ۵۰ درصد در نظر گرفته شده است، در حالت دشارژ، مقدار SOC باتری خودروها باید بیش از ۵۰ درصد باشد تا بتوانند به شبکه انرژی مازاد خود را تزریق نمایند ولی در شرایطی ممکن هست بعضی از خودروها دارای SOC کمتر از ۵۰ درصد بوده که در این صورت علاوه بر این که انرژی مازاد برای تزریق به شبکه ندارند بلکه با کمبود انرژی برای رسیدن به مقدار ۵۰ درصد نیز مواجه هستند که این کمبود انرژی با علامت منفی در مقدار انرژی موجود جهت تزریق به شبکه لحاظ می‌شود. به عنوان مثال، مطابق جدول (۱)، میزان SOC باتری‌های با ظرفیت نامی ۱۰ کیلووات-ساعت برابر ۳۰ درصد است که با ۲۰ درصد کمبود انرژی مواجه هستند که با احتساب تعداد ۲۵ خودرو، با کمبود انرژی به میزان ۵۰ کیلووات-ساعت روبروست و این کمبود با علامت منفی مشخص شده که به‌وسیله انرژی مازاد باتری سایر خودروها تأمین می‌شود. برای سناریوهای مربوط به حالت شارژ خودروهای برقی نیز فرضیات مشابهی در نظر گرفته شده است. در شرایط شارژ نیز مطابق جداول (۴)، (۵) و (۶)، انرژی مورد نیاز برای شارژ خودروهای برقی در سناریوهای ۱، ۲ و ۳ به ترتیب، برابر ۶۴۸، ۴۳۵ و ۳۰۵ کیلووات-ساعت در نظر گرفته شده است. در این قسمت، تکنولوژی V2G به منظور پایداری ولتاژ و مدیریت تقاضای پیک بار مورد ارزیابی قرار گرفته است. شبیه‌سازی‌ها برای هر دو حالت شارژ و دشارژ خودروهای برقی انجام یافته و برای هر حالت سه سناریو به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفته و عملکرد کنترل‌کننده شارژ-دشارژ براساس روش پیشنهادی برای همه موارد تحلیل شده است. با این توضیح که فرضیات مطرح‌شده برای شبیه‌سازی‌ها از جمله انواع ظرفیت انرژی باتری‌ها، تعداد خودروهای برقی و مقدار SOC باتری‌ها در سناریوهای مختلف کاملاً مطابق مرجع [۲۷]، به علت مقایسه نتایج حاصله در نظر گرفته شده‌اند.

Table (1): Total available energy under discharge mode in scenario 1

جدول (۱): انرژی کل موجود تحت شرایط دشارژ در سناریوی یک

| درصد وضعیت شارژ                            | ظرفیت نامی باتری‌ها<br>(کیلووات-ساعت) | تعداد خودروهای برقی | درصد وضعیت شارژ<br>موجود | انرژی موجود ناشی از<br>دشارژ باتری‌ها |
|--------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| ۳۰                                         | ۱۰                                    | ۲۵                  | ۲۰                       | ۵۰                                    |
| ۶۰                                         | ۱۶                                    | ۲۵                  | ۱۰                       | ۴۰                                    |
| ۹۰                                         | ۲۰                                    | ۵۰                  | ۴۰                       | ۴۰۰                                   |
| انرژی کل موجود ناشی از دشارژ خودروهای برقی |                                       |                     |                          |                                       |
|                                            |                                       |                     |                          | ۳۹۰                                   |



شکل (۴): فلوچارت روش پیشنهادی برای کنترل کننده شارژ-دشارژ سیستم خودروی برقی به شبکه

Figure (4): Flowchart of the proposed method for the charge-discharge controller of the V2G system

Table (2): Total available energy under discharge mode in scenario 2

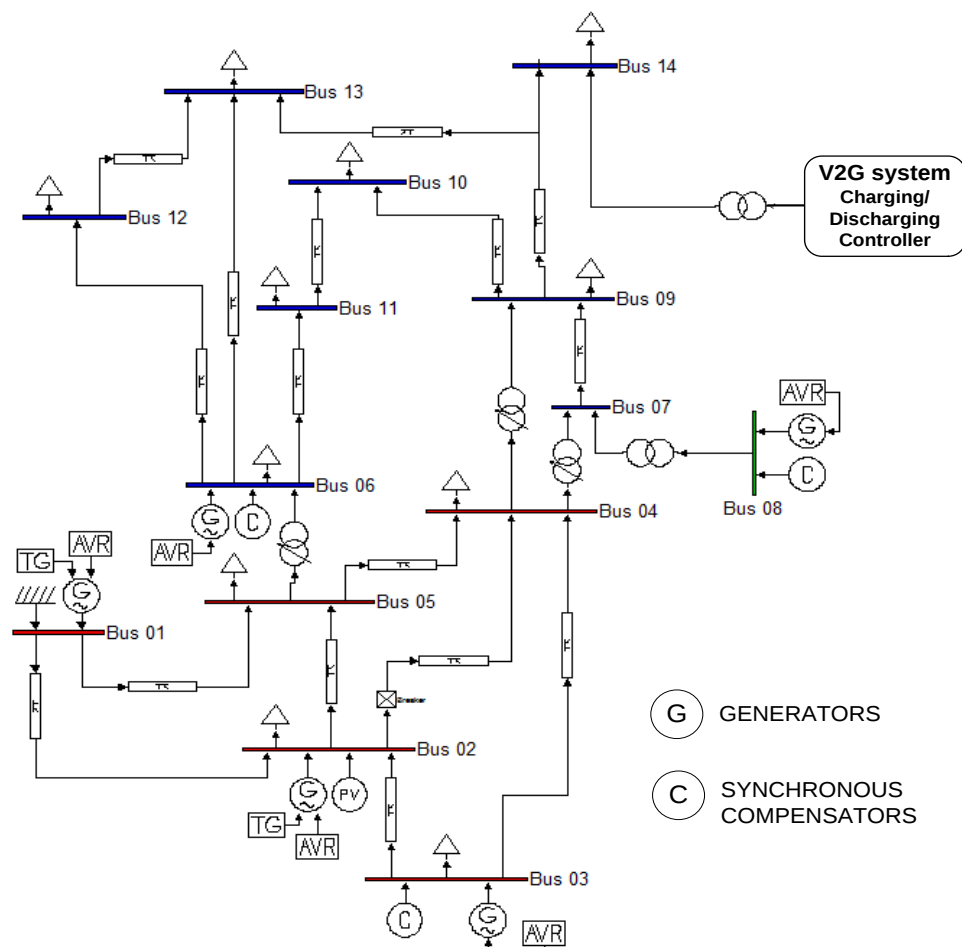
جدول (۲): انرژی کل موجود تحت شرایط دشارژ در سناریوی دو

| درصد وضعیت شارژ                            | ظرفیت نامی باتری‌ها<br>(کیلووات-ساعت) | تعداد خودروهای برقی | درصد وضعیت شارژ<br>موجود | انرژی موجود ناشی از<br>دشارژ باتری‌ها |
|--------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| ۲۰                                         | ۱۰                                    | ۲۰                  | -۳۰                      | -۶۰                                   |
| ۴۰                                         | ۱۶                                    | ۳۰                  | -۱۰                      | -۴۸                                   |
| ۸۰                                         | ۲۰                                    | ۵۰                  | ۳۰                       | ۳۰۰                                   |
| انرژی کل موجود ناشی از دشارژ خودروهای برقی |                                       |                     |                          | ۱۹۲                                   |

Table (3): Total available energy under discharge mode in scenario 3

جدول (۳): انرژی کل موجود تحت شرایط دشارژ در سناریوی سه

| درصد وضعیت شارژ                            | ظرفیت نامی باتری‌ها<br>(کیلووات-ساعت) | تعداد خودروهای برقی | درصد وضعیت شارژ<br>موجود | انرژی موجود ناشی از<br>دشارژ باتری‌ها |
|--------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| ۲۷                                         | ۱۰                                    | ۳۰                  | -۲۳                      | -۶۹                                   |
| ۳۵                                         | ۱۶                                    | ۳۰                  | -۱۵                      | -۷۲                                   |
| ۸۰                                         | ۲۰                                    | ۴۰                  | ۳۰                       | ۲۴۰                                   |
| انرژی کل موجود ناشی از دشارژ خودروهای برقی |                                       |                     |                          | ۹۹                                    |



شکل (۵): سیستم توزیع ۱۴ باسه مجهز به تکنولوژی خودروی برقی به شبکه

Figure (5): IEEE 14-bus distribution system equipped with V2G technology

Table (4): Total energy required under the charging mode in scenario 1

جدول (۴): انرژی کل مورد نیاز تحت شرایط شارژ در سناریوی یک

| درصد وضعیت شارژ                            | ظرفیت نامی باتری‌ها<br>(کیلووات-ساعت) | تعداد خودروهای برقی | درصد وضعیت شارژ مورد نیاز | انرژی مورد نیاز برای شارژ باتری‌ها |
|--------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------|---------------------------|------------------------------------|
| ۲۰                                         | ۱۰                                    | ۲۰                  | ۸۰                        | ۱۶۰                                |
| ۴۰                                         | ۱۶                                    | ۳۰                  | ۶۰                        | ۲۸۸                                |
| ۸۰                                         | ۲۰                                    | ۵۰                  | ۲۰                        | ۲۰۰                                |
| انرژی کل مورد نیاز برای شارژ خودروهای برقی |                                       |                     |                           | ۶۴۸                                |

Table (5): Total energy required under the charging mode in scenario 2

جدول (۵): انرژی کل مورد نیاز تحت شرایط شارژ در سناریوی دو

| درصد وضعیت شارژ                            | ظرفیت نامی باتری‌ها<br>(کیلووات-ساعت) | تعداد خودروهای برقی | درصد وضعیت شارژ مورد نیاز | انرژی مورد نیاز برای شارژ باتری‌ها |
|--------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------|---------------------------|------------------------------------|
| ۳۰                                         | ۱۰                                    | ۲۵                  | ۷۰                        | ۱۷۵                                |
| ۶۰                                         | ۱۶                                    | ۲۵                  | ۴۰                        | ۱۶۰                                |
| ۹۰                                         | ۲۰                                    | ۵۰                  | ۱۰                        | ۱۰۰                                |
| انرژی کل مورد نیاز برای شارژ خودروهای برقی |                                       |                     |                           | ۴۳۵                                |

Table (6): Total energy required under the charging mode in scenario 3

جدول (۶): انرژی کل مورد نیاز تحت شرایط شارژ در سناریوی سه

| درصد وضعیت شارژ                            | ظرفیت نامی باتری‌ها<br>(کیلووات-ساعت) | تعداد خودروهای برقی | درصد وضعیت شارژ<br>مورد نیاز | انرژی مورد نیاز برای<br>شارژ باتری‌ها |
|--------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| ۶۵                                         | ۱۰                                    | ۳۰                  | ۳۵                           | ۱۰۵                                   |
| ۷۵                                         | ۱۶                                    | ۳۰                  | ۲۵                           | ۱۲۰                                   |
| ۹۰                                         | ۲۰                                    | ۴۰                  | ۱۰                           | ۸۰                                    |
| انرژی کل مورد نیاز برای شارژ خودروهای برقی |                                       |                     |                              |                                       |
| ۳۰۵                                        |                                       |                     |                              |                                       |

## ۱-۴- دشارژ انرژی خودروهای برقی برای حمایت از شبکه (حالت V2G)

کنترل‌کننده شارژ-دشارژ در سیستم V2G بر مبنای روش پیشنهادی و با تحلیل اطلاعات و داده‌هایی از قبیل انرژی موجود در تجمیع‌کننده‌ها و ولتاژ شین V2G، می‌تواند شارش توان به نقطه اتصالی، به منظور تنظیم ولتاژ نقطه اتصالی، را کنترل نماید. ولتاژ نقطه اتصالی طی ساعات پیک بار و بدون عملکرد سیستم V2G برابر  $0.93$  پریونیت بوده و با عملکرد سیستم V2G، بر اساس روش پیشنهادی و هنگامی که انرژی خودروهای برقی به شبکه دشارژ می‌شوند، پس از ۱۳ مرحله تکرار به مقدار ۱ پریونیت مطابق جدول (۷) بهبود یافته است.

در سناریوی ۱، انرژی موجود با توجه به تعداد و مقدار SOC خودروهای برقی در تجمیع‌کننده‌ها برابر  $390$  کیلووات-ساعت است. توان انتقالی از شین V2G به نقطه اتصالی در تکرار ۱۳ام برابر  $104/04$  کیلووات ( $0.208$  پریونیت) بوده و مدت زمان حمایت از شبکه ( $t_{V2G}$ ) بنابر رابطه (۲۵) برابر  $3/75$  ساعت است و به‌طوری‌که ملاحظه می‌شود در محدوده مجاز مدت زمان حالت دشارژ خودروهای برقی واقع شده است. بنابراین، سیستم V2G بر اساس روش پیشنهادی، در این سناریو قادر بوده است با تزریق توان  $104/02$  کیلووات و ولتاژ شین V2G ( $V_{V2G}$ ) برابر با  $1/1046$  پریونیت ولتاژ نقطه اتصالی را دقیقاً در مقدار ۱ پریونیت کنترل نماید، همانطور که در شکل (۶) نشان داده شده است.

در سناریوی ۲، انرژی موجود برابر  $192$  کیلووات-ساعت بوده و  $t_{V2G}$  برابر  $1/85$  ساعت به‌دست آمده است که کوچکتر از حداقل مقدار آستانه بوده و لذا در این شرایط،  $t_{V2G}$  برابر حداقل مقدار معین، ۲ ساعت، در نظر گرفته شده و  $P_{V2G}$  و  $V_{V2G}$  مطابق رابطه‌های (۱۸) الی (۲۰)، به ترتیب، برابر  $0.192$  پریونیت ( $96$  کیلووات) و  $1/1061$  پریونیت به‌دست آمده‌اند. با انجام پخش بار بر اساس  $P_{V2G}$  و  $V_{V2G}$  به‌دست آمده،  $V_{node}$  برابر  $0.99917$  پریونیت بوده که در محدوده مجاز ولتاژ نقطه اتصالی قرار گرفته است. لذا، در این سناریو، با تزریق توان  $96$  کیلووات و ولتاژ  $V_{V2G}$  برابر با  $1/1061$  پریونیت، ولتاژ  $V_{node}$  در مقدار  $0.99917$  پریونیت کنترل شده است، همانطور که در شکل (۷) نشان داده شده است.

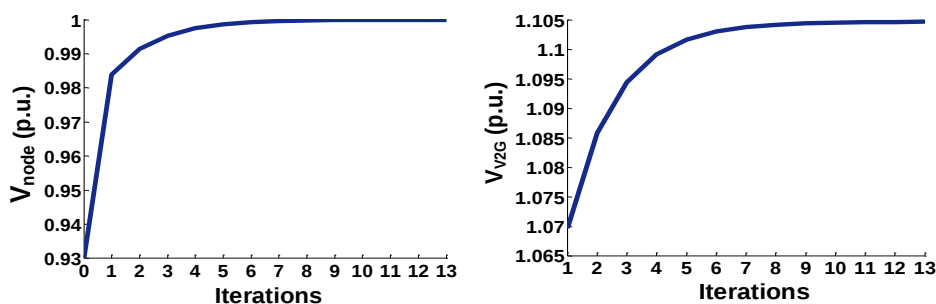
در سناریوی ۳، انرژی موجود دارای مقدار کمتری بوده و برابر  $99$  کیلووات-ساعت است و  $t_{V2G}$  برابر  $0.95$  ساعت به‌دست آمده است که باز از حداقل مقدار تعیین شده کمتر بوده لذا،  $t_{V2G}$  برابر حداقل مقدار آستانه در نظر گرفته شده و  $P_{V2G}$  و  $V_{V2G}$  به ترتیب، برابر  $0.099$  پریونیت و  $1/0572$  پریونیت به‌دست آمده‌اند. با این وجود، با انجام پخش بار بر اساس پارامترهای حاصله،  $V_{node}$  برابر  $0.97716$  پریونیت به‌دست آمده که کمتر از حداقل مقدار آستانه ولتاژ تعیین شده ( $0.98$  پریونیت) است. در این سناریو همانطور که ملاحظه می‌شود با توجه به کم بودن انرژی موجود جهت دشارژ تنها یکی از پارامترهای ولتاژ و یا مدت زمان شارژ/دشارژ می‌توانند در محدوده مجاز خود قرار گیرند لذا در این شرایط با توجه به اهمیت ولتاژ نقطه اتصالی  $V_{node}$  در حداقل مقدار آستانه ( $0.98$  پریونیت) در نظر گرفته شده و بر طبق رابطه‌های (۲۱) الی (۲۵)،  $P_{V2G}$ ،  $V_{V2G}$  و  $t_{V2G}$  به ترتیب، برابر  $1/06$  پریونیت،  $0.1369$  پریونیت ( $69/15$  کیلووات)، و  $1/43$  ساعت حاصل شده‌اند و سپس پخش بار نیوتن-رافسون برای پارامترهای حاصل، به‌طوری‌که در شکل (۸) مشاهده می‌گردد، مجدداً همگرا شده است. بنابراین، در این سناریو، با تزریق توان  $69/15$  کیلووات و ولتاژ  $V_{V2G}$  برابر با  $1/06$  پریونیت به مدت  $1/426$  ساعت، ولتاژ  $V_{node}$  در مقدار  $0.98155$  پریونیت، کنترل شده است. همان‌طوری‌که در نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده است، روش الگوریتمی پیشنهادی برای کنترل سیستم V2G، به منظور حمایت از شبکه و کنترل ولتاژ  $V_{node}$ ، بسیار موفق عمل نموده و تلفات شبکه را مطابق جدول (۸) به خوبی کاهش داده است. در جدول (۸) مشاهده می‌شود که با استفاده از سیستم کنترل‌کننده شارژ-دشارژ بر اساس روش پیشنهادی تلفات توان

اکتیو و راکتیو در سناریوی ۱ به ترتیب، ۱۸/۱۴ و ۱۹ درصد کاهش یافته و در سناریوهای ۲ و ۳، تلفات توان اکتیو و راکتیو به ترتیب ۱۳/۲ و ۱۴ درصد کاهش یافته‌اند. سطح SOC باتری خودروهای برقی پس از عملکرد سیستم V2G در سناریوهای مختلف تغییر یافته به‌طوری‌که در شکل (۹)، سطح SOC باتری خودروهای برقی در شرایط قبل و بعد از دشارژ انرژی نشان داده شده است. با توجه به شکل ملاحظه می‌گردد که کنترل‌کننده شارژ-دشارژ سیستم V2G این اطمینان را می‌دهد که سطح SOC باتری خودروهای برقی در شرایط عملکردی حمایت از شبکه، حداقل در مقدار ۵۰ درصد حفظ شود.

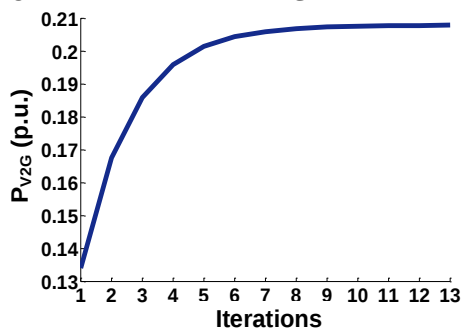
Table (7): Using the proposed algorithmic method for discharge mode

جدول (۷): استفاده از روش الگوریتمی پیشنهادی برای حالت دشارژ

| تکرارها | توان اکتیو خودروبرقی به شبکه (پریونیت) | ولتاژ خودروبرقی به شبکه (پریونیت) | ولتاژ گره‌ها (پریونیت) |
|---------|----------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| ۱       | ۰/۱۳۴۲                                 | ۱/۰۶۹۶۹                           | ۰/۹۸۳۹۱                |
| ۲       | ۰/۱۶۷۶                                 | ۱/۰۸۵۷۸                           | ۰/۹۹۱۳۷                |
| ۳       | ۰/۱۸۶۰                                 | ۱/۰۹۴۴۱                           | ۰/۹۹۵۳۳                |
| ۴       | ۰/۱۹۶۰                                 | ۱/۰۹۹۰۸                           | ۰/۹۹۷۴۷                |
| ۵       | ۰/۲۰۱۵                                 | ۱/۱۰۱۶۱                           | ۰/۹۹۸۶۲                |
| ۶       | ۰/۲۰۴۵                                 | ۱/۱۰۲۹۹                           | ۰/۹۹۹۲۵                |
| ۷       | ۰/۲۰۶۱                                 | ۱/۱۰۳۷۴                           | ۰/۹۹۹۵۹                |
| ۸       | ۰/۲۰۷۰                                 | ۱/۱۰۴۱۵                           | ۰/۹۹۹۷۸                |
| ۹       | ۰/۲۰۷۵                                 | ۱/۱۰۴۳۷                           | ۰/۹۹۹۸۸                |
| ۱۰      | ۰/۲۰۷۷                                 | ۱/۱۰۴۴۹                           | ۰/۹۹۹۹۳                |
| ۱۱      | ۰/۲۰۷۸                                 | ۱/۱۰۴۵۶                           | ۰/۹۹۹۹۶                |
| ۱۲      | ۰/۲۰۷۹                                 | ۱/۱۰۴۶۰                           | ۰/۹۹۹۹۷                |
| ۱۳      | ۰/۲۰۸۰                                 | ۱/۱۰۴۶۳                           | ۱/۰۰۰۰۰                |



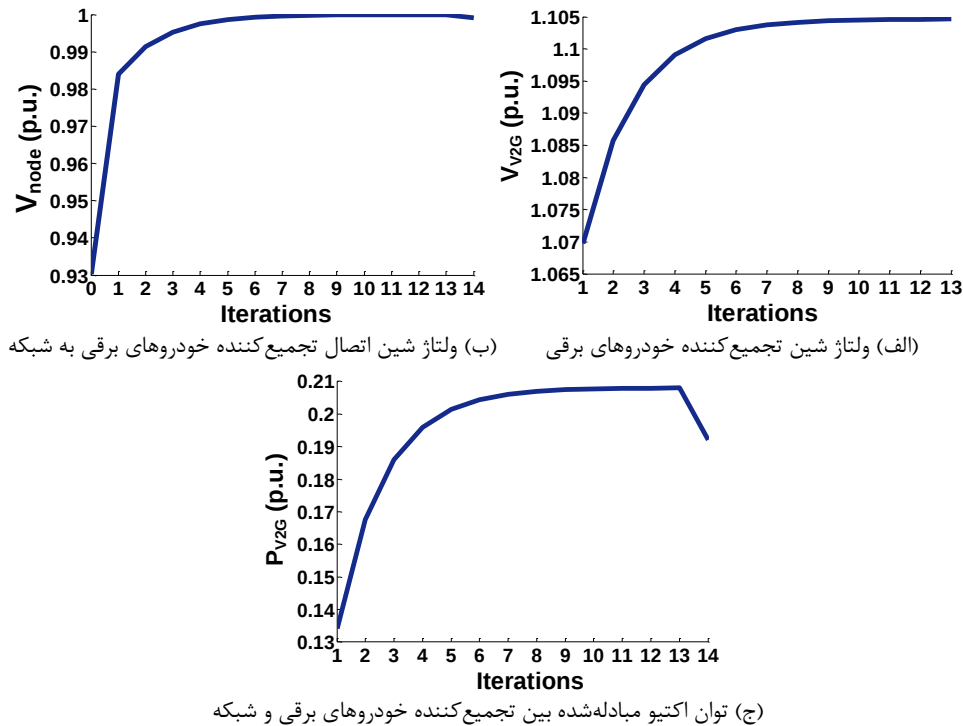
(الف) ولتاژ شین تجميع کننده خودروهای برقی (ب) ولتاژ شین اتصال تجميع کننده خودروهای برقی به شبکه



(ج) توان اکتیو مبادله شده بین تجميع کننده خودروهای برقی و شبکه

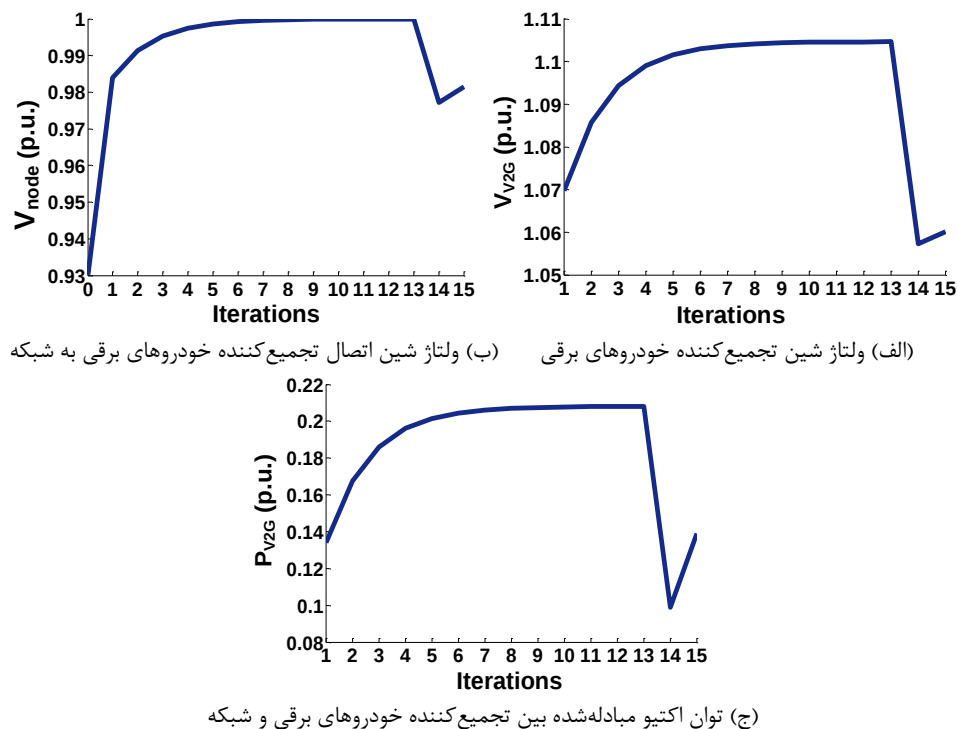
شکل (۶): ولتاژ و توان اکتیو مبادله شده بین تجميع کننده خودروهای برقی و شبکه در سناریوی اول

Figure (6): Voltage and active power exchanged between aggregator (V2G bus) and grid (connection node) in scenario 1, a) Aggregator (V2G) bus voltage b) Connection node (PCC) voltage, c) Active power exchanged between V2G bus and PCC



شکل (۷): ولتاژ و توان اکتیو مبادله شده بین تجميع کننده خودروهای برقی و شبکه در سناریوی دوم

Figure (7): Voltage and active power exchanged between aggregator (V2G bus) and grid (connection node) in scenario 2, a) Aggregator (V2G) bus voltage b) Connection node (PCC) voltage, c) Active power exchanged between V2G bus and PCC

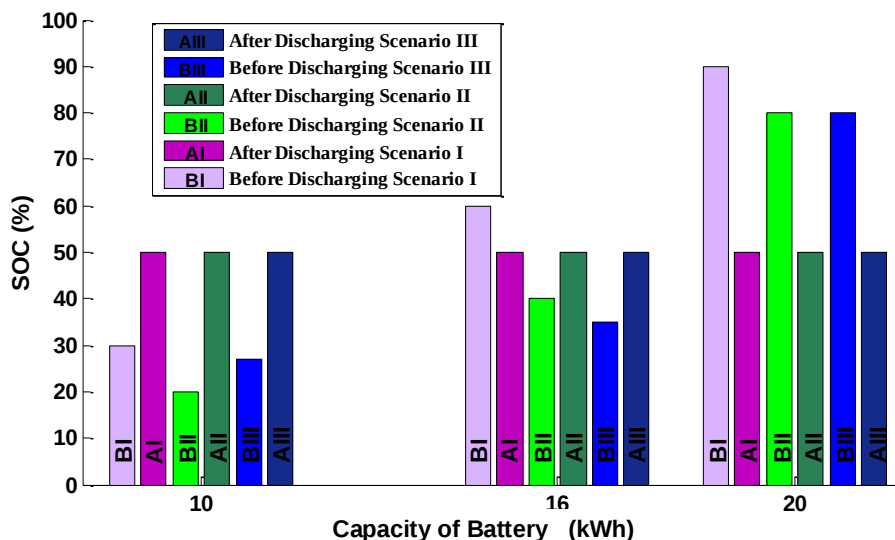


شکل (۸): ولتاژ و توان اکتیو مبادله شده بین تجميع کننده خودروهای برقی و شبکه در سناریوی سوم

Figure (8): Voltage and active power exchanged between aggregator (V2G bus) and grid (connection node) in scenario 3, a) Aggregator (V2G) bus voltage b) Connection node (PCC) voltage, c) Active power exchanged between V2G bus and PCC

Table (8): Network losses with and without V2G operation during peak hours  
 جدول (۸): تلفات شبکه با و بدون عملکرد خودروبرقی به شبکه در ساعات اوج مصرف

| با سیستم خودروبرقی به شبکه |            |            | بدون سیستم خودروبرقی به شبکه | تلفات (پریونیت)   |
|----------------------------|------------|------------|------------------------------|-------------------|
| سناریوی سه                 | سناریوی دو | سناریوی یک |                              |                   |
| ۰/۳۹۵۳۹                    | ۰/۳۹۴۴۹    | ۰/۳۷۲۰۶    | ۰/۴۵۴۵۲                      | تلفات توان اکتیو  |
| ۱/۳۵۹۲                     | ۱/۳۵۹۳     | ۱/۲۸       | ۱/۵۸۰۴                       | تلفات توان راکتیو |



شکل (۹): تغییرات وضعیت شارژ باتری خودروهای برقی قبل و بعد از شرایط دشارژ

Figure (9): SOC changes of EVs battery before and after discharge mode

Table (9): Using the proposed algorithmic method for charging mode

جدول (۹): استفاده از روش الگوریتمی پیشنهادی برای حالت شارژ

| تکرارها | توان اکتیو خودروبرقی به شبکه (پریونیت) | توان راکتیو خودروبرقی به شبکه (پریونیت) | ولتاژ گردها (پریونیت) |
|---------|----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------|
| ۱       | -۰/۰۳۶۱                                | -۰/۰۱۷۵                                 | ۱/۰۱۲۹                |
| ۲       | -۰/۰۵۸۱                                | -۰/۰۲۸۱                                 | ۱/۰۰۸۰                |
| ۳       | -۰/۰۷۱۴                                | -۰/۰۳۴۶                                 | ۱/۰۰۴۹                |
| ۴       | -۰/۰۷۹۵                                | -۰/۰۳۸۵                                 | ۱/۰۰۳۰                |
| ۵       | -۰/۰۸۴۴                                | -۰/۰۴۰۹                                 | ۱/۰۰۱۸                |
| ۶       | -۰/۰۸۷۳                                | -۰/۰۴۲۳                                 | ۱/۰۰۱۱                |
| ۷       | -۰/۰۸۹۱                                | -۰/۰۴۳۱                                 | ۱/۰۰۰۷                |
| ۸       | -۰/۰۹۰۲                                | -۰/۰۴۳۷                                 | ۱/۰۰۰۴                |
| ۹       | -۰/۰۹۰۸                                | -۰/۰۴۴۰                                 | ۱/۰۰۰۳                |
| ۱۰      | -۰/۰۹۱۳                                | -۰/۰۴۴۲                                 | ۱/۰۰۰۲                |
| ۱۱      | -۰/۰۹۱۶                                | -۰/۰۴۴۴                                 | ۱/۰۰۰۱                |
| ۱۲      | -۰/۰۹۱۸                                | -۰/۰۴۴۵                                 | ۱/۰۰۰۰                |

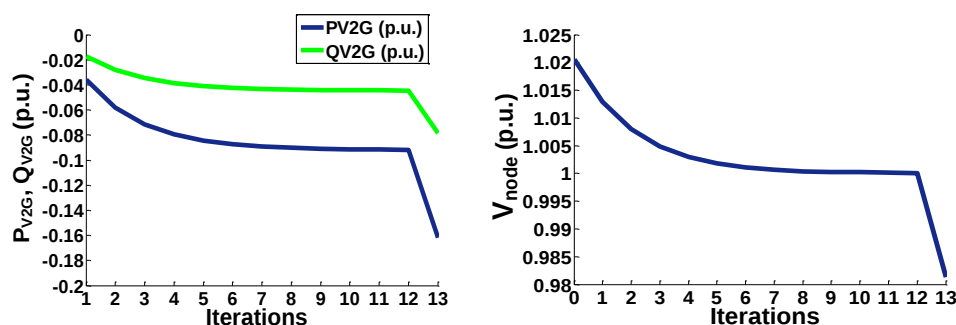
## ۲-۴- شارژ باتری خودروهای برقی از شبکه (حالت شبکه به خودروی برقی)

در این مد عملکرد، انرژی مورد نیاز به منظور شارژ خودروهای برقی برای سه سناریو مورد تحلیل واقع شده است. ولتاژ نقطه اتصالی در طی ساعات کم‌باری و بدون اعمال قابلیت سیستم V2G برابر ۱/۰۲۱۹ پریونیت است. ولتاژ نقطه اتصالی به علت شارژ خودروهای برقی با استفاده از روش پیشنهادی و با انجام ۱۲ مرحله تکرار، دقیقاً به مقدار ۱ پریونیت بهبود یافته است، به‌طوری‌که

در جدول (۹) ملاحظه می‌گردد با این توضیح که علامت منفی در مقادیر توان‌های اکتیو و راکتیو بیانگر تغییر جهت شارش توان از شبکه به سمت سیستم V2G در حالت شارژ است.

در سناریوی ۱، انرژی مورد نیاز برای شارژ خودروهای برقی در حالت کم باری برابر ۶۴۸ کیلووات-ساعت است. توان کشیده شده از شبکه برای شارژ خودروهای برقی در تکرار ۱۲ام، برابر ۰/۰۹۱۸ پرینیت (۴۵/۹ کیلووات) به‌دست آمده است و مدت زمان شارژ خودروهای برقی،  $t_{V2G}$ ، ۱۴/۱۲ ساعت حاصل شده که بیشتر از ماکزیمم آستانه زمانی معین است، لذا،  $t_{V2G}$  برابر ماکزیمم حد آستانه، ۸ ساعت، در نظر گرفته شده و میزان توان اکتیو و راکتیو قابل انتقال از شبکه به سیستم کنترل‌کننده V2G، به ترتیب، برابر ۰/۱۶۲ پرینیت (۸۱ کیلووات) و ۰/۰۷۸۵ پرینیت محاسبه شده‌اند. با انجام پخش بار نیوتن-رافسون،  $V_{node}$  برابر ۰/۹۸۱۳۵ پرینیت به‌دست می‌آید که در محدوده مجاز مربوطه واقع شده است. بنابراین، در این سناریو، با کشیده شدن توان اکتیو ۰/۱۶۲ پرینیت و توان راکتیو ۰/۰۷۸۵ پرینیت از شبکه، به مدت ۸ ساعت، کنترل‌کننده شارژ-دشارژ در سیستم V2G قادر به تأمین انرژی مورد نیاز برای شارژ خودروهای برقی، ضمن کنترل ولتاژ  $V_{node}$  در مقدار ۰/۹۸۱۳۵ پرینیت، مطابق شکل (۱۰) شده است.

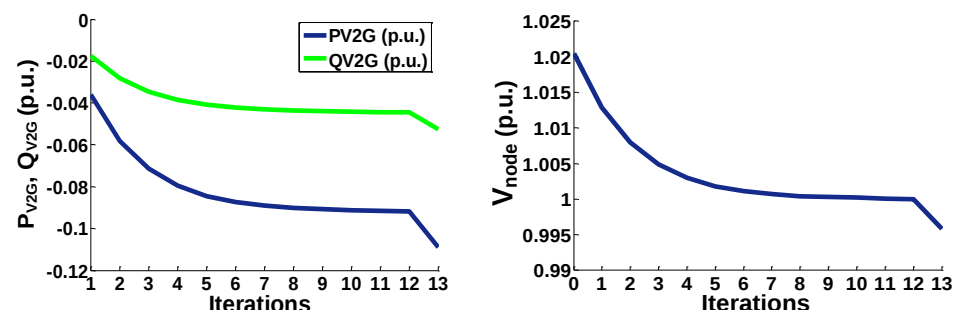
در سناریوی ۲، انرژی مورد نیاز برای شارژ خودروهای برقی برابر ۴۳۵ کیلووات-ساعت و مدت زمان شارژ خودروهای برقی برابر ۹/۴۸ ساعت است و با توجه به این‌که  $t_{V2G}$  بزرگتر از ماکزیمم آستانه مدت زمان معین بوده، لذا،  $t_{V2G}$  را برابر ماکزیمم آستانه در نظر گرفته و توانهای اکتیو و راکتیو کشیده شده از شبکه توسط سیستم V2G به ترتیب، برابر ۰/۱۰۸۸ پرینیت و ۰/۰۵۲۷ پرینیت حاصل می‌شوند. حال با انجام پخش بار نیوتن-رافسون برای کل شبکه، ولتاژ  $V_{node}$  برابر ۰/۹۹۵۸ پرینیت به‌دست می‌آید که به ۱ پرینیت خیلی نزدیک است، به‌طوری‌که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود.



الف) ولتاژ شین اتصال تجمیع‌کننده خودروهای برقی به شبکه (ب) توان‌های مبادله‌شده بین تجمیع‌کننده خودروهای برقی و شبکه

شکل (۱۰): ولتاژ و توان‌های اکتیو و راکتیو مبادله‌شده بین تجمیع‌کننده خودروهای برقی و شبکه در سناریوی اول

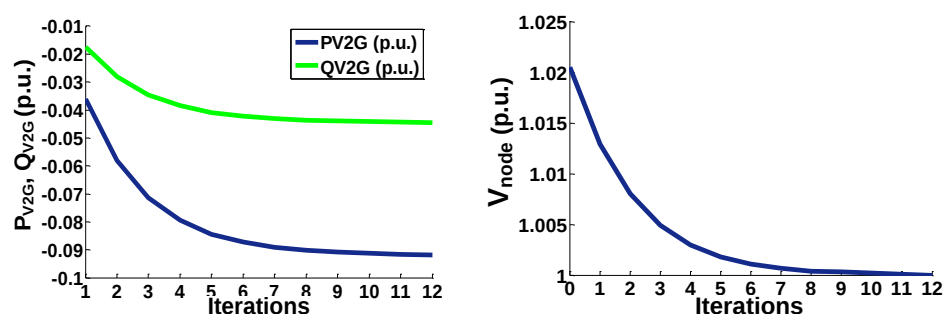
Figure (10): Voltage, active and reactive powers exchanged between aggregator (V2G bus) and grid (connection node) in scenario 1, a) Connection node (PCC) voltage, b) Active and reactive powers exchanged between V2G bus and PCC



الف) ولتاژ شین اتصال تجمیع‌کننده خودروهای برقی به شبکه (ب) توان‌های مبادله‌شده بین تجمیع‌کننده خودروهای برقی و شبکه

شکل (۱۱): ولتاژ و توان‌های اکتیو و راکتیو مبادله‌شده بین تجمیع‌کننده خودروهای برقی و شبکه در سناریوی دوم

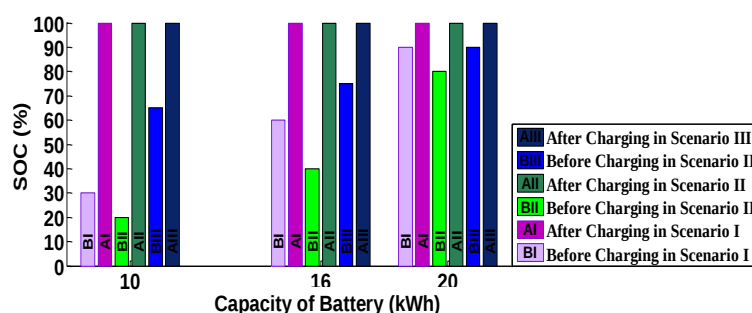
Figure (11): Voltage, active and reactive powers exchanged between aggregator (V2G bus) and grid (connection node) in scenario 2, a) Connection node (PCC) voltage, b) Active and reactive powers exchanged between V2G bus and PCC



(الف) ولتاژ شین اتصال تجمیع کننده خودروهای برقی به شبکه (ب) توان های مبادله شده بین تجمیع کننده خودروهای برقی و شبکه

شکل (۱۲): ولتاژ و توان های اکتیو و راکتیو مبادله شده بین تجمیع کننده خودروهای برقی و شبکه در سناریوی سوم

Figure (12): Voltage, active and reactive powers exchanged between aggregator (V2G bus) and grid (connection node) in scenario 3, a) Connection node (PCC) voltage, b) Active and reactive powers exchanged between V2G bus and PCC



شکل (۱۳): تغییرات وضعیت شارژ باتری خودروهای برقی قبل و بعد از شرایط شارژ

Figure (13): SOC changes of EVs battery before and after charging mode

در سناریوی ۳، انرژی مورد نیاز برای شارژ خودروهای برقی برابر ۳۰۵ کیلووات-ساعت است و مدت زمان شارژ خودروهای برقی در این سناریو برابر ۶/۶۵ ساعت است و مشاهده می شود که  $t_{V2G}$  در بازه مجاز مدت زمان شارژ خودروهای برقی قرار گرفته است. بنابراین، در این سناریو کنترل کننده شارژ-دشارژ سیستم V2G با دریافت توان های اکتیو ۰/۰۹۱۸ و راکتیو ۰/۰۴۴۵ پریونیت، قادر بوده است انرژی لازم برای شارژ خودروهای برقی در مدت زمان ۶/۶۷ ساعت را فراهم نماید و ولتاژ  $V_{node}$  را دقیقاً در مقدار ۱ پریونیت کنترل کند، همانطوریکه در شکل (۱۲) نشان داده شده است. سطح SOC باتری خودروهای برقی پس از شارژ خودروهای برقی تغییر یافته و به طوری که در شکل (۱۳) قابل مشاهده است، سطح SOC همه انواع باتری های خودروهای برقی در هر سه سناریو در شرایط پس از شارژ به مقدار ۱۰۰ درصد افزایش یافته است.

همان طوری که در نتایج شبیه سازی نشان داده شده است، کنترل کننده شارژ-دشارژ سیستم V2G، بر اساس روش پیشنهادی VOF برای حالت شارژ نیز، به منظور شارژ خودروهای برقی و کنترل ولتاژ نقطه اتصال، در ایفای نقش حائز اهمیت خود به خوبی عمل نموده است. همچنین، روش پیشنهادی VOF با روش کنترل فازی مرسوم [۲۷]، FLC، برای سناریوهای ۱ و ۲ مقایسه شده است. از آنجائیکه روش FLC فقط برای سناریوهای ۱ و ۲ در نظر گرفته شده لذا این مقایسه برای سناریوهای ۱ و ۲ انجام گرفته است. جدول ها (۱۰) و (۱۱) به ترتیب، برای شرایط دشارژ و شارژ هستند.

مطابق جدول (۱۰)، همانطوریکه مشاهده می شود در شرایط دشارژ، در سناریوی ۱، در توان دشارژ یکسان و مدت زمان دشارژ برابر روش پیشنهادی بهتر از روش FLC عمل نموده به طوری که ولتاژ نقطه اتصال  $V_{node}$  را در ۱ پریونیت کنترل نموده در صورتی که بر اساس روش FLC ولتاژ نقطه اتصال برابر ۰/۹۸ پریونیت است. در سناریوی ۲، سیستم V2G بر اساس روش پیشنهادی با تزریق توان ۹۶ کیلووات به مدت ۲ ساعت ولتاژ  $V_{node}$  را در مقدار ۰/۹۹۹۱۷ پریونیت کنترل نموده است. همچنین، برای مدت زمان و توان دشارژ یکسان برای هر دو روش، در روش FLC، ولتاژ  $V_{node}$  تا مقدار ۰/۹۵ پریونیت کاهش یافته که کمتر از حداقل ولتاژ آستانه (۰/۹۸ پریونیت) است ولی بر اساس روش پیشنهادی  $V_{node}$  در مقدار ۰/۹۸۷۳۸ پریونیت کنترل شده است.

Table (10): Comparison of the proposed VOF method with the conventional FLC method in discharging mode  
جدول (۱۰): مقایسه روش پیشنهادی تابع هدف متغیر با روش کنترل‌کننده منطق فازی مرسوم در حالت دشارژ

| سناریوها | مقدار انرژی موجود<br>(کیلووات-ساعت) | روش‌ها                | توان اکتیو خودروبرقی<br>به شبکه (کیلووات) | زمان دشارژ یا<br>شارژ (ساعت) | ولتاژ گره‌ها<br>(پریونیت) |
|----------|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------|------------------------------|---------------------------|
| ۱        | ۳۹۰                                 | تابع هدف متغیر        | ۱۰۴                                       | ۳/۷۵                         | ۱                         |
|          |                                     | کنترل‌کننده منطق فازی | ۱۰۴                                       | ۳/۷۵                         | ۰/۹۸                      |
| ۲        | ۱۹۲                                 | تابع هدف متغیر        | ۹۶                                        | ۲                            | ۰/۹۹۹۱۷                   |
|          |                                     | تابع هدف متغیر        | ۷۰                                        | ۲/۷۴                         | ۰/۹۸۷۳۸                   |
|          |                                     | کنترل‌کننده منطق فازی | ۷۰                                        | ۲/۴۷                         | ۰/۹۵ (< ۰/۹۸)             |

Table (11): Comparison of the proposed VOF method with the conventional FLC method in charging mode  
جدول (۱۱): مقایسه روش پیشنهادی تابع هدف متغیر با روش کنترل‌کننده منطق فازی مرسوم در حالت شارژ

| سناریوها | مقدار انرژی موجود<br>(کیلووات-ساعت) | روش‌ها                | توان اکتیو خودروبرقی<br>به شبکه (کیلووات) | زمان دشارژ یا<br>شارژ (ساعت) | ولتاژ گره‌ها<br>(پریونیت) |
|----------|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------|------------------------------|---------------------------|
| ۱        | ۶۴۸                                 | تابع هدف متغیر        | ۸۱                                        | ۸                            | ۰/۹۸۱۳۵                   |
|          |                                     | کنترل‌کننده منطق فازی | ۱۷۰                                       | ۳/۸۱                         | ۰/۹۶۳ (< ۰/۹۸)            |
| ۲        | ۴۳۵                                 | تابع هدف متغیر        | ۵۴/۴                                      | ۸                            | ۰/۹۹۵۸                    |
|          |                                     | تابع هدف متغیر        | ۶۰                                        | ۷/۲۵                         | ۰/۹۹۲۹۲                   |
|          |                                     | کنترل‌کننده منطق فازی | ۶۰                                        | ۷/۲۵                         | ۰/۹۱ (<< ۰/۹۸)            |

در حالت شارژ، در سناریوی ۱، روش پیشنهادی VOF با جذب توان ۸۱ کیلووات از شبکه برای شارژ خودروهای برقی در مدت زمان ۸ ساعت، به خوبی قادر بوده ولتاژ  $V_{node}$  را در مقدار ۰/۹۸۱ پریونیت کنترل نماید در صورتی که روش FLC با جذب توان زیاد ۱۷۰ کیلووات در مدت زمان کم ۳/۸۱ ساعت، باعث افت شدید ولتاژ  $V_{node}$  به مقدار ۰/۹۶۳ پریونیت شده که کمتر از حداقل ولتاژ مجاز بوده و با توجه به این که مدت زمان کم‌باری شبکه تقریباً برابر ۸ ساعت است، این افت ولتاژ منطقی به نظر نمی‌رسد. در سناریوی ۲، سیستم V2G بر اساس روش پیشنهادی و با جذب توان اکتیو ۵۴/۴ کیلووات از شبکه به مدت ۸ ساعت، ولتاژ  $V_{node}$  را در ۰/۹۹۵۸ پریونیت کنترل نموده است در صورتی که بر اساس روش FLC و برای مدت زمان و توان شارژ یکسان، ولتاژ  $V_{node}$  به شدت کاهش یافته و به ۰/۹۱ پریونیت رسیده است که این مقدار حتی کمتر از مقدار ولتاژ در زمان پیک بار و بدون حضور سیستم V2G است. بنابراین، نتایج حاصله نشان می‌دهند که روش پیشنهادی بسیار بهتر از روش مرسوم FLC قادر بوده با هماهنگی مناسب شارژ و دشارژ، از شبکه حمایت نماید و ولتاژ نقطه اتصالی را کنترل کرده و تلفات شبکه را در شرایط پیک بار کاهش دهد.

## ۵- نتیجه‌گیری

خودروهای برقی می‌توانند انرژی مورد نیاز شبکه قدرت طی ساعات پیک بار را تأمین نموده و در ساعات کم‌باری باتری‌های خود را شارژ نمایند. این عملکرد سبب می‌شود خودروهای برقی بتوانند علاوه بر عملکرد به عنوان بار مصرفی متغیر، به عنوان یک منبع انرژی توزیع‌شده متغیر نیز عمل نمایند.

در این تحقیق، با توجه به متغیر بودن کمیت‌های تولید و مصرف، یک کنترل‌کننده شارژ-دشارژ در سیستم خودروی برقی به شبکه بر اساس روش الگوریتمی با تابع هدف متغیر، VOF، برای کنترل توان شارش یافته بین خودروهای برقی و شبکه و به منظور تنظیم مناسب ولتاژ نقطه اتصالی، پیشنهاد شده است. به عبارت دیگر، در روش کنترلی VOF، ولتاژ نقطه اتصالی به عنوان تابع هدف متغیر در یک بازه مجاز معین در نظر گرفته شده و محدودیت‌هایی برای کمیت‌های مدت زمان شارژ-دشارژ و SOC باتری‌های خودروهای برقی وضع شده است. همچنین در این تحقیق، یک سیستم نوعی ۱۴ باسه IEEE به منظور آشکارسازی

قابلیت‌های سیستم V2G از قبیل پشتیبانی از شبکه در ساعات پیک بار و تأمین انرژی مازاد مورد نیاز و جبران‌سازی نوسانات ولتاژ، مدلسازی شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی و مقایسه آن با نتایج حاصل از روش مرسوم FLC مشاهده می‌شود که کنترل شارژ و دشارژ خودروهای برقی با استفاده از روش پیشنهادی به سهولت انجام یافته و برتری عملکرد روش پیشنهادی در کنترل مناسب ولتاژ، بهبود پروفیل بار و همچنین کاهش تلفات شبکه در ساعات پیک بار به اثبات رسیده است.

### سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از مطالعه تحقیقاتی در دانشگاه آزاد اسلامی واحد بناب 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] E.L. Karfopoulos, N.D. Hatziaargyriou, "Distributed coordination of electric vehicles providing V2G services", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 31, no. 1, pp. 329-338, Jan. 2016 (doi: 10.1109/TPWRS.2015.2395723).
- [2] A.Y.S. Lam, K. Leung, V.O.K. Li, "Capacity estimation for vehicle-to-grid frequency regulation services with smart charging mechanism", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 7, no. 1, pp. 156-166, Jan. 2016 (doi: 10.1109/T-SG.2015.2436901).
- [3] Y. Fan, W. Zhu, Z. Xue, L. Zhang, Z. Zou, "A multi-function conversion technique for vehicle-to-grid applications", Energies, vol. 8, no. 8, pp. 7638-7653, July 2015 (doi: 10.3390/en8087638).
- [4] M. Abdollahi, M. Moazzami, "Day-ahead coordination of vehicle-to-grid operation and wind power in security constraints unit commitment (SCUC)", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 6, no. 22, pp. 49-56, Sept. 2015 (in Persian) (dor: 20.1001.1.23223871.1394.6.22.5.1).
- [5] M. Saeedirad, E. Rokrok, and M. Joorabian, "Technical and economic management of energy distribution to reduce charging costs and reduction", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 14, no. 54, pp.59-74, Sept. 2023 (in Persian) (dor: 20.1001.1.23223871.1402.14.54.4.0).
- [6] J. Donadee, M. D. Ilić, "Stochastic optimization of grid to vehicle frequency regulation capacity bids", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 5, no. 2, pp. 1061-1069 Mar. 2014 (doi: 10.1109/TSG.2013.2290971).
- [7] M. Ansari, A.T. Al-Awami, E. Sortomme, M.A. Abido, "Coordinated bidding of ancillary services for vehicle-to-grid using fuzzy optimization", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 6, no. 1, pp. 261-270, Jan. 2015 (doi: 10.1109/TSG.2014.2341625).
- [8] J. Kim, J. Lee, S. Park, J. Choi, "Power scheduling scheme for a charging facility considering the satisfaction of electric vehicle users", IEEE Access, vol. 10, no. 1, pp. 25153 - 25164, Feb. 2022 (doi: 10.1109/ACCESS.2022.3151355).
- [9] H. Eskandari, M.R. Moradian, "Direct torque compound control of induction motors to increase the battery operating life in electric vehicles", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 11, no. 42, pp.1-13, Sept. 2020 (in Persian) (dor: 20.1001.1.23223871.1399.11.42.1.2).
- [10] A. Sangswang, M. Konghirun, "Optimal strategies in home energy management system integrating solar power, energy storage, and vehicle-to-grid for grid support and energy efficiency", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 56, no. 5, p.p. 5716 – 5728, Oct. 2020 (doi: 10.1109/TIA.2020.2991652).
- [11] A. Nazarloo, M.R. Feyzi, M. Sabahi, M.B.B. Sharifian, "Improving voltage profile and optimal scheduling of vehicle to grid energy based on a new method", Advances in Electrical and Computer Engineering vol. 18, no. 1, pp. 81-88, March 2018 (doi: 10.4316/AECE.2018.01010).
- [12] A. Nazarloo, M.R. Feyzi, M. Sabahi, M.B.B. Sharifian, "Energy management of electric vehicles aggregator using a new multi-objective algorithm", Journal of Energy Management and Technology, vol. 2, no. 2, pp. 20-30, June 2018 (doi: 10.22109/jemt.2018.118868.1063).
- [13] Y. Zhang, J. Sun, C. Wu, "vehicle-to-grid coordination via mean field game", IEEE Control Systems Letters, vol. 6, no. 1, pp. 2084-2089, Dec. 2021 (doi: 10.1109/LCSYS.2021.3139266).
- [14] M. Ahmad, Y. Abouelseoud, N.H. Abbasy, S.H. Kamel, "Hierarchical distributed framework for optimal dynamic load management of electric vehicles with vehicle-to-grid technology", IEEE Access, vol. 9, no. 1, pp. 164643-164658, Dec. 2021 (doi: 10.1109/ACCESS.2021.3134868).
- [15] Z. Yang, X. Huang, T. Gao, Y. Liu, S. Gao, "Real-Time energy management strategy for parking lot considering maximum penetration of electric vehicles", IEEE Access, vol. 10, pp. 5281 – 5291, Jan. 2022 (doi: 10.1109/ACCESS.2022.3141377).

- [16] A. Nazarloo, "Improving the voltage profile using intelligent control of electric vehicle charging and discharging based on V2G technology in a sample distribution system", Proceeding of the NCEEIS, pp. 1-6, Najafabad, Iran, May/June 2022 (in Persian).
- [17] Z. Wang, S. Wang, "Grid power peak shaving and valley filling using vehicle-to-grid systems", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 28, no. 3, pp. 1822-1828, July 2013 (doi: 10.1109/TPWRD.2013.2264497).
- [18] E. Sortomme, M. El-Sharkawi, "Optimal combined bidding of vehicle-to-grid ancillary services", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 3, no. 1, pp. 70-79, March 2012 (doi: 10.1109/TSG.2011.2170099).
- [19] M. Singh, K. Thirugnanam, P. Kumar, I. Kar, "Real-Time coordination of electric vehicles to support the grid at the distribution substation level", IEEE System Journal, vol. 9, no. 3, pp. 1000-1010, Sept. 2015 (doi: 10.1109/JSYST.2013.2280821).
- [20] A. Kavousi-Fard, T. Niknam, M. Fotuhi-Firuzabad, "Stochastic reconfiguration and optimal coordination of V2G plug-in electric vehicles considering correlated wind power generation", IEEE Trans. Sustainable Energy, vol.6, no.3, pp. 822-830, July 2015 (doi: 10.1109/TSSTE.2015.2409814).
- [21] A. Nazarloo, "Variable objective function algorithm in charging-discharging scheduling for vehicle-to-grid services", Proceeding of the NCEEIS, pp. 1-6, Najafabad, Iran, May/June 2022.
- [22] C. Wu, H. Mohsenian-Rad, J. Huang, "Vehicle-to-aggregator inter-action game", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 3, no. 1, pp. 434-442, Mar. 2012 (doi: 10.1109/TSG.2011.2166414).
- [23] E. Sortomme, M.A. El-Sharkawi, "Optimal scheduling of vehicle-to-grid energy and ancillary services", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 3, no. 1, pp. 351-359, March 2012 (doi: 10.1109/TSG.2011.2164099).
- [24] N. Chen, M. Wang, M. Zhang, X. Shen, "Energy and information management of electric vehicular network: A survey", IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 22, no. 2, pp. 967-997, March 2020 (doi: 10.1109/COMST.2020.2982118).
- [25] Y. Ota, H. Taniguchi, T. Nakajima, K. Liyanage, J. Baba, A. Yokoyama, "Autonomous distributed V2G (Vehicle-to-Grid) satisfying scheduled charging", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 3, no. 1, pp. 559-564, March 2012 (doi: 10.1109/TSG.2011.2167993).
- [26] Y. Ma, T. Houghton, A. Cruden, D. Infield, "Modeling the benefits of vehicle-to-grid technology to a power system", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 27, no. 2, pp. 1012-1020, May 2012 (doi: 10.1109/TPWRS.2011.2178043).
- [27] M. Singh, P. Kumar, I. Kar, "Implementation of vehicle to grid infrastructure using fuzzy logic controller", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 3, no. 1, pp. 565-577, March 2012 (doi: 10.1109/TSG.2011.2172697).
- [28] M. Singh, P. Kumar, I. Kar, "Designing a multi charging station for electric vehicles and its utilization for the grid support", Proceeding of the IEEE/PES, pp. 1-8, San Diego, CA, USA, July 2012 (doi: 10.1109/PESGM-2012.6344868).
- [29] K. Kaur, N. Kumar, M. Singh, "Coordinated power control of electric vehicles for grid frequency support: MILP-based hierarchical control design", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 10, no. 3, pp. 3364-3373, May 2019 (doi: 10.1109/TSG.2018.2825322).
- [30] S. Karimi-Arpanahia, M. Jooshakib, S.A. Pourmousavia, M. Lehtonenc, "Leveraging the flexibility of electric vehicle parking lots in distribution networks with high renewable penetration", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 142, pp. 1-15, June 2022 (doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108366).

زیر نویس‌ها

1. Voltage collapse
2. Vehicle-to-grid (V2G)
3. Aggregator
4. Peak-valley gap
5. Peak shaving
6. Valley filling
7. Charging station
8. Multi charging station
9. Fuzzy logic controller (FLC)
10. Point of common connection (PCC)
11. State of charge (SOC)
12. Electric vehicle (EV)
13. Variable objective function (VOF)
14. Charging-discharging controller
15. Aggregators of EVs
16. Aggregator of aggregators
17. Charging/discharging controller-aggregator protocol

18. Aggregator-aggregator protocol
19. Aggregator-EV protocol
20. Grid-to-vehicle (G2V)