Journal of **N**ovel **R**esearches on **S**mart **P**ower **S**ystems - Vol. 14 - No. 4 – Winter 2026
P-ISSN: 2322-2468, E-ISSN: 2981-0272, https://jeps.dezful.iau.ir/

Research Article

The Role of Vehicle-to-Grid Technology in Microgrid Sustainability: A Review of Concepts, Challenges, and Future Research Trends

Hamidreza Yazdani-Nogourani[1,2], *Ms.C.*, Ghaznafar Shahgholian[*1,2], *Professor*

[1] Smart Microgrid Research Center, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran, hamidreza.yazdaninogourani@iau.ac.ir
[2] Department of Electrical Engineering, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran, shahgholian@iau.ac.ir

Abstract:
With the expansion of distributed renewable energy sources and the increasing complexity of operating distribution networks, microgrids have faced challenges in maintaining stability, reliability, and power quality. The inherent fluctuations in production in sources such as solar and wind and the need to create a momentary balance between production and consumption are among the most important factors creating these challenges. Vehicle-to-Grid (V2G) technology, which enables two-way energy exchange between electric vehicle batteries and the power grid, is considered a promising solution to address these problems. This article first introduces the concept of microgrids, their types, and the main issues related to sustainability. Then, the operating principles, advantages, and different types of V2G technology are reviewed. The main focus is on the role of this technology in improving the sustainability of microgrids. These roles include improving frequency and voltage regulation through rapid power injection or absorption, managing fluctuations in renewable generation using electric vehicles as energy storage, and increasing the reliability and resilience of microgrids, especially in islanded conditions. V2G can also contribute to economic optimization and reduced operating costs by participating in load response programs and energy markets. In addition to the benefits, the technical, economic, and management challenges associated with the widespread implementation of this technology are also examined. Finally, by reviewing case studies, the efficiency of V2G is evaluated in different scenarios and its future prospects in smart energy grids are outlined. The results show that V2G can be one of the key technologies for realizing sustainable, smart, and resilient microgrids in the future.

Keywords: improving sustainability, vehicle-to-grid, microgrid, microgrid classification.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

Received: 25 Nov. 2025
Revised: 10 Jan. 2026
Accepted: 31 Jan. 2026

*** Corresponding Author:** Dr. Ghaznafar Shahgholian

Citation: H.R. Yazdani-Nogourani, G. Shahgholain, "The role of vehicle-to-grid technology in microgrid sustainability: A review of concepts, challenges, and future research trends", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 14, no. 4, pp. 35-69, March 2026 (in Persian).

[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565]

مقاله پژوهشی

نقش فناوری خودرو به شبکه در پایداری ریزشبکه‌ها: مروری بر مفاهیم، چالش‌ها و روندهای تحقیقاتی آینده

حمیدرضا یزدانی نوگورانی[۱،۲]، دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، غضنفر شاهقلیان[۱،۲*]، استاد

۱- مرکز تحقیقات ریزشبکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، hamidreza.yazdaninogourani@iau.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، shahgholian@iau.ac.ir

چکیده: با گسترش منابع انرژی تجدیدپذیر پراکنده و افزایش پیچیدگی بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع، ریزشبکه‌ها با چالش‌هایی در حفظ پایداری، قابلیت اطمینان و کیفیت توان مواجه شده‌اند. نوسانات ذاتی تولید در منابعی مانند خورشید و باد و ضرورت ایجاد تعادل لحظه‌ای میان تولید و مصرف از مهم‌ترین عوامل ایجاد این چالش‌ها هستند. فناوری خودرو به شبکه (V2G) که امکان تبادل دوطرفه انرژی میان باتری خودروهای الکتریکی و شبکه برق را فراهم می‌کند، راهکاری نویدبخش برای مقابله با این مشکلات محسوب می‌شود. در این مقاله ابتدا مفهوم ریزشبکه، انواع آن و مسائل اصلی مرتبط با پایداری معرفی می‌شود. سپس اصول عملکرد، مزایا و گونه‌های مختلف فناوری V2G بررسی می‌گردد. تمرکز اصلی بر نقش این فناوری در بهبود پایداری ریزشبکه‌ها است. از جمله این نقش‌ها می‌توان به بهبود تنظیم فرکانس و ولتاژ از طریق تزریق یا جذب سریع توان، مدیریت نوسانات تولید منابع تجدیدپذیر با استفاده از خودروهای الکتریکی به‌عنوان ذخیره‌ساز انرژی، و افزایش قابلیت اطمینان و تاب‌آوری ریزشبکه‌ها به‌ویژه در حالت جزیره‌ای اشاره کرد. همچنین V2G می‌تواند با مشارکت در برنامه‌های پاسخگویی بار و بازارهای انرژی، به بهینه‌سازی اقتصادی و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری کمک کند. در کنار مزایا، چالش‌های فنی، اقتصادی و مدیریتی مرتبط با پیاده‌سازی گسترده این فناوری نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت با مرور مطالعات موردی، کارایی V2G در سناریوهای مختلف ارزیابی شده و چشم‌انداز آینده آن در شبکه‌های هوشمند انرژی ترسیم می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که V2G می‌تواند یکی از فناوری‌های کلیدی برای تحقق ریزشبکه‌های پایدار، هوشمند و تاب‌آور در آینده باشد.

کلمات کلیدی: بهبود پایداری، خودرو به شبکه، ریزشبکه، طبقه‌بندی ریزشبکه‌ها

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۹/۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۰

* **نام نویسنده مسئول:** دکتر غضنفر شاهقلیان

نشانی نویسنده مسئول: نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد، دانشکده مهندسی برق

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

۱- مقدمه

در دنیای امروز، تحولات چشمگیری در صنعت انرژی در حال وقوع است. گذار به سمت منابع انرژی تجدیدپذیر، افزایش تقاضای انرژی، و نیاز روزافزون به قابلیت اطمینان و تاب‌آوری سیستم‌های قدرت، منجر به ظهور مفاهیم نوین و فناوری‌های پیشرفته شده است [۱،۲]. در این میان، ریزشبکه‌ها به عنوان یکی از راهکارهای کلیدی برای مدیریت و کنترل بهینه انرژی در مقیاس محلی، اهمیت فزاینده‌ای یافته‌اند. ریزشبکه‌ها، که شبکه‌های کوچکی با قابلیت عملکرد مستقل (جزیره‌ای[۱]) یا متصل به شبکه[۲] اصلی هستند، پتانسیل بالایی برای ادغام منابع انرژی پراکنده[۳] (DERs)، بهبود پایداری، و تضمین تأمین انرژی مطمئن در سطح محلی دارند. با این حال، این سیستم‌ها با چالش‌های منحصر به فردی، به ویژه در زمینه پایداری، مواجه هستند [۳،۴]. منابع انرژی تجدیدپذیر مانند خورشید و باد که اغلب جزء اصلی ریزشبکه‌ها را تشکیل می‌دهند، ذاتاً متغیر و نامنظم هستند و این امر نوسانات قابل توجهی را در تولید و عرضه انرژی ایجاد می‌کند. همچنین، مدیریت بار در ریزشبکه‌ها، حفظ کیفیت توان (ولتاژ و فرکانس)، کاهش اینرسی سیستم[۴] ناشی از کاهش ماشین‌های الکتریکی سنتی و افزایش سهم بارهای الکترونیکی، و اطمینان از پاسخگویی سریع به تغییرات ناگهانی، از جمله مسائل پیچیده‌ای هستند که بر پایداری کلی ریزشبکه تأثیر می‌گذارند [۵،۶]. همزمان با پیشرفت ریزشبکه‌ها، انقلاب دیگری در صنعت حمل و نقل به نام ظهور گسترده خودروهای الکتریکی[۵] (EVs) در حال شکل‌گیری است [۷،۸]. این خودروها نه تنها راه‌حلی برای کاهش آلودگی هوا و وابستگی به سوخت‌های فسیلی ارائه می‌دهند، بلکه پتانسیل قابل توجهی را برای ایفای نقش فعال در سیستم‌های قدرت به وجود آورده‌اند. فناوری خودرو به شبکه[۶] (V2G)، که امکان تبادل دوطرفه انرژی بین باتری خودروهای الکتریکی و شبکه برق را فراهم می‌آورد، یکی از نوآورانه‌ترین رویکردها در این زمینه است [۹،۱۰]. V2G فراتر از یک ابزار شارژ ساده عمل کرده و به خودروهای الکتریکی اجازه می‌دهد تا به عنوان منابع انرژی متحرک، ذخیره‌سازهای انرژی انعطاف‌پذیر، و ارائه‌دهندگان خدمات جانبی برای شبکه عمل کنند. این فناوری می‌تواند با جذب انرژی اضافی در زمان تولید بالا یا تزریق انرژی در زمان نیاز، به متعادل‌سازی عرضه و تقاضا، کاهش پیک بار، و بهبود پایداری شبکه کمک کند [۱۱،۱۲].

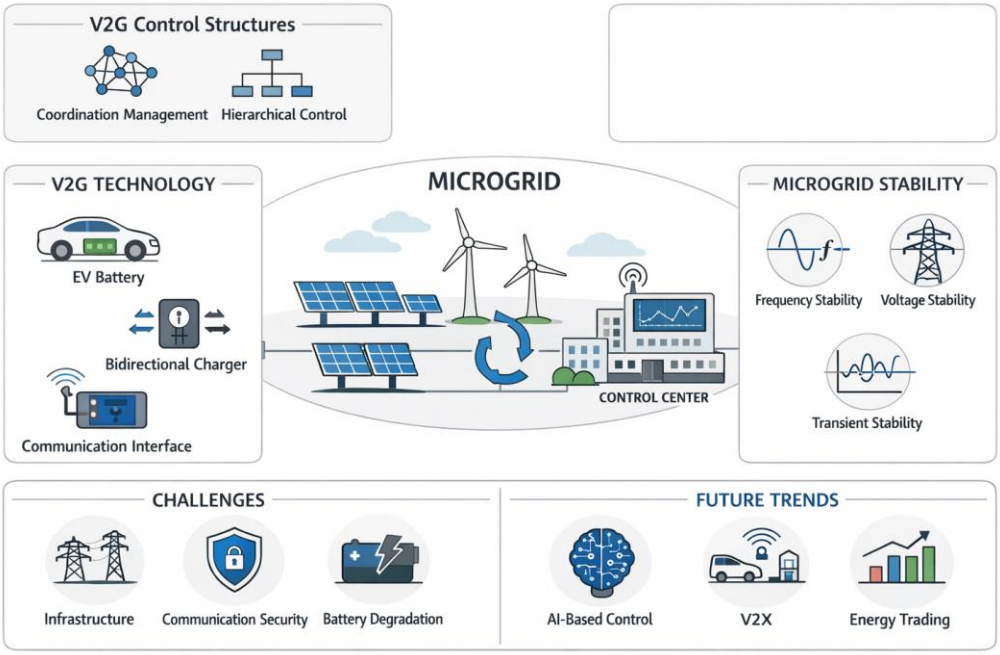
با توجه به چالش‌های ذاتی پایداری در ریزشبکه‌ها و پتانسیل عظیم فناوری V2G، این مقاله با هدف بررسی نقش فناوری خودرو به شبکه در ارتقاء پایداری ریزشبکه‌ها تدوین شده است. این مطالعه به تحلیل چگونگی استفاده از قابلیت‌های V2G برای غلبه بر موانع پایداری در ریزشبکه‌ها، از جمله مدیریت نوسانات منابع تجدیدپذیر، تنظیم فرکانس و ولتاژ، افزایش قابلیت اطمینان در حالت جزیره‌ای، و بهینه‌سازی اقتصادی ریزشبکه می‌پردازد. در این راستا، ابتدا به معرفی مفاهیم پایه ریزشبکه‌ها و چالش‌های پایداری آنها، سپس به تشریح اصول و مزایای فناوری V2G پرداخته خواهد شد. پس از آن، به طور مفصل نقش V2G در ابعاد مختلف پایداری ریزشبکه مورد بحث قرار گرفته و مطالعات موردی و شبیه‌سازی‌های مرتبط بررسی خواهند شد. در نهایت، چالش‌ها و موانع پیش روی پیاده‌سازی گسترده V2G در ریزشبکه‌ها و همچنین پیشنهادات برای تحقیقات آتی و چشم‌انداز آینده این حوزه ارائه خواهد گردید. امید است این مطالعه، مفهومی از پتانسیل V2G برای توانمندسازی ریزشبکه‌ها و ایجاد شبکه‌های انرژی آینده‌ای پایدارتر و انعطاف‌پذیرتر ارائه دهد. از برجستگی‌ها و یافته‌های محوری این مطالعه می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- نقش چندگانه V2G در پایداری دینامیکی و عملکردی ریزشبکه: توانایی فناوری خودرو به شبکه در بهبود تنظیم فرکانس و ولتاژ (از طریق تزریق یا جذب سریع توان)، مدیریت نوسانات منابع تجدیدپذیر باد و خورشید، و افزایش تاب‌آوری سیستم به‌ویژه در سناریوی بحرانی کارکرد جزیره‌ای.
- ارزیابی هم‌زمان ابعاد فنی و اقتصادی: تحلیل جامع اثرات اقتصادی V2G از طریق مشارکت در برنامه‌های پاسخگویی بار و بازارهای انرژی جهت کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، در کنار بررسی چالش‌های فنی، اقتصادی و مدیریتی پیاده‌سازی آن.

شکل (۱) چارچوب مفهومی مطالعه را به‌صورت یکپارچه نمایش می‌دهد و نشان می‌دهد که چگونه فناوری خودرو به شبکه می‌تواند به‌عنوان یک عنصر کلیدی در بهبود عملکرد و پایداری ریزشبکه‌ها ایفای نقش کند. در این ساختار، خودروهای الکتریکی به همراه ایستگاه‌های شارژ دوطرفه، سامانه‌های مدیریت انرژی، زیرساخت‌های ارتباطی و کنترل‌گرهای محلی، اجزای

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

اصلی سیستم V2G را تشکیل می‌دهند. این اجزا از طریق راهبردهای مدیریت و هماهنگی و نیز کنترل سلسله‌مراتبی با ساختار بهره‌برداری ریزشبکه یکپارچه می‌شوند. همانطور که مشاهده می‌شود در بخش میانی، ریزشبکه از منظرهای مختلف شامل نوع اتصال به شبکه، توپولوژی توان عبوری، نوع منبع انرژی و روش کنترل و مدیریت دسته‌بندی شده است. این دسته‌بندی‌ها بستر لازم برای تحلیل اثرات V2G بر رفتار ریزشبکه را فراهم می‌کنند. در ادامه، نقش V2G در سه بعد اصلی پایداری یعنی پایداری فرکانس، پایداری ولتاژ و پایداری گذرا برجسته شده است؛ به‌طوری‌که خودروهای الکتریکی با تبادل دوطرفه توان، قابلیت تنظیم سریع توان اکتیو و راکتیو، جبران نوسانات منابع تجدیدپذیر و پشتیبانی از بارهای حساس را فراهم می‌کنند. همچنین مشاهده می‌شود که بهره‌گیری از V2G با وجود مزایای فنی و بهره‌برداری، با چالش‌هایی نظیر محدودیت زیرساخت شارژ دوطرفه، پیچیدگی هماهنگی و کنترل، عدم قطعیت در رفتار کاربران، هزینه‌های اقتصادی و نگرانی‌های مرتبط با عمر باتری و امنیت سایبری همراه است. در نهایت، مسیرهای آینده شامل کنترل هوشمند مبتنی بر هوش مصنوعی، توسعه استانداردها و بازارهای انرژی محلی، تجمیع‌کننده‌های انرژی و همگرایی با شبکه‌های هوشمند به‌عنوان روندهای کلیدی توسعه این فناوری نمایش داده شده‌اند. در مجموع، این خلاصه گرافیکی نشان می‌دهد که V2G می‌تواند یکی از فناوری‌های راهبردی برای تحقق ریزشبکه‌های پایدار، هوشمند و تاب‌آور در سیستم‌های انرژی آینده باشد.



شکل (۱): خلاصه گرافیکی نقش فناوری خودرو به شبکه در ارتقای پایداری ریزشبکه‌ها

Figure (1): Graphical summary of the role of vehicle-to-grid technology in improving the sustainability of microgrids

در ادامه ساختار مقاله به این شرح است. ابتدا در بخش ۲ اجزای اصلی سیستم خودرو به شبکه معرفی می‌شوند تا چارچوب عملکردی این فناوری تبیین گردد. سپس بخش ۳ به دسته‌بندی سیستم‌های V2G بر اساس رویکردهای مختلف کنترلی اختصاص دارد؛ به‌گونه‌ای که ابتدا مفاهیم مدیریت و هماهنگی بررسی شده و در ادامه ساختارهای کنترل سلسله‌مراتبی تشریح می‌شوند. در بخش ۴ مفاهیم ریزشبکه و انواع دسته‌بندی‌های آن مرور می‌شود؛ شامل ساختار اتصال به شبکه، توپولوژی توان عبوری، نوع منابع انرژی و الگوهای کنترل و مدیریت. پس از آن، بخش ۵ به تعریف جامع پایداری در ریزشبکه‌ها می‌پردازد و سه بعد اصلی آن یعنی پایداری فرکانس، پایداری ولتاژ و پایداری گذرا را مورد بررسی قرار می‌دهد. در بخش ۶ چالش‌ها و موانع فنی، اقتصادی و مدیریتی پیاده‌سازی فناوری خودرو به شبکه در ریزشبکه‌ها مطرح می‌شود. بخش ۷ به بررسی روندهای

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

آینده، فناوری‌های نوظهور و مسیرهای تحقیقاتی مرتبط با توسعه V2G در ریزشبکه‌ها اختصاص دارد. در نهایت، بخش ۸ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری کلی از مباحث مطرح‌شده را ارائه می‌کند.

۲- اجزای اصلی سیستم خودرو به شبکه

فناوری خودرو به شبکه به سازوکاری اطلاق می‌شود که در آن خودروهای برقی علاوه بر دریافت انرژی از شبکه برای شارژ باتری، قادر به تزریق توان الکتریکی به شبکه نیز هستند. در این ساختار، خودرو از یک مصرف‌کننده صرف به یک منبع ذخیره‌سازی توزیع‌شده و فعال تبدیل می‌شود که می‌تواند در مدیریت توان، بهبود پایداری و ارائه خدمات جانبی مشارکت نماید [۱۳،۱۴]. مقایسه بین انواع خودروهای برقی شامل خودروی برقی باتری‌محور[۷] [۱۵،۱۶]، خودروی هیبریدی قابل شارژ[۸] [۱۷،۱۸]، خودروی هیبریدی معمولی[۹] [۱۹،۲۰] و خودروی پیل سوختی[۱۰] [۲۱،۲۲] در جدول (۱) آمده است. از میان انواع خودروهای برقی، خودروهای تمام‌برقی (BEV) به دلیل ظرفیت بالاتر باتری و سازگاری فنی با شارژ دوطرفه، مناسب‌ترین گزینه برای مشارکت در تنظیم فرکانس و پیاده‌سازی سیستم خودرو به شبکه در ریزشبکه محسوب می‌شوند. با توجه به روند رو به رشد پذیرش جهانی این خودروها، استفاده از آن‌ها در قالب تجمیع‌کننده‌ها می‌تواند نقش مهمی در بهبود پایداری دینامیکی ریزشبکه‌ها، به‌ویژه هنگام وقوع رویدادهای ناگهانی، ایفا کند. فناوری خودرو به شبکه، بستری فناورانه برای تبدیل خودروهای برقی به منابع انرژی توزیع‌شده و قابل کنترل فراهم می‌کند.

Table (1): Types of electric vehicles and their role in frequency regulation

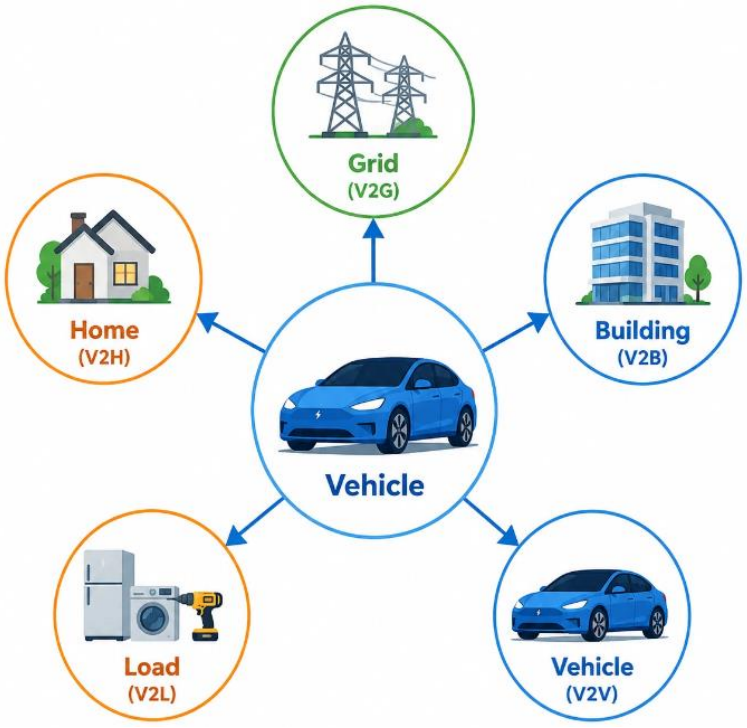
جدول (۱): انواع خودروهای برقی و نقش آنها در تنظیم فرکانس

نوع خودرو	مخفف	منبع تامین انرژی	قابلیت اتصال به شبکه	امکان پیاده‌سازی V2G	سطح ظرفیت باتری	نقش بالقوه در تنظیم فرکانس
خودروی برقی باتری‌محور	BEV	باتری قابل شارژ از شبکه	دارد	کامل	بالا	بسیار مناسب؛ قابلیت پاسخ سریع و اینرسی مجازی
خودروی هیبریدی قابل شارژ	PHEV	باتری + موتور احتراق داخلی	دارد	محدود	متوسط	مناسب برای مشارکت کوتاه‌مدت و محدود
خودروی هیبریدی معمولی	HEV	موتور احتراق داخلی + بازیابی انرژی	ندارد	ندارد	پایین	فاقد قابلیت مشارکت مستقیم
خودروی پیل سوختی	FCEV	هیدروژن (پیل سوختی)	محدود	بسیار محدود	متوسط	در شرایط خاص قابل بررس

در ریزشبکه‌های دارای نفوذ بالای منابع تجدیدپذیر، V2G می‌تواند به عنوان راهکاری مؤثر برای تنظیم فرکانس و افزایش پایداری دینامیکی، به‌ویژه در هنگام وقوع رویدادهای ناگهانی، مورد استفاده قرار گیرد. بهره‌گیری مؤثر از این فناوری مستلزم مدل‌سازی دقیق دینامیکی، طراحی الگوریتم‌های کنترلی مناسب و در نظر گرفتن محدودیت‌های فنی و اقتصادی است. فناوری ارتباط خودرو با همه اجزای پیرامونی یا خودرو به همه‌چیز (V2X) یک اصطلاح جامع در دنیای فناوری‌های مدرن خودرویی و شبکه‌های هوشمند است. این مفهوم فراتر از صرفاً شارژ شدن یا بازگرداندن برق به شبکه است و شامل تبادل اطلاعات و انرژی با تمام اجزای محیط پیرامون می‌شود. در این سیستم، ارتباط باز و مستقیم میان سه بخش مالک خودرو، تامین‌کننده انرژی و خود شبکه برق برقرار است. فناوری V2X، با ارائه بستری برای تبادل دوطرفه داده‌ها، پارادایم سنتی کنترل فرکانس در ریزشبکه‌ها را متحول کرده است. در این معماری، خودروی برقی دیگر نه تنها یک بار مصرف‌کننده، بلکه به عنوان یک عنصر فعال و هوشمند در شبکه شناخته می‌شود که از طریق پیوندهای خودرو به ایستگاه شارژ[۱۱] (V2I) و خودرو به شبکه[۱۲] (V2N)، در لحظات بحرانی وقوع رویدادها، نقش یک منبع تولید مجازی با پاسخ‌دهی سریع را ایفا می‌کند. V2X به ارتباط بین خودرو و سایر اجزا یا شبکه‌های اطراف مطابق شکل (۲) اشاره دارد، که بخش‌های مرتبط با تبادل انرژی[۱۳] عبارتند از: خودرو به خانه[۱۴] (V2H)، خودرو به ساختمان[۱۵] (V2B)، خودرو به بار[۱۶] (V2L)، خودرو به خودرو[۱۷] (V2V) و خودرو به شبکه (V2G). در

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

چارچوب V2G، تبادل توان به صورت دوطرفه انجام می‌شود و مدیریت آن معمولاً از طریق یک نهاد واسط به نام تجمیع‌کننده[۱۸] صورت می‌گیرد که ناوگان خودروهای متصل را به عنوان یک نیروگاه مجازی مدیریت می‌کند [۲۳،۲۴].



شکل (۲): ساختار ساده از فناوری ارتباط خودرو به همه‌چیز

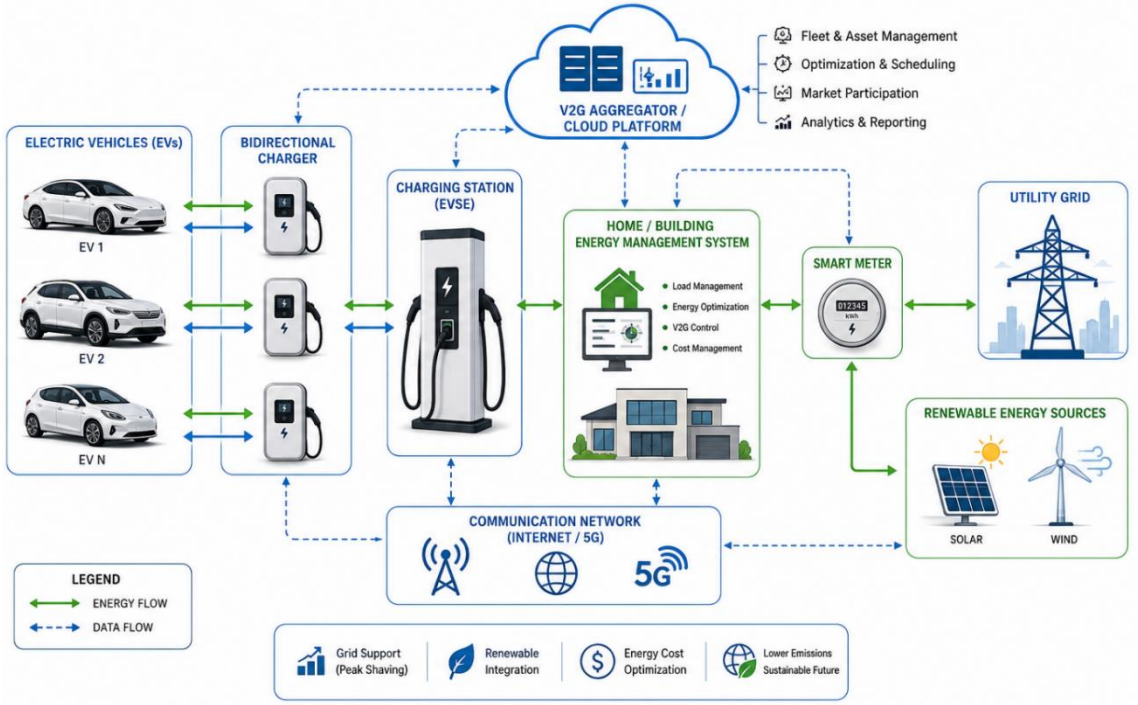
Figure (2): Simple structure of car-to-everything connectivity technology

در سناریوی خودرو به شبکه (V2G)، خودروی برقی نه تنها انرژی را از شبکه دریافت می‌کند، بلکه می‌تواند به عنوان یک منبع تزریق توان عمل کند. شکل (۳) معماری مفهومی و اجزای اصلی سیستم خودرو به شبکه را نشان می‌دهد. در این معماری، خودروهای الکتریکی نه‌تنها به عنوان مصرف‌کننده انرژی برای شارژ باتری عمل می‌کنند، بلکه می‌توانند به عنوان منابع ذخیره‌سازی توزیع‌شده انرژی نیز مورد استفاده قرار گیرند و در شرایط موردنیاز انرژی ذخیره‌شده در باتری خود را به شبکه بازگردانند. در این ساختار، خودروی الکتریکی (EV) شامل باتری، سیستم مدیریت باتری (BMS) و مبدل‌های الکترونیک قدرت است. باتری خودرو انرژی الکتریکی را ذخیره می‌کند و از طریق مبدل‌های توان، امکان تبدیل و کنترل جریان انرژی فراهم می‌شود. سیستم مدیریت باتری نیز وظیفه نظارت بر وضعیت شارژ (SOC)، دما، ایمنی و عملکرد باتری را بر عهده دارد. ارتباط فیزیکی خودرو با شبکه از طریق ایستگاه شارژ خودرو الکتریکی[۱۹] (EVSE) برقرار می‌شود. در سیستم‌های V2G، ایستگاه شارژ دارای مبدل توان دوطرفه است که امکان انتقال انرژی در دو جهت را فراهم می‌کند: از شبکه به خودرو (G2V) برای شارژ باتری، و از خودرو به شبکه (V2G) برای تزریق انرژی به شبکه. علاوه بر این، EVSE شامل واحد کنترل، تجهیزات اندازه‌گیری، سیستم‌های حفاظتی و رابط‌های ارتباطی است [۲۵،۲۶]

در لایه کنترلی، کنترل‌کننده ایستگاه شارژ[۲۰] مسئول مدیریت فرآیند شارژ و دشارژ، تبادل اطلاعات با خودرو و ارسال داده‌ها به سطوح مدیریتی بالاتر است. این کنترل‌کننده پارامترهایی مانند توان شارژ، وضعیت اتصال خودرو، و محدودیت‌های عملیاتی را تنظیم می‌کند. شارژر هوشمند دوطرفه[۲۱] قلب سیستم V2G است و وظیفه تبدیل جریان مستقیم باتری به جریان متناوب شبکه و بالعکس را بر عهده دارد. این مبدل‌ها باید قادر به کنترل دقیق توان فعال و راکتیو تزریقی یا دریافتی باشند. راندمان شارژر، به‌ویژه در حالت دشارژ، بر سودمندی اقتصادی V2G تأثیر مستقیم دارد. در سطح بالاتر، یک تجمیع‌کننده قرار دارد که نقش واسط میان تعداد زیادی از خودروهای الکتریکی و شبکه برق را ایفا می‌کند. تجمیع‌کننده اطلاعات مربوط به وضعیت شارژ خودروها، زمان اتصال آن‌ها، ظرفیت باتری در دسترس و شرایط بازار برق را جمع‌آوری کرده و با استفاده از الگوریتم‌های

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

مدیریتی و بهینه‌سازی، تصمیم می‌گیرد که چه مقدار توان از خودروها دریافت یا به آن‌ها ارسال شود. این تجمیع باعث می‌شود مجموعه‌ای از خودروهای الکتریکی مانند یک نیروگاه مجازی عمل کنند.



شکل (۳): معماری سیستم خودرو به شبکه و اجزای اصلی آن

Figure (3): Vehicle-to-network system architecture and its main components

در سمت شبکه، سیستم‌های مدیریت شبکه مانند سیستم مدیریت انرژی[۲۲] (EMS)، سیستم مدیریت توزیع[۲۳] (DMS) یا اپراتور شبکه برق قرار دارند. این سیستم‌ها وضعیت بار شبکه، فرکانس، ولتاژ و تقاضای انرژی را پایش کرده و در صورت نیاز از ظرفیت ذخیره‌سازی خودروها برای ارائه خدمات کمکی استفاده می‌کنند [۲۷،۲۸]. ارتباط میان اجزای مختلف سیستم از طریق زیرساخت‌های ارتباطی و پروتکل‌های استاندارد انجام می‌شود. این ارتباطات امکان تبادل داده‌هایی مانند وضعیت شارژ باتری، توان قابل ارائه، قیمت انرژی و دستورات کنترلی را فراهم می‌کنند. استانداردهایی مانند ISO 15118، برای ارتباط خودرو و زیرساخت شارژ، و پروتکل نقطه شارژ باز[۲۴] (OCPP)، برای ارتباط ایستگاه شارژ و سیستم مدیریت، ارتباطات لازم را برای اجرای V2G فراهم می‌کنند. این پروتکل‌ها باید قابلیت انتقال دستورات کنترلی و داده‌های وضعیت را داشته باشند [۲۹،۳۰]. در مجموع، معماری V2G یک چارچوب یکپارچه شامل خودروهای الکتریکی، ایستگاه‌های شارژ دوطرفه، تجمیع‌کننده‌ها و سیستم‌های مدیریت شبکه فراهم می‌کند. این ساختار امکان استفاده از ظرفیت ذخیره‌سازی گسترده خودروهای الکتریکی را برای اهدافی مانند کاهش پیک بار، تنظیم فرکانس، بهبود پایداری شبکه، ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر و افزایش انعطاف‌پذیری سیستم قدرت فراهم می‌سازد. به طور کلی فناوری V2G از سه لایه اصلی تشکیل شده است که عبارتند از:

الف- لایه فیزیکی (سخت‌افزاری) شامل باتری خودرو (معمولاً لیتیوم-یون)، مبدل دوطرفه AC/DC، واحد کنترل داخلی خودرو و ایستگاه شارژ دوطرفه[۲۵] است. مبدل‌های الکترونیک قدرت نقش کلیدی در تبدیل انرژی DC ذخیره‌شده در باتری به توان AC هماهنگ با فرکانس و ولتاژ شبکه دارند. در شارژرهای DC، مبدل قدرت دوطرفه[۲۶] در داخل ایستگاه شارژ قرار دارد و وظیفه تبدیل برق شبکه به DC برای شارژ و تبدیل برق DC باتری به AC سنکرون شده با شبکه (برای تخلیه) را بر عهده دارد. کنترل‌کننده ایستگاه شارژ، وظیفه مدیریت جریان، ولتاژ و پروتکل‌های ایمنی را بر عهده دارد. سیستم مدیریت باتری (BMS) وظیفه نظارت بر سلامت باتری، وضعیت شارژ (SoC)، ولتاژ و دمای سلول‌ها را دارد تا از آسیب دیدن باتری در هنگام تزریق توان به شبکه جلوگیری کند.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

ب- لایه کنترلی که شامل الگوریتم‌های کنترلی است که تصمیم می‌گیرند چه مقدار توان در چه زمانی تزریق یا جذب شود. روش‌های متداول عبارت‌اند از: کنترل افت[۲۷]، کنترل پیش‌بین مدل (MPC)، کنترل مقاوم[۲۸] و الگوریتم‌های هوشمند مبتنی بر بهینه‌سازی.

ج- لایه ارتباطی که برای هماهنگی بین خودرو، ایستگاه شارژ، تجمیع‌کننده و مرکز کنترل ریزشبکه، وجود یک زیرساخت ارتباطی امن و سریع ضروری است. پروتکل‌هایی مانند ISO 15118 و استانداردهای OCPP در این زمینه مورد استفاده قرار می‌گیرند. از آنجا که توان یک خودروی واحد برای اثرگذاری بر شبکه بسیار ناچیز است، به یک نهاد واسط نیاز است. واحد نرم-افزاری تجمیع‌کننده مدیریت هزاران خودروی الکتریکی را بر عهده می‌گیرد. او با اپراتور شبکه وارد معامله شده و خودروها را به عنوان یک نیروگاه مجازی[۲۹] (VPP) به شبکه معرفی می‌کند. تجمیع‌کننده تصمیم می‌گیرد کدام خودرو در چه زمانی شارژ یا دشارژ شود تا هم نیاز مالک خودرو برطرف شود و هم بیشترین سود از خدمات شبکه حاصل گردد.

۳- دسته‌بندی سیستم‌های خودرو به شبکه بر اساس ساختار کنترل

یکی از مهم‌ترین جنبه‌های مطالعات مربوط به سیستم‌های خودرو به شبکه، نحوه سازمان‌دهی و کنترل فرآیند شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی است. ساختار کنترل در سیستم V2G تعیین می‌کند که تصمیم‌گیری در خصوص زمان شارژ، میزان دشارژ، مشارکت در خدمات جانبی شبکه و رعایت محدودیت‌های کاربران چگونه و در چه سطحی انجام شود. با توجه به گستردگی تعداد خودروهای الکتریکی و ماهیت پراکنده آن‌ها در شبکه توزیع، انتخاب ساختار کنترلی مناسب نقش مهمی در بهره‌برداری ایمن، اقتصادی و پایدار از این فناوری دارد [۳۱،۳۲].

۳-۱- مدیریت و هماهنگی

سیستم‌های خودرو به شبکه، که امکان تبادل انرژی بین خودروهای الکتریکی و شبکه قدرت را فراهم می‌کنند، بر اساس نحوه مدیریت و هماهنگی تصمیم‌گیری‌ها، در سه دسته اصلی مطابق جدول (۲) طبقه‌بندی می‌شوند: کنترل متمرکز، کنترل غیرمتمرکز، و کنترل توزیع‌شده.

در کنترل متمرکز، یک سیستم مدیریت انرژی یا یک مرکز کنترل مرکزی، وظیفه جمع‌آوری تمام داده‌های مربوط به وضعیت خودروها (مانند سطح شارژ باتری، ظرفیت قابل دسترس)، وضعیت شبکه (مانند فرکانس، ولتاژ، تقاضا) و همچنین اطلاعات منابع تولید پراکنده را بر عهده دارد. تصمیم‌گیری نهایی برای زمان و میزان شارژ یا دشارژ هر خودرو، بر اساس الگوریتم‌های بهینه‌سازی سراسری که توسط این مرکز واحد اجرا می‌شوند، صورت می‌گیرد. مزیت اصلی این رویکرد، توانایی دستیابی به بهینه‌سازی کلی سیستم و هماهنگی جامع است. با این حال، این روش به شدت به عملکرد صحیح و پایدار مرکز کنترل وابسته است و خرابی آن می‌تواند کل سیستم را از کار بیاندازد. همچنین، نیاز به کانال‌های ارتباطی با پهنای باند بالا و تأخیر کم برای انتقال حجم زیاد داده‌ها، یکی از معایب اصلی آن محسوب می‌شود. در کاربردهای V2G در مقیاس بزرگ، مانند مدیریت ناوگان خودروهای الکتریکی در یک شهر، این رویکرد می‌تواند برای هماهنگی دقیق به کار گرفته شود، اما با چالش‌های مربوط به اطمینان‌پذیری و ارتباطات مواجه است [۳۳،۳۴].

در مقابل، کنترل غیرمتمرکز، اختیار تصمیم‌گیری را به واحد کنترل محلی هر خودرو یا یک گروه کوچک از خودروها واگذار می‌کند. این واحدها بر اساس اطلاعات در دسترس خود، مانند سطح شارژ باتری، قیمت لحظه‌ای برق، یا پارامترهای محلی شبکه (مانند ولتاژ و فرکانس در نقطه اتصال)، تصمیم می‌گیرند که چه زمانی و چگونه به شبکه انرژی تزریق یا از آن دریافت کنند. معمولاً در این سیستم‌ها از قوانین کنترلی ساده و محلی، مانند الگوریتم دروپ که در تنظیم فرکانس کاربرد دارد، استفاده می‌شود. مزیت کلیدی این معماری، مقیاس‌پذیری بالا و سادگی پیاده‌سازی آن است، زیرا نیاز به ارتباطات پیچیده و یکپارچه مرکزی ندارد. همچنین، این سیستم‌ها در برابر خرابی یک واحد مقاوم‌تر هستند. با این حال، فقدان دید سراسری باعث می‌شود که هماهنگی بهینه بین تمام خودروها دشوار باشد و احتمال بروز نوسانات ناخواسته در سطح شبکه وجود داشته

[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

باشد. این روش برای کاربردهایی مانند پاسخگویی به تقاضا در مقیاس کوچک یا تنظیم فرکانس در سطح محلی مناسب است [۳۵،۳۶].

کنترل توزیع‌شده، رویکردی میانه بین دو روش فوق است که تلاش می‌کند مزایای هر دو را ترکیب کند. در این معماری، خودروها به صورت مشارکتی و توزیع‌شده عمل می‌کنند. هر واحد کنترلی با همسایگان خود از طریق یک شبکه ارتباطی محدود تبادل اطلاعات می‌کند و با استفاده از الگوریتم‌های اجماع به یک توافق جمعی برای انجام عملیات شارژ/دشارژ دست می‌یابد. این الگوریتم‌ها به واحدها اجازه می‌دهند تا بدون نیاز به یک مرجع مرکزی، به سمت یک وضعیت مطلوب مشترک حرکت کنند. کنترل توزیع‌شده، تعادلی بین قابلیت بهینه‌سازی و مقیاس‌پذیری برقرار می‌کند و نسبت به کنترل متمرکز، مقاومت بیشتری در برابر خرابی از خود نشان می‌دهد. همچنین، هماهنگی بهتری نسبت به کنترل غیرمتمرکز فراهم می‌کند. این روش برای مدیریت هماهنگ ناوگان خودروهای V2G به منظور ارائه خدمات پیچیده به شبکه، مانند تنظیم دقیق فرکانس در زمان وقوع رویدادهای ناگهانی، بسیار مناسب است، زیرا امکان پاسخ‌دهی سریع و هماهنگ را بدون تمرکز بر یک نقطه مرکزی فراهم می‌آورد [۳۷،۳۸]. به طور خلاصه، انتخاب ساختار کنترل برای سیستم V2G به عواملی چون مقیاس سیستم، پیچیدگی خدمات درخواستی از شبکه، الزامات پاسخ‌دهی زمانی، و زیرساخت ارتباطی موجود بستگی دارد. این دسته‌بندی نشان می‌دهد تصمیم‌گیری برای شارژ، دشارژ و ارائه خدمات شبکه در کجا و چگونه انجام می‌شود.

Table (2): Classification of vehicle systems into networks in terms of control structure

جدول (۲): دسته‌بندی سیستم‌های خودرو به شبکه از نظر ساختار کنترل

ساختار کنترل / ویژگی‌ها	کنترل متمرکز	کنترل غیرمتمرکز	کنترل توزیع‌شده
نحوه مدیریت و تصمیم‌گیری	یک مرکز واحد داده‌ها را جمع‌آوری و تصمیم‌گیری می‌کند.	هر واحد محلی بر اساس اطلاعات خود و قوانین ساده تصمیم می‌گیرد.	واحدها به صورت مشارکتی از طریق الگوریتم‌های اجماع به توافق می‌رسند.
نیاز به ارتباطات	پهنای باند بالا، ارتباطات سراسری و قابل اعتماد.	حداقل نیاز به ارتباطات، عمدتاً محلی یا عدم نیاز.	ارتباطات محدود بین همسایگان، تبادل اطلاعات برای اجماع.
مزایا	بهینه‌سازی سراسری، دید کامل، اجرای استراتژی‌های پیچیده.	سادگی پیاده‌سازی، مقیاس‌پذیری بالا، اطمینان‌پذیری در برابر خطا.	تعادل بین بهینه‌سازی و مقیاس‌پذیری، هماهنگی بالا، تحمل خطا.
معایب	نقطه شکست تکی، وابستگی به مرکز، تأخیر احتمالی، هزینه‌های ارتباطی.	عدم بهینه‌سازی سراسری، هماهنگی کمتر، پتانسیل نوسانات محلی.	پیچیدگی الگوریتم‌های اجماع، تأخیر احتمالی در اجماع، نیاز به ارتباطات.
کاربرد در V2G و تنظیم فرکانس	مدیریت ناوگان بزرگ، خدمات پیچیده شبکه در مقیاس وسیع.	تنظیم فرکانس محلی، پاسخگویی به تقاضا در مقیاس کوچک.	تنظیم فرکانس دقیق، پاسخ سریع به رویدادها، خدمات پویا در مقیاس بزرگ.
چالش‌ها در شرایط وقوع رویداد	- وابستگی به مرکز: خرابی EMS یا ارتباطات منجر به از دست رفتن کنترل می‌شود. - تأخیر: ممکن است پاسخ به اغتشاشات سریع نباشد.	- ناهماهنگی: در صورت وقوع رویداد شدید، عدم هماهنگی واحدها می‌تواند باعث نوسان شدید فرکانس یا ولتاژ شود. - تصمیم‌گیری منفرد: ممکن است منجر به اثرات منفی جمعی شود.	کند شدن اجماع: در صورت اختلال در شبکه ارتباطی یا قطع ناگهانی برخی واحدها، فرآیند اجماع کند یا مختل شده و پاسخ به رویداد با تأخیر همراه خواهد بود. - وابستگی به همسایگان: اگر همسایگان اطلاعات نادرست دهند، کل گروه دچار مشکل می‌شوند.
دقت بهینه‌سازی	بالا (به دلیل دسترسی به تمام داده‌ها و قابلیت اجرای الگوریتم‌های بهینه‌سازی پیچیده.)	پایین (به دلیل اتکای صرف به اطلاعات محلی و عدم وجود دید سراسری.)	متوسط تا بالا (بسته به پیچیدگی الگوریتم اجماع و کیفیت ارتباطات، می‌تواند بهینه‌سازی قابل قبولی را فراهم کند.)
بار محاسباتی	بالا (در مرکز کنترل به دلیل	پایین (بار محاسباتی عمدتاً بر عهده	متوسط (هر واحد محاسبات مربوط به

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

اجماع و تعامل با همسایگان را انجام می‌دهد که از بار محاسباتی مرکز متمرکز کمتر و از غیرمتمرکز بیشتر است.)	واحدهای کنترلی محلی است که وظایف ساده‌ای را انجام می‌دهند.)	پردازش حجم زیاد داده‌ها و اجرای الگوریتم‌های پیچیده.)	

۲-۳- کنترل سلسله‌مراتبی

در سیستم‌های خودرو به شبکه، کنترل سلسله‌مراتبی[۳۰] یک رویکرد مدیریتی است که ترکیبی از سطوح مختلف کنترل، از جمله سطوح متمرکز، توزیع‌شده و حتی غیرمتمرکز را به صورت لایه‌ای سازماندهی می‌کند. هدف اصلی این رویکرد، بهره‌گیری از مزایای هر سطح و در عین حال، کاهش نقاط ضعف آن‌هاست تا بتوان به عملکرد بهینه، مقیاس‌پذیری و پایداری بالاتری دست یافت. این ساختار معمولاً به چند لایه تقسیم می‌شود:

الف- لایه استراتژیک[۳۱] (لایه بالا[۳۲]): این لایه در بالاترین سطح قرار دارد و مسئولیت تصمیم‌گیری‌های بلندمدت و کلان را بر عهده دارد. این تصمیمات شامل پیش‌بینی تقاضای انرژی، تعیین سیاست‌های قیمت‌گذاری، برنامه‌ریزی برای ارائه خدمات به شبکه اصلی (مانند تنظیم فرکانس در مقیاس بزرگ، مدیریت ازدحام یا بهینه‌سازی جریان توان در طول روز) و تخصیص منابع V2G به صورت کلی است. معمولاً از نوع کنترل متمرکز است و توسط یک سیستم مدیریت انرژی مرکزی یا یک اپراتور شبکه اجرا می‌شود. نیاز به داده‌های کلان و پیش‌بینی‌شده از وضعیت شبکه، بازار انرژی، و پیش‌بینی رفتار مصرف‌کنندگان و خودروها دارد.

ب- لایه تاکتیکی[۳۳] (لایه میانی[۳۴]): این لایه مسئولیت ترجمه دستورات استراتژیک به وظایف عملیاتی کوتاه‌مدت‌تر را دارد. به عنوان مثال، اگر لایه استراتژیک تصمیم به تزریق توان به شبکه برای تنظیم فرکانس بگیرد، لایه تاکتیکی مسئولیت تخصیص این وظیفه به گروه‌های خاصی از خودروها (مثلاً بر اساس موقعیت جغرافیایی، نوع خودرو، یا سطح شارژ) و تعیین اهداف عملکردی برای آن‌ها را بر عهده دارد. می‌تواند ترکیبی از کنترل متمرکز و کنترل توزیع‌شده باشد. ممکن است یک هماهنگ‌کننده منطقه‌ای (مانند یک مرکز کنترل منطقه‌ای) وجود داشته باشد که وظایف را به زیرگروه‌ها یا خوشه‌های خودرویی محول کند. با لایه بالا ارتباط برقرار کرده و دستورات را دریافت می‌کند، و همچنین اطلاعات وضعیت از لایه پایین‌تر را برای تنظیم دقیق‌تر جمع‌آوری می‌کند.

ج- لایه عملیاتی[۳۵] (لایه پایین[۳۶]): این لایه مسئولیت اجرای دستورات دریافتی از لایه‌های بالاتر را در سطح خودروهای منفرد یا گروه‌های کوچک خودرویی بر عهده دارد. این شامل تصمیم‌گیری در لحظه برای شارژ یا دشارژ کردن باتری هر خودرو، مدیریت ارتباطات با خودرو، و اطمینان از رعایت محدودیت‌های فنی (مانند حداکثر نرخ شارژ/دشارژ، وضعیت سلامت باتری) است.معمولاً از نوع کنترل توزیع‌شده یا کنتل غیرمتمرکز است. خودروها ممکن است بر اساس الگوریتم‌های محلی یا توافق با همسایگان خود، اقدام به شارژ/دشارژ کنند. با خودروهای الکتریکی به طور مستقیم در ارتباط است و وضعیت لحظه‌ای باتری، شارژ و سایر پارامترهای فنی را دریافت و پردازش می‌کند.

از مزایای کنترل سلسله مراتبی در V2G می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- مقیاس‌پذیری: با تقسیم وظایف به لایه‌های مختلف، مدیریت سیستم‌های بسیار بزرگ با تعداد زیادی خودرو امکان‌پذیر می‌شود.
- انعطاف‌پذیری: قابلیت تطبیق با شرایط مختلف شبکه و رویدادهای پیش‌بینی نشده با استفاده از سطوح مختلف کنترل.
- اطمینان‌پذیری: خرابی در یک لایه لزوماً منجر به از کار افتادن کل سیستم نمی‌شود. به عنوان مثال، اگر یک هماهنگ‌کننده منطقه‌ای از کار بیفتد، خودروها همچنان می‌توانند بر اساس الگوریتم‌های محلی خود به صورت غیرمتمرکز عمل کنند.
- بهینه‌سازی: امکان دستیابی به سطوح مختلف بهینه‌سازی؛ بهینه‌سازی سراسری در لایه بالا، بهینه‌سازی منطقه‌ای در لایه میانی، و پاسخ‌دهی سریع محلی در لایه پایین.
- مدیریت مؤثر در شرایط رویداد: در زمان وقوع رویدادهای ناگهانی (مانند قطع خط انتقال یا نوسان شدید فرکانس)، لایه‌های پایین‌تر (عملیاتی و تاکتیکی) می‌توانند به سرعت واکنش نشان دهند، در حالی که لایه استراتژیک به تحلیل رویداد و تنظیم مجدد برنامه‌های بلندمدت می‌پردازد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

از چالش‌های کنترل سلسله مراتبی نیز می‌توان موارد زیر را بیان کرد:

- پیچیدگی طراحی و پیاده‌سازی: هماهنگ کردن لایه‌های مختلف و پروتکل‌های ارتباطی بین آن‌ها می‌تواند چالش‌برانگیز باشد.

- هماهنگی بین لایه‌ها: اطمینان از اینکه تصمیمات یک لایه با اهداف و محدودیت‌های لایه دیگر همسو باشد، نیاز به طراحی دقیق دارد.

- مدیریت داده‌ها: حجم زیاد داده‌ها از لایه‌های پایین‌تر که باید به لایه‌های بالاتر منتقل و پردازش شوند.

کنترل سلسله مراتبی می‌تواند به عنوان یک چارچوب جامع برای شبیه‌سازی و تحلیل تأثیر V2G در تنظیم فرکانس در نظر گرفته شود، زیرا امکان بررسی پاسخ سیستم در سطوح مختلف و تحت سناریوهای گوناگون رویداد را فراهم می‌آورد. در جدول (۳) یک مقایسه بین سیستم‌های کنترلی در سیستم V2G براساس پارامترهای کلیدی آمده است.

Table (3): Comparison of vehicle-to-network system control structures based on key parameters

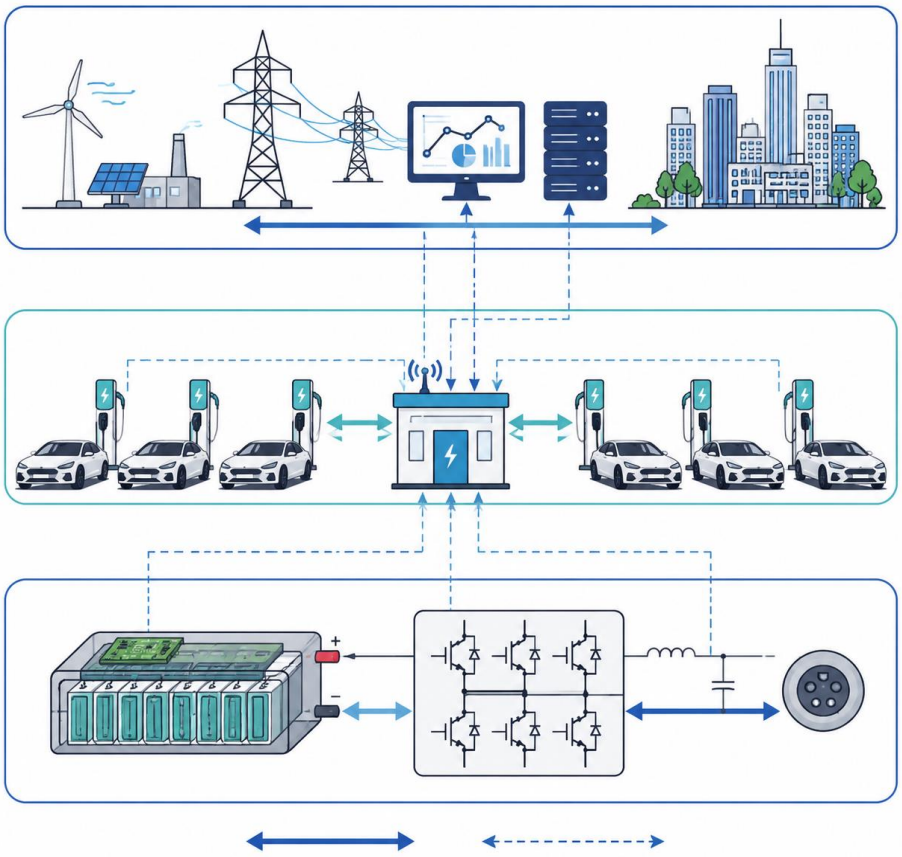
جدول (۳): مقایسه ساختارهای کنترلی سیستم خودرو به شبکه بر اساس پارامترهای کلیدی

روش کنترل / پارامتر کلیدی	کنترل متمرکز	کنترل غیرمتمرکز	کنترل توزیع‌شده	کنترل سلسله‌مراتبی
سطح بهینه‌سازی	سراسری	محلی	نیمه‌سراسری/گروهی	چندسطحی
مقیاس‌پذیری	ضعیف (به دلیل بار محاسباتی و ارتباطی مرکز)	قوی (بدون نیاز به مرکز)	متوسط تا قوی (بسته به ساختار ارتباطی)	قوی (با تقسیم وظایف بین لایه‌ها)
اطمینان‌پذیری/تحمل خطا	ضعیف (نقطه شکست تکی در مرکز)	قوی (خرابی یک واحد تأثیر کمی دارد)	متوسط تا قوی (وابستگی واحدها به همسایگان)	متوسط تا قوی (قطع کل سیستم در اثر خرابی لایه)
پیچیدگی پیاده‌سازی	متوسط (پیچیدگی الگوریتم‌های بهینه‌سازی مرکزی)	پایین (الگوریتم‌های ساده و محلی)	بالا (پیچیدگی الگوریتم‌های اجماع و ارتباطات)	بسیار بالا (هماهنگی بین لایه‌ها و پروتکل‌های مختلف)
نیاز به ارتباطات	بالا (پهنای باند زیاد، ارتباطات سراسری)	پایین (فقط ارتباطات محلی یا بدون ارتباط)	متوسط (ارتباطات محدود بین همسایگان)	بالا (ارتباطات در لایه‌های مختلف با الزامات متفاوت)
بار محاسباتی	بالا	پایین	متوسط	بالا
سرعت پاسخ‌دهی	کند (به دلیل تأخیر در جمع‌آوری داده و پردازش مرکزی)	سریع (تصمیم‌گیری محلی و فوری)	متوسط (بسته به سرعت اجماع)	سریع در لایه‌های پایین، کندتر در لایه‌های بالا
انعطاف‌پذیری در برابر رویداد	ضعیف (وابستگی به مرکز، کندی در واکنش)	متوسط (پاسخ فوری محلی، اما ناهماهنگ)	خوب (هماهنگی پویا با محیط)	عالی (ترکیبی از واکنش سریع محلی و هماهنگی منطقه‌ای/سراسری)
هزینه	بالا (زیرساخت مرکز، ارتباطات)	پایین (عدم نیاز به زیرساخت مرکزی)	متوسط (نیاز به زیرساخت ارتباطی)	بالا (هزینه پیاده‌سازی پیچیده و زیرساخت‌های متعدد)
مدیریت داده‌ها	متمرکز، پیچیده	توزیع‌شده، ساده	توزیع‌شده، پیچیدگی در مدیریت جریان داده	بسیار پیچیده، نیاز به مدیریت داده در سطوح مختلف

شکل (۴) ساختار کنترل سلسله‌مراتبی در سیستم خودرو□به□شبکه را نشان می‌دهد. در این ساختار، کنترل در سه سطح اصلی انجام می‌شود تا مدیریت توان، شارژ و دشارژ خودروهای برقی متصل به شبکه به‌صورت هماهنگ، مطمئن و بهینه صورت گیرد. بازخورد از هر خودرو شامل سطح شارژ (SOC)، توان واقعی و وضعیت اتصال به سطح میانی ارسال شده و سپس

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4– Winter 2026

اطلاعات تجمیع‌شده برای اصلاح تصمیمات به سطح بالا ارسال می‌شود. در نتیجه، یک سیستم چندلایه، واکنش‌پذیر و پایدار برای مدیریت هوشمند ناوگان خودروهای برقی ایجاد می‌شود.



شکل (۴): ساختار کنترل سلسله‌مراتبی در سیستم خودرو□به□شبکه، ساختار شامل سه سطح کنترل است و ارتباط دوسویه و تبادل بازخورد بین سطوح، امکان مدیریت هماهنگ و دقیق توان را فراهم می‌کند.

Figure (4): Hierarchical control structure in the vehicle-to-grid system. The structure consists of three control levels, and the two-way communication and feedback exchange between the levels enables coordinated and precise power management.

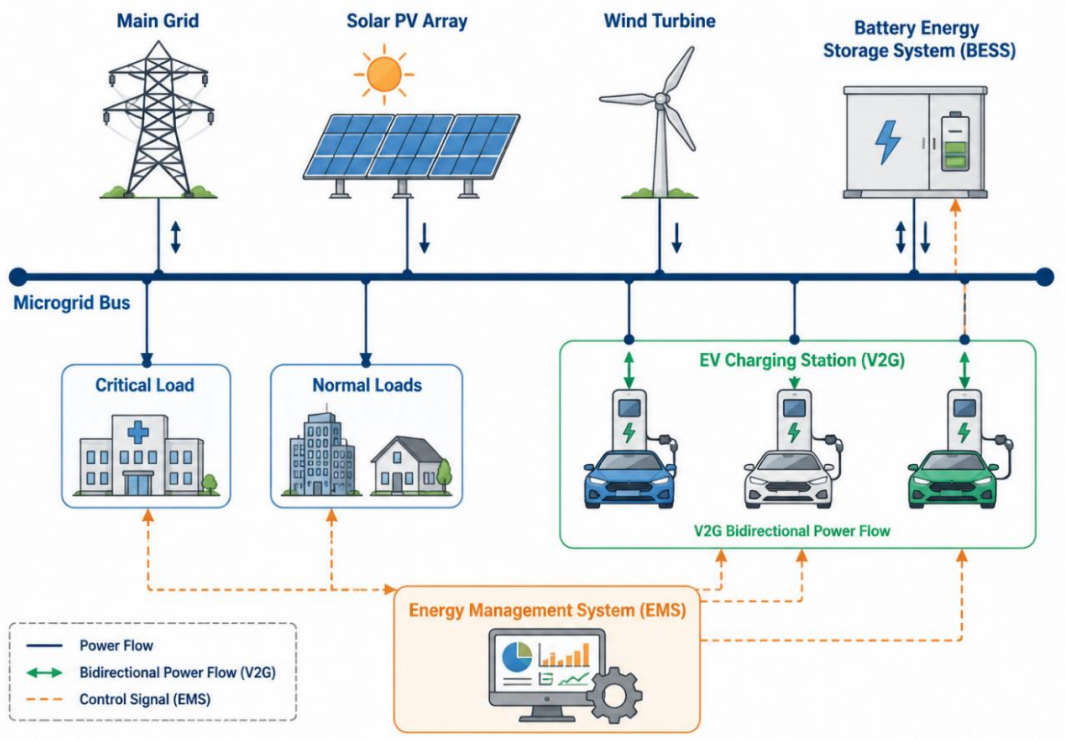
۴- مفاهیم و دسته‌بندی ریزشبکه

در ریزشبکه‌ها، به‌خصوص آن‌هایی که سهم بالایی از منابع تجدیدپذیر دارند، کنترل فرکانس یک چالش اساسی است. به دلیل اینرسی پایین ناشی از حضور اینورترها، هر عدم تعادل کوچک بین تولید و مصرف باعث تغییر سریع فرکانس می‌شود. فناوری V2G این امکان را فراهم می‌کند که خودروهای الکتریکی علاوه بر شارژ شدن، انرژی ذخیره‌شده خود را به شبکه بازگردانند. به دلیل پاسخ سریع اینورترهای خودرو، V2G یک گزینه بسیار مناسب برای کنترل فرکانس اولیه[۳۷] محسوب می‌شود. در ریزشبکه، تجمیع چندین خودرو می‌تواند مانند یک منبع ذخیره انرژی توزیع‌شده[۳۸] عمل کند. سه سطح کنترلی در ریزشبکه وجود دارد که V2G معمولاً در سطح اولیه و ثانویه مشارکت می‌کند [۳۹،۴۰].

شکل (۵) نمایی شماتیک از یک ریزشبکه مجهز به فناوری خودرو به شبکه را نشان می‌دهد که در آن اجزای مختلف تولید، ذخیره‌سازی و مصرف انرژی به‌صورت یکپارچه با یکدیگر در تعامل هستند. در این ساختار، منابع تولید پراکنده از جمله سامانه فتوولتائیک انرژی الکتریکی را از منابع تجدیدپذیر تولید کرده و به ریزشبکه تزریق می‌کنند. از آنجا که توان تولیدی این منابع به شرایط محیطی وابسته بوده و دارای نوسان است، وجود تجهیزات ذخیره‌سازی و سامانه‌های مدیریت انرژی برای حفظ تعادل توان در شبکه ضروری است. در این ریزشبکه، یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی مبتنی بر باتری نیز در نظر گرفته شده است که می‌تواند در زمان مازاد تولید انرژی را ذخیره کرده و در زمان افزایش تقاضا آن را به شبکه بازگرداند. علاوه بر این، خودروهای

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

الکتریکی متصل به ایستگاه شارژ دوطرفه از طریق فناوری V2G قادرند به‌عنوان یک منبع ذخیره‌سازی سیار عمل کنند. در این فناوری، انرژی می‌تواند به‌صورت دوطرفه میان باتری خودروها و ریزشبکه تبادل شود، به‌طوری‌که در زمان تولید مازاد، باتری خودروها شارژ شده و در زمان افزایش بار یا کاهش تولید، بخشی از انرژی ذخیره‌شده را به شبکه بازمی‌گردانند. همچنین در این ساختار، بارهای مصرفی شامل بارهای عادی و بارهای بحرانی در نظر گرفته شده‌اند که تأمین پایدار انرژی برای بارهای بحرانی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در شرایطی مانند قطع ارتباط با شبکه اصلی یا کاهش تولید منابع تجدیدپذیر، منابع ذخیره‌سازی و خودروهای الکتریکی می‌توانند انرژی لازم برای تغذیه این بارها را فراهم کنند. در مرکز این ساختار، کنترل‌گر یا سیستم مدیریت انرژی قرار دارد که وظیفه پایش وضعیت تولید، مصرف و سطح شارژ منابع ذخیره‌سازی را بر عهده دارد. این سیستم با اتخاذ راهبردهای کنترلی مناسب، زمان و میزان شارژ یا دشارژ باتری‌ها و خودروهای الکتریکی را تعیین کرده و تبادل توان با شبکه اصلی را مدیریت می‌کند. در نتیجه، استفاده از فناوری V2G در کنار منابع تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره‌سازی موجب افزایش پایداری ریزشبکه، بهبود مدیریت انرژی، کاهش پیک بار و افزایش قابلیت اطمینان تأمین برق می‌شود.



شکل (۵): شماتیک یک ریزشبکه مجهز به فناوری خودرو به شبکه

Figure (5): Schematic of a microgrid equipped with vehicle-to-grid technology

ریزشبکه‌ها بسته به نوع منبع انرژی، ساختار اتصال، توپولوژی، شیوه کنترل، نوع بار و وجود سیستم‌های ذخیره‌سازی دسته‌بندی می‌شوند که ادامه به طور مختصر اشاره می‌شود:

۴-۱- دسته‌بندی ریزشبکه‌ها بر اساس ساختار اتصال به شبکه

ریزشبکه‌ها را می‌توان بر اساس نحوه‌ی اتصال آن‌ها به شبکه قدرت اصلی به سه دسته‌ی متصل به شبکه[۳۹] [۴۱]، جزیره‌ای[۴۰] [۴۲] و قابل‌سوئیچ یا دوحالته[۴۱] [۴۳] تقسیم‌بندی کرد. این دسته‌بندی به‌ویژه در مطالعات مربوط به پایداری دینامیکی، کنترل فرکانس و نقش سیستم خودرو به شبکه اهمیت بسیار زیادی دارد، زیرا رفتار دینامیکی ریزشبکه و نیاز آن به خدمات کمکی وابسته به وضعیت اتصال آن است [۴۴،۴۵].

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4– Winter 2026

الف- ریزشبکه متصل به شبکه: در این حالت، ریزشبکه به شبکه سراسری قدرت متصل بوده و امکان تبادل توان فعال و راکتیو بین ریزشبکه و شبکه اصلی وجود دارد. شبکه اصلی نقش منبع مرجع فرکانس را ایفا می‌کند و انحرافات فرکانس در ریزشبکه بسیار کوچک هستند. کنترل بار و ژنراتورها ساده‌تر است و منابع تولید پراکنده (DERs) معمولاً در حالت PQ یا کنترل توان کار می‌کنند.

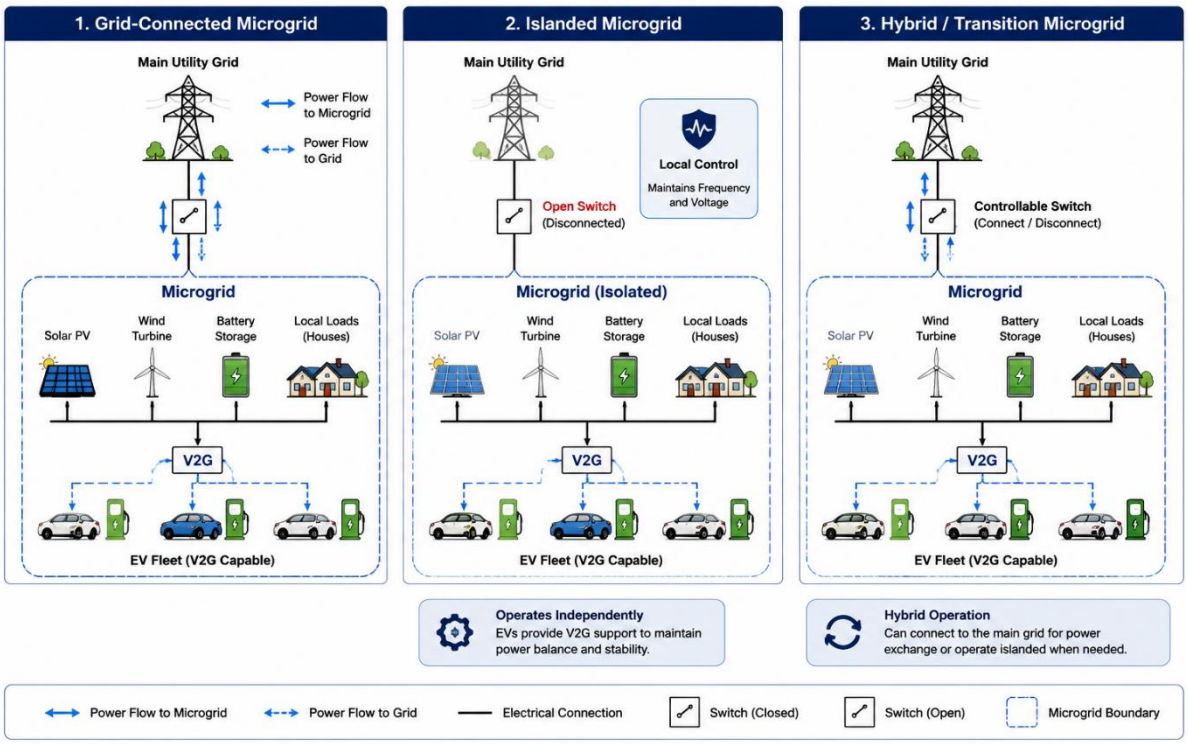
در حالت متصل، سیستم V2G بیشتر نقش توان کمکی و مدیریت پیک مصرف را دارد و به علت وجود شبکه اصلی، وابستگی به ذخیره‌ساز داخلی کمتر است. در رویدادهای کوچک (مثل تغییر بار)، خودروهای V2G می‌توانند انحرافات کوچک فرکانس را سریع جبران کنند.

ب- ریزشبکه جزیره‌ای: در حالت جزیره‌ای، ارتباط ریزشبکه با شبکه اصلی قطع شده و ریزشبکه باید به طور مستقل فرکانس و ولتاژ خود را تنظیم کند. هیچ منبع مرجع فرکانس خارجی وجود ندارد و هرگونه تغییر در بار یا تولید باعث تغییر فوری فرکانس می‌شود. پایداری سیستم به شدت وابسته به کنترل هماهنگ منابع ذخیره‌ساز، ژنراتورهای محلی و سیستم‌های V2G است. نیازمند کنترل اولیه دروپ (افتی)، کنترل ثانویه برای بازیابی فرکانس و گاهی کنترل پیشرفته پیش‌بینانه است.

بیشترین کاربرد V2G برای تنظیم فرکانس در این حالت است و خودروهای برقی به‌عنوان یک ذخیره‌ساز سیار می‌توانند توان فعال تزریق کرده و فرکانس را تثبیت کنند، در هنگام افزایش بار، سریعاً وارد مدار شوند و در کاهش بار، توان را جذب کنند. در رویدادهایی مثل قطع بار، اضافه‌بار و نوسانات منابع تجدیدپذیر، نقش V2G بسیار حیاتی است.

ج- ریزشبکه دوحالته یا قابل‌سوئیچ: این نوع ریزشبکه می‌تواند به صورت متصل به شبکه یا جزیره‌ای عمل کند و قادر است بدون اختلال قابل‌توجه میان دو حالت سوئیچ کند.

پیچیده‌ترین ساختار کنترلی در میان انواع ریزشبکه‌ها دارد و نیازمند هماهنگی دقیق میان مبدل‌ها، ژنراتورها، منابع ذخیره‌ساز و V2G است. همچنین در حالت متصل، نقش فرکانسی محدود و در حالت جزیره‌ای، نقش اصلی در پایداری را دارد.



شکل (۶): دسته‌بندی ریزشبکه‌ها بر اساس ساختار اتصال به شبکه و نقش منابع تولید پراکنده، سیستم‌های ذخیره انرژی و خودروهای الکتریکی مجهز به فناوری خودرو به شبکه در پایداری و تنظیم فرکانس

Figure (6): Classification of microgrids based on grid connection structure and the role of distributed generation sources, energy storage systems, and electric vehicles equipped with vehicle-to-grid technology in stability and frequency regulation.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

مناسب‌ترین نوع برای شبیه‌سازی سناریوهای وقوع رویدادهای گذرا مانند: قطع شبکه اصلی، بازگشت شبکه، تغییرات ناگهانی بار و نوسانات شدید توان تولیدی PV یا باد است. نقش V2G در این نوع ریزشبکه به شکل پویا تغییر می‌کند در حالت متصل باعث مدیریت توان و کاهش تبادل با شبکه می‌شود و در حالت جزیره‌ای، در کنترل فرکانس، افزایش اینرسی مجازی و پایداری گذرا تاثیر دارد. از آنجا که ریزشبکه‌ها هنگام وقوع رویدادهای گذرا مانند تغییرات ناگهانی بار، خروج منابع تجدیدپذیر یا قطع اتصال شبکه با چالش‌های جدی در حفظ فرکانس روبه‌رو می‌شوند، انتخاب نوع ریزشبکه و تحلیل رفتار آن بر اساس ساختار اتصال اهمیت اساسی دارد. در این میان، فناوری V2G با فراهم کردن توان تزریقی سریع و انعطاف‌پذیر، می‌تواند نقش کلیدی در بهبود پایداری فرکانسی، افزایش اینرسی مجازی و کاهش نوسانات دینامیکی ریزشبکه در هر سه حالت اتصال ایفا کند.

شکل (۶) انواع ریزشبکه‌ها بر اساس نحوه اتصال آن‌ها به شبکه اصلی قدرت نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود ساختار اتصال ریزشبکه به شبکه اصلی تأثیر قابل توجهی بر نحوه کنترل و مدیریت توان در سیستم دارد. در این میان، استفاده از ظرفیت ذخیره انرژی خودروهای الکتریکی در قالب فناوری V2G می‌تواند به عنوان یک راهکار مؤثر برای بهبود پایداری فرکانس ریزشبکه، به ویژه در زمان وقوع رویدادها و اغتشاشات سیستم قدرت مورد استفاده قرار گیرد.

۲-۴- دسته‌بندی ریزشبکه‌ها بر اساس توپولوژی توان عبوری

یکی از مهم‌ترین معیارهای تقسیم‌بندی ریزشبکه‌ها، نوع گذردهی توان الکتریکی یا توپولوژی توان عبوری[۴۲] در آن‌ها است. این تقسیم‌بندی تأثیر مستقیم بر رفتار دینامیکی سیستم، روش‌های کنترل، استراتژی‌های تنظیم فرکانس و نحوه‌ی به‌کارگیری فناوری V2G دارد. از این منظر، ریزشبکه‌ها به سه دسته اصلی ریزشبکه جریان متناوب (AC) [۴۶]، ریزشبکه جریان مستقیم (DC) [۴۷] و ریزشبکه AC/DC هیبرید [۴۸] مطابق شکل (۷) طبقه‌بندی می‌شوند.

در ریزشبکه AC، توزیع و تبادل توان در سطح ولتاژهای AC صورت می‌گیرد. این نوع، متداول‌ترین شکل ریزشبکه به‌ویژه در شبکه‌های موجود است. سازگاری بالا با شبکه قدرت سنتی، حضور بارهای اکثراً AC، پیچیدگی کنترل در تنظیم همزمان فرکانس و ولتاژ، و نیاز به اینرسی سیستم جهت پایداری دینامیکی از ویژگی‌های این نوع ریزشبکه است. در ریزشبکه AC، تنظیم فرکانس مهم‌ترین چالش در هنگام وقوع رویدادهایی مانند تغییر ناگهانی بار یا قطع اتصال است. در چنین ساختاری، خودروهای برقی با قابلیت V2G می‌توانند از طریق کنترل توان فعال به‌صورت لحظه‌ای،انحراف فرکانس را کاهش داده و اینرسی معادل سیستم را افزایش دهند. از کاربرد در رویدادها می‌توان به مقابله با افت یا افزایش فوری فرکانس ناشی از خروج منابع تجدیدپذیر و ارائه خدمات کمکی فرکانس اولیه و ثانویه اشاره نمود.

در ریزشبکه DC، تمامی تجهیزات در قالب ولتاژ مستقیم کار می‌کنند. این نوع ریزشبکه به دلیل افزایش بارهای الکترونیکی و منابع تجدیدپذیر DC، رشد چشمگیری یافته است. از ویژگی‌های آن می‌توان راندمان تبدیل انرژی بالاتر نسبت به AC، حذف مشکلات مرتبط با هم‌زمان‌سازی[۱]، مناسب برای بارهای حساس و تجهیزات مخابراتی و سازگاری طبیعی با خودروهای برقی و ذخیره‌سازها را نام برد. اگرچه ریزشبکه DC مفهوم فرکانس ندارد، اما هنگام اتصال به شبکه AC یا ریزشبکه AC، رفتار دینامیکی توان فعال می‌تواند روی تنظیم فرکانس بخش AC اثر بگذارد. سیستم V2G در ریزشبکه‌های DC با راندمان بالاتر و کنترل سریع‌تر توان، می‌تواند در سناریوهای اتصال AC/DC به تثبیت فرکانس کمک کند. در رویداد جذب و تزریق توان سریع در رویدادهای گذرا به دلیل عدم نیاز به کنترل سنکرون کاربرد دارد.

ریزشکه هیبرید AC/DC[۲] یک نوع ریزشبکه ترکیبی از هر دو ساختار AC و DC است و به کمک مبدل‌های قدرت، دو بخش با یکدیگر تبادل توان دارند. این مدل، پیشرفته‌ترین و منعطف‌ترین نوع ریزشبکه است. ویژگی‌های آن عبارتند از: ترکیب مزایای هر دو ریزشبکه AC و DC، بهینه‌سازی انرژی برای بارهای مختلف و انعطاف‌پذیری بالا در اتصال منابع تجدیدپذیر، ذخیره‌سازها و خودروهای برقی. ریزشبکه هیبرید بهترین گزینه برای پیاده‌سازی سیستم V2G محسوب می‌شود زیرا:

[۱] Synchronization

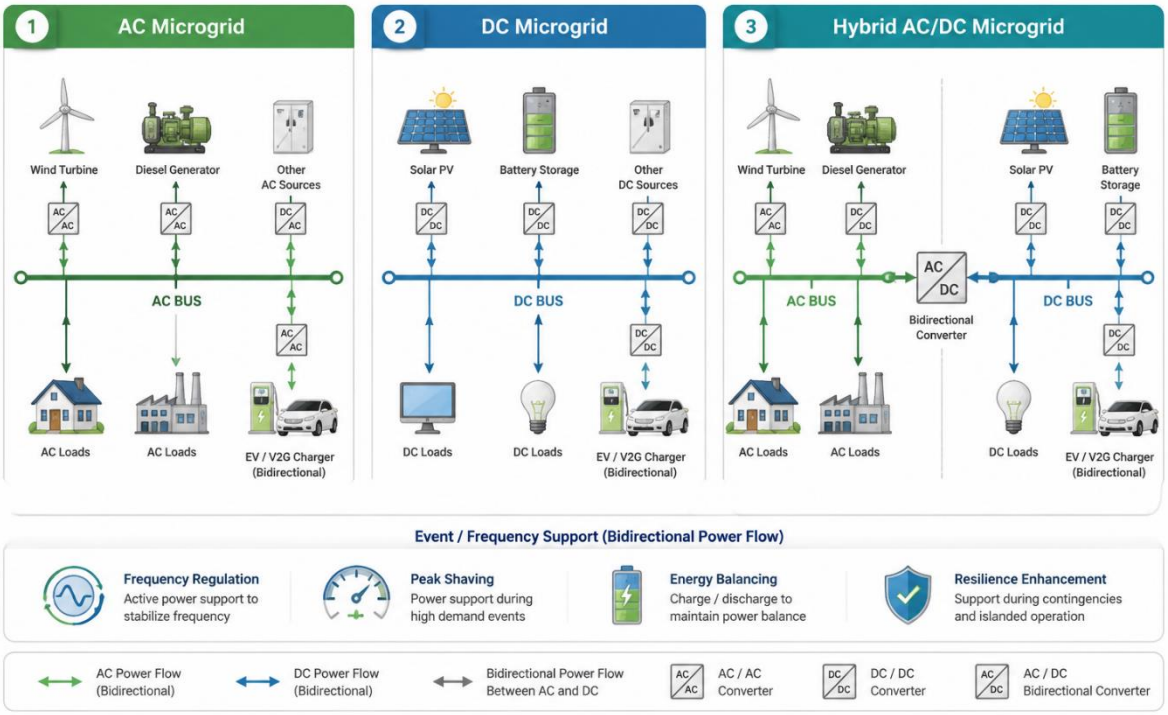
[۲] Hybrid AC/DC Microgrid

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

خودروهای برقی و منابع PV ذاتاً DC هستند، بخش AC نیازمند تنظیم فرکانس است، و بخش DC ظرفیت ذخیره‌سازی و زمان پاسخ‌دهی سریع را فراهم می‌کند. حضور V2G در این ساختار می‌تواند در رویدادهای گذرا مانند: نوسانات تولید PV، خروج ناگهانی بار، جزیره‌ای شدن ریزشبکه سطح پایداری فرکانسی را به طرز چشمگیری افزایش دهد. از کاربرد آن در رویدادها می‌توان به جبران سریع نوسانات توان در هر دو سمت AC و DC، تقویت اینرسی معادل در بخش AC و هماهنگی میان منابع متعدد هنگام تغییرات گذرا را بیان کرد.

به طور کلی، انتخاب توپولوژی مناسب برای ریزشبکه به عواملی مانند نوع منابع انرژی، ساختار بارها، سطح ولتاژ، نیازهای کنترلی و اهداف بهره‌برداری بستگی دارد. در شرایط وقوع رویدادهای دینامیکی، ریزشبکه‌های AC نیازمند تنظیم فرکانس فوری هستند، ریزشبکه‌های DC پاسخ سریع توان ارائه می‌دهند، و ریزشبکه‌های هیبرید AC/DC امکان ترکیب این قابلیت‌ها را فراهم می‌کنند. با توجه به این ویژگی‌ها، سیستم V2G در تمامی این ساختارها به‌عنوان یک منبع ذخیره‌سازی انعطاف‌پذیر قادر است با تزریق یا جذب توان فعال، پایداری ریزشبکه را ارتقا داده و نقش مهمی در حفظ فرکانس در هنگام رویدادها ایفا کند.



شکل (۷): دسته‌بندی ریزشبکه‌ها بر اساس توپولوژی توان عبوری و نحوه اتصال خودروهای الکتریکی مجهز به فناوری خودرو متصل به شبکه

Figure (7): Classification of microgrids based on power throughput topology and how electric vehicles equipped with connected vehicle technology are connected to the grid

۳-۴- دسته‌بندی ریزشبکه‌ها بر اساس نوع منبع انرژی

یکی از معیارهای اصلی در طبقه‌بندی ریزشبکه‌ها، نوع منابع تولید انرژی الکتریکی مورد استفاده در آن‌ها است. نوع منبع انرژی نقش تعیین‌کننده‌ای در رفتار دینامیکی، قابلیت اطمینان، میزان آلایندگی، نیازمندی‌های کنترلی و همچنین ضرورت استفاده از فناوری‌های ذخیره‌سازی و پشتیبان نظیر سیستم V2G دارد. بر این اساس، ریزشبکه‌ها را می‌توان به سه دسته‌ی اصلی مبتنی بر منابع تجدیدپذیر، مبتنی بر منابع غیرتجدیدپذیر، و هیبرید تقسیم کرد.

در ریزشبکه مبتنی بر منابع تجدیدپذیر، بخش عمده یا تمام توان الکتریکی از منابع پاک و تجدیدپذیر مانند سلول‌های فتوولتائیک خورشیدی، توربین‌های بادی، سامانه‌های برق‌آبی کوچک، پیل سوختی و انرژی زیست‌توده تأمین می‌شود. کاهش

[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

چشمگیر انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ها، وابستگی پایین به سوخت‌های فسیلی، نوسان‌پذیری بالا در تولید توان، به‌ویژه در باد و خورشید، و نیاز شدید به سامانه‌های ذخیره‌سازی و کنترل پیشرفته از ویژگی‌های آن به شمار می‌رود [۴۹]. به دلیل ماهیت متغیر تولید انرژی در این ریزشبکه‌ها، فرکانس سیستم در برابر رویدادهای ناگهانی مانند تغییر شدت تابش خورشید، کاهش سرعت باد یا افزایش بار بسیار حساس است. در چنین شرایطی، V2G می‌تواند به‌عنوان یک منبع ذخیره‌ساز سریع و انعطاف‌پذیر عمل کرده و با تزریق یا جذب توان، نوسانات فرکانسی را کاهش دهد. نقش V2G جبران کمبود توان در زمان افت تولید تجدیدپذیر، جذب توان مازاد در زمان تولید بیش از نیاز و افزایش پایداری و قابلیت اطمینان ریزشبکه است.

در ساختار ریزشبکه مبتنی بر منابع غیرتجدیدپذیر، تولید برق عمدتاً توسط منابعی مانند دیزل‌ژنراتور، موتورهای گازسوز، میکروتوربین‌ها و سایر واحدهای مبتنی بر سوخت فسیلی انجام می‌شود. ویژگی‌های آن توان خروجی نسبتاً پایدار و قابل کنترل، قابلیت پاسخ‌دهی خوب به تغییرات بار،آلایندگی بالاتر نسبت به منابع تجدیدپذیر، و هزینه سوخت و نگهداری بیشتر در بلندمدت است [۵۰،۵۱]. اگرچه این نوع ریزشبکه از نظر تولید، پایداری بیشتری دارد، اما همچنان در برابر تغییرات ناگهانی بار یا خروج واحدهای تولیدی ممکن است دچار نوسان فرکانس شود. در این حالت، استفاده از V2G می‌تواند به‌عنوان یک منبع کمکی پشتیبان برای کاهش فشار بر ژنراتورهای اصلی و بهبود تنظیم فرکانس مؤثر باشد. کاهش مصرف لحظه‌ای سوخت در ژنراتورهای متداول، مشارکت در تنظیم فرکانس اولیه و افزایش انعطاف‌پذیری سیستم در شرایط اضطراری نقش V2G در این حالت است.

در ریزشبکه‌های هیبرید، ترکیبی از منابع تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر به همراه سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ساختار امروزه رایج‌ترین و عملی‌ترین نوع ریزشبکه محسوب می‌شود. توازن بین پایداری، هزینه و پاک بودن انرژی، قابلیت بهره‌گیری از مزایای هر دو نوع منبع، کاهش وابستگی به یک منبع واحد، و انعطاف‌پذیری بالا در بهره‌برداری و کنترل از ویژگی‌های ریزشبکه ترکیبی است. در این نوع ریزشبکه، رویدادهایی مانند تغییرات ناگهانی در تولید منابع خورشیدی یا بادی، افزایش بار، و یا قطع موقت ژنراتور می‌تواند باعث نوسان فرکانس شود [۵۲،۵۳]. V2G در چنین ساختاری می‌تواند به‌عنوان بخشی از کنترل هوشمند و انعطاف‌پذیر انرژی عمل کرده و نقش مهمی در متعادل‌سازی توان و حفظ فرکانس ایفا کند. نقش V2G در این ریزشبکه پشتیبانی دینامیکی در لحظات بحرانی، همکاری با ذخیره‌سازهای ثابت مانند باتری‌ها، و بهبود شاخص‌های پایداری و کیفیت توان است [۵۴،۵۵].

۴-۴- دسته‌بندی ریزشبکه‌ها بر اساس نوع کنترل و مدیریت

با افزایش نفوذ منابع تولید پراکنده، ذخیره‌سازهای انرژی و خودروهای الکتریکی، ساختار کنترل و مدیریت ریزشبکه‌ها اهمیت زیادی پیدا کرده است. هدف اصلی سیستم کنترل در ریزشبکه حفظ پایداری ولتاژ، فرکانس، تعادل توان و عملکرد اقتصادی در شرایط بهره‌برداری عادی و همچنین در زمان وقوع اغتشاشات است. بر اساس نحوه تصمیم‌گیری و مدیریت منابع، ریزشبکه‌ها از دیدگاه معماری کنترل به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند [۵۶]: کنترل متمرکز[۴۳] [۵۷]، کنترل غیرمتمرکز[۴۴] [۵۸] و کنترل توزیع‌شده[۴۵] [۵۹].

الف- ریزشبکه با کنترل متمرکز: در ساختار کنترل متمرکز، یک کنترل‌کننده مرکزی یا سیستم مدیریت انرژی (EMS) مسئول جمع‌آوری اطلاعات تمام اجزای ریزشبکه مانند منابع تولید پراکنده، بارها، سیستم‌های ذخیره انرژی و خودروهای الکتریکی است. این کنترل‌کننده با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده، تصمیمات کنترلی لازم را محاسبه کرده و به واحدهای مختلف ارسال می‌کند. در این روش، تمام تصمیم‌گیری‌ها در یک نقطه انجام می‌شود و بنابراین امکان بهینه‌سازی سراسری عملکرد ریزشبکه وجود دارد. به همین دلیل این ساختار برای مدیریت اقتصادی و برنامه‌ریزی بهره‌برداری بسیار مناسب است. با این حال، این نوع کنترل دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشد. وابستگی شدید به سیستم ارتباطی و کنترل‌کننده مرکزی می‌تواند باعث کاهش قابلیت اطمینان سیستم شود. همچنین با افزایش تعداد منابع و تجهیزات، پیچیدگی محاسباتی و حجم تبادل داده افزایش می‌یابد [۶۰،۶۱]. در مطالعات مربوط به خودرو به شبکه، معماری متمرکز می‌تواند برای برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

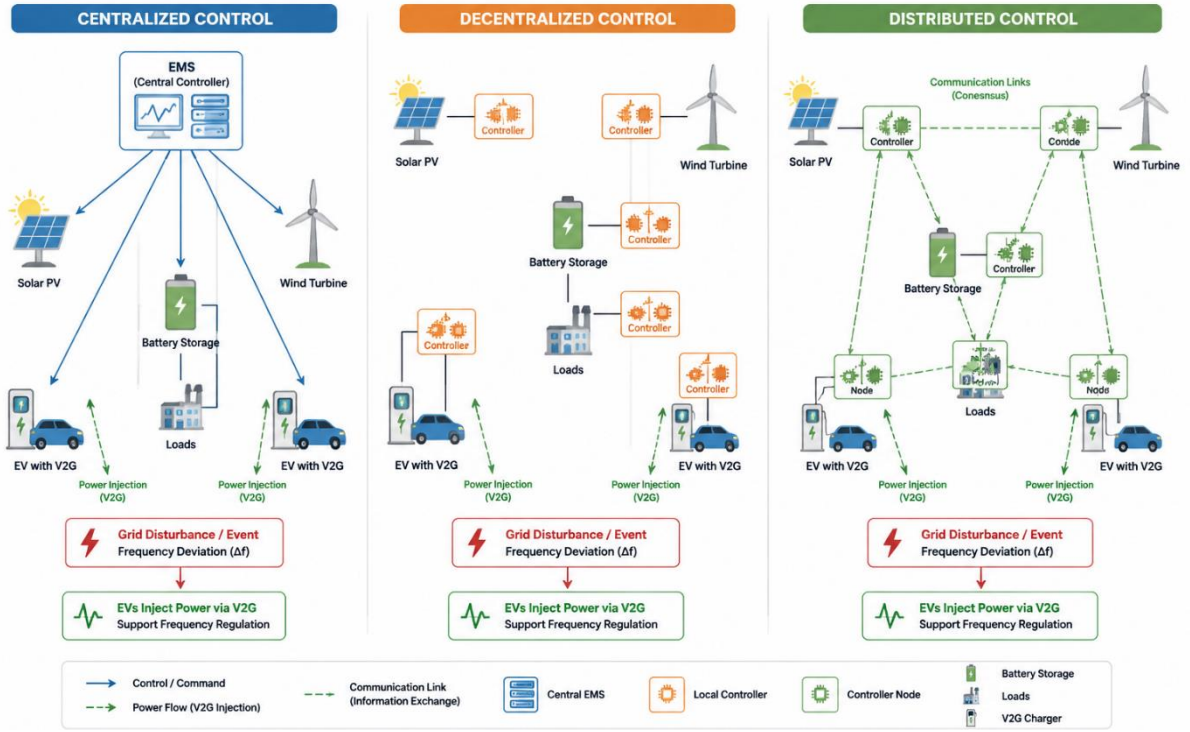
ناوگان خودروهای الکتریکی و مشارکت آن‌ها در تنظیم فرکانس استفاده شود، زیرا کنترل‌کننده مرکزی قادر است وضعیت تمام خودروها را به طور همزمان مدیریت کند.

ب- ریزشبکه با کنترل غیرمتمرکز: در ساختار غیرمتمرکز، هر واحد تولیدی یا ذخیره‌ساز دارای کنترل‌کننده محلی مستقل است که بر اساس اطلاعات محلی تصمیم‌گیری می‌کند. در این روش معمولاً ارتباط مستقیمی بین واحدها وجود ندارد و کنترل بر اساس اندازه‌گیری‌های محلی مانند ولتاژ و فرکانس انجام می‌شود. یکی از رایج‌ترین روش‌ها در این ساختار کنترل دروپ است. در این روش، منابع تولید پراکنده توان اکتیو و راکتیو خود را بر اساس تغییرات فرکانس و ولتاژ تنظیم می‌کنند. این ویژگی باعث می‌شود ریزشبکه بدون نیاز به ارتباطات پیچیده بتواند به صورت خودکار به تغییرات بار یا اغتشاشات پاسخ دهد. مزیت اصلی این روش سادگی، قابلیت اطمینان بالا و عدم وابستگی به سیستم ارتباطی گسترده است [۶۲،۶۳]. با این حال، به دلیل عدم وجود هماهنگی سراسری بین واحدها، ممکن است دقت تقسیم توان و عملکرد اقتصادی سیستم کاهش یابد. در کاربردهای مربوط به V2G، خودروهای الکتریکی می‌توانند با استفاده از کنترل دروپ به صورت محلی در پشتیبانی فرکانسی ریزشبکه مشارکت کنند و هنگام افت فرکانس توان به شبکه تزریق نمایند.

ج- ریزشبکه با کنترل توزیع‌شده: کنترل توزیع‌شده ترکیبی از مزایای دو روش قبلی است. در این ساختار هر واحد دارای کنترل‌کننده محلی است، اما این کنترل‌کننده‌ها از طریق یک شبکه ارتباطی محدود با یکدیگر تبادل اطلاعات دارند و به صورت مشارکتی تصمیم‌گیری می‌کنند. در این روش معمولاً از الگوریتم‌های اجماع[۳] برای هماهنگ‌سازی بین واحدها استفاده می‌شود. این الگوریتم‌ها امکان می‌دهند که بدون نیاز به یک کنترل‌کننده مرکزی، اطلاعات در میان واحدها توزیع شده و تصمیم مشترکی برای کنترل سیستم اتخاذ شود. مزیت اصلی این ساختار مقیاس‌پذیری بالا، قابلیت اطمینان بیشتر نسبت به کنترل متمرکز و عملکرد هماهنگ‌تر نسبت به کنترل غیرمتمرکز است. همچنین در صورت بروز خطا در یکی از واحدها، سایر واحدها می‌توانند به عملکرد خود ادامه دهند [۶۴،۶۵]. در ریزشبکه‌هایی که شامل تعداد زیادی خودرو الکتریکی مجهز به فناوری V2G هستند، کنترل توزیع‌شده می‌تواند نقش مهمی در هماهنگی بین خودروها برای ارائه خدمات تنظیم فرکانس ایفا کند. در این حالت خودروها با تبادل اطلاعات با یکدیگر و با شبکه، توان تزریقی یا دریافتی خود را به گونه‌ای تنظیم می‌کنند که پایداری فرکانس حفظ شود.

[۳] Distributed Control Consensus Algorithms

[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]



شکل (۸): ساختارهای مختلف کنترل و مدیریت در ریزشبکه و نقش خودروهای الکتریکی مبتنی بر فناوری خودرو به شبکه در پشتیبانی فرکانس ریزشبکه هنگام وقوع رویدادها

Figure (8): Different control and management structures in the microgrid and the role of electric vehicles based on vehicle-to-grid technology in supporting the microgrid frequency during events

به طور کلی انتخاب ساختار کنترل مناسب برای ریزشبکه به عواملی مانند اندازه سیستم، تعداد منابع، زیرساخت ارتباطی و اهداف بهره‌برداری بستگی دارد. در مطالعات مربوط به تنظیم فرکانس با استفاده از فناوری V2G، معماری‌های کنترل توزیع‌شده و غیرمتمرکز به دلیل قابلیت اطمینان بالاتر و امکان مشارکت تعداد زیادی خودرو الکتریکی، توجه بیشتری را به خود جلب کرده‌اند. در شکل (۸)، سه معماری اصلی کنترل در ریزشبکه‌ها نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، خودروهای الکتریکی مجهز به فناوری V2G می‌توانند به عنوان منابع ذخیره انرژی متحرک در ریزشبکه عمل کنند و در شرایط وقوع رویدادهایی مانند تغییر ناگهانی بار، خروج واحد تولید یا اختلال در شبکه، با تزریق یا جذب توان اکتیو به تنظیم فرکانس و بهبود پایداری ریزشبکه کمک نمایند. بنابراین نوع معماری کنترل ریزشبکه نقش مهمی در میزان اثربخشی مشارکت خودروهای الکتریکی در ارائه خدمات کمکی شبکه، به ویژه در فرآیند کنترل و تنظیم فرکانس دارد.

۵- مفهوم پایداری در ریزشبکه

پایداری در ریزشبکه مفهومی چندبعدی و پویا است و تنها به معنای تداوم تأمین انرژی نیست، بلکه شامل توانایی سیستم در حفظ عملکرد مطلوب از نظر فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی در شرایط عادی و بحرانی می‌شود. به بیان دیگر، یک ریزشبکه پایدار باید بتواند در برابر تغییرات ناگهانی بار، نوسانات تولید تجدیدپذیر و خطاهای احتمالی، عملکرد خود را در محدوده قابل قبول حفظ کند [۶۶،۶۷].

شکل (۹) نقش فناوری خودرو به شبکه در افزایش پایداری ریزشبکه را به‌صورت شماتیک نشان می‌دهد. در این ساختار، ریزشبکه شامل منابع تولید پراکنده مانند پنل‌های خورشیدی، توربین بادی، و واحدهای تولید محلی است که از طریق یک شبکه توزیع محلی به مصرف‌کنندگان متصل شده‌اند. در کنار این منابع، خودروهای الکتریکی که به ایستگاه‌های شارژ دوطرفه متصل هستند، به‌عنوان یک منبع ذخیره‌سازی انرژی سیار عمل می‌کنند. در فناوری V2G، انرژی می‌تواند به‌صورت دوطرفه بین باتری خودروهای الکتریکی و شبکه مبادله شود. در زمان‌هایی که تولید انرژی تجدیدپذیر بیشتر از مصرف است یا بار

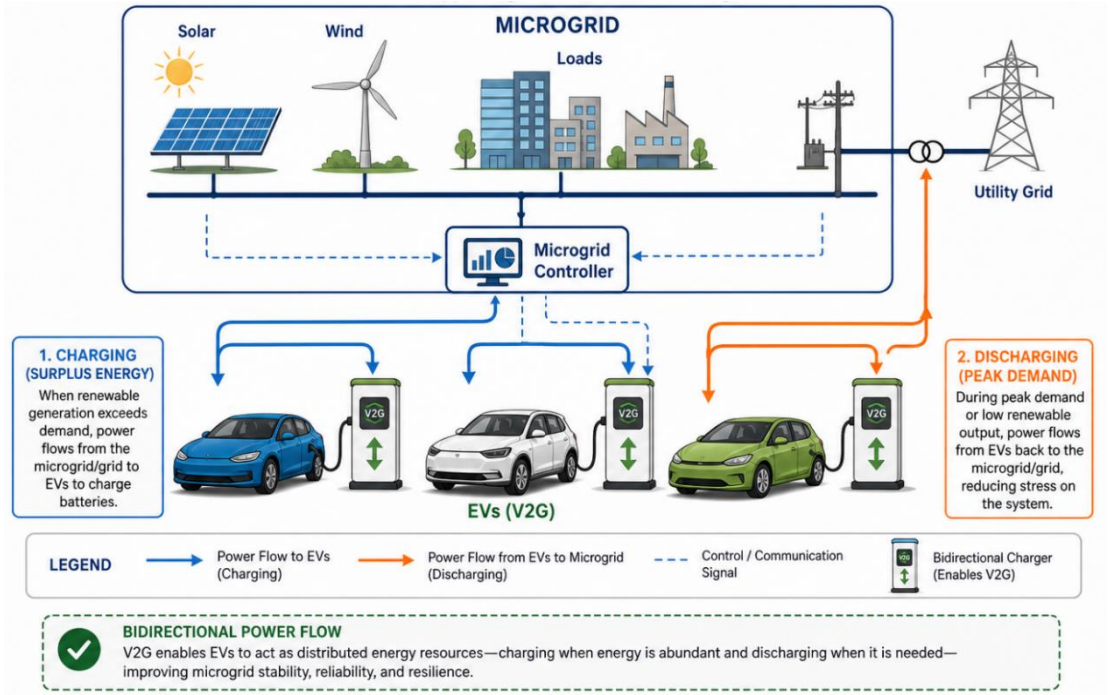
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

شبکه پایین است، خودروها از شبکه شارژ می‌شوند و انرژی اضافی در باتری آن‌ها ذخیره می‌شود. در مقابل، در شرایط اوج بار، کمبود تولید، یا نوسانات توان در ریزشبکه، انرژی ذخیره‌شده در باتری خودروها می‌تواند دوباره به شبکه بازگردانده شود. این قابلیت باعث می‌شود خودروهای الکتریکی به‌عنوان منابع ذخیره‌سازی توزیع‌شده و انعطاف‌پذیر عمل کرده و در متعادل‌سازی عرضه و تقاضا، کاهش نوسانات ناشی از منابع تجدیدپذیر، بهبود قابلیت اطمینان، و افزایش پایداری ولتاژ و فرکانس ریزشبکه نقش مهمی ایفا کنند. در نتیجه، یکپارچه‌سازی فناوری V2G با ریزشبکه‌ها می‌تواند به افزایش تاب‌آوری، بهره‌وری انرژی و مدیریت هوشمند بار در سیستم‌های قدرت مدرن کمک کند. ابعاد اصلی پایداری در ریزشبکه عبارت‌اند از:

۱-۵- پایداری فرکانس

پایداری فرکانس به توانایی سیستم قدرت در حفظ فرکانس در محدوده مجاز پس از وقوع اغتشاش و رسیدن به یک نقطه کار ماندگار جدید اطلاق می‌شود. این نوع پایداری به‌طور مستقیم با تعادل توان اکتیو در سیستم مرتبط است؛ به‌گونه‌ای که هرگونه عدم توازن میان توان تولیدی و توان مصرفی منجر به تغییر در فرکانس خواهد شد. در صورتی که توان تولیدی کمتر از توان مصرفی باشد، فرکانس کاهش می‌یابد و در حالتی که تولید از مصرف بیشتر شود، فرکانس افزایش پیدا می‌کند [۶۸،۶۹].

در ریزشبکه‌ها، پایداری فرکانس از اهمیت دوچندان برخوردار است؛ زیرا برخلاف شبکه‌های قدرت سنتی، بخش عمده‌ای از تولید در این ساختارها توسط منابع مبتنی بر اینورتر تأمین می‌شود. این منابع معمولاً فاقد اینرسی ذاتی قابل‌مقایسه با ژنراتورهای سنکرون هستند و در نتیجه، توانایی ذاتی سیستم برای مقابله با تغییرات ناگهانی توان کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، در یک ریزشبکه هرگونه رویداد نظیر افزایش ناگهانی بار، کاهش توان تولیدی واحدهای تجدیدپذیر، خروج منبع تولید یا گذار از حالت متصل به شبکه به حالت جزیره‌ای، می‌تواند سبب افت یا افزایش سریع فرکانس شود [۷۰،۷۱].



شکل (۹): شماتیک نقش فناوری خودرو به شبکه در افزایش پایداری ریزشبکه

Figure (9): Schematic of the role of vehicle-to-grid technology in increasing microgrid stability

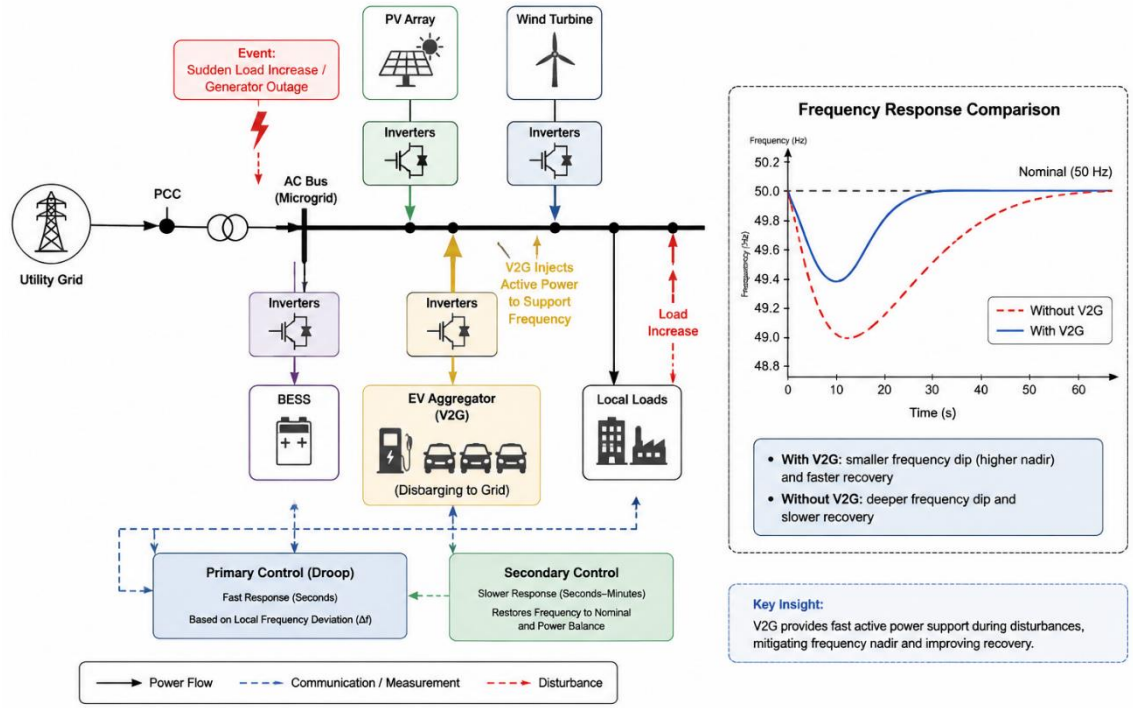
در حالت متصل به شبکه، ریزشبکه از مرجع قوی شبکه اصلی برای تثبیت فرکانس بهره‌مند است و انحرافات فرکانسی معمولاً محدود باقی می‌مانند. اما در حالت جزیره‌ای، مسئولیت کامل تأمین تعادل توان بر عهده منابع داخلی ریزشبکه قرار می‌گیرد و به همین دلیل، پایداری فرکانس به یکی از اساسی‌ترین چالش‌های بهره‌برداری تبدیل می‌شود. در این شرایط، سرعت عملکرد سیستم‌های کنترلی، ذخیره‌سازها و منابع کمکی، نقش تعیین‌کننده‌ای در جلوگیری از افت شدید فرکانس ایفا می‌کند.

[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

در این چارچوب، سامانه خودرو به شبکه می‌تواند به‌عنوان یک منبع ذخیره‌سازی توزیع‌شده و سریع‌العمل در تنظیم فرکانس مورد استفاده قرار گیرد. خودروهای برقی متصل به شبکه قادر هستند در هنگام افت فرکانس، با تزریق توان اکتیو به ریزشبکه، بخشی از کمبود توان را جبران کنند و در شرایط افزایش فرکانس، از طریق جذب توان، به متعادل‌سازی سیستم کمک نمایند. این قابلیت موجب می‌شود سامانه V2G همانند یک ابزار کمکی مؤثر در کنترل اولیه و ثانویه فرکانس عمل کند.

از منظر تحلیلی، ارزیابی پایداری فرکانس در ریزشبکه معمولاً با استفاده از شاخص‌هایی مانند حداکثر انحراف فرکانس، نرخ تغییر فرکانس زمان نشست فرکانس و میزان خطای ماندگار فرکانس انجام می‌شود. هرچه این شاخص‌ها وضعیت مطلوب‌تری داشته باشند، می‌توان نتیجه گرفت که ریزشبکه از منظر فرکانسی عملکرد پایدارتری دارد.

همان‌گونه که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، پایداری فرکانس در ریزشبکه به تعادل لحظه‌ای بین توان تولیدی و توان مصرفی وابسته است. با وقوع یک رویداد نظیر افزایش ناگهانی بار، خروج یکی از منابع تولید یا کاهش توان تولیدی منابع تجدیدپذیر، میان توان اکتیو تولیدی و مصرفی عدم تعادل ایجاد شده و در نتیجه فرکانس سیستم از مقدار نامی خود منحرف می‌شود. در ریزشبکه‌ها، به دلیل پایین بودن اینرسی معادل و غلبه منابع مبتنی بر اینورتر، این انحراف می‌تواند با سرعت بیشتری نسبت به شبکه‌های سنتی رخ دهد. در این شرایط، لایه‌های کنترلی ریزشبکه شامل کنترل اولیه، کنترل ثانویه و همچنین منابع کمکی نظیر سیستم ذخیره‌ساز انرژی و سامانه خودرو به شبکه وارد عمل می‌شوند. نقش سامانه V2G در این ساختار آن است که با تزریق سریع توان اکتیو در هنگام افت فرکانس، یا جذب توان در هنگام افزایش فرکانس، در بازگرداندن فرکانس به محدوده مجاز مشارکت کند. بنابراین، این شکل بیانگر آن است که بهره‌گیری از منابع سریع‌العمل مانند خودروهای برقی می‌تواند دامنه انحراف فرکانس را کاهش داده، زمان بازیابی را کوتاه‌تر کرده و پایداری فرکانسی ریزشبکه را در هنگام وقوع رویدادها بهبود بخشد.



شکل (۱۰): ساختار مفهومی پایداری فرکانس در ریزشبکه شامل وقوع اغتشاش، ایجاد عدم تعادل توان اکتیو، انحراف فرکانس و نقش سامانه خودرو به شبکه، ذخیره‌ساز و کنترل‌کننده‌های اولیه و ثانویه در بازیابی فرکانس.

Figure (10): Conceptual structure of frequency stability in a microgrid, including the occurrence of disturbances, the creation of active power imbalance, frequency deviation, and the role of the vehicle-to-grid system, storage, and primary and secondary controllers in frequency recovery.

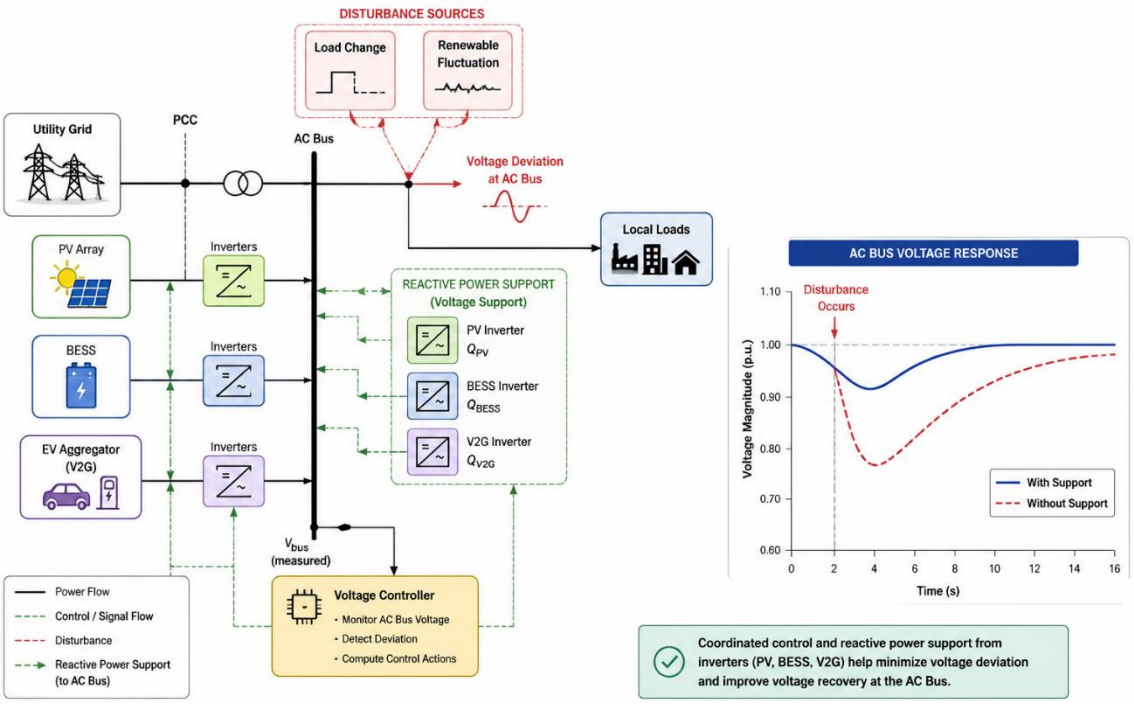
۲-۵- پایداری ولتاژ

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

پایداری ولتاژ به توانایی سیستم قدرت در حفظ سطوح قابل قبول ولتاژ در تمامی باس‌ها، در شرایط عادی بهره‌برداری و پس از وقوع اغتشاش، گفته می‌شود. این نوع پایداری عمدتاً تحت تأثیر تعادل توان راکتیو، مشخصات شبکه، نوع بارها و عملکرد سیستم‌های کنترلی قرار دارد. در صورتی که سیستم نتواند نیاز توان راکتیو بارها را به‌درستی تأمین کند یا در برابر تغییرات ناگهانی شرایط بهره‌برداری واکنش مناسب نشان ندهد، کاهش یا افزایش غیرمجاز ولتاژ در بخش‌هایی از شبکه رخ خواهد داد.
در ریزشبکه‌ها، پایداری ولتاژ به دلایل مختلفی از حساسیت بالایی برخوردار است. نخست آنکه ساختار این شبکه‌ها معمولاً در سطح توزیع بوده و نسبت مقاومت به راکتانس خطوط در آن‌ها نسبت به شبکه‌های انتقال بیشتر است. این ویژگی موجب می‌شود ولتاژ باس‌ها در برابر تغییرات بار و تولید حساس‌تر باشد. دوم آنکه در بسیاری از ریزشبکه‌ها، منابع تولیدی از طریق اینورتر به سیستم متصل می‌شوند و کنترل ولتاژ تا حد زیادی به عملکرد مناسب این تجهیزات وابسته است. سوم آنکه نوسانی بودن تولید منابع تجدیدپذیر نظیر سامانه‌های خورشیدی و بادی نیز می‌تواند تغییرات پیوسته‌ای در پروفیل ولتاژ ایجاد کند [۷۲،۷۳].

وقوع رویدادهایی مانند افزایش بار، خروج یک منبع تولید، تغییر ناگهانی در توان منابع تجدیدپذیر و یا تغییر وضعیت بهره‌برداری ریزشبکه، ممکن است باعث افت ولتاژ در باس‌های مختلف شود. در صورتی که این افت از حدود مجاز فراتر رود و سیستم کنترلی نتواند آن را جبران کند، پایداری ولتاژ شبکه با تهدید مواجه خواهد شد. از سوی دیگر، در برخی شرایط نیز تزریق بیش از حد توان، به‌ویژه در شبکه‌های با بار سبک، می‌تواند منجر به اضافه‌ولتاژ شود. بنابراین، پایداری ولتاژ نه‌تنها به جلوگیری از افت ولتاژ، بلکه به حفظ مقدار آن در محدوده استاندارد نیز مربوط می‌شود.
پایداری فرکانس و پایداری ولتاژ دو شاخص اساسی در ارزیابی عملکرد دینامیکی ریزشبکه هستند. پایداری فرکانس به حفظ تعادل توان اکتیو و جلوگیری از انحرافات شدید فرکانسی مربوط می‌شود، در حالی که پایداری ولتاژ به توانایی سیستم در حفظ سطوح مناسب ولتاژ در باس‌های مختلف وابسته است. در ریزشبکه‌ها، کاهش اینرسی، نفوذ بالای منابع تجدیدپذیر و استفاده گسترده از مبدل‌های الکترونیک قدرت، اهمیت این دو نوع پایداری را افزایش داده است.
مطابق شکل (۱۱)، پایداری ولتاژ در ریزشبکه به توانایی سیستم در حفظ دامنه ولتاژ باس‌ها در حدود مجاز، پیش و پس از وقوع اغتشاش، مربوط می‌شود. در صورت بروز تغییرات ناگهانی در بار، خروج یک منبع تولید، یا نوسان در توان تولیدی منابع تجدیدپذیر، تعادل توان راکتیو و جریان‌های عبوری از خطوط تغییر کرده و این امر می‌تواند به افت یا افزایش غیرمجاز ولتاژ در باس‌های مختلف منجر شود. این مسئله در ریزشبکه‌ها به علت نسبت بالاتر مقاومت به راکتانس خطوط، ساختار توزیعی شبکه و وابستگی بالا به مبدل‌های الکترونیک قدرت، از حساسیت بیشتری برخوردار است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026



شکل (۱۱): ساختار مفهومی پایداری ولتاژ در ریزشبکه شامل تغییرات بار و تولید، نوسانات توان راکتیو، انحراف ولتاژ باس‌ها و نقش اینورترها، ذخیره‌ساز انرژی و تجهیزات کنترلی در حفظ ولتاژ در محدوده مجاز.

Figure (11): Conceptual structure of voltage stability in a microgrid, including load and generation changes, reactive power fluctuations, bus voltage deviations, and the role of inverters, energy storage, and control equipment in maintaining voltage within the allowed range.

در چنین شرایطی، اینورترهای هوشمند، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی و سایر تجهیزات کنترلی با تنظیم توان راکتیو و در برخی موارد با اصلاح شرایط تبادل توان، به بازیابی سطح ولتاژ کمک می‌کنند. از سوی دیگر، هرچند تمرکز اصلی سامانه خودرو به شبکه در این مطالعه بر پشتیبانی فرکانس است، اما عملکرد آن می‌تواند به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر وضعیت ولتاژ نیز اثرگذار باشد. از این‌رو، شکل مذکور نشان می‌دهد که پایداری ولتاژ در ریزشبکه نتیجه تعامل بین ساختار شبکه، رفتار بار، منابع تولید پراکنده و عملکرد سامانه‌های کنترلی است و ارزیابی آن در کنار پایداری فرکانس برای تحلیل جامع عملکرد ریزشبکه ضروری خواهد بود.

۳-۵- پایداری گذرا

پایداری گذرا به توانایی ریزشبکه در حفظ عملکرد پایدار و بازگشت به وضعیت تعادل پس از وقوع اختلالات شدید و ناگهانی در سیستم قدرت گفته می‌شود. این اختلالات می‌توانند شامل اتصال کوتاه، قطع ناگهانی یک منبع تولید، تغییرات سریع بار، یا جداسازی ریزشبکه از شبکه سراسری باشند [۷۴،۷۵]. در چنین شرایطی، سیستم باید بتواند بدون از دست دادن هماهنگی بین منابع تولیدی و بدون ایجاد نوسانات شدید در ولتاژ و فرکانس، به یک نقطه کار پایدار جدید برسد. در ریزشبکه‌ها موضوع پایداری گذرا اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا این شبکه‌ها معمولاً ظرفیت تولید کمتر و اینرسی پایین‌تری نسبت به شبکه‌های قدرت بزرگ دارند [۷۶،۷۷]. در شبکه‌های سنتی، ژنراتورهای سنکرون با جرم چرخان بالا موجب ایجاد اینرسی قابل توجهی در سیستم می‌شوند که به کاهش سرعت تغییرات فرکانس پس از اختلال کمک می‌کند. اما در بسیاری از ریزشبکه‌ها، منابع تولیدی مبتنی بر مبدل‌های الکترونیک قدرت مانند سامانه‌های فتوولتائیک و توربین‌های بادی استفاده می‌شوند که اینرسی ذاتی ندارند. در نتیجه، پس از وقوع اختلال، تغییرات فرکانس و ولتاژ می‌تواند بسیار سریع‌تر و شدیدتر رخ دهد [۷۸،۷۹]. در تحلیل پایداری گذرا معمولاً رفتار دینامیکی سیستم در چند ثانیه اول پس از وقوع خطا بررسی می‌شود. اگر زاویه توان ژنراتورها یا منابع تولیدی از محدوده مجاز خارج شود، ممکن است سیستم همزمانی خود را از دست بدهد و ناپایداری رخ دهد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

در ریزشبکه‌های مبتنی بر اینورتر، کنترل‌کننده‌های پیشرفته نقش جایگزین اینرسی طبیعی را ایفا می‌کنند [۸۰،۸۱]. برخی از روش‌های مهم برای بهبود پایداری گذرا در ریزشبکه عبارت‌اند از:

- استفاده از سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی مانند باتری‌ها برای جبران سریع عدم تعادل توان
- پیاده‌سازی کنترل اینرسی مجازی در اینورترها
- استفاده از استراتژی‌های کنترل دروپ برای هماهنگی منابع تولید
- طراحی سیستم‌های حفاظتی سریع برای تشخیص و حذف خطا
- مدیریت بار و اولویت‌بندی مصرف در شرایط اضطراری

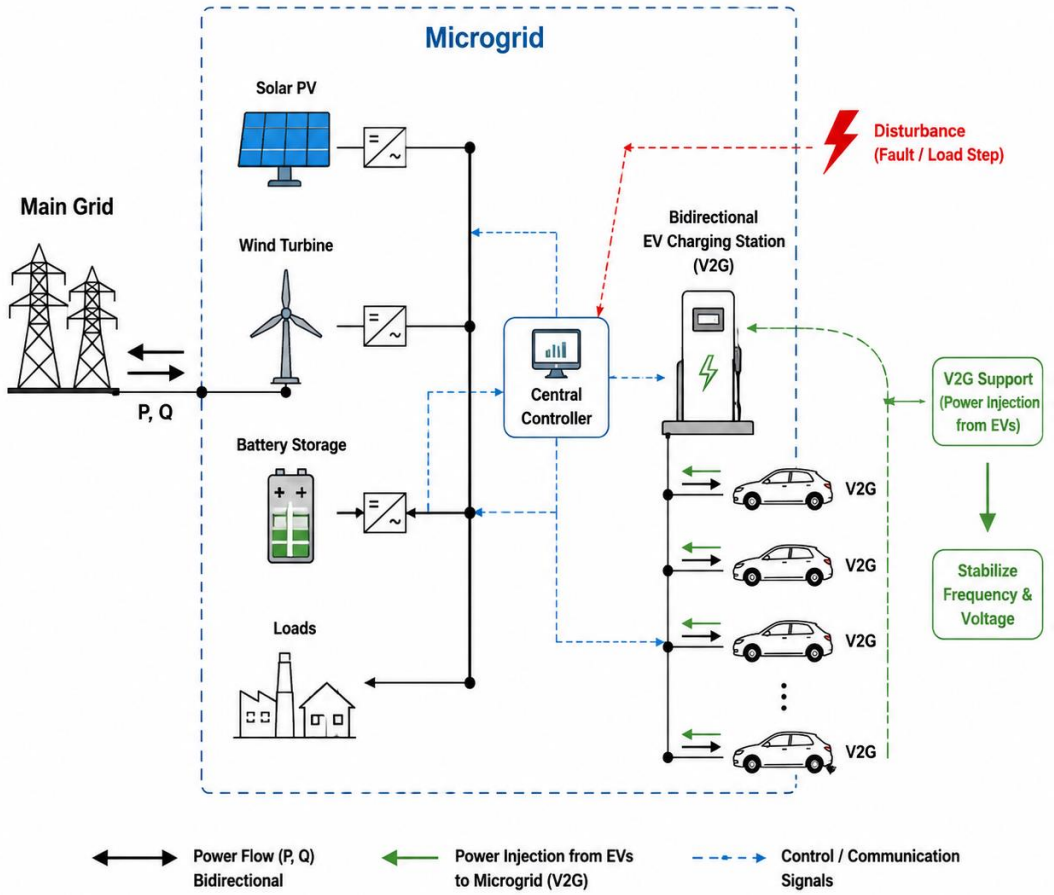
همچنین در حالت عملکرد جزیره‌ای، پایداری گذرا اهمیت بیشتری پیدا می‌کند؛ زیرا در این حالت ریزشبکه هیچ پشتیبانی از شبکه سراسری دریافت نمی‌کند و باید به‌طور کامل توسط منابع داخلی خود پایدار بماند.

در مجموع، پایداری گذرا یکی از شاخص‌های کلیدی در طراحی و بهره‌برداری از ریزشبکه‌ها محسوب می‌شود و تحلیل دقیق آن برای اطمینان از عملکرد مطمئن سیستم در برابر اختلالات ضروری است. استفاده از سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی، کنترل پیشرفته اینورترها و راهبردهای مدیریت انرژی می‌تواند نقش مهمی در افزایش مقاومت ریزشبکه در برابر اغتشاشات گذرا ایفا کند.

در این میان، فناوری V2G می‌تواند نقش مهمی در بهبود پایداری گذرا در ریزشبکه ایفا کند. در این فناوری، خودروهای الکتریکی علاوه بر دریافت انرژی از شبکه، قادر هستند انرژی ذخیره‌شده در باتری خود را به شبکه بازگردانند. به عبارت دیگر، باتری خودروهای الکتریکی می‌تواند به عنوان یک منبع ذخیره‌سازی انرژی توزیع‌شده در سیستم عمل کند. زمانی که تعداد قابل توجهی از خودروهای الکتریکی به شبکه متصل باشند، مجموع ظرفیت باتری آن‌ها می‌تواند یک منبع قابل توجه برای پشتیبانی شبکه محسوب شود. یکی از مهم‌ترین نقش‌های V2G در پایداری گذرا، جبران سریع عدم تعادل توان پس از وقوع اغتشاش است. برای مثال، اگر یک منبع تولید به‌طور ناگهانی از مدار خارج شود، اختلافی بین تولید و مصرف ایجاد می‌شود که باعث افت فرکانس سیستم خواهد شد. در چنین شرایطی، سامانه‌های V2G می‌توانند در مدت زمان بسیار کوتاهی انرژی ذخیره‌شده در باتری خودروها را به شبکه تزریق کنند و این عدم تعادل را کاهش دهند. سرعت پاسخ خودروهای الکتریکی که از طریق اینورترهای قدرت کنترل می‌شوند، بسیار بالا است و می‌تواند در حد چند میلی‌ثانیه باشد. این ویژگی باعث می‌شود V2G ابزار مؤثری برای کنترل سریع سیستم در شرایط گذرا باشد. علاوه بر این، خودروهای الکتریکی می‌توانند از طریق کنترل مناسب اینورترها نوعی اینرسی مجازی در سیستم ایجاد کنند. این مفهوم به این معنا است که سیستم کنترل خودروها به گونه‌ای طراحی می‌شود که در برابر تغییرات فرکانس واکنش نشان داده و توان لازم را به شبکه تزریق یا از آن جذب کند. این رفتار شبیه عملکرد اینرسی ژنراتورهای سنکرون است و می‌تواند سرعت تغییرات فرکانس پس از اختلال را کاهش دهد. در نتیجه، احتمال ناپایداری سیستم کاهش یافته و فرصت بیشتری برای عملکرد سایر سیستم‌های کنترلی فراهم می‌شود. از سوی دیگر، سامانه‌های V2G قادر هستند علاوه بر توان اکتیو، توان راکتیو نیز تولید یا جذب کنند. این قابلیت به بهبود کنترل ولتاژ در شرایط گذرا کمک می‌کند. در زمان وقوع خطا یا تغییرات ناگهانی بار، ولتاژ شبکه ممکن است دچار افت یا افزایش غیرمجاز شود. خودروهای الکتریکی متصل به شبکه می‌توانند با تنظیم توان راکتیو خود در تثبیت سطح ولتاژ نقش مؤثری داشته باشند. نقش V2G در حالت عملکرد جزیره‌ای ریزشبکه نیز بسیار مهم است. زمانی که ریزشبکه از شبکه اصلی جدا می‌شود، پشتیبانی توان از شبکه سراسری از بین می‌رود و سیستم باید تنها با منابع داخلی خود پایدار بماند. در چنین شرایطی، باتری خودروهای الکتریکی می‌تواند به عنوان یک منبع ذخیره‌سازی سریع و منعطف عمل کرده و به حفظ تعادل توان، کنترل فرکانس و تثبیت ولتاژ کمک کند. در مجموع، فناوری V2G با فراهم کردن ظرفیت ذخیره‌سازی پراکنده، پاسخ سریع به اغتشاشات و امکان کنترل توان اکتیو و راکتیو، می‌تواند نقش مهمی در بهبود پایداری گذرا ریزشبکه‌ها ایفا کند. با افزایش تعداد خودروهای الکتریکی و توسعه زیرساخت‌های شارژ هوشمند، انتظار می‌رود این فناوری به یکی از ابزارهای کلیدی در مدیریت و پایداری سیستم‌های انرژی آینده تبدیل شود.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

شکل (۱۲) ساختار کلی یک ریزشبکه شامل منابع تولید پراکنده نظیر سامانه فتوولتائیک، توربین بادی و دیزل‌ژنراتور، بارهای محلی، سامانه ذخیره‌سازی انرژی و ایستگاه شارژ دوطرفه خودروهای الکتریکی را نشان می‌دهد. این ریزشبکه می‌تواند به شبکه سراسری متصل باشد یا در حالت جزیره‌ای بهره‌برداری شود. در این ساختار، سیستم مدیریت انرژی وظیفه هماهنگی بین منابع تولید، ذخیره‌سازی و بارها را بر عهده دارد. در شرایط عادی، خودروهای الکتریکی در حال شارژ از شبکه هستند؛ اما در صورت وقوع اغتشاش شدید مانند خروج ناگهانی یک منبع تولید یا افت فرکانس، سامانه V2G وارد عمل شده و انرژی ذخیره‌شده در باتری خودروها را به شبکه تزریق می‌کند. این تزریق سریع توان موجب کاهش عدم تعادل بین تولید و مصرف شده و در نتیجه افت فرکانس اولیه کاهش می‌یابد، نرخ تغییر فرکانس محدود می‌شود، نوسانات گذرا میرا می‌گردد، و ولتاژ شبکه از طریق کنترل توان راکتیو تثبیت می‌شود. بنابراین، خودروهای الکتریکی مجهز به فناوری V2G به‌عنوان یک منبع ذخیره‌سازی توزیع‌شده و سریع‌الپاسخ، نقش مهمی در افزایش پایداری گذرای ریزشبکه، به‌ویژه در حالت عملکرد جزیره‌ای، ایفا می‌کنند.



شکل (۱۲): ساختار ریزشبکه و نقش سامانه خودرو به شبکه در بهبود پایداری گذرا

Figure (12): Microgrid structure and the role of the vehicle-to-grid system in improving transient stability

۶- چالش‌ها و موانع پیاده‌سازی فناوری خودرو به شبکه در ریزشبکه‌ها

با وجود مزایای قابل‌توجه فناوری خودرو به شبکه در بهبود پایداری، انعطاف‌پذیری و کارایی ریزشبکه‌ها، پیاده‌سازی عملی و گسترده این فناوری با چالش‌ها و موانع مختلفی همراه است. این چالش‌ها می‌توانند جنبه‌های فنی، اقتصادی، مدیریتی و امنیتی داشته باشند و در صورت عدم مدیریت مناسب، روند توسعه و پذیرش این فناوری را با مشکل مواجه کنند. شکل (۱۳) نمایانگر مهم‌ترین چالش‌ها و موانع پیش روی پیاده‌سازی فناوری خودرو به شبکه در ساختار ریزشبکه‌ها است. در این نمودار، سامانه V2G به‌عنوان هسته مرکزی سیستم در نظر گرفته شده و پنج عامل محدودکننده اصلی پیرامون آن نمایش داده

[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

شده‌اند که هر یک به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر عملکرد و قابلیت بهره‌برداری از این فناوری تأثیر می‌گذارند. در ادامه مهم‌ترین موانع پیاده‌سازی V2G در ریزشبکه‌ها با توضیح بیشتر بررسی می‌شوند.

الف- استهلاک باتری: یکی از مهم‌ترین نگرانی‌ها در استفاده از فناوری خودرو به شبکه، افزایش استهلاک باتری خودروهای برقی است. در سیستم‌های V2G، باتری خودرو علاوه بر تأمین انرژی مورد نیاز برای حرکت خودرو، به‌عنوان یک منبع ذخیره انرژی برای شبکه نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. این موضوع باعث می‌شود باتری در معرض چرخه‌های شارژ و دشارژ بیشتری نسبت به حالت معمول قرار گیرد. هر چرخه شارژ و تخلیه انرژی می‌تواند به مرور زمان موجب کاهش ظرفیت باتری و افت عملکرد آن شود. از آنجا که باتری بخش قابل‌توجهی از هزینه یک خودروی برقی را تشکیل می‌دهد، مالکان خودرو ممکن است نسبت به استفاده از باتری خود برای خدمات شبکه‌ای نگرانی داشته باشند. اگرچه مطالعات نشان داده‌اند که با استفاده از الگوریتم‌های مدیریت هوشمند شارژ، محدود کردن عمق دشارژ و کنترل توان مبادله‌ای می‌توان اثرات منفی بر عمر باتری را کاهش داد، اما همچنان این مسئله یکی از مهم‌ترین موانع در پذیرش گسترده فناوری V2G محسوب می‌شود. توسعه باتری‌های با طول عمر بیشتر و سامانه‌های پیشرفته مدیریت باتری می‌تواند در آینده این نگرانی را کاهش دهد.

ب- عدم قطعیت در دسترس بودن خودروها: یکی دیگر از چالش‌های مهم در استفاده از خودروهای برقی به‌عنوان منابع ذخیره انرژی، عدم قطعیت در دسترس بودن آن‌ها است. در حالی که سیستم‌های ذخیره‌سازی ثابت مانند باتری‌های ایستگاهی همواره در محل نصب خود حضور دارند و به شبکه متصل هستند، خودروهای برقی ماهیتی متحرک دارند و در زمان‌های مختلف ممکن است به شبکه متصل یا از آن جدا شوند. برای مثال، یک خودرو ممکن است در طول روز در محل کار یا در حال حرکت باشد و تنها در ساعات مشخصی به ایستگاه شارژ متصل شود. علاوه بر این، میزان شارژ اولیه باتری، مدت زمان اتصال خودرو به شبکه و نیاز راننده برای استفاده از خودرو نیز عواملی هستند که تغییر می‌کنند. این عدم قطعیت باعث می‌شود برنامه‌ریزی دقیق برای استفاده از ظرفیت ذخیره‌سازی خودروها در ریزشبکه دشوار شود. برای کاهش این مشکل می‌توان از مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر داده‌های تاریخی، الگوریتم‌های یادگیری ماشین و سیستم‌های مدیریت انرژی هوشمند استفاده کرد تا احتمال حضور خودروها و میزان انرژی قابل‌دسترس بهتر تخمین زده شود.

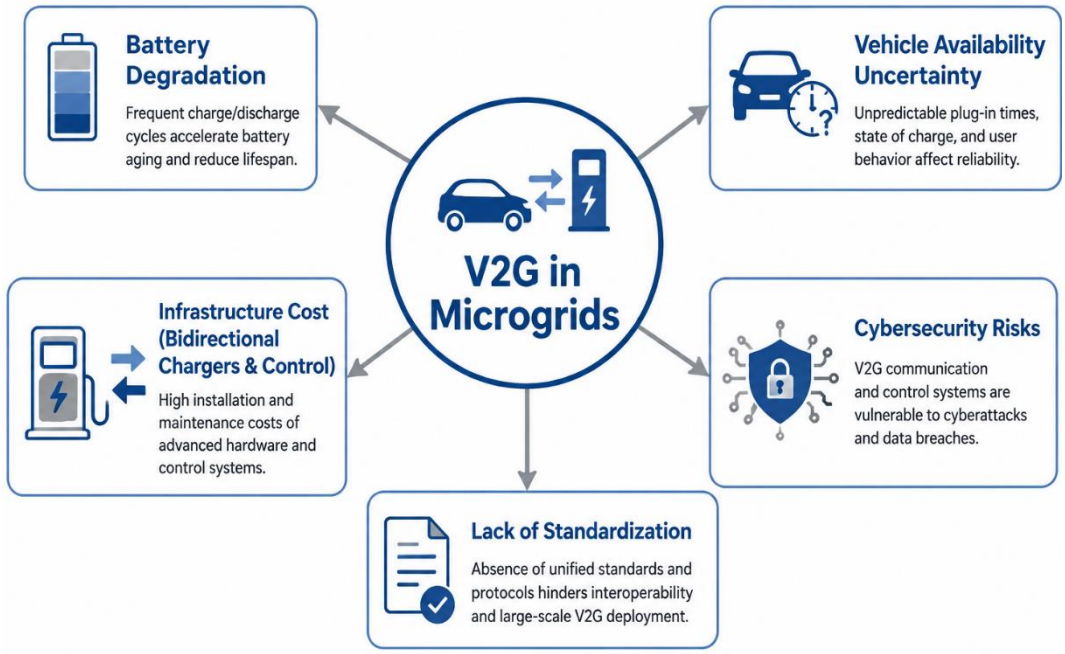
ج- هزینه زیرساخت: پیاده‌سازی فناوری V2G نیازمند ایجاد زیرساخت‌های فنی خاصی است که ممکن است هزینه‌های قابل‌توجهی به همراه داشته باشد. یکی از مهم‌ترین این زیرساخت‌ها شارژرهای دوطرفه هستند که امکان انتقال انرژی از شبکه به خودرو و از خودرو به شبکه را فراهم می‌کنند. این شارژرها نسبت به شارژرهای معمولی پیچیده‌تر هستند و به مبدل‌های الکترونیک قدرت پیشرفته و سیستم‌های کنترل دقیق نیاز دارند. علاوه بر تجهیزات شارژ، ایجاد یک سامانه مدیریت انرژی پیشرفته نیز ضروری است تا بتواند اطلاعات مربوط به وضعیت خودروها، بار شبکه، تولید منابع تجدیدپذیر و قیمت انرژی را تحلیل کرده و تصمیمات بهینه برای شارژ یا دشارژ خودروها اتخاذ کند. همچنین وجود شبکه‌های ارتباطی پایدار برای تبادل داده میان خودروها، ایستگاه‌های شارژ و مرکز کنترل اهمیت زیادی دارد. مجموع این موارد می‌تواند هزینه سرمایه‌گذاری اولیه را افزایش دهد و در مراحل ابتدایی مانعی برای توسعه گسترده این فناوری ایجاد کند. با این حال، انتظار می‌رود با افزایش مقیاس تولید تجهیزات و پیشرفت فناوری، هزینه‌ها در آینده کاهش یابد.

د- مسائل استانداردسازی: برای عملکرد مؤثر فناوری V2G لازم است اجزای مختلف سیستم شامل خودروهای برقی، ایستگاه‌های شارژ، سامانه‌های ارتباطی و سیستم‌های مدیریت انرژی بتوانند به‌صورت هماهنگ با یکدیگر کار کنند. این هماهنگی نیازمند وجود استانداردهای مشخص در زمینه سخت‌افزار، نرم‌افزار و پروتکل‌های ارتباطی است. در حال حاضر، برخی استانداردها برای ارتباط بین خودرو و شبکه توسعه یافته‌اند، اما در بسیاری از کشورها هنوز یکپارچگی کامل میان تجهیزات مختلف وجود ندارد. تفاوت در فناوری‌های مورد استفاده توسط شرکت‌های مختلف خودروسازی و تولیدکنندگان شارژر نیز می‌تواند مشکلاتی در سازگاری سیستم‌ها ایجاد کند. نبود استانداردهای مشترک باعث می‌شود نصب و بهره‌برداری از سامانه‌های V2G پیچیده‌تر و پرهزینه‌تر شود. بنابراین توسعه و پذیرش استانداردهای بین‌المللی مشترک نقش مهمی در تسهیل پیاده‌سازی و گسترش این فناوری خواهد داشت.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

ه- امنیت سایبری: فناوری خودرو به شبکه به‌شدت به ارتباطات دیجیتال، تبادل داده و سیستم‌های کنترل هوشمند وابسته است. این وابستگی موجب می‌شود سیستم در برابر تهدیدهای امنیت سایبری آسیب‌پذیر باشد. حملات سایبری می‌توانند به شکل دسترسی غیرمجاز به سامانه‌های کنترل، تغییر داده‌های شبکه یا ارسال فرمان‌های نادرست برای شارژ و دشارژ خودروها انجام شوند. چنین حملاتی ممکن است باعث اختلال در عملکرد ریزشبکه، ایجاد نوسانات در توان و حتی قطع برق در بخش‌هایی از شبکه شوند. به همین دلیل، امنیت سایبری باید از مراحل اولیه طراحی سیستم در نظر گرفته شود. استفاده از روش‌های رمزنگاری پیشرفته، احراز هویت چندمرحله‌ای، سامانه‌های تشخیص نفوذ و معماری‌های امن ارتباطی می‌تواند خطرات احتمالی را کاهش دهد. همچنین لازم است اپراتورهای شبکه و توسعه‌دهندگان سیستم‌های V2G به‌طور مداوم سامانه‌های امنیتی خود را به‌روزرسانی کنند.

در مجموع، اگرچه فناوری خودرو به شبکه می‌تواند نقش مهمی در بهبود پایداری و انعطاف‌پذیری ریزشبکه‌ها ایفا کند، اما چالش‌هایی مانند استهلاک باتری، عدم قطعیت دسترسی خودروها، هزینه زیرساخت، نبود استانداردهای یکپارچه و تهدیدهای امنیت سایبری باید به‌طور جدی مورد توجه قرار گیرند. با پیشرفت فناوری، توسعه زیرساخت‌ها و تدوین سیاست‌های حمایتی مناسب، انتظار می‌رود بسیاری از این موانع در آینده کاهش یافته و زمینه برای استفاده گسترده‌تر از فناوری V2G در سیستم‌های انرژی هوشمند فراهم شود.



شکل (۱۳): چالش‌ها و موانع اصلی پیاده‌سازی فناوری خودرو به شبکه در ریزشبکه‌ها.

Figure (13): The main challenges and obstacles of implementing vehicle-to-network technology in microgrids.

۷- آینده فناوری خودرو به شبکه در ریزشبکه‌ها

با افزایش استفاده از خودروهای برقی در سراسر جهان و توسعه ریزشبکه‌ها به‌عنوان زیرساخت‌های نوین تأمین انرژی، فناوری خودرو به شبکه به‌تدریج جایگاه مهمی در سیستم‌های قدرت آینده پیدا می‌کند. در مدل‌های سنتی، خودروها تنها مصرف‌کننده انرژی محسوب می‌شوند؛ اما در فناوری V2G خودروهای برقی می‌توانند علاوه بر دریافت انرژی از شبکه، در زمان مناسب بخشی از انرژی ذخیره‌شده در باتری خود را نیز به شبکه بازگردانند. این ویژگی باعث می‌شود خودروهای برقی به منابع ذخیره‌سازی متحرک و توزیع‌شده تبدیل شوند. در محیط ریزشبکه‌ها که معمولاً از منابع تولید پراکنده مانند انرژی خورشیدی و بادی استفاده می‌کنند، چنین ذخیره‌سازی انعطاف‌پذیری نقش مهمی در حفظ تعادل عرضه و تقاضای انرژی دارد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

در دهه آینده انتظار می‌رود فناوری V2G از مرحله آزمایشی و محدود به مرحله کاربرد گسترده در سیستم‌های انرژی برسد. ریزشبکه‌ها به دلیل ساختار محلی و قابلیت کنترل پیشرفته، بستر مناسبی برای پیاده‌سازی این فناوری هستند. در چنین شبکه‌هایی، خودروهای برقی می‌توانند در زمان تولید مازاد انرژی تجدیدپذیر شارژ شوند و در زمان افزایش مصرف یا کاهش تولید، انرژی ذخیره‌شده خود را به سیستم بازگردانند. این فرایند موجب بهبود مدیریت بار، کاهش نوسانات تولید و افزایش پایداری عملیاتی ریزشبکه می‌شود. همچنین در شرایط اضطراری مانند قطع ارتباط با شبکه اصلی، خودروهای متصل می‌توانند به‌عنوان منابع تأمین برق موقت برای بارهای ضروری مورد استفاده قرار گیرند و تاب‌آوری شبکه را افزایش دهند.

آینده این فناوری تا حد زیادی به میزان گسترش خودروهای برقی بستگی دارد. هرچه تعداد خودروهای برقی در یک منطقه بیشتر باشد، ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی در دسترس شبکه نیز افزایش می‌یابد. باتری‌های این خودروها در مجموع می‌توانند ظرفیت بسیار قابل‌توجهی ایجاد کنند که در صورت مدیریت مناسب، برای پشتیبانی از شبکه بسیار ارزشمند خواهد بود. در کنار این موضوع، کاهش هزینه تجهیزات شارژ دوطرفه و توسعه زیرساخت‌های شارژ نیز از عوامل مهم در گسترش V2G محسوب می‌شود. در حال حاضر بسیاری از ایستگاه‌های شارژ تنها امکان انتقال یک‌طرفه انرژی را دارند، اما با پیشرفت فناوری و کاهش قیمت تجهیزات، شارژرهای دوطرفه به‌تدریج رایج‌تر خواهند شد.

پیشرفت فناوری باتری نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در آینده V2G دارد. باتری‌های جدید با طول عمر بیشتر، چگالی انرژی بالاتر و قابلیت تحمل چرخه‌های شارژ و دشارژ بیشتر توسعه یافته‌اند. این پیشرفت‌ها نگرانی‌های مربوط به استهلاک باتری در اثر استفاده از V2G را کاهش می‌دهد و استفاده اقتصادی از این فناوری را امکان‌پذیرتر می‌کند. علاوه بر این، سامانه‌های پیشرفته مدیریت باتری می‌توانند به‌صورت هوشمند میزان شارژ و دشارژ را کنترل کنند تا هم نیاز راننده برای استفاده از خودرو حفظ شود و هم خدمات انرژی به شبکه ارائه شود.

عامل مهم دیگر در توسعه آینده V2G، ایجاد استانداردهای ارتباطی و چارچوب‌های مقرراتی مناسب است. برای عملکرد مؤثر این فناوری لازم است خودروها، ایستگاه‌های شارژ و سامانه‌های مدیریت شبکه بتوانند به‌صورت هماهنگ با یکدیگر ارتباط برقرار کنند. استانداردهای ارتباطی پیشرفته این امکان را فراهم می‌کنند که تبادل داده‌ها و فرمان‌های کنترلی میان اجزای مختلف سیستم به‌صورت ایمن و سریع انجام شود. همچنین سیاست‌های حمایتی و مدل‌های اقتصادی مناسب می‌توانند مالکان خودروهای برقی را به مشارکت در خدمات V2G تشویق کنند. برای مثال، پرداخت هزینه در ازای تزریق انرژی به شبکه یا مشارکت در خدمات تنظیم فرکانس می‌تواند انگیزه اقتصادی لازم را ایجاد کند.

در آینده، فناوری V2G احتمالاً با سایر فناوری‌های دیجیتال ترکیب خواهد شد. هوش مصنوعی می‌تواند در پیش‌بینی بار، تولید انرژی تجدیدپذیر و رفتار کاربران نقش مهمی داشته باشد و به بهینه‌سازی عملکرد سیستم کمک کند. اینترنت اشیا (IoT)نیز امکان اتصال تعداد زیادی خودرو، شارژر و تجهیزات شبکه را فراهم می‌کند و تبادل اطلاعات میان آن‌ها را تسهیل می‌کند. از سوی دیگر، فناوری بلاک‌چین می‌تواند برای مدیریت معاملات انرژی به‌صورت امن و شفاف مورد استفاده قرار گیرد و امکان ایجاد بازارهای محلی انرژی در ریزشبکه‌ها را فراهم کند. ترکیب این فناوری‌ها باعث می‌شود مدیریت انرژی در ریزشبکه‌ها هوشمندتر، کارآمدتر و قابل‌اعتمادتر شود.

علاوه بر مفهوم V2G، مدل‌های دیگری نیز در حال توسعه هستند که دامنه کاربرد خودروهای برقی در سیستم انرژی را گسترش می‌دهند. در فناوری خودرو به خانه (V2H)، باتری خودرو می‌تواند برق مورد نیاز یک خانه را در زمان قطع برق یا افزایش قیمت انرژی تأمین کند. در مدل خودرو به ساختمان (V2B) نیز خودروهای برقی می‌توانند در مدیریت انرژی ساختمان‌های بزرگ یا مجتمع‌های اداری نقش داشته باشند. این مدل‌ها در کنار V2G یک اکوسیستم انرژی انعطاف‌پذیر ایجاد می‌کنند که در آن خودروهای برقی نه‌تنها وسیله حمل‌ونقل، بلکه بخشی فعال از زیرساخت انرژی محسوب می‌شوند.

در مجموع، آینده فناوری خودرو به شبکه در ریزشبکه‌ها بسیار امیدوارکننده به نظر می‌رسد. افزایش نفوذ خودروهای برقی، پیشرفت فناوری باتری، توسعه زیرساخت‌های شارژ، و به‌کارگیری فناوری‌های هوشمند دیجیتال همگی زمینه را برای استفاده گسترده از این فناوری فراهم می‌کنند. در چنین شرایطی، خودروهای برقی می‌توانند به عناصر کلیدی در مدیریت انرژی پایدار تبدیل شوند و نقش مهمی در افزایش پایداری، انعطاف‌پذیری و بهره‌وری ریزشبکه‌ها ایفا کنند.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

۸- نتیجه‌گیری

با گسترش منابع انرژی تجدیدپذیر پراکنده، افزایش نفوذ خودروهای الکتریکی و حرکت سامانه‌های قدرت به سمت ساختارهای هوشمند، ریزشبکه‌ها به یکی از ارکان اصلی شبکه‌های انرژی آینده تبدیل شده‌اند. با این حال، ماهیت متغیر تولید در منابع تجدیدپذیر، تغییرپذیری بار، و پیچیدگی بهره‌برداری در حالت‌های متصل به شبکه و جزیره‌ای، چالش‌های متعددی را در زمینه حفظ پایداری فرکانس، پایداری ولتاژ و پایداری گذرا ایجاد می‌کند. در این میان، فناوری خودرو به شبکه به دلیل قابلیت تبادل دوطرفه انرژی میان خودروهای الکتریکی و شبکه، به‌عنوان یک راهکار انعطاف‌پذیر و چندمنظوره، توجه گسترده‌ای را در پژوهش‌های اخیر به خود جلب کرده است.

در این مقاله، ابتدا اجزای اصلی سیستم‌های **V2G** و ساختارهای کنترلی آن‌ها، شامل راهبردهای مدیریت و هماهنگی و نیز کنترل سلسله‌مراتبی، مورد بررسی قرار گرفت. سپس مفاهیم اساسی ریزشبکه و دسته‌بندی‌های مختلف آن از منظر ساختار اتصال، توپولوژی توان، نوع منابع انرژی و الگوی کنترل و مدیریت تشریح شد. همچنین مفهوم پایداری در ریزشبکه‌ها در سه بعد اصلی فرکانس، ولتاژ و گذرا مرور شد تا بستری مناسب برای تحلیل نقش فناوری **V2G** در بهبود عملکرد این سامانه‌ها فراهم شود. مرور انجام‌شده نشان داد که فناوری **V2G** می‌تواند از چند مسیر کلیدی به ارتقای پایداری ریزشبکه‌ها کمک کند. نخست، این فناوری با فراهم کردن ظرفیت ذخیره‌سازی توزیع‌شده و پاسخ سریع توان، نقش مؤثری در تنظیم فرکانس و کاهش انحرافات ناشی از عدم تعادل لحظه‌ای تولید و مصرف ایفا می‌کند. دوم، از طریق کنترل توان اکتیو و راکتیو، **V2G** قادر است در بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش نوسانات ولتاژی، به‌ویژه در حضور منابع تجدیدپذیر متناوب، مؤثر باشد. سوم، در شرایط گذرا و به‌ویژه در حالت جزیره‌ای، تجمیع ظرفیت باتری خودروهای الکتریکی می‌تواند تاب‌آوری و قابلیت اطمینان ریزشبکه را افزایش داده و تداوم تأمین بارهای حساس را تسهیل کند. افزون بر این، مشارکت خودروهای الکتریکی در برنامه‌های پاسخگویی بار، مدیریت انرژی و بازارهای محلی برق، ظرفیت‌های قابل توجهی را برای بهینه‌سازی اقتصادی و بهره‌برداری هوشمند از ریزشبکه‌ها فراهم می‌سازد.

با وجود این مزایا، پیاده‌سازی گسترده فناوری **V2G** در ریزشبکه‌ها همچنان با چالش‌های مهمی مواجه است. از مهم‌ترین این چالش‌ها می‌توان به محدودیت‌های زیرساخت شارژ دوطرفه، پیچیدگی طراحی و هماهنگی راهبردهای کنترلی، وابستگی عملکرد سیستم به الگوی حضور و رفتار شارژ کاربران، مسائل مربوط به امنیت سایبری و قابلیت اطمینان ارتباطات، و همچنین نگرانی‌های اقتصادی ناشی از هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و تخریب تدریجی باتری اشاره کرد. علاوه بر این، نبود استانداردهای جامع، مدل‌های تجاری شفاف و سازوکارهای انگیزشی مناسب، از دیگر موانع توسعه عملی این فناوری در مقیاس وسیع محسوب می‌شود.

بررسی روندهای تحقیقاتی آینده نشان می‌دهد که موفقیت **V2G** در ریزشبکه‌ها به توسعه هم‌زمان چند حوزه وابسته است: طراحی راهبردهای کنترلی تطبیقی و پیش‌بین، به‌کارگیری هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در پیش‌بینی رفتار کاربران و مدیریت عدم قطعیت، توسعه زیرساخت‌های ارتباطی امن و سریع، تدوین چارچوب‌های اقتصادی و تعرفه‌ای مناسب، و نیز در نظر گرفتن اثرات بلندمدت چرخه‌های شارژ/دشارژ بر عمر باتری. همچنین انتظار می‌رود همگرایی **V2G** با مفاهیمی همچون شبکه هوشمند، اینترنت انرژی، پاسخگویی بار، تجمیع‌کننده‌ها و تجارت محلی انرژی، افق‌های جدیدی را برای بهره‌برداری پایدار و انعطاف‌پذیر از ریزشبکه‌ها ایجاد کند. در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که فناوری خودرو به شبکه یکی از گزینه‌های راهبردی و توانمندساز برای ارتقای پایداری، تاب‌آوری و هوشمندی ریزشبکه‌ها در آینده است. با این حال، تحقق کامل ظرفیت‌های این فناوری مستلزم رفع موانع فنی، اقتصادی، مدیریتی و مقرراتی و نیز انجام پژوهش‌های بین‌رشته‌ای و کاربردمحور در سطوح مدل‌سازی، کنترل، بازار و زیرساخت است. از این رو، **V2G** نه‌تنها یک فناوری مکمل برای خودروهای الکتریکی، بلکه یک مؤلفه کلیدی در معماری سامانه‌های انرژی آینده به شمار می‌آید.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

سپاسگزاری

از داوران محترم مقاله، حوزه معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه آزاد اسلامی و همکاران محترم مجله که در نشر و چاپ این نشریه کمک می‌کنند صمیمانه سپاسگزاریم.

مراجع

[1] S. Yadav, R. Anand, "Analysis of advancing paradigms of smart grid innovations, applications, challenges, future trends and strategic implementations", Discover Applied Sciences, vol. 7, Article Number: 1380, Nov. 2025, https://doi.org/10.1007/s42452-025-07905-2.

[2] G. Shahgholian, M. Moazzami, E. Yaghoubi, S.M. Zanjani, "A review of reliability in the restructured power system: Concepts, classification and challenges", Journal of Applied Research in Electrical Engineering, vol. 4, no. 2, pp. 25-51, July 2025, https://doi.org/10.22055/jaree.20-26.50622.1261.

[3] S. Habibnia, M. Faraji, M.H. Alizadeh, M.M. Zadeh, R. Caire, G.B. Gharehpetian, J.M. Guerrero, "Data-driven solutions for microgrids energy management systems: A state-of-the-art survey on current trends and future directions", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 228, Article Number: 116592, March 2026, https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116592.

[4] G. Shahgholian, M. Moradian, S.M.A. Zanjani, "Analysis and simulation of small signal model of virtual synchronous generator in microgrid system", Journal of Southern Communication Engineering, vol. 14, no. 55, pp. 21–35, Sept. 2025, https://doi.org/10.30495/jce.2025.1993480.1331.

[5] A. Mofidi, A. Lashkarara, H.B. Tolabi, "A review of the role of flexible renewable energy hubs in enhancing economic indices, voltage security, and reliability of microgrids", Journal of Novel Research on Smart Power System, vol. 14, no. 4, pp. 1-16, Dec. 2026.

[6] G Shahgholian, A Movahedi, "Coordinated control of TCSC and SVC for system stability enhancement using ANFIS method", International Review on Modelling and Simulations, vol. 4, no. 5, pp. 2367-2375, Oct. 2011.

[7] A. Barani, M. Moazzami, G. Shahgholian, F. Haghighatdar- Fesharaki, "A unified bi- objective programming framework for active power optimization and reactive power coordination of electric vehicles integrated with distribution feeder reconfiguration", IET Renewable Power Generation, vol. 20, no. 1, Article Number: e70179, Jan. 2026, https://doi.org/10.1049/rpg2.70179.

[8] K. Sayed, M.M. Elsayed, A. Mohamed, A. Eid, "Key performance indicators for resiliency assessment in power systems with renewable energy and electric vehicles integration", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 225, Article Number: 116135, Jan. 2026, https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116135.

[9] F.S. Chien, K.Y. Chau, M. Sadiq, G.L. Diep, T.K. Tran, T.H.A. Pham, "What role renewable energy consumption, renewable electricity, energy use and import play in environmental quality?", Energy Reports, vol. 10, pp. 3826-3834, Nov. 2023, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.10.024.

[10] A. Rehman, M. Radulescu, L.M. Cismaş, C.M. Cismaş, A.A. Chandio, S. Simoni, "Renewable energy, urbanization, fossil fuel consumption, and economic growth dilemma in romania: Examining the short- and long-term impact", Energies, vol. 15, no. 19, Article Number: 7180, Sept. 2022, https://doi.org/10.3390/en15197180.

[11] M. Ghanbarzadeh, H. Barati, "Dynamic optimal load distribution in industrial microgrids considering charging of electric vehicles", Journal of Novel Research on Smart Power System, vol. 14, no. 1, pp. 11-20, Dec. 2013, https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222468.1392.2.3.2.5.

[12] M. Mohseni, M. Joorabian, A. Lashkarara, "Smart charge management of electric vehicles in the distribution network in the presence of demand response program", Journal of Novel Research on Smart Power System, vol. 10, no. 4, pp. 1-12, Dec. 2022, https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222468.1400.10.4.1.2.

[13] H. Tavalaei, M. Samiei-Moghaddam, M. Vahedi, N. Salehi, M.H. Abardeh, "Multi-objective energy management optimization in smart distribution networks using a hybrid fuzzy-genetic

[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565] [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

algorithm in the presence of renewable energy sources, electric vehicles, and energy storage systems", Journal of Novel Research on Smart Power System, vol. 13, no. 4, pp. 37-50, Dec. 2025, http://dx.doi.org/10.82362/jeps.2025.w.529.

[14] H. Niahosseini, M. Jafarifar, "The strategy of managing the influence of electric vehicles along with demand response loads in the electricity distribution network with the aim of reducing operating costs and improving network losses and voltage drop", Journal of Novel Research on Smart Power System, vol. 14, no. 1, pp. 9-32, June 2025, http://dx.doi.org/10.82362/jeps.2025.1.519.

[15] F. Liu, M. Shafique, X. Luo, "Unveiling the determinants of battery electric vehicle performance: A systematic review and meta-analysis", Communications in Transportation Research, vol. 4, Article Number: 100148, 2024, https://doi.org/10.1016/j.commtr.2024.100148.

[16] F. Bartz, S. Gehrmann, T. Fröhlich, J. Beerel, A. Goldberg, "Ceramic heat flow sensor for measuring heat flows in high-voltage batteries of electric vehicles (BEV)", Measurement, vol. 262, Article Number: 120071, Feb. 2026, https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.120071.

[17] J.P. Sahoo, R. Ray, R. Prakash, S. Sivasubramani, "Impacts of plug-in EVs and decentralized power generation on distribution system operation", e-Prime- Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, vol. 9, Article Number: 100658, Sept. 2024, https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100658.

[18] R.M. Kamel, M. Hashem, M. Ebeed, A. Ali, "Enhancing the reliability and security of distribution networks with plug-in electric vehicles and wind turbine generators considering their stochastic natures", Sustainable Energy, Grids and Networks, vol. 39, Article Number: 101439, Sept. 2024, https://doi.org/10.1016/j.segan.2024.101439.

[19] R.R. Ahrabi, H. Ardi, M. Elmi, A. Ajami, "A novel step-up multiinput dc–dc converter for hybrid electric vehicles application", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 32, no. 5, pp. 3549-3561, May 2017, https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2585044.

[20] S. Bairabathina, S. Balamurugan, "Review on non-isolated multi-input step-up converters for grid-independent hybrid electric vehicles", International Journal of Hydrogen Energy, vol. 45, no. 41, pp. 21687-21713, Aug. 2020, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.277.

[21] S. Naresh, S. Peddapati, M.L. Alghaythi, "A novel high quadratic gain boost converter for fuel cell electric vehicle applications", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, vol. 4, no. 2, pp. 637-647, April 2023, https://doi.org/10.1109/JESTIE.2023.3248449.

[22] R. Saadi, M.Y. Hammoudi, O. Kraa, M.Y. Ayad, M. Bahri, "A robust control of a 4-leg floating interleaved boost converter for fuel cell electric vehicle application", Mathematics and Computers in Simulation, vol. 167, pp. 32-47, Jan. 2020, https://doi.org/10.1016/j.matcom.2019.09.014.

[23] D. Pelosi, L. Trombetti, E. Meniconi, M. Ghoreishi, F. Santori, L. Barelli, "Empowering renewables-based microgrids through vehicle-to-building service: A real case study", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 176, Article Number: 111730, March 2026, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2026.111730.

[24] M. İnci, Ö. Berber, M. Büyük, N.S. Özbek, "Dynamic current control of high-gain buck-boost power transfer for electric vehicle-to-vehicle (V2V) charging with PV integration", Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 85, Article Number: 104802, Jan. 2026, https://doi.org/10.1016/j.seta.2025.104802.

[25] J. Olano, H. Camblong, J.A. López-Ibarra, T.T. Lie, "Development of energy management systems for electric vehicle charging stations associated with batteries: Application to a real case", Applied Sciences, vol. 15, no. 16, Article Number: 8798, Aug. 2025, https://doi.org/10.3390/app15168798.

[26] P. Barman, L. Dutta, S. Bordoloi, A. Kalita, P. Buragohain, S. Bharali, B. Azzopardi, "Renewable energy integration with electric vehicle technology: A review of the existing smart charging approaches", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 183, Article Number: 113518, Sept. 2023, https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113518.

[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4– Winter 2026 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

[27] E. El-Saadany, M. Mohamed, H. Farag, A. Al-Obaidi, H. Zeineldin, "Smart power distribution systems: A holistic review of core pillars", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 232, Article Number: 116788, May 2026, https://doi.org/10.1016/j.rser.2026.116788.
[28] R.G. Allwyn, A. Al-Hinai, V. Margaret, "A comprehensive review on energy management strategy of microgrids", Energy Reports, vol. 9, pp. 5565-5591, Dec. 2023, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.04.360.
[29] J.A. Rodriguez-Gil, E. Mojica-Nava, D. Vargas-Medina, M.F. Arevalo-Castiblanco, C.A. Cortes, S. Rivera, J. Cortes-Romero, "Energy management system in networked microgrids: an overview", Energy Systems, vol. 17, pp. 315–346, Feb. 2026, https://doi.org/10.1007/s12667-024-00676-6.
[30] J.A. Basantes, D.E. Paredes, J.R. Llanos, D.E. Ortiz, C.D. Burgos, "Energy management system (EMS) based on model predictive control (MPC) for an isolated dc microgrid", Energies, vol. 16, no. 6, Article Number: 2912, March 2023, https://doi.org/10.3390/en16062912.
[31] M.S. Eltohamy, M.H. Tawfiq, M.M.R. Ahmed, Z. Alaas, B. Mohammed, I. Ahmed, H. Youssef, A. Raouf, "A comprehensive review of vehicle-to-grid V2G technology: Technical, economic, regulatory, and social perspectives", Energy Conversion and Management: X, vol. 27, Article Number: 101138, July 2025, https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101138.
[32] Y. Ding, X. Li, S. Jian, "Modeling the impact of vehicle-to-grid discharge technology on transport and power systems", Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 105, Article Number: 103220, April 2022, https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103220.
[33] F.S. Azad, A. Rahman, S.D. Barman, P. Chowdhury, M.S. Ali, O. Farrok, "Towards efficient energy management systems for electric vehicles: advances in control techniques and applications", Energy Conversion and Management: X, vol. 28, Article Number: 101326, Oct. 2025, https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101326.
[34] D.A.L. Brandao, J.M.S. Callegari, D.I. Brandao, I.A. Pires, "Coordinated, centralized, and simultaneous control of fast charging stations and distributed energy resources", Inventions, vol. 9, no. 2, Article Number: 35, March 2024, https://doi.org/10.3390/inventions9020035.
[35] M. Khalid, "Smart grids and renewable energy systems: Perspectives and grid integration challenges", Energy Strategy Reviews, vol. 51, Article Number: 101299, Jan. 2024, https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101299.
[36] C. Liu, X. Zhang, K.K. Chai, J. Loo, Y. Chen, "A survey on blockchain-enabled smart grids: Advances, applications and challenges", IET Smart Cities, vol. 3, no. 2, pp. 56-78, June 2021, https://doi.org/10.1049/smc2.12010.
[37] D. Wald, J. King, C.J. Bay, R. Chintala, K. Johnson, "Integration of distributed controllers: Power reference tracking through charging station and building coordination", Applied Energy, vol. 314, Article Number: 118753, May 2022, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118753.
[38] W.Y.H. Adoni, S. Lorenz, R. Gloaguen, A. Singh, T.D. Kühne, "A distributed coverage path planning framework for autonomous unmanned aerial vehicle (UAV) swarms", Expert Systems with Applications, vol. 322, Article Number: 132382, Aug. 2026, https://doi.org/10.1016/j.eswa.2026.132382.
[39] S. Roudi, R. Ebrahimi, M. Ghanbari, S. Ranjbar, "Virtual inertia control of microgrid consisting of low inertia resources", Journal of Southern Communication Engineering, vol. 13, no. 49, pp. 65-80, Dec. 2024, https://doi.org/10.30495/jce.2023.1975407.1184.
[40] M. Irfan, T. Tahir, S. Deilami, S. Huang, B.P. Veettil, "Novel control-based design optimization of smart energy distribution and management in vehicle-to-grid integrated microgrid", Applied Energy, vol. 402, Article Number: 127047, Jan. 2026, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.127047.
[41] M. Bonyani, M. Ghanbarian, M. Simab, "Demand side management based on model predictive control in microgrid in grid connected mode", Journal of Southern Communication Engineering, vol. 13, no. 52, Sept. 2024, https://doi.org/10.30495/jce.2023.1996352.1280.
[42] Q.L. Lam, D. Riu, A.I. Bratcu, A. Labonne, C. Boudinet, "Power hardware-in-the-loop validation of primary frequency robust control in stand-alone microgrids with storage units", Electrical Engineering, vol. 105, pp. 317–333, Feb. 2023, https://doi.org/10.1007/s00202-022-01666-6.

[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

[43] X. Meng, Q. Li, G. Zhang, T. Wang, W. Chen, T. Cao, "A dual-mode energy management strategy considering fuel cell degradation for energy consumption and fuel cell efficiency comprehensive optimization of hybrid vehicle", IEEE Access, vol. 7, pp. 134475-134487, 2019, https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2939047.

[44] G. Shahgholian, K. Khani, M. Moazzami, "Frequency control in autanamous microgrid in the presence of DFIG based wind turbine", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, Vol. 6, No. 23, pp. 3-12, December 2015, https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223871.1394.6.23.1.9.

[45] G. Shahgholian, "A brief overview of microgrid performance improvements using distributed FACTS devices", Journal of Renewable Energy and Environment, vol. 10, no. 1, pp. 43-58, March 2023, https://doi.org/10.30501/jree.2022.321435.1305.

[46] G. Shahgholian, "A brief review on the application of the virtual impedance method in islanded alternating current microgrids to control reactive power sharing", Hydrogen, Fuel Cell and Energy Storage, vol. 11, no. 3, pp. 189-204, Sept. 2024, https://doi.org/10.22104/hfe.2024.6989.1304.

[47] M.S. Ouahabi, S. Barkat, A. Benyounes, T. Rekioua, S. Ihammouchen, H. Benbouhenni, Z.M.S. Elbarbary, M.M. Alammar, "Decentralized active fault tolerant control of direct current microgrids under actuator and source disturbances using proportional integral unknown input observer", Scientific Reports, vol. 15, Article Number: 14393, April 2025, https://doi.org/10.1038/s41598-025-99557-w.

[48] M.Y.A. Khan, H. Liu, J. Wang, R. Zhang, Y. Zhang, "Hierarchical control framework for offshore hybrid ac/dc microgrid integrating renewable energy resources and hybrid energy storage system", Journal of Energy Storage, vol. 152, Article Number: 120749, March 2026, ttps://doi.org/10.1016/j.est.2026.120749.

[49] M.Z. Saleheen, M. Wagner, R. Razzaghi, H. Wang, "Reliability as a design principle: A systematic review and integrated framework for renewable-based microgrids", Energy Conversion and Management: X, vol. 30, Article Number: 101878, May 2026, https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2026.101878.

[50] K. Sandhya, K. Chatterjee, "Study the impact of renewable and non-renewable energy sources on micro-grid using time series data based information transfer", Energy Reports, vol. 11, pp. 4957-4966, June 2024, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.04.051.

[51] R. Ramadan, Q. Huang, A.S. Zalhaf, O. Bamisile, J. Li, D.E.A. Mansour, X. Lin, D.M. Yehia, "Energy management in residential microgrid based on non-intrusive load monitoring and internet of things", Smart Cities, vol. 7, no. 4, pp. 1907-1935, July 2024, https://doi.org/10.3390/smartcities7040075.

[52] A. Dosa, O.A. Olanrewaju, F. Mora-Camino, "A comprehensive review of hybrid renewable microgrids: key design parameters, optimization techniques, and the role of demand response in enhancing system flexibility", Energies, vol. 18, no. 19, Article Number: 5154, Sept. 2025, https://doi.org/10.3390/en18195154.

[53] A. Abbass, "Hybrid renewable energy microgrid optimization: an analysis of system performance and cost-efficiency using Python-generated custom code for diesel-wind-solar configurations", Energy Storage and Saving, vol. 4, no. 4, pp. 392-403, Dec. 2025, https://doi.org/10.1016/j.enss.2025.07.001.

[54] M. Babagheibi, S. Jadid, A. Kazemi, "Distribution locational marginal pricing for congestion management of an active distribution system with renewable-based microgrids under a privacy-preserving market clearing approach and load models", Sustainable Energy, Grids and Networks, vol. 32, Article Number: 100935, Dec. 2022, https://doi.org/10.1016/j.segan.2022.100935.

[55] M. Javidsharifi, T. Niknam, J. Aghaei, G. Mokryani, "Multi-objective short-term scheduling of a renewable-based microgrid in the presence of tidal resources and storage devices", Applied Energy, vol. 216, pp. 367–381, April 2018, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.119.

[56] I. Ngamroo, T. Surinkaew, "Coordinated decentralized and centralized microgrid control for distributed renewable energy sources with integrated batteries", IET Renewable Power Generation, vol. 16, no. 15, pp. 3251-3266, Nov. 2022, https://doi.org/10.1049/rpg2.12576.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4– Winter 2026

[57] L.S. Araujo, J.M.S. Callegari, B.J.C. Filho, D.I. Brandao, "Heterogeneous microgrids: Centralized control strategy with distributed grid-forming converters", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 158, Article Number: 109950, July 2024, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.109950.

[58] A. Amirparast, S.K.H. Sani, "Reinforcement learning for decentralized robust optimal voltage control of uncertain islanded dc microgrid under ZIP load", IET Control Theory and Applications, vol. 19, no. 1, Article number: e70053, Jan./Dec. 2025, https://doi.org/10.1049/cth2.70053.

[59] Alankrita, A. Pati, N. Adhikary, "Multiagent deep reinforcement learning-based distributed control strategy for energy management in dc microgrid", Computers and Electrical Engineering, vol. 131, Article Number: 110927, March 2026, https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2025.110927.

[60] E. S. N. Raju P, T. Jain, "Robust optimal centralized controller to mitigate the small signal instability in an islanded inverter based microgrid with active and passive loads", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 90, pp. 225-236, Sept. 2017, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.02.011.

[61] M.M. Rezaei, K. Rouhollahi, S.M. Madani, "Optimization of centralized control of volt/var in transmission systems based on economic dispatch and harmony search algorithm", Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System, vol. 1, no. 4, pp. 90-103, March 2023, https://doi.org/10.30486/teeges.2022.1968162.1038.

[62] A. Karimi, M. Nayeripour, A.R. Abbasi, "Coordination in islanded microgrids: Integration of distributed generation, energy storage system, and load shedding using a new decentralized control architecture", Journal of Energy Storage, vol. 98, Article Number: 113199, Sept. 2024, https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113199.

[63] A.S. Dahane, R.B. Sharma, "Advanced decentralized control framework for voltage stability and proportional power sharing in hybrid ac-dc microgrid", Renewable Energy Focus, vol. 57, Article Number: 100809, June 2026, https://doi.org/10.1016/j.ref.2026.100809.

[64] L. Xing, Z. Shu, J. Fang, C. Wen, C. Zhang, "Distributed control of dc microgrids: A relaxed upper bound for constant power loads", Automatica, vol. 173, Article Number: 112021, March 2025, https://doi.org/10.1016/j.automatica.2024.112021.

[65] G. Ahmad, A. Hassan, A. Islam, M. Shafiullah, M.A. Abido, M. Al-Dhaifallah, "Distributed control strategies for microgrids: A critical review of technologies and challenges", IEEE Access, vol. 13, pp. 60702-60719, March 2025, https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3552940.

[66] H. Fayazi, B. Fani, M. Moazzami, G. Shahgholian, "An offline three-level protection coordination scheme for distribution systems considering transient stability of synchronous distributed generation", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 131, Article Number: 107069, Oct. 2021, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107069.

[67] S. Bagheri, H. Moradi CheshmehBeigi, "DC microgrid voltage stability through inertia enhancement using a bidirectional dc-dc converter", Proceeding of the IEEE/IWEC, pp. 1-5, Shahrood, Iran, May 2021, https://doi.org/10.1109/IWEC52400.2021.9467032.

[68] G. Shahgholian, "Dynamic behavior analysis of load frequency control in power systems with hybrid power plants", Revue Roumaine des Sciences Techniques, vol. 70, no. 3, pp. 325-330, Sept. 2025, https://doi.org/10.59277/RRST-EE.2025.3.7.

[69] M.R. Moradian, M. Moazzami, G. Shahgholian, "Analysis and simulation of dynamic behavior of load frequency control for a thermal–hydro power system with photovoltaic system", Journal of Novel Research on Smart Power System, vol. 13, no. 2, pp. 36-47, Sept. 2024.

[70] F. Renhai, W. Khan, A. Aziz, M.Z. Yousaf, W. Zhang, Z. Cai, B. Khan, A. Ali, N.E. Mabunda, S. Rajkumar, "A deep recurrent neural network-based droop control strategy for frequency stabilization in low-inertia power systems with high renewable energy penetration", Results in Engineering, vol. 28, Article Number: 107443, Dec. 2025, https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107443.

[71] S.H. Lim, K.W. Seo, J.W. Park, K.Y. Lee, "New frequency stability assessment based on contribution rates of wind power plants", International Journal of Electrical Power and Energy

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

Systems, vol. 164, Article number: 110388, March 2025, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.110388.
[72] Y. Xu, Y. He, H. Liu, H. Kang, J. Chen, W. Yue, W. Xiao, Z. Pan, "Optimization configuration of electric–hydrogen hybrid energy storage system considering power grid voltage stability", Energies, vol. 18, no. 13, Article Number: 3506, July 2025, https://doi.org/10.3390/en18133506.
[73] B.B. Adetokun, C.M. Muriithi, "Application and control of flexible alternating current transmission system devices for voltage stability enhancement of renewable-integrated power grid: A compreh¬ensive review", Heliyon, vol. 7, no. 3, Article Number: e06461, 2021, https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06461.
[74] G. Shahgholian, S. Eshtehardiha, H. Mahdavinasab, M.R. Yousefi, "A novel approach in automatic control based on the genetic algorithm in STATCOM for improvement power system transient stability", Proceeding of the IEEE/ICIS, vol. 1, pp.14-19, Varna, Sep. 2008, https://doi.org/ 10.1109/IS.2008.4670419.
[75] N. Khosravi, D. Çelik, H. Bevrani, S. Echalih, "Microgrid stability: A comprehensive review of challenges, trends, and emerging solutions", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 170, Article Number: 110829, Sept. 2025, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.110829.
[76] S.T. Saranya, P. Bhowmik, "A comprehensive review of microgrid architectures, power management and resilient operation", Energy Reports, vol. 15, Article Number: 109021, June 2026, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.109021.
[77] X. Chen, W. Si, Q. Yu, J. Fang, "Transient stability analysis and enhancement of grid-forming converters: A comprehensive review", Electronics, vol. 14, no. 4, Article Number: 645, Feb. 2025, https://doi.org/10.3390/electronics14040645.
[78] E. Jafari, A. Marjanian, S. Solaymani, G. Shahgholian, "Designing an emotional intelligent controller for IPFC to improve the transient stability based on energy function", Journal of Electrical Engineering and Technology, vol. 8, no. 3, pp. 478-489, May 2013, https://doi.org/ /10.5370/JEET.2013.8.3.478.
[79] T. Su, J. Zhao, Y. Yao, A. Selim, F. Ding, "Safe reinforcement learning-based transient stability control for islanded microgrids with topology reconfiguration", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 16, no. 4, pp. 3432-3444, July 2025, https://doi.org/10.1109/TSG.2025.3569696.
[80] A.B. Akinwola, A. Alkuhayli, "Hybrid PSO-reinforcement learning-based adaptive virtual inertia control for frequency stability in multi-microgrid PV systems", Electronics, vol. 14, no. 17, Article Number: 3349, Aug. 2025, https://doi.org/10.3390/electronics14173349.
[81] D. Niu, Z. Wang, M. Chen, J. Fang, "On transient stability problems in dc microgrids", Applied Sciences, vol. 14, no. 24, Article Number: 11523, Dec. 2024, https://doi.org/10.3390/app142411523.

زیرنویس‌ها:

[1] Islanded
[2] Grid-Connected
[3] Distributed Energy Resources
[4] System Inertia
[5] Electric Vehicles
[6] Vehicle-to-Grid
[7] Battery Electric Vehicle (BEV)
[8] Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV)
[9] Hybrid Electric Vehicle (HEV)
[10] Fuel Cell Vehicles
[11] Vehicle-to-Infrastructure
[12] Vehicle-to-Network
[13] Energy-Related Droop Control
[14] Vehicle- to- Home
[15] Vehicle- to- Building

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4– Winter 2026

[16] Vehicle‑ to‑ Load (V2L)
[17] Vehicle‑ to‑ Vehicle (V2V)
[18] Aggregator
[19] Electric Vehicle Supply Equipment
[20] EVSE Controller
[21] Bidirectional Smart Charger
[22] Energy Management System
[23] Distribution Management System
[24] Open Charge Point Protocol
[25] On-Board Bidirectional Charger
[26] Bidirectional Power Converter
[27] Droop Control
[28] Robust Control
[29] Virtual Power Plant
[30] Hierarchical Control
[31] Strategic Layer
[32] Upper Level
[33] Tactical Layer
[34] Intermediate Level
[35] Operational Layer
[36] Lower Level
[37] Primary Frequency Control
[38] Distributed Storage
[39] Grid-Connected
[40] Islanded/Stand-Alone Microgrid
[41] Hybrid / Dual-Mode Microgrid
[42] Power Flow Topology
[43] Centralized Control
[44] Decentralized Control
[45] Distributed Control

[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.565] [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026