نشریه صنعت لاستیک ایران
سال۲۶/شماره ۱۰۶/ تابستان۱۴۰۱

علمی- فنی

برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی به منظور کاهش هزینه بهره‌برداری و ارائه خدمات جانبی به شبکه

Optimal planning and management of electric vehicle charging and discharging in order to reduce operating costs and provide additional services to the network

چکیده

در حال حاضر، شبکه‌های قدرت از قابلیت ذخیره‌سازی ناچیزی برخوردار هستند و به همین دلیل، مفهوم V2G که با معرفی خودروهای الکتریکی ظهور پیداکرده است، توجه بسیاری از بهره‌برداران و برنامه‌ریزان را به خود جلب نموده است؛ چراکه می‌توان با تجمیع باتری‌های تک‌تک خودروهای موجود در یک پارکینگ شهری، ظرفیت ذخیره‌سازی فراوانی را حاصل نمود که می‌تواند از دید شبکه به‌عنوان یک منبع ذخیره‌سازی واحد و یکپارچه، مورد استفاده قرار گیرد. از آنجایی که این خودروها در شبکه با دو کاربری بار الکتریکی و منبع تولید توان ایفای نقش می‌کنند بنابراین نقش بسزایی در بهره‌برداری از یک شبکه توزیع دارند. به‌علاوه با افزایش روزافزون ضریب نفوذ خودروهای برقی (هیبرید) در شبکه‌های توزیع فشار ضعیف، برنامه‌ریزی شارژ/دشارژ باتری آن‌ها به‌منظور حفظ تعادل شبکه و همچنین افزایش سود مالکان خودروها، اهمیت زیادی پیدا می‌کند. از آنجایی که خودروهای الکتریکی می‌توانند به‌عنوان یک منبع انرژی در ساعات پیک بار به شبکه متصل شوند (V2G) و ضمن مسطح کردن پروفیل توان، افت ولتاژ شین‌های شبکه را بهبود بخشند، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و در دسترس‌ترین منبع تولید درآمد از دید مالکان آن‌ها به شمار می‌آیند. اگر برنامه‌ریزی شارژ/دشارژ خودروها به‌طور نامنظم باشد، توان کشیده شده از فازها نامتعادل شده و علاوه بر افزایش میزان هارمونیک و افت کیفیت توان شبکه، می‌توانند باعث خاموشی سراسری و ناپایداری امنیت آن نیز بشوند.

کلمات کلیدی: خودرو برقی، بهینه‌سازی، الگوریتم شارژ و دشارژ.

نوع مقاله: مروری

پارسا پرهیزگار[1*]
۱-کارشناس ارشد، گروه مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

ایمیل نویسندگان و عهده‌دار مکاتبات:
1-*parsa001100par@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱-۰۵-۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱-۰۶-۲۶

مقدمه

سیستم حمل‌ونقل یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی در سطح جهان است که تقریباً یک‌سوم کل مصرف انرژی را به خود اختصاص می‌دهد. علاوه بر این، سیستم حمل‌ونقل جدید، مبتنی بر موتور احتراق داخلی (ICE)، منبع اصلی آلودگی هوا و انتشار گازهای گلخانه‌ای است. برقی سازی سیستم حمل‌ونقل در سال‌های اخیر برای به حداقل رساندن این اثرات منفی و کاهش اتکا به سوخت‌های فسیلی مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. در این راستا، تحقیقات در مورد وسایل نقلیه الکتریکی (EV) به‌عنوان جایگزینی ایمن، اهمیت خاصی پیدا کرده است. از یک دیدگاه، توسعه خودروهای الکتریکی به دلیل هزینه‌های بالا و کمبود ایستگاه‌های شارژ کند بوده است که در نتیجه، اکثر کشورها سیاست‌ها و قوانینی را برای رفع این موانع و افزایش استفاده از خودروهای الکتریکی در مقیاس وسیع اجرا کرده‌اند. طبق گزارش آژانس بین‌المللی انرژی تا سال ۲۰۳۰، ۱۳۰ میلیون خودروی برقی در سراسر جهان در جاده‌ها وجود خواهد داشت [۱].

با افزایش تعداد خودروهای برقی در جاده‌ها، کنترل شارژ و دشارژ آن‌ها در مدت‌زمان کوتاهی به‌طور فزاینده‌ای دشوار می‌شود. ادغام ناهماهنگ EV در شبکه با منابع انرژی دیگر، ممکن است مشکلاتی را در کنترل، مدیریت و عملکرد سیستم قدرت ایجاد کند و با ایجاد پیک تقاضای جدید برای سیستم قدرت، پایداری آن را به خطر بیندازد [۱]. در نتیجه، مطالعات متعددی تا به امروز برای مدیریت شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی برای یکپارچگی بهینه شبکه انجام شده است و این موضوع همچنان توجه محققان را به خود جلب می‌کند. هماهنگی شارژ و دشارژ تأثیر مخرب خودروهای برقی روی شبکه را به حداقل می‌رساند و ممکن است به افزایش کارایی سیستم به طرق مختلف کمک کند. EV ها می‌توانند برای ارائه خدمات متعددی به سیستم‌های قدرت، مانند کنترل فرکانس، کنترل ولتاژ، مدیریت بار پیک، پر کردن دره‌های پروفیل بار و کاهش تلفات برق در سیستم استفاده شوند. این موارد با در نظر گرفتن آن‌ها به‌عنوان منابع ذخیره‌سازی توزیع‌شده و استفاده از ظرفیت باتری آن‌ها در زمان اتصال به شبکه[1] (V2G) آن‌ها قابل انجام است. علاوه بر کسب درآمد از فروش شارژ خودرو به شبکه، خودروهای برقی می‌توانند به‌طور مؤثری استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر را در شبکه برق با شارژ کردن در دوره‌های غیر پیک که بازده انرژی تجدیدپذیر زیاد است و در ساعات اوج تخلیه می‌شوند، ترویج کنند. از سوی دیگر، با مدیریت شارژ و دشارژ خودروهای برقی، می‌توان از اضافه‌بار ترانسفورماتورها و خطوط انتقال جلوگیری کرد تا پیری زودرس در تجهیزات شبکه رخ ندهد. در شرایط بحرانی، از ظرفیت ایستگاه شارژ EV نیز می‌توان برای افزایش پایداری شبکه و بازیابی بارهای ضروری استفاده کرد. یکی دیگر از مزایایی که می‌توان با شارژ و دشارژ هوشمند EV به دست آورد، بهبود کارایی شبکه‌های توزیع است. در این پژوهش ابتدا مقالات در زمینه‌ی تکنیک‌های شارژ و دشارژ بهینه EV و رویکردهای مدل‌سازی آن برای ادغام با دیگر منابع شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

با بررسی مقالاتی که در زمینه خودروهای برقی تمرکز کرده‌اند، تاکنون جنبه‌های مختلفی از ادغام EV در سیستم‌های انرژی در نظر گرفته شده است و دسته‌بندی‌های متفاوتی برای استراتژی‌های شارژ و دشارژ EV معرفی شده‌اند. با این حال، فقدان یک طبقه‌بندی جامع که سایر اهداف شارژ EV و استراتژی‌های مدیریت دشارژ آن‌ها را پوشش دهد، مشاهده می‌گردد. جدا از مقالات بررسی شده در حوزه EV، هدف پژوهش پیش رو، ارائه یک بررسی جامع در مدیریت شارژ/دشارژ EV در سیستم قدرت با مروری بر روش‌های شارژ، ساختارهای کنترل و روش‌های بهینه‌سازی

1.vehicle-to-grid

آن است؛ بنابراین، ابتدا انواع روش‌های شارژ باتری EV و ساختارهای کنترلی آن‌ها در شبکه برق مورد بررسی قرار گرفته و سپس طبقه‌بندی جامعی از استراتژی‌های مدیریت شارژ و دشارژ EV با توجه به اهداف ارائه می‌شود. از این‌رو، اهدافی که با مدیریت بهینه شارژ و دشارژ خودروهای برقی قابل دستیابی است به سه دسته عملیات اهداف فنی شبکه، اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی تقسیم می‌شوند که مورد بررسی قرار می‌گیرند.

تعریف و معرفی انواع خودروهای الکتریکی

فناوری خودروهای الکتریکی اولین بار توسط گروه پورشه ابداع گردید، اما اولین خودروی هیبرید با قابلیت اتصال به پریز برق را شرکت جنرال موتورز در اواخر دهه ۱۹۶۰ معرفی کرد و بدین ترتیب آغاز PHEV را می‌توان به آن زمان مربوط دانست. «خودروی الکتریکی» به خودرویی اطلاق می‌شود که از موتور الکتریکی برای تأمین همه یا بخشی از توان مکانیکی لازم برای حرکت خودرو استفاده نماید. مرجع [۲] سه نوع خودروی الکتریکی را معرفی می‌کند که برای بحث اتصال خودرو به شبکه به کار می‌آیند: خودروی باتری دار ، خودروی پیل سوختی و خودروی هیبرید .

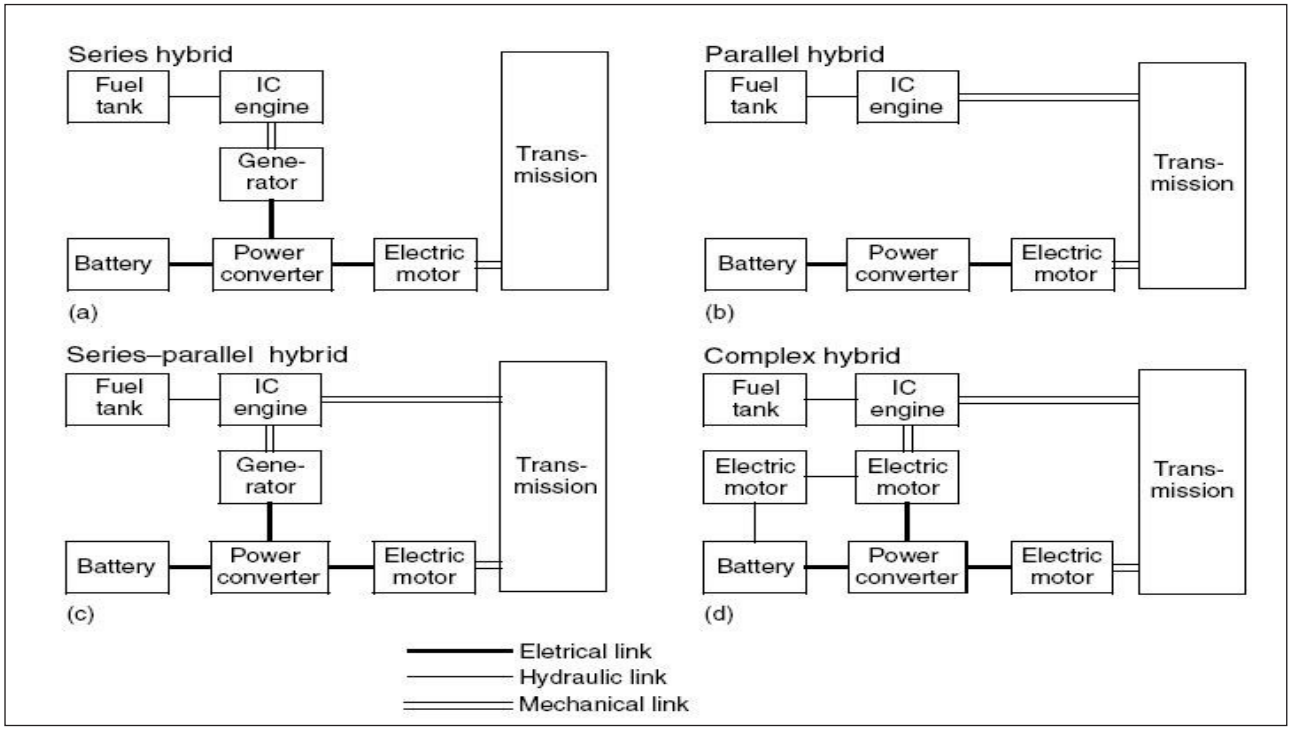
- خودروهای باتری دار انرژی را به صورت الکتروشیمیایی در باتری‌ها ذخیره می‌نمایند. ازآنجایی‌که این خودروها باید برای شارژ به شبکه وصل شوند، هزینه‌های اضافی برای پیاده‌سازی V2G در مورد این خودروها ناچیز است [۲]. خودروی باتری دار فاقد آلایندگی است و بازدهی بسیار بالایی دارد؛ اما قیمت تمام‌شده خودرو بالا بوده و مسافت اندکی را با یک بار شارژ طی می‌نماید. به دلیل وزن بالای باتری، باید از آلیاژهای سبک در ساخت آن استفاده گردد و در ضمن نیاز به نصب سیستم شارژ باتری در منازل یا محل‌های پارک این خودرو وجود دارد.
- خودروهای پیل سوختی انرژی را در قالب هیدروژن ذخیره می‌نمایند که از طریق ترکیب با اکسیژن جو در یک پیل سوختی، تولید برق می‌نماید. مشکلاتی مثل ذخیره هیدروژن و تلفات تبدیل انرژی باعث پرهزینه شدن این نوع خودروها گردیده است. آلایندگی این خودرو نیز در حد صفر است و بازدهی ۵۰ تا ۶۰ درصدی و طی مسافت زیاد از سایر مزایای این نوع خودروها محسوب می‌شود. در این خودروها یک باتری کوچک، انرژی ژنراتور و انرژی ترمز را ذخیره می‌نماید. باتری و ژنراتور، برق مورد نیاز یک یا چند موتور الکتریکی را که چرخ‌ها را می‌گردانند تأمین می‌کنند. توان موتور احتراق داخلی نیز به همین محور تزریق می‌شود [۳].

از نظر [۴]، خودروی PHEV یک خودروی هیبرید است که دو ویژگی اضافی را داراست: یک باتری بزرگ‌تر و امکان شارژ توسط پریز معمولی برق. خودروی PHEV از بنزین و توان دریافتی از پریز برق برای شارژ باتری‌اش استفاده می‌کند.

- خودروی هیبرید بر اساس نشر توان به سمت چرخه به دو دسته سری و موازی تقسیم‌بندی می‌شود؛ اما در یک دسته‌بندی دیگر (که متداول‌تر است)، آن را تعمیم به چهار گروه می‌کنند: خودروی هیبرید سری، هیبرید موازی، هیبرید سری- موازی و هیبرید مختلط. این دسته‌بندی در شکل ۱ آورده شده است [۶].

در ساختار سری، دو منبع انرژی (باتری و موتور احتراق داخلی) یک تولیدکننده توان، یعنی موتور الکتریکی را تغذیه می‌کنند. در واقع خودروی هیبرید سری، همان خودروی الکتریکی محض است که تعدادی از باتری‌های آن جای خود را به موتور احتراق داخلی داده است. در خودروهای هیبرید موازی، هر دو منبع توان (موتور الکتریکی و موتور احتراق داخلی) به طور مستقیم به سیستم انتقال قدرت و چرخها، متصل است. سیستم هیبرید موازی – سری، ترکیبی از ویژگی‌های هر دو سیستم موازی و سری را دارد. البته به‌تناسب ویژگی‌های مطلوب آن، سیستم کنترل آن، پیچیده

است. نکته قابل ذکر در مورد هیبریدهای موازی- سری، این است که با تغییر استراتژی کنترل حرکت در این نوع هیبرید، می‌توان به سیستم‌های هیبرید مختلط که ویژگی‌های آن‌ها کاملاً مطلوب هستند، دست یافت. در جدول ۱، یک مقایسه نوعی بین این سیستم‌ها انجام گرفته است.



شکل ۱. دسته‌بندی خودرو برقی هیبرید

جدول ۱. مقایسه سیستم‌های مختلف خودرو هیبرید برقی

ویژگی	هیبرید سری	هیبرید موازی	هیبرید سری- موازی
بازده سوخت در بزرگراه	+	++	++
بازده سوخت در ترافیک شهری	++	+	++
عملکرد با آلایندگی کم	++	+	++
هزینه	--	-	--
پیچیدگی سیستم	-	-	--
سادگی کنترل	-	-	--

++ : بسیار بهتر از خودروهای متداول. + : بهتر از خودروهای متداول.
-- : بسیار بدتر از خودروهای متداول . - : بدتر از خودروهای متداول .

در خودروهای هیبریدی، استراتژی کنترل‌های مختلفی برای معین کردن چگونگی ورود و خروج جریان قدرت از هر یک از اجزاء موجود در سیستم تولید قدرت، وجود دارد. این استراتژی‌های کنترل، همگی برای دستیابی به تعدادی هدف معین، طراحی می‌شوند. این اهداف که در واقع اهداف اساسی ساخت یک خودروی هیبریدی هستند، عبارت‌اند از:

۱. بهترین مصرف سوخت

۲. کمترین آلایندگی

۳. کمترین هزینه ساخت سیستم

۴. کارایی رانندگی بالا

نهادهای مشارکت‌کننده برای اجرای V2G

اتصال خودرو به شبکه، یکی از فناوری‌های آینده سیستم‌های قدرت است. آینده‌ای که در برخی کشورها حدود دو دهه تا تحققش باقی است و شالوده علمی آن از امروز ریخته شده است. آنچه که مسلم است آن است که ورود خودروهای الکتریکی به صنعت حمل‌ونقل ایران در آینده‌ای نه‌چندان دور اجتناب‌ناپذیر است؛ اما سؤال اینجاست که جایگاه این خودروها در سیستم قدرت و نهادهای موجود در صنعت برق چیست و ساختار نهادی برای اجرای V2G چگونه باید تعریف شود؟ برای پاسخگویی به این پرسش، نهادهای درگیر در بحث اتصال خودرو به شبکه در ادامه این بخش به‌طور مختصر معرفی شده و چگونگی تقسیم وظایف بین این نهادها را تعریف کرده است.

حاکمیت

نقش حاکمیت در صنعت برق، سیاست‌گذاری و تعیین خطوط کلان برای رشد و توسعه ابعاد مختلف این صنعت و افزایش رفاه اجتماعی است. سطوح کلان حاکمیت بر صنعت برق کشور شامل دولت و مجلس شورای اسلامی است که دولت از طریق وزارت نیرو و شرکت توانیر به‌عنوان بازوی اجرایی خود، وظایف حاکمیتی خود را به انجام می‌رساند و ضمناً لوایح مورد نیاز را به مجلس تقدیم می‌کند. با توجه به اینکه ورود فناوری‌های جدید به بازار همچون V2G نیاز به بسترسازی دارد، حاکمیت باید با تدوین نقشه راه به توسعه این مفهوم بپردازد. نقش دیگر حاکمیت تدوین و تنظیم قوانین، مقررات و استانداردهای لازم در راستای فراهم آوردن زیرساخت‌های پیاده‌سازی V2G است. به‌علاوه برای تکمیل سازوکارهای مورد نیاز برای گسترش بازار V2G، لازم است که حاکمیت از طریق اعطای مشوق‌ها و امتیازهای مالی همچون معافیت‌های مالیاتی و غیره، از ترویج این مفهوم پشتیبانی نماید.

شرکت‌های عملیاتی در حوزه برق‌رسانی

شرکت‌هایی از صنعت برق که در بحث V2G به‌طور مستقیم درگیر می‌شوند، شرکت‌های توزیع می‌باشند که مسئول بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری و توسعه شبکه توزیع هستند. در اکثر کشورهای دنیا (به‌جز تعداد اندکی مانند بریتانیا و نیوزلند) شرکت توزیع مسئول نصب، نگهداری و قرائت کنتورهای مصرف‌کنندگان است؛ بنابراین نصب کنتورهای هوشمند و سایر تجهیزات مربوطه برای اجرای V2G نیز با شرکت توزیع است. مسئولیت مدیریت شبکه و امنیت عرضه بر عهده‌ی بهره‌بردار سیستم است که در ایران شرکت مدیریت شبکه برق ایران این نقش را بر عهده دارد. بهره‌بردار سیستم تنها به‌طور غیرمستقیم در بحث V2G وارد می‌شوند و آن از جنبه مشارکت شرکت‌های تجمیع کننده خودروهای الکتریکی در بازار برق و ارسال فرمان‌ها برای این شرکت‌هاست. تجمیع کنندگان فرمان‌های بهره‌بردار سیستم را به خودروها منتقل می‌سازند.

شرکت‌های خودروساز

لازمه پیاده‌سازی V2G وجود خودروهای الکتریکی است که قابلیت اتصال به شبکه برق و تزریق توان به شبکه را

داشته باشند. شرکت‌های خودروساز باید استانداردهای وضع شده توسط حاکمیت را در تولید خودروها و تجهیزات جانبی خودرو که برای تحقق V2G لازم است، در نظر بگیرند.

شرکت‌های سازنده باتری

بدون شک باتری مهم‌ترین یا حداقل یکی از مهم‌ترین بخش‌های خودروهای الکتریکی است. بخش مهمی از هزینه خودروهای الکتریکی مربوط به باتری این خودروهاست و تحقیق و توسعه، طراحی و تولید باتری‌هایی که بتواند مشخصات لازم برای استفاده در خودروهای الکتریکی را داشته باشند حائز اهمیت فراوانی است. باتری‌های قدیمی عمر کمتری داشتند و تعویض باتری‌های فرسوده با باتری‌های جدید چالشی در استفاده از خودروهای الکتریکی محسوب می‌شد. عمر متوسط این باتری‌ها امروزه به حدود ده سال رسیده است و تحقیقات گسترده‌ای برای افزایش عمر مفید آن‌ها در حال انجام است. دیگر مشخصه مهم، وزن و حجم باتری است که می‌تواند با معیار چگالی انرژی (میزان انرژی قابل ذخیره تقسیم بر وزن باتری) سنجیده شود. معیارهای دیگری نیز وجود دارند (نظیر عمق دشارژ یا DoD[1]) که برای یک باتری مورد استفاده در خودروهای الکتریکی اهمیت دارند که در صورت هدف‌گذاری برای بومی‌سازی این فناوری باید توسط شرکت‌های سازنده باتری مدنظر قرار گیرند. DoD بیان می‌کند که نه‌تنها نباید باتری خودرو تا آخرین حد تخلیه شود، بلکه وجود شارژ پسماند در آن باعث افزایش عمر الکترودهای شیمیایی موجود در باتری خواهند شد. فناوری‌های مختلفی در تولید باتری‌ها وجود دارد که برخی از آن‌ها برای خودروهای الکتریکی استفاده می‌شوند. مجموعاً سه فناوری مناسب برای استفاده به‌عنوان باتری خودروهای الکتریکی عبارتند از: باتری Lithium-ion، Lead-Acid و Nieckel Metal Hydride.

شرکت‌های سازنده تجهیزات پشتیبان

راه‌اندازی و استقرار سیستم V2G همانند هر فناوری دیگری، نیازمند بازیگرانی برای تأمین و بهره‌برداری زیرساخت‌های لازم آن است. این شرکت‌ها با تولید تجهیزات سخت‌افزاری همچون ایستگاه‌های شارژ و دشارژ، اندازه‌گیرهای هوشمند، تجهیزات مخابرات بی‌سیم و شبکه‌ای و همچنین با ارائه خدمات نرم‌افزاری مربوط به این تجهیزات و شبکه‌های مخابراتی و رایانه‌ای زیرساخت‌های لازم برای V2G را فراهم می‌آورند. یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌های لازم برای سیستم V2G، ایستگاه‌های شارژ و دشارژ سریع ماشین‌هاست که نیاز به استفاده از فناوری‌های نوین برای تولید آن‌ها دارد. این ایستگاه‌ها باید قابلیت اتصال دو سویه به شبکه را داشته و مطابق با نیازمندی‌ها و استانداردهای شرکت‌های عملیاتی در حوزه برق‌رسانی طراحی و ساخته شوند. دسته دیگر زیرساخت‌ها مربوط به نیازمندی‌های ارتباطی و اندازه‌گیری شبکه هوشمند است. برای راه‌اندازی V2G با تمامی کارکردها و مزایایی که پیش‌ازاین بدان پرداخته شد نیازمند شبکه‌ای هوشمند برای مدیریت و کنترل شارژ و دشارژ ماشین‌ها می‌باشد. راه‌اندازی شبکه هوشمند خود نیاز به اندازه‌گیرهای هوشمند و سیستم‌های مخابراتی دارد. سیستم‌های مخابراتی در شبکه هوشمند با در نظر داشتن خودروهای الکتریکی می‌تواند به دو صورت PLC و بی‌سیم تشکیل گردد.

مالکان خودروهای برقی

مالکان خودروهای الکتریکی، برق مورد نیاز برای شارژ خودروی خود را از شرکت‌های توزیع برق خریداری می‌نمایند و در عین حال می‌توانند باتری خودرو را در V2G مشارکت دهند. چنانچه مصرف‌کننده بخواهد در فرآیند پاسخ تقاضا شرکت نماید و یا از خودروی خود برای مشارکت در بازار بهره ببرد، نیاز به کنتور هوشمند یا حداقل کنتور بازه‌ای[2] است. کنتور بازه‌ای این قابلیت را دارد که مصرف انرژی الکتریکی

1.Depth of discharge
2. .Interval Meter

در بازه‌های زمانی یک‌ساعته یا کمتر را اندازه‌گیری نماید. کنتورهای قدیمی فاقد این قابلیت بوده و تنها مصرف برق را به‌صورت تجمعی اندازه‌گیری نموده و معمولاً به‌صورت ماهانه یا چندماهه قرائت می‌شوند و برای V2G مناسب نیستند.
مالک خودرو با قوانین فعلی بازارهای برق تنها می‌تواند از طریق یک نهاد واسطه به نام تجمیع کننده به‌طور غیرمستقیم در بازار برق مشارکت داشته باشد. مالکین خودروهای الکتریکی با تجمیع کننده‌ها وارد مذاکره و عقد قرارداد شده و بدین ترتیب می‌توانند به‌طور غیرمستقیم در بازارهای برق حضور داشته باشند.

شرکت‌های تجمیع کننده

علت ایجاد نهادی به‌عنوان تجمیع کننده[1] از منظر [۲۰] آن است که از نقطه‌نظر شبکه، توان مصرفی خودروهای الکتریکی و یا توان تزریقی‌شان به شبکه در حالت V2G، بسیار ناچیز بوده و همانند یک نویز برای شبکه محسوب می‌شود و لذا مشارکت مستقیم این خودروها در بازار برق به دلیل ابعاد کوچکشان مناسب نیست. دلیل دیگر آنکه، بهره‌بردار شبکه به علت تعدد زیاد این خودروها نمی‌تواند همان‌طور که با سایر مشارکت‌کنندگان در بازار عمده‌فروشی تعامل مخابراتی داشته و فرامین کنترلی را ارسال می‌کند، با سیستم کنترل‌کننده‌ی تک‌تک خودروهای الکتریکی ارتباط داشته باشد. در [۲۰] تجمیع کننده واسط برقراری ارتباط خودروی الکتریکی با ISO[2]، RTO[3] و خرده‌فروش است. به‌علاوه، تجمیع کننده برای خودروها باتری، تعمیرات و خدمات پارکینگ را تأمین می‌کند. تجمیع کننده با کارخانه‌های سازنده باتری و صاحبان پارکینگ در ارتباط است.

ارتباط میان نهادی

پیاده‌سازی و توسعه مفهوم اتصال خودرو به شبکه یک فرایند میان سازمانی است که نیاز به مشارکت نهادهای مختلف اشاره‌شده در بخش‌های گذشته دارد. این مشارکت باید در قالب یک ساختار نهادی با روابط تعریف‌شده تحقق یابد. شکل (۲) این ساختار کلان را پیشنهاد می‌دهد.

ساختارهای کنترل شارژ و دشارژ EV در سیستم قدرت

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، به دلیل ظرفیت محدود هر EV، تبادل توان بین EV و شبکه برق معمولاً از طریق تجمیع کننده‌ها انجام می‌شود. از سوی دیگر، تجمیع کننده‌ها می‌توانند به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی را کنترل کنند.

ساختار کنترل متمرکز

در یک ساختار کنترل متمرکز، تجمیع‌کننده‌ها معمولاً رفتار شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی را مستقیماً مدیریت و کنترل می‌کنند و مالکان خودروهای برقی اختیار خود را برای کنترل شارژ و دشارژ EV سلب می‌کنند.

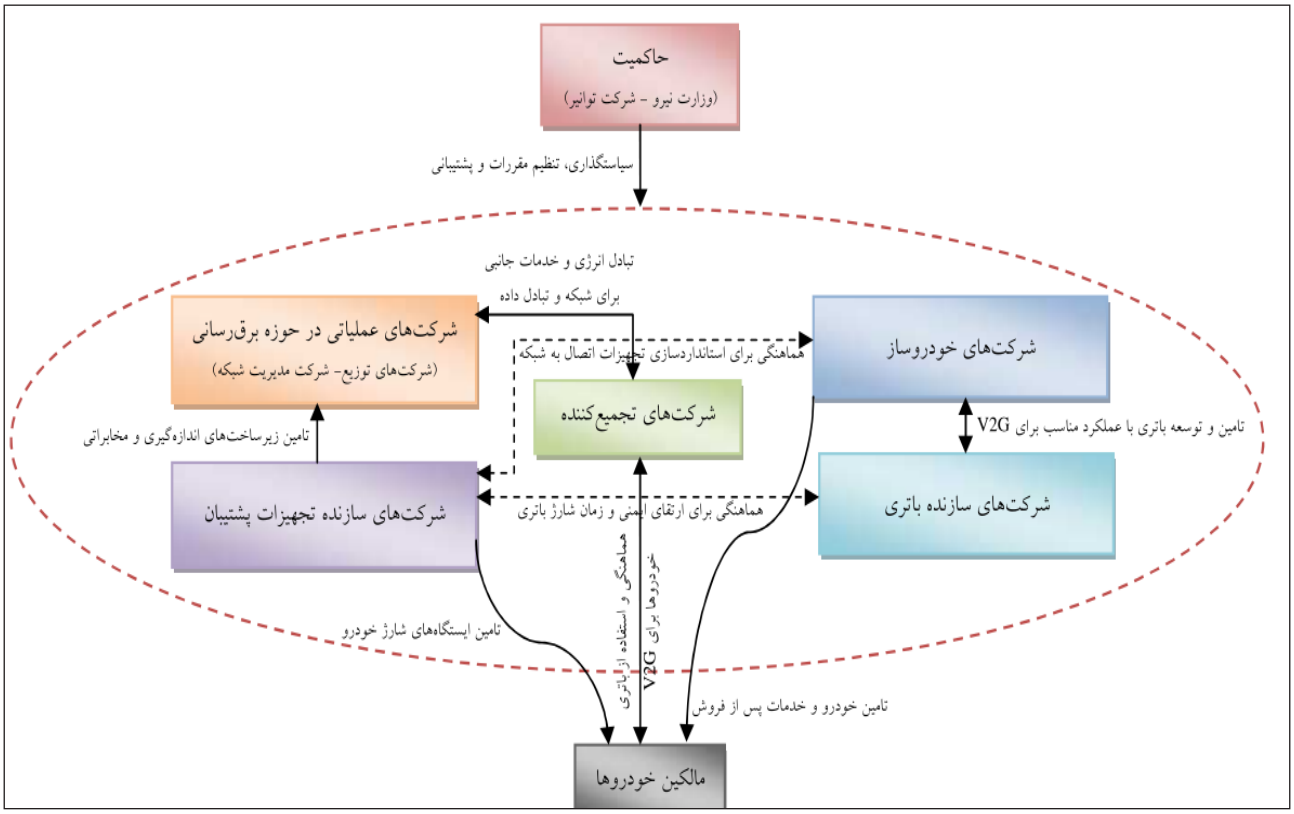
ساختار کنترل غیرمتمرکز

در کنترل غیرمتمرکز، برخلاف کنترل متمرکز، هر صاحب خودروی برقی تصمیم می‌گیرد باتری را با توجه به هدف خاص خود شارژ یا تخلیه کند که معمولاً برای به حداقل رساندن هزینه شارژ است؛ بنابراین، اپراتور سیستم یا تجمیع‌کننده می‌تواند به‌طور غیرمستقیم رفتار شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی را با کمک استراتژی‌های قیمت‌گذاری کنترل کند و بار شارژ خودروهای الکتریکی را از ساعات اوج مصرف به ساعات غیر اوج، با مشوق‌های قیمتی مناسب انتقال دهد.

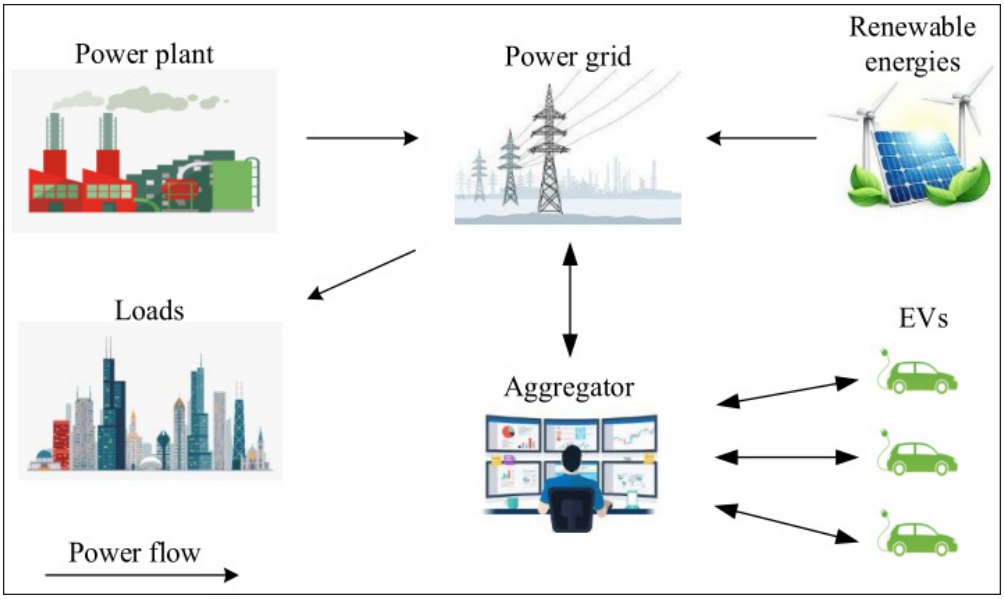
ساختار کنترل سلسله مراتبی

چارچوب کنترل سلسله مراتبی دارای ویژگی‌های کنترل متمرکز و غیرمتمرکز است و از نظر بار محاسباتی و نیاز به شبکه ارتباطی، نسبت به کنترل متمرکز و غیرمتمرکز مزایای

1 Aggregator
2. Independent System Operators
3. Regional Transmission Organizations



شکل ۲. ساختار میان سازمانی



شکل۳. تبادل برق بین خودروهای برقی و شبکه هوشمند

بیشتری دارد. کنترل سلسله مراتبی معمولاً ساختاری دو لایه دارد. در لایه بالایی، یک کنترل‌کننده مرکزی، مانند یک DSO، برای همه جمع کننده‌های EV برنامه‌ریزی می‌کند. در لایه زیرین، هر تجمیع کننده وظیفه کنترل چندین EV را بر عهده دارد و زمان شارژ و دشارژ هر EV را برنامه‌ریزی می‌کند.

روش‌های شارژ باتری‌های EV در سیستم قدرت

به‌طورکلی، خودروهای برقی که نیاز به شارژ از شبکه برق دارند را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: خودروهای برقی با باتری[1] (BEVs) و خودروهای هیبریدی پلاگین[2] (قابل اتصال به پریز و استفاده از بنزین). BEV ها فقط از انرژی الکتریکی ذخیره‌شده در باتری برای پیشرانه استفاده می‌کنند، در حالی که PHEV ها می‌توانند از سوخت‌های فسیلی نیز استفاده کنند. از این‌رو، BEV ها دارای باتری‌هایی با ظرفیت بالاتر از PHEV ها هستند. به‌طور کلی، روش‌های شارژ باتری EV را می‌توان به روش‌های رسانایی[3] (اتصال مستقیم به پریز برق)، القایی[4] (بدون سیم یا وایرلس) و تعویض باتری[5] تقسیم کرد [۲۱]. در این بخش، این سه روش شارژ معرفی می‌شوند، اما از آنجایی که در بیشتر کاربردهای عملی از شارژ رسانایی برای شارژ باتری‌های EV استفاده می‌شود، ویژگی‌ها و اثرات این نوع شارژ از دیدگاه‌های مختلف در این بخش بررسی می‌شود.

کاربردهای خودروهای الکتریکی در شبکه

انرژی الکتریکی که خودروهای دارای قابلیت V2G به شبکه تزریق می‌کنند، می‌تواند کاربردهای متفاوتی در بهبود عملکرد شبکه قدرت داشته باشد. در ادامه با هدف آشنایی با این کاربردها، هرکدام از آن‌ها به‌صورت اجمالی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

تأمین بار پایه

تأمین بار پایه با استفاده از قابلیت V2G خودروهای الکتریکی از نظر اقتصادی به‌صرفه نیست، زیرا هزینه انرژی تولیدی توسط نیروگاه‌ها به ازای هر کیلووات ساعت (kWh) کمتر از خودروهای الکتریکی می‌باشد. لذا به‌منظور استفاده از انرژی خودروهای الکتریکی باید از تجمیع کننده‌ها استفاده نمود.

تأمین توان در ساعات پرباری

خودروهای الکتریکی می‌توانند با تأمین بخشی از انرژی الکتریکی مورد نیاز شبکه در ساعاتی از روز که تقاضا برای مصرف بالا است، به بهبود وضعیت شبکه کمک شایانی نمایند.

تأمین رزرو گردان

رزرو گردان میزانی از ظرفیت تولید مازاد بر مصرف است که می‌تواند در صورت نیاز، با سرعت قابل قبولی (مثلاً ظرف مدت ۱۰ دقیقه) برای تحویل توان به شبکه آماده شود؛ بنابراین خودروهای الکتریکی به دلیل سرعت پاسخگویی بالا، برای تأمین رزرو گردان بسیار مناسب می‌باشند.

تنظیم ولتاژ و فرکانس

تنظیم ولتاژ و فرکانس به معنای حفظ ولتاژ و فرکانس در یک محدوده مشخص، می‌باشد که از طریق برقراری توازن میان تولید و مصرف در شبکه انجام می‌شود. تنظیم فرکانس و ولتاژ به این صورت انجام می‌گیرد که بهره‌بردار شبکه به‌صورت لحظه‌ای[6] با واحدهای تولید، ارتباط برقرار کرده و با توجه به وضعیت شبکه دستورات لازم را برای آن‌ها ارسال می‌کند و واحدهای تولید نیز به‌سرعت (ظرف مدت یک دقیقه یا کمتر) پاسخ داده و میزان تولید خود را کاهش یا افزایش می‌دهند؛ بنابراین خودروهای الکتریکی می‌توانند به دلیل سرعت پاسخگویی بالایی که دارند، به‌خوبی برای کاربرد

1.Battery electric vehicles
2. Plug-in hybrid electric vehicles
3. Conductive charging
4. Inductive charging
5. battery swapping method
6. Real time

تنظیم ولتاژ و فرکانس مورد استفاده قرار گیرند.

چالش‌های اتصال خودرو به شبکه

یکی از موضوعاتی که در گسترش استفاده از خودروهای الکتریکی از اهمیت زیادی برخوردار است، نحوه تعامل این خودروها با شبکه قدرت می‌باشد. به‌سادگی می‌توان پیش‌بینی کرد که اتصال خودروهای الکتریکی به شبکه می‌تواند باعث ایجاد گرفتگی[1]، افزایش افت ولتاژ، افزایش تلفات، بالا رفتن پیک بار و بر هم خوردن تقارن در شبکه شود.

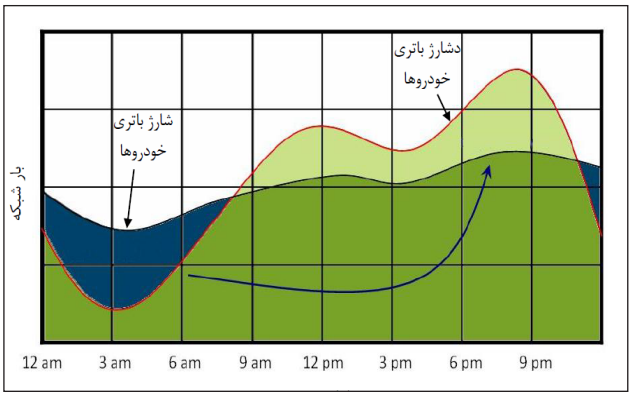
یک راه‌حل مناسب برای جلوگیری از تأثیرات نامطلوب خودروهای الکتریکی بر شبکه، کنترل فرآیند شارژ آن‌ها می‌باشد. بدین معنا که یک عامل کنترل‌کننده (مثلاً بهره‌بردار شبکه) با توجه به میزان مصرف و وضعیت کلی سیستم در ساعات مختلف روز، مقدار توان بهینه اختصاص داده شده به خودروها برای شارژ باتری آن‌ها را مشخص می‌کند. بدین ترتیب، نه‌تنها دیگر شارژ خودروهای الکتریکی برای شبکه تهدیدی ایجاد نمی‌کند، بلکه می‌تواند فرصتی برای بهبود عملکرد آن ایجاد کند، زیرا به‌عنوان مثال می‌توان با شارژ خودروهای الکتریکی در ساعات کم باری، منحنی بار را هموارتر نمود. از سوی دیگر، با توجه به خصوصیت ذاتی خودروهای الکتریکی می‌توان به آن‌ها به‌عنوان یکسری واحد ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی نگاه کرد که در صورت لزوم می‌توانند انرژی خود را در اختیار شبکه قرار دهند و در بهبود عملکرد شبکه نقش مؤثری داشته باشند.

نقش خودروهای الکتریکی در بهبود عملکرد شبکه قدرت

خودروهای الکتریکی در صورت کنترل مناسب، می‌توانند نقش مؤثری در بهبود عملکرد شبکه و بهره‌برداری مؤثر از تجهیزات آن داشته باشند.

هموار نمودن منحنی بار شبکه

با کاهش شدید مصرف در ساعات کم باری، بازدهی و کارایی سیستم نیز کاهش پیدا می‌کند. بنابراین استفاده از خودروهای الکتریکی برای دریافت انرژی در ساعات کم باری، با هموارتر نمودن منحنی بار شبکه هم از نظر فنی و هم از نظر اقتصادی وضعیت شبکه را بهبود می‌بخشد. همچنین اگر خودروهای الکتریکی انرژی ذخیره‌شده در باتری خود را در ساعات پرباری به شبکه بازگردانند، می‌توانند تا حد زیادی جایگزین واحدهای تولیدی مورداستفاده در ساعات پرباری شوند. شکل ۴ چگونگی هموار شدن منحنی بار شبکه با استفاده از قابلیت‌های خودروهای الکتریکی را به‌صورت ساده نشان می‌دهد.



شکل ۴. نحوه هموار شدن منحنی بار شبکه یا به‌کارگیری قابلیت‌های خودروهای الکتریکی

مشارکت در تنظیم فرکانس

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، واحدهای تولید انرژی الکتریکی علاوه بر تأمین بار پایه، کارکرد مهم دیگری نیز دارند که تنظیم فرکانس نامیده می‌شود. هدف اصلی تنظیم فرکانس، برقراری تعادل بین تولید و مصرف در شبکه می‌باشد. فرکانس در واقع شاخصی است که تعادل بین تولید و مصرف را نشان می‌دهد، به این صورت که اگر تولید از مصرف کمتر باشد، فرکانس کاهش پیدا می‌کند و اگر تولید بیشتر از

1. Congestion

مصرف باشد، فرکانس افزایش پیدا می‌کند؛ بنابراین با کاهش فرکانس، میزان تولید نیروگاه‌ها افزایش داده می‌شود و با افزایش فرکانس، میزان تولید نیروگاه‌ها کاهش داده می‌شود.

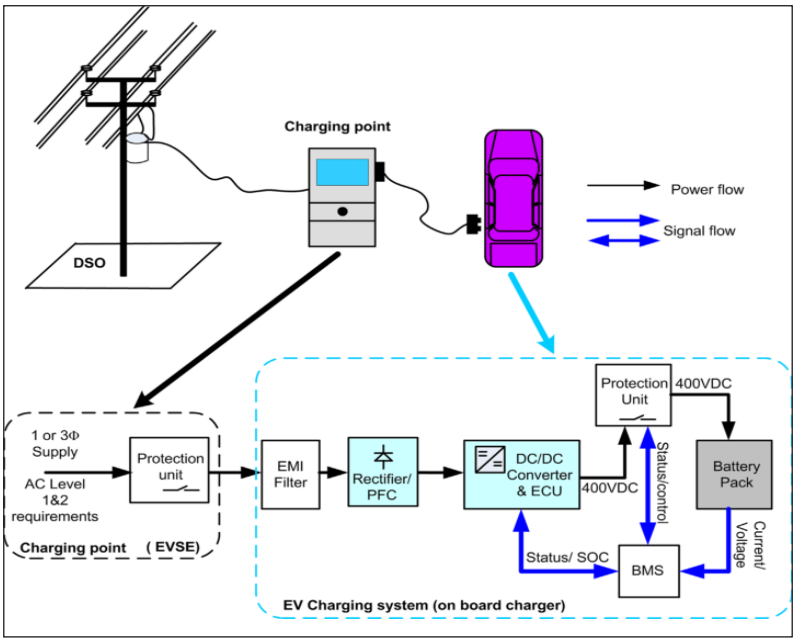
تنظیم فرکانس، نیازمند سرعت پاسخگویی بالایی از سوی واحدهای تولیدکننده است، بنابراین استفاده از انرژی ذخیره‌شده در باتری خودروهای الکتریکی به دلیل سرعت بالای عملکرد آن‌ها، می‌تواند مناسب باشد. تنظیم فرکانس خودروهای الکتریکی به این صورت انجام می‌شود که در مواقعی که تولید از مصرف کمتر می‌شود، خودروها به‌عنوان تولیدکننده عمل کرده و انرژی ذخیره‌شده خود را در اختیار شبکه قرار می‌دهند و در مواقعی که تولید از مصرف بیشتر می‌شود، خودروها به‌عنوان بار عمل کرده و از شبکه، انرژی دریافت می‌کنند و به این ترتیب باعث ایجاد تعادل در شبکه می‌شوند.

علاوه بر آنچه بیان شد، خودروهای الکتریکی می‌توانند برای تأمین توان راکتیو در شبکه نیز مورداستفاده قرار گیرند که البته این موضوع نیازمند آن است که خودروها دارای تجهیزات الکترونیک قدرت مورد نیاز باشند. کاربرد خودروهای الکتریکی برای تأمین توان راکتیو تاکنون چندان موردتوجه قرار نگرفته است، اما این امکان وجود دارد که در آینده بیشتر به آن پرداخته شود. کاربرد دیگری که خودروهای الکتریکی می‌توانند داشته باشند آن است که در ایجاد تعادل محلی[1] در شبکه توزیع مشارکت کنند، به‌خصوص در مناطقی که تجهیزات شبکه توزیع با حداکثر ظرفیت خود کار می‌کنند و احتمال ایجاد اضافه‌بار در آن‌ها زیاد می‌باشد.

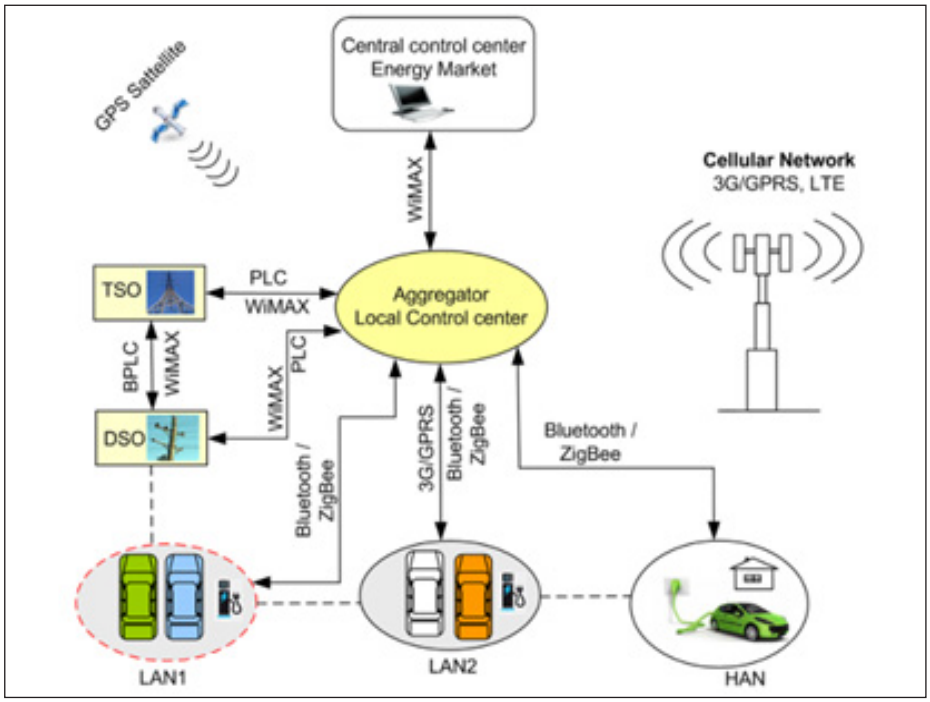
با توجه به دورنمای فوق، تعیین اندازه و محل بهینهٔ ایستگاه‌های شارژ PHEV به‌عنوان نوع جدیدی از تولید پراکنده (DG) می‌تواند بیشترین توجه را به خود جذب کند. تخصیص بهینهٔ ایستگاه‌های شارژ PHEV می‌تواند تلفات شبکه را کاهش دهد، پروفایل ولتاژ و قابلیت اطمینان را بهبود بخشد و در نتیجه مزایای اقتصادی برای DSMها به همراه داشته باشد. مطالعات زیادی در خصوص مسائل مربوط به EVها و تأثیرات آن‌ها بر سیستم قدرت انجام شده است. در بسیاری از این مطالعات نشان داده شده است که تأثیر EVها بستگی به زمان‌بندی شارژ/ دشارژ و تعرفه‌های برق دارد. لذا به‌عنوان جمع‌بندی می‌توان بیان نمود که ریزشبکه‌های مستقل، به‌منظور بهبود عملکرد خود و تأمین بارهای محلی، به منابع تولید پراکنده نیاز دارند که در آن میان، می‌توان به خودروهای الکتریکی نیز، به‌عنوان بخشی از منبع تأمین توان اشاره نمود. همچنین مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های شارژ خودرو نیز باید در قسمت برنامه‌ریزی زیرساخت‌های شبکه، قبلاً موردتوجه قرار گرفته باشد. در این میان، قیودی مانند ظرفیت باتری خودروها، نرخ شارژ و دشارژ آن‌ها، سرویس و نگهداری باتری خودرو، نحوه اتصال آن‌ها به شبکه طبق تعرفه زمان‌بندی‌شده برق، از مدار خارج شدن ناگهانی برخی از منابع تولید توان و ... مسئله ورود PHEVها به شبکه را با چالش روبرو کرده است.

یک نمونه از سیستم کنترل شارژ خودرو برقی در شکل ۵ نشان داده شده است که با توجه به آن، می‌توان ضرورت استفاده از رابط‌های الکترونیک قدرت را درک نمود. فیلترهای حذف نویز نیز در این سیستم استفاده شده و هر خودرو، یک سیستم کنترل بهینه شارژ باتری اختصاصی خواهد داشت. شایان‌ذکر است که ساختار تجمیع کننده‌ها نیز در شکل ۶ نشان داده شده است. ازجمله مزایا و معایب استفاده از PHEVها در بازار خدمات جانبی، تنظیم فرکانس، مسطح سازی پروفیل بار، پیاده‌سازی آن‌ها، بستر مخابراتی لازم برای ارتباط دو سویه و ... می‌توان به نکات اشاره شده در جدول ۲ اشاره نمود.

1. Local equilibrium

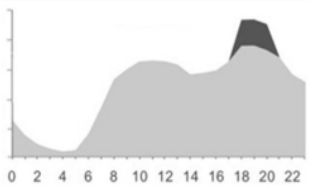
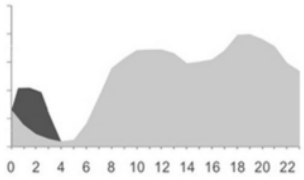
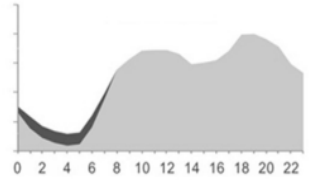
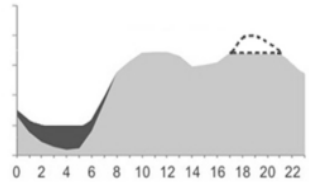


شکل ۵. یک نمونه از سیستم کنترل شارژ خودرو برقی [۳۲]



شکل۶. ساختار تجمیع کننده‌ها و بستر ارتباطی [۳۲]

جدول ۲. مزایا و معایب استفاده از خودروهای برقی [۳۳]

		Advantages	Drawbacks
Uncontrolled Charging		✓ Easy implementation ✓ User friendly	× Overload of transformers and lines × Voltage deviations × Peak power increase × Increase of electricity CO_2 intensity × Electricity cost increase × Needs to reinforce the grid
Off-peak Charging		✓ Easy implementation ✓ Demand profile flattened ✓ Better integration of wind energy at off-peak hours ✓ Delay in grid investments	× Imbalances due to rapid increase of power consumed by PEVs × Possible overload of transformers and lines × Possible voltage deviations × Willingness of the customer required
Smart Charging (Valley filling)		✓ Ancillary services provision ✓ Demand profile flattened ✓ Better integration of wind energy at off-peak hours ✓ Delay in grid investments	× Complex implementation × ICT technologies required × Willingness of the customer required
Smart Charging (Peak saving)		✓ Ancillary services provision ✓ Peak power reduction ✓ Optimal integration of intermittent RES ✓ Reduction of electricity CO_2 intensity ✓ Less investments in network reinforcements	× Very complex implementation × ICT technologies required × Willingness of the customer required × Premature degradation of batteries resulting of using V2G × Energy losses in grid-battery-grid transmissions

جمع‌بندی

در ابتدا باید تصمیمات و روحیه صاحبان خودروهای برقی هنگام توسعه استراتژی شارژ و کنترل شبکه در نظر گرفته شود؛ زیرا منطقی است که فرض شود مالک خودرو مایل است هزینه کارکرد خودروها را تا حد امکان پایین نگه دارد. این مورد شامل هزینه انرژی مصرفی و هزینه فرسودگی باتری می‌شود. باتری‌های الکتریکی با گذشت زمان تحلیل می‌روند و شارژ و دشارژ مکرر این فرآیند را سرعت می‌بخشد. در نتیجه، هنگام در نظر گرفتن یک استراتژی V2G که در آن باتری ممکن است بارها و بارها شارژ و دشارژ شود، هزینه‌های تسریع فرسودگی باید در نظر گرفته شود. با توجه به این، احتمالاً مالک خودروهای برقی به‌نوعی انگیزه مالی برای رضایت در مشارکت به‌صورت V2G نیاز خواهد داشت که باعث پیری سریع‌تر باتری می‌شود. از آنجایی که باتری‌ها یکی از مهم‌ترین و پرهزینه‌ترین اجزای خودروهای الکتریکی هستند هزینه فرسودگی باتری بر مزایای اقتصادی شارژ و دشارژ هوشمند EV تأثیر می‌گذارد. در نتیجه، فرسودگی باتری EV به‌طور گسترده به‌عنوان یک مانع مهم برای مشارکت EV در فاز V2G شناخته می‌شود. در نتیجه، اپراتور سیستم یا جمع‌کننده EV باید یک مدل ریاضی مناسب از فرسودگی باتری داشته باشد تا بهترین تصمیم را در مورد شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی در شبکه برق بگیرد. طبق نتایج حاصل از [۳۵]، الگوریتم‌های مختلفی برای مدیریت شارژ و دشارژ

خودروهای برقی با توجه به نوع اتصال خودرو به شبکه معرفی شده‌اند که در جدول ۳، می‌توان خلاصه آن‌ها را مرور نمود:

جدول ۳. الگوریتم‌های مختلف برای مدیریت شارژ و دشارژ خودروهای برقی با توجه به نوع اتصال خودرو به شبکه [۳۵]

الگوریتم	هدف	ساختار کنترل	V2G یا G2V یا هر دو؟
ژنتیک GA [36]	تنظیم فرکانس ثانویه، به حداکثر رساندن راندمان ایستگاه شارژ، کاهش هزینه‌های مالک خودروهای برقی	متمرکز	G2V
برنامه‌ریزی غیرخطی NLP [37]	به حداقل رساندن هزینه‌های شارژ EV از دیدگاه تجمیع کننده، به حداقل رساندن تلفات، جبران توان راکتیو	سلسله‌مراتبی	G2V
شبه مغناطیسی IEMA [38]	پیک سایی، به حداقل رساندن تلفات، به حداقل رساندن هزینه مالک خودروهای برقی	متمرکز	هر دو
تکامل تفاضلی DE [39]	به حداقل رساندن ضریب عدم تعادل ولتاژ، به حداقل رساندن جریان خنثی، به حداقل رساندن انحراف ولتاژ شین، به حداقل رساندن تلفات	متمرکز	هر دو
تئوری بازی Game theory [40]	به حداقل رساندن هزینه شارژ باتری صاحب خودروی برقی، پیک سایی	غیرمتمرکز	G2V
ازدحام ذرات PSO [41]	به حداقل رساندن ضریب عدم تعادل ولتاژ	متمرکز	هر دو
برنامه‌ریزی آمیخته با عدد صحیح MIP [42]	به حداکثر رساندن سود تجمیع کننده‌های EV	متمرکز	هر دو
برنامه‌ریزی درجه دوم آمیخته با عدد صحیح MIQP [43]	پشتیبانی از توان باد به‌عنوان منبع انرژی تجدیدپذیر، به حداقل رساندن هزینه شارژ مالک، و کاهش فرسودگی باتری	متمرکز	هر دو
فازی Fuzzy [44]	حداکثر کردن سود اپراتور پارکینگ	متمرکز	G2V

نتیجه گیری

به دلیل آنکه خودرو می‌تواند در ساعات کم باری که قیمت برق ارزان است، برق را در باتری خود ذخیره نموده و در ساعات پرباری که قیمت برق بالاست، آن را به شبکه تحویل دهد، می‌تواند سودآور باشد. همچنین خودروها می‌توانند در بازار خدمات جانبی به‌عنوان رزرو مورد بهره‌برداری قرار گیرند تا هرگاه بر اثر وقوع حادثه، نیاز به تزریق فوری توان الکتریکی توسط خودروها به شبکه قدرت باشد، خودروهای پارک شده‌ای که به شبکه متصل هستند، از طریق دشارژ باتری خود بتوانند مانند ارائه‌دهندگان رزرو گردان عمل نمایند. به‌علاوه خودروهای الکتریکی می‌توانند در بازار تنظیم فرکانس نیز مشارکت نموده و از طریق شارژ و دشارژ توان الکتریکی متناسب با فرامین دریافتی از بهره‌بردار شبکه تحت قالب سیگنال AGC، به حفظ فرکانس شبکه در محدوده مجاز خود کمک رسانند. هنگامی‌که به خودروهای الکتریکی پارک شده و متصل به شبکه، به‌عنوان منابع ارائه‌دهنده خدمت به شبکه برق نگاه شود، ورود به بحث V2G صورت گرفته است. به بیان دیگر V2G به معنای استفاده از ظرفیت باتری خودروهای الکتریکی به‌عنوان ذخیره کننده انرژی الکتریکی برای ارائه توان الکتریکی یا خدمات جانبی به شبکه قدرت است.

یکی از پارامترهای مهم دیگر V2G کنترل حالت شارژ

می‌باشد. بحث کنترل SOC یعنی باید بتوان با ارزیابی میزان نرخ شارژ و دشارژ خودروها، بیشترین بهره‌وری را از آن‌ها در بهره‌برداری از شبکه حاصل کرد. پس خرید انرژی در ساعات ارزان با قیمت شارژ پایین و دشارژ در پیک ها با قیمت دشارژ بالا در دستور کار قرار خواهد گرفت. همچنین با وجود فرآیند V2G و G2V، می‌توان مسئولیت تأمین درصدی از بار از شبکه را به خودروها محول نمود. به‌علاوه از آنجایی که خود خودروها هم برای شبکه به‌عنوان بار (در برخی لحظات) محسوب می‌شوند، لذا باید یک استراتژی مدیریت توان بهینه پیاده‌سازی نمود تا هم سودآوری پایین نیاید و هم راندمان شبکه در هنگام تأمین بار، افزایش یابد.

سپاسگزاری IRM

مراجع

1. Saldaña, G.; San Martín, J.I.; Zamora, I.; Asensio, F.J.; Oñederra, O. Electric Vehicle into the Grid: Charging Methodologies Aimedat Providing Ancillary Services Considering Battery Degradation.Energies 2019,12, 2443.
2. Bañol, A.N.; Hashemi, S.; Andersen, P.B.; Træholt, C.; Romero, R. Distribution system services provided by electric vehicles:Recent status, challenges, and future prospects.IEEE Trans. Intell. Trans-Portation Syst.2019,20, 4277–4296.
3. Yanchong, Z.; Niu, S.; Shang, Y.; Shao, Z.; Jian, L. Integrating plug-in electric vehicles into power grids: A comprehensive reviewon power interaction mode, scheduling methodology and mathematical founda-tion.Renew. Sustain. Energy Rev.2019,112,424–439.
4. Nimalsiri, N.I.; Mediwaththe, C.P.; Ratnam, E.L.; Shaw, M.; Smith, D.B.; Halgamuge, S.K. A Survey of Algorithms for DistributedCharging Control of Electric Vehicles in Smart Grid.IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.2019,21, 4497–4515.
5. Ali, A.; Mohammadi-Ivatloo, B.; Elkamel, A. A Review on Plug-In Electric Vehicles: Introduction, Current Status, and LoadModeling Techniques.J. Mod. Power Syst. Clean Energy2020,3, 412–425.
6. Arias-Londoño, A.; Montoya, O.D.; Grisales-Noreña, L.F. A Chronological Literature Review of Electric Vehicle Interactions withPower Distribution Systems.Energies2020,13, 3016.
7. Pearre, N.S.; Ribberink, H. Review of research on V2X technologies, strategies, and operations.Renew. Sustain. Energy Rev.2019,105, 61–70.
8. Kong, P.-Y.; Karagiannidis, G.K. Charging Schemes for Plug-In Hybrid Electric Vehicles in Smart Grid: A Survey. IEEE Access2016,4, 6846–6875.
9. Junjie, H.; Morais, H.; Sousa, T.; Lind, M. Electric vehicle fleet management in smart grids: A review of services, optimization andcontrol aspects.Renew. Sustain. Energy Rev.2016,56, 1207–1226.
10. Salman, H.; Khan, M.M.; Abbas, F.; Sang, L.; Shahid, M.U.; Tang, H. A comprehensive study of implemented internationalstandards, technical challenges, impacts and prospects for electric vehicles.IEEE Access2018,6, 13866–13890.

11. Yang, Z.; Li, K.; Foley, A. Computational scheduling methods for integrating plug-in electric vehicles with power systems:A review.Renew. Sustain. Energy Rev.2015,51, 396–416.
12. Muhammad, A.; Ahmad, A.; Rehmani, M.H.; Umer, T. A review of EVs charging: From the per-spective of energy optimization,optimization approaches, and charging techniques.Transp. Res. Part D Transp. Environ.2018,62, 386–417.
13. Tan, K.M.; Ramachandaramurthy, V.K.; Yong, J.Y. Integration of electric vehicles in smart grid: A review on vehicle to gridtechnologies and optimization techniques.Renew. Sustain. Energy Rev.2016,53, 720–732.
14. Rezvani, Z.; Jansson, J.; Bodin, J. Advances in consumer electric vehicle adoption research: A review and research agenda.Transp.Res. Part D Transp. Environ.2015,34, 122–136.
15. Ning, D.; Prasad, K.; Lie, T.T. The electric vehicle: A review.Int. J. Electr. Hybrid Veh.2017,9, 49–66.
16. Mahmoudzadeh, A.A.; Pesiridis, A.; Rajoo, S.; Martinez-Botas, R.; Esfahanian, V. A review of Battery Electric Vehicle technologyand readiness levels.Renew. Sustain. Energy Rev.2017,78, 414–430.
17. Kumar, R.R.; Alok, K. Adoption of electric vehicle: A literature review and prospects for sustainability.J. Clean. Prod.2020,253, 119911.
18. Ramadhani, U.H.; Shepero, M.; Munkhammar, J.; Widén, J.; Etherden, N. Review of probabilistic load flow approaches for powerdistribution systems with photovoltaic generation and electric vehicle charging.Int. J. Electr. Power Energy Syst.2020,120, 106003.
19. Solanke, T.U.; Ramachandaramurthy, V.K.; Yong, J.Y.; Pasupuleti, J.; Kasinathan, P.; Rajagopalan, A. A review of strategiccharging–discharging control of gridconnected electric vehicles.J. Energy Storage2020,28, 101193.
20. Ahmad, A.; Khan, Z.A.; Alam, M.; Khateeb, S. A Review of the Electric Vehicle Charging Techniques, Standards, Progression andEvolution of EV Technologies in Germany.Smart Sci.2017,6, 36–53.
21. Khalid, M.R.; Alam, M.S.; Sarwar, A.; Asghar, M.J. A Comprehensive review on electric vehicles charging infrastructures andtheir impacts on power-quality of the utility grid.eTransportation2019,1, 100006.
22. Ahmad, F.; Alam, M.S.; Alsaidan, I.S.; Shariff, S.M. Battery swapping station for electric vehicles: Opportunities and challenges.IET Smart Grid2020,3, 280–286.
23. Rao, R.; Zhang, X.; Xie, J.; Ju, L. Optimizing electric vehicle users' charging behavior in battery swapping mode. Appl. Energy2015,155, 547–559. 43.Alshahrani, S.; Khalid, M.; Almuhaini, M. Electric Vehicles Beyond Energy Storage and Modern Power Networks: Challengesand Applications.IEEE Access2019,7, 99031–99064.
24. Liu, M.; Phanivong, P.K.; Shi, Y.; Callaway, D.S. Decentralized charging control of electric vehicles in residential distri-butionnetworks.IEEE Trans. Control. Syst. Technol.2017,27, 266–281.
25. Cardona, J.E.; López, J.C.; Rider, M.J. Decentralized electric vehicles charging coordination using only local voltage magnitudemeasurements.Electr. Power Syst. Res.2018,161, 139–151.
26. Maryam, M.; Monsef, H.; Lesani, H. A decentralized robust model for coordinated operation of smart dis-tribution network andelectric vehicle aggregators.Int. J. Electr. Power Energy Syst.2019,104, 853–867.
27. Wu, D.; Radhakrishnan, N.; Huang, S. A hierarchical charging control of plug-in electric vehicles with simple flexibility model.Appl. Energy2019,253, 113490.
28. Junjie, H.; Saleem, A.; You, S.; Nordström, L.; Lind, M.; Østergaard, J. A multiagent system for distribution grid congestionmanagement with electric vehicles.Eng. Appl. Artif. Intell.2015,38, 45–58.

29. Hu, J.; Si, C.; Lind, M.; Yu, R. Preventing Distribution Grid Congestion by Integrating Indirect Control in a Hierarchical ElectricVehicles' Management System.IEEE Trans. Transp. Electrif.2016,2, 290–299.
30. Yao, W.; Zhao, J.; Wen, F.; Xue, Y.; Ledwich, G. A Hierarchical Decomposition Approach for Coordinated Dispatch of Plug-inElectric Vehicles.IEEE Trans. Power Syst.2013,28, 2768–2778.
31. Shao, C.; Wang, X.; Wang, X.; Du, C.; Wang, B. Hierarchical Charge Control of Large Populations of EVs.IEEE Trans. Smart Grid2015,7, 1147–1155.
32. F Mwasilu F, Justo JJ, Kim EK, Do TD, Jung JW. Electric vehicles and smart grid interaction: A review on vehicle to grid and renewable energy sources integration. Renewable and sustainable energy reviews. 2014 Jun 1;34:501-16.
33. Tan KM, Ramachandaramurthy VK, Yong JY. Integration of electric vehicles in smart grid: A review on vehicle to grid technologies and optimization techniques. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016 Jan 1;53:720-32.
34. Jordehi A.R. How to deal with uncertainties in electric power systems? A review. Renewable and sustainable energy reviews. 2018 Nov 1;96:145-55.
35. Aghajan-Eshkevari, S., Azad, S., Nazari-Heris, M., Ameli, M. T., & Asadi, S. (2022). Charging and discharging of electric vehicles in power systems: An updated and detailed review of methods, control structures, objectives, and optimization methodologies. Sustainability, 14(4), 2137.
36. Janjic, A., Velimirovic, L., Stankovic, M., & Petrusic, A. (2017). Commercial electric vehicle fleet scheduling for secondary frequency control. Electric Power Systems Research, 147, 31-41.
37. Amamra, S. A., & Marco, J. (2019). Vehicle-to-grid aggregator to support power grid and reduce electric vehicle charging cost. IEEE Access, 7, 178528-178538.
38. Einaddin, A. H., & Yazdankhah, A. S. (2020). A novel approach for multi-objective optimal scheduling of large-scale EV fleets in a smart distribution grid considering realistic and stochastic modeling framework. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 117, 105617.
39. Islam, M. R., Lu, H., Hossain, J., & Li, L. (2020). Multiobjective optimization technique for mitigating unbalance and improving voltage considering higher penetration of electric vehicles and distributed generation. IEEE Systems Journal, 14(3), 3676-3686.
40. Bahrami, S., & Parniani, M. (2014). Game theoretic based charging strategy for plug-in hybrid electric vehicles. IEEE Transactions on Smart Grid, 5(5), 2368-2375.
41. Farahani, H. F. (2017). Improving voltage unbalance of low-voltage distribution networks using plug-in electric vehicles. Journal of cleaner production, 148, 336-346.
42. Cao, Y., Huang, L., Li, Y., Jermsittiparsert, K., Ahmadi-Nezamabad, H., & Nojavan, S. (2020). Optimal scheduling of electric vehicles aggregator under market price uncertainty using robust optimization technique. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 117, 105628.
43. Bai, X., & Qiao, W. (2015). Robust optimization for bidirectional dispatch coordination of large-scale V2G. IEEE Transactions on Smart Grid, 6(4), 1944-1954.
44. Faddel, S., Al-Awami, A. T., & Abido, M. A. (2017). Fuzzy optimization for the operation of electric vehicle parking lots. Electric Power Systems Research, 145, 166-174.

IRM