



معرفی مزایای اتصال خودروهای برقی به شبکه توزیع برق و بررسی الزامات مورد نیاز

مصطفی اسماعیلی^{۱*}، محمد ابراهیم شرکاء^۲ و مهدی دادگر^۳

چکیده: با توجه به سهم قابل توجه بخش حمل و نقل در تولید آلاینده‌های محیطی، بسیاری از کشورهای جهان به استفاده از خودروهای برقی روی آورده‌اند. با ظهور شبکه هوشمند در صنعت برق، قابلیت‌های بالقوه خودروهای برقی به ویژه سیستم ذخیره‌سازی انرژی آن و امکان تبادل توان با شبکه، جهت بهبود بهره‌برداری از سیستم قدرت مورد توجه قرار گرفته است. مهم‌ترین مزایای اتصال خودرو برقی به شبکه شامل کاهش آلاینده‌ها، بهبود خدمات جانبی، پشتیبانی توان اکتیو، جبران‌سازی توان راکتیو و پشتیبانی برای منابع انرژی تجدیدپذیر می‌گردد. اما بهره‌گیری از مزایای فوق نیازمند اصلاح و توسعه شبکه توزیع برق فعلی می‌باشد. در این مقاله ضمن معرفی مزایای اتصال خودروهای برقی به شبکه، الزامات مورد نیاز برای تحقق کامل این مزایا یا بخشی از آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: توزیع الکتریکی، خودرو قابل اتصال به شبکه، شبکه هوشمند، منابع انرژی تجدیدپذیر.

۱. مقدمه

بخش حمل و نقل بیش‌ترین سهم در رشد کل مصرف انرژی جهان را دارد. بیشتر رشد مصرف انرژی در بخش حمل و نقل ناشی از رشد بالای اقتصادی و جمعیتی دنیاست. افزایش سریع تقاضای انرژی منجر به انتشار بیش از حد دی‌اکسید کربن و بحران انرژی خواهد شد. در بسیاری از کشورها، برنامه‌های کاهش در نظر گرفته شده است تا به هدف کاهش انتشار آلاینده دست یابند و یکی از راه‌حل‌های نویدبخش، برقی کردن حمل و نقل می‌باشد که امروزه به صورت انواع خودروهای برقی، موتورسیکلت‌های برقی، اتوبوس‌های برقی و دوچرخه‌های برقی ظاهر شده است [۱]. خودروهای برقی از

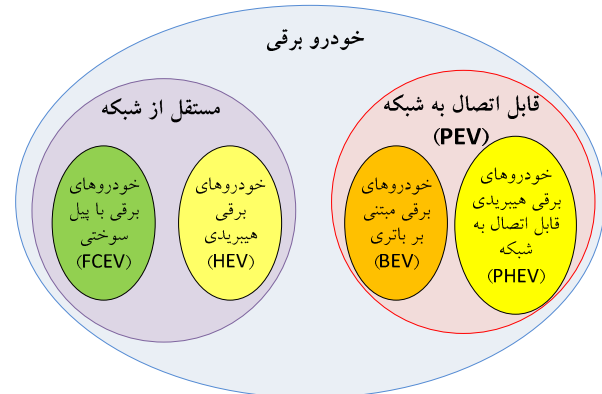
موتور الکتریکی و انرژی باتری برای پیش‌رانش استفاده می‌کند که در مقایسه با خودروهای متداول بنزینی درون‌سوز بازدهی بالاتر و هزینه بهره‌برداری کم‌تری دارند. توسعه پیوسته باتری لیتیم یون و فناوری شارژ سریع، تسهیل‌کننده‌های اصلی برای فراگیر شدن خودرو برقی در آینده نزدیک خواهند بود [۲]. خودروهای برقی را به طور کلی می‌توان به دو گروه بزرگ تقسیم نمود: خودروهای برقی مستقل از شبکه که نیازی به شارژ باتری از طریق برق شهری ندارند و خودروهای برقی قابل اتصال به شبکه^۲ (PEVs) که از برق شهر برای شارژ باتری خودرو استفاده می‌نمایند. هر یک از این گروه‌ها خود به دسته‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شوند که به صورت طرح‌وار در شکل ۱ نشان داده شده است. خودروهای برقی خورشیدی به عنوان یک گروه مستقل در نظر گرفته نشده است و افزودن سلول‌های فتوولتائیک (برای شارژ باتری، تغذیه موتور الکتریکی و یا تأمین برق سیستم‌های جانبی خودرو) می‌تواند در خودروهای هر یک از دسته‌بندی‌های فوق صورت گیرد.

۱. استادیار، دانشکده مهندسی صنایع و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی بیرجند. آدرس پست الکترونیک: esmaeeli@birjandut.ac.ir
۲. شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان جنوبی. آدرس پست الکترونیک: shoraka@skedc.ir
۳. شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان جنوبی. آدرس پست الکترونیک: mahdidadgar@yahoo.com

² Plug-in Electric Vehicles



در این مقاله، مزایای متعددی که با اتصال خودروهای برقی به شبکه برای شرکت‌های برق ممکن می‌شود شناسایی شده و اقدامات اصلاحی یا توسعه‌ای مورد نیاز در شبکه‌های توزیع برق فعلی به منظور بهره‌مندی از این مزایا بررسی می‌گردد. ساختار مقاله در ادامه به صورت زیر تنظیم شده است. در بخش دوم، به معرفی مفهوم V2G در سیستم قدرت و صورت‌های مختلف آن پرداخته می‌شود. سپس در بخش سوم مزایای مختلفی که به کارگیری فناوری V2G برای شرکت‌های برق فراهم می‌نماید بررسی شده و در بخش چهارم الزامات مورد نیاز برای بهره‌مندی از این مزایا معرفی می‌گردد. در پایان نیز، جمع‌بندی از مطالب مطرح شده ارائه می‌گردد.



شکل ۱. دسته‌بندی خودروهای برقی.

خودروهای مستقل از شبکه شامل خودروهای برقی هیبریدی و خودروهای برقی با پیل سوختی می‌شود. خودروهای برقی هیبریدی یک سیستم پیشرانس موتور بنزینی درون سوز را با یک سیستم پیشرانس الکتریکی ترکیب می‌کنند. خودروهای با پیل سوختی نوعی خودرو هیبریدی هستند که در آن‌ها پیل سوختی جایگزین موتورهای بنزینی درون‌سوز متداول شده و با پیشرانس الکتریکی ترکیب شده است. خودروهای برقی قابل اتصال به شبکه به دو دسته خودروهای برقی هیبریدی قابل اتصال به شبکه^۱ (PHEVs) و خودروهای برقی مبتنی بر باتری^۲ (BEVs) تقسیم می‌شوند. در حالی که BEVها به استفاده از باتری برای سیستم پیشرانس الکتریکی خود شناخته می‌شوند، PHEVها معمولاً دارای باتری‌های کوچکتری هستند زیرا یک موتور درون‌سوز را نیز به کار می‌گیرند. این سیستم ترکیبی باعث می‌شود که محدوده حرکت PHEVها بیش از BEVها گردد و نیازی به نگرانی درباره تمام شدن شارژ باتری نباشد.

گسترش به کارگیری خودروهای قابل اتصال به شبکه در کنار ظهور شبکه‌های هوشمند در سیستم قدرت که با افزودن ویژگی‌های مخابراتی سیستم قدرت را مدرن نموده است، موجب معرفی مفهوم جدید خودرو متصل به شبکه^۳ (V2G) به عنوان یکی از فناوری‌های شبکه هوشمند شده است. مفهوم V2G یعنی اجازه داده شود انرژی بین خودرو برقی و شبکه قدرت مبادله شود که موجب فراهم شدن مزایا و خدمات متعددی برای شبکه قدرت می‌گردد. ضمناً مالکان خودروهای برقی می‌توانند بابت مشارکتشان در خدمات V2G از درآمدهای جذابی بهره‌مند شوند [۳].

۲. معرفی مفهوم V2G در سیستم قدرت

فناوری V2G به کنترل و مدیریت بار خودروهای برقی توسط شرکت برق یا مراکز تجمیع کننده^۴ با استفاده از ارتباط بین خودروها و شبکه قدرت اشاره دارد. مفهوم V2G اشاره به برهم کنش بین خودرو برقی و شبکه قدرت با کمک سیستم مخابراتی دارد. بهره‌بردار شبکه قدرت تجهیزات مخابراتی را برای کنترل و مدیریت گردش توان بین باتری خودرو برقی و شبکه قدرت به منظور دستیابی به مزایای مورد نظر استفاده می‌کند. در بسیاری از موارد، اهداف مدیریت V2G حداکثر کردن سود، کاهش آلاینده و بهبود کیفیت توان شبکه می‌باشد. با توجه به نحوه تبادل توان الکتریکی بین خودروها و شبکه قدرت، دو نوع V2G یک جهته و دو جهته تعریف می‌گردد که در ادامه به معرفی آن‌ها پرداخته می‌شود.

۱-۲. V2G یک جهته

در این فناوری نرخ شارژ باتری خودرو برقی در یک گردش توان یک جهته بین خودرو برقی و شبکه کنترل می‌شود [۴]. تحقق V2G یک جهته با افزودن یک کنترل کننده ساده برای مدیریت نرخ شارژ میسر است و هزینه کمی نیاز دارد.

فناوری V2G یک جهته می‌تواند خدمات جانبی از قبیل تنظیم شبکه قدرت و ذخیره چرخان را برای شبکه قدرت فراهم نماید [۵]. این امر می‌تواند انعطاف‌پذیری بهره‌بردار شبکه قدرت را افزایش دهد. بهره‌مندی از مزایای V2G یک جهته نیازمند وجود یک سیاست جذاب تبادل انرژی بین مالکان خودروهای برقی و شبکه

¹ Plug-in Hybrid Electric Vehicles

² Battery Electric Vehicles

³ Vehicle to Grid

⁴ Aggregators



دشارژ به ترتیب به عنوان یک مبدل باک یا بوست^۱ عمل می‌کند [۳].

فناوری V2G دو جهت انعطاف‌پذیری و قابلیت‌های بیشتری از جمله پشتیبانی توان اکتیو، پشتیبانی توان راکتیو، تنظیم ضریب توان و پشتیبانی اجتماع منابع انرژی تجدیدپذیر برای بهبود بهره‌برداری سیستم قدرت فراهم می‌کند. پشتیبانی توان راکتیو از سوی V2G دو جهت می‌تواند خدمات اصلاح بار اوج و تسطیح بار را ممکن سازد [۱۰]. این خدمات از طریق شارژ خودرو برقی در طول ساعات غیر اوج و تزریق انرژی اضافی خودروهای برقی به شبکه قدرت در طول ساعات اوج میسر می‌شود. علاوه بر فراهم کردن پشتیبانی توان اکتیو، V2G دو جهت این قابلیت را دارد تا توان راکتیو را برای تنظیم ولتاژ شبکه تأمین نماید [۱۱]. این سرویس با اندازه‌دهی مناسب خازن لینک DC شارژر و کلیدزنی کنترلی صحیح قابل پیاده‌سازی است. تنظیم ضریب توان نیز یکی از خدمات ارزش افزوده‌ای است که از سوی فناوری V2G دو جهت پیشنهاد می‌گردد که می‌تواند تلفات توان را در شبکه قدرت کاهش دهد. علاوه بر این، V2G دو جهت به اجتماع منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه قدرت کمک می‌کند [۱۲].

پیاده‌سازی موفق V2G نیازمند پیشرفت‌های بیشتر فناوری است. اخیراً، V2G یک جهت در کشورهای متعددی اجرا شده است تا موضوع موانع اجتماعی را کاهش دهد و موجب افزایش رغبت برای نفوذ خودرو برقی به بازار گردد. فناوری V2G دو جهت این قابلیت را دارد تا در آینده‌ای که بازار و فناوری مهیا گردد با آن‌ها هماهنگ شود.

۳. مزایای اتصال خودرو برقی به شبکه توزیع

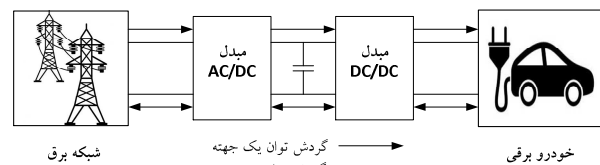
فناوری اتصال خودرو برقی به شبکه یا V2G می‌تواند خدمات متعددی را برای دستیابی به مزایای متعدد فراهم نماید. مزایای اتصال خودرو برقی به شبکه توزیع نه تنها امتیازی برای شرکت‌های برق است بلکه برای مالکان خودروهای برقی نیز منافی دارد. فناوری اتصال خودرو برقی به شبکه می‌تواند پشتیبانی بدون وقفه توان برای خانه یا ذخیره انرژی پشتیبان برای منابع انرژی تجدیدپذیر خانه باشد [۱۳]. مزایای اصلی اتصال خودرو برقی به شبکه شامل کاهش آلاینده‌ها، بهبود خدمات جانبی، پشتیبانی توان اکتیو، جبران‌سازی توان راکتیو و پشتیبانی برای منابع انرژی تجدیدپذیر می‌گردد که در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته می‌شود.

برق می‌باشد [۶]. به منظور تشویق مشارکت مالکان خودروهای برقی، این سیاست تبادل انرژی باید درآمد مالکان خودرو را در صورتی که آن‌ها خودروهای برقی خود را در ساعات غیر اوج شارژ نمایند و شارژ خودرو برقی را در دوره‌های اوج محدود نمایند، تضمین نماید [۷]. به این ترتیب شرکت برق می‌تواند از اضافه بار در ساعات اوج اجتناب کند. علاوه بر این، V2G یک جهت با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی می‌تواند موجب حداکثرسازی سود و حداقل‌سازی آلاینده گردد [۸].

اما خدمات V2G یک جهت به قابلیت فراهم کردن خدمات جانبی برای شبکه قدرت محدود می‌گردد. نقش‌هایی از قبیل پشتیبانی توان اکتیو، جبران‌سازی توان راکتیو و پشتیبانی از منابع انرژی تجدیدپذیر خدمات ارزش افزوده‌ای هستند که تنها با V2G دو جهت قابل دستیابی هستند.

۲-۲. V2G دو جهت

مفهوم V2G دو جهت به گردش توان دو جهت بین خودرو برقی و شبکه قدرت برای دستیابی به مزایای متعدد اشاره دارد. یک شارژر دو جهت متداول باتری خودرو شامل مبدل AC/DC و مبدل DC/DC مطابق آنچه در شکل ۲ رسم شده است می‌باشد [۹]. هنگامی که در حالت شارژ کار می‌کند، شارژر باید یک جریان سینوسی با زاویه فاز مشخص از شبکه بکشد تا توان اکتیو و راکتیو را کنترل کند. در حالت تزریق به شبکه، شارژر باید یک جریان سینوسی مشابه به شبکه برگرداند.



شکل ۲. طرح کلی گردش توان در اتصال خودرو به شبکه برای V2G یک جهت و دو جهت.

مبدل AC/DC برای یک‌سوسازی توان AC گرفته شده از شبکه قدرت و تبدیل آن به توان DC در طول حالت شارژ خودرو برقی می‌باشد و در حالت دشارژ، توان DC را پیش از تزریق به شبکه قدرت به توان AC تبدیل می‌کند. از سوی دیگر، مبدل DC/DC مسئولیت گردش توان دو جهت با استفاده از روش‌های کنترل جریان را بر عهده دارد. مبدل DC/DC در طول حالت شارژ یا

¹ Buck or boost converter



۳-۱. کاهش آلاینده‌ها

خودروهای برقی قابل اتصال به شبکه نسبت به خودروهای برقی هیبریدی و خودروهای درون‌سوز متداول از نظر انتشار آلودگی مزیت دارند. با استفاده از خودروهای برقی انتظار می‌رود میزان انتشار دی اکسید کربن به ازای هر خودرو از حدود ۶/۲ تن در سال به کم تر از ۴ تن در سال کاهش یابد [۱۴]. انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط با خودرو برقی به نوع سوخت تولیدکننده برق بستگی دارد. اگر برق از طریق منابع غیر تجدید پذیر، که خود این منابع آلاینده هستند، تولید شود مزایای زیست محیطی خودروهای برقی محدودتر می‌شود. با این وجود حتی هنگامی که خودروهای برقی به طور کامل با برق حاصل از احتراق زغال سنگ تغذیه شوند، این خودروها هنوز هم حدود ۲۵٪ گازهای گلخانه‌ای کمتری نسبت به خودروهای بنزینی انتشار می‌دهند [۳].

اگرچه شرکت‌های نفت و خودروسازی ادعا می‌کنند که به دلیل تخلیه سرب از جانب تأسیسات تولید باتری و معدوم نمودن باتری، برآیند آثار خودروهای برقی بر روی محیط زیست منفی است [۱۵]، اما این تعارض، ناشی از بازار موجود باتری‌های سرب اسید است در حالی که این بازار در حال حرکت به سمت سایر باتری‌های شیمیایی می‌باشد.

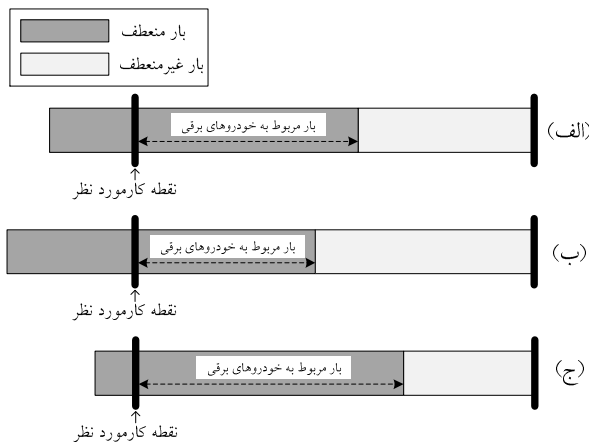
۳-۲. بهبود خدمات جانبی

خدمات جانبی در سیستم قدرت را می‌توان به دو بخش اصلی تقسیم نمود که عبارتند از: تنظیم شبکه قدرت و ذخیره چرخان. با پیاده‌سازی مفهوم V2G می‌توان خدمات جانبی با کیفیت تری از آن چه اکنون موجود است فراهم نمود. به این منظور، انتظار می‌رود مراکز تجمع‌کننده وجود داشته باشد تا خودروهای برقی را در قالب یک گروه به منظور تشکیل یک بار بزرگتر و مطلوب‌تر برای شرکت‌های برق گرد آوری کنند.

V2G تک‌جهته از طریق کنترل نرخ شارژ خودروهای برقی با توجه به درخواست بهره‌برداران شبکه قدرت، تنها خدمات جانبی مربوط به بار را برای شبکه قدرت فراهم می‌سازد [۱۶]. مراکز تجمع‌کننده گروه بزرگی از خودروهای برقی را برای دستیابی به خدمات جانبی مدیریت و کنترل می‌کنند. خدمات تنظیمی به دلیل ارزش تجاری بالا و حداقل فشار روی سیستم ذخیره‌ساز خودرو، احتمالاً اولین گام برای مفهوم V2G باشد [۱۷]. تنظیم فرکانس برای تعادل عرضه و تقاضای توان حقیقی استفاده می‌شود. امروزه، تنظیم فرکانس بیشتر از طریق ژنراتورهای بزرگ چرخان صورت می‌گیرد

که بسیار پرهزینه است. نرخ‌های سریع شارژ و دشارژ باتری خودروهای برقی، V2G را به عنوان یک جایگزین محتمل برای تنظیم فرکانس مطرح می‌سازد [۱۸].

شکل ۳ مفهوم خدمات جانبی را با استفاده از V2G یک‌جهته نشان می‌دهد. دو نوع بار در این شکل در نظر گرفته شده است که شامل بارهای منعطف و بارهای غیرمنعطف می‌باشد. خودروهای برقی متصل به شبکه به عنوان بارهای منعطف در فناوری V2G یک‌جهته نظر گرفته شده‌اند در حالی که نرخ‌های شارژ خودروهای برقی به صورت افزایش یا کاهش تنظیم می‌گردند تا نقطه کار مورد نظر را برآورده سازند. شکل ۳ (الف) به عنوان یک حالت پایه جهت نشان دادن مفهوم خدمات جانبی در نظر گرفته می‌شود. هنگامی که بارهای غیرمنعطف افزایش می‌یابند، حالت تنظیم کاهش از طریق کاهش نرخ‌های شارژ خودروهای برقی انجام می‌شود تا در همان نقطه کار مورد نظر مطابق شکل ۳ (ب) باقی بماند. در مقابل، شکل ۳ (ج) نشان می‌دهد که نرخ‌های شارژ خودروهای برقی افزایش می‌یابد تا به دلیل کاهش بارهای غیرمنعطف حالت تنظیم افزایشی صورت گیرد.



شکل ۳. خدمات جانبی فراهم شده از طریق V2G یک‌جهته؛ (الف) حالت پایه، (ب) حالت تنظیم کاهش، (ج) حالت تنظیم افزایشی.

ذخیره چرخان یک تولید اضافی است که پاسخ سریع، معمولاً در طول ده دقیقه، را فراهم می‌کند تا قطع تولید را جبران نماید [۱۹]. به منظور دستیابی به خدمات ذخیره چرخان با استفاده از V2G یک‌جهته، با کاهش نرخ‌های شارژ خودروهای برقی تا یک نقطه کار جدید پایین‌تر، ذخیره چرخان اضافی به دست می‌آید [۲۰]. خدمات جانبی که توسط هر خودرو برقی فراهم می‌شود بر اساس مدت



تأمین گردد [۲۳]. خودروهای برقی می‌توانند برای تغذیه انرژی به شبکه قدرت در طول دوره بار اوج استفاده شوند تا بار اوج را اصلاح نمایند. این امر می‌تواند به کاهش فشار وارده بر تجهیزات سیستم قدرت در طی دوره بار اوج کمک نماید و مالکان خودروهای برقی با یک نرخ انرژی تشویقی پول دریافت نمایند. در طول ساعات غیر اوج، مالکان خودروهای برقی می‌توانند باتری‌های خودرو را با قیمت انرژی پایین‌تر شارژ نمایند.

پشتیبانی توان اکتیو به دلیل سودهای تشویقی که می‌تواند به دست آورد، یک خدمت مهم از V2G است. یکی از مزایای آن کاهش تلفات است. با نگر داشتن ظرفیت عملکردی سیستم قدرت در یک سطح پایین‌تر، تلفات کلی توان کاهش خواهد یافت [۲۴].

به طور سنتی، سیستم قدرت برای برآوردن بیشترین اوج تقاضای بار ساخته می‌شود. بنابراین، تجهیزات قدرت در طول ساعات غیر اوج کم‌تر از ظرفیتشان مورد استفاده قرار می‌گیرند. اجرای روش‌های اصلاح بار اوج با استفاده از فناوری V2G می‌تواند ظرفیت تجهیزات قدرت را بیشینه سازد و از هزینه اضافی ارتقای تجهیزات جلوگیری نماید [۲۵]. علاوه بر این، جابه‌جایی زمان شارژ خودروهای برقی به ساعات غیر اوج یک روش خوب برای پرهیز از اضافه بار سیستم قدرت و پیری تجهیزات می‌باشد [۲۶].

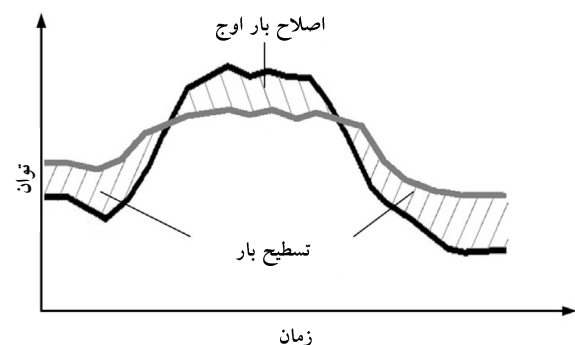
پایه‌سازی V2G به منظور دستیابی به اصلاح بار اوج و تسطیح بار از طریق دسترس‌پذیری ظرفیت باتری خودرو برقی متصل به سیستم قدرت تعیین می‌شود. در مدیریت ذخیره‌سازهای انرژی خودرو برقی، عوامل متعددی از قبیل احتمال اتصال خودرو برقی به شبکه قدرت، انرژی قابل دسترسی در باتری خودرو برقی و عمق تخلیه باتری^۳ باید در نظر گرفته شود [۲۷]. تحقیقات متعددی برای طراحی راهبرد کنترلی که پروفیل بار را با در نظر گرفتن قيود مربوطه مسطح نماید، در جریان است. این تحقیقات به عنوان روش‌های بهینه‌سازی که می‌توانند سود را برای شرکت‌های برق و مالکین خودروها بهینه‌سازند نیز شناخته می‌شوند [۲۵].

در [۲۸]، یک مدیریت پاسخگویی بار غیرمتمرکز با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه طراحی شده است تا خودروهای برقی متصل به شبکه را برای پشتیبانی توان اکتیو در یک ریزشبه محلی به کار گیرد. این الگوریتم می‌تواند به صورت هوشمند مقدار مناسبی انرژی از یک گروه از خودروهای برقی برای پشتیبانی شبکه قدرت در حین شرایط اضطراری شبکه استخراج نماید.

زمانی است که این خدمات در دسترس هستند حتی اگر هیچ تحویل انرژی به شبکه برق صورت نگیرد. این سیاست برای تجمیع‌کننده‌های خودرو برقی و مالکان جذاب است زیرا درآمدهای تضمین شده‌ای هستند [۲۱]. به عنوان مثال، در [۲۲] یک بهینه‌سازی فازی برای بررسی درباره منافع خدمات جانبی برای V2G یک جهته پیشنهاد شده و با دیگر روش‌های بهینه‌سازی مقایسه شده است. با هدف فراهم ساختن خدمات جانبی، تمام برنامه‌ریزی‌های بهینه V2G یک جهته سودهای بالایی را برای تجمیع‌کننده‌های مشارکت کننده نشان می‌دهند مخصوصاً برای بهینه‌سازی فازی پیشنهادی که تقریباً شش درصد بیش از سایر روش‌های بهینه‌سازی می‌باشد.

۳-۲. پشتیبانی توان اکتیو

خدمت دیگر V2G این است که انرژی اضافی خودروهای برقی را برای فراهم کردن پشتیبانی توان اکتیو از شبکه قدرت به کار می‌گیرد. پشتیبانی توان اکتیو نیاز به تخلیه انرژی باتری‌ها دارد، بنابراین تنها با استفاده از V2G دو جهته می‌تواند اجرا شود و با V2G یک جهته امکان‌پذیر نیست. هدف این خدمت مسطح کردن پروفیل بار شبکه با استفاده از «اصلاح بار اوج»^۱ و «تسطیح بار»^۲ می‌باشد. شکل ۴، مقایسه یک پروفیل بار مسکونی متداول قبل و بعد از اجرای اصلاح بار اوج و تسطیح بار را نشان می‌دهد.



شکل ۴. مقایسه پروفیل بار قبل و بعد از اصلاح بار اوج و تسطیح بار.

توان اوج معمولاً برای یک دوره زمانی کوتاه در طول روز نیاز می‌باشد. بنابراین، اقتصادی‌تر خواهد بود که این تقاضای بار اوج از طریق منابع توزیع شده مانند خودروهای برقی متصل به شبکه

¹ Peak load shaving

² Load leveling

³ Depth of Discharge (DOD)



۳-۴. جبران سازی توان راکتیو

جبران سازی توان راکتیو روشی برای فراهم کردن تنظیم ولتاژ در شبکه قدرت است [۲۹]. پشتیبانی توان راکتیو همچنین می تواند موجب تصحیح ضریب توان گردد که باعث کاهش گردش جریان از سمت تولید و تلفات توان در خطوط انتقال توان می گردد [۳۰]. علاوه بر این، این خدمات می تواند بارگذاری تجهیزات قدرت را کاهش دهد و موجب افزایش بازده عملکردی سیستم قدرت گردد. روش متداول برای جبران سازی توان راکتیو با کشیدن توان راکتیو از ژنراتور توزیع یا جبران سازه های راکتیو استاتیک حاصل می شود [۳۱]. در بسیاری از موارد، یک توان راکتیو خازنی برای جبران سازی شبکه قدرت نیاز است. بنابراین خودرو برقی متصل به شبکه به خاطر توان راکتیو خازنی ذخیره شده در خازن لینک DC شارژر باتری دو جهته خودرو برقی، قادر است تا خدمات جبران سازی توان راکتیو را فراهم نماید. از آن جا که جبران سازی توان راکتیو توسط خازن لینک DC شارژر باتری دو جهته خودرو برقی فراهم می گردد، این خدمت موجب هیچ تنزلی در عمر باتری نخواهد شد. جبران سازی توان راکتیو از طریق کنترل کلیدزنی مبدل AC/DC با استراتژی های کنترلی مختلف می باشد [۳۲].

طراحی و توسعه یک ایستگاه شارژ سریع خودرو برقی دو جهته با کنترل شارژ سریع خودرو برقی علاوه یک روش جدید کنترل جبران سازی توان راکتیو در [۳۳] پیشنهاد شده است. کنترل جبران سازی توان راکتیو، ولتاژ شبکه قدرت را در حین فرایند شارژ سریع خودرو برقی تنظیم می کند. بنابراین موضوع افت ولتاژ شبکه ناشی از عملکرد شارژر خودرو برقی می تواند با روش کنترل پیشنهادی جبران سازی توان راکتیو ایستگاه شارژر خودرو برقی فراهم گردد. همچنین، یک کنترل مجزای توان اکتیو و راکتیو در شارژر V2G در [۳۴] طراحی شده است که موجب فراهم شدن تغذیه مناسب توان راکتیو به شبکه قدرت بر اساس سیگنال توان راکتیو صادر شده از جانب شرکت برق می گردد. کنترل جبران سازی توان راکتیو با استفاده از یک شارژر ۱۲/۵ kVA به طور آزمایشگاهی صحت سنجی شده است.

۳-۵. پشتیبانی منابع انرژی تجدید پذیر

واحدهای تولید انرژی و بخش حمل و نقل دو منبع اصلی انتشار دی اکسید کربن هستند. میزان این آلاینده به حدی رسیده است که سلامت عمومی و محیط زیست را تهدید می کند. به کارگیری منابع انرژی تجدید پذیر می تواند به حفاظت از محیط زیست کمک کند. اما تولید توان از منابع انرژی تجدید پذیر به شدت وابسته به عوامل

محیطی است. تولید انرژی غیر قابل پیش بینی و غیر پایدار، ضعف منابع انرژی تجدید پذیر می باشد. فناوری V2G دو جهته از تحرک خودروی برقی برای عمل به عنوان ذخیره ساز انرژی واسط و تغذیه کننده برای حل موضوع تناوبی بودن منابع انرژی تجدید پذیر استفاده می کند به این نحو که گروهی از خودروهای برقی به عنوان منبع انرژی پشتیبان یا منبع ذخیره انرژی به کار گرفته می شوند [۳۵]. هنگامی که تولید انرژی تجدید پذیر ناکافی باشد، گروه های خودروهای برقی به عنوان یک منبع انرژی پشتیبان برای تأمین توان لازم عمل می کنند. ضمناً، آن ها به عنوان یک منبع ذخیره انرژی عمل می کنند تا توان اضافی تولیدی توسط منابع انرژی تجدید پذیر را جذب نمایند که در غیر این صورت باید تولید آن متوقف می شد [۲۳]. تحقیقات نشان داده است که با ظرفیت بیشتر باتری خودروهای برقی متصل به شبکه، ظرفیت انرژی تجدید پذیر بیشتری می تواند در سیستم قدرت گنجانده شود. بنابراین خودرو برقی می تواند اقتصاد صنعت تولید انرژی تجدید پذیر را بهبود بخشد. با مدیریت صحیح انرژی بین منابع انرژی تجدید پذیر و خودروهای برقی، شبکه قدرت آینده تمیزتر و پایدارتر خواهد بود [۳۶].

یک روش بهینه سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک در [۳۷] پیشنهاد شده است که قادر است به صورت بهینه ظرفیت V2G را استفاده کند و تغییر توان ناشی از تولید نوسانی توان بادی را حداقل سازد. هدف اصلی روش پیشنهادی بهینه سازی V2G، تحقق کامل ظرفیت بالقوه خودرو برقی برای حداکثر کردن سود و مشوقی برای شرکت برق و مالکان خودروهای برقی می باشد. نویسندگان در [۳۸]، اهمیت تعیین بهینه اندازه و محل پارکینگ های خودروهای برقی با انرژی تجدید پذیر را در نظر گرفته اند. از این رو، یک الگوریتم چند هدفه برای یافتن بهینه اندازه و محل سیستم های انرژی تجدید پذیر برای ایستگاه V2G ایجاد کرده اند. این الگوریتم می تواند بهترین محل و اندازه را برای سیستم V2G با حداقل هزینه کل انرژی تعیین نماید.

۴. الزامات مورد نیاز

همان گونه که در بخش قبل بررسی گردید، اتصال خودروهای برقی به شبکه می تواند مزایای متعددی برای شرکت های برق و مالکین خودروها فراهم نماید. برخی از این مزایا با به کارگیری فناوری ساده و ارزان قیمت V2G یک جهته قابل تحقق است اما استفاده از مزایای کامل نیازمند به کارگیری فناوری V2G دو جهته می باشد. در جدول ۱ مزایای قابل تحقق با هر یک از این فناوری ها مقایسه شده است.



جدول ۲. توسعه و الزامات مورد نیاز برای V2G یک جهت و دو جهت.

V2G دو جهت	V2G یک جهت	
نیازمند توسعه و سرمایه‌گذاری	عدم نیاز به توسعه	سیستم توزیع
پیچیده، نیازمند مدارهای کنترل درایو اضافی، اندازه‌گیری‌های گسترده	ساده، کنترل فعال جریان شارژ	سیستم کنترل
گران قیمت، نیاز به سرمایه‌گذاری زیاد	ارزان قیمت، عدم نیاز به سرمایه‌گذاری اضافی	هزینه
فروسودگی اضافی ناشی از شارژ دوره‌ای، نیاز به فناوری بالاتر	بدون فرسودگی تخلیه، کارایی فناوری فعلی	باتری
اتصال برق و مخابرات دو طرفه، اندازه‌گیرها و حسگرهای هوشمند مناسب، تبادل اطلاعات پایدار	اتصال به شبکه برق	الزامات فنی

البته شارژ خودروهای برقی به صورت تصادفی و بدون برنامه‌ریزی می‌تواند موجب بارگذاری بیش از حد خطوط و ترانسفورماتورها شده و مشکلاتی برای تجهیزات شرکت برق فراهم نماید. این مشکل با استفاده از روش شارژ هماهنگ خودروهای برقی قابل حل می‌باشد، اگرچه فرایند پیاده‌سازی چنین ابزار بلند پروازانه‌ای نیازمند اختصاص زمان و هزینه قابل توجه برای توسعه زیرساخت‌های لازم می‌باشد.

۵. نتیجه گیری

با توجه به سهم قابل توجه بخش حمل و نقل در تولید آلاینده‌ها، حرکت به سمت خودروهای برقی ناگزیر به نظر می‌رسد. ظهور خودروهای برقی در کنار توسعه شبکه‌های هوشمند در صنعت برق می‌تواند مزایای متعدد و قابل توجهی برای شرکت‌های برق فراهم نماید. مهم‌ترین این مزایا شامل کاهش آلاینده‌ها، بهبود خدمات جانبی، پشتیبانی توان اکتیو، جبران‌سازی توان راکتیو و پشتیبانی برای منابع انرژی تجدیدپذیر می‌گردد.

بهره‌مندی کامل از مزایای فوق نیازمند سیستم‌های ارتباطی و گردش توان الکتریکی دو جهته‌ای است که تحت عنوان V2G دو جهته شناخته می‌شود. جهت بهره‌گیری از این فناوری باید زیرساخت‌های لازم در بخش‌های برقی شبکه توزیع و سیستم‌های مخابراتی فراهم گردد که پیاده‌سازی آن مستلزم اختصاص هزینه‌های سرمایه‌گذاری قابل توجهی می‌باشد. اما برخی از این مزایا از جمله کاهش آلاینده‌ها و خدمات تنظیم فرکانس شبکه برق با استفاده از

جدول ۱. مزایای اتصال خودروهای برقی به شبکه توزیع برق.

V2G دو جهت	V2G یک جهت	
✓	✓	کاهش آلاینده‌ها
✓	✓	بهبود خدمات جانبی
✓	-	پشتیبانی توان اکتیو
✓	-	جبران‌سازی توان راکتیو
✓	-	پشتیبانی منابع انرژی تجدیدپذیر

فناوری V2G یک جهت به سخت افزار خاصی جز یک خروجی برق نیاز ندارد و پیاده‌سازی این سیستم می‌تواند تقریباً بدون هیچ هزینه اضافی انجام شود. کنترل اولیه می‌تواند با قیمت‌دهی انرژی حساس به زمان مدیریت شود. یک مدار متداول با استفاده از یک پل دیدودی متصل به فیلتر و مبدل DC به DC قابل اجرا است. امروزه، این مبدل‌ها به صورت یک مرحله‌ای پیاده‌سازی می‌شوند تا هزینه، حجم، وزن و تلفات محدود گردد [۳۹]. همچنین پیچیدگی‌های کنترلی مطرح شده در استانداردهای اتصال به شبکه مانند استاندارد IEEE-1547 [۴۰] وجود ندارد زیرا تغذیه برگشتی به شبکه ممکن نیست.

هزینه اضافی زیادی برای مبدل‌های دو جهت، مباحث اندازه‌گیری و نگرانی‌های اتصال به شبکه نیاز می‌باشد. حفاظت مقابله با جزیره شدن و سایر مباحث اتصال متقابل باید پاسخ داده شود. فناوری V2G دو جهت با خودروهای برقی فعلی قابل پیاده‌سازی نمی‌باشد و توسعه فناوری باتری خودرو و سیستم شارژ آن ضروری می‌باشد. پیچیدگی شارژر باتری دو جهت نیازمند سخت‌افزار اضافی است و موجب نیاز به سرمایه‌گذاری خیلی بیشتری می‌گردد. علاوه بر این، موضوع موانع اجتماعی چالش مهم دیگری در مسیر پیاده‌سازی V2G دو جهت می‌باشد. بنا به دلایل امنیتی، مالکان خودروهای برقی معمولاً تلاش خواهند کرد تا وضعیت شارژر باتری برای استفاده در تردهای غیرمنتظره بالاتر باشد [۳]. این امر مانع مشارکت فعال آن‌ها در خدمات V2G دو جهت خواهد شد. از این رو لازم است راهکارهایی برای کاهش موانع اجتماعی و افزایش رغبت مالکین خودروها به مشارکت در خدمات V2G اندیشیده شود. در جدول ۲ تغییرات و الزامات مورد نیاز در بخش‌های مختلف شبکه توزیع به منظور به کارگیری فناوری V2G یک جهت و دو جهت مقایسه شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، خدماتی که خودروهای برقی با فناوری V2G یک جهت فراهم می‌کنند با وضعیت فعلی شبکه نیز قابل پیاده‌سازی می‌باشد.



resources," in Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-6, 2012.

[9] C. Gould, K. Colombage, J. Wang, D. Stone, and M. Foster, "A comparative study of on-board bidirectional chargers for electric vehicles to support vehicle-to-grid power transfer," in 10th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), pp. 639-644, 2013.

[10] Z. Wang and S. Wang, "Grid power peak shaving and valley filling using vehicle-to-grid systems," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, pp. 1822-1829, 2013.

[11] V. Monteiro, J. Pinto, B. Exposto, H. Gonçalves, J. C. Ferreira, C. Couto, et al., "Assessment of a battery charger for electric vehicles with reactive power control," in 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp. 5142-5147, 2012.

[12] J. R. Pillai and B. Bak-Jensen, "Integration of vehicle-to-grid in the western Danish power system," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 2, pp. 12-19, 2011.

[13] J. Y. Yong, V. K. Ramachandaramurthy, K. M. Tan, and N. Mithulananthan, "A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 49, pp. 365-385, 2015.

[14] J. DiPeso, "Cars to grid: an electrifying idea," Environmental Quality Management, vol. 18, pp. 89-94, 2008.

[15] B. K. Sovacool and R. F. Hirsh, "Beyond batteries: An examination of the benefits and barriers to plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) and a vehicle-to-grid (V2G) transition," Energy Policy, vol. 37, pp. 1095-1103, 2009.

[16] Y. Mou, H. Xing, Z. Lin, and M. Fu, "Decentralized Optimal Demand-Side Management for PHEV Charging in a Smart Grid," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6, pp. 726-736, 2015.

[17] A. De Los Ríos, J. Goentzel, K. E. Nordstrom, and C. W. Siegart, "Economic analysis of vehicle-to-grid (V2G)-enabled fleets participating in the regulation service market," in Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), PES, pp. 1-8, 2012.

[18] W. Kempton and J. Tomić, "Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue," Journal of power sources, vol. 144, pp. 268-279, 2005.

[19] S. Han, S. Han, and H. Aki, "A practical battery wear model for electric vehicle charging applications," Applied Energy, vol. 113, pp. 1100-1108, 2014.

[20] E. Sortomme and M. A. El-Sharkawi, "Optimal combined bidding of vehicle-to-grid ancillary services," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 3, pp. 70-79, 2012.

[21] D. B. Richardson, "Encouraging vehicle-to-grid (V2G) participation through premium tariff rates," Journal of Power Sources, vol. 243, pp. 219-224, 2013.

فناوری ارزان قیمت V2G یک جهت و وضعیت فعلی شبکه‌های توزیع هم قابل تحقق می‌باشد.

از این رو انتظار می‌رود که با هدف گسترش حضور خودروهای برقی و بهره‌مندی هر چه بیشتر از مزایای بالقوه آن‌ها، شرکت‌های برق ضمن فراهم ساختن زیرساخت‌های اساسی و اولیه مانند ایستگاه‌های شارژ، مراکز جمع‌کننده و ..، با به کارگیری فناوری V2G یک جهت از مزایای خودروهای برقی بهره‌مند گردند. به تدریج و با پیاده‌سازی سایر الزامات شبکه هوشمند و پیشرفت تکنولوژی، شرکت‌های برق می‌توانند زمینه بهره‌گیری از فناوری V2G دو جهت و تحقق کامل مزایای اتصال خودروهای برقی به شبکه را فراهم نمایند.

مراجع

[۱] علی‌رضا زارع، شاهین ریاحی‌نیا، معین معینی، محمود فتوحی، نادر سالک، "صنعت حمل و نقل الکتریکی: چالش و یا فرصتی برای آینده شبکه‌های حمل و نقل هوشمند"، سیزدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی حمل و نقل و ترافیک، تهران، ۱۳۹۲.

[2] C.-H. Lin, C.-Y. Hsieh, and K.-H. Chen, "A Li-ion battery charger with smooth control circuit and built-in resistance compensator for achieving stable and fast charging," IEEE Transactions on Circuits and Systems, vol. 57, pp. 506-517, 2010.

[3] K. M. Tan, V. K. Ramachandaramurthy, and J. Y. Yong, "Integration of electric vehicles in smart grid: A review on vehicle to grid technologies and optimization techniques," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 53, pp. 720-732, 2016.

[4] R. Romo and O. Micheloud, "Power quality of actual grids with plug-in electric vehicles in presence of renewables and micro-grids," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 46, pp. 189-200, 2015.

[5] C. Guille and G. Gross, "A conceptual framework for the vehicle-to-grid (V2G) implementation," Energy policy, vol. 37, pp. 4379-4390, 2009.

[6] N. O'Connell, Q. Wu, J. Østergaard, A. H. Nielsen, S. T. Cha, and Y. Ding, "Day-ahead tariffs for the alleviation of distribution grid congestion from electric vehicles," Electric Power Systems Research, vol. 92, pp. 106-114, 2012.

[7] C. Quinn, D. Zimmerle, and T. H. Bradley, "The effect of communication architecture on the availability, reliability, and economics of plug-in hybrid electric vehicle-to-grid ancillary services," Journal of Power Sources, vol. 195, pp. 1500-1509, 2010.

[8] M. Ghofrani, A. Arabali, and M. Etezadi-Amoli, "Electric drive vehicle to grid synergies with large scale wind



- [34] M. Kesler, M. C. Kisacikoglu, and L. M. Tolbert, "Vehicle-to-grid reactive power operation using plug-in electric vehicle bidirectional offboard charger," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, pp. 6778-6784, 2014.
- [35] F. Fazelpour, M. Vafaeipour, O. Rahbari, and M. A. Rosen, "Intelligent optimization to integrate a plug-in hybrid electric vehicle smart parking lot with renewable energy resources and enhance grid characteristics," *Energy Conversion and Management*, vol. 77, pp. 250-261, 2014.
- [36] C. Goebel and D. S. Callaway, "Using ICT-controlled plug-in electric vehicles to supply grid regulation in California at different renewable integration levels," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, pp. 729-740, 2013.
- [37] M. Ghofrani, A. Arabali, M. Etezadi-Amoli, and M. S. Fadali, "Smart scheduling and cost-benefit analysis of grid-enabled electric vehicles for wind power integration," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, pp. 2306-2313, 2014.
- [38] A. El-Zonkoly, "Intelligent energy management of optimally located renewable energy systems incorporating PHEV," *Energy Conversion and Management*, vol. 84, pp. 427-435, 2014.
- [39] M. Yilmaz and P. T. Krein, "Review of the impact of vehicle-to-grid technologies on distribution systems and utility interfaces," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, pp. 5673-5689, 2013.
- [40] IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, IEEE Standard 1547, 2003.
- [22] M. Ansari, A. T. Al-Awami, E. Sortomme, and M. Abidoeric, "Coordinated bidding of ancillary services for vehicle-to-grid using fuzzy optimization," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, pp. 261-270, 2015.
- [23] T. Yiyun, L. Can, C. Lin, and C. Lin, "Research on vehicle-to-grid technology," in *International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring (CDCIEM)*, pp. 1013-1016, 2011.
- [24] H. Turker, A. Hably, and S. Bacha, "Housing peak shaving algorithm (HPSA) with plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs): Vehicle-to-Home (V2H) and Vehicle-to-Grid (V2G) concepts," in *Fourth International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, pp. 753-759, 2013.
- [25] J. Soares, T. Sousa, H. Morais, Z. Vale, B. Canizes, and A. Silva, "Application-Specific Modified Particle Swarm Optimization for energy resource scheduling considering vehicle-to-grid," *Applied Soft Computing*, vol. 13, pp. 4264-4280, 2013.
- [26] A. Sheikhi, S. Bahrani, A. Ranjbar, and H. Oraee, "Strategic charging method for plugged in hybrid electric vehicles in smart grids; a game theoretic approach," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 53, pp. 499-506, 2013.
- [27] E. Baker, H. Chon, and J. Keisler, "Battery technology for electric and hybrid vehicles: Expert views about prospects for advancement," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 77, pp. 1139-1146, 2010.
- [28] B. Ramachandran, S. K. Srivastava, and D. A. Cartes, "Intelligent power management in micro grids with EV penetration," *Expert Systems with Applications*, vol. 40, pp. 6631-6640, 2013.
- [29] S. Bolognani and S. Zampieri, "A distributed control strategy for reactive power compensation in smart microgrids," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 58, pp. 2818-2833, 2013.
- [30] P. N. Vovos, A. E. Kiprakis, A. R. Wallace, and G. P. Harrison, "Centralized and distributed voltage control: Impact on distributed generation penetration," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, pp. 476-483, 2007.
- [31] B. Jiang and Y. Fei, "Decentralized scheduling of PEV on-street parking and charging for smart grid reactive power compensation," in *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, pp. 1-6, 2013.
- [32] M. C. Kisacikoglu, B. Ozpineci, and L. M. Tolbert, "Examination of a PHEV bidirectional charger system for V2G reactive power compensation," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 458-465, 2010.
- [33] J. Y. Yong, V. K. Ramachandramurthy, K. M. Tan, and N. Mithulananthan, "Bi-directional electric vehicle fast charging station with novel reactive power compensation for voltage regulation," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 64, pp. 300-310, 2015.