



Technovations in Electrical Engineering & Green Energy System

Research Article

(2022) 1(2):1-16

Decentralized Coordination of Distributed Electric Vehicles Charger for Distribution Network Harmonic Mitigation

Majid Tavoosi¹, PhD Student, Majid Delshad¹, Associate Professor,
Iman Sadeghkhanian^{2,3}, Assistant Professor

¹ Department of Electrical Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

² Smart Microgrid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

³ Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

Abstract:

Today, due to increasing trend in fossil fuel price and environmental concerns, use of electric vehicles (EVs), which are mainly capable of connecting to the distribution network, has grown. The electronic power converter that connects the EV battery to the grid, it makes it possible to use the EV when connected to the distribution system (connected to charging stations or connected at home and even connected when parked in parking lots) to mitigate network harmonics. Due to distributed nature of EVs in power grid, to implement the aim mentioned above, we must execute distributed power line conditioners (DPLC). In this paper, with investigate active filters distributed in the network and present a grid connected EV model for harmonic studies, to their DPLC has been addressed. For simulation, IEEE 13 Node Test feeder is used, that the results confirms the applicability of the proposed model for grid harmonics filtering.

Keywords: Electric Vehicle (EV), Active Filter (AF), Distributed Power Line Conditioner (DPLC), Distribution Network, Power Quality.

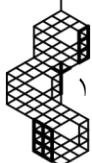
Received: 31 March 2022

Revised: 5 June 2022

Accepted: 9 July 2022

Corresponding Author: Dr. Majid Delshad, delshad@khuisf.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2022.1959178.1014>





مقاله پژوهشی

فناوری‌های نوین در مهندسی برق و سیستم انرژی سبز

هماهنگی غیر متمرکز شارژر خودروهای الکتریکی توزیع شده برای کاهش هارمونیک شبکه توزیع

مجید طاوسی^۱، دانشجوی دکتری، مجید دلشاد^۱، دانشیار، ایمان صادق خانی^۲، استادیار

۱- دانشکده فنی مهندسی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

۲- مرکز تحقیقات ریزشبکه های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۳- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

چکیده: امروزه به علت افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی و نگرانی‌های زیست محیطی، استفاده از خودرو الکتریکی (EV) که عمدتاً دارای قابلیت اتصال به شبکه توزیع هستند، رشد یافته است. مبدل الکترونیک قدرت که واسط اتصال باتری EV به شبکه است، این امکان را فراهم می‌کند که از خودرو برقی در زمان اتصال به شبکه توزیع (اتصال در ایستگاه‌های شارژ یا اتصال در خانه و حتی اتصال به هنگامی که در مراکز پارکینگ پارک شده‌اند) در جهت کاهش هارمونیک‌های شبکه استفاده کرد. به سبب توزیع گسترده EVها در سطح شبکه، برای دستیابی به هدف مزبور باید هماهنگی ناحیه گسترده پالایش‌کننده‌های توان انجام شود. در این مقاله با بررسی فیلترهای اکتیو توزیع‌شده در شبکه و ارائه مدل EV متصل به شبکه برای مطالعات هارمونیک، به هماهنگی ناحیه گسترده آنها پرداخته می‌شود. برای شبیه‌سازی شبکه ۱۳ باس IEEE استفاده شده است؛ به طوریکه نتایج نشان دهنده‌ی توانایی مدل ارائه شده در جبران هارمونیک های شبکه است.

واژه های کلیدی: خودرو الکتریکی، فیلتر اکتیو، پالاینده توان ناحیه گسترده، شبکه توزیع، کیفیت توان

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۱۱

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۱۸

نویسنده‌ی مسئول: دکتر مجید دلشاد، delshad@khuisf.ac.ir

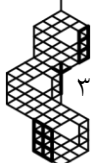
DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2022.1959178.1014>



در سالیان اخیر توسعه‌ی استفاده از خودروهای الکتریکی (EVs^۱) با هدف کاهش آلودگی‌های زیست محیطی از سوی سیاست‌گذاران انرژی در کشورهای مختلف مورد توجه قرار گرفته است. سیاست‌های حمایتی از EV در کشورهای پیشرو در این صنعت از جمله تدارکات عمومی، تخصیص بودجه برای شارژ زیرساخت‌ها، نصب پارکینگ رایگان و دسترسی ترجیحی برای خرید EV باعث رشد ۴۱ درصدی در فروش این وسیله حمل و نقل در جهان در سال ۲۰۲۰ و رسیدن موجودی جهانی EV به ۱۰ میلیون دستگاه شده است (سهام اروپا حدود ۴۷ درصد، سهم چین حدود ۳۸ درصد، سهم آمریکا حدود ۱۰ درصد و سهم سایر کشورها حدود ۵ درصد)؛ در حالیکه فروش خودروهای معمولی بدلیل پاندمی COVID-19 با کاهش ۱۴ درصدی در سال ۲۰۲۰ روبرو شده است [۱]. از جنبه تقاضا، EV نسبت به خودرو با موتور احتراق داخلی کارآمدتر است؛ بعلاوه آنکه می‌تواند انرژی مورد نیاز خود را با سهولت بیشتری از طیف گسترده‌ای از انرژی‌های تجدیدپذیر تامین کند. از جنبه عرضه، فناوری‌هایی مانند وسیله نقلیه به شبکه (V2G^۲) که نیازمند استفاده از شارژرهای دوطرفه به‌جای شارژرهای یک‌طرفه است، می‌تواند EVها را به دستگاه‌های ذخیره‌ساز انرژی تبدیل کند که به باتری اجازه می‌دهد انرژی را در دوره‌های کم مصرف از شبکه برق ذخیره کند و سپس در زمانی که بیشتر مورد نیاز است، آن را به شبکه تخلیه کند؛ به گونه ای که می‌تواند باعث افزایش انعطاف پذیری کلی شبکه شود [۲ و ۳].

EV به‌عنوان بار جدید سیستم قدرت معمولاً به شبکه توزیع^۳ وصل می‌شود. چنانچه تحت توجه کافی در نحوه‌ی مدیریت اتصال و شارژ در سطح سیستم قدرت قرار نگیرند، می‌توانند شبکه را با چالش جدی در حوزه‌ی کیفیت توان، امنیت تأمین برق و افزایش تلفات مواجه سازند. این چالش به‌علت نامشخص بودن میزان بار این خودروها در ساعات مختلف شبانه‌روز و نیز درخواست انرژی از شبکه بیش از مقدار قابل تحویل شبکه می‌باشد؛ در صورت استفاده از قابلیت V2G، علاوه‌بر رفع شدن مشکلات به‌وجود آمده در زمان شارژ شدن EV، می‌توان از مزیت‌های آن نظیر تنظیم فرکانس، خدمات کنترل ولتاژ و توان راکتیو، خدمات ذخیره چرخان، کنترل پارامترهای کیفیت توان و ... استفاده کرد. با توجه به اینکه اتصال EVها به شبکه از طریق واسط‌های الکترونیک قدرت صورت می‌پذیرد، از یک سو می‌تواند کیفیت توان سیستم قدرت را از طریق تولید هارمونیک‌های ولتاژ و جریان متأثر نمایند، ولی از سوی دیگر وجود همین واسط‌های الکترونیک قدرت می‌تواند امکان استفاده از مجموعه‌ی باتری و شارژر خودرو را به‌صورت پالایندگی توان^۴ (فیلترهای اکتیو توزیع شده^۵) فراهم کنند [۴-۶]؛ و تاثیرات مزبور به شرط تامین هماهنگی بین شارژر EV و تجهیزات شبکه اتصال یافته مطلوب واقع می‌شود. به موازات بحث فوق، در سالیان اخیر توجه به موضوع کیفیت توان افزایش یافته است و محققین به دنبال ارائه راهکارهایی برای ارتقای سطح آن در سیستم قدرت هستند. یکی از موضوعات مهم در این حوزه، بررسی هارمونیک‌ها در شبکه و نحوه‌ی کاهش آن‌ها می‌باشد [۷]. در مقالات تکنیک‌های متعددی برای جبران‌سازی هارمونیک‌ها یا بهبود کیفیت توان در شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی پیشنهاد شده است، که عمدتاً می‌توانند در چهار دسته طبقه بندی شده‌ی جدول (۱) ارائه شوند.

با توجه به گسترش سطح اتوماسیون در شبکه‌های توزیع در محیط شبکه‌ی هوشمند^۶ آینده، ارتباط مخابراتی مؤثر با کلیه‌ی نقاط شبکه‌ی توزیع (از جمله بارها) برقرار می‌باشد. با فرض وجود این دسترسی، ارتباطی مستقیم بین بهره‌برداری شبکه توزیع و EVها برقرار شده و امکان کنترل از راه دور آن‌ها فراهم است. با توجه به تحقیقات انجام شده [۲۱ و ۲۲]، امکان استفاده از EVها به‌عنوان فیلترهای اکتیو وجود دارد. لذا تعداد زیادی فیلتر اکتیو در نقاط مختلف شبکه در دسترس است که می‌توان با انتخاب مناسب استراتژی شارژر، از این ظرفیت برای ارتقاء شاخص‌های کیفیت توان و بهبود بهره‌وری تکنولوژی V2G استفاده کرد. در [۲۰]، با توجه به نیاز به زمانی برای شارژ شدن EVها در زمان پارک (که ممکن است در پارکینگ‌ها پارک شده باشند)، از باتری EVها برای کنترل توان راکتیو استفاده شده است و البته این در حالی است که با وجود این کارکرد شارژر EV، تاثیر اندکی در کاهش طول عمر باتری صورت می‌پذیرد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد، این عملکرد باعث افزایش یافتن حاشیه پایداری ولتاژ و بهبود برخی از مشخصه‌های کیفیت توان می‌شود. در این مقاله تمرکز روی کاهش هارمونیک، با در نظر گرفتن EVها بصورت توزیع شده ملاک عمل قرار نگرفته است. نتایج به‌دست آمده در [۲۱ و ۲۲] در قبال استفاده از EVها، حاکی از آن است که فیلتر اکتیو پیشنهادی، کیفیت توان شبکه را بهبود بخشیده و در حد استاندارد [۲۵] نگه می‌دارد. عدم ارائه مدل دقیق پخش بار هارمونیک‌ی شبکه توزیع شعاعی و عدم استفاده از ظرفیت توزیع شده EV در سطح شبکه از جمله چشم پوشی‌های این مطالعه است. بعلاوه مقاله [۱۷] روی بررسی در زمینه هزینه‌های استفاده از EVها به‌عنوان پالایندگی کیفیت توان (با تمرکز بر توان راکتیو) متمرکز شده است. بر این اساس هزینه استفاده از EV





جدول (۱): دسته بندی روشهای ارائه شده برای بهبود آلودگی هارمونیک شبکه توزیع

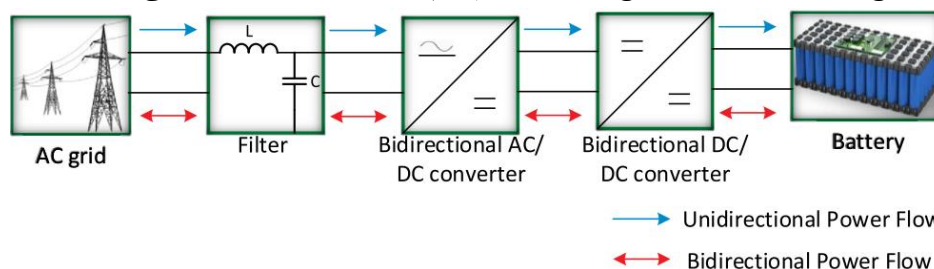
ردیف	روش	شرح	مزایا	معایب
۱	فیلتر پسیو [۸]	✓ شامل سلف، خازن و مقاومت ✓ از ساده ترین راه حل‌های متداول برای کاهش اعوجاجات هارمونیک ✓ قابل تنظیم ✓ دارای دو نوع فیلتر تک تنظیمه و فیلتر بالاگذر	✓ ساده ✓ ارزان قیمت	✓ عدم عملکرد صحیح تحت بار متغیر (غیر خطی) یا تغییر آرایش سیستم ✓ پاسخ دینامیکی کند ✓ عدم سهولت در اجرای جبران سازی توزیع شده در سطح شبکه
۲	فیلتر اکتیو [۹-۱۳]	✓ مبتنی بر ادوات الکترونیک قدرت و روشهای کنترل ✓ کاربرد وسیع برای جبران سازی هارمونیک‌ها و نامتعادلی های جریان بار، توان راکتیو بار، هارمونیکهای ولتاژ و تنظیم ولتاژ ترمینال خط یا بار ✓ نصب بصورت موازی، سری و سری- موازی ✓ طبقه بندی بر اساس محدوده توان و سرعت پاسخ مورد نیاز در سیستم های جبران کننده، اتصالات و آرایش های مدار قدرت، پارامترهای جبران شونده، تکنیک ها و روشهای کنترلی و تکنیک مورد استفاده برای تخمین ولتاژ و جریان مرجع	✓ آداپتیو ✓ سرعت بالا ✓ پاسخ دینامیکی دقیق ✓ جبران با دقت بالا ✓ قابلیت تنظیم رخداد رزونانس در مولفه های فرکانس بالا	✓ دارای محدودیت روی فرکانس کلیدزنی و محدوده توان ادوات نیمه هادی در کاربردهای توان بالا ✓ پیچیدگی طراحی ✓ پر هزینه در موارد کاربرد توزیع شده ✓ طراحی پرهزینه کنترل محلی
۳	انرژی های تجدیدپذیر [۱۴-۱۶]	✓ فرمول بندی کاهش هارمونیک در سطوح کنترلی DG ^v های تجدیدپذیر ✓ جبران متمرکز و یا توزیع شده وابسته به الگوی نصب DG جهت تامین توان اکتیو و راکتیو ✓ قابلیت مدیریت توان اکتیو و راکتیو همزمان با جبران سازی هارمونیک	✓ سرعت دینامیکی بالا ✓ در دسترس (بدلیل نفوذ بالای DG در شبکه توزیع) ✓ کم هزینه	✓ دارای تأخر در سطوح کنترلی DG (با توجه به مفهوم میکروگرید) ✓ وابسته به ضریب نفوذ DG ^a ✓ طیف جبران سازی متغیر وابسته به ماهیت متغیر انرژی های تجدیدپذیر ✓ طراحی پرهزینه مدار کنترل ✓ وابستگی به مکان نصب DG ✓ اجرای عمده کنترل متمرکز و عدم دسترسی به جبران سازی توزیع شده با توجه به تعداد بیشتر سناریوهای نصب متمرکز DG و عدم در اختیار بودن سیستم کنترل شارژ DG های توزیع شده در شبکه (مشارکت کنندگان خصوصی)
۴	EV (بعنوان فیلتر اکتیو) [۱۷-۲۴]	✓ استفاده از مجموعه شارژر EV به عنوان یک فیلتر اکتیو با توجه به زمان شارژ شدن EV ها در وضعیت پارک ✓ قابلیت فیلترینگ و کنترل توان راکتیو ✓ قابلیت افزایش حاشیه پایداری ولتاژ و بهبود کیفیت توان به وسیله ی کاهش هارمونیکها	✓ قابلیت متمرکز بودن و توزیع در شبکه ✓ کم هزینه ✓ افزایش مشارکت فعال مصرف کننده در بستر شبکه هوشمند ✓ محدوده ی بالای جبران سازی هارمونیک سلفی و خازنی با دقت مطلوب ✓ قابلیت تنظیم رخداد رزونانس در مولفه های فرکانس بالا	✓ وابستگی طیف جبران سازی به مشارکت مصرف کننده ✓ غیرقابل برنامه ریزی بودن زمان جبران سازی ✓ وابستگی به ساختار شارژر ✓ دارای ماهیت عملکرد لحظه ای ^۹



به‌عنوان جبران‌ساز توان راکتیو بیشتر از خازن بوده و مشابه ادوات جبران‌ساز استاتیکی مانند D-statcom است. اما وجود ویژگی‌ها و قابلیت بیشتر جبران‌سازی توسط EVها نسبت به خازن‌ها مانند، کنترل پیوسته توان اکتیو و راکتیو، سرعت عملکرد بالا، قابلیت کارکرد سلفی و خازنی، جبران‌سازی هارمونیک، تنظیم ولتاژ، کنترل توان راکتیو باعث شده تا جبران‌سازی توسط EVها از جذابیت بالاتری برخوردار باشد. همچنین امکان تقسیم هزینه پالایش بین چندین مشترک مزیت دیگر استفاده از EVها به‌عنوان پالاینده کیفیت توان است. در این مقاله، امکان هماهنگی بین EVها برای عملکرد به‌عنوان فیلتر اکتیو توزیع شده در جهت کاهش هارمونیک های شبکه توزیع شعاعی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به طور کلی نوآوری‌های این مقاله به شرح زیر است:

- طراحی پالایش‌کننده توان به‌صورت ناحیه گسترده به‌وسیله‌ی EVها در زمان اتصال به شبکه.
- ارائه یک راه‌حل ارزان‌قیمت به‌عنوان جایگزین ادوات Custom Power در شبکه قدرت برای کاهش هارمونیک‌های شبکه.
- هماهنگی شارژر EVها در جهت کاهش و حذف آلودگی‌های هارمونیک در سیستم قدرت.

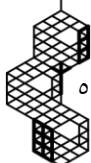
روند ارائه مطالب به این صورت است که در بخش دوم الگو و مدل شارژر بعنوان یک فیلتر اکتیو مطرح می‌شود. بخش سوم فرمول‌بندی پخش توان هارمونیک شبکه توزیع و هماهنگی شارژر EV جهت کاهش هارمونیک های شبکه بیان می‌شود. در بخش چهارم شبیه سازی و نتایج آن روی شبکه تست طرح شده و بخش پنجم نتیجه گیری مقاله را ارائه می‌دهد.



شکل (۱): توپولوژی عمومی شارژر یک جهته و دو جهته [۲۶]

۲- فیلتر اکتیو توزیع شده مبتنی بر EV

فرآیند شارژر باتری EV به دو روش داخل خودرو و بیرون خودرو انجام می‌شود. در روش داخل خودرو شارژر داخل خود EV تعبیه شده و کاربر برای اتصال به شبکه قدرت تنها به ورودی شارژر دسترسی دارد؛ به سبب محدودیت در واسط الکترونیک قدرت مورد استفاده، نرخ شارژر خودرو محدود بوده و سرعت شارژر باتری کم است. در روش خارج خودرو، شارژر خارج از وسیله قرار داشته و به‌طور مستقیم دسترسی به باتری امکان‌پذیر می‌باشد. به کمک این شارژر عمل شارژ سریع انجام می‌شود؛ این نوع شارژر عموماً در ایستگاه‌های شارژ و یا مناطق پارکینگ واقع شده‌اند. اصول عملکرد شارژرهای خودرو یکسان بوده تنها با این تفاوت که در شارژر داخل خودرو تبدیل ولتاژ AC به DC داخل خودرو انجام شده و خودرو از یک منبع AC شارژ می‌شود؛ ولی در شارژر خارج خودرو تبدیل ولتاژ خارج خودرو بوده و خودرو به‌عنوان یک بار DC عمل می‌کند. شکل (۱) توپولوژی عمومی شارژر EV را نشان می‌دهد. معمولاً راه‌حل‌هایی که برای شارژر خودروهای الکتریکی در نظر گرفته می‌شود، در سطوح قدرت مختلف انجام می‌گیرد. سطح ۱ برای شارژر تا حدود ۳ kW است که می‌توان از پریزهای خانگی نیز برای آن‌ها استفاده کرد؛ سطح ۲ برای قدرت شارژر تا حدود ۱۹/۲ kW و جریان ۸۰ آمپر و سطح ۳ برای قدرت شارژر بیش از ۵۰ kW است. سطح ۱ به شارژر آهسته و سطح ۳ به شارژر سریع اشاره دارد [۲۶]. جدول (۲) طبقه بندی شارژرهای EV را به اختصار بیان می‌کند. بدون از دست رفتن کلیت مسأله در این بخش فرض می‌کنیم که تعدادی EV مجهز به شارژر دوطرفه در یک پارکینگ در دسترس هستند. مزیتی که ایستگاه‌های شارژر یا مراکز پارکینگ نسبت به اتصال انفرادی EV به شبکه دارد این است که اولاً مدیریت یک گروه از EVها به‌عنوان یک بار برای شبکه ساده‌تر بوده و ثانیاً می‌توانیم هر زمان که لازم باشد از آن به‌عنوان یک منبع انرژی توزیع شده برای شبکه استفاده نماییم [۲۰]. از آنجایی که EV یا ایستگاه‌های شارژر و مراکز پارکینگ خودورها به‌صورت موازی با شبکه قرار می‌گیرند و چون هدف ما از طراحی یک فیلتر اکتیو در جهت کاهش جریان‌های هارمونیک شبکه است، به همین علت آن‌ها را به‌صورت فیلتر اکتیو موازی در شبکه مدل می‌کنیم. نحوه‌ی عملکرد فیلتر اکتیو موازی بدین صورت است که ابتدا جریان‌های شبکه پایین دست محل اتصال خود را اندازه‌گیری نموده، سپس به کمک بلوک‌های کنترلی خود اقدام به تولید جریان مرجع و سپس سیگنال‌های گیت مورد نیاز برای کلیدزنی ادوات الکترونیک قدرت می‌نماید. در نهایتاً



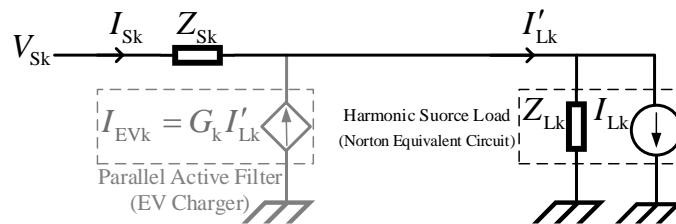
با انجام این عملیات، جریانی به شبکه تزریق خواهد نمود که باعث می‌شود جریان کشیده شده توسط بارهای غیرخطی پایین دست فیلتر اکتیو از شبکه بالا دست، عاری از مؤلفه‌های هارمونیک جریانی باشد. به عبارت ساده‌تر، فیلتر اکتیو موازی جریانی هارمونیک بارهای غیرخطی پایین دست خود را تأمین می‌نماید [۲۱ و ۲۲].

جدول (۲): تقسیم‌بندی شارژر EV [۲۷]

انواع طبقه‌بندی	زیرگروه
توپولوژی مداری شارژر	تکی ^{۱۱} (سطح ۱ و سطح ۲) - مجتمع ^{۱۱} (سطح ۳)
موقعیت و مکان نصب شارژر	داخل خودرو - خارج خودرو
نحوه اتصال به شبکه	القایی (بی سیم) - شارژی
نوع برق اتصالی	جریان متناوب - جریان مستقیم
جهت شارش توان	یک‌طرفه ^{۱۲} - دوطرفه ^{۱۳}

۱-۲- تحلیل روابط جبران‌سازی هارمونیک شبکه توزیع به کمک فیلتر اکتیو مبتنی بر EV

بار هارمونیک را می‌توان به دو شکل منبع ولتاژ و یا منبع جریان مدل‌سازی نمود. در صورتی که فیلتر اکتیو سری با شبکه باشد بار هارمونیک به صورت منبع ولتاژ و در صورتی که فیلتر اکتیو موازی با شبکه باشد بار هارمونیک به صورت منبع جریان مدل می‌شوند [۲۸]. با توجه به اینکه شارژر EV بصورت موازی به شبکه اتصال می‌یابد، بار هارمونیک در این شرایط بصورت منبع جریان هارمونیک مدل می‌شود. شکل (۲) فیلتر اکتیو موازی مبتنی بر EV را نشان می‌دهد که به صورت موازی با بار (منبع هارمونیک) قرار گرفته است.



شکل (۲): شارژر EV اتصال یافته به شبکه توزیع با بار (منبع جریان) هارمونیک

در این شکل V_{Sk} ولتاژ منبع بالادست، I_{Sk} جریان کشیده شده از منبع، Z_{Sk} امپدانس منبع بالادست تا نقطه اتصال بار و G_k تابع انتقال معادل شارژر EV است که مطابق رابطه‌ی (۱) شامل مقدار صفر برای مؤلفه اصلی (به معنی عدم جبران) و مقدار یک برای مؤلفه‌های هارمونیک (جبران‌سازی) می‌باشد.

$$G_k = \begin{cases} 0 & k = 0 \\ 1 & k > 1 \end{cases} \quad (1)$$

بر اساس قاعده جمع آثار، جریانهای I_{Sk} و I'_{Lk} مطابق روابط (۲) و (۳) بدست می‌آید (لندیس k به معنی در نظر گفتن تمامی پارمترها در شرایط هارمونیک بودن جریان است).

$$I_{Sk} = \frac{Z_{Lk}}{Z_{Sk} + (Z_{Lk}/1 - G_k)} I_{Lk} + \frac{V_{Sk}}{Z_{Sk} + (Z_{Lk}/1 - G_k)} \quad (2)$$

$$I'_{Lk} = \frac{Z_{Lk}/1 - G_k}{Z_{Sk} + (Z_{Lk}/1 - G_k)} I_{Lk} + \frac{(1/1 - G_k)V_{Sk}}{Z_{Sk} + (Z_{Lk}/1 - G_k)} \quad (3)$$

در صورتیکه $G_k = 0$ باشد، یعنی بار اتصال یافته به شبکه فاقد درخواست هارمونیک بوده و نیاز به عملکرد شارژر EV در جبران هارمونیک نمی‌باشیم. بنابراین روابط فوق بصورت زیر در می‌آید:

$$I_{Sk} = I'_{Lk} = \frac{Z_{Lk}}{Z_{Sk} + Z_{Lk}} I_{Lk} + \frac{V_{Sk}}{Z_{Sk} + Z_{Lk}} \quad (4)$$

در صورتیکه $Z_{Lk}/1-G_k \gg Z_{Sk}$ باشد (معادل $|1-G_k| \cong 0$ به معنی هارمونیک بودن بار و نیاز به عملکرد شارژر EV جهت جبرانسازی)، معادلات جریان (۲) و (۳) بصورت زیر خواهد بود:

$$I_{Sk} = (1-G_k)I_{Lk} + \frac{(1-G_k)V_{Sk}}{Z_{Lk}} \cong 0 \quad (5)$$

$$I'_{Lk} = I_{EVk} = I_{Lk} + \frac{V_{Sk}}{Z_{Lk}} \quad (6)$$

معادله (۶) همان جریان فیلتر اکتیو برای جبران هارمونیکهای مورد درخواست بار هارمونیک متصل به شبکه توزیع است. با تامین این جریان توسط مبدل پاور الکترونیک EV، منبع بالادست عاری از هرگونه مؤلفه هارمونیک بوده و جریان مؤلفه هارمونیک بار غیرخطی، توسط فیلتر اکتیو موازی تأمین می‌شود. بنابراین برای آن که خودرو بتواند چنین عملی را انجام دهد لازم است شرط $Z_{Lk}/1-G_k \gg Z_{Sk}$ در شبکه برقرار باشد [۲۸]. در شبیه‌سازی‌هایی که در بخش سوم ارائه خواهد شد، بارهای هارمونیک موجود در شبکه به صورت منبع جریان هارمونیک مدل خواهند شد و هدف از ورود EV به شبکه جبران بخش هارمونیک شبکه پایین دست خود می‌باشد بنابراین می‌توان EV را مطابق شکل (۲) به صورت یک منبع جریان مدل نمود.

۲-۲- مدل پخش توان هارمونیک (HPF^{۱۴})

در موضوع کاهش هارمونیک های شبکه توزیع به کمک فیلترهای اکتیو در عموم تحقیقات انجام شده فرض بر این بوده است که این فیلتر دقیقاً در محل بار غیرخطی نصب می‌شود و در تحقیقات اندکی که از EV بعنوان فیلتر اکتیو استفاده شده است نیز بنا بر جبرانسازی محلی است. لذا در زمان طراحی فیلتر اکتیو، توجه کافی به توان جبران‌سازی فیلتر اکتیو می‌شود [۷]. اما چنانچه قرار باشد شارژر EV به عنوان فیلتر اکتیو استفاده شود، ممکن است که در بسیاری از موارد فیلترهای اکتیو توزیع شده حاصل در محل بارها قرار نگرفته باشند و یا در صورت قرار گرفتن در محل بار، توان لازم برای حذف هارمونیک‌های محلی را نداشته باشند. در این شرایط لازم است که توانمندی این فیلترهای اکتیو توزیع شده در کاهش هارمونیک‌ها مورد ارزیابی قرار گیرند. به همین جهت در این قسمت، یک مدل ریاضی ساده پخش توان هارمونیک ارائه می‌شود که به کمک آن، توانمندی EVها در کاهش هارمونیک‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

با فرض مشخص بودن جریان هارمونیک هر بار برای تحلیل رفتار هارمونیک شبکه توزیع، می‌توان از معادلات پخش توان هارمونیک که به صورت معادلات گره نوشته می‌شوند به صورت زیر استفاده کرد:

$$\left(1/Z_{line}^L\right) \sum_{j=1}^J V_{hj} * A_{linej}^{LN} = I_{hline} \quad \forall h, \forall line \quad (7)$$

$$\sum_{line=1}^L I_{hline} * A_{linej}^{LN} + \left(1/Z_j^D\right) \sum_{j=1}^J V_{hj} = \sum_{k=1}^K I_{hk}^F * A_{kj}^{FN} \quad \forall h, \forall j \quad (8)$$

$$I_{hk}^F = \left|I_{hk}^F\right| R_{hk}^F \quad k=1, \dots, K \quad (9)$$

$$X_{hline} = h * X_{1line} \quad \forall h \quad (10)$$

$$Z_{line}^L = R_{line}^L + ihX_{line}^L \quad \forall line \quad (11)$$

رابطه (۷) نشان دهنده‌ی جریان عبوری از هر خط شبکه بوده که شامل مؤلفه‌های مرتبه hام هارمونیک است. با نوشتن معادله جریان کرشهف (KCl^{۱۵}) در هر شین شبکه، رابطه‌ی (۸) حاصل می‌شود که شامل جریان هارمونیک خارج شونده از شین به علاوه‌ی جریان کشیده شده توسط بار هارمونیک بوده و در صورتی که در شین مربوطه شارژر EV بعنوان فیلتر اکتیو متصل باشد حاصل این عبارت برابر جریان هارمونیک تزریق شده توسط شارژر به آن شین بوده و اگر EV وجود نداشته باشد حاصل آن عبارت برابر صفر می‌شود. در این معادلات، ماتریس A^{LN} شامل مقادیر صفر، ۱ و -۱ بوده که عدد صفر عدم وجود تلاقی خط با شین، عدد ۱ نشان دهنده خارج شدن خط از شین و عدد -۱ نشان دهنده‌ی وارد شدن خط به شین می‌باشد، A^{DN} ماتریس تلاقی بارها و شین‌های شبکه، A^{FN} ماتریس تلاقی شارژر EV و شین‌های شبکه، $V_{hj}^N \ll V_{hj}^N$ به ترتیب اندازه و فاز و ولتاژ هارمونیک مرتبه‌ی hام شین jام، $I_{hline}^L \ll I_{hline}^L$ به ترتیب اندازه و فاز جریان هارمونیک مرتبه‌ی hام خط lineام، $I_{hk}^F \ll I_{hk}^F$ به ترتیب اندازه و فاز جریان هارمونیک مرتبه‌ی hام شارژر EV بعنوان فیلتر اکتیو kام، $I_{hi}^D \ll I_{hi}^D$ به ترتیب اندازه و فاز جریان هارمونیک مرتبه‌ی hام بار lineام، X_{hline} راکتانس هارمونیک خط





line، Z_{line}^L ماتریس امپدانس خطوط شبکه و Z_j^D ماتریس امپدانس بارها می‌باشد (برای مشاهده ماتریس ها و امپدانس ها به ضمیمه مراجعه کنید). از آن جا که شبکه‌های توزیع عموماً شعاعی هستند، برای ارزیابی توانمندی EVها در کاهش هارمونیک، کمیت‌های THD^{16} برای ولتاژ شین‌ها و جریان منبع بالادست شبکه‌ی توزیع بصورت زیر است:

$$\%THD_j^N = 100(1/V_{lj}) \sqrt{\sum_{j=1}^j |V_{hj}|^2} \quad \forall h \quad (12)$$

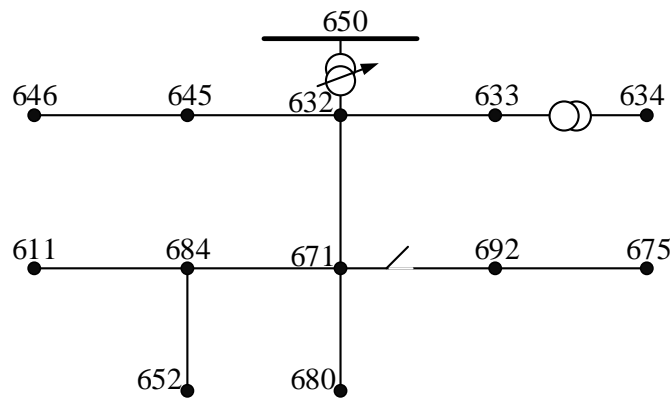
$$\%THD_{isj} = 100(1/i_{sl}^j) \sqrt{\sum_{h=3}^{19} |i_{shj}|^2} \quad \forall h \quad (13)$$

در ادامه شبکه‌ی استاندارد ۱۳ شین IEEE مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و با انجام شبیه سازی، توانمندی EVها در موردهای مطالعاتی مختلف در حذف هارمونیک‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۳- شبیه سازی

شبکه‌ای که برای انجام شبیه‌سازی در این مقاله استفاده می‌شود، در شکل (۳) نشان داده شده است. در این شبکه سطح ولتاژ در فیدر اصلی ۱۱۵ کیلوولت است که توسط یک ترانسفورماتور کاهنده به ۴/۱۶ کیلوولت کاهش یافته و در تمام شین‌ها این سطح ولتاژ وجود دارد. تنها در شین شماره‌ی ۶۳۴، سطح ولتاژ به کمک یک ترانسفورماتور کاهنده دیگر به سطح ولتاژ ۴۸۰ ولت کاهش می‌یابد. در این شبکه ۸ بار نقطه‌ای به صورت سه‌فاز متعادل و ۲ خازن سه‌فاز متعادل در شین‌های ۶۱۱ و ۶۷۵ وجود دارد. تعداد خطوط بین شین‌ها ۱۲ خط و یک کلید بین شین‌های ۶۷۱ و ۶۹۲ وجود دارد. از پدیده رزونانس در شبکه تست صرف نظر می‌نمائیم، چون وجود پدیده رزونانس باعث ایجاد اختلال در عملکرد فیلترهای اکتیو می‌شود. همچنین برای آن که نتایج به دست آمده تنها حاصل از ورود بارهای هارمونیک در شبکه باشند و مسائل دیگر در این نتایج تأثیری نداشته باشند، کلیه بارگذاری‌ها به صورت متعادل انجام پذیرفته‌اند. بدون از دست رفتن کلیت مسأله و صرفاً به جهت سادگی، مدل جایگاه‌های شارژ EVها را در شبیه‌سازی به صورت مدل خارج خودرو در نظر می‌گیریم. با توجه به این فرضیه و با وجود زیرساخت‌های مخابراتی در شبکه‌های هوشمند، بهره‌بردار شبکه قادر است به صورت لحظه به لحظه از ورود EVها به شبکه اطلاع داشته باشد؛ به نحوی که می‌تواند مشخص نماید چه خودرویی، در چه زمانی و در چه مکانی به شبکه متصل است. بنابراین تعداد ورود EVها به شبکه در هر زمان مشخص می‌باشد. بارهای موجود در شبکه به صورت امپدانس و ادmittانس با آرایش‌های مثلث و ستاره و به صورت بارهای سه‌فاز متعادل مدل می‌شوند و بارهای هارمونیک به صورت منبع جریان و شارژر EVها به صورت منبع جریان مدل شده‌اند. برای مدل نمودن خطوط شبکه، مقادیر امپدانس‌ها و ادmittانس‌های توالی صفر، مثبت و منفی نیاز است. ولی در داده‌های شبکه برای هر خط مشخصات پیکربندی آن داده شده است. در توضیحات ارائه شده در بخش قبل، مدل‌سازی شارژر EVها به صورت یک منبع جریان صورت گرفت، در نتیجه در موارد مطالعاتی مورد بررسی این فصل، شارژر EVها به صورت یک منبع جریان ایده‌آل با مشخصه‌ی خازنی و ضریب توان صفر (یعنی $\cos \varphi = 0$) که φ زاویه بین ولتاژ و جریان آن می‌باشد) در نظر گرفته می‌شود. همچنین در این بخش فرض بر این است که مقادیر انتخابی برای میزان جریان تزریقی به شبکه توسط شارژر EVها به گونه‌ای باشد که شارژر EVها این امکان را نداشته باشند که بتوانند به صورت محلی کار فیلترینگ را انجام دهند. بنابراین کل جریان فیلترینگ شاید در بعضی موارد از میزان کل جریان‌های هارمونیک کشیده شده توسط بارهای متصل به شبکه کمتر نیز باشد تا بدین صورت برای جبران آن از شبکه اصلی جریان کشیده شود و همانطور که ذکر شد برای ساده‌سازی مسئله، مدل منبع جریان شارژر EVها و شبکه را نیز به صورت ایده‌آل در نظر گرفته‌ایم. بنابراین در شینی که بار هارمونیک وجود دارد شارژر EV وجود نخواهند داشت. با توجه به فرضیات فوق، اکنون به بررسی چند مورد مطالعاتی که جزئیات آن در جدول (۳) آمده است، می‌پردازیم و با توجه به نتایج حاصل شده به بررسی تأثیر ورود EV در مکان‌های مختلف شبکه می‌پردازیم و میزان بهبود کیفیت توان شبکه که در اثر حضور بارهای هارمونیک خراب شده است را توسط شارژر EVها مورد سنجش قرار می‌دهیم.





شکل (۳): شبکه توزیع شعاعی ۱۳ شینه IEEE

جدول (۳): مشخصات موردهای مطالعاتی مورد بررسی بر روی شبکه واقعی

مورد مطالعاتی	محل بارها در شبکه	میزان دامنه هر مؤلفه هارمونیک بارها	محل اتصال EVها به شبکه	محل اندازه‌گیری اطلاعات مورد نیاز برای شارژر EV	شاخص مورد محاسبه شبکه
اول	شین ۶۱۱، ۶۴۵، ۶۳۴ و ۶۷۵، ۶۵۲	۲۰٪ هارمونیک مرتبه ۵	-	-	-
دوم	شین ۶۱۱، ۶۴۵، ۶۳۴ و ۶۷۵، ۶۵۲	۳۰٪ هارمونیک مرتبه ۵	شین‌های ۶۹۲ - ۶۸۴	خط بین شین ۶۹۲ - ۶۷۵ و خط بین شین ۶۸۴ - ۶۱۱	
سوم	شین ۶۱۱، ۶۴۶، ۶۳۴ و ۶۷۵، ۶۵۲	۳۵٪ هارمونیک مرتبه ۵	شین‌های ۶۹۲ - ۶۸۴	خط بین شین ۶۹۲ - ۶۷۵ و خط بین شین ۶۸۴ - ۶۱۱	THD_v شین تغذیه بالادست
		۳۰٪ هارمونیک مرتبه ۷ ۲۵٪ هارمونیک مرتبه ۱۱ ۲۰٪ هارمونیک مرتبه ۱۳ ۱۵٪ هارمونیک مرتبه ۱۷			
چهارم	شین ۶۱۱، ۶۴۶، ۶۳۴ و ۶۷۵، ۶۵۲	۳۰٪ هارمونیک مرتبه ۷ ۲۵٪ هارمونیک مرتبه ۱۱ ۱۰٪ هارمونیک مرتبه ۱۹	شین‌های ۶۴۵ - ۶۹۲ - ۶۸۴	خط بین شین ۶۹۲ - ۶۷۵ و خط بین شین ۶۸۴ - ۶۱۱ و خط بین شین ۶۴۶ - ۶۴۵	

در خصوص اطلاعات ارائه شده در جدول (۳) می‌توان گفت مکان بارها در دو مورد مطالعاتی اول و دوم همانند هم می‌باشد. اطلاعات اندازه‌گیری شده، مربوط به شبکه پایین دست محل اتصال شارژر EV به شبکه بوده، به طوری که اندازه‌گیری از خط بین شین‌های ۶۹۲ و ۶۷۵ مربوط به شارژر EV متصل به شین ۶۹۲، خط بین شین‌های ۶۸۴ و ۶۱۱ مربوط به شارژر EV شین ۶۸۴ و خط بین شین‌های ۶۴۶ و ۶۴۵ مربوط به شارژر EV شین ۶۴۵ می‌باشد. هدف از انجام موارد مطالعاتی فوق بررسی نمودن تأثیر ورود تک تک یا همزمان شارژر EVها به شبکه با وجود بارهای هارمونیک شبکه است. روند بررسی موارد مطالعاتی بدین صورت است که ابتدا شبکه را براساس مشخصات جدول (۳) شبیه‌سازی نموده، در حالت عدم حضور شارژر EV پخش توان هارمونیک را محاسبه کرده، سپس با وجود مشخص بودن مکان اتصال شارژر EV به شبکه، جریان هارمونیک شبکه پایین دست شارژر EV را تعیین نموده و مقدار فاز جریان هارمونیک تریقی شارژر EV را تعیین می‌نمائیم. سپس مقادیر محاسبه شده را در مشخصات شارژر EV وارد نموده و نهایتاً پخش بار هارمونیک در شبکه، محاسبه شده و نتایج حاصل شده را بررسی می‌نمائیم. برای تعیین فاز جریان هارمونیک تریقی شارژر EV از اندازه‌گیری فاز جریان شبکه پایین دست آن استفاده می‌کنیم. جهت جریان شبکه پایین دست شارژر EV ممکن است از شینی که شارژر EV به آن متصل است خارج شود که فاز آن مثبت است و یا به آن شین وارد شود که فاز آن منفی است. بنابراین در تعیین فاز شارژر EV علامت فاز جریان مهم می‌باشد. برای تعیین فاز جریان تریقی شارژر ابتدا از شبکه پخش توان هارمونیک را محاسبه نموده (زمانیکه هنوز شارژر EV به شبکه متصل نیست)، سپس فاز مؤلفه جریان هارمونیک خط شبکه پایین دست شارژر EV را تعیین می‌کنیم. اگر این فاز دارای علامت مثبت باشد آن را با فاز ۱۸۰ درجه جمع نموده و مجموع حاصل را با مؤلفه اصلی جریان شارژر EV جمع می‌نمائیم. اما اگر فاز محاسبه شده دارای علامت منفی بود (یعنی جریان هارمونیک در حال وارد شدن به شین باشد) فاز محاسبه شده را با فاز ۳۶۰ درجه جمع و در نهایت با فاز مؤلفه اصلی جریان شارژر EV جمع می‌نمائیم. علت نیاز به





مؤلفه اصلی جریان فیلتر اکتیو به این خاطر است که در نرم‌افزار، تعیین فاز مؤلفه‌های هارمونیک جریان شارژر EV، براساس جریان مؤلفه اصلی شارژر صورت می‌گیرد. اما روش محاسبه‌ی فاز مؤلفه‌ی اصلی جریان شارژر این‌گونه است که شارژر EV را به شبکه متصل نموده و از شبکه پخش توان هارمونیک در حالت فرکانس اصلی گرفته، حال مقدار فاز جریان شارژر EV را به‌عنوان مؤلفه اصلی جریان آن در نظر می‌گیریم.

۳-۱- بررسی نتایج شبیه سازی مورد مطالعاتی اول

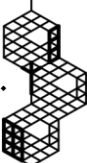
در این مورد مطالعاتی فرض بر این است که هیچ EV در شبکه وجود ندارد و شبکه را تنها با وجود بارهای هارمونیک مورد بررسی قرار می‌دهیم. در نتیجه طبق اطلاعات ارائه شده در جدول (۳)، برای بارهای مشخص شده‌ی شبکه، ۲۰٪ دامنه مؤلفه‌ی مرتبه‌ی ۵ هارمونیک که به‌صورت منبع جریان مدل شده قرار می‌دهیم؛ این یعنی بارهای تعیین شده جریان هارمونیک با دامنه ۲۰٪ مؤلفه مرتبه ۵ هارمونیک به شبکه تزریق می‌نمایند. پس از شبیه‌سازی این مورد مطالعاتی، پخش توان هارمونیک را محاسبه می‌کنیم تا اثر بارهای هارمونیک بر روی شبکه و به‌خصوص میزان THD_v شین‌های شبکه را مورد بررسی قرار دهیم. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی در جدول (۴) ارائه شده است. در مورد نتایج این جدول می‌توان گفت به‌علت آن که طبق مقادیر از پیش تنظیم شده شبکه تست، توان راکتیو خازن شین ۶۷۵ دو برابر خازن شین ۶۱۱ است، در نتیجه میزان جریان کشیده شدن توسط آن تقریباً دو برابر خازن دیگری است. مقادیر THD_v به‌دست آمده برای شین‌ها مقداری زیاد و غیر قابل قبول بوده و باید درصدد کاهش آن‌ها باشیم. هدف از ورود شارژر EV به شبکه در موارد مطالعاتی بعدی کاهش همین مقادیر می‌باشد.

جدول (۴): نتایج شبیه سازی شبکه ۱۳ شینه در مورد مورد مطالعاتی اول

شماره شین	THD_v	جریان مصرفی بار هارمونیک	THD_i
شین ۶۵۰	۱/۲۳۷۶	-	-
شین ۶۴۶	۴/۱۴۱۳	-	-
شین ۶۳۴	۷/۳۰۱۸	-	-
شین ۶۷۵	۶/۲۶۵۶	-	-
شین ۶۹۲	۵/۹۸۳۴	-	-
شین ۶۸۴	۶/۰۷۲۸	-	-
شین ۶۵۲	۶/۰۹۴۸	-	-
شین ۶۸۰	۵/۹۸۳۴	-	-
خازن شین ۶۷۵	-	۰/۰۸۰۹	۳۱/۳۲۸۱
خازن شین ۶۱۱	-	۰/۰۳۹۵	۳۰/۵۲۰۶

۳-۲- بررسی نتایج شبیه سازی مورد مطالعاتی دوم

در این مورد طبق اطلاعات ارائه شده در جدول (۳)، برای بارهای تعیین شده ۳۰٪ دامنه مؤلفه‌ی مرتبه‌ی ۵ هارمونیک در نظر می‌گیریم. با اجرای پخش توان هارمونیک مقدار THD_v شین ۶۵۰ برابر مقدار ۱/۸۵۶۳ درصد به‌دست می‌آید (افزایش در مقایسه با مورد مطالعاتی اول با توجه به افزایش دامنه هارمونیک). برخی از نتایج پخش توان هارمونیک در این مورد مطالعاتی بدون حضور شارژر EVها در جدول (۵) و محاسبات انجام گرفته برای تعیین مشخصات شارژر EV در جدول (۶) ارائه شده است. برای آن که تأثیر ورود شارژر EV به شبکه را مشاهده نمائیم ابتدا یک‌بار به‌صورت تک‌تک، هر یک از شارژرهای EV را به شبکه متصل نموده و شبکه را مورد بررسی قرار می‌دهیم. نتایج برای شارژر EV متصل به شین ۶۹۲ در جدول (۷) و برای شارژر EV متصل به ۶۸۴ در جدول (۸) ارائه شده است. طبق مقادیر محاسبه شده، هر چه دامنه مؤلفه مرتبه ۵ هارمونیک جریان شارژر EV را افزایش دهیم ابتدا سبب کاهش مقدار THD_v شین ۶۵۰ شبکه و رسیدن به مقدار حداقل شده و دوباره شروع به افزایش می‌نماید. بار دوم اثر همزمان دو شارژر EV در شبکه را بررسی می‌نمائیم. نتایج ارائه شده در جدول (۹) اثر همه‌نگی بین شارژر EVها را نشان می‌دهد. از نتایج این جدول قابل مشاهده است که در صورت همه‌نگی بین شارژر EVها، مقدار دامنه جریان تزریقی نسبت به حالتی که تنها یک شارژر EV در شبکه باشد، کاهش یافته است؛ یعنی از تمام ظرفیت شارژر EV برای فیلترینگ استفاده نمی‌شود. همچنین میزان THD_v شین ۶۵۰



شبکه با وجود هر دو شارژر EV برابر مقدار ۰/۰۲۳۸ درصد به دست می آید که از زمانی که شارژر EVها به صورت تک تک در شبکه وجود دارند، بهبود یافته است. جدول (۱۰) خلاصه ای از نتایج حضور تک تک و همزمان شارژر EV در این مورد مطالعاتی نشان می دهد.

جدول (۵): نتایج شبیه سازی شبکه ۱۳ شینه در مورد مطالعاتی دوم بدون حضور شارژر EV

شماره شین	THD_v
شین ۶۵۰	۱/۸۵۶۳
شین ۶۴۵	۶/۲۰۵۹
شین ۶۳۳	۸/۱۸۵۵
شین ۶۷۵	۹/۳۹۸۳
شین ۶۷۱	۸/۹۷۴۹
شین ۶۸۴	۹/۱۰۹
شین ۶۱۱	۹/۱۵۶

جدول (۶): مشخصات مورد نیاز برای شارژر EV مورد مطالعاتی دوم

مقدار فاز محاسبه شده برای شارژر EVها	مقدار فاز مؤلفه اصلی شارژر EVها	اندازه گیری های انجام گرفته از خطوط شبکه	مرتبه	محل اتصال شارژر EVها
-۵۸/۰۵۰۷	۸۵/۷۴	-۱۴۳/۷۹۰۷	۵	شین ۶۸۴
-۷۵/۴۶۱	۸۵/۸۶۹۱	-۱۶۱/۳۳۰۶	۵	شین ۶۹۲

جدول (۷): مقادیر $THD_v^{bus_650}$ براساس مقادیر مختلف دامنه هارمونیک ۵ جریان تزریقی شارژر EV متصل به شین ۶۹۲

دامنه مؤلفه مرتبه ۵ جریان تزریقی شارژر EV شین ۶۹۲	۱۰	۳۰	۵۰	۷۰	۸۱	۹۰
مقدار $THD_v^{bus_650}$ بر حسب درصد	۱/۶۰۴۳	۱/۱۷۲۳	۰/۷۵۳۶	۰/۳۸۷۴	۰/۲۹۴۲	۰/۳۴۹۷

جدول (۸): مقادیر $THD_v^{bus_650}$ براساس مقادیر مختلف دامنه هارمونیک ۵ جریان تزریقی شارژر EV متصل به شین ۶۸۴

دامنه مؤلفه مرتبه ۵ جریان تزریقی شارژر EV شین ۶۸۴	۱۰	۳۰	۵۰	۷۰	۸۳	۹۰
مقدار $THD_v^{bus_650}$ بر حسب درصد	۱/۶۰۴	۱/۱۶۹۱	۰/۷۴۲۴	۰/۳۵۴۴	۰/۲۴۱۳	۰/۳۰۰۳

جدول (۹): مقادیر $THD_v^{bus_650}$ براساس مقادیر مختلف دامنه مؤلفه مرتبه ۵ هارمونیک جریان تزریقی شارژر EVها

دامنه مؤلفه مرتبه ۵ جریان تزریقی شارژر EV شین ۶۹۲	۱۰	۲۰	۴۰	۳۹	۵۰	۶۰
دامنه مؤلفه مرتبه ۵ جریان تزریقی شارژر EV شین ۶۸۴	۱۰	۱۵	۳۰	۴۳	۴۵	۵۵
مقدار $THD_v^{bus_650}$ بر حسب درصد	۱/۳۵۴۸	۱/۰۲۹۴	۰/۲۷۵۲	۰/۰۲۳۸	۰/۲۸۱۹	۰/۷۱۴۱

جدول (۱۰): مقادیر $THD_v^{bus_650}$ در حضور شارژر EVها در مورد مطالعاتی دوم

مرتبه هارمونیک	شارژر EV شین ۶۸۴	شارژر EV شین ۶۹۲	$THD_v^{bus_650}$
۵	-	-	۱/۸۵۶۳٪
	-	۸۱٪ - ۷۵/۴۶۱	۰/۲۹۴۲٪
	۸۳٪ - ۵۸/۰۵۰۷	-	۰/۲۴۱۳٪
	۴۳٪ - ۵۸/۰۵۰۷	۳۹٪ - ۷۵/۴۶۱	۰/۰۲۳۸٪





۳-۳- بررسی نتایج شبیه سازی مورد مطالعاتی سوم

طبق اطلاعات ارائه شده در جدول (۳)، برای بارهای تعیین شده در این بخش، مؤلفه‌های مرتبه‌ی ۵، ۷، ۱۱، ۱۳ و ۱۷ هارمونیک با میزان دامنه به ترتیب برابر ۰/۳۵٪، ۰/۳۰٪، ۰/۲۵٪، ۰/۲۰٪ و ۰/۱۵٪ در نظر می‌گیریم. با انجام شبیه‌سازی و اجرای پخش توان هارمونیک مقدار THD_v شین ۶۵۰ برابر مقدار ۵/۶۲۳۴ درصد به دست می‌آید. با استخراج مشخصات مورد نیاز برای جریان تزریقی شارژر EVها (جهت رعایت اختصار، گزارش مربوطه نیامده است)، پخش بار هارمونیک را برای سنجش تاثیر شارژرهای اتصال یافته انجام می‌دهیم. جدول (۱۱) از نتایج پخش بار هارمونیک برای تعداد مختلفی از دامنه‌ی مؤلفه‌های مرتبه ۵، ۷، ۱۱، ۱۳ و ۱۷ هارمونیک جریان تزریقی توسط شارژرهای EV اتصال یافته را نشان می‌دهد. کمترین مقدار برای THD_v شین ۶۵۰ شبکه برابر مقدار ۰/۹۹۸۳ درصد به دست می‌آید. جدول (۱۲) مقادیر فاز و دامنه مربوط به هر یک از مؤلفه‌های جریان تزریقی توسط فیلترهای اکتیو و مقدار برای THD_v شین ۶۵۰ شبکه به دست آمده برای هر مورد را نشان می‌دهد.

جدول (۱۱): مقادیر $THD_v^{bus_{650}}$ براساس مقادیر مختلف دامنه مؤلفه‌های مرتبه مختلف هارمونیک جریان‌های تزریقی شارژرهای EV

۶۰	۵۰	۴۸	۳۰	۱۵	۶۹۲	دامنه مؤلفه مرتبه ۵ جریان تزریقی شارژر EV شین ۶۹۲
۱۵	۲۵	۵۰	۴۰	۳۰	۶۸۴	دامنه مؤلفه مرتبه ۵ جریان تزریقی شارژر EV شین ۶۸۴
۲۵	۳۰	۳۶	۱۵	۱۰	۶۹۲	دامنه مؤلفه مرتبه ۷ جریان تزریقی شارژر EV شین ۶۹۲
۳۰	۲۵	۴۳	۲۰	۱۵	۶۸۴	دامنه مؤلفه مرتبه ۷ جریان تزریقی شارژر EV شین ۶۸۴
۲۰	۳۵	۳۲	۲۳	۱۸	۶۹۲	دامنه مؤلفه مرتبه ۱۱ جریان تزریقی شارژر EV شین ۶۹۲
۳۸	۲۸	۲۶	۲۵	۲۰	۶۸۴	دامنه مؤلفه مرتبه ۱۱ جریان تزریقی شارژر EV شین ۶۸۴
۳۳	۱۰	۲۳	۱۸	۲۵	۶۹۲	دامنه مؤلفه مرتبه ۱۳ جریان تزریقی شارژر EV شین ۶۹۲
۲۵	۱۸	۲۰	۱۰	۵	۶۸۴	دامنه مؤلفه مرتبه ۱۳ جریان تزریقی شارژر EV شین ۶۸۴
۰/۵	۳	۰/۰۰۱	۰/۱	۲	۶۹۲	دامنه مؤلفه مرتبه ۱۷ جریان تزریقی شارژر EV شین ۶۹۲
۰/۳	۲	۱۷	۰/۳	۶	۶۸۴	دامنه مؤلفه مرتبه ۱۷ جریان تزریقی شارژر EV شین ۶۸۴
۲/۱۱۶۸	۲/۱۵۱۳	۰/۹۹۸۳	۲/۴	۲/۷۴۰۱		مقدار $THD_v^{bus_{650}}$ بر حسب درصد

جدول (۱۲): مقادیر $THD_v^{bus_{650}}$ در حضور شارژرهای EV مورد مطالعاتی چهارم

مرتبه هارمونیک	شارژر EV شین ۶۹۲	شارژر EV شین ۶۸۴	$THD_v^{bus_{650}}$
	-	-	۵/۶۵۳۴٪
۵	۹۵٪-۷۵/۴۶۱۵	-	۲/۰۵۶۰٪
۷	۷۷٪-۳۹/۹۷۷۳		
۱۱	۵۴٪-۸۹/۲۰۵۴		
۱۳	۳۸٪-۲۶/۱۸۶۶		
۱۷	۰/۰۱٪-۷۷/۰۱۰۸		
۵	-	۹۵٪-۵۸/۰۵۰۷	۱/۷۱۷۶٪
۷		۷۶٪-۶۴/۲۲۴۸	
۱۱		۵۳٪-۵۱/۵۹۴۵	
۱۳		۳۶٪-۷۰/۴۱۸۷	
۱۷		۲۰٪-۴۵/۳۲۲۶	
۵	۴۵٪-۷۵/۴۶۱۵	۵۰٪-۵۸/۰۵۰۷	۰/۹۹۸۳٪
۷	۳۶٪-۳۹/۹۷۷۳	۴۳٪-۶۴/۲۲۴۸	
۱۱	۳۲٪-۸۹/۲۰۵۴	۲۶٪-۵۱/۵۹۴۵	
۱۳	۲۳٪-۲۶/۱۸۶۶	۲۰٪-۷۰/۴۱۸۷	
۱۷	۰/۰۰۱٪-۷۷/۰۱۰۸	۱۸٪-۴۵/۳۲۲۶	



۴-۳- بررسی نتایج شبیه سازی مورد مطالعاتی چهارم

طبق اطلاعات ارائه شده در جدول (۳)، برای بارهای تعیین شده، مؤلفه‌های مرتبه‌ی ۷، ۱۱ و ۱۹ هارمونیک با میزان دامنه به ترتیب برابر ۳۰٪، ۲۵٪ و ۱۰٪ در نظر می‌گیریم. با انجام شبیه‌سازی و اجرای پخش توان هارمونیک مقدار THD_v شین ۶۵۰ برابر مقدار ۴/۰۶۴۱ درصد به دست می‌آید. در این مورد مطالعاتی مکان اتصال شارژرهای EV به شبکه را تغییر داده و در سه حالت زیر، اتصال شارژرهای EV را بررسی می‌نمائیم.

۳-۴-۱- اتصال دو شارژر EV به شین‌های ۶۸۴ و ۶۴۵

بعد از محاسبات مقادیر فاز شارژرها (جهت رعایت اختصار، گزارش آن نیامده است) و انجام تنظیمات مربوطه روی شارژر EVها و انجام پخش بار هارمونیک، جدول (۱۳) مقادیر فاز و دامنه مربوط به هر یک از مؤلفه‌های جریان تزریقی توسط شارژرهای EV در این حالت و مقدار THD_v شین ۶۵۰ را نشان می‌دهد.

جدول (۱۳): مقادیر $THD_v^{bus_650}$ در حضور شارژرهای EV متصل به شین‌های ۶۸۴ و ۶۴۵

مرتبه هارمونیک	فیلتر اکتیو شین ۶۸۴	فیلتر اکتیو شین ۶۴۵	$THD_v^{bus_650}$
-	-	-	۴/۰۶۴۱٪
۷	۴۰۴۶۴/۴۴۸۲	۴۱۴۴۱/۳۵۴۱	۰/۲۴۹٪
۱۱	۲۳۴-۵۱/۲۱۱۹	۳۸۴-۸۷/۶۳۳۸	
۱۹	۷۴۷۶/۶۷۹	۸۴۱۴/۳۹۰۹	

۳-۴-۲- اتصال دو شارژر EV به شین‌های ۶۹۲ و ۶۴۵

بعد از محاسبات مقادیر فاز شارژرها (جهت رعایت اختصار، گزارش آن نیامده است) و انجام تنظیمات مربوطه روی شارژر EVها و انجام پخش بار هارمونیک، جدول (۱۴) مقادیر فاز و دامنه مربوط به هر یک از مؤلفه‌های جریان تزریقی توسط شارژرهای EV در این حالت و مقدار THD_v شین ۶۵۰ را نشان می‌دهد.

جدول (۱۴): مقادیر $THD_v^{bus_650}$ در حضور شارژرهای EV متصل به شین‌های ۶۹۲ و ۶۴۵

مرتبه هارمونیک	فیلتر اکتیو شین ۶۹۲	فیلتر اکتیو شین ۶۴۵	$THD_v^{bus_650}$
-	-	-	۴/۰۶۴۱٪
۷	۲۵۴۴۰/۱۹۱۲	۵۵۴۴۱/۳۵۵۴	۱/۰۳۹۵٪
۱۱	۱۲۴-۸۸/۹۵۱۴	۴۶۴-۸۷/۶۳۲۵	
۱۹	۳۴۱۲/۸۳۷۵	۱۱۴۱۹/۶۵۹۱	

۳-۴-۳- اتصال سه شارژر EV به شین‌های ۶۸۴، ۶۹۲ و ۶۴۵

در قسمت سوم این مورد اتصال همزمان سه فیلتر اکتیو به شبکه در شین‌های ۶۸۴، ۶۹۲ و ۶۴۵ را بررسی می‌نمائیم. بعد از محاسبات مقادیر فاز شارژرها (جهت رعایت اختصار، گزارش آن نیامده است) و انجام تنظیمات مربوطه روی شارژر EVها و انجام پخش بار هارمونیک، جدول (۱۵) مقادیر فاز و دامنه مربوط به هر یک از مؤلفه‌های جریان تزریقی توسط شارژر EVها و مقدار THD_v شین ۶۵۰، به دست آمده برای هر مورد را نشان می‌دهد.

اگر به دقت به نتایج به دست آمده از قسمت‌های مختلف مورد مطالعاتی ششم توجه نمائیم، می‌توان دریافت که مقدار THD_v محاسبه شده زمانی که دو شارژر EV به شین‌های ۶۴۵ و ۶۸۴ شبکه متصل هستند، نسبت به زمانی که سه شارژر EV در شین‌های ۶۸۴، ۶۹۲ و ۶۴۵ شبکه قرار گرفته‌اند تقریباً نصف می‌باشد. یعنی در صورتی که بتوانیم مکان مناسب برای اتصال فیلترهای اکتیو در شبکه را پیدا نمائیم آن‌گاه نتیجه مطلوب‌تر از زمانی است که حتی از تعداد بیشتری فیلتر اکتیو در شبکه استفاده نمائیم و این اهمیت مکان یابی بهینه پارکینگ خودروهای برقی را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که در موارد مطالعاتی بررسی شده تنها بارهای هارمونیک دارای اندازه هارمونیک بودند و مقدار فاز آن‌ها صفر بودند. در صورتی که بارها علاوه بر اندازه، دارای فاز هارمونیک باشند در مقدار THD_v شین‌ها هیچ‌گونه تغییری حاصل نخواهد شد؛ بنابراین شرایط حل مسأله دقیقاً مطابق بالا می‌باشد. به‌طور مثال در مورد مطالعاتی دوم اگر بارهای هارمونیک دارای ۱۵ درجه فاز هارمونیک باشند با اجرای پخش بار هارمونیک میزان THD_v شین ۶۵۰ بدون تغییر و برابر ۱/۸۵۶۳ درصد به دست می‌آید. جدول (۱۶) نتایج حاصل از ورود شارژر EV به شبکه را نشان می‌دهد.

جدول (۱۵): مقادیر $THD_v^{bus_650}$ در حضور شارژرهای EV متصل به شین های ۶۸۴، ۶۹۲ و ۶۴۵

مرتبۀ هارمونیک	فیلتر اکتیو شین ۶۴۵	فیلتر اکتیو شین ۶۹۲	فیلتر اکتیو شین ۶۸۴	$THD_v^{bus_650}$
-	-	-	-	۴/۰۶۴۱٪
۷	۳۶٪۴۱/۱۵۶۵	۱۴٪۳۹/۸۴۲۵	۳۱٪۶۴/۱۰۲۶	۰/۴۴۸۸٪
۱۱	۳۰٪-۸۷/۸۳۱۴	۱۱٪-۸۸/۳۰۰۱	۲۰٪-۵۱/۷۰۹۲	
۱۹	۷٪۱۴/۱۹۳۳	۲٪۱۲/۴۸۸۸	۸٪۷۶/۳۳۳۴	

جدول (۱۶): مقادیر $THD_v^{bus_650}$ در حضور شارژرهای EV

مرتبۀ هارمونیک	فیلتر اکتیو شین ۶۹۲	فیلتر اکتیو شین ۶۸۴	$THD_v^{bus_650}$
-	-	-	۱/۸۵۶۱٪
۵	۸۲٪-۶۰/۱۱۱۴	-	۰/۲۸۳۳٪
-	-	۸۲٪-۴۲/۷۰۳۶	۰/۲۵۰۹٪
-	۴۱٪-۶۰/۱۱۱۴	۴۱٪-۴۲/۷۰۳۶	۰/۲۵۷٪

۴- نتیجه گیری

با تولید سیگنال‌های مطلوب کلیدزنی در ساختار الکترونیک قدرت شارژر EVها که به کنترل میزان شارژ باتری EV می انجامد؛ جریانی از EV به شبکه توزیع تزریق می شود که با جبران جریان هارمونیک جاری شده در شبکه، سبب کاهش یا حذف مؤلفه‌های هارمونیک موجود در شبکه خواهد شد. با وجود بستر مخابراتی شبکه های هوشمند، اطلاعات مورد نیاز از شبکه توزیع برای تنظیم جریان هارمونیک شارژر EV در وضعیت مخالف جریان هارمونیک شبکه در دسترس است. همچنین برای کارآمدتر بودن تأثیر EVها در شبکه، باید به جای استفاده از خودروها به صورت انفرادی، از تجمیع خودروها استفاده کرد که در مراکز شارژ ایستگاهی و نواحی پارکینگ چنین امکانی فراهم است. در این مقاله به کمک مطالعات عددی تأثیر استفاده از EVها بر شبکه‌ی توزیع نمونه بررسی شد. در موارد مطالعاتی بررسی شده محاسبه‌ی فاز مؤلفه‌های هارمونیک مورد نیاز برای جریان‌های تزریقی شارژر EV به صورت دستی و از طریق اندازه گیری فاز مؤلفه‌های هارمونیک جریان شبکه پایین دست شارژر EV اعمال شد. همچنین دامنه هر یک از مؤلفه‌های مورد نیاز برای جریان تزریقی توسط شارژر EV به صورت دستی اعمال شد. نشان داده شد که توزیع EVها در سطح شبکه توزیع به صورت گسترده می تواند به فیلترینگ کمک کند، به گونه ای که در این مطالعه، THD ولتاژ شین اصلی شبکه در بالادست بهبود پیدا کرد. به علاوه از نتایج بدست آمد که در فیلترینگ به صورت ناحیه گسترده، امکان حذف هارمونیک‌ها، حتی در مواردی که EV در محل منبع آلوده کننده قرار ندارد، فراهم می شود.

ضمائم

(۱۴)

$$A^{LN} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & \ddots & -1 & 0 \\ 0 & -1 & \ddots & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

(۱۵)

$$A^{DN} = \begin{bmatrix} \dots & 0 & 1 \\ 1 & \ddots & 0 \\ 0 & 1 & \dots \end{bmatrix}$$

(۱۶)

$$A^{FN} = \begin{bmatrix} \dots & 0 & 1 \\ 1 & \ddots & 0 \\ 0 & 1 & \dots \end{bmatrix}$$

(۱۷)

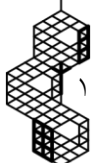
$$Z_{line}^L = [z_1^L \ z_2^L \ z_3^L \ z_4^L \ z_5^L \ z_6^L \ z_7^L \ z_8^L \ z_9^L \ z_{10}^L]$$

(۱۸)

$$Z_j^D = [z_1^D \ z_2^D \ z_3^D \ z_4^D \ z_5^D \ z_6^D \ z_7^D \ z_8^D \ z_9^D \ z_{10}^D \ z_{11}^D \ z_{12}^D \ z_{13}^D]$$



- [1] R. adib, "Renewables 2021 Global Status Report," *National Technical University of Athens (NTUA), 2021, available at <http://www.ren21.net/gsr>.*
- [2] B. Singh, P. K. Dubey, "Distributed power generation planning for distribution networks using electric vehicles: Systematic attention to challenges and opportunities," *Journal of Energy Storage*, Vol. 48, pp. 1-44, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.104030.
- [3] M. Yilmaz and P. T. Krein, "Review of the Impact of Vehicle-to-Grid Technologies on Distribution Systems and Utility Interfaces," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 12, pp. 5673-5689, Dec. 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2227500.
- [4] Y. Chen, A. Oudalov and J. S. Wang, "Integration of electric vehicle charging system into distribution network," *8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia*, 2011, pp. 593-598, doi: 10.1109/ICPE.2011.5944615.
- [5] A. Casaleiro, R. A. esilva, B. Teixeira, J. M. Serra, "Experimental assessment and model validation of power quality parameters for vehicle-to-grid systems," *Electric Power Systems Research*, Vol. 191, pp. 1-15, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106891.
- [6] V. Monteiro, J.G. Pinto, J. L. Afonso, "Improved vehicle-for-grid (iV4G) mode: Novel operation mode for EVs battery chargers in smart grids," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 110, pp. 579-587, sep. 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.03.049.
- [7] A. Kalair, N. Abas, A.R. Kalair, Z. Saleem, N. Khan, "Review of harmonic analysis, modeling and mitigation techniques," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 78, pp. 1152-1187, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.04.121.
- [8] S. Kuo, T. Lee, C. Chen, P. Cheng and C. Pan, "Distributed Active Filters for Harmonic Resonance Suppression in Industrial Facilities," *2007 Power Conversion Conference - Nagoya*, 2007, pp. 391-397, doi: 10.1109/PCCON.2007.372997.
- [9] M. Shahbaz, "Active Harmonics Filtering of Distributed AC System," *Norwegian University of Science and Technology Department of Electrical Power Engineering*, Sep. 2012.
- [10] P. Salmerón, and J. R. Vázquez, "Active Power-Line Conditioners," *University of Huelva, Spain*, 2007.
- [11] S. K. Khadem, M. Basu and M. F. Conlon, "A review of parallel operation of active power filters in the distributed generation system," *Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications*, 2011, pp. 1-10, doi: 10.1016/j.rser.2011.06.011.
- [12] GH. Dehnavi, "Coordinated Control of Power Electronic Converters in an Autonomous Microgrid," *University of South Carolina*, Jan. 2013.
- [13] W. Rohouma, R. S. Balog, A. A. Peerzada, M. M. Begovic, "D-STATCOM for harmonic mitigation in low voltage distribution network with high penetration of nonlinear loads," *Renewable Energy*, Vol. 145, pp. 1449-1464, jan. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.05.134.
- [14] A. Vinayagam, A. Aziz, P.M. Balasubramaniam, J. Chandran, V. Veerasamy, A. Gargoom, "Harmonics assessment and mitigation in a photovoltaic integrated network, Sustainable Energy," *Grids and Networks*, Vol. 20, pp. 1-14, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.segan.2019.100264.
- [15] M. Ahmed, N. AlMasood, T. Aziz, "An approach of incorporating harmonic mitigation units in an industrial distribution network with renewable penetration," *Energy Reports*, Vol. 7, pp. 6273-6291, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.egyr.2021.09.072.
- [16] A. Mishra, P.M. Tripathi, K. Chatterjee, "A review of harmonic elimination techniques in grid connected doubly fed induction generator based wind energy system," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 89, pp. 1-15, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.02.039.
- [17] M. C. Kisacikoglu, B. Ozpineci and L. M. Tolbert, "Examination of a PHEV bidirectional charger system for V2G reactive power compensation," *2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2010, pp. 458-465, doi: 10.1109/APEC.2010.5433629.
- [18] H. F. Farahani, H. A. Shayanfar, and M. S. Ghazizadeh, "Modeling of Stochastic Behavior of Plug- in Hybrid Electric Vehicle in a Reactive Power Market," *Electric Power Components and Systems(Springer)*, Vol. 96, pp. 31-56, Nov. 2012.





- [19] M. Bojrup, "Advanced Control of Active Filters in a Battery Charger Application," *Department of Industrial Electrical Engineering and Automation Lund Institute of Technology*, 1999.
- [20] F. M Rabiul Islam, "Impact and Utilization of Emerging PHEV in Smart Power Systems," *The University of New South Wales, Canberra, Australia*, May 2013.
- [21] F. R. Islam, H. R. Pota and A. B. M. Nasiruzzaman, "PHEV's park as a virtual active filter for HVDC networks," *2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, 2012, pp. 885-890, doi: 10.1109/EEEIC.2012.6221501.
- [22] F.R. Islam, H.R. Pota, "Virtual active filters for HVDC networks using V2G technology," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 54, pp. 399-407, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2013.07.028.
- [23] J. Su, T. T. Lie and R. Zamora, "Integration of Electric Vehicles in Distribution Network Considering Dynamic Power Imbalance Issue," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 5, pp. 5913-5923, Sept.-Oct. 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.2990106.
- [24] L. Wang, Z. Qin, T. Slangen, P. Bauer and T. van Wijk, "Grid Impact of Electric Vehicle Fast Charging Stations: Trends, Standards, Issues and Mitigation Measures - An Overview," in *IEEE Open Journal of Power Electronics*, vol. 2, pp. 56-74, 2021, doi: 10.1109/OJPEL.2021.3054601.
- [25] IEEE Recommended Practices and Requirements for harmonic Control in Electrical power Systems, IEEE standard 519 (1992).
- [26] H.S. Das, M.M. Rahman, S. Li, C.W. Tan, "Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid integration: A technological review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 120, pp. 1-27, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2019.109618.
- [27] "PJM, Evolution of the US Power Grid and Market Operations through 2030", Nov. 2011.
- [28] P. Tricoli, "Active Power Filters: Behaviour and Performance Analysis," *University of Naples Federico II*, Nov. 2005.

زیر نویس ها

-
- ¹ Electric Vehicles
 - ² Vehicle to Grid
 - ³ Distribution Network
 - ⁴ Power Conditioner
 - ⁵ Distributed Active Filter
 - ⁶ Smart Grid
 - ⁷ Distributed Generation
 - ⁸ Penetration Level
 - ⁹ Stochastic
 - ¹⁰ Dedicated
 - ¹¹ Integrated
 - ¹² Unidirectional
 - ¹³ Bidirectional
 - ¹⁴ Harmonic Power Flow
 - ¹⁵ Kirchhoff Current Law
 - ¹⁶ Total Harmonic Distortion

