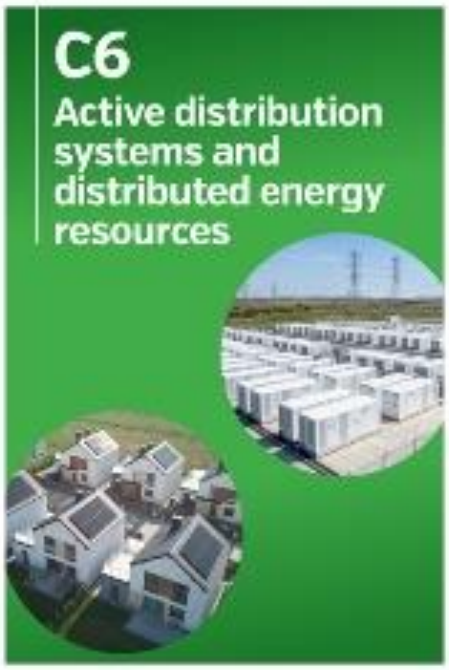
بروشور فنی TB ۹۵۴ مجله الکترا ۳۳۸

کمیته مطالعاتی شبکه‌های توزیع فعال و منابع انرژی توزیع شده

خودروهای برقی به‌عنوان سیستم‌های منابع انرژی توزیع‌شده (DER)





cigre
Iran



گزارش شماره ۱۰

۱-مقدمه

گسترش خودروهای برقی(EV[1]) یکی از روندهای مهم تحول بخش انرژی و حمل‌ونقل در سال‌های اخیر است. افزایش نفوذ این خودروها، علاوه بر تغییر الگوی مصرف انرژی در بخش حمل‌ونقل، آثار قابل‌توجهی بر شبکه‌های برق در سطوح توزیع و انتقال به همراه دارد. افزایش تقاضای برق، هم‌زمانی شارژ با ساعات اوج مصرف، اضافه‌بار تجهیزات، افت ولتاژ و نیاز به توسعه زیرساخت‌های شبکه، از جمله چالش‌هایی هستند که با رشد کنترل‌نشده خودروهای برقی می‌توانند تشدید شوند. با این حال، خودروهای برقی را نمی‌توان صرفاً به‌عنوان یک بار جدید شبکه در نظر گرفت. باتری خودرو، در کنار زیرساخت شارژ، سامانه‌های کنترل هوشمند و بسترهای ارتباطی، می‌تواند به یک ظرفیت انعطاف‌پذیر و قابل‌کنترل برای شبکه تبدیل شود. در این رویکرد، خودروهای برقی قادر خواهند بود در قالب راهکارهایی مانند شارژ هوشمند، V1G و V2G علاوه بر مدیریت مصرف خود، در ارائه خدمات مختلف به شبکه نیز مشارکت کنند.

در این میان، تجمیع تعداد زیادی خودروی برقی توسط تجمیع کننده[2] می‌تواند ظرفیت‌های کوچک و پراکنده را به یک منبع انعطاف‌پذیر قابل بهره‌برداری تبدیل کند. این ظرفیت تجمیع‌شده می‌تواند در مدیریت پیک، پاسخگویی بار، پشتیبانی ولتاژ و فرکانس، مدیریت تراکم شبکه، ادغام منابع تجدیدپذیر و افزایش تاب‌آوری شبکه مورد استفاده قرار گیرد. از این منظر، خودروهای برقی می‌توانند به‌تدریج از یک بار مصرفی به یک بار قابل‌کنترل و در نهایت به یک منبع انرژی توزیع‌شده و فعال (DER) تبدیل شوند.

بروشور فنی **CIGRE TB954** با عنوان " خودروهای برقی به‌عنوان منابع انرژی توزیع‌شده [3]" مسیر این تحول را بررسی می‌کند؛ از روند رشد و فناوری‌های شارژ و ذخیره‌سازی گرفته تا راهبردهای کنترل شارژ، V1GوV2G ، خدمات قابل ارائه به DSO وTSO ، نقش تجمیع کننده و نیروگاه مجازی (VPP[4]) و در نهایت الزامات فنی، ارتباطی، اقتصادی و مقرراتی موردنیاز برای شکل‌گیری این اکوسیستم. مجله شماره ۳۳۸ الکترا نیز در جمع‌بندی **CIGRE TB954** بر همین تحول مفهومی تأکید می‌کند: مسئله اصلی صرفاً تأمین برق موردنیاز خودروهای برقی نیست، بلکه چگونگی مدیریت اثر آن‌ها بر شبکه و بهره‌گیری از ظرفیت انعطاف‌پذیری آن‌هاست. در ادامه این گزارش سعی شده به صورت خلاصه به نکات ارائه شده در بروشور مذکور پرداخته شود.

۲-روند رشد و تحول فناوری خودروهای برقی و اثرات بر شبکه

بازار خودروهای برقی در سال‌های اخیر از یک بازار نوظهور به یکی از مسیرهای اصلی تحول صنعت خودرو تبدیل شده است. این رشد حاصل هم‌زمانی چند عامل است: سیاست‌های حمایتی و الزامات زیست‌محیطی، کاهش هزینه و بهبود عملکرد باتری، توسعه زیرساخت شارژ، افزایش تنوع مدل‌های خودرو و پیشرفت فناوری‌های الکترونیک قدرت و کنترل. در میان بازارهای جهانی، چین نقش مهمی در شتاب‌گیری این تحول داشته و توسعه هم‌زمان تولید خودرو، زنجیره تأمین باتری و زیرساخت شارژ، جایگاه آن را به یکی

[1] Electric Vehicles
[2] Aggregator
[3] Electric Vehicles as Distributed Energy Resource (DER) Systems
[4] Virtual Power Plant (VPP)

دبیرخانه سیگره ایران: تهران – خیابان ولیعصر – بالاتر از میدان ونک - خیابان عطار – پلاک ۱۲ – شرکت مونتکو ایران
تلفن: ۰۲۱-۸۱۹۶۷۰۱۶ ایمیل: cigre@monencogroup.com/info@cigreiran.com وب سایت: www.cigreiran.com

از محورهای اصلی بازار جهانی EV تبدیل کرده است. اروپا و آمریکای شمالی نیز با سیاست‌های صنعتی و زیست‌محیطی و توسعه زیرساخت‌های شارژ، از دیگر قطب‌های اصلی این روند به شمار می‌روند.

این تحول صرفاً در تعداد خودروها خلاصه نمی‌شود، بلکه خود فناوری خودروهای برقی نیز با سرعت در حال تغییر است. در بخش ذخیره‌سازی، باتری‌های لیتیوم‌یون به فناوری غالب تبدیل شده‌اند و هم‌زمان توسعه شیمی‌های جدید، بهبود چگالی انرژی، افزایش طول عمر و کاهش زمان شارژ در حال پیگیری است. فناوری‌هایی مانند Solid-State Battery نیز با هدف دستیابی به چگالی انرژی بالاتر، ایمنی بیشتر و شارژ سریع‌تر در حال توسعه‌اند.

در بخش زیرساخت نیز مسیر حرکت از شارژ معمولی به سمت شارژ سریع و فوق‌سریع، شارژ مگاواتی برای خودروهای سنگین، شارژ بی‌سیم و فناوری تعویض باتری است. افزایش توان شارژ، به‌ویژه در ایستگاه‌های پرتردد، موجب می‌شود طراحی زیرساخت انرژی و نحوه اتصال آن به شبکه نیز متناسب با این تحول توسعه یابد.

از سوی دیگر، معماری خودرو نیز در حال حرکت به سمت خودروی نرم‌افزارمحور و متصل است؛ به‌گونه‌ای که مدیریت باتری، الکترونیک قدرت، ارتباطات و سامانه‌های کنترل، سهم بیشتری در قابلیت‌های خودرو پیدا می‌کنند. در نتیجه، خودروهای برقی آینده تنها از نظر پیشرانه با خودروهای متعارف متفاوت نخواهند بود، بلکه از نظر باتری، شارژ، ارتباطات و قابلیت تعامل با زیرساخت انرژی نیز تحول خواهند یافت. خودروهای برقی در حال تبدیل شدن به یک اکوسیستم فناورانه متشکل از خودرو، باتری، شارژر، ارتباطات و زیرساخت انرژی هستند؛ تحولی که زمینه را برای نقش‌آفرینی گسترده‌تر آن‌ها در سیستم انرژی فراهم می‌کند.

۳-اثر گسترش خودروهای برقی بر شبکه برق

خودروهای برقی در زمان اتصال به شبکه، یک بار متغیر ایجاد می‌کنند. اگر شارژ خودروها بدون هماهنگی با شرایط شبکه انجام شود، افزایش هم‌زمان تقاضا می‌تواند موجب افزایش پیک بار، اضافه‌بار ترانسفورماتورها و فیدرها، افزایش تلفات و افت ولتاژ شود. این موضوع در شبکه‌های توزیع اهمیت بیشتری دارد، زیرا خودروها در نقاط مختلف شبکه و معمولاً در محل‌هایی با الگوی مصرف متفاوت به شبکه متصل می‌شوند. برای مثال، تمرکز خودروهای برقی در مناطق مسکونی، پارکینگ‌های عمومی، مراکز تجاری یا ایستگاه‌های شارژ سریع می‌تواند ظرفیت محلی شبکه را تحت تأثیر قرار دهد.

یکی از نکات مهم TB954، توجه به توزیع مکانی و زمانی خودروهای برقی است. صرفاً دانستن تعداد خودروهای موجود برای ارزیابی اثر آن‌ها بر شبکه کافی نیست؛ بلکه محل اتصال، زمان شارژ، توان شارژر و الگوی رفتاری کاربران نیز باید در برنامه‌ریزی شبکه لحاظ شود .از طرف دیگر، توسعه شارژ سریع و فوق‌سریع، به دلیل توان بالای موردنیاز، می‌تواند موجب ایجاد پیک‌های شدید و موضعی شود. بنابراین، توسعه این زیرساخت‌ها ممکن است به تقویت ترانسفورماتورها، فیدرها و پست‌ها و در برخی موارد توسعه ظرفیت اتصال در سطوح MV و HV نیاز داشته باشد. با این حال، TB954 نشان می‌دهد که پاسخ به این مسئله الزاماً تنها از مسیر توسعه فیزیکی شبکه نیست. مدیریت هوشمند شارژ می‌تواند بخشی از ظرفیت موجود شبکه را آزاد کرده و نیاز به تقویت برخی تجهیزات را کاهش دهد.

دبیرخانه سیگره ایران: تهران – خیابان ولیعصر – بالاتر از میدان ونک - خیابان عطار – پلاک ۱۲ – شرکت مونتکو ایران
تلفن: ۰۲۱-۸۱۹۶۷۰۱۶ ایمیل: cigre@monencogroup.com/info@cigreiran.com وب سایت: www.cigreiran.com

۴- رویکردهای کنترل و مدیریت شارژ خودروهای برقی

نحوه مدیریت شارژ، یکی از عوامل اصلی تعیین‌کننده اثر خودروهای برقی بر شبکه قدرت است. اگر خودروها بدون هماهنگی و صرفاً بر اساس زمان اتصال شارژ شوند، هم‌زمانی این بار با دوره‌های اوج مصرف می‌تواند موجب افزایش بارگذاری تجهیزات، افت ولتاژ و ایجاد پیک‌های جدید در شبکه توزیع شود. از این رو، راهبردهای شارژ به‌تدریج از شارژ کنترل‌نشده به سمت تعرفه‌های زمان مصرف (ToU) و سپس شارژ هوشمند (V1G) توسعه یافته‌اند؛ رویکردی که در آن زمان و توان شارژ متناسب با شرایط شبکه، قیمت برق و نیاز کاربر مدیریت می‌شود. در مرحله پیشرفته‌تر، V2G امکان جریان دوطرفه انرژی را فراهم می‌کند و خودرو، علاوه بر یک بار قابل‌کنترل، می‌تواند در زمان مناسب انرژی ذخیره‌شده خود را به شبکه بازگرداند. بر اساس چارچوب مطرح‌شده در TB954، می‌توان این تحول را در چهار سطح اصلی خلاصه کرد:

۱. شارژ کنترل‌نشده (Uncontrolled / Dumb Charging): در این حالت، خودروها بلافاصله پس از اتصال به شبکه با حداکثر توان نامی شارژ می‌شوند. همزمانی این رفتار با پیک مصرف خانگی (ساعات ابتدایی شب) موجب افت شدید ولتاژ و اضافه بار تجهیزات توزیع می‌گردد.
۲. تعرفه زمان استفاده (Time-of-Use / Multiple Tariff): اِعمال قیمت‌گذاری متغیر برق در ساعات مختلف شبانه‌روز. این روش غیرفعال بوده و در صورت عدم مدیریت، اتصال همزمان تعداد زیادی خودرو در ابتدای بازه کم‌باری (مثلاً ساعت ۲۲) موجب بروز پیک مجدد (Secondary Peak) و آسیب به شبکه می‌شود.
۳. شارژ هوشمند کنترل‌شده (Smart Charging / V1G): کنترل فعال توان و زمان شارژ بر اساس الگوریتم‌های بهینه‌سازی توسط تجمیع‌کننده (Aggregator) و اپراتور شبکه توزیع (DSO). در شرایط اضطراری شبکه، فرمان‌های DSO بر سیگنال‌های تجمیع‌کننده ارجحیت خواهند داشت.
٤. فناوری خودرو به شبکه (Vehicle-to-Grid / V2G): فراتر از شارژ هوشمند، توان ذخیره‌شده در باتری خودرو می‌تواند در صورت نیاز به شبکه تزریق شود. این روش قابلیت ارائه خدمات تنظیم فرکانس، مدیریت ولتاژ و رفع تراکم را فراهم می‌سازد.

۵-خودروهای برقی به‌عنوان منابع انرژی توزیع‌شده

مفهوم اصلی بروشور TB954 در این بخش شکل می‌گیرد؛ به این معنا که خودروهای برقی می‌توانند به‌صورت منفرد یا از طریق تجمیع، به‌عنوان منابع انرژی توزیع‌شده (DER) در اختیار شبکه قرار گیرند. با این حال، ظرفیت قابل استفاده خودرو برای شبکه معادل ظرفیت نامی باتری آن نیست، بلکه به عواملی مانند وضعیت شارژ باتری، مدت زمان اتصال خودرو، نیاز مالک برای سفر بعدی، توان شارژر، قابلیت‌های V1G یا V2G، محدودیت‌های فنی و عمر باتری و همچنین شرایط شبکه وابسته است. بنابراین، آنچه از دیدگاه شبکه اهمیت دارد، نه مجموع ظرفیت باتری خودروها، بلکه ظرفیت انعطاف‌پذیر و قابل‌دسترس آن‌ها در زمان و مکان مشخص است. این ویژگی، تفاوت مهمی میان خودروهای برقی و ذخیره‌سازهای ثابت ایجاد می‌کند؛ زیرا باتری خودرو در درجه اول برای جابه‌جایی و نیاز مالک طراحی شده است و استفاده از آن برای خدمات شبکه باید به‌گونه‌ای انجام شود که با نیاز اصلی کاربر برای سفر و بهره‌برداری از خودرو تداخل ایجاد نکند.

دبیرخانه سیگره ایران: تهران – خیابان ولیعصر – بالاتر از میدان ونک - خیابان عطار – پلاک ۱۲ – شرکت مونتکو ایران
تلفن: ۰۲۱-۸۱۹۶۷۰۱۶ ایمیل: cigre@monencogroup.com/info@cigreiran.com وب سایت: www.cigreiran.com

۶- ارائه خدمات جانبی به اپراتور سیستم توزیع (DSO)

خودورهای برقی می‌توانند به عنوان ارائه دهنده خدمات جانبی به DSO نیز عمل کنند. این موضوع وابسته به شیوه تعامل و کیفیت زیرساخت‌های در دسترس است. مراحل سه‌گانه تکامل و تعامل خودروهای برقی با DSO مطابق جدول ۶-۱ بوده که بسته به قرارگیری در هر مرحله، خدمات جانبی مختلفی قابل ارائه خواهد بود.

جدول۶-۱: مراحل سه‌گانه تکامل نقش خودروهای برقی در شبکه توزیع

مرحله	نقش خودرو	راهکار اجرایی
مرحله ۱	بار مصرفی	تعرفه‌های استاتیک زمان استفاده (ToU)
مرحله ۲	بار قابل کنترل	شارژ هوشمند تک‌طرفه (V1G)
مرحله ۳	ذخیره‌ساز	شارژ دوطرفه (V2G)

۶-۱-پشتیبانی ولتاژ و کنترل توان راکتیو

تغییرات بار اکتیو حاصل از شارژ خودروها می‌تواند موجب افت ولتاژ شود. خودروهای برقی مجهز به اینورترهای ۴ناحیه‌ای[5] می‌توانند بدون درگیر کردن باتری و آسیب به طول عمر آن، توان راکتیو محلی (PQ Control) تزریق یا جذب کرده و ولتاژ شبکه را تثبیت نمایند. همچنین کنترل افت ولتاژ محلی بر روی هر فاز، عدم تعادل فازها را در شبکه‌های فشار ضعیف کاهش می‌دهد.

۶-۲- پاسخگویی بار (DR[6]) و مدیریت تراکم

خودروهای برقی می‌توانند با کاهش نرخ شارژ در ساعات پیک یا انتقال زمان شارژ به ساعات اوج تولید نیروگاه‌های تجدیدپذیر (مانند تولید خورشیدی در اواسط روز، گرفتگی ترانسفورماتورها و خطوط را مرتفع سازند. پروژه‌های اجرایی مانند Electric Nation نشان دادند که انعطاف‌پذیری شارژ خودروهای خانگی در ساعت ۲۰ به حداکثر می‌رسد (تنها ٪۲۰ از زمان اتصال به شبکه برای شارژ واقعی مورد نیاز است) که دقیقاً با پیک مصرف خانگی مطابقت دارد.

۶-۳-تاب‌آوری شبکه و تأمین برق اضطراری

در زمان وقوع برخی از حوادث یا قطعی‌های گسترده، خودروهای برقی می‌توانند به عنوان منابع تغذیه اضطراری عمل کنند:

- تأمین برق اضطراری خانگی (V2H / V2L): استفاده از مبدل‌های قابل حمل جهت تخلیه انرژی باتری خودرو به منازل یا مراکز حساس
- تأمین برق ریزشبکه (V2B / V2G): تغذیه ریزشبکه‌های محلی و مراکز عمومی در زمان قطعی کامل شبکه سراسری.

[5] Four-Quadrant Converters
Demand Response [6]

دبیرخانه سیگره ایران: تهران – خیابان ولیعصر – بالاتر از میدان ونک - خیابان عطار – پلاک ۱۲ – شرکت مونتکو ایران
تلفن: ۰۲۱-۸۱۹۶۷۰۱۶ ایمیل: cigre@monencogroup.com/info@cigreiran.com وب سایت: www.cigreiran.com

۶-۴- بهره‌برداری جزیره‌ای و بازیابی سراسری[۷]

در شرایط بهره‌برداری جزیره‌ای، خودروهای برقی مجهز به کنترل‌کننده افت توان-فرکانس (Pf Droop) می‌توانند فرکانس ریزشبکه را تثبیت نمایند. علاوه بر این، در فرآیندهای بازیابی شبکه از پایین به بالا[۸] ، این منابع جهت کنترل جهش‌های فرکانسی نقش به‌سزایی ایفا می‌کنند.

۷- ارائه خدمات جانبی به اپراتور سیستم انتقال (TSO)

در سطح شبکه انتقال، تجمیع توان و انرژی هزاران خودروی برقی در قالب نیروگاه‌های مجازی، امکان حضور آن‌ها را در بازارهای عمده‌فروشی خدمات جانبی فراهم می‌سازد. در ادامه، انواع خدمات جانبی و قابلیت‌های این خودروها در تعامل با TSO ارائه می‌شود.

۷-۱- انواع خدمات جانبی در سطح TSO

- تنظیم فرکانس: شامل رزرو نگهداری فرکانس (FCR)، رزرو بازیابی فرکانس (FRR) و رزرو جایگزینی (RR).
- رزروهای عملیاتی[۹] : شامل رزروهای گردان و غیرگردان جهت جبران خروج ناگهانی واحدهای تولیدی.

۷-۲- قابلیت‌های خودروهای برقی برای TSO

- آربیتراژ انرژی: عمل به عنوان باتری مجازی؛ جذب انرژی مازاد تجدیدپذیرها در ساعات کم‌باری و تزریق آن در ساعات اوج مصرف.
- پاسخ فرکانسی اولیه: تغییر آنی توان شارژ/دشارژ بر اساس اندازه‌گیری محلی فرکانس.
- تنظیم ثانویه فرکانس: پاسخ تجمیعی خودروها به سیگنال‌های کنترل خودکار تولید (AGC) دریافتی از مرکز دیسپاچینگ در فواصل زمانی ۲ تا ۸ ثانیه.

۷-۳- موانع و چالش‌های ارائه خدمات به TSO

برای تحقق ارائه خدمات جانبی از سوی خودروهای برقی به TSO، چالش ها و موانع مختلفی به شرح ذیل وجود دارد:

- موانع مقرراتی: بالا بودن حد آستانه ورود به بازار (مثلاً حداقل ۱ مگاوات در بازار اتحادیه اروپا).
- موانع فنی: تاخیر در سیگنال‌های ارتباطی، پیچیدگی پیش‌بینی رفتار مالکان و هزینه‌های بالای ابزار دقیق اندازه‌گیری.

[7] Black Start
[8] Bottom-up Restoration
[9] Operating Reserves

دبیرخانه سیگره ایران: تهران – خیابان ولیعصر – بالاتر از میدان ونک - خیابان عطار – پلاک ۱۲ – شرکت مونتکو ایران
تلفن: ۰۲۱-۸۱۹۶۷۰۱۶ ایمیل: cigre@monencogroup.com/info@cigreiran.com وب سایت: www.cigreiran.com

- موانع اقتصادی: هزینه بالای اینورترهای دوطرفه، تلفات چرخه شارژ و دشارژ (۱۵ تا ۳۶ درصد) و عدم شفافیت در نحوه تقسیم منافع بین تجمیع‌کننده و مالک خودرو.

۸- مدل‌های کسب‌وکار و ادغام در بازار برق

توسعه کاربردی خودروهای برقی به عنوان منابع انرژی پراکنده صرفاً یک مسئله فنی نیست، بلکه مستلزم شکل‌گیری مدل‌های اقتصادی انگیزش‌بخش و چارچوب‌های مقرراتی شفاف است. مالکان خودرو در صورتی اجازه کنترل باتری یا مشارکت در برنامه‌های پاسخگویی بار و V2G را به تجمیع‌کننده می‌دهند که منافع مالی مشخصی از طریق تعرفه‌های پویا، پاداش‌های انعطاف‌پذیری یا سهم‌بری از درآمدهای بازار خدمات جانبی دریافت نمایند. علاوه بر این، چارچوب‌های تنظیم‌گری باید ضمن شفاف‌سازی روابط میان DSO، TSO، تجمیع‌کننده و اپراتورهای شارژ، قوانین را به گونه‌ای تدوین کنند که رفتارهای شارژ سازگار با نیاز شبکه تشویق شده و هم‌زمان حقوق، ترجیحات حرکتی و گارانتی باتری مصرف‌کنندگان کاملاً تضمین گردد.

۸-۱- دسته‌بندی مدل‌های انعطاف‌پذیری

جدول ۸-۱، خلاصه‌ای از سطوح مختلف انعطاف‌پذیری و شیوه‌های خلق ارزش از خودروهای برقی را نشان می‌دهد.

جدول ۸-۱: سطوح انعطاف‌پذیری و شیوه‌های خلق ارزش

نماد	عنوان	بستر کنترلی	شیوه ایجاد ارزش اقتصادی
V0G	رفتاری	تصمیم دستی کاربر	پاسخ به تعرفه‌های استاتیک ToU
V1G	مدیریت‌شده	کنترل هوشمند تک‌طرفه	کاهش/تعویق توان شارژ در ساعات پیک
V2G/V2B	دوطرفه	کنترل هوشمند دوطرفه	تزریق توان، آربیترژ انرژی و ارائه خدمات فرکانسی

۸-۲- نقش ذینفعان کلیدی

هر یک از ذینفعان کلیدی در مدل‌های اقتصادی مختلف، وظایف و نقش‌های متفاوتی به شرح ذیل خواهند داشت:

- مالکان خودرو: اولویت اصلی آن‌ها تأمین نیازهای حمل‌ونقل است؛ مشارکت آن‌ها مشروط به سود مالی ملموس و حفظ گارانتی باتری خواهد بود.
- تجمیع‌کنندگان: واسطه میان مالکان و بازارهای برق؛ مسئول پیش‌بینی میزان انعطاف‌پذیری و مدیریت ریسک عدم تحویل خدمت.
- اپراتورهای شبکه: خریداران خدمات انعطاف‌پذیری جهت رفع محدودیت‌های شبکه و حفظ پایداری سیستم.
- خودروسازان: تعیین‌کننده شرایط گارانتی باتری در صورت مشارکت در برنامه‌های V2G.

دبیرخانه سیگره ایران: تهران – خیابان ولیعصر – بالاتر از میدان ونک - خیابان عطار – پلاک ۱۲ – شرکت مونتکو ایران
تلفن: ۰۲۱-۸۱۹۶۷۰۱۶ ایمیل: cigre@monencogroup.com/info@cigreiran.com وب سایت: www.cigreiran.com

۷- نقش تجمیع کننده در بهره‌برداری از خودروهای برقی

اگرچه هر خودروی برقی به‌تنهایی ظرفیت محدودی برای ارائه خدمات شبکه دارد، تعداد زیاد خودروها می‌تواند یک ظرفیت قابل‌توجه ایجاد کند. مسئله اصلی، هماهنگ‌سازی این منابع پراکنده است. در اینجا تجمیع کننده نقش کلیدی پیدا می‌کند. تجمیع‌کننده می‌تواند مجموعه بزرگی از خودروهای برقی را به‌عنوان یک پرتفوی انعطاف‌پذیر مدیریت کند. این نهاد اطلاعات مربوط به وضعیت خودروها، میزان شارژ، زمان اتصال، محدودیت‌های کاربر و شرایط شبکه را دریافت کرده و بر اساس آن برنامه شارژ و دشارژ را تنظیم می‌کند. در واقع، تجمیع کننده فاصله میان منابع کوچک و پراکنده در سمت مشترک و نیازهای شبکه یا بازار را پر می‌کند. به‌جای آنکه بهره‌بردار شبکه مجبور باشد با تعداد زیادی خودروی مستقل تعامل داشته باشد، یک ظرفیت تجمیع‌شده و قابل‌کنترل در اختیار خواهد داشت. این مفهوم می‌تواند در چارچوب نیروگاه مجازی یا VPP نیز توسعه پیدا کند؛ به‌گونه‌ای که خودروهای برقی در کنار PV، باتری‌های ثابت و سایر بارها و منابع انعطاف‌پذیر، یک پرتفوی واحد تشکیل دهند. در این ساختار، ارزش اصلی دیگر در یک خودروی منفرد نیست، بلکه در توانایی هماهنگ‌سازی تعداد زیادی منبع کوچک و تبدیل آن‌ها به یک ظرفیت قابل‌بهره‌برداری است.

۸- زیرساخت‌های فنی و ارتباطی موردنیاز

تبدیل خودروهای برقی به منابع فعال شبکه نیازمند زیرساخت‌های فنی مناسب است. شارژ هوشمند و V2G بدون وجود سیستم‌های اندازه‌گیری، ارتباطات، کنترل و مدیریت انرژی نمی‌توانند به‌صورت گسترده و مطمئن اجرا شوند. برای این منظور، باید میان خودرو، شارژر، کاربر، تجمیع‌کننده و سامانه‌های بهره‌برداری شبکه ارتباط مؤثر برقرار باشد. اطلاعاتی مانند وضعیت شارژ، توان قابل‌دسترس، زمان اتصال و فرمان‌های کنترلی باید با سرعت و دقت مناسب مبادله شوند.

قابلیت همکاری میان تجهیزات و سامانه‌های مختلف نیز اهمیت زیادی دارد. در یک اکوسیستم گسترده، خودروها، شارژرها و سامانه‌های مدیریت ممکن است توسط سازندگان مختلف تولید شده باشند. بنابراین، استانداردسازی پروتکل‌های ارتباطی و سازوکارهای تبادل اطلاعات برای جلوگیری از ایجاد جزایر فناوری و تضمین قابلیت همکاری ضروری است.

با افزایش تعداد تجهیزات متصل و وابستگی بهره‌برداری به ارتباطات دیجیتال، امنیت سایبری نیز به یکی از الزامات مهم تبدیل می‌شود. اختلال یا دستکاری در سامانه‌های کنترل شارژ می‌تواند به‌صورت هم‌زمان بر تعداد زیادی از خودروها اثر گذاشته و حتی موجب ایجاد نوسانات ناخواسته در بار شبکه شود.

۹- الزامات اقتصادی، مقرراتی و مشارکت مصرف‌کننده

توسعه خودروهای برقی به‌عنوان DER صرفاً یک مسئله فنی نیست. حتی در صورت وجود فناوری مناسب، نبود مدل اقتصادی و چارچوب مقرراتی مشخص می‌تواند مانع مشارکت کاربران و سرمایه‌گذاران شود.

دبیرخانه سیگره ایران: تهران – خیابان ولیعصر – بالاتر از میدان ونک - خیابان عطار – پلاک ۱۲ – شرکت مونتکو ایران
تلفن: ۰۲۱-۸۱۹۶۷۰۱۶ ایمیل: cigre@monencogroup.com/info@cigreiran.com وب سایت: www.cigreiran.com

برای مثال، اگر کاربر قرار باشد اجازه دهد باتری خودرو در زمان مشخصی تحت کنترل تجمیع کننده قرار گیرد، باید در مقابل آن منفعت اقتصادی مشخصی دریافت کند. این منفعت می‌تواند از طریق تعرفه‌های زمان‌مند، پرداخت بابت انعطاف‌پذیری، پاداش مشارکت در پاسخ گویی بار یا دریافت درآمد ناشی از ارائه خدمات شبکه ایجاد شود.

از سوی دیگر، نقش و مسئولیت بازیگران مختلف باید مشخص باشد. نحوه تعامل DSO، TSO، تجمیع کننده، اپراتورهای شارژ، مالکان خودرو و بازار برق باید در چارچوب‌های مقرراتی تعریف شود. همچنین، قوانین باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که رفتارهای شارژ سازگار با نیاز شبکه را تشویق کرده و در عین حال حقوق و ترجیحات مصرف‌کنندگان را حفظ کنند.

بنابراین، توسعه خودروهای برقی به‌عنوان DER نیازمند هم‌زمانی سه دسته اقدام است: توسعه فناوری و زیرساخت، ایجاد سازوکارهای اقتصادی و طراحی چارچوب مقرراتی.

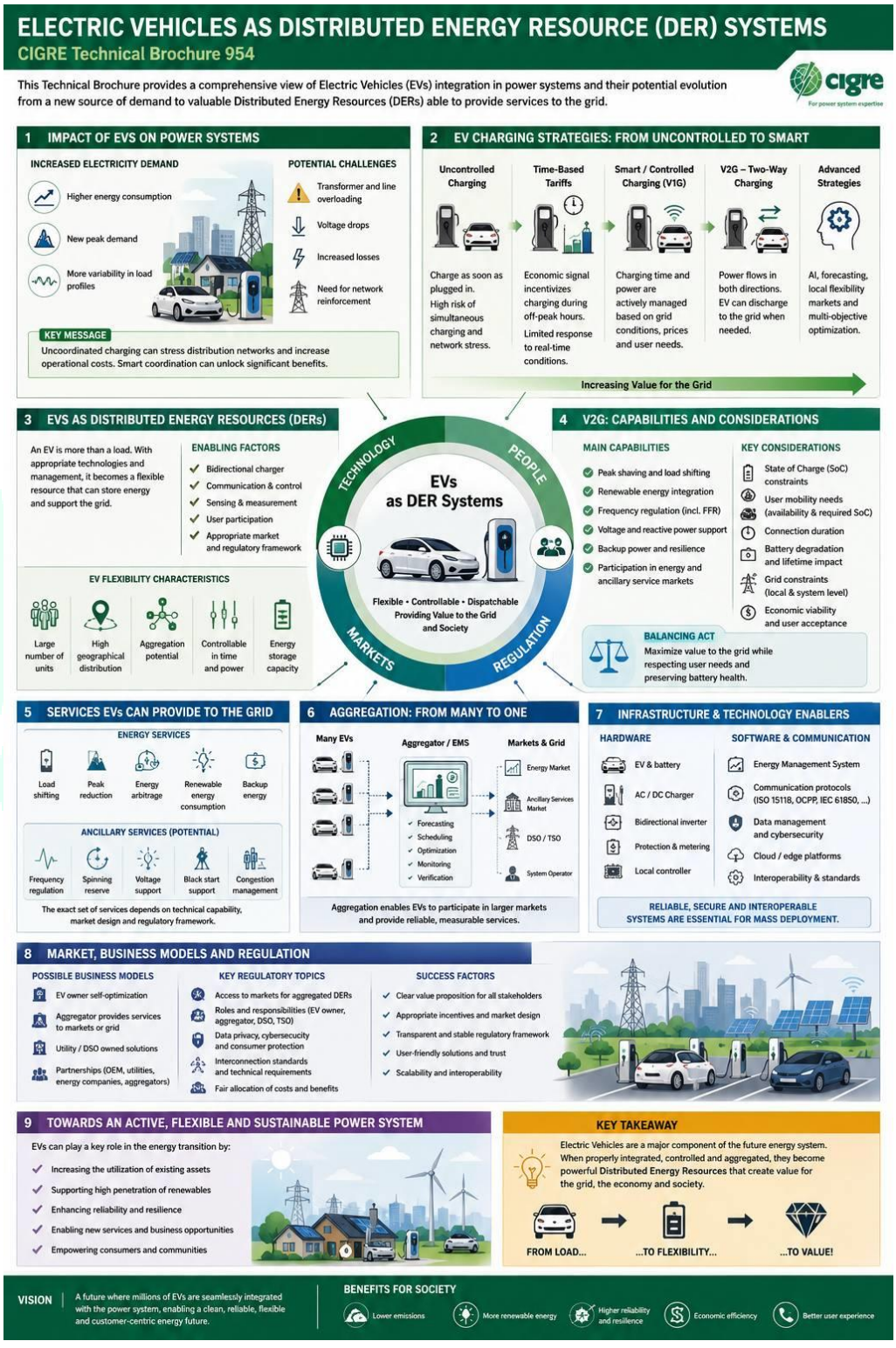
۱۰- جمع‌بندی

بر اساس چارچوب‌ها و مباحث مطرح‌شده در بروشور CIGRE TB954، خلاصه‌ای از مسیر تحول و یکپارچه‌سازی خودروهای برقی با شبکه برق، در شکل ۱ ارائه شده است. این مسیر نشان می‌دهد که خودروهای برقی در حال گذار از یک بار جدید در شبکه برق به منابعی انعطاف‌پذیر و قابل‌کنترل هستند که می‌توانند، به‌صورت منفرد یا از طریق تجمیع، در قالب DER در سیستم قدرت ایفای نقش کنند. تحقق این ظرفیت، صرفاً با توسعه تعداد خودروها یا زیرساخت شارژ امکان‌پذیر نیست و نیازمند شکل‌گیری یک اکوسیستم هماهنگ میان زیرساخت شارژ، سیستم‌های کنترل و ارتباطات، استانداردهای تعامل‌پذیری، مدل‌های اقتصادی و تجاری، سازوکارهای بازار و چارچوب‌های مقرراتی و حمایتی است.

در این چارچوب، مسیر توسعه از شارژ کنترل‌نشده به شارژ هوشمند و سپس شارژ دوطرفه V2G، امکان بهره‌گیری تدریجی از انعطاف‌پذیری خودروها را فراهم می‌کند. با توسعه تجمیع‌کننده‌ها نیز ظرفیت‌های کوچک و پراکنده خودروها می‌توانند در مقیاس بزرگ‌تر مدیریت شده و در حوزه‌هایی مانند مدیریت تقاضا، کاهش پیک، رفع تراکم شبکه، پشتیبانی ولتاژ و فرکانس و افزایش تاب‌آوری سیستم مورد استفاده قرار گیرند.

برای تحقق این گذار، تمرکز بر چند محور کلیدی ضروری است :توسعه زیرساخت‌های شارژ متناسب با نیاز شبکه، استقرار استانداردها و بسترهای ارتباطی یکپارچه، ایجاد مدل‌های اقتصادی و سازوکارهای مناسب برای مشارکت EV و تجمیع کننده در بازار، تدوین چارچوب‌های روشن برای مسئولیت‌ها و حقوق ذی‌نفعان، و هماهنگی میانDSO ، TSO، خودروسازان، اپراتورهای شارژ و تجمیع‌کنندگان. در کنار این موارد، توسعه شارژ سریع و مگاواتی نیز نیازمند برنامه‌ریزی هم‌زمان شبکه و در برخی کاربردها استفاده از منابع مکملی مانند BESS و تولید تجدیدپذیر خواهد بود.

دبیرخانه سیگره ایران: تهران – خیابان ولیعصر – بالاتر از میدان ونک - خیابان عطار – پلاک ۱۲ – شرکت مونتکو ایران
تلفن: ۰۲۱-۸۱۹۶۷۰۱۶ ایمیل: cigre@monencogroup.com/info@cigreiran.com وب سایت: www.cigreiran.com



شکل۱- خلاصه مسیر تحول و یکپارچه‌سازی خودروهای برقی با شبکه برق(TB954)

دبیرخانه سیگره ایران: تهران – خیابان ولیعصر – بالاتر از میدان ونک - خیابان عطار – پلاک ۱۲ – شرکت مونتکو ایران
تلفن: ۰۲۱-۸۱۹۶۷۰۱۶ ایمیل: cigre@monencogroup.com/info@cigreiran.com وب سایت: www.cigreiran.com

کمیته مطالعاتی شبکه‌های توزیع فعال و منابع انرژی توزیع شده
SC C6
سیگره ایران
آبان ماه ۱۴۰۵

مرجع اصلی: CIGRE Electra No. 338 و CIGRE TB No. 954- دسترسی به مراجع از طریق سایت https://www.e-cigre.org

تهیه کنندگان:

- آقای دکتر محمودرضا حقی فام از گروه مپنا و عضو هیئت علمی دانشگاه تربیت مدرس، رئیس کمیته مطالعاتی کمیته مطالعاتی C6 سیگره ایران
- خانم مهندس زهرا صبوری از گروه مپنا،دبیر کمیته مطالعاتی سیگره ایران، کمیته مطالعاتی SC 6
- آقای دکتر حسن گرامی‌فر از شرکت توزیع نیروی برق مازندران، نماینده کمیته C6 سیگره ایران در سیگره بین‌الملل

برای کسب اطلاعات تکمیلی با دبیرخانه سیگره ایران تماس بگیرید.

این گزارش شامل خلاصه ای برای معرفی یکی از بروشورهای فنی منتشر شده توسط سیگره بین الملل و منبع معرفی آن، مجله الکترا می باشد.

Electra, reprinted/translated with permission from CIGRE, © 2026

دبیرخانه سیگره ایران: تهران – خیابان ولیعصر – بالاتر از میدان ونک - خیابان عطار – پلاک ۱۲ – شرکت مونتکو ایران
تلفن: ۰۲۱-۸۱۹۶۷۰۱۶ ایمیل: cigre@monencogroup.com/info@cigreiran.com وب سایت: www.cigreiran.com

کمیته های مطالعاتی متناظر سیگره ایران	کمیته های مطالعاتی سیگره بین الملل
Group A – Equipment	
ماشین‌های الکتریکی دوار و تولید برق	**A1** Power Generation and Electromechanical Energy Conversion
ترانسفورماتورها و راکتورها	**A2** Power transformers and reactors
تجهیزات انتقال و توزیع	**A3** Transmission and distribution equipment
Group B – Technologies	
کابل‌های عایق شده	**B1** Insulated cables
خطوط انتقال هوایی برق	**B2** Overhead lines
پست‌های فشار قوی	**B3** Substations and electrical installations
سیستم‌های DC و الکترونیک قدرت	**B4** DC systems and power electronics
حفاظت و اتوماسیون	**B5** Protection and automation
Group C – Systems	
توسعه سیستم قدرت و جنبه های اقتصادی	**C1** Power system development and economics
سیستم بهره برداری و کنترل	**C2** Power system operation and control
پایداری و عملکرد زیست محیطی سیستمهای قدرت	**C3** Power System Sustainability and Environmental Performance
عملکرد فنی سیستمهای قدرت	**C4** Power system technical performance
بازار برق و تنظیم گری	**C5** Electricity markets and regulation
شبکه‌های توزیع فعال و منابع انرژی توزیع شده	**C6** Active distribution systems and distributed energy resources
Group D – New Materials and IT	
مواد و روشهای نوین آزمون	**D1** Materials and emerging test techniques
مخابرات و فناوری اطلاعات	**D2** Information Systems Telecommunications and Cybersecurity

cigre Iran

با ما در ارتباط باشید:

دبیرخانه سیگره ایران:

تهران - خیابان ولیعصر- بالاتر از میدان ونک - خیابان عطار- پلاک ۱۲ - شرکت مونتکو ایران

شماره تماس: ۸۱۹۶۷۰۱۶-۰۲۱ ایمیل: info@cigreiran.com وب سایت: www.cigreiran.com

مونتکو ایران
Monenco Iran