برنامه‌ریزی بهینه شارژ خودروهای الکتریکی جهت مدیریت تراکم در شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی

سعید سیاهکلایی[۱]، محمد تبریزیان*[۲]، حمیدرضا شاهمیرزاد[۳]

۱- کارشناس ارشد برق قدرت، شرکت بهره برداری راه آهن شهری تهران و حومه، تهران، ایران،ssk1361@yahoo.com

*۲- استادیار گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، واحد یادگار امام خمینی(ره)، شهرری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، mm_tabrizian@yahoo.com

۳- کارشناس ارشد برق قدرت، شرکت بین المللی مهندسی ایران(ایریتک)، تهران، ایران، hr.shahmirzad@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۷/۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۷

چکیده: امروزه خودروهای الکتریکی با توجه به عدم آلودگی هوا به میزان قابل توجهی مورد نظر قرار گرفته‌اند. اما با توجه به حجم زیاد خودروهای موجود در شهر، اتصال آن‌ها به شبکه توزیع بدون برنامه کنترلی ممکن است باعث ایجاد تراکم در خطوط و پست‌های شبکه گردد. لذا یک روش سلسله مراتبی دو سطحی برای اتصال خودروهای الکتریکی به شبکه توزیع برای هماهنگی خدمات و محدودیت‌های عملکردی سه عنصر اصلی یعنی بهره‌بردار ناوگان، بهره‌بردار سیستم توزیع و بهره‌بردار بازار ظرفیت در حضور مالکان خودرو و با در نظر گرفتن الزامات رانندگی، هزینه شارژ و تراکم خطوط و ترانسفورماتورهای قدرت پیشنهاد می‌گردد. در این روش ابتدا مالکان خودرو و بهره‌برداران ناوگان، برنامه شارژ خود را با توجه به قیمت‌های پیش‌بینی شده بازار به بهره بردار سیستم توزیع ارائه می‌دهند. در مرحله بعدی در صورتی که این برنامه شارژ منجر به تراکم در خطوط یا پست‌ها و ترانسفورماتورهای قدرت شود به بهره‌بردارهای ناوگان برگشت داده شده و قیمت سایه بر مبنای میزان تراکم، توسط بهره‌بردار بازار ظرفیت تعیین می‌گردد. سپس برنامه شارژ جدید با توجه به قیمت‌های جدید بازار دوباره ایجاد می‌گردد. روش پیشنهادی در یک شبکه توزیع نمونه اجرا شده و نتایج شبیه‌سازی کارآمدی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: خودروهای الکتریکی، مدیریت تراکم، سیستم توزیع انرژی الکتریکی، برنامه شارژ بهینه، سیستم چند عامله

۱- مقدمه

مطالعات اخیر نشان می‌دهد که حدود ۲۰ تا ۳۰٪ انرژی مصرفی بدون نیاز به تغییرات در ساختار فیزیکی سیستم قدرت و تنها با استفاده از عملکرد بهینه و مدیریت شده قابل کاهش خواهد بود. در این مقاله به بررسی خودروهای الکتریکی به‌عنوان یک دارایی ارزشمند جهت بهبود مدیریت تراکم سیستم‌های توزیع انرژی الکتریکی در زمان‌های اوج بار پرداخته شده است. برای یکپارچه سازی و ادغام خودروهای الکتریکی با سیستم توزیع انرژی الکتریکی، می‌بایست روش کنترلی معرفی گردد تا محدودیت‌های عملیاتی و برخی از منافع سیستم به واسطه بهره‌بردار ناوگان و بهره بردار سیستم توزیع و همچنین بهره‌بردار بازار ظرفیت تسهیل گردد. بنابراین برای اعتبارسنجی، روش پیشنهادی در یک شبکه توزیع ۱۰ کیلوولتی مشابه با نمونه‌ای از شبکه توزیع کشور دانمارک پیاده‌سازی شده است. این شبکه شامل دو سطح ولتاژ، ۱۱ باس(شین)، ۹ خط توزیع و ۷ باس مربوط به بار(مصرف‌کننده) بوده که در نرم افزار دیگسایلنت(Digsilent) به عنوان یک نمونه نرم افزار پرقدرت برای شبیه‌سازی شبکه‌های قدرت پیاده‌سازی شده و محاسبات تکمیلی بهینه‌سازی نیز در محیط نرم‌افزار متلب(Matlab) اجرا شده است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-04-12]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.2.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023

در این مقاله در بخش دوم ضـــمن بیان ادبیات و پیشـــینه تحقیق، به اثرات خودروهای الکتریکی بر شـبکه توزیع انرژی الکتریکی و همچنین اســتراتژی(راهبرد) هماهنگی بازار محور، ســاختارهای کنترل ســلســه مراتبی و کاربرد سیستم چندعاملی تشریح شده است. در بخش سوم روش کنترل ســلســه مراتبی دو مرحله‌ای جهت مدیریت تراکم شــبکه معرفی می‌گردد. بخش چهارم نحوه شــبیه‌ســازی و تحلیل نتایج عددی حاصله ارائه شده است و نهایتا در بخش پنجم جمع‌بندی و نتیجه‌گیری این مقاله بیان شده است.

۲- پیشینه تحقیق

موضوع خودروهای الکتریکی در حال حاضر به طور گسترده‌ای در حمل و نقل شهری مورد توجه قرار گرفته است زیرا این خودروها می‌توانند سهم به سزایی در کاهش آلودگی هوا داشته باشند، بخصوص زمانی که انرژی الکتریکی مورد نیاز برای شارژ خودرو از منابع انرژی تجدیدپذیر تولید شده باشد. با این حال عرضه‌کنندگان انرژی الکتریکی باید نظارت و مدیریت داشته باشند که این خودروها چگونه در شبکه توزیع رفتار نمایند. اتصال تعداد زیادی از خودروهای الکتریکی به شبکه توزیع انرژی الکتریکی و شارژ همزمان آن‌ها را باید برای مدیریت اوج بار شبکه کنترل نمود، چون اتصال خودروهای الکتریکی به شبکه‌ی توزیع برای شارژ بدون هیچ گونه نظارت و اقدام کنترلی ممکن است منجر به اضافه بار در طول ساعات اوج بار و تحمیل هزینه اقتصادی مضاعف گردد. همچنین عدم کنترل و نظارت بر اتصال خودروها به شبکه، سبب تغییر در ظرفیت شبکه، ایجاد اضافه بار، افزایش مصرف و در نتیجه افزایش تقاضای روزانه می‌گردد که خود منجر به افزایش تراکم شبکه توزیع، به‌ویژه در ساعات اوج مصرف خواهد شد. با پیش بینی برنامه کنترلی مطلوب برای شارژ خودروهای الکتریکی که سبب بهینه شدن تولید و مصرف توان در شبکه توزیع گردد، می‌توان توسعه شبکه را به تعویق انداخت. همچنین می‌توان تعادل در تولید و مصرف توان را ایجاد کرد که این خود منجر به اصلاح منحنی تقاضا می‌گردد. بنابراین برای یکپارچه‌سازی و ادغام خودروهای الکتریکی با سیستم توزیع باید روش کنترلی معرفی گردد تا محدودیت‌های عملیاتی و برخی از منافع سیستم به واسطه بهره‌بردار سیستم توزیع و بهره‌بردار ناوگان و همچنین بهره-بردار بازار ظرفیت، تسهیل گردد.

استفاده از خودروهای برقی اثرات زیادی در تسهیل برنامه‌های مدیریت سمت مصرف و ارائه خدمات جانبی از جمله رزرو چرخان، تنظیم ولتاژ، تنظیم فرکانس و غیره دارد. پیاده‌سازی این برنامه‌ها توسط خودروهای برقی می‌تواند برای صاحبان آن‌ها درآمدزایی و سودآوری مناسبی به همراه داشته باشد. در اجرای برنامه‌های مدیریت مصرف، با استفاده از تجهیزاتی مانند کنتورهای هوشمند در منازل و وضع تعرفه‌های مبتنی بر زمان، این امکان فراهم می‌شود که وسایل برقی مصرف انرژی را به ساعاتی که تعرفه ارزان‌تر است انتقال دهند. با اجرایی شدن تعرفه‌های قیمت زمان واقعی، وسایل ذخیره‌ساز می‌توانند انرژی الکتریکی را در بهترین حالات مالی و تشویقی شارژ و دشارژ نمایند. برای مثال خودروهای با قابلیت ذخیره‌سازی این امکان را فراهم می‌آورند که در ساعات اوج به منظور تأمین انرژی الکتریکی در منازل به عنوان مولد عمل کرده و انرژی ارزان ذخیره شده در باتری خود را صرف تامین روشنایی و تجهیزات برقی نمایند. بنابراین خودروهای برقی باعث کاهش هزینه تمام شده برق مشترکین گردیده که موجب سودآوری و اجرای برنامه‌های مدیریت مصرف می‌شود[۱]. اگر این خودروها برای تنظیم ولتاژ و فرکانس به کار گرفته شوند، تنظیم‌کنندگان و شرکت‌های واسطه بین صاحبان خودرو و شرکت های توزیع نقش قابل توجهی در تنظیم و پیاده‌سازی این قراردادها دارند، آن‌ها می‌توانند با ارائه تسهیلاتی صاحبان خودروها را جذب کنند. شرکت‌های واسط با اخذ قرارداد با صاحبان خودروها تسهیلاتی از جمله تخفیف زیاد برای تعمیر و نگهداری باتری آن‌ها، تخفیف در هزینه پارک و ... فراهم آورند. در عوض صاحبان خودرو نیز موظفند در ساعاتی که واسط‌ها نیاز دارند، خودرو خود را به شبکه متصل نموده و در صورت کوتاهی مشترکین، قراردادها با جریمه‌های مالی و پشتیبانی مواجه گردد. در نتیجه ایجاد طرح‌های تشویقی برای صاحبان خودروها این امکان را فراهم می‌کند که خودروی خود را متصل به شبکه نگه دارند. بدین ترتیب خودروها برای صاحبان خود مفید و کارآمد بوده و سودآوری بیشتر به همراه دارند. در مرجع[۲] برقی‌سازی حمل‌ونقل به‌عنوان بخشی از تلاش‌های کربن‌زدایی جهانی اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد، اما یکپارچه‌سازی سیستم قدرت خودروهای الکتریکی با چالش‌های متعددی مواجه است، از جمله اوج تقاضای نامتناسب بالا که نیاز به سرمایه‌گذاری‌های گران زیرساختی را ایجاب می‌کند. علاوه بر این، تحولات بلندمدت در بخش برق با عدم اطمینان زیاد مشخص می‌شود، که خطر اتخاذ تصمیمات سرمایه‌گذاری نادرست را افزایش می‌دهد که منجر به دارایی‌های سرگردان می‌شود. بنابراین، یکپارچه سازی سیستم مقرون به صرفه حمل و نقل برقی بدون اجرای مفاهیم شارژ هوشمند در ترکیب با برنامه ریزی استراتژیک گسترش شبکه که تأثیر عدم قطعیت ها را در نظر می گیرد، امکان پذیر نخواهد بود. این مرجع مدل‌های سرمایه‌گذاری و عملیات شبکه به وسیله نقلیه (G2V)، وسیله نقلیه به شبکه (V2G) و وسیله نقلیه به ساختمان (V2B) را برای مشکل برنامه‌ریزی توسعه شبکه در مقیاس بزرگ و بلندمدت تحت شرایط چندگانه پیشنهاد می‌کند. عدم قطعیت موجود در این مطالعه، یک چارچوب برنامه‌ریزی تصادفی چند مرحله‌ای را ارائه می‌کند که می‌تواند استراتژی‌های سرمایه‌گذاری بهینه را شناسایی کند، به طوری که هزینه سیستم مورد انتظار به حداقل برسد و ریسک سرمایه‌گذاری‌های رشته‌ای کاهش یابد. در مرجع [۳] روشی را برای به حداقل رساندن برخی از مشکلات امروزی شبکه برق از جمله تراکم شبکه در یک شبکه هوشمند با ضریب نفوذ بالای تولید پراکنده و (EVs) با در نظر گرفتن تجمیع‌کننده‌های متعدد پیشنهاد می‌کند. مدل

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-04-12]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.2.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023

پیشنهادی سود هر جمع‌کننده را از طریق برخی مدل‌های تجاری محاسبه می‌کند و شبکه را بدون هیچ گونه استراتژی تراکم تحلیل می‌کند. نتایج ثابت می‌کند که قیمت‌های پویا برای شبکه برق با کاهش تراکم با تجزیه و تحلیل سود هر تجمیع‌کننده، قابل دوام‌تر هستند. در مرجع [۴] یک مکانیسم مدیریت تراکم سلسله مراتبی دو مرحله‌ای برای یک شبکه توزیع فعال (ADN) مرتبط با چند نوع DER و ریزشبکه پیشنهاد شده است. در مرحله اول، یک مدل بهینه‌سازی سلسله مراتبی با توجه به اعزام منابع کنترل مستقیم (DCR) و ریزشبکه‌ها ساخته می‌شود. بهینه سازی مرحله دوم برای مقابله با مواردی طراحی شده است که کنترل DCR ها و ریزشبکه ها برای حذف کامل تراکم کافی نیست. یک مدل مدیریت تراکم که خدمات جانبی ارائه شده توسط DERها را فرا می خواند، با هدف به حداقل رساندن هزینه عملیاتی اپراتور سیستم توزیع (DSO) ایجاد شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی می‌تواند منافع ذینفعان مختلف را متعادل کند و تراکم شبکه را به طور موثر حذف کند. در مرجع [۵] با توسعه یک چارچوب پاسخ تقاضای یکپارچه دو سطحی (IDR) برای کاهش تراکم در شبکه‌های جفت شده به این موضوع می‌پردازد. در سطح بالا، اپراتور سیستم مستقل قصد دارد با اعمال کمترین عوارض ترافیکی و تعرفه برق، تراکم را کاهش دهد. در سطح پایین تر، مسافران منطقی در TN مسیرها و زمان حرکت خود را با توجه به عوارض ترافیک و شرایط ترافیک برنامه ریزی می کنند، که یک حالت تعادل کاربر چند دوره ای ایجاد می کند که در آن هزینه سفر عمومی کاربران را نمی توان با تغییر یک طرفه مسیرها یا زمان حرکت کاهش داد. درمرجع[۶] یک چارچوب زمان‌بندی جمع‌کننده خودروهای الکتریکی مبتنی بر قیمت‌گذاری حاشیه‌ای مکانی توزیعی (DLMP) ایجاد می‌کند که تراکم در شبکه را به حداقل می‌رساند. مسئله دو سطحی غیرخطی با استفاده از شرایط کاروش-کوهن-تاکر و قضیه دوگانگی به مسئله تک سطحی تبدیل می-شود. این چارچوب عدم قطعیت جمع‌کننده EV را با استفاده از برنامه‌ریزی قوی در نظر می‌گیرد و با شبکه توزیع شعاعی ۱۵ شینه برای موارد تراکم و بدون تراکم آزمایش می‌شود. در مرجع [۷] یک استراتژی جدید برای مدیریت تراکم در یک سیستم توزیع ارائه می‌کند که به دلیل شارژ ناهماهنگ وسایل نقلیه الکتریکی پلاگین (PEVs) رخ می‌دهد. یک مطالعه تحلیلی برای ارزیابی حداکثر نفوذ PEV ممکن که شبکه توزیع می‌تواند بدون نقض محدودیت‌های شبکه در خود جای دهد، ارائه شده است. علاوه بر این، عملکرد استراتژی پیشنهادی با یا بدون حضور پارکینگ با انرژی خورشیدی برای ارزیابی حداکثر نفوذ PEVs ممکن در شبکه مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد تا هیچ ازدحام در خطوط توزیع رخ ندهد. در مرجع[۸] یک چارچوب بازار یک روزه برای مدیریت تراکم در شبکه‌های توزیع هوشمند پیشنهاد می‌کند. طرح ارائه شده بستری را برای همکاری بین اپراتور بازار در سطح توزیع (DMO) و اپراتور ترافیک داده (DTO) برای کاهش فیدرهای متراکم فراهم می کند به طوری که ترافیک انتقال داده بین شرکت کنندگان در بازار به طور موثر در یک شبکه هوشمند مدیریت می شود. چارچوب پیشنهادی یک اقدام اداری را برای اپراتور سیستم توزیع (DSO) برای حمایت از بازار مشخص می‌کند، زمانی که رقابت‌های غیرمتمرکز بین تجمیع‌کننده‌های تولید پراکنده (DG) و تجمیع‌کننده‌های EV به طور کامل ازدحام جدی را برطرف نکند. طرح مدیریت ازدحام پیشنهادی در روز آینده بر روی یک سیستم توزیع ۱۳۶ اتوبوسی نامتعادل که به طور انبوه با توربین‌های بادی (WTDGs) DGs، DGs فتوولتائیک (PVDGs)، DGs موتور دیزلی (DEDGs) و EVs یکپارچه شده است، تایید شده است.

چندین روش حل مسئله تراکم از منظر بازار برق، به طور متناوب پیشنهاد شده است. مرجع[۹] چند روش را برای بررسی تراکم شبکه مطابق با ارزش و مزایای حاصله علاوه بر معایب و خطرات و پیچیدگی پیاده‌سازی، ارائه کرده است. توصیف کوتاهی از اصول این استراتژی-ها(راهبردها) ذیلاً اشاره می‌شود.

الف) بازار ظرفیت شبکه توزیع: در این روش، بهره‌بردار ناوگان نیازهای خود را برای بهره‌بردار سیستم توزیع در برنامه زمانی توان یا انرژی خود در هر گره را ثبت می‌کند. در پاسخ به این برنامه، بهره‌بردار سیستم توزیع یک قیمت برای هر گره را که انعکاس دهنده محدودیت تراکم متناظر با آن‌هاست دریافت می‌کند و تقاضای به روزرسانی برنامه زمانی خود را می‌کند. این فرایند تا زمانی که تمام محدودیت‌ها ارضا شود ادامه پیدا می‌کند. شیوه بازار می‌تواند به چندین روش طراحی شود، نظیر شیوه مزایده قیمت یکسان [۱۰] و شیوه مبتنی بر قیمت سایه [۱۱].

ب) تعرفه پویای شبکه: در این روش[۱۲]، بهره بردار سیستم توزیع یک قیمت که تابعی از مکان و زمان است را ایجاد می‌کند که برای عملکرد شبکه برای مقدار مصرف پیش‌بینی شده است. به عبارت دیگر، این بهره‌بردار مقدار و پاسخ قیمت در گره‌های بحرانی شبکه را پیش‌بینی کرده و قیمت را برای انعکاس مسئله تراکم مورد انتظار محاسبه می‌کند. بهره‌بردار ناوگان تعرفه گره‌های شبکه دینامیکی را گرفته و یک برنامه زمانی بهینه را با توجه به قیمت نقدی پیش‌بینی شده و تعرفه شبکه دینامیکی ایجاد می‌کند. علاوه بر این، مطالعات [۱۳] و [۱۴] روش-های هماهنگی را با استفاده از یک سیگنال قیمت مشترک بررسی می‌کند که دارای تشابهات زیادی است. به طور عمده هر دو مطالعه از نظریه بازی‌ها برای فرمول‌بندی یک برنامه‌ریزی مصرف انرژی خودرو استفاده می‌کند. فرض می‌شود بازیگران دارای حداقل هزینه بوده و از طریق یک سیگنال مشترک به هم وصل می‌شوند.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-04-12]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.2.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023

۳- روش پیشنهادی

۳-۱- روش کنترل سلسله مراتبی دو سطحی برای مدیریت تراکم شبکه های توزیع برق با حضور خودروهای الکتریکی

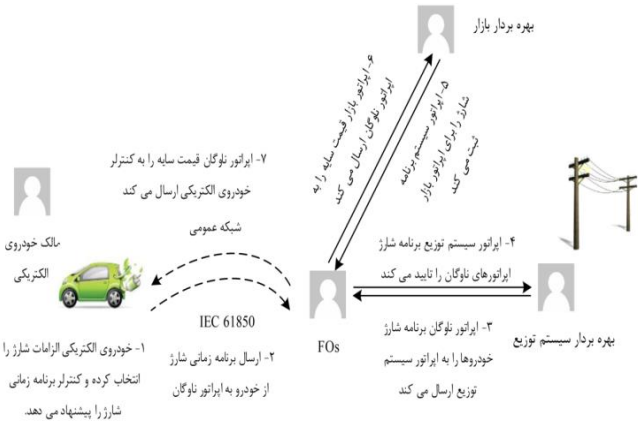
این مقاله از تکنولوژی چند عامله برای مدیریت تراکم سیستم توزیع با در نظر گرفتن خودروهای الکتریکی استفاده شده است. ویژگی خاص این سیستم چند عامله در ساختار سیستمی آن است که در آن، سیستم یک ساختار سلسله مراتبی دارد و روش کنترل بر پایه بازار به طور کامل به هر دو سطح بالا و پائین آن اعمال می‌گردد. بنابراین سیستم پیشنهادی مزایای هر دو ساختار سلسله مراتبی و کنترل بر پایه بازار را برای کاربرد سیستم چند عامله در مدیریت تراکم سیستم توزیع دارا می‌باشد. در مطالعات گذشته فقط تراکم در یک تجهیز شبکه به عنوان مثال ترانسفورماتور توزیع در نظر گرفته شده بود، در حالی که ممکن است تراکم در خطوط شبکه نیز اتفاق بیافتد. در این صورت تغییر برنامه زمانی شارژ خودروهای الکتریکی می‌بایست با توجه به خطوط متراکم شده صورت بگیرد. به عبارت دیگر، رنامه شارژ خودروهای الکتریکی که بر میزان بار خط متراکم شده تاثیر دارد باید تغییر داده شود. بنابراین با تخصیص تعریف جدیدی از ضریب قیمت سایه برای خطوط متراکم، این تغییر صورت می‌پذیرد. لازم به ذکر است در شبیه‌سازی روش پیشنهادی، نرم افزارهای متلب و دیگسایلنت به همدیگر لینک شده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند که دیگسایلنت یک نرم افزار کارآمد برای شبیه‌سازی و مدل‌سازی شبکه‌های قدرت و متلب نیز یک ابزار محاسباتی قوی و مناسب است.

در پروتکل‌های قیمت سایه برای هماهنگی بین عامل بهره بردار ناوگان و بهره‌بردار سیستم توزیع[۱۵]، قیمت سایه به عنوان قیمت تعادل بازار در هر مرحله از پیشنهاددهی توسط بهره بردار بازار ظرفیت شبکه به روز رسانی می‌شود. پیشنهادات از بهره‌بردارهای ناوگان دریافت می‌شود که نمایندگی خودروهای الکتریکی را بر عهده دارند و به صورت مستقیم شارژ خودروهای الکتریکی را برنامه‌ریزی و کنترل می‌کنند. در این مقاله، روش هماهنگی بین بهره بردارهای ناوگان و خودروهای الکتریکی با تصمیم‌گیری در مورد شارژ خودروی الکتریکی اصلاح می شود. یک ضریب وزنی پاسخ‌دهی برای قیمت سایه برای هر خودروهای الکتریکی تعریف می‌شود. در این حالت، عامل خودروی الکتریکی می‌تواند تمایل خود را به شارژ یا عدم شارژ در طول دوره زمانی با قیمت بالاتر نشان دهد.

در ادامه مقاله، نحوه هماهنگی سلسله مراتبی دو سطحی برای اتصال خودروهای الکتریکی به سیستم‌های توزیع توان تشریح می‌شود. شکل (۱) مراحل روش‌های پیشنهادی را نشان می‌دهد:

a) مالک خودروی الکتریکی، الزامات شارژ مطلوب را انتخاب کرده و کنترلر خودروی الکتریکی برنامه شارژ را بر اساس استراتژی کمترین هزینه شارژ تولید می‌کند.
b) مالک خودروی الکتریکی برنامه شارژ را به بهره‌بردار ناوگان ارسال می‌کند.
c) بهره‌بردارهای ناوگان برنامه شارژها را از خودروهای الکتریکی تحت قراردادشان جمع‌آوری کرده و برنامه شارژ را در بهره‌بردارهای سیستم توزیع ثبت می‌کنند.
d) بهره‌بردارهای سیستم توزیع برنامه شارژ را با اجرای محاسبه پخش بار و ارسال نتایج به تمام بهره‌بردارهای ناوگان تایید می‌کند.
e) بهره‌بردارهای ناوگان در صورتی که تراکم وجود داشته باشد، برنامه شارژ را به بهره‌بردار بازار ارسال می‌کند. در غیر این صورت بهره-بردارهای ناوگان می‌توانند برنامه انرژی را به بازار نقدی انرژی پیشنهاد کند و فرآیند در این مرحله متوقف می‌شود.
f) بهره‌بردار بازار قیمت سایه را به بهره‌بردار ناوگان ارسال می‌کند و سپس آن‌ها دوباره برنامه شارژ را به بهره‌بردار بازار داده تا قیمت سایه همگرا شود.
g) بهره‌بردارهای ناوگان قیمت سایه را به تمام کنترلرهای خودروهای الکتریکی ارسال می‌کند.
h) مراحل a تا g تکرار می‌شود تا تراکم به‌طور کامل در دوره برنامه-ریزی حذف گردد.
i) برنامه توان / انرژی حاصله به بازار آنی(لحظه‌ای) انرژی پیشنهاد می‌شود.

مفهوم کلیدی این است که برنامه‌های انرژی خودروهای الکتریکی/بهره-بردار ناوگان با بهره‌بردار سیستم توزیع/بازار قبل از ارسال آن‌ها به بازار انرژی هماهنگ شود.



شکل (۱): طرح کلی روش پیشنهادی

لازم به ذکر است که سه روش کاملا متفاوت از مدیریت تراکم سیستم انتقال در محیط تجدید ساختار شده ارائه شده است[۱۶]. یک روش مدل پخش بار بهینه است که در کشورهایی مانند انگلستان، استرالیا،

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-04-12]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.2.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023

نیوزلند و بخش‌هایی از ایالات متحده آمریکا استفاده می‌شود. روش دیگر مدل بر پایه قیمت ناحیه‌ای که در بازارهایی نظیر نوردپول در کشورهای اسکاندیناوی استفاده می‌شود و مدل مبتنی بر معاملات که در برخی از ایالات متحده و ... استفاده می‌شود. در بازار آنی، بخش‌های مسئول تعادل توان پیشنهادهای انرژی و توان را به بازار ارائه می کنند که شامل انرژی‌های غیرتجدید پذیر و تجدید پذیر است. با استفاده از تعاملات تجاری، مسئولان تعادل توان می‌توانند سیستم توان در محیط مقررات زدائی شده را متعادل سازند. به دلیل این که تولید و مصرف همیشه باید در حالت تعادل باشد، عدم تعادل باید توسط بهره‌بردار سیستم انتقال در ساعات عملکردی سیستم جبران گردد که از طریق بازار تنظیم توان بدست می‌آید. به طور خلاصه، روش پیشنهادی در این پژوهش می‌تواند مدیریت تراکم توزیع را قبل از عملکرد تخصیص منابع، فعال سازد. به علاوه، بازار ظرفیت در زمانی که لازم باشد ایجاد می‌شود، یعنی در مواقعی که احتمال تراکم توسط بهره بردار سیستم انتقال پیش‌بینی می‌شود.

در روش مبتنی بر قیمت سایه، مالک خودروی الکتریکی در صورتی نیاز به پرداخت قیمتی بالاتر از قیمت سایه دارد که باتری خودرو در بازه زمانی وقوع تراکم انتقال که بهره بردار سیستم توزیع هزینه‌ای برای حذف تراکم شبکه بالادست نکند، شارژ نماید. اما در عمل، این مسئولیت بهره‌بردار سیستم توزیع است که شبکه را برای مواجهه با چالش‌ها به‌روزرسانی کند. بنابراین فرض می‌شود که قیمت سایه می‌تواند در زمانی که به بهره‌بردارهای ناوگان ارسال می‌شود یا بهره‌بردارهای ناوگان ممکن است جبران سازی را از بهره‌بردار سیستم توزیع دریافت کنند اصلاح شود. به علاوه بهره‌بردار سیستم توزیع باید از عملکرد بهره‌بردار بازار حمایت نموده و بتواند راه‌های کاهش هزینه بر پایه پیاده‌سازی زیرساخت‌های ارتباطات و اطلاعاتی در شبکه‌های توزیع را مورد بررسی و پیاده‌سازی قرار دهد.

۲-۳- فرمول‌بندی مساله و توسعه الگوریتم‌های کنترلی

در این بخش، در ابتدا روش جدیدی برای تولید برنامه زمانی شارژ خودروهای الکتریکی تعریف شده و مبانی کلیدی توسعه فرمول ریاضی مطالعات قبلی نظیر [۱۵] یعنی الگوریتم هماهنگی قیمت سایه به صورت خلاصه بیان می‌شود.

۱-۲-۳- تولید برنامه زمانی شارژ خودروهای الکتریکی

در برنامه‌ریزی زمانی شارژ خودروهای الکتریکی از برنامه‌ریزی خطی استفاده شده و در فرایند شارژ خودروها این برنامه ریزی اصلاح می‌شود. هدف، حداقل سازی هزینه شارژ علاوه بر برآورده ساختن الزامات رانندگی مالک خودرو می‌باشد. دوره زمانی برنامه‌ریزی به N_T دوره زمانی تقسیم می‌شود که هر دوره زمانی می‌تواند یک ساعت یا زمانی معادل ۱۰ تا ۱۵ دقیقه باشد که بستگی به الزامات مدل سازی دارد.

تابع هدف به صورت حاصل ضرب قیمت مجازی (قیمت برق پیش‌بینی شده و قیمت سایه وزن دار که در آن قیمت سایه هزینه تراکم شبکه توزیع را انعکاس می دهد) و متغیر تصمیم‌گیری $P_{j,i}$ می‌باشد که $j=1,2,...,N_E$ شاخصی برای نشان دادن شماره خودروهای الکتریکی تحت قرارداد با یک بهره‌بردار ناوگان و N_E تعداد خودروهای الکتریکی تحت قرارداد با بهره‌بردار ناوگان kام را نشان می‌دهد. $i=1,2,...,N_T$ شاخصی برای نشان دادن شماره دوره زمانی در طول دوره برنامه‌ریزی می‌باشد. مفهوم فیزیکی متغیر تصمیم‌گیری $P_{j,i}$ تصمیم‌گیری برای شارژ یا عدم شارژ در دوره زمانی خاص با هدف حداقل‌سازی هزینه شارژ می‌باشد. فرض می‌شود قیمت برق پیش‌بینی شده در هر دوره زمانی مشخص است. با تابع هدف بیان شده و ملاحظه محدودیت‌های زیر:

- انرژی موجود در باتری باید بزرگتر یا مساوی انرژی لازم برای دوره زمانی بعدی باشد
- انرژی موجود در باتری باید کمتر یا مساوی ظرفیت باتری باشد
- نرخ شارژ باید کمتر یا مساوی حداکثر نرخ شارژ باشد

مدل ریاضی به صورت زیر ارائه می‌گردد:

$$\text{Minimize}: \sum_{i=1}^{N_T}\left(\Phi_{j,i}+\varepsilon_i * \Lambda(i)\right)P_{j,i}t \quad j=1,...,N_k^E \qquad (۱)$$

باتوجه به:

$$SOC_{0,j}+\sum_{i=1}^{N_T}P_{j,i}t_{j,i} \geq SOC_{Min,j}+\sum_{i=0}^{N_T-1}E_{drive,i+1}$$
$$0 \leq P_{j,i}t_{j,i} \leq E_{max,j},\ i=1,...,N_T \qquad (۲)$$
$$SOC_{0,j}+\sum_{i=1}^{N_T}P_{j,i}t_{j,i} \leq \omega * E_{cap,j}+\sum_{i=2}^{N_T+1}E_{drive,i-1}$$
$$0 \leq P_{j,i}t_{j,i} \leq E_{max,j},\ i=1,...,N_T \qquad (۳)$$

که در آن $\Phi_{j,i}$ بردار قیمت بازار برق روز بعد، $\Lambda(i)$ قیمت سایه، ε_i ضریب وزنی پاسخ‌دهی قیمت سایه و t طول دوره زمانی هر گام را نشان می‌دهد. $SOC_{0,j}$ وضعیت شارژ اولیه باتری و $SOC_{Min,j}$ حداقل شارژ پیشنهادی را برای باتری خودروی الکتریکی نشان می‌دهد. E_{drive} مقدارانرژی پیش‌بینی شده لازم برای خودروی الکتریکی و $E_{max,j}$ نرخ شارژ را بر حسب انرژی باتری نشان می‌دهد. $\omega * E_{cap,j}$ حداکثر وضعیت شارژ پیشنهادی خودروی الکتریکی را نشان می‌دهد که ω پارامتری است که نشان می‌دهد رفتار شارژ باتری یک فرایند خطی است و $E_{cap,j}$ ظرفیت باتری می‌باشد. ε_i ضریب وزنی پاسخ‌دهی به قیمت سایه می‌باشد که برای ۱۴ گروه خودروی الکتریکی به صورت زیر تعریف می‌گردد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-04-12]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.2.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023

$$\varepsilon_i = [0.01\ 0.01\ 0.01\ 0.0\ 0.0\ 0.01\ 0.01\ 0.0\ 0.0\ 0.01\ 0.01\ 0.01\ 0.0\ 0.0] \quad (۴)$$

با مسئله بهینه‌سازی فوق، هر خودروی الکتریکی می‌تواند یک برنامه شارژ یکتا تولید کند. مجموع برنامه زمانی انرژی هر خودروی الکتریکی در هر بهره‌بردار ناوگان با $P^E_{k,j}$ نشان داده می‌شود.

$$P^E_{k,i} = \sum_{j=1}^{N^E_k} P_{j,i},\ k = 1,...,N_B,\ i = 1,...,N_T \quad (۵)$$

که N_B تعداد بهره‌بردارهای ناوگان و k شاخصی برای نشان دادن تعداد آن‌ها می‌باشد. این برنامه زمانی کلید روش محاسباتی است که در این مطالعه برای گام اول مورد استفاده قرار می‌گیرد که در بخش سوم تشریح شد. در گام‌های بعدی نکته مبهمی وجود ندارد و سپس بهره بردار سیستم توزیع، شبکه توزیع را با اجرای پخش بار در نرم‌افزار دیگسایلنت بازنگری و تحلیل می‌کند که در اینجا یک شبکه توزیع ۱۰KV مدل شده است.

۲-۲-۳- کنترل مبتنی بر بازار برق برای مدیریت تراکم شبکه توزیع

توصیف روش کنترل بر مبنای بازار، با یک تابع هزینه پیشنهادی آغاز می‌شود که هزینه تفاوت ترجیح توان یک بهره بردار ناوگان در هر بازه زمانی را نشان می‌دهد یعنی:

$$\mu_k = C_{k,i}\left(\tilde{P}_{k,i} - P^E_{k,i}\right)^2 \quad (۶)$$

که $\tilde{P}_{k,i}$ متغیر کنترلی و $C_{k,i}$ ضریب وزنی که متناسب با تفاوت توان است را نشان می‌دهد. مقدار بزرگتر $C_{k,i}$ موجب اختلاف کمتری می‌گردد. هدف حداقل‌سازی هزینه تمام بهره‌بردارهای ناوگان با رعایت قیود بهره بردار سیستم توزیع می‌باشد.

$$\min:\ \sum_{k=1}^{N_B}\sum_{i=1}^{N_T} C_{k,i}\left(\tilde{P}_{k,i} - P^E_{k,i}\right)^2 \quad (۷)$$

باتوجه به:

$$\sum_{k=1}^{N_B} \tilde{P}_{k,i} \le P_{Cap}(i),\ \ i = 1,...,N_T \quad (۸)$$

که $P_{Cap}(i)$ ظرفیت توان برای تمام بهره‌بردارهای ناوگان می‌باشد که به طور مثال می‌تواند توسط بهره بردار سیستم توزیع با توجه به بارهای دیگر شبکه تخمین زده شود. این مسئله یک مسئله بهینه سازی محدب است که مطالعات مرتبط مانند [۱۷] نیز نشان می‌دهد، با معرفی ضرایب لاگرانژ یا قیمت سایه $\Lambda(i)$ به رابطه (۷) می‌تواند به مسئله لاگرانژ جزئی زیر تبدیل شود:

$$L = \sum_{k=1}^{N_B}\sum_{i=1}^{N_T} C_{k,i}\left(\tilde{P}_{k,i} - P^E_{k,i}\right)^2 + \sum_{i=1}^{N_T}\Lambda(i)\left(\sum_{k=1}^{N_B}\tilde{P}_{k,i} - P_{Cap}(i)\right) \quad (۹)$$

رابطه بهینه‌سازی متمرکز(۷) به یک مسئله غیرمتمرکز با هدف رقابتی کردن رفتار بازار تبدیل می‌شود. در نقطه آغازین فرض می‌شود که قیمت سایه صفر است و سپس نتیجه حل مسئله بهینه‌سازی رابطه (۹)، $P^E_{k,i}$ می‌باشد. در نتیجه در گام پنجم (e) ، بهره بردار ناوگان در ابتدا به صورت مستقیم برنامه زمانی توان خود را برای بهره‌بردار بازار ارسال کرده و بهره‌بردار بازار قیمت سایه را تعیین می‌کند. به دلیل این که هدف بهره‌بردار بازار همسو با هدف بهره بردار سیستم توزیع یعنی حذف تراکم شبکه است، همان‌طور که در مطالعات [۱۵] و [۱۸] بیان گردید، قیمت سایه می‌تواند مطابق با رابطه به‌روزرسانی شود تا قیمت همگرا شود. که در آن $P^*_{k,i}(\Lambda^*)$ جواب بهینه معادله (۶) با مقدار Λ^* داده شده است. یعنی مقدار که ω تعداد گام‌های همگرایی مورد نیاز است. $\alpha_\omega \in R$ اندازه گام را نشان می‌دهد که می‌تواند به صورت $\alpha_\omega = \alpha$ انتخاب شود که مقدار مثبتی می‌باشد. با چنین انتخابی همگرایی تضمین خواهد شد. این فرایند گام ششم یعنی f را نشان می‌دهد.

در گام هفتم (g)، بهره بردار ناوگان قیمت سایه را به تمام کنترلرهای خودروی الکتریکی ارسال می‌کند. سپس هر کنترلر خودروی الکتریکی به گام اول باز می‌گردد. تنها تفاوت این است که یک قیمت سایه به بالای قیمت‌های نقدی انرژی پیش‌بینی شده افزوده می‌شود و اصلاحی که در مقایسه با مقاله [۱۵] صورت گرفته در ضریب وزنی پاسخ‌دهی ε به قیمت سایه می‌باشد.

اگر تراکم فقط در پست توزیع اتفاق بیفتد مقدار ضریب وزنی پاسخ‌دهی به قیمت سایه طبق رابطه (۴) بدست می‌آید، در صورتی که برای حالتی که تراکم در خطوط نیز اتفاق بیفتد بسته به خط متراکم شده مقدار این ضرایب برای خودروهای مختلف از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\varepsilon(EV_i)_{new} = 0.5 \times \varepsilon(EV_i)_{old} \quad (۱۰)$$

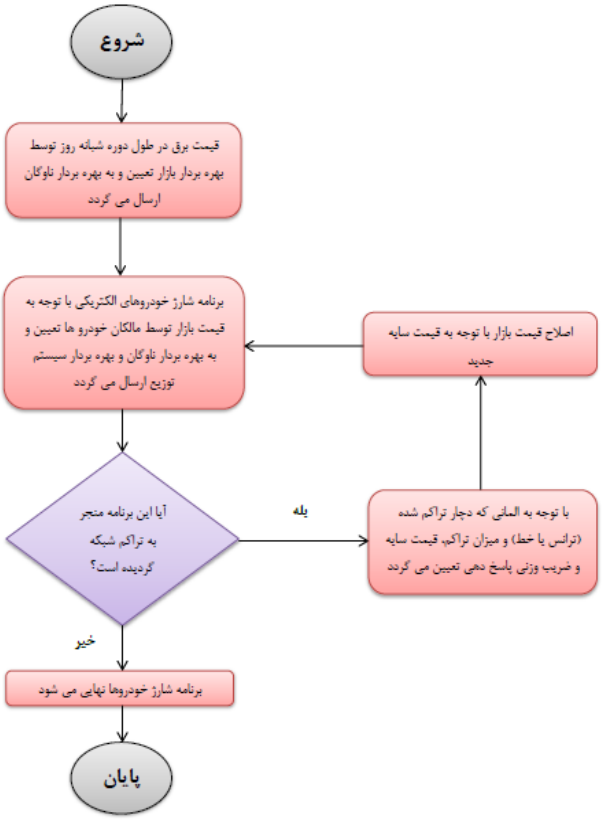
این رابطه نشان می‌دهد که در هر مرحله از تکرار این روش، مقدار ضریب وزنی پاسخ‌دهی به قیمت سایه برای خودروهایی که بارشان روی خط متراکم موثر است نصف می‌گردد.

مالکان خودرو می‌توانند خواسته‌های خود را با دادن مقادیر مناسب به ضرایب وزنی پاسخ‌دهی نشان دهند. برای مثال، اگر ε برابر صفر انتخاب گردد نشان می‌دهد که مالک خودرو به قیمت سایه حساس نیست و برنامه زمانی اصلی را حفظ می‌کند. در غیر این صورت، یک برنامه زمانی جدید تولید شده و به بهره بردار ناوگان ارسال می گردد. با تکرار این گام‌ها، راه‌حل پیشنهادی می‌تواند ایمنی شبکه را در دوره زمانی طراحی تضمین نماید.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-04-12]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.2.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023

۳-۲-۳- بلوک دیاگرام روش پیشنهادی

در شکل (۲) بلوک دیاگرام روند کلی کار مورد مطالعه یعنی تعیین هزینه و نحوه زمان‌بندی را نشان می دهد. همان‌طور که از قبل اشاره شد و می‌توان در بلوک دیاگرام نیز مشاهده کرد، فرآیند انجام کار به صورت سلسله مراتبی دو سطحی با وجود بهره‌بردار بازار ظرفیت، بهره-بردار سیستم توزیع و بهره‌بردار ناوگان در حضور مالکان خودروهای الکتریکی است.



شکل(۲): بلوک دیاگرام روند تعیین هزینه و برنامه زمان بندی

- در ابتدا قیمت برق در طول یک دوره از شبانه روز از طریق بازار روزپیش توسط بهره‌بردار بازار تعیین می‌گردد و به بهره‌بردار ناوگان ارسال می‌شود.
- قیمت ارسالی از بهره‌بردار بازار ظرفیت به بهره‌بردار ناوگان در اختیار مالکان خودروهای الکتریکی قرار گرفته و مالکان خودرو برنامه شارژ خود با توجه به قیمت تعیین شده توسط بهره‌بردار بازار به بهره‌بردار ناوگان ارائه می دهند. بهره‌بردار ناوگان نیز برنامه شارژ و زمان‌بندی خودروهای الکتریکی را برای بهره‌بردار سیستم توزیع ارسال می‌نماید.
- در مرحله بعد، بهره‌بردار سیستم توزیع با انجام محاسباتی بر روی برنامه شارژ و زمان‌بندی خودروهای الکتریکی، تشخیص می‌دهد که این برنامه سبب به وجود آمدن تراکم در شبکه می‌شود یا خیر و نتیجه دوباره به بهره‌بردار ناوگان ارسال می‌گردد.
- در این مرحله اگر بررسی‌ها منجر به تراکم شبکه نگردد، برنامه شارژ و زمان‌بندی خودروهای الکتریکی تایید نهایی شده و برنامه پایان می‌پذیرد.
- اما در صورتی که برنامه شارژ و زمان بندی خودروهای الکتریکی منجر به تراکم شبکه گردید، با توجه به عنصری که دچار تراکم شده (پست یا خط توزیع) و با توجه به میزان تراکم، قیمت سایه و ضریب وزنی پاسخ‌دهی قیمت سایه توسط بهره‌بردار بازار ظرفیت تعیین می‌گردد.
- با مشخص شدن قیمت سایه و ضریب وزنی پاسخ‌دهی قیمت سایه، بهره‌بردار بازار ظرفیت قیمت جدید را برای بهره‌بردار ناوگان ارسال می‌کند تا مالکان خودروهای الکتریکی برنامه شارژ خود را با توجه به قیمت جدید بازار تعیین نمایند و به بهره‌بردار ناوگان ارائه دهند و این چرخه تا زمان رفع تراکم از شبکه ادامه می‌یابد.

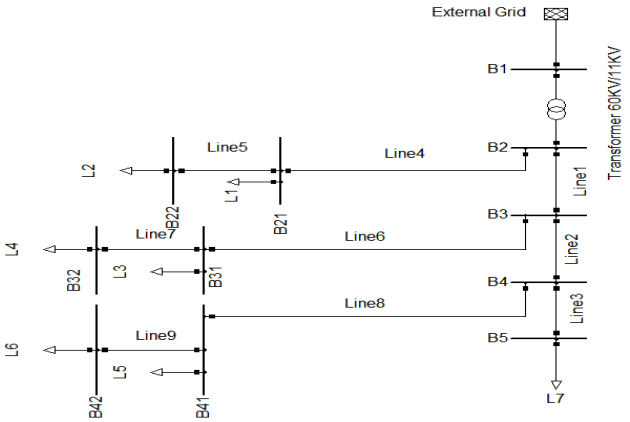
۴- شبیه سازی و نتایج عددی

در این بخش ابتدا شبکه مورد مطالعه و مشخصات آن معرفی شده و سپس به شرح و تحلیل نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی پرداخته و در انتها، مقایسه اجمالی با نتایج به‌دست آمده در نمونه مطالعات قبلی یعنی مراجع [۱۵] و [۲۱]، که هم راستا با موضوع کار و مطالعه موردی است، صورت گرفته است، برای سهولت، عنوان مقایسه با دو پژوهش قبل را به ترتیب مقایسه با پژوهش اول (یعنی مرجع[۱۵]) و مقایسه با پژوهش دوم (یعنی مرجع[۲۱]) ذکر شده است.

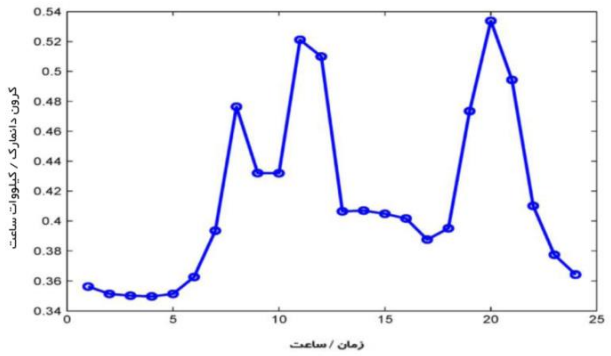
یک شبکه توزیع شعاعی ۱۰ KV در مطالعه موردی در نظر گرفته شده و دیاگرام تک خطی آن در شکل (۳) نشان داده شده است. اطلاعات این شبکه در [۱۹] و [۲۰] آورده شده است که ویژگی‌های خاص یک نمونه از سیستم توزیع در شبکه کشور دانمارک را نشان می‌دهد. شبکه شامل دو سطح ولتاژ، ۱۱ باس، ۹ خط توزیع و ۷ باس مصرف‌کننده است که در این مقاله، شبکه مورد مطالعه در نرم‌افزار دیگسایلنت مدل شده است. تعداد ۱۴۰۰ مصرف کننده خانگی به این سیستم توزیع متصل بوده که ۲۰٪ آن‌ها خودروی الکتریکی فرض میشوند. با در نظر گرفتن تشابه الگوهای رانندگی خودروهای الکتریکی و الزامات شبیه-سازی سیستم چند عامله، ۲۸۰ خودروی الکتریکی به ۱۴ گروه تقسیم شده که توسط ۱۴ عامل خودروهای الکتریکی نشان داده می‌شوند. فرض می شود که سه بهره‌بردار ناوگان خدماتی را برای چهارده گروه خودروی الکتریکی فراهم می کنند. بهره‌بردار ناوگان اول مسئول عوامل(گروههای) ۱ تا ۵ است. عوامل ۶ تا ۹ به ناوگان دوم اختصاص می‌یابد و بقیه عوامل نیز به ناوگان سوم تعلق دارند. این بهره‌برداران ناوگان به ترتیب در بارهای L3، L5 و L7 قرار گرفته‌اند. نرخ شارژ هر خودروی الکتریکی ۲/۳ KW در نظر گرفته می‌شود. در این مورد

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-04-12]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.2.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023

مطالعاتی، توان موجود برای تمام خودروها ۱۰۰ KW (ظرفیت موجود ترانسفورماتور قدرت پست توزیع برای خودروها) و نرخ ضریب وزنی $C_{1,j}, C_{2,j}, C_{3,j}$ ثابت و برابر ۰/۱ در نظر گرفته می‌شود. خطوطی که با تغییر این بارها در معرض تراکم هستند خطوط ۱، ۲، ۳، ۶ و ۸ هستند. به‌طور مثال در صورت وجود تراکم در خط ۳، خودروهایی که به بار L7 متصل هستند فقط در این تراکم موثر بوده و باید ضرایب وزنی پاسخ دهی آن ها به قیمت سایه طبق رابطه (۱۰) تغییر کند.



شکل(۳): نمودارتک‌خطی شبکه توزیع مورد مطالعه

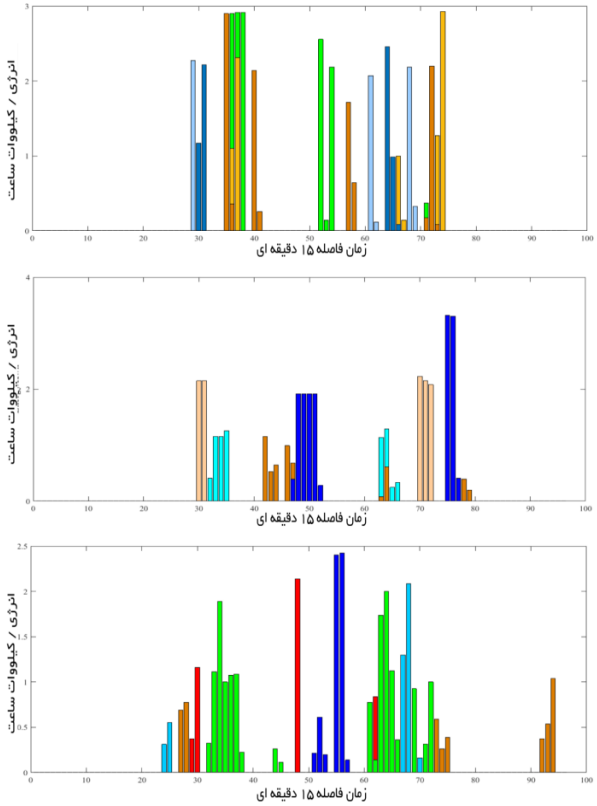


شکل(۴): قیمت پیش‌بینی شده انرژی در طول ساعات شبانه روز

برای برنامه زمانی شارژ خودروهای الکتریکی، اطلاعات قیمت بازار آنی برق به صورت ساعتی فرض می‌شود که به طور کامل مشخص است. این قیمت‌ها در شکل (۴) آورده شده است. اطلاعات رانندگی ۱۴ عامل بر اساس برنامه ای تولید می‌شود که در آن ۳۶۰ خودرو در شهر کپنهاک دانمارک با استفاده از سامانه GPS به مدت ۱۴ تا ۱۰۰ روز تعقیب شده‌اند. هر فایل اطلاعات شامل یک زمان آغاز و پایان و فاصله و طول زمان سفر متناظر می‌باشد. اطلاعات اصلی به فواصل زمانی ۱۵ دقیقه با این فرض که در هر ۱۰۰Km، ۱۱ Kwh مصرف می‌شود منتقل می‌گردد. مقدار انرژی مصرف شده توسط خودروهای ۱ تا ۱۴ در شکل (۵) تشریح شده است. اکثر خودروها یک الگوی منظم از خود نشان می‌دهند. یعنی صبح خانه خود را ترک کرده و عصر به خانه برمی‌گردند. در حالی که برخی از آن‌ها نیاز به انرژی بیشتری دارند مانند خودروی شماره ۱۳ که با منحنی سبز در پایین‌ترین شکل نشان داده شده است.

برای دیگر پارامترها داریم:

- ظرفیت باتری هر خودرو ۲۰Kwh در نظر گرفته می شود.
- مقدار اولیه وضعیت شارژ هر خودرو ۰/۲ ظرفیت باتری است.
- حداقل وضعیت شارژ هر خودرو بر روی ۰/۲ ظرفیت باتری تنظیم می‌شود.
- حداکثر وضعیت شارژ خودروی الکتریکی بر روی ۰/۸۵ ظرفیت باتری تنظیم می‌گردد و حداقل و حداکثر وضعیت شارژ باتری به این دلیل تعیین می‌گردد که فرایند شارژ باتری خودرو خطی است.

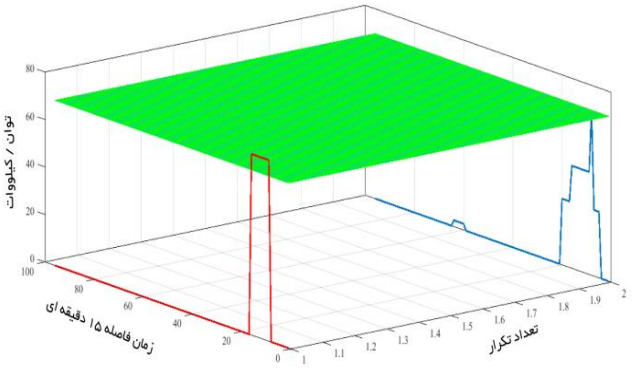


شکل(۵): الزامات رانندگی خودرو الکتریکی در بهره برداران ناوگان سه‌گانه

در ادامه این بخش، نتایج شبیه‌سازی و پیاده‌سازی روش پیشنهادی برای برنامه‌ریزی شارژ خودروهای الکتریکی ارائه خواهد شد. روش ارائه شده همان‌طور که در بخش‌های قبل توضیح داده شد از پروتکل های بازار همسو با قیمت برای ارتباط با بهره بردار ناوگان استفاده می‌کند. همچنین در روش هماهنگی بهره بردار ناوگان و مالکان خودروی الکتریکی فرض می‌شود که سه بهره بردار ناوگان تنها برنامه زمانی شارژ را که توسط کنترلرهای خودرو ایجاد شده است جمع‌آوری می‌کنند. همان‌طور که در شکل (۶) ملاحظه می‌شود تنها دو گام برای حل مسئله تراکم مورد نیاز است. در این شکل با توجه به قیمت مجازی و با فرض این که در مرحله نخست قیمت سایه صفر می‌باشد شارژ خودروها در بین هشتمین تا شانزدهمین فاصله زمانی که قیمت پایین‌ترین مقدار

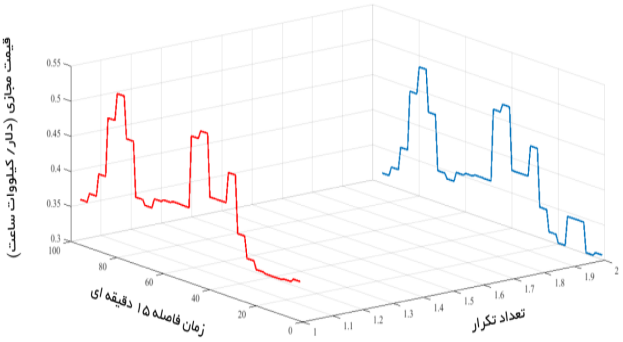
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.2.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-04-12]

خود را داراست صورت می گیرد. اما در نظر گرفتن تنها قیمت، باعث ایجاد تراکم در شبکه می گردد که در گام بعدی با در نظر گرفتن قیمت سایه در زمان‌های تراکم این مسئله حل می‌شود.



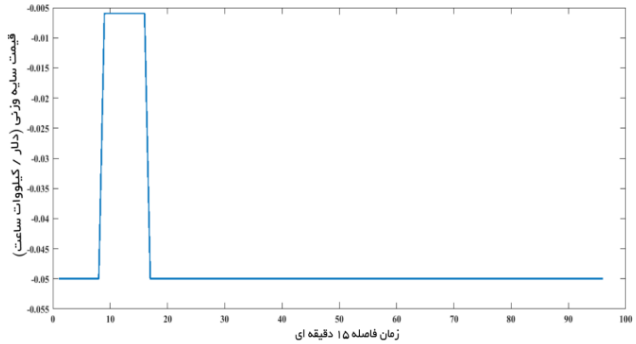
شکل(۶): نمودار نتایج شبیه‌سازی

علت کم بودن تعداد مراحل برای حل این مسئله این است که در این روش با استفاده از ضرایب وزنی پاسخ‌دهی قیمت سایه تنها بخشی از خودروها نیاز به اصلاح برنامه شارژ خود دارند و خودروهای شماره ۴، ۵، ۸، ۹، ۱۳ و ۱۴ نیازی به تغییر برنامه‌های شارژ خود ندارند که این مسئله باعث کاهش احتمال تراکم جدید می‌گردد. در گام اول، قیمت سایه صفر است بنابراین منحنی قرمز رنگ شکل (۶) که نشان دهنده وضعیت شارژ شدن تمام خودروها می‌باشد از حد مجاز برای عدم ایجاد تراکم (صفحه سبز رنگ) بالاتر می‌رود در حالی که در گام دوم، قیمت سایه بر قیمت مجازی تاثیر گذاشته و باعث انتقال بخشی از مقدار شارژ خودروها به ساعات دیگر و رفع تراکم شده است. شکل (۷) قیمت مجازی هر دو مرحله را نشان می‌دهد که در گام اول قیمت سایه صفر و در گام بعدی با توجه به تراکم‌های ایجاد شده در شبکه قیمت مجازی دچار کاهش می‌گردد.



شکل(۷): قیمت مجازی گام‌های حل مسئله

همچنین اختلاف قیمت مجازی هر دو مرحله در شکل (۸) آورده شده است که نشان می‌دهد در بین هشتمین تا شانزدهمین گام زمانی که تراکم در شبکه وجود دارد مقدار مجازی به قیمت کمتری کاهش یافته است. به عبارتی دیگر در زمان هایی که با تراکم مواجه هستیم قیمت حدود ۰/۰۰۵ $/KWh کاهش پیدا کرده است در حالی که در زمان های دیگر این کاهش به حدود ۰/۰۵ $/KWh خواهد رسید تا مشوقی برای مالکان خودرو باشد برای اینکه مصرف خود را به ساعاتی که تراکم در شبکه وجود ندارد انتقال دهند.



شکل(۸): اختلاف قیمت مجازی هر دو مرحله

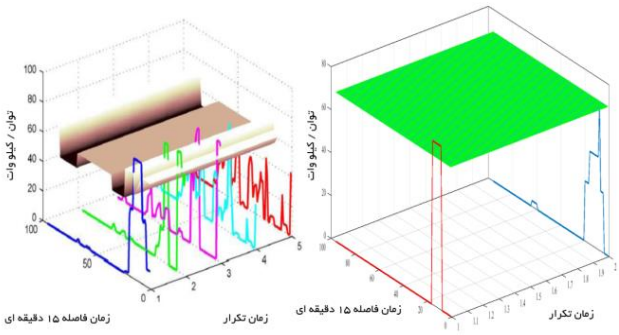
با نگاه اجمالی به دو نمودار به دست آمده از نتایج شبیه سازی مورد مطالعه در مقایسه با پژوهش اول که برنامه شارژ و دریافت توان خودروهای الکتریکی را مطابق شکل (۹) نشان می دهد، می توان به راحتی ملاحظه نمود که مسأله بهینه سازی و رفع تراکم در پژوهش اول در پنج مرحله انجام گرفته در حالی که در اینجا در دو مرحله تراکم در شبکه توزیع رفع می گردد.

پنج مرحله روند حل مسأله در پژوهش اول بدین سبب است که خودروهای الکتریکی همیشه وابسته به قیمت سایه‌ای بوده و سعی دارند از ورود به دوره‌های زمانی که قیمت دریافت توان و شارژ خودروها بالاست، جلوگیری کنند و در نتیجه در مرحله اول طوری زمان‌بندی انجام می‌دهند که در دوره ی قیمتی پایین شارژ خود را انجام دهند و این امر منجر به ایجاد تراکم در شبکه توزیع می گردد. اما در مرحله دوم فرض می‌شود که تنها چند خودروی الکتریکی با قیمت سایه ای ارتباط دارند و تنها بخشی از طرح شارژ برای دوره‌های قیمتی پایین زمان‌بندی شده و این فقط کاهش احتمال دوره تراکمی (فاصله زمانی که تراکم رخ داده است) را به همراه دارد. این داستان ادامه می یابد تا اینکه در مرحله پنجم تکرار تراکم شبکه رفع می گردد. اما در مورد مطالعه، در اولین مرحله تراکم در شبکه رخ داده و در مرحله دوم با وجود قیمت سایه و همچنین ضریب وزنی پاسخ‌دهی قیمت سایه هم برای ترانسفورماتور و هم خطوطی که سبب ایجاد تراکم شده اند، تراکم شبکه رفع می گردد. پس مورد مطالعه در رفع تراکم شبکه نسبت به پژوهش اول با کاهش تعداد مراحل رفع تراکم مواجه و همچنین به طور بهینه و با سرعت بالاتری به جواب دست پیدا می‌کند.

همان‌طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، هر دو روش در رفع تراکم از شبکه توزیع انرژی الکتریکی با استفاده از تعیین قیمت سایه و ضریب وزنی پاسخ دهی قیمت سایه برای هر گروه خودرو، در دومین

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.2.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-04-12]

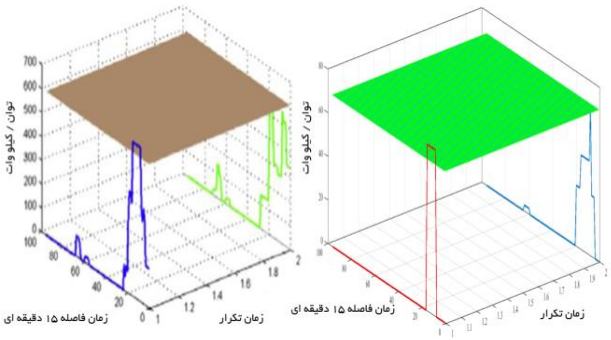
مرحله اجرای برنامه موفق به رفع تراکم به وجود آمده در شبکه توزیع در مرحله‌ی اول شده اند.



(ب) (الف)

شکل(۹): نمودار الف: برنامه شارژ، نمودار ب: برنامه شارژ خودروهای الکتریکی در پژوهش اول

با توجه به این‌که هر دو روش در دومین مرحله تکرار موفق به رفع تراکم از روی شبکه توزیع شده‌اند ولی باید توجه داشت که در این مقاله علاوه بر پست توزیع و ترانسفورماتور آن، خطوط توزیع نیز جزو عناصری که ممکن است تراکم در آن رخ دهد، مدنظر قرار گرفته است و برای خودروهایی که منجر به تراکم در آن خط یا خطوط می‌شوند ضریب وزنی پاسخ‌دهی قیمت سایه جدیدی معرفی شده است. لذا با این ذهنیت که در این مطالعه موردی، علاوه بر در نظر گرفتن ترانسفورماتور به عنوان المان تحت تاثیر تراکم طبق پژوهش دوم، خط یا خطوط متراکم شده نیز در شبیه‌سازی لحاظ گردیده است؛ می‌توان مشاهده کرد که نمودار به دست آمده در مرحله دوم تکرار مورد مطالعه (نمودار آبی رنگ) در مقایسه با نمودار به دست آمده در مرحله دوم تکرار پژوهش دوم (نمودار سبز رنگ) با کمترین تغییر به شکل بهینه، موجب رفع تراکم در شبکه توزیع انرژی الکتریکی شده است. دلیل این امر تاثیرگذاری مثبت معرفی ضریب وزنی پاسخ دهی قیمت سایه برای خودروهایی است که منجر به ایجاد تراکم در خط یا خطوط مورد نظر بوده، می‌باشد.



(ب) (الف)

شکل(۱۰): نمودار الف: برنامه شارژ در مطالعه موردی، نمودار ب: برنامه شارژ خودروهای الکتریکی در پژوهش دوم

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، یک سیستم چند عامله برای تشریح پیاده‌سازی طرح مدیریت تراکم یک شبکه توزیع با استفاده گسترده از خودروهای الکتریکی پیشنهاد گردید. همان‌گونه که بیان گردید تراکم شبکه توزیع می‌تواند مطابق با اصول اقتصادی با پیاده‌سازی سیستم چند عامله مزایای قابل توجهی فراهم سازد. در این مطالعه، یک محیط یکپارچه شامل دو نرم افزار دیگسایلنت و متلب برای اجرای شبیه‌سازی توسعه و استفاده شد. البته در حالت کلی، برنامه‌های شبیه‌سازی مختلفی می‌تواند برای تشریح تراکم در شبکه مورد استفاده قرار گیرد. به‌طور مثال، در حل مسائل بهینه‌سازی، نرم‌افزار گمز(GAMS) نیز یک ابزار مناسب است، اما نرم‌افزارمتلب به صورت گسترده‌تری در کارهای علمی و دانشگاهی استفاده می‌شود. همچنین مدل‌سازی شبکه با ابزارهای مدل‌سازی موجود نظیر سیمولینک، مت پاور، نپلن و غیره نیز می‌تواند صورت گیرد. هدف از نام بردن این ابزار مقایسه آن ها نیست. بلکه تاکید بر این نکته است که ابزارهای مختلفی می‌تواند برای پیاده‌سازی سیستم چند عامله مورد استفاده قرار گیرد. برای جمع‌بندی مقاله، ویژگی‌های عمده پژوهش ارائه شده، ذیلا به‌طور خلاصه بیان می‌شود:

- سیستم چند عامله ایجاد شده یک بستر نرم افزاری ارائه شده بر اساس تلفیق نرم‌افزارهای دیگسایلنت و متلب است. سیستم چند عامله ایجاد شده یک محیط مدل‌سازی فراهم می سازد که مطالعه مشخصه‌های مهم بازار ظرفیت شبکه توزیع پیشنهادی را امکان‌پذیر می‌سازد. با پیاده‌سازی و ارزیابی استراتژی کنترلی سلسله مراتبی دو مرحله‌ای، مشاهده گردید که مشکل تراکم شبکه در چند گام می‌تواند برطرف شود.
- در این مطالعه بسته به مکان قرار گرفتن خودروهای الکتریکی در شبکه، میزان اثرگذاری آن ها بر تراکم شبکه مورد بررسی قرار گرفته و قیمت انرژی به میزان این تاثیر کاملا وابسته است. همچنین ضریب پاسخ‌دهی وزنی به قیمت سایه، علاوه بر تمایلات مالک خودرو به زمان و مکان اتصال آن به شبکه نیز بستگی دارد.

به علاوه در این مطالعه روش کنترلی بر مبنای بازار برق، در سیستم چند عامله سلسله مراتبی پیاده گردید. مزایای عمده سیستم ارائه شده، چنین است:

- پاسخ‌دهی هر خودروی الکتریکی به قیمت انرژی در بازار در نظر گرفته شده است که مطالعه را عملی‌تر می‌سازد زیرا رفتار مالکان خودرو در مقابل تغییر قیمت متفاوت است.
- نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی می‌تواند تاثیر منفی کنترل قیمت را که در آن تمام مالکان سعی می‌کنند

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.2.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-04-12]

خودروهای خود را در زمان‌هایی که قیمت انرژی پائین است شارژ کنند و در شبکه تراکم ایجاد شود از بین ببرد.

روش های کنترل تراکم بر مبنای بازار تنها بر مقدار توان عبوری از پست توزیع و ترانسفورماتور وابسته نیست بلکه به ظرفیت خطوط شبکه نیز بستگی دارد که در این مطالعه لحاظ گردید.

مراجع

[1] K. Clement-Nyns, et al., *"The impact of vehicle-to-grid on the distribution grid"*, Electric Power Systems Research, vol. 81, pp. 185-192, 2011.

[2] S.Borozan, S. Giannelos, G. Strbac, *"Strategic network expansion planning with electric vehicle smart charging concepts as investment options"*, Advances in Applied Energy, vol. 5, 2022.

[3] J. Almeida, J. Soares, B. Canizes, Z. Vale, *"Coordination strategies in distribution network considering multiple aggregators and high penetration of electric vehicles"*, Procedia Computer Science, vol. 186, pp. 698-705, 2021.

[4] E. Luo, P. Cong, H. Lu, Y. Li, *"Two-Stage Hierarchical Congestion Management Method for Active Distribution Networks With Multi-Type Distributed Energy Resources"*, IEEE Sys, vol. 8, pp.309-320, 2020.

[5] S. Lv, Z. Wei, S. Chen, G. Sun, D. Wang*," Integrated demand response for congestion alleviation in coupled power and transportation networks"*, Applied Energy, vol. 283, 2021.

[6] B.S.K.Patnam, N. Pindoriya, *"DLMP Calculation and Congestion Minimization With EV Aggregator Loading in a Distribution Network Using Bilevel Program"* , IEEE Sys, vol. 15(2), pp. 1835-1846, 2020.

[7] S. Deb, A. Goswami, P. Harash, *"Charging Coordination of Plug-In Electric Vehicle for Congestion Management in Distribution System Integrated With Renewable Energy Sources"*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 56(5), 5452-5462, 2020.

[8] A.Asrari, M. Ansari, J. Khazaei, P. Fajri, *"A Market Framework for Decentralized Congestion Management in Smart Distribution Grids Considering Collaboration Among Electric Vehicle Aggregators"*, IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 11(2), pp. 1147-1158, 2019.

[9] P. B. Andersen, J. Hu, and K. Heussen, *"Coordination strategies for distribution grid congestion management in a multi-actor, multi-objective setting"*, in Proc. 2012 Eur. ISGT, Berlin, Germany.

[10] R. D. Zimmerman, *"Uniform price auctions and optimal power flow"*, Matpower Technical Note, Feb. 1, 2010, Available: http://www. pserc. cornell. edu/ matpower/ TN1-OPF-Auctions.pdf

[11] B. Biegel, P. Andersen, J. Stoustrup, and J. Bendtsen, *"Congestion management in a smart grid via shadow prices"*, in Proc. 8th IFAC Symp. Power Plant Power Syst. Control, Toulouse, France, Sep. 2012.

[12] N. O'Connel, Q. Wu, J. Stergaard, A. Nielsen, S. Cha, and Y. Ding, *"Electric vehicle (ev) charging management with dynamic distribution system tariff"*, in Proc. 2011 ISGT.

[13] A. Mohsenian-Rad, V. Wong, J. Jatskevich, R. Schober, and A. LeonGarcia, *"Autonomous demand-side management based on gametheoretic energy consumption scheduling for the future smart grid"*, IEEE Trans. Smart Grid, vol. 1, no. 3, pp. 320–331, 2010.

[14] Z. Ma, D. Callaway, and I. Hiskens, *"Decentralized charging control for large populations of plug-in electric vehicles"*, IEEE Trans. Control Syst. Technol., vol. 21, no. 1, pp. 67–78, 2013

[15] Hu, J., You,S., Lind,M., Østergaard,J., *"Coordinated charging of electric vehicle for congestion prevention in the distribution grid"*, IEEE Trans. Smart Grids, 703–711, 2014.

[16] Christie,R.D., Wollenberg, B.F., Wangensteen,I., *"Transmission management in the deregulated environment"*, Proceeding softhe IEEE 88, pp.170–195, 2000.

[17] Boyd,S., Xiao,L., Mutapcic,A., Mattingley,J., *"Notes on Decomposition Methods"*, Stanford University, /http:// see.stanford.edu/ materials/ lsocoee364b/ 08-decomposition _notes.pdf.

[18] Boyd, S., Xiao,L., Mutapcic,A.,*"Subgradient Methods"*, Stanford University, 2004, /https:// web.stanford.edu /class/ ee392o/ subgrad_ method. pdf.

[19] Pipattanasomporn,M., Feroze,H., Rahman,S., *"Multi-agent systems in a distributed smart grid: design and implementation"*, Proceeding softhe 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition PSCE'09, IEEE.pp.1–8.

[20] Han, X., *"Quantitaive analysis of distribtued energy resources in future distribution networks (Master's thesis)"*, Royal Institute of Technology, 2012.

[21] A.Saleem, L.Nordstrom, M.Lind, J.Østergaard, "*Amulti-agent system for distribution grid congestion management with electric vehicles",* Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol 38, Pages 45-58, 2015.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.2.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-04-12]

رزومه

سعید سیاهکلایی در تهران متولد شده است. تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد میانه(۱۳۹۱)، کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام(ره)(۱۳۹۷) سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه برنامه ریزی و تحلیل سیستم‌های تولید و انتقال و توزیع انرژی الکتریکی، سیستم‌های قدرت تجدیدساختار شده و بازار برق، انرژی‌های نو و تجدیدپذیر است و در حال حاضر کارمند رسمی شرکت بهره برداری راه آهن شهری تهران و حومه می‌باشد.

محمد تبریزیان در سال ۱۳۴۹ متولد شده است، تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق-قدرت از دانشگاه صنعتی شریف(۱۳۷۱)، کارشناسی ارشد مهندسی برق-قدرت از دانشگاه فردوسی مشهد(۱۳۷۷) و دکترای مهندسی برق-قدرت از دانشگاه تربیت مدرس(۱۳۸۹) سپری کرده است، فعالیت پژوهشی و علاقمندی ایشان در زمینه سیستم‌های قدرت تجدیدساختار شده و بازار برق، برنامه‌ریزی و مدیریت و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، طراحی و بهره‌برداری شبکه‌های توزیع و تاسیسات الکتریکی، مهندسی انرژی و مدیریت انرژی است و در حال حاضر استادیار گروه مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام(ره) شهرری می‌باشد، از نامبرده تاکنون حدود سی و پنج مقاله علمی در مجلات و کنفرانس‌های معتبر داخلی و خارجی منتشر شده است.

حمیدرضا شاهمیرزاد در تهران متولد شده است(۱۳۶۴). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندس برق-الکترونیک از دانشگاه آزاد اسلامی یزد(۱۳۸۹)، کارشناسی ارشد مهندسی برق-قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام(ره)(۱۳۹۸) سپری کرده است. علاقه‌مندی و فعالیت‌های ایشان در زمینه‌های بهینه‌سازی و مدیریت انرژی، بازار برق، اینترنت اشیاء، طراحی و تامین و بهره‌برداری شبکه‌های توزیع و تاسیسات الکتریکی پلنتهای صنعتی، بومی‌سازی تجهیزات خاص الکتریکی صنایع مادر تخصصی است و در حال حاضر کارمند شرکت بین المللی مهندسی ایران(ایریتک) از زیرمجموعه های سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران(ایمیدرو) می‌باشد. از نامبرده بیش از پانزده مقاله در مجلات و کنفرانسهای معتبر داخلی منتشر شده است.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.2.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-04-12]

Optimal charging planning of electric vehicles for congestion management in electrical distribution networks

Saeed Siahkolaei[1], Mohammad Tabrizian[2], Hamidreza Shahmirzad[3]

1- Electrical Engineering, Tehran Urban & Suburban Railway Operation Company, Tehran, Iran, ssk1361@yahoo.com

2- Assistant Professor - Department of Electrical Engineering-Yadegar-e-Imam Khomeini(Rah), Shahre-Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, mm_tabrizian@yahoo.com

3- Department of Electrical Engineering-Yadegar-e-Imam Khomeini(Rah) Shahre-Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, hr.shahmirzad@gmail.com

Abstract: Today, electric vehicles have been significantly considered due to the lack of air pollution. However, due to the large volume of vehicles in the city, connecting them to the distribution network without a control program may cause congestion in the network lines and substations. Therefore, a bi-level hierarchical method for connecting electric vehicles to the distribution network to coordinate services and performance constraints of the three main elements, namely fleet operator, distribution system operator, and capacity market operator in the presence of vehicle owners and taking into account driving requirements, charging and compaction costs of power lines and transformers are recommended. In this method, first car owners and fleet operators present their charging program to the distribution system operator according to the predicted market prices. In the next step, if this charging program leads to congestion in the lines or substations and power transformers, it is returned to the fleet operators and the shadow price is determined by the capacity market operator based on the congestion status. Then the new charging program is dispatch according to the new market prices. The proposed method is implemented in a sample distribution network and the simulation results show the efficiency of the proposed method.

Keywords: Electric Vehicles, Congestion Management, Electrical Distribution Network, Optimal Charging Planning, Multi Agent System

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.2.0]
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-04-12]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023