Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 17, No. 2, 2026
pp. 63-78
Research Paper

Smart Charging/Discharging Management Capability of Electric and Fuel Cell Vehicles in the Microgrid in accordance with the Simultaneous Assessment of Goals of Network Operator and Vehicle Owners

Sasan Pirouzi
[1] Associate Professor, Department of Engineering, Sem. C., Islamic Azad University, Semirom, Iran

Abstract:
Electric and fuel cell vehicles are new consumers that are supplied by the power system. Their energy management in a microgrid can manage the technical and economic demands of the system along with meeting the economic demands of vehicle owners. Smart energy management for vehicles connected to a microgrid is presented with the aim of improving the security and operation of the network and reducing the cost of vehicle refueling or charging. Two-objective optimization is used for this scheme. In one objective function, the expected costs of charging and refueling are considered. In the other objective function, the voltage deviation is minimized. The scheme is limited to the power flow model, voltage security and operation constraints, and the operation model of vehicle parking lots. Uncertainties of energy price, load, discharging and charging rates, and the final and initial energy of vehicles appear in the proposed scheme. They are modeled based on stochastic optimization. Innovations include intelligent charging and discharging management of electric and fuel cell vehicles to improve operating and voltage security indicators of the microgrid, along with improving the economic situation of vehicle owners. Numerical results confirm the capability of the scheme. Smart management of vehicle charging/discharging, compared to the condition of smart discharging/charging of vehicles, leads to a reduction of 9.6% (3%) in the energy costs of electric and fuel cell vehicles. Also, smart management of vehicle charging/discharging compared to microgrid load distribution analysis can improve voltage security by about 14.1%, improve the voltage profile by 5.2%, reduce voltage drop by about 31.5%, and increase energy losses by about 10.3%.

Keywords: Electric Vehicles, Fuel Cell Vehicles, Smart Charging/Discharging, Voltage Security, Refueling Cost.

This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

https://doi.org/10.22108/isee.2026.149206.1791

مقاله پژوهشی

قابلیت مدیریت شارژ/دشارژ هوشمند خودروهای الکتریکی و پیل سوختی در ریزشبکه متناسب با برآورد همزمان اهداف اپراتور شبکه و مالکان خودروها

ساسان پیروزی *

دانشیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمیرم، سمیرم، ایران

s.pirouzi68@iau.ir

چکیده: خودروهای الکتریکی و پیل سوختی مصرف‌کننده‌هایی جدید هستند که توسط سیستم قدرت تأمین می‌شوند. مدیریت انرژی آنها در ریزشبکه می‌تواند خواسته‌های فنی و اقتصادی سیستم را در کنار برآورد خواسته‌های اقتصادی مالکان خودرو به دست آورد. در این مقاله، مدیریت انرژی برای خودروهای متصل‌شده به ریزشبکه با هدف بهبود امنیت و بهره‌برداری شبکه و کاهش هزینهٔ سوخت‌گیری یا شارژ خودروها بیان می‌شود. بهینه‌سازی دوهدفه برای این طرح استفاده می‌شود. در یک تابع هدف، کمینه‌سازی هزینه‌های مورد انتظار شارژ خودروهای الکتریکی و سوخت‌گیری خودروهای پیل سوختی مدنظر است. در تابع هدف دیگر، کمینه‌سازی تابع انحرافات ولتاژ استفاده می‌شود. این طرح مقید به معادلات پخش توان، محدودیت‌های امنیت ولتاژ و بهره‌برداری ریزشبکه، و مدل بهره‌برداری پارکینگ خودروهاست. عدم قطعیت‌های قیمت انرژی، بار، نرخ شارژ و دشارژ، انرژی اولیه و نهایی خودروهای یادشده در طرح پیشنهادی ظاهر می‌شود. آنها بر اساس بهینه‌سازی تصادفی مدل‌سازی می‌شوند. نوآوری‌های این مقاله شامل مدیریت شارژ و دشارژ هوشمند خودروهای الکتریکی و پیل سوختی در راستای بهبود شاخص‌های بهره‌برداری و امنیت ولتاژ ریزشبکه در کنار ارتقای وضعیت اقتصادی مالکان خودروهاست. نتایج عددی تأییدکنندهٔ قابلیت‌های طرح پیشنهادی هستند. مدیریت هوشمند شارژ/دشارژ خودروها نسبت به شرایط عدم مدیریت سوخت-گیری خودروها (شارژ هوشمند) به کاهش ۹/۶ درصد (۳ درصد) هزینهٔ انرژی خودروهای الکتریکی و پیل سوختی منجر می‌شود. همچنین، مدیریت شارژ/دشارژ هوشمند خودروها نسبت به مطالعات پخش بار ریزشبکه توانسته است امنیت ولتاژ را در حدود ۱۴/۱ درصد ارتقا دهد؛ همچنین، پروفیل ولتاژ ۵/۲ درصد بهبود می‌یابد، افت ولتاژ در حدود ۳۱/۵ درصد کاهش، و تلفات انرژی در حدود ۱۰/۳ درصد افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: خودروهای الکتریکی، خودروهای پیل سوختی، شارژ/دشارژ هوشمند، امنیت ولتاژ، هزینهٔ سوخت‌گیری.

۱- مقدمه

با وجود نگرانی‌های زیست‌محیطی حاصل از مصرف کنترل‌نشدهٔ سوخت‌های فسیلی، سازمان‌ها و پژوهشگران مختلف استفاده از خودروهایی با سوخت پاک و دوستدار محیط‌زیست را به جای خودروهایی با موتور احتراق داخلی پیشنهاد دادند. خودروهای الکتریکی (EVها)[۱] و خودروهای پیل سوختی (FCV)[۲] نمونه‌ای از خودروهای دوستدار محیط‌زیست هستند. برخی از انواع EVها مانند EV هیبریدی متصل به شبکه (PHEV)[۳] و EV مبتنی بر باتری (BEV)[۴] برای تأمین بخشی از (تمامی) انرژی مورد نیاز مسافرت خود، به سیستم قدرت به خصوص شبکهٔ توزیع یا ریزشبکه (MG)[۵] متصل می‌شوند [۱]. سوخت FCVها هیدروژن است. سیستم برق به هیدروژن (P2H)[۶] از فناوری‌های دوستدار محیط‌زیست برای دست‌یابی به هیدروژن است. از این رو، انتظار می‌رود

[۱] تاریخ ارسال مقاله : ۱۴۰۵/۰۳/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۵/۰۷/۰۸

نام نویسنده مسئول : ساسان پیروزی

نشانی نویسنده مسئول : ایران، سمیرم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمیرم، دانشکده مهندسی

FCVها برای تأمین انرژی مورد نیاز مسافرت خود، به سیستم قدرت متصل شوند. به طور کلی، نحوهٔ شارژ EVها و سوخت‌گیری FCVها به صورت غیرهوشمند و هوشمند است [۲]. در مدل غیرهوشمند، خودروها با اتصال به شبکه، عملیات شارژ یا سوخت‌گیری را انجام می‌دهند. بعد از مدت زمانی مشخص (تحت عنوان مدت شارژ)، شارژ باتری EVها و سوخت‌گیری تانک هیدروژنی FCVها کامل می‌شود و خودروها از شبکه قطع می‌شوند [۲]. بر اساس پیش‌بینی‌های انجام‌شده در پژوهش‌های مختلف، تعداد زیادی از EVها و FCVها عموماً در بازهٔ پرباری شبکه، ۱۷:۰۰–۲۲:۰۰، به سیستم قدرت وصل می‌شوند. مدیریت غیرهوشمند خودروها ممکن است به افزایش تقاضای انرژی شبکه در ساعات پرباری منجر شود [۳]. پیرو این موضوع، به علت محدودیت‌های بهره‌برداری، بسیاری از EVها و FCVها نمی‌توانند شارژ شوند. شاخص‌های فنی شبکه مانند پروفیل ولتاژ، امنیت ولتاژ و تلفات توان در شرایطی نامطلوب قرار خواهند داشت [٤]. در مدیریت انرژی هوشمند EVها و FCVها، عملیات شارژ یا سوخت‌گیری خودروها متناسب با خواسته‌های شبکه و مالکان خودروها انجام می‌شود [۱]. همچنین، EVها و FCVها در این مدل می‌توانند در وضعیت دشارژ نیز فعالیت کنند. به عبارتی، در مدیریت انرژی هوشمند، EVها و FCVها به صورت یک بار اکتیو در شبکه ظاهر می‌شوند و می‌توانند در نقش ذخیره‌ساز انرژی فعالیت کنند [۵]. در این شرایط، پیش‌بینی می‌شود مدیریت انرژی EVها و FCVها، علاوه بر برآورد خواسته‌های مالکان آنها مانند کمینه‌سازی هزینهٔ سوخت‌گیری، بتواند در بهبود شرایط فنی و اقتصادی شبکه مانند MG نیز مؤثر باشد.

در زمینهٔ مدیریت انرژی MG یا شبکهٔ توزیع در حضور EVها و FCVها، پژوهش‌ها و کارهایی متفاوت وجود دارند. مرجع [٦] پیشنهاد افزایش ایمنی و کارایی شارژ خودروهای الکتریکی را با اجرای یک سیستم شارژ ترکیبی و راهبردهای مدیریت هوشمند ارائه می‌دهد. هدف اصلی مطالعهٔ پیشنهادی افزایش ایمنی شارژ EVها با یک سیستم شارژ ترکیبی است که حالت‌های مختلف شارژ (مانند شارژ سریع، شارژ بی‌سیم) را برای بهینه‌سازی زمان شارژ و کمینه‌کردن اتلاف انرژی ادغام می‌کند. در [۷]، یک مدل جامع و کارآمد برای مدیریت انرژی پارکینگ EVها ارائه شده است که امکان مشارکت در بازارهای انرژی و استفاده از قابلیت‌های خودرو به شبکه (V2G)[۷] برای بیشینه‌کردن سودآوری EVها را فراهم می‌کند. برای دست‌یابی به توزیع کارآمد انرژی برای MG مبتنی بر حمل‌ونقل ریلی شهری، شامل سیستم ذخیره‌سازی و منبع تجدیدپذیر، با ایستگاه شارژ EVها از طریق فناوری V2G، یک مدیریت انرژی سه‌مرحله‌ای با مقیاس‌های زمانی مختلف در [۸] ارائه شده است. مرجع [۹] یک کاربرد نوآورانه از تکنیک‌های بهینه‌سازی یادگیری عمیق، همراه با الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی، برای افزایش کنترل و تنظیم ولتاژ در ریزشبکه‌های هوشمند یکپارچه با EVها ارائه می‌دهد. مرجع [۱۰] وضعیت ادغام EVها در MGها را با تمرکز بر پیشرفت‌های فناوری و روندهای نوظهور ارزیابی می‌کند، در حالی که چالش‌ها و فرصت‌های فنی کلیدی را مشخص می‌کند. علاوه بر این، این مقاله نقش محوری EVها را در مشارکت در خدمات V2G بررسی می‌کند و پشتیبانی کمکی را برای بهبود عملکرد MG فراهم می‌آورد. مرجع [۱۱] یک روش ترکیبی برای مدیریت انرژی ریزشبکه‌های جریان مستقیم مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر پیشنهاد می‌دهد که از سیستم‌های شارژ EVها پشتیبانی می‌کنند. در [۱۲] یک سیستم مدیریت انرژی[۸] جدید برای بهره‌برداری بهینه از منابع انرژی یک ایستگاه شارژ هیبریدی برای EVها و FCVها ارائه می‌شود. این سیستم از یک سیستم فتوولتائیک، یک باتری و یک سیستم هیدروژنی به عنوان سیستم‌های ذخیرهٔ انرژی، شش واحد شارژ سریع و یک تأمین‌کنندهٔ هیدروژن تشکیل شده است. در [۱۳]، یک ایستگاه شارژ خارج از شبکه برای EVها و FCVها طراحی می‌شود. هر دو خودروی الکتریکی و هیدروژنی به طور هم‌زمان شارژ می‌شوند. آنها به عنوان دو تقاضای بار الکتریکی و هیدروژنی در ایستگاه شارژ ظاهر می‌شوند و ایستگاه شارژ توسط پنل‌های خورشیدی تغذیه می‌شود. مرجع [۱٤] یک مدل داده‌محور جدید برای بهینه‌سازی عملکرد ریزشبکه‌ها بر اساس یک سیستم مدیریت انرژی انعطاف‌پذیر–هوشمندِ ریسک‌گریز، با در نظر گرفتن چالش رو به رشد تغییرات اقلیمی جهانی ارائه می‌دهد. اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و فنی اپراتور شبکهٔ توزیع از طریق مدیریت هم‌زمان توان راکتیو و اکتیو در شبکهٔ توزیع هوشمند که مجهز

به یک نیروگاه مجازی انعطاف‌پذیر-پایدار است، در [۱۵] برآورده می‌شوند. در [۱۶]، سیستمی جدید برای بهبود انعطاف‌پذیری سیستم توزیع با استفاده از EVها تحت چارچوب سیستم مدیریت منابع انرژی توزیع‌شده پیشنهاد شده است. چارچوب پیشنهادی شامل چهار سطح سلسله‌مراتبی است: دستگاه، تجمیع، عملیات و سازمان، با یک سطح مجازی اختیاری. در [۱۷]، یک تکنیک بهینه‌سازی برای سیستم انرژی ریزشبکه هماهنگ با خانهٔ هوشمند به عنوان یک خوشهٔ غیرمتمرکز در شبکهٔ توزیع برق حاوی منابع انرژی توزیع‌شده ارائه شده که با EVها به عنوان ذخیره‌سازی انعطاف‌پذیر تحت طرح زمان‌بندی یکپارچه بین ریزشبکه و شبکهٔ توزیع هماهنگ شده است. پژوهش در [۱۸] یک سیستم مدیریت انرژی یکپارچه مبتنی بر الگوریتم‌های کنترل هوشمند برای طراحی و اندازه‌گیری ریزشبکه، همراه با یک بستر اینترنت اشیا، ارائه می‌دهد که مدیریت بلادرنگ دستگاه‌های ناهمگن تشکیل‌دهندهٔ ریزشبکه را به عهده دارد.

بر اساس پیشینهٔ پژوهش، شکاف‌ها و محدودیت‌های پژوهشی مختلفی در حوزهٔ مدیریت انرژی شبکهٔ توزیع یا MG در حضور EVها و FCVها وجود دارند. به عنوان یک محدودیت، در بیشتر پژوهش‌ها، مدیریت انرژی EVها در شبکهٔ توزیع یا MG مطرح بوده و کمتر دربارهٔ مدیریت انرژی FCVها در پژوهش‌های مختلف بحث شده است، اما به منظور تأمین هیدروژن پاک، تولید هیدروژن توسط P2Hها یک راه‌کار دوستدار محیط‌زیست است. در این شرایط، FCVها به شبکه متصل خواهند شد. از این رو، پیش‌بینی می‌شود مدیریت انرژی آنها بتواند اثرگذاری چشمگیری بر روی شاخص‌های فنی و اقتصادی شبکه داشته باشد. علاوه بر این، در بیشتر پژوهش‌ها در زمینهٔ مدیریت انرژی شبکه در حضور خودروهای دوستدار محیط‌زیست، اهداف اپراتور سیستم توزیع (DSO)[۹] یا اپراتور MG (MGO)[۱۰] به عنوان تابع هدف مدنظر بوده است. اگرچه مالکان خودروها نیز مایل به برآورد اهداف خود مانند کمینه‌سازی هزینهٔ شارژ یا سوخت‌گیری هستند، کمینه‌سازی هزینهٔ سوخت‌گیری EVها و FCVها به عنوان یک تابع هدف در کمتر پژوهشی مدنظر بوده است. در مدیریت انرژی شبکه، انتظار می‌رود شاخص‌های فنی و اقتصادی مختلف سیستم قدرت ارتقا یابند. در بیشتر پژوهش‌ها، عموماً کمینه‌سازی هزینهٔ بهره‌برداری شبکه مدنظر بوده است و محدودیت دامنهٔ ولتاژ و توان ظاهری عبوری از پست و خط توزیع به صورت قید در مدیریت انرژی شبکه ظاهر شدند. در این شرایط، انتظار می‌رود وضعیت اقتصادی بهبود یابد، وضعیت پروفیل ولتاژ در حد مجاز رعایت شود، و از اضافه‌باری در خطوط و پست توزیع جلوگیری شود، اما در برخی از شرایط، لازم است وضعیت شاخص‌های مختلف ارتقای چشمگیری داشته باشد. برای مثال، عموماً باس‌های انتهای فیدر توزیع دارای دامنهٔ ولتاژ پایینی هستند؛ به طوری که امکان دارد افزایش بارگذاری به فروپاشی ولتاژ در باس‌های انتهای فیدر منجر شود. بنابراین، لازم است امنیت ولتاژ در مدیریت انرژی شبکه مدل‌سازی شود. این موضوع در کمینه‌سازی هزینهٔ بهره‌برداری شبکه به عنوان تابع هدف برآورد نمی‌شود، ولی انتظار می‌رود با انتخاب کمینه‌سازی تابع انحرافات ولتاژ به عنوان تابع هدف تلفات شبکه کاهش یابد، پروفیل ولتاژ تخت‌تر حاصل شود، امنیت ولتاژ زیاد به دست آید، بارگذاری روی خطوط و پست توزیع کاهش یابد و هزینهٔ بهره‌برداری کمتر شود، اما این موضوع در کمتر پژوهشی لحاظ شده است.

به منظور جبران شکاف‌های پژوهشی مطرح‌شده، این مقاله مدیریت انرژی هوشمند پارکینگ EVها و FCVها در ریزشبکه با در نظر گرفتن اهداف اقتصادی خودروها و اهداف فنی و اقتصادی MG را ارائه می‌دهد. در این طرح، بهینه‌سازی دوهدفه وجود دارد. متناسب با برآورد اهداف اقتصادی مالکان EVها و FCVها در مدیریت انرژی هوشمند، کمینه‌سازی هزینه‌های مورد انتظار شارژ EVها و سوخت‌گیری FCVها به عنوان یک تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. همچنین، برای برآورد اهداف بهره‌برداری و امنیت ولتاژ MGO، کمینه‌سازی تابع انحرافات ولتاژ MG به عنوان تابع هدف دیگر لحاظ می‌شود. البته، اهداف اقتصادی MGO با در نظر گرفتن دو تابع هدف یادشده حاصل می‌شوند. قیود مسأله شامل معادلات پخش توان، محدودیت‌های بهره‌برداری و امنیت ولتاژ MG، مدل بهره‌برداری پارکینگ EVها و FCVهاست. در این مقاله، فرض شده است هر EV شامل یک شارژ است که می‌تواند توان اکتیو را در دو جهت EV به شبکه و شبکه به EV کنترل کند. فرض شده است که پارکینگ FCVها مجهز به پیل

سوختی غشای مبادلهٔ پروتون (PEMFC)[11] است. PEMFC دارای دو فناوری P2H و هیدروژن به برق (H2P)[12] است. به عبارتی، قادر است انرژی الکتریکی دریافت کند و در خروجی هیدروژن تولید کند. علاوه بر این، قادر است هیدروژن دریافت کند و انرژی الکتریکی تولید کند. بنابراین، FCVها با اتصال به شبکه از طریق PEMFC می‌توانند انرژی به (از) شبکه تزریق (دریافت) کنند. در ادامه، از بهینه‌سازی تصادفی برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های بار، قیمت انرژی، نرخ شارژ و دشارژ، انرژی اولیه و نهایی EVها و FCVها استفاده می‌شود. با مقایسهٔ راهکار پیشنهادی و پیشینهٔ پژوهش، نوآوری‌های طرح به شرح زیر است: ۱) کمینه‌سازی تابع انحرافات ولتاژ برای بهبود وضعیت اقتصادی، بهره‌برداری و امنیت ولتاژ MG، ۲) کمینه‌سازی هزینه‌های شارژ EVها و سوخت‌گیری FCVها به منظور برآورد اهداف اقتصادی مالکان خودروها، ۳) بررسی قابلیت‌های مدیریت انرژی پارکینگ FCVها در بهبود شاخص‌های فنی و اقتصادی MG، و٤) تجهیز پارکینگ FCVها به PEMFC به منظور کنترل توان FCV در دو جهت خودرو به شبکه و شبکه به خودرو.

در ادامه، فرمول‌بندی بهره‌برداری EVها و FCVها در ریزشبکه در بخش دوم ارائه می‌شود. مدل تک‌هدفه مبنی بر بهینه‌سازی تصادفی در بخش سوم ارائه می‌شود. نتایج عددی حاصل از موارد مطالعاتی مختلف در بخش چهارم گزارش می‌شود. نتیجه‌گیری‌های کلی به منظور بیان قابلیت‌های طرح پیشنهادی در بخش پنجم ارائه می‌شود.

۲- بهره‌برداری بهینهٔ خودروها در MG

مدیریت انرژی بهینهٔ EVها و FCVها در MG متناسب با کمینه‌سازی هزینهٔ انرژی خودروها و تابع پروفیل ولتاژ شبکه با در نظر گرفتن قیود پخش توان بهینه MG و مدل بهره‌برداری خودروها در این بخش ارائه می‌شود. جزئیات فرمول‌بندی این طرح به شرح زیر است:

الف) توابع هدف: در این بخش، برای برآورد اهداف اقتصادی مالکان EVها و FCVها، تابع هدف (۱) استفاده می‌شود. این رابطه بیانگر کمینه‌سازی هزینهٔ خرید انرژی مورد انتظار خودروهای یادشده از MG (F_O) است. این هزینه در هر ساعت بهره‌برداری برابر حاصل‌ضرب قیمت انرژی و توان اکتیو EVها و FCVها از دیدگاه MG است [۱۹]. توان اکتیو FCVها از دیدگاه MG برابر توان اکتیوی است که به PEMFC داده می‌شود. از این رو، در رابطهٔ (۱)، توان اکتیو PEMFC (P^{PE}) استفاده می‌شود. علاوه بر این، رابطهٔ (۲) به منظور برآورد اهداف بهره‌برداری اپراتور MG استفاده شده است. در این رابطه، کمینه‌سازی تابع پروفیل ولتاژ (F_V) مدنظر است [۲۰]. بر اساس این رابطه، انتظار می‌رود افت ولتاژ در خطوط توزیع کمینه شود. بنابراین، دامنهٔ ولتاژ در تمامی باس‌ها به مقدار ولتاژ باس مرجع (V_r) نزدیک می‌شود که به استخراج پروفیل ولتاژ تخت‌تر در MG منجر می‌شود. این موضوع می‌تواند دامنهٔ ولتاژ در باس ضعیف (باسی دارای کمترین دامنهٔ ولتاژ) را نیز افزایش دهد؛ در نتیجه، حاشیهٔ امن زیادی برای ولتاژ به دست می‌آید. در این شرایط، انتظار می‌رود امنیت ولتاژ بیشینه شود [٤]. با کمینه‌سازی افت ولتاژ در خطوط توزیع، جریان عبوری از خطوط توزیع کاهش می‌یابد، و پیرو آن، تلفات توان در خطوط توزیع کمینه می‌شود. بنابراین، بر اساس رابطهٔ (۲)، می‌توان کمینه‌ترین مقدار تلفات انرژی را برای MG استخراج کرد. به عنوان نکتهٔ دیگر، هزینهٔ انرژی ریزشبکه برابر هزینهٔ انرژی مصرفی بارهای پسیو، هزینهٔ انرژی خودروهای یادشده و هزینهٔ تلفات انرژی MG است. بر اساس روابط (۱) و (۲)، هزینه‌های انرژی خودروها و تلفات انرژی قابل مدیریت است؛ به طوری که کمینه‌سازی Fv و F_O می‌تواند در کمینه‌سازی هزینهٔ بهره‌برداری MG نتیجه داشته باشد.

$$\min \quad F_O = \sum_{n,h,s} \pi_s \lambda_{h,s} \left(P^{EV}_{n,h,s} + P^{PE}_{n,h,s} \right) \qquad (۱)$$

$$\min \quad F_V = \sum_{n,h,s} \pi_s \left(V_{n,h,s} - V_r \right)^2 \qquad (۲)$$

ب) مدل ریزشبکه: این بخش فرمول‌بندی پخش توان بهینهٔ مقید به امنیت ولتاژ در MG را ارائه می‌دهد. مدل (۳)-(۷) اشاره به معادلات پخش توان دارد که به ترتیب اشاره به تعادل توان اکتیو و راکتیو در باس‌های MG، (۳) و (٤)، توان اکتیو و راکتیو عبوری از خطوط توزیع، (۵) و (٦)، میزان ولتاژ در باس مرجع، (۷)، دارد [۲۱-۲۲]. محدودیت‌های بهره‌برداری MG متناظر با قیود (۸)-(۱۰) هستند. محدودیت دامنهٔ ولتاژ در باس‌های MG در قید (۸) ارائه شده است [۱]. محدودیت

توان ظاهری عبوری از خط و پست توزیع به ترتیب در روابط (۹) و (۱۰) بیان شده است. [۱] مدل امنیت ولتاژ در MG مبنی بر محاسبهٔ بدترین شاخص امنیت (WSI)[۱۳] در قیود (۱۱) و (۱۲) لحاظ شده است [۴]. در این مدل، میزان WSI برای ضعیف‌ترین باس (p) بر اساس رابطهٔ (۱۱) محاسبه می‌شود. این باس دارای کمترین دامنهٔ ولتاژ است. WSI دارای مقداری بین صفر و یک است. مقدار صفر آن به معنای فروپاشی ولتاژ در MG است، در صورتی که مقدار ۱ برای آن به معنای عملکرد MG در وضعیت بی‌باری است. از این رو، مقدار زیاد WSI بیانگر شرایط مطلوب امنیت ولتاژ در MG است [۴]. برای برقراری چنین شرایطی، قید (۱۲) استفاده شده است. در این قید، WSI باید از یک مقدار مشخص بیشتر باشد. این مقدار عموماً بر اساس [۴، ۱۵] برابر ۰/۸ انتخاب می‌شود.

$$P^{DP}_{n,h,s} + \sum_k J^{DL}_{n,k} P^{DL}_{n,k,h,s} = P^{L}_{n,h,s} + P^{EV}_{n,h,s} + P^{PE}_{n,h,s} \forall n,h,s \quad (۳)$$

$$Q^{DP}_{n,h,s} + \sum_k J^{DL}_{n,k} Q^{DL}_{n,k,h,s} = Q^{L}_{n,h,s} \quad \forall n,h,s \quad (۴)$$

$$P^{DL}_{n,k,h,s} = g^{DL}_{n,k}\left(V_{n,h,s}\right)^2 - V_{n,h,s}V_{k,h,s}\begin{Bmatrix} g^{DL}_{n,k}\cos\left(\alpha_{n,h,s}-\alpha_{k,h,s}\right) \\ +b^{DL}_{n,k}\sin\left(\alpha_{n,h,s}-\alpha_{k,h,s}\right)\end{Bmatrix} \quad \forall n,k,h,s \quad (۵)$$

$$Q^{DL}_{n,k,h,s} = -b^{DL}_{n,k}\left(V_{n,h,s}\right)^2 + V_{n,h,s}V_{k,h,s}\begin{Bmatrix} b^{DL}_{n,k}\cos\left(\alpha_{n,h,s}-\alpha_{k,h,s}\right) \\ -g^{DL}_{n,k}\sin\left(\alpha_{n,h,s}-\alpha_{k,h,s}\right)\end{Bmatrix} \quad \forall n,k,h,s \quad (۶)$$

$$[V_{n,h,s}\alpha_{n,h,s}] = [V_r 0] \forall b = r,h,s \quad (۷)$$

$$\underline{V_n} \le V_{n,h,s} \le \bar{V}_n \forall b,h,s \quad (۸)$$

$$\sqrt{\left(P^{DL}_{n,k,h,s}\right)^2 + \left(Q^{DL}_{n,k,h,s}\right)^2} \le \bar{S}^{DL}_{n,k} \forall n,k,h,s \quad (۹)$$

$$\sqrt{\left(P^{DP}_{n,h,s}\right)^2 + \left(Q^{DP}_{n,h,s}\right)^2} \le \bar{S}^{DP}_{n} \forall n,h,s \quad (۱۰)$$

$$W_{h,s} = \left(V_{p-1,h,s}\right)^4 - 4\left(V_{p-1,h,s}\right)^2\begin{pmatrix} r^{DL}_{p,p-1}P^{DL}_{p,p-1,h,s} + \\ x^{DL}_{p,p-1}Q^{DL}_{p,p-1,h,s}\end{pmatrix} - 4\left(x^{DL}_{p,p-1}P^{DL}_{p,p-1,h,s} - r^{DL}_{p,p-1}Q^{DL}_{p,p-1,h,s}\right)^2 \forall h,s \quad (۱۱)$$

$$W_{h,s} \ge \underline{W} \forall h,s \quad (۱۲)$$

پ) مدل تجمیع EVها: فرمول‌بندی پارکینگ EVها در قیود (۱۳)–(۱۸) ارائه شده است. در این فرمول‌بندی، فرض شده است هر باس می‌تواند دارای یک پارکینگ باشد. EVها بعد از آخرین سفرشان در طول بازهٔ بهره‌برداری مشخص (یک شبانه روز) به پارکینگ وارد و به شبکه متصل می‌شوند. آنها به صورت تصادفی از ساعت ۵:۰۰ الی ۹:۰۰ از پارکینگ خارج می‌شوند. در رابطهٔ (۱۳)، توان اکتیو EVها از دیدگاه MG مدل‌سازی شده که برابر توان اکتیو EVها در مد شارژ منهای توان اکتیو آنها در مد دشارژ است. به عبارتی، میزان مثبت (منفی) P^{EV} متناظر با عملکرد EVها به صورت مصرف‌کننده (تولیدکننده) است. محدودیت نرخ شارژ و دشارژ برای تجمیع EVها به ترتیب در قیود (۱۴) و (۱۵) ارائه شده است [۲، ۱۹]. EVها دارای باتری هستند. در باتری، هم‌زمان عملیات شارژ و دشارژ قابل اجرا نیست. این موضوع در رابطهٔ (۱۶) بیان شده است؛ به طوری که در این رابطه، دست‌کم یکی از متغیرهای P^{CH} یا P^{DCH} دارای مقدار صفر است. انرژی ذخیره‌شده در EVها به‌ازای ساعات بهره‌برداری مختلف در رابطهٔ (۱۷) مدل‌سازی شده است. میزان این انرژی در ساعت h برابر مجموع انرژی اولیهٔ EVهای تازه واردشده به پارکینگ (E^{eA})، میزان انرژی ذخیره‌شده در ساعت قبل (E^{EV}_{h-1}) و انرژی به‌دست‌آمده از مد شارژ EVها ($\eta^{eCH}P^{CH}$) منهای انرژی تخلیه‌شدهٔ EVها ناشی از عملکرد دشارژ آنها ($\frac{1}{\eta^{eDCH}}P^{DCH}$) و انرژی نهایی EVهای تازه خارج‌شده از پارکینگ (E^{eD}) است [۲]. در قید (۱۸)، محدودیت انرژی ذخیره‌شده در EVها بیان شده است. پارامترهای CR^{EV}، DR^{EV}، E^{eA} و E^{eD} وابسته به تعداد و نوع EVهای وصل‌شده به شبکه هستند. از آنجا که در هر ساعت بهره‌برداری، تعداد و نوع EVها متفاوت است، این پارامترها وابسته به زمان هستند. DR^{EV}/CR^{EV} در هر ساعت بهره‌برداری برابر مجموع نرخ شارژ/دشارژ EVهای موجود در شبکه است. E^{eA} (E^{eD}) در ساعت h برابر انرژی اولیهٔ تمامی خودروهای تازه وصل‌شده (خارج‌شده) به (از) شبکه است. انرژی اولیه در یک EV برابر حاصل‌ضرب ظرفیت باتری (BC)[۱۴] و حالت شارژ (SOC)[۱۵] است [۳–۴]. فرض می‌شود باتری EV باید کامل شارژ شود؛ در نتیجه، انرژی نهایی EV برابر BC است.

$$P^{EV}_{n,h,s} = P^{CH}_{n,h,s} - P^{DCH}_{n,h,s} \forall n,h,s \quad (۱۳)$$

$$0 \le P^{CH}_{n,h,s} \le CR^{EV}_{n,h,s} \forall n,h,s \quad (۱۴)$$

$$0 \le P^{DCH}_{n,h,s} \le DR^{EV}_{n,h,s} \forall n,h,s \quad (۱۵)$$

$$P^{CH}_{n,h,s} P^{DCH}_{n,h,s} = 0 \forall n,h,s \quad (۱۶)$$

$$E^{EV}_{n,h,s} = E^{eA}_{n,h,s} + E^{EV}_{n,h-1,s} + \eta^{eCH} P^{CH}_{n,h,s} - \frac{1}{\eta^{eDCH}} P^{DCH}_{n,h,s} - E^{eD}_{n,h,s} \forall n,h,s \quad (۱۷)$$

$$E^{EV}_{n,h,s} \ge 0 \forall n,h,s \quad (۱۸)$$

ت) مدل تجمیع FCVها: عملکرد تجمیع FCVها در قیود (۱۹)-(۲۴) ظاهر شده است. در این فرمول‌بندی، فرض شده است هر باس می‌تولند دارای یک پارکینگ FCVها باشد. هر FCV بعد از آخرین سفرش در طول شبانه‌روز به MG وصل می‌شود. این پارکنیک مجهز به PEMFC است. PEMFC قادر است از شبکهٔ انرژی الکتریکی دریافت و آن را به هیدروژن تبدیل کند (عملکرد الکترولایزر). همچنین، می‌تولند هیدروژن دریافت و آن را به انرژی الکتریکی تبدیل کند (عملکرد پیل سوختی). به عبارتی، مجهز به فناوری‌های P2H و H2P است [۲۳]. PEMFC دارای دو گره است. یک گره آن به صورت الکتریکی است و به MG متصل می‌شود. گره دیگر از نوع باس هیدروژنی است که به FCV وصل می‌شود. فرمول‌بندی عملکرد PEMFC به علاوهٔ مخزن هیدروژنی در FCV در قیود (۱۹)-(۲۴) ظاهر شده است. در رابطهٔ (۱۹)، توان اکتیو PEMFC از دیدگاه MG محاسبه می‌شود که برابر توان اکتیو PEMFC در مد مصرف‌کننده (P^{cPE}) منهای توان اکتیو آن در مد تولیدکننده (P^{dPE}) است. محدودیت نرخ شارژ و دشارژ FCVها یا ظرفیت P2H و H2P به ترتیب در قیود (۲۰) و (۲۱) ظاهر شده است. FCVها دارای تانک هیدروژنی هستند. در این تانک، عملکرد شارژ و دشارژ هم‌زمان انجام نمی‌شود. پیرو این موضوع، قید (۲۲) استفاده می‌شود. در رابطهٔ (۲۳)، انرژی ذخیره‌شده در FCVها محاسبه می‌شود. این انرژی در هر ساعت برابر مجموع انرژی اولیهٔ FCVهای تازه وصل‌شده به پارکینگ (E^{fA})، انرژی دریافتی در مد شارژ ($\eta^{fCH} P^{cPE}_{n,h,s}$) و انرژی در ساعت قبل ($E^{FCV}$) منهای انرژی نهایی FCVهای خارج‌شده از پارکینگ (E^{fD}) و انرژی تخلیه‌شده در مد دشارژ ($\frac{1}{\eta^{fDCH}} P^{dPE}_{n,h,s}$) است. محدودیت انرژی ذخیره‌شده در FCVها در قید (۲۴) ظاهر شده است. انرژی اولیه در یک FCV برابر حاصل‌ضرب ظرفیت تانک هیدروژنی (HTC)[۱۶] و SOC است. فرض می‌شود تانک هیدروژنی در FCV باید کامل شارژ شود؛ در نتیجه، انرژی نهایی FCV برابر HTC است.

$$P^{PE}_{n,h,s} = P^{cPE}_{n,h,s} - P^{dPE}_{n,h,s} \forall n,h,s \quad (۱۹)$$

$$0 \le P^{cPE}_{n,h,s} \le CR^{FCV}_{n,h,s} \forall n,h,s \quad (۲۰)$$

$$0 \le P^{dPE}_{n,h,s} \le DR^{FCV}_{n,h,s} \forall n,h,s \quad (۲۱)$$

$$P^{cPE}_{n,h,s} P^{dPE}_{n,h,s} = 0 \forall n,h,s \quad (۲۲)$$

$$E^{FCV}_{n,h,s} = E^{fA}_{n,h,s} + E^{FCV}_{n,h-1,s} + \eta^{fCH} P^{cPE}_{n,h,s} - \frac{1}{\eta^{fDCH}} P^{dPE}_{n,h,s} - E^{fD}_{n,h,s} \forall n,h,s \quad (۲۳)$$

$$E^{FCV}_{n,h,s} \ge 0 \forall n,h,s \quad (۲۴)$$

۳- مدل تک‌هدفهٔ تصادفی

فرمول‌بندی (۱)-(۲۴) مبنی بر بهینه‌سازی دوهدفه است. برای حل مسألهٔ پیشنهادی توسط حل‌کننده‌های مرسوم، نیاز به استخراج مدل تک‌هدفه است. برای این منظور، از تکنیک بهینه‌سازی پارتو[۱۷] مبنی بر مجموع توابع وزندار استفاده می‌شود [۱۵]. در این روش، تابع هدف همانند رابطهٔ (۲۵) به صورت مجموع وزن‌دار مقدار نرمالیزه‌شدهٔ توابع هدف (۱) و (۲) است. در رابطهٔ (۲۵)، ε^V معرف یک ضریب وزنی است. مقدار ε^V بین صفر و ۱ تغییر می‌کند. کمینهٔ (بیشینهٔ) مقدار F_V (F_O) به‌ازای حل مسألهٔ (۲)-(۲۴) به دست می‌آید. بیشینهٔ (کمینهٔ) مقدار F_V (F_O) به‌ازای حل مسألهٔ (۱) و (۳)-(۲۴) حاصل می‌شود. در مدل تک‌سطحی، قیود دیگر مسأله همانند رابطهٔ (۲۶) شامل روابط (۳)-(۲۴) است.

$$min \quad (1 - \varepsilon^V) \frac{F_O - F_O^{min}}{F_O^{min_O^{min}} + \varepsilon^V \frac{F_V - F_V^{min}}{F_V^{min_V^{min}}}} \quad (۲۵)$$

به شرطی که:

قیود (۳)-(۲۴) (۲۶)

در مدل (۲۵)-(۲۶)، به‌ازای مقدارهای مختلف ε^V، نقاط

بهینهٔ متفاوتی حاصل می‌شود؛ به طوری که مقادیر بهینهٔ زیادی برای F_V و F_O به دست می‌آید. مجموع نقاط بهینه بیانگر جبههٔ پارتو است. بنابراین، لازم است برای طرح پیشنهادی یک نقطهٔ بهینه محاسبه شود. بهترین نقطه برابر نقطهٔ مصالحه بین F_V و F_O است [۱۵]. برای استخراج راه‌حل مصالحه از تکنیک تصمیم‌گیری فازی [۱۵] استفاده می‌شود. در این تکنیک، مقدار تابع عضویت خطی فازی (f) برای توابع F_V و F_O به‌ازای مقادیر مختلف ε^V محاسبه می‌شود. میزان f برای یک تابع (F) برابر صفر/یک است، اگر میزان F بیشتر از بیشنهٔ مقدارش (F^{max})/کمینهٔ مقدارش (F^{min}) باشد؛ در غیر این صورت، برابر $(F - F^{max})/(F^{min} - F^{max})$ است. f برای F_O/F_V به ترتیب با f_o/f_v نمایش داده می‌شود. قدم بعدی در تکنیک تصمیم‌گیری فازی، تعیین کمینهٔ مقدار بین f_o و f_v است. این میزان با β نمایش داده می‌شود. این روند برای تمامی اعضای جبههٔ پارتو اجرا می‌شود. در نهایت، نقطهٔ مصالحه متناظر با بیشینهٔ مقدار β است [۱۵].

در فرمول‌بندی (۲۵)–(۲۶)، پارامترهایی مانند بار، P^L و Q^L، قیمت انرژی، λ، نرخ شارژ و دشارژ EVها، CR^{EV} و DR^{EV}، انرژی اولیه و نهایی EVها، E^{eA} و E^{eD}، نرخ شارژ و دشارژ FCVها، CR^{FCV} و DR^{FCV}، انرژی اولیه و نهایی FCVها، E^{fA} و E^{fD}، به صورت عدم قطعیت هستند. در این بخش، از بهینه‌سازی تصادفی برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های یادشده استفاده می‌شود. همچنین، از مکانیسم چرخ رولت برای تولید سناریو استفاده می‌شود؛ این تکنیک تعداد زیادی سناریو ایجاد می‌کند. در هر سناریو، میزان پارامترهای یادشده مبنی بر مقدار میانگین و انحراف معیار خودشان تعیین می‌شود. احتمال هر پارامتر عدم قطعیت مبنی بر تابع چگالی احتمال نرمال است. احتمال هر سناریو برابر حاصل‌ضرب احتمال پارامترهای عدم قطعیت است. در بهینه‌سازی تصادفی، از تکنیک کانترویچ [۲۴] به عنوان کاهش سناریو استفاده می‌شود. در این سناریو، فاصلهٔ بین سناریوهای مختلف محاسبه می‌شود. سپس، تعدادی مشخص سناریو انتخاب و به مسأله اعمال می‌شوند. سناریوهای منتخب دارای کمینه‌ترین فاصله نسبت به یکدیگر هستند. احتمال هر سناریو برابر احتمال آن در مکانیسم چرخ رولت تقسیم بر مجموع احتمال سناریوهای منتخب است.

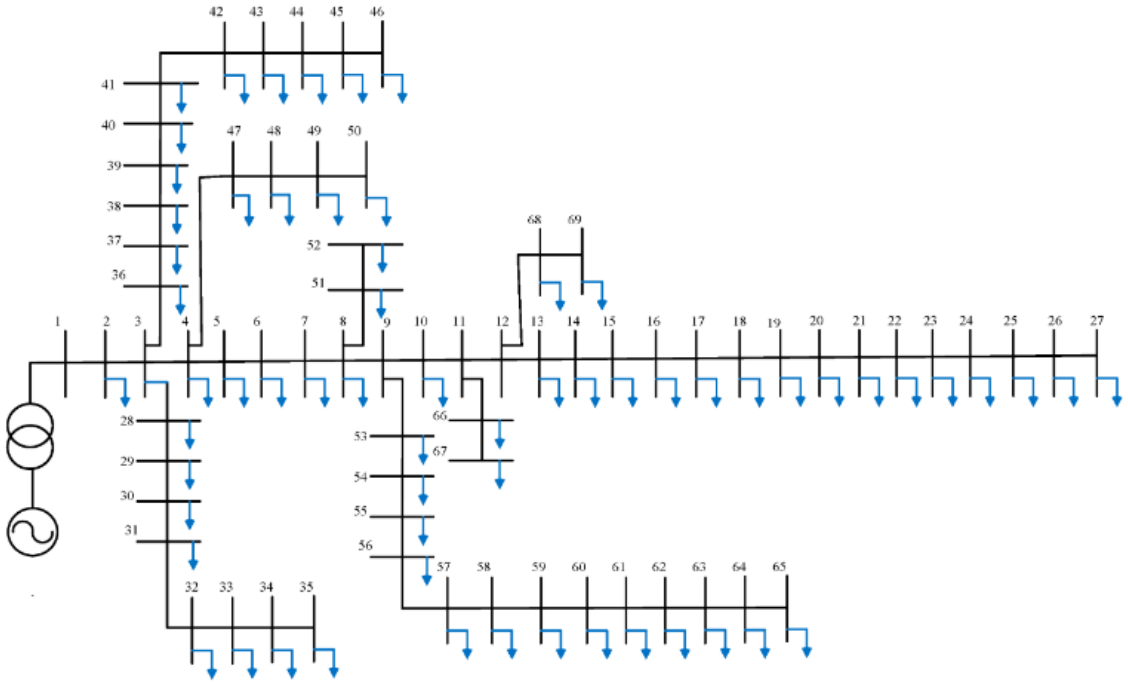
۴- نتایج عددی

۴-۱- مورد مطالعاتی

در این بخش، داده‌های ریزشبکه از MG ۶۹باسهٔ شعاعی با استاندارد IEEE [۲۵] تبعیت می‌کند. مدار تک‌خطی این شبکه در شکل ۱ [۲۵] ارائه شده است. این شبکه دارای توان مبنا ۱ MVA است و ولتاژ مبنا برای آن برابر ۱۲/۶۶ kV است. باس ۱ به عنوان باس مرجع شناخته می‌شود. دامنه و زاویهٔ ولتاژ در این باس به ترتیب برابر ۱ p.u. و صفر درجه است. محدودهٔ مجاز دامنهٔ ولتاژ نیز برابر [۰/۹ ۱/۰۵] پریونیت در نظر گرفته شده است. کمترین میزان WSI به منظور دسترسی به امنیت ولتاژ زیاد در MG برابر ۰/۸ p.u. است [۴]. مشخصات خطوط توزیع و پست توزیع به همراه داده‌های پیک بار در [۲۵] گزارش شده است. میزان بار در ساعات دیگر از حاصل‌ضرب ضریب بار و پیک بار به دست می‌آید.

منحنی روزانهٔ مورد انتظار ضریب بار در [۴] ترسیم شده است. بر اساس [۱، ۴]، قیمت انرژی در ۱:۰۰–۷:۰۰ در حدود ۱۶ $/MW است. در ساعات ۱۷:۰۰–۲۲:۰۰، قیمت انرژی برابر $/MWh است. در ساعات دیگر، قیمت انرژی برابر ۲۴ $/MWh لحاظ می‌شود. در این شبکه، ۱۰ پارکینگ EVها و ۶ ایستگاه هیدروژنی وجود دارند. مکان پارکینگ EVها در باس‌های ۴، ۱۱، ۲۶، ۳۵، ۴۱، ۴۲، ۵۰، ۵۵، ۶۵ و ۶۸ توزیع شده است. پارکینگ FCVها در باس‌های ۲۱، ۳۷، ۴۴، ۵۸، ۶۲ و ۶۶ مستقر شدند. هر پارکینگ EV قادر است حداکثر ۳۰ تا EV را تغذیه کند. هر ایستگاه هیدروژنی نیز ۳۰ تا FCV را تغذیه می‌کند. در این بخش، فرض شده است خودروهای الکتریکی و پیل سوختی بعد از آخرین سفرشان در طول شبانه‌روز به پارکینگ یا ایستگاه هیدروژنی وارد و سپس به MG متصل می‌شوند. آنها نیز به طور تصادفی از ساعات ۵ الی ۹:۰۰ از شبکه خارج می‌شوند. منحنی روزانهٔ مورد انتظار برای تعداد EVها و FCVها در [۲] ارائه شده است. جدول ۱ نیز مشخصات هر EV و FCV را بیان می‌کند. راندمان شارژ و دشارژ در EV (FCV) به ترتیب در حدود ۹۵ درصد و ۹۳ درصد (۷۵ درصد و ۵۱ درصد) است [۲، ۲۳]. به منظور استخراج راه‌حل مطمئن در برابر پراکندگی زیاد داده‌های عدم قطعیت‌ها، انحراف معیار عدم قطعیت‌ها برابر ۱۰ درصد مقدار

میانگین آنهاست. مکانیسم چرخ رولت ۲۰۰۰ سناریو برای پارامترهای عدم قطعیت تولید می‌کند، سپس روش کانترویچ تعداد ۸۰ سناریو را انتخاب و به مساله پیشنهادی اعمال می‌کند.



شکل (۱): مدار تک‌خطی ریزشبکهٔ ۶۹باسهٔ IEEE [۲۵]

۲-۴- نتایج و بحث

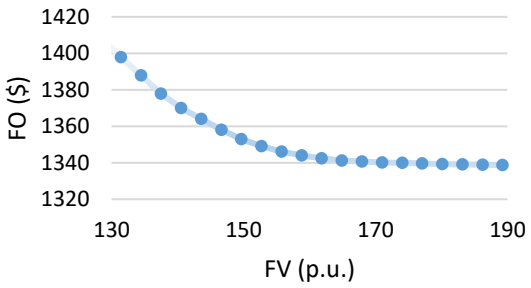
نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS [۲۶] برای کدنویسی طرح پیشنهادی متناظر با بخش‌های ۲ و ۳ با در نظر گرفتن داده‌های بخش ٤-۱ در این بخش استفاده می‌شود. حل‌کننده‌های مختلف در این نرم‌افزار دارای تولباکس هستند. در این مقاله، از حل‌کنندهٔ IPOPT [۲۶] برای استخراج راه‌حل بهینه استفاده می‌شود. در این بخش، نتایج عددی به‌ازای چهار مورد مطالعاتی ارائه می‌شود. در مورد ۱، مطالعات پخش بار (شبکهٔ بدون خودرو) ارزیابی می‌شود، در موارد ۲ الی ٤ نیز به ترتیب تکنیک‌های شارژ غیرهوشمند، شارژ هوشمند و شارژ/دشارژ هوشمند تحلیل می‌شوند.

جدول (۱): مشخصات EV و FCV [۲-۱، ۱۶]

EV	ظرفیت باتری (kWh)	۸	۱۵	٤۲
	نرخ شارژ/دشارژ (kW)	۲/۵	۵	۱۱
	SOC (%)	۲۰	۲۰	۲۰
	نرخ نفوذ (٪)	۲۵	٤۵	۳۰
FCV	HTC (kWh)	۱۶	۳۳	۵۰
	نرخ شارژ/دشارژ (kW)	۵	۱۱	۱۷
	SOC (%)	۲۰	۲۰	۲۰
	نرخ نفوذ (٪)	۳۲	۳۷	۳۱

الف) تعیین راه‌حل مصالحه بین هدف اقتصادی مالکان خودروها و هدف فنی اپراتور سیستم توزیع: در شکل (۲)، نمودار جبههٔ پارتو برای طرح پیشنهادی (مورد ٤) ترسیم می‌شود. این نمودار شامل مقادیر بهینهٔ توابع هدف Fo و Fv به‌ازای تغییرات ε^V است. ε^V نیز بین صفر و ۱ تغییر می‌کند. از این رو، نقطهٔ اول در سمت چپ نمودار متناظر با کمترین مقدار ε^V است و اولین نقطه در سمت راست منحنی متناظر با بیشینهٔ مقدار ε^V است. بر اساس این منحنی، مشاهده می‌شود کمینه‌سازی تابع انحرافات ولتاژ متناظر با بیشینه‌سازی هزینهٔ شارژ EVها و FCVهاست. به عبارتی، تغییرات توابع Fo و Fv در خلاف جهت همدیگر است؛ زیرا برای بهبود Fo لازم است EVها و FCVها توان اکتیو زیادی را به شبکه، به ویژه در ساعات بحرانی مانند بازهٔ پربار، تزریق کنند. در این شرایط، این خودروها انرژی اولیهٔ خود را به شبکه تزریق

می‌کنند. در ادامه، لازم است در ساعات غیربحرانی، آنها توان زیادی را از شبکه دریافت کنند که جبران‌ساز کاهش انرژی اولیهٔ آنها نیز باشد. علاوه بر این، خودروها باید در ساعات غیربحرانی انرژی در خود ذخیره کنند تا بتوانند آن را در ساعات بحرانی به شبکه تزریق کنند. از این رو، تعداد ساعات شارژ EVها و FCVها زیاد خواهد بود. این موضوع در بخش ۲-٤ب بررسی خواهد شد. از این رو، هزینهٔ شارژ EVها و FCVها افزایش می‌یابد. بر اساس شکل (۲)، کمترین و بیشترین مقدار F_V به ترتیب در حدود ۱۲۸/٤ p.u. و ۱۸۹/۳ p.u. است. بنابراین، دامنهٔ تغییرات آن برابر ٦۰/۹ p.u. (۱۸۹/۳ -۱۲۸/٤) است. کمترین و بیشترین مقدار F_O نیز به ترتیب در حدود ۱۳۳۸/۷ $ و ۱٤۰۸/۹ $ است، به عبارتی، دامنهٔ تغییرات آن برابر ۷۰/۲ $ (۱٤۰۸/۹–۱۳۳۸/۷) است. در جدول (۲)، مقادیر بهینهٔ توابع یادشده در نقطهٔ مصالحه به‌ازای راهبردهای مختلف مدیریت انرژی EVها و FCVها ارائه شده است. در طرح پیشنهادی (راهبرد مدیریت شارژ/دشارژ خودروها)، مقادیر بهینهٔ F_O و F_V به ترتیب در حدود ۱۳۵۳ $ و ۱٤۹/۷۱۵ p.u. است. F_O در نقطهٔ مصالحه نسبت به کمینهٔ مقدار خود ($ ۱۳۳۸/۷) در حدود ۲۰/٤ درصد (۷۰/۲÷(۱۳۳۸/۷ -۱۳۵۳)) فاصله دارد. این مقدار برای F_V در حدود ۳۵ درصد است. طرح توانسته است مقادیری برای توابع هدف به دست آورد که به بهینه‌ترین مقدار خود نزدیک هستند.



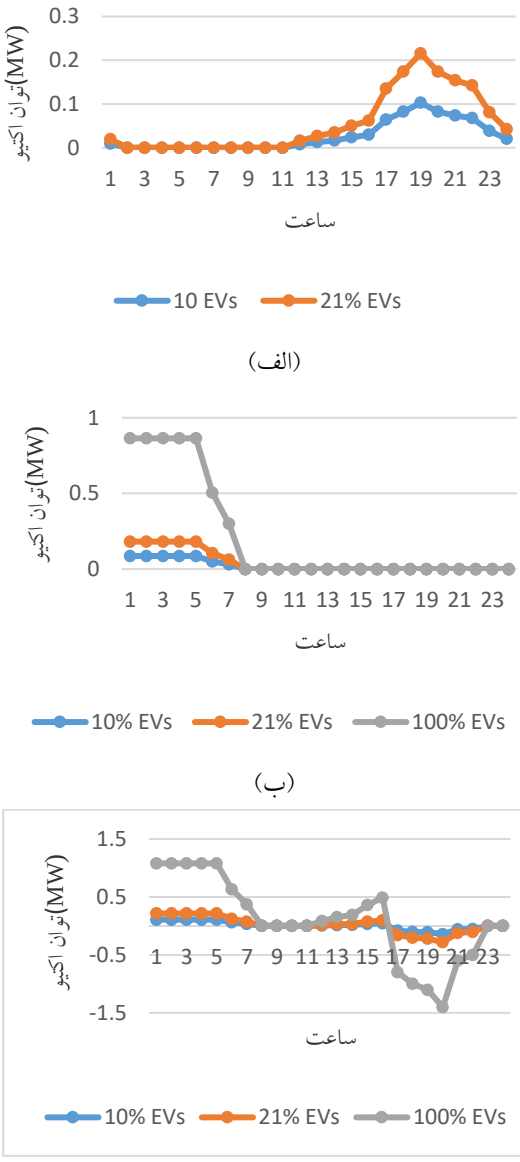
شکل (۲): جبههٔ پارتو طرح پیشنهادی به‌ازای مورد ٤

در جدول (۲)، مقادیر توابع هدف به‌ازای راهبردهای مختلف مدیریت انرژی EVها و FCVها (موارد ۲ الی ٤) ارائه شده است. در روش شارژ غیرهوشمند (مورد ۲)، EVها و FCVها به‌محض اتصال به شبکه عملیات شارژ را انجام می‌دهند. این خودروها توان اکتیوی برابر حداکثر نرخ شارژ خود را از شبکه دریافت می‌کنند. از این رو، بعد از مدت زمان مشخص (مدت شارژ، یعنی تقریباً ۳ ساعت بر اساس جدول (۱))، ذخیره‌ساز در خودروها کاملاً شارژ می‌شود. در ادامه، خودروها توانی از شبکه دریافت نمی‌کنند. در این روش، حداکثر ۲۱ درصد از EVها و FCVها توانسته‌اند توسط شبکه تغذیه شوند؛ زیرا بر اساس بخش ٤-۱ می‌توان بیان کرد بیشترین تعداد خودروها در ساعات پرباری متناظر با تکنیک شارژ غیرهوشمند از شبکه تغذیه می‌شوند. در این شرایط، محدودیت‌های فنی شبکه مانند محدودیت ظرفیت خطوط توزیع از ورود تعداد زیاد خودروها به شبکه جلوگیری می‌کنند. به‌ازای ۲۱ درصد حضور EVها و FCVها، F_O و F_V به ترتیب در حدود ۲۹۱/۳ $ و ۱۵۸/٤۰۲ p.u. است. در راهبرد شارژ هوشمند (یعنی توان اکتیو فقط در مد شارژ خودروها کنترل شود) یا مورد ۳، به‌ازای ۲۱ درصد EVها و FCVها، میزان F_O و F_V به ترتیب در حدود ۲۷۲/۷ $ و ۱۵۱/۸۱۱ p.u. است. از این رو، هزینهٔ شارژ خودروها (تابع انحرافات ولتاژ) در این روش در حدود ٦/٤ درصد (٤/۲ درصد) نسبت به تکنیک شارژ غیرهوشمند کاهش می‌یابد. در تکنیک شارژ هوشمند، ۱۰۰ درصد EVها و FCVها می‌توانند توسط شبکه تغذیه شوند؛ زیرا در این راهبرد توان اکتیو خودروها کنترل می‌شود. از این رو، صاحبان خودروها می‌توانند عملیات شارژ را در ساعات غیربحرانی مانند بازهٔ کم‌باری انجام دهد. تکنیک دیگر برای خودروها راهبرد شارژ/دشارژ هوشمند (مورد ۳) است. در این تکنیک، توان اکتیو EVها و FCVها در دو مد شارژ و دشارژ کنترل می‌شود. به‌ازای ۲۱ دصرد EVها و FCVها، میزان F_O و F_V به ترتیب برابر ۲٦۳/٤ $ و ۱۵۰/۲۰۸ p.u. است. به عبارتی، اهداف اقتصادی خودروها و اهداف فنی ریزشبکه به ترتیب در حدود ۹/٦ درصد و ۵/۲ درصد نسبت به تکنیک شارژ غیرهوشمند ارتقا می‌یابند. به‌ازای ۱۰۰ درصد EVها و FCVها، مشاهده می‌شود F_O و F_V در تکنیک شارژ/دشارژ هوشمند نسبت به روش شارژ هوشمند به ترتیب در حدود ۳ درصد و ۳/٤ درصد کاهش یافت.

جدول (۲): میزان توابع هدف در نقطهٔ مصالحه به‌ازای موارد ۲ الی ٤

مورد	نرخ نفوذ EVها و FCVها	Fo ($)	Fv (p.u.)
٤	٪۱۰۰	۱۳۵۳	۱٤۹/۷۱٥
	٪۲۱	۲٦۳/٤	۱٥۰/۲۰۸
۳	٪۱۰۰	۱۳۹٤/۲	۱٥٤/۹۲٥
	٪۲۱	۲۷۲/۷	۱٥۱/۸۱۱
۲	٪۱۰	۱٤٥/۱	۱٥٥/۲۳۳
	٪۲۱	۲۹۱/۳	۱٥۸/٤۰۲
	>٪۲۱	غیرممکن	

ب) ارزیابی عملکرد EVها و FCVها در ریزشبکه: در شکل‌های (۳) و (٤)، منحنی روزانهٔ توان اکتیو EVها و FCVها به‌ازای تکنیک مختلف مدیریت انرژی خودروها ارائه شده است. در شکل (۳الف)، تغییرات زمانی توان اکتیو EVها در راهبرد شارژ غیرهوشمند ارائه شده است. بر اساس بخش ۱-٤، خودروهای الکتریکی در ساعات ۱۲:۰۰ الی ۲٤:۰۰ وارد شبکه می‌شوند. در تکنیک شارژ غیرهوشمند، خودروها به‌محض اتصال شبکه در حدود ۳ ساعت (بر اساس جدول ۱)، ذخیره‌ساز خود را کاملاً شارژ می‌کنند. پیرو این موضوع، بیشترین تعداد خودروها در ساعات پرباری، ۱۷:۰۰-۲۲:۰۰، از شبکه انرژی دریافت می‌کنند. در این ساعات، به علت انرژی مصرفی زیاد، محدودیت‌های فنی مانند دامنهٔ ولتاژ و توان ظاهری خطوط توزیع در نزدیک‌ترین نقطه به حد مجاز خود کار می‌کنند. از این رو، این محدودیت اجازه نمی‌دهد تعداد زیادی از خودروها توسط شبکه تغذیه شوند. بنابراین، بر اساس شکل (۳الف)، ۲۱ درصد EVها در تکنیک شارژ غیرهوشمند می‌توانند از ریزشبکه تغذیه شوند. در شکل (۳ب)، منحنی روزانهٔ توان اکتیو EVها به ازای تکنیک شارژ هوشمند ترسیم شده است. بر اساس این شکل، به منظور کاهش هزینهٔ شارژ، مالکان خودروها تمایل دارند EVها در ساعات قیمت انرژی ارزان، ۱:۰۰-۷:۰۰، عملیات شارژ را انجام دهند. این بازه متناظر با ساعات کم‌باری است. از این رو، محدودیت‌های فنی ریزشبکه در فاصلهٔ دورتر از حد مجاز خود قرار دارند. این موضوع باعث شده است تمامی EVها (۱۰۰ درصد EVها) بتوانند از شبکه تأمین انرژی شوند. در شکل (۳پ)، نمودار زمانی توان اکتیو EVها به‌ازای راهبرد شارژ/دشارژ هوشمند ارائه شده است. بر اساس این شکل، مشاهده می‌شود مالکان EVها به منظور کاهش هزینهٔ شارژ خود تمایل دارند EVها در ساعات کم‌باری انرژی مصرفی مورد نیاز مسافرت آیندهٔ خود را از شبکه دریافت کنند. علاوه بر این موضوع، EVها در ساعات پرباری، ۱۷:۰۰-۲۲:۰۰، در مد دشارژ قرار می‌گیرند و توان اکتیو به شبکه تزریق می‌کنند. آنها انرژی اولیهٔ ذخیره‌ساز در خود را در این ساعات به شبکه تزریق می‌کنند.



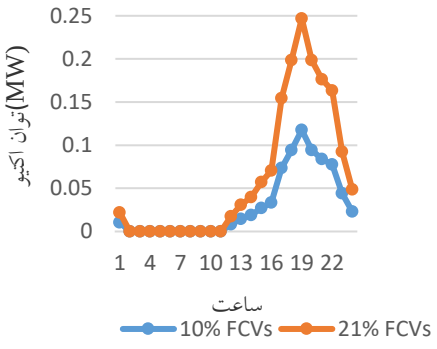
شکل (۳): منحنی روزانهٔ مورد انتظار توان اکتیو EVها برای راهبرد؛ الف) عدم مدیریت شارژ، ب) مدیریت فقط شارژ، پ) مدیریت شارژ/دشارژ

EVها در ساعات ۱۲:۰۰–۱٦:۰۰ در مد شارژ هستند، تا اینکه انرژی دریافتی در این ساعات را در بازهٔ پرباری به شبکه تزریق کنند. این نحوهٔ عملکرد EVها متناظر با کمینه‌سازی Fo و Fv است. با مقایسهٔ شکل‌های (۳ب) و (۳پ)، دیده می‌شود به‌ازای ساعات کم‌باری، انرژی مصرفی بیشتری در تکنیک شارژ/دشارژ هوشمند نسبت به تکنیک شارژ هوشمند از شبکه دریافت می‌شود؛ زیرا در تکنیک شارژ هوشمند، انرژی اولیهٔ EVها مصرف نمی‌شد. از این رو، در این تکنیک لازم است انرژی کمتری در باتری EV ذخیره شود، ولی در روش شارژ/دشارژ هوشمند، انرژی اولیه در ساعات پرباری مصرف می‌شود؛ در نتیجه، EVها در ساعات کم‌باری نیاز به انرژی مصرفی بیشتری دارند تا اینکه باتری خود را پر کنند.

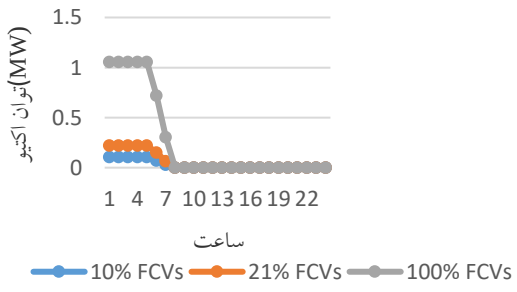
عملکرد FCVها به‌ازای تکنیک‌های شارژ غیرهوشمند، شارژ هوشمند و شارژ/دشارژ هوشمند در شکل (٤) مشخص شده است. با مقایسهٔ شکل‌های (۲) و (۳)، دیده می‌شود عملکرد FCVها همانند EVهاست. برای مثال، بر اساس شکل (٤الف)، در تکنیک شارژ غیرهوشمند، FCVها همانند EVها در ساعات پرباری عملیات شارژ را انجام می‌دهند. در این شرایط، محدودیت‌های فنی اجازه نمی‌دهند تعداد زیادی از FCVها از شبکه تغذیه شوند. بر اساس شکل (٤ب)، در تکنیک شارژ هوشمند، FCVها در ساعات کم‌باری توانسته‌اند عملیات شارژ را انجام دهند؛ زیرا این بازه متناظر با قیمت انرژی ارزان است. همچنین، محدودیت‌های فنی در فاصلهٔ دورتر از حد مجاز خود قرار دارند. در شکل (٤پ)، عملکرد FCVها به‌ازای راهبرد شارژ/دشارژ هوشمند بررسی شده است. همانند EVها، FCVها انرژی مصرفی مورد نیاز مسافرت خود را در ساعات کم‌باری از شبکه دریافت می‌کنند. آنها در ساعات ۱۲:۰۰–۱٦:۰۰ نیز در مد شارژ هستند تا اینکه انرژی دریافتی در این ساعات در بازهٔ پرباری به شبکه تزریق شود.

پ) بررسی وضعیت فنی MG: در شکل‌های (۵) الی (۷)، میزان شاخص‌های بهره‌برداری MG مانند تلفات انرژی مورد انتظار (EEL)[۱۸]، بیشترین افت ولتاژ (UVD)[۱۹]، بیشترین اضافه ولتاژ (UOV)[۲۰]، قابلیت حمل پیک بار (PLCC)[۲۱] و شاخص‌های امنیت ولتاژ مانند کمترین میزان WSI و باس ضعیف به‌ازای موارد مطالعاتی مختلف گزارش شده است.

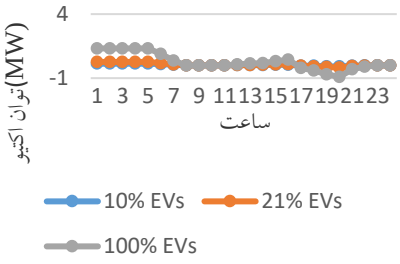
PLCC اشاره به این موضوع دارد که MG قادر است تا چه مقدار پیک بار را تغذیه کند. بر اساس این شکل‌ها، بیشترین تلفات انرژی و افت ولتاژ و کمترین PLCC و WSI در مورد ۱ وجود دارد؛ به طوری که بر اساس شکل (٦)، افت ولتاژ نزدیک به حد مجاز خود، یعنی ۰/۱ p.u. (۰/۹ – ۱) و WSI کمتر از حد مجاز خود، یعنی ۰/۸ p.u. است. در مورد ۲ که خودروها در راهبرد شارژ غیرهوشمند قرار دارند، به‌ازای حضور ۲۱ درصد EVها و FCVها، افزایش ۵ درصدی تلفات انرژی، افزایش ۱۳ درصدی افت ولتاژ و کاهش ٦/٤ درصدی WSI در MG ظاهر می‌شود. دیگر شاخص‌ها بدون تغییر هستند. در مورد ۳ که راهبرد شارژ هوشمند برای EVها و FCVها استفاده می‌شود، به‌ازای حضور ۲۱ درصد خودروها، تلفات انرژی در حدود ۲/۷ درصد افزایش دارد و دیگر شاخص‌ها بدون تغییر هستند. به عبارتی، شارژ خودروها در ساعات کم‌باری به حفظ شاخص‌های فنی نسبت به مورد ۱ منجر می‌شود. این موضوع حتی در حضور ۱۰۰ درصد EVها و FCVها نیز برقرار است. فقط و فقط، تلفات انرژی در حدود ۱۸/٤ درصد نسبت به مورد ۱ افزایش دارد؛ زیرا در مورد ۳، خودروها فقط مصرف‌کنندهٔ انرژی هستند.



(الف)



(ب)



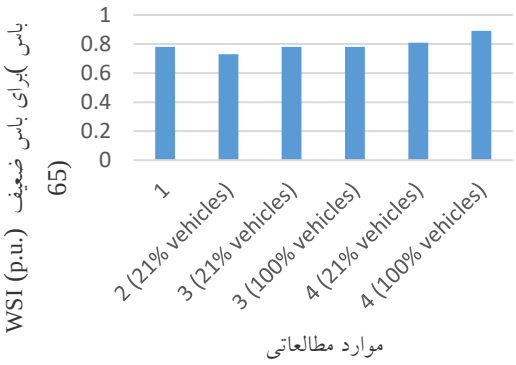
(پ)

شکل (٤): منحنی روزانهٔ مورد انتظار توان اکتیو FCVها برای راهبرد؛ الف) عدم مدیریت شارژ، ب) مدیریت فقط شارژ، پ) مدیریت شارژ/دشارژ

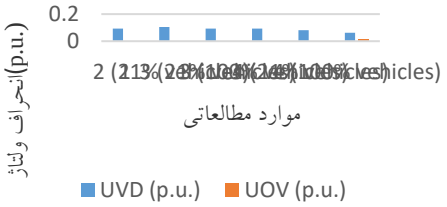
در مورد ٤، راهبرد شارژ/دشارژ هوشمند EVها و FCVها استفاده می‌شود. با افزایش ۲۱ درصد خودروها در مورد ٤ نسبت به مورد ۱، تلفات انرژی در حدود ۱/۲ درصد افزایش دارد، افت ولتاژ در حدود ۱۲ درصد کاهش دارد، اضافه ولتاژ بدون تغییر است، PLCC و WSI به ترتیب در حدود ۲٦/۳ درصد و ۳/۸ درصد افزایش دارند. با افزایش تعداد EVها و FCVها در MG (حضور ۱۰۰ درصد خودروها) به‌ازای مورد ٤، افت ولتاژ در حدود ۳۱/۵ درصد نسبت به مورد ۱ کاهش دارد، WSI و PLCC به ترتیب در حدود ۱٤/۱ درصد و ۳٤/۲ درصد افزایش دارند. البته، در این شرایط، تلفات انرژی در حدود ۱۰/۳ درصد افزایش دارد و بیشترین اضافه ولتاژ در حدود ۰/۰۱۳ p.u. در MG ظاهر می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری‌ها

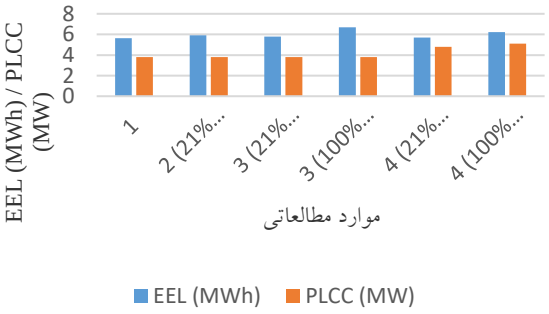
در این مقاله، مدیریت انرژی پارکینگ خودروهای الکتریکی و ایستگاه هیدروژنی خودروهای پیل سوختی در ریزشبکه با در نظر گرفتن اهداف اقتصادی مالکان خودروها و اهداف بهره‌برداری و امنیت ولتاژ اپراتور سیستم توزیع ارائه شد. طرح پیشنهادی مبنی بر بهینه‌سازی دوهدفه بود. تابع هدف اول شامل کمینه‌سازی هزینهٔ انرژی مورد انتظار خودروهای الکتریکی و پیل سوختی بود و تابع هدف دوم کمینه‌سازی انحرافات ولتاژ را به عهده داشت. این مسأله دارای قیود پخش توان AC، محدودیت‌های بهره‌برداری و امنیت ولتاژ، مدل بهره‌برداری پارکینگ خودروهای الکتریکی و ایستگاه هیدروژنی خودروهای پیل سوختی است. در ادامه، از تکنیک قید ε برای استخراج مدل تک‌هدفه استفاده شد. همچنین، از بهینه‌سازی تصادفی برای مدل‌سازهای عدم قطعیت‌های بار، قیمت انرژی و نرخ شارژ و دشارژ خودروها، و انرژی اولیه و نهایی خودروها استفاده شد. بر اساس نتایج عددی، طرح پیشنهادی قادر است در نقطهٔ مصالحه بین اهداف اقتصادی مالکان خودروها و اهداف فنی ریزشبکه مقادیری برای توابع هدف به دست آورد که نزدیک به بهینه‌ترین مقدار خود باشند؛ به طوری که تابع هزینهٔ شارژ خودروها و تابع انحرافات ولتاژ در نقطهٔ مصالحه به ترتیب در حدود ۲۰/٤ درصد و ۳۵ درصد از کمترین مقدار خود فاصله دارند. این مقاله سه نوع مدیریت انرژی خودروها، یعنی راهبرد شارژ غیرهوشمند، تکنیک شارژ هوشمند و تکنیک شارژ/دشارژ هوشمند را بررسی کرد. خودروها به‌ازای راهبرد شارژ غیرهوشمند (هوشمند) در ساعات پرباری (کم‌باری) انرژی مصرفی خود را از ریزشبکه دریافت می‌کنند. از این رو، محدودیت‌های فنی شبکه از تغذیهٔ زیاد خودروها در راهبرد شارژ غیرهوشمند جلوگیری می‌کنند؛ به طوری که در این شرایط، حداکثر ۲۱ درصد خودروهای الکتریکی و پیل سوختی توسط شبکه تغذیه می‌شوند، ولی در راهبرد شارژ هوشمند، ۱۰۰ درصد خودروها می‌توانند توسط شبکه تغذیه شوند. در تکنیک شارژ/دشارژ هوشمند، خودروها انرژی مصرفی مورد نیاز خود را در ساعات کم‌باری از ریزشبکه دریافت می‌کنند.



شکل (۵): میزان WSI در موارد مختلف



شکل (۶): میزان بیشترین افت ولتاژ و اضافه ولتاژ در موارد مختلف



شکل (۷): میزان تلفات انرژی و PLCC برای موارد مختلف

در ساعات میان‌باری نیز خودروهای الکتریکی و پیل سوختی در مد شارژ قرار می‌گیرند، تا اینکه خودروها انرژی دریافتی از شبکه در این ساعات را در بازهٔ پرباری به ریزشبکه تزریق کنند. این نحوهٔ عملکرد خودروها باعث شده است ۱۰۰ درصد خودروها بتوانند توسط ریزشبکه تغذیه شوند. علاوه بر این، این تکنیک باعث کاهش ۳۱/۵ درصد افت ولتاژ نسبت به تحلیل پخش بار ریزشبکه می‌شود و شاخص امنیت ولتاژ و قابلیت حمل پیک بار در این شرایط به ترتیب در حدود ۱۴/۱ درصد و ۳۴/۲ درصد نسبت به مطالعات پخش بار ارتقا می‌یابند. در این شرایط، تلفات انرژی در حدود ۱۰/۳ درصد افزایش دارد که ناشی از انرژی مصرفی مورد نیاز خودروهاست. در راهبرد شارژ غیرهوشمند، شاخص‌های یادشده نسبت به ریزشبکهٔ بدون خودروها تضعیف می‌شوند، ولی در راهبرد شارژ هوشمند، بیشتر شاخص‌های فنی به‌جز تلفات انرژی بدون تغییر هستند. در این راهبرد، تلفات انرژی در حدود ۱۸/۴ درصد افزایش دارد، ولی راهبرد شارژ/دشارژ هوشمند به کاهش ۸/۱ درصد تلفات انرژی نسبت به تکنیک شارژ هوشمند منجر می‌شود.

علائم

متغیرها

E^{EV}, E^{FCV}	انرژی (MWh) ذخیره‌شده در EVها و FCVهای تجمیع‌شده در پارکینگ
Fo	تابع هزینهٔ انرژی EVها و FCVها ($)
F_V	تابع پروفیل (انحرافات) ولتاژ (p.u)
P^{CH}, P^{DCH}	توان اکتیو (MW) EVها در مد شارژ و دشارژ
P^{cPE}, P^{dPE}	توان اکتیو پیل سوختی غشای مبادلهٔ پروتون (PEMFC) در مد مصرف‌کننده و تولیدکننده (MW)
P^{DL}, Q^{DL}	توان اکتیو (MW) و راکتیو (MVAr) عبوری از خط توزیع
P^{DP}, Q^{DP}	توان اکتیو (MW) و راکتیو (MVAr) عبوری از پست توزیع
P^{EV}	توان اکتیو (MW) EVها از دیدگاه ریزشبکه
P^{PE}	توان اکتیو PEMFC (MW)
V, α	دامنه (p.u.) و زاویهٔ (رادیان) ولتاژ
W	بدترین شاخص امنیت برحسب p.u.

پارامترها

b^{DL}, g^{DL}	سوسپتانس و رسانایی در خط توزیع (p.u.)
CR^{EV}, DR^{EV}	نرخ شارژ و دشارژ در تجمیع EVها (MW)
CR^{FCV}, DR^{FCV}	نرخ شارژ و دشارژ در تجمیع FCVها (MW)
E^{eA}, E^{eD}	انرژی اولیه در لحظهٔ رسیدن و انرژی نهایی در لحظهٔ عزیمت برابر EVها (MWh)
E^{fA}, E^{fd}	انرژی اولیه در لحظهٔ رسیدن و انرژی نهایی در لحظهٔ عزیمت برابر FCVها (MWh)
J^{DL}	ماتریس تلاقی باس و خط توزیع در MG
P^{L}, Q^{L}	توان اکتیو (MW) و راکتیو (MVAr) بارهای پسیو
$\overline{S}^{DL}$	ظرفیت خط توزیع (MVA)
$\overline{S}^{DP}$	ظرفیت پست توزیع (MVA)
$\underline{V}$,$\overline{V}$	حداقل و حداکثر مقدار مجاز دامنهٔ ولتاژ (p.u.)
V_r	دامنهٔ ولتاژ در باس مرجع (p.u.)
$\underline{W}$	حداقل مقدار مجاز WSI (p.u.)
η^{eCH}, η^{eDCH}	راندمان EVها در مد شارژ و دشارژ
η^{fCH}, η^{fDCH}	راندمان FCVها در مد شارژ و دشارژ
λ	قیمت انرژی ($/MWh)
π	احتمال سناریو

اندیس‌ها

h	ساعت بهره‌برداری

k	اندیس کمکی متناظر با باس	
n	باس	
p	باس ضعیف دارای کمترین دامنهٔ ولتاژ	
$p-1$	باس بالادست باس ضعیف	
r	باس مرجع	
s	سناریو	

زیرنویس‌ها

[1] Electric vehicles (EVs)
[2] Fuel cell vehicles (FCVs)
[3] Plug-in hybrid electric vehicle (PHEV)
[4] Battery electric vehicle (BEV)
[5] Microgrid (MG)
[6] Power to hydrogen (P2H)
[7] Vehicle-to-grid (V2G)
[8] Energy management system
[9] Distribution system operator (DSO)
[10] Micro-grid operator (MGO)
[11] Proton-exchange membrane fuel cell (PEMFC)
[12] Hydrogen to power (H2P)
[13] Worst security index (WSI)
[14] Battery capacity (BC)
[15] State of charge (SOC)
[16] Hydrogen tank capacity (HTC)
[17] Pareto optimization
[18] Expected energy loss (EEL)
[19] Upper voltage drop (UVD)
[20] Upper over-voltage (UOV)
[21] Peak load carrying capacity (PLCC)

مراجع

[1] S. Pirouzi, J. Aghaei, "Active and Reactive Power Management of Smart Distribution Network Using Electric Vehicles as Mixed Integer Linear Programming Problem", *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. *8*, *No.* 2, pp. 1-12, 2017. https://doi.org/10.22108/isee.2017.21703 [In Persian]

[2] S. Pirouzi, "Stochastic Planning of the Hybrid System with Wind Turbine and Biomass Energy Unit System besides Battery and Electric Vehicles Parking Lot Considering Storage Degradation", *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. *14*, *No.* 2, pp. 111-126, 2023. https://doi.org/10.22108/isee.2022.134774.1580 [In Persian]

[3] S. Shafiee, S. M. Fotuhi-Firuzabad, M. Rastegar, "Investigating the impacts of plug-in hybrid electric vehicles on power distribution systems", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 4, No. 3, pp. 1351-1360, 2013. https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2251483

[4] S. Pirouzi, J. Aghaei, "Mathematical modeling of electric vehicles contributions in voltage security of smart distribution networks", Simulation, Vol. 95, No. 5, pp. 429-439, 2019. https://doi.org/10.1177/0037549718778766

[5] X. Lin, J. Li, W. Zhong, X. Lin, W. Wei, H. Zhang, "Multi-segment flexibility-based optimization scheduling for integrated energy systems coupled with electric and hydrogen fuel cell vehicles", Applied Energy, Vol. 402, pp. 126957, 2026. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126957

[6] A. Joseph, S. S. Sivaraju, "Enhancing electric vehicle charging safety and efficiency through hybrid charging systems and intelligent management strategies", Journal of Energy Storage, Vol. 118, pp. 116073, 2025. https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116073

[7] K. Kioumarsi, A. Bolurian, "Optimal energy management for electric vehicle charging parking lots with considering renewable energy resources and accurate battery characteristic modeling", Journal of Energy Storage, Vol. 107, pp. 114914, 2025. https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114914

[8] H. Dong, Z. Tian, K. Liao, J. Yang, J. W. Spencer, "Three-Stage Energy Management of Urban Rail Transit-based Microgrid and EV Charging Station with V2T Technology", IEEE Transactions on Transportation Electrification, Vol. 11, No. 2, pp. 1-16, 2025. https://doi.org/10.1109/TTE.2025.3543222

[9] M. Karthikeyan, D. Manimegalai, R. Karthikeyan, "Enhancing voltage control and regulation in smart micro-grids through deep learning-optimized EV reactive power management", Energy Reports, Vol. 13, pp. 1095-1107, 2025. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.12.072

[10] J. Sora, I. Serban, D. Petreus, "Enhancing microgrid operation through electric vehicle integration: A survey", IEEE Access, Vol. 10, No. 2, pp. 1-14, 2024. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3397587

[11] R. Sathishkumar, M. Venkateswaran, P. Deepamangai, P. Soundar Rajan, "An efficient power management control strategy for grid-independent hybrid renewable energy systems with hybrid energy storage: Hybrid approach", Journal of Energy Storage, Vol. 95, pp. 112325, 2024. https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112685

[12] P. García-Triviño, J. P. Torreglosa, F. Jurado, L. M. Fernández Ramírez, "Optimised operation of power sources of a PV/battery/hydrogen-

Yousefi, G. Mokryani, “A robust optimization approach for active and reactive power management in smart distribution networks using electric vehicles”, IEEE Systems Journal, Vol. 12, No. 3, pp. 2699-2710, 2018. https://doi.org/10.1109/JSYST.2017.2716980

[21] R. Homayoun, B. Bahmani-Firouzi, T. Niknam, “Multi-objective operation of distributed generations and thermal blocks in microgrids based on energy management system”, IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 15, No. 9, pp. 1451-1462, 2021. https://doi.org/10.1049/gtd2.12112

[22] E. Faraji, A. R. Abbasi, S. Nejatian, M. Zadehbagheri, H. Parvin, “Probabilistic planning of the active and reactive power sources constrained to securable-reliable operation in reconfigurable smart distribution networks”, Electric Power Systems Research, Vol. 199, pp. 107457, 2021. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107457

[23] O. S. Ijaodola, Z. El-Hassan, E. Ogungbemi, F. N. Khatib, T. Wilberforce, J. Thompson, A. G. Olabi, “Energy efficiency improvements by investigating the water flooding management on proton exchange membrane fuel cell (PEMFC)”, Energy, Vol. 179, pp. 246-267, 2019. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.074

[24] A. Kavousi-Fard, A. Khodaei, “Efficient integration of plug-in electric vehicles via reconfigurable microgrids”, Energy, Vol. 111, pp. 653-663, 2016. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.018

[25] A. F. A. Kadir, A. Mohamed, H. Shareef, M. Z. C. Wanik, “Optimal placement and sizing of distributed generations in distribution systems for minimizing losses and THD_v using evolutionary programming”, Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, Vol. 21, No. 8, pp. 2269-2282, 2013. https://doi.org/10.3906/elk-1205-35

[26] Generalized Algebraic Modeling Systems (GAMS). [Online]. Available: http://www.gams.com.

powered hybrid charging station for electric and fuel cell vehicles”, IET Renewable Power Generation, Vol. 13, No. 16, pp. 3022-3032, 2019. https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.0766

[13] H. Mehrjerdi, “Off-grid solar-powered charging station for electric and hydrogen vehicles including fuel cell and hydrogen storage”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 44, No. 23, pp. 11574-11583, 2019. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.158

[14] M. Norouzi, J. Aghaei, T. Niknam, M. Alipour, S. Pirouzi, M. Lehtonen, “Risk-averse and flexi-intelligent scheduling of microgrids based on hybrid Boltzmann machines and cascade neural network forecasting”, Applied Energy, Vol. 348, pp. 121573, 2023. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121573

[15] J. Zhang, H. Wu, E. Akbari, L. Bagherzadeh, S. Pirouzi, “Eco-power management system with operation and voltage security objectives of distribution system operator considering networked virtual power plants with electric vehicles parking lot and price-based demand response”, Computers and Electrical Engineering, Vol. 121, pp. 109895, 2025. https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2024.109895

[16] S. Lee, J. Jung, “Improving distribution system flexibility using electric vehicles under the distributed energy resource management system framework”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 226, pp. 116292, 2026. https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116292

[17] H. Shayeghi, B. Mohamadi, A. Younesi, S. Sadr, P. Siano, “Cooperative stochastic energy management of multi smart home microgrids joint with modern distribution network”, Scientific Reports, Vol. 16, No. 1, pp. 4667, 2026. https://doi.org/10.1038/s41598-025-34945-w

[18] A. Varone, G. Porruvecchio, A. Romanino, “Smart charge management of Electric Vehicle fleets from Renewable Energy through innovative deferring strategies”, Energy Conversion and Management, Vol. 350, pp. 120957, 2026. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120957

[19] H. Kiani, K. Hesami, A. Azarhooshang, S. Pirouzi, S. Safaee, “Adaptive robust operation of the active distribution network including renewable and flexible sources”, Sustainable Energy, Grids and Networks, Vol. 26, pp. 100476, 2021. https://doi.org/10.1016/j.segan.2021.100476

[20] S. Pirouzi, J. Aghaei, M. A. Latify, G. R.