

بررسی تأثیر کاهش محافظه کارانه ولتاژ بر برنامه ریزی بهره برداری بهینه شبکه توزیع هوشمند در حضور خودروهای الکتریکی

پوریا رضایی^۱، وحید تلاوت^{۲*}، سجاد گلشن نواز^۳، امیر حمیدی^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

st_p.rezaie@urmia.ac.ir

^۲ استادیار گروه مهندسی برق قدرت، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

v.talavat@urmia.ac.ir

^۳ استادیار گروه مهندسی برق قدرت، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

s.golshannavaz@urmia.ac.ir

^۴ دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

st_a.hamidi@urmia.ac.ir

چکیده: در شبکه های توزیع شعاعی، به منظور تأمین ولتاژ با کیفیت به مشترکین انتهایی در محدوده مجاز بهره برداری، دامنه ولتاژ در محل پست توزیع و گره های ابتدایی فیدر در مقادیر بالاتری از مقدار نامی تنظیم می گردد. با توجه به اینکه مقدار توان اکتیو و راکتیو مصرفی بارها وابسته به ولتاژ گره مربوطه است، این موضوع در گره های ابتدایی فیدرهای شعاعی که با افزایش ولتاژ بهره برداری از مقدار نامی شبکه مواجه می شوند، منجر به افزایش توان مصرفی مشترکین و هزینه بهره برداری می گردد. بر این اساس، این مقاله به ارائه یک سیستم مدیریت توزیع مبتنی بر کاهش محافظه کارانه ولتاژ به منظور بهره برداری بهینه شبکه و کاهش توان مصرفی بارها می پردازد. در روش ارائه شده، به منظور بررسی تأثیر کاهش محافظه کارانه ولتاژ، مدل واقعی بارها در نظر گرفته می شود. مدل ارائه شده برنامه ریزی همزمان توان اکتیو و راکتیو اینورتر تجمیع کننده خودروی الکتریکی را مد نظر قرار داده و با کنترل ولتاژ/توان راکتیو توزیع شده، به دنبال کنترل مؤثر ولتاژ در طول فیدر است. از این طریق، دامنه ولتاژ در گره های ابتدایی کاهش یافته و در نتیجه، توان مصرفی این گره ها و هزینه بهره برداری شبکه کاهش می یابد. همچنین، بهبود در شاخص های فنی بهره برداری از شبکه نیز مدنظر قرار دارد. بدین منظور، تلفات توان در فیدرهای توزیع نیز مورد توجه قرار گرفته و با توسعه مدلی چندهدفه بهره برداری بهینه شبکه حاصل می گردد. روش ارائه شده بر روی یک شبکه توزیع نمونه شبیه سازی شده و نتایج به دست آمده مورد تحلیل قرار گرفته اند.

واژه های کلیدی: شبکه توزیع هوشمند، سیستم مدیریت توزیع، کاهش محافظه کارانه ولتاژ، خودروی الکتریکی، برنامه ریزی چندهدفه.

۱. مقدمه

در مقادیر پایین محدوده استانداردهای بین المللی همچون مؤسسه استاندارد ملی آمریکا (ANSI^۵) [۶] یا مؤسسه استاندارد کانادا (CSA^۶) [۷] حفظ کند، به گونه ای که عملکرد تجهیزات مختل نشود. هدف روش CVR دست یابی به صرفه جویی انرژی بدون ایجاد اختلال در تأمین توان مشترکین است. برای مثال، با توجه به اینکه محدوده تغییرات ولتاژ برای تجهیزات خانگی طبق ANSI در محدوده ۱۱۴-۱۲۶ ولت بر مبنای ولتاژ ۱۲۰ ولت می باشد، CVR ممکن است سطح ولتاژ مشترکین را از ۱۲۱ ولت به ۱۱۸ ولت کاهش دهد و این کاهش ولتاژ در تأمین توان مشترکین کمترین تأثیر را می گذارد [۸]. در مرجع [۹] نویسندگان روشی برای مدیریت انرژی جهت کاهش میزان توان مصرفی کل گره های شبکه ارائه داده اند. در این مرجع، کنترل ولتاژ توسط تپ چنجر قابل عمل زیر بار (ULTC^۷) و تنظیم کننده های ولتاژ (VRS^۸) در فیدرهای شبکه به نحوی صورت گرفته است که توان اکتیو مصرفی بارهای شبکه به حداقل مقدار ممکن برسد. به عنوان راه حلی دیگر، کنترل شارش توان راکتیو برای کنترل ولتاژ گره های شبکه یکی دیگر از روش های رایج است. به علت شارش توان راکتیو در فیدرهای توزیع، ولتاژ محسوسی روی راکتانس خطوط افت می نماید. بدین منظور برای بهبود منحنی ولتاژ، کنترل ولتاژ و تنظیم میزان شارش توان راکتیو بایستی به صورت به هم پیوسته مورد مطالعه قرار گیرد. روش مورد نظر را کنترل ولتاژ/توان راکتیو (VVC^۹) می نامند [۱۰-۱۱]. با استفاده از ادوات کنترل VVC مانند بانک های خازنی، ترانسفورماتورهای تپ چنجر دار و تنظیم کننده های ولتاژ در ابتدای شبکه یا میان فیدرهای توزیع سعی می شود تا با بهینه سازی ولتاژ/توان راکتیو، بهره برداری شبکه بهبود یافته و تلفات شبکه کاهش یابد. همچنین این روش باعث بهبود منحنی ولتاژ گره ها با تزریق یا جذب توان راکتیو به شبکه و تنظیم ولتاژ گره ها در محدوده مجاز می شود [۱۲]. با توجه به رشد سریع در حوزه تکنولوژی اطلاعات و ارتباطات و بهره گیری از کتورهای هوشمند، امکان تبادل داده دوطرفه بین بهره بردار و تجهیزات شبکه به منظور دست یابی به کنترل کارآمد شبکه فراهم شده است. در این چنین بستری پایش مصرف توان و پیاده سازی برنامه های مدیریت انرژی مانند بهینه سازی ولتاژ/توان راکتیو به سهولت انجام می گیرد [۱۳].

با توجه به روند رو به رشد استفاده از بارهای جدید همچون خودروهای الکتریکی (EVs^{۱۰})، چالش ها و فرصت های جدیدی برای

تأثیرات منفی زیست محیطی افزایش مصرف انرژی در سال های اخیر، موجب ایجاد نگرانی هایی برای محققان شده است. در این میان، پیشرفت روزافزون تکنولوژی های شبکه هوشمند، تأثیرات قابل توجهی روی بهره برداری از تجهیزات شبکه قدرت و بار مشترکین گذاشته است [۱]. سیستم قدرت از سه قسمت اصلی شامل تولید، انتقال و توزیع تشکیل شده است که در این بین، بیشترین تمرکز مفاهیم شبکه هوشمند بر روی بهره برداری از سیستم توزیع بوده است؛ به نحوی که به منظور مدیریت مناسب انرژی و بهبود کیفیت توان تحویلی به مشترکین سیستم توزیع نیازمند توجه بیشتری است [۲]. استفاده از فناوری هایی مانند کتورهای اندازه گیری هوشمند (AMI^۱)، تولیدات پراکنده (DG^۲) و سیستم مدیریت توزیع (DMS^۳) موجب افزایش کارآمدی و قابلیت اطمینان شبکه توزیع می گردد و عمل برق رسانی با کارایی اقتصادی و فنی بهتری انجام می گیرد [۳-۱].

با توجه به اینکه در شبکه های قدرت، موضوع کیفیت توان تحویلی به انواع مختلف مصارف خانگی، تجاری و صنعتی از جایگاه ویژه ای برخوردار است، تحلیل و بررسی ولتاژ تحویلی به مشترکین، همواره به عنوان یکی از مهم ترین پارامترهای کیفیت توان مورد توجه محققان و کارشناسان صنعت برق بوده است. به طور کلی، محدوده ولتاژ مشخصی برای عملکرد ایمن تجهیزات الکتریکی مشخص می شود، اما به علت افت ولتاژهای متفاوت در هر بخش از شبکه، به آسانی نمی توان سطح ولتاژهای یکسان به مشترکین ارائه داد. به همین دلیل سطح ولتاژ مورد نیاز گره های مختلف را می توان با روش های کنترل ولتاژ تأمین نمود. از طرف دیگر، به دلیل اینکه بحث صرفه جویی انرژی و منابع ذخیره انرژی در سیستم های توزیع، از مهم ترین دغدغه های اقتصادی شرکت های توزیع به شمار می رود، محققان روش های نوینی را برای مدیریت مصرف انرژی تعبیه نموده اند [۴-۵]. محققان در [۴] مدیریت مصرف انرژی بارهای شبکه را برای به حداقل رساندن میزان تولید گازهای آلاینده به کار گرفته اند. در [۵] نیز از برنامه های پاسخگویی بار برای کاهش میزان توان مصرف شده روزانه شبکه توزیع بهره گیری شده است. علاوه بر این مطالعات، یکی دیگر از جدیدترین روش های مدیریت مصرف انرژی در شبکه توزیع، کاهش محافظه کارانه ولتاژ (CVR^۴) است. در این روش با کاهش ولتاژ می توان به کاهش مصرف انرژی دست یافت؛ بدین صورت که این روش سعی می کند ولتاژ مشترکین را

5. American National Standards Institute
6. Canadian Standards Association
7. Under-Load Tap Changer
8. Voltage Regulators
9. Volt/VAr Control
10. Electric Vehicles

1. Advanced Metering Infrastructure
2. Distributed Generation
3. Distribution Management System
4. Conservative Voltage Reduction

است. به منظور در نظر گرفتن شاخص‌های اقتصادی و فنی، مدل ارائه شده به شکل چندهدفه توسعه داده می‌شود و کارکرد خودروهای الکتریکی در کنترل ولتاژ و کاهش هزینه بهره‌برداری از شبکه ارزیابی می‌گردد.

۲. سیستم مدیریت توزیع پیشنهادی

بهره‌گیری از CVR در برنامه‌ریزی بهره‌برداری از شبکه توزیع می‌تواند به تأثیرات مختلفی بینجامد. از دید کلی در این مطالعه، سه رویکرد متفاوت در توسعه مدل پیشنهادی برای مدیریت شبکه توزیع در نظر گرفته می‌شود. در ابتدا، بهره‌گیری از CVR، تأثیر کارکرد متغیرهای کنترلی شامل برنامه‌ریزی هماهنگ خودروها، موقعیت تپ ترانسفورماتور و برنامه‌ریزی تولیدات پراکنده در کاهش تلفات اهمی شبکه از یک سو و کاهش توان مصرفی کل بارهای شبکه از سوی دیگر مطالعه می‌گردد تا دید مناسبی از تأثیرپذیری این دو رویکرد حاصل آید. سپس به‌عنوان رویکرد اصلی، مدلی برای مدیریت شبکه توزیع برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از آن ارائه می‌گردد که در آن، توجه مناسبی به هر دو رویکرد قبلی انجام می‌گیرد. در این راستا، مدل ریاضی روش پیشنهادی، توابع هدف و قیود موجود در مسئله در بخش بعدی با جزئیات ارائه می‌شود.

۱.۲. مدل‌سازی بار و تجهیزات مختلف شبکه

۱.۱.۲. مدل ریاضی بار

بایستی توجه داشت که اساس مفهوم کاهش محافظه‌کارانه ولتاژ بر مبنای مدل‌سازی دقیق بار و بیان وابستگی آن به ولتاژ گره متصل است. به دلیل وابستگی توان اکتیو و راکتیو مصرفی هر گره به ولتاژ آن، از این مدل اغلب به منظور مطالعه و کنترل دقیق و واقعی تر ولتاژ/توان راکتیو استفاده می‌شود [۲۳]. این مدل در واقع به شکل چندجمله‌ای استاتیک می‌باشد و تحت عنوان مدل زیرنویس شناخته می‌شود که در روابط (۱) و (۲) ارائه شده است. در این نوع بیان، هر بار ترکیبی از بخش‌های امپدانس ثابت، جریان ثابت و توان ثابت است و بر اساس مشخصات ذاتی آن بیان می‌شود.

$$P_{i,t}^D = P_{i,t}^{D_0} \left[K_p^Z \left(\frac{V_{i,t}}{V_0} \right)^2 + K_p^I \left(\frac{V_{i,t}}{V_0} \right) + K_p^P \right] \quad (1)$$

به نحوی که

$$K_p^Z + K_p^I + K_p^P = 1$$

$$Q_{i,t}^D = Q_{i,t}^{D_0} \left[K_Q^Z \left(\frac{V_{i,t}}{V_0} \right)^2 + K_Q^I \left(\frac{V_{i,t}}{V_0} \right) + K_Q^Q \right] \quad (2)$$

به نحوی که

$$K_Q^Z + K_Q^I + K_Q^Q = 1$$

شبکه‌های توزیع در حوزه کنترل ولتاژ و توان راکتیو فراهم شده است. تحقیقات سازمان انرژی الکتریکی اروپا نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۲۰ میلادی، سهم خودروهای الکتریکی از کل خودروهای جهان به ۳۰٪ خواهد رسید که مقدار قابل توجهی را به خود اختصاص داده است [۱۴]. تأثیر خودروهای الکتریکی در شبکه‌های توزیع در مطالعات مختلفی مورد بررسی واقع شده است. این مطالعات به صورت عمده درباره اثر شارژ خودروهای الکتریکی روی شبکه توزیع انجام گرفته‌اند [۱۵-۱۶]. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که شارژ ناهماهنگ خودروها موجب تضعیف شاخص‌های عملکرد بهینه شبکه مانند کیفیت ولتاژ و تلفات شبکه می‌شود. شارژ ناهماهنگ و غیرکنترل‌شده این خودروها می‌تواند منجر به وقوع تراکم و مشکلات فنی در فیدرهای توزیع شود. در تقابل با این وضعیت، شارژ هوشمند این خودروها مطرح شده است که عمده مشکلات ذکر شده را برطرف می‌کند [۱۷]. برای نمونه، برخی از محققان، روش‌های مختلف شارژ هماهنگ یا کنترل‌شده خودروهای الکتریکی را برای بهینه‌سازی عملکرد شبکه و کمینه کردن تلفات فیدرهای توزیع ارائه کرده‌اند [۱۸-۱۹]. اخیراً استفاده از قابلیت‌های جانبی خودروهای الکتریکی نیز به عنوان روشی قابل اتکا توسط محققان پیشنهاد شده است. استفاده از خودروهای الکتریکی به عنوان بارهای پاسخگو جهت مدیریت مصرف انرژی در مرجع [۲۰] پیشنهاد شده است. مطالعات اخیر [۲۱-۲۲] نشان می‌دهد که با بهره‌گیری از اینورتر سیستم شارژ باتری، خودروهای الکتریکی قادر به تزریق یا جذب توان راکتیو به شبکه و در نتیجه مشارکت در کنترل ولتاژ آن می‌باشند.

در روش‌های نوین مدیریت انرژی که بر پایه قابلیت جذب یا تزریق توان راکتیو خودروهای الکتریکی است، می‌توان کنترل ولتاژ گره‌های شبکه را به صورت کارتری انجام داد. به منظور بهینه‌سازی مصرف توان بر اساس مفهوم CVR، استفاده از این قابلیت جانبی خودروهای الکتریکی (مشارکت در کنترل ولتاژ و توان راکتیو)، موجب کاهش بیش از پیش هزینه‌های بهره‌برداری می‌گردد. با بهره‌گیری از قابلیت جذب توان راکتیو توسط اینورتر خودرو (حالت سلفی) مقدار بیشبود ولتاژ در گره‌های ابتدایی شبکه را می‌توان به شکل محافظه‌کارانه‌ای کاهش داد و مفهوم CVR را عملیاتی نمود. همچنین با تزریق توان راکتیو (حالت خازنی) به گره‌های موجود در انتهای فیدرهای شعاعی، می‌توان دامنه ولتاژ را در این گره‌ها افزایش داد. در این میان، شارش توان راکتیو در فیدرهای توزیع می‌تواند شبکه را با چالش افزایش تلفات توان مواجه کند. بر اساس نکات ارائه شده، مطالعه پیش رو در صدد ارائه مدلی کارآمد برای برنامه‌ریزی بهره‌برداری شبکه توزیع هوشمند مبتنی بر CVR و در حضور خودروهای الکتریکی برآمده

منابع در شبکه لحاظ می گردد. برای مدل سازی این منابع روابط (۶) تا (۹) در نظر گرفته می شود.

$$(P_{i,g,t}^{DG})^2 + (Q_{i,g,t}^{DG})^2 \leq (S_{i,g,t}^{DG})^2 \quad (6)$$

$$PF_{i,g,t}^{DG} = \frac{P_{i,g,t}^{DG}}{\left((P_{i,g,t}^{DG})^2 + (Q_{i,g,t}^{DG})^2 \right)^{1/2}} \quad (7)$$

$$PF_{i,g,t}^{DG} \geq PF_{i,g,t}^{DG, \min} \quad (8)$$

(۹) $C_{p,i,g,t}^{DG} = w_{i,g,t} a_g + b_g P_{i,g,t}^{DG} + c_g (P_{i,g,t}^{DG})^2$ در این روابط، $P_{i,g,t}^{DG}$ و $Q_{i,g,t}^{DG}$ به ترتیب توان های اکتیو، راکتیو و ضریب توان، $PF_{i,g,t}^{DG}$ حداقل ضریب توان و $w_{i,g,t}$ نیز متغیر باینری نشان دهنده وضعیت روشن یا خاموش بودن واحد تولید پراکنده g -ام در گره i و در زمان t است. $C_{p,i,g,t}^{DG}$ تابع هزینه تولید توان اکتیو واحد تولید پراکنده مطابق با رابطه (۹)، a_g و b_g و c_g ضرایب ثابت تابع هزینه و زیرنویس p بیانگر توان اکتیو است.

۴.۱.۲. ترانسفورماتور تپ چنجر دار

برای مدل سازی ترانسفورماتور تپ چنجر دار در شبکه، روابط (۱۰) تا (۱۱) در نظر گرفته می شود.

$$V_{s,t} = V_{ref} + \Delta V TS_t \quad (10)$$

$$TS_{\min} \leq TS_t \leq TS_{\max} \quad (11)$$

در رابطه (۱۰)، $V_{s,t}$ ولتاژ گره مرجع (پست توزیع)، V_{ref} ولتاژ مرجع، ΔV مقدار اختلاف ولتاژ مابین گام ها و TS_t موقعیت گام را در زمان t نشان می دهند. همچنین گام انتخابی در هر زمان باید در محدوده مجاز تغییرات باشد که توسط رابطه (۱۱) مدل می گردد.

۵.۱.۲. قیود امنیتی بهره برداری از شبکه توزیع

برای بهره برداری از شبکه توزیع بایستی این شبکه به صورت صحیح مدل سازی و بهره برداری گردد. بدین منظور روابط (۱۲) تا (۱۵) در نظر گرفته شده اند که اساس معادلات پخش توان در فیدهای توزیع می باشند.

$$P_{i,t}^G + P_{i,g,t}^{DG} - P_{i,t}^{EV} - P_{i,t}^D - V_{i,t} \sum_{j \in N} V_{j,t} (G_{ij} \cos \theta_{ij,t} + B_{ij} \sin \theta_{ij,t}) = 0 \quad (12)$$

$$Q_{i,t}^G + Q_{i,g,t}^{DG} - Q_{i,t}^{EV} - Q_{i,t}^D - V_{i,t} \sum_{j \in N} V_{j,t} (G_{ij} \sin \theta_{ij,t} - B_{ij} \cos \theta_{ij,t}) = 0 \quad (13)$$

$$V_{i,t}^{\min} \leq V_{i,t} \leq V_{i,t}^{\max} \quad (14)$$

$$S_{l,t} \leq S_l^{\max} \quad (15)$$

در روابط (۱) و (۲)، $P_{i,t}^D$ و $Q_{i,t}^D$ به ترتیب توان های اکتیو و راکتیو مصرفی در گره i و زمان t $P_{i,t}^{D0}$ و $Q_{i,t}^{D0}$ به ترتیب توان های اکتیو و راکتیو نامی آن گره تحت ولتاژ نامی و ضرایب K^P ، K^I ، K^Z مربوط به بخش های امیدانس ثابت، جریان ثابت و توان ثابت هستند.

۲.۱.۲. خودروهای الکتریکی

افزایش تعداد خودروهای الکتریکی در شبکه توزیع منجر به افزایش تقاضای انرژی شبکه می شود. در صورت عدم کنترل الگوی شارژ آن ها، ممکن است ولتاژ گره ها و بارگذاری خطوط از محدوده مجاز خود خارج شوند. در این مطالعه، شبکه توزیع از طریق تجمیع کننده خودروها به شارژ خورهای الکتریکی و مشارکت آن ها در توان راکتیو مورد نیاز شبکه می پردازد. برای مدل سازی تجمیع کنندگان خودروهای الکتریکی روابط زیر در نظر گرفته می شود.

$$(P_{i,t}^{EV})^2 + (Q_{i,t}^{EV})^2 \leq (S_{i,t}^{EV})^2 \quad (3)$$

$$P_{i,t}^{EV} \leq A_{i,t}^{EV} S_{i,t}^{EV, \max} \quad (4)$$

در این روابط، $P_{i,t}^{EV}$ و $Q_{i,t}^{EV}$ توان های اکتیو و راکتیو تجمیع کننده خودروها و $S_{i,t}^{EV}$ توان ظاهری نامی اینورتر تجمیع کننده در گره i در زمان t می باشد. همچنین در این رابطه، $A_{i,t}^{EV}$ درصد حضور خودروها در گره i در زمان t را نشان می دهد.

از سوی دیگر مقدار توان اکتیو مورد نیاز توسط تجمیع کننده خودروها در طول دوره برنامه ریزی (روز پیش رو) باید با توان مورد نیاز خودروها برابر باشد. بدین منظور رابطه (۵) در نظر گرفته می شود.

$$\sum_{t \in T} P_{i,t}^{EV} = P_{RE_i}^{EV} \quad (5)$$

در رابطه (۵)، $P_{RE_i}^{EV}$ توان اکتیو مورد نیاز تجمیع کننده گره i در طول دوره برنامه ریزی روزانه است. همچنین T بیانگر کل دوره برنامه ریزی است.

۳.۱.۲. واحدهای تولید پراکنده

همان طور که اشاره شد، شبکه های توزیع هوشمند شاهد نفوذ تولیدات پراکنده به منظور افزایش قابلیت اطمینان، بهبود کیفیت سرویس دهی و بهبود شاخص های اقتصادی هستند. منبع تولید پراکنده مورد مطالعه در این مقاله از نوع دیزل ژنراتور است که برنامه ریزی میزان تولید توان اکتیو و راکتیو آن توسط بهره بردار شبکه بار با هدف بهبود شاخص های عملکرد اقتصادی و فنی شبکه و با در نظرگیری محدودیت های واحد تولید پراکنده انجام می گیرد. برای بهره برداری صحیح از منابع تولید پراکنده، قیود فنی موجود برای مدل سازی این

1. Aggregator

در این روابط، $V_{i,t}$ ، $P_{i,t}^D$ ، $Q_{i,t}^D$ ، $P_{i,t}^G$ ، $Q_{i,t}^G$ ، G_{ij} ، B_{ij} ، $\theta_{ij,t}$ و N به ترتیب ولتاژ گره i ، مقدار توان اکتیو و راکتیو مصرفی گره i و توان اکتیو و راکتیو تولیدی گره i در زمان t ، قسمت حقیقی و موهومی ماتریس ادیتانس شبکه، اختلاف زاویه فاز ولتاژ بین گره‌ها و مجموعه گره‌های شبکه را نشان می‌دهند. طبق رابطه (۱۴) نیز ولتاژ هر گره باید در محدوده تعیین شده قرار گیرد. رابطه (۱۵) بیان می‌کند که بارگیری هر خط باید از بیشینه بارگیری آن خط کمتر باشد؛ به طوری که در این رابطه $S_{i,t}^{\max}$ بیشینه حد گرمایی خط l است.

۲.۲. توابع هدف در رویکردهای مختلف

در این مطالعه، دو رویکرد نخست به بررسی اثر کاهش تلفات توان و کاهش توان مصرفی در نتیجه به کارگیری CVR می‌پردازد. از آنجایی که از مدل ZIP برای مدل‌سازی بارهای موجود در شبکه استفاده شده است، توان‌های اکتیو و راکتیو در این مدل وابسته به ولتاژ گره مربوطه هستند. از سوی دیگر، عبور توان‌های اکتیو و راکتیو از بخش‌های توزیع منجر به ایجاد تلفات اهمی می‌گردد. در نتیجه، CVR می‌تواند بر تلفات اهمی شبکه نیز تأثیر داشته باشد. علاوه بر این، با در نظر گرفتن تابع هدف کارآمد، می‌توان ولتاژ گره‌ها را در محدوده مجاز بهره‌برداری کاهش داد و در نتیجه منجر به کاهش توان مصرفی آن گره گردید. این رویکرد به خصوص در گره‌های ابتدایی فیدرهای شعاعی متمر ثمر خواهد بود. بدین منظور روابط (۱۶) تا (۱۷) در نظر گرفته می‌شود.

$$\min OF_{Loss} = \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} R_{ij} |I_{ij,t}|^2 \quad (16)$$

$$\min OF_{Demand} = \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} P_{i,t}^D \quad (17)$$

توابع مذکور به منظور تحلیل حساسیت شبکه توزیع به تأثیرپذیری از CVR در کاهش تلفات اهمی شبکه، طبق رابطه (۱۶) و کاهش توان مصرفی کل بارهای شبکه طبق رابطه (۱۷) مطرح‌اند. در توسعه نهایی مدل پیشنهادی برنامه‌ریزی بهره‌برداری از شبکه، تابع هدف کلی در رابطه (۱۸) ارائه شده است که هزینه بهره‌برداری از شبکه را مورد توجه قرار دارد.

$$\min OF_{Cost} = \sum_{t \in T} \left(C_t^{Sub} P_t^{Sub} + K_q C_t^{Sub} Q_t^{Sub} + \sum_{t \in G} C_{g,t}^{DG} \right) \quad (18)$$

در رابطه (۱۸)، C_t^{Sub} هزینه توان فراهم‌آمده توسط شبکه بالادست و P_t^{Sub} و Q_t^{Sub} مقادیر توان‌های اکتیو و راکتیو ورودی به شبکه در زمان t است. همچنین ضریب K_q هزینه توان راکتیو را بیان می‌کند. این رابطه، هزینه تغذیه بارهای شبکه و تلفات اهمی شبکه را به صورت یکجا در نظر می‌گیرد و به شکل کلی، هزینه بهره‌برداری

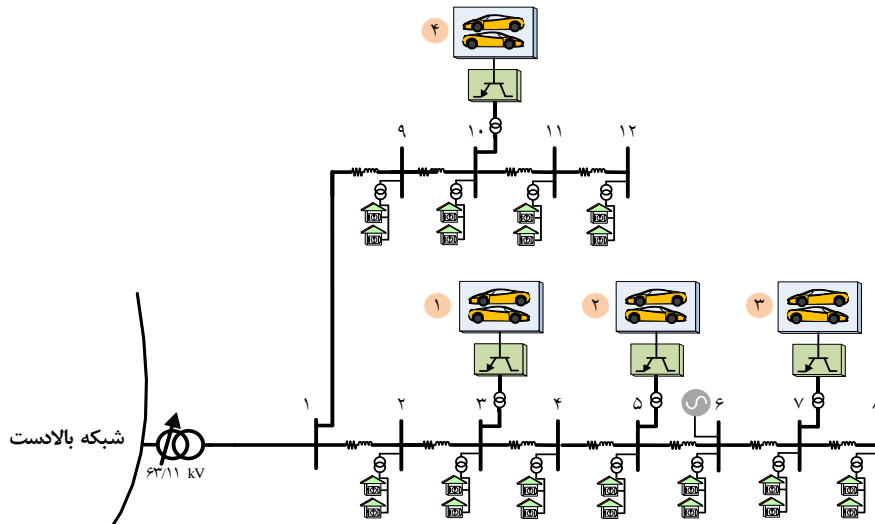
شبکه در افق روز پیش رو را کمینه می‌کند. قسمت سوم این رابطه نیز هزینه بهره‌برداری تولیدات پراکنده را در بر دارد. شایان ذکر است که در نتیجه مشارکت خودروهای الکتریکی در عملیاتی نمودن مفهوم CVR، منحنی ولتاژ در گره‌های مختلف به نحوی بهینه می‌گردد که مقدار توان مصرفی برخی از گره‌های مربوطه کاهش یابد و به مقدار نامی نزدیک‌تر شود و در نتیجه، مقداری سود ناشی از کاهش هزینه بهره‌برداری حاصل می‌آید. نحوه تقسیم سود حاصل مابین بهره‌بردار شبکه و صاحبان خودروها نیازمند مطالعات میان‌مدت اقتصادی و عقد قراردادهای مناسبی می‌باشد. بحث مورد نظر از تمرکز اصلی این مطالعه دور بوده و در نتیجه بدان پرداخت نمی‌شود.

۳. شبیه‌سازی و مطالعه موردی

۳.۱. شبکه مورد آزمایش

شبکه توزیع نمونه مورد آزمایش در شکل (۱) نمایش داده شده است. این شبکه از نوع فشار متوسط 11 kV با 12 گره است. فرض شده است که تجمیع‌کنندگان خودرو در گره‌های ۳، ۵، ۷ و ۱۰ قرار دارند و هریک مدیریت تعداد یکسان خودرو را بر عهده دارند. حضور خودروها در تجمیع‌کنندگان مربوط، بر اساس اطلاعات مرجع [۲۴] مدل شده است. مشخصات فنی خودروی الکتریکی منطبق با جدول (۱) می‌باشد. ظرفیت کل مبدل واسط هریک از تجمیع‌کنندگان با شبکه $1/4 \text{ MWh}$ است. نحوه حضور خودروها در شبکه به صورت منحنی حضور آن‌ها در شکل (۳) ارائه شده است. هر تجمیع‌کننده دارای 240 خودرو است که میزان توان مورد نیاز آن‌ها در جدول (۲) ذکر شده است. تپ‌چنجر ترانسفورماتور دارای 11 پله با قابلیت تنظیم ولتاژ در محدوده 0.95 تا 1.05 با گام‌های 0.01 پروپیت است. ضرایب مدل ZIP و مقادیر P_0 و Q_0 بار هریک از گره‌ها از مرجع [۲۵] استخراج شده است. ضریب هزینه توان راکتیو تأمین‌شده از شبکه بالادست K_q ، مابین 5% تا 10% قیمت توان اکتیو است که برابر 0.05 در نظر گرفته می‌شود [۲۶]. منحنی بار نامی شبکه بر اساس داده‌های به دست آمده از نهاد (NYISO^۱) مقیاس‌دهی شده و در شکل (۲) نشان داده شده است [۲۷]. شبکه دارای یک واحد تولید پراکنده در گره ۶ با ظرفیت MVA ۳ است که مشخصات مربوط به ضرایب تابع هزینه تولید توان اکتیو آن در جدول (۳) ارائه شده است. حداقل ضریب توان پس‌فاز یا پیش‌فاز برای این منبع 0.85 در نظر گرفته می‌شود. اطلاعات راکتانس و مقاومت اهمی بخش‌های شبکه در ضمیمه ارائه شده است.

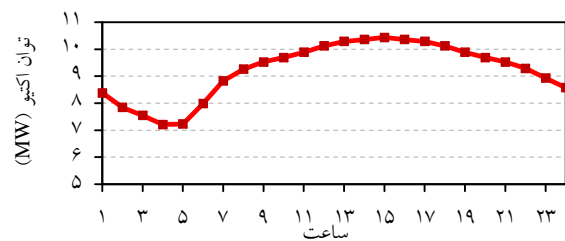
1. New York Independent System Operator



شکل (۱): شبکه توزیع مورد مطالعه

جدول (۳): مشخصات تولید پراکنده در ۶ گره

توان نامی	ضرایب تابع هزینه		
$S_{i,g,max}^{DG}$ (MVA)	C_g (\$/MW ²)	b_g (\$/MW)	a_g (\$)
۳	۰/۰۰۴۵	۹۲	۲۸



شکل (۲): منحنی بار نامی شبکه

جدول (۱): مشخصات خودروهای الکتریکی

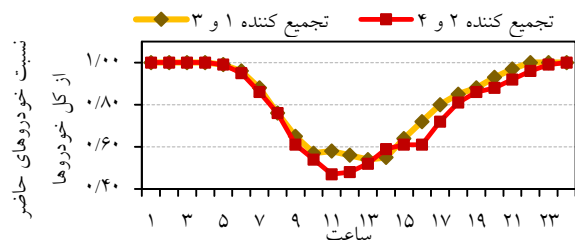
Nissan leaf 2017		نوع خودرو
۱۰۷		مسافت قابل پیمایش (mile)
۳۰		ظرفیت باتری (kWh)
۶		توان نامی مبدل (kW)

۲.۳. سناریوهای مورد مطالعه

به منظور بررسی روش پیشنهادی مبتنی بر کاهش محافظه کارانه ولتاژ توسط مشارکت تجمیع کننده خودروهای الکتریکی در تأمین توان راکتیو مورد نیاز شبکه توزیع و بهینه سازی عملکرد آن، دو سناریوی مختلف در نظر گرفته می شود:

- سناریو ۱: بدون در نظر گرفتن مشارکت خودروها در کنترل توزیع شده ولتاژ/توان راکتیو شبکه؛
- سناریو ۲: با در نظر گرفتن مشارکت خودروها در کنترل توزیع شده ولتاژ/توان راکتیو شبکه.

نتایج حاصل از این دو سناریو بررسی می شوند تا کارکرد روش ارائه شده ارزیابی گردد. شایان ذکر است که مطالعات شبیه سازی ها در نرم افزار GAMS توسط حل کننده DICOPT در رایانه ای با پردازنده ۵ هسته ای ۱/۶ GHz و رم ۴ GB انجام گرفته است.



شکل (۳): منحنی حضور خودروها در شبکه

۳.۳. شبیه سازی و تحلیل نتایج عددی

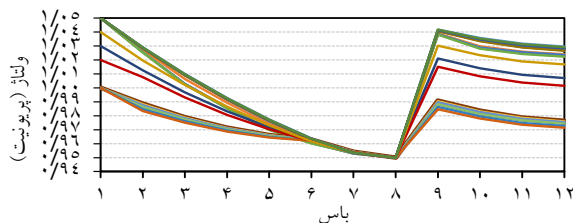
۱.۳.۳. آنالیز حساسیت

به منظور بررسی اثر کاهش تلفات و مصرف انرژی که به ترتیب در توابع هدف (۱۶) و (۱۷) ارائه شد، در این قسمت به تحلیل حساسیت این دو تابع هدف پرداخته می شود. جهت پارتو حاصل از نتایج کمیته سازی این توابع در شکل (۴) رسم شده است. همان طور که در این شکل مشخص

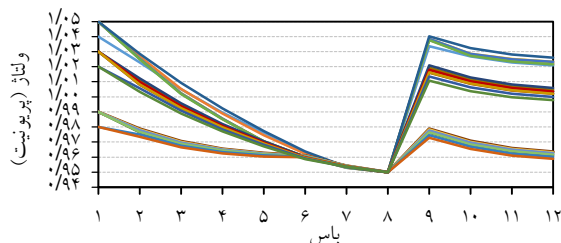
جدول (۲): انرژی مورد نیاز هر تجمیع کننده

تجمیع کننده	انرژی مورد نیاز (MWh)
۱	۶/۳
۲	۶/۳
۳	۶/۹
۴	۶/۶

ابتدای دو فیدر، تجمع کنندگان ۱ و ۴ توان راکتیو مصرف کرده‌اند تا اندازه ولتاژ گره‌های ابتدایی را کاهش دهند و میزان توان جذب شده توسط بارهای ZIP کاهش یابد. در سناریوی ۱ انتخاب تپ مناسب ترانسفورماتور برای دو فیدر شبکه با چالش روبه‌روست و این انتخاب با در نظر گرفتن فیدر طولانی‌تر انجام گرفته است؛ زیرا گره انتهایی این فیدر، تپ مناسب را برای جلوگیری از کاهش ولتاژ این گره از مقدار کمیته مجاز مشخص می‌کند. این چنین وضعیتی منجر به افزایش مصرف توان در بارهای ابتدایی هر دو فیدر می‌شود. مشارکت تجمع کنندگان در کنترل ولتاژ گره‌های شبکه سبب شده است تا ترانسفورماتور تپ‌چنجدار بتواند به صورت مؤثرتری، ولتاژ گره‌های هر دو فیدر را کنترل کند. در این صورت، برنامه مدیریت شبکه با انتخاب موقعیت تپ پایین‌تر در سناریوی ۲ و تزریق توان راکتیو در گره‌های انتهایی فیدر طولانی، هم از لحاظ فنی و هم از دید اقتصادی، ولتاژ گره‌های شبکه را کنترل کرده است.



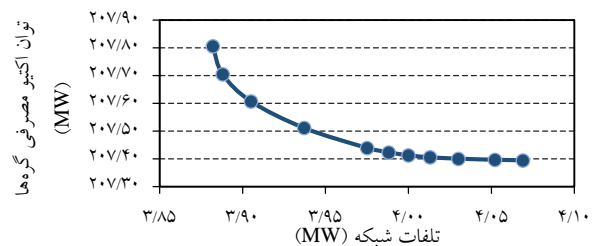
شکل (۵): منحنی ولتاژ گره‌ها در ۲۴ ساعت (سناریوی ۱)



شکل (۶): منحنی ولتاژ گره‌ها در ۲۴ ساعت (سناریوی ۲)

شکل‌های (۸) و (۹) به ترتیب، نحوه مشارکت توان اکتیو تجمع کنندگان خودروهای الکتریکی در سناریوهای ۱ و ۲ را نمایش می‌دهند. تأمین توان اکتیو برای شارژ خودروهای الکتریکی به صورت عمده در ساعات کم‌باری انجام می‌یابد؛ زیرا پایین بودن بار مصرف کنندگان خانگی و همچنین هزینه پایین تأمین توان از شبکه بالادست در این ساعات است. علاوه بر این در ساعات میان‌باری شبکه، میزان حضور خودروهای الکتریکی در تجمع کنندگان مربوطه پایین است. در نتیجه، تأمین توان خودروهای الکتریکی به ساعاتی که خودروها در شبکه حضور دارند موقوف شده است. نحوه مشارکت خودروها در تأمین توان راکتیو شبکه در شکل (۱۰) نمایش داده می‌شود. همان طور که در این شکل مشخص است، هریک از تجمع کنندگان با توجه به موقعیت خود در شبکه توزیع به صورت خازنی یا سلفی در تأمین توان راکتیو مشارکت دارند.

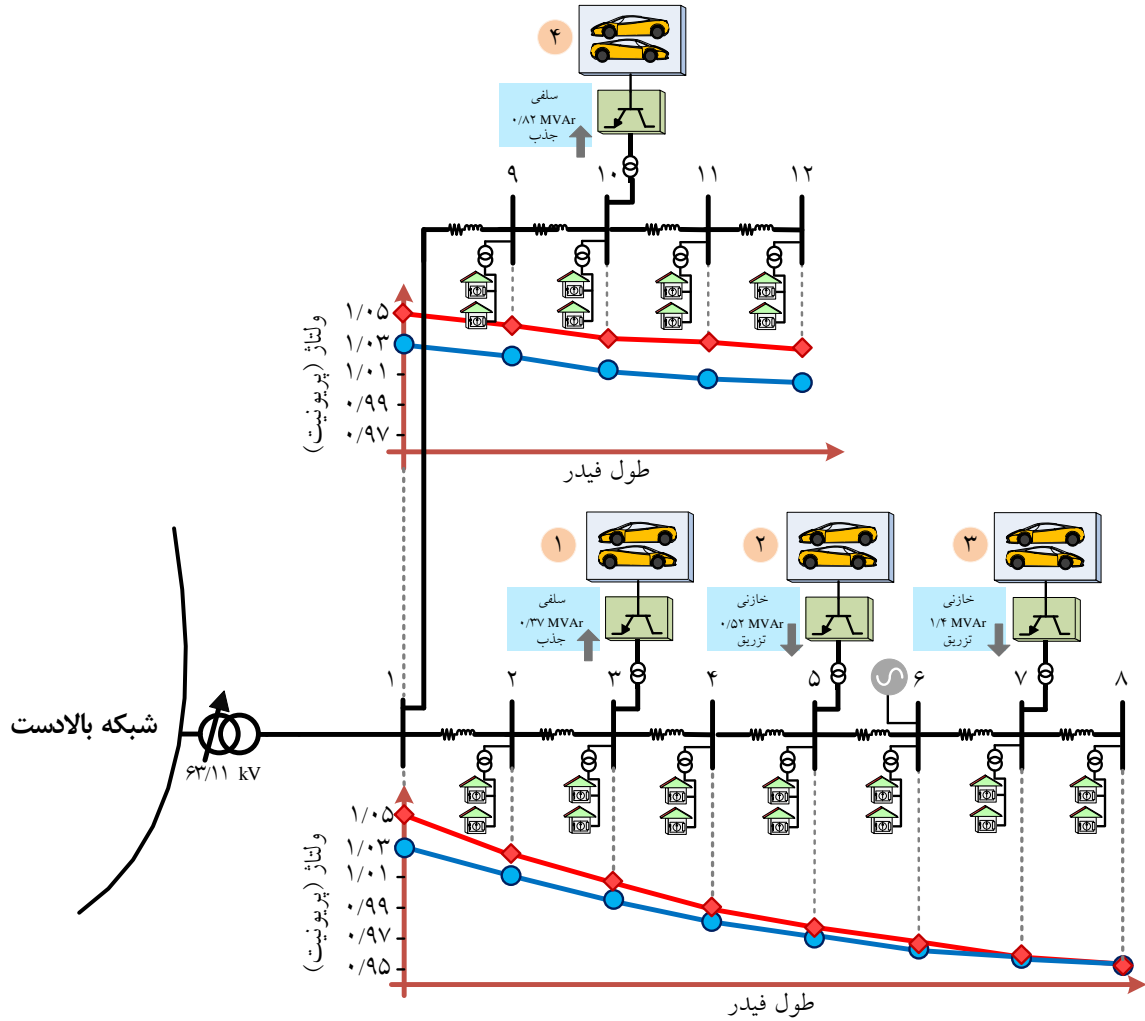
است، مفهوم CVR بر تلفات توان شبکه و میزان توان مصرفی بارهای شبکه تأثیرات متفاوتی را می‌گذارد. برای توضیح این امر ذکر این نکته لازم است که با توجه به روابط (۱) و (۲)، میزان توان مصرفی بارهای شبکه با پایین آمدن مقدار ولتاژ گره‌ها کاهش می‌یابد. از طرف دیگر و با توجه به رابطه (۱۶)، کاهش سطح ولتاژ گره‌های شبکه موجب افزایش میزان تلفات خطوط شبکه می‌گردد. بر این اساس، لزوم ایجاد مدلی مناسب برای عملکرد اقتصادی و فنی شبکه توزیع ضروری می‌نماید. بدین سبب تابع هدف اصلی به شکل کمیته‌سازی هزینه کل توان ورودی به شبکه مطابق رابطه (۱۸) تعریف شده است. این رابطه به عنوان تابع مناسبی برای بهبود عملکرد شبکه برای دو سناریوی مختلف در ادغام خودروهای الکتریکی در برنامه‌های مدیریت شبکه توزیع در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۴): جهت پارتو حاصل از کمیته‌سازی تلفات و توان مصرفی گره‌ها

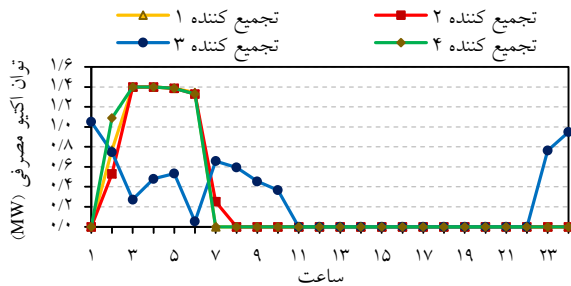
۲.۳.۳. تأثیر توان راکتیو فراهم آمده از خودروهای الکتریکی

این بخش به منظور مطالعه تأثیر توان راکتیو فراهم آمده از خودروهای الکتریکی در برنامه‌ریزی بهره‌برداری از شبکه توزیع، به بررسی نتایج حاصل از دو سناریوی معرفی شده می‌پردازد. منحنی ولتاژ روزانه گره‌های شبکه در تمامی ۲۴ ساعت روز مورد بررسی در شکل‌های (۵) و (۶)، به ترتیب برای سناریوهای ۱ و ۲ ارائه شده است. می‌توان مشاهده کرد که در سناریوی ۲، ولتاژ گره‌های شبکه در اکثر ساعات در مقایسه با سناریوی ۱، مقدار کمتری دارند. دلیل این امر این است که در سناریوی دوم به دلیل مشارکت تجمع کنندگان خودروهای الکتریکی در تأمین توان راکتیو، کنترل بیشتری روی بهینه‌سازی ولتاژ/توان راکتیو به شکل غیرمتمرکز ایجاد شده است. برای بیان شفاف‌تر این نکته، منحنی ولتاژ گره‌های شبکه در ساعت ۱۰ برای دو سناریوی مورد بررسی در شکل (۷) نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، دامنه ولتاژ گره‌ها در سناریوی ۲ با مقادیر پایینی به دست آمده است. این کاهش اندازه ولتاژ در راستای کاهش توان مصرفی بارهای شبکه انجام گرفته است. نکته مهم، تأثیر عملکرد غیرمتمرکز تجمع کنندگان خودروهای الکتریکی در کنترل ولتاژ گره‌های شبکه است. در فیدر طولانی‌تر به دلیل افت ولتاژ بیشتر در گره‌های انتهایی، تجمع کنندگان به تزریق توان راکتیو پرداخته‌اند. از این طریق، اندازه ولتاژ این گره‌ها در محدوده مجاز قرار می‌گیرد. حال آنکه در



شکل (۷): مقایسه منحنی ولتاژ گره‌ها در ساعت ۱۰ در دو سناریو

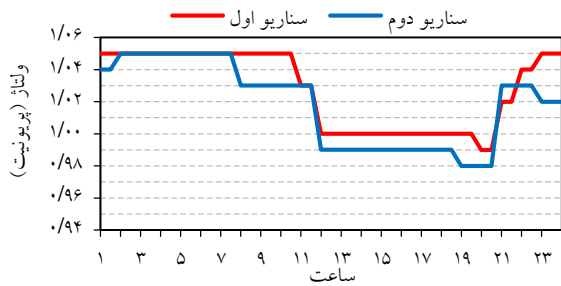
هزینه بهره‌برداری و نیز آلاینده‌گی هوا می‌شود. همچنین در ساعاتی که این واحد مورد بهره‌برداری واقع است، عمده ظرفیت آن به تأمین توان اکتیو اختصاص یافته که این امر مورد استقبال مالکان منابع تولید پراکنده است. همان طور که در شکل (۵) مشخص است، واحد تولید پراکنده در کنترل ولتاژ گره‌های شبکه، تأثیر محسوسی دارد و توانسته است به صورت متمرکز در کنار خودروهای الکتریکی به کاهش سطح ولتاژ گره‌های مجاور بپردازد تا از طریق مفهوم CVR به توان مصرفی کمتری توسط بارهای شبکه منجر شود.



شکل (۸): توان اکتیو مصرفی خودروها در ۲۴ ساعت (سناریوی ۱)

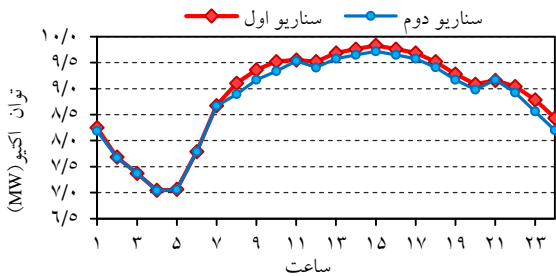
با توجه به اینکه تجمیع‌کنندگان ۱ و ۴ در گره‌های ابتدایی شبکه قرار گرفته‌اند، از شبکه توان راکتیو جذب می‌کنند تا دامنه ولتاژ گره‌های مجاور را کاهش دهند که در نتیجه منجر به کاهش مصرف انرژی توسط بار گره‌های مجاور می‌گردد. در مقابل، دو تجمیع‌کننده دیگر که در گره‌های انتهایی قرار دارند، به تزریق توان راکتیو پرداخته تا ضمن اینکه ولتاژ گره‌های مجاور را در محدوده مجاز نگاه دارند، سبب کاهش تلفات تأمین توان در این قسمت از شبکه نیز بشوند. نکته دیگر واضح در این شکل، افزایش مقدار جذب یا تزریق توان راکتیو در ساعات پرباری شبکه است. در مقابل، اندازه توان راکتیو مبادله‌ای تجمیع‌کنندگان با شبکه در ساعات کم‌باری کاهش دارد تا ظرفیت مبدل شارژ خودروها به جذب توان اکتیو اختصاص داده شود.

مشارکت واحد تولید پراکنده در برنامه‌ریزی به عمل آمده در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) به ترتیب برای سناریوهای ۱ و ۲ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل‌ها مشخص است، میزان مشارکت این واحد در تأمین توان مورد نیاز شبکه توزیع کاهش یافته و موجب کاهش



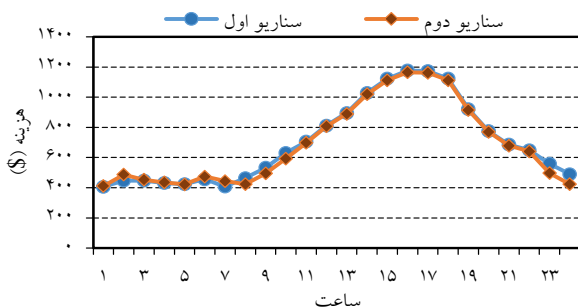
شکل (۱۳): تغییرات تپ ترانسفورماتور

شکل (۱۴) مقدار توان اکتیو مصرفی کل شبکه (تمام گره‌ها) در دو سناریوی مورد بررسی را نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است، در تمام ساعات شبانه‌روز، میزان توان اکتیو مصرفی در سناریوی ۲ نسبت به سناریوی ۱ کاهش داشته که نشان از تأثیرگذاری مشارکت خودروها در کنترل ولتاژ/توان راکتیو و کارایی مدل ارائه شده است.



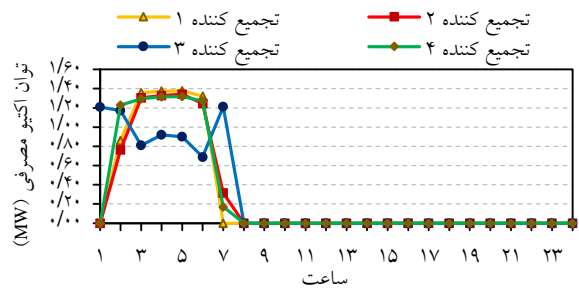
شکل (۱۴): توان اکتیو مصرفی بارهای شبکه توزیع

هزینه بهره‌برداری روزانه از شبکه توزیع در دو سناریوی مورد بررسی در شکل (۱۵) نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که در اغلب ساعات و به‌خصوص در ساعات پرباری، هزینه بهره‌برداری شبکه توزیع در سناریوی ۲ در مقایسه با سناریوی ۱ کمتر است. فقط در قسمتی از ساعات کم‌باری، هزینه بهره‌برداری سناریوی ۲ بیشتر از سناریوی ۱ است که به دلیل انتقال شارژ خودروهای الکتریکی به این ساعات و اختصاص ظرفیت مبدل به تبادل توان اکتیو است.

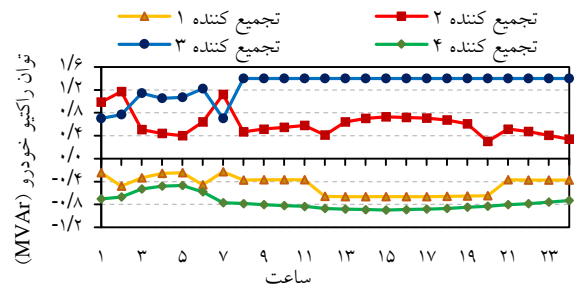


شکل (۱۵): مقایسه هزینه کل در دو سناریو

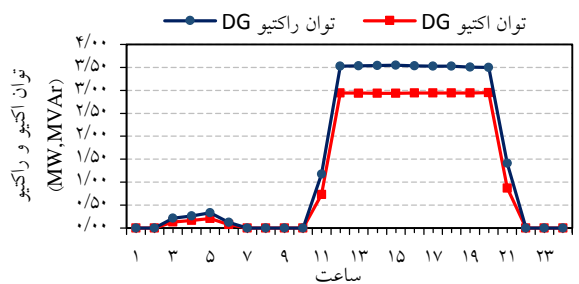
توان اکتیو دریافتی شبکه توزیع از پست فوق توزیع در دو سناریوی مختلف مورد بررسی در شکل (۱۶) مشاهده می‌شود. همان طور که در



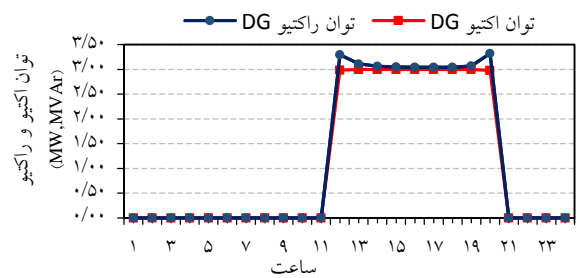
شکل (۹): توان اکتیو مصرفی خودروها در ۲۴ ساعت (سناریوی ۲)



شکل (۱۰): توان راکتیو خودروها در ۲۴ ساعت (سناریوی ۲)



شکل (۱۱): توان اکتیو و راکتیو DG در ۶ گره (سناریوی ۱)



شکل (۱۲): توان اکتیو و راکتیو DG در ۶ گره (سناریوی ۲)

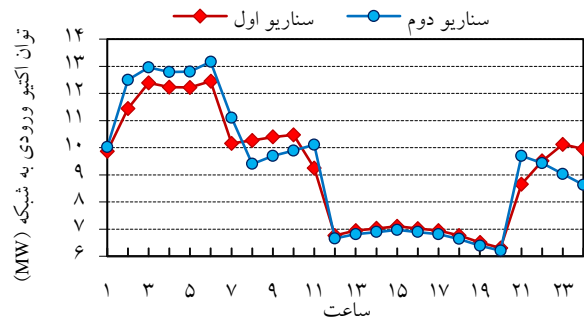
شکل (۱۳) تغییرات موقعیت تپ را در سناریوهای مورد بررسی نمایش می‌دهد. در سناریوی دوم، با در نظر گرفتن مشارکت خودروها در مبادلات توان راکتیو، موقعیت‌های تپ پایین‌تری به دست می‌آید که نشان از کارکرد مؤثر مدل پیشنهادی بر مبنای CVR است.

ظرفیت اینورتر تجمیع کننده خودروها به منظور مشارکت در کنترل ولتاژ و توان راکتیو توزیع شده بهره گرفته شد. این فرصت بستر مناسبی را برای پیاده سازی مفهوم CVR و کاهش دامنه ولتاژ، به خصوص در گره های ابتدایی فیدرهای شعاعی که با بیشبود ولتاژ مواجه بوده اند، فراهم نمود. شبیه سازی های عددی نشان می دهد که خودروهای الکتریکی که به صورت پراکنده در شبکه توزیع حضور دارند، می توانند با کنترل ولتاژ گره های شبکه بر مبنای مفهوم CVR، توان اکتیو مصرفی کل شبکه را تا حد قابل توجهی کاهش دهند. میزان کاهش در این مطالعه برابر ۱/۰۷٪ به دست آمد. علاوه بر این، هزینه بهره برداری از شبکه توزیع بر مبنای مدل پیشنهادی به مقدار ۱/۴٪ کاهش داشت که با توجه به مقدار بسیار بالای گردش مالی در شبکه های توزیع، بهبود چشمگیری به حساب می آید. بهره گیری از روش پیشنهادی توانست شرایط مناسب تری برای ترانسفورماتور تپ چنجردار در کاهش سطح ولتاژ گره های شبکه فراهم کند. مدل ارائه شده و مفهوم CVR می تواند به عنوان فرصت های مناسبی در راستای بهبود برنامه ریزی شبکه های توزیع هوشمند مدنظر قرار گیرد. در نظرگیری عدم قطعیت برای پارامترهای مهم مسئله اعم از زمان اتصال و ترک شبکه توزیع و همچنین دیگر پارامترها در مطالعات آتی نویسندگان بررسی خواهند شد.

ضمیمه

مشخصات بخش های شبکه توزیع مورد مطالعه			
راکتانس (Ω)	مقاومت (Ω)	گره ابتدا	گره انتها
۰/۱۷۵۰	۰/۳۵۲۱	۱	۲
۰/۱۷۱۱	۰/۳۵۳۰	۲	۳
۰/۱۷۶۴	۰/۳۵۳۰	۳	۴
۰/۱۷۴۱	۰/۳۵۱۱	۴	۵
۰/۱۷۶۸	۰/۳۵۱۵	۵	۶
۰/۱۷۹۸	۰/۳۵۲۰	۶	۷
۰/۱۷۵۱	۰/۳۵۲۲	۷	۸
۰/۱۲۶۵	۰/۳۹۴۰	۱	۹
۰/۱۲۴۸	۰/۳۹۵۵	۹	۱۰
۰/۱۲۷۳	۰/۳۹۵۹	۱۰	۱۱
۰/۱۲۵۴	۰/۳۹۴۲	۱۱	۱۲

این شکل مشخص است، میزان توان ورودی در ساعات پر بار کاهش داشته است. فقط در ساعات کم باری مقداری افزایش در توان پست فوق توزیع دیده می شود که به علت انتقال بار خودروها به این ساعات می باشد. در مابقی ساعات، کاهش توان در بار کل مصرفی شبکه که ناشی از کاهش محافظه کارانه ولتاژ می باشد، به خوبی نمایان است. مقایسه عددی کارکرد دو سناریو در جدول (۴) ارائه شده است. هزینه کل بهره برداری شبکه توزیع در سناریوی ۲ نسبت به سناریوی ۱ به مقدار ۱/۴٪ کاهش یافته است. همچنین میزان توان مصرفی بارها ۱/۰۷٪ در سناریوی ۲ در مقایسه با سناریوی ۱ کاهش دارد که این کاهش فقط با کنترل ولتاژ گره های شبکه و بر مبنای مفهوم CVR بدون هیچ گونه سرمایه گذاری جدید در مستحکم سازی و نصب ادوات جدید انجام یافته است. نتایج به دست آمده، کارکرد مؤثر مدل پیشنهادی را در برنامه ریزی بهره برداری از شبکه های توزیع تأیید می کند.



شکل (۱۶): مقایسه توان ورودی از شبکه بالادست

جدول (۴): نتایج مربوط به کمیته سازی تابع هزینه

سناریوی اول	سناریوی دوم	هزینه (\$)
۱۶۷۶۳/۳۳۱	۱۶۵۲۷/۶۰۷	
۲۱۲/۹۴۶	۲۱۰/۶۵۸	توان مصرفی بارها (MW)

۴. نتیجه گیری

در این مطالعه، مدل کارآمدی برای برنامه ریزی بهره برداری بهینه از شبکه توزیع در حضور خودروهای الکتریکی و بر مبنای مفهوم CVR ارائه شد. بدین منظور بارهای موجود در گره های شبکه به شکل دقیق و بر مبنای مدل ZIP بیان شدند تا وابستگی مقدار توان اکتیو و راکتیو مصرفی آن ها به دامنه ولتاژ گره مربوطه مدل گردد. علاوه بر تأمین توان اکتیو مورد نیاز خودروهای الکتریکی و شارژ کنترل شده آن ها، از مابقی

- [1] Cagri, V., Sahin, D., Kocak, T., Ergut, S., Buccella, C., Cecati, C., Hancke, G. P., "A Survey on Smart Grid Potential Applications and Communication Requirements", IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 9, No. 1, pp. 28-42, 2013.
- [2] Farhangi, H. "A Road Map to Integration: Perspectives on Smart Grid Development", IEEE Power & Energy Magazine, Vol.12, No.3, pp.52-66, 2014.
- [3] Rahimi, S., Marinelli, M., Silvestro, F., "Evaluation of Requirements for Volt/Var Control and Optimization Function in Distribution Management Systems", IEEE International Conference of Energy and Exhibition (ENERGYCON), pp. 331-336, 2012.
- [4] Zakariazadeh, A., Jadid, S., Siano, P., "Economic-Environmental Energy and Reserve Scheduling of Smart Distribution Systems: A Multiobjective Mathematical Programming Approach", Energy Conversion and Management, Vol. 78, pp. 151-164, Feb. 2014.
- [5] Mazidi, M., Monsef, H., Siano, P., "Incorporating Price-Responsive Customers in Day-Ahead Scheduling of Smart Distribution Networks", Energy Conversion and Management, Vol. 115, pp. 103–116, 2016.
- [6] ANSI Standard. Electrical Power Systems and Equipment – Voltage Ratings: C 84.1-1995; 1995.
- [7] Preferred Voltage Levels for AC Systems, 0 to 50000 V, Standard: CAN3- C235-83(R2000), 2000.
- [8] Manbachi, M., Farhangi, H., Palizban, A., Arzanpour, S., "Maintenance Scheduling of Volt-VAR Control Assets in Smart Distribution Networks Using Advanced Metering Infrastructure", Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol. 39, No. 1, pp. 26-33, 2016.
- [9] Feltrin, A. P., Quinjano, D. A., Mantovani, J. R. S., "Volt-VAR Multiobjective Optimization to Peak-Load Relief and Energy Efficiency in Distribution Networks," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 30, No. 2, pp. 618-626, 2015.
- [10] Antonio, P.F., Rodezno, D.Q., Mantovani, J.R.S., "Volt-VAR Multiobjective Optimization to Peak-Load Relief and Energy Efficiency in Distribution Networks", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 30, No. 2, pp. 618-626, 2011.
- [11] Borghetti, A., Napolitano, F., Nucci, C. A., "Volt/Var Optimization of Unbalanced Distribution Feeders via Mixed Integer Linear Programming", 18th Power Systems Computation Conference, pp. 1-7, 2014.
- [12] Manbachi, M., Nasri, M., Shahabi, B., Farhangi, H., A. Palizban, Arzanpour, S., Moallem, M., Lee, D. C., "Real-Time Adaptive VVO/CVR Topology using Multi-Agent System and IEC 61850-based Communication Protocol", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 5, No.2, pp. 587-597, 2014.
- [13] Niazi, A. N., Sheikholeslami, A., Varaki, A. R. K., "Global Generation Maintenance Scheduling with Network Constraints, Spinning Reserve, Fuel, and Energy Purchase from Outside", IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), pp. 330–336, 2012.
- [14] Environmental Assessment of Plug-In Hybrid Electric Vehicles, Available Online: www.energy.gov.
- [15] Shao, S., Zhang, T., Ipattanasomporn, M., Rahman, S., "Impact of TOU Rates on Distribution Load Shapes in a Smart Grid with PHEV Penetration", IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, pp. 1-6, 2010.
- [16] Weiller, C., "Plug-in Hybrid Electric Vehicle Impacts on Hourly Electricity Demand in the United States", Energy Policy, Vol. 39, No. 6, pp. 3766–78. 2011.
- [17] Xing, H., Fu, M., Lin, Z., Mou, Y., "Decentralized Optimal Scheduling for Charging and Discharging of Plug-in Electric Vehicles in Smart Grids", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 31, No. 5, pp. 4118-4127, 2016.
- [18] Clement, K., Haesen, H., Driesen, J., "Coordinated Charging of Multiple Plug-in Hybrid Electric Vehicles in Residential Distribution Grids", IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, Seattle, 2009.
- [19] Gao, S., Chau, K. T., Chan, C. C., Wu, D., "Loss Analysis of Vehicle-to-Grid Operation", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, pp. 1-6, 2010.
- [20] Zakariazadeh, A., Jadid, S., Siano, P., "Integrated Operation of Electric Vehicles and Renewable Generation in a Smart Distribution System", Energy Conversion and Management, Vol. 89, pp. 99-110, 2015.
- [21] Kisacikoglu, M.C., Ozpineci, B., Tolbert, L.M., "Effects of V2G Reactive Power Compensation on the Component Selection in an EV or PHEV Bidirectional Charger", IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, pp. 870-876, 2010.
- [22] Fasugba, M. A., Krein, P.T., "Gaining Vehicle-to-Grid Benefits with Unidirectional Electric and Plug-in Hybrid Vehicle Chargers", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2011.
- [23] Marti, J. R., Ahmadi, H., Bashualdo, L., "Linear Power Flow Formulation based on a Voltage-Dependent Load Model", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 28, No. 3, pp. 1682–1690, 2013.
- [24] Hamidi, A., Nazarpour, D., Golshannavaz, S., "Increasing the Renewables Share in Discos Power Provision: An Optimal Charging/Discharging Collaboration through EV Fleets", 21st Electric Power Distribution Conference (EPDC 21), 2016.
- [25] Bokhari, A., et al., "Experimental Determination of the ZIP Coefficients for Modern Residential, Commercial, and Industrial Loads", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 29, No. 3, 2014.
- [26] Algarni, A. A. S., Bhattacharya, K., "Disco operation considering DG units and their goodness factors", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, No. 4, pp. 1831–1840, 2009.

[27] Golshannavaz, S., Afsharnia, S., Aminifar, F., "*Smart Distribution Grid: Optimal Day-Ahead Scheduling With*

Reconfigurable Topology", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 5, No. 5, pp. 2402-2411, 2014.