

ارائه یک مدل خطی دومرحله‌ای جهت ارزیابی تأثیر تقاضای شارژ خودروهای برقی در ایستگاه‌های شارژ سریع بر تاب‌آوری شبکه توزیع فعال

محمد علیزاده گل‌محله^۱، میثم جعفری نوکندی^{۲*} و مجید شهابی^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۰۶	
پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۲۴	
واژگان کلیدی:	
ایستگاه‌های شارژ سریع، بازآرایی، تاب‌آوری.	تقاضای شارژ خودروهای برقی در ایستگاه‌های شارژ سریع می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر مسئله بازآرایی و جزیره‌سازی شبکه توزیع داشته باشد. بنابراین در این مقاله، مسئله جزیره‌سازی دینامیکی و بازآرایی شبکه توزیع با در نظر گرفتن تأثیر متقابل شبکه‌های الکتریکی و حمل‌ونقل در قالب یک مدل دومرحله‌ای ارائه شده است. در مرحله اول، با در نظر گرفتن تمایل رانندگان خودروهای برقی به شارژ در ایستگاه‌های شارژ سریع نزدیک‌تر، مدلی خطی برای تعیین تقاضای شارژ ایستگاه‌های موجود پیشنهاد شده است. در مرحله دوم، یک مدل خطی آمیخته با عدد صحیح مبتنی بر سناریو با هدف حداکثر کردن شاخص تاب‌آوری شبکه توزیع مجهز به منابع تولید پراکنده با بهره‌گیری از طرح‌های جزیره‌سازی دینامیکی و بازآرایی پیشنهاد شده است. شاخص تاب‌آوری شامل دو هدف حداکثر کردن بازایی بارهای شبکه و حداکثر کردن تأمین انرژی ایستگاه‌های شارژ سریع است. مدل پیشنهادی با اعمال چندین خطای هم‌زمان روی شبکه ۱۱۸ شینه و حضور خودروهای برقی در شبکه ترافیکی ۲۵ گرهی در نرم‌افزار GAMS پیاده‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی، کارایی مدل پیشنهادی را در ارزیابی تاب‌آوری شبکه توزیع فعال در حضور خودروهای برقی نشان می‌دهد.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر و با وقوع خاموشی‌های گسترده در سراسر جهان پس از وقوع حوادث دارای احتمال وقوع کم و تأثیر زیاد^۱ مانند سیل، طوفان یا زلزله، تاب‌آوری به یکی از کلیدواژه‌های اصلی در سیستم‌های قدرت تبدیل شده است [۱]. تاب‌آوری با تضمین کمترین قطعی بار و بازایی سریع به شرایط عادی، توانایی سیستم را در تحمل چنین حوادث شدیدی نشان می‌دهد. در [۲] علاوه بر پیشنهاد چند شاخص تاب‌آوری، از زنجیره مارکوف برای بیان تغییر حالت شبکه قدرت به شرایط بحرانی استفاده شده است. در [۳] تاب‌آوری سیستم براساس شاخص بازایی بار قطع شده، ارزیابی و مقدار آن با یک مدل برنامه‌ریزی مرتبه دوم

آمیخته با اعداد صحیح بهبود یافته است. تشکیل ریزشبکه‌ها و جزیره‌سازی به‌عنوان یک استراتژی کارآمد در بهبود تاب‌آوری شبکه توزیع در مقالات زیادی مورد بررسی قرار گرفته است. مرجع [۴] روی نقش ریزشبکه‌های شبکه‌شده^۲ برای افزایش تاب‌آوری سیستم در مقابل حوادث شدید متمرکز شده است. در [۵] مدلی برای حداقل کردن هزینه بهره‌برداری ریزشبکه با در نظر گرفتن قابلیت جزیره شدن بر پایه برنامه‌ریزی مقاوم، پیشنهاد شده است. مرجع [۶] تنظیمات شیب افقی^۳ منابع تولید پراکنده را در حالت جزیره‌ای به‌منظور حداکثر کردن شاخص بازایی بار به‌صورت بهینه تعیین کرده است. در [۷] با فرض ثابت بودن تعداد جزایر و بدون استفاده از بازآرایی، مدلی

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.jafari@nit.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲. استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۳. دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۱. Low-Probability High-Impact Incidents

۲. Networked MGs

۳. Droop

بخش چهارم نیز نتیجه‌گیری آورده شده است.

۲- طرح پیشنهادی دو مرحله‌ای

تشکیل ریزشکه‌ها و جزیره‌سازی شبکه توزیع پس از وقوع یک حادثه شدید، مستلزم پیش‌بینی بارهای الکتریکی مانند ایستگاه‌های شارژ سریع است. بنابراین در مرحله اول روش پیشنهادی این مقاله، مدلی خطی برای پیش‌بینی تقاضای شارژ هریک از ایستگاه‌های شارژ پیشنهاد شده است. در مرحله دوم، با مشخص شدن بار متناظر با تقاضای شارژ هریک از ایستگاه‌های شارژ سریع در مرحله اول و همچنین اطلاع از سایر بارهای شبکه، مسئله جزیره‌سازی دینامیکی شبکه توزیع با هدف حداکثر کردن شاخص بازیابی بار قطع شده حل می‌شود. روند طرح پیشنهادی دومرحله‌ای در شکل ۱ و داده‌های ورودی و متغیرهای خروجی هر مرحله در شکل ۲ نشان داده شده است.

۲-۱- تعیین تقاضای شارژ ایستگاه‌های شارژ سریع

یقیناً با افزایش تعداد خودروهای برقی، عدم ارائه سرویس شارژ به خودروهای برقی موجب اختلال در بخش حمل‌ونقل شده، ضمن وارد کردن ضررهای اقتصادی به مردم، به آشفته‌گی در جامعه منجر خواهد شد. بنابراین توجه جدی به بحث شارژ این خودروها در ایستگاه‌های شارژ سریع، امری ضروری است [۱۸].

حل مسئله بهینه‌سازی تعیین کوتاهترین مسیر بین گره‌های ترافیکی و ایستگاه‌های شارژ سریع خودروهای برقی با در نظر گرفتن شبکه ترافیکی

تعیین بار الکتریکی متناظر با تقاضای شارژ هر یک از ایستگاه‌های شارژ سریع

حل مسئله بهینه‌سازی بازآرایی و جزیره‌سازی دینامیکی شبکه توزیع با دو تابع هدف متفاوت به منظور حداکثر کردن بازیابی بارهای شبکه

شکل ۱- الگوریتم پیشنهادی دومرحله‌ای

برخی از رانندگان خودروهای برقی، هنگام شروع سفر روزانه، متوجه پایین بودن سطح شارژ باتری خودرو می‌شوند و باید برای شارژ مجدد به نزدیک‌ترین ایستگاه شارژ سریع مراجعه کنند. تمایل رانندگان برای رفتن به ایستگاه شارژ، با فاصله بین مبدأ حرکت تا آن ایستگاه، رابطه عکس دارد.

خطی برای تعیین مرزبندی جزایر در شبکه توزیع پیشنهاد شده است. مرجع [۸]، الگوریتم پیشنهادی در [۷] را با در نظر گرفتن بازآرایی شبکه توزیع در فرایند بازیابی بار، بهبود داده است. مرجع [۹] با فرض امکان وجود چند منبع دارای قابلیت کنترل ولتاژ و فرکانس در هر جزیره، تاب‌آوری شبکه را نسبت به [۷ و ۸] افزایش داده است.

با افزایش سطح نفوذ خودروهای برقی، بار الکتریکی متناظر با تقاضای شارژ این خودروها چالش‌های جدیدی را در بهره‌برداری از شبکه توزیع ایجاد کرده است [۱۰]. به‌عنوان مثال، تأثیر حضور خودروهای برقی بر روی تلفات توان و هزینه بهره‌برداری شبکه توزیع در [۱۱ و ۱۲] و پرشدگی خطوط و انحراف ولتاژ شین‌ها در [۱۳] بررسی شده است. پیش‌بینی تقاضای شارژ خودروهای برقی با در نظر گرفتن تصادفی بودن زمان شروع شارژ و سطح شارژ اولیه هر خودرو در [۱۴]، ظرفیت ایستگاه‌های شارژ سریع و محدودیت مسافت رانندگی در [۱۵]، دینامیک زمانی- مکانی حرکت خودروها با استفاده از زنجیره سفر تصادفی^۱ و فرایند تصمیم‌گیری مارکوف در [۱۶] و استفاده از مدل دینامیک سیال^۲ و تئوری صف برای یک ایستگاه شارژ سریع در خروجی یک بزرگراه در [۱۷] فرمول‌بندی شده است.

بررسی مقالات نشان می‌دهد که تاکنون تأثیر تقاضای شارژ خودروهای برقی در ایستگاه‌های شارژ سریع بر تاب‌آوری شبکه توزیع فعال بررسی نشده است. بنابراین در این مقاله، یک مدل خطی آمیخته با عدد صحیح و مبتنی بر سناریو به‌منظور جزیره‌سازی دینامیکی شبکه توزیع با ترکیب دو هدف شامل حداکثر کردن بازیابی بارهای شبکه و تأمین انرژی ایستگاه‌های شارژ سریع ارائه شده است. همچنین یک مدل خطی جهت پیش‌بینی بار متناظر با تقاضای شارژ هریک از ایستگاه‌های شارژ سریع با در نظر گرفتن تمایل رانندگان برای مراجعه به ایستگاه‌های شارژ نزدیک‌تر پیشنهاد شده است. همچنین عدم قطعیت در پیش‌بینی توان بادی در نظر گرفته شده است.

بخش‌های مختلف این مقاله در ادامه، به‌صورت زیر است: طرح پیشنهادی دومرحله‌ای و روابط مربوط به آن در بخش دوم بیان شده است. در بخش سوم، مدل پیشنهادی در یک سیستم یکپارچه شامل شبکه‌های الکتریکی و ترافیکی، پیاده‌سازی و نتایج به‌دست‌آمده از آن تحلیل شده است. در

². Fluid Dynamic Model

¹. Random Trip Chain

$$\sum_{c \in B} P_{b,f,c}^G = 1 \quad \forall b \in B, \forall f \in F \quad (۸)$$

$$P_{b,f,c}^G - P_{b,f,c}^l = \sum_{c' \in \Gamma_c} P_{b,f,c,c'}^{flow, traf} \quad \forall b, \forall f, \forall c \quad (۹)$$

$$P_{b,f,c,c'}^{flow, traf} = -P_{b,f,c',c}^{flow, traf} \quad \forall b, \forall f, \forall c, \forall c' \quad (۱۰)$$

$$P_{b,f,c,c'}^{flow, traf} \leq x_{b,f,c,c'} \quad \forall b, \forall f, \forall c, \forall c' \quad (۱۱)$$

$$P_{f,t}^{ch} = \sum_{b \in B} N_{b,t}^{ev} \cdot G_{b,f}^{nom} \times \left((1 - SOC_b^{ev}) \cdot CAP_b^{ev} - distance_{b,f} \cdot EC_b^{ev} \right) \quad (۱۲)$$

$$P_{f,t}^{ch, act} = \sum_{k \in K} \alpha_{i,k,t} \cdot P_{f,t}^{ch} \quad (۱۳)$$

حداقل کردن مسیر بین هر گره و ایستگاه‌های شارژ به‌عنوان تابع هدف در رابطه (۴) بیان شده است. رابطه (۵)، فاصله بین هر یک از گره‌های ترافیکی و ایستگاه‌های شارژ را به‌صورت ترکیبی از چندین قوس بیان کرده است. روابط (۶) تا (۱۰) پیوستگی مسیر بین مبدأ حرکت و ایستگاه شارژ را تضمین می‌کنند [۸ و ۲۰]. مطابق رابطه (۱۱)، هر یک از قوس‌های شبکه الکتریکی فرضی که دارای جریان غیر صفر باشد، در مسیر بین گره مبدأ و ایستگاه شارژ قرار دارد. با اطلاع از تعداد خودروهایی که از هر گره به سمت ایستگاه‌های شارژ حرکت می‌کنند و همچنین سطح شارژ اولیه، ظرفیت باتری هر خودرو و کوتاه‌ترین مسیر بین مبدأ

به عبارت دیگر، تعداد بیشتری از خودروها به ایستگاه شارژ نزدیک‌تر و تعداد کمتری به ایستگاه دورتر مراجعه می‌کنند. در این مقاله، برای تعیین تعداد خودروهایی که از گره مبدأ به سمت یکی از ایستگاه‌های شارژ مراجعه می‌کنند، از روابط (۱) تا (۳) استفاده شده است [۱۹].

$$distance_{b,f}^{dev} = distance_{b,f} - distance_b^{\min} \quad (۱)$$

$$G_{b,f} = 1 - \frac{distance_{b,f}^{dev}}{\beta} \quad \forall b, \forall f \quad (۲)$$

$$G_{b,f}^{nom} = \frac{G_{b,f}}{\sum_{f' \in F} G_{b,f'}} \quad \forall b, \forall f \quad (۳)$$

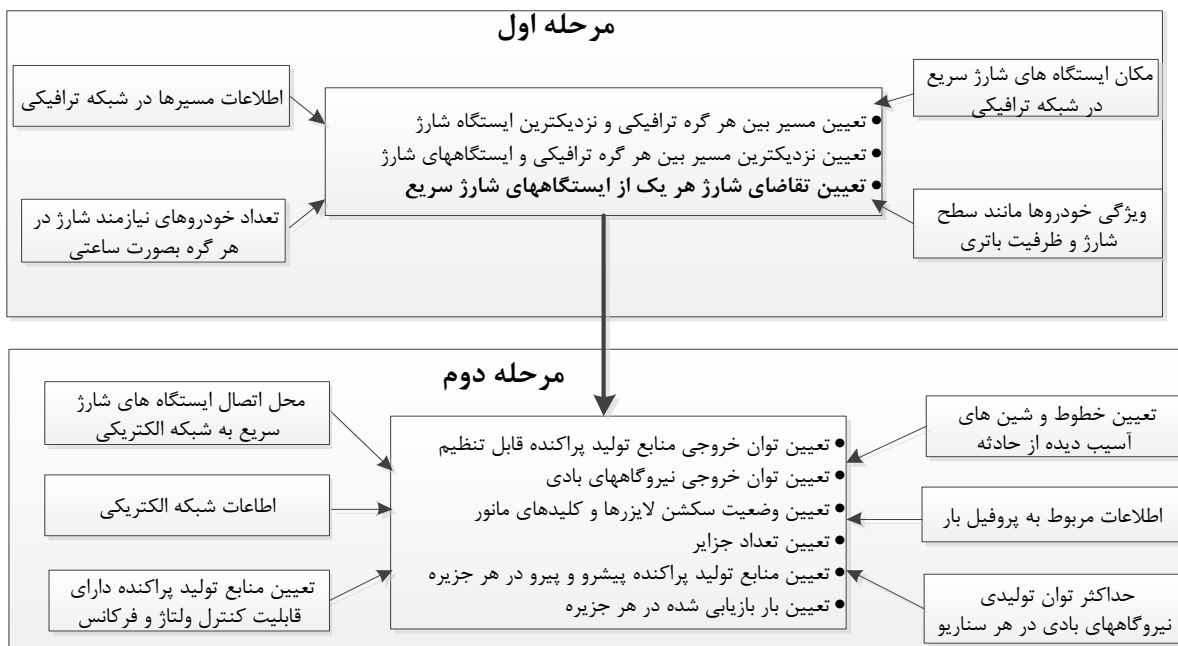
روابط مربوط به تعیین کوتاه‌ترین مسیر بین گره‌های ترافیکی مبدأ و هر یک از ایستگاه‌های شارژ سریع و در نتیجه تعیین تقاضای هر یک از ایستگاه‌ها در روابط (۴) تا (۱۳) بیان شده است.

$$Obj = \min \sum_{b \in B} \sum_{f \in F} distance_{b,f} \quad (۴)$$

$$distance_{b,f} = \sum_{c \in B} \sum_{c' \in B} x_{b,f,c,c'} \cdot adj_{c,c'} \quad \forall b \in B, \forall f \in F \quad (۵)$$

$$P_{b,f,c}^l = 1 \quad \forall b \in B, \forall f \in F, c = f \quad (۶)$$

$$P_{b,f,c}^G = 1 \quad \forall b \in B, \forall f \in F, c = b \quad (۷)$$



شکل ۲- داده‌های ورودی و متغیرهای خروجی هر مرحله در طرح پیشنهادی دومرحله‌ای

$$P_{m,t,\omega}^{DG} + P_{n,t,\omega}^{wind} = P_{i,t}^{load} + P_{f,t}^{ch,act} + \sum_{l \in \theta L_i} P_{l,t,\omega}^{flow} \quad (25)$$

$$Q_{m,t,\omega}^{DG} - Q_{i,t}^{load} = \sum_{l \in \theta L_i} Q_{l,t,\omega}^{flow} \quad m = N_{ADG}(i), \forall l \in \theta L_i \quad (26)$$

$$P_{n,t,w}^{wind} \leq \sum_{k \in K} \alpha_{i,k,t} \cdot P_{n,t,w}^{w,prod} \quad i = N_{WT}(n) \quad (27)$$

$$P_{l,t,w}^{flow} = P_{l,t,w}^{z-flow} + F2_l \times (\delta_{i,t,w} - \delta_{j,t,w}) + F1_l \times (V_{i,t,w} - V_{j,t,w}) \quad (28)$$

$$Q_{l,t,w}^{flow} = Q_{l,t,w}^{z-flow} + F1_l \times (\delta_{i,t,w} - \delta_{j,t,w}) + F2_l \times (V_{i,t,w} - V_{j,t,w}) \quad (29)$$

$$F1_l = \frac{r_l}{r_l^2 + x_l^2}, \quad F2_l = \frac{x_l}{r_l^2 + x_l^2} \quad (30)$$

$$-(1 - \beta_{l,t}) \cdot M \leq P_{l,t,w}^{z-flow} \leq (1 - \beta_{l,t}) \cdot M \quad (31)$$

$$-(1 - \beta_{l,t}) \cdot M \leq Q_{l,t,w}^{z-flow} \leq (1 - \beta_{l,t}) \cdot M \quad (32)$$

$$-\beta_{l,t} \cdot M \leq P_{l,t,w}^{flow} \leq \beta_{l,t} \cdot M \quad (33)$$

$$\left(P_{l,t,\omega}^{flow} \right)^2 + \left(Q_{l,t,\omega}^{flow} \right)^2 \leq \left(S_l^{max} \right)^2 \quad (34)$$

رابطه (۱۴) نشان می‌دهد که هر شین می‌تواند حداکثر عضو یکی از جزایر باشد. طبق رابطه (۱۵)، شین i در صورتی می‌تواند عضو جزیره k باشد که k امین عضو از مجموعه منابع دارای قابلیت کنترل ولتاژ و فرکانس به‌عنوان واحد پیشرو انتخاب شود. رابطه (۱۶) با تعریف عملگر $xnor$ بین دو متغیر باینری، بیان می‌کند که اگر شین‌های متصل به دو سر یک خط، عضو یک جزیره نباشند، آن خط، باز خواهد بود. تعیین وضعیت باز و بسته بودن خطوط و مدل‌سازی وجود سگشن‌لازرها در برخی از آن‌ها در رابطه (۱۷) بیان شده است. بارهای اکتیو و راکتیو هر شین در رابطه (۱۸) مشخص شده‌اند. روابط (۱۹) و (۲۰) محدودیت حداکثر و حداقل توان اکتیو و راکتیو منابع تولید پراکنده و رابطه (۲۱) محدودیت اندازه ولتاژ هر شین را نشان می‌دهند [۲۱]. اگر منبع تولید پراکنده‌ای به‌عنوان واحد پیشرو در نظر گرفته شود، اندازه و زاویه ولتاژ شین آن منبع در یک مقدار از پیش تعیین شده‌ای تنظیم خواهد شد که این شرط در روابط (۲۲) تا (۲۴) بیان شده است. قیود برابری توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی و مصرفی در هر جزیره توسط روابط (۲۵) و (۲۶) بیان شده است. طبق رابطه (۲۷)، توان تولیدی یک نیروگاه بادی در صورتی به شبکه تزریق خواهد شد که شین متصل به آن نیروگاه، عضوی از یک جزیره باشد [۲۲]. روابط پخش بار اکتیو و

حرکت و ایستگاه‌های شارژ، تقاضای شارژ هر یک از ایستگاه‌ها از رابطه (۱۲) تعیین می‌شود. مطابق رابطه (۱۳) در صورتی که یک ایستگاه شارژ در هیچ‌یک از جزایر شبکه توزیع قرار نگیرد، امکان ارائه سرویس شارژ به خودروهای برقی را نخواهد داشت و تقاضای شارژ آن ایستگاه برابر صفر خواهد بود. همچنین فرض شده است آن دسته از خودروهای برقی که به یکی از ایستگاه‌های شارژ بی‌برق می‌رسند، به ایستگاه شارژ دیگری مراجعه نخواهند کرد.

۲-۲- روابط حاکم بر مشخصه‌های شبکه توزیع

برای جزیره‌سازی لازم است در هر جزیره، حداقل یک منبع تولید پراکنده با قابلیت کنترل فرکانس و ولتاژ وجود داشته باشد. اگر چند منبع با این قابلیت در هر جزیره وجود داشته باشد، یکی از این واحدها به‌عنوان واحد پیشرو^۱ و بقیه به‌عنوان واحدهای پیرو^۲ انتخاب می‌شوند. در صورت نیاز به قطع هر یک از بارها، باید شین مربوط را با باز کردن برخی از سگشن‌لازرها از شبکه جدا کرد. روابط مربوط به مسئله جزیره‌سازی دینامیکی در روابط (۱۴) تا (۳۴) ارائه شده است.

$$\sum_{k \in K} \alpha_{i,k,t} \leq 1 \quad \forall i, \forall t \quad (14)$$

$$\alpha_{i,k,t} \leq \alpha_{r,k,t} \quad \forall i, \forall r = N_{CDG}(k) \quad (15)$$

$$\beta_{l,t} \leq \alpha_{i,k,t} \odot \alpha_{j,k,t} \quad \forall i, j \in \psi_l \quad (16)$$

$$\beta_{l,t} \leq HL_l, \quad \beta_{l,t} \geq (1 - sec_l) \cdot HL_l, \quad \alpha_{i,k,t} \leq HB_i \quad (17)$$

$$P_{i,t}^{load} = \sum_{k \in K} \alpha_{i,k,t} \cdot P_{load_{i,t}}, \quad Q_{i,t}^{load} = \sum_{k \in K} \alpha_{i,k,t} \cdot Q_{load_{i,t}} \quad (18)$$

$$P_{m,t,\omega}^{DG} \leq \sum_{k \in K} \alpha_{i,k,t} \cdot P_m^{DG,max} \quad i = N_{CDG}(m) \quad (19)$$

$$\sum_{k \in K} \alpha_{i,k,t} \cdot Q_m^{DG,min} \leq Q_{m,t,\omega}^{DG} \leq \sum_{k \in K} \alpha_{i,k,t} \cdot Q_m^{DG,max} \quad i = N_{CDG}(m) \quad (20)$$

$$\sum_{k \in K} \alpha_{i,k,t} \cdot V_i^{min} \leq V_{i,t,\omega} \leq \sum_{k \in K} \alpha_{i,k,t} \cdot V_i^{max} \quad (21)$$

$$V_{i,t,w} \leq V_m^{DG,set} \cdot \alpha_{i,k,t} + V_i^{max} \cdot \sum_{k' \neq k} \alpha_{i,k',t} \quad i = N_{CDG}(m), m = k \quad (22)$$

$$V_{i,t,w} \geq V_m^{DG,set} \cdot \alpha_{i,k,t} + V_i^{min} \cdot \sum_{k' \neq k} \alpha_{i,k',t} \quad i = N_{CDG}(m), m = k \quad (23)$$

$$-(1 - \alpha_{i,k,t}) \cdot \delta_i^{max} \leq \delta_{i,t,w} \leq (1 - \alpha_{i,k,t}) \cdot \delta_i^{max} \quad i = N_{CDG}(m), m = k \quad (24)$$

². Slave

¹. Master

جدول ۱- اطلاعات منابع تولید پراکنده

واحد	واحد	توان اکتیو (kW)	توان راکتیو (kVAr)	واحد	واحد	توان اکتیو (kW)	توان راکتیو (kVAr)
DG1	۱۷	۱۰۰۰	۶۰۰	DG8	۷	۲۰۰	۱۵۰
DG2	۲۴	۱۰۰۰	۸۰۰	DG9	۳۳	۳۰۰	۲۰۰
DG3	۵۱	۹۰۰	۸۰۰	DG10	۴۳	۳۰۰	۲۰۰
DG4	۵۹	۱۲۰۰	۱۰۰۰	DG11	۸۸	۲۰۰	۱۰۰
DG5	۶۷	۱۰۰۰	۸۰۰	DG12	۱۰۳	۵۰۰	۳۰۰
DG6	۷۶	۱۱۰۰	۸۰۰	DG13	۱۱۳	۳۰۰	۱۵۰
DG7	۱۰۷	۱۵۰۰	۱۲۰۰	DG14	۱۱۷	۳۰۰	۱۵۰

با توجه به خطی بودن مدل پیشنهادی این مقاله، برای خطی سازی روابط (۱۶) و (۳۴) به ترتیب از روش های ارائه شده در [۹] و [۲۳] استفاده شده است.

۳- پیاده سازی مدل پیشنهادی

مدل پیشنهادی در یک شبکه توزیع ۱۱ کیلوولتی مطابق شکل (۳) شامل ۳ فیدر و ۱۱۸ شین پیاده سازی شده است. اطلاعات شبکه توزیع از [۲۴] استخراج شده است. اطلاعات مکان و ظرفیت منابع تولید پراکنده در جدول ۱ آمده است [۹]. در این شبکه، ۱۴ منبع تولید پراکنده وجود دارد که هفت منبع ۱ تا ۷ دارای قابلیت کنترل ولتاژ و فرکانس هستند. همچنین ۱۰ توربین بادی با ظرفیت تولید هر کدام برابر ۵۰۰ کیلووات در نظر گرفته شده و مکان نصب آنها در شکل (۳) نشان داده شده است [۹]. سناریوهای متناظر با توان تولیدی بادی در شکل (۴) و منحنی بار روزانه برای هر شین در شکل (۵) نشان داده شده است [۹]. اولویت همه بارهای شبکه، برابر و پروفیل بار روزانه برای همه شین ها به صورت یکسان در نظر گرفته شده است. مطابق شکل (۳) فرض می شود که در اثر وقوع یک حادثه شدید، چند خطا به صورت همزمان در سطح شبکه توزیع رخ داده و شبکه مورد مطالعه به مدت ۲۴ ساعت به طور کامل از شبکه بالادست جدا شده است.

شکل (۶)، شبکه حمل و نقل را نشان می دهد که شامل ۲۵ گره است [۱۵]. اعداد درج شده روی هر قوس، فاصله بین دو گره را برحسب مایل نشان می دهد. با توجه به وسعت شبکه مورد مطالعه، چهار ایستگاه برای شارژ خودروهای برقی در نظر گرفته شده که مکان آنها در شبکه الکتریکی و ترافیکی (شکل های ۳ و ۶) با ستاره نشان داده شده است. محل اتصال گره های ترافیکی دارای ایستگاه شارژ به شبکه الکتریکی نیز در جدول ۲ آورده شده است.

راکتیو در روابط (۲۸) تا (۳۰) بیان شده است. روابط (۳۱) و (۳۲) محدودیت متغیر کمکی مورد استفاده در پخش بار را نشان می دهند. با توجه به رابطه (۳۳)، در صورت آسیب دیدگی یا باز شدن یک خط، توان عبوری از آن برابر صفر خواهد بود. رابطه (۳۴) محدودیت حداکثر توان ظاهری هر خط را نشان می دهد. مطابق رابطه (۳۵) شاخص تاب آوری شبکه توزیع به صورت نسبت بار اکتیو باز یابی شده به کل بار اکتیو قطع شده و با در نظر گرفتن اولویت هریک از بارها محاسبه شده است [۹-۷]:

$$SRI = \frac{\sum_{t \in T} \sum_{i \in I} pr_{i,t} \cdot P_{i,t}^{load}}{\sum_{t \in T} \sum_{i \in I} pr_{i,t} \cdot P_{load,i,t}} \quad (35)$$

۲-۲-۱- قواعد توپولوژی شبکه توزیع

شبکه توزیع باید دارای شرط پیوستگی و شعاعی بودن باشد. برای تضمین پیوستگی شین ها در هر جزیره از مدل ارائه شده در [۸ و ۲۰] استفاده شده است. روابط (۳۶) تا (۳۹) نیز شعاعی بودن هر جزیره را تضمین می کنند. روابط (۳۶) و (۳۷) خطوط فعال در هر جزیره را مشخص می کنند. برای شعاعی بودن هر جزیره، لازم است ضمن پیوستگی شین ها، تعداد شاخه های فعال هر جزیره، یکی کمتر از تعداد شین های عضو آن جزیره باشد که این مسئله توسط روابط (۳۸) و (۳۹) بیان شده است.

$$-\beta_{i,t} \leq \beta \beta_{i,k,t} \leq \beta_{i,t} \quad (36)$$

$$-(1-\beta_{i,t}) \leq \beta \beta_{i,k,t} - \alpha_{i,k,t} \leq (1-\beta_{i,t}) \quad \forall i \in \psi_l \quad (37)$$

$$\sum_{i \in L} \beta \beta_{i,k,t} - \sum_{i \in I} \alpha_{i,k,t} + 1 \leq (1-\alpha_{ii,k,t}) \cdot M \quad ii = N_{cc}(m), m = k \quad (38)$$

$$\sum_{i \in L} \beta \beta_{i,k,t} - \sum_{i \in I} \alpha_{i,k,t} + 1 \geq -(1-\alpha_{ii,k,t}) \cdot M \quad ii = N_{cc}(m), m = k \quad (39)$$

۲-۲-۲- تابع هدف

با توجه به در نظر گرفتن دو هدف متفاوت شامل حداکثر کردن باز یابی بارهای شبکه و حداکثر کردن تأمین انرژی ایستگاه های شارژ، تابع هدف مدل پیشنهادی با استفاده از روش ضرایب وزنی به صورت زیر تعریف شده است:

$$Obj = \max \sum_{t \in T} (a_1 \sum_{i \in I} pr_{i,t}^{load} \cdot P_{i,t}^{load} + a_2 \sum_{f \in F} P_{f,t}^{ch,act}) \quad (40)$$

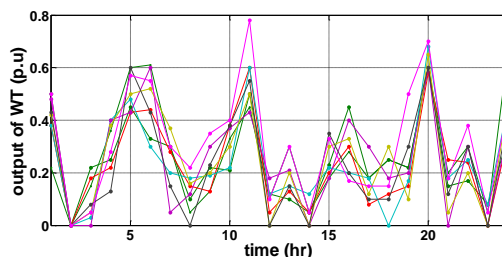
که ضرایب a_1 و a_2 ضرایب وزنی توابع هدف هستند.

کل خودروها را نشان می‌دهد. گره‌هایی که تعداد بیشتری از خودروها در آن‌ها حضور دارند، گره‌هایی هستند که به دلیل وجود اماکن تجاری یا اداری، اهمیت بیشتری برای رانندگان دارند. فرض شده است که ۱۰ درصد از خودروهای موجود در هر گره ترافیکی با کاهش سطح شارژ باتری به مقدار ۳۰ درصد تصمیم به شارژ مجدد می‌گیرند. میزان مصرف انرژی خودروها، ۰/۲۷ کیلووات ساعت در هر مایل فرض شده است [۲۵]. با پیاده‌سازی مرحله اول و مطابق شکل ۹، بار الکتریکی متناظر با تقاضای شارژ هر یک از ایستگاه‌های شارژ ۱ تا ۴ در ۲۴ ساعت به ترتیب برابر ۶/۱۷۱، ۸/۹۵۷، ۱۰/۵۰۸ و ۹/۷ مگاوات ساعت به دست آمده است. دلیل تقاضای پایین‌تر ایستگاه ۱، دوری این ایستگاه از مراکز پرتردد شبکه ترافیکی و تمایل کمتر

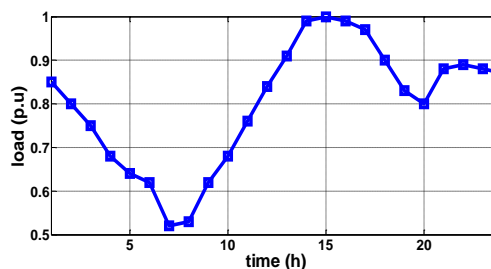
جدول ۲- تلاقی گره‌های شبکه‌های ترافیکی و الکتریکی

شماره ایستگاه شارژ سریع	۱	۲	۳	۴
محل اتصال به شین الکتریکی	۵	۲۷	۸۵	۱۰۹
محل قرارگیری در گره ترافیکی	۲	۷	۱۳	۲۰

رانندگان برای شارژ در این ایستگاه به دلیل دوری مسافت است. پس از تعیین تقاضای شارژ ایستگاه‌ها در مرحله اول، برای ارزیابی تأثیر این تقاضا بر مسئله جزیره‌سازی

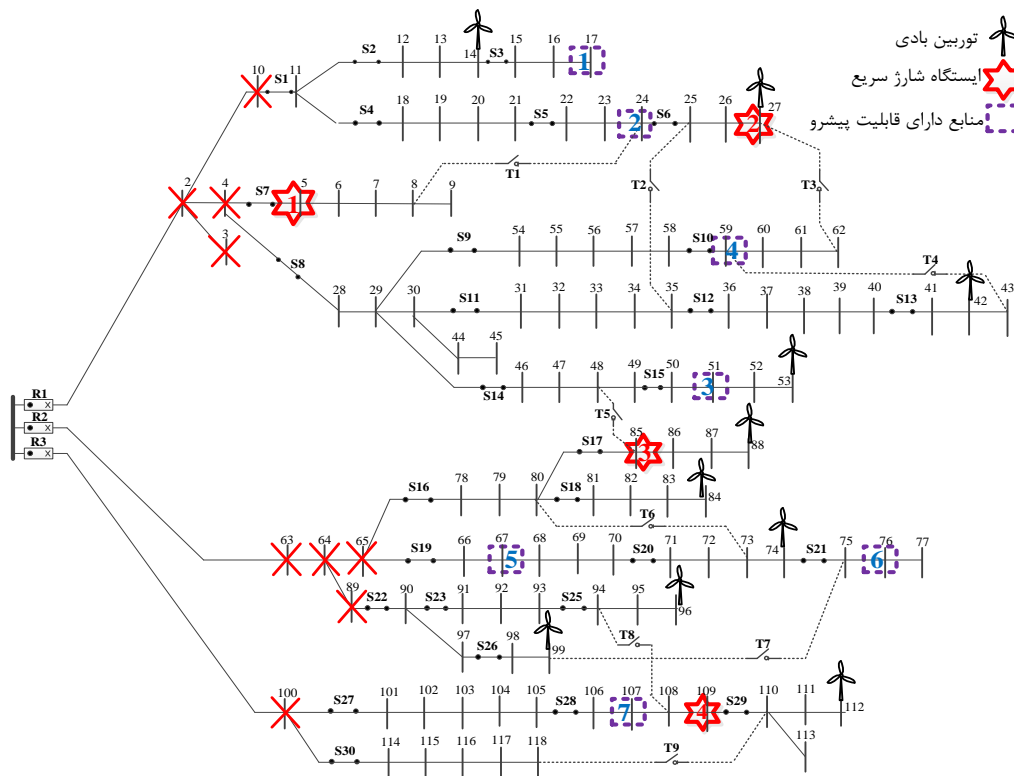


شکل ۴- سناریوهای توان تولیدی بادی



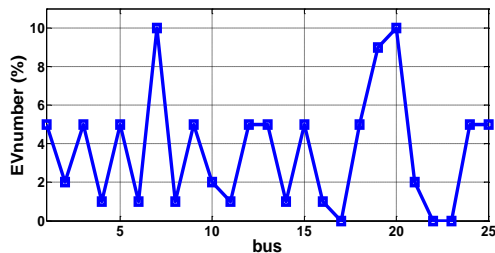
شکل ۵- منحنی تغییرات بار روزانه

تعداد خودروهای برقی موجود در شبکه حمل‌ونقل در ساعت اوج ترافیک، برابر ۲۰۰۰ در نظر گرفته شده است. مطابق شکل (۷)، تعداد خودروهایی که در هر ساعت در شبکه ترافیکی در حال حرکت هستند، رابطه‌ای تقریباً معکوس با تغییرات بار شبکه توزیع دارد. خودروها در هر ساعت در گره‌های متفاوتی حضور دارند که شکل (۸) نسبت تعداد خودروهای موجود در هر گره ترافیکی به تعداد

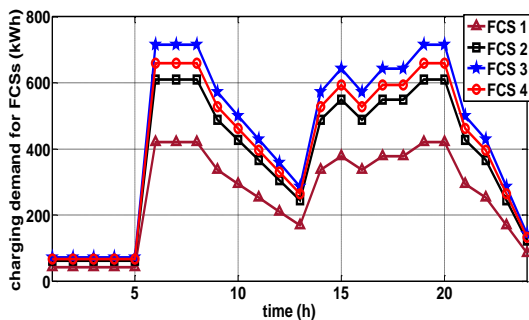


شکل ۳- شبکه ۱۱۸ شین مورد مطالعه

شکل (۱۰)، مرزبندی جزایر در این حالت را نشان می‌دهد. با توجه به وجود هفت منبع دارای قابلیت کنترل ولتاژ و فرکانس، شش جزیره تشکیل شده است. منبع ۵، به دلیل نداشتن ظرفیت کافی برای تأمین انرژی بارهای مجاور، عضو هیچ جزیره‌ای نشده است که این عدم تعادل بین توان تولیدی این منبع و توان مصرفی کوچک‌ترین جزیره‌ای که می‌تواند با باز شدن سکشن‌های S۱۹ و S۲۰ تشکیل شود، در شکل (نشان داده شده است. در ساعت ۱۵، ۶/۲ کیلووات اضافه‌بار در این بخش وجود دارد؛ بنابراین امکان



شکل ۸- تعداد خودروهای برقی در هر گره ترافیکی



شکل ۹- تقاضای ایستگاه‌های شارژ سریع

تشکیل این جزیره وجود ندارد. مطابق جدول ۳، ۹۰/۰۸۷ مگاوات ساعت و ۶۶/۵۱۱ مگاوار ساعت از بارهای اکتیو و راکتیو شبکه در طول ۲۴ ساعت، بازیابی شده است. در این

جدول ۳- بارهای بازیابی شده در حالت اول

جزیره	انرژی اکتیو (kWh)	انرژی راکتیو (kVARh)
۱	۸.۷۲۷	۶.۰۶۵
۲	۱۸.۲۶۷	۱۲.۳۹۱
۳	۱۶.۲۶۰	۱۳.۵۸۴
۴	۱۴.۴۴۶	۱۰.۳۵۴
۵	-	-
۶	۶.۹۴۲	۴.۴۱۶
۷	۲۵.۴۴۶	۱۹.۷۰۱

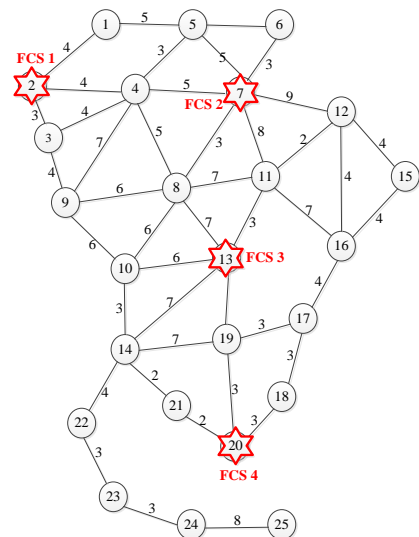
دینامیکی شبکه توزیع در مرحله دوم، سه مورد مطالعاتی زیر بررسی می‌شوند:

مورد اول: جزیره‌سازی استاتیکی با یک منبع دارای قابلیت پیشرو در هر جزیره بدون حضور ایستگاه‌های شارژ؛

مورد دوم: جزیره‌سازی دینامیکی با یک منبع دارای قابلیت پیشرو در هر جزیره بدون حضور ایستگاه‌های شارژ؛

مورد سوم: جزیره‌سازی استاتیکی با یک منبع با قابلیت پیشرو در هر جزیره در حضور ایستگاه‌های شارژ.

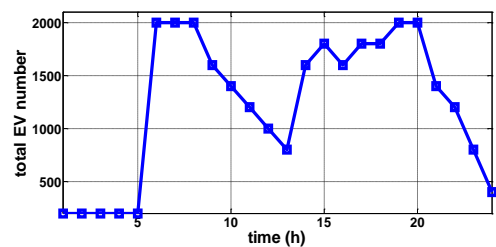
در مورد سوم که تأثیر تقاضای شارژ خودروهای برقی در نظر گرفته شده است، مقدار ۳۵/۳۳۶ مگاوات ساعت (تقاضای شارژ ایستگاه‌های شارژ) به مقدار بارهای قطع شده شبکه اضافه خواهد شد. با توجه به خطاهایی که در ابتدای فیدرهای شبکه مورد مطالعه رخ داده است، پس از وقوع خطاهای هم‌زمان، همه بارهای شبکه قطع شده‌اند؛ بنابراین



شکل ۶- شبکه حمل‌ونقل ۲۵ گره‌ای

مقاومت^۱ شبکه در این حالت برابر صفر است. تحلیل نتایج شبیه‌سازی در ادامه آورده شده است:

مورد مطالعاتی اول:



شکل ۷- تعداد کل خودروهای برقی در شبکه ترافیکی

^۱. Resistancy

حالت، برنامه پس از ۲۴ ثانیه به جواب بهینه رسیده است. **مورد مطالعاتی دوم:** در این حالت که با امکان تغییر وضعیت سکشن لایزرها و کلیدهای مانور در هر ساعت، می‌توان مرزبندی متفاوتی را

جزیره ۵ در حالت اول را تأیید می‌کند. مطابق جدول ۵، با استفاده از جزیره‌سازی دینامیکی مقدار ۱۴۲/۹۰۷ مگاوات ساعت و ۱۰۳/۷۶۰ مگاوار ساعت از بارهای اکتیو و راکتیو شبکه توزیع در طول ۲۴ ساعت بازایی شده است که با

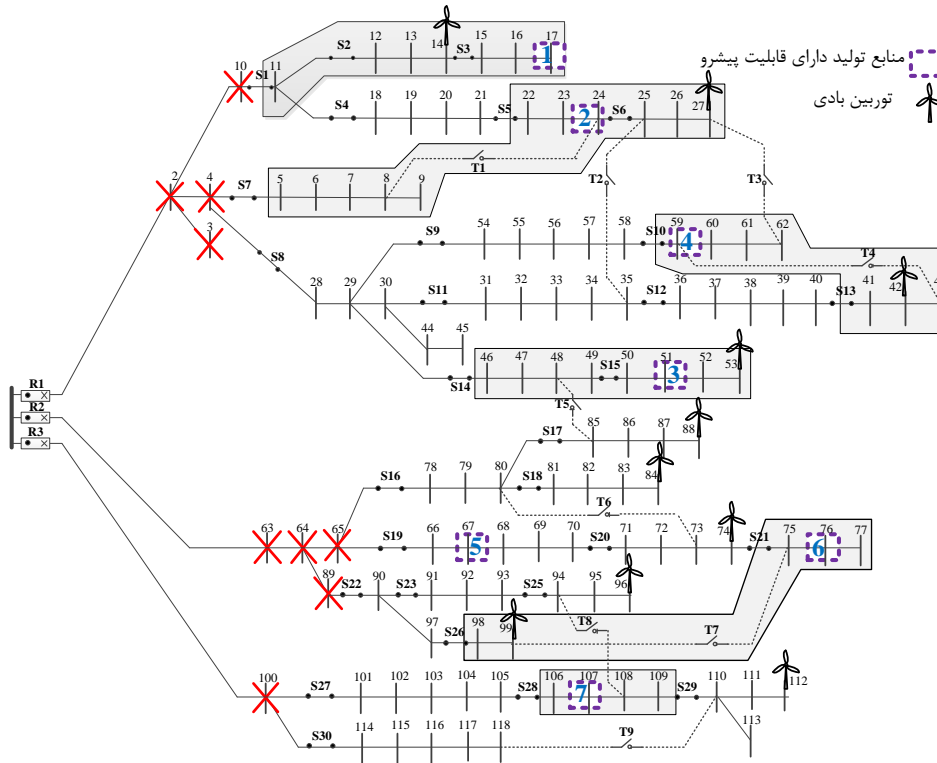
جدول ۴- شین‌های بازایی شده در مورد مطالعاتی دوم (جزیره‌سازی دینامیکی بدون حضور خودروهای برقی)

جزیره ساعت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۱	۱۱-۱۷	۵-۹، ۲۲-۲۴	۴۶-۵۳	۲۵-۲۷، ۴۱-۴۳، ۵۹-۶۲	۶۶-۷۰	۷۵-۷۷، ۹۸-۹۹	۹۴-۹۶، ۱۰۶-۱۰۹
۲	۱۱-۱۷	۵-۹، ۲۲-۲۴	۴۶-۵۳	۲۵-۲۷، ۳۱-۳۵، ۵۹-۶۲	۶۶-۷۰	۷۵-۷۷، ۹۸-۹۹	۹۴-۹۶، ۱۰۶-۱۰۹
۳	۱۱-۱۷	۱۸-۲۴	۴۶-۵۳	۲۵-۲۷، ۳۱-۳۵، ۴۱-۴۳، ۵۹-۶۲	۶۶-۷۰	۷۵-۷۷، ۹۸-۹۹	۹۴-۹۶، ۱۰۶-۱۰۹
۴	۱۲-۱۷	۱۱، ۱۸-۲۷	۴۶-۵۳	۴۱-۴۳، ۵۴-۶۲	۶۶-۷۰	۷۵-۷۷، ۹۸-۹۹	۹۴-۹۶، ۱۰۶-۱۰۹
۵	۱۱-۱۷	۵-۹، ۲۲-۲۷، ۳۱-۳۵	۴۶-۵۳، ۸۵-۸۸	۴۱-۴۳، ۵۴-۶۲	۶۶-۷۰	۷۱-۷۷، ۹۸-۹۹	۱۰۱-۱۰۹
۶	۱۱-۲۱	۵-۹، ۲۲-۲۷، ۳۱-۳۵	۴۶-۵۳، ۸۵-۸۸	۴۱-۴۳، ۵۴-۶۲	۶۶-۷۰	۷۱-۷۷، ۹۸-۹۹	۹۴-۹۶، ۱۰۱-۱۰۹
۷	۱۱-۲۱	۲۲-۲۷، ۳۱-۳۵	۴۶-۵۳، ۷۸-۸۰، ۸۵-۸۸	۴۱-۴۳، ۵۹-۶۲	۶۶-۷۰	۷۱-۷۷، ۹۸-۹۹	۱۰۶-۱۱۸
۸	۱۱-۲۱	۲۲-۲۷، ۳۱-۳۵	۴۶-۵۳، ۷۸-۸۰، ۸۵-۸۸	۴۱-۴۳، ۵۹-۶۲	۶۶-۷۰	۷۱-۷۷، ۹۸-۹۹	۱۰۶-۱۱۸
۹	۱۱-۲۱	۵-۹، ۲۲-۲۷، ۳۱-۳۵	۴۶-۵۳، ۸۵-۸۸	۴۱-۴۳، ۵۴-۶۲	۶۶-۷۰	۷۵-۷۷، ۹۸-۹۹	۹۴-۹۶، ۱۰۱-۱۰۹
۱۰	۱۱-۱۷	۵-۱۱، ۹-۲۴، ۳۱-۳۵	۴۶-۵۳	۲۵-۲۷، ۳۱-۳۵، ۴۱-۴۳، ۵۹-۶۲	۶۶-۷۰	۷۵-۷۷، ۹۸-۹۹	۹۴-۹۶، ۱۰۶-۱۰۹
۱۱	۱۱-۱۷	۱۸-۲۷	۴۶-۵۳	۴۱-۴۳، ۵۴-۶۲	۶۶-۷۰	۷۵-۷۷، ۹۸-۹۹	۹۴-۹۶، ۱۰۶-۱۰۹
۱۲	۱۱-۱۷	۵-۹، ۲۲-۲۷	۴۶-۵۳	۴۱-۴۳، ۵۹-۶۲	۶۶-۷۰	۷۵-۷۷، ۹۸-۹۹	۹۴-۹۶، ۱۰۶-۱۰۹
۱۳	۱۱-۱۷	۵-۹، ۲۲-۲۷	۴۶-۵۳	۴۱-۴۳، ۵۹-۶۲	۶۶-۷۰	۷۵-۷۷، ۹۸-۹۹	۹۴-۹۶، ۱۰۶-۱۰۹
۱۴	۱۱-۱۷	۵-۹، ۲۲-۲۷	۴۶-۵۳	۴۱-۴۳، ۵۹-۶۲	۶۶-۷۰	۷۵-۷۷، ۹۸-۹۹	۱۰۶-۱۰۹
۱۵	۱۱-۱۷	۵-۹، ۲۲-۲۷	۴۶-۵۳	۴۱-۴۳، ۵۹-۶۲	-----	۷۵-۷۷، ۹۸-۹۹	۹۴-۹۶، ۱۰۶-۱۰۹
۱۶	۱۱-۱۷	۵-۹، ۲۲-۲۷	۴۶-۵۳	۴۱-۴۳، ۵۹-۶۲	۶۶-۷۰	۷۵-۷۷، ۹۸-۹۹	۹۴-۹۶، ۱۰۶-۱۰۹
۱۷	۱۱-۱۷	۵-۹، ۲۲-۲۴	۴۶-۵۳	۲۵-۲۷، ۴۱-۴۳، ۵۹-۶۲	۶۶-۷۰	۷۵-۷۷، ۹۸-۹۹	۹۴-۹۶، ۱۰۶-۱۰۹
۱۸	۱۱-۱۷	۵-۹، ۲۲-۲۷	۴۶-۵۳	۴۱-۴۳، ۵۹-۶۲	۶۶-۷۰	۷۵-۷۷، ۹۸-۹۹	۹۴-۹۶، ۱۰۶-۱۰۹
۱۹	۱۱-۱۷	۵-۹، ۲۲-۲۷	۴۶-۵۳	۴۱-۴۳، ۵۹-۶۲	۶۶-۷۰	۷۵-۷۷، ۹۸-۹۹	۹۴-۹۶، ۱۰۶-۱۰۹
۲۰	۱۱-۱۷	۱۸-۲۷	۴۶-۵۳	۴۱-۴۳، ۵۴-۶۲	۶۶-۷۰	۷۵-۷۷، ۹۸-۹۹	۹۴-۹۶، ۱۰۶-۱۰۹
۲۱	۱۱-۱۷	۵-۹، ۲۲-۲۷	۴۶-۵۳	۴۱-۴۳، ۵۹-۶۲	۶۶-۷۰	۷۵-۷۷، ۹۸-۹۹	۹۴-۹۶، ۱۰۶-۱۰۹
۲۲	۱۱-۱۷	۵-۹، ۲۲-۲۷	۴۶-۵۳	۴۱-۴۳، ۵۹-۶۲	۶۶-۷۰	۷۵-۷۷، ۹۸-۹۹	۹۴-۹۶، ۱۰۶-۱۰۹
۲۳	۱۱-۱۷	۵-۹، ۲۲-۲۴	۴۶-۵۳	۲۵-۲۷، ۴۱-۴۳، ۵۹-۶۲	۶۶-۷۰	۷۵-۷۷، ۹۸-۹۹	۹۴-۹۶، ۱۰۶-۱۰۹
۲۴	۱۱-۱۷	۵-۹، ۲۲-۲۷	۴۶-۵۳	۴۱-۴۳، ۵۹-۶۲	۶۶-۷۰	۷۵-۷۷، ۹۸-۹۹	۹۴-۹۶، ۱۰۶-۱۰۹

برای جزایر در هر ساعت در نظر گرفت، شین‌های بازایی شده در هر ساعت در جدول ۴ آورده شده است. با توجه به جدول ۴، در ساعت ۱۵ هیچ جزیره‌ای در حضور منبع ۵ تشکیل نشده است؛ بنابراین این نتیجه نیز عدم تشکیل

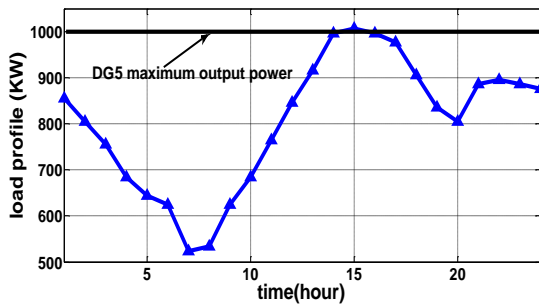
بازایی ۳۲/۸ درصد از بارهای قطع شده، شاخص تاب‌آوری ۱۲/۱ درصد نسبت به جزیره‌سازی استاتیکی در حالت اول بهبود یافته است.

برای جزایر در هر ساعت در نظر گرفت، شین‌های بازایی شده در هر ساعت در جدول ۴ آورده شده است. با توجه به جدول ۴، در ساعت ۱۵ هیچ جزیره‌ای در حضور منبع ۵ تشکیل نشده است؛ بنابراین این نتیجه نیز عدم تشکیل

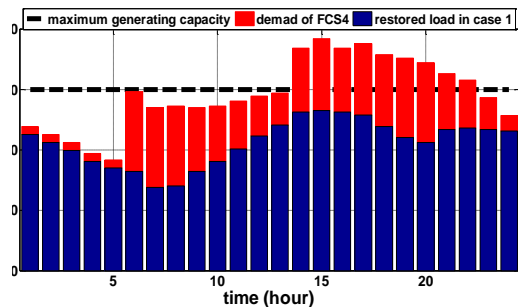


شکل ۱۰- تعیین بهینه مرزهای جزایر در حالت اول

تعداد بین توان‌های تولیدی و مصرفی، در شکل (۱۳) نشان داده شده است.



شکل ۱۱- عدم تعادل بین توان تولیدی و مصرفی در کوچک ترین جزیره ممکن با وجود منبع ۵ در حالت اول



شکل ۱۳- عدم تعادل بین توان‌های اکتیو تولیدی و مصرفی در جزیره هفتم در حالت سوم

جدول ۵- بارهای بازیابی شده در حالت دوم

جزیره	انرژی اکتیو (kWh)	انرژی راکتیو (kVARh)
۱	۱۱،۲۷۵	۷،۷۸۹
۲	۲۳،۴۱۹	۱۵،۸۳۵
۳	۱۹،۶۷۸	۱۵،۵۹۵
۴	۲۵،۴۴۳	۱۸،۹۷۴
۵	۱۸،۳۲۲	۱۲،۳۸۴
۶	۱۰،۷۵۴	۶،۶۳۷
۷	۳۴،۰۱۶	۲۶،۵۶۶

مورد مطالعاتی سوم:

در این حالت، مرزبندی برخی از جزایر به دلیل تأثیر بار الکتریکی متناظر با ایستگاه‌های شارژ سریع، تغییر می‌کند که این تغییرات در شکل (۱۲) قابل تشخیص است. در این حالت، پنج جزیره تشکیل شده است. با مقایسه شکل‌های (۱۰) و (۱۲) مشاهده می‌شود جزیره‌ای که در حالت اول با منبع ۷ تشکیل شده بود، با قرار گرفتن ایستگاه شارژ شماره ۴ در محدوده این جزیره، کنترل‌ناپذیر بودن بارهای شبکه و همچنین کمبود ظرفیت تولید در این جزیره برای تغذیه ایستگاه ۴، در حالت سوم تشکیل نشده است که این عدم

جدول ۶- بارهای بازیابی شده در حالت سوم

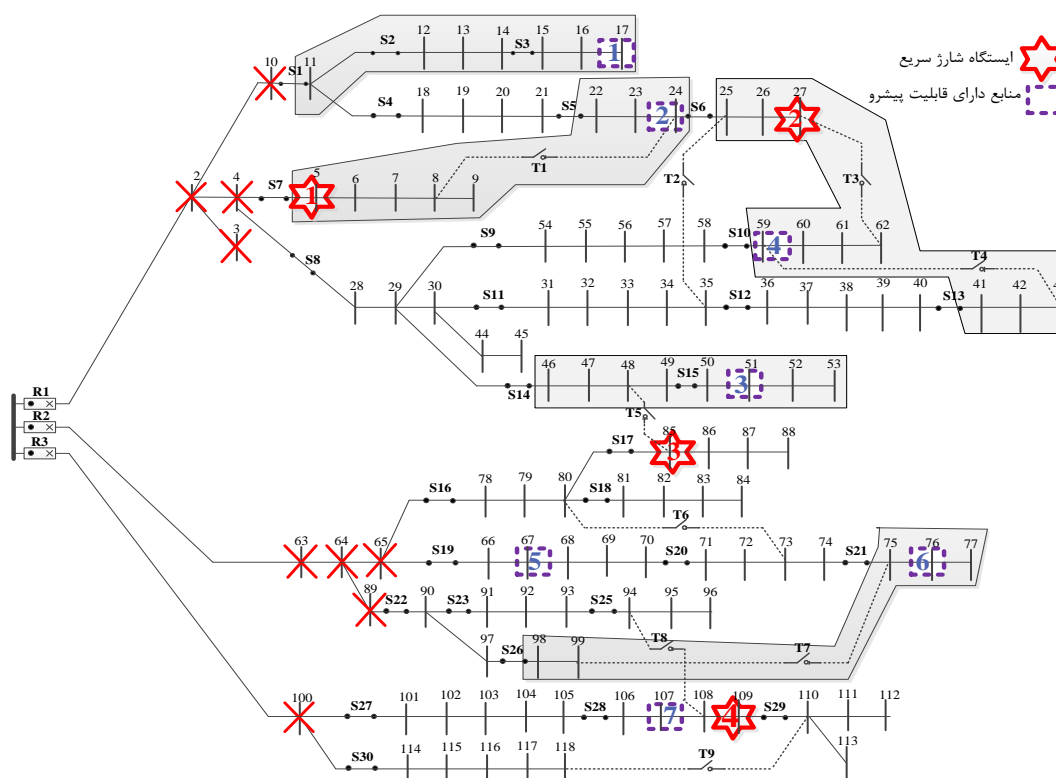
جزیره	انرژی اکتیو (kWh)		انرژی راکتیو (kVARh)
	بار عادی	ایستگاه شارژ	
۱	۸,۷۲۷	-	۶,۰۶۵
۲	۱۵,۰۵۷	۶,۱۷۱	۸,۵۶۲
۳	۱۶,۲۶۰	-	۱۳,۵۸۴
۴	۱۷,۶۵۵	۸,۹۵۷	۱۴,۱۸۳
۵	-	-	-
۶	۶,۹۴۳	-	۴,۴۱۶
۷	-	-	-

ساعت به شبکه الکتریکی، مقدار $۸۶/۷۰۴$ مگاوات ساعت از مجموع بارهای عادی و ایستگاه‌های شارژ در طول ۲۴ ساعت، بازیابی می‌شوند که با بازیابی $۱۸/۴$ درصد از بارهای شبکه، شاخص تاب‌آوری نسبت به حالتی که فقط یک منبع دارای قابلیت کنترل ولتاژ و فرکانس در هر جزیره وجود داشته باشد، $۱/۵$ درصد بهبود خواهد یافت. در این حالت، منابع تولید پراکنده‌ای که به شین‌های ۱۷، ۲۴ و ۵۹ متصل هستند، در یک جزیره قرار خواهند گرفت که منبع واقع در شین ۵۹ به‌عنوان واحد پیشرو و دو منبع دیگر به‌عنوان واحدهای پیرو عمل خواهند کرد.

از چهار ایستگاه شارژ موجود در شبکه، دو ایستگاه ۱ و ۲ توسط بهره‌بردار شبکه توزیع به شبکه الکتریکی متصل شده‌اند، ولی ایستگاه‌های ۳ و ۴ به دلیل کمبود ظرفیت تولید منابع موجود در مجاورت این دو ایستگاه، در هیچ جزیره‌ای قرار نگرفته، بنابراین بی‌برق مانده‌اند.

با اتصال ایستگاه‌های ۱ و ۲ به شبکه الکتریکی با مجموع تقاضای شارژ $۱۵/۱۲۸$ مگاوات ساعت و همچنین اتصال $۶۴/۶۴۲$ مگاوات ساعت از بارهای عادی شبکه، در مجموع $۷۹/۷۷۰$ مگاوات ساعت از بارهای شبکه در طول ۲۴ ساعت بازیابی شده است. با بازیابی $۱۶/۹$ درصد از بارهای شبکه، شاخص تاب‌آوری نسبت به حالت اول $۳/۸$ درصد کاهش یافته است که دلیل آن، عدم بازیابی $۲۵/۴۴۵$ مگاوات ساعت از بارهای عادی شبکه به دلیل حذف یکی از جزایر و تغییر مرزهای برخی دیگر از جزایر در اثر اضافه بار ناشی از ایستگاه‌های شارژ سریع است. بارهای اکتیو و راکتیو بازیابی شده در هر جزیره در جدول ۶ آمده است.

اگر امکان تشکیل جزایری شامل چند منبع دارای قابلیت کنترل ولتاژ و فرکانس در هر جزیره وجود داشته باشد، سه جزیره شامل شش منبع تولید پراکنده تشکیل خواهد شد. در این صورت، با اتصال دو ایستگاه شارژ متصل به شین‌های ۵ و ۲۷ با مجموع تقاضای شارژ $۱۵/۱۲۸$ مگاوات



شکل ۱۲- تعیین بهینه مرزهای جزایر در حالت سوم

شرایطی، امکان وجود چند منبع دارای قابلیت کنترل ولتاژ و فرکانس در هر جزیره به دلیل هم‌پوشانی تولید این منابع و همچنین پیاده‌سازی طرح جزیره‌سازی دینامیکی موجب کاهش تأثیر نامطلوب بار الکتریکی متناظر با شارژ خودروهای برقی بر تاب‌آوری شبکه توزیع شده است.

نتایج شبیه‌سازی در سه حالت مختلف برای مقایسه، در جدول ۷ آمده است. با مقایسه نتایج می‌توان نتیجه‌گیری کرد در صورتی که هیچ کنترلی روی بارهای شبکه توزیع وجود نداشته باشد، حضور خودروهای برقی و بار الکتریکی متناظر با تقاضای شارژ آن‌ها در ایستگاه‌های شارژ سریع، موجب کاهش تاب‌آوری شبکه شده است. در چنین

جدول ۷- مقایسه بار بازیابی شده در سه مورد مطالعاتی

مورد	حضور خودروها	جزیره‌سازی	تعداد منبع دارای قابلیت کنترل ولتاژ و فرکانس در هر جزیره	تعداد جزایر	بار بازیابی شده شبکه (MWh)	بار بازیابی شده متناظر با تقاضای ایستگاه‌های شارژ (MWh)	مجموع بار بازیابی شده (MWh)
اول	×	استاتیک	یک منبع	۶	۹۰/۰۸۷	-	۹۰/۰۸۷
دوم	×	دینامیک	یک منبع	متغیر	۱۴۲/۹۰۷	-	۱۴۲/۹۰۷
سوم	✓	استاتیک	یک منبع	۵	۶۴/۶۴۲	۱۵/۱۲۸	۷۹/۷۷۰

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدلی به‌منظور پیش‌بینی تقاضای شارژ خودروهای برقی در ایستگاه‌های شارژ سریع و بررسی تأثیر این تقاضا بر تاب‌آوری شبکه توزیع ارائه شد. با تحلیل نتایج، مشخص شد که اضافه‌بار ناشی از سرویس‌دهی ایستگاه‌های شارژ منجر به تغییر مرزهای جزایر، بازیابی مقدار کمتری از بارها و در نتیجه کاهش شاخص تاب‌آوری شبکه خواهد شد. با این حال، امکان بهره‌برداری از چند منبع دارای قابلیت کنترل ولتاژ و فرکانس در هر جزیره و همچنین استفاده از طرح‌های بازآرایی و جزیره‌سازی دینامیکی توسط بهره‌بردار شبکه توزیع می‌تواند موجب بهبود شاخص تاب‌آوری شبکه و بازیابی مقدار بیشتری از بارهای شبکه شود.

فهرست علائم

مجموعه‌ها و اندیس‌ها

N_{ADG}	مجموعه شین‌های متصل به منابع تولید پراکنده
N_{CDG}	مجموعه شین‌های متصل به منابع تولید پیش‌رو
Ψ_l	مجموعه شین‌های دو سر خط l
N_{wt}	مجموعه شین‌های متصل به توربین‌های بادی
B	مجموعه گره‌های ترافیکی
Γ_c	مجموعه مسیرهای متصل به گره ترافیکی c
F	مجموعه گره‌های ترافیکی دارای ایستگاه شارژ سریع
n	اندیس توربین‌های بادی
i, ii	اندیس شین‌ها
t	اندیس دوره زمانی
b, b', c, c'	اندیس گره‌های ترافیکی
f, f'	اندیس ایستگاه‌های شارژ سریع
l	اندیس خطوط

k, k'	اندیس جزایر
m	اندیس منابع تولید پراکنده
θ_{Li}	اندیس خطوط متصل به شین الکتریکی i
h	اندیس تقسیمات در خطی‌سازی محدودیت توان

پارامترها

M	عدد بسیار بزرگ
H	تعداد تقسیمات در خطی‌سازی محدودیت توان
HL_l	ظاهری عبوری از هر خط
HL_l	متغیر باینری سالم بودن خط l پس از وقوع خطا
Sec_l	متغیر باینری وجود کلید سکش‌لایزر روی خط l
HB_i	متغیر باینری سالم بودن شین i پس از وقوع خطا
$P_{load_i,t}, Q_{load_i,t}$	توان اکتیو و راکتیو قطع شده شین i در زمان t
$P_i^{load, fic}$	بار اکتیو شین i در شبکه فرضی
$P_m^{DG, max}$	حداکثر توان اکتیو تولیدی منابع تولید پراکنده
$Q_m^{DG, min}, Q_m^{DG, max}$	حداقل و حداکثر توان راکتیو تولیدی منابع
V_i^{max}, V_i^{min}	حداکثر و حداقل اندازه ولتاژ مجاز در شین i
$P_{n,t,\omega}^{w, prod}$	توان تولیدی توربین بادی n در زمان t و سناریو ω
$V_m^{DG, set}, \delta_m^{DG, set}$	اندازه و زاویه ولتاژ تعیین شده برای منبع پیش رو m
$Pr_{i,t}$	اولویت بار متصل به شین i در زمان t
$N_{b,t}^{ev}$	تعداد خودروهای برقی نیازمند شارژ در گره b
EC_b^{ev}	توان مصرفی خودروی موجود در گره ترافیکی b

$x_{b,f,c,c'}$	متغیر باینری وجود قوس c, c' در مسیر b, f	cap_b^{ev}, SOC_b^{ev}	ظرفیت و سطح شارژ باتری خودروی موجود در گره b
$P_{b,f,c,c'}^{flow, traf}$	توان عبوری از قوس c, c' در مسیر b, f شبکه فرضی	$Adj_{b,b'}$	مسافت بین گره ترافیکی b و b'
$\alpha_{i,k,t}$	متغیر باینری که یک بودن آن، نشان‌دهنده عضویت شین i در جزیره k است.	β	مسافت مرجع
$\beta_{l,t}$	متغیر باینری که یک بودن آن، نشان‌دهنده فعال بودن خط l است.	$P_{b,f,c}^G$	توان منبع الکتریکی فرضی در گره c از مسیر ترافیکی b, f
$\beta\beta_{l,k,t}$	متغیر باینری که یک بودن آن، نشان‌دهنده وجود خط فعال l در جزیره k است.	$P_{b,f,c}^l$	بار الکتریکی فرضی در گره c از مسیر ترافیکی b, f
$P_{i,t}^{load}, Q_{i,t}^{load}$	بار اکتیو و راکتیو بازبایی شده در شین i در زمان t	$distance_b^{min}$	طول مسیر بین گره ترافیکی b و نزدیک‌ترین ایستگاه شارژ
$P_{m,t,\omega}^{DG}, Q_{m,t,\omega}^{DG}$	توان اکتیو و راکتیو منبع m در زمان t و سناریوی ω	$distance_{b,f}^{dev}$	مقدار انحراف مسیر بین گره ترافیکی b و ایستگاه شارژ f نسبت به فاصله نزدیک‌ترین ایستگاه
$P_{n,t,\omega}^{wind}$	توان تزیقی توربین بادی n در زمان t و سناریوی ω	$distance_{b,f}$	طول کوتاه‌ترین مسیر بین گره ترافیکی b و ایستگاه شارژ f
$P_{l,t,\omega}^{flow}, Q_{l,t,\omega}^{flow}$	توان اکتیو و راکتیو عبوری از خط l	$G_{b,f}^{nom}$	در صد خودروهای مراجعه‌کننده از گره b به ایستگاه شارژ f
$V_{i,t,w}, \delta_{i,t,w}$	اندازه و زاویه ولتاژ شین i در زمان t و سناریوی w	$P_{f,t}^{ch}$	تقاضای شارژ ایستگاه f در زمان t
$P_{l,t}^{flow, fic}$	توان اکتیو عبوری از خط l در شبکه فرضی	$P_{f,t}^{ch, act}$	توان دریافتی ایستگاه شارژ f از شبکه الکتریکی
$P_{m,t}^{DG, fic}$	توان تولیدی منبع تولید پراکنده m در شبکه فرضی		

مراجع

- [1] M. Panteli, D.N. Trakas, P. Mancarella and N.D. Hatziargyriou, "Power Systems Resilience Assessment: Hardening and Smart Operational Enhancement Strategies", Proceedings of the IEEE, Vol. 105, No. 7, 2017, pp. 1202-1213.
- [2] X. Liu, M. Shahidepour, Z. Li, X. Liu, Y. Cao and Z. Bie, "Microgrids for Enhancing the Power Grid Resilience in Extreme Conditions", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 8, No. 2, 2017, pp. 589-597.
- [3] Z. Bie, Y. Lin, G. Li and F. Li, "Battling the Extreme: A Study on the Power System Resilience", Proceedings of the IEEE, Vol. 105, No. 7, 2017, pp. 1253-1266.
- [4] Z. Li, M. Shahidepour, F. Aminifar, A. Alabdulwahab and Y. Al-Turki, "Networked Microgrids for Enhancing the Power System Resilience", Proceedings of the IEEE, Vol. 105, No. 7, 2017, pp. 1289-1310.
- [5] G. Liu, M. Starke, B. Xiao and K. Tomsovic, "Robust optimisation-based microgrid scheduling with islanding constraints", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 11, No. 7, 2017, pp. 1820-1828.
- [6] M.Z. El-Sharafy and H.E.Z. Farag "Back-feed power restoration using distributed constraint optimization in smart distribution grids clustered into microgrids", Applied Energy, Vol. 206, 2017, pp. 1102-1117.
- [7] C. Chen, J. Wang, F. Qiu and D. Zhao, "Resilient Distribution System by Microgrids Formation After Natural Disasters", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 7, No. 2, 2016, pp. 958-966.
- [8] T. Ding, Y. Lin, Z. Bie and C. Chen, "A resilient microgrid formation strategy for load restoration considering master-slave distributed generators and topology reconfiguration", Applied Energy, Vol. 199, 2017, pp. 205-216.
- [9] S. Mousavizadeh, M.R. Haghifam and M.H. Shariatkah, "A linear two-stage method for resiliency analysis in distribution systems considering renewable energy and demand response resources", Applied Energy, Vol. 211, 2018, pp. 443-460.

[۱۰] محمد علیزاده، میثم جعفری نوکنندی، یامین سلطان مرادی، «مدل‌سازی و بهینه‌سازی مصرف انرژی در خانه هوشمند با حضور ذخیره‌ساز انرژی، سلول خورشیدی، خودروی برقی و پاسخگویی بار»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۷، ۱۳۹۸، صفحه ۲۱۵-۲۲۶.

- [11] P. Grahn, J. Munkhammar, J. Widén, K. Alvehag and L. Söder, "PHEV Home-Charging Model Based on Residential Activity Patterns", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 28, No. 3, 2013, pp. 2507-2515.
- [12] S. Shao, M. Pipattanasomporn and S. Rahman, "Challenges of PHEV penetration to the residential distribution network", in 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2009.
- [13] D. Tang and P. Wang, "Nodal Impact Assessment and Alleviation of Moving Electric Vehicle Loads: From Traffic Flow to Power Flow", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 31, No. 6, 2016, pp. 4231-4242.
- [14] K. Qian, C. Zhou, M. Allan and Y. Yuan, "Modeling of Load Demand Due to EV Battery Charging in Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 26, No. 2, 2011, pp. 802-810.
- [15] H. Zhang, S.J. Moura, Z. Hu and Y. Song, "PEV Fast-Charging Station Siting and Sizing on Coupled Transportation and Power Networks", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 9, No. 4, 2018, pp. 2595-2605.
- [16] D. Tang and P. Wang "Probabilistic Modeling of Nodal Charging Demand Based on Spatial-Temporal Dynamics of Moving Electric Vehicles", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 7, No.2, 2016, pp. 627-636.
- [17] S. Bae and A. Kwasinski, "Spatial and Temporal Model of Electric Vehicle Charging Demand", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 3, No. 1, 2012, pp. 394-403.
- [۱۸] سید محمدباقر ساداتی، جمال مشتاق، میعادرضا شفیعی خواه، «تأثیر خودروهای الکتریکی و برنامه پاسخگویی بار بر بهره‌برداری بهینه از شبکه توزیع در چهارچوب یک مدل دوسطحی جدید»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۴، ۱۳۹۷، صفحه ۵۳-۶۸.
- [19] J.G. Kim and M. Kuby, "The deviation-flow refueling location model for optimizing a network of refueling stations", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 37, No. 6, 2012, pp. 5406-5420.
- [20] T. Ding, K. Sun, C. Huang, Z. Bie and F. Li, "Mixed-integer linear programming-based splitting strategies for power system islanding operation considering network connectivity", IEEE Systems Journal, Vol. 12, No. 1, 2015, pp. 350-359.
- [۲۱] مسعود احمدی گرجی، نیما امجدی، «برنامه‌ریزی توسعه پویای شبکه‌های توزیع در حضور منابع تولید پراکنده با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی جدید دوسطحی»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۴، شماره ۴۴، ۱۳۹۵، صفحه ۱۴۳-۱۵۷.
- [۲۲] جمشید آقائی، امین رحیمی رضایی، محمدرضا کریمی، «هماهنگی نیروگاه‌های بادی و دستگاه‌های ذخیره‌ساز سیستم قدرت در مسئله برنامه‌ریزی امنیت-مقید مشارکت واحدها با استفاده از بهینه‌سازی استوار»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۳، ۱۳۹۷، صفحه ۲۰۷-۲۲۰.
- [23] T. Akbari and M.T. Bina, "Linear approximated formulation of AC optimal power flow using binary discretisation", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 10, No. 5, 2016, pp. 1117-1123.
- [24] D. Zhang, Z. Fu and L. Zhang, "An improved TS algorithm for loss-minimum reconfiguration in large-scale distribution systems", Electric Power Systems Research, Vol. 77, No. 5, 2007, pp. 685-694.
- [25] M.E. Khodayar, L. Wu and Z. Li, "Electric Vehicle Mobility in Transmission-Constrained Hourly Power Generation Scheduling", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 4, No. 2, 2013, pp. 779-788.