

بهینه‌سازی حضور خودروهای الکتریکی در کنار واحدهای تولید توان به منظور بهبود قابلیت اطمینان ریزشبکه

محمد رضا آقاابراهیمی^۱، مهدی تورانی^۲

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران
Aghaebrahimi@birjand.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران
Tourani.mahdi@birjand.ac.ir

چکیده: ریزشبکه‌ها نسل جدیدی از سیستم‌های قدرت در مقیاس کوچک هستند که می‌توانند به صورت مستقل از شبکه اصلی قدرت، نیاز مشترکین خود را تأمین نمایند. از ویژگی‌های این سیستم‌ها، امکان تجمع تولیدات پراکنده در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر، با ماهیت احتمالاتی و نوسانی، است که این موضوع ضرورت بررسی قابلیت اطمینان ریزشبکه و حصول اطمینان از حفظ قابلیت اطمینان، و در صورت نیاز، اتخاذ روش‌هایی برای بهبود آن را برجسته می‌سازد. در این مقاله سعی بر آن است تا با بهره‌گیری از روش‌های احتمالاتی، به بهینه‌سازی ترکیب تولیدات توان در کنار خودروهای الکتریکی با هدف بهبود قابلیت اطمینان ریزشبکه پرداخته شود. بهینه‌سازی ترکیب تولیدات توان در کنار خودروهای الکتریکی به منظور بهبود قابلیت اطمینان ریزشبکه، ارائه روشی نوین در برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروها و مدل‌سازی توان تزریقی به ریزشبکه از نوآوری‌های مطرح در این مقاله هستند.

واژه‌های کلیدی: بهبود قابلیت اطمینان ریزشبکه، ترکیب بهینه واحدهای تولید توان، الگوریتم مونت کارلو، حداکثر توان قابل انتقال به ریزشبکه، خودروهای الکتریکی

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۴/۰۵/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۴/۱۲/۰۴

نام نویسنده مسئول : محمد رضا آقا ابراهیمی

نشانی نویسنده مسئول : دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه بیرجند

۱- مقدمه

پیوستن تولیدات کوچک و ذخیره‌ای انرژی به سیستم‌های ولتاژ پایین یا متوسط، نوع جدیدی از سیستم قدرت را به نام ریزشبکه تشکیل می‌دهد. این سیستم قادر است به صورت جدا از شبکه مصرف مشترکین خود را تأمین و بدین ترتیب مانع از انتقال خاموشی‌های شبکه اصلی به مشترکین ریزشبکه شود. از سویی دیگر، در صورت عدم توانایی در تأمین بار مشترکین در ساعاتی خاص، ریزشبکه قادر خواهد بود با اتصال به شبکه اصلی، کمبود توان خود را جبران نماید. استفاده مؤثرتر از واحدهای تولید پراکنده تجدیدپذیر، امکان تأمین تقاضای رشد بار و بهبود عملکرد سیستم، از دیگر ویژگی‌های ریزشبکه به شمار می‌آیند.

افزایش به کارگیری واحدهای تولید توان با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در ریزشبکه‌ها سبب توجه به قابلیت‌اطمینان در این سیستم‌ها شده است. از آنجایی که این قبیل منابع تولید پراکنده دارای عدم قطعیت بسیار هستند، بایستی تدابیر لازم جهت تأمین پایدار توان برای مصرف‌کننده اندیشیده شود. در این زمینه تاکنون پژوهش‌های مختلفی صورت گرفته است. در مرجع [۱] به ارائه یک روش تحلیلی برای ارزیابی قابلیت‌اطمینان مشترکین ریزشبکه پرداخته شده است. در [۲]، کاربرد سیستم‌های توزیع با قابلیت‌اطمینان بالا^۱ (HRDS) در بهره‌برداری اقتصادی ریزشبکه بررسی شده است. در مرجع [۳]، نویسندگان به معرفی مجموعه‌ای از استانداردها برای تعریف بهتر ریزشبکه پرداخته‌اند. این استانداردها شامل پارامترهای قابلیت‌اطمینان برای ریزشبکه در حالت مستقل، شاخص حضور تولیدات پراکنده، شاخص‌های اقتصادی ریزشبکه و ... هستند. در مرجع [۴] به دسته‌بندی شبکه توزیع به منظور تشکیل ریزشبکه‌ها با خصوصیت خودکفایی بهینه پرداخته شده است. در مرجع [۵]، نویسندگان به دسته‌بندی شبکه توزیع درون ریزشبکه‌هایی با قابلیت‌اطمینان و امنیت تولید بالا پرداخته‌اند. بدین منظور از شاخص‌های SAIDI، SAIFI و MAIFI برای ارزیابی قابلیت‌اطمینان استفاده شده است. در مرجع [۶]، دسته‌بندی شبکه توزیع درون ریزشبکه‌ها با لحاظ کردن خاصیت احتمالاتی بار و تولید پراکنده صورت پذیرفته است. ریزشبکه‌های حاصل، از بهینه‌سازی مسئله با هدف بهبود قابلیت‌اطمینان و امنیت تولید، به دست می‌آیند.

امری که در این بین قابلیت بررسی بیشتری دارد، تأثیر خودروهای الکتریکی بر قابلیت‌اطمینان ریزشبکه است. خودروهای الکتریکی وسایل نقلیه‌ای هستند که می‌توانند ضمن فعالیت در فرایند حمل و نقل، به دلیل دارا بودن ذخیره‌سازهای انرژی، مزیت‌های بسیاری را برای شبکه قدرت فراهم آورند. در زمینه خودروهای الکتریکی در مرجع [۷] مطالعاتی بر روی آنالیز هزینه-فایده و تأثیر خودروهای

هیبریدی برقی متصل شونده به شبکه^۲ (PHEV) انجام شده است. در مرجع [۸] نویسنده یک روش شارژ برای PHEV با تنظیم تقاضای مصرف بر اساس اطلاعات قیمت ارائه می‌کند. در مراجع [۹-۱۲] تأثیر خودروهای الکتریکی بر سیستم توزیع، به ویژه اثر آن بر روی امنیت شبکه، بررسی شده است. مطالعات بر روی پروفایل بهینه شارژ برای تشدید بار در ساعات غیر پیک در مرجع [۱۳] انجام شده است. سود شرکت دادن PHEV در انواع بازارهای برق نیز در مرجع [۱۴] مورد بحث قرار گرفته است.

استفاده از خودروهای الکتریکی در ریزشبکه، با توجه به عدم قطعیت بالای ناشی از ماهیت واحدهای تجدیدپذیر، سبب کاهش هزینه در خرید ذخیره‌سازهای انرژی می‌شود. در این مقاله سعی بر آن است تا با به کارگیری خودروهای الکتریکی در کنار سایر تولیدکننده‌های توان به بهبود قابلیت‌اطمینان ریزشبکه پرداخته شود. بهینه‌سازی ترکیب تولیدات توان در کنار خودروهای الکتریکی به منظور بهبود قابلیت‌اطمینان ریزشبکه، ارائه روشی جدید در برنامه‌ریزی زمان شارژ و دشارژ خودروها و مدل‌سازی حالت اتصال به شبکه در ریزشبکه‌ها، نوآوری‌هایی هستند که در این مقاله ارائه می‌شوند. برای این منظور، در بخش دوم به بیان مدل پیشنهادی برای هر موضوع و در بخش سوم به تعریف مسئله پرداخته می‌شود. سپس، در بخش چهارم نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل‌های ارائه شده در مقاله و در نهایت، در بخش پنجم نتیجه‌گیری مقاله بیان می‌گردد.

۲- مدل‌های پیشنهادی

قابلیت‌اطمینان یکی از مهم‌ترین پارامترهای ارزیابی عملکرد ریزشبکه است. برای بهبود این پارامتر، ابتدا بایستی با توجه به سیستم مورد مطالعه، شاخص‌هایی تعریف و سپس ارزیابی بر اساس این شاخص‌ها صورت گیرد. در این میان، شاخص‌های متنوعی برای قابلیت‌اطمینان وجود دارند که از جمله آن‌ها می‌توان به شاخص عدم تأمین انرژی (EENS) اشاره کرد. از آنجایی که ریزشبکه باید بتواند نیاز مشترکین خود را برآورده سازد، این شاخص توانایی ریزشبکه را در تأمین بار مشترکین بررسی می‌کند. از دیگر ویژگی‌های ریزشبکه، تأمین این نیاز با بیشترین استقلال از شبکه اصلی است تا بدین ترتیب از بروز خاموشی‌های ناخواسته ناشی از شبکه بالادست جلوگیری شود. برای بررسی این پارامتر، نیاز به استفاده از شاخص‌های قابلیت‌اطمینان مرتبط با ریزشبکه است که نشان‌دهنده میزان وابستگی ریزشبکه به شبکه اصلی هستند. هر چه قدر میزان این وابستگی کمتر باشد، امکان انتقال خاموشی از شبکه اصلی به ریزشبکه کمتر خواهد بود. در این مقاله، در بررسی و ارزیابی قابلیت‌اطمینان علاوه بر شاخص عدم تأمین انرژی، از شاخص مدت‌زمان اتصال ریزشبکه به شبکه اصلی نیز استفاده می‌شود.

² Plug-in Hybrid Electric Vehicles¹ High Reliability Distribution System

برای به دست آوردن سری زمانی بار مشترکین از الگوی بار IEEE_RTS با بار پیک ریزشبه استفاده شده که اطلاعات آن در مرجع [۱۵] آمده است.

ب- سری زمانی تولید توان بادی

سری زمانی توان بادی متأثر از مدل سرعت باد و مدل توربین بادی است.

از آنجایی که سرعت باد در هر ساعت بستگی به زمان قبل از آن و نیز اطلاعات تاریخی سرعت باد در همان زمان دارد، با توجه به مرجع [۱۶] از رابطه ۴ برای شبیه‌سازی سرعت باد در هر ساعت استفاده می‌شود.

$$SW_t = \mu_t + \sigma_t \times y_t \quad (۴)$$

که در آن SW_t سرعت وزش باد در زمان t و μ_t و σ_t میانگین و انحراف معیار سرعت باد در زمان t در سال‌های گذشته هستند.

پارامتر y_t تأثیر سرعت باد در زمان‌های قبل از t را بر روی سرعت باد در زمان t نشان می‌دهد و می‌توان آن را با استفاده از مدل ARMA به دست آورد.

$$A(q)y_t = C(q)e_t \quad (۵)$$

$$A(q) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_{n_a}q^{-n_a} \quad (۶)$$

$$C(q) = 1 + c_1q^{-1} + c_2q^{-2} + \dots + c_{n_c}q^{-n_c} \quad (۷)$$

e_t خروجی مدل در زمان t و e_t نویز سفید نرمال با میانگین صفر و انحراف معیار σ_n است. n_a و n_c درجه آزادی مدل و ضرایب a_i و c_i نیز با استفاده از داده‌های تاریخی به دست می‌آیند.

مدل توربین بادی را نیز می‌توان با استفاده از مرجع [۷] به صورت رابطه ۸ بیان کرد.

$$P_{Wind} = \begin{cases} 0 & V < V_{cut\ in} \\ P_{rated}(aV^2 + bV + c) & V_{cut\ in} \leq V < V_{rated} \\ P_{rated} & V_{rated} \leq V < V_{cut\ out} \\ 0 & V_{cut\ out} \leq V \end{cases} \quad (۸)$$

P_{Wind} توان خروجی توربین بادی، V سرعت باد، $V_{cut\ in}$ سرعت قطع پایین، V_{rated} سرعت نامی، $V_{cut\ out}$ سرعت قطع بالا، P_{rated} توان نامی توربین و a ، b و c مشخصات وابسته به توربین هستند. مقادیر a ، b و c با توجه به سرعت قطع بالا، سرعت قطع پایین و سرعت نامی قابل محاسبه بوده که روابط آن در مرجع [۱۷] آمده است.

برای محاسبه سری زمانی تولید توان بادی، ابتدا، سری زمانی شبیه‌سازی سرعت باد در بازه موردنظر با توجه به روش ارائه شده تعیین و سپس مطابق سرعت باد در هر ساعت و مدل توربین، سری زمانی تولید بادی به دست می‌آید.

پ - سری زمانی تولید توان فتوولتائیک

برای به دست آوردن مدل تولیدی فتوولتائیک، شدت تابش و مدل پنل‌های خورشیدی موردنیاز هستند. شدت تابش خورشید در زمان t ، G_{H_t} را می‌توان با توجه به مرجع [۱۸] از تابع توزیع نرمال به دست آورد.

از آنجایی که تجمیع گسترده واحدهای تولیدپراکنده با انرژی‌های تجدیدپذیر از مزایای ریزشبه‌ها به شمار می‌رود، مبحث عدم قطعیت از مسائل مطرح در این حوزه خواهد بود. برای ارزیابی قابلیت اطمینان با توجه به عدم قطعیت موجود، بایستی از روش‌های احتمالاتی بهره‌گیری نمود. از جمله این روش‌ها، روش مونت کارلو است. روش‌های مونت کارلو یک دسته از الگوریتم‌های محاسباتی هستند که بر اساس تکرار تصادفی نمونه‌برداری، برای محاسبه نتایج، به کار می‌روند. به دلیل اتکای این روش‌ها به تکرار محاسبات و اعداد تصادفی، این الگوریتم‌ها برای کامپیوترها مناسب هستند. روش‌های متفاوتی برای اجرای الگوریتم مونت کارلو وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به مونت کارلو ترتیبی و مونت کارلو غیرترتیبی اشاره کرد که استفاده از هر کدام از این روش‌ها، بسته به نوع مطالعه مشخص می‌شود. از آنجایی که در این مقاله خودروهای الکتریکی در ریزشبه وجود دارند و با توجه به خاصیت شارژ و دشارژ خودروها و وابستگی آن‌ها به زمان، از روش مونت کارلو ترتیبی در ارزیابی قابلیت اطمینان ریزشبه استفاده می‌شود.

در روش مونت کارلو ترتیبی، ابتدا سری‌های زمانی مربوط به هر یک از اجزای ریزشبه تعریف و سپس با استفاده از این سری‌ها، مطالعات قابلیت اطمینان انجام می‌پذیرد. نحوه ارزیابی قابلیت اطمینان بدین صورت است که در مرحله نخست، یک زمان تصادفی در بازه مورد مطالعه انتخاب و سپس وضعیت شبکه از روی سری‌های زمانی مشخص می‌شود. با مشخص شدن وضعیت شبکه، شاخص‌های قابلیت اطمینان محاسبه شده و شرط توقف مونت کارلو ترتیبی بررسی می‌شود. در صورت برآورده نشدن شرط توقف، دوباره به مرحله نخست رفته و مراحل بالا تکرار می‌شود. پس از توقف الگوریتم، امید ریاضی شاخص‌های قابلیت اطمینان، از روی پاسخ‌های هر تکرار، به دست خواهد آمد.

$$E(ENS) = \frac{1}{N} \left(\sum_i^N P_{NS_i} \right) \times Period \quad (۱)$$

$$E(T_{connect}) = \frac{1}{N} \left(\sum_i^N \alpha_{connect_i} \right) \times Period \quad (۲)$$

$$\alpha_{connect} = \begin{cases} 0 & \text{if microgrid disconnected} \\ 1 & \text{if microgrid is connected} \end{cases} \quad (۳)$$

در روابط بالا، ENS شاخص انرژی تأمین نشده ریزشبه، $E(ENS)$ امید ریاضی آن، $T_{connect}$ شاخص مدت زمان اتصال ریزشبه به شبکه اصلی، $E(T_{connect})$ امید ریاضی آن، $Period$ دوره موردنظر و N تعداد تکرار مونت کارلو هستند. معیار همگرایی الگوریتم مونت کارلو در این مقاله، ضریب همگرایی^۳ میانگین برای شاخص‌های قابلیت اطمینان است.

۲-۱- سری زمانی اجزای ریزشبه

الف - سری زمانی بار مشترکین

³Coefficient of Variation

مقداری از شارژ باتری دست نخورده باقی بماند. در صورتی که بتوان این مقدار از توان را قبل از خروج خودرو از پارکینگ تأمین نمود، ظرفیت استفاده از باتری خودروها افزایش می‌یابد. در این مقاله، با استفاده از یک سیگنال کنترلی، وضعیت شارژ مجدد خودرو تا زمان خروج محاسبه و در صورت اطمینان از شارژ مجدد باتری، تا بیشترین سطح ممکن، دشارژ می‌شود. البته لازم به ذکر است که همواره یک سطح حداقلی دیگر به منظور جلوگیری از کاهش عمر مفید باتری وجود دارد که به آن عمق تخلیه (DOD) گفته می‌شود و بایستی در دشارژ خودرو رعایت گردد. با به دست آوردن سیگنال کنترلی از روی زمان ورود و خروج خودروها و با توجه به وضعیت کمبود توان، باتری خودرو با توجه به حداکثر نرخ دشارژ، تخلیه و توان حاصل به شبکه قابل تزریق خواهد بود. مدیریت این تزریق توان به گونه‌ای طراحی شده است که تا حد ممکن، خودروها از اتصال ریزشبه به شبکه اصلی جلوگیری نمایند. در صورتی که امکان جلوگیری از اتصال ریزشبه وجود نداشته باشد - توان لازم برای تأمین مصرف ریزشبه با وجود خودروها فراهم نشود - شارژ و یا دشارژ خودرو وابسته به وضعیت جدید- کمبود یا مازاد تولید در شبکه اصلی و ریزشبه خواهد بود.

ث- سری زمانی توان تزریقی به ریزشبه در حالت اتصال به شبکه اصلی

مدل ارائه شده برای توان تزریقی به ریزشبه در این مقاله بر اساس حداکثر بار قابل انتقال به ریزشبه، از طرف شبکه اصلی، است. برای به دست آوردن این حداکثر بار، بایستی میزان بار دریافت شده توسط باس اتصال ریزشبه تا جایی افزایش داده شود تا قیود سیستم نقض گردد. روش‌های متفاوتی برای تعیین بیشترین توان قابل انتقال به ریزشبه وجود دارد. یکی از این روش‌ها، که در این مقاله از آن استفاده شده است، روش بهینه‌سازی توان حداکثر است. فرآیند این روش شامل تعیین تابع هدف، تعیین قیود و حل مسئله بهینه‌سازی با استفاده از یک الگوریتم معتبر و کاراست. در این روش، زمان محاسبات نسبت به پخش بار کلاسیک و پخش بار تداومی کمتر است. فرمول‌بندی این مسئله شامل تعریف تابع هدف و محدودیت‌های مسئله بوده که طبق روابط ۱۳ و ۱۴ قابل بیان است.

$$\begin{aligned} & \text{Max } P_{\text{micro}} \quad (13) \\ & S.T. \begin{cases} P_G^{\text{main}} = P_D^{\text{main}} + P_{\text{micro}} + P_L^{\text{main}} \\ P_G^{\text{min}} \leq P_G^{\text{main}} \leq P_G^{\text{max}} \\ V_i^{\text{min}} \leq V \leq V_i^{\text{max}} \\ I_{ij}^{\text{min}} \leq I \leq I_{ij}^{\text{max}} \end{cases} \quad (14) \end{aligned}$$

در رابطه بالا P_{micro} حداکثر توان تزریقی به ریزشبه، P_G^{main} توان تولیدی شبکه اصلی، P_D^{main} توان مصرفی شبکه اصلی، P_L^{main} تلفات شبکه اصلی و V و I ولتاژ باس‌ها و جریان عبوری از خطوط در شبکه اصلی هستند.

$$G_{ht} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{G_t}} \text{EXP}\left(\frac{-(x-\mu_{G_t})^2}{2\sigma_{G_t}^2}\right) \quad (9)$$

μ_{G_t} و σ_{G_t} انحراف معیار و میانه شدت تابش در ساعت t هستند که از روی داده‌های ساعتی منطقه در ساعت t از داده‌های تاریخی سال‌های گذشته در همان ساعت حاصل می‌شوند. مقدار این تابع توزیع حول یک مقدار حداقل و حداکثر محدود شده و به همین علت از تابع توزیع محدود شده استفاده خواهد شد. با داشتن شدت تابش خورشید و با توجه به مرجع [۱۹]، توان تولیدی هر پنل از رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود.

$$P_{ph_t} = \begin{cases} -0.0622 \times G_{ht}^2 + 36.5073G_{ht} + 351.2987 & 0 < G_{ht} < 190 \\ (0.0022 \times G_{ht} + 4.8821) \times 10^3 & 190 \leq G_{ht} < 1000 \end{cases} \quad (10)$$

در رابطه ۱۰، P_{ph_t} توان پنل فتوولتاییک در ساعت t را نشان می‌دهد. برای به دست آوردن سری زمانی تولید فتوولتاییک، ابتدا برای یک ساعت خاص شدت تابش بر اساس تابع توزیع نرمال محدود شده همان ساعت محاسبه شده و سپس با توجه به رابطه ۱۰ مقدار توان تولیدی به دست می‌آید. با ادامه دادن این روش سری زمانی تولید فتوولتاییک کامل خواهد شد.

ت- سری زمانی شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی

برای به کارگیری خودروهای الکتریکی، در این مقاله از پارکینگ‌هایی استفاده شده است که خودروها در هنگام شارژ و یا تزریق توان به شبکه در آن‌ها قرار می‌گیرند. برای مدل‌سازی رفتار این خودروها از قضیه حد مرکزی استفاده شده است [۲۰].

قضیه حد مرکزی: در صورتی که X_1, \dots, X_n متغیرهای تصادفی مستقل با تابع توزیع احتمالاتی متفاوت باشند، مجموع آن‌ها یعنی $X_1 + X_2 + \dots + X_n$ برای n های بزرگ، دارای تابع توزیع احتمال نرمال خواهد بود.

حال، در صورتی که رفتار صاحبان خودرو را مانند هم در نظر گیریم، می‌توان ساعات خروج و مدت‌زمان عدم حضور در پارکینگ را با توجه به مرجع [۲۱] مطابق رابطه ۸ و ۹ بیان نمود.

$$T_{\text{exit}_t} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{T_t}} \text{EXP}\left(\frac{-(x-\mu_{T_t})^2}{2\sigma_{T_t}^2}\right) \quad (11)$$

$$\Delta T_t = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta T_t}} \text{EXP}\left(\frac{-(x-\mu_{\Delta T_t})^2}{2\sigma_{\Delta T_t}^2}\right) \quad (12)$$

T_{exit} زمان خروج خودروها از پارکینگ، ΔT مدت‌زمان عدم حضور خودروها در پارکینگ و σ_{T_t} و μ_{T_t} انحراف معیار و میانه پارامترهای زمان خروج و مدت خروج برای روز t بوده که از روی داده‌های تاریخی همان روز از سال‌های گذشته به دست می‌آید. بدین ترتیب، پارامترهای رفتاری خودروها برای هر روز - روز کاری هفته و یا آخر هفته در فصول مختلف - متناسب با همان روز تعریف می‌شوند. با توجه به ساعات حضور خودروها در پارکینگ و سری زمانی تولید و مصرف ریزشبه، می‌توان سری زمانی شارژ و دشارژ ریزشبه را محاسبه کرد. برای تأمین نیاز صاحبان خودرو در مسافرت‌های روزانه، بایستی

⁴ Depth of Discharge

در این مقاله برای محاسبه حداکثر توان انتقالی به ریزشبه، ابتدا با استفاده از الگوی بار IEEE_RTS برای بار پیک شبکه اصلی، مصرف شبکه اصلی مشخص می‌شود. با داشتن مصرف شبکه اصلی در زمان t و به تبع آن بار مشترکین هر باس، و نیز با استفاده از حداکثر تولید در همان زمان برای شبکه اصلی، حداکثر توان قابل انتقال به ریزشبه با استفاده از مدل ارائه شده به دست می‌آید. حداکثر تولید برای زمان t در شبکه اصلی از روی حداکثر توان پست‌های بالادستی و حداکثر توان واحد بادی در شبکه اصلی در زمان t - حداکثر توان تولیدی باد ناشی از شدت باد در زمان t است - به دست می‌آید. این توان زمانی برای ریزشبه قابل دسترس است که کلید ورودی ریزشبه در حالت خرابی قرار نگرفته باشد. برای مدل‌سازی خرابی کلید با استفاده از نرخ خرابی و نرخ تعمیرات تجهیز، سری زمانی در مدار بودن کلید به دست می‌آید. برای این کار از ابتدای بازه موردنظر سری زمانی شروع و مدت زمان استمرار حالت سلامت از رابطه ۱۹ مشخص می‌گردد. تا این زمان مقدار سری ۱ قرار داده می‌شود که به مفهوم در مدار بودن کلید است. بعد از این زمان تا مدت استمرار خرابی که از رابطه ۲۰ مشخص می‌شود، مقدار سری زمانی صفر خواهد بود. این روند تا انتهای بازه سری زمانی ادامه پیدا می‌کند.

$$T_h = \frac{-\ln(x)}{\lambda} \quad (19)$$

$$T_{uh} = \frac{-\ln(x)}{\mu} \quad (20)$$

در رابطه ۱۹ و ۲۰، x یک عدد تصادفی با تابع توزیع یکنواخت، λ نرخ خرابی کلید و μ نرخ تعمیرات آن هستند.

بدین ترتیب، در صورتی که واحدهای تولیدی و خودروهای الکتریکی ریزشبه نتوانند توان موردنیاز ریزشبه را تأمین نمایند، کمبود موردنیاز توسط توان انتقالی از شبکه اصلی به ریزشبه - P_{micro} - جبران خواهد شد. مقدار کمبود جبران شده با توجه به حداکثر توان قابل انتقال و بسته به سری زمانی در مدار بودن کلید ورودی ریزشبه، سری زمانی تولید، سری زمانی مصرف و سری زمانی شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی، سری زمانی تزریق توان ریزشبه را به دست می‌دهد.

۳- تعریف مسئله

هدف تحقیق حاضر، بهینه‌سازی حضور خودروهای الکتریکی در کنار سایر واحدهای تولید توان به منظور بهبود قابلیت اطمینان ریزشبه است. ظرفیت نصب واحدهای بادی و خورشیدی، مقدار واحدهای دیزل موردنیاز به منظور جبران بخشی از عدم قطعیت ریزشبه و نیز ظرفیت نصب پارکینگ خودروهای الکتریکی، متغیرهای تولید ریزشبه هستند که بایستی به نحو بهینه‌ای انتخاب شده تا اهداف طرح محقق شوند. برای این منظور ابتدا توابع هدف مشخص و سپس با استفاده از الگوریتم‌های جستجو به تعیین پاسخ بهینه، از میان حالات ممکن، پرداخته می‌شود. از آنجایی که فضای مسئله دارای عدم قطعیت

روش‌های متفاوتی برای حل مسئله بهینه‌سازی فوق وجود دارد که این روش‌ها را به‌طور کلی می‌توان به دو دسته روش‌های هوشمند یا ابتکاری و روش‌های کلاسیک طبقه‌بندی نمود. روش‌های هوشمند شامل الگوریتم‌های ژنتیک، اجتماع ذرات، کلونی مورچه و بازپخت فلزات می‌شود. این روش‌ها برای حل مسئله از پخش بار کلاسیک جهت ارزیابی استفاده می‌کنند و از آنجاکه ماتریس ژاکوبین در نزدیکی نقطه فروپاشی ولتاژ دچار مشکل همگرایی می‌شود این روش‌ها در ارائه جواب مناسب در یک زمان معقول کارا نیستند. علاوه بر این، روش‌های هوشمند برای انجام محاسبات به مدت زمان بالایی نیاز دارند. الگوریتم‌های کلاسیک شامل برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی غیرخطی و الگوریتم دور از کرانه است. در این الگوریتم‌ها معمولاً از مشتقات مرتبه دوم معادلات توان استفاده می‌شود. همچنین، این الگوریتم‌ها برای انجام محاسبات به زمان کمتری نیاز دارند. در این بخش، الگوریتم دور از کرانه، که مبتنی بر برنامه‌ریزی غیرخطی است، به اختصار تشریح می‌شود.

مسئله حداکثر توان انتقالی به ریزشبه را می‌توان به شکل کلی روابط ۱۵ و ۱۶ نوشت. این روابط بیانگر شکل کلی روابط ۱۴ هستند.

$$\max: F(x) \quad (15)$$

$$S.T. \begin{cases} G(x) = 0 \\ h_{min} \leq H(x) \leq h_{max}(x) \end{cases} \quad (16)$$

که در آن x ، متغیر حالت شامل اندازه و زاویه ولتاژ باس‌ها، $G(x)$ بیانگر قیود مساوی شامل معادلات تعادل توان، $H(x)$ قیود نامساوی شامل محدودیت ولتاژ باس‌ها و تولید توان ژنراتورها و جریان خطوط هستند. $F(x)$ نیز تابع هدف شامل حداکثرسازی توان انتقالی به ریزشبه است. h_{min} و h_{max} بیانگر حدود بالا و پایین قیود نامساوی هستند. در ابتدا قیود نامساوی از طریق متغیرهای شناور به قیود مساوی به شکل رابطه ۱۷ تبدیل می‌شوند.

$$\begin{cases} H(x) - s_l - h_{min} = 0 \\ H(x) - s_u - h_{max} = 0 \\ s_u, s_l \geq 0 \end{cases} \quad (17)$$

در رابطه بالا، s_l و s_u به ترتیب متغیرهای شناور حد پایین و بالا هستند. پس از تبدیل قیود نامساوی به مساوی، توابع لاگرانژ با استفاده از توابع مرزی لگاریتمی و ضرایب لاگرانژ به شکل رابطه ۱۸ تشکیل می‌شوند.

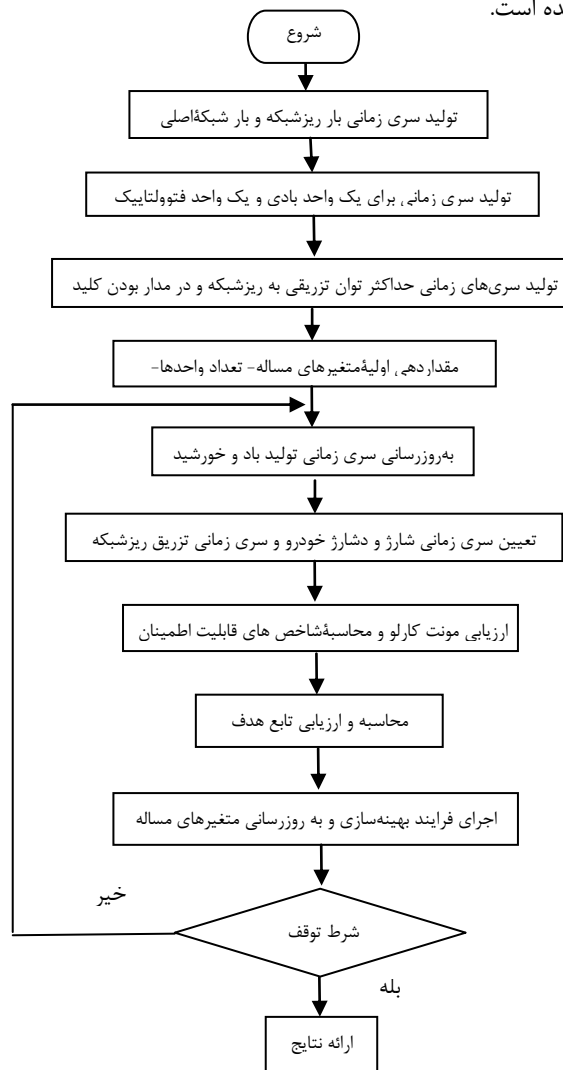
$$L(x, \lambda, s_u, s_l, \pi_u, \pi_l, \mu) = F(x) - \lambda^T G(x) - \pi_l^T (H(x) - s_l - h_{min}) - \pi_u^T (H(x) - s_u - h_{max}) - \mu (\sum_i \ln s_{li} + \sum_i \ln s_{ui}) \quad (18)$$

که در آن λ ضرایب لاگرانژ برای قیود مساوی، π_l ضرایب لاگرانژ برای قیود $(H(x) - s_l - h_{min})$ ، π_u ضرایب لاگرانژ برای قیود $(H(x) - s_u - h_{max})$ و μ پارامتر مرزی هستند. در ادامه، برای کمینه‌سازی یا بیشینه‌سازی تابع لاگرانژ از شرایط کاروش-کوهان-تاکر^۵ استفاده می‌شود.

⁵Karush-Kuhan-Tucker

۳-۲- روش بهینه‌سازی

برای جستجو در بین پاسخ‌های ممکن از روش‌های مختلفی می‌توان بهره گرفت. در تحقیق حاضر از روش‌های جستجوی ازدحام ذرات، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم جستجوی گرانشی به منظور بررسی مقادیر مختلف ظرفیت نصب واحدهای بادی و خورشیدی، واحدهای دیزل و ظرفیت پارکینگ خودروهای الکتریکی در ریزشبه استفاده شده است. در این روش ابتدا برای هر یک از متغیرهای جستجو - تعداد واحدهای بادی، تعداد پنل‌های خورشیدی، تعداد واحدهای دیزل و ظرفیت خودروهای الکتریکی پارکینگ - یک کد تعریف می‌شود. سپس، برای هر ترکیب از این واحدها و با استفاده از مدل‌های احتمالاتی ارائه شده در این مقاله، سری‌های زمانی، مصرف ریزشبه، تولید بادی، تولید فتوولتاییک، شارژ و دشارژ خودروها و تزریق توان شبکه اصلی به ریزشبه، تشکیل می‌شود. از روی این سری‌ها، الگوریتم مونت کارلو ترتیبی اجرا و شاخص‌های احتمالاتی قابلیت اطمینان به دست می‌آیند. با استفاده از این شاخص‌ها و سایر اهداف تعریف شده، ارزش هر پاسخ تعیین می‌شود. فلوچارت حل مسئله در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل (۱)، فلوچارت حل مسئله

است، برای ارزشیابی هر حالت کاندیدا، از ارزیابی احتمالاتی ارائه شده در بخش دوم استفاده شده است.

۳-۱- توابع هدف

در این قسمت به معرفی اهداف مسئله پرداخته می‌شود.

الف - بهبود قابلیت اطمینان ریزشبه:

برای ارزیابی قابلیت اطمینان، از شاخص عدم تأمین انرژی ریزشبه و شاخص مدت زمان اتصال ریزشبه به شبکه اصلی استفاده می‌شود. هر چه قدر ریزشبه توانایی بالاتری در تأمین بار مصرفی خود داشته باشد، عملکرد بهتری در حوزه قابلیت اطمینان خواهد داشت. از سویی دیگر، استقلال از شبکه اصلی باعث می‌شود خاموشی‌های شبکه اصلی به ریزشبه منتقل نشده و در نتیجه قابلیت اطمینان ریزشبه بهبود یابد.

به خاطر وجود عدم قطعیت در اجزای سیستم، از شاخص‌های احتمالاتی قابلیت اطمینان در توابع هدف استفاده شده است.

$$E(ENS) = \frac{1}{N} (\sum_i^N P_{NSi}) \times Period \quad (21)$$

$$E(T_{connect}) = \frac{1}{N} (\sum_i^N \alpha_{connect_i}) \times Period \quad (22)$$

$$\alpha_{connect} = \begin{cases} 0 & \text{if microgrid disconnected} \\ 1 & \text{if microgrid is connected} \end{cases} \quad (23)$$

در روابط بالا ENS شاخص انرژی تأمین نشده ریزشبه، E(T_{connect}) امید ریاضی آن، T_{connect} شاخص مدت زمان اتصال ریزشبه به شبکه اصلی، E(T_{connect}) امید ریاضی آن، Period دوره مورد نظر و N تعداد تکرار مونت کارلو هستند.

ب - کاهش هزینه‌های طرح:

یکی از مهم‌ترین عوامل در موفقیت طرح، بررسی اقتصادی هزینه‌های طرح است. این هزینه‌ها بایستی جوابگوی اهداف مسئله بوده و بتوانند صرفه اقتصادی را به دنبال داشته باشند. برای این منظور، در این مقاله کاهش هزینه‌های طرح به عنوان یک هدف در نظر گرفته شده است. هزینه‌های متفاوتی در اجرای این طرح وجود دارند که در این مسئله تنها به چند هزینه اولیه برای واحدها بسنده شده است.

$$Cost = wind\ cost + solar\ cost + parking\ cost \quad (24)$$

که در آن هزینه طرح، wind cost هزینه واحدهای بادی، solar cost هزینه واحدهای فتوولتاییک و parking cost هزینه احداث پارکینگ خودروهای الکتریکی هستند.

پ - کاهش استفاده از واحدهای دیزل

از آنجایی که واحدهای تولیدپراکنده با انرژی‌های تجدیدپذیر دارای عدم قطعیت بالا هستند از واحدهای دیزل به منظور جبران بخشی از این عدم قطعیت استفاده می‌شود. این واحدها دارای هزینه بهره‌برداری زیاد و نیز آلاینده‌گی بالا هستند که در این هدف به کاهش به کارگیری آن‌ها، تا حد ممکن، پرداخته می‌شود.

جدول (۱)، اطلاعات فنی توربین V-100

توان نامی	سرعت نامی	سرعت قطع پایین	سرعت قطع بالا
Pr	Vr	Vcut in	Vcut out
۲MW	۱۲m/s	۳m/s	۲۰m/s

ریزشبکه از طریق باس ۱۲ به شبکه CIVANLAR متصل می‌شود. بار پیک ریزشبه ۳/۸ مگاوات است. برای داده‌های ساعتی موردنیاز ریزشبه برای شدت تابش خورشید، از اطلاعات هواشناسی بخش مک هنری در ایالت داکوتای شمالی و از مرجع [۲۴]، در طی ۲۰ سال، از ۱۴ آگوست ۱۹۹۵ تا ۱۴ آگوست ۲۰۱۵، استفاده شده است. از آنجایی که شبکه اصلی و ریزشبه در یک محدوده جغرافیایی قرار دارند، برای داده‌های ساعتی موردنیاز وزش باد نیز در این ریزشبه از اطلاعات شبکه اصلی استفاده می‌شود.

هزینه هر واحد توربین بادی ۲ مگاواتی با توجه به مرجع [۲۵] ۳ میلیون دلار انتخاب و برای هر پنل ۲/۵ کیلوواتی فتوولتاییک بر طبق مرجع [۲۶] ۶۱/۳ سنت بر وات منظور شده است. هزینه ساخت پارکینگ خودروهای الکتریکی و هزینه نصب تجهیزات موردنیاز خودروها مانند مبدل‌ها، با توجه به مرجع [۲۷]، به ترتیب ۳۰۰ دلار بر مترمربع و ۴۰۰۰۰ دلار بر مگاوات فرض شده است. مساحت موردنیاز هر خودرو ۶ مترمربع در نظر گرفته شده است. خودروهای الکتریکی مورد استفاده در این مقاله از نوع شورولت بوده که پارامترهای آن بر طبق مرجع [۲۸] در جدول ۲ آمده‌اند.

جدول (۲)، پارامترهای خودروهای الکتریکی

Chvrolet	Battery Capacity	Electric Mode Range	Maximum Charging Power
	۱۶ کیلووات ساعت	۶۴ کیلومتر	۵ کیلووات

حداکثر نرخ شارژ و دشارژ خودروها در این مقاله یکسان فرض شده و با استفاده از جدول ۲، ۵ کیلووات انتخاب می‌شود. برای مدل‌سازی احتمالاتی خودروهای الکتریکی، پارامترهای مدل برای روزهای کاری و آخر هفته متفاوت فرض شده است. همچنین، دو فصل بهار و تابستان دارای رویه یکسان اما متفاوت با دو فصل دیگر سال - پاییز و زمستان - در نظر گرفته شده‌اند.

در این مقاله، هر واحد دیزل نیز ۲۵۰ کیلووات توان نامی دارد. سری‌های زمانی با توجه به الگوی مصرف بار IEEE_RTS در بازه ۸۷۳۶ ساعته تعریف شده‌اند.

برای بررسی و تحلیل بیشتر مباحث بیان شده در این مقاله، سه سناریو مطرح و نتایج شبیه‌سازی هر کدام از آن‌ها ارائه می‌گردد.

الف - سناریوی اول: بهینه‌سازی ریزشبه بدون در نظر گرفتن خودروهای الکتریکی

در این سناریو، شبیه‌سازی ترکیب تولیدات توان ریزشبه، به منظور بهبود قابلیت اطمینان، بدون در نظر گرفتن خودروهای الکتریکی

از آنجایی که توابع هدف ارائه شده دارای تنوع هستند، امکان ترکیب این ارزش‌ها با یکدیگر وجود ندارد. به همین خاطر از روش تئوری فازی به منظور تجمیع ارزش اهداف استفاده می‌شود. در این روش با استفاده از توابع عضویت، ارزش هر هدف با یک مقدار حداکثر و حداقل سنجیده شده و مقداری بین صفر تا یک به آن اختصاص می‌یابد. با این روش، مقدار به دست آمده برای همه هدف‌ها را می‌توان با یکدیگر ترکیب نمود.

$$\text{Min Fitness} = \sum_i^n \alpha_i \mu_i(G_i) \quad (25)$$

$$G_1 = E(ENS) \quad (26)$$

$$G_2 = E(T_{\text{connect}}) \quad (27)$$

$$G_3 = \text{cost} \quad (28)$$

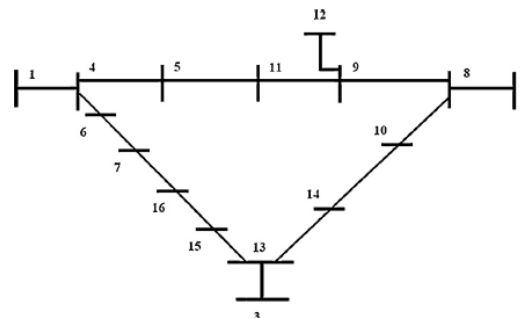
$$G_4 = \text{number of Diesel Generator} \quad (29)$$

در رابطه با Fitness، ارزش فازی ناشی از ترکیب اهداف، G_i هدف نام، μ_i تابع عضویت فازی هدف نام و α_i ضرایب تأثیر اهداف هستند.

۴- شبیه‌سازی و نتایج

برای اعتبار بخشیدن به مدل‌های ارائه شده در این مقاله، به شبیه‌سازی آنان بر روی یک شبکه نمونه و ارائه نتایج حاصله پرداخته می‌شود. برای این منظور از شبکه تست توزیع ۱۶ باسه CIVANLAR جهت تغذیه ریزشبه استفاده شده است. اطلاعات خطوط شبکه در مرجع [۲۲] آمده است.

در این شبکه، بار کل مشترکین از الگوی بار IEEE_RTS برای بار پیک ۲۸/۷ مگاوات پیروی کرده و به نسبت بار هر باس که در مرجع [۲۲] آمده است، تقسیم می‌گردد.



شکل (۲)، شبکه تست CIVANLAR [۱۱]

شبکه اصلی از طریق دو پست با ظرفیت حداکثر ۱۵ مگاوات در باس ۱ و ۲ و یک واحد بادی با ظرفیت ۲ مگاوات در باس ۳ تأمین می‌شود. توربین نصب شده از نوع V-100 بوده که اطلاعات آن از مرجع [۲۳] برداشت شده است.

داده‌های سرعتی باد این توربین مربوط به بخش مک هنری در ایالت داکوتای شمالی بوده و از مرجع [۲۴]، در طی ۲۰ سال، از ۱۴ آگوست ۱۹۹۵ تا ۱۴ آگوست ۲۰۱۵، برداشت شده است.

سیگنال شارژ مجدد، تا قبل از زمان خروج از پارکینگ انرژی مورد نیاز مسافرت روزانه را دریافت خواهند کرد.

با شبیه‌سازی مسئله با استفاده از الگوریتم جستجوی ازدحام ذرات، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم جستجوی گرانشی، ظرفیت بهینه هر کدام از واحدها برای بهبود اهداف تعیین شده مطابق جدول ۷ به دست می‌آید.

ترکیب بهینه ارائه شده در جدول ۷، وابسته به اطلاعات هواشناسی منطقه ایجاد ریزش شبکه و شبکه اصلی بوده و بسته به موقعیت جغرافیایی آن‌ها، عموماً تغییر خواهد کرد.

جدول (۷)، ترکیب بهینه تولید ریزش شبکه

تعداد واحدهای دیزل	ظرفیت خودروبی پارکینگ	تعداد پنل فتوولتاییک	تعداد توربین بادی	تعداد واحدهای دیزل	
				تعداد	تعداد
۵	۱۰۹۶	۴۵۲۲	۱	۱	PSO
۵	۱۰۹۲	۴۵۱۸	۱	۱	GA
۵	۱۱۴۷	۳۶۹۷	۱	۱	GSA

امید ریاضی شاخص‌های قابلیت اطمینان ریزش شبکه به همراه ارزش فازی پاسخ بهینه برای هر روش در جدول ۸ آمده است.

جدول (۸)، اطلاعات پاسخ بهینه

شاخص E(T _{connect})	شاخص E(ENS)	تکرار همگرایی	ارزش فازی
۲۴۰/۸۳ ساعت در سال	۱۱/۸ مگاوات در سال	۴۳	۰/۳۲۸۱
۲۴۲/۴ ساعت در سال	۱۱/۹ مگاوات در سال	۴۹	۰/۳۲۸۲
۳۱۸/۶ ساعت در سال	۲۶/۵ مگاوات در سال	۲	۰/۳۷۴۲

همان‌طور که از جدول ۸ مشخص است، از میان الگوریتم‌های اجرا شده بر روی مسئله، پاسخ نهایی الگوریتم PSO دارای دقت بیشتری نسبت به الگوریتم ژنتیک و جستجوی گرانشی است. از طرف دیگر، از نظر سرعت همگرایی الگوریتم‌ها، در صورتی که تعداد تکرار تا رسیدن به پاسخ نهایی به‌عنوان تعریف سرعت در نظر گرفته شود، روش جستجوی گرانشی نسبت به الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات سرعت بهتری را دارا بوده و پس از آن الگوریتم ازدحام ذرات سرعت بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک دارد.

رتبه اول دقت الگوریتم ازدحام ذرات در کنار رتبه دوم سرعت، از میان سه الگوریتم ارائه شده، کارایی بهتر الگوریتم ازدحام ذرات را نسبت به الگوریتم ژنتیک و الگوریتم جستجوی گرانشی در این مسئله نشان می‌دهد.

نمودار همگرایی الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم جستجوی گرانشی در شکل ۳ آمده است.

صورت می‌پذیرد. جداول ۳ و ۴ نتایج حاصل از شبیه‌سازی، با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات، را نشان می‌دهند.

جدول (۳)، ترکیب بهینه تولید ریزش شبکه

تعداد واحدهای دیزل	تعداد پنل فتوولتاییک	تعداد توربین بادی
۸	۲۷۸۹	۱

امید ریاضی شاخص‌های قابلیت اطمینان ریزش شبکه به همراه ارزش فازی پاسخ بهینه، در جدول ۴ قابل مشاهده است.

جدول (۴)، اطلاعات پاسخ بهینه

شاخص E(T _{connect})	شاخص E(ENS)	ارزش فازی
۱۳۳۹/۲ ساعت در سال	۱۹/۷۱ مگاوات در سال	۰/۷۳۷۵

ب - سناریوی دوم: بهینه‌سازی ریزش شبکه در حضور خودروهای الکتریکی بدون در نظر گرفتن سیگنال شارژ مجدد

این سناریو دربرگیرنده حضور خودروهای الکتریکی در ترکیب با واحدهای تولید پراکنده توان در ریزش شبکه است. در این سناریو، به منظور تأمین انرژی مورد نیاز خودروها برای مسافرت‌های روزانه، یک سطح از شارژ باتری خودروها، در هر زمان، دست‌نخورده باقی خواهد ماند. جداول ۵ و ۶ نتایج حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات را نشان می‌دهند.

جدول (۵)، ترکیب بهینه تولید ریزش شبکه

تعداد واحدهای دیزل	ظرفیت خودروبی پارکینگ	تعداد پنل فتوولتاییک	تعداد توربین بادی
۵	۱۰۴۴	۳۰۶۸	۲

امید ریاضی شاخص‌های قابلیت اطمینان ریزش شبکه به همراه ارزش فازی پاسخ بهینه در جدول ۶ آمده‌اند.

جدول (۶)، اطلاعات پاسخ بهینه

شاخص E(T _{connect})	شاخص E(ENS)	ارزش فازی
۳۹۸ ساعت در سال	۲۳/۴۱ مگاوات در سال	۰/۳۷۸۶

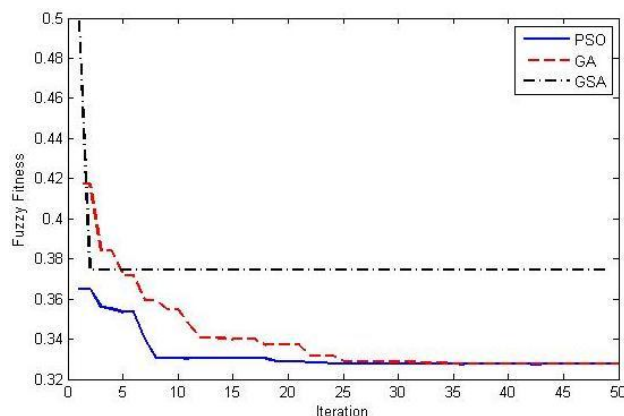
پ - سناریوی سوم: بهینه‌سازی ریزش شبکه در حضور خودروهای الکتریکی با توجه به سیگنال شارژ مجدد

این سناریو، کامل‌ترین مدل برای مسئله بهینه‌سازی ترکیب واحدهای تولید توان از بین سناریوهای قبل است. در این حالت، مدیریت شارژ و دشارژ خودروها، با توجه به سیگنال کنترلی شارژ مجدد، صورت می‌گیرد. این سیگنال نشان‌دهنده امکان شارژ خودرو قبل از خروج از پارکینگ است. بدین ترتیب، الزامی به حبس سطح شارژ در تمام ساعات حضور خودرو در پارکینگ نیست، بلکه خودروها با توجه به

به کارگیری خودروهای الکتریکی در ریزشبه‌ها، با استفاده از سیگنال کنترلی شارژ مجدد، موجب بهبود هدف نهایی - شامل ترکیب فازی اهداف بهبود شاخص‌های قابلیت‌اطمینان، کاهش هزینه و کاهش واحدهای دیزل موردنیاز- در ریزشبه خواهد شد.

۶- مراجع

- [1] Bae, I., Kim, J., "Reliability Evaluation of Customers in a Microgrid", IEEE Transactions on Power System, Vol. 23, P.P. 1416 - 1422, 2008.
- [2] Khodayar, M.E., Barati, M., Shahidehpour, M., "Integration of High Reliability Distribution System in Microgrid Operation", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 3, P.P. 1997 - 2006, 2012.
- [3] Wang, S., Li, Z., Wu, L., Shahidehpour, M., Li, Z., "New Metrics for Assessing the Reliability and Economics of Microgrids in Distribution System", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 28, P.P. 2852 - 2861, 2013.
- [4] Arefifar, S. A., Mohamed, Y. A-R. I., El-Fouly, T.H. M., "Supply-Adequacy-Based Optimal Construction of Microgrids in Smart Distribution Systems", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 3, P.P. 1491 - 1502, 2012.
- [5] Arefifar, S. A., Mohamed, Y. A-R. I., El-Fouly, T.H. M., "Optimum Microgrid Design for Enhancing Reliability and Supply-Security", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 4, P.P. 1567 - 1575, 2013.
- [6] Arefifar, S. A., Mohamed, Y. A-R. I., El-Fouly, T.H. M., "DG Mix, Reactive Sources and Energy Storage Units for Optimizing Microgrid Reliability and Supply Security", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 5, P.P. 1835 - 1844, 2014.
- [7] K. Morrow, D. Karner, and J. Francfort, "Plug-in Hybrid Electric Vehicle Charging Infrastructure Review", The Idaho National Laboratory, Tech. Rep., 2008.
- [8] Z. Fan, "A Distributed Demand Response Algorithm and Its Application to PHEV Charging in Smart Grids", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 3, No. 3, PP. 1280-1290, Sept. 2012.
- [9] W. Kempton, J. Tomic, "Vehicle-to-Grid Power Implementation: From Stabilizing the Grid to Supporting Large-scale Renewable Energy", J. Power Sources, Vol. 144, No. 1, PP. 280-294, 2005.
- [10] J. R. Pillai, and B. Bak-Jensen, "Impacts of Electric Vehicle Loads on Power Distribution Systems," in Proceedings of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Sept. 2010.
- [11] Z. Darbai, and M. Ferdowsi, "Aggregated Impact of Plug-in Hybrid Electric Vehicles on Electricity Demand Profile," IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 2, No. 4, PP. 501-508, Oct. 2011.
- [12] S. Shao, M. Pipattanasomporn, and S. Rahman, "Grid Integration of Electric Vehicles and Demand Response with Customer Choice," IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 3, No. 1, PP. 543-550, Mar. 2012.
- [13] X. Yu, "Impacts Assessment of PHEV Charge Profiles on Generation Expansion Using National Energy Modeling System", in Proc. IEEE Power & Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, PP. 1_5, 2008.
- [14] W. Kempton, "A Test of Vehicle-to-Grid (V2G) for Energy Storage and Frequency Regulation in the PJM System", Results from an Industry-University Research Partnership, 2008.



شکل (۳)، نمودار همگرایی

همان‌طور که از جداول ۴، ۶ و ۸ برای الگوریتم ازدحام ذرات برمی‌آید، با توجه به تمامی اهداف - کاهش هزینه، بهبود شاخص‌های قابلیت‌اطمینان و کاهش نیاز به واحدهای دیزل - ارزش فازی سناریوی سوم دارای ارجحیت بیشتر و در نتیجه پاسخ مطلوب‌تری نسبت به سایر سناریوهاست. این بدان معناست که به کارگیری خودروهای الکتریکی، با استفاده از سیگنال کنترلی شارژ مجدد، تأثیرات مطلوبی بر روی مسئله بهینه‌سازی دارد.

در این پاسخ، در صورتی که مقدار میانگین مصرف در ریزشبه در بازه تعریف سری‌های زمانی به‌عنوان مبنا در نظر گرفته شود، درصد قابلیت‌اطمینان برای شاخص انرژی ازدست‌رفته در همان بازه زمانی، ۲/۷۵ درصد و برای شاخص اتصال ریزشبه به شبکه اصلی ۲/۷۵ درصد خواهد بود. به عبارت دیگر، در بازه تعریف سری‌های زمانی، با این ترکیب از واحدهای تولیدی، ریزشبه در ۹۹/۹۹۸ درصد توانایی تأمین توان و در ۹۷/۲۵ درصد زمان استقلال خود را حفظ خواهد کرد.

۵- نتیجه‌گیری

پیوستن تولیدات کوچک و ذخیره‌ای انرژی در سیستم‌های ولتاژ پایین یا متوسط، نوع جدیدی از سیستم‌های قدرت به نام ریزشبه‌ها را تشکیل می‌دهند. از ویژگی‌های این سیستم، امکان جمع‌آوری تولیدات پراکنده در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر بوده که این موضوع قابلیت‌اطمینان ریزشبه را برجسته می‌سازد. ترکیب بهینه واحدهای تولید توان به همراه خودروهای الکتریکی می‌تواند نقش بسزایی در تأمین پایدار انرژی داشته باشد. هر چه قدر وابستگی ریزشبه به شبکه اصلی، در کنار تأمین مصرف مشترکین، کاهش یابد، قابلیت‌اطمینان ریزشبه افزایش خواهد یافت. در این مقاله به بهینه‌سازی حضور خودروهای الکتریکی، در ترکیب با سایر واحدهای تولید توان، به منظور بهبود تأمین بار و کاهش وابستگی ریزشبه به شبکه اصلی پرداخته شده است. با استفاده از مدل‌های احتمالاتی ارائه شده برای اجزای سیستم و برای حالات مختلف ترکیب واحدهای تولید توان، ارزیابی قابلیت‌اطمینان به روش‌های احتمالاتی انجام و بهترین پاسخ با بهره‌گیری از الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم جستجوی گرانشی مشخص شد. در این مقاله نشان داده شد که

- [15] A report prepared by the Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee, "IEEE Test System", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, No.6, PP. 2047-2054, Nov./Dec. 1979.
- [16] Billinton, R., Chen H., Ghajar, R., "Time-Series Models for Reliability Evolution of Power Systems including Wind Energy", Microelectron. Reliab., Vol. 36, No. 9, PP. 1253-1261, 1996
- [17] Giorsetto, P., Utsurogi, K.F., "Development of a new procedure for reliability modeling of wind turbine generators", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, P.P. 134-143, 1983.
- [18] Moharil, R. M., Kulkarni, P. S., "Reliability Analysis of Solar Photovoltaic System using Hourly Mean Solar Radiation Data", Solar Energy, Vol. 84, P.P. 691-702, 2010.
- [19] Moharil, R. M., Kulkarni, P. S., "A case study of solar photovoltaic power system at Sagardeep Island, India", Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 13, no. 3, pp. 673-681, 2009.
- [20] Le Cam, L., "The central limit theorem around 1935," Statistical Science, pp. 78-91, 1986.
- [21] Hosseini Bioki, M. M., Zareian Jahromi, M., Rashidinejad, M., "A combinatorial artificial intelligence real-time solution to the unit commitment problem incorporating V2G", Electr. Eng., PP. 1-15, Nov. 2012.
- [22] Nojavan, S., Jalali, M., Zare, K., "Optimal allocation of capacitors in radial/mesh distribution system using mixed integer nonlinear programming approach", Electric Power Systems Research, Vol. 107, P.P. 119-124, 2014.
- [23] Vestas Company Site, [Online]. Available: http://www.vestas.com/en/products_and_services/turbines, [Accessed: July 4, 2015].
- [24] North Dakota Agricultural Weather Network, [Online]. Available: <http://www.ndawn.ndsu.nodak.edu/>, [Accessed: July 4, 2015].
- [25] <http://www.windustry.org/>, [Accessed: July 4, 2015].
- [26] <http://cleantechnica.com/>, [Accessed: June 29, 2015].
- [27] Esmaeilian, H. R., Hosseini Bioki, M. M., Rashidinejad, M., Abdollahi, A., "Economic-Driven Measure in Constructing a V2G Parking Lot from DisCo. Perspective", International Journal of Economics and Management Engineering (IJEME), Vol. 2, Issue 3, PP. 117-124, Aug. 2012.
- [28] He, Y., Venkatesh, B., Gaun, L., "Optimal Scheduling for Charging and Discharging of Electric Vehicle", IEEE Transaction on Smart Grid, Vol. 3, NO. 3, September 2012.