بهینه‌سازی حضور خودروهای الکتریکی در کنار واحدهای تولید توان به‌منظور بهبود قابلیت‌اطمینان ریزشبکه

محمدرضا 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 به‌صورت مستقل از شبکهٔ اصلی قدرت، نیاز مشترکین خود را تأمین نمایند. از ویژگی‌های این سیستم‌ها، امکان تجمیع تولیدات پراکنده در حوزهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر، با ماهیت احتمالاتی و نوسانی،است که این موضوع ضرورت بررسی قابلیت‌اطمینان ریزشبکه و حصول اطمینان از حفظ قابلیت‌اطمینان، 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 پراکنده و خودروهای الکتریکی با هدف بهبود قابلیت‌اطمینان ریزشبکه پرداخته شود. بهینه‌سازی ترکیب تولیدات توان در کنار خودروهای الکتریکی به‌منظور بهبود قابلیت‌اطمینان ریزشبکه، ارائهٔ روشی نوین در برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروها و مدل‌سازی توان تزریقی به ریزشبکه از نوآوری‌های مطرح در این مقاله هستند.**

واژه‌های کلیدی: **بهبود قابلیت‌اطمینان ریزشبکه، ترکیب بهینهٔ واحدهای تولید توان،الگوریتم مونت‌کارلو، حداکثر توان قابل‌انتقال به ریزشبکه، خودروهای الکتریکی**

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۴/۰۵/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۴/۱۲/۰۴

نام نویسندهٔ مسئول : محمدرضا آقا ابراهیمی

نشانی نویسندهٔ مسئول : دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه بیرجند

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.9.9]

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 به‌صورت جدا از شبکه مصرف مشترکین خود را تأمین و بدین ترتیب مانع از انتقال خاموشی‌های شبکهٔ 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 شبکهٔ اصلی، کمبود توان خود را جبران نماید. استفاده مؤثرتر از واحدهای تولید پراکندهٔ تجدیدپذیر، امکان تأمین تقاضای رشد بار و بهبود عملکرد سیستم، از دیگر ویژگی‌های ریزشبکه به شمار می‌آیند.

افزایش به‌کارگیری واحدهای تولید توان با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در ریزشبکه‌ها سبب توجه به قابلیت‌اطمینان در این سیستم‌ها شده است. ازآنجایی‌که این قبیل منابع تولیدپراکنده 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 ارائهٔ یک روش تحلیلی برای ارزیابی قابلیت‌اطمینان مشترکین ریزشبکه پرداخته‌شده است. در [۲]، کاربرد سیستم‌های توزیع با قابلیت‌اطمینان بالا[1] (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 به‌منظور تشکیل ریزشبکه‌ها با خصوصیت خودکفایی بهینه پرداخته‌شده است. در مرجع [۵]، نویسندگان به دسته‌بندی شبکهٔ 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 شبکهٔ توزیع درون ریزشبکه‌ها با لحاظ کردن خاصیت احتمالاتی بار و تولیدپراکنده صورت پذیرفته است. ریزشبکه‌های حاصل، از بهینه‌سازی مسئله با هدف بهبود قابلیت‌اطمینان و امنیت تولید،به دست می‌آیند.

امری که دراین‌بین قابلیت بررسی بیشتری دارد، تأثیر خودروهای الکتریکی بر قابلیت‌اطمینان ریزشبکه است. خودروهای الکتریکی وسایل نقلیه‌ای هستند که می‌توانند ضمن فعالیت در فرایند حمل‌ونقل، به دلیل دارا بودن ذخیره‌سازهای انرژی، مزیت‌های بسیاری را برای شبکهٔ قدرت فراهم آورند. درزمینهٔ خودروهای الکتریکی در مرجع [۷] مطالعاتی بر روی آنالیز هزینه-فایده و تأثیر خودروهای هیبریدی برقی متصل شونده به شبکه[2](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 [۱۲-۹] تأثیر خودروهای الکتریکی بر سیستم توزیع، به‌ویژه اثر آن بر روی امنیت شبکه، بررسی شده است. مطالعات بر روی پروفایل بهینهٔ 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] موردبحث 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 به‌کارگیری خودروهای الکتریکی در کنار سایر تولیدکننده‌های توان به بهبود قابلیت‌اطمینان ریزشبکه پرداخته شود. بهینه‌سازی ترکیب تولیدات توان در کنار خودروهای الکتریکی به‌منظور بهبود قابلیت‌اطمینان ریزشبکه، ارائهٔ 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 ارائه‌شده در مقاله و درنهایت، 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 موردمطالعه، شاخص‌هایی تعریف و سپس ارزیابی بر اساس این شاخص‌ها صورت گیرد. در این میان، شاخص‌های متنوعی برای قابلیت‌اطمینان وجود دارند که ازجملهٔ آن‌ها می‌توان به شاخص عدم تأمین انرژی (EENS) اشاره کرد. ازآنجایی‌که 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 شبکهٔ اصلی است تا بدین ترتیب از بروز خاموشی‌های ناخواسته ناشی از شبکهٔ بالادست جلوگیری شود. برای بررسی این پارامتر، نیاز به استفاده از شاخص‌های قابلیت‌اطمینان مرتبط با ریزشبکه است که نشان‌دهندهٔ میزان وابستگی ریزشبکه به شبکهٔ اصلی هستند. هر چه قدر میزان این وابستگی کمتر باشد، امکان انتقال خاموشی از شبکهٔ 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 شبکهٔ اصلی نیز استفاده می‌شود.

[1] High Reliability Distribution System

[2] Plug-in Hybrid Electric Vehicles

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.9.9]

ازآنجایی‌که تجمیع گستردهٔ واحدهای تولیدپراکنده با انرژی‌های تجدیدپذیر از مزایای ریزشبکه‌ها به شمار می‌رود، مبحث عدم قطعیت از مسائل مطرح در این حوزه خواهد بود. برای ارزیابی قابلیت‌اطمینان با توجه به عدم قطعیت موجود، بایستی از روش‌های احتمالاتی بهره‌گیری نمود. ازجملهٔ این روش‌ها، روش مونت‌کارلو است. روش‌های مونت‌کارلو یک دسته از الگوریتم‌های محاسباتی هستند که بر اساس تکرار تصادفی نمونه‌برداری، برای محاسبهٔ 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 مونت‌کارلو وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به مونت‌کارلو ترتیبی و مونت‌کارلو غیرترتیبی اشاره کرد که استفاده از هرکدام از این روش‌ها، بسته به نوع مطالعه مشخص می‌شود. ازآنجایی‌که در این مقاله خودروهای الکتریکی در ریزشبکه وجود دارند و با توجه به خاصیت شارژ و دشارژ خودروها و وابستگی آن‌ها به زمان، از روش مونت‌کارلو ترتیبی در ارزیابی قابلیت‌اطمینان ریزشبکه استفاده می‌شود.

در روش مونت‌کارلو ترتیبی، ابتدا سری‌های زمانی مربوط به هریک از اجزای ریزشبکه تعریف و سپس با استفاده از این سری‌ها، مطالعات قابلیت‌اطمینان انجام می‌پذیرد. نحوهٔ ارزیابی قابلیت‌اطمینان بدین‌صورت است که در مرحلهٔ نخست، یک زمان تصادفی در بازهٔ موردمطالعه انتخاب و سپس وضعیت شبکه از روی سری‌های زمانی مشخص می‌شود. با مشخص‌شدن وضعیت شبکه، شاخص‌های قابلیت‌اطمینان محاسبه شده و شرط توقف مونت‌کارلو ترتیبی بررسی می‌شود. در صورت برآورده نشدن شرط توقف، دوباره به مرحلهٔ نخست رفته و مراحل بالا تکرار می‌شود. پس از توقف الگوریتم، امید ریاضی شاخص‌های قابلیت‌اطمینان،از روی پاسخ‌های هر تکرار،به دست خواهد آمد.

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

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

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

در روابط بالا،ENS شاخص انرژی تأمین نشدهٔ ریزشبکه، E(ENS) امید ریاضی آن، $T_{connect}$شاخص مدت‌زمان اتصال ریزشبکه به شبکه اصلی، $E(T_{connect})$ امید ریاضی آن، $Period$دورهٔ موردنظر و N تعداد تکرار مونت‌کارلو هستند. معیار همگرایی الگوریتم مونت‌کارلو در این مقاله، ضریب همگرایی[3]میانگین برای شاخص‌های قابلیت‌اطمینان است.

۲-۱- سری زمانی اجزای ریزشبکه

الف- سری زمانی بار مشترکین

برای به دست آوردن سری زمانی بار مشترکین از الگوی بار IEEE_RTS با بار پیک ریزشبکه 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.

ازآنجایی‌که 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 رابطهٔ۴ برای شبیه‌سازی سرعت باد در هر ساعت استفاده می‌شود.

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

که در آن SW_tسرعت 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_tتأثیر سرعت باد در زمان‌های قبل از tرا بر روی سرعت باد در زمان t نشان می‌دهد و می‌توان آن را با استفاده از مدل ARMA به دست آورد.

$$A(q)y_t = C(q)e_t \quad (۵)$$

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

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

y_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 درجهٔ 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] به‌صورت رابطهٔ ۸ بیان کرد.

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

P_{Wind} توان خروجی توربین بادی،Vسرعت 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 قابل‌محاسبه بوده که روابط آن در مرجع [۱۷] آمده است.

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

پ - سری زمانی تولید توان فتوولتاییک

برای به دست آوردن مدل توان تولیدی فتوولتاییک،شدت تابش و مدل پنل های 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.

[3]Coefficient of Variation

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.9.9]

$$G_{h_t} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{G_t}} EXP\left(\frac{-(x-\mu_{G_t}{}^2)}{2\sigma_{G_t}{}^2}\right) \quad (۹)$$

μ_{G_t} و σ_{G_t} انحراف معیار و میانهٔ 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 محدودشده و به همین علت از تابع توزیع محدودشده استفاده خواهد شد. با داشتن شدت تابش خورشید و با توجه به مرجع [۱۹]، توان تولیدی هر پنل از رابطهٔ ۱۰ محاسبه می‌شود.

$$P_{ph_t} = \begin{cases} -0.0622 \times G_{h_t}^2 + 36.5073 G_{h_t} + 351.2987 & 0 < G_{h_t} < 190 \\ (0.0022 \times G_{h_t} + 4.8821) \times 10^3 & 190 \leq G_{h_t} < 1000 \end{cases} \quad (۱۰)$$

در رابطهٔ ۱۰، P_{ph_t}توان پنل فتوولتاییک در ساعت tرا نشان می‌دهد.

برای به‌دست آوردن سری زمانی تولید فتوولتاییک، ابتدا برای یک ساعت خاص شدت تابش بر اساس تابع توزیع نرمال محدودشدهٔ 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 به‌کارگیری 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 قضیهٔ حد مرکزی استفاده شده است[۲۰].

قضیهٔ حد مرکزی: درصورتی‌که X_1،... و X_n متغیرهای تصادفی مستقل با تابع توزیع احتمالاتی متفاوت باشند، مجموع آن‌ها یعنی $X_1+X_2+...+X_n$ برای n های بزرگ، دارای تابع توزیع احتمال نرمال خواهد بود.

حال، درصورتی‌که 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.

$$T_{exit_t} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{T_t}} EXP\left(\frac{-(x-\mu_{T_t}{}^2)}{2\sigma_{T_t}{}^2}\right) \quad (۱۱)$$

$$\Delta T_t = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta_t}} EXP\left(\frac{-(x-\mu_{\Delta_t}{}^2)}{2\sigma_{\Delta_t}{}^2}\right) \quad (۱۲)$$

T_{exit}زمان خروج خودروها از پارکینگ، ΔT مدت‌زمان عدم حضور خودروها در پارکینگ و μ_t و σ_t انحراف معیار و میانهٔ 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 ریزشبکه، می‌توان سری زمانی شارژ و دشارژ ریزشبکه را محاسبه کرد. برای تأمین نیاز صاحبان خودرو در مسافرت‌های روزانه، بایستی مقداری از شارژ باتری دست نخورده باقی بماند. درصورتی‌که 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 به‌منظور جلوگیری از کاهش عمر مفید باتری وجود دارد که به آن عمق تخلیه(DOD)[4] گفته می‌شود و بایستی در دشارژ خودرو رعایت گردد.با به‌دست 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 به‌گونه‌ای طراحی شده است که تا حد ممکن، خودروها از اتصال ریزشبکه به شبکهٔ اصلی جلوگیری نمایند. درصورتی‌که امکان جلوگیری از اتصال ریزشبکه وجود نداشته باشد - توان لازم برای تأمین مصرف ریزشبکه با وجود خودروها فراهم نشود -شارژ و یا دشارژ خودرو وابسته به وضعیت جدید- کمبود یا مازاد تولید در شبکهٔ اصلی و ریزشبکه -خواهد بود.

ث- سری زمانی توان تزریقی به ریزشبکه در حالت اتصال به شبکهٔ اصلی

مدل ارائه‌شده برای توان تزریقی به ریزشبکه در این مقاله بر اساس حداکثر بار قابل‌انتقال به ریزشبکه، از طرف شبکهٔ اصلی، است. برای به دست آوردن این حداکثر بار، بایستی میزان بار دریافت‌شده توسط باس اتصال ریزشبکه تا جایی افزایش داده شود تا قیود سیستم نقض گردد. روش‌های متفاوتی برای تعیین بیشترین توان قابل‌انتقال به ریزشبکه 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 مسألهٔ 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 قابل‌بیان است.

$$Max\ P_{micro} \quad (۱۳)$$

$$S.T. \begin{cases} P_G^{main} = P_D^{main} + P_{micro} + P_L^{main} \\ P_{G\,main}^{min} \leq P_G^{main} \leq P_{G\,main}^{max} \\ V_i^{min} \leq V \leq V_i^{max} \\ I_{ij}^{min} \leq I \leq I_{ij}^{max} \end{cases} \quad (۱۴)$$

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

[4] Depth of Discharge

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.9.9]

روش‌های متفاوتی برای حل مسألهٔ بهینه‌سازی فوق وجود دارد که این روش‌ها را به‌طورکلی 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 ازآنجاکه ماتریس ژاکوبین در نزدیکی نقطهٔ فروپاشی ولتاژ دچار مشکل همگرایی می‌شود این روش‌ها در ارائهٔ جواب مناسب در یک زمان معقول کارا نیستند. علاوه بر این، روش‌های هوشمند برای انجام محاسبات به مدت‌زمان بالایی نیاز دارند. الگوریتم‌های کلاسیک شامل برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی غیرخطی و الگوریتم دور از کرانه است. در این الگوریتم‌ها معمولاً از مشتقات مرتبهٔ 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، به‌اختصار تشریح می‌شود.

مسألهٔ حداکثر توان انتقالی به ریزشبکه را می‌توان به شکل کلی روابط ۱۵ و ۱۶ نوشت. این روابط بیانگر شکل کلی روابط ۱۳ و ۱۴ هستند.

$$\max: F(x) \qquad (۱۵)$$

$$S.T.\begin{cases} G(x) = 0 \\ h_{min} \le H(x) \le h_{max}(x) \end{cases} \qquad (۱۶)$$

که در آن x، متغیر حالت شامل اندازه و زاویهٔ 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 ریزشبکه 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 رابطهٔ ۱۷تبدیل می‌شوند.

$$\begin{cases} H(x) - s_l - h_{min} = 0 \\ H(x) - s_u - h_{max} = 0 \\ s_u, s_l \ge 0 \end{cases} \qquad (۱۷)$$

در رابطهٔ 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 رابطهٔ ۱۸ تشکیل می‌شوند.

$$\begin{aligned} &L(x, \lambda, s_u, s_l, \pi_u, \pi_l, \mu) = F(x) - \lambda^T G(x) \\ &-\pi_l^T (H(x) - s_l - h_{\min}) \\ &-\pi_u^T (H(x) - s_u - h_{\max}) \\ &-\mu(\textstyle\sum_i \ln s_{li} + \sum_i \ln s_{ui}) \end{aligned} \qquad (۱۸)$$

که در آن λ ضرایب لاگرانژ برای قیود مساوی ، π_l ضرایب لاگرانژ برای قیود $(H(x) - s_l - h_{\min})$،π_uضرایب لاگرانژ برای قیود $(H(x) - s_u - h_{\max})$و μپارامتر مرزی هستند.

در ادامه،برای کمینه‌سازی یا بیشینه‌سازی تابع لاگرانژ از شرایط کاروش-کوهان-تاکر[5] استفاده می‌شود.

در این مقاله برای محاسبهٔ حداکثر توان انتقالی به ریزشبکه، ابتدا با استفاده از الگوی بار IEEE_RTS برای بار پیک شبکه اصلی، مصرف شبکهٔ اصلی مشخص می‌شود. با داشتن مصرف شبکهٔ اصلی در زمان t و به‌تبع آن بار مشترکین هر باس، و نیز با استفاده از حداکثر تولید در همان زمان برای شبکهٔ اصلی، حداکثر توان قابل‌انتقال به ریزشبکه با استفاده از مدل ارائه‌شده به دست می‌آید. حداکثر تولید برای زمان t در شبکهٔ اصلی از روی حداکثر توان پست‌های بالادستی و حداکثر توان واحد بادی در شبکهٔ اصلی در زمان t - حداکثر توان تولیدی باد ناشی از شدت باد در زمان t است- به دست می‌آید. این توان زمانی برای ریزشبکه قابل‌دسترس است که کلید ورودی ریزشبکه 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 بازهٔ موردنظر سری زمانی شروع و مدت‌زمان استمرار حالت سلامت از رابطهٔ ۱۹ مشخص می‌گردد. تا این زمان مقدار سری ۱ قرار داده می‌شود که به مفهوم در مدار بودن کلید است. بعدازاین زمان تا مدت استمرار خرابی که از رابطه ۲۰ مشخص می‌شود، مقدار سری زمانی صفر خواهد بود. این روند تا انتهای بازهٔ سری زمانی ادامه پیدا می‌کند.

$$T_h = \frac{-\ln(x)}{\lambda} \qquad (۱۹)$$

$$T_{uh} = \frac{-\ln(x)}{\mu} \qquad (۲۰)$$

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

بدین ترتیب، درصورتی‌که واحدهای تولیدی و خودروهای الکتریکی ریزشبکه نتوانند توان موردنیاز ریزشبکه را تأمین نمایند، کمبود موردنیاز توسط توان انتقالی از شبکهٔ اصلی به ریزشبکه - P_{micro} - جبران خواهد شد.مقدار کمبود جبران‌شده با توجه به حداکثر توان قابل‌انتقال و بسته به سری زمانی درمدار بودن کلید ورودی ریزشبکه، سری زمانی تولید، سری زمانی مصرف و سری زمانی شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی، سری زمانی تزریق توان ریزشبکه را به دست می‌دهد.

۳- تعریف مسئله

هدف تحقیق حاضر، بهینه‌سازی حضور خودروهای الکتریکی در کنار سایر واحدهای تولید توان به‌منظور بهبود قابلیت‌اطمینان ریزشبکه است. ظرفیت نصب واحدهای بادی و خورشیدی، مقدار واحدهای دیزل موردنیاز به‌منظور جبران بخشی از عدم‌قطعیت ریزشبکه و نیز ظرفیت نصب پارکینگ خودروهای الکتریکی، متغیرهای تولید ریزشبکه 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. ازآنجایی‌که فضای مسئله دارای عدم قطعیت

[5] Karush-Kuhan-Tucker

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.9.9]

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

۳-۱- توابع هدف

در این قسمت به معرفی اهداف مسئله پرداخته می‌شود.

الف- بهبود قابلیت‌اطمینان ریزشبکه:

برای ارزیابی قابلیت‌اطمینان، از شاخص عدم تأمین انرژی ریزشبکه و شاخص مدت‌زمان اتصال ریزشبکه به شبکهٔ اصلی استفاده می‌شود. هر چه‌قدر ریزشبکه توانایی بالاتری در تأمین بار مصرفی خود داشته باشد،عملکرد بهتری در حوزهٔ قابلیت‌اطمینان خواهد داشت. از سویی دیگر، استقلال از شبکهٔ اصلی باعث می‌شود خاموشی‌های شبکهٔ اصلی به ریزشبکه منتقل نشده و در نتیجه قابلیت‌اطمینان ریزشبکه بهبود یابد.

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

$$E(ENS) = \frac{1}{N}\left(\sum_i^N P_{NS_i}\right) \times Period \quad (۲۱)$$

$$E(T_{conect}) = \frac{1}{N}\left(\sum_i^N \alpha_{conect\,i}\right) \times Period \quad (۲۲)$$

$$\alpha_{conect} = \begin{cases} 0 & if\ microgrid\ disconected \\ 1 & if\ microgrid\ is\ conected \end{cases} \quad (۲۳)$$

در روابط بالا ENS شاخص انرژی تأمین نشدهٔ ریزشبکه، E(ENS) امید ریاضی آن، $T_{connect}$ شاخص مدت‌زمان اتصال ریزشبکه به شبکهٔ اصلی، $E(T_{connect})$ امید ریاضی آن، Period دورهٔ موردنظر و N تعداد تکرار مونت‌کارلو 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 به‌عنوان یک هدف در نظر گرفته شده است. هزینه‌های متفاوتی در اجرای این طرح وجود دارند که در این مسئله تنها به چند هزینهٔ اولیه برای واحدها بسنده شده است.

$$Cost = wind\ cost + solar\ cost + parking\ cost \quad (۲۴)$$

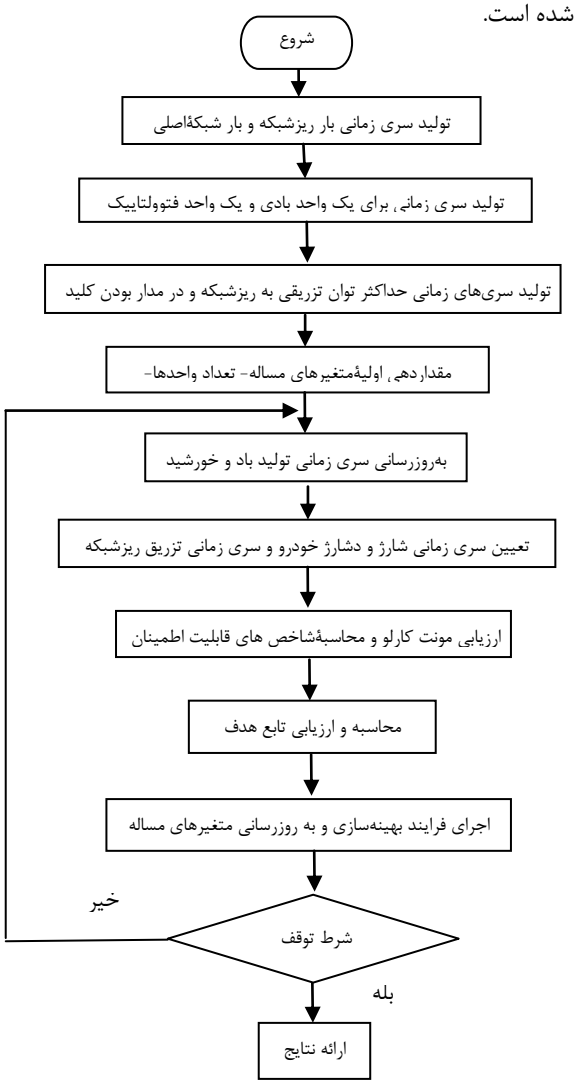
که در آن cost هزینهٔ طرح، wind cost هزینهٔ واحدهای بادی، solar cost هزینهٔ واحدهای فتوولتاییک و parking cost هزینهٔ احداث پارکینگ خودروهای الکتریکی هستند.

پ- کاهش استفاده از واحدهای دیزل

ازآنجایی‌که واحدهای تولیدپراکنده با انرژی‌های تجدیدپذیر دارای عدم‌قطعیت بالا هستند از واحدهای دیزل به‌منظور جبران بخشی از این عدم‌قطعیت استفاده می‌شود. این واحدها دارای هزینهٔ بهره‌برداری زیاد و نیز آلایندگی بالا هستند که در این هدف به کاهش به‌کارگیری آن‌ها، تا حد ممکن، پرداخته می‌شود.

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 به‌منظور بررسی مقادیر مختلف ظرفیت نصب واحدهای بادی و خورشیدی، واحدهای دیزل و ظرفیت پارکینگ خودروهای الکتریکی در ریزشبکه استفاده شده است. در این روش ابتدا برای هریک 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 ارائه‌شده در این مقاله، سری‌های زمانی، مصرف ریزشبکه، تولید بادی، تولید فتوولتاییک، شارژ و دشارژ خودروها و تزریق توان شبکهٔ اصلی به ریزشبکه، تشکیل می‌شود. از روی این سری‌ها، الگوریتم مونت‌کارلو ترتیبی اجرا و شاخص‌های احتمالاتی قابلیت‌اطمینان به دست می‌آیند. با استفاده از این شاخص‌ها و سایر اهداف تعریف‌شده، ارزش هر پاسخ تعیین می‌شود.فلوچارت حل مسئله در شکل۱ نشان داده شده است.



شکل (۱)، فلوچارت حل مسئله

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.9.9]

ازآنجایی‌که توابع هدف ارائه‌شده دارای تنوع هستند، امکان ترکیب این ارزش‌ها با یکدیگر وجود ندارد. به همین خاطر از روش تئوری فازی به‌منظور 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 به‌دست‌آمده برای همه هدف‌ها را می‌توان با یکدیگر ترکیب نمود.

$$\text{Min} \quad Fitness = \sum_{i}^{n} \alpha_i \mu_i(G_i) \qquad (۲۵)$$

$$G_1 = E(ENS) \qquad (۲۶)$$

$$G_2 = E(T_{conect}) \qquad (۲۷)$$

$$G_3 = cost \qquad (۲۸)$$

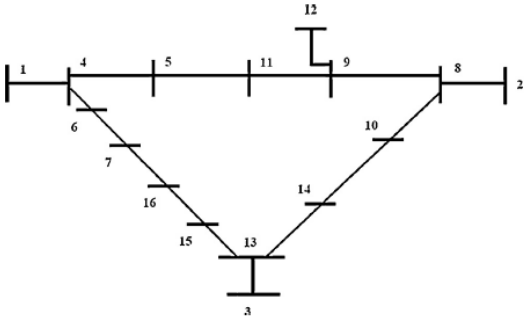
$$G_4 = \text{number of Diesel Generator} \qquad (۲۹)$$

در رابطهٔ بالا$Fitness$، ارزش فازی ناشی از ترکیب اهداف،G_i هدف iام، μ_i تابع عضویت فازی هدف iام و α_i ضرایب تأثیر اهداف هستند.

۴- شبیه‌سازی و نتایج

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

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



شکل (۲)، شبکهٔ تست CIVANLAR،[۱۱]

شبکهٔ 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 نصب‌شده 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.

جدول(۱)، اطلاعات فنی توربین V-100

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

ریزشبکه از طریق باس ۱۲ به شبکه CIVANLAR متصل می‌شود. بار پیک ریزشبکه۳/۸ مگاوات است. برای داده‌های ساعتی موردنیاز ریزشبکه برای شدت تابش خورشید، از اطلاعات هواشناسی بخش مک هنری در ایالت داکوتای شمالی و از مرجع [۲۴]،در طی ۲۰ سال، از ۱۴ آگوست۱۹۹۵ تا ۱۴ آگوست ۲۰۱۵، استفاده شده است. ازآنجایی‌که شبکهٔ اصلی و ریزشبکه در یک محدودهٔ جغرافیایی قرار دارند، برای داده‌های ساعتی موردنیاز وزش باد نیز در این ریزشبکه از اطلاعات شبکهٔ اصلی استفاده می‌شود.

هزینهٔ 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. هزینهٔ ساخت پارکینگ خودروهای الکتریکی و هزینهٔ نصب تجهیزات موردنیاز خودروها مانند مبدل‌ها، با توجه به مرجع [۲۷] ، به ترتیب ۳۰۰ دلار بر مترمربع و ۴۰۰۰۰دلار بر مگاوات فرض شده است. مساحت موردنیاز هر خودرو ۶ مترمربع در نظر گرفته شده است.

خودروهای الکتریکی مورداستفاده در این مقاله از نوع شورولت بوده که پارامترهای آن بر طبق مرجع [۲۸] در جدول ۲ آمده‌اند.

جدول(۲)، پارامترهای خودروهای الکتریکی

	Maximum Charging Power	Electric Mode Range	Battery Capacity
Chrevolet	۵ کیلووات	۶۴ کیلومتر	۱۶ کیلووات‌ساعت

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 رویهٔ یکسان اما متفاوت با دو فصل دیگر سال - پاییز و زمستان - در نظر گرفته‌شده‌اند.

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 تعریف‌شده‌اند.

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

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

در این سناریو، شبیه‌سازی ترکیب تولیدات توان ریزشبکه، به‌منظور بهبود قابلیت‌اطمینان، بدون در نظر گرفتن خودروهای الکتریکی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.9.9]

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

جدول (۳)، ترکیب بهینهٔ تولید ریزشبکه

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

امید ریاضی شاخص‌های قابلیت‌اطمینان ریزشبکه به همراه ارزش فازی پاسخ بهینه، در جدول ۴ قابل‌مشاهده است.

جدول (۴)، اطلاعات پاسخ بهینه

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

ب – سناریوی دوم: بهینه‌سازی ریزشبکه در حضور خودروهای الکتریکی بدون در نظر گرفتن سیگنال شارژ مجدد

این سناریو دربرگیرندهٔ حضور خودروهای الکتریکی در ترکیب با واحدهای تولید پراکندهٔ توان در ریزشبکه است. در این سناریو، به‌منظور تأمین انرژی موردنیاز 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 بهینهٔ تولید ریزشبکه

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

امید ریاضی شاخص‌های قابلیت‌اطمینان ریزشبکه به همراه ارزش فازی پاسخ بهینه در جدول ۶آمده‌اند.

جدول (۶)، اطلاعات پاسخ بهینه

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

پ – سناریوی سوم: بهینه‌سازی ریزشبکه در حضور خودروهای الکتریکی با توجه به سیگنال شارژ مجدد

این سناریو، کامل‌ترین مدل برای مسئلهٔ 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 نشان‌دهندهٔ 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 سیگنال شارژ مجدد، تا قبل از زمان خروج از پارکینگ انرژی موردنیاز مسافرت روزانه را دریافت خواهند کرد.

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

ترکیب بهینهٔ ارائه‌شده در جدول ۷، وابسته به اطلاعات هواشناسی منطقهٔ ایجاد ریزشبکه و شبکهٔ اصلی بوده و بسته به موقعیت جغرافیایی آن‌ها، عموماً تغییر خواهد کرد.

جدول (۷)، ترکیب بهینه تولید ریزشبکه

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

امید ریاضی شاخص‌های قابلیت‌اطمینان ریزشبکه به همراه ارزش فازی پاسخ بهینه برای هر روش در جدول ۸آمده است.

جدول (۸)، اطلاعات پاسخ بهینه

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

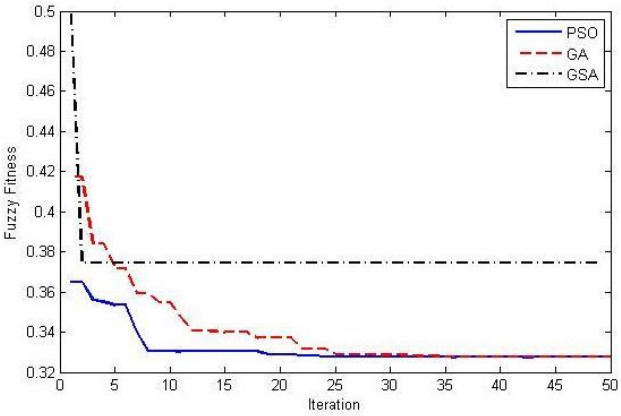
همان‌طور که از جدول ۸ مشخص است، از میان الگوریتم‌های اجراشده بر روی مسئله، پاسخ نهایی الگوریتم PSO دارای دقت بیشتری نسبت به الگوریتم ژنتیک و جستجوی گرانشی است. از طرف دیگر، ازنظر سرعت همگرایی الگوریتم‌ها، درصورتی‌که تعداد تکرار تا رسیدن به پاسخ نهایی به‌عنوان تعریف سرعت در نظر گرفته شود، روش جستجوی گرانشی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

رتبهٔ اول دقت الگوریتم ازدحام ذرات در کنار رتبهٔ دوم سرعت، از میان سه الگوریتم ارائه‌شده، 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.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.9.9]



شکل (۳)، نمودار همگرایی

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

در این پاسخ، درصورتی‌که مقدار میانگین مصرف در ریزشبکه در بازهٔ تعریف سری‌های زمانی به‌عنوان مبنا در نظر گرفته شود، درصد قابلیت‌اطمینان برای شاخص انرژی ازدست‌رفته در همان بازهٔ زمانی، ۰/۰۰۲ درصد و برای شاخص اتصال ریزشبکه به شبکهٔ اصلی۲/۷۵ درصد خواهد بود. به‌عبارت‌دیگر، در بازهٔ تعریف سری‌های زمانی، با این ترکیب از واحدهای تولیدی، ریزشبکه در۹۹/۹۹۸ 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 ریزشبکه‌ها را تشکیل می‌دهند. از ویژگی‌های این سیستم، امکان تجمیع تولیدات پراکنده در حوزهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر بوده که این موضوع قابلیت‌اطمینان ریزشبکه را برجسته می‌سازد. ترکیب بهینهٔ واحدهای تولید توان به همراه خودروهای الکتریکی می‌تواند نقش بسزایی در تأمین پایدار انرژی داشته باشد. هر چه‌قدر وابستگی ریزشبکه به شبکهٔ اصلی،در کنار تأمین مصرف مشترکین، کاهش یابد، قابلیت‌اطمینان ریزشبکه افزایش خواهد یافت. در این مقاله به بهینه‌سازی حضور خودروهای الکتریکی، در ترکیب با سایر واحدهای تولید توان، به‌منظور بهبود تأمین بار و کاهش وابستگی ریزشبکه به شبکهٔ اصلی پرداخته‌شده است. با استفاده از مدل‌های احتمالاتی ارائه‌شده 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 به‌کارگیری خودروهای الکتریکی در ریزشبکه‌ها، 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 ریزشبکه 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 ReliabilityDistribution System in MicrogridOperation", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 3, P.P. 1997 - 2006, 2012.

[3] Wang,S., Li,Zh., Wu,L., Shahidehpour,M., Li,Zu., "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 Applicationto 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 RenewableEnergy",J. Power Sources, Vol. 144, No. 1, PP. 280–294, 2005.

[10] J. R. Pillai, and B. Bak-Jensen, "Impacts of Electric Vehicle Loads onPower Distribution Systems," in Proceedings of the IEEE Vehicle Powerand Propulsion Conference (VPPC), Sept. 2010.

[11] Z. Darbai, and M. Ferdowsi, "Aggregated Impact of Plug-in HybridElectric Vehicles on Electricity Demand Profile," IEEE Transactions onSustainable Energy, Vol. 2, No. 4, PP. 501–508, Oct. 2011.

[12] S. Shao, M. Pipattanasomporn, and S. Rahman, "Grid Integration ofElectric Vehicles and Demand Response with Customer Choice," IEEETransactions on Smart Grid, Vol. 3, No. 1, PP. 543–550, Mar. 2012.

[13] X. Yu, "Impacts Assessment of PHEV Charge Profiles on GenerationExpansion Using National Energy Modeling System", in Proc. IEEEPower & Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery ofElectrical Energy in the 21st Century, PP. 1_5, 2008.

[14] W. Kempton, "A Test of Vehicle-to-Grid (V2G) for Energy Storage andFrequency Regulation in the PJM System", Results from an Industry-University Research Partnership, 2008.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.9.9]

[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 Modelsfor ReliabilityEvolutionof 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, Vo1. 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 Transactionon Smart Grid, Vol. 3, NO. 3, September 2012.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.9.9]