

مدل‌سازی سیستم‌های ذخیره‌کننده انرژی در ریزشبکه‌ها با هدف کاهش هزینه و آلاینده‌های زیست محیطی

مهدی متوسل^{۱*}

۱- گروه مهندسی برق، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران
 Mehdi_motevasel@yahoo.com

چکیده: در این مقاله به منظور بهبود عملکرد یک ریزشبکه، یک مدل کامل و عملی برای ذخیره‌کننده‌های انرژی الکتریکی ارائه گردیده است. به منظور بهینه کردن انرژی در ریزشبکه، یک تابع هدف دو منظوره در نظر گرفته شده که هدف اصلی این تابع آن است که با در نظر گرفتن عدم قطعیت موجود در ریزشبکه، به حداقل کردن همزمان هزینه‌های کل بهره‌برداری و آلاینده‌های زیست محیطی بپردازد. در قسمت بهینه‌سازی، با توجه به فضای جستجوی بزرگ مسئله فوق و همچنین غیرخطی بودن آن، از الگوریتم پیشنهادی بهبود یافته ازدحام ذرات استفاده شده است. مقایسه جواب‌های به دست آمده از طریق الگوریتم بهینه‌سازی فوق با سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم فوق کارا تر بوده و دارای سرعت و دقت بالاتری می‌باشد. در نهایت، الگوریتم پیشنهادی جهت مدیریت انرژی الکتریکی کل ریزشبکه، نقاط کار کلیه منابع تولید پراکنده، نحوه شارژ و دشارژ ذخیره‌کننده‌های انرژی الکتریکی و همچنین میزان توان الکتریکی مبادلاتی با شبکه بالادست را در شرایطی که کل هزینه‌های بهره‌برداری و آلودگی‌های زیست محیطی تولیدی به‌طور همزمان حداقل گردد، بهینه می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: ریزشبکه، ذخیره‌کننده انرژی، هزینه، آلاینده زیست محیطی

Modeling of Energy Storage Systems in Microgrids with the Aim of Reducing Cost and Environmental Pollutants

Mehdi Motevasel^{1*}

¹Department of Electrical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran
 Mehdi_motevasel@yahoo.com

Abstract:

In this article, in order to improve the performance of a micro-grid, a complete and practical model for electric energy storage is presented. In order to optimize the energy in the micro-grid, a dual-purpose objective function has been considered, and the main purpose of this function is to simultaneously minimize the total operating costs and environmental pollutants by considering the uncertainty in the micro-grid. In the optimization part, due to the large search space of the above problem and its non-linearity, the proposed improved particle swarm algorithm has been used. Comparing the answers obtained through the above optimization algorithm with other optimization algorithms shows that the above algorithm is more efficient and has higher speed and accuracy. Finally, the proposed algorithm for managing the electrical energy of the entire micro-grid, the working points of all scattered production sources, how to charge and discharge electrical energy storage devices, as well as the amount of electrical power exchanged with the upstream network, in the condition that the total operating costs and environmental pollution Production is simultaneously minimized and optimized.

Keywords: Micro-grid, energy saver, cost, environmental pollution

DOI: 00.00000/0000

تاریخ چاپ مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۱۷

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۰۱

کمتری هستند ولی باز محاسبات ریاضی پیچیده‌ای دارند [۱۹ و ۲۰]. اما روش‌های تقریبی بین حجم محاسباتی بالا و دقت برنامه یک تعادل مناسب برقرار می‌کند. به‌طور کلی روش تخمین 2m نقطه‌ای به عنوان یکی از بهترین روش‌های تقریبی محسوب می‌گردد که می‌توان با استفاده از آن با کارایی و قابلیت اعتماد بالا به مدلسازی عدم قطعیت در شبکه‌های قدرت پرداخت. با وجود آنکه روش تخمین 2m نقطه‌ای از جریان‌های معمولی و قطعی جهت پیدا کردن زمان‌های آماری متغیرهای تصادفی خروجی استفاده می‌کند اما به مراتب نسبت به روش مونت کالو دارای حجم و تعداد دفعات شبیه‌سازی کمتری می‌باشد [۲۱]. در این مقاله روش تخمین 2m نقطه‌ای جهت مدلسازی عدم قطعیت‌های موجود در دیملند الکتریکی ساعتی و قیمت انرژی در بازار برق به همراه توان‌های خروجی سلول‌های فتوولتائیک و توربین‌های بادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در واقع، ابتدا به تعیین مدل الکتریکی کامل ذخیره‌کننده انرژی پرداخته می‌شود. سپس روش 2m نقطه‌ای برای عدم قطعیت موجود در ریزشبه مدلسازی می‌شود و در آخر نیز به کمک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهبود یافته نقاط بهینه مشابه تولید پراکنده، نحوه شارژ و دشارژ ذخیره‌کننده انرژی و توان مبادلاتی با شبکه بالادست بهینه می‌گردد.

۲- مدلسازی ذخیره‌کننده انرژی الکتریکی

یکی از ذخیره‌کننده‌های انرژی، ذخیره‌کننده‌های انرژی الکتریکی می‌باشند که قادرند انرژی الکتریکی را به صورت‌های مختلف در خود نگه داشته و در مواقع مورد نیاز به شبکه تزریق نمایند. باتری‌های لیتروشمیایی یکی از پرکاربردترین این نوع ذخیره‌کننده‌های انرژی الکتریکی هستند که برای مدلسازی آنها بایستی ظرفیت ذخیره‌سازی و نرخ شارژ و دشارژ آنها مد نظر قرار گیرد. حال فرض می‌شود E_S^{\max} ماکزیمم ظرفیت قابل ذخیره باتری بر حسب کیلووات ساعت بوده و P_{ch}^{\max} و P_{dech}^{\max} به ترتیب نرخ ماکزیمم شارژ و دشارژ آنها بر حسب کیلو وات می‌باشد. در عمل دشارژ کامل باتری‌ها می‌تواند باعث کاهش طول عمر مفید آنها گردد. لذا بایستی باتری‌های لیتروشمیایی دارای یک مینیمم ظرفیت عملی باشند که با E_S^{\max} نمایش داده می‌شود. بنابراین با توجه به موارد فوق اگر $E_S(t)$ را به عنوان حالت شارژ باتری در ساعت t ام در نظر بگیریم، محدودیت حالت شارژ و دشارژ باتری را می‌توان به صورت زیر نمایش داد:

$$E_S^{\min} \leq E_S(t) \leq E_S^{\max} \quad (1)$$

حال اگر توان شارژ و دشارژ ذخیره‌کننده‌های الکتریکی را $P_S(t)$ تعریف کنیم، آنگاه به صورت زیر به دست آورد:

$$P_S(t) = E_S(t) - E_S(t-1), t = 1, 2, \dots, T \quad (2)$$

که در این رابطه، $P_S(t)$ بایستی محدودیت‌های زیر را داشته باشد:

به‌طور کلی ریز شبکه به مجموعه‌ای از واحدهای تولید پراکنده با ظرفیت‌های معمولاً کمتر از پانصد کیلو وات اطلاق می‌گردد که می‌توانند به دو صورت متصل یا منفصل از شبکه بالادست خود عمل نمایند [۱-۴]. ذخیره‌کننده‌های انرژی نقش بسیار مهمی را در مدیریت انرژی و برنامه‌ریزی ریزشبه‌ها به عهده دارند. به طوری که می‌توانند با شارژ و دشارژ هوشمند بازدهی سیستم را بهبود بخشند [۵-۶]. این ادوات قادر هستند که با ذخیره انرژی‌های الکتریکی در ساعات کم مصرف و آزاد کردن آنها در زمان‌های پیک بار، ضمن پیک‌زدائی شبکه سبب کم شدن هزینه‌های بهره‌برداری ریز شبکه‌ها و منافع اقتصادی زیادی نیز گردند [۷]. علاوه بر آن، به عنوان یک واسط بین تولید و مصرف قادرند تولیدات منابع تولید پراکنده و توان‌های مبادلاتی با شبکه بالادست را طوری بهینه نمایند که آلودگی کل نیز به بهترین شکل ممکن حداقل شود [۸-۹]. اکثر مراجع علمی مدل کاملی که قادر باشند تمامی قیود در شرایط عملی ذخیره‌کننده‌های انرژی الکتریکی را تامین نمایند را ارائه نموده‌اند [۱۰-۱۵]. امروزه به دلیل مسائل آب و هوایی، اقتصادی و غیره، عدم قطعیت‌هایی در قسمت‌های مختلف زیر شبکه‌ها وجود دارد که بدون در نظر گرفتن آنها نمی‌توان به درستی به مدیریت انرژی در آنها پرداخت [۱۶]. به عنوان مثال به دلیل شرایط آب و هوایی، تولید منابع تولید پراکنده مانند توربین بادی و پنل‌های خورشیدی می‌تواند دست خوش تغییرات گردد. لذا به دلیل رفتار تصادفی سرعت باد یا تابش نور خورشید، توان تولیدی خروجی سلول‌های فتوولتائیک، توربین‌های بادی همواره با عدم قطعیت مواجه هستند. علاوه بر آن به دلیل تولید برق در شبکه بالا دست، مقدار بار الکتریکی مصرف‌کنندگان نیز می‌تواند برخلاف پیش‌بینی‌های انجام پذیرفته تغییر کند [۱۷]. در این راستا راهکارهای دقیق، نیازمند ورود بدون خطای اطلاعات قیمت انرژی الکتریکی در بازار برق هستند که مقدار دقیق بار مصرفی مشترکین قابل پیش‌بینی نمی‌باشد. بنابراین روش‌های بهینه‌سازی سنتی بایستی تحت شرایط فوق انجام پذیرد تا بتوان به بهترین و واقعی‌ترین جواب‌ها دست پیدا نمود. در این راستا، بایستی روش‌های جدیدی را به کار برد تا عدم قطعیت‌های موجود در جواب‌های خروجی را در نظر بگیرد و ریسک جواب‌های فوق را که به دلیل تصادفی بودن اطلاعات ورودی انسان به وجود آمده به کمترین مقدار خود تقلیل دهد. به‌طور کلی روش‌های احتمالی را می‌توان به سه دسته روش شبیه‌سازی مونت کالو، روش‌های تحلیل و روش‌های تقریبی تقسیم‌بندی نمود [۱۸].

روش مونت کالو یک روش درست و دقیق می‌باشد؛ اما ضعف

این روش حجم بالای عملیات محاسباتی آن می‌باشد. روش‌های تحلیلی نسبت به روش مونت کالو دارای تعداد دفعات شبیه‌سازی

روش آماری فوق قابل انجام می‌باشد. در این راستا در هر مرحله شبیه‌سازی، یکی از متغیرهای تصادفی ورودی برابر با مقادیر میانگین آنها مطابق زیر قرار داده می‌شود:

$$S_{(l,po)} = f(c, \mu_{z_1}, \mu_{z_2}, \dots, z_{l,po}, \dots, \mu_{z_m}) \quad (7)$$

$$l = 1, 2, \dots, m, po = 1, 2$$

در رابطه بالا $z_{l,1}$ و $z_{l,2}$ موقعیت تصادفی ورودی z_1 است. زمانی که جواب‌های قطعی مسئله $S_{(l,po)}$ به دست آمد، مقادیر انحراف از معیار و میانگین متغیرهای تصادفی خروجی قابل پیش‌بینی می‌باشد.

۳-۱- پیاده‌سازی روش تخمین 2m نقطه‌ای

در ادامه مراحل گام به گام روش تخمین 2m نقطه‌ای جهت به دست آوردن مشخصات متغیر تصادفی خروجی آورده شده است: ابتدا m را تعیین کرده، $E(S^h) = 0$ ($h = 1, 2$) تنظیم و پارامتر غیرمسلّم z_1 انتخاب می‌شود. مطابق (λ) مقدار چولگی z_1 ($\lambda_{pl,3}$) تعیین می‌شود.

$$\lambda_{pl,3} = \frac{E[(z_l - \mu_{z_l})^3]}{(\sigma_{z_l})^3} \quad (8)$$

در (λ) $E[(z_l - \mu_{z_l})^3] = \sum_{j=1}^N (z_{l,j} - \mu_{z_l})^3 \times \text{prob}(z_{l,j})$ می‌باشد، که N تعداد دفعات رصد کردن z_l و $\text{prob}(z_{l,j})$ نیز احتمال مشاهده هر کدام از $z_{l,j}$ ها می‌باشد، که توسط اپراتور سیستم تعیین می‌گردد. دو موقعیت مکانی استاندارد مطابق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\xi_{l,po} = \frac{\lambda_{z_1,3}}{2} + (-1)^{3-po} \sqrt{\left(m + \left(\frac{\lambda_{z_1,3}}{2}\right)^2\right)}, po = 1, 2 \quad (9)$$

سپس دو موقعیت مکانی پیش‌بینی شده به دست می‌آید.

$$z_{l,k} = \mu_{z_l} + \xi_{z_l,k} \cdot \sigma_{z_l}, po = 1, 2 \quad (10)$$

جواب قطعی مسئله برای po امین موقعیت مکانی پیش‌بینی شده طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$S_{(l,po)} = f(\mu_{z_1}, \mu_{z_2}, \dots, z_{l,po}, \dots, \mu_{z_m}), l = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

دو ضریب وزنی مربوط به z_l تعیین می‌شود.

$$w_{l,po} = \frac{(-1)^{po} \xi_{l,3-po}}{m (\xi_{l,1} - \xi_{l,2})}, po = 1, 2 \quad (12)$$

مشخصات متغیرهای تصادفی خروجی به روز رسانی می‌شود.

$$E(S^h) = E(S^h) + \sum_{po=1}^2 w_{l,po} \cdot (S_{(l,po)})^h, h = 1, 2 \quad (13)$$

مراحل فوق تا زمانی که تمام پارامترهای نامشخص مدنظر قرار بگیرد ادامه می‌یابد. مقادیر میانگین و انحراف معیار کلیه متغیرهای تصادفی خروجی طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\mu_S = E(S^h), \sigma_S = \sqrt{E(S^h) - (E(S^h))^2} \quad (14)$$

$$\begin{cases} P_S(t) / \eta_D \leq P_{dech}^{max} \text{ For discharging } (P_S(t) > 0) \\ -\eta_C P_S(t) \leq P_{ch}^{max} \text{ For charging } (P_S(t) < 0) \end{cases} \quad (3)$$

در معادلات بالا η_D کارایی دشارژ باتری و η_C کارایی شارژ باتری می‌باشد. مقادیر منفی و مثبت $P_S(t)$ نشان‌دهنده حالت شارژ و دشارژ باتری می‌باشد. برای مدل‌سازی ذخیره‌کننده انرژی الکتریکی (باتری‌های الکتروشیمیایی) باید دو شرط مهم زیر برقرار باشد:

• از آنجا که در هر ساعت بسته به مقدار $P_S(t)$ انرژی ذخیره شده در باتری‌ها دائماً در حال تغییر است، لذا در هر ساعت کاری بایستی $P_S(t)$ طوری تعیین گردد که انرژی کل ذخیره شده در باتری بین محدوده‌های مجاز خود باقی بماند. محدودیت‌های $P_S(t)$ برای هر ساعت بصورت ذیل قابل بیان است:

$$E_S^{min} - E_S(0) \leq \sum_{k=1}^t P_S(k) \leq E_S^{max} - E_S(0), \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (4)$$

• به منظور بهینه کردن انرژی کل یک ریز شبکه در یک دوره زمانی T ساعته، بایستی انرژی ابتدایی ذخیره‌کننده‌های الکتریکی و انرژی انتهایی آن با هم مساوی باشد ($E_S(0) = E_S(T)$). این محدودیت را می‌توان به صورت قید زیر بیان نمود:

$$\frac{1}{\eta_D} \sum_{P(t)>0, t=1}^T P_S(t) + \eta_C \sum_{P(t)<0, t=1}^T P_S(t) = 0 \quad (5)$$

۳-۲- مدل‌سازی عدم قطعیت

در این مقاله از روش تخمین 2m نقطه‌ای هانگ جهت مدل‌سازی عدم قطعیت‌های موجود در توان‌های خروجی PV و WT ، قیمت انرژی در بازار برق، و دیماند الکتریکی مصرف‌کنندگان ریز شبکه استفاده می‌شود. به‌طور کلی تابع ریاضی مدیریت انرژی ریزشبه‌ها را به صورت ذیل می‌توان بیان نمود:

$$S = f(c, z_1, z_2, \dots, z_m) \quad (6)$$

که در آن v مجموعه متغیرهای خروجی، S خروجی مسئله و نهایتاً تابع f نیز معادلات مربوط به توابع هدف ریزشبه می‌باشد. c مجموعه متغیرهای واقعی و غیر تصادفی است. Z_i ($i = 1, \dots, m$) متغیرهای ورودی تصادفی تحت عدم قطعیت با تابع احتمالی Df_{z_i} می‌باشند. به منظور پیدا کردن مشخصه‌های آماری متغیرهای تصادفی خروجی، روش فوق به تعدادی از مشخصه‌های متغیرهای ورودی تصادفی مانند ضرائب میانگین (μ_{pl})، واریانس (σ_{pl}) و ضریب چولگی ($\lambda_{pl,3}$) نیاز دارد. روش تخمین 2m نقطه‌ای دو ملاحظه برای هر یک از متغیرهای ورودی تصادفی z_l با عنوان‌های $(z_{l,1}, w_{l,1})$ و $(z_{l,2}, w_{l,2})$ در نظر می‌گیرد. $(po = 1, 2) Z_{l,po}$ به عنوان po امین موقعیت مکانی z_l نام‌گذاری می‌گردد و $(po = 1, 2) w_{l,po}$ یک فاکتور وزنی است که اهمیت موقعیت مکانی جهت ارزیابی مشخصه‌های آماری متغیرهای تصادفی را نشان می‌دهد. پیدا کردن جواب قطعی مسئله با اجرای 2m مرتبه



تابع چگالی احتمالی متغیر تصادفی خروجی را می‌توان با محاسبه مقادیر میانگین و انحراف از معیار و سری گرام چابلیر تخمین زد.

۴- تابع هدف

هدف اصلی ریزشبه، تامین بهینه بارهای حرارتی و الکتریکی با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی و زیست محیطی می‌باشد. در این طرح مقاله، فرض می‌شود که انرژی حرارتی تولیدی منابع تولید پراکنده (مانند میکروتوربین و پیل سوختی) یک رابطه خطی با تولید انرژی الکتریکی آن‌ها دارد. در این راستا به منظور مدیریت هوشمند انرژی در یک ریزشبه دو تابع هدف برای تامین برق مصرف‌کنندگان به شرح زیر در نظر گرفته می‌شود.

۴-۱- حداقل کردن همزمان هزینه‌های بهره‌برداری و آلاینده‌های زیست محیطی تولیدی

هزینه بهره‌برداری ریز شبکه شامل هزینه فروش توان الکتریکی منابع تولید پراکنده، هزینه‌های تعمیرات و نگهداری و هزینه‌های ناشی از خاموش و روشن شدن منابع، هزینه خرید یا فروش انرژی الکتریکی از شبکه بالادست می‌باشد. تابع هدف اقتصادی فوق را می‌توان به صورت ذیل خلاصه نمود:

$$F = \text{Min} \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^{N_g} \left[u_i(t) P_{gi}(t) (B_{gi}(t) + K_{OM_i}) + EF_{gi} \times P_{gi}(t) + S_{gi} |u_i(t) - u_i(t-1)| \right] + \sum_{j=1}^{N_{Es}} \left[u_j(t) P_{Sj}(t) B_{Sj}(t) + P_{Grid}(t) B_{Grid}(t) + EF_{Grid} \times P_{Grid}(t) \right] \right\} \quad (15)$$

که در آن N_g تعداد کل منابع تولید پراکنده، N_{Es} تعداد ذخیره‌کننده‌های انرژی الکتریکی (باتری‌های الکتروشیمیایی)، $B_{gi}(t)$ و $B_{Sj}(t)$ به ترتیب قیمت پیشنهادی i امین منابع تولید پراکنده و j امین ذخیره‌کننده انرژی الکتریکی در ساعت t ام می‌باشد. $P_{gi}(t)$ توان تولیدی i امین منبع تولید پراکنده در ساعت t ام و $P_{Sj}(t)$ نیز توان شارژ شده یا دشارژ شده i امین منبع ذخیره‌کننده الکتریکی در ساعت t ام است. $u_i(t)$ یک بردار حالت است که نشان‌دهنده روشن یا خاموش بودن واحدها در ساعت t ام می‌باشد. S_{gi} هزینه روشن شدن یا خاموش شدن i امین منبع تولید پراکنده در ساعت t ام است، K_{OM_i} ضریب مربوط به هزینه‌های تعمیر و نگهداری i امین منبع تولید پراکنده می‌باشد. در رابطه فوق $P_{Grid}(t)$ توان الکتریکی فروخته شده یا خریداری شده از شبکه بالادست در ساعت t ام می‌باشد و EF_{gi} و EF_{Grid} ضریب آلاینده‌گی i امین منبع تولید پراکنده و ضریب آلاینده‌گی شبکه بالادست می‌باشد.

$$P_{Grid}(t) = P_L(t) - \left[\sum_{i=1}^{N_g} P_{gi}(t) + \sum_{j=1}^{N_{Es}} P_{Sj}(t) \right] \quad (16)$$

۴-۲- الگوریتم بهینه‌سازی

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)¹ یک روش بهینه‌سازی است که از رفتار جمعی گله پرندگان الهام می‌گیرد. این الگوریتم اولین بار در سال ۱۹۹۵ به‌عنوان یک الگوریتم بهینه‌سازی تصادفی مبتنی بر جمعیت پیشنهاد شد که مفهوم رفتار اجتماعی مشاهده شده در گله‌های پرندگان است. در الگوریتم ازدحام ذرات، جمعیتی از ذرات، راه‌حل‌های بالقوه را برای مسئله بهینه‌سازی نشان می‌دهند. هر ذره تحت تأثیر تجربه خود و دانش مشترک ذرات با بهترین عملکرد ازدحام در فضای جستجو حرکت می‌کند. این الگوریتم یک روش بهینه‌سازی قدرتمند است که از رفتار جمعی ذرات الهام گرفته شده و به دلیل سادگی، همگرایی سریع و استحکام، به ابزاری ارزشمند برای حل انواع مسائل بهینه‌سازی تبدیل شده است. در این مقاله به منظور بهینه کردن تابع هدف ارائه شده در (۱۵)، از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده شده است. همچنین به منظور رسیدن به جواب‌های بهینه‌تر از یک مدل بهبود یافته پیشنهادی (MPSO)² استفاده شده است.

۴-۲-۱- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهبود یافته (MPSO)

در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، اندازه طول واحد حرکت ذرات $(X(i, j))$ یکی از پارامترهای مهم در سرعت همگرایی و دقت جواب بهینه می‌باشد؛ به‌طوری‌که اگر طول آن زیاد باشد دقت جواب بهینه به دست آمده کاهش پیدا می‌کند و در صورتی که طول آن کم باشد سرعت همگرایی کاهش می‌یابد. برای افزایش کارایی الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی و بالا رفتن دقت و سرعت آن، یک تابع غیرخطی دینامیکی نزولی به جای مقادیر ثابت $X(i)$ در نظر گرفته شده است. تابع غیرخطی فوق را به صورت زیر تعریف نمود:

$$X(i, j+1) = \left(\frac{X(i, j) - X(N_c)}{N + X(N)} \right) (N - j) \quad (17)$$

در عبارت فوق j مرحله پروسه تکرار الگوریتم بوده و $X(N)$ یک پارامتر از پیش تعیین شده می‌باشد.

۵- شبیه سازی

در این قسمت به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، الگوریتم فوق بر روی یک ریزشبه در یک بازه ۲۴ ساعته تست می‌شود. این ریزشبه شامل انواع منابع تولید پراکنده (توربین بادی، فتوولتائیک، میکروتوربین و پیل سوختی) و ذخیره‌کننده‌های انرژی الکتریکی می‌باشد. به منظور تامین مطمئن بارهای حرارتی، میکروتوربین و پیل سوختی به عنوان سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت در نظر گرفته شده است. این ریزشبه قادر است جهت تامین بهینه بارهای

² Modified Particle Swarm Optimization

¹ Particle Swarm Optimization



که به دلیل آلودگی های بیشتری که توسط شبکه های بالادست ریزشکبه ها تولید می شود، الگوریتم مورد نظر منابع تولید پراکنده را مجبور به تولید در حداکثر سقف مجاز نماید تا خرید انرژی از شبکه بالادست را به حداقل رسانده و در بعضی از ساعات نیز بتواند حتی به آن نیز انرژی بفروشد.

جدول (۱): محدودیت های منابع تولید پراکنده ریزشکبه

| Type | Min power (kW) | Max Power (kW) | shut down Start up cost (Euro/kW) |
|------|----------------|----------------|-----------------------------------|
| MT | 6 | 30 | 0.107 |
| FC | 3 | 30 | 0.138 |
| PV | 0 | 25 | 0 |
| WT | 0 | 15 | 0 |
| ESS | -30 | 30 | 0 |

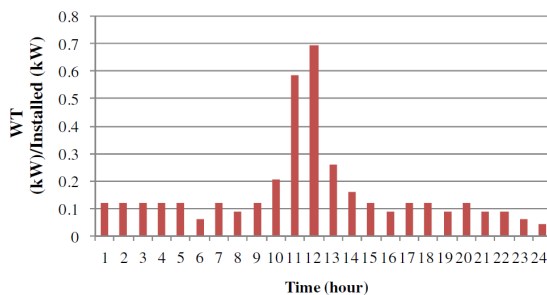
جدول (۲): قیمت انرژی الکتریکی شبکه بالادست (Euro/kWh)

و دیماند الکتریکی (kW)

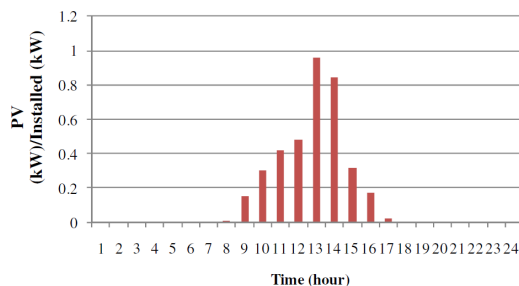
| Hr | Elec Price | P_{L_elec} | Hr | Elec Price | P_L |
|----|------------|---------------|----|------------|-------|
| 1 | 0.033 | 52 | 13 | 0.215 | 72 |
| 2 | 0.027 | 50 | 14 | 0.572 | 72 |
| 3 | 0.02 | 50 | 15 | 0.286 | 76 |
| 4 | 0.017 | 51 | 16 | 0.279 | 80 |
| 5 | 0.017 | 56 | 17 | 0.086 | 85 |
| 6 | 0.029 | 63 | 18 | 0.059 | 88 |
| 7 | 0.033 | 70 | 19 | 0.05 | 90 |
| 8 | 0.054 | 75 | 20 | 0.061 | 87 |
| 9 | 0.215 | 76 | 21 | 0.181 | 78 |
| 10 | 0.572 | 80 | 22 | 0.077 | 71 |
| 11 | 0.572 | 78 | 23 | 0.043 | 65 |
| 12 | 0.572 | 74 | 24 | 0.037 | |

جدول (۳): ضرایب آلودگی منابع تولید پراکنده و شبکه

| Emission type | Emission factors (kg/MWh) | |
|---------------|---------------------------|-------|
| | MT | Grid |
| NOX | 0.2 | 2.295 |
| CO2 | 724 | 922 |
| SO2 | 0.0036 | 3.583 |



شکل (۱): نمودار نرمال شده توان خروجی توربین بادی



شکل (۲): نمودار نرمال شده توان خروجی پنل خورشیدی

الکتریکی خود، توان الکتریکی محدودی را با توجه به مسائل اقتصادی و زیست محیطی با شبکه فشار متوسط بالا دست خود مبادله نماید. همه منابع تولید پراکنده مجاز به تولید الکتریسته تنها در محدوده های مجاز خود هستند. همچنین جهت بهینه نمودن عملکرد کل ریزشکبه، آنها قادرند واحدهای خود را بسته به شرایط مختلف خاموش و یا روشن کنند. عدم قطعیت موجود در منبع خورشیدی و بادی نیز توسط روش $2m$ در نظر گرفته شده است.

در جدول (۱) ماکزیمم و مینیمم تولید توان هر یک از منابع تولید پراکنده به همراه هزینه خاموش یا روشن شدن آنها آورده شده است. قیمت انرژی الکتریکی شبکه بالادست و دیماند الکتریکی ریزشکبه در طول مدت شبانه در جدول (۲) آورده شده است. ضرایب آلودگی نیز برای منابع تولید پراکنده و شبکه بالادست در جدول (۳) بیان گردیده است قیمت تمام شده تولید توان برای هر یک از منابع تولید پراکنده و هزینه شارژ و شارژ ذخیره کننده انرژی در جدول (۴) نشان داده است. نمودار نرمال شده توان خروجی پیش بینی شده مولدهای PV و WT در شکل (۱-۲) آورده شده است. همچنین در شبکه مورد مطالعه برای ذخیره کننده انرژی الکتریکی

$$P_{exch}^{max} = 60kW, E_S(0) = 5kW, \eta_C = \eta_D = 90\%$$

$$P_{th_ch}^{max} = P_{th_dech}^{max} = 40kW \text{ و } E_S^{max} = 150kW \text{ می باشد.}$$

در این مرحله، الگوریتم بهینه سازی MPSO جهت بهینه نمودن هزینه کل بهره برداری و آلاینده های تولیدی مورد استفاده قرار می گیرد. به منظور نشان دادن کارایی و دقت الگوریتم پیشنهادی MPSO، مجموعه جواب های حاصل با الگوریتم های بهینه سازی ژنتیک و PSO مقایسه گردیده است (جدول (۵)). مقایسه نتایج نشان می دهد که الگوریتم بهینه سازی پیشنهادی MPSO هم کارا بوده و هم نسبت به الگوریتم های PSO و GA علاوه بر رسیدن به جواب های بهتر، دارای میانگین و انحراف از معیار بهتری نیز می باشد.

نقاط کار بهینه هر یک از منابع تولید پراکنده، همچنین نحوه شارژ و دشارژ بهینه ذخیره کننده انرژی و توان مبادلاتی با شبکه بالادست در جدول (۶) نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که هنگامی که قیمت انرژی در شبکه بالادست کمتر از قیمت تمام شده انرژی تولیدی منابع تولید پراکنده ریزشکبه باشد، ذخیره کننده انرژی الکتریکی باتری با توجه به ماکزیمم ظرفیت خود شارژ می گردد. در دوره پیک بار که قیمت انرژی در شبکه بالادست بالا باشد، تمامی منابع تولید پراکنده تا حداکثر سقف قابل تولید خود، انرژی تولید می کنند و ذخیره کننده انرژی الکتریکی نیز دشارژ می گردد این در حالی است که پس از تأمین بارهای الکتریکی داخلی ریزشکبه، مازاد انرژی به شبکه بالادست فروخته می شود. علاوه بر آن همزمان با تأمین انرژی بارهای الکتریکی ریزشکبه، انرژی شارژ و دشارژ ذخیره کننده های انرژی الکتریکی نیز تأمین می شود. توابع جریمه مربوط به آلاینده زیست محیطی در تابع هدف، با در نظر گرفتن آلاینده های زیست محیطی به عنوان تابع هدف باعث می شود



جدول (۴): قیمت‌های تمام شده تولید انرژی توسط منابع تولید

پراکنده (Euro /kWh)

| Hour | MT | FC | PV | WT | Battery |
|------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 1 | 0.0823 | 0.1277 | 0 | 0.021 | 0.1192 |
| 2 | 0.0823 | 0.1277 | 0 | 0.017 | 0.1192 |
| 3 | 0.0831 | 0.1285 | 0 | 0.0125 | 0.1269 |
| 4 | 0.0831 | 0.129 | 0 | 0.011 | 0.1346 |
| 5 | 0.0838 | 0.1285 | 0 | 0.001 | 0.1423 |
| 6 | 0.0838 | 0.1292 | 0 | 0.015 | 0.15 |
| 7 | 0.0846 | 0.1292 | 0 | 0.021 | 0.1577 |
| 8 | 0.0854 | 0.13 | 0.0646 | 0.033 | 0.1608 |
| 9 | 0.0862 | 0.1308 | 0.0654 | 0.062 | 0.1662 |
| 10 | 0.0862 | 0.1315 | 0.0662 | 0.125 | 0.1677 |
| 11 | 0.0892 | 0.1323 | 0.0669 | 0.15 | 0.1731 |
| 12 | 0.09 | 0.1315 | 0.0677 | 0.155 | 0.1769 |
| 13 | 0.0885 | 0.1308 | 0.0662 | 0.125 | 0.1692 |
| 14 | 0.0885 | 0.1308 | 0.0654 | 0.135 | 0.16 |
| 15 | 0.0885 | 0.1308 | 0.0646 | 0.115 | 0.1538 |
| 16 | 0.09 | 0.1315 | 0.0638 | 0.085 | 0.15 |
| 17 | 0.0908 | 0.1331 | 0.6538 | 0.035 | 0.1523 |
| 18 | 0.0915 | 0.1331 | 0.0662 | 0.025 | 0.15 |
| 19 | 0.0908 | 0.1338 | 0 | 0.02 | 0.1462 |
| 20 | 0.0885 | 0.1331 | 0 | 0.23 | 0.1462 |
| 21 | 0.0862 | 0.1315 | 0 | 0.033 | 0.1431 |
| 22 | 0.0846 | 0.1308 | 0 | 0.015 | 0.1385 |
| 23 | 0.0838 | 0.13 | 0 | 0.021 | 0.1346 |
| 24 | 0.0831 | 0.1285 | 0 | 0.017 | 0.1269 |

در این مقاله به بهینه‌سازی و تعیین نقاط کار بهینه برای اجزای یک ریزشبکه پرداخته شده است. در این راستا ابتدا یک مدل با در نظر گرفتن تمامی شرایط عملی برای ذخیره‌کننده‌های انرژی الکتریکی ارائه گردیده است. به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در یک ریزشبکه، از روش تخمین دونقطه‌ای استفاده شده است. همچنین یک تابع هدف دو منظوره شامل مسائل زیست محیطی و اقتصادی در نظر گرفته شده که هدف اصلی این تابع آن است که به حداقل کردن همزمان هزینه‌های کل بهره‌برداری و آلاینده‌های زیست محیطی بپردازد. در قسمت بهینه‌سازی با توجه به فضای جستجوی بزرگ مسئله فوق و همچنین غیرخطی بودن آن، از الگوریتم پیشنهادی بهبود یافته ازدحام ذرات استفاده شده است. نهایتاً الگوریتم پیشنهادی بر روی یک ریزشبکه نمونه اعمال گردید و نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم فوق قادر است به طرز مناسبی نقاط کار بهینه کلیه منابع تولید پراکنده، نحوه شارژ و دشارژ ذخیره‌کننده‌های انرژی الکتریکی و همچنین میزان توان الکتریکی مبادلاتی با شبکه بالادست را در شرایطی که کل هزینه‌های بهره‌برداری و آلودگی‌های زیست محیطی تولیدی به‌طور همزمان حداقل گردد، به‌دست آورد.

مراجع

- [1] G. Melath, S. Rangarajan and V. Agarwal, "Comprehensive power management scheme for the intelligent operation of photovoltaic-battery based hybrid microgrid system", *IET Renew. Power Gener.*, vol. 14, no. 1, pp. 1688-1698, 2020
- [2] Z. Yi, W. Dong and A. H. Etemadi, "A unified control and power management scheme for PV-battery-based hybrid microgrids for both grid-connected and islanded modes", *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 6, pp. 5975-5985, Nov. 2018.
- [3] S. Sen and V. Kumar, "Simplified modeling and HIL validation of solar PVs and storage-based islanded microgrid with generation uncertainties", *IEEE Syst. J.*, vol. 14, no. 2, pp. 2653-2664, Jun. 2020.
- [4] X. Zhang, B. Wang, U. Manandhar, H. Beng Gooi and G. Foo, "A model predictive current controlled bidirectional three-level DC/DC converter for hybrid energy storage system in DC microgrids", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 5, pp. 4025-4030, May 2019.
- [5] B. R. Ravada and N. R. Tummuru, "Control of a supercapacitor-battery-PV based stand-alone DC-microgrid", *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 35, no. 3, pp. 1268-1277, Sep. 2020.
- [6] . Shan, J. Hu, K. W. Chan, Q. Fu and J. M. Guerrero, "Model predictive control of bidirectional DC-DC converters and AC/DC interlinking converters—A new control method for PV-Wind-Battery microgrids", *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 10, no. 4, pp. 1823-1833, Oct. 2019.
- [7] O. Wallscheid and E.F.B. Ngoumtsa, "Investigation of disturbance observers for model predictive current control in electric drives", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 35, no. 12, pp. 13 563-13 572, Dec. 2020.
- [8] J. Guo, "Robust tracking control of variable stiffness joint based on feedback linearization and disturbance observer

جدول (۵): مقایسه روش بهینه‌سازی MPSO با الگوریتم‌های دیگر

| Standard deviation (Euro) | Average (Euro) | Worst solution (Euro) | Best solution (Euro) | Algorithm |
|---------------------------|----------------|-----------------------|----------------------|-----------|
| 0.3234 | 159.29 | 161.456 | 154.197 | GA |
| 0.2517 | 154.14 | 160.347 | 151.265 | PSO |
| 0.0964 | 145.37 | 145.567 | 145.347 | MPSO |

جدول (۶): تعیین نقاط بهینه منابع تولید پراکنده، نحوه شارژ و

دشارژ ذخیره‌کننده انرژی و توان مبادلاتی با شبکه بالادست

| Hr | MT | FC | PV | WT | Battery | Utility |
|----|-------|-------|-------|-------|---------|---------|
| 1 | 0 | 17.07 | 0 | 0.94 | -4.88 | 38.86 |
| 2 | 6.95 | 29.64 | 0 | 0.94 | 4.88 | 7.566 |
| 3 | 13.64 | 15.35 | 0 | 0.94 | -32.57 | 52.62 |
| 4 | 13.45 | 4.82 | 0 | 0.94 | -30.06 | 61.83 |
| 5 | 12.6 | 0 | 0 | 0.94 | 10.21 | 32.14 |
| 6 | 8.38 | 17.75 | 0 | 0.48 | 22.19 | 14.17 |
| 7 | 13.99 | 23.03 | 0 | 0.94 | -8.72 | 40.75 |
| 8 | 14.61 | 12.64 | 0.07 | 0.69 | -3.57 | 50.55 |
| 9 | 17.90 | 4.11 | 1.31 | 0.94 | -31.06 | 82.78 |
| 10 | 22.46 | 17.34 | 2.64 | 1.64 | 20.54 | 15.35 |
| 11 | 29.65 | 24.0 | 3.68 | 4.66 | -21.46 | 37.37 |
| 12 | 13.33 | 11.20 | 4.20 | 5.53 | 2.99 | 36.73 |
| 13 | 21.27 | 16.82 | 11.89 | 2.07 | 0.38 | 19.54 |
| 14 | 21.56 | 20.02 | 11.48 | 1.252 | 23.23 | -5.55 |
| 15 | 0 | 13.29 | 2.75 | 0.94 | 8.23 | 50.77 |
| 16 | 16.92 | 24.67 | 1.47 | 0.69 | 17.98 | 18.24 |
| 17 | 29.45 | 10.50 | 0.19 | 0.94 | -16.09 | 59.99 |
| 18 | 10.17 | 22.46 | 0 | 0.945 | -0.70 | 55.11 |
| 19 | 12.68 | 0 | 0 | 0.67 | -17.24 | 93.87 |
| 20 | 13.90 | 19.25 | 0 | 0.94 | 13.42 | 39.46 |
| 21 | 17.93 | 10.02 | 0 | 0.69 | 25.73 | 23.61 |
| 22 | 22.17 | 4.99 | 0 | 0.699 | 16.58 | 26.54 |
| 23 | 7.34 | 11.61 | 0 | 0.48 | 0 | 45.5 |
| 24 | 22.48 | 20.52 | 0 | 0.32 | 0 | 12.66 |



- with estimation error compensation", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 173 732–173 754, 2020.
- [9] H. Bakhshi Yamchi, H. Shahsavari, N. T. Kalantari, A. Safari and M. Farrokhifar, "A cost-efficient application of different battery energy storage technologies in microgrids considering load uncertainty", *J. Energy Storage*, vol. 22, pp. 17-26, Apr. 2019.
- [10] M. Faisal, M. A. Hannan, P. J. Ker, M. S. A. Rahman, R. A. Begum and T. M. I. Mahlia, "Particle swarm optimised fuzzy controller for charging–discharging and scheduling of battery energy storage system in MG applications", *Energy Rep.*, vol. 6, pp. 215-228, Dec. 2020.
- [11] M. S. Reza, M. Mannan, S. B. Wali, M. A. Hannan, K. P. Jern, S. A. Rahman, et al., "Energy storage integration towards achieving grid decarbonization: A bibliometric analysis and future directions", *J. Energy Storage*, vol. 41, Sep. 2021.
- [12] E. Borri, A. Tafone, G. Zsembinszki, G. Comodi, A. Romagnoli and L. F. Cabeza, "Recent trends on liquid air energy storage: A bibliometric analysis", *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 8, pp. 2773, Apr. 2020.
- [13] S. B. Wali, M. A. Hannan, M. S. Reza, P. J. Ker, R. A. Begum, M. S. A. Rahman, et al., "Battery storage systems integrated renewable energy sources: A bibliometric analysis towards future directions", *J. Energy Storage*, vol. 35, Mar. 2021.
- [14] A. Q. Al-Shetwi, M. A. Hannan, K. P. Jern, M. Mansur and T. M. I. Mahlia, "Grid-connected renewable energy sources: Review of the recent integration requirements and control methods", *J. Cleaner Prod.*, vol. 253, Apr. 2020.
- [15] M. A. Hannan, M. Faisal, P. Jern Ker, R. A. Begum, Z. Y. Dong and C. Zhang, "Review of optimal methods and algorithms for sizing energy storage systems to achieve decarbonization in microgrid applications", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 131, Oct. 2020.
- [16] V. V. S. N. Murty and A. Kumar, "Multi-objective energy management in microgrids with hybrid energy sources and battery energy storage systems", *Protection Control Mod. Power Syst.*, vol. 5, no. 1, pp. 1-20, 2020.
- [17] X. Wu, S. Qi, Z. Wang, C. Duan, X. Wang and F. Li, "Optimal scheduling for microgrids with hydrogen fueling stations considering uncertainty using data-driven approach", *Appl. Energy*, vol. 253, Nov. 2019.
- [18] A. Mansour-Saatloo et al., "Multi-objective IGDT-based scheduling of low-carbon multi-energy microgrids integrated with hydrogen refueling stations and electric vehicle parking lots", *Sustain. Cities Soc.*, vol. 74, Nov. 2021.
- [19] T. Ding, M. Qu, C. Huang, Z. Wang, P. Du and M. Shahidehpour, "Multi-period active distribution network planning using multi-stage stochastic programming and nested decomposition by SDDIP", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 36, no. 3, pp. 2281-2292, May 2021.
- [20] X. Cao, X. Sun, Z. Xu, B. Zeng and X. Guan, "Hydrogen-based networked microgrids planning through two-stage stochastic programming with mixed-integer conic recourse", *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 19, no. 4, pp. 3672-3685, Oct. 2022.
- [21] Y. Liu, R. Sioshansi and A. J. Conejo, "Multistage stochastic investment planning with multiscale representation of uncertainties and decisions", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 1, pp. 781-791, Jan. 2018.

