بهینه سازی و سرمایه گذاری نصب بهینه باتری ذخیره ساز در ریز شبکه با حضور برنامه های پاسخگویی بار به منظور کاهش هزینه با استفاده از الگوریتم کلونی زنبورها

نوع مطالعه: پژوهشی

صهباالسادات رجامند[1]

[1] گروه مهندسی برق، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران،
srajamand@gmail.com

چکیده:

امروزه ریزشبکه‌ها نقش مهمی در سیستم‌های قدرت دارند. تعادل بار، پایداری ولتاژ و تامین بار مشتریان در مواقع پیک بار از جمله مهم ترین کارهای ریزشبکه است. در کنار مزایا، چالشهای مهم ریز شبکه مخصوصا هزینه آنها نیز باید دیده شود. بکاربردن ذخیره ساز و الگوی پاسخ تقاضا می‌تواند در پایداری بیشتر ولتاژ و کاهش هزینه‌های ریز شبکه نقش مهمی داشته باشد. در این مقاله با تعریف تابع هزینه شامل منابع تجدیدپذیر، ذخیره ساز و پاسخ تقاضا سعی می‌کنیم با استفاده از الگوریتم هوشمند کلونی زنبورها، هزینه ریز شبکه را حداقل کنیم. کاربرد ذخیره ساز، باعث پایداری ولتاژ ریزشبکه می‌شود اما در کنار این مزیت، بایستی بحث طول عمر آن نیز لحاظ گردد که منجر به افزایش هزینه نگه‌داری و تعمیرات می‌شود. به همین دلیل، هزینه مربوط به طول عمر باتری نیز در تابع هزینه آورده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن مکان و ظرفیت بهینه ذخیرسازها و الگوی مناسب پاسخ تقاضا، عملکرد ریزشبکه بهبود می‌یابد و هزینه‌ها نیز کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: ذخیره‌ساز، استهلاک باتری، الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبورها، ریزشبکه، تابع هزینه

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۹/۰۸/۰۹

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۹/۱۲/۱۵

نام نویسنده‌ی مسئول : صهباالسادات رجامند

نشانی نویسنده‌ی مسئول : گروه مهندسی برق، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.1.7.2]

[DOI: 10.52547/ieijqp.10.1.80]

۱. مقدمه

با توجه به گسترش روزافزون ریزشبکه‌ها و تاثیر آن‌ها بر پایداری شبکه قدرت، چالش‌های این سیستم قدرت و نحوه مقابله با آن‌ها مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. از جمله چالش‌ها بحث مشارکت مشتریان در تعادل بار این سیستم است که پاسخ تقاضا نامیده می‌شود. پاسخ تقاضا عبارت است از ایجاد تغییراتی در مصرف توان مشتریان شبکه برق و یا قطع بار آنها در مواقع پیک بار که به منظور تطبیق بهتر تقاضای توان با منبع انرژی انجام می‌پذیرد. با توجه به اینکه در مواقع پیک بار ممکن است ریزشبکه قادر به تامین همه بار نباشد و از طرفی استفاده از حداکثر توان باتری و ذخیره ساز نیز موجب تحمیل هزینه و خرابی باتری می‌شود، بنابراین شبکه های قدرت با استفاده از استراتژی پاسخ تقاضا سعی در تعادل توان شبکه دارند. در بعضی موارد، مشتریان تقاضای توان را با به تعویق انداختن برخی کارهایی که توان الکتریکی بالایی دارند و یا با پرداخت هزینه بیشتر برای مصرفشان، تنظیم می‌کنند. پاسخ تقاضا عمدتا به اصلاح مصرف برق توسط مشتریان نهایی شبکه برق در زمان عدم تعادل سیستم اشاره دارد در حالیکه از ابتدا به منظور پشتیبانی قابلیت اطمینان سیستم قدرت در ساعات پیک بار توسعه یافته است. در بعضی موارد دیگر، با ایجاد طرحی مانند پرداخت مبالغ تشویقی برای القای مصرف کمتر مشتریان در هنگام پیک بار سعی در اجرای الگوی پاسخ تقاضا و تعادل توان شبکه می‌شود [۴-۱]. ذخیره انرژی نیز به عنوان راهکاری مناسب در ریزشبکه به عنوان منبع تولید انرژی در مواقع پیک بار یا کاهش تولید و هم چنین عامل اطمینان بیشتر سیستم تلقی می‌شود. سرمایه گذاری در مبحث ذخیره ساز با توجه به افزایش قابلیت سیستم و اصلاح پروفیل ولتاژ و توان شبکه نه تنها باعث افزایش هزینه نمی شود بلکه در برگشت سرمایه و صرفه جویی در هزینه های دیگر شبکه کمک شایانی می کند. در واقع، انرژی اضافی در سیستم‌های ذخیره، مانند باتری و یا خازنهایی با ظرفیتهای مناسب، ذخیره می‌شود تا در مواقع پیک بار یا در مواقعی که انرژی تولیدی نیروگاه کاهش می‌یابد از آن انرژی ذخیره شده استفاده شود. برخی روشهای ذخیره انرژی، کوتاه مدت بوده و می‌توانند انرژی را برای مدت کمی ذخیره کنند و برخی دیگر از روشهای ذخیره انرژی بلند مدت می‌باشند. به طورکلی مفهوم ریزشبکه و روشهای انرژی تجدیدپذیر با سیستم‌های ذخیره انرژی مرتبط می‌باشند که با ذخیره انرژی در ساعات غیرپیک و استفاده از آن در ساعات پیک بار، باعث افزایش راندمان انرژی می‌شود. اگرچه این روشها به علت مسائل مختلفی مانند شارژ و دشارژ، ایمنی، قابلیت اطمینان، اندازه، هزینه، طول عمر و مدیریتهای کلی با چالشهایی روبه‌رو می‌باشد. بنابراین یک سیستم ذخیره پیشرفته با لحاظ کردن ظرفیت، حفاظت، کنترل، مدیریت انرژی و ویژگی‌هایی برای ارتقای عملکرد سیستم ذخیره انرژی نیاز است [۵]. مزایای دیگر به‌کاربردن ذخیره‌ساز در شبکه قدرت را می‌توان در مواردی مانند منبعی برای تعادل تغییرات منابع انرژی مانند باد یا خورشیدی، حذف پیک یا سطح‌بندی بار و کاهش تغییرات ظرفیت ژنراتور بیان نمود. تکنولوژیهای ذخیره شامل هیدروپمپ هوای فشرده، چرخ گردان (فلای ویل)، خازن‌های بزرگ و انواع باتری‌ها (لیتیوم-یون، سدیم-سولفور) هستند که در ظرفیت انرژی و سرعت شارژ-دشارژ فرق می‌کنند [۸-۶]. مثلا هوای فشرده دارای ظرفیت انرژی بیشتر، اما سرعت شارژ و دشارژ کمتر است. در حالیکه خازن بزرگ، ظرفیت کمتر اما سرعت شارژ-دشارژ بیشتر دارد [۹]. همانطور که اشاره شد در حالت کلی، استفاده از ذخیره ساز نیازمند ایجاد مصالحه یا سازش بین پارامترهایی است که بر روی هزینه کلی سیستم قدرت تاثیر گذار است. از جمله هزینه هایی که ذخیره ساز بر سیستم تحمیل می‌کند می‌توان به هزینه های نصب اولیه، هزینه های سالانه نگهداری و سرویس، هزینه مربوط به استهلاک و جایگزینی تجهیزات و همینطور هزینه های روزانه مختص به شارژ و دشارژ اشاره نمود. بنابراین بسیاری از مقالات در پی کاهش هزینه های مرتبط با ذخیره سازها در جهت کاهش هزینه کلی سیستم هستند [۱۰-۹]. برای مثالی از هزینه باتری، مشخصه باتری لیتیوم-یون که به صورت گسترده در سیستم‌های تجدیدپذیر استفاده می‌شود، دارای ظرفیتی حدود ۱۰ تا ۲۰ کیلووات ساعت می‌باشد. شارژ باتری بین ۶ تا ۷ ساعت برای شروع از ۲۰درصد شارژ تا ۱۰۰ درصد شارژ طول می‌کشد. تعداد سیکل یا دوره این شارژ ۱۰۰۰ دوره است و هزینه این باتری ۸۰۰ دلار برای هر کیلووات ساعت است [۱۱]. مهمترین فاکتور تأثیرگذار بر روی طول عمر این باتریها، سطح شارژ و دشارژ، دما، ولتاژ و زمان است. تعداد دفعات شارژ و دشارژ این باتریها به وضعیت شارژ (SOC) بستگی دارد و طبق رابطه زیر است:

$$L = ۶۹۴(۱-SOC)^{-۰/۷۹۵} \qquad (۱)$$

که L تعداد دفعات شارژ-دشارژ را نشان می‌دهد و رابطه‌ی بالا تعداد دفعات سیکل شارژ-دشارژ را درحالت افزایش یا کاهش خطی محاسبه می‌کند. فاکتور ظرفیت باتری متناسب با دما ، ولتاژ و زمان استفاده است که به صورت زیر می‌باشد [۱۱]:

$$\frac{C(t)}{C_{init}} = ۱ + C_a C_v^{\left(\frac{v-v_۰}{\Delta v}\right)} C_T^{\left(\frac{T-T_۰}{\Delta T}\right)} \sqrt{t}$$

$$V(soc) = -۱/۰۳۱e^{-۲۵soc} + ۳/۶۸۵ + \qquad (۲)$$
$$+۰/۲۱۵۶soc - ۰/۱۱۷۸soc^۲ + ۰/۳۲۰۱soc^۳$$

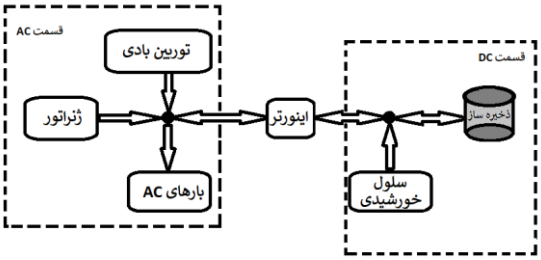
$$T(x,t) = T_{av} + T_{am} \times \exp(-x\sqrt{\frac{\omega}{۲a}})\cos(\omega t$$
$$+۰/۷۷ - x\sqrt{\frac{\omega}{۲a}} + c)$$

که $C(t)$ ظرفیت باتری در طول زمان، C_{init} ظرفیت اولیه، C_a ثابت زمانی ظرفیتی، C_v ثابت ولتاژی ظرفیتی، C_T ثابت دمایی ظرفیتی، ω فرکانس شارژ-دشارژ و T دمای اندازه‌گیری است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.1.7.2]
[DOI: 10.52547/ieijqp.10.1.80]

جدا از بحث عمر و خرابی باتری در ذخیره سازها، بحث مکان و ظرفیت بهنیه آنها درمدل ریزشبکه بسیار حایز اهمیت است و در مقالات زیادی مورد مطالعه بوده است [۱۲]. تعداد زیاد ذخیره ساز قطعا هزینه را افزایش می‌دهد و تعداد کم آنها نیز ممکن است عملکرد بهینه نداشته باشد. همچنین تعیین ظرفیت ذخیره ساز مهم و حیاتی می‌باشد چون ذخیره ساز بزرگ دارای هزینه سرمایه گذاری و تعمیرات بیشتر است. بنابراین مصالحه در این بخش از مساله نیز چالش مهمی دارد.

علاوه بر بحث پاسخ تقاضا و ذخیره سازها، بحث منابع تولید انرژی برنامه پذیر یا غیر برنامه پذیر نیز در بازدهی و هزینه سیستم موثر است. توضیح آنکه در یک ریزشبکه، منابع برنامه‌پذیر را می‌توان متناسب با تقاضا برنامه‌ریزی کرد اما منابع غیر قابل پیش بینی مثل انرژی بادی و خورشیدی باید با در نظر گرفتن عدم قطعیت، در کاهش هزینه سیستم، کمک شایانی انجام دهند. در واقع، منابع خورشیدی و بادی با توجه به شرایط محیطی و آب و هوایی به شدت تغییر می‌کنند و دارای ماهیت تصادفی هستند. بنابراین لزوم مدلسازی این منابع بر پایه مدل‌های آماری اجتناب ناپذیر است [۱۸-۱۳]. در شکل ۱، بلوک دیاگرام شامل منابع مختلف در ریز شبکه نشان داده شده است.



شکل ۱: بلوک دیاگرام شامل منابع مختلف در ریز شبکه

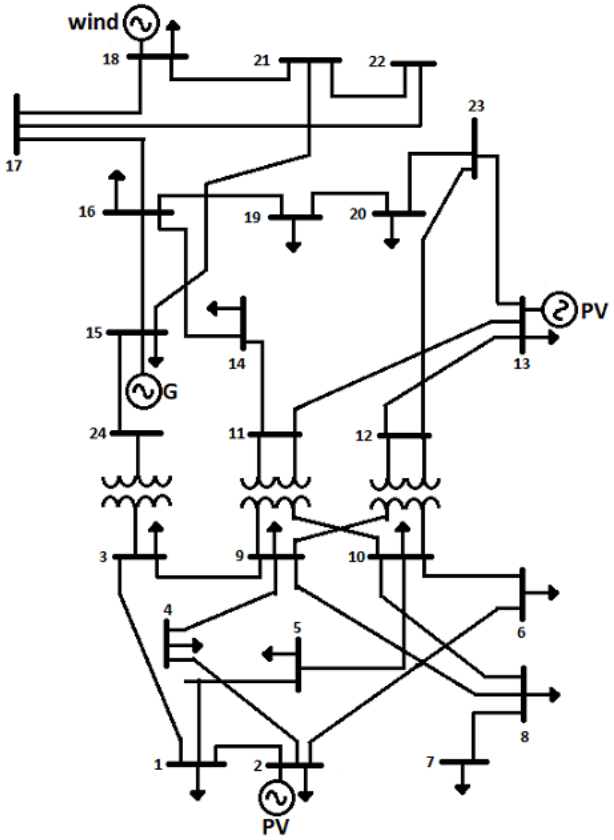
در این مقاله در پی آنیم که با در نظر گرفتن موارد بالا یعنی پاسخ تقاضا، ذخیره ساز و هزینه خرابی باتری، و تولید انرژی منابع غیرقابل برنامه-ریزی مثل انرژی خورشیدی و بادی، تابع بهینه سازی را در جهت کاهش هزینه‌ها تشکیل داده و با الگوریتم هوشمند کلونی زنبورها، آن را بهینه سازیم. بسیاری از مقالات از روش‌های هوشمند برای یافتن نقاط بهینه ذخیره‌سازها و منابع تجدیدپذیر استفاده کرده‌اند چون روشهای مرسوم مثل گرادیان، با توجه به پیچیدگی و چندمتغیره بودن مساله، موثر نیستند [۲۴-۱۹]. با استفاده از الگوریتم کلونی زنبورها، مکان اعمال ذخیره سازها در شبکه قدرت و نیز پاسخ تقاضا به عنوان نتایج این تحقیق بدست می‌آید. در انتها با توجه به بهینه سازی مکان و ظرفیت ذخیره سازها و توان بهینه پاسخ تقاضا، هزینه سیستم در حالت کلی کاهش یافته و عملکرد ریزشبکه بهبود می‌یابد. نوآوری این مقاله شامل:

- اعمال پاسخ تقاضا در تابع هزینه و بهینه‌سازی
- اعمال سیستم ذخیره، بهینه سازی مکان و ظرفیت و تحلیل تابع بهینه‌سازی
- درنظر گرفتن عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر خورشیدی و بادی

می‌باشد. ادامه این مقاله به این ترتیب است. در بخش ۲ مدل سیستم شبکه قدرت، در بخش ۳ تابع هدف، در بخش ۴ الگوریتم پیشنهادی و بهینه‌سازی، در بخش ۵ نتایج شبیه سازی و در انتها در بخش ۶ نتیجه-گیری مقاله بیان می شود.

۲. مدل شبکه قدرت

در این بخش، مدل ریزشبکه شامل منابع انرژی ثابت و تصادفی و باس‌ها در شکل ۲ نمایش داده شده است. از مدل ۲۴-باسه برای ریز شبکه استفاده شده است. هم چنین ریز شبکه دارای دیزل ژنراتور به عنوان منبع ثابت و منابع خورشیدی و بادی به عنوان منابع تجدیدپذیر می-باشد. ذخیره سازها نیز برای بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش هزینه در نظر گرفته شده است.



شکل ۲: مدل ۲۴-باسه ریزشبکه مفروض

۳. تابع هدف

در این بخش تابع بهینه سازی برای کاهش هزینه پیشنهاد می‌شود که در زیر آمده است:

$$f_{day}(ct)=\sum_{i=1}^{h}\{(p_G\times S_G+p_{ESS}\times S_{ESS}+p_{PV}\times S_{pv}+p_{WT}\times S_{WT}+P_{DR}\times S_{DR})\Delta t_i+C_{wear}\times S_{wear}\} \quad (۳)$$

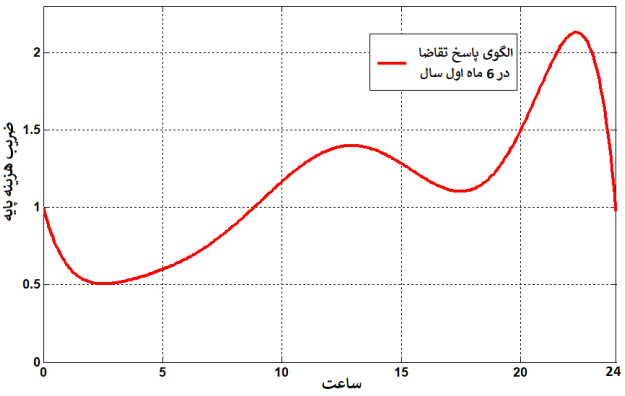
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.1.7.2]
[DOI: 10.52547/ieijqp.10.1.80]

در این تابع p_G توان ژنراتور، p_{ESS} توان ذخیره‌ساز، p_{PV} توان خورشیدی، p_{WT} توان بادی و P_{DR} توان پاسخ تقاضا هستند. هم‌چنین پارامترهای S_G، S_{ESS}، S_{pv}، S_{WT}، S_{DR} و S_{wear} به ترتیب هزینه ژنراتور، هزینه ذخیره‌ساز، هزینه خورشیدی، هزینه بادی، هزینه پاسخ تقاضا و هزینه استهلاک و نگهداری باتری بر حسب $\frac{\$}{kwh}$ هستند.

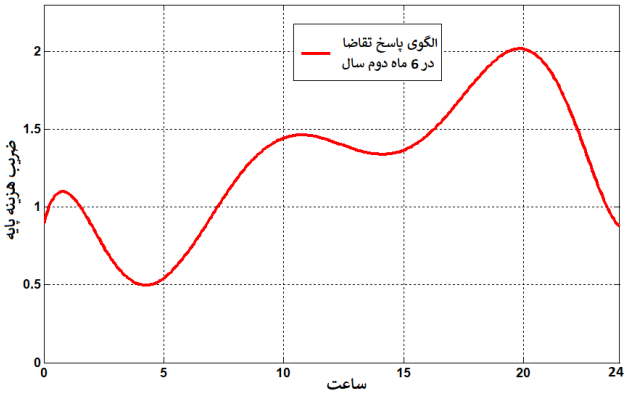
Δt_i بازه‌های زمانی در طی یک شبانه‌روز را نشان می‌دهد که معمولا گام‌های زمانی ۲ یا ۳ ساعته انتخاب می‌شود. h تعداد گام زمانی، ct هزینه و $f_{day}(ct)$ تابع هزینه روزانه را نشان می‌دهد. برای محاسبه هزینه سالیانه بایستی تابع بالا را بر روی تعداد روز سال که ۳۶۵ روز است جمع ببندیم و داریم:

$$f_{year}(ct)=\sum_{i=1}^{365} f_{day,i}(ct) \qquad (۴)$$

در واقع استراتژی این مساله این است که در مواقع پیک بار، اگر تقاضای بار مشتریان افزایش یابد، هزینه‌ای بر شبکه تحمیل شده و جریمه‌ای شامل مشتری می‌شود. DR به عنوان پاسخ تقاضا، ESS که نماینده ذخیره سازی و C_{wear} هزینه استهلاک باتری است. برای هزینه پاسخ تقاضا تابعی را در نظر میگیریم که در مواقع پیک بار باید هزینه پرداختی یا جریمه مشتری بیشتر و در مواقع غیر پیک، بسیار کمتر است. الگوی شکل ۳ را برای پاسخ تقاضا در نظر می گیریم. ذکر این نکته مهم است که با توجه به تغییر الگوی پیک بار، دو تابع یکی برای نیمه اول سال و دیگری برای نیمه دوم سال در نظر می گیریم که در شکل زیر نمایش داده شده است. در این شکل‌ها مشخص است که در مواقع پیک بار، ضریب هزینه مصرف مشتری چندبرابر شده و در مواقع کم‌باری، این ضریب کاهش می‌یابد.



(الف)



(ب)

شکل ۳: الگوی پاسخ تقاضا و پیک بار الف) برای نیمه اول سال ب) برای نیمه دوم سال

هزینه ذخیره‌سازی، هزینه مرتبط با پیاده سازی ذخیره ساز و شارژ-دشارژ آنهاست. هزینه استهلاک و خرابی باتری نیز مرتبط با تعمیر و نگهداری ذخیره ساز باتری است. در رابطه با هزینه استهلاک باتری می-توان گفت که طول عمر باتری به‌شدت وابسته به چگونگی کارکرد آن است و تابعی از توان شارژ-دشارژ و وضعیت شارژ می‌باشد.

نکته شایان ذکر اینست که در رابطه (۳) به دنبال حداقل کردن تابع هزینه روزانه یا سالیانه هستیم و همه متغیرها یا پارامترها قطعی هستند و تنها مولفه تصادفی و غیر قطعی تولید انرژی خورشیدی و بادی است که با توجه به پارامترهایی مثل دما، رطوبت، تابش خورشید و سرعت باد در روزهای مختلف متغیر است. معمولا دو رویکرد برای برخورد با این پدیده تصادفی در نظر گرفته می‌شود. اول اینکه با استفاده از مدلسازی تصادفی و استفاده از الگوریتم هوشمند، پیش بینی توان خورشیدی و بادی در روزهای مختلف انجام می‌گیرد. برای این کار نیاز به پایگاه داده دقیق و به روز است و پیچیدگی نسبتا زیادی دارد. در روش دوم که پیچیدگی محاسباتی کمتری دارد یک مقدار میانگین توان خورشیدی و بادی در نظر گرفته می‌شود و با در نظر گرفتن توزیع احتمال نرمال، چندین واریانس برای این توان در قالب چندین سناریو فرض می‌شود و با استفاده از حالات مختلف مونت کارلو در تابع بهینه سازی اعمال می-شود. برای تولید انرژی خورشیدی و بادی باتوجه به عدم قطعیت مساله می توان تابع توزیع نرمال در نظر گرفت که در واقع داریم:

$$f_{PV}(P)=\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{PV}^2}}\exp\left(-\left(P-P_{PV,avg}\right)^2/2\sigma_{PV}^2\right) \qquad (۵)$$

که $P_{PV,avg}$ مقدار توان متوسط تولیدی خورشیدی و σ_{PV}^2 واریانس این توان از مقدار میانگین است. برای توان بادی نیز به صورت مشابه داریم:

$$f_{WT}(P)=\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{WT}^2}}\exp\left(-\left(P-P_{WT,avg}\right)^2/2\sigma_{WT}^2\right) \qquad (۶)$$

که $P_{WT,avg}$ مقدار توان متوسط تولیدی خورشیدی و σ_{WT}^2 واریانس این توان از مقدار میانگین است. با افزایش و کاهش واریانس توان‌های

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.1.7.2]
[DOI: 10.52547/ieijqp.10.1.80]

بادی وخورشیدی، تابع هزینه در رابطه (۳) تغییر می‌کند و نقطه بهینه در هر حالت محاسبه می‌شود. قطعا برای بهینه سازی تابع هدف رابطه (۳)، مجموعه‌ای از قیدها و شرایط داریم که در زیر آمده است:

$$\sum_{i=1}^{H}\left\{\sum_{j=1}^{M} P_{load,j,NDR}(t) + P_{wear}(t)\right\} = \sum_{i=1}^{H}\left\{\sum_{j=1}^{M} P_{G,i}(t)\, U_i(t) + \sum_{n=1}^{N} P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_{ESS}(t)\right\} \quad (۷)$$

این قید بیان می‌کند که توان بار مصرفی بایستی از مجموع توان خورشیدی و بادی و ذخیره ساز و توان پاسخ تقاضا کمتر باشد که تعادل توان انجام شود. در واقع این رابطه، رابطه اصلی تعادل بار در سیستم است. برای جلوگیری از شارژ و دشارژ همزمان باتری، دو محدوده را باید به صورت زیر در نظر بگیریم:

$$P_{min,i}(t) \le P_i(t) \le P_{max,i}(t) \quad (۸)$$

$$P_{Charge} \le \gamma CP_{bat} \quad (۹)$$

$$P_{Discharge} \le (۱-\gamma) CP_{bat} \quad (۱۰)$$

که CP نشان دهنده ظرفیت باتری است و γ متغیر باینری شامل ۰ و ۱ است. دو قید بالا در واقع نشان‌دهنده غیر همزمانی شارژ و دشارژ باتری است و در هنگام شارژ، باتری نمی‌تواند دشارژ شود و برعکس. برای محدوده ظرفیت باتری نیز داریم:

$$CP_{bat,\min} \le CP_{bat} \le CP_{bat,\max} \quad (۱۱)$$

محدودیت دیگر ذخیره‌سازها بحث وضعیت شارژ است. وضعیت شارژ یک باتری، انرژی موجود به‌عنوان درصدی از ظرفیت نامی آن است. برای افزایش عمر باتری از دشارژ کامل یا فراشارژ کامل بایستی جلوگیری شود و بنابراین وضعیت شارژ معمولا در یک محدودی مناسب باید قرار گیرد:

$$۲۰\%CP_{bat} \le SOC_{bat} \le ۹۰\%CP_{bat} \quad (۱۲)$$

دیگر قیدهای مساله در ارتباط با محدوده توان منابع تجدیدپذیر، ذخیره ساز و پاسخ تقاضا در زیر آمده است:

$$\begin{aligned} &P_{WT,\min} \le P_{WT} \le P_{WT,\max} \\ &P_{PV,\min} \le P_{PV} \le P_{PV,\max} \\ &P_{ESS,\min} \le P_{ESS} \le P_{ESS,\max} \\ &P_{DR} \le P_{DR,\max} \end{aligned} \quad (۱۳)$$

بنابراین با یک تابع هدف چند متغیره چند قیده مواجه هستیم که بهینه سازی آن با توجه به پیچیدگی مساله بایستی از طریق الگوریتم‌های تکاملی و هوشمند انجام گیرد.

۴. الگوریتم پیشنهادی و بهینه‌سازی

در این بخش سعی بر آنست که از الگوریتم هوشمند کلونی زنبورها برای رسیدن به نقطه بهینه تابع هدف استفاده کنیم. با توجه به اینکه مساله تعریف شده یک تابع تک هدفه با هدف حداقل سازی تابع هزینه اما با چند متغیرو چندین قید یا محدودیت است، استفاده از روش مرسوم گرادیان در اینجا مفید نیست و بنابراین از الگوریتم‌های هوشمند استفاده می‌کنیم. الگوریتم‌های هوشمند با در نظر گرفتن جمعیت شامل متغیرهای مساله و بررسی قید بهینه‌سازی و همچنین با استفاده از تکرارهای متعدد، سعی در رسیدن به هدف بهینه دارند. الگوریتم کلونی زنبورها یکی از قوی‌ترین ابزارها در راستای این هدف است و از ایده هوشمندی زنبورها در رسیدن به هدف (غذا) در کوتاهترین مسیر (هزینه کمتر) استفاده می‌کند. در واقع زنبورها همان متغیرهای مساله و کوتاهترین مسیر، همان کمترین هزینه در مساله ریز شبکه مطرح شده است. در ابتدا جایابی غذا به صورت مقادیر تصادفی و اولیه تعریف می‌شود:

$$X_{ij} = X_{j,min} + rand \times \left(X_{j,max} - X_{j,min}\right), \quad i = 1,2,\dots NFS \quad j = 1,2,\dots J \quad (۱۴)$$

که X_{ij} جمعیت iام در بردار jام است و پارامتر NFS که نشان دهنده تعداد غذا است برابر ۵۰ فرض می‌شود.

$$X_{j,ne}^{iter+1} = X_{j,ne}^{iter+1} + sign \times \left[c_1.rand.\left(pbest_{j,ne} - X_{j,ne}^{iter}\right) + c_2.rand.\left(gbest_j - X_{j,ne}^{iter}\right)\right] \quad (۱۵)$$

که $pbest$ بهترین موقعیت فعلی و $gbest$ بهترین موقعیت کلی است.

$$c_1 = \left(c_{1f} - c_{1i}\right) \times \frac{iter}{iter_{max}} + c_{1i} \;, c_2 = \left(c_{2f} - c_{2i}\right) \times \frac{iter}{iter_{max}} + c_{2i} \quad (۱۶)$$

که نحوه بروزرسانی ضرایب مساله است. برای بیشتر کردن گستره جستجو در الگوریتم، رابطه زیر را در هر تکرار می‌توان نوشت:

$$Prob\left(X_{j,ne}^{iter}\right) = \frac{\frac{1}{Fitness(X_{j,ne}^{iter})}}{\sum_{ne=1}^{NFS}\frac{1}{Fitness(X_{j,ne}^{iter})}} \quad (۱۷)$$

$$X_{j,no}^{iter} = X_{j,no}^{iter} + sign \times \left(c_1.rand.\left(X_{j,ne}^{iter} - X_{j,no}^{iter}\right)\right) \quad (۱۸)$$

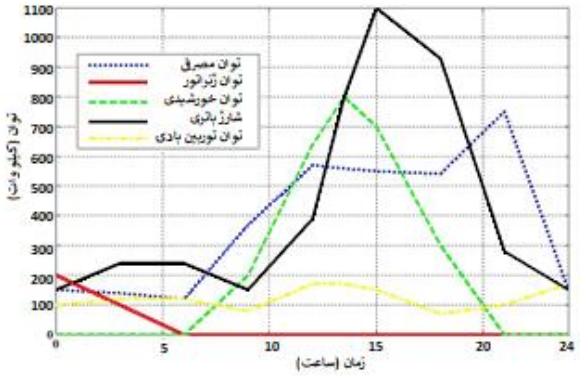
که ne تعداد زنبورهای بکار گرفته‌شده‌است و $Prob()$ بردار شامل بهترین مقادیر تابع شایستگی است. در ادامه فلوچارت این الگوریتم در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود با توجه به عدم قطعیت تولید انرژی خورشیدی و بادی، از روش مونت کارلو برای در نظر گرفتن مقادیر متفاوت واریانس استفاده شده و هر بار تابع بهینه سازی طی تکرارهای مختلف اجرا می شود. در واقع سناریوهای مختلف بر اساس میانگین و واریانس احتمالاتی تولید انرژی خورشیدی و بادی به کمک روش مونت کارلو فرض شده و الگوریتم برای هر کد اجرا می شود. بعد از رسیدن به نقطه همگرایی، قیدها و شرط‌های مساله بررسی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.1.7.2]
[DOI: 10.52547/ieijqp.10.1.80]

می شود و در صورت تایید، الگوریتم به جواب بهینه می‌رسد. در غیر اینصورت دوباره به ابتدای روش مونت کارلو برگشته و حالت دیگری انتخاب شده و وارد فرایند بهینه سازی می‌شود.

۵. نتایج شبیه‌سازی و بحث

در این بخش نتایج شبیه‌سازی ارایه شده است. در واقع عملکرد الگوریتم پیشنهادی و تاثیر آن بر هزینه سیستم در مقایسه با حالات و روش‌های دیگر بیان شده است. در شبیه‌سازی‌ها، برای ذخیره‌ساز لیتیوم-یون با بازدهی $\eta_c \cdot \eta_d = ۰/۸۵$، پارامترهای هزینه‌ی ظرفیت $۶۰۰ \ \$/kwh$ و هزینه توان $۴۰۰ \ \$/kw$ در نظر گرفته شده است. هم‌چنین دیاگرام توان-های تولیدی و بار حاصل از شبیه‌سازی در طول یک شبانه‌روز در شکل ۵ نمایش داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود در برخی ساعات با استفاده از توان ذخیره شده در باتری، بارهای ریزشبکه به‌خوبی پوشش داده شده است که منجر به کاهش هزینه می‌شود.



شکل ۵: دیاگرام توان‌های تولیدی و بار در ریزشبکه پیشنهادی

در جدول ۱، میزان بهینه توان مرتبط با ذخیره ساز، سلول خورشیدی، توربین بادی، ژنراتور و پاسخ تقاضا ارایه شده است. این مقادیر با توجه به همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی به‌دست آمده‌اند.

جدول ۱: توان المان‌های مساله پیشنهادی

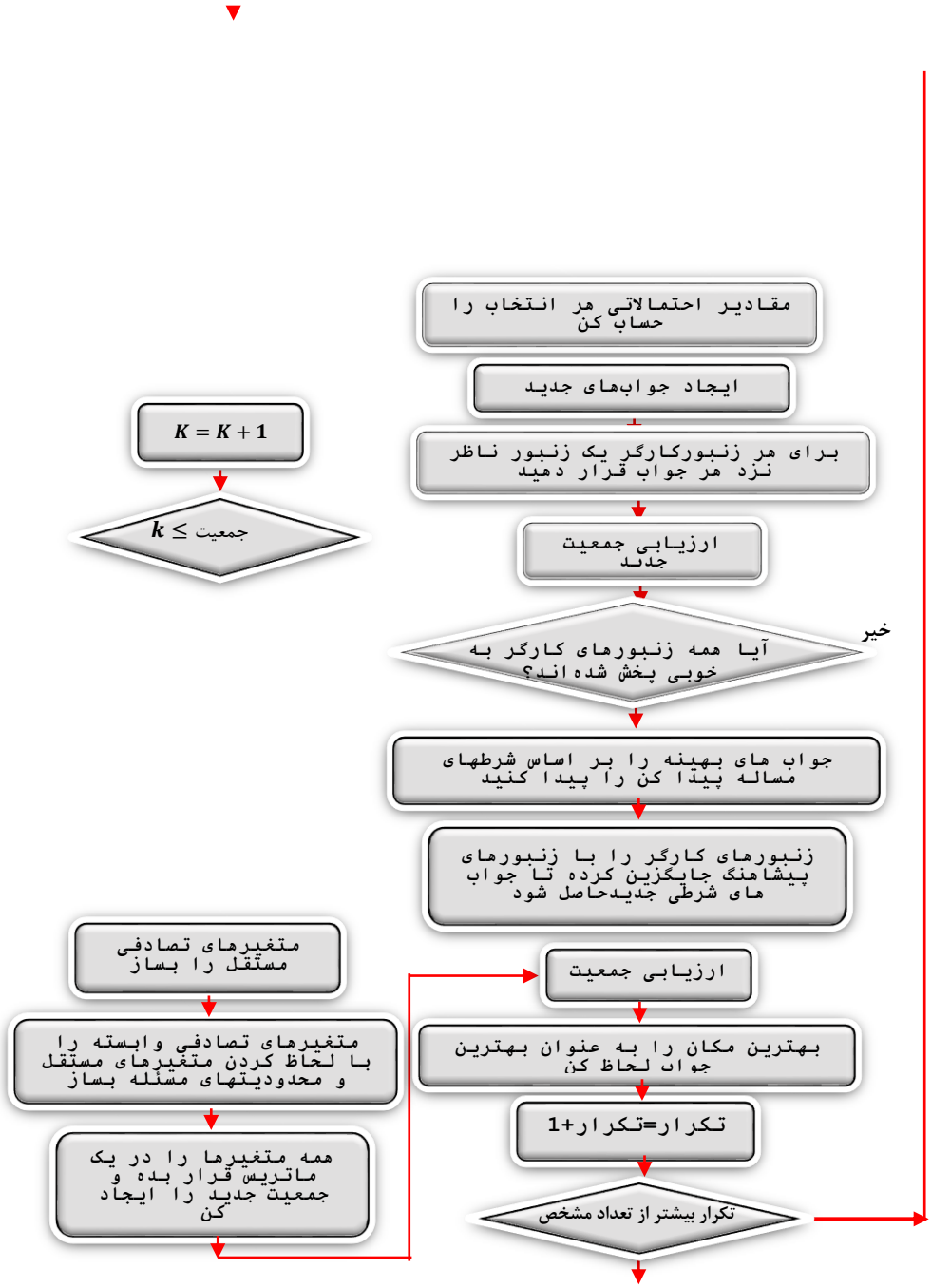
المان	توان در طول سال (مگاوات)
ذخیره ساز	۱۶۵
ژنراتور	۴۳
سلول خورشیدی	۸۵۶
توربین بادی	۱۲۴
پاسخ تقاضا	۵۲

هزینه سیستم ریزشبکه در حالت های مختلف در یک سال در جدول ۲ توصیف شده است. دیده می‌شود که هزینه کلی ریزشبکه با اعمال الگوی پاسخ تقاضا و ذخیره‌ساز به طور قابل توجهی کاهش یافته است.

جدول ۲: هزینه سیستم

حالت مفروض	هزینه (میلیون دلار/سال)
ریزشبکه با سلول خورشیدی و توربین بادی	۱۵/۰۵
ریزشبکه با سلول خورشیدی، توربین بادی، ذخیره ساز و پاسخ تقاضا	۱۳/۴۰

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.1.7.2]
[DOI: 10.52547/ieijqp.10.1.80]



شکل ۴: فلوچارت الگوریتم کلونی زنبورها

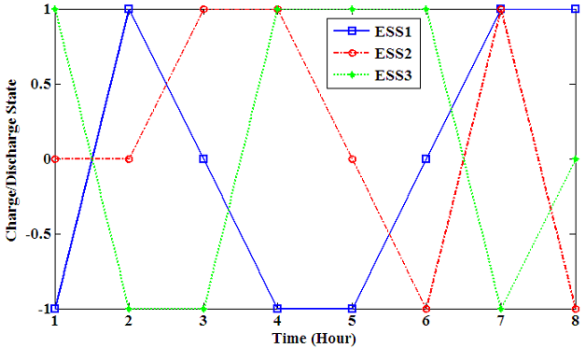
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.1.7.2]
[DOI: 10.52547/ieijqp.10.1.80]

در ادامه به بیان باسهای بهینه برای نصب ذخیره ساز می‌پردازیم. در جدول ۳ مکان و ظرفیت بهینه باتری ذخیره ساز نمایش داده شده است. در شبیه‌سازی قید اعمال ۳ ذخیره‌ساز اعمال شده و الگوریتم کلونی زنبور، ظرفیت و مکان بهینه نصب ذخیره‌ساز را طبق جدول ۳ بیان کرده است. با توجه به جدول مشاهده می‌شود که ذخیره‌ساز طوری انتخاب شده که بتواند پوشش و تامین مناسبی در مواقع حساس و پیک بار برای بار مشتریان داشته باشد.

جدول ۳: ظرفیت و مکان بهینه نصب ذخیره‌ساز

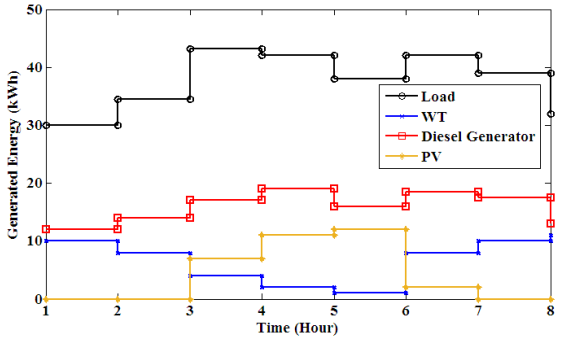
باس	ظرفیت (مگا وات ساعت)	شماره ذخیره ساز	توان (مگاوات)
۳	۸۰	ESS_1	۴۵
۱۰	۴۰	ESS_2	۲۰
۱۹	۴۵	ESS_3	۲۰

الگوی شارژ-دشارژ ذخیره‌سازها در بازه‌های زمانی روزانه در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به جدول قبل، سه ذخیره‌ساز برای تعادل بار و هزینه ریزشبکه انتخاب شده است. بازه‌های زمانی، ۳ ساعته انتخاب شده است (۱ به معنی دشارژ، ۱- به معنی شارژ و ۰ نه شارژ و نه دشارژ است).

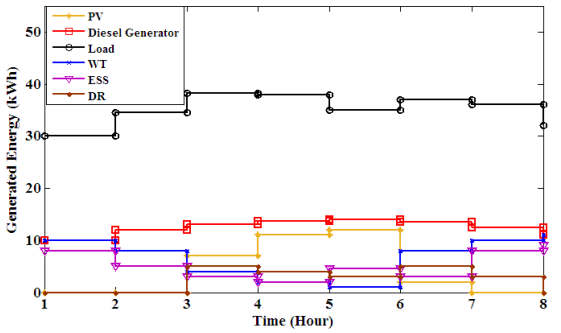


شکل ۶: دیاگرام الگوی شارژ-دشارژ باتری‌ها

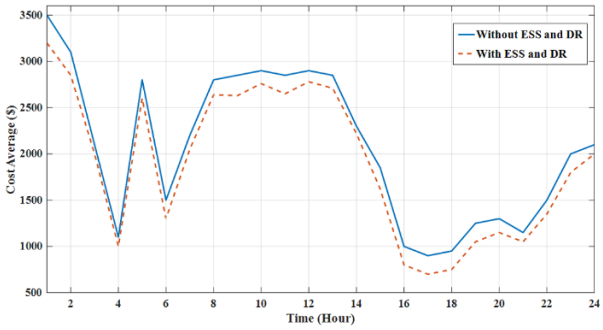
در شکل‌های ۷ و ۸، تحلیل انرژی تولید شده در دو حالت بدون استفاده از سیستم ذخیره ساز و پاسخ تقاضا و با استفاده از این دو المان و فاکتور را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در حالت سیستم دارای ذخیره ساز و کاهش بار، انرژی تولید شده بسیار کاهش می‌یابد و در مقابل در شکل ۷، با توجه به نبود باتری و پاسخ تقاضا، انرژی تولیدی بیشتر شده و بنابراین هزینه‌ها نیز افزایش می‌یابد. همچنین در شکل ۹، هزینه متوسط در دو حالت استفاده از ذخیره‌ساز و پاسخ تقاضا و بدون استفاده از آنها نشان داده‌شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود هزینه شبکه با استفاده از ذخیره‌ساز بهینه و پاسخ تقاضای بهینه، کاهش یافته است. در ادامه در جدول ۴، تاثیر واریانس توان تولیدی خورشیدی و بادی بر هزینه کلی ریزشبکه را بررسی کرده‌ایم. با افزایش واریانس ممکن است هزینه تولید توان خورشیدی کمتر باشد، اما هزینه ذخیره ساز و یا بار پاسخ تقاضا بیشتر شده و اثر منفی بر هزینه کلی سیستم دارد.



شکل ۷: انرژی تولیدی و بار در سیستم بدون ذخیره ساز و پاسخ تقاضا



شکل ۸: انرژی تولیدی و بار در سیستم با ذخیره ساز و پاسخ تقاضا



شکل ۹: مقایسه هزینه متوسط سیستم با ذخیره ساز و پاسخ تقاضا و بدون آن

جدول۴: اثر واریانس توان خورشیدی-بادی بر هزینه سیستم

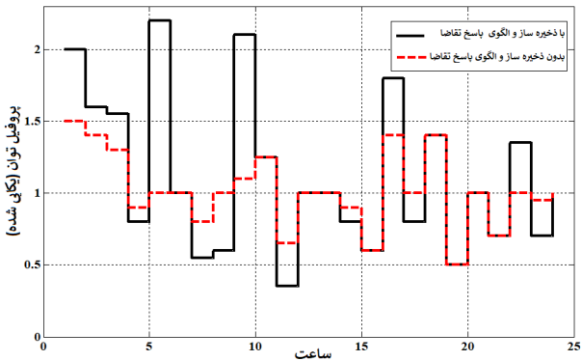
واریانس	هزینه توان خورشیدی (هزاردلار در سال)	هزینه کلی ریزشبکه (هزاردلار در سال)
۰.۰۱	۱۱۰۰	۳۵۰۰
۰.۰۵	۱۰۰۰	۳۶۷۰
۰.۱	۹۵۰	۳۸۰۰

در انتها، پروفیل توان با اعمال روش پیشنهادی و درنظر گرفتن ذخیره ساز و پاسخ تقاضا در مقایسه با نبود این المان ها در شکل ۱۰ مقایسه شده است. می‌بینیم که تغییرات توان در حالت اعمال ذخیره‌ساز و الگوی پاسخ تقاضا کمتر بوده و پایداری توان ریزشبکه بیشتر است. در واقع نوسانات توان با استفاده از پایداری ناشی از ذخیره‌ساز، به وضوح بیشتر شده و این کار باعث افزایش قابلیت اطمینان سیستم و پایداری بیشتر توان شده است.

۶. نتیجه‌گیری

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.1.7.2]
[DOI: 10.52547/ieijqp.10.1.80]

در این مقاله با در نظر گرفتن منابع انرژی تجدیدپذیر و اعمال ذخیره ساز و الگوی پاسخ تقاضای مشتریان، نشان داده شد که هزینه‌های کلی ریزشبکه کاهش می‌یابد. توضیح بیشتر آنکه اگر صرفا منابع تامین توان ثابت و تجدیدپذیر در ریزشبکه استفاده شود، تامین بار در مواقع حساس و پیک بار غیرممکن شده و یا در صورت امکان، منجر به هزینه‌های زیادی خواهد شد. استفاده از ذخیره ساز اگرچه سرمایه گذاری اولیه نیاز دارد اما در مدت طولانی و بازه یک ساله منجر به کاهش هزینه‌ها می‌شود. هم‌چنین با اطلاع مشتریان از الگوی پاسخ تقاضای ریزشبکه و کاهش بار مصرفی در زمان های پیک و انتقال بار خود به مواقع کم باری، هزینه ریزشبکه به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد همانطور که در نتایج شبیه سازی این مقاله بیان شد.



شکل ۱۰: پروفیل توان با و بدون اعمال روش پیشنهادی

مراجع

[1] Wang, Y.; Huang, Y.; Wang, Y.; Yu, H.; Li, R.; Song, S. Energy Management for Smart Multi-Energy Complementary Micro-Grid in the Presence of Demand Response. *Energies* 2018, *11*, 974.

[2] Nojavan, Sayyad, Majidi, Majid, Esfetanaj, Naser Nourani, "An efficient cost-reliability optimization model for optimal siting and sizing of energy storage system in a microgrid in the presence of responsible load management," Energy, Vol. 139, pp. 89-97, 2017.

[3] H. Ardeshiri, S. M. Barakati and K. Ranjbar, "Using improved time of use demand response in optimal operation of microgrid," 20th Conference on Electrical Power Distribution Networks Conference (EPDC), Zahedan, 2015, pp. 117-122.

[4] JING, Zhaoxia, ZHU, Jisong, HU, Rongxing, 2018, "Sizing optimization for island microgrid with pumped storage system considering demand response", Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 791 – 801, vol. 6, IS - 4.

[5] Fady Y. Melhem. "Optimization methods and energy management in smart grids", Electric power. Université Bourgogne Franche-Comté, 2018. English. NNT: 2018UBFCA014.

[6] M. R. Djalal, M. Yunus, A. Imran, H. Setiadi, "Capacitive energy storage (CES) optimization for load frequency control in micro hydro power plant using imperialist competitive algorithm (ICA)," Int J Eng Technol, vol. 5, no. 2, pp. 279-297, 2018.

[7] M. Saffari, A. de Gracia, C. Fernandez, M. Belusko, D. Boer, L. F. Cabeza, "Optimized demand side management (DSM) of peak electricity demand by coupling low temperature thermal energy storage (TES) and solar PV," Appl Energy, vol. 211, pp. 604-616, 2018.

[8] J. Hu, M. Sarker, J. Wang, F. Wen, W. Liu, "Provision of flexible ramping product by battery energy storage in day-ahead energy and reserve markets," IET Gen Trans Dist., vol. 12 , Iss. 10, pp. 2256 – 2264, 2018.

[9] M. Faisal, M. A. Hannan, P. J. Ker, A. Hussain, M. B. Mansor and F. Blaabjerg, "Review of Energy Storage System Technologies in Microgrid Applications: Issues and Challenges," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 35143-35164, 2018.

[10] M. Brenna, F. Foiadelli, M. Longo and D. Zaninelli, "Energy Storage Control for Dispatching Photovoltaic Power," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 9, no. 4, pp. 2419-2428, 2018.

[11] Zhang, R.; Xia, B.; Li, B.; Cao, L.; Lai, Y.; Zheng, W.; Wang, H.; Wang, W. State of the Art of Lithium-Ion Battery SOC Estimation for Electrical Vehicles. Energies 2018, 11, 1820.

[12] Sufyan M, Abd Rahim N, Tan C, Muhammad MA, Sheikh Raihan SR (2019) Optimal sizing and energy scheduling of isolated microgrid considering the battery lifetime degradation. PLoS ONE 14(2): e0211642.

[13] H. Bludszuweit and J. A. Dominguez-Navarro, "A probabilistic method for energy storage sizing based on wind power forecast uncertainty," IEEE Trans. Power Syst., vol. 26, no. 3, pp. 1651–1658, 2011.

[14] Y. M. Atwa and E. F. El-Saadany, "Optimal allocation of ESS in distribution systems with a high penetration of wind energy," IEEE Trans. Power Syst., vol. 25, no. 4, 2010.

[15] A. S. A. Awad, T. H. M. El-Fouly, and M. M. A. Salama, "Optimal ESS allocation and load shedding for improving distribution system reliability," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 5, Iss. 5, pp. 2339 – 2349, 2014.

[16] A. S. A. Awad, T. H. M. EL-Fouly and M. M. A. Salama, "Optimal ESS Allocation for Load Management Application," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 30, no. 1, pp. 327-336, 2015.

[17] El-Bidairi, Kutaiba S., Nguyen, Hung Duc, Mahmoud, Thair S., Jayasinghe, S.D.G., Guerrero, Josep M. "Optimal sizing of Battery Energy Storage Systems for dynamic frequency control in an islanded microgrid: A case study of Flinders Island, Australia," Energy, vol. 195, SP. 117059, 2020.

[18] M. Sedighizadeh, M. Esmaili, S. M. Mousavi-Taghiabadi, "Optimal joint energy and reserve scheduling considering frequency dynamics, compressed air energy storage, and wind turbines in an electrical power system", Journal of Energy Storage, vol. 23, pp. 220-233, 2019.

[19] C. Abbey and G. Joos, "A stochastic optimization approach to rating of energy storage systems in wind-diesel isolated grids," IEEE Trans. Power Syst., vol. 24, no. 1, pp. 418–426, 2009.

[20] S. X. Chen, H. B. Gooi, and M. Q. Wang, "Sizing of energy storage for microgrids," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 3, no. 1, 2012.

[21] W. Yu, D. Liu, Y. Huang, "Operation Optimization Based on the Power Supply and Storage Capacity of an Active Distribution Network", Energies, vol. 6, pp. 6423-6438, 2013.

[22] W. Shi, X. Xie, C. Chu, R. Gadh, "Distributed optimal energy management in microgrids," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 6, pp. 1137-1146, 2015.

[23] Angenendt, Georg, Zurmühlen, Sebastian, Figgener, Jan, Kairies, Kai-Philipp, Sauer, Dirk Uwe, "Providing frequency control reserve with photovoltaic battery energy storage systems and power-to-heat coupling," Energy, vol. 194, 116923, 2020.

[24] R. Hemmati, S. M. S. Ghiasi, A. Entezariharsini, "Power fluctuation smoothing and loss reduction in grid integrated with thermal-wind-solar-storage units", Energy, vol. 152, no. 1, pp. 759-769, 2018.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.1.7.2]
[DOI: 10.52547/ieijqp.10.1.80]