

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

صهبالسادات رجامند^۱

^۱ گروه مهندسی برق، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران،

srajamand@gmail.com

چکیده:

امروزه ریز شبکه ها نقش مهمی در سیستم های قدرت دارند. تعادل بار، پایداری ولتاژ و تامین بار مشتریان در مواقع پیک بار از جمله مهم ترین کارهای ریز شبکه است. در کنار مزایا، چالش های مهم ریز شبکه مخصوصا هزینه آنها نیز باید دیده شود. بکار بردن ذخیره ساز و الگوی پاسخ تقاضا می تواند در پایداری بیشتر ولتاژ و کاهش هزینه های ریز شبکه نقش مهمی داشته باشد. در این مقاله با تعریف تابع هزینه شامل منابع تجدید پذیر، ذخیره ساز و پاسخ تقاضا سعی می کنیم با استفاده از الگوریتم هوشمند کلونی زنبورها، هزینه ریز شبکه را حداقل کنیم. کاربرد ذخیره ساز، باعث پایداری ولتاژ ریز شبکه می شود اما در کنار این مزیت، بایستی بحث طول عمر آن نیز لحاظ گردد که منجر به افزایش هزینه نگهداری و تعمیرات می شود. به همین دلیل، هزینه مربوط به طول عمر باتری نیز در تابع هزینه آورده شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که با در نظر گرفتن مکان و ظرفیت بهینه ذخیره سازها و الگوی مناسب پاسخ تقاضا، عملکرد ریز شبکه بهبود می یابد و هزینه ها نیز کاهش یافته است.

واژه های کلیدی: ذخیره ساز، استهلاک باتری، الگوریتم بهینه سازی کلونی زنبورها، ریز شبکه، تابع هزینه

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۰۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۱۵

نام نویسنده ی مسئول: صهبالسادات رجامند

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

۱. مقدمه

با توجه به گسترش روزافزون ریزشکه‌ها 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 ریزشکه 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 شبکه‌های 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 عمدتاً 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 ریزشکه 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 نمی‌شود بلکه در برگشت سرمایه و صرفه جویی در هزینه‌های دیگر شبکه کمک شایانی می‌کند. 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 طور کلی مفهوم ریزشکه 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]. مثلاً 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 هزینه‌هایی که ذخیره ساز بر سیستم تحمیل می‌کند می‌توان به هزینه‌های نصب اولیه، هزینه‌های سالانه نگهداری و سرویس، هزینه مربوط به استهلاک و جایگزینی تجهیزات و همینطور هزینه‌های روزانه مختص به شارژ و دشارژ اشاره نمود. بنابراین بسیاری از مقالات در پی کاهش هزینه‌های 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 ۲۰ درصد 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:

$$L = 694(1 - SOC)^{-0.795} \quad (1)$$

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

$$\frac{C(t)}{C_{init}} = 1 + C_a C_v \left(\frac{v-v_0}{\Delta v} \right) C_T \left(\frac{T-T_0}{\Delta T} \right) \sqrt{t} \quad (2)$$

$$V(SOC) = -1/0.31e^{-3.5SOC} + 3/685 + 0.2156SOC - 0.1178SOC^2 + 0.3201SOC^3$$

$$T(x, t) = T_{av} + T_{am} \times \exp(-x \sqrt{\frac{\omega}{2a}}) \cos(\omega t + 0.77 - x \sqrt{\frac{\omega}{2a}} + c)$$

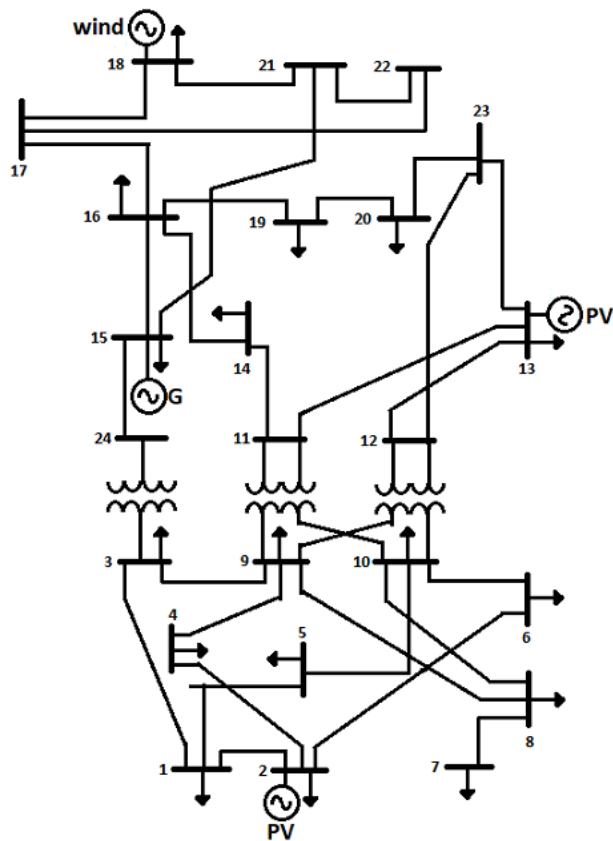
که $C(t)$ ظرفیت باتری در طول زمان، C_{init} ظرفیت اولیه، C_a ثابت زمانی ظرفیتی، C_v ثابت ولتاژی ظرفیتی، C_T ثابت دمایی ظرفیتی، ω فرکانس شارژ-دشارژ و T دمای اندازه‌گیری است.

- در نظر گرفتن عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر خورشیدی و بادی

می باشد. 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 بهینه سازی، 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 ریز شبکه 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 ریز شبکه مفروض

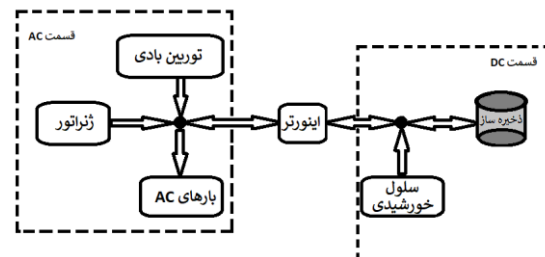
۳. تابع هدف

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

$$f_{day}(ct) = \sum_{i=1}^h \{ (p_G \times S_G + p_{ESS} \times S_{ESS} + p_{PV} \times S_{pv} + p_{WT} \times S_{WT} + p_{DR} \times S_{DR}) \Delta t_i + C_{wear} \times S_{wear} \} \quad (3)$$

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

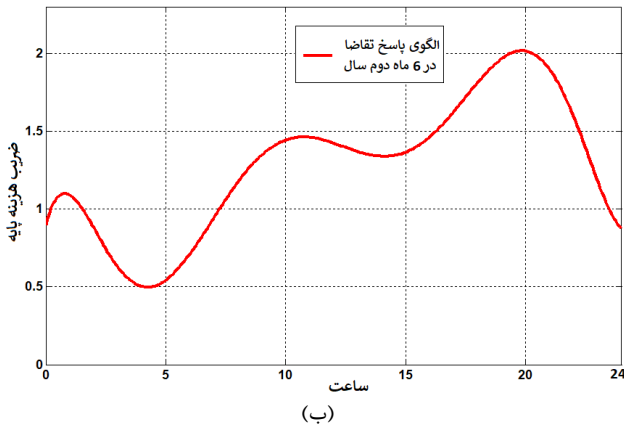
علاوه بر بحث پاسخ تقاضا و ذخیره سازها، بحث منابع تولید انرژی برنامه پذیر یا غیر برنامه پذیر نیز در بازدهی و هزینه سیستم موثر است. توضیح آنکه در یک ریز شبکه، منابع برنامه پذیر را می توان متناسب با تقاضا برنامه ریزی کرد اما منابع غیر قابل پیش بینی مثل انرژی بادی و خورشیدی باید با در نظر گرفتن عدم قطعیت، 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 می کنند و دارای ماهیت تصادفی هستند. بنابراین لزوم مدلسازی این منابع بر پایه مدل های 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 غیر قابل برنامه ریزی مثل انرژی خورشیدی و بادی، تابع بهینه سازی را در جهت کاهش هزینه ها تشکیل داده و با الگوریتم هوشمند کلونی زنبورها، آن را بهینه سازیم. بسیاری از مقالات از روش های هوشمند برای یافتن نقاط بهینه ذخیره سازها و منابع تجدیدپذیر استفاده کرده اند چون روش های 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 می آید. 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 ریز شبکه بهبود می یابد. نوآوری این مقاله شامل:

- اعمال پاسخ تقاضا در تابع هزینه و بهینه سازی
- اعمال سیستم ذخیره، بهینه سازی مکان و ظرفیت و تحلیل تابع بهینه سازی



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

هزینه ذخیره‌سازی، هزینه مرتبط با پیاده‌سازی ذخیره‌ساز و شارژ-دشارژ آنهاست. هزینه استهلاک و خرابی باتری نیز مرتبط با تعمیر و نگهداری ذخیره‌ساز باتری است. در رابطه با هزینه استهلاک باتری می‌توان گفت که طول عمر باتری به شدت 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. معمولاً دو رویکرد برای برخورد با این پدیده تصادفی در نظر گرفته می‌شود. اول اینکه با استفاده از مدل‌سازی تصادفی و استفاده از الگوریتم هوشمند، پیش‌بینی توان خورشیدی و بادی در روزهای مختلف انجام می‌گیرد. برای این کار نیاز به پایگاه داده دقیق و به روز است و پیچیدگی نسبتاً 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 بهینه‌سازی اعمال می‌شود. برای تولید انرژی خورشیدی و بادی با توجه به عدم قطعیت مساله می‌توان تابع توزیع نرمال در نظر گرفت که در واقع داریم:

$$f_{PV}(P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{PV}} \exp\left(-\frac{(P - P_{PV,avg})^2}{2\sigma_{PV}^2}\right) \quad (5)$$

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

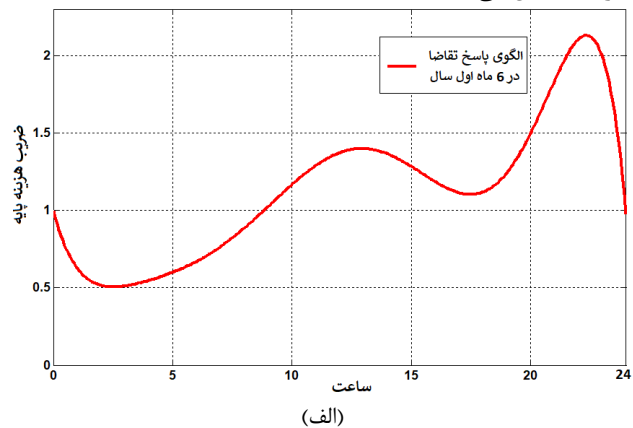
$$f_{WT}(P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{WT}} \exp\left(-\frac{(P - P_{WT,avg})^2}{2\sigma_{WT}^2}\right) \quad (6)$$

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

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 معمولاً 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:

$$f_{year}(ct) = \sum_{i=1}^{365} f_{day,i}(ct) \quad (4)$$

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 ذخیره‌سازی 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 می‌گیریم. 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 می‌گیریم 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.



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

۴. الگوریتم پیشنهادی و بهینه سازی

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 متغیره چندین قید یا محدودیت است، استفاده از روش مرسوم گرادیان در اینجا مفید نیست و بنابراین از الگوریتم های هوشمند استفاده می کنیم. الگوریتم های هوشمند با در نظر گرفتن جمعیت شامل متغیرهای مساله و بررسی قید بهینه سازی و همچنین با استفاده از تکرارهای متعدد، سعی در رسیدن به هدف بهینه دارند. الگوریتم کلونی زنبورها یکی از قوی ترین ابزارها در راستای این هدف است و از ایده هوشمندی زنبورها در رسیدن به هدف (غذا) در کوتاهترین مسیر (هزینه کمتر) استفاده می کند. 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 می شود:

$$X_{ij} = X_{j,min} + rand \times (X_{j,max} - X_{j,min}), \quad i = 1, 2, \dots, NFS \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (14)$$

که جمعیت X_{ij} نام در بردار J ام است و پارامتر NFS که نشان دهنده تعداد غذا است برابر ۵۰ فرض می شود.

$$X_{j,ne}^{iter+1} = X_{j,ne}^{iter} + sign \times [c_1 \cdot rand \cdot (pbest_{j,ne} - X_{j,ne}^{iter}) + c_2 \cdot rand \cdot (gbest_j - X_{j,ne}^{iter})] \quad (15)$$

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

$$c_1 = (c_{1f} - c_{1i}) \times \frac{iter}{iter_{max}} + c_{1i}, \quad c_2 = (c_{2f} - c_{2i}) \times \frac{iter}{iter_{max}} + c_{2i} \quad (16)$$

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

$$Prob(X_{j,ne}^{iter}) = \frac{1}{\sum_{ne=1}^{NFS} \frac{1}{Fitness(X_{j,ne}^{iter})}} \quad (17)$$

$$X_{j,no}^{iter} = X_{j,no}^{iter} + sign \times (c_1 \cdot rand \cdot (X_{j,ne}^{iter} - X_{j,no}^{iter})) \quad (18)$$

که ne تعداد زنبورهای بکار گرفته شده است و $Prob()$ بردار شامل بهترین مقادیر تابع شایستگی است. در ادامه فلوجارت 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

بادی و خورشیدی، تابع هزینه در رابطه (۳) تغییر می کند و نقطه بهینه در هر حالت محاسبه می شود. قطعاً برای بهینه سازی تابع هدف رابطه (۳)، مجموعه ای از قیدها و شرایط داریم که در زیر آمده است:

$$\left. \begin{aligned} & \sum_{i=1}^H \left\{ \sum_{j=1}^M P_{load,j, NDR}(t) + P_{wear}(t) \right\} \\ & = \sum_{i=1}^H \left\{ \sum_{j=1}^M P_{G,i}(t) U_i(t) \right. \\ & \quad \left. + \sum_{n=1}^N P_{WT}(t) + P_{PV}(t) \right. \\ & \quad \left. + P_{ESS}(t) \right\} \quad (9) \end{aligned}$$

این قید بیان می کند 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:

$$P_{min,i}(t) \leq P_i(t) \leq P_{max,i}(t) \quad (8)$$

$$P_{Charge} \leq \gamma CP_{bat} \quad (9)$$

$$P_{Discharge} \leq (1 - \gamma) CP_{bat} \quad (10)$$

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

$$CP_{bat,min} \leq CP_{bat} \leq CP_{bat,max} \quad (11)$$

محدودیت دیگر ذخیره سازها بحث وضعیت شارژ است. وضعیت شارژ یک باتری، انرژی موجود به عنوان درصدی از ظرفیت نامی آن است. برای افزایش عمر باتری از دشارژ کامل یا فراشارژ کامل بایستی جلوگیری شود و بنابراین وضعیت شارژ معمولاً در یک محدوده مناسب باید قرار گیرد:

$$20\% CP_{bat} \leq SOC_{bat} \leq 90\% CP_{bat} \quad (12)$$

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

$$\left. \begin{aligned} & P_{WT,min} \leq P_{WT} \leq P_{WT,max} \\ & P_{PV,min} \leq P_{PV} \leq P_{PV,max} \\ & P_{ESS,min} \leq P_{ESS} \leq P_{ESS,max} \\ & P_{DR} \leq P_{DR,max} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

شکل ۵: دیاگرام توان‌های تولیدی و بار در ریزشکبه 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 به دست آمده‌اند.

جدول ۱: توان المان‌های مساله پیشنهادی

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

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

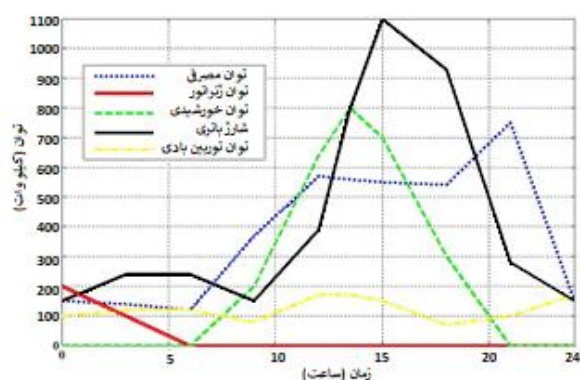
جدول ۲: هزینه سیستم

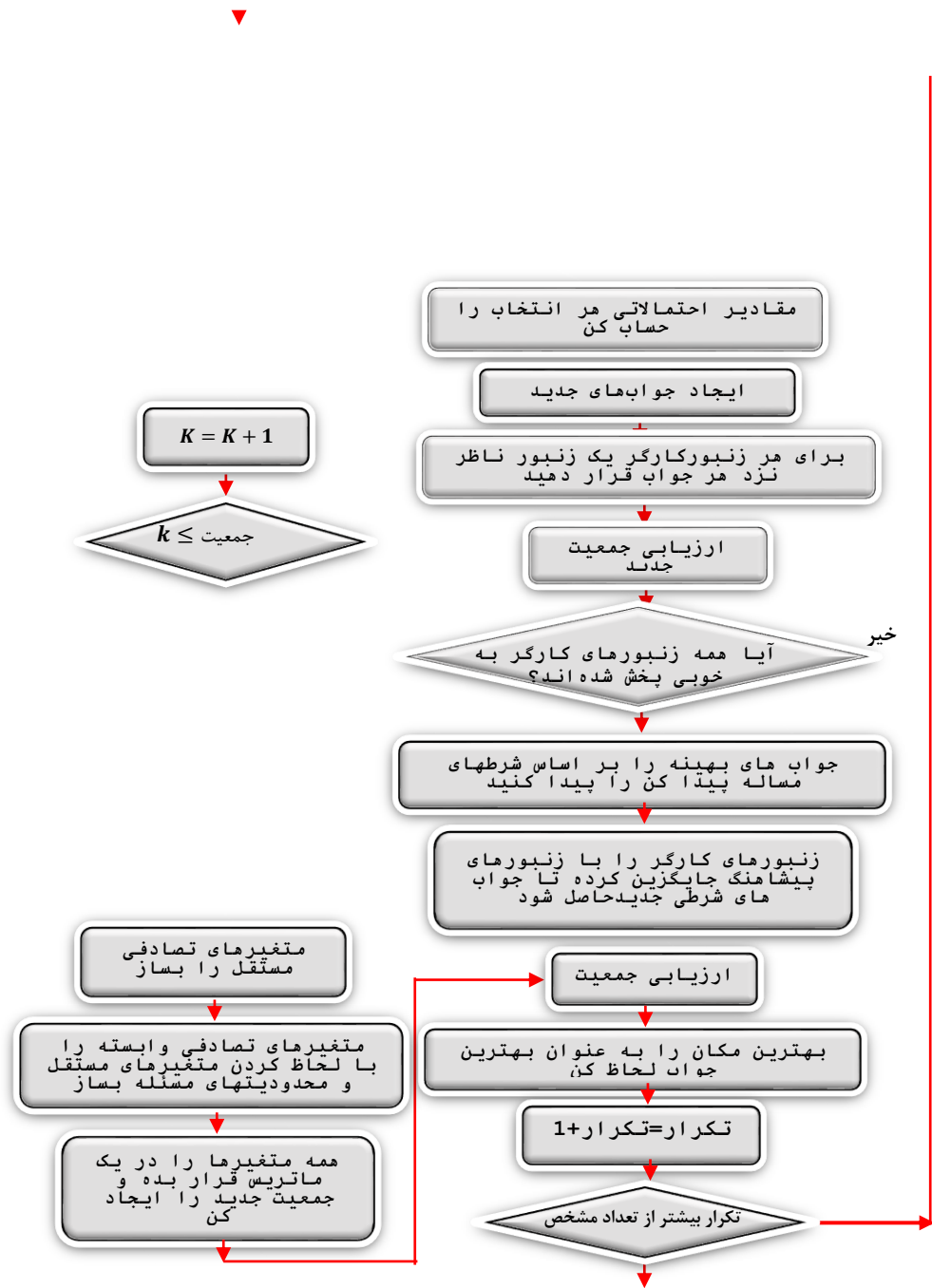
هزینه (میلیون دلار/سال)	حالت مفروض
۱۵/۰۵	ریزشکبه با سلول خورشیدی و توربین بادی
۱۳/۴۰	ریزشکبه با سلول خورشیدی، توربین بادی، ذخیره ساز و پاسخ تقاضا

می‌شود 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 بهینه‌سازی می‌شود.

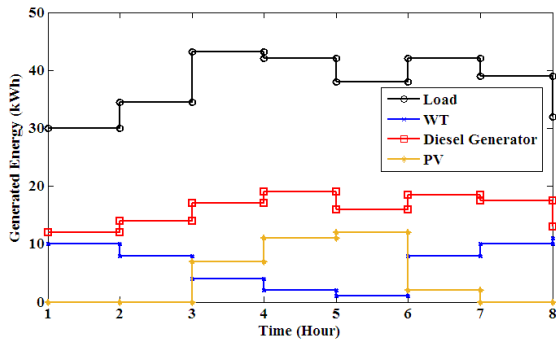
۵. نتایج شبیه‌سازی و بحث

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 $\eta_c \cdot \eta_d = 0.85$ ، پارامترهای هزینه‌ی ظرفیت $\$/kwh$ ۶۰ و هزینه توان $\$/kw$ ۴۰ در نظر گرفته شده است. هم‌چنین دیاگرام توان‌های 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 ریزشکبه به‌خوبی پوشش داده شده است که منجر به کاهش هزینه می‌شود.

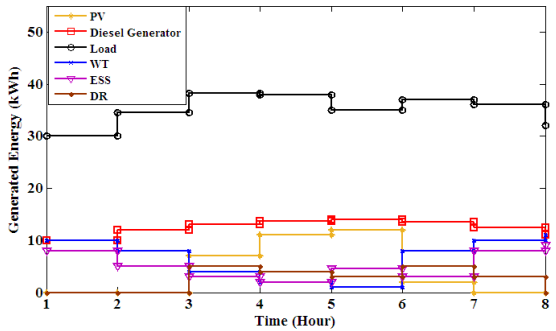




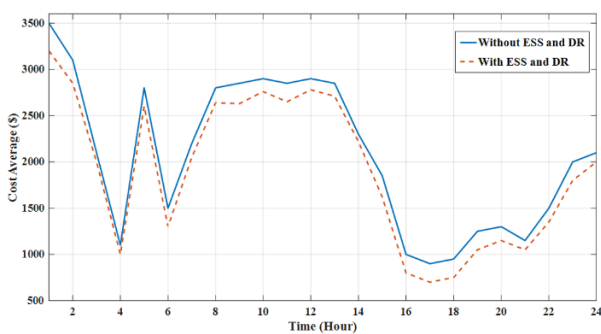
شکل ۴: فلوچارت الگوریتم کلونی زنبورها



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

جدول ۴: اثر واریانس توان خورشیدی-بادی بر هزینه سیستم

هزینه کلی ریزش شبکه (هزار دلار در سال)	هزینه توان خورشیدی (هزار دلار در سال)	واریانس
۳۵۰۰	۱۱۰۰	۰.۰۱
۳۶۷۰	۱۰۰۰	۰.۰۵
۳۸۰۰	۹۵۰	۰.۱

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

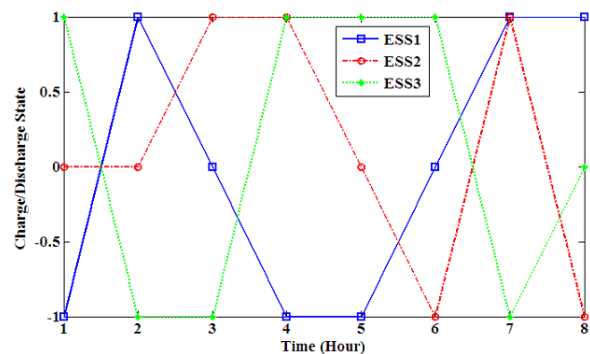
۶. نتیجه گیری

در ادامه به بیان باسهای بهینه برای نصب ذخیره ساز می پردازیم. در جدول ۳ مکان و ظرفیت بهینه باتری ذخیره ساز نمایش داده شده است. در شبیه سازی قید اعمال ۳ ذخیره ساز اعمال شده و الگوریتم کلونی زنبور، ظرفیت و مکان بهینه نصب ذخیره ساز را طبق جدول ۳ بیان کرده است. با توجه به جدول مشاهده می شود که ذخیره ساز 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 ذخیره ساز

توان (مگاوات)	شماره ذخیره ساز	ظرفیت (مگاوات ساعت)	باس
۴۵	ESS ₁	۸۰	۳
۲۰	ESS ₂	۴۰	۱۰
۲۰	ESS ₃	۴۵	۱۹

الگوی شارژ-دشارژ ذخیره سازها در بازه های زمانی روزانه در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به جدول قبل، سه ذخیره ساز برای تعادل بار و هزینه ریزش شبکه انتخاب شده است. بازه های زمانی، ۳ ساعته انتخاب شده است (۱ به معنی دشارژ، -۱ به معنی شارژ و ۰ نه شارژ و نه دشارژ است).



شکل ۶: دیگرام الگوی شارژ-دشارژ باتری ها

در شکل های 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 می دهد. مشاهده می شود که در حالت سیستم دارای ذخیره ساز و کاهش بار، انرژی تولید شده بسیار کاهش می یابد و در مقابل در شکل ۷، با توجه به نبود باتری و پاسخ تقاضا، انرژی تولیدی بیشتر شده و بنابراین هزینه ها نیز افزایش می یابد. هم چنین در شکل ۹، هزینه متوسط در دو حالت استفاده از ذخیره ساز و پاسخ تقاضا و بدون استفاده از آنها نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود هزینه شبکه با استفاده از ذخیره ساز بهینه و پاسخ تقاضای بهینه، کاهش یافته است. در ادامه در جدول ۴، تاثیر واریانس توان تولیدی خورشیدی و بادی بر هزینه کلی ریزش شبکه را بررسی کرده ایم. 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.

[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. Bludszweit 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.

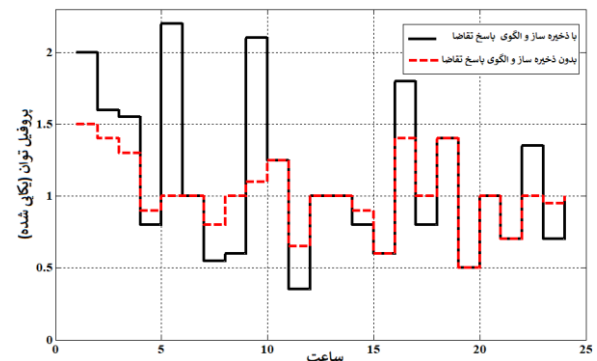
[21] W. Yu, D. Liu, Y. Huang, "Operation Optimization Based on the Power Supply and Storage Capacity of an Active Distribution Network", *Energies*, vol. 6, pp. 6423-6438, 2013.

[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, Figgner, 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.

در این مقاله با در نظر گرفتن منابع انرژی تجدیدپذیر و اعمال ذخیره ساز و الگوی پاسخ تقاضای مشتریان، نشان داده شد که هزینه های کلی ریز شبکه کاهش می یابد. توضیح بیشتر آنکه اگر صرفاً منابع تامین توان ثابت و تجدیدپذیر در ریز شبکه استفاده شود، تامین بار در مواقع حساس و پیک بار غیرممکن شده و یا در صورت امکان، منجر به هزینه های زیادی خواهد شد. استفاده از ذخیره ساز اگرچه سرمایه گذاری اولیه نیاز دارد اما در مدت طولانی و بازه یک ساله منجر به کاهش هزینه ها می شود. همچنین با اطلاع مشتریان از الگوی پاسخ تقاضای ریز شبکه و کاهش بار مصرفی در زمان های پیک و انتقال بار خود به مواقع کم باری، هزینه ریز شبکه به طور قابل توجهی کاهش می یابد 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, Esfetaaj, 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.