



تعیین اندازه بهینه ذخیره‌ساز در ریز شبکه جهت کاهش تلفات با استفاده از

روش هوشمند

جواد صفائی کوچکسرائی^۱

۱- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران
* سوادکوه، j_safae@yahoo.com

چکیده

یکی از چالش‌های مهم در جهان نیاز به منابع انرژی به دلیل تقاضای روزافزون آن می باشد. در همین راستا، در این مقاله روشی جدید برای تعیین مکان و اندازه بهینه ذخیره ساز انرژی در ریز شبکه با در نظر گرفتن قیود و با هدف کاهش تلفات و هزینه‌های سرمایه‌گذاری و نگهداری ارائه گردیده است. با توجه به اینکه هزینه تلفات به‌عنوان قسمتی از تابع هدف در این مقاله انتخاب شده است و در پیک‌بار هزینه انرژی بالاتر است، باتری‌های نصب شده در شبکه در ساعات پایین بودن قیمت انرژی شروع به شارژ شده و در ساعاتی که قیمت برق بالاتر است شروع به دشارژ کرده تا علاوه بر کاهش تلفات و بهبود پروفایل ولتاژ، منجر به بهبود پارامترهای فنی شبکه می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی اثربخشی و کارایی الگوریتم و تابع هدف پیشنهادی را نشان می‌دهد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: ۱۰ مهر ۱۳۹۸
پذیرش: ۱۲ بهمن ۱۳۹۸
ارائه در سایت: ۲۰ اسفند ۱۳۹۸

کلیدواژگان

ریز شبکه
هزینه‌های سرمایه‌گذاری
جایابی بهینه
تلفات
الگوریتم جستجوی کلاغ

Determination of Optimum Storage Size in Micro grid for Loss Reduction using Smart Method

Javad Safae Kouchaksaraee¹

1- Department of Electrical Engineering, Savadkooh Branch, Islamic Azad University, Savadkooh, Iran
* Savadkooh, Iran, j_safae@yahoo.com

Article Information

Original Research Paper
Received 2 October 2019
Accepted 1 February 2020
Available Online 10 March 2020

Keywords

micro grid
Investment costs
Optimal placement
Crow Search Algorithm

ABSTRACT

One of the major challenges in the world is the need for energy resources due to its increasing demand. In this regard, this paper presents a new method for determining the location and size of energy storage in the micro grid, considering the constraints and with the aim of reducing investment losses and maintenance costs. Since the cost of losses is selected as part of the objective function in this article and the higher power cost is in peak demand, the batteries installed in the network start charging at low power prices and start charging at higher power costs. In addition to reducing losses and improving voltage profiles, it improves the technical parameters of the grid. The results of the simulation show the effectiveness and efficiency of the proposed algorithm and the objective function.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Javad Safae Kouchaksaraee, Determination of Optimum Storage Size in Micro grid for Loss Reduction using Smart Method, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 10, No. 4, pp. 25-35, 2020 (In Persian)

۱-مقدمه

تعیین همزمان مکان و اندازه ذخیره‌سازهای انرژی منجر به ایجاد یک مسئله چندجمله‌ای نامعین و سخت می‌شود که تاکنون به صورت دقیق برای مسائل مقیاس بزرگ حل نشده باقی مانده است. مقالاتی که در تعیین اندازه و مکان ذخیره‌ساز انتشار یافته‌اند به اختصار در این بخش بررسی می‌شوند. روش‌های به کار گرفته برای تعیین اندازه و مکان ذخیره‌ساز نیز مطابق حالت تعیین اندازه و جایابی برای منابع تولید پراکنده دسته‌بندی می‌شوند. از روش تحلیلی تنها به منظور تعیین اندازه بهینه ذخیره‌ساز انرژی برای ایجاد تعادل توان تولیدات تجدید پذیر استفاده شده است. بحث‌های زیادی روی مفهوم ذخیره‌ساز به عنوان وسیله‌ای انرژی را بتواند از منابع تجدید پذیر در خود ذخیره کند وجود دارد [۳-۱] و این شاید بزرگ‌ترین مزیت این مقالات باشد. روش تحلیلی مبتنی بر منحنی‌های بار از پیش معلوم [۴-۸] و یا تحلیل داده‌های ثابت است [۹-۱۴] که قیود شبکه را در نظر نمی‌گیرند.

در مرجع [۱۰] نیز مقدار ذخیره‌ساز برای تغذیه پشتیبان بر اساس آمار مدت‌زمان قطع برق و سطح قابلیت اطمینان هدف‌گذاری شده تعیین شده است. در [۱۱-۱۳] به روش‌های تحلیلی مقدار ذخیره‌ساز از توزیع خطای پیش‌بینی باد محاسبه شده است. در مرجع [۱۴] اندازه ذخیره‌ساز بر اساس آماری برای سطوح مختلف نفوذ باد از داده‌های مقیاس بندی شده از پیش معلوم تعیین شده است و از روش ریاضیاتی استفاده شده است. با استفاده از روش بهینه‌سازی در مرجع [۱۵] نویسنده با حل مسئله بهره‌برداری از نیروگاه (UC) برای سیستم جزیره شده با سیستم تلمبه ذخیره‌ای و محدودیت‌های دینامیکی سیستم حالت دینامیکی سیستم را بهبود بخشیده است. در [۱۶] نیز از این ابزار برای حل مسئله UC برای تولیدهای دیزل ژنراتور و توربین بادی استفاده شده است. یک جستجوی جامع ترکیب شده با شبیه‌سازی در مرجع [۱۷] برای یافتن اندازه ذخیره‌ساز با وجود سیستم فتوولتائیکی صورت گرفته است به طوری که هزینه‌های کلی برای سیستم جزیره‌ای مینی‌مم شده و سطح قابلیت اطمینان مورد نیاز فراهم شود. توان باتری مقرون به صرفه و ظرفیت آن که میزان ذخیره سوخت را ماکزیمم می‌کند برای ترکیب‌های مختلف در مرجع [۱۸] بررسی شده است. در مرجع [۱۹] نیز روش جستجوی جامع برای تعیین توان باتری و ظرفیت مورد نیاز برای حمایت از فرکانس اصلی بر طبق مقررات UCTE اعتبار سنجی الگوریتم کنترل و یافتن

اندازه ذخیره‌ساز صورت گرفته است. در مرجع [۲۰] نیز شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز بر اساس داده‌های از قبل معلوم تولید توان توسط انرژی بادی با هدف مینی‌م کردن تعداد چرخه‌های شارژ و دشارژ کامل باتری صورت گرفته است. در مرجع [۲۱] از روش الگوریتم ژنتیک به همراه برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی به منظور تعیین اندازه و مکان بهینه ذخیره‌ساز، DG و خازن در سیستم با بازار انرژی راکتیو استفاده شده است. همچنین ترکیب الگوریتم ژنتیک با پخش بار بهینه به منظور استفاده حداکثری از انرژی باد در مرجع [۲۲] ارائه شده است. در مرجع [۲۳] از روش ازدحام ذرات برای حل یک مسئله ترکیبی، گسترش شبکه در گام اول و نصب DG ها و ذخیره‌سازها در گام بعدی استفاده شده است. همچنین در مرجع [۲۴] نیز همین روش برای تعیین اندازه DG و ذخیره‌ساز انرژی در یک خانه‌ی هوشمند استفاده کرده است. هزینه‌های عملیاتی به وسیله شبیه‌سازی با پارامترهای تعیین شده مونت کارلو در یک سیستم مدیریت انرژی مبتنی بر قانون محاسبه شده است. از الگوریتم زنبور عسل در مرجع [۲۵] برای یافتن اندازه و مکان بهینه ایستگاه‌های شارژ وسایل نقلیه باتری دار استفاده شده است. در مرجع [۲۶] یک روش سیستماتیک برای انتخاب اندازه‌های مؤلفه‌های ریز شبکه مانند تعداد ماژول‌های باتری و پنل‌های خورشیدی بکار رفته است. مسئله فرموله بندی شده و با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی حل شده است. روش جدید معرفی شده در مرجع [۲۷] روشی مبتنی بر گراف و الگوریتم ژنتیک است که برای محاسبه مکان و اندازه DG در ریز شبکه استفاده شده است. در مرجع [۲۸] یک سیستم ذخیره‌ساز ترکیبی تشکیل شده از ابر خازن‌ها و باتری‌ها ارائه شده است. مرجع [۲۹] محدودیت‌های قابلیت اطمینان را دریافتن اندازه بهینه سیستم ذخیره‌ساز در ریز شبکه بررسی کرده است.

از این رو در این مقاله، سعی خواهد شد تا یک تابع هدف جامع برای تعیین مکان و اندازه بهینه باتری در ریز شبکه با در نظر گرفتن مدل‌های با قیودی نظیر تأمین بارهای الکتریکی و حد شارژ و دشارژ باتری‌ها به منظور برآورده شدن اهداف فنی نظیر کاهش تلفات و اهداف اقتصادی نظیر هزینه‌های سرمایه‌گذاری و تعمیر و نگهداری باتری‌ها ارائه شده است. علاوه بر این در این مقاله روش حل جدیدی مبتنی بر روش‌های بهینه‌سازی و تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه برای حل مدل پیشنهاد شده است.

۲- الگوریتم جستجوی کلاغ (CSA)

کلاغ‌ها به‌عنوان باهوش‌ترین پرندگان به حساب می‌آیند. آن‌ها نسبت به اندازه بدن خود بزرگ‌ترین مغز را دارند. بر اساس نسبت مغز به اندازه بدن، مغز آن‌ها تنها کمی از مغز انسان کوچک‌تر است. شواهد مبتنی بر هوش کلاغ‌ها شگفت‌انگیز است. آن‌ها قابلیت شناسایی خود در جلوی آینه را دارند و همچنین قادر به ساخت ابزار هستند. کلاغ‌ها می‌توانند صورت‌ها را به یاد بیاورند و یکدیگر را در مواجهه با یک رفتار غیردوستانه آگاه کنند. علاوه بر این آن‌ها می‌توانند از ابزار استفاده کنند، با روش‌های پیچیده‌ای ارتباط برقرار کنند و مکان غذای پنهان کرده خود را بعد از چند ماه به یاد بیاورند. کلاغ‌ها قادر به مشاهده دیگر پرندگان هستند به طوری که متوجه مکانی که دیگر پرندگان غذای خود را پنهان کرده‌اند می‌شوند و زمانی که آن پرنده محل غذای خود را ترک کرد آن را می‌دزدند. اگر یک کلاغ تهدید شود، اقدامات احتیاطی بیشتری نظیر مخفی شدن انجام می‌دهد تا از قربانی شدن و کشته شدن نجات یابد. در حقیقت آن‌ها از تجربیات شخصی خود در دزدی به‌منظور پیش‌بینی رفتار دزد استفاده می‌کنند و می‌توانند امن‌ترین روش را به‌منظور پنهان کردن غذای به دست آورده خود تعیین کنند به طوری که از دزدی شدن آن محافظت شود [۳۰].

بنابراین بر اساس رفتار هوشمندانه عنوان شده کلاغ، یک الگوریتم فرا ابتکاری مبتنی بر جمعیت کلاغ (CSA) ارائه می‌شود. اصول CSA مطابق موارد زیر است:

- کلاغ‌ها به‌صورت گروهی زندگی می‌کنند.
- کلاغ‌ها قادرند موقعیت‌های مکان‌های مخفی را حفظ کنند.
- کلاغ‌ها یکدیگر را در دزدی دنبال می‌کنند.
- کلاغ‌ها ذخایر غذایی خود را با یک احتمال در برابر دزدیده شدن محافظت می‌کنند.

فرض می‌شود که یک محیط d بعدی شامل یک تعداد از کلاغ‌ها وجود دارد. تعداد کلاغ‌ها (اندازه جمعیت) برابر با N و مکان هر کلاغ در زمان (تکرار) $iter$ در فضای جستجو با یک بردار $X^{i,iter}$ ($i = 1, 2, \dots, N; iter = 1, 2, \dots, iter_{max}$) که $X^{i,iter} = [X_1^{i,iter}, X_2^{i,iter}, \dots, X_d^{i,iter}]$ تعیین می‌شود و در آن $iter_{max}$ تعداد ماکزیمم تکرارهاست. هر کلاغ یک حافظه‌ای درباره موقعیت مکان مخفی خود در ذهن دارد. در تکرار $iter$ ، موقعیت مکان مخفی کلاغ i با علامت $m^{i,iter}$ نشان داده شده است. این درواقع بهترین مکانی است که کلاغ i تاکنون به دست

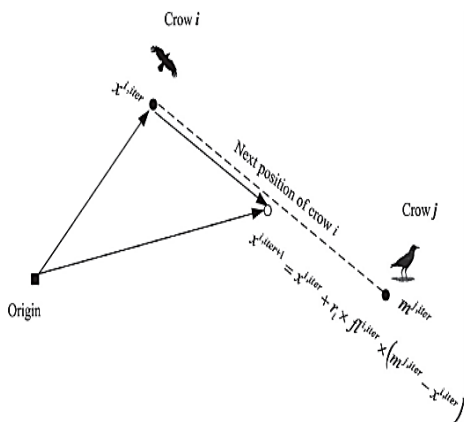
آورده است. درواقع در حافظه هر کلاغ موقعیت بهترین مکان مخفی به‌جامانده است. کلاغ‌ها در محیط حرکت کرده و به دنبال منابع غذایی بهتری هستند (مکان‌های مخفی). فرض می‌شود که در تکرار $iter$ ، کلاغ i قصد دیدن مکان مخفی خود $m^{j,iter}$ را دارد. در این تکرار کلاغ i تصمیم می‌گیرد تا را در رسیدن به سمت مکان مخفی کلاغ j دنبال کند. در این حالت دو اتفاق ممکن است رخ دهد:

- حالت اول

کلاغ j نمی‌داند که کلاغ i او را دنبال می‌کند. در نتیجه کلاغ i کلاغ به مکان مخفی کلاغ j پی خواهد برد. در این مورد مکان جدید کلاغ i مطابق رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$X^{i,iter+1} = X^{i,iter} + r_i \times fl^{i,iter} \times (m^{j,iter} - X^{i,iter}) \quad (1)$$

که در آن r_i عدد تصادفی با توزیع یکنواخت بین ۰ و ۱ بوده و $fl^{i,iter}$ اشاره به طول پرواز کلاغ i در تکرار $iter$ دارد. شما تیک این حالت و تأثیر fl بر روی قابلیت جستجو را نشان می‌دهد. مقدار کوچک fl در شکل (۱) منجر به جستجوی محلی (پیرامون $X^{i,iter}$) می‌شود و مقدار زیاد آن در شکل (۲) منجر به جستجوی جهانی (دور از $X^{i,iter}$) خواهد شد.



شکل ۱. روند حالت اول در fl های کوچک‌تر از ۱ همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است اگر مقدار fl کوچک‌تر از ۱ انتخاب شود، مکان بعدی کلاغ i بر روی خط چین بین $X^{i,iter}$ و $m^{j,iter}$ خواهد بود و مطابق شکل ۳-۶ اگر مقدار fl بزرگ‌تر از ۱ انتخاب شود مکان بعدی کلاغ i بر روی خط‌چین ممکن است از مقدار $m^{j,iter}$ نیز بیشتر شود.

۳- تحلیل ریاضی مسئله بهینه‌سازی

در مسئله طرح‌شده در این مقاله، تابع هدف مجموعه هزینه‌های سیستم است که باید مینیمم سازی شود. در این مقاله، می‌توان بیان کرد که مکان و ظرفیت باتری/باتری‌ها باید به صورتی در شبکه تعبیه شوند که تابع هدف تعریف‌شده در مینیمم مقدار خود باشد. در نتیجه می‌توان با توجه به اهداف ذکر شده تابع هدف را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

در رابطه فوق، f تابع هزینه است که مجموع کل هزینه‌های سیستم پس از نصب باتری‌های ذخیره‌ساز در شبکه است. این رابطه نشان می‌دهد که هزینه‌های سیستم به منظور نصب باتری به دو قسمت تقسیم شده است. قسمت f_1 شامل اهداف فنی شبکه پس از باتری‌هاست و قسمت f_2 نیز اهداف اقتصادی شبکه هست. در ادامه به توضیح این مقادیر پرداخته می‌شود.

۳-۱- تلفات (f_1)

کمینه کردن تلفات کل شبکه مورد بررسی یکی از مهم‌ترین اهداف باتری‌های ذخیره‌ساز در شبکه است. تلفات شبکه به صورت رابطه زیر به عنوان قسمت تابع هدف فنی شبکه در نظر گرفته خواهد شد. این مقدار در هر ساعت محاسبه خواهد شد و مجموع آن به عنوان تلفات روزانه محاسبه می‌شود.

$$f_1 = P_{Loss} = \sum_{i=1}^{n_{br}} R_i |I_i|^2 \quad (4)$$

۳-۲- هزینه نصب باتری (f_2)

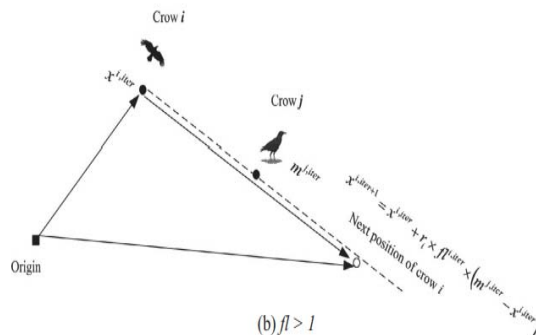
تابع هزینه اقتصادی شبکه شامل هزینه باتری است. هزینه باتری‌های ذخیره‌ساز شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری و هزینه‌های تعمیرات سالیانه است. هزینه سرمایه‌گذاری شامل خرید باتری‌ها و نصب آن‌ها است که هزینه‌ی متغیری وابسته به سایز باتری ذخیره‌ساز دارد. این هزینه با FC نشان داده شده و مقادیر آن برحسب kWh/\$ ارائه می‌شود. هزینه نگهداری در سال نیز متناسب با سایز باتری ذخیره‌ساز متغیر است. اگر طول عمر باتری به مدت L سال باشد و هزینه نگهداری MC (\$/kWh) در سال باشد، در نتیجه تمام هزینه‌های باتری مطابق با رابطه زیر خواهد شد:

$$CE \times (FC + L \times MC) \quad (5)$$

که در رابطه فوق CE سایز باتری ذخیره‌ساز است. در این مقاله هزینه‌های شبکه به صورت سالانه محاسبه شده است. از این رو نیاز

$$X^{i,iter+1} = \begin{cases} X^{i,iter} + r_j \times fl^{i,iter} \times (m^{j,iter} - X^{i,iter}) & r_j \geq AP^i \\ \text{یک موقعیت تصادفی} & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$\min f = f_1 + f_2 \quad (3)$$



شکل ۲. روند حالت اول در fl های بزرگتر از ۱

• حالت دوم

کلاغ j می‌داند که کلاغ i او را دنبال می‌کند. در نتیجه به منظور حفاظت از منابع غذایی خود در برابر دزدیده شدن، کلاغ j کلاغ i را با رفتن به نقطه‌ای دیگر از فضای جستجو گول خواهد زد. در نهایت حالت اول و دوم را می‌توان مطابق رابطه زیر ارائه کرد:

که در آن r_j یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت بین ۰ و ۱ بوده و $AP^{i,iter}$ اشاره به احتمالی آگاهی کلاغ j در تکرار i دارد.

الگوریتم‌های فرا ابتکاری باید تعادل خوبی بین تنوع و افزونگی داشته باشند. در CSA، افزونگی و تشدید عمدتاً توسط پارامتر احتمال آگاهی (AP) کنترل می‌شود. با کاهش مقدار احتمال آگاهی، CSA به سمت جستجو بر روی مناطق محلی، جایی که یک راه حل خوب در این منطقه پیدا شده است حرکت می‌کند. در نتیجه با استفاده از مقدار کم AP ، افزونگی زیاد می‌شود. از سوی دیگر با افزایش مقدار احتمال آگاهی احتمال جستجو در مجاورت راه‌حل‌های موجود فعلی کاهش می‌یابد و CSA به سمت اکتشاف فضای جستجو در مقیاس جهانی حرکت می‌کند. در نتیجه استفاده از مقادیر AP بزرگ، تنوع را افزایش می‌دهد.

$$P_{DG} + P_{grid} + P_{Dch} - P_{loss} - P_{ch} - P_{load} = 0 \quad (12)$$

معادله فوق نشان می‌دهد که مجموع توان‌های ورودی به شبکه باید برابر با مجموع توان‌های مصرف‌شده در شبکه باشد. P_{Dch} و P_{ch} هم شارژ و یا دشارژ شدن باتری/باتری‌های موجود در شبکه را نشان می‌دهد.

۳-۳-۲ حد رعایت افت ولتاژ مجاز

$$V_{min} \leq V \leq V_{max} \quad (13)$$

حد رعایت افت ولتاژ مجاز همانند رابطه (۱۳) ولتاژ هر باس در طی دوره بهینه‌سازی و جابجایی و تعیین اندازه تولیدات پراکنده و ایستگاه شارژ باید در محدوده مجاز خود قرار گیرد.

۳-۳-۳ محدودیت انرژی باتری

$$W_{batt,min} \leq W_{batt}^t \leq W_{batt,max} \quad (14)$$

قید اول محدودیت انرژی باتری‌هاست به طوری که انرژی باتری در هر ساعت بین مقدار انرژی حداقل و حداکثر باتری قرار داشته باشد.

۳-۳-۴ حد رعایت حداکثر میزان شارژ و دشارژ باتری

بدین ترتیب که میزان شارژ باتری نباید از میزان شارژ ماکزیمم تعیین‌شده برآین افزایش و میزان دشارژ باتری نباید از میزان حداکثر دشارژ باتری فراتر رود. این قید را می‌توان مطابق روابط (۱۵) تعریف کرد:

$$P_{charge}^t \leq P_{charge,max} \quad (15)$$

۳-۴ پخش بار پسر و پیشرو

دو گام اساسی این روش شامل جاروب پیشرو و پسر هست:
 ✓ جاروب پیشرو: در این گام تمام طول شبکه از شین مرجع که همان پست توزیع می‌باشد، تا انتهای فیدر جارو می‌شود و معمولاً یکی از پارامترهای شبکه مانند ولتاژ شین‌ها در این مرحله به‌روزرسانی می‌شود.

✓ جاروب پسر: در این گام از انتهای فیدر به سمت ابتدای آن، فیدر جارو می‌شود و معمولاً یکی از پارامترهای مرتبط با پارامتر جاروب پیشرو در این گام بروز می‌شود.

است تمام هزینه‌های ذخیره‌ساز به‌صورت سالانه نرمالیزه شود. اگر نرخ بهره r برای تأمین مالی باتری ذخیره‌ساز نصب‌شده در نظر گرفته شود هزینه سالانه سرمایه‌گذاری سالانه (AOTC) به‌صورت $\$/year$ برای باتری ذخیره‌ساز در معادله (۶) بیان‌شده است.

$$AOTC = \frac{r(1+r)^t}{(1+r)^t - 1} FC \times CE \quad (6)$$

در نتیجه می‌توان تابع هزینه اقتصادی را مطابق رابطه زیر نشان داد:

$$f_2 = (AOTC + CE \times MC) \quad (7)$$

۳-۳-۳ معرفی قیود فنی حاکم بر شبکه

به‌منظور حل مسئله و تابع هزینه تعریف‌شده توسط الگوریتم بهینه‌سازی، مستلزم رعایت قیودی هستیم که در ادامه بدان پرداخته می‌شود.

۳-۳-۱ قیود تغذیه شدن تمامی بارها

قیود تساوی بر اساس اصول تعادل است. معادلات پخش بار مربوط به تعادل توان حقیقی و موهومی به‌صورت ریاضی معادل روابط زیر است:

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^{N_{bus}} V_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (8)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^{N_{bus}} V_j Y_{ij} \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (9)$$

در این روابط P_i و Q_i به ترتیب توان حقیقی و موهومی در باس i ، V_i و δ_i به ترتیب دامنه و زاویه ولتاژ در باس i ، Y_{ij} و θ_{ij} دامنه و زاویه ادمیتانس بین باس i و باس j می‌باشد. همچنین تزریق توان حقیقی و موهومی در هر باس از شبکه به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

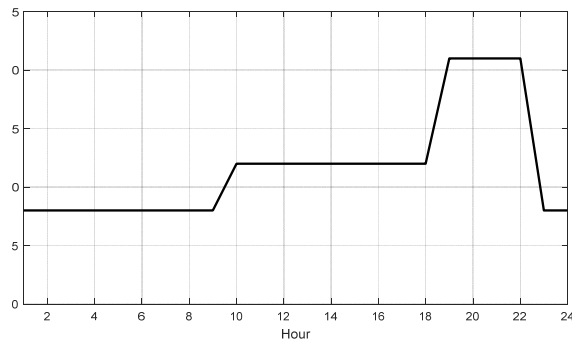
$$P_i = P_{gi} - P_{di} \quad (10)$$

$$Q_i = Q_{gi} - Q_{di} \quad (11)$$

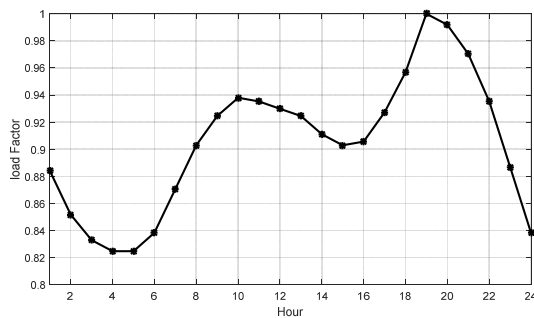
که در این روابط P_{gi} و Q_{gi} به ترتیب توان‌های حقیقی و موهومی خروجی تأمین ژنراتور و P_{di} و Q_{di} نیز به ترتیب توان‌های حقیقی و موهومی بار در باس i هستند. با تعیین توان‌های حقیقی می‌توان قید تعادل توان را مطابق رابطه زیر تعریف کرد:

۳-۵ سیستم تحت مطالعه

در انجام این پروژه یک سیستم ۳۳ باس استاندارد IEEE مطابق شکل (۳) می باشد. سیستم تحت مطالعه یک سیستم شعاعی است و برای شبیه‌سازی این سیستم و به‌کارگیری الگوریتم کلاغ از نرم‌افزار Matlab استفاده شده است. به‌منظور نصب باتری‌ها در شبکه، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و تعمیر و نگهداری آن‌ها مطرح است. هزینه‌های سرمایه‌گذاری یک‌بار برای هر باتری صورت گرفته اما هزینه‌های تعمیر و نگهداری سالیانه محاسبه می‌شود. این هزینه‌ها در جدول (۱) بیان شده است. به‌منظور در نظرگیری واحدهای تولید پراکنده در ریز شبکه، مطابق شکل (۳) چهار واحد تولید پراکنده شامل دو واحد نیروگاه خورشیدی در شین‌های ۲۲ و ۲۴ با ظرفیت‌های ۱۰۰ کیلووات و دو واحد مزرعه بادی با ظرفیت‌های ۱۵۰ کیلووات در شین‌های ۱۶ و ۳۰ تعبیه شده‌اند. قیمت انرژی در روز به‌صورت شکل (۴) در نظر گرفته شده است. مشاهده می‌شود در ساعات پیک‌بار، قسمت انرژی نیز در بالاترین مقدار خود قرار دارد. در هر ساعت از روز، جزئی از بار هر باس در مدار و در حال تغذیه است. بدین منظور با تعریف پارامتر ضریب بار مطابق شکل (۵)، میزان حضور بار در هر ساعت مشخص می‌شود. در مدل‌سازی بار نیز، ۴ نوع بار ثابت، مسکونی، تجاری و صنعتی در نظر گرفته شده است.



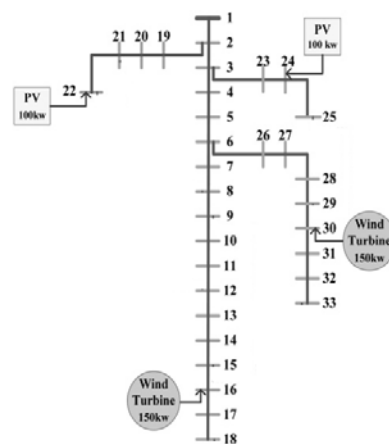
شکل ۴. تغییرات قیمت انرژی



شکل ۵. منحنی ضریب بار

جدول ۱. هزینه‌های باتری

پارامتر	مقدار
هزینه سرمایه‌گذاری	۶۰۰ \$/kW
هزینه‌های تعمیر و نگهداری	۲۰ \$/kW
نرخ شارژ و دشارژ	۲۰ درصد
بازده	۹۰ درصد
نرخ بهره	۶ درصد
عمر مفید باتری	۳ سال



شکل ۳. شبکه ۳۳ باس استاندارد IEEE شبیه‌سازی شده [۵]

شبکه با بار ثابت (kW)	با بار ثابت (m\$)
-----------------------	-------------------

۴- بررسی و تحلیل نتایج

به‌منظور مطالعه و بررسی نتایج حاصل‌شده، در ابتدا حالت پایه، یعنی شبکه بدون نصب هیچ عنصری به‌منظور مقایسه نتایج با دیگر سناریوها مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه دو سناریو با توجه به چهار نوع بار مختلف شبکه در نظر گرفته شده است. در هر سناریو الگوریتم به‌منظور جایابی و تعیین اندازه یک و دو باتری به‌طور جداگانه اجرا خواهد شد و نتایج به‌دست‌آمده مورد بررسی قرار خواهد گرفت. مدت‌زمان مورد مطالعه شبکه ۲۴ ساعت است و بنابراین کلیه هزینه‌ها، هزینه‌های روزانه خواهد بود. برای مقایسه‌ی حالت قبل و بعد از قرار دادن عناصر در شبکه ابتدا از سیستم اصلی بدون وجود منبع پراکنده و باتری‌ها پخش بار گرفته می‌شود. مهم‌ترین خروجی پخش بار که در تابع هدف این پروژه قرار دارند میزان تلفات است. نتایج خروجی پروفیل ولتاژ در حالت عادی و بدون نصب هیچ‌گونه منبع تولید پراکنده در بارهای مختلف و در پیک‌بار مطابق شکل (۶) خواهد بود. همچنین سایر شاخص‌های شبکه نیز مطابق جدول (۲) خواهد بود.

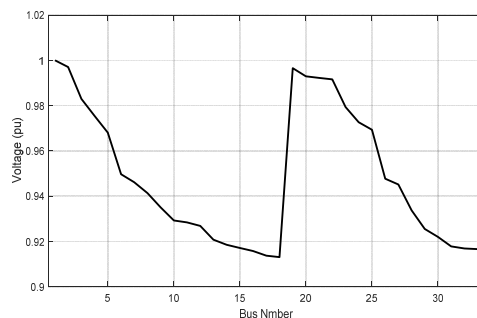
۴-۱- بررسی جایابی و تعیین اندازه باتری در شبکه بدون وجود تولید پراکنده

۴-۱-۱- با نصب یک باتری

در این سناریو هدف جایابی و تعیین ظرفیت باتری‌ها در شبکه است به‌نحوی که قیود شبکه و باتری رعایت شده و تابع هدف در نظر گرفته‌شده در هر حالت بهینه قرار گیرد. باتری می‌تواند در باس ۲ تا باس ۳۳ و با مقدار حداقلی ۱۰ تا حداکثری ۵۰۰ کیلووات نصب شود. با نصب بهینه یک باتری در شبکه، پارامترهای به دست آمده پس از بهینه‌سازی مطابق جدول (۳) است.

جدول ۳. پارامترهای شبکه در حالت اول از سناریوی اول

سناریوی اول - بدون تولید پراکنده			
تعداد باتری‌ها به‌منظور نصب	۱	مجموع هزینه‌های سالیانه باتری‌ها (k\$)	۱۲۲/۱۲
باس‌های نصب باتری	۱۸	ظرفیت باتری (kW)	۵۰۰
تلفات روزانه شبکه	۳۹۲۵/۲	هزینه سالیانه تلفات (m\$)	۱۷/۱۸

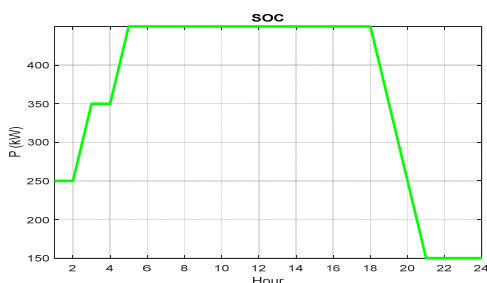


شکل ۶. شکل موج ولتاژ شبکه ۳۳ باس در پیک‌بار شبکه

همان‌طور که از شکل دیده می‌شود دامنه ولتاژ در باس‌های ۶ تا ۱۸ و همچنین ۲۹ تا ۳۳ افت محسوسی داشته است به‌طوری‌که مقدار آن در باس ۱۸ به کمتر از ۰/۹۲ پریونیت رسیده است.

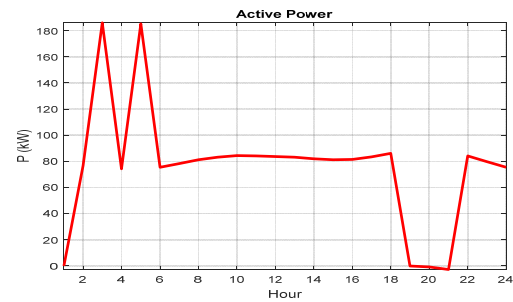
جدول ۲. پارامترهای شبکه در حالت پایه

حالت پایه			
تلفات روزانه	۳۹۳۴	هزینه سالیانه تلفات	۱۷/۳۸۱

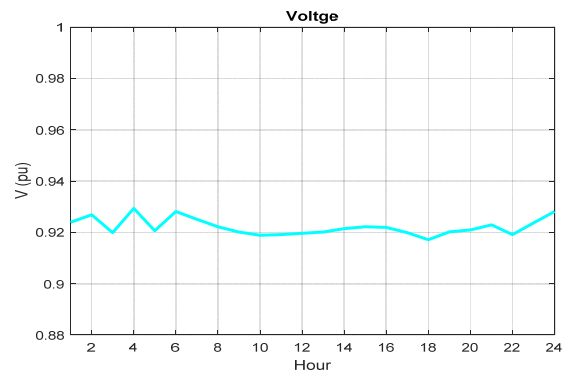


۱۸۲/۷	مجموع هزینه‌های سالیانه باتری‌ها (k\$)	۲	تعداد باتری‌ها به‌منظور نصب
-۴۹۶ ۲۵۱	ظرفیت باتری (kW)	۳۲-۱۸	باس‌های نصب باتری
۱۷/۱۴۵	هزینه سالیانه تلفات (m\$)	۳۹۲۳/۶	تلفات روزانه شبکه (kW)

شکل ۷. روند شارژ و دشارژ روزانه باتری

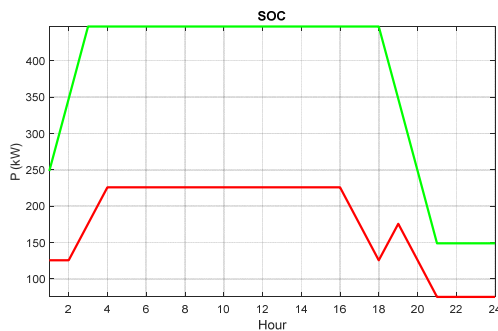


شکل ۸. توان اکتیو در باس محل نصب باتری

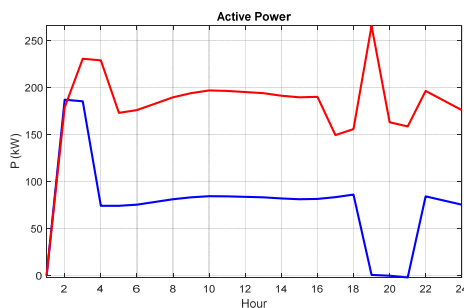


شکل ۹. ولتاژ روزانه باس نصب باتری

با نصب دو باتری با ظرفیت‌های نشان داده‌شده در جدول فوق در شبکه، هم تلفات شبکه نسبت به حالت پایه کاهش یافته است و هم هزینه سالیانه تلفات کاهش یافته است. به‌طوری‌که مجموعه هزینه‌های سالیانه در این حالت نسبت به حالت پایه نزدیک ۲۵۰ هزار دلار کاهش می‌یابد. البته با مقایسه این حالت با حالت نصب یک باتری دربار ثابت، تفاوت آن‌چنانی (سالیانه ۴۰ هزار دلار) در هزینه‌های کلی شبکه به وجود نمی‌آید.



شکل ۱۰. روند شارژ و دشارژ روزانه باتری‌ها



شکل ۱۱. توان اکتیو در باس محل نصب باتری‌ها

از نتایج به‌دست‌آمده در این بخش می‌توان متوجه شد که وجود باتری ۵۰۰ کیلوواتی در باس شماره ۱۸ با ایجاد اربیتراژ انرژی (شارژ در قیمت انرژی پایین و دشارژ در قیمت انرژی بالا) به کاهش هزینه‌های شبکه کمک کرده است به‌طوری‌که هزینه‌ی شبکه با در نظرگیری هزینه‌های خود باتری سالیانه ۸۰ هزار دلار کاهش یافته است.

۴-۱-۲ بانصب دو باتری

در این سناریو نیز مانند سناریوی قبل هدف جایابی و تعیین ظرفیت باتری‌ها در شبکه است به‌نحوی که قیود شبکه و باتری رعایت شده و تابع هدف در نظر گرفته‌شده در هر حالت بهینه قرار گیرد. در این حالت باتری‌ها می‌تواند در باس ۲ و باس ۳۳ با مقدار حداقلی ۱۰ تا حداکثری ۵۰۰ کیلووات نصب شود.

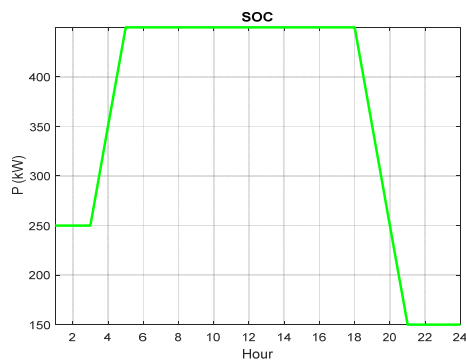
جدول ۴. پارامترهای شبکه در حالت نصب دو باتری

سناریوی دوم - بدون تولید پراکنده

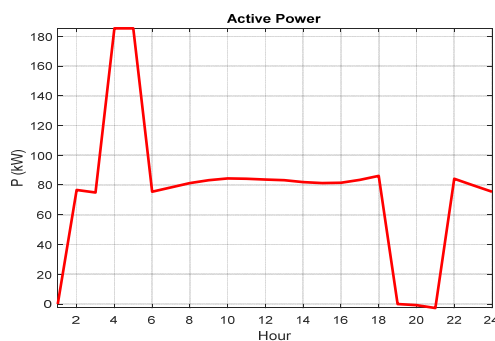
۲-۴ بررسی جایابی و تعیین اندازه باتری در شبکه باوجود تولید پراکنده

در این سناریو هدف جایابی و تعیین ظرفیت باتری‌ها در شبکه با نچو نصب منابع تولید پراکنده تجدید پذیر است به نحوی که قیود شبکه و باتری رعایت شده و تابع هدف در نظر گرفته شده در هر حالت بهینه قرار گیرد. باتری می‌تواند در باس ۲ تا باس ۳۳ و با مقدار حداقلی ۱۰ تا حداکثری ۵۰۰ کیلووات نصب شود.

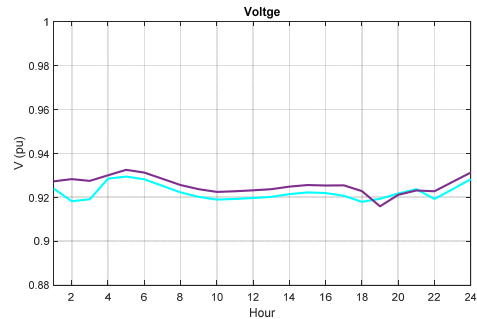
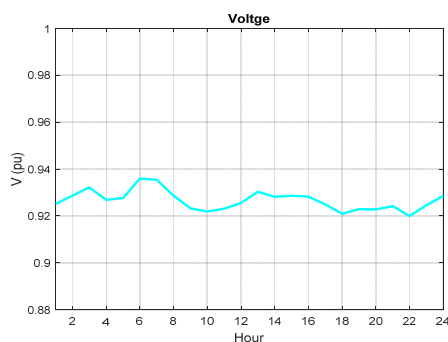
۲-۴-۱ بانصب یک باتری



شکل ۱۳. روند شارژ و دشارژ روزانه باتری



شکل ۱۴. توان اکتیو در باس محل نصب باتری



شکل ۱۶. ولتاژ روزانه باس نصب باتری‌ها

۳-۱-۴ با نصب سه باتری

در این سناریو نیز مانند سناریوی قبل هدف جایابی و تعیین ظرفیت باتری‌ها در شبکه است به نحوی که قیود شبکه و باتری رعایت شده و تابع هدف در نظر گرفته شده در هر حالت بهینه قرار گیرد. در این حالت باتری‌ها می‌تواند در باس ۲ تا باس ۳۳ و با مقدار حداقلی ۱۰ تا حداکثری ۵۰۰ کیلووات نصب شود.

جدول ۵. پارامترهای شبکه در حالت نصب سه باتری

سناریوی سوم - بدون تولید پراکنده			
تعداد باتری‌ها به منظور نصب	۳	مجموع هزینه‌های سالیانه باتری‌ها (k\$)	۱۴۳/۱
باس‌های نصب باتری	۲-۳۳	ظرفیت باتری (kW)	۱۵
تلفات روزانه شبکه (kW)	۳۹۲۸/۱	هزینه سالیانه تلفات (m\$)	۱۷/۱۸

با نصب سه باتری با ظرفیت‌های نشان داده شده در جدول فوق در شبکه، هم تلفات شبکه نسبت به حالت پایه کاهش یافته است و هم هزینه سالیانه تلفات کاهش یافته است. با مقایسه این حالت با حالت نصب دو باتری در شبکه، مشخص است که مجموع هزینه‌ها نسبت به حالت دو باتری افزایش یافته و در نتیجه تعداد بهینه باتری‌ها برای این شبکه نصب دو باتری مطابق حالت قبل خواهد بود.

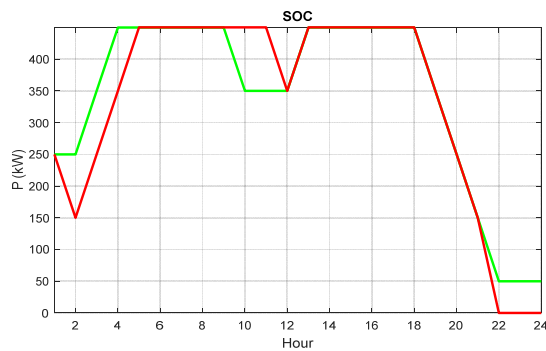
۵۰۰	ظرفیت باتری (kW)	۳۲-۱۸	باس‌های نصب باتری
۱۵/۷	هزینه سالیانه تلفات (m\$)	۳۵۹۷/۵	تلفات روزانه شبکه (kW)

شکل ۱۵. ولتاژ روزانه باس نصب باتری

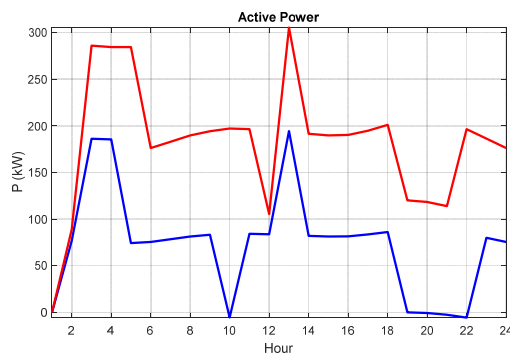
از نتایج به دست آمده در این بخش می‌توان نتیجه گرفت که در صورت نیاز به نصب یک باتری با هر ظرفیت، بهترین باس، باس شماره ۱۸ خواهد بود. تلفات در این حالت به دلیل وجود منابع پراکنده کمتر شده و در نتیجه هزینه تلفات نیز از هزینه‌های تلفات در حالت پایه نزدیک به ۲ میلیون دلار کمتر خواهد بود. با وجود باتری در باس ۱۸ و یک منبع تولید پراکنده در نزدیکی آن (باس ۱۶) ولتاژ محل نصب باتری یعنی باس ۱۸ نیز نسبت به حالت پایه و حالت بدون تولید پراکنده بهبود یافته است.

جدول ۶. پارامترهای شبکه در حالت اول از سناریوی اول

سناریوی اول - با تولید پراکنده			
۱۲۲/۱۲	مجموع هزینه‌های سالیانه باتری‌ها (k\$)	۱	تعداد باتری‌ها به منظور نصب
۵۰۰	ظرفیت باتری (kW)	۱۸	باس‌های نصب باتری
۱۵/۹۱	هزینه سالیانه تلفات (m\$)	۳۶۰۷/۶	تلفات روزانه شبکه (kW)



شکل ۱۶. روند شارژ و دشارژ روزانه باتری‌ها



شکل ۱۷. توان اکتیو در باس محل نصب باتری‌ها

۲-۴-۲ با نصب یک باتری

در این سناریو نیز مانند سناریوی قبل هدف جابجایی و تعیین ظرفیت باتری‌ها در شبکه است در این حالت باتری‌ها می‌توانند در باس ۲ تا باس ۳۳ و با مقدار حداقلی ۱۰ تا حداکثری ۵۰۰ کیلووات نصب شود. با نصب دو باتری با ظرفیت‌های نشان داده شده در جدول فوق در شبکه، هم تلفات شبکه نسبت به حالت پایه کاهش یافته است و هم هزینه سالیانه تلفات کاهش یافته است.

جدول ۷. پارامترهای شبکه در حالت نصب دو باتری

سناریوی دوم - با تولید پراکنده			
۲۴۴/۲	مجموع هزینه‌های سالیانه باتری‌ها (k\$)	۲	تعداد باتری‌ها به منظور نصب

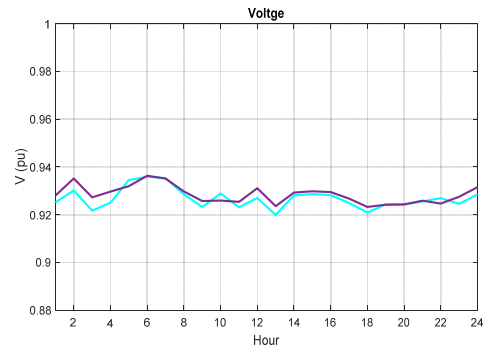
به طوری که مجموعه هزینه‌های سالیانه در این حالت نسبت به حالت نصب یک باتری در شبکه ۹۰ هزار دلار کاهش یافته است. مکان نصب باتری‌ها مطابق حالت بدون تولید پراکنده است اما ظرفیت در این حالت افزایش یافته است. می‌توان بیان کرد با وجود تولید پراکنده و مخصوصاً نیروگاه‌های خورشیدی، نصب باتری‌ها با ظرفیت بیشتر با توجه به اینکه قادر خواهند بود انرژی بیشتری را در روز ذخیره و در ساعات پیک بار ارائه دهند، به کاهش هزینه‌های شبکه کمک شایانی خواهد کرد.

شبکه با در نظر گرفتن مدل‌های با قیودی نظیر تأمین بارهای الکتریکی و حد شارژ و دشارژ باتری‌ها به‌منظور برآورده شدن اهداف فنی نظیر کاهش تلفات و اهداف اقتصادی نظیر هزینه‌های سرمایه‌گذاری و تعمیر و نگهداری باتری‌ها ارائه شده است.

با بررسی نتایج به‌دست‌آمده از تعیین مکان و اندازه بهینه باتری در ریز شبکه می‌توان بیان کرد که نصب باتری در شبکه منجر به کاهش مجموعه هزینه‌های شبکه اعم از هزینه تلفات و نصب باتری‌ها می‌شود. همچنین در اغلب سناریوها نصب باتری منجر به بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش تلفات و در واقع بهبود پارامترهای فنی شبکه نیز شده است. با در نظرگیری دو باتری به‌منظور نصب در شبکه فرایند بهینه‌سازی دوباره صورت گرفته است. با توجه به نتایج ولتاژ تمامی باس‌های شبکه و میزان تلفات مشخص است که پارامترهای فنی شبکه با وجود دو باتری بهبود می‌یابد اما از آنجاکه هزینه نصب و نگهداری باتری نیز با افزایش تعداد و ظرفیت آن‌ها افزایش می‌یابد، از این رو نمی‌توان به‌طور قاطع بیان کرد که با افزایش بیشتر تعداد باتری‌ها منجر به کاهش هزینه‌ها می‌شود زیرا مطابق نتایج ارائه شده در این مقاله با افزایش باتری‌ها از دوبرسه باتری در حالت با و بدون منابع تولید پراکنده مجمع هزینه‌ها افزایش یافت. در واقع این امر موجب مسطح شدن منحنی بار و افزایش قابلیت اطمینان شبکه می‌شود. مدل ارائه شده برای شبکه توزیع اجرا و با استفاده از نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی گردیده. نتایج به‌دست‌آمده کارایی روش ارائه شده را در بهبود شبکه‌های توزیع نشان می‌دهد.

منابع

- [1] Swift-Hook, D.T.: 'Grid-connected intermittent renewables are the last to be stored', *Renew. Energy*, pp. 1967-1969, 2010.
- [2] Wilson, I.a.G., McGregor, P.G., Infield, D.G., et al.: 'Grid-connected renewables, storage and the UK electricity market', *Renew. Energy*, pp. 2166-2170, 2011.
- [3] Venu, C., Rifonnewau, Y., Bacha, S., et al.: 'Battery Storage System sizing in distribution feeders with distributed photovoltaic systems'. 2009 IEEE Bucharest PowerTech, pp. 1-5 2009,
- [4] Eyer, J., Iannucci, J., Butler, P.: 'Estimating electricity storage power rating and discharge duration for utility transmission and distribution deferral', 2005



شکل ۱۸. ولتاژ روزانه باس نصب باتری‌ها

۴-۲-۳ با نصب سه باتری

در این سناریو نیز مانند سناریوی قبل هدف جایابی و تعیین ظرفیت باتری‌ها در شبکه است.

جدول ۸. پارامترهای شبکه در حالت نصب سه باتری

سناریوی سوم - بدون تولید پراکنده			
تعداد باتری‌ها به‌منظور نصب	۳	مجموع هزینه‌های سالانه باتری‌ها (k\$)	۲۴۹/۳
باس‌های نصب باتری	-۱۸ ۲-۳۲	ظرفیت باتری (kW)	-۵۰۰ ۲۰-۵۰۰
تلفات روزانه شبکه (kW)	۳۵۹۶/۰	هزینه سالانه تلفات (m\$)	۱۵/۷۰

با نصب سه باتری با ظرفیت‌های نشان داده شده در جدول فوق در شبکه، نسبت به حالت وجود یک و دو باتری در شبکه با وجود منابع تولید پراکنده، تلفات اندکی بیشتر کاهش یافته است اما با توجه به اضافه شدن یک باتری جدید، مجموع هزینه‌های باتری و همچنین هزینه‌های تلفات شبکه نسبت به حالت دو باتری افزایش یافته است. لذا می‌توان اذعان کرد با وجود منابع تولید پراکنده نیز حالت بهینه، نصب دو باتری در شبکه اما با ظرفیت‌های بیشتر نسبت به حالت بدون تولید پراکنده است.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله یک الگوریتم بهینه‌سازی جدید به همراه یک تابع هدف جامع برای تعیین مکان و اندازه بهینه باتری در ریز

- modified PSO algorithm', *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, pp. 221-230, 2013.
- [24] Kahrobaee, S., Asgarpoor, S., Qiao, W.: 'Optimum sizing of distributed generation and storage capacity in smart households', *IEEE Trans. Smart Grid*, pp. 1791-1801, 2013.
- [25] Jamian, J.J., Mustafa, M.W., Mokhlis, H., et al.: 'Simulation study on optimal placement and sizing of battery switching station units using Artificial Bee Colony algorithm', *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, pp. 592-601, 2014.
- [26] Yu, Xiang Eric, Pawel Malysz, Shahin Sirouspour, and Ali Emadi. "Optimal microgrid component sizing using mixed integer linear programming." In *Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)* pp. 1-6, 2014.
- [27] Li, Peng, Tao Li, Jiaming Li, and Jian Ma. "Optimum allocation and sizing of distributed generators in Microgrid." In *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2013 International Conference on*, pp. 324-328, 2013.
- [28] Sun, Chengchen, and Yue Yuan. "Sizing of hybrid energy storage system in independent microgrid based on BP neural network." In *Renewable Power Generation Conference (RPG 2013), 2nd IET*, pp. 1-4, 2013.
- [29] Bahramirad, Shaghayegh, Wanda Reder, and Amin Khodaei. "Reliability-constrained optimal sizing of energy storage system in a microgrid." *IEEE Transactions on Smart Grid* 3, no. 4, 2012.
- [30] Askarzadeh A. A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: crow search algorithm. *Computers & Structures*. 2016 Jun 1;169:1-2.
- [5] Wang, X.: 'Determination of battery storage capacity in energy buffer for wind farm', *IEEE Trans. Energy Convers*, pp. 868-878, 2008.
- [6] Venu, C., Riffonneau, Y., Bacha, S., et al.: 'Battery Storage System sizing in distribution feeders with distributed photovoltaic systems'. 2009 *IEEE Bucharest PowerTech*, pp. 1-5, 2009.
- [7] Kaldellis, J.K., Zafirakis, D., Kondili, E.: 'Optimum sizing of photovoltaic-energystorage systems for autonomous small islands', *Int. J. Electr. Power Energy Syst*, pp. 24-36 2010.
- [8] [Mitra, J., Vallem, M.: 'Determination of storage required to meet reliability guarantees on Island-capable microgrids with intermittent sources', *IEEE Trans. Power Syst.*, pp. 2360-2367, 2012.
- [9] Yao, D., Choi, S., Tseng, K.J., et al.: 'A statistical approach to the design of a dispatchable wind power-battery energy storage system', *IEEE Trans. Energy Convers.*, pp. 916-925, 2009.
- [10] Mitra, J.: 'Reliability-based sizing of backup storage', *IEEE Trans. Power Syst.*, pp. 1198-1199, 2010.
- [11] Bludszuweit, H., Domínguez-navarro, J.A.: 'A probabilistic method for energy storage sizing based on wind power forecast uncertainty', *IEEE Trans. Power Syst.*, pp. 1651-1658, 2011.
- [12] Wang, S.Y., Yu, J.L.: 'Optimal sizing of the CAES system in a power system with high wind power penetration', *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, pp. 117-125 2012.
- [13] Mitra, J., Vallem, M.: 'Determination of storage required to meet reliability guarantees on Island-capable microgrids with intermittent sources', *IEEE Trans. Power Syst.*, pp. 2360-2367, 2012.
- [14] Hartmann, B., Dán, A.: 'Methodologies for storage size determination for the integration of wind power', *IEEE Trans. Sustain. Energy*, pp. 182-189, 2014.
- [15] Brown, P.: 'Optimization of pumped storage capacity in an isolated power system with large renewable penetration', *IEEE Trans. Power Syst.*, pp. 523-531, 2008.
- [16] Abbey, C., Joós, G.: 'A stochastic optimization approach to rating of energy storage systems in wind-diesel isolated grids', *IEEE Trans. Power Syst.*, pp. 418-426 2009.
- [17] [17] Borowy, B.S., Salameh, Z.M.: 'Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system', *IEEE Trans. Energy Convers.*, pp. 367-375, 1996.
- [18] Lo, C., Anderson, M.: 'Economic dispatch and optimal sizing of battery energy storage systems in utility load-leveling operations', *IEEE Trans. Energy Convers.*, pp. 824-829, 1999.
- [19] Oudalov, A., Chartouni, D., Ohler, C.: 'Optimizing a battery energy storage system for primary frequency control', *IEEE Trans. Power Syst.*, pp. 1259-1266, 2007.
- [20] Li, Q., Choi, S., Yuan, Y., et al.: 'On the determination of battery energy storage capacity and short-term power dispatch of a wind farm', *IEEE Trans. Sustain. Energy*, pp. 148-158, 2011.
- [21] Carpinelli, G., Mottola, F.: 'Optimal allocation of dispersed generators, capacitors and distributed energy storage systems in distribution networks'. 2010 *Proc. Int. Symp. on Modern Electric Power Systems (MEPS)*, pp. 1-6, 2010.
- [22] Ghofrani, M., Arabali, A., Etezadi-Amoli, M., et al.: 'A framework for optimal placement of energy storage units within a power system with high wind penetration', *IEEE Trans. Sustain. Energy*, pp. 434-442, 2013.
- [23] Sedghi, M., Aliakbar-Golkar, M., Haghifam, M.: 'Distribution network expansion considering distributed generation and storage units using