

مدیریت بهینه تولید در یک سیستم تولید انرژی ترکیبی چندمنبعی جدا از شبکه با حضور سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی به‌منظور کاهش هزینه تقاضا

سیدجلال سیدشنوا^۱، دانشیار؛ نوید افسری اردبیلی^۲، دانشجوی دکتری

۱- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه محقق اردبیلی - اردبیل - ایران - seyedshenava@uma.ac.ir

۲- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه محقق اردبیلی - اردبیل - ایران - afsarinavid@gmail.com

چکیده: در این مقاله یک سیستم ترکیبی تأمین تقاضای انرژی الکتریکی در حالت جدا از شبکه با حضور سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این سیستم انرژی ترکیبی از منابع تجدیدپذیر مختلف از قبیل سلول خورشیدی و توربین بادی، همچنین از اجزای پشتیبان و ذخیره‌ساز شامل دیزل ژنراتور و باتری برای تأمین تقاضای بار با قابلیت اطمینان بالا به نحوی که تقاضای بار همواره تأمین شود، استفاده شده است. دو نوع تقاضای بار AC و DC برای مصرف‌کنندگان در نظر گرفته شده است؛ سپس با توجه به منحنی تقاضای بار ۲۴ ساعته برای هر کدام از آن‌ها، با استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی ریاضی غیرخطی مرتبه دوم، حالت بهینه مدیریت تولید بین اجزا به‌نحوی به‌دست آمده است تا با کم‌ترین هزینه بتوان تقاضای بار مصرف‌کنندگان را تأمین نمود و سیستم را در بالاترین سطح قابلیت اطمینان نگه داشت. در ادامه هزینه سوخت دیزل ژنراتور و هزینه شارژ باتری با توجه به وضعیت شارژ آن برای یک روز تأمین تقاضای بار در شرایط مختلف فصلی و ضرایب وزنی تولید متفاوت برای اجزای سیستم انرژی ترکیبی ارائه شده و برای شرایط مختلف بهره‌برداری تأمین تقاضای بار محاسبه شده است. در پایان تأثیر انواع سیستم ذخیره‌ساز باتری بر مسئله اعمال و باتری اسید سرب برای رسیدن به حالت بهینه بهره‌برداری تحت شرایط مختلف بهره‌برداری مورد بررسی قرار گرفته است. مدل به‌کاررفته و روش حل ارائه‌شده قابلیت‌های خود را در تجزیه و تحلیل حالت‌های مختلف به‌خوبی نشان داده‌اند.

واژه‌های کلیدی: سیستم ترکیبی انرژی الکتریکی، سیستم پشتیبان و ذخیره‌ساز، مدیریت تولید، وضعیت شارژ باتری، هزینه سالیانه تأمین تقاضای بار.

Optimal Energy Management of an Off-Grid Mmulti-Source Hybrid Energy System in Presence of Storage Systems to Reduce the Cost of Demand

S. J. SeyedShenava¹, Associate Professor; N. Afsari Ardabili², PhD Student

1- Faculty of Engineering, University of Mohageg Ardabili, Ardabil, Iran, Email: seyedshenava@uma.ac.ir

2- Faculty of Engineering, University of Mohageg Ardabili, Ardabil, Iran, Email: afsarinavid@gmail.com

Abstract: In this paper, a hybrid system of electric energy supply in presence of storage systems in off-grid applications has been studied. Different renewable sources such as solar cell and wind turbine, and backup and storage components such as diesel generator and battery were used to meet the demand of time with high reliability. Two types of load demand, i.e. AC and DC is intended for consumers. Then, according to a 24-hour load demand and using a mathematical nonlinear quadratic programming algorithm, the optimal power flow between the components has taken place with the lowest cost to consumers supplied to the load and to keep the system at the highest level of reliability so that the load demand will always be met. In the following, the cost of fuel in diesel generator and battery charging, according to battery state of charge, for one day load demand in different seasonal conditions and different production weighting coefficients for the components of the hybrid electrical energy system is provided and for various conditions of operation calculated annual costs load demand. In the end, the impact of using various types of batteries storage system and lead-acid battery to achieve the optimal state of operation investigated. The results show the effectiveness of the proposed model and the optimization algorithm.

Keywords: Hybrid electrical energy system, backup and storage system, energy management, battery state of charge, the annual cost of supply to the load.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۲۵

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۱۸، ۱۳۹۵/۰۴/۲۸ و ۱۳۹۵/۰۶/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۲۶

نام نویسنده مسئول: سیدجلال سیدشنوا

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اردبیل - خیابان دانشگاه - دانشگاه محقق اردبیلی - دانشکده فنی و مهندسی.

۱- مقدمه

هر یک از اعضای سیستم ترکیبی و تأثیر این انتخاب روی هزینه روزانه تأمین تقاضای انرژی الکتریکی است. در مرجع [۱۲] روی انواع تکنولوژی باتری و محدودیت‌های شارژ و دشارژ آن‌ها و نیز تأثیر محدودیت‌های شارژ و دشارژ بر روی طول عمر مفید باتری بحث شده است. مشابه چنین کاری برای انواع دیزل ژنراتور در [۱۳] انجام شده است. در مرجع [۱۴] برای حل مسئله مشارکت بهینه بین واحدهای نیروگاهی یک سیستم قدرت استاندارد در حضور دو واحد توربین بادی و یک واحد سیستم فتوولتائیک از مقادیر پیش‌بینی شده ساعتی سرعت باد و تابش خورشید استفاده شده، با این تفاوت که برای اطمینان از صحت مقادیر پیش‌بینی شده از اطلاعات ۱۰ ساله واقعی یک منطقه برای به دست آوردن مقادیر ساعتی با کم‌ترین خطا نسبت به مقدار میانگین ۱۰ ساله استفاده شده است. همچنین در مرجع [۱۵] مسئله عدم قطعیت در مقادیر پیش‌بینی شده در نظر گرفته شده و به منظور تطبیق داده‌های پیش‌بینی شده با واقعیت از مدل‌های احتمالی تقاضای بار، تولید توربین بادی و تولید سیستم فتوولتائیک استفاده شده است. در همه کارهای انجام شده هدف تأمین تقاضای بار مصرف‌کنندگان به اقتصادی‌ترین شکل ممکن است. در این مقاله برای مدیریت بهینه تولید به منظور تأمین تقاضای بار، یک مدل برای سیستم انرژی ترکیبی شامل توربین بادی، دیزل ژنراتور، سیستم فتوولتائیک و سیستم ذخیره‌ساز انرژی شامل باتری ارائه شده به نحوی که این سیستم می‌تواند پاسخ‌گوی تقاضای بار AC و DC مصرف‌کنندگان باشد. با استفاده از روش پخش بار پیشنهادی، باتری به عنوان سیستم ذخیره‌ساز انرژی در یک سیستم ترکیبی از دید پخش بار بهینه در این مقاله مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. به طور مشخص نوآوری‌های این مقاله به شرح زیر است:

- تأثیر استفاده از منابع متنوع تجدیدپذیر انرژی الکتریکی در کاهش هزینه تأمین تقاضای بار در یک سیستم ترکیبی انرژی الکتریکی جدا از شبکه با حضور سیستم ذخیره‌ساز انرژی بر اساس مدیریت بهینه تولید نشان داده شده است.
- عمق دشارژ مناسب برای باتری اسید سرب در سیستم ترکیبی به گونه‌ای تعیین شده که موجب حالت بهینه بهره‌برداری از سیستم ترکیبی انرژی الکتریکی شده و نشان داده شده که حالت بهینه بهره‌برداری از سیستم ذخیره‌ساز باتری در سیستم ترکیبی جواب یکتا ندارد و با توجه به شرایط تعیین می‌شود.
- برای شرایط در دسترس بودن انواع متنوع باتری، با انجام پخش بار بهینه با استفاده از قیود متناسب با نوع باتری و محاسبه هزینه سالیانه تأمین تقاضای بار، مناسب‌ترین نوع باتری برای سیستم ترکیبی انتخاب شده است.

با توجه به افزایش روزافزون تقاضای استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، منابع ترکیبی تأمین انرژی الکتریکی گزینه مناسبی برای تأمین تقاضای بار مصرف‌کنندگان به نظر می‌رسد [۱]. از آنجایی که استفاده از دیزل ژنراتور و باتری سهم به‌سزایی در افزایش قابلیت اطمینان منابع تولید پراکنده انرژی دارند، نیاز به برنامه‌ریزی مناسب برای استفاده از این منابع و مدیریت بهینه آن‌ها احساس می‌شود. در کنار پخش بار بهینه با استفاده از روش‌های مختلف بهینه‌سازی، انتخاب اجزا از نظر اندازه و ظرفیت تولید توان باید به گونه‌ای باشد که در یک حالت بهینه بتوانند ضمن تأمین تقاضای بار از نظر اندازه آنقدر بزرگ نباشند که هزینه اضافی داشته باشند [۲، ۳]. در مراجع [۱، ۴] تازوینگا و همکاران یک سیستم ترکیبی شامل سیستم فتوولتائیک، دیزل ژنراتور و باتری را که یک مثال واقعی از آفریقای جنوبی می‌باشد، در نظر گرفته‌اند و با استفاده از روش برنامه‌ریزی مرتبه دوم به برنامه‌ریزی بهینه سیستم در یک دوره ۲۴ ساعته پرداخته‌اند. همچنین در مرجع [۵] همان نویسندگان به بررسی میزان صرفه‌جویی در هزینه در مقاطع مختلف زمانی از قبیل روزهای تابستانی و زمستانی و روزهای آخر هفته پرداخته‌اند. با توجه به شرایط منطقه‌ای از توربین آبی نیز می‌توان برای تولید انرژی الکتریکی در سیستم انرژی ترکیبی استفاده کرد. در مرجع [۶] ضمن استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی و اجزای پشتیبان سیستم ترکیبی، از توربین آبی نیز به‌عنوان یکی از منابع تجدیدپذیر انرژی استفاده شده است و با پیش‌بینی مقدار چگالی آب جاری در هر ساعت، پخش بار بهینه بین اجزای سیستم ترکیبی انجام شده است. همچنین در مرجع [۷] از توربین آبی به‌عنوان سیستم پشتیبان ذخیره‌ساز و جایگزین باتری استفاده شده است. بدین صورت که از اضافه تولید توان منابع تجدیدپذیر برای پمپ کردن آب به سطح با ارتفاع بالا استفاده شده و در زمان کمبود تولید توان، با جاری شدن آب از سطح بالا به پایین توسط توربین آبی کمبود تولید توان جبران شده است. در مرجع [۸] یک سیستم ترکیبی شامل دیزل ژنراتور، توربین بادی، سیستم فتوولتائیک و باتری در نظر گرفته شده و با الگوریتم مدل پیش‌کنترل (MPC)^۱ پخش بار و تولید بهینه اجزا برای شرایط وجود اختلال در مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از مدل حلقه بسته صورت گرفته است. در مرجع [۹] ضمن بحث کلی روی روابط مربوط به توان تولیدی سیستم فتوولتائیک، توربین بادی و توربین آبی و نیز سوخت مصرفی دیزل ژنراتور به بررسی ترکیب‌ها با ظرفیت‌های مختلف پرداخته و با استفاده از الگوریتم شبه‌نیوتن^۲ یک ترکیب خاص از اجزای سیستم ترکیبی با ظرفیت خاص اجزا برای یک جامعه روستایی در نظر گرفته شده است. کار مشابهی در [۱۰] توسط الگوریتم ژنتیک^۳ انجام گرفته است. در مرجع [۱۱] بحث تخصصی‌تری روی باتری انجام شده و راهکارهای افزایش طول عمر مفید باتری بررسی شده است. از مطالعات دیگر انجام‌شده بحث روی انتخاب نوع

که مجموع توان‌های منابع تجدیدپذیر انرژی و باتری نتوانند تقاضای بار را تأمین کنند. بارها نیز شامل دو دسته بار AC و DC است. نحوه فرمول‌بندی توان تولیدی اجزای سیستم ترکیبی به‌طور اختصار در بخش بعد توضیح داده شده است.

۳-۱- مدل سیستم فتوولتائیک

تولید ساعتی توان از سیستم فتوولتائیک بر اساس رابطه (۱) به‌دست می‌آید [۸].

$$P_{PV} = \eta_{PV} \times A_C \times I_{PV} \quad (1)$$

در این رابطه η_{PV} بازده سیستم فتوولتائیک است که به عملکرد ساعتی و نوع چیدمان صفحات خورشیدی بستگی دارد. I_{PV} برحسب $(\frac{KW.h}{m^2})$ تابش ساعتی خورشید بر روی آرایه سیستم فتوولتائیک است. A_C مساحت صفحات خورشیدی به‌کاررفته و P_{PV} توان تولیدی سیستم فتوولتائیک است [۱۶]. در این مقاله از داده‌های در دسترس برای تابش خورشید و میزان انرژی الکتریکی به‌دست‌آمده از سیستم فتوولتائیک استفاده می‌شود. همچنین با توجه به خطای کم گام زمانی یک ساعتی [۱۷] از این گام زمانی برای تجزیه‌وتحلیل داده‌ها استفاده شده است.

۳-۲- مدل توربین بادی

خروجی توان توربین بادی بر اساس رابطه (۲) به‌دست می‌آید [۸، ۹].

$$P_{WT} = \frac{1}{2} \times \eta_T \times \eta_G \times \rho_{air} \times C_p \times A \times V_f^3 \quad (2)$$

در این رابطه V_f سرعت باد، ρ_{air} چگالی هوا، C_p ضریبی وابسته به طراحی توربین، A مساحت سطح روتور توربین بادی، η_T و η_G به‌ترتیب راندمان مربوط به توربین بادی و ژنراتور می‌باشند که از یک الگوی درجه دوم از اطلاعات توربین بادی به‌دست می‌آید. در این مقاله بر اساس الگوی‌های ورزش باد ساعتی پیش‌بینی‌شده برای یک منطقه، مقدار تولید توان توربین بادی در هر ساعت از قبل مشخص می‌شود تا به این ترتیب در هر ساعت مقدار بهینه پخش بار برای اجزای کنترلی جهت تأمین تقاضای بار مشخص شود.

۳-۳- مدل بانک باتری

باتری‌ها از اجزای مهم سیستم‌های ترکیبی انرژی الکتریکی جدا از شبکه شامل منابع تجدیدپذیر انرژی از جمله سیستم فتوولتائیک هستند تا بتوانند با ذخیره‌سازی انرژی مازاد در روز، کمبود تولید در شب را جبران کنند [۱۸]. با فرض حضور در ساعت t وضعیت شارژ باتری با استفاده از روابط (۳) و (۴) مشخص می‌شود.

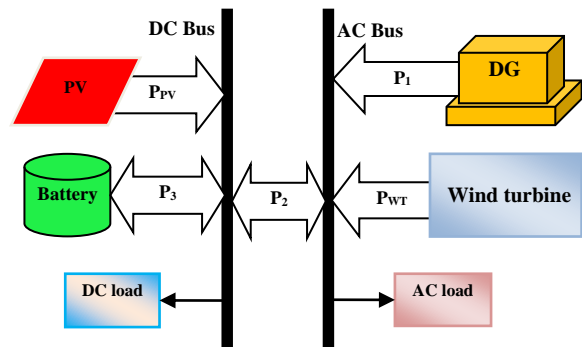
$$soc(t) = soc(t-1) + \alpha P_3(t) - \beta P_4(t) \quad (3)$$

$$\alpha = \eta_C \times \frac{\Delta t}{E} \quad , \quad \beta = \eta_D \times \frac{\Delta t}{E} \quad (4)$$

در بخش ۲ ضمن معرفی سیستم پارامترها و متغیرهای سیستم نیز معرفی شده‌اند. در بخش ۳ اجزای سیستم ترکیبی معرفی شده و میزان توان تولیدی هر یک از اجزا به اختصار توضیح داده شده است. در بخش ۴ نوع فرمول‌بندی سیستم و روش حل مسئله بهینه‌سازی ارائه و در بخش ۵ نتایج حاصل از اعمال مدیریت تولید و نتایج اقتصادی سیستم ترکیبی تولید انرژی ارائه شده است. بخش آخر به نتیجه‌گیری اختصاص دارد.

۲- ساختار سیستم ترکیبی

مطابق شکل ۱ در این مقاله سیستم ترکیبی شامل سیستمی مرکب از سیستم فتوولتائیک، توربین بادی، سیستم ذخیره‌ساز باتری و سیستم پشتیبان دیزل ژنراتور است. توربین بادی و سیستم فتوولتائیک برای تأمین تقاضای بار مصرف‌کنندگان در الویت قرار دارند به‌گونه‌ای که اگر این دو سیستم نتوانند تقاضای بار را تأمین کنند، از انرژی ذخیره‌ساز باتری و دیزل ژنراتور استفاده خواهد شد. در ضمن، اضافه تولید این دو سیستم می‌تواند برای شارژ باتری با توجه به وضعیت شارژ باتری (soc) (که در بخش ۳ توضیح داده خواهد شد) مورد استفاده قرار گیرد. متغیرهای P_{PV} و P_{WT} و P_1 به ترتیب توان دریافتی از سیستم فتوولتائیک، توربین بادی و دیزل ژنراتور می‌باشند. متغیر کنترلی P_2 توان جاری‌شده بین دو باس DC و AC است که از طریق اینورتر به هم متصل شده‌اند. متغیر کنترلی P_3 نیز توان جاری‌شده از یا به باتری است. جهت مثبت توان P_2 از سمت باس DC به باس AC و جهت مثبت توان P_3 برای حالت شارژ باتری در نظر گرفته شده است.



شکل ۱: ساختار سیستم ترکیبی تأمین انرژی

۳- معرفی اجزای سیستم ترکیبی

برای یک سیستم ترکیبی تأمین انرژی الکتریکی که در حالت جدا از شبکه قرار دارد، اجزای سیستم ترکیبی به چهار دسته تقسیم می‌شوند. این چهار دسته شامل منابع تجدیدپذیر انرژی الکتریکی، منابع پشتیبان تأمین انرژی، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی و بار است. در این مقاله از سیستم‌های فتوولتائیک و توربین بادی به‌عنوان منابع تجدیدپذیر انرژی الکتریکی و از باتری به‌عنوان سیستم ذخیره‌ساز در زمان اضافه تولید منابع تجدیدپذیر انرژی استفاده شده است. دیزل ژنراتور هم به‌عنوان سیستم پشتیبان زمانی روشن می‌شود

اساس تولید انرژی سیستم فتوولتاییک و پخش بار بهینه بین پارامترهای کنترلی در نظر گرفته شده است. برای توان تولیدی مربوط به سیستم فتوولتاییک از داده‌های [۱] استفاده شده است. همچنین میزان تولید توان توسط توربین بادی نیز چنین شرایطی دارد و براساس پیش‌بینی‌های وزش باد برای یک منطقه و اطلاعات توربین بادی میزان توان الکتریکی تولیدی توربین بادی در یک دوره ۲۴ ساعته پیش‌بینی و با توجه به محدوده تقاضای بار از اطلاعات یک میکروتوربین استفاده شده است. اندازه اجزای سیستم به گونه‌ای مشخص شده‌اند که همواره تقاضای بار را تأمین کنند.

روشن یا خاموش بودن دیزل ژنراتور و نحوه شارژ باتری بدین صورت است که شارژ باتری فقط از طریق منابع تجدیدپذیر انرژی یعنی توربین بادی و سیستم فتوولتاییک و در زمان تولید بیش از تقاضای بار و با توجه به محدودیت‌های وضعیت شارژ باتری (soc) انجام می‌شود. در این سیستم دیزل ژنراتور فقط وقتی روشن می‌شود که توربین بادی و سیستم فتوولتاییک و باتری نتوانند تقاضای بار را تأمین کنند. برای حل مسئله بهینه‌سازی از الگوریتم ریاضی غیرخطی مرتبه دوم QP^c در محیط برنامه MATLAB استفاده شده است. تابع هدف با رابطه (۹) تعریف و محدودیت‌های آن با روابط (۱۰) تا (۱۴) تعریف شده‌اند.

$$\min \sum_{i=1}^N (w_1 C_f (a P_1^2(k) + b P_1(k)) + w_2 C_{bw} |P_3(k)| - w_3 P_{pv}(k) - w_4 P_{wt}(k)) \quad (9)$$

$$P_1(k) + P_2(k) = P_{Lac}(k) - P_{wt}(k) \quad (10)$$

$$P_2(k) + P_3(k) \leq P_{pv}(k) - P_{Ldc}(k) \quad (11)$$

$$0 \leq P_1(k) \leq DG^{rated} \quad (12)$$

$$P_3^{min} \leq P_3(k) \leq P_3^{max} \quad (13)$$

$$SOC^{min} \leq SOC(0) - \alpha \sum_{\tau=1}^k P_3(\tau) \leq SOC^{max} \quad (14)$$

به ازای هر مقدار $k=1, \dots, N$ و برابر ۲۴، C_f قیمت سوخت است. w_1 تا w_4 ضرایب وزنی هستند که مجموع آن‌ها یک می‌باشد. $soc(0)$ مقدار اولیه شارژ باتری و soc^{min} و soc^{max} حداقل و حداکثر وضعیت شارژ باتری را نشان می‌دهند. DG^{rated} ظرفیت تولید توان دیزل ژنراتور است. عبارت اول از تابع هدف، مقدار هزینه سوخت مصرفی دیزل ژنراتور را مشخص می‌کند که به ضریب وزنی w_1 ضرب شده است. جمله دوم نشان‌دهنده اندازه توان از یا به باتری ضرب در هزینه پوشش باتری و وزنی ضریب w_2 است. با توجه به اینکه هدف به حداقل رساندن استفاده از این دو منبع است، این دو عبارت با علامت مثبت در تابع هدف استفاده شده‌اند. جملات سوم و چهارم مقدار توان دریافت‌شده در پخش بار از منابع تجدیدپذیر سیستم فتوولتاییک و توربین بادی را ضرب

که η_D و η_C به ترتیب راندمان‌های حالت شارژ و دشارژ باتری و Δt گام زمانی و E ظرفیت نامی باتری است. یک بیان دینامیکی کلی تر که بیش تر در مورد باتری‌ها استفاده می‌شود طبق رابطه (۵) است.

$$soc(t) = soc(0) + \alpha \sum_{\tau=1}^t P_3(\tau) - \beta \sum_{\tau=1}^t P_4(\tau) \quad (5)$$

که در این رابطه $soc(0)$ نشان‌دهنده وضعیت اولیه شارژ باتری است. $\alpha \sum_{\tau=1}^t P_3(\tau)$ نشان‌دهنده مجموع توان‌های ورودی به باتری تا زمان t ام و $\beta \sum_{\tau=1}^t P_4(\tau)$ نشان‌دهنده مجموع توان‌های خروجی از باتری تا زمان t ام است. همچنین میزان ظرفیت در دسترس باتری طبق رابطه (۶) در هر زمان نمی‌تواند از یک مقدار کمینه کم‌تر و از یک مقدار بیشینه بیش‌تر باشد [۵، ۱۱].

$$soc^{min} \leq soc(t) \leq soc^{max} \quad (6)$$

$$soc^{min} = (1 - DOD) soc^{max} \quad (7)$$

که در رابطه (۷) کمیت DOD نشان‌دهنده عمق دشارژ باتری بر حسب درصد است. هزینه پوشش باتری از رابطه (۸) به دست می‌آید.

$$C_{bw} = \frac{C_b}{E \times DOD_i \times C_i} \quad (8)$$

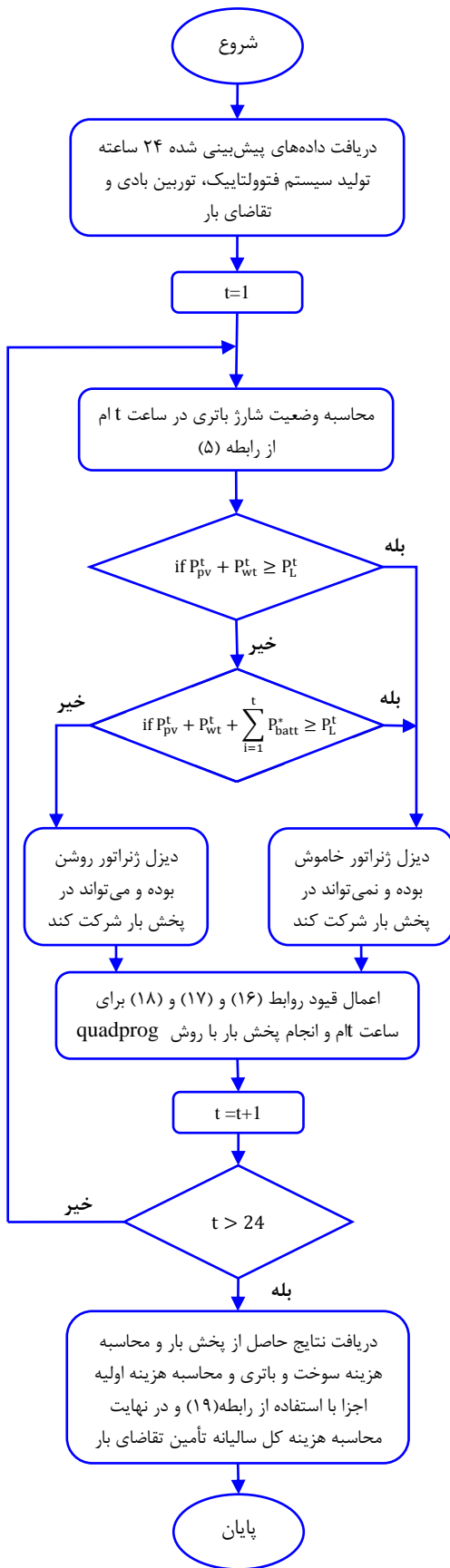
که در این رابطه C_b هزینه خالص خرید باتری، E ظرفیت باتری و DOD_i مقدار عمق دشارژ اولیه (DOD اولیه) در نظر گرفته می‌شود و C_i تعداد سیکل‌های مانده تا خرابی باتری است. تعداد سیکل‌های مانده تا خراب شدن باتری توسط سازنده مشخص می‌شود.

۳-۴- مدل دیزل ژنراتور

دیزل ژنراتورها در سیستم‌های ترکیبی انرژی به‌عنوان پشتیبان استفاده می‌شوند و معمولاً زمانی وارد مدار می‌شوند که باتری و منابع تجدیدپذیر انرژی نمی‌توانند تقاضای بار را تأمین کنند [۱۰]. بنابراین استفاده از دیزل ژنراتور باعث افزایش قابلیت اطمینان سیستم ترکیبی برای تأمین تقاضای بار می‌شود. معمولاً سازندگان توصیه می‌کنند که استفاده از دیزل ژنراتور در سیستم حداقل باشد. بنابراین تنها زمانی از دیزل ژنراتور استفاده می‌شود که تقاضای بار با حداکثر توان خروجی باتری با توجه به محدودیت‌ها به همراه توان تولیدی توربین بادی و سیستم فتوولتاییک تأمین نشود و به هیچ عنوان از دیزل ژنراتور برای شارژ باتری استفاده نمی‌شود. این کار باعث افزایش هزینه سوخت و کاهش طول عمر مفید دیزل ژنراتور می‌شود [۱۳]. در این مقاله از اطلاعات دیزل ژنراتور ΔkW مجهز به سیستم کنترل الکترونیکی برای کنترل سوخت ورودی و تعداد دور ژنراتور برای تأمین بار مورد نیاز استفاده شده است. این نوع دیزل ژنراتورها به‌طور سریع در هر زمان توانایی تأمین توان خروجی مورد نیاز را دارند [۵].

۴- مدل‌سازی سیستم ترکیبی و روش حل

تولید ساعتی سیستم فتوولتاییک بر اساس میزان تابش خورشید در یک منطقه در هر فصل سال پیش‌بینی شده و برنامه‌ریزی مناسب بر



شکل ۲: روندنمای انجام پخش بار و محاسبه هزینه تأمین تقاضای بار

در ضرایب وزنی مربوط به این دو منبع نشان می‌دهند. همچنین با توجه به اینکه هدف استفاده بیشینه از منابع تجدیدپذیر انرژی است، این دو جمله با علامت منفی در تابع هدف مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مرجع [۵] تابع هدف تنها جمله اول رابطه (۹) در نظر گرفته شده که در آن شرایط می‌توان گفت کمینه استفاده از دیزل ژنراتور با کمینه‌سازی آن تابع هدف به دست می‌آید ولی در این مقاله ضرورتاً این موضوع اتفاق نمی‌افتد و کمینه تابع هدف می‌تواند در جایی باشد که تولید دیزل ژنراتور و باتری از مقدار کمینه شرایطی که می‌تواند برای دیزل ژنراتور و باتری در پخش بار اتفاق افتد و نیز شرایطی که از منابع تجدیدپذیر استفاده بیشینه در پخش بار می‌توان داشت، فاصله داشته باشد.

برای اینکه مجموع توان‌های ورودی و خروجی به باس AC مساوی صفر شود، باید قید تساوی (۱۰) در هر ساعت رعایت شود. چنین شرطی برای باس DC با قید نامساوی (۱۱) تأمین می‌شود. در این قید علامت کوچک‌تر برای حالت دشارژ باتری و علامت مساوی برای حالت شارژ باتری در نظر گرفته شده است. قیود (۱۲) تا (۱۴) حداقل و حداکثر توان متغیرهای کنترلی را مشخص می‌کنند. برای حل مسئله بهینه‌سازی به روش برنامه‌ریزی غیرخطی مرتبه دوم لازم است مسئله به شکل زیر در آید:

$$\min \left(\frac{1}{2} x^T H x + f^T x \right) \quad (15)$$

همچنین لازم است قیود به شکل زیر نوشته شوند:

$$A x \leq b \quad (16)$$

$$A_{eq} x = b_{eq} \quad (17)$$

$$L b \leq x \leq U b \quad (18)$$

که در این روابط H ماتریس ضرایب مرتبه دوم و f ماتریس ضرایب مرتبه اول تابع هدف است. ماتریس‌های A و b از روی قیود نامساوی و ماتریس‌های Aeq و beq از روی قیود مساوی به دست می‌آیند. همچنین Ub و Lb حدود بالا و پایین پارامترهای کنترلی می‌باشند.

در شکل ۲ روندنمای انجام پخش بار و محاسبه هزینه سالیانه تأمین تقاضای بار نشان داده شده است. در این روندنما P_{pv}^t و P_{wt}^t به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر پیش‌بینی شده تقاضای بار، تولید سیستم فتوولتائیک و تولید توربین بادی در ساعت tام هستند. مقدار $\sum_{i=1}^t P_{batt}^*$ نشان‌دهنده مقدار شارژ باتری تا ساعت tام است که با توجه به محدودیت دشارژ باتری می‌توان از آن استفاده کرد.

۵- نتایج عددی

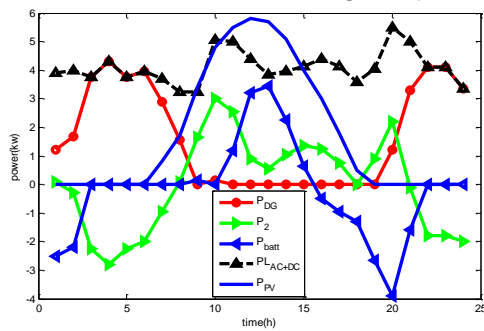
با توجه به اجزای استفاده شده در سیستم ترکیبی انرژی الکتریکی و نیز برای انجام پخش بار بهینه بین اجزای کنترلی سیستم، تقاضای بارهای AC و DC و میزان وزش باد و تابش خورشید از روی پیش‌بینی‌ها مشخص شده است. شکل ۳ مقادیر پیش‌بینی شده تولید توان سیستم فتوولتائیک برای فصل تابستان و زمستان [۱]، میزان تولید توان توربین بادی [۱۸] و تقاضای بارهای AC و DC مصرف‌کننده را نشان می‌دهد [۱۹، ۱].

رابطه (۹) تعریف شده است. برای اختصاص وزن‌ها از دو روش SMARTS و SWING می‌توان استفاده کرد. در این روش‌ها اهداف برحسب اهمیت رتبه‌بندی شده و پس از محاسبات وزن‌ها به گونه‌ای نرمال می‌شوند که جمع آن‌ها برابر یک شود. برای مثال مسائل زیست‌محیطی و محدودیت در تأمین سوخت مصرفی دیزل ژنراتور می‌توانند از اهداف دارای الویت در استفاده از دیزل ژنراتور باشند. لازم به توضیح است در مسائلی که محدودیت‌های زیست‌محیطی در نظر گرفته می‌شوند، مقدار تولید آلاینده‌ها به تابع هدف اضافه می‌شود ولی در این مقاله حداقل استفاده از دیزل ژنراتور که موجب کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود، به عنوان یک عامل مثبت در حفاظت از محیط‌زیست در نظر گرفته شده است. انواع مختلفی از حالت‌های بهره‌برداری با توجه به اهداف و هزینه‌ها می‌توانند در نظر گرفته شوند، با این حال در این مقاله طبق پیشنهاد مرجع [۱] دو حالت بهره‌برداری به تفصیل بررسی شده است. در حالت اول میزان اهمیت دو هدف اول در رابطه (۹) به یک اندازه است، و در حالت دوم برای هزینه پوشش باتری وزن بیش‌تری اختصاص داده شده و وزن دیزل ژنراتور صفر است. مقادیر این ضرایب در جدول ۲ مشخص شده است.

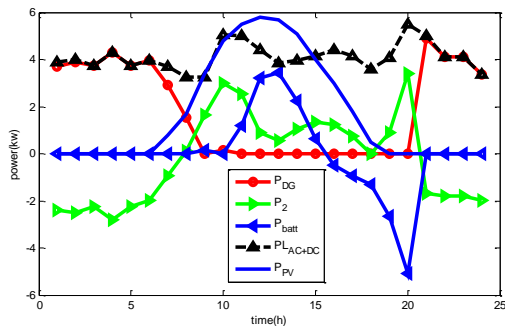
جدول ۲: ضرایب وزنی برای دو حالت مطالعه

حالت بهره‌برداری	w_1	w_2	w_3	w_4
Case1	۰/۴	۰/۴	۰/۱	۰/۱
Case2	صفر	۰/۸	۰/۱	۰/۱

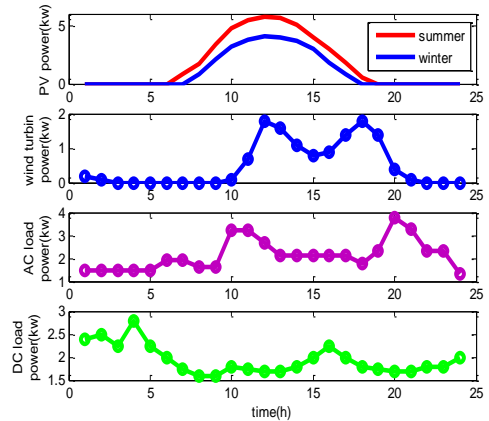
پخش بار سیستم برای مقادیر ساعتی تولید توان سیستم فتوولتائیک در فصل تابستان و ضرایب وزنی case1 و case2 در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴: پخش بار بهینه برای داده‌های تابشی تابستان و ضرایب وزنی case1



شکل ۵: پخش بار بهینه برای داده‌های تابشی تابستان و ضرایب وزنی case2



شکل ۳: مقادیر تقاضای بار و تولید انرژی پیش‌بینی شده

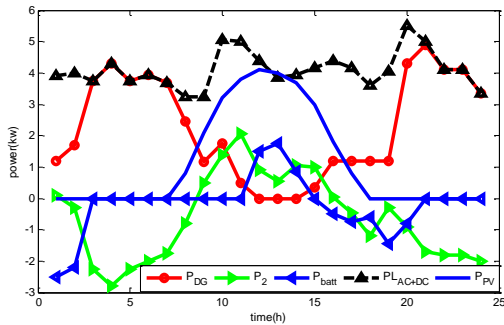
جدول ۱ اطلاعات مربوط به سیستم ترکیبی انرژی الکتریکی شامل سیستم ذخیره ساز انرژی را نشان می‌دهد. این اطلاعات از [۱] و [۲۰] اتخاذ و برای ایجاد سیستم ترکیبی به نحو مناسبی با هم ادغام شده‌اند.

جدول ۱: اطلاعات مربوط به سیستم ترکیبی

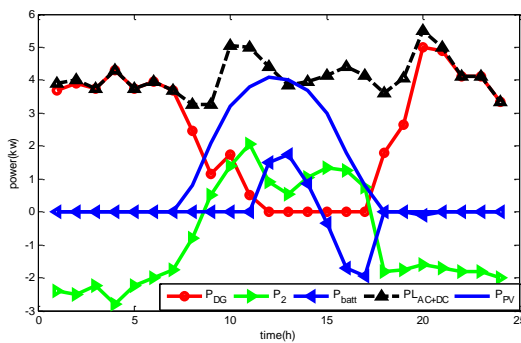
پارامتر	مقدار
ظرفیت باتری	۴۰ kWh
بازده حالت شارژ	٪۸۵
بازده حالت دشارژ	٪۸۵
حداقل وضعیت شارژ	۰/۵
حداکثر وضعیت شارژ	۱
مقدار اولیه شارژ	۰/۶
بالاترین مقدار دشارژ باتری	٪۵۰
a	۰/۲۴۶\$/h
b	۰/۱\$/kWh
هزینه سوخت	۱/۲\$/لیتر
ظرفیت دیزل ژنراتور	۵ kW
مساحت سیستم فتوولتائیک	۴۷ مترمربع
هزینه اولیه دیزل ژنراتور	۵۵۰\$/kW
هزینه اولیه توربین بادی	۶۰۰\$/kW
هزینه اولیه باتری اسید سرب	۶۵\$/kWh
هزینه اولیه سیستم فتوولتائیک	۸۴۰\$/m ²
نرخ تورم اقتصادی	٪۵
عمر مفید توربین بادی	۲۰ سال
عمر مفید دیزل ژنراتور	۵ سال
عمر مفید سیستم فتوولتائیک	۲۰ سال

۵-۱ نتایج حاصل از پخش بار سیستم

برای پخش بار بهینه بین اجزای کنترلی سیستم، با توجه به روش حل مسئله بهینه‌سازی پیشنهاد شده، لازم بود تابع هدف به صورت تک هدفه تعریف شود. با توجه به اینکه اهداف مسئله شامل دو هدف کمینه‌سازی سوخت مصرفی و استفاده از باتری و دو هدف بیشینه‌سازی استفاده از توربین بادی و سیستم فتوولتائیک است، با استفاده از روش وزن‌دهی مسئله به صورت یک تابع تک هدفه طبق



شکل ۶: پخش بار بهینه برای داده‌های تابشی زمستان و ضرایب وزنی case1



شکل ۷: پخش بار بهینه برای داده‌های تابشی زمستان و ضرایب وزنی case2

۵-۲- مقایسه اقتصادی با استفاده از نتایج پخش بار بهینه

میزان هزینه سالیانه برای اجزایی چون دیزل ژنراتور، سیستم فتوولتائیک و توربین بادی را می‌توان با در اختیار داشتن هزینه سرمایه‌گذاری اولیه شامل هزینه خرید و نصب، طول عمر مفید اجزا و نرخ تورم سالیانه طبق رابطه (۱۹) برای هر یک از اجزا به‌دست آورد.

$$C_{cpt} = \frac{i(1+i)^n P}{(1+i)^n - 1} \quad (19)$$

در این رابطه C_{cpt} هزینه سرمایه‌گذاری سالیانه برای اجزای سیستم ترکیبی است. P هزینه سرمایه‌گذاری اولیه اجزا و i و n به ترتیب نرخ تورم اقتصادی و طول عمر مفید اجزای سیستم هستند [۲۱، ۲۲]. البته هزینه تعمیر و نگهداری این اجزا با توجه به اینکه شامل درصد کمی از هزینه سالیانه می‌شود و به‌صورت مقدار ثابت برای تمام شرایط مورد مطالعه به هزینه کل اضافه می‌شود، ناچیز بوده و در نظر گرفته نمی‌شود. هزینه بعدی مربوط به سوخت مصرفی دیزل ژنراتور است که با توجه به نتایج مدیریت بهینه تولید، مقدار هزینه سوخت مصرفی به‌دست می‌آید. از روی نتایج مدیریت بهینه تولید، تعداد سیکل‌های شارژ و دشارژ باتری را به‌دست آورده و با نسبت‌گیری از تعداد سیکل‌های تا خرابی باتری که توسط سازنده مشخص می‌شود، هزینه باتری محاسبه می‌شود. هزینه تأمین تقاضای بار سالیانه با جمع کردن این هزینه‌ها به‌دست می‌آید. در شکل ۸ هزینه تأمین تقاضای بار سالیانه برای دو فصل و دو حالت ضرایب وزنی نشان داده شده است.

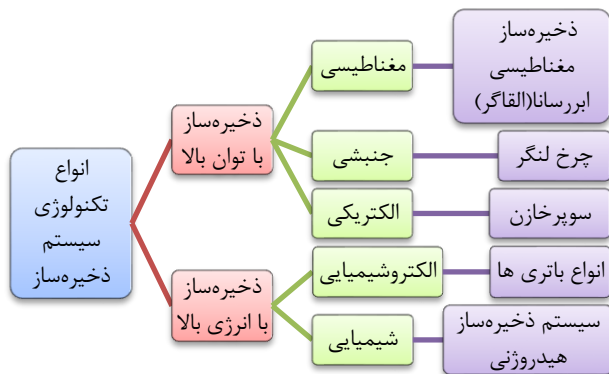
البته در این شکل‌ها برای بهتر مشخص شدن مقادیر متغیرهای کنترلی، تولید ساعتی توربین بادی نشان داده نشده است. شرط روشن شدن دیزل ژنراتور که عبارت بود از آن که مجموع توان‌های تولیدی توربین بادی و سیستم فتوولتائیک و توان ذخیره شده در باتری نتوانند تقاضای بار را تأمین کنند، در نتایج روشن می‌باشد. نکته قابل توجه در مقایسه شکل‌های ۴ و ۵ این است که با کاهش ضریب وزنی مربوط به دیزل ژنراتور در case2، استفاده بیش‌تری از دیزل ژنراتور شده است و دلیل این امر آن است که با کاهش ضریب وزنی مربوط به دیزل ژنراتور، اهمیت کمینه‌سازی سوخت مصرفی آن کاهش و مقدار سوخت مصرفی و هزینه آن افزایش یافته است.

در شکل‌های ۶ و ۷ نتایج حاصل از مدیریت تولید برای داده‌های تابشی فصل زمستان برای دو حالت از ضرایب وزنی نشان داده شده است. در شکل ۶ با کاهش تولید سیستم فتوولتائیک، برای تأمین کامل تقاضای بار استفاده بیش‌تری از دیزل ژنراتور در مقایسه با شکل ۴ شده است. با کاهش ضریب وزنی دیزل ژنراتور در شکل ۷ در کنار کاهش تولید سیستم فتوولتائیک، توان دریافتی از دیزل ژنراتور در مقایسه با حالات قبل بیش‌ترین مقدار را دارد و استفاده از باتری با توجه به افزایش ضریب وزنی مربوط کم‌ترین مقدار را دارا است به‌نحوی که در ۱۱ ساعت اول از باتری استفاده نمی‌شود. با دقت در شکل‌ها مشخص می‌شود که با افزایش ضریب وزنی مربوط به باتری در case2 تعداد تغییر وضعیت حالت شارژ و دشارژ باتری به ۲ بار کاهش می‌یابد، در حالی که برای حالت case1 تغییر وضعیت حالت شارژ و دشارژ باتری ۳ بار صورت می‌گیرد.

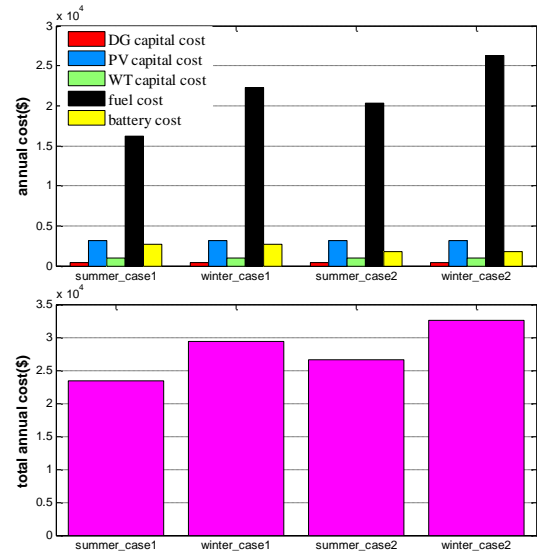
نکته قابل توجه دیگر در بیشتر بودن مقدار دشارژ در ساعت ۲۰م در case2 نسبت به case1 است که با توجه به افزایش ضریب وزنی مربوط به باتری در case2 انتظار می‌رفت این وضعیت برعکس باشد. علت این است که در ساعت ۲۰م مقدار توان ذخیره‌شده در باتری برای case2 به حدی است که با اضافه شدن تولید منابع تجدیدپذیر می‌تواند تقاضای بار را تأمین کند به همین دلیل با توجه به توضیحات داده شده در این شرایط دیزل ژنراتور در حالت خاموش قرار می‌گیرد و باتری باید کمبود توان منابع تجدیدپذیر برای تأمین تقاضای بار را جبران کند؛ ولی در case1 به دلیل این‌که برای تأمین تقاضای بار باید حتماً دیزل ژنراتور روشن شود، پخش بار بهینه بین این دو منبع صورت می‌گیرد و این امر موجب می‌شود که فقط بخشی از کمبود توان جهت تأمین تقاضای بار توسط باتری صورت گیرد. به همین دلیل دشارژ باتری در ساعت ۲۰م برای case1 کم‌تر از case2 است. با مقایسه شکل‌ها برای دو نوع ضرایب وزنی در دو فصل تابستان و زمستان مشخص می‌شود که با کاهش ضریب وزنی دیزل ژنراتور، استفاده از آن بیشتر شده و در عین حال استفاده از باتری کاهش یافته است. برای تشخیص شرایط بهره‌برداری با هزینه کم، لازم است مقایسه اقتصادی بین شرایط مختلف انجام شود که به این امر در بخش بعد پرداخته شده است.

هزینه کل تأمین تقاضای بار شامل هزینه اولیه دیزل ژنراتور و هزینه سوخت است. در مرحله بعد یک منبع تجدیدپذیر انرژی الکتریکی (سیستم فتوولتاییک) به همراه دیزل ژنراتور تقاضای بار روزانه را تأمین می‌کنند. با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود که مقدار کاهش هزینه سوخت دیزل ژنراتور به علت تأمین بخشی از تقاضای بار توسط سیستم فتوولتاییک در مقایسه با هزینه اولیه سیستم فتوولتاییک بیشتر است. در نتیجه استفاده از سیستم فتوولتاییک با وجود هزینه اولیه، موجب کاهش هزینه سالیانه تأمین تقاضای بار شده است. اضافه شدن باتری به عنوان یک سیستم ذخیره ساز انرژی نیز چنین شرایطی دارد به طوری که با ذخیره سازی اضافه تولید توان سیستم فتوولتاییک توسط باتری و استفاده از این انرژی ذخیره شده در زمان نیاز، موجب کاهش هزینه سالیانه تأمین تقاضای بار حتی با در نظر گرفتن هزینه باتری شده است. همچنین با اضافه شدن توربین بادی، یک سیستم ترکیبی انرژی الکتریکی نظیر شکل ۱ خواهیم داشت که کمترین هزینه را جهت تأمین تقاضای بار روزانه در مقایسه با سایر شرایط بهره‌برداری دارد. در صورت استفاده از اجزای متنوع سیستم ترکیبی هزینه اولیه بالا می‌رود ولی با توجه نتایج مشاهده می‌شود هزینه سالیانه تأمین تقاضای بار کاهش می‌یابد.

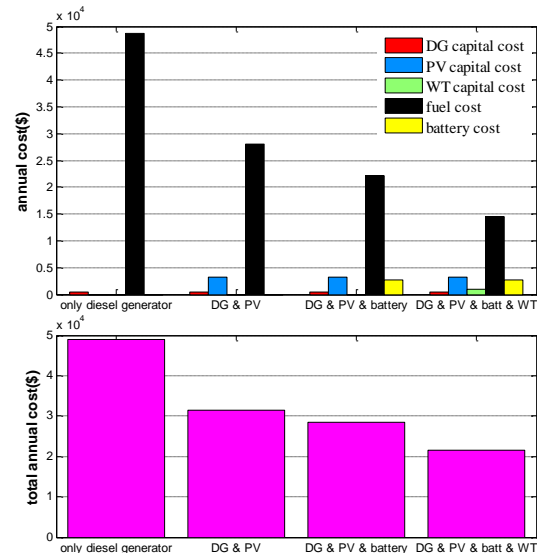
باتری‌ها که در تقسیم‌بندی انواع تکنولوژی سیستم ذخیره ساز جزو تکنولوژی‌های ذخیره ساز الکتروشیمیایی انرژی محسوب می‌شوند در این مقاله مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند (شکل ۱۰) [۲۳]. از بحث‌های مهم در طراحی و بررسی سیستم‌های ترکیبی انتخاب نوع باتری از میان گزینه‌های مختلف برای سیستم ترکیبی است به گونه‌ای که انواع باتری‌ها با محدودیت‌های شارژ و دشارژ متفاوت موجب تغییر در نتایج پخش بار روزانه سیستم ترکیبی شده و با تعداد سیکل‌های تا خرابی باتری و هزینه‌های اولیه خرید متفاوت موجب تغییر در هزینه سالیانه باتری می‌شوند. با توجه به کنترل‌پذیر بودن و الویت باتری نسبت به دیزل ژنراتور در تأمین کمبود تقاضای بار و همچنین امکان وجود شرایط متنوع استفاده از باتری، در این مقاله حضور سیستم ذخیره ساز باتری در سیستم ترکیبی از دید پخش بار بهینه بررسی شده است.



شکل ۱۰: تقسیم‌بندی انواع تکنولوژی سیستم ذخیره ساز [۲۳]



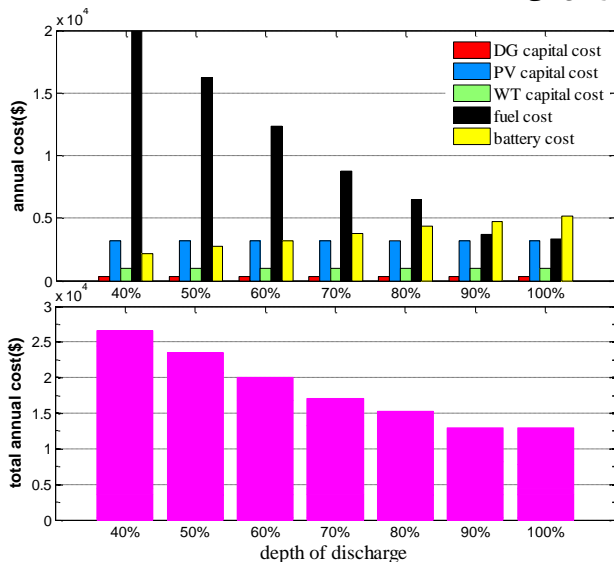
شکل ۸: هزینه سالیانه تأمین تقاضای بار در فصل‌های تابستان و زمستان با استفاده از دو نوع ضرایب وزنی



شکل ۹: مقایسه هزینه سالیانه تأمین تقاضای در تابستان و ضریب وزنی case1 با اضافه شدن هر یک از اجزای سیستم ترکیبی

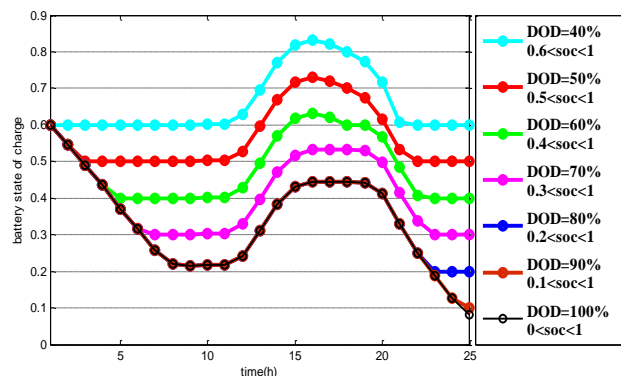
برای داده‌های تابشی تابستان و ضرایب وزنی case1 با در نظر گرفتن انواع شرایط بهره‌برداری از قبیل فقط دیزل ژنراتور، دیزل ژنراتور و سیستم فتوولتاییک، دیزل ژنراتور و سیستم فتوولتاییک و باتری و نهایتاً استفاده کامل از اجزای سیستم ترکیبی معرفی شده، مدیریت بهینه تولید انجام و نتایج در شکل ۹ ارائه شده است. با مقایسه هزینه‌ها در شکل ۹ مشاهده می‌شود که در استفاده از تمام اجزای سیستم ترکیبی هزینه تأمین تقاضای بار سالیانه کمترین مقدار را دارد. روند کاهش هزینه کل سالیانه تأمین تقاضای بار با اضافه شدن اجزای سیستم ترکیبی خود می‌تواند دلیلی بر صحت پخش بار بهینه انجام شده باشد. برای شرایط تأمین تقاضای بار توسط دیزل ژنراتور

دشارژ باتری و کاهش تعداد سیکل‌های تا خرابی باتری، هزینه سوخت به‌طور قابل توجه و با سرعت بیش‌تری کاهش می‌یابد به‌طوری که باعث کاهش هزینه کل تأمین تقاضای انرژی الکتریکی مصرف‌کنندگان می‌شود. این کاهش هزینه‌ها تا عمق دشارژ ۹۰٪ اتفاق می‌افتد. در عمق دشارژ ۱۰۰٪ کاهش هزینه سوخت به اندازه‌ای کم است که با اضافه شدن هزینه باتری افزایش یافته نسبت به عمق دشارژ ۹۰٪، هزینه کل تأمین انرژی الکتریکی نسبت به حالت قبل افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱: مقایسه هزینه سالانه تأمین تقاضای بار به ازای عمق دشارژهای مختلف

پس با توجه به نتایج می‌توان نتیجه گرفت که باتری اسید سرب در این سیستم ترکیبی در عمق دشارژ ۹۰٪ حالت بهینه بهره‌برداری را دارا است. در شکل ۱۲ وضعیت شارژ باتری اسید سرب به‌ازای عمق دشارژهای مجاز مختلف در طی دوره ۲۴ ساعته نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است الگوریتم بهینه‌سازی به جز برای DOD=۹۰٪ و DOD=۱۰۰٪ در دیگر شرایط بهره‌برداری برای انجام پخش بار بین اجزای سیستم ترکیبی با محدودیت دشارژ باتری مواجه است.



شکل ۱۲: وضعیت شارژ باتری اسید سرب به ازای عمق دشارژهای مختلف

در جدول ۳ اطلاعات مربوط به باتری از نوع اسید سرب ارائه شده است. در تمام پخش بارهای انجام‌شده از اطلاعات مربوط به این نوع باتری مطابق جدول ۱ استفاده شده است. برای هر نوع باتری روش‌های بهره‌برداری متفاوتی وجود دارد به‌طوری‌که با تغییر محدودیت‌های شارژ و دشارژ باتری نتایج پخش بار بهینه سیستم تغییر خواهد کرد. بدین ترتیب هزینه سوخت دیزل ژنراتور نیز با تغییر نتایج حاصل از پخش بار می‌تواند تغییر کند. همچنین تعداد سیکل‌ها تا خراب شدن هر نوع باتری با بالاترین مقدار دشارژ باتری رابطه عکس دارد، بدین صورت که با افزایش عمق دشارژ باتری عمر مفید باتری کاهش می‌یابد. در نتیجه با تغییر محدودیت‌های شارژ و دشارژ از دو طریق هزینه سالیانه تأمین تقاضای بار تغییر می‌کند. با انجام پخش بار بهینه به‌ازای عمق دشارژهای مختلف برای باتری اسید سرب و محاسبه هزینه کل تأمین تقاضای بار سالیانه می‌توان حالت بهینه بهره‌برداری باتری را به‌دست آورد. در جدول ۳ اطلاعات مربوط به تعداد سیکل‌های تا خراب شدن باتری به‌ازای عمق دشارژهای مختلف ارائه شده است [۲۴]. هزینه تأمین تقاضای بار در شرایط مختلف بهره‌برداری از باتری اسید سرب با انجام پخش بار بهینه برای داده‌های تابشی فصل تابستان و ضرایب وزنی case1 نیز در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: اطلاعات مربوط به انواع شرایط بهره‌برداری باتری اسید سرب

عمق دشارژ باتری	تعداد سیکل‌ها تا خرابی	وضعیت اولیه شارژ باتری	حداقل وضعیت شارژ	حداکثر وضعیت شارژ	هزینه کل سالیانه تأمین تقاضای بار (\$))
۴۰٪	۱۳۰۰	۰/۶	۰/۶	۱	۲۶۶۳۰
۵۰٪	۱۰۵۰	۰/۶	۰/۵	۱	۲۳۴۴۰
۶۰٪	۹۰۰	۰/۶	۰/۴	۱	۱۹۹۵۸
۷۰٪	۷۵۰	۰/۶	۰/۳	۱	۱۷۰۳۸
۸۰٪	۶۵۰	۰/۶	۰/۲	۱	۱۵۳۱۵
۹۰٪	۶۰۰	۰/۶	۰/۱	۱	۱۲۸۹۹
۱۰۰٪	۵۵۰	۰/۶	صفر	۱	۱۳۰۹۶

همان‌گونه که از جدول ۳ مشخص است حالت بهینه بهره‌برداری از باتری اسید سرب در سیستم ترکیبی در عمق دشارژ ۹۰٪ اتفاق می‌افتد. در شکل ۱۱ هزینه سالیانه تأمین انرژی الکتریکی به‌صورت نمودار نشان داده شده است. با بررسی نمودار مشخص می‌شود که تا عمق دشارژ ۹۰٪ رابطه معکوس بین هزینه باتری و هزینه سوخت وجود دارد به‌نحوی که با افزایش هزینه باتری با توجه به افزایش عمق

نسبت به تعداد سیکل‌های کارکرد مفید باتری به‌دست آمده و با اضافه کردن هزینه‌های اولیه سالیانه هر یک از اجزای سیستم ترکیبی، هزینه کل تأمین تقاضای بار سالیانه به‌دست آمده است. با توجه به هزینه‌های محاسبه‌شده برای تأمین تقاضای بار سیستم ترکیبی، باتری لیتیومی بهترین گزینه برای استفاده در این سیستم ترکیبی است. در شکل ۱۳ هزینه سالیانه تأمین تقاضای بار سیستم ترکیبی به‌صورت نمودار نشان داده شده است. در این نمودار و در محاسبه هزینه کل تأمین تقاضای بار سیستم ترکیبی، با توجه به ناچیز بودن و ثابت بودن هزینه تعمیر و نگهداری از آن صرف‌نظر شده است.

جدول ۵: اطلاعات مربوط به سه نوع باتری

	باتری لیتیومی	باتری اسید سرب	باتری NIMH
هزینه اولیه خرید باتری	۱۲۸\$/kWh	۶۵\$/kWh	۱۹۲\$/kWh
تعداد سیکل‌های تا خرابی	۲۲۰۰	۶۰۰	۱۰۰۰
بالاترین مقدار دشارژ باتری	%۹۵	%۹۰	%۷۵
حداکثر وضعیت شارژ	۱	۱	۱
حداقل وضعیت شارژ	۰/۰۵	۰/۱	۰/۲۵
هزینه سالیانه باتری (\$)	۲۵۴۷	۴۶۷۲	۸۴۰۹
هزینه کل سالیانه تأمین تقاضا (\$)	۱۰۳۵۸	۱۲۸۹۹	۲۰۳۸۵

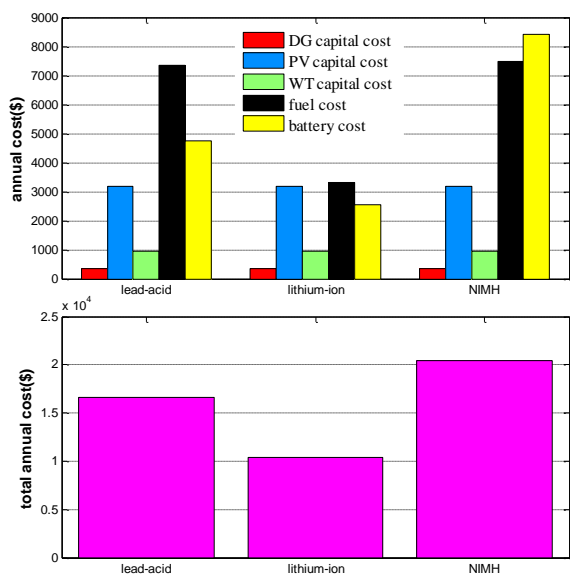
همان‌طور که اشاره شد با تغییر شرایط بهره‌برداری از سیستم ترکیبی حالت بهینه بهره‌برداری باتری اسید سرب نیز تغییر خواهد کرد به‌نحوی که با توجه به جدول ۴ با ایجاد تغییر فقط در انرژی تابشی خورشید، برای داده‌های تابشی زمستان حالت بهینه بهره‌برداری از باتری اسید سرب در عمق دشارژ ۱۰۰٪ و برای داده‌های تابشی با ۱/۲ برابر داده‌های تابشی در نظر گرفته شده برای فصل تابستان این حالت بهینه در عمق دشارژ ۸۰٪ برای باتری اسید سرب اتفاق می‌افتد.

جدول ۴: حالت بهینه بهره‌برداری از باتری اسید سرب با تغییر شرایط تابش

عمق دشارژ باتری	تعداد سیکل‌ها تا خرابی	هزینه کل سالیانه برای داده‌های تابشی تابستان (\$)	هزینه کل سالیانه برای داده‌های تابشی زمستان (\$)	هزینه کل سالیانه برای داده‌های تابشی تابستان ۱/۲× (\$)
%۴۰	۱۳۰۰	۲۶۶۳۰	۳۲۹۳۰	۲۱۹۰۷
%۵۰	۱۰۵۰	۲۳۴۴۰	۲۹۴۲۴	۱۸۹۱۱
%۶۰	۹۰۰	۱۹۹۵۸	۲۶۹۱۱	۱۶۰۴۹
%۷۰	۷۵۰	۱۷۰۳۸	۲۴۸۲۹	۱۳۴۴۰
%۸۰	۶۵۰	۱۵۳۱۵	۲۴۸۲۶	۱۲۰۵۷
%۹۰	۶۰۰	۱۲۸۹۹	۲۰۵۸۰	۱۲۴۴۲
%۱۰۰	۵۵۰	۱۳۰۹۶	۱۷۵۸۹	۱۲۸۵۳

درکنار بحث مفصل انجام‌شده در مورد حضور باتری اسید سرب به عنوان سیستم ذخیره‌ساز انرژی در سیستم ترکیبی بررسی دیگری که می‌توان در مورد باتری‌ها انجام داد تا بتوان با کم‌ترین هزینه تقاضای بار را تأمین کرد، انتخاب نوع باتری با توجه به محدودیت‌های شارژ و دشارژ و هزینه‌های متفاوت آن‌ها است. در جدول ۵ اطلاعات مربوط به سه نوع باتری و هزینه کل تأمین انرژی الکتریکی سیستم ترکیبی در حضور هر یک از سه نوع باتری نشان داده شده است. در این جدول از اطلاعات شرایط بهینه بهره‌برداری باتری اسید سرب که در جدول ۳ مشخص است، استفاده شده است. همچنین اطلاعات مربوط به شرایط مناسب بهره‌برداری باتری‌های نیکلی و لیتیومی از [۲۵] استخراج شده است.

با انجام پخش بار بهینه برای سیستم ترکیبی به‌ازای هر یک از سه نوع باتری معرفی‌شده در جدول ۵ با ظرفیت‌های مشابه ۴۰kWh، و با در نظر گرفتن قیود شارژ و دشارژ هر یک از باتری‌ها و اطلاعات تابشی مربوط به فصل تابستان و ضرایب وزنی case1 هزینه سوخت تأمین تقاضای بار روزانه در استفاده از هر نوع باتری به‌دست آمده است. همچنین محاسبه هزینه سالیانه باتری با استفاده از هزینه اولیه خرید و درصدگیری از تعداد سیکل‌های شارژ و دشارژ باتری در طول روز



شکل ۱۳: هزینه سالیانه تأمین تقاضای بار با انواع باتری با داده‌های تابشی تابستان و ضرایب وزنی case1

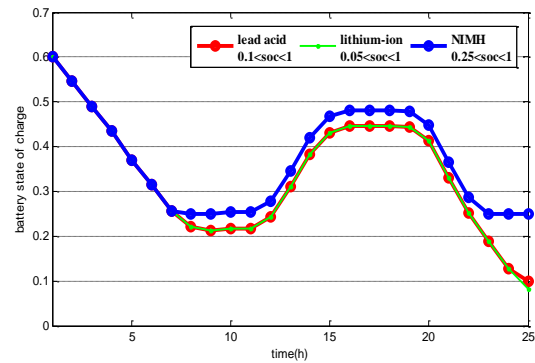
تجدیدپذیر توربین بادی و سیستم فتوولتائیک با در نظر گرفتن هزینه‌های سرمایه‌گذاری آن‌ها نسبت به حالتی که فقط از دیزل ژنراتور استفاده شود ۵۵ درصد کاهش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی در سیستم‌های ترکیبی جدا از شبکه نه تنها با کاهش مصرف سوخت فسیلی آلودگی زیست محیطی را کاهش می‌دهد بلکه باعث کاهش هزینه‌های تأمین تقاضای بار روزانه نیز می‌شود.

اثر بهره‌برداری مناسب از باتری اسید سرب در هزینه کل تأمین تقاضای بار و تأثیر پارامترهای دیگر بر روی عمق دشارژ بهینه نشان داده شده و اثبات گردیده که عمق دشارژ بهینه باتری نمی‌تواند جواب یکتا داشته باشد و باید برحسب شرایط سیستم ترکیبی عمق دشارژ مناسب باتری انتخاب شود. در پایان با توجه به اطلاعات در دسترس انواع دیگر باتری موجود در بازار و براساس محدوده عمق دشارژ مناسب پیشنهادی در سایر مراجع برای این باتری‌ها، تأثیر انتخاب باتری مناسب برای سیستم ترکیبی انرژی الکتریکی از بین گزینه‌های مختلف در کاهش هزینه سالیانه تأمین تقاضای بار نشان داده شده است.

مراجع

- [1] H. Tazvinga, B. Zhu and X. Xia, "Optimal power flow management for distributed energy resources with batteries," *Energy Conversion and Management*, vol. 102, no. 15, pp. 104-110, September 2015.
- [2] R. Dufo-Lopez, J. L. Bernal-Agustin, J. M. Yusta-Loyo, J. A. Domnguez-Navarro, I. J. Ramirez-Rosado, J. Lujano and I. Aso, "Multiobjective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV-wind-diesel systems with batteries storage," *Applied Energy*, vol. 88, no. 11, pp. 4033-4041, November 2011.
- [3] A. M. Elaiw, X. Xia and A. M. Shehata, "Application of model predictive control to optimal dynamic dispatch of generation with emission limitations," *Electric Power System Research*, vol. 84, no. 1, pp. 31-44, March 2012.
- [4] H. Tazvinga, X. Xia and B. Zhu, "Optimal energy management strategy for distributed energy resources," *Energy Procedia*, vol. 61, pp. 1331 - 1334, 2014.
- [5] H. Tazvinga, X. Xia and J. Zhang, "Minimum cost solution of photovoltaic-diesel-battery hybrid power systems for remote consumers," *Solar Energy*, vol. 96, pp. 292-299, October 2013.
- [6] M. Rezasudin Basir Khan, R. Jidin and J. Pasupuleti, "Multi-agent based distributed control architecture for microgrid energy management and optimization," *Energy Conversion and Management*, vol. 112, pp. 288-307, March 2016.
- [7] K. Kusakana, "Optimal scheduling for distributed hybrid system with pumped hydro storage," *Energy Conversion and Management*, vol. 111, pp. 253-260, March 2016.
- [8] H. Tazvinga, B. Zhu and X. Xia, "Energy dispatch strategy for a photovoltaic-wind-diesel-battery hybrid power system," *Solar Energy*, vol. 108, pp. 412-20, October 2014.
- [9] S. Ashok, "Optimised model for community-based hybrid energy system," *Renewable Energy*, vol. 32, pp. 1155-1164, June 2007.
- [10] E. Koutroulis, D. Kolokotsa, A. Potirakis and K. Kalaitzakis, "Methodology for optimal sizing of stand-

با توجه به شکل ۱۳ مشخص است که با در نظر گرفتن انواع دیگر باتری‌ها به جای باتری لیتیومی هزینه سالیانه باتری افزایش می‌یابد. به دلیل کم‌تر بودن محدوده شارژ و دشارژ باتری‌های اسیدسرب و نیکلی در مقایسه با باتری لیتیومی، استفاده از این نوع باتری‌ها موجب افزایش استفاده از دیزل ژنراتور در پخش بار بهینه بین اجزا شده و در نتیجه باعث افزایش هزینه‌های مربوط به سوخت می‌شود. در شکل ۱۴ وضعیت شارژ باتری‌های معرفی شده در جدول ۵ برای اطلاعات تابشی فصل تابستان و ضرایب وزنی case1 نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ۱۴ مشخص است در پخش بار بهینه بین اجزا وضعیت شارژ باتری از محدوده مجاز خارج نمی‌شود. با بررسی دقیق‌تر این شکل مشاهده می‌شود که برای باتری نیکلی در طی انجام پخش بار بهینه با محدودیت دشارژ مواجه شده است. این امر بیانگر این موضوع است که باتری بیش از این مقدار توانایی تأمین تقاضای بار را ندارد و این شرایط تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که با شارژ مجدد باتری توسط اضافه تولید منابع تجدیدپذیر وضعیت شارژ باتری بهبود یابد.



شکل ۱۴: وضعیت شارژ سه نوع باتری در تأمین تقاضای بار روزانه

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله شیوه بهینه‌سازی تقسیم تولید بین منابع مختلف برای تأمین تقاضای بار الکتریکی روزانه در یک سیستم تولید انرژی ترکیبی جدا از شبکه با حضور سیستم ذخیره‌ساز انرژی که دارای منابع تولید متفاوت می‌باشد، بررسی شده است. در یک سیستم ترکیبی جدا از شبکه استفاده از دیزل ژنراتور و باتری در کنار منابع تجدیدپذیر انرژی جهت تأمین تقاضای بار روزانه ضروری است. حال آن که با استفاده از پخش بار بهینه هزینه سوخت و باتری را برای یک سیستم ترکیبی می‌توان کاهش داد. با داده‌های تابشی فصل تابستان و ضریب وزنی بالا برای دیزل ژنراتور که موجب می‌شود در حل مسئله بهینه‌سازی کم‌تر از آن استفاده شود، هزینه تأمین تقاضای بار روزانه به کم‌ترین مقدار خود می‌رسد. درحالی‌که برای فصل زمستان و ضریب وزنی صفر برای دیزل ژنراتور بیش‌ترین مقدار هزینه برای تأمین تقاضای بار روزانه باید صرف شود. همچنین تأثیر استفاده از سیستم ذخیره‌ساز و منابع تجدیدپذیر انرژی بر روی هزینه‌ها بررسی شده و نشان داده شده است که هزینه تأمین تقاضای بار سالیانه در استفاده از باتری و دو نوع منبع

- Journal of Energy in Southern Africa*, vol. 18, no. 2, pp. 16-25, May 2007.
- [18] M. Taufiqul Arif, M. T. Amanullah and A. B. M. Shawkat Ali. *Estimation of Energy Storage and Its Feasibility Analysis*. Chapter 2, Energy Storage – Technologies and Applications, <http://dx.doi.org/10.5772/52218>, 2013.
- [19] C. Keles, A. Karabiber, M. Akcin, A. Kaygusuz and B. Alagoz, “A smart building power management concept: Smart socket applications with DC distribution,” *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 64, pp. 679–688, January 2015.
- [20] N. Achaibou, M. Haddadi and A. Malek, “Lead acid batteries simulation including experimental validation,” *Journal of Power Sources*, vol. 185, no. 2, pp. 1484–91, December 2008.
- [21] A. Maleki, M. Ameri and F. Keynia, “Scrutiny of multifarious particle swarm optimization for finding the optimal size of a PV/wind/battery hybrid system,” *Renewable Energy*, vol. 80, pp. 552-563, February 2015.
- [22] A. Maleki and F. Pourfayaz, “Optimal sizing of autonomous hybrid photovoltaic/wind/battery power system with LPSP technology by using evolutionary algorithms,” *Solar Energy*, vol. 115, pp. 471–483, March 2015.
- [23] L. W. Chong, Y. W. Wong, R. K. Rajkumar, R. Rajkumar and D. Isa, “Hybrid energy storage systems and control strategies for stand-alone renewable energy power systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 66, pp. 174–189, December 2016.
- [24] H. Binder, T. Cronin, P. Lundsager, JF. Manwell, U. Abdulwahid and I. Baring-Gould. *Lifetime modelling of lead acid batteries*. Technical report Roskilde, Denmark, Riso National Laboratory, April 2005.
- [25] C. Zhou, K. Qian, M. Allan and W. Zhou, “Modeling of the cost of EV battery wear due to V2G application in power systems,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 4, pp. 1041–1050, December 2011.
- alone photovoltaic/ wind-generator systems using genetic algorithms,” *Solar Energy*, vol. 80, pp. 1072–1088, September 2006.
- [11] S. R. Vosen and J. O. Keller, “Hybrid energy storage systems for standalone electric power systems: optimization of system performance and cost through control strategies,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 24, no. 12, pp. 1139–1156, December 1999.
- [12] R. E. Ciez and J. F. Whitacre, “Comparative techno-economic analysis of hybrid micro-grid systems utilizing different battery types,” *Energy Conversion and Management*, vol. 112, pp. 435–444, March 2016.
- [13] M. Muselli, G. Notton and A. Louche, “Design of hybrid-photovoltaic power generator, with optimization of energy management,” *Solar Energy*, vol. 65, no. 3, pp. 143–157, February 1999.
- [۱۴] ح. شکری و س. نجفی روادانق، «حل مسئله مشارکت بهینه واحدهای نیروگاهی در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۵، شماره ۱، صفحه ۲۹–۴۲، بهار ۱۳۹۴.
- [۱۵] م. جوادی، س.م. میرحسینی مقدم و م. مرزبند، «مدیریت بهینه انرژی در ریزشکبه‌ها در بازار خرده‌فروشی بر پایه روش تئوری بازی غیرهمکارانه با در نظر گرفتن عدم قطعیت»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۶، شماره ۱، صفحه ۶۳–۷۴، بهار ۱۳۹۵.
- [16] T. Hove and H. Tazvinga, “A techno-economic model for optimizing component sizing and energy dispatch strategy for PV–diesel–battery hybrid power systems,” *Journal of Energy in Southern Africa*, vol. 23, no. 4, pp. 18–28, November 2012.
- [17] B. Bekker, “Irradiation and PV array energy output, cost, and optimal positioning estimation for South Africa,”

زیرنویس‌ها

- ¹ Model Predictive Control
- ² Quasi-Newton algorithm
- ³ Genetic Algorithm
- ⁴ State Of Charge
- ⁵ Depth Of Discharge
- ⁶ Quadratic Programming