

برنامه‌ریزی تصادفی ریزشبکه جزیره‌ای در حضور سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی و برنامه پاسخ‌گویی بار

علی مهدی‌زاده^۱، دانشجوی دکتری؛ نوید تقی‌زادگان کلانتری^۲، استادیار

۱- گروه مهندسی برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهید مدنی آذربایجان - تبریز - ایران - alimehdizadee@gmail.com

۲- گروه مهندسی برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهید مدنی آذربایجان - تبریز - ایران - taghizadegan@azaruniv.edu

چکیده: ریزشبکه یکی از مباحث جدید در شبکه‌های توزیع می‌باشد که انرژی الکتریکی به صورت محلی با منابع انرژی پراکنده در سیستم ولتاژ پایین تأمین می‌شود. در این مقاله، ریزشبکه جزیره‌ای شامل توربین بادی و سلول‌های خورشیدی به عنوان منابع انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد. علاوه بر این، به دلیل عدم دسترسی به شبکه برق، این ریزشبکه از باتری‌های ذخیره‌ساز انرژی هم بهره می‌برد. بنابراین، این مقاله استراتژی مدیریت انرژی جدیدی برای ریزشبکه در حالت جزیره‌ای با استفاده از سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی که شامل الکترولایزر، تانک‌های هیدروژنی و پیل سوختی در حضور برنامه پاسخ‌گویی بار را پیشنهاد داده است. استراتژی مدیریت انرژی پیشنهادی بر اساس بهره‌برداری بهینه از منابع انرژی ریزشبکه با هدف حداقل کردن هزینه بهره‌برداری باتری، سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی، هزینه‌های مربوط به انرژی تأمین نشده و مازاد انرژی می‌باشد. همچنین، عدم قطعیت‌های بار، توان تولیدی توربین بادی و توان تولیدی سلول‌های خورشیدی با روش سناریو مدل‌سازی شده‌اند. علاوه بر این، برنامه پاسخ‌گویی بار با هدف مدیریت بار ریزشبکه و هموار کردن منحنی بار و در نتیجه کاهش هزینه بهره‌برداری پیشنهاد شده است. مدل پیشنهادی روی یک ریزشبکه با استفاده از نرم‌افزار GAMS شبیه‌سازی شده و نتایج نشان می‌دهد که استفاده از سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی و برنامه پاسخ‌گویی بار باعث کاهش هزینه بهره‌برداری ریزشبکه در حالت جزیره‌ای می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ریزشبکه، توربین بادی، سلول‌های خورشیدی، سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی و برنامه پاسخ‌گویی بار.

A Stochastic Programming of Islanding Microgrid in the Presence of the Hydrogen Storage System and Demand Response Program

A. Mehdizadeh¹, PhD Student; N. Taghizadegan Kalantari², Assistant Professor

1- Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran, Email: alimehdizadee@gmail.com

2- Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran, Email: taghizadegan@azaruniv.edu

Abstract: Microgrid (MG) is one of the new topics in distribution networks in which electrical energy is locally supplied with distributed energy resources at the low voltage system. In this paper, islanding MG includes wind turbine and photovoltaic systems as renewable energy sources. Moreover, due to unavailability of power grid, the MG benefits energy storage batteries. Therefore, this paper proposes a new energy management strategy (EMS) for MG in islanding mode using the hydrogen storage system (HSS) which includes electrolyzer, hydrogen tanks and fuel cell (FC) in the presence of demand response program (DRP). The proposed EMS is based on the optimal operation of energy sources of MG with the objective of minimizing operating costs of batteries, HSS and the costs associated with excess and undelivered energy. Also, the uncertainties of demand, produced power of wind turbine and photovoltaic systems are modeled with scenario approach. Moreover, DRP is proposed with the objective of MG load management and flattening the load curve and thus reducing the operation cost. The proposed model is been simulated on a MG using GAMS software and the results show that by using HSS and DRP, the operation cost of MG in islanding mode is reduced.

Keywords: Microgrid, wind turbine, photovoltaic systems, hydrogen storage system and demand response program.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۲۷

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۱۳ و ۱۳۹۵/۰۴/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۲۳

نام نویسنده مسئول: نوید تقی‌زادگان کلانتری

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تبریز - دانشگاه شهید مدنی آذربایجان - دانشکده فنی و مهندسی - گروه مهندسی برق.

۱- مقدمه

بازار خرده‌فروشی برق بر پایه روش تئوری بازی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها^۱ در [۱۲] پیشنهاد شده است.

ریزشبکه توانایی عملکرد در دو موقعیت متفاوت را دارد: اول حالت نرمال متصل به شبکه و دوم در حالت جزیره‌ای^۲ [۱۳]. پیش‌بینی‌های دقیق علمی نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۴۰ بیش از ۲۵٪ انرژی الکتریکی توسط توربین بادی، بیش از ۲۰٪ توسط سلول‌های شیمیایی و حدود ۳۰٪ از انرژی الکتریکی توسط سلول‌های خورشیدی تولید خواهد شد [۱۴]. بنابراین، امکان استفاده گسترده از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر را فراهم می‌سازد [۱۵]. تولید متغیر انرژی‌های نو از قبیل توربین‌های بادی و سلول‌های خورشیدی ضرورت استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی را دو چندان می‌کند.

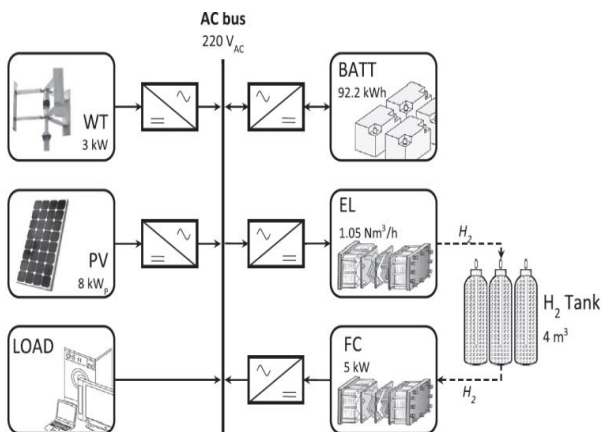
در میان سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، باتری‌ها رایج‌ترین گزینه برای ذخیره‌سازی کوتاه‌مدت هستند. با این‌حال، برای ذخیره‌سازی انرژی در درازمدت به‌دلیل چگالی کم ذخیره انرژی، خالی شدن باتری و خراب شدن، باتری‌ها گزینه نامناسبی می‌باشند [۱۶]. برای رفع معایب باتری‌های ذخیره‌ساز انرژی در درازمدت، استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی مبتنی بر فن‌آوری هیدروژن یکی از گزینه‌های جالب و جذابی است که موضوع مطالعات و تحقیقات در سال‌های اخیر شده است [۱۷-۱۹]. در سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی^۳، تولید توان اضافی انرژی‌های تجدیدپذیر را می‌توان به‌راحتی از طریق الکترولایز^{۱۱} به هیدروژن تبدیل کرده و آن را در مخازن تحت فشار در تانک‌های هیدروژنی ذخیره نمود و در صورت نیاز، هیدروژن ذخیره‌شده بعداً می‌تواند توسط پیل سوختی تولید برق نماید.

علاوه بر این، پس از تجدید ساختار در صنعت برق، برنامه پاسخ‌گویی بار^{۱۲} به‌دلیل تعددی از قبیل کاهش بار پیک و در نتیجه افزایش بار غیرپیک یا به‌عبارتی شیف‌ت بار از بارپیک به بار غیرپیک و افزایش بازده شبکه مورد توجه قرار گرفته است [۲۰-۲۱]. یکی از رایج‌ترین انواع برنامه پاسخ‌گویی بار، برنامه پاسخ‌گویی بار زمان استفاده^{۱۳} می‌باشد [۲۲]، یعنی با شیف‌ت بار از بازه‌های پرباری به بازه‌های کم‌باری باعث هموار شدن منحنی بار شده و در نتیجه باعث کاهش هزینه بهره‌برداری شبکه می‌شود. به‌طور کلی در ساعت‌های پیک به‌خاطر مصرف زیاد توان در یک ریزشبه شاید منابع انرژی‌های تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی نتواند بار را تأمین کنند و ممکن است منجر به افزایش هزینه انرژی توزیع‌نشده^{۱۴} شود [۲۳]. با این کار مصرف‌کنندگان انرژی، تشویق می‌شوند که استفاده از برخی تجهیزات پرمصرف برقی را به ساعات کم‌باری و میان‌باری انتقال دهند تا با این کار هزینه کمتری برای مصرف انرژی پرداخت کنند [۲۴]. تقسیم‌بندی مصرف در پیک بار، میان‌باری و کم‌باری را می‌توان برای ساعات یک روز، روزهای یک هفته و یا فصل‌های یک سال اعمال کرد. البته باید به این نکته هم اشاره کرد در هر بازه تقسیم‌بندی شده، تنها

مطابق با گزارش آژانس بین‌المللی انرژی [۱]، امروزه بیش از یک میلیارد نفر در سراسر جهان به شبکه برق دسترسی ندارند. گزینه‌های مختلفی نظیر گسترش شبکه برق سراسری، ایجاد ریزشبه^۱ متصل به شبکه برق و همچنین ریزشبه به‌صورت جزیره‌ای برای تأمین برق این افراد در نظر گرفته شده است. به‌طور کلی، گزینه‌های غیرمتمرکز مانند ایجاد ریزشبه در جایی که توسعه شبکه برق سراسری بیش‌ازحد گران‌قیمت است گزینه مناسبی می‌باشد. همچنین سیستم‌های قدرت مستقل بر پایه سوخت‌های فسیلی، دارای مشکلاتی نظیر هزینه‌های بالای سوخت، آلودگی و انتشار گازهای گل‌خانه‌ای می‌باشند در حالی که یک ریزشبه مستقل براساس منابع انرژی تجدیدپذیر^۲ می‌تواند بر این مشکلات غلبه کند. یکی از مشکلات استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند سلول‌های خورشیدی^۳ و توربین‌های بادی^۴، عدم تولید پیوسته توان بوده که دارای وابستگی شدید به شرایط محیطی از قبیل دمای محیط، تابش خورشید و سرعت باد می‌باشند. بنابراین برای اطمینان از تأمین انرژی الکتریکی به‌طور پیوسته استفاده از سیستم ذخیره‌ساز انرژی^۵ لازم و ضروری است.

مقالات ارزشمند مختلفی به بررسی مفاهیم فنی مختلف، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری ریزشبه پرداخته است. برای مثال مرجع [۲] مسائل اقتصادی و قابلیت اطمینان ریزشبه‌ها را بررسی کرده است. جایابی منابع تولید پراکنده و پروژه‌های تحقیقاتی آتی پیشنهادی در این زمینه در [۳] بررسی شده است. مرجع [۴] به گسترش استراتژیکی منابع تولید پراکنده مبتنی بر تولید همزمان برق و حرارت در جهت افزایش قابلیت اطمینان ریزشبه‌ها می‌پردازد. در [۵] برنامه‌ریزی کوتاه مدت تولید در ریزشبه‌ها بحث شده است. بهینه‌سازی چندهدفه برنامه‌ریزی ریزشبه‌ها با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی و محیط‌زیست در [۶] بررسی شده است. به دلیل توسعه و پیشرفت تکنولوژی و مسائل زیست‌محیطی، برخی منابع انرژی پراکنده از قبیل موتورهای احتراق داخلی، توربین‌های گازی، میکروتوربین‌ها، پیل‌های سوختی^۶، فتوولتائیک‌ها و انرژی بادی در شبکه توزیع پدیدار شده‌اند [۷]. یک روش مناسب جهت استفاده بهینه از پتانسیل منابع انرژی پراکنده، ساختاری با عنوان ریزشبه می‌باشد [۸]. در [۹] ریزشبه به‌صورت ترکیبی از مجموعه بارها و منابع کوچک به‌عنوان یک سیستم قابل کنترل توصیف شده است که انرژی الکتریکی و حرارتی را برای محدوده خود تأمین می‌کند. در [۱۰] مزایای ریزشبه از قبیل بالا بردن ضریب اطمینان محلی، کاهش تلفات خط تغذیه، حمایت و بهبود ولتاژ محلی، تصحیح افت ولتاژ یا به‌عبارتی عملکرد به‌عنوان منابع تغذیه غیرقابل قطع ذکر شده است. مرجع [۱۱] یک سیستم مدیریت انرژی پیشنهاد داده است که وظیفه برنامه‌ریزی بهینه واحدهای تولیدی موجود در ریزشبه، مدیریت سمت تقاضا^۷ و تبادل توان با شبکه سراسری را بر عهده دارد که هدف تأمین توان ریزشبه با کمترین هزینه می‌باشد. همچنین، مدیریت بهینه انرژی ریزشبه در

سلول‌های خورشیدی تغذیه می‌شود. همچنین به‌خاطر اطمینان از تأمین انرژی الکتریکی به‌طور پیوسته از سیستم ذخیره‌ساز باتری استفاده شده است. علاوه بر این، استراتژی جدید مدیریت انرژی به‌کار گرفته شده در این مقاله از الکترولایزر، تانک‌های هیدروژنی و پیل سوختی به‌عنوان سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی در حضور برنامه پاسخ‌گویی بار بهره گرفته است. شکل ۱ ساختار ریزشکه مورد مطالعه را نشان می‌دهد [۲۵]. در ادامه زیربخش‌ها، اجزای سازنده ریزشکه تشریح می‌شود.



شکل ۱: ساختار ریزشکه در حالت جزیره‌ای

۲-۱- مدل توربین بادی

توربین بادی انرژی جنبشی باد را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. برای مطالعه آیرودینامیکی تیغه‌ها از منحنی‌های ضرایب آیرودینامیکی بهره می‌برند. توان تبدیلی یک توربین بادی از رابطه (۱) به دست می‌آید. که در آن $A = \pi \cdot r^2$ برابر مساحت سطح جاروب تیغه‌ها است. و ρ چگالی هوا و $C_p(\lambda, \beta)$ ضریب آیرودینامیکی روتور است که تابعی از نسبت سرعت تیپ λ و زاویه پیچ تیغه β است. این ضریب می‌تواند به‌صورت درصدی از انرژی جنبشی برخوردی هوا به انرژی مکانیکی روتور بیان شود [۲۶].

$$P_{con} = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) V_t^{w3} \quad (1)$$

برای مدل‌سازی عدم قطعیت سرعت باد، تابع توزیع ویبال برای تولید سناریو سرعت باد استفاده شده است. بنابراین، توان خروجی توربین بادی در هر زمان و در هر سناریو به‌صورت رابطه (۲) بیان می‌شود [۲۶].

$$P_{t,s}^{wind} = \begin{cases} 0 & V_{ts}^w < V_{ci} \\ p_r \times \left(\frac{V_{ts}^w - V_{ci}}{V_r - V_{ci}} \right) & V_{ci} < V_{ts}^w < V_r \\ p_r & V_r < V_{ts}^w < V_{c0} \\ 0 & V_{ts}^w > V_{c0} \end{cases} \quad (2)$$

قادر به انتقال x درصد از بار به قسمت‌های دیگر می‌باشیم (تا به واقعیت نزدیک‌تر باشد).

در این مقاله، استراتژی جدید مدیریت انرژی برای یک ریزشکه در حالت جزیره‌ای با استفاده از سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی و با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های توان تولیدی توربین بادی، سلول‌های خورشیدی و بار ریزشکه به روش سناریو مطابق با مرجع ارزشمند [۲۵] پیشنهاد شده است، با این تفاوت که برنامه پاسخ‌گویی بار به‌عنوان یکی از تکنولوژی‌های شبکه هوشمند انرژی جهت مدیریت مصرف بار و کاهش هزینه بهره‌برداری ریزشکه پیشنهاد شده است. این استراتژی مدیریت انرژی براساس بهره‌برداری بهینه از منابع انرژی و تعیین میزان شارژ و دشارژ سیستم‌های ذخیره‌ساز هیدروژنی و باتری در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن برنامه پاسخ‌گویی بار با هدف حداقل‌سازی هزینه بهره‌برداری باتری، سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی، هزینه مربوط به انرژی تأمین‌نشده و مازاد انرژی با در نظر گرفتن قیود تأمین بار، محدودیت‌های فنی منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز هیدروژنی و باتری مورد بررسی قرار می‌گیرد. با در نظر گرفتن مطالب ارائه‌شده در بالا، نوآوری ارائه‌شده در این مقاله به شرح ذیل است:

۱- پیشنهاد تابع هزینه بهره‌برداری به‌عنوان تابع هدف بهینه‌سازی با در نظر گرفتن هزینه‌های بهره‌برداری سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی هیدروژن (هزینه‌های بهره‌برداری الکترولایزر و پیل سوختی) و باتری در حضور برنامه پاسخ‌گویی بار

۲- در نظر گرفتن هزینه‌های مربوط به انرژی تأمین‌نشده و مازاد انرژی^{۱۵} در تابع هدف پیشنهادی

۳- در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های بار، توان تولیدی توربین بادی و سلول‌های خورشیدی با استفاده از روش سناریو

۴- استراتژی جدید مدیریت انرژی برای یک ریزشکه در حالت جزیره‌ای با استفاده از سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی و برنامه پاسخ‌گویی بار

ادامه مقاله به شرح زیر می‌باشد: در بخش ۲، مدل‌سازی اجزای ریزشکه در حالت جزیره‌ای تشریح شده است. فرمول‌بندی مسئله بهینه‌سازی با هدف حداقل‌سازی هزینه بهره‌برداری به‌همراه قیود مربوطه در بخش ۳ ارائه شده است. در بخش ۴، استراتژی مدیریت انرژی پیشنهادی روی یک ریزشکه مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج با و بدون در نظر گرفتن برنامه پاسخ‌گویی بار ارائه شده و مقایسه شده است. در پایان، نتیجه‌گیری نهایی مقاله در بخش ۵ ارائه شده است.

۲- مدل‌سازی اجزای ریزشکه

در این مقاله، یک ریزشکه در حالت جزیره‌ای در نظر گرفته شده است که بار ریزشکه توسط منابع انرژی‌های نو شامل توربین بادی و

مدل دینامیکی انرژی در هر زمان و سناریو را برای ذخیره‌ساز باتری نشان می‌دهد.

$$SOC_{t_0} = SOC_{initial} \quad (5)$$

$$SOC_{t,s} \leq SOC^{max} \quad (6)$$

$$SOC_{t,s} \geq SOC^{min} \quad (7)$$

$$P_{t,s}^{charge} \leq P_{charge}^{max} \times U_{t,s}^{charge} \quad (8)$$

$$P_{t,s}^{charge} \geq P_{charge}^{min} \times U_{t,s}^{charge} \quad (9)$$

$$P_{t,s}^{disc} \leq P_{disc}^{max} \times U_{t,s}^{disc} \quad (10)$$

$$P_{t,s}^{disc} \geq P_{disc}^{min} \times U_{t,s}^{disc} \quad (11)$$

$$U_{t,s}^{charge} + U_{t,s}^{disc} \leq 1 \quad (12)$$

$$SOC_{t,s} = SOC_{t-1,s} + \eta_{ch}^B \times P_{t,s}^{charge} - \frac{P_{t,s}^{disc}}{\eta_{disc}^B} \quad (13)$$

۲-۴- مدل سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی

در سال‌های اخیر استفاده از سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی در سیستم‌های انرژی مستقل گسترش پیدا کرده است. در این سیستم ذخیره‌ساز، وقتی که توان تولیدی منابع انرژی‌های تجدیدپذیر از بار ریزشکبه بیش‌تر باشد، توان مازاد تولیدی توسط الکترولایزر می‌تواند به تولید هیدروژن منجر شده و آن را در مخازن تحت فشار ذخیره نماید. این هیدروژن ذخیره شده می‌تواند در مواقعی که بار ریزشکبه بیش‌تر از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر است توسط پیل سوختی به تولید برق پرداخته و قسمتی از بار ریزشکبه را تأمین کند.

معادلات (۲۶) - (۱۴) مربوط به محدودیت‌های فنی سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی است. با مصرف توان مازاد توسط الکترولایزر، مول‌های هیدروژن از الکترولایزر به‌عنوان تابعی از توان مصرف‌شده توسط الکترولایزر جاری شده و در تانک‌های هیدروژنی تحت فشار ذخیره می‌گردد. محدودیت حداقل و حداکثر توان مصرفی توسط الکترولایزر با معادلات (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است. محدودیت حداکثری تعداد مول‌های هیدروژنی در رابطه (۱۶) و تعداد مول‌های هیدروژن تولید شده تابعی از توان مصرف شده الکترولایزر در معادله (۱۷) نشان داده شده است.

$$P_{t,s}^{EL} \leq P_{max}^{EL} \times U_{t,s}^{EL} \quad (14)$$

$$P_{t,s}^{EL} \geq P_{min}^{EL} \times U_{t,s}^{EL} \quad (15)$$

که در آن مقادیر V_{ts}^w ، V_r ، V_{c0} ، V_{ci} ، P_r به ترتیب توان نامی، سرعت وصل، سرعت قطع، سرعت در توان نامی و سرعت باد در زمان t و سناریو s است. معادله (۲) نشان می‌دهد که توان خروجی توربین بادی با سرعت وزش باد متناسب است.

۲-۲- مدل سلول خورشیدی

سلول‌های خورشیدی، انرژی خورشید را به توان الکتریکی تبدیل می‌کنند. از آنجایی که توان خروجی آرایه‌های خورشیدی وابسته به شدت تابش و دما می‌باشد کنترل نقطه کار آن‌ها به‌منظور جذب حداکثر توان از اهمیت زیادی برخوردار است. در بیش‌تر روش‌های ارائه‌شده در مقالات، نقطه عملکرد بهینه با استفاده از تقریب خطی تخمین زده شده است که به این روش‌ها ردیابی نقطه حداکثر توان اطلاق می‌شود. همچنین، برای مدل‌سازی عدم قطعیت دمای هوا و تابش خورشید و تولید سناریو از تابع توزیع نرمال با میانگین مقادیر پیش‌بینی‌شده و واریانس ۱۰ درصد استفاده می‌شود [۲۷]. معادله (۳) در دماها و تابش‌های مختلف بیش‌ترین توان در هر زمان و در هر سناریو، $P_{t,s}^{PV}$ حاصل از سلول‌های خورشیدی را تخمین می‌زند. مشاهده می‌شود که توان خروجی به شدت تابش خورشید و دمای هوا بستگی دارد.

$$P_{t,s}^{PV} = G_{t,s} \cdot A_{PV} \cdot N_{PV} \cdot \eta_{PV,t,s} \quad (3)$$

در این‌جا، N_{PV} ، A_{PV} ، $G_{t,s}$ به ترتیب شدت تابش خورشید در زمان t و سناریو s ، مساحت سلول و تعداد سلول‌های خورشیدی است، بازده سلول‌های خورشیدی، $\eta_{PV,t,s}$ تابعی از شدت تابش خورشیدی و دمای محیط طبق معادله (۴) تعریف می‌شود:

$$\eta_{PV,t,s} = \eta_{PV,ref} \left[1 - \alpha \left(T_{t,s} + G_{t,s} \times \frac{NOCT - 20}{800} - T_{ref} \right) \right] \quad (4)$$

در رابطه ۴، $\eta_{PV,ref}$ بازده سلول در شرایط استاندارد (شدت تابش ۱۰۰۰ وات بر مترمربع در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد) و T_{ref} دمای استاندارد، α ضریب دما، $NOCT$ دمای سلول در حالت بهره‌برداری نامی و $T_{t,s}$ دمای محیط برای سناریوهای مختلف می‌باشد [۲۸].

۲-۳- مدل سیستم ذخیره‌ساز باتری

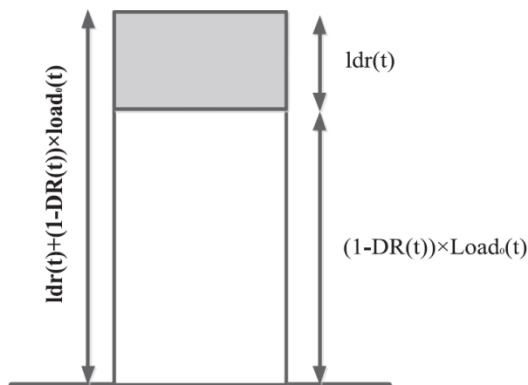
معادلات (۱۳) - (۵) مربوط به قیود فنی سیستم ذخیره‌ساز باتری است [۲۹]. معادله (۵)، انرژی اولیه باتری را نشان می‌دهد. همچنین معادلات (۶) و (۷) محدودیت حداقل و حداکثر سطح انرژی ذخیره‌شده در باتری را نشان می‌دهد. علاوه بر این محدودیت حداکثری و حداقلی توان شارژ و دشارژ باتری در معادلات (۱۱) - (۸) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که باتری نمی‌تواند همزمان شارژ و یا دشارژ شود که این محدودیت در معادله (۱۲) با استفاده از متغیرهای باینری شارژ و دشارژ اجبار شده است. نهایتاً، معادله (۱۳)

۲-۵- مدل توان تأمین نشده و توان مازاد

در یک ریزشکه در حالت بهره‌برداری جزیره‌ای، قطع بار و قطع توان تولیدی اغلب لازم می‌شود تا تعادل توان در سیستم برقرار شود. اگر بار ریزشکه از ظرفیت تولید انرژی‌های تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره‌ساز بیشتر باشد، سیستم قادر به تأمین بار نبوده و لازم است برای برقراری تعادل توان در سیستم قطع بار صورت گیرد. بالعکس، اگر کل بار ریزشکه می‌تواند به‌وسیله منابع انرژی‌های تجدیدپذیر تأمین شود و سیستم‌های ذخیره‌ساز در شارژ کامل باشند و چون توان اضافه تولیدی منابع انرژی‌های تجدیدپذیر قادر به ذخیره‌سازی نیست بنابراین لازم است توان تولیدی منابع کاهش یابد. هر دو گزینه قطع بار و قطع توان تولیدی در قید تعادل توان سیستم به‌عنوان متغیر به ترتیب با توان تأمین نشده ($P_{UN,t,s}$) و توان مازاد ($P_{EX,t,s}$) مدل‌سازی شده‌اند.

۲-۶- برنامه پاسخ‌گویی بار و عدم قطعیت بار

برنامه پاسخ‌گویی بار استفاده‌شده از نوع برنامه پاسخ‌گویی بار زمان استفاده می‌باشد. هدف از استفاده برنامه پاسخ‌گویی بار، هموار کردن منحنی بار با استفاده از شیفت بار از بازه‌های پیک به بازه‌های کم‌باری و میان‌باری و در نتیجه کاهش هزینه‌های بهره‌برداری می‌باشد. برنامه پاسخ‌گویی بار زمان استفاده می‌تواند همانند شکل ۲ مدل‌سازی شود.



شکل ۲: مدل بار با در نظر گرفتن برنامه پاسخ‌گویی بار

مطابق شکل ۲ و با توجه به تعریف برنامه پاسخ‌گویی بار زمان استفاده، اپراتور ریزشکه فقط قادر به انتقال قسمتی از بار به قسمت دیگر می‌باشد که فرم ریاضی این جمله در معادلات (۲۷) و (۲۸) ارائه شده است.

$$Load(t) = (1 - DR(t)) \times load^0(t) + ldr(t) \quad (27)$$

$$load^0(t) - load(t) = DR(t) \times load^0(t) - ldr(t) \quad (28)$$

قیود فنی مربوط به برنامه پاسخ‌گویی بار در معادلات (۳۲)-(۲۹) بیان شده است. علاوه بر این، برای تولید سناریو برای مدل‌سازی عدم قطعیت بار ریزشکه از تابع توزیع نرمال با میانگین مقدار

$$N_{H2,t,s}^{EL} \leq N_{H2,max}^{EL} \times U_{t,s}^{EL} \quad (16)$$

$$N_{H2,t,s}^{EL} = \frac{\eta^{EL} P_{t,s}^{EL}}{LHV_{H2}} \quad (17)$$

میزان فشار اولیه، محدودیت حداکثری و حداقلی تانک‌های هیدروژنی به‌ترتیب با معادلات (۱۸)، (۱۹) و (۲۰) نشان داده شده است.

$$P_{t0}^{H2} = P_{initial}^{H2} \quad (18)$$

$$P_{t,s}^{H2} \leq P_{max}^{H2} \quad (19)$$

$$P_{t,s}^{H2} \geq P_{min}^{H2} \quad (20)$$

مول‌های هیدروژن ذخیره‌شده در تانک‌های هیدروژنی زمانی که بار ریزشکه بیشتر از توان تولیدی منابع انرژی‌های تجدیدپذیر و سیستم ذخیره‌ساز باتری است، جهت تأمین بار لازم است توسط پیل سوختی مصرف‌شده و انرژی الکتریکی تولید کند. میزان حداکثر تعداد مول مصرف‌شده توسط پیل سوختی با رابطه (۲۱) مدل‌سازی شده و میزان توان تولیدی توسط پیل سوختی که تابعی از تعداد مول مصرف‌شده است در رابطه (۲۲) نشان داده شده است. همچنین میزان محدودیت حداکثری و حداقلی توان تولیدی توسط پیل سوختی در معادلات (۲۳) و (۲۴) بیان شده است.

$$N_{H2,t,s}^{FC} \leq N_{H2,max}^{FC} \times U_{t,s}^{FC} \quad (21)$$

$$N_{H2,t,s}^{FC} = \frac{P_{t,s}^{FC}}{\eta^{FC} LHV_{H2}} \quad (22)$$

$$P_{t,s}^{FC} \leq P_{max}^{FC} \times U_{t,s}^{FC} \quad (23)$$

$$P_{t,s}^{FC} \geq P_{min}^{FC} \times U_{t,s}^{FC} \quad (24)$$

لازم به ذکر است که در سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی، الکترولایزر و پیل سوختی نمی‌تواند به‌طور هم‌زمان در هر سناریو به ترتیب مصرف‌کننده توان (شارژ) و یا تولیدکننده توان (دشارژ) شوند که این محدودیت در معادله (۲۵) مدل‌سازی شده است. نهایتاً، معادله (۲۶) مدل دینامیکی فشار تانک‌های هیدروژنی را در هر زمان و در هر سناریو را نشان می‌دهد که تابعی از فشار ساعت قبل و تعداد مول‌های تولیدشده توسط الکترولایزر و مصرف‌شده توسط پیل سوختی می‌باشد.

$$U_{t,s}^{EL} + U_{t,s}^{FC} \leq 1 \quad (25)$$

$$P_{t,s}^{H2} = P_{t-1,s}^{H2} + \frac{RT_{H2}}{V_{H2}} (N_{H2,t,s}^{EL} - N_{H2,t,s}^{FC}) \quad (26)$$

در این معادله، C_{in}^B و $C_{O\&M}^B$ ، به ترتیب هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه تعمیر و بهره‌برداری باتری ذخیره‌ساز است و $L_{t,s}^{B, ch}$ ، عمر مفید باتری در حالت شارژ است که طبق رابطه (۳۴) قابل محاسبه است.

$$L_{t,s}^{B, ch} = \frac{N_B U_B Q_B}{P_{t,s}^{charge}} \times N_{CYCLES} \quad (34)$$

علاوه بر این، هزینه بهره‌برداری باتری در حالت دشارژ از رابطه (۳۵) قابل محاسبه است.

$$C_{t,s}^{B, dis} = (C_{in}^B / L_{t,s}^{B, dis} + C_{O\&M}^B \times U_{t,s}^{disc}) \quad (35)$$

در این معادله، $L_{t,s}^{B, dis}$ ، عمر مفید باتری در حالت دشارژ است که طبق رابطه (۳۶) مدل شده است.

$$L_{t,s}^{B, dis} = \frac{N_B U_B Q_B}{P_{t,s}^{disc} / \eta_{disc}^B} \times N_{CYCLES} \quad (36)$$

مشابه هزینه بهره‌برداری باتری در حالت شارژ، هزینه بهره‌برداری سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی مربوط است به هزینه تولید مول‌های هیدروژنی که توسط الکترولایزر برای مصرف پیل سوختی انجام می‌شود که طبق رابطه (۳۷) بیان شده است.

$$C_{t,s}^{H2, ch} = \left\{ \frac{(C_{in}^{EL} / L_{t,s}^{EL} + C_{O\&M}^{EL}) + (C_{in}^{FC} / L_{t,s}^{FC} + C_{O\&M}^{FC})}{\eta_{t,s}^{EL} \eta_{t,s}^{FC}} \right\} \times U_{t,s}^{EL} \quad (37)$$

همچنین اگر لازم است تقاضای بار به‌وسیله سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی تأمین شود، باید پیل سوختی بهره‌برداری شده و به تولید توان بپردازد. بنابراین هزینه بهره‌برداری پیل سوختی مطابق با معادله (۳۸) محاسبه می‌شود.

$$C_{t,s}^{FC} = (C_{in}^{FC} / L_{t,s}^{FC} + C_{O\&M}^{FC}) \times U_{t,s}^{FC} \quad (38)$$

در آخر، جهت جلوگیری از قطع بار و قطع توان مازاد تا حد ممکن، هزینه‌های مجازی برای تولید توان تأمین‌نشده ($C_{UN, t, s}$) و توان مازاد ($C_{EX, t, s}$) اختصاص داده می‌شود که در این مقاله قیمت‌های متناظر برابر با ۵ یورو بر کیلووات ساعت در نظر گرفته شده است [۲۵].

۳-۲- تابع هدف و قیود

هدف از استراتژی جدید مدیریت انرژی براساس برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت ریزشکه است که هزینه بهره‌برداری ریزشکه حداقل شود. تابع هدف پیشنهادی از مجموع هزینه‌های بهره‌برداری باتری، الکترولایزر و پیل سوختی که در دو حالت شارژ و دشارژ بهره‌برداری می‌شود تشکیل شده است. علاوه بر این هزینه‌های انرژی تأمین‌نشده و مازاد انرژی هم در تابع هدف در نظر گرفته شده است. تابع هدف پیشنهادی با معادله (۳۹) مدل سازی شده است که باید حداقل شود.

$$f = \min \sum_{t=1}^{24} \sum_{s=1}^{N_s} \pi_s \times \left\{ \begin{aligned} &C_{t,s}^{B, ch} + C_{t,s}^{B, dis} + C_{t,s}^{H2, ch} \\ &+ C_{t,s}^{FC} + C_{EX, t, s} + C_{UN, t, s} \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

پیش‌بینی‌شده و واریانس ۱۰ درصد استفاده شده است [۲۷]. معادله (۲۹) بیانگر این واقعیت است که باری کم و یا زیاد نمی‌شود بلکه از بازه‌های پیک به بازه‌های میان‌باری و یا کم‌باری شیفت داده می‌شود به عبارتی بار کاهشی باید برابر با بار افزایشی در طول مدت بهره‌برداری باشد. همچنین، مقدار بار افزایشی باید کوچک‌تر از درصدی از بار پایه باشد که معادله (۳۰) بیانگر این موضوع است و در نهایت درصد کاهش و یا افزایش بار باید کوچک‌تر از یک مقدار معینی باشد که با معادلات (۳۱) و (۳۲) بیان شده است. لازم به ذکر است این درصد در این مقاله برابر ۲۰ درصد در نظر گرفته شده است [۲۴].

$$\sum_{t=1}^T ldr(t, s) = \sum_{t=1}^T DR(t, s) \cdot load^0(t, s) \quad (29)$$

$$load^{inc}(t, s) \leq inc(t, s) \cdot load^0(t, s) \quad (30)$$

$$DR(t, s) \leq DR \max \quad (31)$$

$$inc(t, s) \leq inc \max \quad (32)$$

۳- فرمول‌بندی مسئله

از آنجایی که ریزشکه جزیره‌ای به‌وسیله منابع انرژی‌های تجدیدپذیر تغذیه می‌شوند و این منابع انرژی غیرقابل کنترل در توان تولیدی هستند. بنابراین، فرض می‌شود که توربین بادی و سلول‌های خورشیدی در همه زمان‌ها در حداکثر توان قابل دسترس‌شان در هر سناریو بهره‌برداری می‌شوند. بنابراین، توان خروجی تابعی از تابش خورشید، دمای محیط و سرعت باد می‌شود. با استفاده از مقادیر پیش‌بینی‌شده شرایط محیطی و تولید سناریو مربوطه، مقدار مورد انتظار توان توربین بادی و سلول‌های خورشیدی برای هر زمان و در هر سناریو محاسبه می‌شود. برای سناریوهای مختلف بار ریزشکه، هدف از استراتژی جدید مدیریت انرژی، بهره‌برداری بهینه از ادوات ذخیره‌ساز (باتری، الکترولایزر و پیل سوختی) با این هدف که هزینه بهره‌برداری بهینه ریزشکه حداقل شود. در ادامه ابتدا هزینه‌های بهره‌برداری المان‌های ذخیره‌ساز مطرح شده، سپس تابع هدف پیشنهادی با قیود مربوطه جهت انجام بهینه‌سازی با نرم‌افزار GAMS مدل‌سازی خواهد شد.

۳-۱- هزینه‌های بهره‌برداری

هزینه بهره‌برداری باتری ذخیره‌ساز در حالت شارژ با استفاده از رابطه (۳۳) مدل سازی می‌شود [۲۵].

$$C_{t,s}^{B, ch} = \left\{ \frac{C_{in}^B / L_{t,s}^{B, ch} + C_{O\&M}^B \times U_{t,s}^{charge}}{\eta_{ch}^B \eta_{disc}^B} \right\} \quad (33)$$

۴-۱- داده‌ها

به‌طور کلی، سیستم ذخیره‌سازی هیدروژن شامل یک الکترولیز، چهار مخزن مستقل برای ذخیره‌سازی فشار ناشی از تولید مول‌های هیدروژن با ظرفیت مجموع ۵۵ نیوتون مترمکعب (۱۳/۸ بار واحد فشار) و یک پیل سوختی ۶ کیلوواتی است. همچنین یک بانک ذخیره‌ساز شامل ۳۲ باتری اسید سرب نیز گنجانده شده است. جدول ۱ هزینه‌ها و عمر مفید مورد انتظار اجزای ذخیره‌ساز (باتری، الکترولیزر و پیل سوختی) را نشان می‌دهد [۲۵]. در حالی که جداول ۲-۵ به ترتیب پارامترهای استفاده‌شده برای سیستم ذخیره‌ساز هیدروژن، باتری ذخیره‌ساز، توربین بادی و سلول‌های خورشیدی را ارائه داده است [۲۵].

علاوه بر این، منحنی بار ریز شبکه برای تمامی سناریوها در شکل ۳ نشان داده شده است. در آخر مقادیر پیش‌بینی روزانه شرایط محیطی برای تابش خورشید، دمای محیط و سرعت باد در جدول ۶ ارائه شده است [۳۲].

جدول ۱: هزینه‌ها و عمر مفید اجزای ذخیره‌سازهای انرژی

پیل سوختی	الکترولیزر	باتری	هزینه نصب
۲۸۰۰۰ یورو	۷۵۰۰۰ یورو	۴۰۰ یورو برای هر باتری	
۳۰۰۰۰ ساعت	۳۰۰۰۰ ساعت	۱۳۰۰ سیکل شارژ و دشارژ	عمر مفید
۰/۲ یورو بر ساعت	۰/۲ یورو بر ساعت	۰	هزینه تعمیر و بهره‌برداری

جدول ۲: پارامترهای سیستم ذخیره‌ساز هیدروژن

۶/۲ کیلووات	P_{max}^{EL}
۱/۵ کیلووات	P_{min}^{EL}
۱/۰۵ نیوتون مترمکعب بر ساعت	$N_{H2,max}^{EL}$
۵۰ درصد	η^{EL}
۲۴۰	LHV_{H2}
۱۰ بار	$P_{initial}^{H2}$
۱۳/۸ بار	P_{max}^{H2}
۲ بار	P_{min}^{H2}
۳/۹۰ نیوتون مترمکعب بر ساعت	$N_{H2,max}^{FC}$
۴۰ درصد	η^{FC}
۶ کیلووات	P_{max}^{FC}
۰/۵ کیلووات	P_{min}^{FC}
۸/۳۱۴	\mathcal{R}
۳۱۳ درجه کلونین	T_{H2}
۴ مترمکعب	V_{H2}

تابع هدف پیشنهادی باید با در نظر گرفتن قیود زیر بهینه‌سازی شود:

۱- قید تعادل توان

مجموع توان‌های تولیدی در ریزشکه باید با مجموع توان‌های مصرفی در هر زمان و در هر سناریو برابر باشد که این قید در معادله (۴۰) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که بار ریزشکه با بار جدید جایگزین شده است. بار جدید مدل بار پایه با در نظر گرفتن برنامه پاسخ‌گویی بار مطابق با بخش‌های قبلی که توضیح داده شده بود مدل‌سازی شده است.

$$P_{t,s}^{wind} + P_{t,s}^{PV} + P_{t,s}^{disc} + P_{t,s}^{FC} + P_{UN,t,s} = Load(t,s) + P_{t,s}^{charge} + P_{t,s}^{EL} + P_{EX,t,s} \quad (40)$$

۲- قیود مربوط به توان تولیدی توربین بادی و سلول‌های خورشیدی معادلات (۴)-(۱)،

۳- قیود فنی سیستم ذخیره‌ساز باتری: معادلات (۱۳)-(۵)،

۴- قیود فنی سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی: معادلات (۲۶)-(۱۴)،

۵- قیود مربوط به برنامه پاسخ‌گویی بار: معادلات (۳۲)-(۲۷)،

۶- قیود مربوط به محاسبات هزینه‌های بهره‌برداری: معادلات (۳۸)-(۳۳).

تابع هدف پیشنهادی (۳۹) با در نظر گرفتن قیود (۳۸)-(۱) و (۴۰) به‌صورت برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح (MIP) مدل‌سازی شده و با استفاده از حل‌کننده CPLEX [۳۰] در نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS [۳۱] حل شده است. چون مسئله به‌صورت برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح مدل‌سازی شده، بنابراین جواب بهینه مطلق با استفاده از حل‌کننده CPLEX تضمین شده است.

۴- مطالعات عددی

در این بخش، برای نشان دادن کارایی استراتژی پیشنهادی مدیریت انرژی یک ریزشکه جزیره‌ای و مفاهیم پیشنهادی روی یک ریزشکه جزیره‌ای که شامل توربین بادی، سلول‌های خورشیدی، باتری ذخیره‌ساز و سیستم ذخیره‌ساز هیدروژن (شامل الکترولیزر، بانک‌های هیدروژنی و پیل سوختی) است شبیه‌سازی شده است. همچنین اثر برنامه پاسخ‌گویی بار روی بار ریزشکه مطالعه شده و اثر آن روی هزینه بهره‌برداری ریزشکه مطالعه خواهد شد. و در نهایت حالت‌های مختلف بهره‌برداری باهم مقایسه شده و کارایی و عملکرد مطلوب روش پیشنهادی نتیجه خواهد شد.

جدول ۶: مقادیر پیش‌بینی روزانه شرایط محیطی برای تابش خورشید،

دمای محیط و سرعت باد

زمان (ساعت)	تابش خورشید (وات بر مترمربع)	دمای محیط (درجه سانتی‌گراد)	سرعت باد (متر بر ثانیه)
1	0	24/7	10/5
2	0	24/5	13/5
3	0	24/3	14/9
4	0	24/4	15/6
5	93/5	24/5	19/5
6	219	26/5	20/6
7	467/5	27/5	14/4
8	637/5	28	14/1
9	780	28/5	11/3
10	916	28/8	9/7
11	1100	29	7/0
12	1033	29/7	5/9
13	850	29/8	8/9
14	680	30	9/5
15	595	29/8	10/4
16	255	29/5	8/8
17	212/5	29	7/1
18	153	27/7	8/3
19	63	26/5	9/9
20	0	24/8	7/5
21	0	25	8/8
22	0	24/8	9/8
23	0	24/6	9/2
24	0	24/8	8/4

۴-۲- نتایج شبیه‌سازی در ۴ حالت مختلف و مقایسه نتایج

به‌منظور نشان دادن اثر سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی و برنامه پاسخ‌گویی بار در استراتژی پیشنهادی مدیریت انرژی و برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت ریزشکه، چهار مطالعه موردی بررسی شده و نتایج آن باهم مقایسه شده است. در مطالعه موردی ۱، مسئله برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت ریزشکه جزیره‌ای بدون در نظر گرفتن سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی و برنامه پاسخ‌گویی بار بررسی شده است. به‌منظور نشان دادن اهمیت استفاده از سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی، مطالعه موردی ۲ همان مسئله مشابه را با در نظر گرفتن سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی و بدون برنامه پاسخ‌گویی بار مطالعه کرده است. مطالعه موردی ۳ همان مسئله را با در نظر گرفتن برنامه پاسخ‌گویی بار و بدون استفاده از سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی حل کرده است و اثرات برنامه پاسخ‌گویی بار را روی منحنی بار ریزشکه و هزینه‌های بهره‌برداری را نشان می‌دهد. در آخر، مطالعه موردی ۴، به‌منظور نشان دادن کارایی استراتژی پیشنهادی مدیریت انرژی در این مقاله و نشان دادن اهمیت استفاده همزمان از سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی و برنامه پاسخ‌گویی بار را ارزیابی کرده و اثرات همزمان آن را روی منحنی بار و هزینه‌های بهره‌برداری ریزشکه بررسی کرده است. لازم به ذکر است که در هر چهار حالت بهره‌برداری بالا، عدم قطعیت‌های بار، سرعت باد، تابش خورشید و دمای محیط برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های سیستم در نظر گرفته شده است.

جدول ۳: پارامترهای باتری ذخیره‌ساز

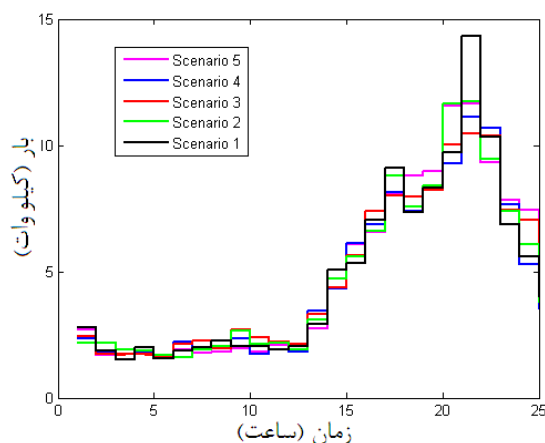
ولتاژ نامی (UB)	۱۲ ولت
ظرفیت نامی (QB)	۲۴۰ آمپر ساعت
تعداد باتری‌ها (NB)	۳۲
باتری در هر رشته	۴
نوع باتری	اسید سرب
SOC^{max}	۹۰ درصد
SOC^{min}	۶۰ درصد
$SOC^{initial}$	۸۰ درصد
P_{charge}^{max}	۱۸ کیلو وات
P_{charge}^{min}	۰
P_{disc}^{max}	۱۸ کیلو وات
P_{disc}^{min}	۰
η_{ch}^B	۸۲ درصد
η_{disc}^B	۹۰ درصد

جدول ۴: پارامترهای توربین بادی

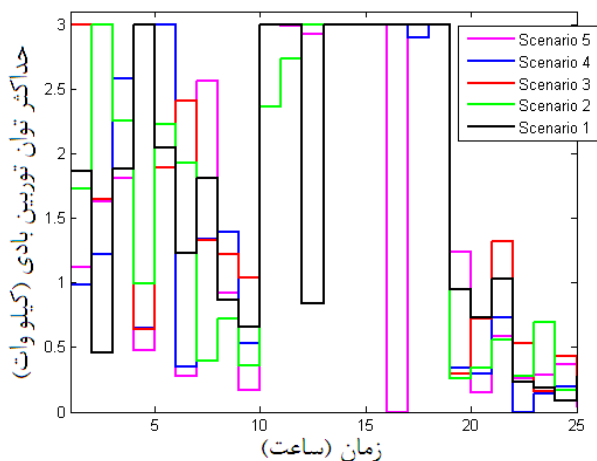
توان نامی توربین بادی	۳ کیلووات
شکل	۳ تیغه با محور عمودی
قطر روتور	۴
ارتفاع مرکز توربین	۵/۸ متر
ارتفاع سنج	۲ متر
V_{ci}	۲ متر بر ثانیه
V_r	۱۴ متر بر ثانیه
V_{c0}	۲۵ متر بر ثانیه

جدول ۵: پارامترهای سلول‌های خورشیدی

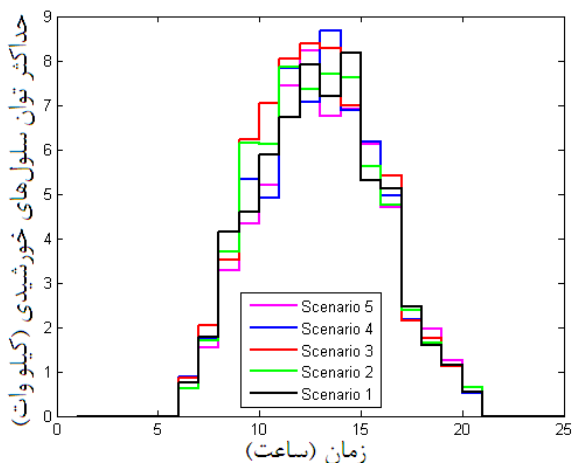
توان پیک هر سلول خورشیدی	۰/۲۲۵ کیلووات
بازده نامی	۱۸/۱٪
تعداد سلول‌های خورشیدی	۳۶
مساحت سلول خورشیدی	۱/۲۴۴ مترمربع
مواد سلول‌های خورشیدی	سیلیکون کبود
ضریب دما	-۰/۳۸ $1/K$
دمای سلول در حالت بهره‌برداری نامی	۴۵ درجه سانتی‌گراد
T_{ref}	۲۵ درجه سانتی‌گراد



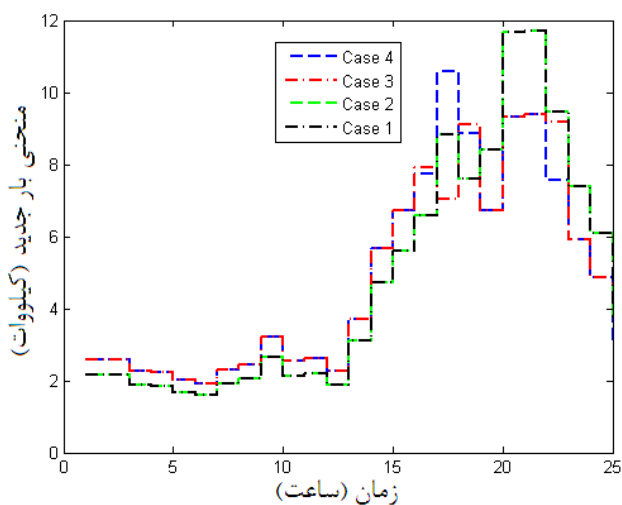
شکل ۳: منحنی بار ریزشکه برای تمامی سناریوها



شکل ۴: حداکثر توان در دسترس توربین بادی در سناریوهای مختلف



شکل ۵: حداکثر توان در دسترس سلول‌های خورشیدی در سناریوهای مختلف



شکل ۶: مقایسه منحنی بار با در نظر گرفتن اثر برنامه پاسخ‌گویی در سناریو دوم

نتایج مقایسه‌ای هزینه‌های مختلف مربوط به هزینه‌های بهره‌برداری باتری، سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی، انرژی تأمین‌نشده، مازاد انرژی و کل هزینه بهره‌برداری در چهار مطالعه موردی در جدول ۷ مقایسه شده است.

با توجه به جدول مقایسه هزینه‌های مختلف برای چهار مطالعه موردی مشاهده می‌شود که کل هزینه بهره‌برداری ریزشکبه در حالت مطالعه موردی چهارم که برنامه پاسخ‌گویی بار و ذخیره‌ساز هیدروژن را به‌طور همزمان استفاده کرده است هزینه کاهش یافته است. علاوه بر این، هزینه‌های انرژی تأمین‌نشده و انرژی مازاد در حالت چهارم نسبت به حالت‌های قبلی کاهش قابل توجهی داشته است که منجر به کاهش هزینه کل شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در یک ریزشکبه جزیره‌ای، استراتژی پیشنهادی مدیریت انرژی با استفاده از سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی و برنامه پاسخ‌گویی بار علاوه بر کاهش انرژی تأمین‌نشده موجب کاهش هزینه کل بهره‌برداری ریزشکبه شده است.

شکل‌های ۴ و ۵ توان تولیدشده توسط توربین بادی و سلول‌های خورشیدی را در سناریوهای مختلف نشان می‌دهد که در هر چهار مطالعه موردی با حداکثر توان قابل دسترس‌شان مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. حداکثر توان در دسترس سلول‌های خورشیدی برخلاف حداکثر توان در دسترس توربین بادی در ساعاتی نظیر ۵-۰ و ۲۵-۲۱ برابر صفر است. همچنین، شکل‌های ۶ و ۷ منحنی‌های بار ریزشکبه را با در نظر گرفتن اثر برنامه پاسخ‌گویی بار در چهار حالت مختلف مطالعه در سناریوهای دوم و سوم نشان می‌دهد. از این شکل مشخص است که منحنی بار در حالت چهارم در مقایسه با حالت‌های ۱، ۲ و ۳ هموارتر است، در نتیجه انتظار می‌رود که هزینه بهره‌برداری کل ریزشکبه در این حالت کم‌تر از بقیه حالت‌ها باشد که طبق جدول ۷ که مقایسه هزینه‌ها را نشان می‌داد این امر به وضوح قابل مشاهده است.

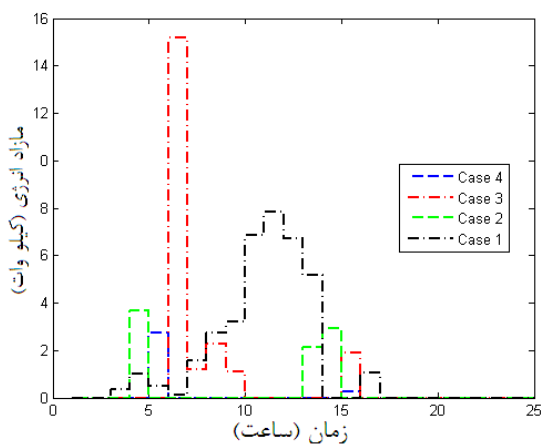
جدول ۷: مقایسه هزینه‌های مختلف بهره‌برداری ریزشکبه

مطالعه موردی ۴	مطالعه موردی ۳	مطالعه موردی ۲	مطالعه موردی ۱	هزینه‌های مختلف برحسب یورو
۵/۷۹	۵/۵۳	۵/۷۵	۶/۲۲	هزینه بهره‌برداری شارژ باتری (یورو)
۵/۴۷	۵/۳۲	۵/۴۵	۵/۷۲	هزینه بهره‌برداری دشارژ باتری (یورو)
۵۶/۷۰	۰	۷۵/۶۱	۰	هزینه ذخیره‌ساز هیدروژنی (یورو)
۵/۸۹	۰	۷/۴۸	۰	هزینه بهره‌برداری دشارژ ذخیره‌ساز هیدروژنی (یورو)
۱۲۷/۰۷	۱۳۵/۷۸	۱۶۸/۶۷	۱۷۷/۳۸	هزینه انرژی تأمین‌نشده (یورو)
۳/۰۵	۱۱۱/۸۷	۷/۳۴	۱۴۴/۸۸	هزینه مازاد انرژی (یورو)
۲۰۳/۹۷	۲۵۸/۵۰	۲۷۰/۳۰	۳۳۴/۲۰	کل هزینه بهره‌برداری (یورو)

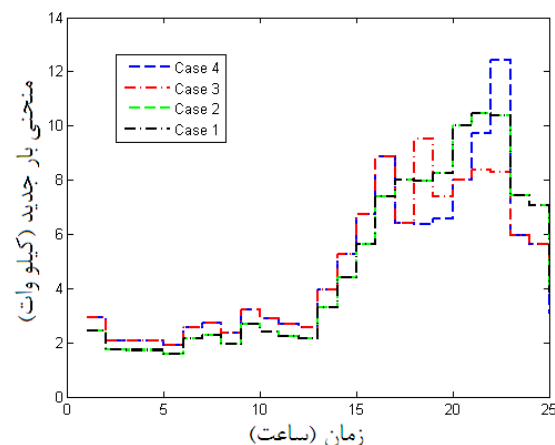
چهار حالت مختلف بهره‌برداری در سناریوهای اول و دوم را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل‌ها مشاهده می‌شود که میزان انرژی تأمین نشده و مازاد انرژی در حالت چهارم که برنامه پاسخ‌گویی بار و سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی را مورد بهره‌برداری قرار می‌دهد کاهش چشم‌گیری داشته که منجر به کاهش هزینه‌های انرژی تأمین‌نشده و مازاد انرژی شده که در جدول ۷ به وضوح قابل مشاهده است. این کاهش انرژی تأمین‌نشده و مازاد انرژی منجر به کاهش کل هزینه بهره‌برداری ریزشبکه در حالت چهارم در مقایسه با سایر موارد بهره‌برداری شده است.

علاوه بر این، شکل‌های ۱۲ و ۱۳ به ترتیب منحنی‌های شارژ/دشارژ در باتری ذخیره‌ساز را در چهار حالت مختلف در اولین و دومین سناریو را نشان می‌دهد. همچنین، شکل‌های ۱۴ و ۱۵ به ترتیب منحنی‌های میزان انرژی ذخیره‌شده در باتری ذخیره‌ساز را در چهار حالت مختلف در دومین و پنجمین سناریو را نشان می‌دهد. از این گذشته، شکل‌های ۱۶ و ۱۷ میزان توان مصرف‌شده توسط الکتروایزر برای تولید مول‌های هیدروژنی برای ذخیره در تانک‌های هیدروژنی و توان تولیدشده توسط پیل سوختی با مصرف مول‌های هیدروژن ذخیره‌شده در تانک‌های هیدروژنی را در چهار حالت مختلف در سناریوهای دوم و چهارم را ارائه کرده است. در آخر، شکل‌های ۱۸ و ۱۹ میزان فشار ذخیره‌شده در تانک‌های هیدروژنی که ناشی از تولید مول‌های هیدروژن توسط الکتروایزر و مصرف مول‌های هیدروژن توسط پیل سوختی تغییر می‌کند در چهار حالت مختلف بهره‌برداری در سناریوهای دوم و سوم را نشان داده شده است.

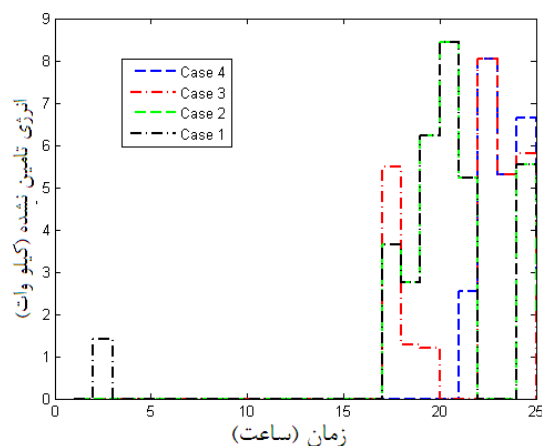
نهایتاً، از شکل‌های ۱۲-۱۹ نتیجه می‌شود که در حالت چهارم میزان شارژ و دشارژ باتری و سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی در مقایسه با حالت‌های دیگر با شیب ملایم انجام شده است. زیرا حالت چهارم از مزایای سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی و برنامه پاسخ‌گویی بار به‌طور همزمان بهره می‌برد و در نهایت منجر به کاهش هزینه کل بهره‌برداری ریزشبکه شده است.



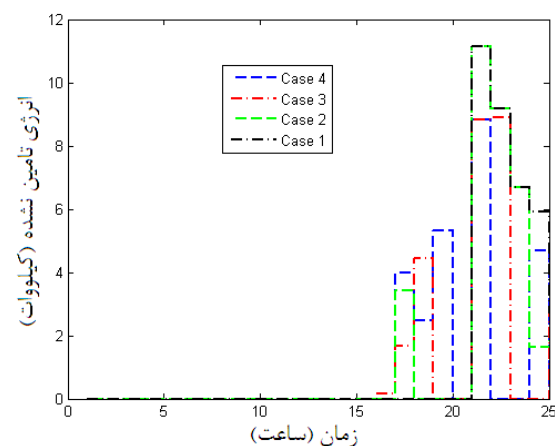
شکل ۱۰: مقایسه مازاد انرژی در سناریو اول



شکل ۷: مقایسه منحنی بار با در نظر گرفتن اثر برنامه پاسخ‌گویی در سناریو سوم

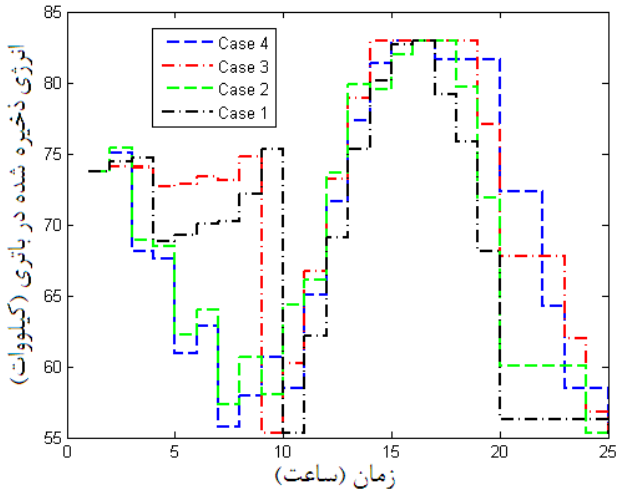


شکل ۸: مقایسه انرژی تأمین‌نشده در سناریو اول

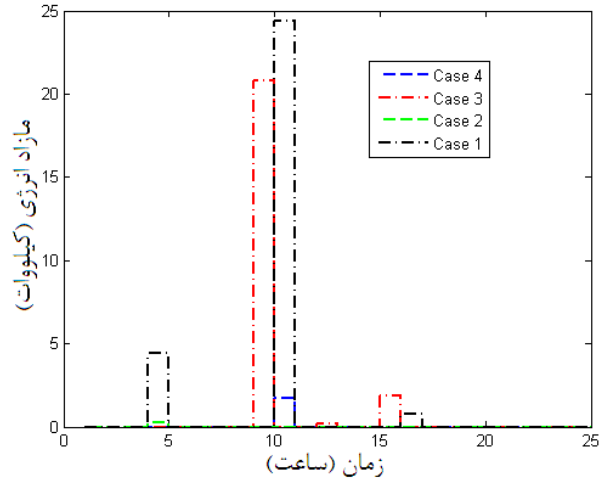


شکل ۹: مقایسه انرژی تأمین‌نشده در سناریو دوم

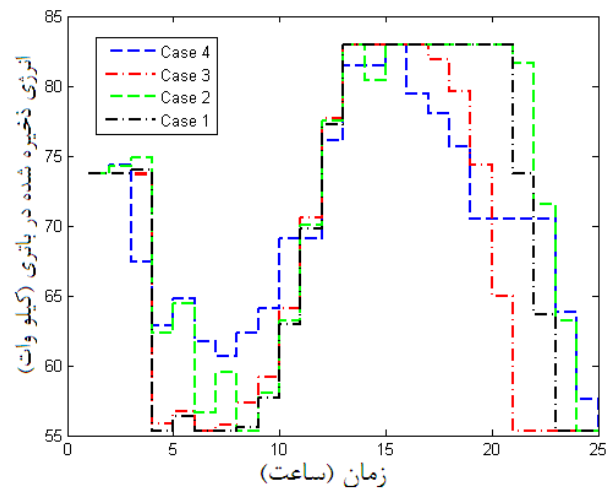
همچنین، شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب منحنی‌های انرژی تأمین‌نشده برای ساعات مختلف شبانه‌روز در چهار حالت مختلف بهره‌برداری در سناریوهای اول و دوم را نشان می‌دهد. علاوه بر این، شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب منحنی‌های مازاد انرژی برای ساعات مختلف شبانه‌روز در



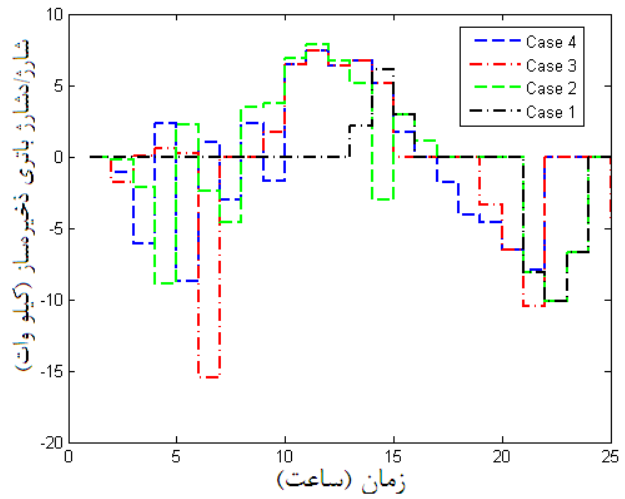
شکل ۱۴: مقایسه انرژی ذخیره شده در باتری در سناریو دوم



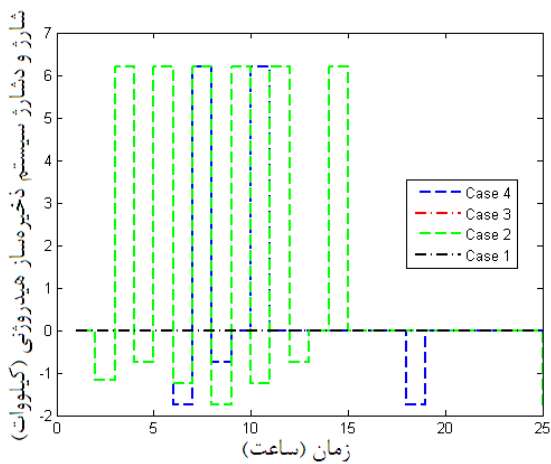
شکل ۱۱: مقایسه مازاد انرژی در سناریو دوم



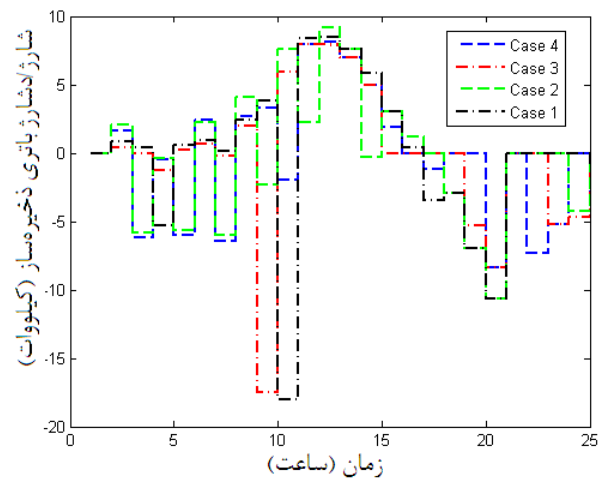
شکل ۱۵: مقایسه انرژی ذخیره شده در باتری در سناریو پنجم



شکل ۱۲: مقایسه شارژ/دشارژ باتری ذخیره‌ساز در سناریو اول



شکل ۱۶: مقایسه شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی در سناریو دوم



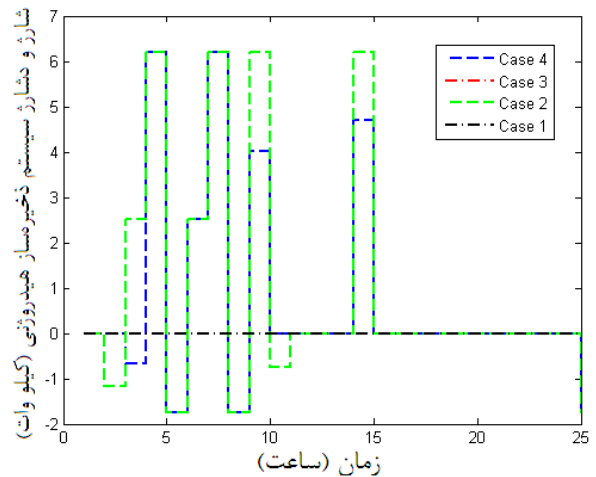
شکل ۱۳: مقایسه شارژ/دشارژ باتری ذخیره‌ساز در سناریو دوم

۵- نتیجه‌گیری

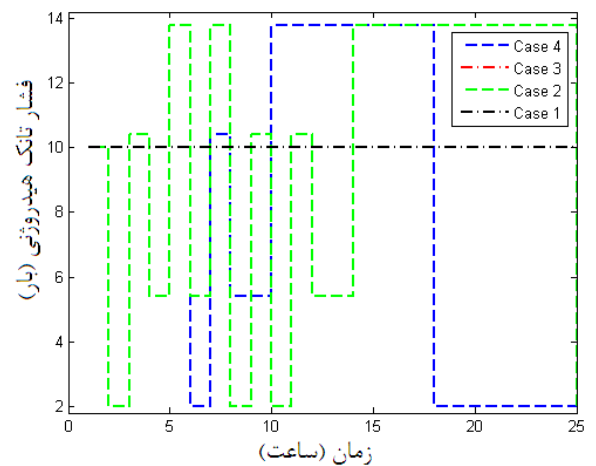
این مقاله، استراتژی جدید مدیریت انرژی برای یک ریزشبه در حالت جزیره‌ای با استفاده از سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی و برنامه پاسخ‌گویی بار با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های بار، توان تولیدی توربین بادی و سلول‌های خورشیدی را پیشنهاد داده است. برای نشان دادن کارایی مدیریت انرژی پیشنهادی، چهار مطالعه موردی با استفاده از سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی و برنامه پاسخ‌گویی بار بررسی شده و نتایج آن باهم مقایسه شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که استفاده از سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی باعث مدیریت انرژی بهتری نسبت به بدون استفاده از آن شده و هزینه بهره‌برداری ریزشبه و همچنین هزینه مربوط به انرژی تأمین‌نشده و مازاد انرژی کاهش می‌یابد. از طرفی با مدیریت بار ریزشبه با برنامه پاسخ‌گویی بار و شیف‌ت بار از بازه‌های پرباری به بازه‌های کم‌باری و میان‌باری باعث هموار شدن منحنی بار ریزشبه شده و در نهایت موجب کاهش هزینه بهره‌برداری ریزشبه در حالت جزیره‌ای شده است. در نهایت، با توجه به مقایسه هزینه‌های مختلف برای چهار مطالعه موردی، هزینه کل بهره‌برداری ریزشبه در حالت چهارم که برنامه پاسخ‌گویی بار و ذخیره‌ساز هیدروژن را به‌طور همزمان استفاده کرده است کاهش قابل توجهی نسبت به بقیه حالت‌ها داشته است. زیرا از مزایای هر دو مورد مدیریت انرژی بهره می‌برد.

فهرست علائم و اختصارات

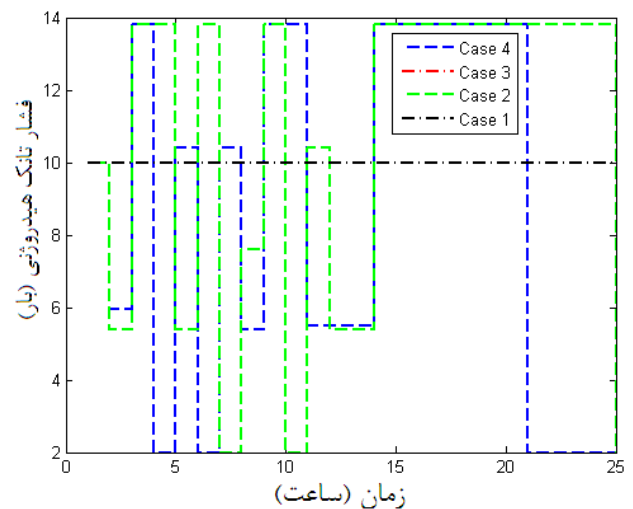
پارامترها	
توان تبدیلی توربین بادی	P_{con}
چگالی هوا	ρ
مساحت سطح جاروب تیغه‌ها	A
ضریب آیرودینامیکی روتور	C_p
توان در دسترس توربین بادی	$P_{t,s}^{wind}$
سرعت باد	$V_{t,s}^w$
توان نامی توربین بادی	P_r
سرعت وصل	V_{ci}
سرعت در توان نامی	V_r
سرعت قطع	V_{c0}
توان خروجی سلول خورشیدی	$P_{t,s}^{PV}$
شدت تابش خورشید	$G_{t,s}$
مساحت سلول خورشیدی	A_{PV}
تعداد سلول‌های خورشیدی	N_{PV}
بازده سلول‌های خورشیدی	$\eta_{PV,t,s}$
بازده سلول در شرایط استاندارد	$\eta_{PV,ref}$
ضریب دما	α
دمای محیط	$T_{t,s}$



شکل ۱۷: مقایسه شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی در سناریو چهارم



شکل ۱۸: مقایسه فشار ذخیره‌شده در تانک‌های هیدروژنی در سناریو دوم



شکل ۱۹: مقایسه فشار ذخیره‌شده در تانک‌های هیدروژنی در سناریو سوم

هزینه سرمایه‌گذاری پیل سوختی	C_{in}^{FC}
هزینه تعمیر و بهره‌برداری پیل سوختی	$C_{O\&M}^{FC}$
احتمال سناریو S	π_s
متغیرها	
هزینه توان مازاد	$C_{EX,t,s}$
هزینه توان تأمین‌نشده	$C_{UN,t,s}$
هزینه بهره‌برداری سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی	$C_{t,s}^{H2, ch}$
هزینه بهره‌برداری باتری در حالت شارژ	$C_{t,s}^{B, ch}$
هزینه بهره‌برداری باتری در حالت دشارژ	$C_{t,s}^{B, dis}$
عمر مفید الکترولایزر	L^{EL}
عمر مفید پیل سوختی	L^{FC}
عمر مفید باتری در حالت شارژ	$L_{t,s}^{B, ch}$
عمر مفید باتری در حالت دشارژ	$L_{t,s}^{B, dis}$
میزان افزایش بار	$ldr(t)$
حداکثر بار قابل افزایش	$load^{inc}(t,s)$
درصد بار قابل افزایش	$inc(t,s)$
بار با در نظر گرفتن برنامه پاسخ‌گویی بار	$Load(t)$
میزان کاهش بار	$DR(t)$
توان تأمین‌نشده	$P_{UN,t,s}$
توان مازاد	$P_{EX,t,s}$
تعداد مول‌های هیدروژن مصرف‌شده توسط پیل سوختی	$N_{H2,t,s}^{FC}$
تعداد مول‌های هیدروژن تولیدشده توسط الکترولایزر	$N_{H2,t,s}^{EL}$
فشار تانک هیدروژنی	$P_{t,s}^{H2}$
توان الکترولایزر	$P_{t,s}^{EL}$
توان تولیدشده توسط پیل سوختی	$P_{t,s}^{FC}$
انرژی باتری	$SOC_{t,s}$
میزان توان شارژ باتری	$P_{t,s}^{ch}$
میزان توان دشارژ باتری	$P_{t,s}^{disc}$
متغیرهای باینری	
متغیر باینری برای وضعیت شارژ باتری	$U_{t,s}^{ch}$
متغیر باینری برای وضعیت دشارژ باتری	$U_{t,s}^{disc}$
متغیر باینری برای وضعیت الکترولایزر	$U_{t,s}^{EL}$
متغیر باینری برای وضعیت پیل سوختی	$U_{t,s}^{FC}$

مراجع

- [1] World Energy Outlook, "Measuring progress towards energy for all," *International Energy Agency*, pp. 529–547, 2012.
- [2] S. Wang, Z. Li, L. Wu, M. Shahidepour and Z. Li, "New metrics for assessing the reliability and economics of microgrids in distribution system", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 2852–2861, 2013.

NOCT	دمای سلول در حالت بهره‌برداری نامی
T_{ref}	دمای استاندارد
SOC_{t_0}	میزان انرژی باتری در ساعت شروع
$SOC_{initial}$	انرژی اولیه باتری
SOC^{max}	حداکثر انرژی باتری
SOC^{min}	حداقل انرژی باتری
P_{charge}^{max}	حداکثر توان شارژ باتری
P_{charge}^{min}	حداقل توان شارژ باتری
P_{disc}^{max}	حداکثر توان دشارژ باتری
P_{disc}^{min}	حداقل توان دشارژ باتری
η_{ch}^B	بازده شارژ باتری
η_{disc}^B	بازده دشارژ باتری
P_{min}^{EL}	حداقل توان الکترولایزر
P_{max}^{EL}	حداکثر توان الکترولایزر
$N_{H2,max}^{EL}$	حداکثر تعداد مول‌های هیدروژن تولیدشده توسط الکترولایزر
η^{EL}	بازده الکترولایزر
LHV_{H2}	حداقل ارزش حرارتی هیدروژن
$P_{t_0}^{H2}$	فشار تانک هیدروژنی در وضعیت شروع
$P_{initial}^{H2}$	فشار تانک هیدروژنی در وضعیت اولیه
P_{max}^{H2}	حداکثر فشار تانک هیدروژنی
P_{min}^{H2}	حداقل فشار تانک هیدروژنی
$N_{H2,max}^{FC}$	حداکثر تعداد مول‌های هیدروژن مصرف‌شده توسط پیل سوختی
η^{FC}	بازده پیل سوختی
p_{max}^{FC}	حداکثر توان تولیدشده توسط پیل سوختی
p_{min}^{FC}	حداقل توان تولیدشده توسط پیل سوختی
\mathcal{R}	ثابت گازها
T_{H2}	دمای میانگین هیدروژن
V_{H2}	حجم مخزن هیدروژن
$load^0(t)$	بار پیش‌بینی‌شده
DR_{max}	حداکثر درصد بار قابل کاهش
inc_{max}	حداکثر درصد بار قابل افزایش
C_{in}^B	هزینه سرمایه‌گذاری باتری
$C_{O\&M}^B$	هزینه تعمیر و بهره‌برداری باتری
N_B	تعداد باتری‌ها
U_B	ولتاژ نامی باتری‌ها
Q_B	ظرفیت نامی باتری‌ها
N_{CYCLES}	تعداد سیکل شارژ و دشارژ باتری
C_{in}^{EL}	هزینه سرمایه‌گذاری الکترولایزر
$C_{O\&M}^{EL}$	هزینه تعمیر و بهره‌برداری الکترولایزر

- alone power systems analysis of the current potential for applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 10, no. 5, pp. 432-462, 2006.
- [18] P. P. Edwards, V. L. Kuznetsov, W. F. David, and N. P. Brandon, “Hydrogen and fuel cells: towards a sustainable energy future,” *Energy Policy*, vol. 36, no. 12, pp. 4356-4362, 2008.
- [19] O. Ulleberg, “The importance of control strategies in PV-hydrogen systems,” *Solar Energy*, vol. 76, no. 1-3, pp. 323-329, 2004.
- [20] H. Aalami, M. Moghaddam and G. Yousefi, “Modeling and prioritizing demand response programs in power markets,” *Electric Power Systems Research*, vol. 80, no. 4, pp. 426-435, 2010.
- [21] P. Siano, “Demand response and smart grids—A survey,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 28, no. 30, pp. 461-478, 2014.
- [22] H. A. Aalami, M. Parsa Moghadam, and G. R. Yousefi, “Optimum time of use program proposal for Iranian power systems,” *In Electric Power and Energy Conversion Systems*, pp. 1-6, 2009.
- [23] A. Mohammadveisi, and A. Hatami, “An energy management framework for a smart home: optimal appliances scheduling and operational planning of renewable energy resources,” *Tabriz Journal of Electrical Eng.*, vol. 45, no. 1, pp. 53-66, 2015.
- [24] S. Nojavan, H. Qesmati, K. Zare and H. Seyyedi, “Large Consumer Electricity Acquisition Considering Time-of-Use Rates Demand Response Programs,” *Arab J Sci Eng*, vol. 39, no. 12, pp. 8913-8923, 2014.
- [25] G. Cau, D. Cocco, M. Petrollese, S. Knudsen Kær, and C. Milan, “Energy management strategy based on short-term generation scheduling for a renewable microgrid using a hydrogen storage system,” *Energy Conversion and Management*, vol. 87, pp. 820-831, 2014.
- [26] M. Abbaspour, M. Satkin, B. Mohammadi-Ivatloo, F. Hoseinzadeh Lotfi and Y. Noorollahi, “Optimal operation scheduling of wind power integrated with compressed air energy storage (CAES),” *Renewable Energy*, vol. 51, pp. 53-59, 2013.
- [27] H. A. Aalami, and S. Nojavan, “Energy storage system and demand response program effects on stochastic energy procurement of large consumers considering renewable generation,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 7, no. 10(1), pp. 107-114, 2016.
- [28] Sunpower E18/225-WHT-I solar panel. <<http://www.sunpowercorp.com>>.
- [29] N. D. Tung, and L. B. Le, “Optimal bidding strategy for microgrids considering renewable energy and building thermal dynamics,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp.1608-1620, 2014.
- [30] The GAMS Software Website, 2016. [Online]. Available: <http://www.gams.com/dd/docs/solvers/cplex.pdf>.
- [31] A. Brooke, D. Kendrick, A. Meeraus and R. Raman, *GAMS: A User's Guide*, Washington, DC: GAMS Development Corporation, 1998.
- [32] S. Nojavan, and H. A. Aalami, “Stochastic energy procurement of large electricity consumer considering photovoltaic, wind-turbine, micro-turbines, energy storage system in the presence of demand response program,” *Energy Conversion and Management*, vol. 31, no. 103, pp. 1008-1018, 2015.
- [3] P. Georgilakis and N. Hatzigiorgiou, “Optimal distributed generation placement in power distribution networks: models, methods, and future research,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 3420-3428, 2013.
- [4] A. Basu, S. Chowdhury and S. Chowdhury, “Impact of strategic deployment of CHP-based DERs on microgrid reliability,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 3, pp. 1697-1705, 2010.
- [5] T. Logenthiran, D. Srinivasan and A. Khambadkone, “Multi-agent system for energy resource scheduling of integrated microgrids in a distributed system,” *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 1, pp. 138-148, 2011.
- [6] F. Ren, M. Zhang and D. Sutanto, “A multi-agent solution to distribution system management by considering distributed generators,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 2, pp. 1442-1451, 2013.
- [7] Y. Atwa, E. El-Saadany, M. Salama, R. Seethapathy, M. Assam and S. Conti, “Adequacy evaluation of distribution system including wind/solar DG during different modes of operation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 4, pp. 1945-1952, 2011.
- [8] O. Hafez and K. Bhattacharya, “Optimal planning and design of a renewable energy based supply system for microgrids,” *Renewable Energy*, vol. 45, pp. 7-15, 2012.
- [9] A. K. Basu, A. Bhattacharya, S. Chowdhury and S. P. Chowdhury, “Planned scheduling for economic power sharing in a CHP-based micro-grid,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 1, pp. 30-38, 2012.
- [10] C. Marnay, and G. Venkataramanan, “Microgrids in the evolving electricity generation and delivery infrastructure,” *In Power Engineering Society General Meeting*, pp. 1-5, 2006.
- [11] N. Parhizi, M. Marzband, S. M. Mirhosseini Moghaddam, B. Mohammadi Ivatloo, and F. Azarnejadian, “The experimental implementation of an energy management system for a grid connected microgrid by using a multi-period imperialist competition algorithm”, *Tabriz Journal of Electrical Eng.*, vol. 46, no. 1, 2016.
- [12] M. Javadi, S. M. Mirhosseini Moghaddam, and M. Marzband, “Optimal energy management of microgrids in the retail market based on non-cooperative game theory considering the uncertainty,” *Tabriz Journal of Electrical Eng.*, vol. 46, no. 1, 2016.
- [13] A. Mehrizi-Sani and R. Iravani, “Potential-function based control of a microgrid in islanded and grid-connected modes,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 4, pp. 1883-1891, 2010.
- [14] J. Lopes, C. Moreira and A. Madureira, “Defining control strategies for microgrids islanded operation”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 2, pp. 916-924, 2006.
- [15] H. Morais, P. Kádár, P. Faria, Z. Vale and H. Khodr, “Optimal scheduling of a renewable micro-grid in an isolated load area using mixed-integer linear programming,” *Renewable Energy*, vol. 35, no. 1, pp. 151-156, 2010.
- [16] A. Yilanci, I. Dincer and H. Ozturk, “A review on solar-hydrogen/fuel cell hybrid energy systems for stationary applications,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 35, no. 3, pp. 231-244, 2009.
- [17] E. Zoulias, R. Glockner, N. Lymberopoulos, T. Tsoutsos, I. Vosseler, O. Gavalda, H. Mydske and P. Taylor, “Integration of hydrogen energy technologies in stand-

زیرنویس‌ها

- ¹ Microgrid
- ² Renewable energy sources
- ³ Photovoltaic systems
- ⁴ Wind-turbine
- ⁵ Energy storage systems
- ⁶ Fuel Cells
- ⁷ Demand side management
- ⁸ Uncertainties
- ⁹ Islanding
- ¹⁰ Hydrogen storage systems
- ¹¹ Electrolyzer
- ¹² Demand response program
- ¹³ Time-of-use
- ¹⁴ Undelivered power
- ¹⁵ Excess power