Archive of SID.ir

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۵، شماره ۱، سال ۱۴۰۲، صفحات ۳ تا ۲۰
DOI: 10.22060/mej.2023.20755.7346

سامانه مدیریت انرژی ریزشبکه‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر

مصطفی اسماعیلی شایان[۱]، غلامحسن نجفی[۱*]، صحرا اسماعیلی شایان[۲]

۱- دانشکده مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۲- دانشکده مدیریت صنعتی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

خلاصه: انرژی‌های تجدیدپذیر پایدار، پاک و اقتصادی هستند و آینده تأمین انرژی را برعهده دارند. این منابع به دلیل الگوی تولید غیرقطعی و تصادفی، قابلیت اطمینان پایین دارند. استفاده از منابع تولید انرژی ترکیبی به همراه منابع ذخیره کننده و پشتیبان، راه حل مسئله قابلیت اطمینان سامانه‌های تجدیدپذیر می‌تواند باشد. در این مقاله یک ریزشبکه ترکیبی مستقل از شبکه، متشکل از منابع تولید اولیه انرژی بادی و خورشیدی و یک سامانه پشتیبان باتری و ژنراتور با بکارگیری الگوریتم تصمیم‌گیری پویا، مدلسازی، ساخته، ارزیابی و سیزده طرح برای تأمین برق واحد مسکونی پیشنهاد شده است. نتایج نشان داد، استفاده از مدل تصمیم‌گیری پویا موجب افزایش کیفیت و بهره‌وری شده سامانه‌ها شده و در طرح استفاده ۲۴ درصدی از انرژی‌های تجدیدپذیر، مصرف سوخت فسیلی روزانه ۱/۱۱ لیتر بوده و انرژی سالانه تولیدی سامانه تبدیل انرژی تجدیدپذیر ترکیبی معادل ۱۶۹۷ kWh/yr با خالص ارزش فعلی ۵۵۳/۶۸ دلار و نرخ بازگشت سرمایه داخلی ۲۱/۴۹ درصد با دوره بازگشت سرمایه ۱۵/۷۱ سال است. با افزایش ضریب انرژی تجدیدپذیر به ۵۴ درصد، مصرف سوخت فسیلی ۰/۶۹۴ لیتر و انرژی تولیدی سالانه ۱۶۵۲ kWh/yr با دوره بازگشت سرمایه ۱۷/۶۱ سال محاسبه بدست آمد. مدیریت انرژی مصرف کننده‌ها با ضریب ۱۰۰٪ انرژی تجدیدپذیر، سالانه ۱۹۳۳ kWh/yr انرژی بدون انتشار آلاینده‌های زیست محیطی و خالص ارزش فعلی ۳۷۲/۰۹- دلار است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۵
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۷/۰۹
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۵
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۱۱/۱۹

کلمات کلیدی:
انرژی‌های تجدیدپذیر
پایداری
تصمیم‌گیری پویا
کلبه سبز
مدیریت انرژی

۱- مقدمه

افزایش تقاضای انرژی و کمبود سوخت‌های فسیلی نگرانی‌ها را در مورد امنیت تأمین انرژی اولیه افزایش داده است. همچنین اثرات نامطلوب تولید برق مبتنی بر سوخت‌های فسیلی بر محیط زیست، تمرکز بر انرژی‌های تجدیدپذیر را تحت تأثیر قرار داده است. به عنوان اطمینانی از قابلیت تأمین انرژی، سامانه پشتیبان مبتنی بر دیزل ژنراتور غالب است.

شبکه برق آینده، با نفوذ بی‌سابقه منابع انرژی تجدیدپذیر، با عدم قطعیت‌های شدیدی روبه رو خواهد شد که ممکن است مشکلاتی را در بهره برداری از شبکه سبب شوند [۱]. سازمان جهانی انرژی پیش‌بینی کرده است، ذخایر سوخت‌های فسیلی که بیش از ۷۹٪ از انرژی اولیه‌ی جهان را تشکیل می‌دهند به سرعت در حال کاهش هستند و قسمت عمده‌ی آن معادل ۵۷/۷٪ در بخش حمل و نقل به‌کارگیری شده است [۲]. منابع سوخت‌های فسیلی مانند: زغال سنگ، نفت و گاز با ایجاد چالش‌های زیست محیطی، دارای ذخایر محدودی هستند و همزمان با افزایش تقاضای انرژی و کاهش منابع آن‌ها اقتصاد کشورها ناپایدار خواهد شد [۳]. درحالی که تولید برق مبتنی بر مجموعه دیزل ژنراتورها، بسیار پرهزینه شده است و تأثیر نامطلوبی بر محیط زیست دارد. تولید برق مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر ثابت می‌کند که یک جایگزین مؤثر است اما ماهیت متناوب و متغیر دارد. یکی از راه حل‌های کلیدی ارائه ذخیره انرژی در سامانه‌های چند نسلی و ترکیبی است [۴]. باحضور گسترده منابع انرژی‌های تجدیدپذیر (انرژی بادی، انرژی خورشیدی و ...)، سامانه‌های قدرت از ساختار فعلی خود تغییر خواهند کرد و به سامانه‌هایی با نفوذ بالای انرژی‌های تجدیدپذیر تبدیل خواهند شد [۵]. قابلیت اطمینان تأمین انرژی لازم نماید تا طراحی و ادغام منابع مختلف انرژی‌های تجدیدپذیر تحت سامانه‌های چندگانه و ترکیبی باشد. این روش، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر را در سطح محلی یا خانگی افزایش داده و شرایط را برای تولید برق در مقیاس بزرگ‌تر فراهم می‌کند. در همین راستا، توسعه تولید ترکیبی حرارت و برق برای تأمین بیش از برق و دستیابی به کارایی سامانه جذاب است [۶]. اگرچه اجرای سامانه‌های ترکیبی حرارت و برق مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر مطلوب است، اما بررسی این موضوع به

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: g.najafi@modares.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

صورت جهانی هنوز محدود است [۷]. در طراحی و کاربردهای سامانه‌های ترکیبی حرارت و برق، مدیریت انرژی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی و دستیابی به هزینه بهینه، صرفه‌جویی در مصرف انرژی، انتشار و طول عمر قطعات بسیار مهم است [۸]. از طرف دیگر، هزینه‌ی اولیه‌ی سرمایه‌گذاری در سامانه‌های خورشیدی و بادی در مقایسه با برق مبتنی بر سوخت فسیلی هنوز نسبتاً زیاد است. با استفاده از یک منبع انرژی مرسوم در ارتباط با منابع تجدیدپذیر، سامانه‌ی مقرون به صرفه و مطمئن‌تر می‌شود. ترکیبی از چنین سامانه‌ی تولید انرژی متفاوت اما مکمل مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر ترکیبی به‌عنوان یک راه حل مدیریت انرژی‌های تجدید پذیر در شبکه‌های کوچک شناخته می‌شود [۹].

طی چند دهه‌ی گذشته، کنترل کننده‌ی سامانه‌های تجدیدپذیر ترکیبی از دغدغه‌های اساسی پژوهشگران حوزه‌ی انرژی بوده است [۱۰]. سامانه‌های چند پورت ابتدایی‌ترین کنترل کننده‌های سامانه ترکیبی بودند. هدف اصل آن‌ها افزایش توان و بهره‌وری الکتریکی سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر به نسبت سامانه‌های منفرد بود [۱۱]. این سامانه‌ها دارای قابلیت‌های عمده‌ای هستند که در پژوهش‌های مختلف بررسی شده‌اند [۱۲]. در پژوهشی پروفایل تقاضای ساعتی انرژی الکتریکی از ۲۰۰۰ خانوار سوئدی اندازه‌گیری شد. بازخورد بین سیستم تولید برق مرکزی و سرمایه‌گذاری‌های خانگی در سامانه‌ی ترکیبی خورشیدی و باتری‌ها مثبت بود و بازار به سرمایه‌گذاری این تکنولوژی در خانه‌های تک خانواری روی آورده است [۱۳]. به کارگیری اینترنت اشیاء باریک و فناوری‌های سلولی اینترنت اشیاء در شبکه‌های کم قدرت به صورت گسترده طیف ایمن انرژی را فراهم می‌کند [۱۴].

در بعد کنترل هوشمند، مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۱ سامانه‌ی کنترل منطق فازی سامانه فتوولتاییک مستقل با ذخیره باتری را پیشنهاد کرد [۱۵]. در مطالعه‌ی دیگری در سال ۲۰۲۱ یک روش کنترل هوشمند نیروگاه خورشیدی فتوولتاییک با اتصال مستقیم و دنبال کننده پیشنهاد شده است [۱۶]. در پژوهشی در سال ۲۰۲۲ از کنترل کننده مبتنی بر شبکه‌های عصبی در کنترل کننده هوشمند سامانه ترکیبی استفاده شد. این اقدام برای بهبود عملکرد دینامیکی و قابلیت اطمینان برق رسانی در شرایط کاری مختلف بدون باتری اضافی انجام شد [۱۷]. با این حال، پژوهش‌هایی که اخیراً منتشر شده تمرکز بیش‌تری بر سامانه‌های ترکیبی متصل به شبکه و الگوریتم‌های زمان واقعی دارند. به عنوان مثال، در سال ۲۰۲۰، سلیمان و همکاران [۱۸] یک سامانه ترکیبی فتوولتاییک خورشیدی متصل به شبکه را با استفاده از شبیه ساز دیجیتال در زمان واقعی ایجاد کردند. همچنین، لی و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۱۸ عملکرد سامانه ترکیبی انرژی خورشیدی و باتری در منازل مسکونی متصل به شبکه با هدف مدیریت مصرف و اصلاح اوج در ژاپن بررسی کرد. در پژوهشی‌هایی در سال ۲۰۲۲ همچنین کنترل هماهنگ برای ادغام شبکه یک آرایه فتوولتاییک، ذخیره باتری و خازن را مطالعه کردند و استراتژی‌های مختلف توسعه این صنعت اقداماتی صورت گرفته است [۲۰]. در این پژوهش‌ها خوشه بندی اختراع و روند تکامل، باتری‌های خورشیدی نیز بررسی شده است [۲۱]. العرفی و همکاران [۲۲] در سال ۲۰۲۱ یک سامانه‌ی کنترل هوشمند انرژی تجدیدپذیر ترکیبی را توسعه دادند. در این سامانه فرآیند تولید برق برای به دست آوردن بیشینه‌ی قدرت سودآور با کمینه‌ی هزینه‌ی عملکرد سامانه‌ی قدرت کنترل می‌شد. طرح کنترل به شرایط محیطی متکی بود. سامانه‌ی تولید انرژی شرایط محیطی مناسب برای دستیابی به بیشینه‌ی سود را تجزیه و تحلیل کرده و توزیع بار را مدل‌سازی کرد. عملکرد سیستم پیشنهادی با استفاده از معیارهای سود عملیاتی، عامل عدم تعادل، پیش‌بینی موفقیت آمیز عملیات و تأخیر زمانی تجزیه و تحلیل شد.

توزیع توان راکتیو بهینه یک جزء حیاتی از تنظیم ولتاژ در بخش انرژی است که قابلیت اطمینان سیستم و دوام اقتصادی را در محدوده قابل قبول تضمین می‌کند. انرژی‌های تجدیدپذیر در سامانه‌های تولید برق ضروری‌تر می‌شوند، اما ترکیب دو یا چند منبع با شبکه ممکن است منجر به مشکلات کیفیت برق شود. یک راه‌حل استفاده از تکنیک بهینه‌سازی ترکیبی به نام تکامل متفاوت مبتنی بر کلونی مورچه‌های پیوسته است [۲۳]. نتایج پژوهشی در این موضوع نشان داد، می‌تواند مشکل کاهش توان در ترکیب دو یا چند منبع توان را با بهینه‌سازی تکامل دیفرانسیل چند هدفه و الگوریتم تکاملی پارتو قدرت برطرف کرد [۲۴]. یانگ و همکاران در سال ۲۰۲۰ سامانه‌ی کنترل انرژی تجدیدپذیر ترکیبی با روش پیش‌بینی بیش‌ترین بار را توسعه دادند. این سامانه جریان متناوب و تصادفی انرژی‌های تجدیدپذیر را به طوری که قابلیت اطمینان بار افزایش یابد کنترل می‌کرد. رویکرد کنترل، حالت تطبیقی بوده برای بهبود پاسخ‌های دینامیکی طراحی شده است. نتایج نشان داد: فقط جریان‌های محور dq نیاز به اندازه‌گیری دارند و برآورد اغتشاش به راحتی با هزینه‌های کنترل مناسب است. عملکرد کنترل معمولی متناسب با انتگرال – مشتق پی‌ای‌دی[1]کنترل، اتصال و انتساب کنترل مبتنی بر انفعال، کنترل حالت کشویی و کنترل کسری مرتب حالت کشویی مقایسه شده است. آن‌ها نشان دادند، خطای توان فعال در سامانه‌ی پی‌ای‌دی کمینه

1 Proportional Integral Derivative (PID)

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

است. در این پژوهش یک آزمایش سخت افزار مبتنی بر دی اسپیس[1] برای بررسی عملی بودن در شرایط مختلف اجرا شده است [۲۱]. در زیرساخت اندازه‌گیری پیشرفته برای سامانه توزیع ولتاژ پایین این تکنولوژی‌ها رعایت می‌گردد و برنامه‌های نظارت مبتنی بر شبکه هوشمند بر اساس مدل‌های تخمین کاهش ابعاد تلفات احتمالی، مدل تخمین کورهونن و مدل تخمین نرخ تلفات شبکه ثابت انجام می‌شود [۲۵]. در پژوهشی مدل بهینه‌سازی وضعیت شبکه تبدیل به تبادل اطلاعات در شبکه هوشمند چندسطحی کمک کرد و به کنترل کننده هوشمند اجازه داد تا اطلاعات برای به دست آوردن بهترین راه حل فنی و اقتصادی با کیفیت بالا برای هر مصرف‌کننده استفاده شود [۲۶].

پراوین و همکاران [۲۷] در سال ۲۰۲۰ یک چارچوب برنامه ریزی و کنترل واکنشی برای ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر با یک سامانه‌ی پیل سوختی مبتنی بر اصلاح کننده و یک دستگاه ذخیره انرژی را طراحی کردند. در این پژوهش سعی شده است تا با ماهیت متناوب احتمالی انرژی‌های خورشیدی و بادی با اتکا به سامانه‌ی ذخیره مناسب اقدام شود. یک لایه زمانبندی مناسب که برنامه مفصلی از سهم بهینه منابع مختلف برق موجود را ارائه می‌دهد، در طول مدت یک هفته (۷ روز) در نظر گرفته شد. اندازه‌گیری نوسانات یا عدم قطعیت‌های احتمالی در منابع انرژی تجدیدپذیر دریافت و عملکرد صحیح سیستم تولید برق از طریق تصمیم‌گیری مناسب در مورد تولید از طریق اصلاح کننده مستقر ثبت شد. نتایج نشان داد: عملکرد سامانه‌ی کنترلی برنامه ریزی شده توانست بار با تعادل مناسب برای منابع انرژی تجدیدپذیر ایجاد کند. چنانچه مدل سخت افزاری آن هرگز ایجاد نشد تا اعتبار سنجی مناسب صورت گیرد.

دانگ و همکاران [۲۸] در سال ۲۰۲۰ عملکرد بیشینه‌ی سامانه‌ی خنک کننده، گرمایش و قدرت ترکیبی انرژی تجدیدپذیر براساس مدل کنترل پیش بینی بکارگیری کردند. بار تولیدی سامانه می‌تواند برای تأمین انرژی حرارتی یا انرژی خنک کننده کاربران استفاده شود. با توجه به ویژگی‌های دینامیکی واحد ذخیره انرژی، یک مدل بهینه سازی انرژی با خطای پیش بینی ارائه شده است. بر این اساس، یک استراتژی عملیاتی بهینه‌سازی هزینه عملیاتی سیستم به عنوان عملکرد هدف در نظر گرفته شده است. با بهینه‌سازی خروجی هر دستگاه در سیستم، هزینه کارکرد تحت حداکثر خطای پیش بینی به حداقل رسیده است [۲۹].

نوقریان و کوفیگر [۳۰] در سال ۲۰۲۰ کنترل توان سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر ترکیبی باد، فتوولتاییک و باتری با استفاده از استراتژی سیستم‌های سوئیچ شده را طراحی کردند. در این سامانه، استراتژی کنترل انطباقی برای تأمین کل تقاضای برق در شرایط مختلف تحت سوئیچینگ خودکار ارائه شد. قانون کنترل پیشنهادی بدون نیاز به اندازه‌گیری انرژی باد فقط به سرعت و جریان زاویه‌ای وابسته بود. نتایج شبیه‌سازی برای نشان دادن عملکرد روش پیشنهادی برای یک سیستم انرژی ترکیبی معمولی ارائه و بحث شد.

کنترل کننده‌های هوشمند جدید فناوری بلاک چین را برای تشخیص الگوی توزیع شده و نظارت بر زیر سیستم‌ها استفاده می‌کند. این کنترل‌کننده خودکار الگو، داده‌های خاص سفارشی شده را غیرمتمرکز و توزیع می‌کند. یادگیری ماشین از هوش مصنوعی نشات گرفته است، با استخراج طرح‌های عمل سامانه کنترلی، الگوهای مانند کشف دانش در پایگاه داده و داده کاوی به طور گسترده در برنامه‌های تجاری و آب و هوا استفاده می‌شوند [۳۱].

در پژوهشی دیگر اندازه‌گیری هوشمند بر اساس معماری ابری برای شبکه‌های توزیع ولتاژ پایین در کاربرد نظارت بر شبکه هوشمند انجام شده است. این مقاله نقش حیاتی راه حل ابری را در دستیابی به قابلیت همکاری، مقیاس پذیری و انعطاف پذیری و همچنین امکان ترکیب زیر سامانه‌ها برای اتوماسیون سیستم توزیع مورد بحث قرار خواهد داد. عملیات هماهنگ خدمات شبکه برق واحد مصرف کننده توسط ابر، تکنیک تخمین وضعیت توزیع شده و همچنین پیکربندی مجدد شبکه مستقل را بکار می‌گیرد [۳۲].

جفت شدن منابع نوسان‌دار انرژی تجدیدپذیر با منابع قابل کنترل، مانند تولید همزمان میکرو با سوخت فسیلی، یک سامانه ترکیبی را شکل می‌دهد که به طور قابل توجهی انتشار گاز دی‌اکسید کربن و مصرف انرژی اولیه را کاهش می‌دهد. هدف از این کار بررسی کارهای تحقیقاتی در مورد سامانه‌های ترکیبی انرژی تجدیدپذیر مبتنی بر تولید همزمان میکرو و ارائه یک مطالعه موردی از بهینه‌سازی سامانه تولید همزمان میکرو مبتنی بر خورشید و باد به صورت همزمان است. نوآوری در سامانه کنترلی هوشمند است که با استفاده از الگوریتم تصمیم‌گیری پویا و منظور کردن متغیرهای بهینه سازی، مدیریت انرژی تجدیدپذیر ترکیبی را انجام داده و توان الکتریکی کلبه سبز را بر عهده می‌گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

طراحی سخت افزار سامانه کنترلی با استفاده از نرم افزار پروتئوس[2] انجام گردید. از کد نویسی برای توسعه الگوریتم تصمیم‌گیری استفاده شد

1 dSpace

2 Proteus

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

و در پایان برنامه‌نویسی بر روی میکرو کنترلر نصب شد. مدار الکترونیکی میکروکنترلر[1] در نرم افزار پروتئوس طراحی شده به شرح زیر است:

- مدارهای خود مداخله ولتاژ[2] (۴ واحد)؛
- مدار توسعه میکروکنترلر PIC۱۶F۱۸۸۷۷ (۱ واحد)؛
- مدارهای سوئیچینگ پایه رله (۱۷ واحد)؛
- مبدل‌های جریان مستقیم به جریان مستقیم افزاینده (۴ واحد)؛
- مبدل جریان مستقیم به جریان غیرمستقیم (۱ واحد).

مدار توسعه میکروکنترلر، برای ادغام کلیه مدارهای الکترونیکی کنترل شده از طریق برنامه بارگزاری شده طراحی گردید. مدارهای سوئیچینگ رله شامل ۲ قسمت است:

۱- ماژول‌های سوئیچینگ و کنترل رله که برای انجام تنظیم بین ولتاژهای خروجی تنظیم شده از منابع انرژی تجدیدپذیر خورشید و باد هستند.

۲- مدارهای سوئیچینگ شارژ یا تخلیه که برای شارژ یا تخلیه استفاده می‌شوند. این پایه رله مدارها، از طریق برنامه بارگذاری شده در میکروکنترلر بکارگیری می‌شوند.

کلبه سبز در ارتفاع ۱۲۸۱ متری سطح دریا و در موقعیت کشور ایران، شهر تهران با مختصات جغرافیایی ۵۱ درجه و ۹ دقیقه و ۵۳ ثانیه طولی و ۳۵ درجه و ۴۴ دقیقه و ۳۱ ثانیه عرضی مطابق با شکل (۱- الف)، احداث، تجهیز و ارزیابی شد. کمینه‌ی دمای هوا در این محل ۰/۱- درجه‌ی سلسیوس و بیشینه‌ی آن به ۴۲/۷+ درجه سلسیوس می‌رسد. متوسط دریافت انرژی خورشیدی در موقعیت این کلبه روزانه برابر با ۴/۹ kWh/m^2 می‌باشد. میانگین سالانه‌ی دمای محیط در ارزیابی موقعیت جغرافیایی و متغیرهای هواشناسی با استفاده از داده‌های هواشناسی اندازه‌گیری شده برابر ۲۱/۲ درجه‌ی سلسیوس است. شکل ۱ نمای بیرونی سامانه‌ی تبدیل انرژی تجدیدپذیر ترکیبی با اتصال زیر سامانه‌های خوشیدی و بادی را نشان می‌دهد. اجزای تشکیل‌دهنده‌ی سامانه‌ی تبدیل انرژی تجدیدپذیر ترکیبی در زمان واقعی شامل، مدارهای الکترونیک، زیر سامانه خورشیدی و بادی، کنترل‌کننده‌ی شارژ، بانک باتری، حس‌گرها، مدارهای آماده‌ساز، مدارهای ایمنی، مبدل‌ها، مدارهای مداخله‌ی ولتاژ، مدارهای سوئیچینگ رله، اینورتر، دیتالاگر و رایانه می‌باشد. یکپارچه‌سازی و ساخت سخت افزار سامانه‌ی هوشمند تبدیل انرژی تجدیدپذیر ترکیبی جریان مستقیم برای آزمایش سامانه در زمان واقعی انجام شده است. کنترل‌کننده هوشمند، ضمن اینکه به‌طور پویا با تغییرات خروجی منبع خورشیدی و انرژی بادی و باتری‌ها منطبق می‌شود، قادر به پاسخ‌گویی به درخواست‌های بیرونی، مانند سیگنال‌های ولتاژ و محدودیت‌های سامانه‌ی قدرت یا درخواست‌های کاربر است. کنترل‌کننده‌ی شارژ، توان الکتریکی تولید شده توسط زیر سامانه‌های انرژی را ضمن ارسال به منبع ذخیره انرژی باتری، به منظور ارزیابی، به مدارهای کنترل‌کننده و سپس به مبدل آنالوگ به دیجیتال و کنترل‌کننده هوشمند انرژی تجدیدپذیر ترکیبی ارسال می‌کند. کنترل‌کننده‌ی شارژ علاوه بر ولتاژ مناسب شارژ باتری، متغیری به نام ولتاژ آزاد را به مدارهای کنترل‌کننده ارسال می‌کند.

داده‌های هواشناسی هم‌زمان توسط ابزار اندازه‌گیری دریافت و قابلیت تولید توان در هر زیر سامانه، پیش‌بینی می‌شود. این سامانه بار منبع تغذیه باتری را به بار متناوب متصل به مصرف کننده‌ی کلبه سبز به صورت بهینه می‌رساند. همچنین سامانه‌ی کنترلی انرژی تجدیدپذیر ترکیبی در زمان واقعی به طور مداوم فرآیند شارژ یا تخلیه منبع باتری را مطابق با الگوریتم تصمیم‌گیری پویا مدیریت کرده و ولتاژهای خروجی تنظیم شده ۷ تا ۱۲ ولت و ۱۲ تا ۱۵ ولت را از منابع انرژی تجدیدپذیر خورشیدی و بادی به ولتاژ ۲۳۰ ولت مصرف کننده بار در کلبه سبز می‌رساند. هواشناسی منطقه آزمون از طریق سامانه‌ی کنترلی، در بازه زمانی هر ۱ ساعت به مدت یک سال (مجموعاً ۸۷۶۰ ساعت) اندازه‌گیری شده و از طریق مبدل در بسته تجاری لب ویو[3] و سپس در برنامه اکسل ثبت شده است. مدیریت انرژی توسط کنترل‌کننده هوشمند انجام می‌شود. این سامانه به‌طور خودکار و پویا با تغییرات خروجی منبع خورشیدی و انرژی بادی و باتری‌ها تطبیق یافته و قادر به پاسخ‌گویی درخواست‌های بیرونی، مثل سیگنال‌های ولتاژ و محدودیت‌های سامانه‌ی قدرت یا درخواست‌های اپراتور است. شکل۲ مدل خود مداخله مبتنی بر ولتاژ و سخت افزار سامانه کنترلی را نشان می‌دهد.

ساختار کنترل سامانه‌ی انرژی تجدیدپذیر ترکیبی جریان مستقیم در زمان واقعی به پارادایم‌های کنترل تمرکز، توزیع و ترکیبی طبقه بندی شده است. در هر سه پارادایم کنترل، منابع انرژی تجدیدپذیر به یک کنترل کننده متصل می‌شوند که کارایی و عملکرد بهینه همه زیر سامانه‌ها را تعیین می‌کند.

پارادایم‌های تمرکز، ولتاژهای خروجی تنظیم شده را از تمام منابع انرژی تجدیدپذیر موجود اندازه‌گیری کرده و یک سیگنال کنترل فعال سازی به کنترل کننده می‌فرستد. کنترل کننده مبتنی بر ولتاژ با هدف بهینه‌سازی استفاده از ولتاژهای خروجی منابع انرژی تجدیدپذیر برای تأمین بار و شارژ منبع ذخیره انرژی باتری که بر اساس شرایط ولتاژ خروجی تنظیم شده

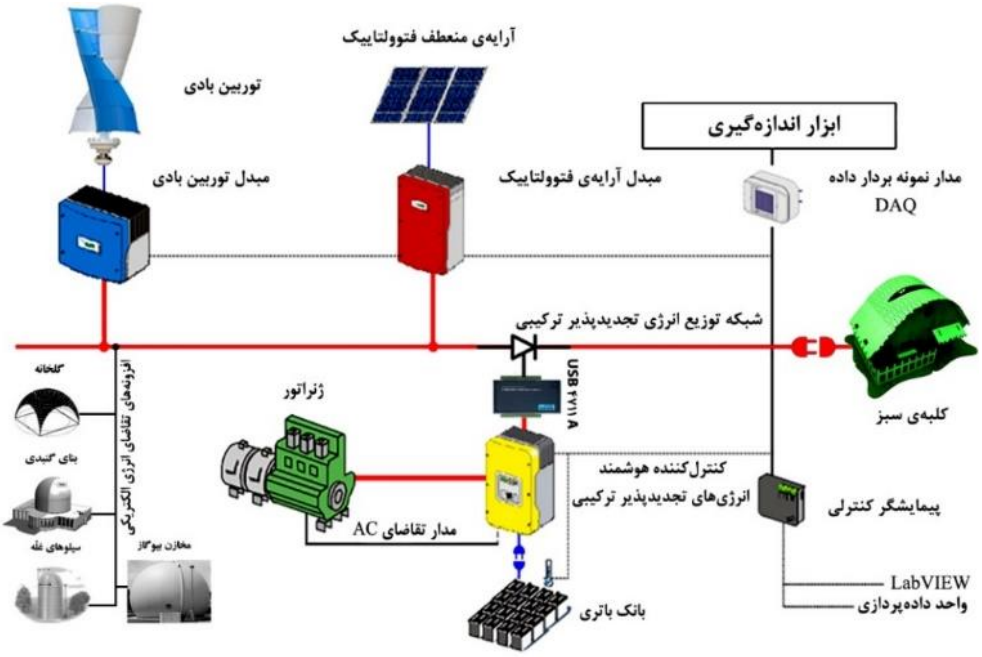
1 PIC16F18877
2 Voltage based self intervention circuitries
3 LabVIEW

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



الف



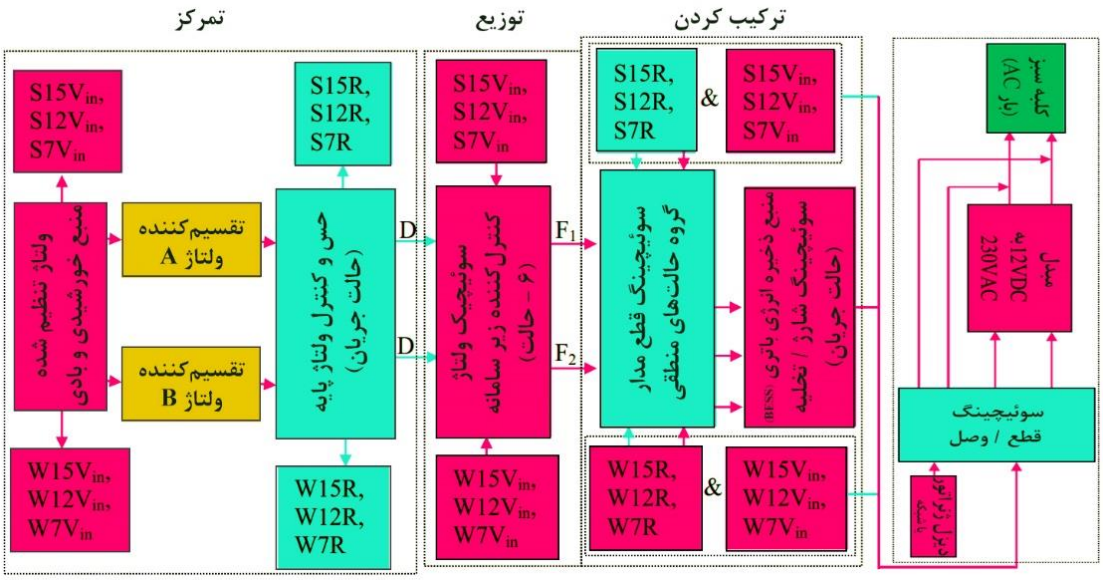
ب

شکل ۱. سامانه‌ی تجدیدپذیر ترکیبی و تجهیزات کنترلی. الف: نمای بیرونی کلبه سبز؛ ب: شماتیک اتصال سامانه‌ها

Fig. 1. Hybrid renewable energy system and control equipment A: Green hut; B: System connection schematic

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



شکل ۲. بلوک دیاگرام مدل کنترل ولتاژ سامانه‌ی انرژی تجدیدپذیر ترکیبی جریان مستقیم.

Fig. 2. Block diagram of voltage control circuit of hybrid renewable energy system

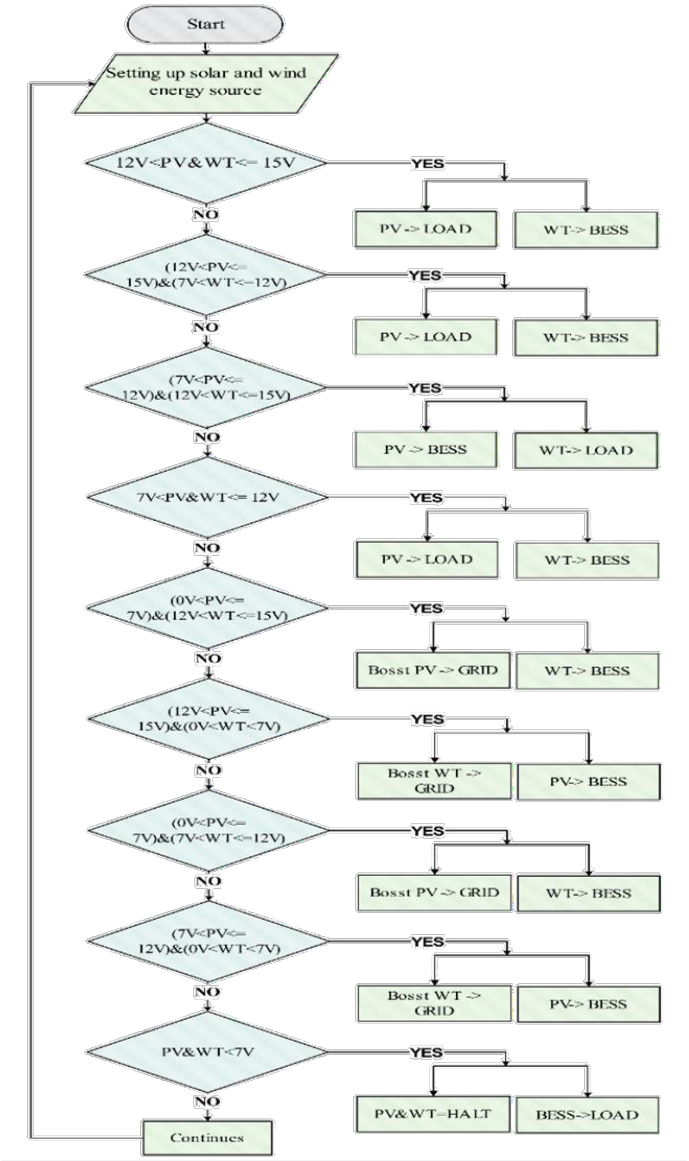
کار تصمیم‌گیری را انجام می‌دهد. کنترل کننده پایه ولتاژ، میزان ولتاژهای خروجی تنظیم شده را از منابع تجدیدپذیر اندازه‌گیری کرده و یک سیگنال به واحد تصمیم‌گیری ارسال می‌کند.

پارادایم توزیع، سیگنال فعال سازی را از کنترل کننده مبتنی بر ولتاژ دریافت کرده و مطابقت می‌دهد تا منابع انرژی تجدیدپذیر متصل به کنترل کننده ولتاژ در سامانه متصل باشند. سوئیچینگ ولتاژ با قطع کننده مدار و کنترل کننده شرایط منابع انرژی ارتباط برقرار می‌کند تا تصمیم فعال‌سازی را بر اساس سیگنال دریافتی، ایجاد کند. با این قابلیت، امکان مدیریت مؤثر منابع انرژی تجدیدپذیر بر اساس محاسبات کنترل کننده فراهم شده و خروجی هر منبع انرژی تجدیدپذیر بهینه می‌شود.

الگوی ترکیب، از پارادایم‌های کنترل توزیع تشکیل شده است تا تمام زیر سامانه‌های مربوطه در زمان واقعی مدیریت شود. منابع انرژی تجدیدپذیر به طور مشروط به عنوان یک واحد در زیر سامانه گروه‌بندی می‌شوند. سوئیچینگ قطع کننده مدار و شرایط گروه در زیر سامانه برای مدیریت و هماهنگی مؤثر ولتاژهای خروجی از منابع انرژی تجدیدپذیر به بار متصل شده یا برای شارژ منبع ذخیره انرژی باتری استفاده می‌شوند. در سطح عملیاتی، الگوی ترکیب، تصمیم‌گیری‌های زیادی انجام می‌دهد. شکل ۳ الگوریتم تصمیم‌گیری پویا سامانه مدیریت انرژی کلبه سبز را نشان می‌دهد. الگوریتم تصمیم‌گیری پویا ۹ شرایط مختلف را بررسی می‌کند که به منابع انرژی تجدیدپذیر خورشیدی و بادی اجازه می‌دهد منبع تقاضای الکتریکی کلبه سبز یا منبع ذخیره انرژی باتری برای فرآیند شارژ را متصل کند. در این پیکربندی‌ها، هنگامی که یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر قادر به تأمین ولتاژ خروجی باشد، از این ولتاژ برای شارژ منبع ذخیره باتری‌ها استفاده می‌شود که به عنوان منبع تغذیه ثانویه در هنگام در دسترس نبودن منابع انرژی تجدیدپذیر خورشیدی-بادی برای تولید خروجی ولتاژ از آن یا دیزل ژنراتور استفاده می‌شود. هشت ماژول سوئیچینگ و کنترل رله به ولتاژهای خروجی تنظیم شده از منابع انرژی تجدیدپذیر خورشیدی و باد متصل هستند و هشت ماژول کنترل و رله دیگر نیز برای انجام فرآیند شارژ یا تخلیه به منبع ذخیره انرژی باتری متصل هستند. اگرچه تمام ماژول‌های سوئیچینگ و کنترل رله به درگاه‌های ورودی یا خروجی میکروکنترلر متصل هستند اما هر یک از آن‌ها براساس سیگنال فعال شده بیشینه از الگوریتم تصمیم گیری پویا، به صورت جداگانه پیروی می‌کنند. هر یک از ماژول‌های سوئیچینگ و کنترل

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



شکل ۳. الگوریتم تصمیم‌گیری پویا سامانه مدیریت انرژی کلبه سبز

Fig. 3. Dynamic decision-making algorithm of the system

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جدول ۱. مصرف کننده‌های برقی کلبه‌ی سبز

Table 1. Electricity consumers of the green cottage.

بخش	مصرف (W)	جریان (A)	زمان (ساعت)	آمپرساعت روزانه (Ah)
پخت و پز	۴۰-۸۰۰	۸/۳۳	۱	۸/۳۳
سرگرمی	۱۷-۱۰۰	۲/۵	۲	۵
		۰/۸۳	۵	
روشنایی	۵-۱۰	۰/۶۲	۵	۱۱/۴۵
		۰/۸۳	۵	
رایانه	۵۰	۴/۱۶	۸	۳۳/۲۸
نگهداری	۲۰-۱۰۰	۳/۳۳	۲۴	۷۹/۹
جمع	۱۳۲-۱۰۶۰	۲۰/۶	-	۱۳۷/۹۶

رله به عنوان یک درگاه خروجی در میکروکنترلر متصل شده‌اند. در زمان نبود منابع انرژی تجدیدپذیر، تخلیه شارژ از بانک باتری دوم و باتری اول آغاز شده و تخلیه شارژ تا وضعیت ۴۰ ٪ به صورت متناوب ادامه می‌یابد. چنانچه شارژ بانک باتری به زیر ۴۰ ٪ برسد و منبع تجدیدپذیر برای اتصال نباشد، سامانه کنترلی دیزل ژنراتور را برای تأمین شارژ باتری‌ها وارد مدار می‌کند. پس از کامل شدن شارژ باتری، دیزل ژنراتور خاموش و فرآیند تکرار می‌شود.

برای تعیین آمپر ساعت باتری ۱۲ ولت، چنانچه در بخش روشنایی ۲ عدد ۱۰۰ وات با مصرف ۱۰ وات و ۱ عدد ۷۵ واتی با مصرف ۷/۵ وات که دارای مصرف مجموع ۲۷/۵ وات هستند استفاده شده است که می‌تواند با انواع به روز لامپ‌های روشنایی کم‌مصرف در محدوده‌ی توان ۵ تا ۱۰ وات تغییر کند. مصرف بخش روشنایی با ولتاژ باتری ۱۲ ولت قبل از اینورتر، معادل ۲/۲۹ آمپرساعت در هر روز و اگر هر ۳ لامپ را به مدت ۵ ساعت روشن نگهداریم، آنگاه این زمان ۱۱/۴۵ آمپر ساعت نیاز به باتری ۱۲ ولتی دارد. جدول ۱ مصرف کننده‌های برقی کلبه‌ی سبز را نشان می‌دهد.

در مجموع روزانه ۱۳۸ آمپر ساعت تقاضای انرژی کلبه سبز خواهد بود. این مقدار در محدوده‌ی منطقی مصرف کلبه‌های کوچک (۱۰۰ تا ۲۰۰ آمپر ساعت) است. چنانچه مجموع توان مصرفی در حالت بحرانی ۲۴۷ وات و تخلیه کامل باتری‌ها ۲۰۰ آمپر ساعت در ولتاژ ۱۲ ولت ورودی اینورتر باشد، آنگاه حداقل زمانی پشتیبانی ۴۰۸/۱۰ دقیقه محاسبه می‌گردد. این شرایط زمانی رخ می‌دهد که منابع انرژی تجدیدپذیر موجود نبوده و دیزل ژنراتور به سامانه متصل نباشد. چنانچه الگوریتم کنترلی اجازه نخواهد داد ذخیره انرژی باتری به ۴۰٪ این مقدار برسد و سامانه‌ی پشتیبان وارد شبکه خواهد شد.

در این پژوهش از استاندارد سنجش عملکرد زیر سامانه خورشیدی[1] استفاده گردید. این اطلاعات شامل: ولتاژ مداربار V_{oc}، جریان مداربسته یا کوتاه سلول I_{sc}، ولتاژ در نقطه‌ی بیشینه‌ی توان V_{MPP}، جریان در نقطه‌ی بیشینه‌ی توان I_{MPP}، توان در نقطه‌ی بیشینه P_{MPP}، عملکرد یا بازده η می‌باشد. متغیر پوشش FF مطابق با رابطه (۱) محاسبه می‌گردد. همچنین عملکرد (η) از طریق رابطه (۲) محاسبه شده است.

$$FF = \frac{V_{MPP} \times I_{MPP}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (۱)$$

$$\eta = \frac{P/S_t}{I} \quad (۲)$$

در رابطه‌ی فوق، I برابر مجموعه تابش بر روی سطح آرایه با واحد $\mathrm{W/m^2}$ و S_t برابر سطح آرایه‌ی فتوولتاییک با واحد $\mathrm{m^2}$ و P برابر توان سامانه‌ی در نقطه‌ی دلخواه با واحد W می‌باشد.

برای ارزیابی زیر سامانه انرژی بادی از استانداردهای IEC ۶۱۴۰۰-۵:۲۰۲۰ و IEC ۶۱۴۰۰-۱۲-۱:۲۰۱۷ RLV و برای ارزیابی توان الکتریکی زیر سامانه بادی از استاندارد IEC ۶۱۴۰۰-۱۲-۱:۲۰۱۷ RLV پیروی شده است. چنانچه π برابر با ۳/۱۴۱۵ و r برابر با طول یک تیغه توربین بادی باشد، مساحت جاروب شده با استفاده از رابطه (۳) و سرعت چرخش روتور با استفاده از

1 IEC 61853-4:2018

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

رابطه (۴) محاسبه شد.

$$A = \pi r^2 \qquad (۳)$$

$$TSR(\lambda) = \frac{Tip\,\text{speed}}{\text{wind speed}} = \frac{v}{V} \equiv \frac{\omega r}{V} \qquad (۴)$$

در رابطه (۴)، v برابر با ωr. برابر نسبت سرعت TIP (m/sec) و r برابر طول تیغه‌ی توربین بادی (m) و ω برابر سرعت زاویه‌ای (rad/sec) برابر $2\pi f$ و همچنین f برابر فرکانس چرخش (Hz) است. چنانچه r شعاع چرخش تیغه توربین بادی و T زمان چرخش یک دور با واحد ثانیه باشد، رابطه (۵) سرعت باد در نوک تیغه‌ها را نشان می‌دهد.

$$Blades\,TIP = V = \frac{2\pi r}{T(Time)} \qquad (۵)$$

TSR متغیری برای بیشینه کردن توان خروجی و بهبود کارایی توربین بادی است. هنگامی که اندازه‌گیری‌ها انجام شد، بیشینه توان توربین بادی با استفاده از رابطه (۶) محاسبه می‌شود؛

$$P_{WP} = \frac{\rho \times A \times V^3}{2} \qquad (۶)$$

در رابطه (۶)، P توان بر حسب وات و ρ چگالی هوا در محدوده‌ی ۱/۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب در سطح دریا و A مساحت جاروب شده توسط تیغه‌های توربین بادی بر حسب متر مربع و V سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه که توسط دستگاه اندازه‌گیری شد.

برای محاسبه اثرات زیست محیطی تأمین برق کلبه سبز از طریق سامانه تبدیل انرژی تجدید پذیر ترکیبی از استانداردهای ISO ۱۴۰۶۷ و ISO/IEC ۱۷۰۲۹ استفاده شد. معادلات گاز گلخانه‌ای با استفاده از نرخ انتشار حاشیه CO_2 و با میانگین وزنی ملی انسی[1] برای تبدیل کاهش کیلووات ساعت به واحدهای کاهش انتشار دی‌اکسید کربن استفاده گردید. کاربرد عمومی معادلات، یافتن معادل‌سازی برای انتشارهای مربوط به برق است. این معادلات انتشار در برنامه‌های بهره‌وری انرژی یا انرژی‌های تجدیدپذیر استفاده شده است.

در ارزیابی اقتصادی سامانه، معیارهای خالص ارزش فعلی[2] ، نرخ بازده داخلی[3] و دوره بازگشت سرمایه[4] محاسبه شده است. ارزش فعلی مجموعه‌ای از جریانات وجوه نقد آینده از طریق رابطه (۷) محاسبه شده است.

$$NPV = \text{NCF}_0 + \frac{NCF_1}{(1+i)} + \frac{NCF_2}{(1+i)^2} + \frac{NCF_t}{(1+i)^t} \qquad (۷)$$

در رابطه‌ی (۷)، NPV برابر خالص ارزش فعلی، NCF برابر خالص وجوه نقد، i برابر نرخ تنزیل و t برابر دوره‌ی مالی می‌باشد. NPV ممکن است یک عدد منفی (عدم انتخاب پروژه) یا یک عدد مثبت (انتخاب پروژه) باشد. در صورتی که خالص ارزش فعلی مساوی با صفر گردد، آنگاه طراح در انتخاب یا عدم انتخاب انجام پروژه بی‌تفاوت خواهد بود. نرخ بازده داخلی، نرخ تنزیلی است که بر اساس آن، ارزش خالص فعلی پروژه برابر صفر می‌شود. اگر خالص ارزش فعلی پروژه‌ای مثبت باشد، نرخ بازده داخلی آن پروژه از نرخ بازدهی که برای سرمایه‌گذاری به کار برده شده، بیش‌تر است. در محاسبه خالص ارزش فعلی فرض بر این است که نرخ تنزیل مشخص است و خالص ارزش فعلی پروژه تعیین می‌گردد. در محاسبه نرخ بازده داخلی، خالص ارزش فعلی پروژه معادل صفر قرار گرفته و نرخ تنزیل که همان نرخ بازده داخلی پروژه است، تعیین شده است. با استفاده از معیار دوره‌ی بازگشت سرمایه[5] ، دوره‌ای که در آن مجموع درآمدهای سالیانه با هزینه‌ی سرمایه‌گذاری برابر (سربه‌سر) مشخص می‌گردد. آزمون آماری بر مبنای طرح آزمایشی فاکتوریل و تاگوچی برای چهار سطح و سه فاکتور (شدت تابش خورشیدی، دمای سطح سلول‌های خورشیدی، سرعت باد) انجام شده است.نهایتاً میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای با استفاده از نرخ انتشار حاشیه گاز دی‌اکسید کربن و با میانگین وزنی انسی برای تبدیل کاهش کیلووات ساعت به واحدهای انتشار دی‌اکسید کربن استفاده شده است.

۳- نتایج و بحث

با در نظر گرفتن ترکیب انرژی خورشیدی، بادی و استفاده از پشتیبان

1 Ansi

2 Net Present Value (NPV)
3 Internal Rate of Return (IRR)
4 Payback Period
5 Payback Period

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جدول ۲. ترکیب‌های بهینه سامانه تبدیل انرژی تجدیدپذیر ترکیبی.

Table 2. Optimum hybrid design of renewable energy system.

ترکیب	خورشیدی (kW)	بادی (i۱۵۰۰)	TG2500 (kW)	باتری (100Ah)	هزینه برق (COE-$)	هزینه اولیه ($)	سوخت (L)
۱	۰/۳۶۸	۰	۰/۸۹۰	۲	۰/۳۷۹	۱۲۲۲	۴۰۷
۲	۰/۲۰۵	۱	۰/۸۹۰	۲	۰/۳۸۱	۱۸۸۸	۲۵۳
۳	۰	۱	۰/۸۹۰	۳	۰/۴۰۲	۱۵۷۹	۳۵۹
۴	۰	۰	۰/۸۹۰	۴	۰/۴۰۷	۶۹۵/۶	۵۸۵
۵	۰/۳۹۶	۲	۰	۴	۰/۴۴۶	۳۳۷۸	۰
۶	۰	۳	۰	۵	۰/۵۱۰	۳۸۰۰	۰
۷	۱/۴۲	۰	۰	۱۱	۰/۵۴۷	۴۱۳۰	۰
۸	۰	۰	۰/۸۹۰	۰	۰/۶۳۶	۲۸۵/۴۶	۱۰۸۰
۹	۰/۰۰۶۵۱	۰	۰/۸۹۰	۰	۰/۶۳۷	۲۸۹/۸۳	۱۰۸۰
۱۰	۰	۱	۰/۸۹۰	۰	۰/۷۲۱	۱۲۷۸	۱۰۱۱
۱۱	۰/۰۰۳۴۸	۱	۰/۸۹۰	۰	۰/۷۱۷	۱۳۲۵	۱۰۱۷
۱۲	۰/۰۳۹۷	۱۴	۰	۰	۱/۸	۱۴۰۸۳	۰
۱۳	۰	۱۵	۰	۰	۱/۹۱	۱۵۰۰۰	۰

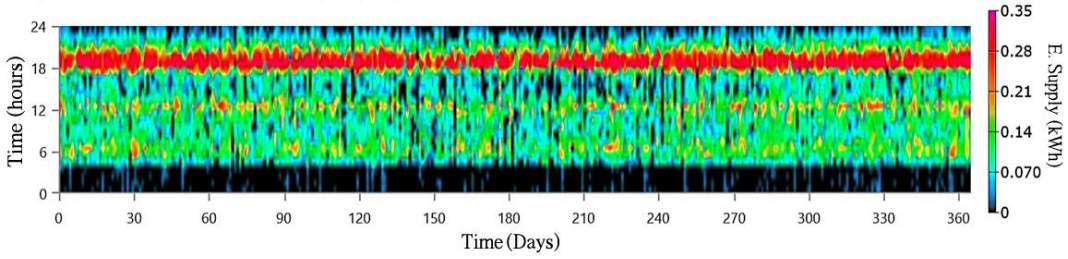
باتری و دیزل ژنراتور، ۱۳ حالت منطقی برای آرایش زیر سامانه‌ها محاسبه شده است. ترکیبی که از همه زیر سامانه‌ها استفاده می‌کند و هزینه تولید انرژی الکتریکی ۰/۳۸۱ دلار به ازای هر کیلو وات داشته باشد، دارای ۰/۲۰۵ کیلو وات زیر سامانه خورشیدی (با هزینه اولیه ۴۱۰ دلار) با ۱ توربین بادی مدل i۱۵۰۰ (هزینه اولیه ۱۰۰۰ دلار) و دیزل ژنراتور (موتور برق) مدل TG۲۵۰۰DC با ظرفیت اسمی ۰/۸۹۰ کیلو وات و ۲ عدد باتری ۱۰۰ آمپر ساعتی می‌باشد. این سامانه دارای نفوذ ۵۴ درصدی انرژی تجدیدپذیر بوده و سالانه ۲۵۳ لیتر سوخت مصرف کرده است. همچنین موتور برق در این آرایش ۱۳۴۵ ساعت کار کرده تا ۶۷۵ کیلو وات ساعت انرژی تولید کند. توان جبران باتری در این آرایش ۷/۰۳ ساعت بوده و کل انرژی سالانه گذرا از منبع ذخیره انرژی باتری ۴۹۹ کیلو وات ساعت می‌باشد. نقاط بهینه ترکیب زیر سامانه‌ها در جدول ۲ گزارش شده است. نتایج مصرف برق کلبه سبز نشان می‌دهد، الگوی مصرف برق خانگی با پیک شبانه از غروب آفتاب تا ۳ ساعت پس از آن خواهد بود. بیشینه مصرف برق در برخی از روزهای سال به ۲/۰۹ کیلو وات رسیده است. کمینه مصرف در ساعات خاموشی و معادل ۰/۰۱ کیلو وات ثبت شد. در زمان طلوع خورشید، شروع مصرف برق در کلبه سبز ۰/۳۳ کیلو وات خواهد بود و تا زمان غروب آفتاب به صورت میانگین سالانه ۰/۴۷ کیلو وات اندازه‌گیری شد. همچنین از دید مهندسی برق ضریب بار کلبه سبز ۲۲ درصد محاسبه شد.

شکل ۴ تولید و مصرف برق کلبه سبز طی دوره یک ساله را نشان می‌دهد. اینورتر از مجموع ۷۲۳۹ ساعت کارکرد در سال توانسته است با دریافت ۹۱۷ کیلو وات ساعت انرژی ۸۷۱ کیلو وات ساعت انرژی در سال خارج کند. بنابراین با تبدیل بار AC به DC سامانه ۴۵/۸ درصد اتلاف انرژی داشته است.

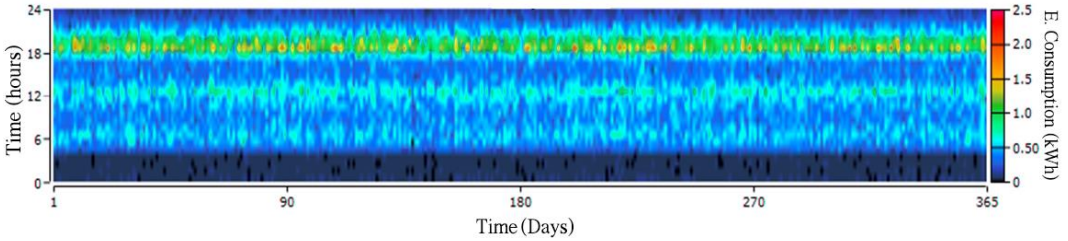
تولید سالانه زیر سامانه خورشیدی با نفوذ ٪۲۰ برابر ۳۳۱ کیلو وات ساعت در سال و زیر سامانه بادی با نفوذ ۴۰/۸ درصد برابر ۶۷۵ کیلو وات ساعت در سال و دیزل ژنراتور با نفوذ ۳۹/۲ درصد برابر ۶۴۷ کیلو وات ساعت در سال خواهد بود. عملکرد دیزل ژنراتور نشان می‌دهد، کل انرژی تولیدی این واحد ۶۷۵ کیلو وات ساعت در سال بوده و خروجی الکتریکی این سامانه ۰/۵۰۲ کیلو وات (کمینه ۰/۲۲۳ و بیشینه ۰/۷۹۸) ثبت شد. این واحد با آرایش ترکیبی ۲ از جدول۲ نیاز به ۲۵۳ لیتر سوخت دارد و تقاضای ویژه سوخت در ازای تولید توان برابر ۰/۳۷۶ لیتر به کیلو وات ساعت بوده است. همچنین تعداد شروع به کار این واحد ۵۸۹ بار در سال با عمر مفید ۱۱/۲ سال خواهد بود. عملکرد اسمی این واحد نهایتاً ۲۷/۱ درصد محاسبه

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



الف: تولید برق سامانه تبدیل انرژی تجدیدپذیر ترکیبی (محور افقی: روزهای سال؛ محور عمودی: ساعت – توان (kW))
A: Electricity generation (horizontal axis: days of the year; vertical axis: hours - power (kW))



ب: مصرف برق کلبه سبز
B: Electricity consumption

شکل ۴. تولید و مصرف برق کلبه سبز طی دوره یک ساله.

Fig. 4. Annual electricity production and consumption

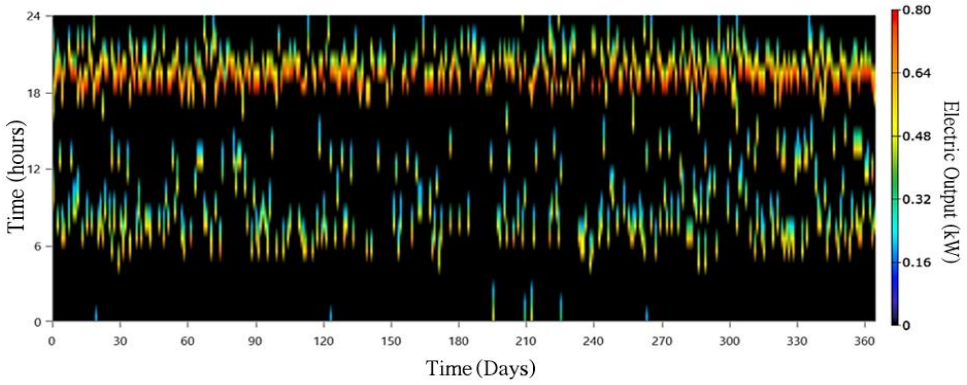
شد. شکل۵ کارکرد سامانه پشتیبان و ذخیره را نشان می‌دهد.

استفاده از منبع ذخیره انرژی باتری نشان می‌دهد، ولتاژ اسمی ۱۲ ولت مناسب بوده و هزینه میانگین تولید انرژی این منبع ۰/۰۹۷۷ دلار به ازای هر کیلو وات ساعت خواهد بود. انرژی وارد شده به منبع ذخیره باتری ۵۷۷ و انرژی خارج شده از این منبع ۴۴۶ کیلو وات ساعت در سال بوده است. افت توان ۱۱۱ کیلو وات ساعت در سال و کل انرژی گذرا از باتری‌ها ۴۹۹ کیلو وات ساعت در سال ثبت شد. همچنین استقلال منبع ذخیره انرژی باتری در تأمین تقاضای برق کلبه سبز ۷/۰۳ ساعت و هزینه تولید ۰/۱۱۲ دلار به ازای هر کیلو وات ساعت گزارش شد. سامانه هوشمند تبدیل انرژی تجدیدپذیر ترکیبی، بیش‌ترین سهم از تأمین تقاضای توان الکتریکی کلبه سبز را مدیریت می‌کند. شکل۶ امکان نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر با مولفه‌ی تصمیم‌گیری پویا و خالص ارزش سرمایه‌گذاری را نشان می‌دهد. با افزایش میانگین سرعت باد و با کاهش قیمت سوخت، خالص ارزش سرمایه‌گذاری کاهش می‌یابد. با خالص ارزش سرمایه‌گذاری ۳۳۴۹/۳ دلار می‌توان سهم نفوذ ۳۸٪ انرژی تجدیدپذیر به نسبت بار را داشت و چنانچه میانگین سرعت باد مطلوب و در محدوده ۵ متر بر ثانیه و قیمت سوخت ۰/۶ دلار، سامانه دارای خالص ارزش فعلی ۲۶۰۰ دلار خواهد بود.

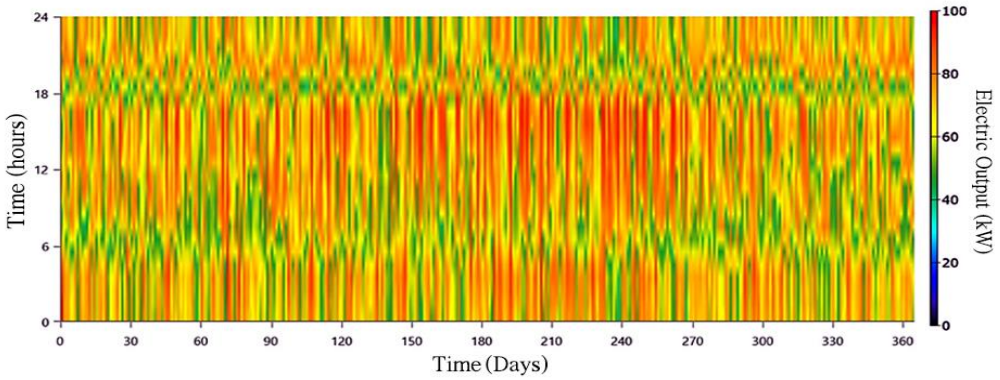
با افزایش میانگین سرعت باد و با کاهش قیمت سوخت، خالص ارزش سرمایه‌گذاری کاهش می‌یابد. با خالص ارزش سرمایه‌گذاری ۳۳۴۹/۳ دلار می‌توان سهم نفوذ ۳۸٪ انرژی تجدیدپذیر به نسبت بار را داشت و چنانچه میانگین سرعت باد مطلوب و در محدوده ۵ متر بر ثانیه و قیمت سوخت ۰/۶ دلار باشد، سامانه دارای خالص ارزش ۲۶۰۰ دلار خواهد بود. افزایش سرمایه‌گذاری از ۳۳۰۰ دلار به بالا غیر منطقی بوده و هزینه تولید انرژی را به صورت خطی افزایش می‌دهد. بهینه‌سازی سامانه نشان می‌دهد با در نظر گرفتن میانگین سرعت باد ۳ متر بر ثانیه و خارج کردن دیزل ژنراتور از ترکیب، استفاده از ۳ باتری و افزایش ظرفیت زیر سامانه خورشیدی و بادی

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



الف: کارکرد دیزل ژنراتور طی یک سال (محور افقی: روزهای سال؛ محور عمودی: ساعت – خروجی واحد (kW))
A: One-year operation of the generator (horizontal axis: days of the year; vertical axis: hours - unit output (kW))



ب: وضعیت شارژ منبع ذخیره انرژی باتری (محور افقی: روزهای سال؛ محور عمودی: ساعت – وضعیت شارژ (٪))
B: State of charge of the battery energy storage source (horizontal axis: days of the year; vertical axis: hours – state of charge (%))

شکل ۵. کارکرد سامانه پشتیبان و ذخیره.

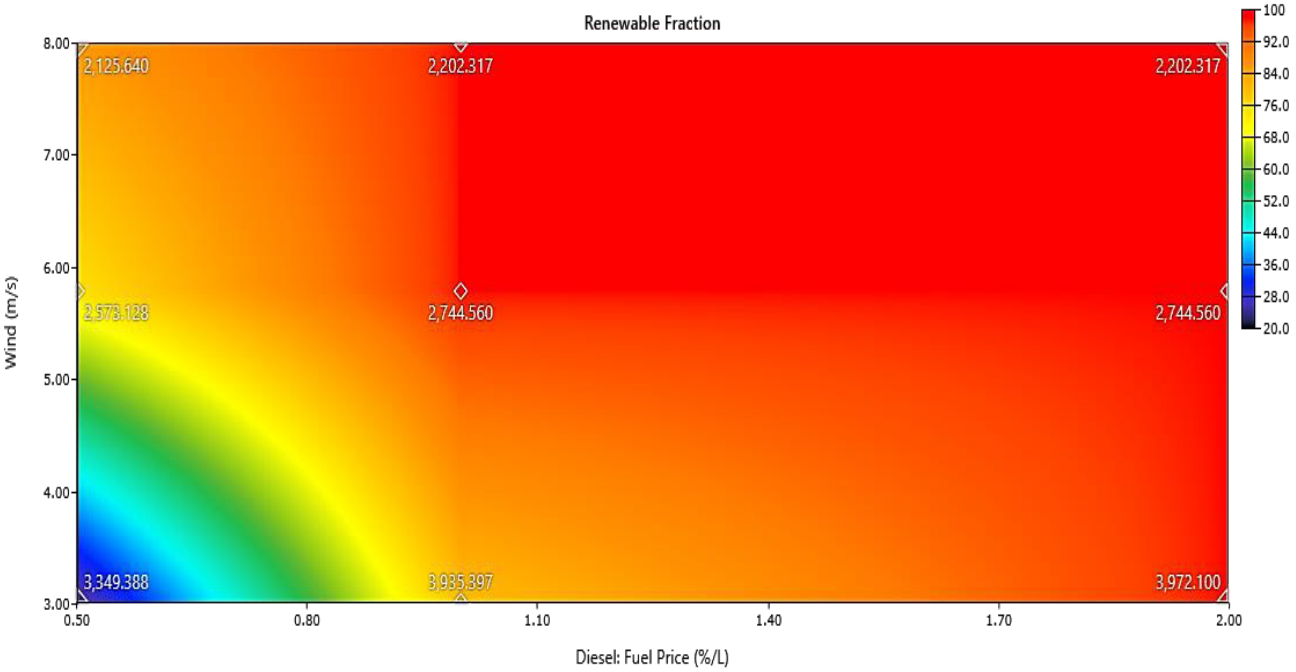
Fig. 5. One-year performance of the backup and storage system

می‌توان هزینه تولید برق تجدیدپذیر را تا ۰/۴۰۲ دلار به ازای هر کیلو وات ساعت کاهش داد.

ارزیابی هزینه – فایده برای سه طرح جدول ۲ انجام شده است. سامانه برای دوره ۲۰ سال با فرض نرخ تنزیل ۱۶/۷، تعرفه خرید برق تجدیدپذیر ۰/۰۵ دلار، قیمت بنزین ۳۰۰۰۰ ریال (۰/۱۲ دلار) متوسط تورم حامل‌های انرژی ۱۰ ٪ می‌باشد. زمان مورد نیاز برای راه‌اندازی پروژه‌ها ۱ ماه و از سال ۲۰۲۰ تا مستهلک در سال ۲۰۴۰ فرض شده است. طرح اول به منظور تأمین برق کلبه سبز با هدف اقتصادی می‌باشد. در این طرح میزان نفوذ انرژی تجدیپذیر ۲۳/۸ درصد و انرژی تجدیدناپذیر با مصرف ۴۰۷ لیتر سوخت بنزین می‌باشد. در طرح دوم با مصرف سوخت ۲۵۳ لیتر میزان نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر (خورشیدی و بادی) ۵۴ درصد با هدف «تجدیدپذیر و اقتصادی» می‌باشد. طرح سوم به دنبال تأمین ۱۰۰درصد انرژی کلبه سبز از طریق منابع

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



شکل ۶. نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر با مولفه‌ی تصمیم‌گیری پویا و خالص ارزش سرمایه‌گذاری.

Fig. 6. Fraction of renewable energies with dynamic decision-making model and net investment value

انرژی تجدیدپذیر است. بنابراین سوخت‌های فسیلی صفر بوده و از پشتیبان انرژی باتری تقاضای برق کلبه سبز تأمین شده است.

در طرح اول کل انرژی تولیدی سالانه کلبه سبز معادل kWh/yr ۱۶۹۷ می‌باشد. همچنین ارزش فعلی خالص برابر ۵۵۳/۶۸ دلار و نرخ بازگشت سرمایه داخلی برابر ۲۱/۴۹ درصد است. در پایان برنامه فروش برق به کلبه سبز در سال ۲۰۳۹ مجموعاً ۲۷۱۰/۷۹ دلار انرژی فروخته شده است. دوره بازگشت سرمایه در حالت طبیعی ۹/۱۰ سال (سال ۲۰۲۹) و در حالت دینامیک ۱۵/۷۱ سال است. تحلیل حساسیت نشان داد، بیش‌ترین اثر مربوط به درآمد فروش و پس از آن مربوط به هزینه‌های عملیاتی است و نسبت هزینه – فایده معادل ۱/۳۸ می‌باشد. از لحاظ زیست محیطی، طرح ۱ سالانه ۴۰۷ لیتر سوخت بنزین معادل ۱۰۶۵ کیلوگرم در سال دی اکسید کربن برای تأمین برق از طریق دیزل ژنراتور بکار گرفته است.

در طرح دوم کل انرژی تولیدی سالانه سامانه تبدیل انرژی تجدیدپذیر ترکیبی معادل kWh/yr ۱۶۵۲ می‌باشد. همچنین ارزش فعلی خالص برابر ۳۴۱/۴۷ دلار و نرخ بازگشت سرمایه داخلی برابر ۱۹/۵ درصد خواهد بود. در پایان برنامه فروش برق کلبه سبز در سال ۲۰۳۹ مجموعاً ۲۶۳۸/۹۰ دلار انرژی فروخته شده است. دوره بازگشت سرمایه در حالت طبیعی ۹/۸ سال (سال ۲۰۲۹) و در حالت دینامیک ۱۷/۶۱ سال است. تحلیل حساسیت پروژه نشان داد نسبت هزینه – فایده معادل ۱/۲۱ بوده و بیش‌ترین اثر مربوط به درآمد فروش و پس از آن مربوط به افزایش دارایی‌های ثابت است. از لحاظ زیست محیطی، طرح ۲ سالانه ۲۵۳/۴۴ لیتر سوخت بنزین معادل ۶۳۳ کیلوگرم در سال دی اکسید کربن برای تأمین برق بکار گرفته است. در طرح سوم انرژی تولیدی سالانه معادل kWh/yr ۱۹۳۳ می‌باشد. خالص ارزش فعلی سرمایه برابر ۳۷۹/۰۹ – دلار و نرخ بازده داخلی برابر ۱۵/۰۸ درصد است. در پایان برنامه فروش برق کلبه سبز در سال ۲۰۳۹ مجموعاً ۳۰۸۷/۷۷ دلار انرژی فروخته شده است. چنانچه از منفی بودن ارزش فعلی سرمایه مشخص است، اجرای پروژه توجیه اقتصادی ندارد و دوره استهلاک و بازگشت سرمایه خارج از طول عمر پروژه است. بیش‌ترین اثر مربوط به درآمد فروش و پس از آن مربوط به افزایش دارایی‌های ثابت بوده و اجرای این طرح انتشار گازهای گلخانه‌ای ندارد.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

تحلیل آماری متغیرهای اثرگذار بر توان و عملکرد سامانه نشان داد: تابش خورشیدی در محدوده‌ی ۰ تا ۱۲۰۰ وات بر متر مربع، همواره اثر مثبت بر روی توان سامانه خواهد داشت. با طلوع خورشید و افزایش شدت تابش تا W/m^2 ۹۰۰ اثر زیاد و از سطح ۹۰۰ تا W/m^2 ۱۲۰۰ اثر با شیب کمتر اما مثبت بر توان سامانه خواهد بود. اثر دما بر عملکرد سامانه‌های خورشیدی فتوولتاییک منفی بوده و با افزایش مقاومت داخلی و خارجی، کاهش توان سامانه را موجب می‌شود. این فاکتور تأثیر محدودتر بر توان سامانه دارد. اما افزایش دمای سطح سلول‌های خورشیدی بیش از ۸۰ درجه سلسیوس، اثر بیش‌تری بر کاهش توان سامانه خواهد داشت. فاکتور سرعت باد اثر مستقیم و مثبت بر عملکرد سامانه تبدیل انرژی تجدیدپذیر ترکیبی دارد. زیر سامانه بادی به‌وسیله توربین بادی در محدوده ۴ تا ۸ متر بر ثانیه به حد مطلوب تولید توان خواهد رسید. سرعت باد مطلوب برای استفاده از توربین‌های بادی مقیاس کوچک (۴۰۰ وات) بیش از ۴ متر بر ثانیه و در محدوده ۸ متر بر ثانیه ثبت شده است.

۴- نتیجه‌گیری

این تحقیق به منظور طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه تبدیل انرژی تجدیدپذیر ترکیبی جریان مستقیم در زمان واقعی برای نظارت، مدیریت و منابع انرژی موجود با هدف بهینه‌سازی انرژی انجام شده است. الگوریتم کنترل پویا که در سامانه تبدیل انرژی تجدیدپذیر ترکیبی بارگذاری شده و با موفقیت بهینه‌سازی ورودی و خروجی منابع انرژی تجدیدپذیر را مطابق با اقدامات ذیل انجام داده است.

- حس و اندازه‌گیری ولتاژ و انجام محاسبات ریاضی ولتاژ تنظیم شده منابع انرژی تجدیدپذیر خورشیدی و بادی؛
- انجام محاسبات ریاضی جهت ارائه وضعیت ولتاژ اندازه‌گیری شده سامانه ذخیره انرژی باتری و گزارش آن به درصد بر روی صفحه نمایشگر؛
- نظارت، هماهنگی، مدیریت و کنترل ماژول‌های تعویض رله برای منابع انرژی تجدیدپذیر خورشیدی و بادی و مدارهای سوئیچینگ شارژ / تخلیه برای سامانه ذخیره انرژی باتری بر اساس وضعیت شارژ.

نتایج ارزیابی هزینه – فایده اجرای طرح‌های تأمین برق کلبه سبز بیش‌ترین اتلاف توان را مربوط به اثر دما با ۱۵/۸ درصد و کمترین را مربوط به سیم‌کشی زیر سامانه‌ها گزارش می‌کند. بیش‌ترین مصرف برق کلبه سبز ۲/۰۹ کیلو وات و کمینه‌ی آن ۰/۰۱ کیلو وات ثبت شد. در زمان طلوع خورشید، مصرف برق کلبه آغاز و به ۰/۳۳ کیلو وات رسیده است. به صورت میانگین ضریب بار کلبه سبز ۲۲ درصد محاسبه شد.

آزمون آماری بر مبنای طرح آزمایشی فاکتوریل و تاگوچی برای چهار سطح و سه متغیر (شدت تابش خورشیدی، دمای سطح سلول‌های خورشیدی، سرعت باد) انجام شده است. دریافت داده‌های متناظر ماتریس آزمایش، از طریق طراحی داشبورد دینامیک داده‌های ذخیره شده اکسل، منتقل شده از نرم افزار لب‌ویو می‌باشد. رابطه (۸) معادله توان سامانه تبدیل انرژی تجدیدپذیر ترکیبی در شرایط محیطی را نشان می‌دهد؛

$$P(W) = 5.656 + 0.00047\mathrm{Irr} - 0.00115\mathrm{AvgCTemp} + 0.046\mathrm{WindS} \quad (۸)$$

R-sq=96.9

چنانچه، $R\text{-}Sq$ معادله توان سامانه ۹۶/۹۳ درصد و Irr تابش خورشیدی (W/m^2) و $AvgCTemp$ دمای سطح پنل‌های خورشیدی ($^\circ C$) و $WindS$ سرعت باد در محل نصب توربین بادی (m/s) می‌باشد. با تغییر تعرفه فروش تجدیدپذیر از مبلغ پایه ۰/۰۵ دلار به ۰/۰۶ دلار مطابق با تحلیل حساسیت شکل ۷، شرایط هزینه – فایده طرح سامانه تبدیل انرژی تجدیدپذیر ترکیبی تغییر خواهد کرد. در این حالت، در نرخ تنزیل ۱۶/۷ درصد، ارزش فعلی سرمایه در حالت بحرانی برابر ۷۰/۹۳ دلار و نرخ بازگشت سرمایه معادل ۱۶/۹۹ سال خواهد بود. همچنین دوره بازگشت سرمایه در حالت طبیعی، ۱۰/۶۸ سال و با احتساب نرخ تنزیل (دینامیک) ۲۰/۵۲ سال خواهد بود. در این حالت، نسبت هزینه – فایده معادل ۱/۰۳ محاسبه می‌گردد. بنابراین طرح ۱ با نفوذ انرژی تجدیدپذیر ۲۳/۸ درصد اقتصادی‌ترین، طرح ۲ دارای توجیه اقتصادی با ضریب نفوذ انرژی تجدیدپذیر ۵۴ ٪ درصد و اجرای طرح ۳ با نفوذ انرژی تجدیدپذیر ۱۰۰٪ در ایران اقتصادی نمی‌باشد اما با رعایت اثرات اجتماعی و زیست محیطی، اجرای این طرح، بدلیل عدم استفاده از دیزل ژنراتور و مصرف سوخت‌های فسیلی، آلاینده زیست محیطی ندارد.

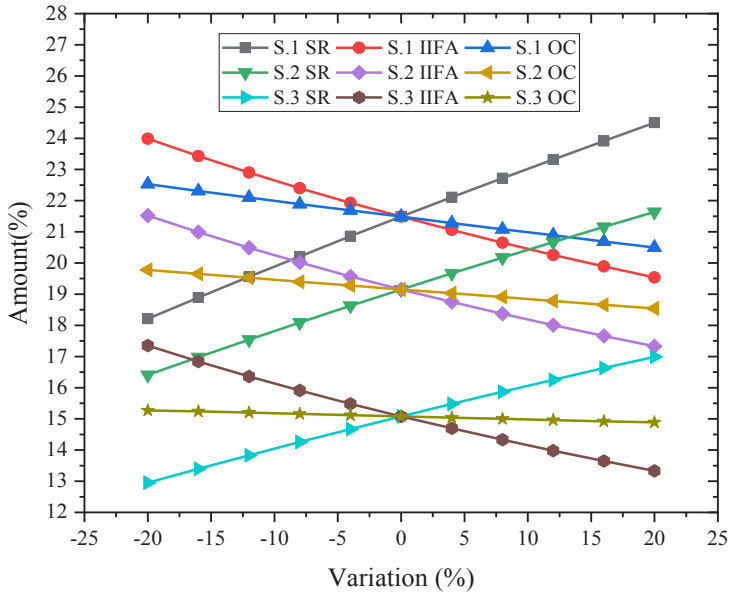
نظر به نتایج تحقیق، پیشنهادهای ذیل برای نزدیک شدن به الگوی توسعه پایدار مدیریت هزینه‌های انرژی و مصرف انرژی پیشنهادات می‌گردد.

۱- استفاده از توربین‌های بادی مقیاس کوچک (کمتر از ۴۰۰ وات) در سرعت باد بیش ۴ متر بر ثانیه مناسب است.

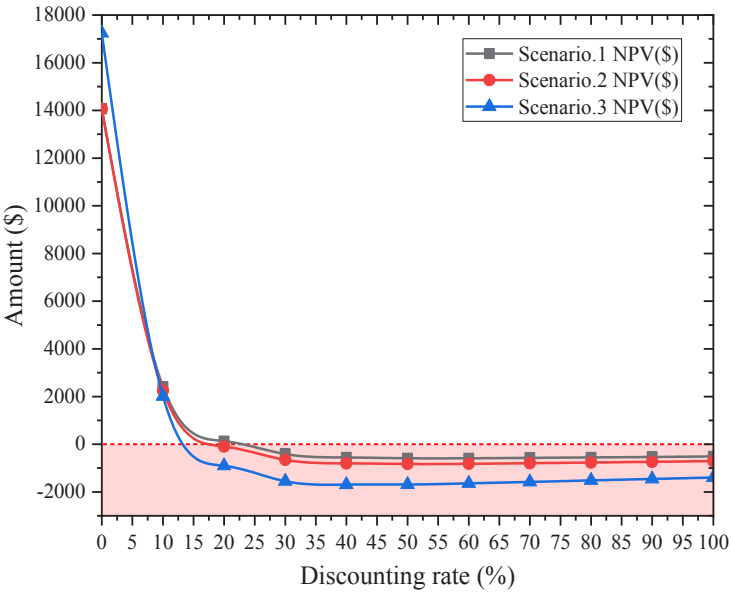
۲- بر اساس الگوی بهینه دریافت انرژی تجدیدپذیر محیطی، بهترین زاویه شیب بام کلبه سبز ۳۰/۲ درجه و بهترین جهت‌گیری شهرها متناسب با این الگو ۱۹۵ درجه آزیموت می‌باشد.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



الف



ب

شکل ۷. بررسی متغیرهای مالی سامانه. الف: تحلیل حساسیت ۳ طرح؛ ب: اثر نرخ تنزیل بر روی ۳ طرح.

Fig. 7. Review of financial variables. A: Sensitivity analysis of 3 scenarios; B: The effect of the discount rate on 3 scenarios

۳- اثرات مخرب زیست‌محیطی حذف یا کمینه گردد.

۴- تعرفه خرید تضمینی برق از تجدیدپذیرها (در بخش خانگی) افزایش یابد. حد بحرانی این تعرفه ۰/۰۶ دلار محاسبه شده است.

در بعد سیاستگذاری مطابق با تحلیل حساسیت طرح‌ها، افزایش قیمت فروش انرژی از منابع تجدیدپذیر مهم‌ترین عامل در اقتصادی بودن طرح‌ها و پس از آن کاهش هزینه‌های عملیاتی است. کمترین اثر مربوط به عامل افزایش دارایی‌های ثابت است. آلاینده‌های زیست محیطی اجرای طرح اول معادل ۱۰۶۵ کیلوگرم دی اکسید کربن در سال و اجرای طرح دوم تولید سالانه ۶۳۳ کیلوگرم دی اکسید کربن است.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی

T	دما، ^{o}C
Q	انرژی تابشی، $W.m^{-1}$
V,F	سرعت بادی، $m\ s^{-1}$
P	توان الکتریکی، W
I	جریان الکتریکی، A
V	ولتاژ، V
IRR	بازگشت سرمایه داخلی، ٪
NPV	مدول الاستیسیته، $

علائم یونانی

η	بازده / عملکرد، ٪
β	شیب سطح، درجه
γ	زاویه آزیموت، درجه

منابع

[1] X.L. W. Cai, A. Maleki, F. Pourfayaz, M.A. Rosen, M. Alhuyi Nazari, D.T. Bui, Optimal sizing and location based on economic parameters for an off-grid application of a hybrid system with photovoltaic, battery and diesel technology, Energy, 201 (2020) 117480.

[2] O.M.A. O.I. Awad, R. Mamat, A.A. Abdullah, G. Najafi, M.K. Kamarulzaman, I.M. Yusri, M.M. Noor, Using fusel oil as a blend in gasoline to improve SI engine efficiencies: A comprehensive review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 69 (2017) 1232–1242.

[3] M. Esmaeili Shayan, G. Najafi, S. Gorjian, Design Principles and Applications of Solar Power Systems (In Persian), ACECR Publication- Amirkabir University of Technology Branch, Tehran, 2020.

[4] A.K. V., Verma, A., Optimal techno-economic sizing of a solar-biomass-battery hybrid system for off-setting dependency on diesel generators for microgrid facilities, Journal of Energy Storage, 36 (2021) 102251.

[5] R.Z. Zhong, Cheng, L., Wang, Y.Q., Sun, X.Z., Luo, D.W., Fang, Y., Bush, R.D., Zhou, D.W., Effects of anthelmintic treatment on ewe feed intake, digestion, milk production and lamb growth, SPRINGER Verlag, SINGAPOR, 2017.

[6] O. Erixno, Rahim, N.A., Ramadhani, F., and Adzman, N.N.,, Energy management of renewable energy-based combined heat and power systems: A review, Sustainable Energy Technologies and Assessments, 51 (2022) 101944.

[7] A. Chakir, Abid, M., Tabaa, M., and Hachimi, H.,, Demand-side management strategy in a smart home using electric vehicle and hybrid renewable energy system, Energy Reports, 8 (2022) 383–393.

[8] M. Esmaeili Shayan, Najafi, G., Ghobadian, B., Gorjian, S., Mamat, M., Fairusham Ghazali, M., Multi-microgrid optimization and energy management under boost voltage converter with Markov prediction chain and dynamic decision algorithm, Renewable Energy, 201(2) (2022) 179-189.

[9] R. Madhana, Mani, G., Power enhancement methods of renewable energy resources using multiport DC-DC converter: A technical review, Sustainable Computing: Informatics and Systems, 35 (2022) 100689.

[10] A. Jouda, Elyes, F., Rabhi, A., Abdelkader, M., Optimization of Scaling Factors of Fuzzy–MPPT Controller for Stand-alone Photovoltaic System by Particle Swarm Optimization, Energy Procedia, 111 (2017) 954–963.

[11] M. Esmaeili Shayan, Hayati, M.R., Thermal Performance and Heat Dynamics Energy and Exergy of Integrated Asphalt Collector Storage: Sources of Thermal Energy, and Thermoelectric Energy, Iranian Journal of Energy and Environment, 14 (2023) 17–25.

[12] M. Esmaeili Shayan, Najafi, G., Ghobadian, B., Gorjian, S., Mazlan, M., A novel approach of synchronization of the sustainable grid with an intelligent local hybrid renewable energy control, International Journal of Energy and Environmental Engineering, (2022) 1–12.

[13] M. Esmaeili shayan, Najafi, G., Banakar, A. , Power

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

Quality in Flexible Photovoltaic System on Curved Surfaces, Journal of Energy Planning And Policy Research, 3(17) (2017) 105–136.

[14] R. Gnanaselvam, Vasanthi, M.S., Signal coverage analysis with link adaptation in Narrowband-IoT, Sustainable Computing: Informatics and Systems, 33 (2022) 100644.

[15] M. Esmaeili Shayan, Esmaeili Shayan, S., and Nazari, A., Possibility of supplying energy to border villages by solar energy sources, Energy Equipment and Systems, 9(3) (2021) 279–289.

[16] B. Yang, Wang, J., Zhang, X., Yu, L., Shu, H., Yu, T., Sun, L., Control of SMES systems in distribution networks with renewable energy integration: A perturbation estimation approach, Energy, 202 (2020) 117753.

[17] G. Renjini, and Devi, V., Artificial neural network controller based cleaner battery-less fuel cell vehicle with EF2 resonant DC-DC converter, Sustainable Computing: Informatics and Systems, 35 (2022) 100667.

[18] S. Sulaeman, Brown, E., Quispe-Abad, R., and Müller, N., Floating PV system as an alternative pathway to the amazon dam underproduction, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 135 (2021) 110082.

[19] Y. Li, Gao, W., and Ruan, Y., Performance investigation of grid-connected residential PV-battery system focusing on enhancing self-consumption and peak shaving in Kyushu, Japan, Renewable Energy, 127 (2018) 514–523.

[20] M. Esmaeili Shayan, Hayati, M.R., Najafi, G., Esmaeili Shayan, S., The Strategy of Energy Democracy and Sustainable Development: Policymakers and Instruments, Iranian (Iranica) Journal of Energy & Environment, 13(2) (2022) 185–201.

[21] M. Esmaeili Shayan, Najafi, G., Ghobadian, B., Gorjian, S., Mazlan, M., Samami, M., Flexible Photovoltaic System on Non-Conventional Surfaces: A Techno-Economic Analysis, Sustainability 14 (2022) 3566.

[22] A. Alarifi, Ali AlZubi, A., Alfarraj, O., and Alwadain, A., Automated control scheduling to improve the operative performance of smart renewable energy systems, Sustainable Energy Technologies and Assessments, 45 (2021) 101036.

[23] A.K. PG, P, A.J., and D, D., Hybrid CAC-DE in optimal reactive power dispatch (ORPD) for renewable energy cost reduction, Sustainable Computing: Informatics and Systems, 35 (2022) 100688.

[24] W. Anupong, Azhagumurugan, R., Sahay, K.B., Dhabliya, D., Kumar, R., Vijendra Babu, D., Towards a high precision in AMI-based smart meters and new technologies in the smart grid, Sustainable Computing: Informatics and Systems, 35 (2022) 100690.

[25] F. Alassery, Advanced metering infrastructure smart metering based on cloud architecture for low voltage distribution networks in application of smart grid monitoring, Sustainable Computing: Informatics and Systems, 35 (2022) 100747.

[26] M. Esmaeili Shayan, Najafi, G., Lorenzini, G., Phase change material mixed with chloride salt graphite foam infiltration for latent heat storage applications at higher temperatures and pressures, International Journal of Energy and Environmental Engineering, (2021) 1-11.

[27] P.S. Pravin, Misra, S., Bhartiya, S., Gudi, R.D., A reactive scheduling and control framework for integration of renewable energy sources with a reformer-based fuel cell system and an energy storage device, Journal of Process Control, 87 (2020) 147–165.

[28] X. Dong, Lu, J., Sun, B., Min-max Operation Optimization of Renewable Energy Combined Cooling, Heating, and Power Systems Based on Model Predictive Control, IFAC-PapersOnLine, 53(2) (2020) 12809–12814.

[29] M. Esmaeili Shayan, Najafi, G., Ghobadian, B., Gorjian, S., Modeling the Performance of Amorphous Silicon in Different Typologies of Curved Building-integrated Photovoltaic Conditions, Iranian (Iranica) Journal of Energy & Environment, 13(1) (2022) 87–97.

[30] E. Noghreian, Koofigar, H.R., Power control of

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

hybrid energy systems with renewable sources (wind-photovoltaic) using switched systems strategy, Sustainable Energy, Grids and Networks, 21 (2020) 100280.

[31] M.T. Quasim, Sulaiman, A., Shaikh, A., Younus, M., Blockchain in churn prediction based telecommunication system on climatic weather application, Sustainable Computing: Informatics and Systems, 35 (2022) 100705.

[32] J. Jeyaranjani, Devaraj, D., Improved genetic algorithm for optimal demand response in smart grid, Sustainable Computing: Informatics and Systems, 35 (2022) 100710.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Esmaeili Shayan, G. Najafi, S. Esmaeili Shayan, Energy Management Model for a Standalone Hybrid Microgrid Using a Dynamic Decision-Making Algorithm, Amirkabir J. Mech Eng., 55(1) (2023) 3-20.

DOI: 10.22060/mej.2023.20755.7346

Archive of SID.ir