

Research Paper

Evaluating a Dual-Axis Solar Tracker's Performance on Cloudy and Partly Cloudy Days

Amirhossein Fathi^{1*}, Mohammad Salehi², Amirmahdi Komarizadeh³, Kianoosh Choubineh⁴, Saeed Golkar¹ and Laleh Ghahremani⁵

¹ School of Mechanical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran.

² Department of Energy Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

³ Faculty of Natural Resources and Environment, Islamic Azad University Science and Research Branch, Tehran, Iran.

⁴ Department of Renewable Energies and Environment, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

⁵ Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received 01 January, 2022

Revised 25 January, 2022

Accepted 25 February, 2022

Keywords:

Dual-Axis Solar Tracker

Solar Energy

Cloudy Day

Efficiency Increase

PV Panel

ABSTRACT

Introduction

Despite the increasing penetration of renewable energy sources in recent decades, many countries are significantly dependent on fossil fuels. The emission of regional (such as oil spills) and global (such as global warming) environmental pollution is the result of the excessive use of fossil fuels. Considering the significant reduction in the investment cost of renewable resources, Development and exploitation of these resources is one of the effective solutions to overcome these problems. In 2020, about 3.1% of the world's electrical energy was supplied by photovoltaic panels. This amount of production has caused solar energy to rank third among renewable energy sources after water and wind. In the past years, the levelized cost of electrical energy has decreased remarkably. This reduction is due to the decrease in the investment cost of solar power plant components, including photovoltaic panels. Although many papers have been published on the structure and control system of the solar tracker, few have investigated the performance of these systems in cloudy and semi-cloudy days. In this research, the solar tracker system developed is evaluated on cloudy and semi-cloudy days.

Materials and methods

The solar tracker system investigated in this research uses a structure and a control system for the optimal placement of photovoltaic panels in two lateral - vertical and polar placements. Before this and in the researches of the authors of this article, this solar tracker has been mentioned. The number of photovoltaic panels installed on this structure will be multiple of two. The investigated system is a multi-input-multi-output system. In order to increase the reliability of the system, this system is divided into two separate systems.

In order to evaluate the performance of the solar

tracker, the power and electrical energy produced by photovoltaic panels installed on a mobile structure have been compared with a similar panel installed on a fixed structure with the ability to adjust the angle to the horizon. The installation angle of the panel on the fixed structure is adjusted on a monthly basis and has been chosen in such a way that the maximum electrical energy produced during that month is obtained.

Conclusion

The comparison of the tracking system and a fixed structure showed that the tracker would produce less energy on some hours of a cloudy day. The reason is the defined limitation on LDRs to follow the sun. However, on sunny days, the tracker would

* Corresponding Author, Email: afathi@shirazu.ac.ir; P.O.B. 71946-84334, Shiraz, Iran

receive adequate solar radiation and be in optimal positioning. The results demonstrated this system

increases electricity production by 18.2 % compared to the fixed one.

فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: <https://ses.ut.ac.ir>

مقاله پژوهشی

بررسی عملکرد یک ردیاب خورشیدی در روز ابری و نیمه‌ابری

امیرحسین فتحی^{۱*}، محمد صالحی^۲، امیرمهدی کماری‌زاده^۳، کیانوش چوپینه^۴، سعید گلکار^۵، لاله قهرمانی^۶

^۱ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز

^۲ دانش‌آموخته مقطع کارشناسی‌ارشد، دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

^۳ دانش‌آموخته مقطع کارشناسی‌ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشگاه علوم و تحقیقات تهران، تهران

^۴ دانشجوی مقطع دکتری، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران

^۵ دانش‌آموخته مقطع کارشناسی‌ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز

^۶ دانش‌آموخته مقطع کارشناسی‌ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

در این پژوهش عملکرد یک سیستم ردیاب خورشیدی در روزهای ابری و نیمه‌ابری مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور تشخیص حرکت در هر استقرار از یک جفت مقاومت نوری استفاده شده و همچنین، به منظور کاهش مصرف محرک‌ها (موتورهای الکتریکی) و کاهش دفعات خاموش و روشن شدن آن‌ها، حداقل حد نصاب تفاوت میان اختلاف پتانسیل قرائت‌شده دو سر مقاومت‌های نوری تعریف شده است. سازه و سیستم کنترل ردیاب خورشیدی امکان کالیبراسیون از سه راه فراهم می‌آورند. همچنین، سازه به گونه‌ای طراحی شده است که امکان نصب تعدادی زوج از یک نوع پنل فتوولتائیک فراهم آید. عملکرد سیستم ردیاب خورشیدی در دو حالت ابری و نیمه‌ابری با یک سازه با امکان استقرار در هر زاویه دلخواه در راستای افق مورد مطالعه قرار گرفته است. زاویه استقرار سازه بدون ردیاب خورشیدی، به صورت دستی بر بهترین زاویه قرار داده شده است. مقایسه توان خروجی پنل نصب‌شده روی سازه متحرک و ثابت نشان می‌دهد در برخی از ساعات ابری امکان دارد پنل فتوولتائیک نصب‌شده روی سازه متحرک توان الکتریکی اندکی کمتر از توان الکتریکی تولیدی پنل فتوولتائیک نصب‌شده روی سازه ثابت داشته باشد و این مسئله به دلیل حد نصاب تعریف‌شده از تفاوت دو مقاومت نوری به منظور دنبال کردن خورشید است. همچنین، بررسی‌ها نشان می‌دهد به محض رفع ابر و دریافت تابش خورشید، سیستم ردیاب خورشید بر استقرار بهینه قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد انرژی الکتریکی تولیدی پنل فتوولتائیک در صورت استفاده از ردیاب خورشیدی به میزان ۱۸/۲ درصد نسبت به استفاده از سازه ثابت (اما قرار گرفته روی زاویه بهینه نسبت به افق) افزایش می‌یابد.

اطلاعات مقاله

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۱۱/۱۱

تاریخ بازنگری ۱۴۰۰/۱۱/۰۵

تاریخ تصویب ۱۴۰۰/۱۲/۰۵

کلیدواژه:

افزایش بازده

انرژی خورشیدی

پنل فتوولتائیک ردیاب خورشیدی آنلاین

روزهای ابرناکی

مقدمه

با وجود افزایش نفوذ منابع تجدیدپذیر انرژی، کشورهای مختلف به طور قابل توجهی به سوخت‌های فسیلی وابسته‌اند [۱]. سوخت‌های فسیلی سبب انتشار بسیاری از

آلودگی‌ها و آثار زیست‌محیطی منطقه‌ای (همچون لکه‌های نفتی) و جهانی (همچون گرمایش جهانی) می‌شوند [۲] و [۳]. یکی از راهکارهای مؤثر برای غلبه بر این دسته از مشکلات، استفاده از منابع تجدیدپذیر است. در دهه گذشته قیمت فناوری‌های مبتنی بر تجدیدپذیر به طور ملموس کاهش یافته است [۴-۶]. بیشتر انرژی

* نویسنده مسئول

Email: afathi@shirazu.ac.ir

اینورتر به منظور تحقق کمینه هزینه تراشده انرژی (یا هر شاخص اقتصادی پیشنهادی) تعیین کرد.

ج) خنک‌سازی پنل: افزایش دمای سلول همراه با کاهش بازده الکتریکی پنل‌های فتوولتائیک تجاری مرسوم است. از راهکارهای مرسوم در جهت افزایش بازده الکتریکی، کاهش دمای سلول است. امروزه، راهکارهای متعدد در جهت کاهش دما مطرح است. از این بین، می‌توان به نصب پنل‌های فتوولتائیک روی سطح آب کردن [۱۷]، خنک کردن با مایعات (از جمله آب) [۱۸] یا خنک کردن با هوا [۱۹] اشاره کرد. احداث این دسته نیروگاه‌ها روی سطح آب، علاوه بر امکان تحقق بازده بیشتر نسبت به نصب روی سطح زمین، کاهش سطح تبخیر آب و مقابله با کمبود زمین اشاره کرد. استفاده از راهکارهای کاهش سلول با استفاده از سیالات سبب می‌شود تا علاوه بر تحقق بازده الکتریکی، جذابیت استفاده از انرژی دریافت‌شده توسط سیال نیز مطرح شود. به طور نمونه، می‌توان در صورت خنک‌سازی پنل با استفاده از آب، از آب گرم‌شده توسط پنل فتوولتائیک به عنوان آب پیش‌گرم‌شده برای مصارف بهداشتی یا تأمین بار گرمایش/سرمایش (در صورت استفاده از سیستم چیلر جذبی) بهره برد.

د) استفاده از ردیاب خورشیدی: این امکان فراهم می‌آید در مقایسه با نصب پنل در زاویه مشخص ثابت، انرژی ورودی به سطح پنل افزایش یابد. تأثیر راهکار بیان‌شده در ساعات غیر از ظهر شرعی است. این افزایش انرژی ورودی می‌تواند به معنای افزایش انرژی خروجی باشد، اما از آنجا که حرکت پنل‌ها همراه با مصرف انرژی است، این امکان وجود دارد در صورت انتخاب مکانیسم نامناسب، ظرفیت محرک نامناسب و سایر موارد مشابه، بازده کلی سیستم نیز کاهش یافته باشد. به طور کلی، می‌توان ردیاب خورشید را به دو دسته دستی و اتوماتیک طبقه‌بندی کرد. در حالت استفاده از ردیاب خورشیدی دستی، کاربر پنل فتوولتائیک را در بازه‌های زمانی مناسب (این فاصله‌های زمانی ممکن است ثابت یا متغیر باشند)، در زاویه بهینه قرار دهد [۱۰]. از این راهکار بیشتر در نیروگاه‌های خانگی می‌توان بهره برد. ردیاب خورشیدی اتوماتیک را می‌توان به سه دسته فعال و غیرفعال یا ترکیب این دو روش طبقه‌بندی کرد. در روش فعال، میزان چرخش بهینه در هر لحظه به صورت

تجدیدپذیر شامل انرژی خورشید، باد، آب، بیوگاز و زمین گرمایی می‌شود [۷]. در این میان، خورشید انرژی کافی برای تقاضا کل جهان فراهم می‌آورد [۸]. از فناوری‌های مرسوم برای تبدیل انرژی خورشید به انرژی الکتریکی، پنل‌های فتوولتائیک است. در سال ۲۰۲۰، حدود ۳/۱ درصد انرژی الکتریکی دنیا توسط پنل‌های فتوولتائیک تأمین شده است. این مقدار تولید سبب شده است تا انرژی خورشیدی در مکان سوم در میان‌های انرژی‌های تجدیدپذیر پس از آب و باد قرار گیرد. در سال‌های گذشته هزینه هم‌تراشده هر واحد انرژی الکتریکی به طور قابل توجهی کاهش یافته است [۹] و این کاهش به دلیل کاهش هزینه سرمایه‌گذاری اجزای نیروگاه خورشیدی از جمله پنل‌های فتوولتائیک است.

به طور کلی، می‌توان راهکارهای افزایش بازدهی نیروگاه‌های خورشیدی بر پایه پنل فتوولتائیک در یک منطقه مشخص جغرافیایی را در قالب چهار گروه طبقه‌بندی کرد [۱۰]:

الف) استفاده از تجهیزات با بازده بیشتر: این امکان فراهم می‌آید در توان/انرژی ثابت ورودی به بالاتر دست یافت.

ب) اصلاح نسبت ظرفیت پنل فتوولتائیک به اینورتر [۱۱]: از آنجا که غالباً افزایش شدت تابش همراه با افزایش دمای ماژول است. این امکان وجود دارد تا دمای پنل فتوولتائیک از دمای استاندارد بیشتر شود و این به معنای کاهش بازده پنل فتوولتائیک است [۱۲ و ۱۳]. از این‌رو، رسیدن به توان نامی خروجی پنل‌های فتوولتائیک در عمل کاهش می‌یابد. علاوه بر این، اگرچه پیشرفت تکنولوژی سبب شده است بیشتر اینورترهای تجاری بازدهی بالاتر از ۹۳ درصد داشته باشند [۱۴ و ۱۵] اما این به معنای آن است که می‌توان ظرفیت پنل فتوولتائیک را حتی بدون احتساب تأثیر ضریب دما، بالاتر از ظرفیت اینورتر در نظر گرفت. پیشنهاد می‌شود نسبت ظرفیت پنل فتوولتائیک به ظرفیت اینورتر بالاتر از یک در نظر گرفته شود. این نسبت بهینه را می‌توان با کمک نرم‌افزارهای تجاری همچون PVSyst [۱۶] از طریق بررسی افزایش نسبت ظرفیت پنل فتوولتائیک به ظرفیت اینورتر مقید به مسائل فنی همچون حداکثر ولتاژ ورودی قابل قبول

از ردیاب خورشیدی گزارش نشده است. ال‌حمومی^۶ و همکاران (۲۰۱۸) نوعی ردیاب خورشیدی دوماحوره با تعداد اندک بخش متحرک طراحی کردند [۲۳]. سنسورهای استفاده‌شده در این طرح، مقاومت نوری هستند و در چهار گوشه پنل نصب می‌شود. نتایج تجربی نشان‌دهنده افزایش تولید انرژی الکتریکی به میزان ۳۶/۲۶ درصد نسبت به نصب پنل روی سازه ثابت است. مصطفی^۷ و همکاران (۲۰۱۸) نوعی سیستم ردیاب خورشیدی دوماحوره فعال طراحی کردند [۲۴]. مقدار و جهت چرخش با کمک چهار مقاومت نوری تشخیص داده می‌شد. بررسی نتایج نشان می‌دهد در صورت استفاده از ردیاب خورشیدی در مقایسه با سازه ثابت، ۵۶ درصد تابش خورشیدی بیشتری به سطح پنل وارد می‌شود. این افزایش سطح ورودی انرژی، سبب افزایش ۳۵ درصد انرژی الکتریکی پنل فتوولتائیک نصب‌شده روی سازه متحرک نسبت به سازه ثابت می‌شود. هافمان^۸ و همکاران (۲۰۱۸) نوعی ردیاب خورشیدی دوماحوره توسعه دادند [۲۵]. در پژوهش یادشده به منظور تشخیص جهت و مقدار حرکت از مقاومت نوری استفاده شده است. استفاده از این ردیاب خورشیدی در آب‌وهوای برزیل سبب افزایش تولید از ۱۷/۲ درصد در ماه جون با کمترین مقدار افزایش تولید نسبت به نصب پنل فتوولتائیک روی سازه ثابت تا ۳۱/۱ درصد در ماه نوامبر شده است. به طور متوسط، این افزایش مقدار تولید ۲۳/۴ درصد گزارش شده است. این مقدار افزایش زمانی جذاب می‌شود که به این مهم دقت شود تعداد روزهای ابری و بارانی طی مدت آزمایش ۴۰ درصد بوده است. کوتیبای^۹ و همکاران (۲۰۲۰) نوعی ردیاب خورشیدی تک‌محوره با ترکیب برنامه کاری و مقاومت نوری توسعه دادند [۲۶]. نتایج پژوهش یادشده نشان می‌داد ردیاب خورشیدی تک‌محوره با برنامه کاری می‌تواند ۴/۲ درصد بیشتر از سیستم ردیاب خورشیدی تک‌محوره بر پایه مقاومت نوری، انرژی الکتریکی طی سال تولید کند. ترکیب این دو مکانیسم می‌تواند ۵۷/۴ درصد بر میزان تولید انرژی الکتریکی در مقایسه با پنل فتوولتائیک نصب‌شده روی

دینامیکی با استفاده از سنسورهای نصب‌شده تعیین می‌شود. در روش غیرفعال، میزان چرخش بهینه در بازه‌های زمانی مشخص، پیش از این محاسبه می‌شود و در اختیار پردازنده ردیاب قرار می‌گیرد. در مقایسه این دو راهکار، در صورت محاسبه میزان چرخش به صورت آنلاین، تأثیر پدیده‌های تصادفی از جمله ساعات ابری بر میزان چرخش قابل مشاهده است، اما از سوی دیگر در صورت انتخاب میزان و بازه زمانی چرخش به صورت آفلاین، امکان بهره‌مندی از نتایج مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی با بار محاسباتی بالا بدون نیاز به پردازنده خاص روی ردیاب خورشیدی به وجود می‌آید. این طرح می‌تواند برای مناطقی با تعداد روزهای ابری یا آلودگی کم مناسب باشد. چین و همکاران (۲۰۱۱) نوعی ردیاب خورشیدی تک‌محوره فعال طراحی کردند [۲۰]. سیستم کنترل طراحی شده قابلیت تشخیص روز و شب را داشت. با کمک مد خواب طی شب، مصرف سیستم ردیاب خورشیدی کاهش یافته است. جهت و میزان چرخش سیستم ردیاب خورشیدی با استفاده از دو مقاومت نوری تعیین می‌شود. فادیل^۱ و همکاران (۲۰۱۳) یک سیستم ردیاب خورشیدی دوماحوره طراحی کردند [۲۱]. سازه طراحی شده از یک پایه تشکیل می‌شد و مقاومت‌های نوری در چهار سوی پنل نصب شد. در این مقاله نتایج پژوهش و میزان تأثیر ردیاب خورشیدی گزارش نشده است. کومار^۲ و سورینارایانا^۳ (۲۰۱۴) نوعی سیستم ردیاب خورشیدی با کمک چهار مقاومت نوری طراحی کردند [۲۲]. بیشترین توان تولیدی در صبحگاه و عصر گزارش شده است. بیشترین مقدار افزایش توان تولیدی مربوط به ساعت ۸:۰۰ صبح با ۱۱۴/۵۹ درصد و کمترین مقدار مربوط به ساعت ۱۴:۰۰ با مقدار ۱۸ درصد بوده است. ابھیساک شرما^۴ و چاحک شرما^۵ (۲۰۱۷) نوعی ردیاب خورشیدی دوماحوره طراحی کردند. در پژوهش یادشده میزان و مقدار چرخش با کمک چهار مقاومت نوری تعیین می‌شد. مقاومت‌های نوری در این طرح روی چهار ضلع پنل نصب می‌شود. در این مقاله نتایج استفاده

6. El Hammoumi
7. Mustafa
8. Hoffmann
9. Kuttybay

1. Fadil
2. Kumar
3. Suryanarayana
4. Abhisak Sharma
5. Chahak Sharma

می‌آورد. پیش از این، در پژوهش فتحی و همکاران (۲۰۲۲)، این ردیاب خورشیدی مطرح شده است.

تعداد پنل‌های فتوولتائیک نصب‌شده روی این سازه مضربی از عدد ۲ خواهد بود. شکل ۱ شماتیک سازه ردیاب خورشیدی طراحی‌شده برای نصب دو پنل را نشان می‌دهد.

سیستم مورد بررسی یک سیستم چند ورودی - چند خروجی است. به منظور افزایش قابلیت اطمینان، این سیستم به دو سیستم مجزا تقسیم شده است. برای هر استقرار یک سیستم مجزا در نظر گرفته شده است.

تشخیص محل استقرار بهینه با کمک یک جفت سنسور برای هر استقرار حاصل می‌شود. سنسورها روی سازه نشان داده شده با شکل ۲ نصب می‌شوند. سنسورهای مورد استفاده برای تشخیص استقرار بهینه، مقاومت نوری است. بین دو سنسور یک صفحه عمود قرار گرفته است. در حالت ایده‌آل، در صورت استقرار بهینه، مقاومت این دو سنسور نزدیک به یکدیگر خواهد بود. شکل ۳ مدار ردیاب خورشیدی دوکاناله را نشان می‌دهد. پایه پیشنهادی جهت نصب سنسورها از چهار بخش اصلی تشکیل می‌شود. این چهار بخش روی شکل ۲ قابل مشاهده است. این چهار بخش، بخش نگهدارنده، صفحه عمود، بخش نصب سنسور و پیچ‌های فنردار نام‌گذاری شده است. از پیچ‌های نگهدارنده به منظور تنظیم و کالیبراسیون استفاده می‌شود. در صورت عدم استقرار بهینه پنل‌ها، حرکت پنل‌ها به سمتی خواهد بود که مقاومت دو سنسور برابر شود.

در حالت ایده‌آل، در صورت استقرار بهینه، مقاومت این دو سنسور نزدیک به یکدیگر خواهد بود. از آنجا که این امکان وجود دارد دو مقاومت نوری تولیدشده توسط یک کارخانه و از یک مدل، عملکرد یکسان در برابر شدت روشنایی یکسان نداشته باشند. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود از یک مولتی ترن به منظور اصلاح و کالیبراسیون استفاده شود. شکل ۳ مدار ردیاب خورشیدی دوکاناله را نشان می‌دهد.

سازه ثابت بیفزاید. ناهار^۱ و همکاران (۲۰۲۱) نوعی سیستم ردیاب خورشیدی تک‌محوره به منظور افزایش بازده سیستم طراحی کردند [۲۷]. مقدار و جهت چرخش با کمک مقاومت نوری متصل به یک پردازنده و محرک تعیین می‌شود. براساس نتایج گزارش‌شده، میزان تولید انرژی الکتریکی در صورت استفاده از این ردیاب ۷۲/۴۵ درصد افزایش می‌یابد. سعیدی^۲ و عفت‌نژاد^۳ (۲۰۲۱) نوعی ردیاب خورشیدی دومحوره طراحی کردند [۲۸]. در پژوهش یادشده سیستم کنترل مورد استفاده حلقه بسته بوده است. سنسورهای استفاده‌شده از مقاومت نوری بوده است. نتایج پژوهش یادشده نشان‌دهنده افزایش بازده سیستم به میزان ۴۸/۲ درصد نسبت به پنل نصب‌شده روی سازه بوده است. طاهری^۴ و همکاران (۲۰۲۱) عملکرد پنل فتوولتائیک و سیستم فتوولتائیک - حرارتی را در سه حالت استفاده از ردیاب خورشیدی دومحوره، ردیاب خورشیدی تک‌محوره و سازه ثابت مورد مطالعه قرار داده‌اند [۲۹]. این پژوهش نشان می‌دهد افزایش متوسط توان الکتریکی تولیدی پنل‌های فتوولتائیک مورد مطالعه از ۴۶/۱۱ W در حالت نصب پنل روی سازه با زاویه ثابت به ۶۲/۸ W و ۵۵/۴۱ W قابل تحقق است، اگر به ترتیب از ردیاب خورشیدی دومحوره با خنک‌کننده نانوسیال سیلیکون کارباید (SiC/water) با کسر جرمی ۱ درصد و ردیاب خورشیدی دومحوره بدون سیستم خنک‌کننده استفاده شود.

اگرچه تا کنون مقالات متعددی در زمینه سازه و سیستم کنترل ردیاب خورشیدی منتشر شده است، اما مقالات اندکی عملکرد این سیستم‌ها را در روزهای ابری و نیمه‌ابری مورد بررسی قرار داده‌اند. در این پژوهش قصد است سیستم ردیاب خورشیدی مطرح‌شده توسط فتحی و همکاران در روزهای ابری و نیمه‌ابری مورد ارزیابی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

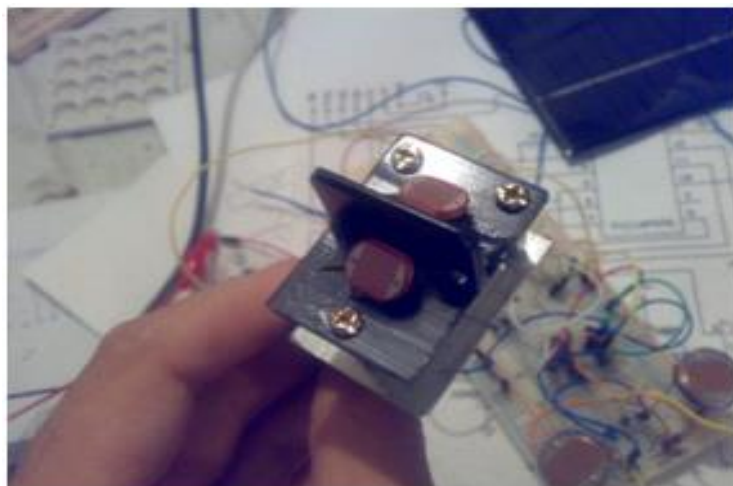
سیستم ردیاب خورشیدی مورد بررسی در این پژوهش از یک سازه و یک سیستم کنترل برای استقرار بهینه پنل فتوولتائیک در دو استقرار سمتی - ارتفاعی و قطبی فراهم

1. Nahar
2. saeedi
3. Effatnejad
4. Taheri

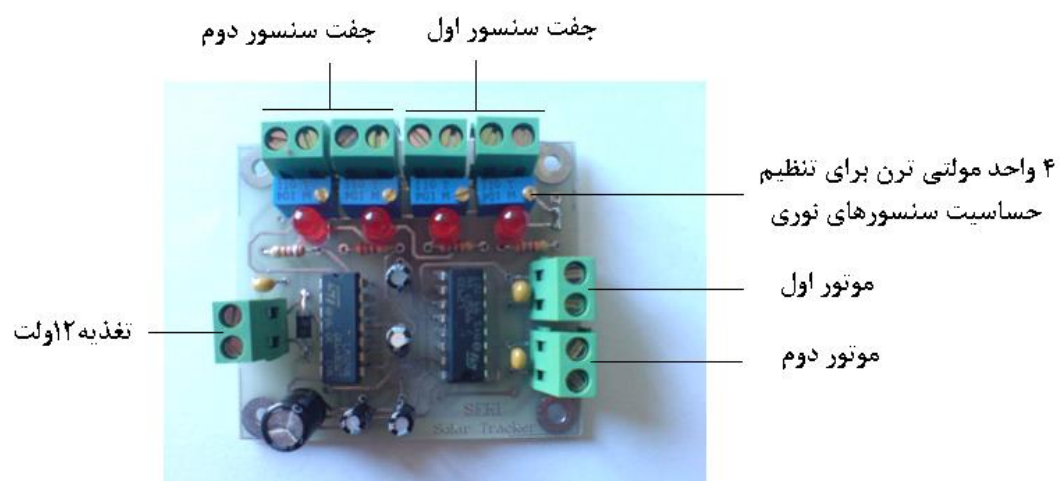
فتحی و همکاران: بررسی عملکرد یک ردیاب خورشیدی در روز ابری و نیمه‌ابری



شکل ۱. شماتیک سازه ردیاب خورشیدی طراحی شده برای نصب دو پنل



شکل ۲. پایه نصب جفت سنسورها



شکل ۳. مدار ردیاب خورشیدی دوکاناله

بررسی عملکرد سیستم ردیاب خورشیدی در روز ابری به منظور ارزیابی عملکرد سیستم ردیاب خورشیدی، توان خروجی از پنل‌های فتوولتائیک در یک روز تمام ابری برای هر دو سازه ثابت و مجهز به ردیاب خورشیدی قرائت شد. زاویه استقرار پنل ثابت نسبت به افق به گونه‌ای تنظیم شده است که بیشترین توان ورودی خورشیدی به سطح پنل وارد شود. توان‌های خروجی در فواصل زمانی ۱۰ دقیقه ثبت شده است. شکل ۴ توان خروجی هر دو سیستم برای یک روز ابری را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، تقریباً توان تولیدی هر دو سیستم یکسان مشاهده می‌شود. علت کاهش توان خروجی پنل فتوولتائیک قرار گرفته روی سازه متحرک را می‌توان در کران‌های تعریف شده برای چرخش و کالیبره نبودن سیستم ردیاب خورشیدی دانست. به منظور کاهش مصرف انرژی و همچنین، جلوگیری از روشن و خاموش شدن محرک‌ها (موتورهای الکتریکی)، حداقل اختلاف جهت شروع چرخش تعریف شده است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، این مسئله می‌تواند در بازه‌های زمانی همچون ساعت ۱۱:۰۰ تا ۱۱:۴۵ سبب تولید کمتر نسبت به سازه ثابت با استقرار بهینه نسبت به افق شود.

بررسی عملکرد سیستم ردیاب خورشیدی در روز نیمه‌ابری

در ادامه، عملکرد سیستم ردیاب خورشیدی توسعه‌یافته در یک روز نیمه‌ابری مورد ارزیابی قرار گرفته است. شکل ۵ نشان‌دهنده توان خروجی پنل فتوولتائیک نصب‌شده روی سازه ثابت و مجهز به ردیاب خورشیدی است.

به منظور ارزیابی عملکرد ردیاب خورشیدی، توان و انرژی الکتریکی تولیدی توسط پنل‌های فتوولتائیک نصب‌شده روی سازه متحرک با یک پنل مشابه نصب‌شده روی سازه ثابت با قابلیت تنظیم زاویه نسبت به افق مقایسه شده است. زاویه استقرار پنل روی سازه ثابت به صورت ماهانه تنظیم می‌شود و به گونه‌ای انتخاب شده است تا بیشترین انرژی الکتریکی تولیدی طی آن ماه حاصل شود.

نتایج

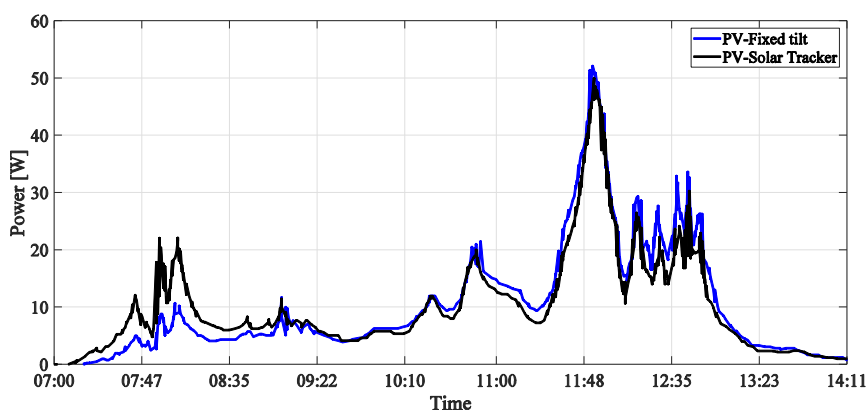
سیستم ردیاب خورشیدی به همراه پنل‌های فتوولتائیک نصب‌شده روی آن مشابه وضعیت مطرح‌شده در پژوهش پیشین نویسندگان است. به طور خلاصه، اطلاعات دو پنل فتوولتائیک نصب‌شده روی این سازه در جدول ۱ بیان شده است.

جدول ۱. اطلاعات پنل فتوولتائیک نصب‌شده روی سازه ردیاب خورشیدی

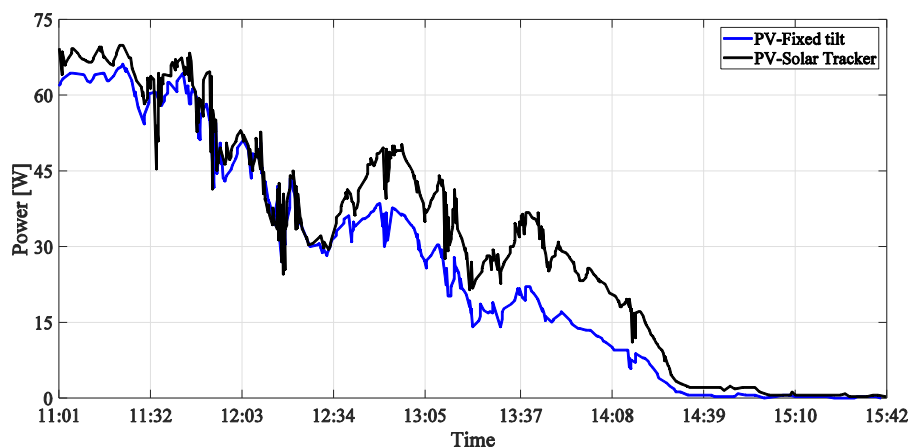
شرکت سازنده	Sharp
مدل	NE-080T1J
ابعاد	1214*545*35mm
وزن	9 kg

به منظور ارزیابی عملکرد ردیاب خورشیدی از یک سازه ثابت با قابلیت زاویه استقرار پنل نسبت به افق استفاده شده است. زاویه استقرار سازه ثابت روی کسب حداکثر تابش خورشیدی تنظیم شده است.

به منظور ارزیابی توان خروجی سیستم‌های خورشیدی از بارهای مقاومتی استفاده شده و به گونه‌ای عمل شده است که بیشترین توان ممکن حاصل شود.



شکل ۴. توان تولیدی پنل‌های فتوولتائیک نصب‌شده روی سازه ثابت و مجهز به ردیاب خورشیدی



شکل ۵. توان خروجی پنل فتوولتائیک نصب‌شده روی سازه ثابت و مجهز به ردیاب خورشیدی

فتوولتائیک نسبت به حالت نصب پنل روی یک زاویه ثابت بهینه (نسبت به افق) کاهش یابد.

بررسی عملکرد سیستم ردیاب خورشیدی در روزهای نیمه‌ابری نشان می‌دهد در ساعات ابرناکی عملکرد پنل‌های فتوولتائیک مشابه حالت نصب پنل فتوولتائیک روی سازه ثابت (اما با استقرار بهینه روزانه روی یک زاویه ثابت نسبت به افق) خواهد بود. نتایج تجربی نشان می‌دهد به محض حرکت ابر و دریافت مستقیم تابش خورشید، سیستم ردیاب خورشید پنل‌های فتوولتائیک در استقرار بهینه قرار می‌دهد. براساس نتایج به‌دست‌آمده میزان افزایش انرژی الکتریکی در یک روز نیمه‌ابری نسبت به استقرار پنل فتوولتائیک روی زاویه بهینه ۱۸/۲ درصد افزایش می‌یابد.

از چالش‌های سیستم ردیاب خورشیدی مورد بررسی، کالیبراسیون سیستم است. به منظور فائق آمدن بر این مشکل، از دو راهکار کلی کالیبراسیون به صورت الکترونیکی و مکانیکی بهره گرفته شده است. به منظور تفاوت عملکرد مقاومت‌های نوری می‌توان از کالیبراسیون الکترونیکی بهره برد. همچنین، به منظور مشکلات عدم تقارن سازه و تفاوت پنل‌ها می‌توان از کالیبراسیون مکانیکی سازه و کالیبراسیون مکانیکی سنسورها بهره برد.

منابع

- [1]. Baz K, Cheng J, Xu D, Abbas K, Ali I, Ali H, et al. Asymmetric impact of fossil fuel and renewable energy consumption on economic growth: A nonlinear technique. Energy. 2021;226:120357.

همان‌طور که در شکل ۵ مشخص است، توان تولیدی پنل فتوولتائیک قرارگرفته روی سازه مجهز به ردیاب خورشیدی تقریباً در ساعات ابری برابر با توان تولیدی پنل فتوولتائیک نصب‌شده روی سازه ثابت است. همچنین، در ساعات غیرابری سیستم ردیاب خورشیدی با موفقیت اقدام به دنبال کردن خورشیدی می‌کند و این مسئله با افزایش توان تولیدی سیستم مشخص است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله عملکرد یک ردیاب خورشیدی با امکان دو استقرار در روزهای ابری و نیمه‌ابری مورد مطالعه قرار می‌گیرد. سیستم کنترل ردیاب خورشیدی به صورت آنلاین عمل می‌کند. از این‌رو، ممکن است در ساعات ابرناکی و نیمه‌ابری سیستم از عملکرد بهتری نسبت به سیستم‌های مجهز به ردیاب خورشیدی آفلاین عمل کند.

سازه ردیاب خورشیدی امکان نصب تعداد زوج از پنل‌های فتوولتائیک از یک مدل را فراهم می‌آورد. سیستم ردیاب خورشیدی برای هر استقرار مجزا است. از این‌رو، اگرچه هزینه سرمایه‌گذاری افزایش می‌یابد، اما قابلیت اطمینان بیشتر فراهم می‌آورد. به منظور تشخیص جهت حرکت برای هر استقرار از یک جفت مقاومت نوری نصب‌شده روی یک سازه چهاربخشی استفاده شده است. همچنین، به منظور کاهش مصرف انرژی محرک‌ها و تعداد خاموش و روشن محرک‌ها، حداقل تفاوت میان دو مقاومت نوری قرائت‌شده تعریف شده است، اگرچه این مسئله روی توان تولیدی پنل تأثیرگذار است و این امکان وجود دارد در برخی از ساعات ابرناکی توان تولیدی پنل‌های

- [2]. Perera F. Pollution from fossil-fuel combustion is the leading environmental threat to global pediatric health and equity: Solutions exist. *International journal of environmental research and public health*. 2018;15(1):16.
- [3]. Change IPOC. *Climate change 2007: the physical science basis. Agenda*. 2007;6(07):333.
- [4]. Apergis N, Danuletiu DC. Renewable energy and economic growth: Evidence from the sign of panel long-run causality. *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2014;4(4):578-87.
- [5]. Li L, Lin J, Wu N, Xie S, Meng C, Zheng Y, et al. Review and outlook on the international renewable energy development. *Energy and Built Environment*. 2020.
- [6]. Dincer I. Renewable energy and sustainable development: a crucial review. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2000;4(2):157-75.
- [7]. Panwar N, Kaushik S, Kothari S. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2011;15(3):1513-24.
- [8]. Letcher TM. *Why Solar Energy? A Comprehensive Guide to Solar Energy Systems*: Elsevier; 2018. p. 3-16.
- [9]. Gielen D, Gorini R, Leme R, Prakash G, Wagner N, Janeiro L, et al. *World Energy Transitions Outlook: 1.5° C Pathway*. 2021.
- [10]. Fathi A, Barzadeh Ledari M, Saboohi Y. Evaluation of Optimal Occasional Tilt on Photovoltaic Power Plant Energy Efficiency and Land Use Requirements, Iran. *Sustainability*. 2021;13(18):10213.
- [11]. Mondol JD, Yohanis YG, Norton B. Optimal sizing of array and inverter for grid-connected photovoltaic systems. *Solar energy*. 2006;80(12):1517-39.
- [12]. Dash P, Gupta N. Effect of temperature on power output from different commercially available photovoltaic modules. *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2015;5(1):148-51.
- [13]. Cotfas DT, Cotfas PA, Machidon OM. Study of temperature coefficients for parameters of photovoltaic cells. *International Journal of Photoenergy*. 2018;2018.
- [14]. Salam Z, Rahman AA, editors. Efficiency for photovoltaic inverter: A technological review. 2014 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON); 2014: IEEE.
- [15]. The Efficiency of Solar Inverters: SRNE SOLAR CO.,LTD; 2022 [Available from: <https://www.srnesolar.com/blog/the-efficiency-of-solar-inverters#:~:text=Solar%20inverters%20are%20very%20efficient,the%20inverter%20in%20powered%20mode>].
- [16]. Mermoud A, Wittmer B. *PVSYST user's manual*. Switzerland, January. 2014.
- [17]. Trapani K, Millar DL. Proposing offshore photovoltaic (PV) technology to the energy mix of the Maltese islands. *Energy Conversion and Management*. 2013;67:18-26.
- [18]. Fakouriyan S, Saboohi Y, Fathi A. Experimental analysis of a cooling system effect on photovoltaic panels' efficiency and its preheating water production. *Renewable Energy*. 2019;134:1362-8.
- [19]. Arifin Z, Tjahjana DDDP, Hadi S, Rachmanto RA, Setyohandoko G, Sutanto B. Numerical and experimental investigation of air cooling for photovoltaic panels using aluminum heat sinks. *International Journal of Photoenergy*. 2020;2020.
- [20]. Chin C, Babu A, McBride W. Design, modeling and testing of a standalone single axis active solar tracker using MATLAB/Simulink. *Renewable Energy*. 2011;36(11):3075-90.
- [21]. Fadil S, Çapar AC, Çağlar K, editors. Two axis solar tracker design and implementation. 2013 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO); 2013: IEEE.
- [22]. Kumar VSS, Suryanarayana S. Automatic dual Axis sun tracking system using LDR sensor. *International Journal of Current Engineering and Technology*. 2014;4(5):3214-7.
- [23]. Hammoumi AE, Motahhir S, Ghzizal AE, Chalh A, Derouich A. A simple and low-cost active dual-axis solar tracker. *Energy science & engineering*. 2018;6(5):607-20.
- [24]. Mustafa FI, Shakir S, Mustafa FF, Naiyf AT, editors. Simple design and implementation of solar tracking system two axis with four sensors for Baghdad city. 2018 9th International Renewable Energy Congress (IREC); 2018: IEEE.
- [25]. Hoffmann FM, Molz RF, Kothe JV, Nara EOB, Tedesco LPC. Monthly profile analysis based on a two-axis solar tracker proposal for photovoltaic panels. *Renewable energy*. 2018;115:750-9.

- [26]. Kuttybay N, Saymbetov A, Mekhilef S, Nurgaliyev M, Tukymbekov D, Dosymbetova G, et al. Optimized single-axis schedule solar tracker in different weather conditions. *Energies*. 2020;13(19):5226.
- [27]. Nahar MJ, Sarkar MR, Uddin M, Hossaine MF, Rana MM, Tanshena MR. Single axis solar tracker for maximizing power production and sunlight overlapping removal on the sensors of tracker. *International Journal of Robotics and Control Systems*. 2021;1(2):186-97.
- [28]. Saeedi M, Effatnejad R. A new design of dual-axis solar tracking system with LDR sensors by using the wheatstone bridge circuit. *IEEE Sensors Journal*. 2021;21(13):14915-22.
- [29]. Taheri A, Malayjerdi M, Kazemi M, Kalani H, Nemati-Farouji R, Passandideh-Fard M, et al. Improving the performance of a nanofluid-based photovoltaic thermal module utilizing dual-axis solar tracker system: Experimental examination and thermodynamic analysis. *Applied Thermal Engineering*. 2021;196:117178.