

KNO-1101-4304

بررسی و تحلیل عملکرد بهینه و مطلوب یک سیستم فتوولتائیک با بهره بردن از ویژگی ردیابی نقطه حداکثر توان

امیر شاطری amir.sh197799@gmail.com

فارغ التحصیل مقطع کارشناسی پیوسته مهندسی برق موسسه آموزش عالی آپادانا شیراز؛ ایران

چکیده

توان الکتریکی تامین شده توسط آرایه فتوولتائیک به تابش، دما و بار بستگی دارد. از طرف دیگر، توان واقعی تولید شده توسط آرایه فتوولتائیک به طور کامل به بار منتقل نمی شود. بنابراین، استخراج حداکثر توان از آرایه فتوولتائیک ضروری است. حداکثر توان ردیابی یک سیستم الکترونیکی قدرت است که حداکثر توان را از سیستم فتوولتائیک استخراج می کند. ردیابی نقطه حداکثر توان نقطه عملکرد الکتریکی ماژول های فتوولتائیک را تغییر می دهد و آنها را قادر می سازد حداکثر توان موجود را ارائه دهند. در این تحقیق و مقاله، یک الگوریتم ردیابی نقطه حداکثر توان جدید طراحی و ارائه شده است که از ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه، نمونه برداری از یک پنل فتوولتائیک منبع استفاده می کند. با استفاده از این اندازه گیری ها، حداکثر توان از پنل اصلی بدون شکستن توان انتقال یافته به بار ردیابی می شود. یک مبدل تقویت کننده کاهنده برای تطبیق امپدانس بین منبع و بار استفاده شد تا انتقال حداکثر توان را تسهیل کند. الگوریتم پیشنهادی برای عملکرد آن در شرایط محیطی محلی بررسی شد.

کلید واژه ها: سیستم فتوولتائیک، حداکثر توان ردیابی، مبدل کاهنده-افزاینده، میکروکنترلر قابل برنامه نویسی

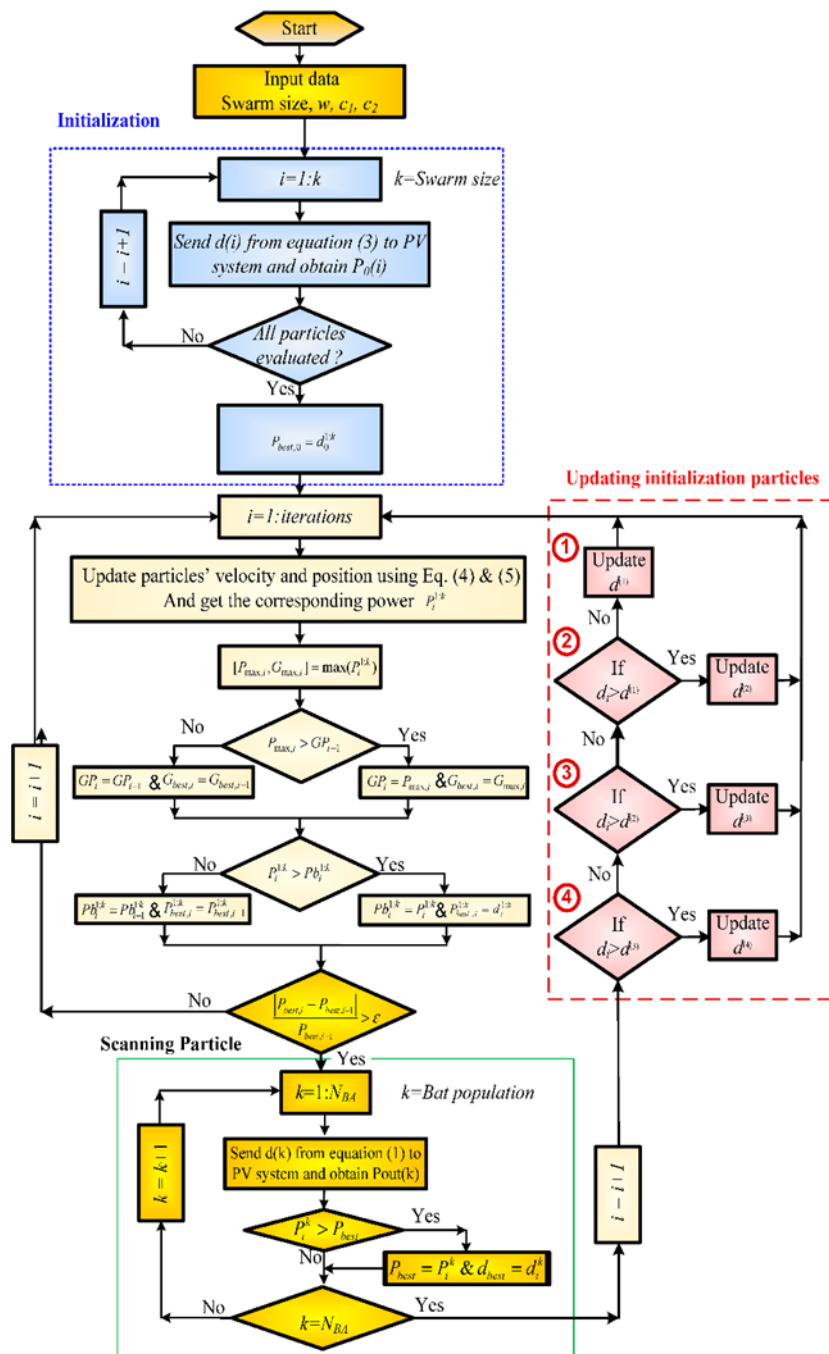
۱. مقدمه

از بین فناوری های مختلف موجود برای بهره برداری از انرژی خورشیدی، فتوولتائیک فناوری ساده و قابل اعتمادی است که مستقیماً انرژی خورشیدی را به برق تبدیل می کند که راحت ترین شکل انرژی برای استفاده است. توان خروجی از سیستم فتوولتائیک به راندمان سلول فتوولتائیک، تابش، دمای سلول و امپدانس بار بستگی دارد. برای سلول فتوولتائیک داده شده، استخراج حداکثر توان برای شرایط جوی معین، به قابلیت عملکرد سیستم نزدیک به نقطه حداکثر توان بستگی دارد. حداکثر ردیابی نقطه توان شامل تنظیم ولتاژ خروجی و/یا جریان سیستم فتوولتائیک برای بار داده شده، تابش و دمای سلول است. ردیابی حداکثر توان نه تنها توان خروجی را افزایش می دهد، بلکه عمر سیستم را نیز افزایش می دهد [۱]. تاکنون انواع مختلفی از روش های حداکثر ردیابی نقطه توان توسعه یافته و مورد استفاده قرار گرفته است [۶-۲]. این روش ها را می توان به حسگرهای مورد استفاده، سرعت همگرایی، هزینه، محدوده اثربخشی، الزامات سخت افزاری پیاده سازی و محبوبیت متمایز کرد [۳]. بر اساس رویکرد استفاده شده برای تولید سیگنال کنترل، این روش ها به روش آنالین، روش آفلاین و روش ترکیبی دسته بندی می شوند. روش آفلاین بسیار ساده است [۱۰-۱۲] و بیشتر به روش ولتاژ مدار باز و روش جریان اتصال کوتاه طبقه بندی می شود. روش ولتاژ مدار باز از رابطه خطی تقریبی بین ولتاژ و جریان مدار باز و ولتاژ نقطه توان حداکثر در شرایط محیطی مختلف استفاده می کند (معادل (فرمول ۱)). روش جریان اتصال کوتاه همچنین از رابطه خطی تقریبی بین جریان اتصال کوتاه و حداکثر جریان نقطه توان در شرایط محیطی مختلف استفاده می کند (معادل (فرمول ۲)).

$$V_{mpp} \approx k_1 V_{oc} \quad (1)$$

$$I_{mpp} \approx k_2 I_{sc} \quad (2)$$

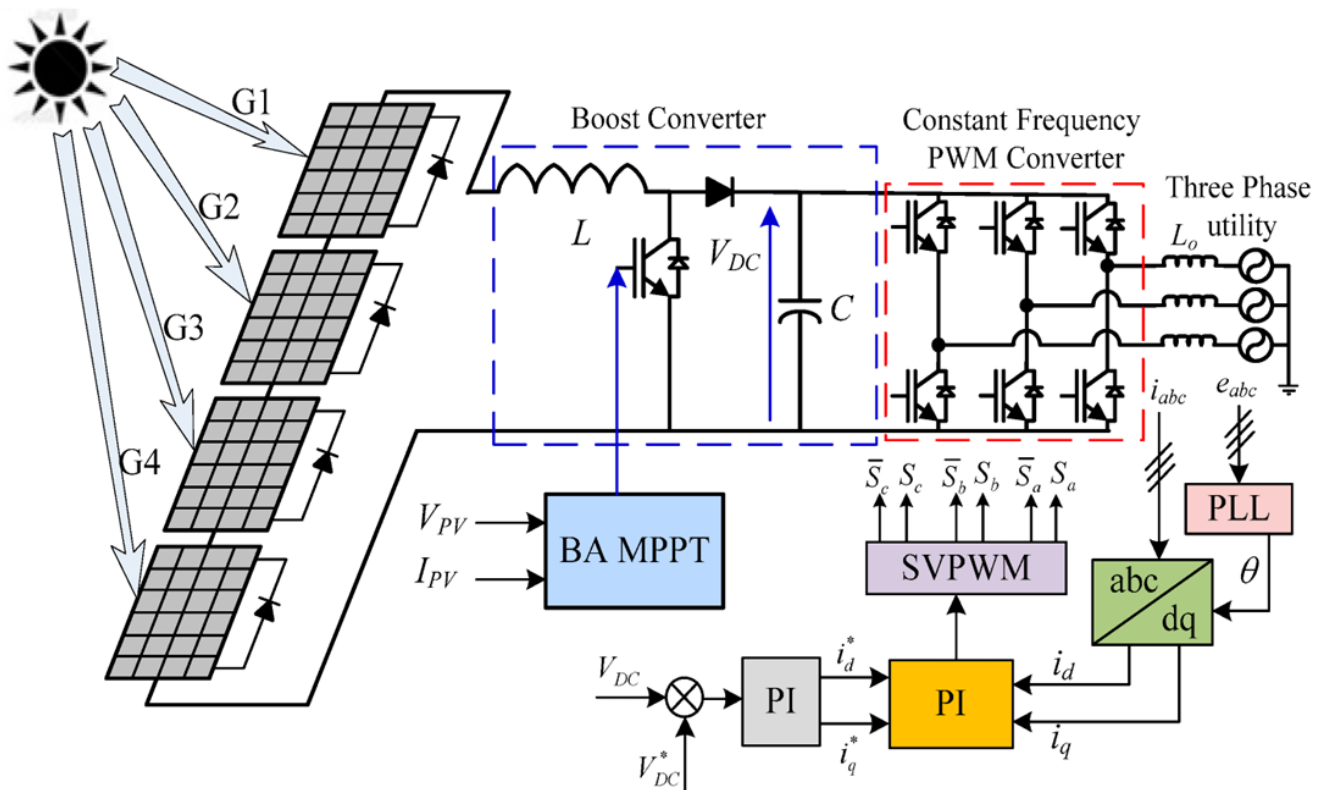
جایی که k_1 و k_2 ثابت هستند به ویژگی های سلول خورشیدی بستگی دارد. به دلیل مشکلات عملی مربوط به اندازه گیری، روش جریان اتصال کوتاه دقیق تر و کارآمدتر از روش ولتاژ مدار باز است [۱۲]. اشکال اصلی روش آفلاین وقفه بار است که در حین اندازه گیری جریان اتصال کوتاه یا ولتاژ مدار باز رخ می دهد. همچنین، این روش قادر به پیش بینی نقطه توان حداکثر با استفاده از معادله (۱) یا معادله (۲) نیست [۴]. در روش های آنلاین، مقادیر لحظه ای ولتاژ یا جریان خروجی فتوولتائیک برای تولید سیگنال های کنترلی استفاده می شود. این شامل روش اغتشاش و مشاهده (P&O)، روش کنترل جست و جوی افراطی و روش هدایت افزایشی است. در روش اغتشاش و مشاهده، ولتاژ یا جریان سیستم فتوولتائیک با اعمال یک سری اغتشاشات کوچک و ثابت به صورت گام به گام تغییر می کند تا توان تحویلی به حداکثر برسد [۸-۱۳-۱۴]. مشکلات مرتبط با این روش دامنه اغتشاش و میزان همگرایی است. روش کنترل جستجوی افراطی یک روش بهینه سازی زمان واقعی برای یک سیستم دینامیکی غیرخطی با بازخورد تطبیقی است که برای ردیابی نقطه حداکثر توان استفاده می شود [۱۷-۱۵]. معایب روش جست و جوی افراطی پیچیدگی آن در پیاده سازی و ارزیابی سیگنال های دامنه نسبتاً کم است. روش رسانایی افزایشی روش هدایت افزایشی مبتنی بر این واقعیت است که شیب منحنی توان آرایه فتوولتائیک در نقطه حداکثر توان صفر است [۲۰-۱۸]. اشکال اصلی این روش این است که به مدارهای کنترل پیچیده ای نیاز دارد. در روش ترکیبی [۲۱]، هر دو روش آفلاین و آنلاین به ترتیب برای مکان یابی ردیابی نقطه حداکثر توان به طور دقیق برای بهینه سازی پیچیدگی استفاده می شوند. ابتدا از روش آفلاین برای تعیین مکان نقطه حداکثر توان تقریباً استفاده می شود، سپس از روش آنلاین برای مکان یابی دقیق نقطه استفاده می شود.



شکل ۱. نمودار (فلوچارت) جریان الگوریتم ردیابی نقطه حداکثر توان پیشنهادی.

جدول ۱. جزئیات پنل فتوولتائیک استفاده شده.

مدل پنل خورشیدی	مدل یو-اس-ال ۱۲
توان پنل	۱۲ وات
حداکثر ولتاژ	۱۷٫۱ ولت
حداکثر جریان	۰٫۷۰ آمپر
ولتاژ مدار باز	۲۱٫۵ ولت
جریان اتصال کوتاه	۰٫۷۹ آمپر

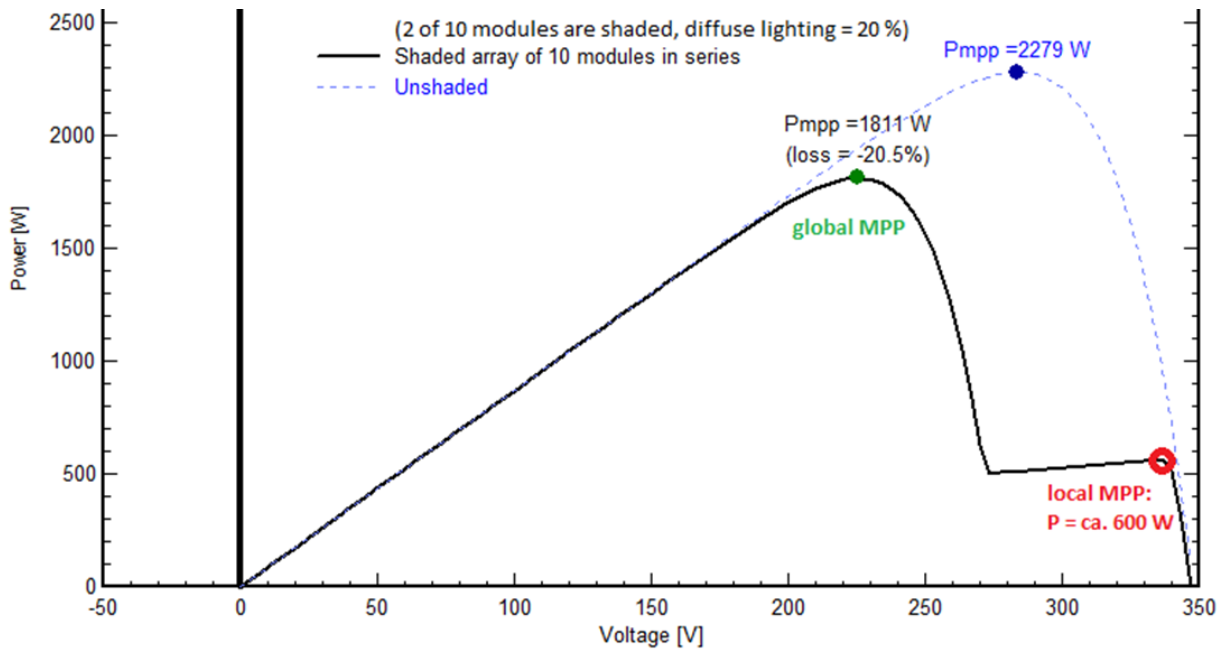


شکل ۲. شماتیک مبدل کاهنده-افزاینده.

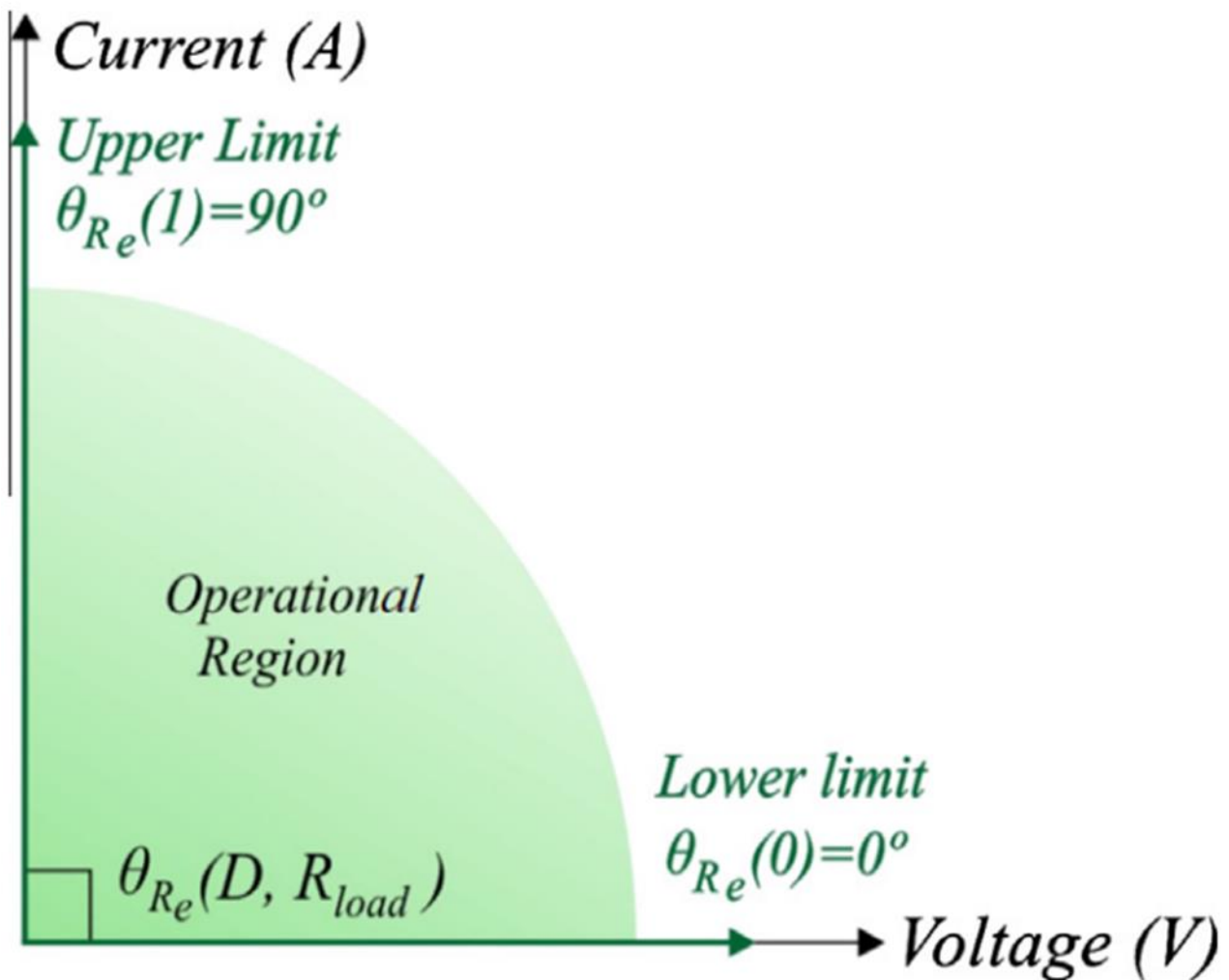
۲. روش و پیشینه تحقیق و پژوهش

ردیابی نقطه حداکثر توان یا گاهی اوقات فقط ردیابی نقطه قدرت، تکنیکی است که با منابع توان متغیر برای به حداکثر رساندن استخراج انرژی با تغییر شرایط استفاده می شود. این تکنیک بیشتر در سیستم های خورشیدی فتوولتائیک استفاده می شود، اما می تواند برای توربین های بادی، انتقال انرژی نوری و ترموفوتولتائیک نیز استفاده شود. سیستم های خورشیدی فتوولتائیک روابط متفاوتی با سیستم های اینورتر، شبکه های خارجی، بانک باتری و سایر بارهای الکتریکی دارند. مشکل اصلی که ردیابی نقطه حداکثر توان به آن پرداخته این است که کارایی انتقال نیرو از سلول خورشیدی به میزان نور خورشید در دسترس، سایه، دمای پنل خورشیدی و ویژگی های الکتریکی بار بستگی دارد. از آنجایی که این شرایط متفاوت است، مشخصه بار (امپدانس) که بالاترین انتقال توان را ایجاد می کند، تغییر می کند. هنگامی که مشخصه بار تغییر می کند تا انتقال قدرت در بالاترین بازدهی حفظ شود، سیستم بهینه می شود. این مشخصه بار بهینه، نقطه حداکثر توان نامیده می شود. ردیابی نقطه حداکثر توان فرآیند تنظیم مشخصه بار با تغییر شرایط است. مدارها را می توان برای ارائه بارهای بهینه به سلول های فتوولتائیک طراحی کرد و سپس ولتاژ، جریان یا فرکانس را متناسب با دستگاه ها یا سیستم های دیگر تبدیل کرد. ارتباط غیر خطی سلول های خورشیدی بین دما و مقاومت کل را می توان بر اساس منحنی ولتاژ-جریان و منحنی های ولتاژ-توان تحلیل کرد. ردیابی نقطه حداکثر توان از خروجی سلول نمونه برداری کرده و مقاومت مناسب (بار) را برای به دست آوردن حداکثر توان اعمال می کند. دستگاه های ردیابی نقطه حداکثر توان معمولاً در یک سیستم مبدل برق ادغام می شوند که تبدیل ولتاژ یا جریان، فیلتر کردن و تنظیم بارهای مختلف از جمله شبکه های برق، باتری ها یا موتورها را فراهم می کند. اینورترهای خورشیدی برق جریان مستقیم را به برق جریان متناوب تبدیل می کنند و ممکن است ردیابی نقطه حداکثر توان را در خود جای دهند. توان در حداکثر نقطه توان حاصل ضرب ولتاژ حداکثر نقطه توان و

جریان نقطه حداکثر توان است. به طور کلی، منحنی توان-ولتاژ یک آرایه خورشیدی نیمه سایه‌دار می‌تواند چندین قله داشته باشد و برخی از الگوریتم‌ها می‌توانند در حداکثر محلی به جای حداکثر جهانی منحنی گیر کنند.

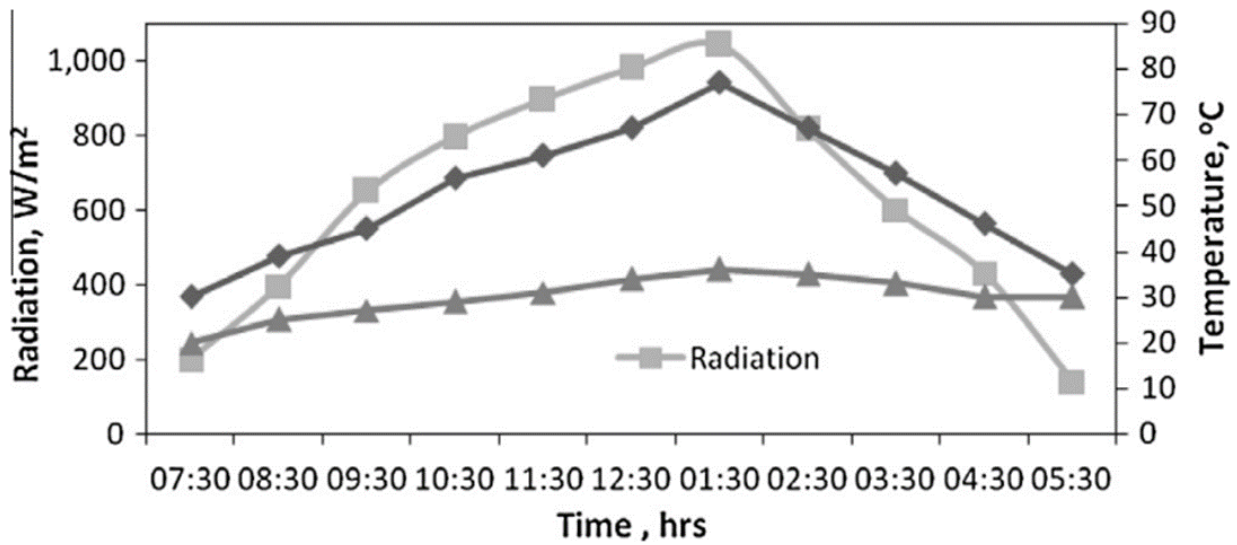


شکل ۳. منحنی توان/ولتاژ یک سیستم فتوولتائیک نیمه سایه دار، با نقطه حداکثر توان محلی و جهانی مشخص شده است.



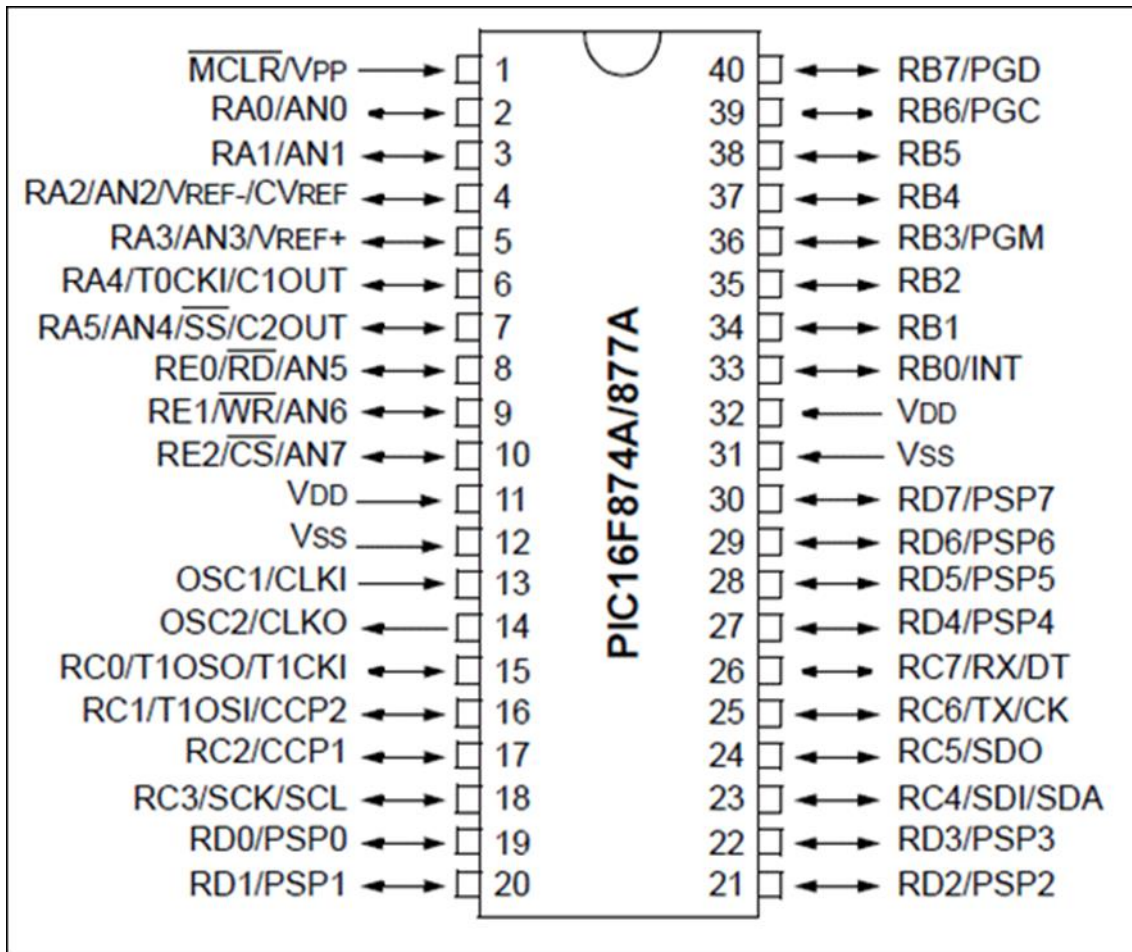
شکل ۴. منحنی عملیاتی برای مبدل کاهنده-افزاینده.

در تحقیقات انجام گرفته تا کنون که توسط محققان مختلف بر روی سیستم رديابی نقطه حداکثر توان هیبریدی را با ترکیبی از هر روش آفلاین (اعم از ولتاژ مدار باز یا جریان اتصال کوتاه) و با هر روش آنلاین (P&O یا جست و جوی افراطی یا روش هدایت افزایشی) مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفته است. یک ارائه جامع در این تحقیق و مقاله در مورد اصل کار تکنیک های مختلف رديابی نقطه حداکثر توان ارائه شد که از نظر برخی پارامترهای مهم مانند: تعداد متغیرهای مورد استفاده، پیچیدگی، دقت، سرعت، اجرای سخت افزار، هزینه، کارایی رديابی و به همین ترتیب [4-22].

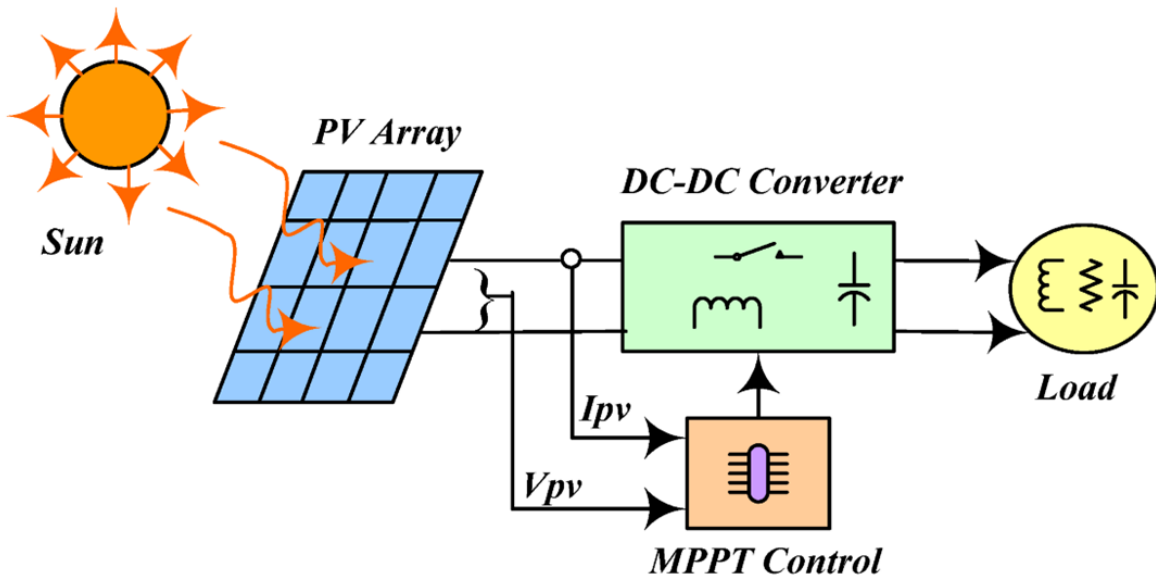


شکل ۵. تغییر دمای اتمسفر، دمای پنل و شدت تابش.

روش های آفلاین بسیار ساده و مقرون به صرفه هستند اما دقیق نیستند و همچنین خروجی برق را قطع می کنند [۲۳]. از سلول فتوولتائیک پابلوت برای تشخیص ولتاژ مدار باز بدون قطع برق خروجی استفاده کرد. روش های آنلاین و ترکیبی کارآمد اما پیچیده تر هستند. در این کار، یک روش آفلاین جدید برای مکان یابی نقطه حداکثر توان با استفاده از ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه برای بهبود دقت استفاده شده است. برای جلوگیری از تداخل با مدار برای اندازه گیری ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه و صرفه جویی در مصرف برق، از یک پنل پابلوت استفاده شد. عملکرد سیستم برای شرایط آب و هوایی محلی ارزیابی شده است.



شکل ۶. شماتیک پین میکروکنترلر قابل برنامه نویسی.



شکل ۷. یک سیستم فتوولتائیک مستقل.

۳. توضیحات سیستم

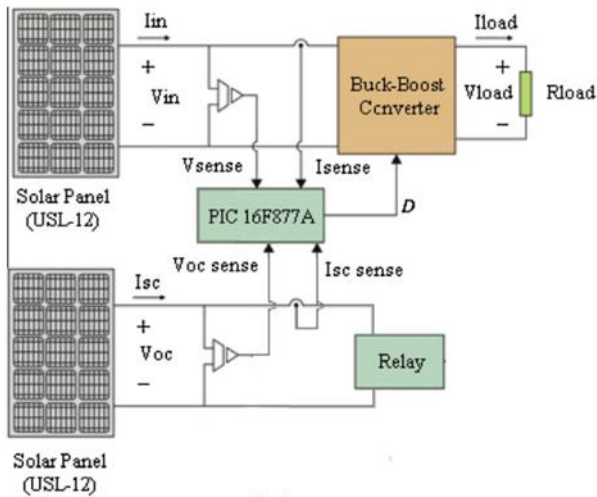
به گفته برخی از دانشمندان [۲۴]، حداکثر ولتاژ تولید شده توسط پنل فتوولتائیک (k_1) ۰,۸ برابر ولتاژ مدار باز مربوط به آن پنل فتوولتائیک است [۲۵]. در این تحقیق و مقاله یک الگوریتم نقطه حداکثر توان مبتنی بر جریان کوتاه را پیشنهاد می شود و نشان داده می شود که حداکثر جریان تولید شده توسط پنل فتوولتائیک (k_2) ۰,۹۲ برابر جریان اتصال کوتاه پنل فتوولتائیک است. در این روش جدید، الگوریتم ردیابی نقطه حداکثر توان جدید (شکل ۱) بر اساس مفاهیم ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه، برای ردیابی حداکثر توان از پنل فتوولتائیک فرموله شده است. از معادلات (۱) و (۲) حداکثر توان تولید شده توسط پنل فتوولتائیک توسط معادله (۳) داده می شود. نمودار جریان زیر الگوریتم مورد استفاده برای ردیابی نقطه حداکثر توان را توضیح می دهد.

$$P_{\max} = V_{mpp} I_{mpp} = k_1 k_2 V_{oc} I_{sc} = 0.736 V_{oc} I_{sc} \quad (3)$$

دو پنل پلی کریستالی یکسان با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ استفاده شده است. یک پنل به عنوان پنل مرجع برای اندازه گیری ولتاژ باز و اتصال کوتاه استفاده می شود. پنل دیگری به عنوان پنل اصلی در نظر گرفته می شود که در آن نیروی بار مقاومتی متصل به آن را برای اندازه گیری تامین می کند. یک مبدل کاهنده-افزاینده جریان مستقیم به جریان مستقیم (شکل ۷) برای مطابقت با امپدانس استفاده می شود. همچنین به عنوان رابط بین پنل فتوولتائیک و بار عمل می کند که سطح ولتاژ پنل فتوولتائیک را مطابق الگوریتم طراحی شده تنظیم می کند [۲۶]. مبدل های کاهنده-افزاینده برای یافتن مستقل نقطه حداکثر توان قابل اعتماد هستند. منطقه عملیاتی مبدل کاهنده-افزاینده در شکل ۲ نشان داده شده است. به منظور کنترل عملکرد مبدل کاهنده-افزاینده، الگوریتم ردیابی نقطه حداکثر توان در یک میکروکنترلر از نوع قابل برنامه نویسی سری ۱۶ برنامه ریزی شد. شکل ۶ شماتیک پین میکروکنترلر مورد استفاده به عنوان مبدل را نشان می دهد.

۴. راه اندازی و روش آزمایشی

سیستم فتوولتائیک آزمایشی با سیستم ردیابی نقطه حداکثر توان پیشنهادی مطابق بلوک دیاگرام نشان داده شده در شکل ۸ (a) مرتب شد. مجموعه آزمایشی نشان داده شده در شکل ۸ (b) قرار داده شد تا عملکرد خود را در شرایط جوی مختلف آزمایش کند. پنل ها با شیب برابر با عرض جغرافیایی محلی رو به جنوب هستند. بهترین زمان برای انجام آزمایش ها با توجه به توان و پتانسیل پنل فتوولتائیک به مدت پنج روز باید انجام شود. بهترین زمان جمع آوری نتایج حاصل از آزمایش ها بنا به پتانسیل پنل فتوولتائیک از ساعت ۷ صبح تا ۵ بعد از ظهر برای هر ۱ ساعت می تواند انجام شود. برای اندازه گیری تابش از سنج خورشیدی دستی، برای اندازه گیری دمای اتمسفر از دماسنج جیوه ای کالیبره شده و برای اندازه گیری دمای پنل فتوولتائیک از ترموکوپل نوع K با نمایشگر دیجیتال استفاده می شود. برای اندازه گیری ولتاژ و جریان مستقیم به ترتیب از ولت متر و آمپر متر آنالوگ استفاده می شود. یک مقاومت متغیر به عنوان بار جریان مستقیم استفاده شد. توان تولید شده توسط پنل خورشیدی با و بدون ردیابی نقطه حداکثر توان اندازه گیری شد. مقادیر ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه پنل فتوولتائیک منبع نیز با کمک نمایشگر کریستال مایع متصل به میکروکنترلر مشخص شد. جریان اتصال کوتاه توسط میکروکنترلر، با کار کردن رله متصل به پنل مرجع اندازه گیری شد.



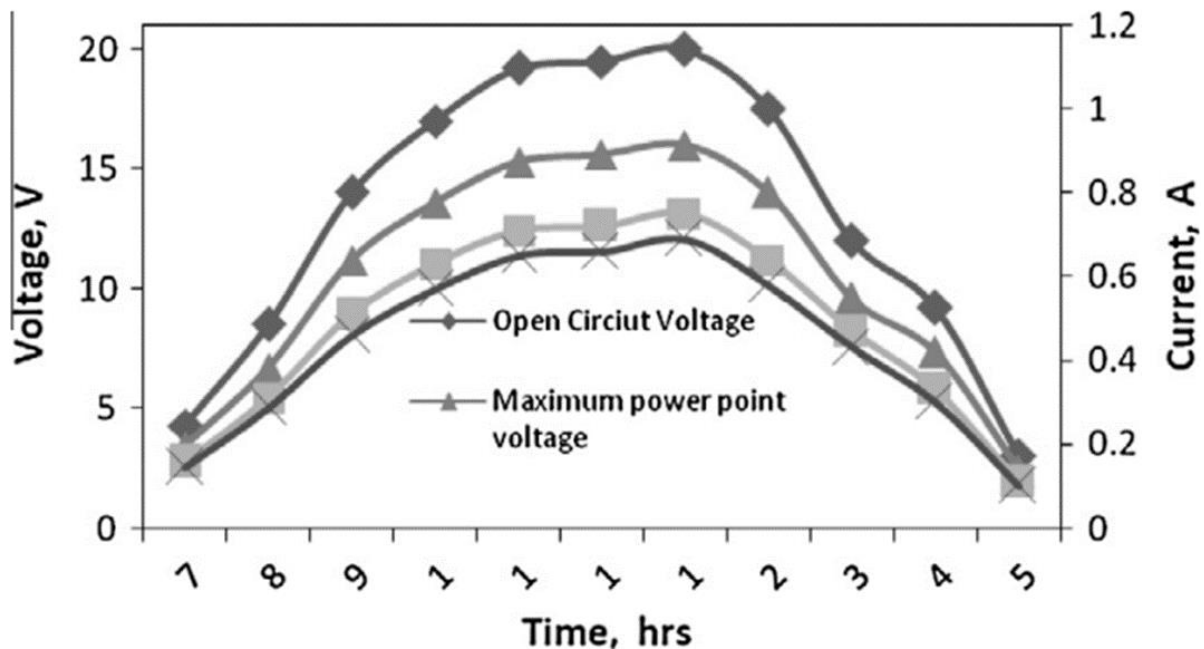
(a)

(b)

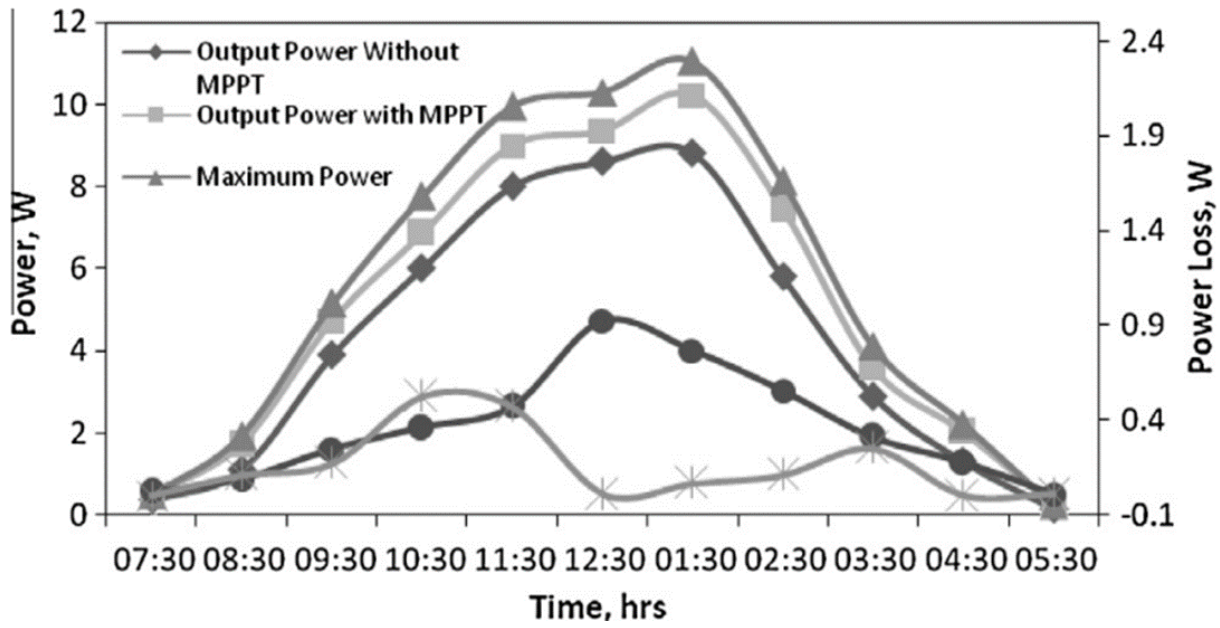
شکل ۸. بلوک دیاگرام و راه اندازی و آزمایش.

۵. نتایج و بحث

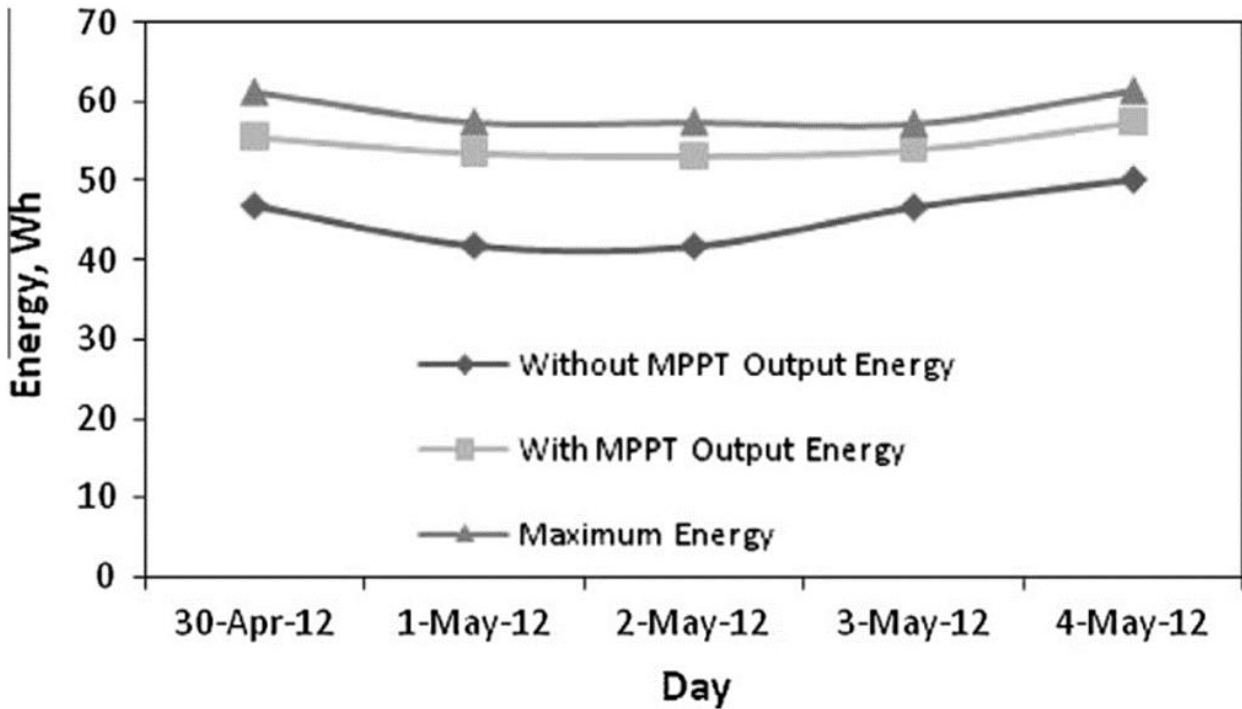
میانگین تغییرات تابش خورشیدی و دمای اتمسفر در طول روزهای آزمایشی در شکل ۵ نشان داده شده است. هم تابش و هم دمای اتمسفر از صبح افزایش می‌یابد و در حدود ساعت ۱:۳۰ بعد از ظهر به حداکثر مقدار می‌رسد و سپس در ساعات عصر کاهش می‌یابد. تغییرات متناسب در دمای پنل نیز مشاهده می‌شود.



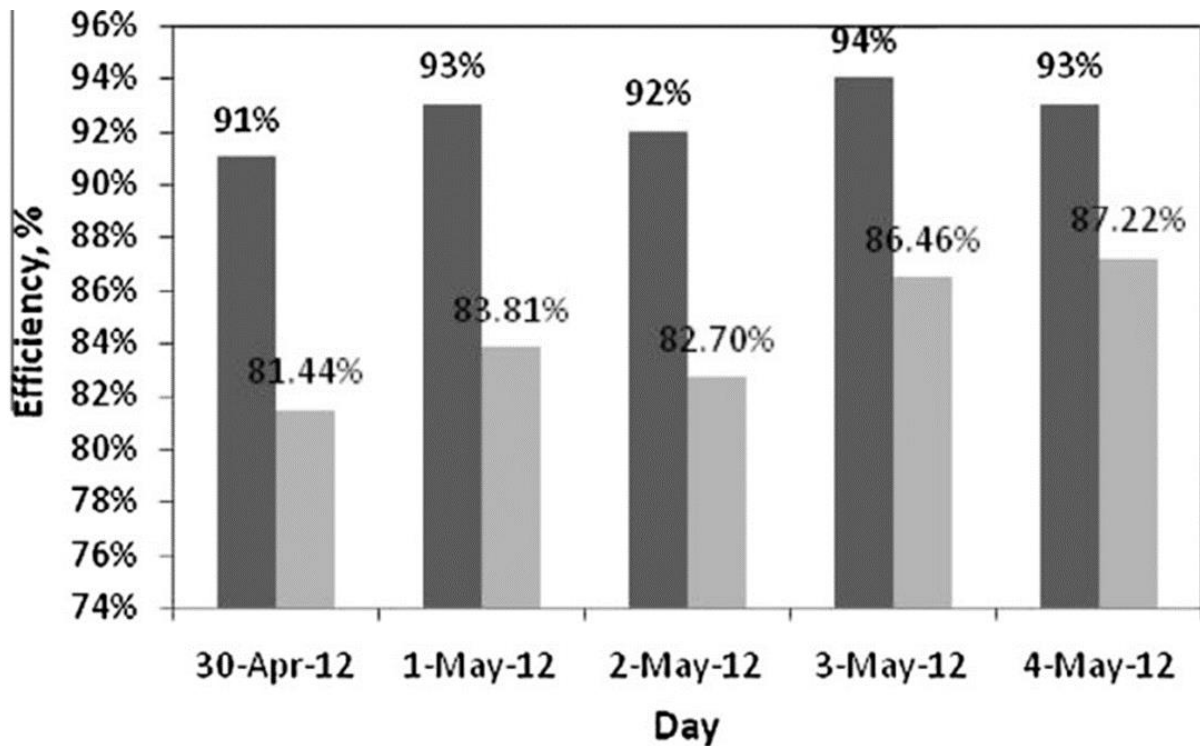
شکل ۹. تغییرات ولتاژ و جریان مختلف.



شکل ۱۰. تنوع توان و تلفات.



شکل ۱۱. تنوع انرژی برای روزهای مختلف.



شکل ۱۲. تغییرات راندمان (بازدهی) مبدل (نمودار رنگ روشن: بدون ردیابی نقطه حداکثر توان و نمودار رنگ تیره: با ردیابی نقطه حداکثر توان).

جدول ۲. مقایسه روش های مختلف ردیابی نقطه حداکثر توان.

بهره وری	آموزش قبلی	پارامترهای حسی	سرعت همگرایی	دیجیتال یا آنالوگ	پیچیدگی	نوع	روش ردیابی نقطه حداکثر توان
کم	بله	ولتاژ	متوسط	هر دو	کم	آفلاین	ولتاژ مدار باز
کم	بله	جریان	متوسط	هر دو	متوسط	آفلاین	جریان اتصال کوتاه
زیاد	بله	بستگی دارد	سریع	دیجیتال	زیاد	آفلاین	شبکه های عصبی-مصنوعی
زیاد	بله	بستگی دارد	آهسته	دیجیتال	زیاد	آفلاین	منطق فازی
کم	خیر	ولتاژ و جریان	سریع	هر دو	کم	آنلاین	اندازه اغتشاش ثابت
زیاد	خیر	ولتاژ و جریان	بستگی دارد	دیجیتال	متوسط	آنلاین	اندازه اغتشاش متغیر
زیاد	خیر	ولتاژ و جریان	بستگی دارد	دیجیتال	متوسط	آنلاین	جست و جوی افراطی
زیاد	خیر	ولتاژ و جریان	بستگی دارد	دیجیتال	متوسط	آنلاین	روش هدایت افزایشی
زیاد	خیر	ولتاژ؛ جریان و دما	سریع	دیجیتال	متوسط	ترکیبی	P&O
زیاد	خیر	ولتاژ و جریان	سریع	دیجیتال	کم	آفلاین	روش فعلی

تغییرات ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه، حداکثر جریان نقطه قدرت و حداکثر ولتاژ نقطه قدرت از صبح تا عصر همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است. تغییرات در این مقادیر نیز متناسب با تابش است. تغییرات حداکثر توان، توان بدون ردیابی نقطه حداکثر توان

و با ردیابی نقطه حداکثر توان همان طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است. این تغییرات همچنین با تابش و جریان اتصال کوتاه از صبح تا عصر است. تغییرات در تلفات عملیاتی ردیابی نقطه حداکثر توان و تلفات عدم تطابق نیز در شکل ۱۰ آورده شده است. این تغییرات هیچ ارتباطی با تشعشع یا حداکثر توان ندارند. این تلفات ناشی از تغییرات سریع تابش خورشیدی است که در زمان های مختلف روز، در حین کارکرد سیستم رخ می دهد. تغییرات توان با و بدون ردیابی نقطه حداکثر توان و حداکثر توان نظری با استفاده از معادله (۳) محاسبه شده است. برای روزهای مختلف آزمایشی مانند شکل ۱۱ نشان داده شده است. شکل ۱۲ تغییرات بازده مبدل را برای روزهای مختلف آزمایشی با و بدون ردیابی نقطه حداکثر توان نشان می دهد. تغییر در تفاوت بین حداکثر انرژی و انرژی خروجی با ردیابی نقطه حداکثر توان و تغییرات در راندمان مبدل با و بدون ردیابی نقطه حداکثر توان به دلیل تأثیر تغییرات غیریکنواخت در عملکرد ردیابی نقطه حداکثر توان و تلفات عدم تطابق است که در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

۶. نتیجه گیری

در این تحقیق و مقاله، یک الگوریتم نقطه توان حداکثر بر اساس ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه پیشنهاد شد. در الگوریتم ردیابی نقطه حداکثر توان ارائه شده، یک رله ۱۲ ولتی به پنل فتوولتائیک مرجع متصل شد که به طور دوره ای بسته و سپس باز می شود تا ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه را اندازه گیری کند، که به ردیابی حداکثر توان از پنل فتوولتائیک کمک می کند. یک مبدل کاهنده-افزاینده، که توسط میکروکنترلر قابل برنامه نویسی کنترل می شود، ساخته شد و با آرایه فتوولتائیک خورشیدی و بار متصل شد. الگوریتم ردیابی نقطه حداکثر توان پیشنهادی با استفاده از یک بار مقاومتی خالص تأیید شد. جدول ۲ ویژگی های سیستم ردیابی نقطه حداکثر توان جدید پیشنهادی را با سایر سیستم ها مقایسه می کند. سیستم پیشنهادی برای عملکرد آن در شرایط جوی محلی ارزیابی شد. الگوریتم نقطه حداکثر توان ارائه شده در اینجا یک روش ساده و ارزان برای ردیابی مداوم حداکثر توان آرایه فتوولتائیک خورشیدی است، زیرا شرایط آب و هوایی متفاوت است. این یک طرح مقرون به صرفه حداکثر توان را فراهم می کند که می تواند در هر سیستم فتوولتائیک استفاده شود. این سیستم در ردیابی حداکثر توان از پنل فتوولتائیک ۹۴٪ کارآمد بود.



منابع و مراجع

- [1] Bahgat ABG, Helwa NH, Ahmad GE, El Shenawy ET. Maximum power point tracking controller for PV systems using neural networks. *Renewable Energy* 2005;30:1257–68.
- [2] Salas V, Olias E, Barrado A, Lazaro A. Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2006;90:1555–78.
- [3] ESRAM T, Chapman PL. Comparison of photovoltaic array maximum powerpoint tracking techniques. *IEEE Trans Energy Convers* 2007;22:2.
- [4] Reisi AR, Moradi MH, Jamas S. Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;19:433–43.
- [5] Kassem AM. MPPT control design and performance improvements of a PV generator powered DC motor-pump system based on artificial neural networks. *Int J Electr Power Energy Syst* 2012;43(1):90–8.
- [6] Ramaprabha R, Balaji M, Mathur BL. Maximum power point tracking of partially shaded solar PV system using modified Fibonacci search method with fuzzy controller. *Int J Electr Power Energy Syst* 2012;43(1):754–65.
- [7] Irmak E, Güler N. Application of a high efficient voltage regulation system with MPPT algorithm. *Int J Electr Power Energy Syst* 2013;44(1):703–12.
- [8] Bianconi E, Calvente J, Giral R, Mamarelis E, Petrone G, Ramos-Paja CA, et al. Perturb and observe MPPT algorithm with a current controller based on the sliding mode. *Int J Electr Power Energy Syst* 2013;44(1):346–56.
- [9] Houssamo Issam, Locment Fabrice, Sechilariu Manuela. Experimental analysis of impact of MPPT methods on energy efficiency for photovoltaic power systems. *Electr Power Energy Syst* 2013;46:98–107.
- [10] Enslin JHR, Wolf MS, Snyman DB, Swiegers W. Integrated photovoltaic maximum power point tracking converter. *IEEE Trans Industr Electron* 1997;44:769–73.
- [11] Masoum MAS, Dehbonei H, Fuchs EF. Theoretical and experimental analyses of photovoltaic systems with voltage and current-based maximum power-point tracking. *IEEE Trans Energy Convers* 2002;17(4):514–22.
- [12] Noguchi method for multiple photovoltaic-and-converter module system. *IEEE Trans Ind Electron* 2002; 49(1): pp. 217–23.
- [13] Hua C, Lin J, Shen C. Implementation of a DSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking. *IEEE Trans Industr Electron* 1998;45(1):99–107.
- [14] Abdelsalam AK, Massoud AM, Ahmed S, Enjeti PN. High-performance adaptive perturb and observe MPPT technique for photovoltaic based microgrids. *IEEE Trans Power Electron* 2011;4:26.
- [15] Brunton SL, Rowley CW, Kulkarni SR, Clarkson C. Maximum power point tracking for photovoltaic optimization using ripple-based extremum seeking control. *IEEE Trans Power Electron* 2010;25(10):2531–40.



- [16] Lei P, Li Y, Seem JE. Sequential ESC-based global MPPT control for photo-voltaic array with variable shading. *IEEE Trans Sustain Energy* 2011;2(3):348–58.
- [17] Bazzi AM, Krein PT. Concerning maximum power point tracking for photovoltaic optimization using ripple-based extremum seeking control. *IEEE Trans Power Electron* 2011;26(6):1611–2.
- [18] Hohm DP, Ropp ME. Comparative study of maximum power point tracking algorithms. *Prog Photovoltaics Res Appl* 2003;11:47–62.
- [19] Liu F, Duan S, Liu F, Liu B, Kang Y. A variable step size INC MPPT method for PV systems. *IEEE Trans Industr Electron* 2008;55:7.
- [20] Mei Q, Shan M, Liu L, Guerrero JM. A novel improved variable step-size incremental-resistance MPPT method for PV systems. *IEEE Trans Industr Electron* 2011;58:6.
- [21] Moradi MH, Reisi AR. Hybrid maximum power point tracking method for photovoltaic systems. *Sol Energy* 2011;85:2965–76.
- [22] Bhatnagar P, Nema RK. Maximum power point tracking control techniques: state-of-the-art in photovoltaic applications. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;23:224–41.
- [23] Salameh Z, Dagher F, Lynch W. Step-down maximum power point tracker for photovoltaic systems. *Sol Energy* 1991;46(5):279–82.
- [24] Aganah KA, Leedy AW. A constant voltage maximum power point tracking method for solar powered systems. In: *Proceedings of the IEEE 43rd south eastern symposium on system theory (SSST)*; 2011, pp. 125–30.
- [25] Noguchi T, Togashi S, Kakamoto R. Short-current pulse based adaptative maximum power point tracking for photovoltaic power generation system. *IEEE Int Symp Industr Electron (ISIE)* 2000;1:157–62.
- [26] Coelho RF, Concer FM, Martins DC. A simplified analysis of DC–DC converters applied as maximum power point tracker in photovoltaic systems. In: *2nd IEEE international symposium on power electronics for distributed generation systems*; 2010, pp. 29–4.