
A Novel Algorithm to Find Maximum Power Point for Solar Systems under Partial Shading

Ali Asghar Ghadimi^{*1}, Mohammad Shafiei Ahooei², Amir Hossein Abolmasoumi³

¹ Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran
a-ghadimi@araku.ac.ir (**Corresponding author**)

² Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran
mohammadshafiei7@gmail.com

³ Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran
a-abolmasoumi@araku.ac.ir

Abstract

In this paper, a new two-stage control algorithm to reach the maximum power point in photovoltaic (PV) systems under partially shaded conditions is presented. This algorithm tracks the maximum power point without any need to measure the open circuit voltage, short circuit current and making use of any extra switches. To achieve maximum power performance, the method firstly selects the relevant region of maximum power point based on received radiations from solar panels. After finding the correct power region, the accurate point of maximum power is reached by applying P&O method. Using this algorithm decreases the costs and also finds the MPP with more speed and accuracy at the first cycle. Performance validation of the proposed algorithm, is performed by running simulation on a typical system. The simulation results show the superior performance of the proposed approach in comparison with the conventional methods.

Keywords: Solar system, Maximum Power Point Tracking, Partial shading condition, Energy optimization

Submit date: 2022/09/08
Accepted date: 2023/09/30

Corresponding author name: Ali Asghar Ghadimi

Corresponding author's Address: Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

طراحی یک الگوریتم جدید برای یافتن نقطه بیشینه توان در سیستم‌های خورشیدی تحت سایه

نوع مطالعه: پژوهشی

علی اصغر قدیمی*^۱، دانشیار، محمد شفیعی آهویی^۲، دانشجوی کارشناسی ارشد، امیرحسین ابوالمعصومی^۳، دانشیار

۱- گروه مهندسی برق- دانشکده فنی و مهندسی- دانشگاه اراک- اراک- ایران

a-ghadimi@araku.ac.ir

۲- گروه مهندسی برق- دانشکده فنی و مهندسی- دانشگاه اراک- اراک- ایران

mohammadshafiei7@gmail.com

۳- گروه مهندسی برق- دانشکده فنی و مهندسی- دانشگاه اراک- اراک- ایران

a-abolmasoumi@araku.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک الگوریتم کنترلی برای دستیابی به بیشترین توان ممکن، در سیستم های خورشیدی که تحت سایه جزئی قرار می گیرند، ارائه گردیده است. این الگوریتم بدون نیاز به استفاده از تجهیزات روش های معمول که شامل اندازه گیری جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز و استفاده از کلیدهای اضافی می باشد، به ردیابی توان بیشینه می پردازد. در مرحله ی ابتدایی، الگوریتم پیشنهادی بر اساس تابش های دریافت شده، محدوده نقطه ی بیشینه توان را می یابد و سپس با استفاده از روش تغییرات و مشاهده، نقطه دقیق توان بیشینه را به دست می آورد. با استفاده از این الگوریتم هزینه های ناشی از استفاده از روش های معمول کاهش یافته و نقطه بیشینه توان با دقت و سرعت بالا در چرخه ابتدایی به دست می آید. جهت صحت سنجی الگوریتم پیشنهادی، شبیه سازی بر روی یک سیستم خورشیدی نمونه انجام شده و نتایج حاصل از این الگوریتم با روش های پرکاربرد مقایسه گردیده که نتایج حکایت از کارآیی این الگوریتم در قیاس با روش های معمول دارد.

واژه های کلیدی: سیستم خورشیدی، ردیابی توان بیشینه، سیستم تحت سایه، بهینه سازی انرژی.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۰۸

نام نویسنده ی مسئول: دکتر علی اصغر قدیمی

نشانی نویسنده ی مسئول: اراک- میدان سردشت- دانشگاه اراک- دانشکده فنی و مهندسی- گروه مهندسی برق

۱- مقدمه

امروزه استفاده از واحدهای تولید پراکنده به علت مسائل مختلف فنی، اقتصادی و زیست محیطی مورد استقبال قرار گرفته است که در این میان انرژی خورشیدی به عنوان منبع بدون نویز صوتی و آلودگی زیست محیطی مورد توجه ویژه می باشد (Shekipour et al., 2021; Mirzaei et al., 2017). در سیستم های تولید الکتریسیته به وسیله ی انرژی خورشیدی از برخورد تابش با سلول های خورشیدی، جریان الکتریکی حاصل می شود و این جریان پس از عبور از مبدلها به شکل مناسب مصرف کننده ها یا شبکه برق تبدیل می شود (عباسی و همکاران، ۱۳۹۵).

علی رغم مزایای متنوعی که انرژی خورشیدی دارد، به علت بالا بودن هزینه های اولیه، اقتصادی بودن به کارگیری سیستم های خورشیدی وابسته به استفاده حداکثری از انرژی تابش می باشد، که برای این مهم بایستی شرایط بهره برداری از سیستم خورشیدی به نحوی باشد که سیستم خورشیدی در نقطه بیشینه توان، مورد استفاده قرار گیرد. به همین علت روش های مختلفی در زمینه ردیابی توان بیشینه در سیستم های خورشیدی ارائه گردیده است. از طرفی برای بالا بردن سطح ولتاژ در سیستم خورشیدی، ماژول ها به صورت سری به یکدیگر متصل می گردند (Mochizuki et al., 2018). در این شرایط هنگامی که هوا ابری یا آلوده باشد، ماژول های متصل به هم، تابش های مختلفی را درک می کنند. این تفاوت تابش در ماژول ها سبب ایجاد نقاط بیشینه متفاوتی می شود که یکی از این نقاط، نقطه بیشینه مطلق بوده و مابقی نقاط بیشینه محلی هستند. تحت این وضعیت، روش های ردیابی توان بیشینه در ابتدایی ترین نقطه بیشینه که می تواند نقطه بیشینه محلی باشد، متوقف شده و سیستم را مجبور به تولید توان کمتری می کند. در نتیجه بازده کل سیستم کاهش یافته و صرفه ی اقتصادی استفاده از این مجموعه را زیر سوال می برد. در این شرایط مشکل یافتن نقطه عملکرد بیشینه توان استخراجی، به وجود می آید (Podder et al., 2019).

با مطرح شدن استفاده از سیستم های خورشیدی، بحث بر سر بهره برداری از این سیستم ها در بیشترین بازده ممکن مورد توجه قرار گرفت. مطالعاتی که در این زمینه طی دهه های گذشته انجام پذیرفته، منجر به دستیابی و معرفی روش های مختلفی در زمینه ردیابی توان بیشینه در سیستم های خورشیدی گردیده است. در این قسمت به طور مختصر به روش های برگزیده ردیابی توان بیشینه پرداخته شده است. یک روش ردیابی توان بیشینه مناسب برای اعمال در تولید انبوه باید راندمان بالا و در عین حال هزینه پایین داشته باشد. روش تغییرات و مشاهده به علت سادگی و نیاز به تنها سنسورهای جریان و ولتاژ و قابلیت ردیابی بیشترین توان

به صورت کاملاً دقیق در تغییرات دما و تابش، کاربردهای گسترده ای دارد. همانطور که از اسمش مشخص است این روش بر اساس تغییر ولتاژ آرایه واحد خورشیدی و مشاهده تاثیر این تغییرات در توان خروجی آرایه PV (PhotoVoltaic) عمل می کند (Mohapatra et al., 2019). روش کنداکتانس افزایشی بر اساس این واقعیت بنا شده که شیب منحنی توان در نقطه بیشترین مقدار خود صفر و در سمت چپ این نقطه مثبت و در سمت راست آن منفی است. در این روش بر اساس شیب دریافتی از منحنی، تنظیمات جهت رسیدن به نقطه ای با شیب صفر که برابر با نقطه بیشینه می باشد انجام می پذیرد (Alsumiri, 2019). ساده ترین روش، روش چرخه عملکرد ثابت می باشد که در آن نیازی به فیدبک نیست و امیدانس بار تنها یک بار برای بیشینه توان تنظیم می شود. این روش به صورت تقریبی نقطه عملکرد بیشینه توان را تعیین می کند (De Brito et al., 2013). روش ولتاژ ثابت از نتایج تجربی استفاده می کند که نشان می دهد ولتاژ در توان بیشینه در حدود ۷۰ تا ۸۰ درصد ولتاژ مدار باز فتوولتائیک می باشد. در نقطه توان بیشینه، ولتاژ در ترمینال ماژول با تغییر شدت تابش خورشید به میزان کمی تغییر می کند در حالی که با تغییرات دمایی، نقطه عملکرد بهینه در ولتاژهای متفاوتی رخ می دهد. بنابراین این روش در مناطقی که تغییرات دما کم است باید مورد استفاده قرار گیرد (Pandey et al., 2007; Nansur et al., 2018). همانطور که در بخش قبلی نیز اشاره شد، وجود تابش های مختلف در ماژول هایی که به صورت سری به یکدیگر متصل شده اند باعث ایجاد نقاط بیشینه متعدد شده که در این میان تنها یکی از این نقاط نقطه بیشینه مطلق بوده و مابقی نقاط محلی هستند. با توجه به این نکته که روش هایی که معرفی گردید، امکان ردیابی توان بیشینه تحت این شرایط خاص را ندارند و ممکن است این روش ها در نقاط بیشینه محلی به دام بیافتند، مطالعات در زمینه یافتن روش های متناسب با این موقعیت انجام پذیرفت.

در مرجع (Masoum et al., 2010) نقطه توان بیشینه تحت سایه ردیابی شده، اما از یک کلید اضافه به صورت موازی با منبع فتوولتائیک استفاده شده تا در هر چرخه جریان منبع را اتصال کوتاه کرده و جریان اتصال کوتاه را محاسبه می کند. این عمل خود باعث اتلاف بخش زیادی از انرژی می گردد. در مرجع (Nemours et al., 2019) نویسنده کلید اضافی را حذف کرده و روش کنترلی پیشنهاد داده که بر اساس آن چرخه عملکرد را از صفر تا یک افزایش داده تا جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز را محاسبه کرده و نقاط بیشینه را یافته و نقاط محلی را حذف کند.

این الگوریتم می تواند سرعت یافتن نقطه بیشینه را به شدت افزایش دهد و از به دام افتادن سیستم در نقاط بیشینه محلی جلوگیری کند. همچنین به علت عدم استفاده از هرگونه کلید اضافی در سیستم کنترل، اتلاف توان و هزینه به شدت کاهش می یابد. بطور خلاصه می توان نوآوری مقاله حاضر را استفاده از روشی سریع و مطمئن برای یافتن نقطه بیشینه توان سلولهای خورشیدی تحت سایه بیان نمود.

مقاله حاضر در پنج بخش نگارش شده است. در ادامه در بخش دوم اصول اولیه شامل معرفی اجزای سیستم خورشیدی و مدلسازی آنها انجام خواهد شد و همچنین اثر سایه جزئی در عملکرد یک سیستم خورشیدی مورد بررسی قرار می گیرد. در بخش سوم روش پیشنهادی معرفی شده و با فلوچارت و توضیحات مختلف اصول و روش عملکرد آن تشریح خواهد شد. در بخش چهارم شبیه سازی روش ارائه شده بر روی یک سیستم نمونه انجام شده و نتایج و تحلیل های مربوطه آمده است. سرانجام در بخش پایانی نتیجه گیری از مقاله آمده است.

۲- اصول اولیه

۲-۱- معرفی اجزای سیستم خورشیدی

سیستم های خورشیدی که به منظور تولید انرژی الکتریکی از نور خورشید مورد بهره برداری قرار می گیرند، از سه بخش اصلی شامل سلول های خورشیدی، مبدل DC/DC، اینورتر و مصرف کننده تشکیل می شوند. اجزای یک سیستم خورشیدی نمونه در شکل (۱) نشان داده شده است. اولین بخش، ماژول های خورشیدی هستند که به عنوان منبع انرژی مورد استفاده قرار می گیرند. قسمت دوم سیستم خورشیدی، مبدل DC/DC می باشد (تودجی، ۱۳۹۷). مبدل در سیستم خورشیدی با دو هدف اصلی مورد استفاده قرار می گیرد: اولین هدف بالا بردن میزان سطح ولتاژ می باشد که بر این اساس بیشترین کاربرد در سیستم های خورشیدی را مبدل های افزایشنده و افزایشنده-کاهنده دارند. دومین هدف دستیابی به نقطه عملکرد بیشینه توان می باشد. برای این منظور با به کار گیری روش های ردیابی توان بیشینه، خروجی این کنترل کننده ها که میزان چرخه عملکرد (Duty Cycle) مناسب می باشد به مبدل اعمال گردیده و در نتیجه مبدل بر اساس چرخه عملکرد دریافتی میزان ولتاژ ورودی را برای استخراج بیشترین توان ممکن از ماژول تنظیم می کند (Mirzaei et al., 2020). آخرین بخش یک سیستم خورشیدی، مصرف کننده می باشد که سیستم خورشیدی با هدف انرژی رسانی به آن طراحی و مورد بهره برداری قرار گرفته است. در این بخش بسته به

در این روش کنترل کننده تمام بازه ی چرخه عملکرد را طی می کند که این خود باعث بالا رفتن زمان چرخه یافتن نقطه بیشینه می گردد. در مرجع (Cardoso et al., 2019) یک الگوریتم خطی بر اساس اعداد فیبوناچی ارائه گردیده که جهت یافتن توان بیشینه تحت شرایط سایه به کار گرفته شده است. مشکل این روش امکان ایجاد خطا در یافتن نقطه بیشینه مطلق تحت شرایط خاص می باشد. در مرجع (Nguyen et al., 2010) الگوریتم جست و جویی ارائه گردیده که از شرایط استفاده از آن، انتخاب مقدار اولیه به صورت دقیق می باشد که در غیر اینصورت امکان دارد کنترل کننده در یک نقطه محلی به دام افتد. در مرجع (Kan et al., 2019) با ارائه یک پیکر بندی که در آن برای هر ماژول یک مبدل در نظر گرفته شده است تا ماژول ها به صورت مستقل در نقطه بیشینه توان، عمل نمایند. این پیکر بندی باعث بالا رفتن بازده سیستم می شود اما این طرح افزایش زیادی در هزینه نصب برای مبدل ها را در پی دارد که تمایل اقتصادی استفاده از این سیستم را کاهش می دهد. در مرجع (Li et al., 2019) الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO) برای ردیابی نقطه توان بیشینه به کار گرفته شده است. مشکل این طرح، تاخیر زمانی تا انجام محاسبات برای رسیدن به نقطه بیشینه می باشد. در مرجع (Nguyen et al., 2008) برای کاهش اثرات سایه، یک طرح تطبیقی برای اتصال آرایه های فتوولتائیک پیشنهاد گردیده که به وسیله ی یک الگوریتم کنترلی نحوه اتصال آرایه ها تغییر میکند. در این طرح مشکل بالا رفتن هزینه و استفاده از کلیدهای زیاد به چشم می خورد. در مرجع (Shekipour et al., 2021) از الگوریتم P&O به منظور ردیابی حداکثر توان در سیستم استفاده شده است و جهت حذف سنسور تابش از روش اندازه گیری ولتاژ و جریان پنل و استفاده از الگوریتم تخمین تابش پنل استفاده نموده است.

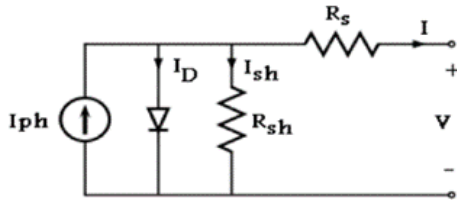
با مرور کارهای گذشته میتوان جمع بندی نمود که ارائه روشی با دقت بالا و سرعت مناسب و در عین حال با حداقل پیچیدگی جهت دستیابی به نقطه حداکثر توان در سلولهای خورشیدی تحت سایه از اهمیت فوق العاده ای برخوردار است که هدف این مقاله است. در این مقاله یک الگوریتم جدید برای یافتن نقطه بیشینه توان سلول های خورشیدی سری در حضور سایه ارائه شده است. در این روش بر اساس تابش اندازه گیری شده لحظه ای محدوده قرار گرفتن نقطه بیشینه توان تخمین زده شده و به سیستم کنترل ارائه می شود. در مرحله بعد با دانستن محدوده ی توان بیشینه، روش کنترلی ردیابی توان بیشینه اعمال گشته و نقطه عملکرد بهینه به صورت دقیق مشخص می شود. با توجه به این که، در این روش همانند روش های قبل نیاز به جستجو در تمامی بازه نیست

(۳) جریان خروجی سلول خورشیدی می تواند به صورت روابط (۳) و (۴) محاسبه شود.

$$I = I_{pv} - I_d - I_{sh} \quad (3)$$

$$I = I_{pv} - I_s \left\{ e^{\frac{q}{AKT_c N_s} (V + IR_s)} - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (4)$$

که N_s تعداد سلول های سری، I_{sh} جریان مقاومت موازی، R_s مقاومت سری و R_{sh} مقاومت موازی می باشد.



شکل (۳): مدار معادل سلول خورشیدی

جریان تولید شده توسط نور در سلول خورشیدی عمدتاً وابسته به سطح تابش خورشید و دمای کاری آن می باشد که در معادله (۵) آمده است.

$$I_{pv} = [I_{sc} + K_i (T_c - T_r)] G \quad (5)$$

که G میزان تابش بر حسب وات بر متر مربع، I_{sc} جریان اتصال کوتاه در دمای ۲۵ درجه و تابش ۱۰۰۰ وات بر متر مربع، K_i بازده مشترک دمای جریان اتصال کوتاه، T_c و T_r به ترتیب دمای کاری سلول و دمای مرجع بر حسب کلوین می باشند. جریان اشباع دیود با دمای سلول تغییر می کند که در معادله (۶) آورده شده است.

$$I_s = I_{rs} \left[\frac{T_c}{T_r} \right]^3 e^{\left[\frac{qE_g}{AK} \left[\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_r} \right] \right]} \quad (6)$$

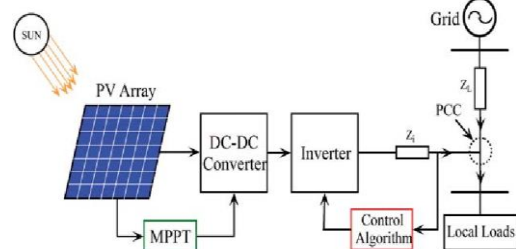
که I_{rs} جریان اشباع معکوس سلول در دما و تابش مرجع می باشد، E_g انرژی شکاف های نیمه هادی در سلول مورد استفاده در دمای ۲۵ درجه می باشد. (برای پلی کریستال Si، $E_g = 1.12 \text{ eV}$ می باشد).

جریان اشباع معکوس سلول در معادله (۷) آورده شده است.

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\exp \left[\frac{qV_{oc}}{AKT_c N_s} \right] - 1} \quad (7)$$

با به دست آوردن معادلات بالا، می توان معادل ریاضی ماژول خورشیدی را در محیط شبیه سازی Matlab/Simulink به دست آورد. شکل (۴) نشان دهنده ی شبیه سازی سیستم براساس روابط ریاضی در این محیط می باشد. لازم به ذکر است که مدل دیود و مدل دما و تابش طبق رابطه ۱ تا ۷ همگی در

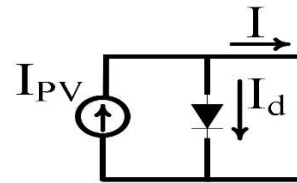
کاربرد و ابعاد سیستم، می توان از باتری و یا ابر خازن ها به عنوان ذخیره سازهای انرژی استفاده نمود. همچنین انرژی خروجی مدل را می توان به وسیله ی اینورترهای DC/AC برای مصارف AC تبدیل کرد. اینور وظیفه تبدیل ولتاژ جریان مستقیم به جریان متناوب جهت تغذیه بارهای متناوب یا اتصال به شبکه سراسری را بعهده دارد. علاوه بر این سیستم های خورشیدی بسته به ابعاد و کاربری می توانند به صورت متصل به شبکه یا به صورت جزیره ای مورد بهره برداری قرار گیرند.



شکل (۱): اجزای سیستم خورشیدی

۲-۲- مدل ریاضی سلول خورشیدی

مدل مداری یک سلول فتوولتائیک ایده ال در شکل (۲) نشان داده شده است. معادله ریاضی برای مشخصه جریان ولتاژ سلول ایده ال در معادلات (۱) و (۲) توصیف شده است (Aldaoudeyeh, 2018; Allani et al., 2018).



شکل (۲): مدار معادل سلول ایده آل (Aldaoudeyeh, 2018)

$$I = I_{pv} - I_d \quad (1)$$

که I_{pv} جریان تولیدی سلول فتوولتائیک و I_d جریان دیود است که می تواند از معادله (۲) به دست آید.

$$I_d = I_s \left[e^{\frac{q}{AKT_c} V} - 1 \right] \quad (2)$$

که I_s جریان اشباع دیود، q بار الکترون، A ثابت ایده آلی، T_c دمای کاری سلول و K ثابت بولتزمن می باشد.

مدار معادل یک ماژول خورشیدی شامل چند سلول سری از یک منبع جریان متصل به صورت موازی با دیود در راستای عکس، مقاومت سری و مقاومت موازی تشکیل شده و در شکل (۳) نمایش داده شده است (Nema et al., 2010). بر اساس شکل

میزان تابش و دمای دریافتی سلول و مشخصات ساختاری سلول خورشیدی می باشد (Pandey et al., 2007).

۴-۲- اثر سایه در عملکرد سیستم خورشیدی

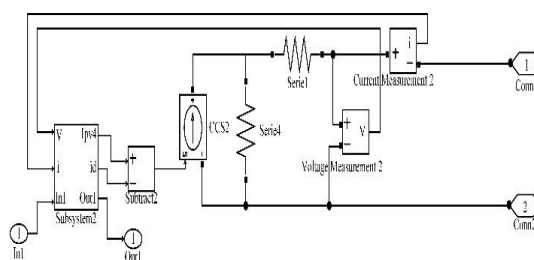
همانطور که در بخش های قبل نیز اشاره شد، برای دستیابی به ولتاژ بالاتر در سیستم های خورشیدی اقدام به اتصال سری ماژول ها و تشکیل آرایه ها می نمایند. در این میان، هنگامی که ماژول ها تابش های مختلفی را درک کنند، جریان تولیدی آنها با توجه به رابطه (۵) متناسب با میزان تابش دریافتی متفاوت خواهد بود. برای مثال اگر ماژول تابشی نصف تابش کامل دریافت کند، جریانی برابر با نصف جریان نامی تولید خواهد کرد. تحت چنین شرایطی با توجه به سری بودن ماژول ها، جریان عبوری از آن ها مساوی کمترین جریان تولیدی (ماژول با کمترین تابش) خواهد شد. بنابراین در این حالت از تمامی توان ماژول های دارای تابش های بالاتر استفاده نشده است. در نتیجه سیستم در بازدهی به مراتب پایین تر از توان بهینه، مورد بهره برداری قرار می گیرد. در این موقعیت صرفه اقتصادی طرح زیر سوال رفته و بازگشت سرمایه مد نظر در سیستم رخ نخواهد داد.

جهت رفع این مشکل با هر ماژول در سیستم های خورشیدی یک دیود موازی می شود. با موازی سازی این دیودها هر یک از ماژول ها جریان تولیدی خود (وابسته به تابش دریافتی) را به صورت مستقل تولید نموده و تفاوت بین جریان های ماژول های سری از دیودها عبور می کند. به عنوان مثال اگر سه ماژول یکسان تحت تابش های متفاوت، جریان های ۱، ۲ و ۳ آمپر تولید کنند، از دیود ماژولی که ۳ آمپر تولید می کند، هیچ جریانی گذر نمی کند، از دیود ماژول دو آمپری یک آمپر و از دیود ماژول یک آمپری، دو آمپر جریان عبور می کند. عبور جریان از دیودها باعث کاهش ولتاژ ماژول تا حد ۰.۷ ولت شده و عملاً ماژول از چرخه تولید توان حذف می گردد.

این که حداکثر توان قابل استحصال از یک آرایه با n ماژول در حالت وجود سایه جزئی (تابش های مختلف) چقدر می باشد بسته به اختلاف میزان تابش ها دارد. گاهی ممکن است، اثر منفی وجود یک ماژول با جریان کم (تحت تابش کم) در کاهش جریان کل عبوری از یک آرایه بیش از اثر مثبت افزایش ولتاژ آرایه باشد که در این صورت به صرفه خواهد بود که این ماژول از آرایه حذف گردد. این مسئله می تواند برای وجود یا عدم وجود چند ماژول در یک آرایه نیز صدق کند.

جهت روشن شدن موضوع فرض کنید یک آرایه با سه ماژول یکسان به صورت سری وجود دارد که تحت سه تابش مختلف قرار گرفته اند. با فرض این که جریان تولیدی این ماژول ها ۱، ۳ و ۳.۷

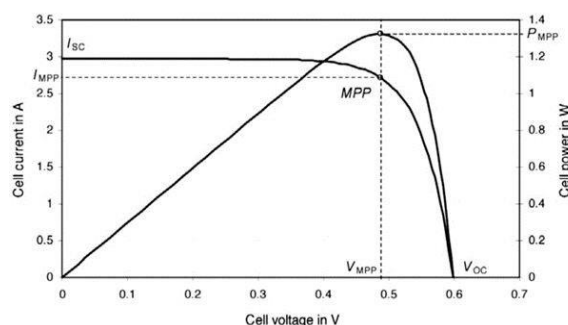
داخل بلوک subsystem2 پیاده سازی شده و نتیجه آن بعنوان یک جریان توسط منبع جریان کنترل شده به بقیه اجزا متصل شده است.



شکل (۴): شبیه سازی سیستم براساس روابط ریاضی در محیط متلب

۳-۲- مدل سلول خورشیدی

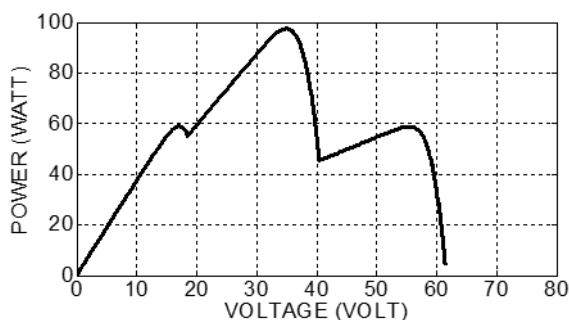
سلول های خورشیدی به صورت طبیعی، مشخصه توان-ولتاژ و جریان-ولتاژ غیر خطی به نمایش می گذارند که با تابش خورشید و دمای سلول تغییر می کنند. مشخصه توان-ولتاژ و جریان-ولتاژ عمومی یک ماژول که به صورت منفرد مورد بهره برداری قرار می گیرد در شکل (۵) نمایش داده شده است (دهقان زاده و همکاران، ۱۳۹۸).



شکل (۵): منحنی مشخصه توان ولتاژ و جریان ولتاژ سلول خورشیدی

همانطور که در شکل منحنی مشخصه توان-ولتاژ ماژول خورشیدی مشاهده می شود، توان استخراجی از ماژول با افزایش ولتاژ تا محدوده ۷۰ الی ۹۰ درصد ولتاژ مدار باز، بالا رفته و بعد از آن با شیب نسبتاً زیادی سقوط می کند. این نقطه عملکرد بهینه توان برای سیستم خورشیدی می باشد که در آن بیشترین توان ممکن از ماژول دریافت می گردد. همچنین این نقطه بر روی مشخصه جریان ولتاژ، منطبق بر ناحیه زانویی جریان می باشد که در شکل (۵) نیز نشان داده شده است. این مشخصه وابسته به

وضعیت در سیستم خورشیدی رخ می دهد، روش های معمول ردیابی توان بیشینه، در ابتدایی ترین نقطه بیشینه عملکرد که می تواند نقطه ای محلی باشد به دام افتاده و قادر به یافتن نقطه بیشترین توان مطلق نمی باشد (Podder et al., 2019).



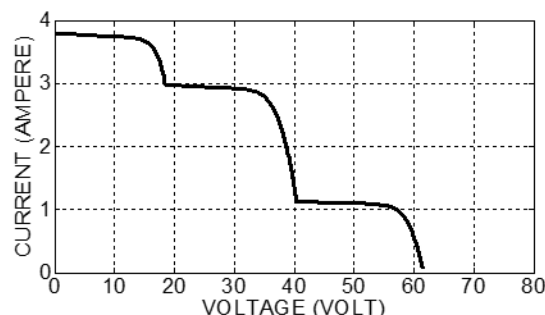
شکل (۷): منحنی مشخصه توان ولتاژ شامل سه ماژول با تابش های مختلف

۳- روش پیشنهادی

همانگونه که اشاره شد، در این تحقیق هدف یافتن بازه مناسب بهره برداری از آرایه های خورشیدی به منظور استحصال حداکثر توان (ردیابی بیشینه توان) می باشد. فلوجارت روش پیشنهادی در شکل (۸) آمده است. در مرحله اول با نصب سنسورهای تابش بر روی ماژول ها، میزان تابش های دریافتی تعیین می گردد. نسبت تابش های دریافتی برابر با نسبت جریانهای تولیدی ماژول ها می باشد. این میزان تابش ها می تواند نماینده ای برای جریان تولیدی ماژول ها باشد. در مرحله بعد تابش های دریافتی را بر حسب بیشترین مقدار مرتب نموده و سپس ضرایب به ترتیب از یک، دو، سه و غیره به تابش ها نسبت داده می شود. این ضرایب بدین طریق انتخاب شده اند که اگر یک ماژول داشته باشیم اولین جریان را (تولیدی توسط ماژول با حداکثر تابش) خواهیم داشت، دو ماژول داشته باشیم دومین جریان و غیره. در نتیجه ولتاژ آرایه به همین ترتیب در حدود یک، دو و سه برابر ولتاژ مدار باز یک ماژول خواهد شد.

در مرحله سوم با ضرب ضریب هر یک از تابش ها در میزان تابش، معیاری از حداکثر توان قابل تولید در هر یک از بازه ها به دست می آید. این معیار تعیین کننده بازه ای می باشد که بیشترین توان ممکن در آن بازه قابل استخراج می باشد و به این ترتیب بازه ی کاری بهینه مشخص می شود و فرمان لازم به سیستم کنترل مبدل به منظور تنظیم ولتاژ تولیدی آرایه در مقدار مورد نظر بازه ارسال می شود. ولتاژ مورد نظر در بازه ی k ام در حدود رابطه ۸ می باشد.

آمپر باشد. اگر تنها ماژول با بیشترین تابش در مدار باشد ولتاژ به اندازه ولتاژ کاری یک ماژول (حدود ۱۷ ولت) و جریانی به اندازه جریان عبوری از ماژول با تابش دریافتی بیشتر (حدود ۳.۷ آمپر) خواهد بود. حال اگر دو ماژول در مدار قرار گیرند، ولتاژ کاری دو ماژول سری (حدود ۳۷ ولت) حاصل خواهد شد در حالی که جریان تولیدی برابر جریان ماژول با تابش کمتر (حدود ۳ آمپر) می شود و نهایتاً اگر هر سه ماژول در مدار قرار گیرند، ولتاژ حاصل برابر با ولتاژ کاری سه ماژول سری خواهد شد و جریان نیز برابر با جریان حداقل این سه ماژول (حدود ۱ آمپر) می گردد. لذا با توجه به این که آرایه در خروجی خود چه ولتاژی تولید می کند، می تواند در هر یک از این سه حالت قرار گیرد. این موضوع در شکل (۶) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، سه بازه بر روی محور ولتاژ به دست آمده است. حال این سوال پیش می آید که بهترین حالت بهره برداری در کدام یک از این بازه ها می باشد. در این خصوص باید میزان توان قابل استحصال در هر یک از این بازه ها محاسبه شود. این کار با ضرب ولتاژ و جریان قابل انجام می باشد (Kermadi et. al, 2019; Aquib et al., 2018; Özgenç et al., 2019; Dhimish, 2019). نتیجه برای این مثال در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل (۶): منحنی مشخصه جریان ولتاژ شامل سه ماژول با تابش های مختلف

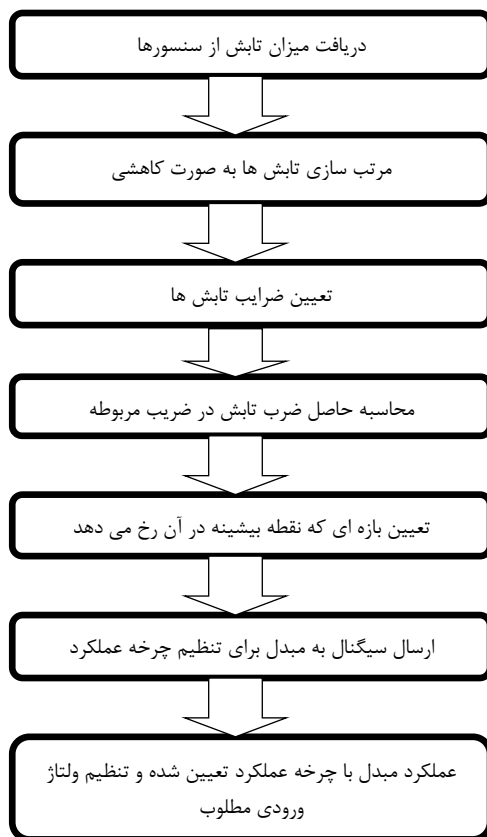
در این حالت، ملاحظه می شود که حداکثر توان در حالت بهره برداری دو یعنی به کارگیری دو ماژول به دست می آید. همانطور که اشاره شد به ازای تابش های دیگر ممکن است این اتفاق در بازه های اول یا سوم نیز رخ دهد.

همان طور که در شکل (۶) و شکل (۷) دیده می شود، امکان وجود نقطه عملکرد بیشینه مطلق در سه محدوده ی ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درصدی ولتاژ مدار باز می باشد. در واقع نقاطی که در آن ها بیشترین توان استخراج می گردد نزدیک به محدوده ایجاد تقاطع در منحنی مشخصه جریان ولتاژ سیستم می باشد. در این بین نقطه بیشینه توان مطلق بر اساس میزان اختلاف سطوح تابش می تواند در هر یک از این سه محدوده واقع گردد. هنگامی که این

پس از تعیین بازه مطلوب و ولتاژ مورد نظر طبق رابطه (۸) میزان چرخه عملکرد با توجه به رابطه (۹) تعیین و برای تولید پالس مورد استفاده قرار می گیرد. لازم به ذکر است این میزان ولتاژ محدوده کاری حدودی سیستم را مشخص می کند و نیاز به چرخش در کل بازه ها مانند روش های قبلی نمی باشد و این روش سرعت و دقت بالایی در پی دارد. مراحل این الگوریتم در شکل (۸) آورده شده است.

از مزیت های روش پیشنهادی می توان به مزایای زیر اشاره کرد:

- در این روش، در بخش اولیه کنترلی، بازه بیشینه توان به طور دقیق مشخص می گردد.
- بر اساس تعیین بازه نقطه عملکرد بهینه، روش های معمول سعی و خطا حذف گردیده و سرعت یافتن بیشینه توان افزایش می یابد.
- همچنین در این روش به علت عدم استفاده از هرگونه کلید اضافه، میزان تلفات توان کم شده و هدف اصلی که همان استخراج بیشترین توان ممکن است، در دسترس تر قرار گرفته است.



شکل (۸): مراحل الگوریتم پیشنهادی

$$V = k \frac{V_{oc}}{n} \quad (8)$$

که در اینجا n تعداد کل ماژول های سری، V_{oc} ولتاژ مدار باز هر یک از ماژول ها می باشد. همانگونه که میدانیم مقدار V_{oc} در شرایط تابش و دمای مختلف متفاوت است. اما اصول کلی روش پیشنهادی بر تعیین بازه تقریبی عملکرد در مرحله اول می باشد. لذا استفاده از مقدار تقریبی ولتاژ مدار باز خللی در سیستم ایجاد نمیکند. از اینرو میتوان از اثر دما و تابش در ولتاژ مدار باز (که تاثیر کمی هم دارد) صرف نظر نمود و مقدار ولتاژ مدار باز در هر تابش را در رابطه بالا استفاده نمود.

برای مثال در یک سیستم خورشیدی متشکل از سه پنل که به صورت سری است تابش های ۳۰۰، ۹۰۰ و ۱۰۰۰ را دریافت می کند. ضریب برای تابش ۱۰۰۰ برابر یک، برای تابش ۹۰۰ برابر دو و برای تابش ۳۰۰ برابر سه می باشد. با ضرب میزان تابش در ضریب مربوطه معیار توان برای بازه های مختلف به دست می آید. در واقع ضرایبی که برای این تابش ها در نظر گرفته شده است، بدین صورت است که پس از مرتب سازی تابش بیشتر ضریب یک را گرفته بدین معنی که در این حالت تنها از یک ماژول تولید توان صورت می پذیرد و چون تنها این ماژول در چرخه قرار دارد، میزان تولید توان برابر با حداکثر خواهد بود. در حالت بعد که دو ماژول در چرخه تولید توان قرار می گیرد، ماژولی که تابش بیشتر را دریافت می کند بایستی میزان تولید توان و در پی آن، جریان تولید خود را با ماژولی که تابش کمتری دریافت می کند هماهنگ کند. همین منوال برای ماژول های بیشتر نیز صادق خواهد بود. به این ترتیب معیار توان به ترتیب برابر ۱۰۰۰، ۱۸۰۰ و ۹۰۰ خواهد بود که براساس این معیار نقطه بهینه عملکرد در بازه دوم می باشد. لذا سیگنال چرخه عملکرد لازم جهت ارسال به مبدل DC-DC برای بازه اول برابر ۰.۳، برای بازه دوم ۰.۶ و نهایتاً برای بازه سوم ۰.۹ می باشد. این مقادیر بر اساس شرایط معمول حاکم بر ماژول های خورشیدی تعیین گردیده اند.

همانطور که در مقدمه نیز اشاره گردید، از مبدل DC/DC جهت تنظیم ولتاژ استفاده می شود. مبدل های افزایشی یکی از پر کاربردترین مبدل ها در سیستم های خورشیدی می باشند که در این مقاله هم از آن استفاده شده است (Mirzaei et al., 2019).

رابطه اساسی مربوط به این مبدل در معادله (۹) آورده شده است.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D} \quad (9)$$

جدول (۱): مشخصات سیستم شبیه سازی شده

پارامترها	واحد	مقادیر
V_{oc}	ولت	۲۱.۱
I_{sc}	آمپر	۳.۸
K_i	آمپر بر کلوین	۱
K	ژول بر کلوین	۱.۳۸×۱۰^{-۲۲}
N_s	تعداد سلول	۳۶
R_s	اهم	۰.۲۲۱
T_r	کلوین	۲۹۸
A	-	۱.۳

الگوریتم پیشنهادی با دریافت میزان تابش ها و اعمال الگوریتم جدید، مقدار چرخه عملکرد مبدل را تنظیم نموده که در نتیجه مبدل میزان جریان دریافتی از منبع تغذیه را تنظیم نموده و ولتاژ در نقطه عملکرد بهینه ثابت می گردد. این سیستم در محیط شبیه سازی نرم افزار Matlab، مدل سازی گردیده است. ابتدا شبیه سازی بصورت استاتیکی جهت نمایش کارایی روش پیشنهادی در سه حالت مختلف آورده شده و کارایی روش پیشنهادی در انتخاب منطقه بهینه بررسی خواهد شد. سپس شبیه سازی ترکیبی به منظور بررسی سرعت عملکرد و توانایی انتخاب منطقه مد نظر با تغییرات دینامیک تابش انجام خواهد شد.

سیستم پیشنهادی در شرایط مختلف تابشی و دمایی مورد ارزیابی قرار گرفته است. سه حالت مختلف تابش، برای حالت هایی که نقطه بیشینه توان به علت تابش های متفاوت در بازه های مختلف منحنی توان-ولتاژ قرار می گیرد و همچنین دو حالت برای شرایطی که دو ماژول تابش یکسان و ماژول سوم تابش متفاوتی را دریافت می کند مورد ارزیابی قرار گرفته اند. همچنین حالتی که تمامی ماژول ها تابش یکسانی را دریافت می کنند، مورد بررسی قرار گرفته است. در کنار این شرایط، حالتی نیز تحت عنوان حالت خاص آورده شده که معیار های حاصل از ضرب تعداد ماژول ها و تابش ها با هم برابر می باشد که در این شرایط نیز الگوریتم پیشنهادی قادر به انتخاب حالت بهینه می باشد.

۴-۱-۱- حالت اول (منطقه بهینه در ناحیه انتهایی)

در حالت ابتدایی ماژول های سری، تابش های ۷۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ را دریافت می کنند. در این حالت نقطه بیشینه توان در یک سوم انتهایی قرار می گیرد. شکل (۹) نشان دهنده منحنی توان ولتاژ و شکل (۱۰) منحنی مشخصه جریان ولتاژ در این حالت می باشد.

این روش دارای سرعت بسیار بالا و دقت بسیار مناسبی است و تنها اشکال آن نیاز به سنسورهای تابش در سیستم میباشد که این اندازه گیری حتما نیاز نیست توسط سنسورهای تابش بصورت سخت افزاری انجام شود و با روشهای تخمین تابش که دارای دقت مناسبی میباشد میتوان نیاز به سنسور را مرتفع نمود (Chepp et al., 2021) و از مزایای این روش بهره جست (Kermadi et al., 2020).

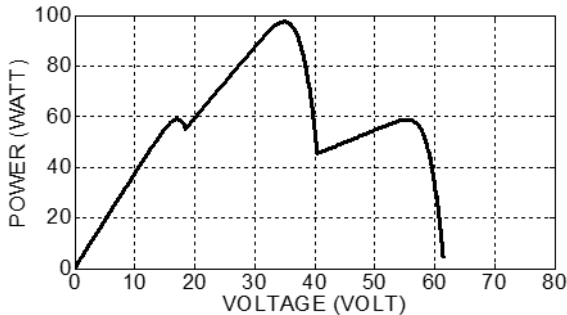
نکته بسیار مهم این است که روش ارائه شده جهت ردیابی دقیق نقطه توان بیشینه در حالت سایه جزئی بصورت دو مرحله ای است. در مرحله اول محدوده کاری مشخص میشود که این مرحله نیاز به اطلاعات دقیق ندارد و خطاهای ناشی از صرف نظر کردن دما و تخمین تابش هیچگونه خللی در آن ایجاد نمیکند زیرا بعنوان مثال در پنل مورد آزمایش در مقاله محدوده کاری بازه حدود ۲۰ ولتی دارد (شکل ۷). در مرحله دوم ردیابی دقیق با استفاده از روشهای مرسوم نظیر P&O انجام میشود. این فرآیند دو مرحله ای احتمال گیر افتادن روشهای مرسوم در نقطه بهینه محلی را به صفر میرساند و ردیابی با دقت بسیار بالا انجام میشود.

۴- شبیه سازی و نتایج

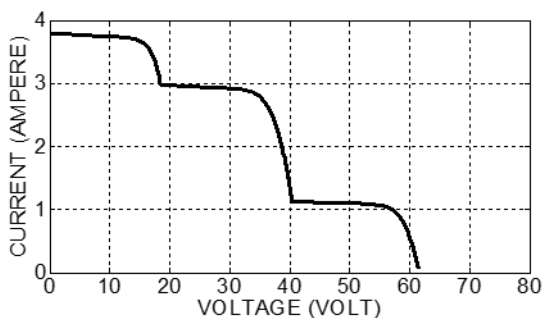
۴-۱- معرفی سیستم نمونه

سیستم خورشیدی که در این مقاله شبیه سازی شده و الگوریتم کنترل بر روی آن اعمال گردیده، شامل سه ماژول خورشیدی با اتصال سری به یکدیگر می باشد که این ماژول ها می توانند تحت تابش های یکسان و یا متفاوت قرار گیرند و بصورت جزیره ای یک بار جریان مستقیم را تغذیه نمایند. مشخصات ماژول مورد استفاده در این شبیه سازی در جدول (۱) آورده شده است. مجموعه این سه ماژول سری، بخش منبع تغذیه سیستم خورشیدی را تشکیل می دهد. خروجی منبع تغذیه جهت افزایش ولتاژ به یک مبدل DC/DC افزایش یافته متصل شده است و در خروجی مبدل DC/DC بار DC قرار گرفته است. سیستمهای خورشیدی معمولا در حالت متصل به شبکه در مود بیشینه توان کار میکنند اما در این مقاله هدف ارائه و آزمایش روش ردیابی حداکثر توان میباشد و از این رو به جهت سادگی یک سیستم جدا از شبکه در نظر گرفته شده است. این سیستم شامل یک بار بوده که در مقادیر تابش یا سایه متفاوت دارای توانهای مصرفی متفاوت میباشد. بدیهی است اتصال این سیستم به شبکه توسط اینورتر و کارکرد آن در حالت بیشینه توان هیچگونه خللی در عملکرد سیستم کنترل ایجاد نخواهد کرد.

می گردد. تحت این شرایط نیز مشاهده می شود که ولتاژ در ۳۷ ولت تنظیم می گردد و نتیجه توان استخراجی ۹۸ وات می باشد. در این حالت هم با استفاده از روش های معمول ردیابی توان بیشینه، سیستم در ولتاژ ۱۷ ولت متوقف شده و توان ۵۹ وات را تحویل می دهد که تحت این شرایط در صورت استفاده از روش های معمول حدود ۴۰٪ اتلاف توان خواهیم داشت



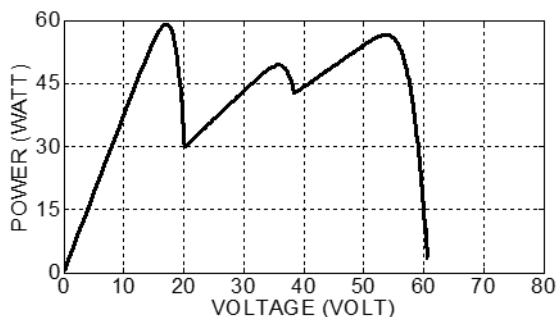
شکل (۱۱): منحنی مشخصه توان ولتاژ حالت دوم



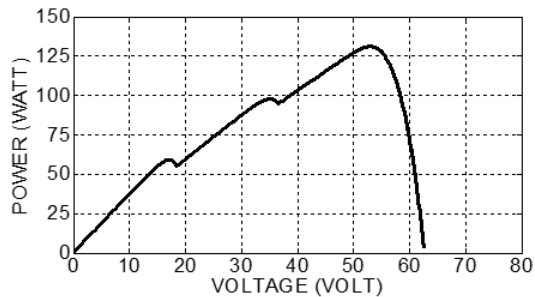
شکل (۱۲): منحنی مشخصه جریان ولتاژ حالت دوم

حالت سوم (منطقه بهینه در ناحیه ابتدایی)

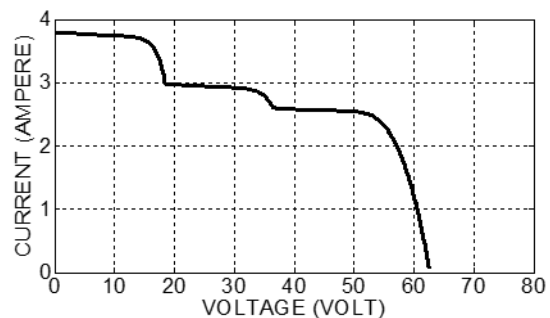
تحت شرایط جدید میزان تابش ماژولی که تحت تابش ۸۰۰ قرار داشته به ۴۰۰ رسیده و در نتیجه نقطه بیشینه توان به یک سوم ابتدایی جا به جا می گردد. شکل های (۱۳) و (۱۴) منحنی های توان ولتاژ و جریان ولتاژ این حالت را نشان می دهد.



شکل (۱۳): منحنی مشخصه توان ولتاژ حالت سوم



شکل (۹): منحنی مشخصه توان ولتاژ حالت اول



شکل (۱۰): منحنی مشخصه جریان ولتاژ حالت اول

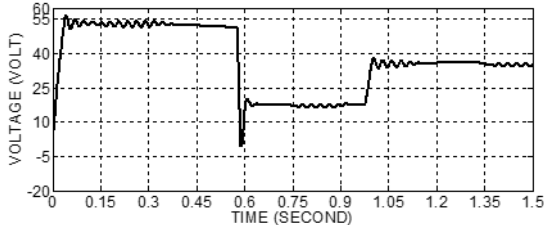
تحت این شرایط، الگوریتم پیشنهادی ولتاژ را در ۶۰ ولت تنظیم نموده و سپس سیستم کنترلی در مرحله دوم تنظیم دقیق ولتاژ را انجام می دهد. همانطور که در شکل (۹) نیز مشاهده می گردد، در این حالت توان بیشینه برابر ۱۳۷ وات بوده و در ولتاژ ۵۳ ولت به دست می آید که در بازه یک سوم انتهایی قرار دارد. این در حالی می باشد که با اعمال روش های معمول ردیابی توان بیشینه، سیستم در اولین نقطه بیشینه که در ولتاژ ۱۷ ولت رخ می دهد (نقطه بیشینه محلی) متوقف شده و توان ۶۰ وات قابل استخراج خواهد بود و در نتیجه از نقطه بهینه حقیقی غافل می ماند. نتیجه استفاده از الگوریتم پیشنهادی در این شرایط جلوگیری از اتلاف ۵۶٪ انرژی می باشد.

۲-۱-۴- حالت دوم (منطقه بهینه در ناحیه میانی)

در این حالت میزان تابش ماژولی که تحت تابش ۷۰۰ قرار داشت به میزان ۳۰۰ کاهش پیدا می کند. در شرایط جدید نقطه بیشینه توان به یک سوم میانی انتقال پیدا می کند. منحنی مربوط به توان ولتاژ و جریان ولتاژ در شکل های (۱۱) و (۱۲) نمایش داده شده است.

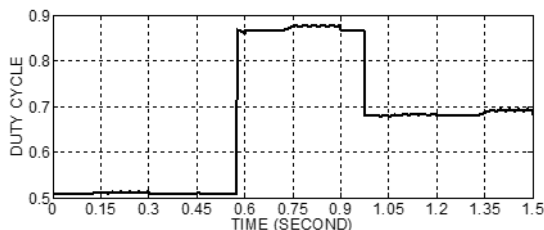
در این حالت نیز الگوریتم پیشنهادی بازه را در اولین چرخه تشخیص داده و سپس عمل جستجو تنها در بازه ی دوم اعمال

قابل مشاهده است، با تغییرات تابش سیستم به سرعت (سرعت واکنش سیستم در این شرایط در حد دهم ثانیه می باشد) خود را با شرایط جدید منطبق نموده و بیشترین توان در بازه جدید دریافت می شود.



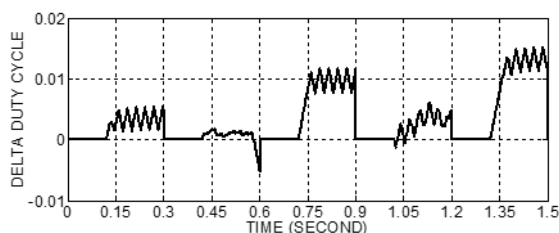
شکل (۱۶): منحنی تغییرات ولتاژ بر حسب زمان

شکل (۱۶) نشان دهنده تغییرات در میزان ولتاژ دریافتی از ماژول ها می باشد که با هدف دستیابی به بیشترین توان دریافتی از ماژول ها، توسط الگوریتم پیشنهادی، کنترل می گردد. مطابق شکل (۱۶) ولتاژهای حاصل به ترتیب در مقادیر ۵۳، ۱۷ و ۳۷ ولت به میرایی رسیده اند.



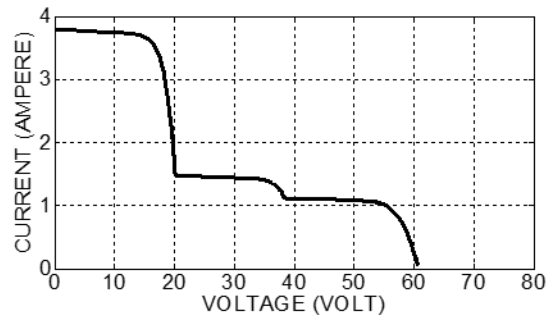
شکل (۱۷): منحنی چرخه عملکرد بر حسب زمان

در شکل (۱۷) تغییرات در چرخه عملکرد ارسالی توسط الگوریتم پیشنهادی نشان داده شده است. همچنین شکل (۱۸) تغییرات این پارامتر را در زمان های مختلف با هدف ردیابی توان بیشینه توسط روش تغییرات و مشاهده نشان می دهد.



شکل (۱۸): منحنی تغییرات چرخه عملکرد بر حسب زمان

در شبیه سازی دوم، حالتی که در آن دو ماژول تابش برابر و ماژول سوم تابش متفاوتی را دریافت می کند، در نظر گرفته شده است. در بازه ۰.۳ ثانیه ابتدایی میزان تابش های دریافتی برای ماژول ها برابر ۷۰۰، ۷۰۰ و ۳۰۰ می باشد که در بازه بعدی و پس از ۰.۳ ثانیه دوره گذر به تابش های ۷۰۰، ۳۰۰ و ۳۰۰ می رسد و نهایتاً در بازه انتهایی تمامی ماژول ها تابش برابر ۷۰۰ را دریافت می

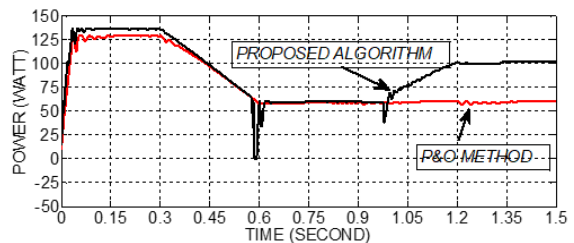


شکل (۱۴): منحنی مشخصه جریان ولتاژ حالت سوم

در شکل (۱۳)، توان بیشینه تقریباً برابر ۶۰ بوده و در ولتاژ ۱۷ ولت به دست می آید. تنها در این حالت است که استفاده از روش های متداول ردیابی توان بیشینه، سیستم را در شرایط بهینه حقیقی وادار به کار می کند.

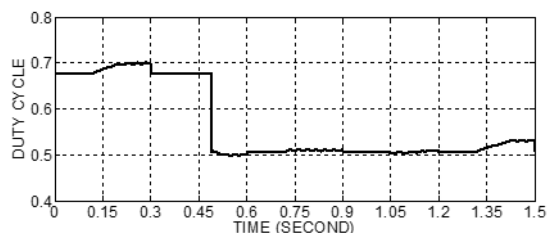
۲-۴- شبیه سازی ترکیبی

حال با مشخص شدن حالت های مختلف و به دست آوردن توان ها، شبیه سازی شرایط طبیعی که در عمل ممکن است رخ دهد صورت پذیرفته است. در این شبیه سازی ماژول ها در بازه ۰.۳ ثانیه اولیه، تابش های ۱۰۰۰، ۷۰۰ و ۸۰۰ را دریافت می کنند. سپس بعد از ۰.۳ ثانیه حالت گذر به تابش های ۱۰۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ می رسند و نهایتاً در بازه آخر، تابش ها ۱۰۰۰، ۳۰۰ و ۸۰۰ می شوند. در شکل های (۱۵) الی (۱۸) به ترتیب منحنی مشخصه توان، ولتاژ، چرخه عملکرد (مربوط به خروجی الگوریتم شناسایی محدوده نقطه بهینه) و تغییرات چرخه عملکرد (مربوط به خروجی سیستم کنترل) بر حسب زمان آورده شده است.

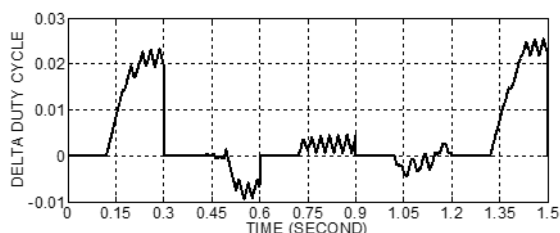


شکل (۱۵): منحنی تغییرات توان بر حسب زمان

همانطور که در شکل (۱۵) مشاهده می گردد، توان در تمامی سه بازه در بیشترین مقدار ممکن قرار دارد و بازه سیستم خورشیدی به بالاترین حد خود در شرایط سایه می رسد. تحت بازه ی اول توان ۱۳۷ وات و در بازه های بعد به ترتیب مقادیر ۶۰ و ۹۸ وات استخراج گردیده که مطابق با مقادیر به دست آمده در بخش های ۱-۴ الی ۱-۳ می باشد. نکته دیگری که حائز اهمیت است، سرعت عملکرد الگوریتم پیشنهادی می باشد. همانطور که در شکل



شکل (۲۲): منحنی چرخه عملکرد بر حسب زمان



شکل (۲۳): منحنی تغییرات چرخه عملکرد بر حسب زمان

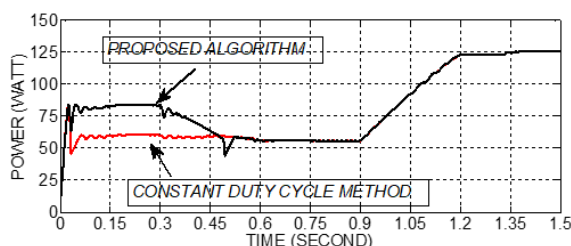
مطابق با شکل (۲۳) در این شبیه سازی نیز با استفاده از روش تغییرات و مشاهده، چرخه عملکرد برای دستیابی به بیشترین توان تنظیم می گردد.

۳-۴- حالت خاص

تحت تابش های خاص، شرایطی پدید می آید که معیار های معرفی شده برای یافتن بازه بهینه در دو یا چند حالت با یکدیگر برابر می شوند. برای مثال در حالتی که تابش ها برابر ۱۰۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ باشند، ضرایب به ترتیب برای تابش ها برابر با ۲، ۳ و ۱ می باشد که با ضرب این ضرایب در میزان تابش دریافتی، معیار ۳۰۰ برای تمامی بازه ها به دست می آید. بدین معنی که توان قابل استخراج در تمامی بازه ها با یکدیگر برابر می باشد.

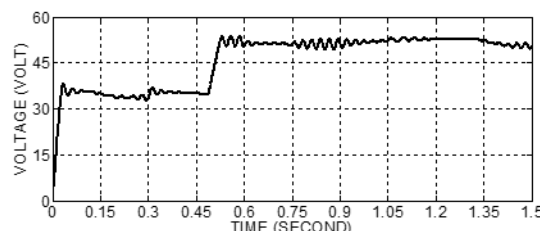
از طرفی باید توجه کرد که دیود های موازی شده با مازول ها، ایده آل نیستند و در حالت هدایت، ولتاژی کمی در حدود ۰.۷ ولت در دوسر دیودها ایجاد می شود. این ولتاژ بر روی مازول هایی که از مدار خارج شده اند نیز اعمال خواهد شد و در نتیجه توان کوچکی توسط مازول های خارج از مدار تولید می گردد. این موضوع سبب می گردد تا در حالتی که معیار های برابر برای بازه ها به دست می آید، حالت ترجیح، حالتی باشد که تعداد مازول های بیشتر در مدار قرار گیرند.

کنند. شکل های (۱۹) الی (۲۳) به ترتیب منحنی های مربوط به توان، ولتاژ، جریان، چرخه عملکرد و تغییرات چرخه عملکرد را نشان می دهند.



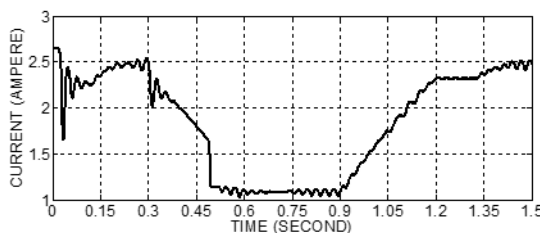
شکل (۱۹): منحنی توان بر حسب زمان

در شکل (۱۹) نیز مشاهده می گردد که در بازه های مختلف، بیشترین توان ممکن از مازول ها دریافت گردیده است. در این حالت توان های ۸۴، ۵۶ و ۱۲۴ از سیستم استخراج گردیده است.



شکل (۲۰): منحنی ولتاژ بر حسب زمان

شکل (۲۰) نشان دهنده تغییرات ولتاژ در سیستم خورشیدی می باشد که با هدف رسیدن به بیشترین توان ممکن انجام پذیرفته است.



شکل (۲۱): منحنی جریان بر حسب زمان

شکل (۲۱) مربوط به تغییرات در جریان دریافتی از سیستم در حین عملکرد می باشد، که وابسته به ولتاژ تنظیمی، تغییر می کند.

۵- نتیجه گیری

- shading on PV systems, *Solar Energy*, 216, 537-550
- De Brito, M., Galotto, L., Sampaio, L. P., e Melo, G. d. A. and Canesin, C. A., (2013), Evaluation of the Main MPPT Techniques for Photovoltaic Applications, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(3), 1156-1167
- Dhimish, M., (2019), Assessing MPPT Techniques on Hot-Spotted and Partially Shaded Photovoltaic Modules: Comprehensive Review Based on Experimental Data, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 66(3), 1132-1144
- Kan, S., Ruan, X., Dang, H., Zhang, L. and Huang, X., (2019), Second Harmonic Current Reduction in Front-End DC-DC Converter for Two-Stage Single-Phase Photovoltaic Grid-Connected Inverter, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(7), 6399-6410
- Kermadi, M., Chin, VJ., Mekhilef, S., and Salam, Z., (2020), A fast and accurate generalized analytical approach for PV arrays modeling under partial shading conditions, *Solar Energy*, 208, 753-765
- Kermadi, M., Salam, Z., Ahmed, J., Berkouk, E. M., (2019), An Effective Hybrid Maximum Power Point Tracker of Photovoltaic Arrays for Complex Partial Shading Conditions, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(9), 6990-7000
- Li, H., Yang, D., Su, W., Lü, J. and Yu, X., (2019), An Overall Distribution Particle Swarm Optimization MPPT Algorithm for Photovoltaic System Under Partial Shading, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(1), 265-275
- Masoum, A. S., Padovan, F. and Masoum, M. A. S., (2010), Impact of partial shading on voltage- and current-based maximum power point tracking of solar modules, *IEEE PES General Meeting*, Minneapolis, USA
- Mirzaei, A., Rezvanyvardom, M., (2020), High voltage gain soft switching full bridge interleaved Flyback DC-DC converter for PV applications, *Solar Energy*, 196, 217-227
- Mirzaei, A., Rezvanyvardom, M., Taati, M., (2019), High step-up fully soft switched interleaved Sheppard-Taylor converter with only one auxiliary switch for PV application, *Solar Energy*, 177, 455-463
- Mirzaei, A., Forooghi, M., Ghadimi, A. A., Abolmasoumi, A. H., Riahi, M. R., (2017), Design and construction of a charge controller for stand-alone PV/battery hybrid system by using a new control strategy and power management, *Solar Energy*, 149, 132-144
- Mochizuki, Y., Yachi, T., (2018), Effective Series-Parallel Cell Configuration in Solar Panels for FPM Power Generation Forest, 7th
- در این مقاله الگوریتم جدیدی برای ردیابی نقطه توان بیشینه برای سیستم های خورشیدی متشکل از چند ماژول که تحت تابش های مختلفی قرار می گیرند، ارائه گردیده است. در این الگوریتم، در ابتدا بازه ای که توان بیشینه مطلق در آن رخ می دهد با سرعت و دقت کاملا بالا شناسایی شده و سپس در بازه مشخص شده، نقطه بیشینه مطلق ردیابی می گردد.
- در این روش، برخلاف روش های گذشته نیازی به استفاده از کلیدهای اضافی جهت یافتن جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز نبوده و همچنین به علت یافتن بازه بیشینه توان در اولین چرخه جستجو، با سرعت بالا و بدون جستجوی تمامی بازه، عمل می کند و در نتیجه از اتلاف زمان و انرژی جلوگیری به عمل می آورد.
- نتایج شبیه سازی الگوریتم و سیستم تحت آزمایش جهت تایید و اعتبار سنجی طرح پیشنهادی در بخش انتهایی آورده شده است. این نتایج نشان از عملکرد کاملا بهینه و با صرفه ی این طرح در سیستم های خورشیدی دارد.

مراجع

- Aldaoudeyeh, A. I., (2018), Development of a generalised PV model in MATLAB/Simulink using datasheet values, *The Journal of Engineering*, 2018(5), 257-263
- Allani, M. Y., Jomaa, M., Mezghani, D. and Mami, A., (2018), Modelling and simulation of the hybrid system PV-wind with MATLAB/SIMULINK, 9th International Renewable Energy Congress (IREC), Hammamet, Tunisia
- Alsumiri, M., (2019), Residual Incremental Conductance Based Nonparametric MPPT Control for Solar Photovoltaic Energy Conversion System, *IEEE Access*, 7, 87901-87906
- Aquib, M. and Jain, S., (2018), A Fast Global Maximum Power Point Tracking Technique for Partially Shaded PV Arrays, 2018 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS), Bhopal, India
- Cardoso, R. de B., da Silva, E. R. C. and Fernandes, D. A., (2019), Multilevel-Boost-Converter-Neutral-Point-Clamped-Inverter Photovoltaic System with MPPT Based on Fibonacci Search, 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Baltimore, USA
- Chepp, E.D., and Krenzinger, A. (2021), A methodology for prediction and assessment of

- shading condition, ISA transactions, 128(A), 606-623
- تودجی، ح، (۱۳۹۷)، استفاده از اینورتر چندسطحی با کنترل‌کننده غیرخطی مستقیم برای اتصال مزرعه خورشیدی به شبکه، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال پانزدهم، شماره اول، صص ۶۵-۷۴
- دهقان زاده، ا، فراهانی، غ، رجبی مشهدی، م، (۱۳۹۸) شبیه سازی جامع مدل دو دیود سلول های خورشیدی در محیط SimPowerSystems به صورت توابع صریح ریاضی، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال شانزدهم، شماره دوم، صص ۷۷-۸۶
- عباسی، س، قدیمی، ع، ا، ابوالمعصومی، ا، ح، (۱۳۹۵)، حذف نوسانات توان اکتیو تزریقی سیستم فتوولتاییک متصل به شبکه در شرایط افت ولتاژ، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، (۲) ۴۶، صص ۱۴۹-۱۵۸
- International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Paris, France
- Mohapatra, A., Nayak, B., Saiprakash, C., (2019), Adaptive perturb & observe MPPT for PV system with experimental validation, 2019 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies and Systems (ICSETS), Bhubaneswar, India
- Nansur, A. R., Syah Laili Hermawan A., and Murdianto, F. D., (2018), Constant Voltage Control Using Fuzzy Logic Controller (FLC) to Overcome The Unstable Output Voltage of MPPT in DC Microgrid System, 2018 International Electronics Symposium on Engineering Technology and Applications (IES-ETA), Bali, Indonesia
- Nema, S., Nema, R., Agnihotri, G., (2010), MATLAB/Simulink based study of photovoltaic cells / modules / array and their experimental verification, International journal of Energy and Environment, 1(3), 487-500
- Nemours, J. A. and Chowdhury, S., (2019), Performance Analysis of Fuzzy Logic Maximum Power Point Tracking Scheme for Solar PV System Under Varying Load and Atmospheric Conditions, 2019 IEEE PES/IAS PowerAfrica, Abuja, Nigeria
- Nguyen, T. L. and Low, K., (2010), A Global Maximum Power Point Tracking Scheme Employing DIRECT Search Algorithm for Photovoltaic Systems, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 57(10), 3456-3467
- Nguyen, D. and Lehman, B., (2008), An Adaptive Solar Photovoltaic Array Using Model-Based Reconfiguration Algorithm, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55(7), 2644-2654
- Özgenç, B. and Altaş, İ. H., (2019), Implementation of A New Maximum Power Point Tracking Algorithm for partially shaded PV Systems, 7th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair (ICSG), Istanbul, Turkey
- Pandey, A., Dasgupta, N., and Mukerjee A. K., (2007), A Simple Single-Sensor MPPT Solution, IEEE Transactions on Power Electronics, 22(2), 698-700
- Podder, A. K., Roy, N. K., Pota, H. R., (2019), MPPT methods for solar PV systems: a critical review based on tracking nature, IET Renewable Power Generation, 13(10), 1615-1632
- Shekipour S., Ghadimi A. A., Mirzaei, A., (2021), Sensor-less control and optimal energy management algorithm for a stand-alone photovoltaic system considering partial