

یک روش جدید برای تعیین و ردیابی نقطه حداکثر توان آرایه خورشیدی

سید محمد مهدی حاج سید ابوترابی^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ محمد سروی^۲، دانشیار

۱- دانشکده فنی مهندسی- دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) - قزوین- ایران - m.aboutorabi@edu.ikiu.ac.ir

۲- دانشکده فنی مهندسی- دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) - قزوین- ایران - sarvi@eng.ikiu.ac.ir

چکیده: توان خروجی آرایه‌های خورشیدی به دما و شدت تابش وابسته است. آرایه‌های خورشیدی دارای بازده پایینی هستند. برای افزایش بازده سیستم فتوولتائیک، ردیابی نقطه حداکثر توان آرایه‌های خورشیدی مورد نیاز است. از طرفی پدیده‌های نامتعرفی مانند ابرها، بر روی آرایه‌های خورشیدی سایه جزئی ایجاد می‌کنند که در این شرایط منحنی ولتاژ-توان آن‌ها چندین نقطه بیشینه محلی دارد. روش‌های ردیابی معمولی به دلیل تمایل به هم‌گرایی در نقطه حداکثر توان محلی، مناسب شرایط سایه جزئی نیستند؛ بنابراین در این مقاله، یک روش جدید ردیابی نقطه حداکثر توان با قابلیت ردیابی نقطه حداکثر توان سراسری ارائه می‌شود. روش ارائه شده توسط میکروکنترلر STM32F407VGT6 به همراه مبدل DC به DC از نوع باک پیاده‌سازی می‌شود. مدارهایی برای اندازه‌گیری دما و تابش ارائه می‌گردند. همچنین مقایسه‌ای بین روش پیشنهادی و روش P&O برای بررسی کارایی روش پیشنهادی انجام می‌شود. نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی صحت روش پیشنهادی را تأیید می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم هوشمند، ردیابی نقطه حداکثر توان، فتوولتائیک، مبدل DC به DC.

A new method for solar array maximum power point determining and tracking

S. M. Haj Seyed Aboutorabi¹, MSc Student; M. Sarvi², Associate Professor

1- Faculty of Electrical Engineering, Imam khomeini international university, Qazvin, Iran, Email: m.aboutorabi@edu.ikiu.ac.ir

2- Faculty of Electrical Engineering, Imam khomeini international university, Qazvin, Email: sarvi@eng.ikiu.ac.ir

Abstract: The output power of solar arrays is dependent on temperature and light intensity. Solar arrays have low efficiency. To increase the efficiency of photovoltaic systems, the solar array maximum power point tracking is required. The exotic phenomena like clouds, on the solar arrays will provide partial shade in these conditions and voltage curve can be several local maximum points. Conventional methods because they tend to track the maximum power point of the local convergence are not appropriate in partial shade condition. So in this paper, a new method of the maximum power point tracking with the ability to track the global maximum power point is provided. The proposed method is implemented by the microcontroller STM32F407VGT6 and DC/DC buck converter. The circuits are presented to measure temperature and irradiation. Also a comparison between the proposed method and the method of P&O to verify the performance of the proposed method is done. The experimental and simulation results confirm the accuracy of the proposed method.

Keywords: Intelligent algorithm, maximum power point tracking, photovoltaic, DC/DC converters.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۰۷

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۲۲، ۱۳۹۶/۰۸/۱۹ و ۱۳۹۶/۱۰/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۲۲

نام نویسنده مسئول: محمد سروی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - قزوین - دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) - دانشکده فنی مهندسی

۱- مقدمه

امروزه، انرژی تولیدشده توسط خورشید، یکی از منابع جایگزین انرژی برای مواجه شدن با چالش‌های جدید در زمینه سوخت‌های فسیلی می باشد. یکی از برترین تکنولوژی‌های مورداستفاده در تولید برق از طریق انرژی خورشیدی، فتوولتائیک است. اما بازده کم، خاصیت غیرخطی آرایه فتوولتائیک و وابستگی به سطح تابش و دما و قرارگیری در سایه مشکلاتی را در استخراج حداکثر توان از آن‌ها ایجاد کرده است [۱، ۲]. سایه ممکن است به‌طور یک‌نواخت بر روی کل سطح پنل و یا فقط بر روی بخشی از آن اتفاق بیفتد که می‌تواند تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر توان خروجی آن داشته باشد. تحت شرایط تابش یک‌نواخت مشخصه الکتریکی غیرخطی آرایه‌های فتوولتائیک فقط یک نقطه حداکثر توان دارد، ولی در شرایط سایه جزئی منحنی دارای چندین نقطه حداکثر توان می‌باشد که به‌غیر از نقطه بیشینه سراسری، بقیه نقاط به‌صورت محلی می‌باشند [۳، ۴].

به‌منظور استخراج توان حداکثر از سیستم فتوولتائیک به‌طور معمول از ردیابی نقطه حداکثر توان (MPPT) به‌همراه مبدل الکترونیک قدرت (مبدل DC به DC و یا اینورتر) استفاده می‌شود [۵]. روش‌های معمولی مانند آشفتن و مشاهده کردن (P&O) [۶]، تپه نوردی (HC) [۷] و هدایت افزایشی (INC) [۸] به‌دلیل تمایل به هم‌گرایی در نقطه حداکثر توان محلی (LMP)، مناسب شرایط سایه جزئی نیستند. بنابراین با توجه به عملکرد نامناسب این روش‌ها در ردیابی نقطه حداکثر توان سراسری (GMP)، استفاده از روش‌های جایگزین ضروری می‌باشد.

در [۹] با ترکیب الگوریتم اغتشاش و مشاهده و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، نقطه حداکثر توان سیستم فتوولتائیک را در شرایط سایه جزئی ردیابی کرده است. ابتدا روش P&O برای شناسایی نزدیک‌ترین نقطه حداکثر محلی انتخاب شده است، سپس از آن نقطه برای جستجوی GMP، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) مورداستفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله سه حالت مختلف تابش مورد ارزیابی قرار گرفته است، ابتدا فرض شده است که تابش یک‌نواخت می‌باشد، در این حالت با استفاده از کنترلر DSP-TMS320F28035 در مدت زمان ۶/۵۹ ثانیه نقطه حداکثر توان ردیابی شده است. در حالت دوم با قرار گرفتن نقطه حداکثر توان در سمت راست منحنی مشخصه توان-ولتاژ، ردیابی در زمان ۹/۶۹ ثانیه انجام شده است و در حالت سوم، طی زمان ۷/۴۵ ثانیه به نقطه حداکثر توان که در سمت چپ منحنی مشخصه است، می‌رسد.

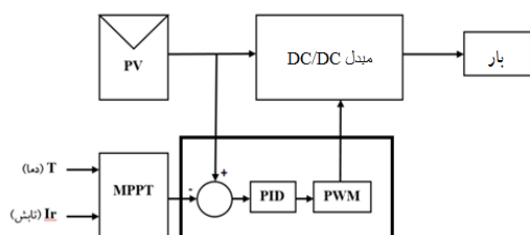
در [۱۰] دو نوع الگوی تابش را مورد بررسی قرار داده است. با استفاده از شبیه‌سازی در حالت یک، الگوریتم مورداستفاده در زمان ۴/۲۴۲ ثانیه به نقطه حداکثر توان هم‌گرا شده است و بعد از ۲۰ ثانیه که تابش به الگوی دوم تغییر می‌کند ردیابی در مدت ۵/۶۵ ثانیه انجام می‌شود. در حالت پیاده‌سازی با استفاده از میکروکنترلر PIC16F876A ردیابی نقطه حداکثر توان توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی کلونی زنبور عسل (ABC) و PSO به‌ترتیب در زمان‌های ۵/۰۱ و ۹/۲۹ ثانیه انجام شده است. در

[۱۱] با بهره‌گیری از الگوریتم PSO، نقطه حداکثر توان تحت شرایط سایه جزئی ردیابی شده است. سیستم فتوولتائیک مورد بررسی شامل مبدل DC به DC، پنل خورشیدی، میکروکنترلر و بار مقاومتی است. زمان اجرای الگوریتم و ردیابی MPP در آن ۱/۴ ثانیه می‌باشد. باتوجه به اینکه در شرایط سایه جزئی، منحنی توان-ولتاژ آرایه خورشیدی دارای چند قله می‌شود و جهت ردیابی نقطه GMP توسط الگوریتم‌های معمولی و همچنین الگوریتم‌های هوشمند متعارف، زمان زیادی لازم است. لذا ارائه یک روش برای کاهش زمان همراه با دقت مناسب برای ردیابی نقطه GMP ضروری به نظر می‌رسد.

در این مقاله، حداکثر توان سیستم فتوولتائیک در شرایط سایه جزئی با استفاده از روش پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم هوشمند، ردیابی می‌شود. برای صحت عمل کرد روش پیشنهادی، پیاده‌سازی عملی سیستم خورشیدی با استفاده از میکروکنترلر STM32F407VGT6 انجام شده است. همچنین از روش P&O جهت مقایسه ردیابی نقطه حداکثر توان با روش پیشنهادی نیز استفاده شده است. بقیه این مقاله به این صورت مرتب شده است. سیستم فتوولتائیک در بخش ۲ به‌طور خلاصه شرح داده شده است. در بخش ۳ شرایط سایه جزئی بیان شده است. روش پیشنهادی در بخش ۴ به‌طور کامل ارائه می‌گردد. سپس نتایج حاصل از شبیه‌سازی و پیاده‌سازی در بخش ۵ شرح داده می‌شود. سرانجام نتیجه‌گیری در بخش ۶ ارائه می‌شود.

۲- سیستم فتوولتائیک

بلوک دیاگرام سیستم فتوولتائیک مورد بررسی در شکل ۱ نشان داده شده است، بار سیستم مقاومتی می‌باشد و از مبدل DC به DC نوع کاهنده (باک) استفاده شده است.

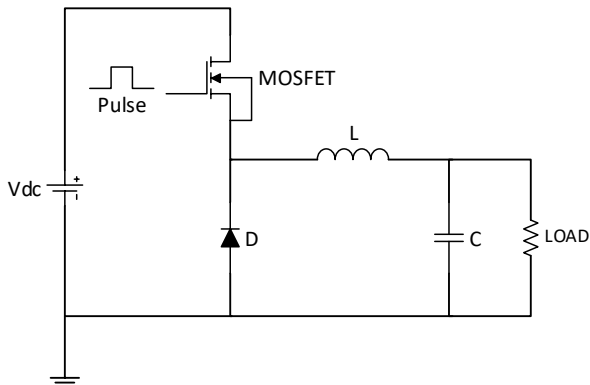


شکل ۱: بلوک دیاگرام سیستم فتوولتائیک

۲-۱- مدل‌سازی پنل فتوولتائیک

هر پنل فتوولتائیک دارای تعدادی پارامتر مهم است که مشخصات فنی آن را توصیف می‌کنند، معمولاً مشخصات فنی به‌ازای شرایط استاندارد ارائه می‌شود. مدل‌سازی پنل خورشیدی برای شناسایی مشخصه آن تحت شدت تابش مختلف نور خورشید و دماهای متفاوت مفید می‌باشد. شکل ۲ مدار معادل پنل فتوولتائیک را نشان می‌دهد، معادله ریاضی مشخصه پنل فتوولتائیک به‌صورت رابطه (۱) است [۱۲، ۱۳].

به منظور ردیابی نقطه حداکثر توان در سلول‌های خورشیدی مقدار دیوتی سایکل باید به طور مناسب تنظیم گردد.



شکل ۳: مبدل DC به DC نوع باک

معادلات (۵) و (۶) به ترتیب نحوه محاسبه مقادیر سلف (L) و خازن خروجی (C_{out}) را مشخص می‌نمایند.

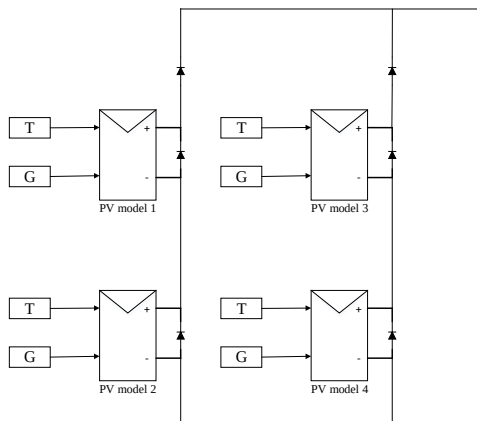
$$L = (V_{in} - V_{out}) \frac{D}{f_{sw} \cdot I_{ripple}} \quad (۵)$$

$$C_{out} = \frac{\Delta I \cdot D}{f_{sw} (\Delta V - \Delta I \cdot ESR)} \quad (۶)$$

در روابط فوق، f_{sw} فرکانس کلیدزنی و ESR اثر مقاومت سری خازن می‌باشد.

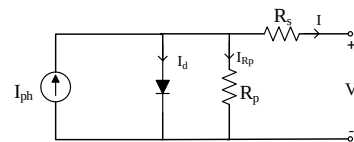
۳- شرایط سایه جزئی

پیکره‌بندی پنل‌های فتوولتائیک در شرایط سایه جزئی مانند شکل ۴ در نظر گرفته شده‌است.



شکل ۴: پیکره‌بندی پنل‌های فتوولتائیک در شرایط سایه جزئی

وجود ساختمان‌ها، درختان و حرکت ابرها از عوامل ایجاد سایه هستند. تحت شرایط سایه جزئی سلول‌های قرار گرفته شده در سایه در بایاس معکوس قرار خواهند گرفت و مانند یک بار عمل خواهند کرد. برای اجتناب از آن از دیودهای بای‌پس استفاده می‌شود، عملاً کاربرد این دیودها برای هدایت جریان تولیدی پنل‌های خورشیدی که در معرض تابش قرار گرفته‌اند، است [۱۸]. بنابراین پدیده چندقله‌ای در شرایط سایه جزئی به دلیل عملکرد دیودهای بای‌پس متصل شده به صورت موازی با



شکل ۲: مدل تک‌دیودی سلول خورشیدی

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + R_s I}{V_{ta}} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (۱)$$

$$I_{ph} = (I_{ph,n} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_{STC}} \quad (۲)$$

$$I_0 = \frac{I_{sc,n} + K_I \Delta T}{\exp \left(\frac{V_{oc,n} + K_V \Delta T}{V_{ta}} \right) - 1} \quad (۳)$$

در روابط فوق I_{ph,n} جریان تولید شده توسط سلول خورشیدی تحت شرایط نامی (T=25°C, G=1000W/m²) برحسب آمپر، ΔT اختلاف دمای سلول و اسمی آن، G و G_n به ترتیب شدت تابش واقعی و نامی، K_V نسبت ولتاژ مدار باز به ضریب حرارتی، K_I نسبت جریان اتصال کوتاه به ضریب حرارتی، I₀، جریان اشباع دیود، a ضریب ایده‌آلی دیود، k ثابت بولتزمن (۱/۳۸۰۶۵۰۳e^{-۲۳})، q بار الکتریکی یک الکترون (۱/۶۰۲۱۷۶۴۶e^{-۱۹} T دمای سلول برحسب کلوین می‌باشد).

کاهش بازدهی سلول بر اثر انعکاس نور خورشید از سطح سلول با مقاومت R_s و تلفات ناشی از جریان نشستی با مقاومت R_p مدل می‌شود. مقادیر این مقاومت‌ها با استفاده از روش تکرار محاسبه می‌شوند، در [۱۴] روش تعیین R_s و R_p شرح داده شده‌است. پس از مشخص شدن این مقادیر با تنظیم آن‌ها می‌توان منحنی مشخصه‌های سلول خورشیدی مدل شده را با سلول خورشیدی واقعی تطبیق داد. اندازه R_s مقدار کوچکی است (معمولاً کمتر از یک اهم) و اندازه R_p در مقایسه با R_s مقدار بزرگ‌تری است.

۲-۲- مبدل باک

برای این‌که بتوان حداکثر توان را از سلول خورشیدی به بار انتقال داد، نیاز به مبدل است. یکی از مهم‌ترین ویژگی مبدل‌های DC/DC در سیستم‌های فتوولتائیک آن است که جریان کشیده شده از پانل پالسی شکل نمی‌شود. [۱۵] یکی از مبدل‌های مورد استفاده در سیستم‌های فتوولتائیک، مبدل باک می‌باشد. سادگی، کارایی بالا و کم حجم بودن از مزایای این نوع مبدل می‌باشد. [۱۶] شکل ۳ مبدل باک معمولی را نشان می‌دهد [۱۷].

رابطه بین ولتاژ ورودی (V_{in}) و خروجی (V_{out}) مبدل باک به صورت رابطه (۴) است.

$$V_{out} = D \cdot V_{in} = \frac{t_{on}}{T_s} \cdot V_{in} \quad (۴)$$

در رابطه (۴) D دیوتی سایکل مبدل می‌باشد که مقدار آن بین صفر تا یک است، لذا ولتاژ خروجی در مبدل باک کمتر از ولتاژ ورودی آن است.

در رشته برای محاسبه $V_{mp2,S}$ از رابطه (۱۰) استفاده می‌شود. $V_{end,s}$ از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$V_{end,s} = V_t - \ln \left(\frac{I_{ph,s} + I_o - I_{s,s}}{I_o} \right) - I_{s,s} \times R_s - V_d \quad (11)$$

$I_{s,s}$ از معادله زیر به دست می‌آید.

$$I_{s,s} = I_{ph,sh} + \left(\frac{V_{mp1,s}}{R_p} \right) \quad (12)$$

در رابطه (۱۰)، $V_{mp2,S}$ به دست آمده توسط الگوریتم هوشمند، باتوجه به اختلاف تابش، از طریق روابط شرح داده شده در زیر محاسبه می‌شود:

- اگر اختلاف تابش کمتر از ۱۵۰ باشد در این صورت $V_{mp2,S}$ با استفاده از رابطه (۱۳) به دست می‌آید.

$$V_{mp2,s} = (-0.000625 \times (\Delta G_s - 100) + 1.055) \times V_{mp2,s} \quad (13)$$

- اگر چنانچه اختلاف تابش در محدوده بین ۱۵۰ تا ۲۵۰ باشد، $V_{mp2,S}$ با استفاده از رابطه (۱۴) محاسبه می‌گردد.

$$V_{mp2,s} = (-0.00025 \times (\Delta G_s - 150) + 1.027) \times V_{mp2,s} \quad (14)$$

- در صورتی که اختلاف تابش بیشتر از ۲۵۰ باشد، مقدار $V_{mp2,S}$ بدون تغییر باقی می‌ماند.

برای محاسبه نقطه حداکثر توان در رشته شامل پنل‌های سری، با مقایسه مقدار توان در دو نقطه (قله)، به این صورت رفتار می‌شود که اگر توان حاصل در هر کدام از نقاط بزرگ‌تر باشد ولتاژ معادل آن به عنوان نقطه بیشینه توان لحاظ می‌گردد. مراحل فوق برای رشته‌های بعدی تکرار خواهد شد. برای انتخاب نقطه حداکثر توان آرایه فتوولتائیک که شامل رشته‌های موازی می‌باشد به صورت زیر عمل می‌شود.

مجموع توان نقاط ۱ و ۲ هر کدام به طور مجزا محاسبه می‌گردد و جهت انتخاب نقطه حداکثر توان باهم مقایسه می‌شوند که ممکن است یکی از حالت‌های زیر به وجود آید:

- اگر مجموع توان در نقطه ۱ از مجموع توان در نقطه ۲ بزرگ‌تر باشد، نقطه حداکثر توان از میانگین مقدار نقاط حداکثر توان در نقطه ۱ رشته‌ها محاسبه می‌گردد. به عنوان مثال در صورتی که یک آرایه فتوولتائیک شامل دو رشته باشد از رابطه (۱۵) به دست می‌آید:

$$V_{mp} = \frac{V_{mp1,S1} + V_{mp2,S2}}{2} \quad (15)$$

- برعکس حالت قبل، چنانچه مجموع توان در نقطه ۱ از مجموع توان در نقطه ۲ کوچک‌تر باشد، نقطه حداکثر توان با استفاده از رابطه (۱۶) محاسبه می‌گردد:

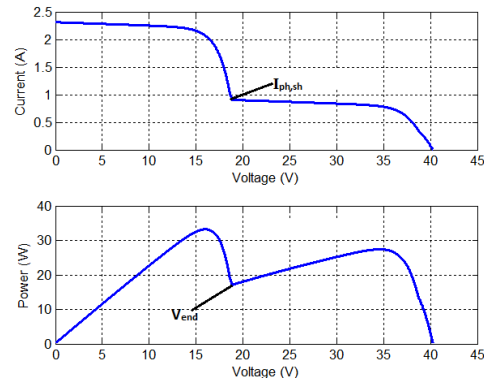
$$V_{mp} = \frac{(V_{mp1,S1} \times y) + V_{mp2,S2}}{2} \quad (16)$$

که در آن ضریب y طبق رابطه زیر تعیین می‌گردد.

$$y = 0.002597523736609 \Delta V^2 + 0.004697192010536 \Delta V + 0.991852380756291 \quad (17)$$

سلول‌ها در ماژول‌های فتوولتائیک است. شکل ۵ منحنی‌های جریان-ولتاژ و توان-ولتاژ، آرایه خورشیدی را تحت شرایط سایه جزئی نشان می‌دهد.

$$V_{mp2,s} = V_{end,s} - V_{mp2,s} - V_d \quad (10)$$



شکل ۵: منحنی مشخصه آرایه فتوولتائیک در شرایط سایه جزئی تحت تابش‌های مختلف

۴- روش پیشنهادی

فلوچارت ردیابی نقطه حداکثر توان در شرایط سایه جزئی در شکل ۶ ارائه گردیده است. در ابتدا میزان تابش و دمای موجود بر روی سطح هر یک از پنل‌های خورشیدی اندازه‌گیری می‌شود. حداقل و حداکثر میزان تابش و اختلاف آن‌ها برای هر یک از رشته‌ها، محاسبه می‌گردد و همچنین اختلاف تابش بین پنل‌های با تابش بیشتر در هر رشته نیز مشخص می‌شود و اندازه تابش پنلی که دارای بیشترین تابش را دارد ذخیره می‌گردد.

اگر میزان تابش بر روی هر یک از پنل‌ها یکسان باشد، در این صورت آرایه فتوولتائیک دارای یک نقطه حداکثر توان است که می‌توان آن را با استفاده از رابطه (۷) محاسبه نمود.

$$V_{mp,s} = (V_{mp1,S1} \times 2) - V_d \quad (7)$$

در صورتی که اندازه تابش‌ها یکسان نباشد، منحنی‌های آرایه فتوولتائیک مانند شکل ۵ دارای چند قله می‌شود که در این حالت ابتدا نقطه حداکثر توان مربوط به پنل خورشیدی دارای تابش بیشتر واقع در هر یک از رشته‌ها توسط یکی از الگوریتم‌های هوشمند به دست می‌آید. همچنین حداکثر جریان تولیدی همان پنل را به‌ازای تابش اندازه‌گیری شده با استفاده از رابطه (۸) می‌توان محاسبه نمود.

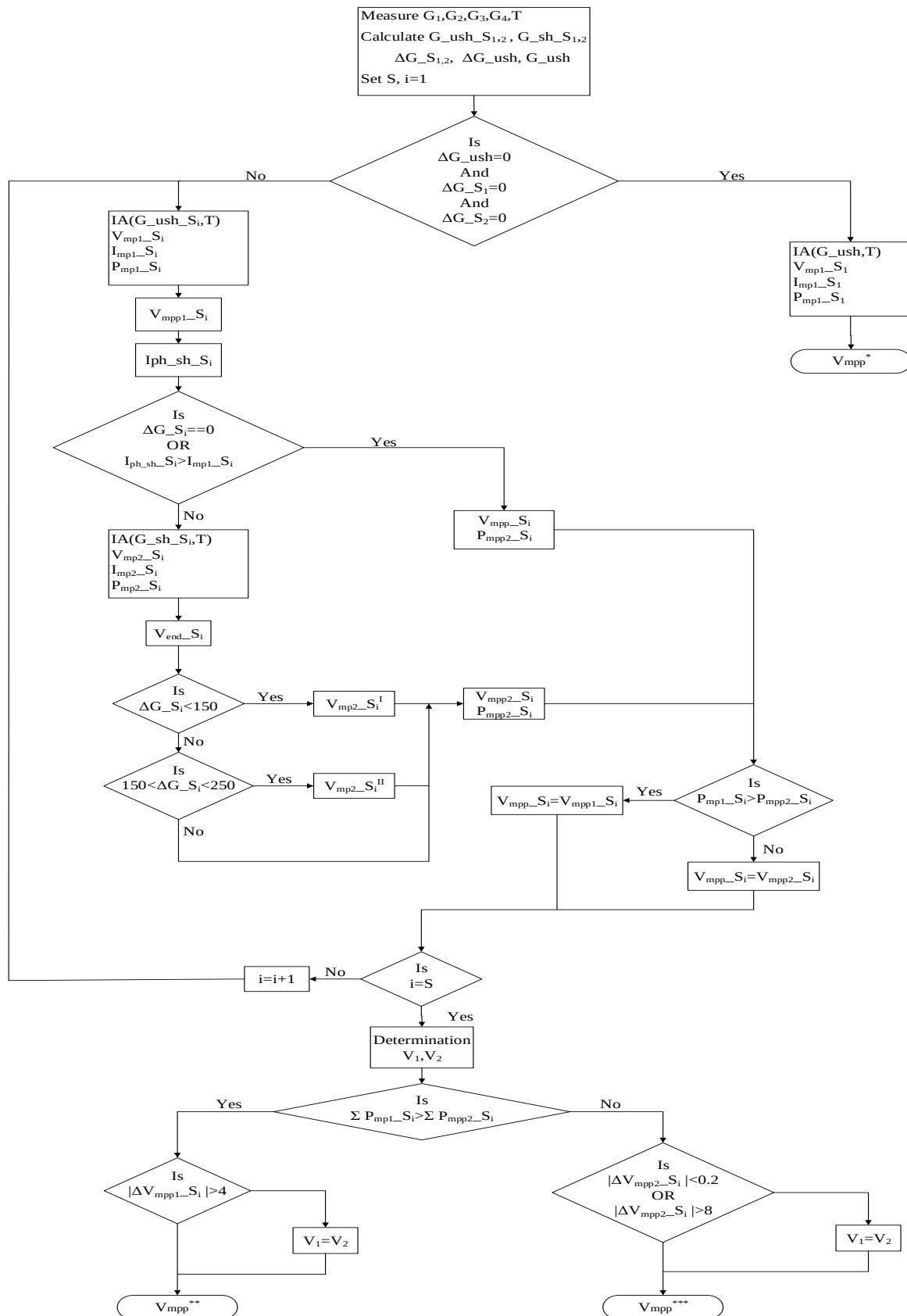
$$I_{ph_sh} = \frac{G_{sh}}{1000} \times I_{ph,n} \quad (8)$$

حال اگر این جریان از جریان نقطه حداکثر توان بزرگ‌تر بود و یا اختلاف تابش در آن رشته وجود نداشت رابطه (۹) برقرار می‌باشد.

$$V_{mp2,s} = (V_{mp1,S} \times 2) - V_d \quad (9)$$

در صورتی که شرایط فوق برقرار نباشد، نقطه حداکثر توان ($V_{mp2,S}$) مربوط به پنلی که کمترین میزان تابش را در رشته دارد، توسط همان الگوریتم هوشمند به دست می‌آید. در اینجا باتوجه به اختلاف تابش موجود

در رابطه (۱۷) اختلاف ولتاژ بین V_{mpp2} رشته ۱ و ۲ می باشد. با محاسبه میانگین مقدار نقاط حداکثر توان در نقطه ۲ رشته ها به دست چنانچه تعداد رشته ها بزرگتر از ۲ باشد، نقطه حداکثر توان را می توان آورد.



شکل ۶: فلوچارت ردیابی نقطه حداکثر توان در شرایط سایه جزئی

۵-۲- پیاده‌سازی سیستم فتوولتائیک

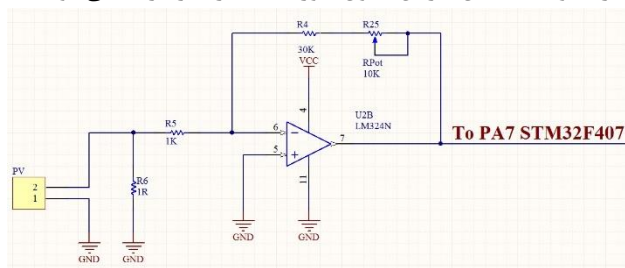
الف- مدار اندازه‌گیری تابش

یکی از پارامترهای موردنیاز برای ردیابی نقطه حداکثر توان پنل‌های فتوولتائیک توسط الگوریتم‌های هوشمند میزان تابش سطح آن‌ها می‌باشد. جهت اندازه‌گیری تابش از جریان اتصال کوتاه پنل خورشیدی استفاده شده‌است، با اندازه‌گیری جریان اتصال کوتاه و قراردادن آن در رابطه (۱۸) می‌توان تابش را محاسبه نمود.

$$G = \frac{G_0 \cdot I_{SC}}{I_{SC,n}} \quad (18)$$

باتوجه‌به اینکه نمی‌توان پنل خورشیدی اصلی (تولیدکننده توان) را اتصال کوتاه نمود لذا برای اندازه‌گیری تابش از یک سلول خورشیدی کوچک که در کنار پنل خورشیدی اصلی تعبیه شده‌است بهره برده می‌شود. از آنجایی که مشخصات این سلول خورشیدی در دسترس نیست با مقایسه نمودن آن با مشخصات فنی پنل خورشیدی اصلی که توسط سازنده ارائه شده‌است می‌توان مشخصات سلول خورشیدی کوچک را به دست آورد.

شکل ۹ مدار مربوط به اندازه‌گیری تابش را نشان می‌دهد. در این مدار جهت اندازه‌گیری جریان سلول فتوولتائیک، خروجی آن با مقاومت یک اهم، به صورت موازی قرار می‌گیرد که باتوجه‌به قانون اهم ولتاژ دو سر مقاومت، معادل جریان سلول خورشیدی در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۹: مدار اندازه‌گیری تابش

باتوجه‌به اینکه اندازه ولتاژ دو سر مقاومت کم می‌باشد لذا برای افزایش دقت مبدل آنالوگ به دیجیتال، این ولتاژ بایستی تقویت گردد. استفاده از تقویت‌کننده‌های آپ-آپ برای این امر مناسب می‌باشد. خروجی این مدار برای پردازش و تبدیل آن به عدد دیجیتال به میکروکنترلر اعمال می‌گردد.

مبدل آنالوگ به دیجیتال استفاده شده در این مرحله به صورت ۱۲ بیتی پیکره‌بندی شده‌است و حداقل ولتاژ قابل اندازه‌گیری حدود ۷۲۲ میکرو ولت $(\frac{2.96}{2^{12}})$ می‌باشد. با توجه به این موضوع، تابش با پله‌های 10 W/m^2 اندازه‌گیری می‌شود.

ب- مدار اندازه‌گیری دما

باتوجه‌به معادلات مدار معادل سلول فتوولتائیک، دما یکی از پارامترهای اساسی می‌باشد. برای اندازه‌گیری دمای محیط (روی سطح پنل خورشیدی) می‌توان از سنسور LM35 استفاده نمود. یکی از قابلیت‌های

۵- نتایج شبیه‌سازی و پیاده‌سازی

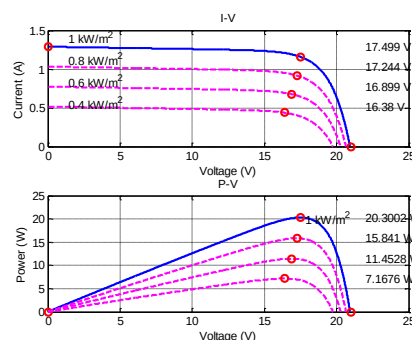
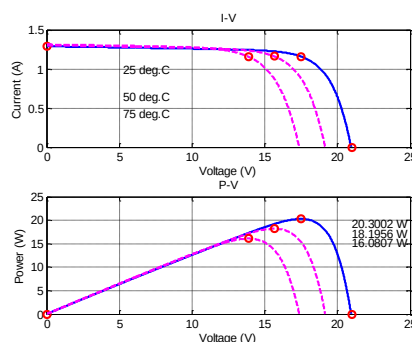
۵-۱- شبیه‌سازی پنل خورشیدی

پنل خورشیدی مورد شبیه‌سازی محصول شرکت برق آفتابی هدایت نور یزد دارای مشخصات الکتریکی ارائه شده در جدول ۱ می‌باشد. این مشخصات توسط سازنده تحت شرایط $I_r=1000 \text{ W/m}^2$, $AM=1/5$ و $T=25^\circ\text{C}$ ارائه شده‌است.

جدول ۱: مشخصات پنل خورشیدی

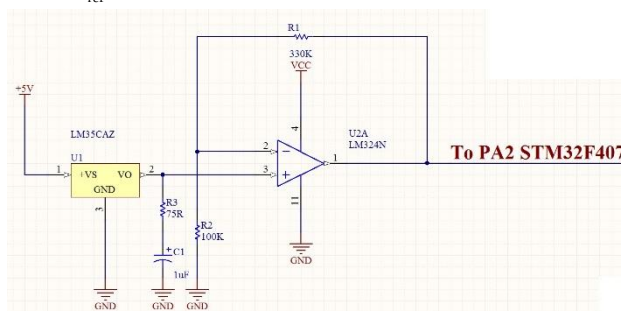
پارامتر	مقدار
I_{mp}	$1/16 \text{ A}$
V_{mp}	$17/5 \text{ V}$
P_{max}	20 W
I_{SC}	$1/29 \text{ A}$
V_{OC}	21 V
K_V	-0.34 V/K
K_I	$+0.37 \text{ A/K}$
N_S	۳۶

ابتدا مقادیر R_p و R_s برای پنل خورشیدی توسط روش مذکور به ترتیب $295/41$ و 0.08 اهم محاسبه گردید. جهت تطبیق منحنی مشخصه پنل واقعی و شبیه‌سازی شده آن R_p برابر $329/36$ اهم و R_s معادل 0.09 اهم در نظر گرفته می‌شود. شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب، منحنی مشخصه‌های $I-V$ و $P-V$ را در دمای 25°C و تابش‌های مختلف و منحنی مشخصه‌های $I-V$ و $P-V$ به ازای تابش 1000 W/m^2 و دماهای مختلف را نشان می‌دهند.

شکل ۷: منحنی مشخصه‌های $I-V$ و $P-V$ پنل خورشیدی در دمای 25°C شکل ۸: منحنی مشخصه‌های $I-V$ و $P-V$ پنل خورشیدی در تابش 1000 W/m^2

مهم این سنسور تبدیل خطی دما به ولتاژ می‌باشد. مدار مربوط به اندازه‌گیری دما در شکل ۱۰ ترسیم شده‌است. استفاده از تقویت‌کننده عملیاتی در این مدار جهت افزایش دقت مبدل آنالوگ به دیجیتال می‌باشد. عدد دیجیتال تولیدشده توسط مبدل آنالوگ به دیجیتال ۱۲ بیتی توسط رابطه (۱۹) محاسبه می‌گردد.

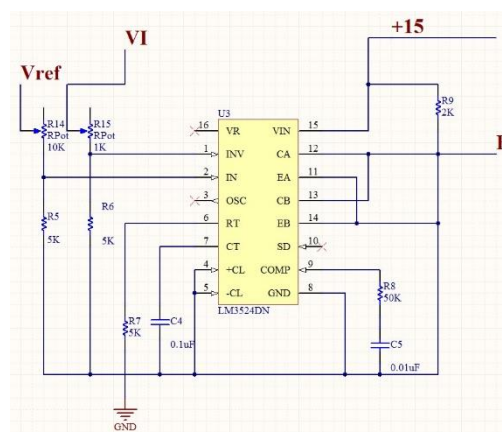
$$D = \frac{V_{in}}{V_{ref}} \times 2^{12} \quad (19)$$



در رابطه (۱۹) V_{in} ولتاژ خروجی مدار دماسنج و یا ورودی مبدل آنالوگ به دیجیتال می‌باشد، V_{ref} ولتاژ مرجع، مربوط به میکروکنترلر و D عدد دیجیتال حاصل از تبدیل است. عدد تولیدشده از رابطه فوق معادل دمای واقعی نمی‌باشد، بلکه جهت دستیابی به دمای واقعی محیط لازم است که این عدد در ضریب، ضرب گردد.

جهت تولید سیگنال PWM از تراشه LM3524DN استفاده شده است، مدار آن در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

الگوریتم ردیابی نقطه حداکثر توان (MPPT) توسط میکروکنترلر ۳۲ بیتی STM32F407 پیاده‌سازی شده‌است. حداکثر فرکانس کاری آن ۱۶۸ مگاهرتز می‌باشد و از کامپایلر KEIL جهت برنامه‌نویسی آن استفاده شده‌است.



G_ush_s1=1000 W/m²
G_sh_s1=500 W/m²
DeltaG_s1=500 W/m²

$$\begin{aligned} G_{ush_s2} &= 800 \text{ W/m}^2 \\ G_{sh_s2} &= 200 \text{ W/m}^2 \\ \Delta G_{s2} &= 600 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$
$$\Delta G_{ush} = 200 \text{ W/m}^2$$

G_ush_s1=1000 W/m²
Vmp1_s1=17.4969 V
Imp1_s1=1.1602 A
Pmp1_s1=18.6763 W
Vmpp1_s1=16.0969 V

Iph sh s1=0.64502 A

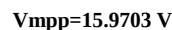
G_{sh_s1}=500 W/m²
V_{mp2_s1}=16.6695 V
I_{mp2_s1}=0.5576 A
P_{mp2_s1}=9.295 W

Vend_s1=19.3003 V

Vmpp2_s1=35.2697 V
Pmpp2_s1=20.3549 W

Vmpp_s1=35.2697 V

G_ush_s2=800 W/m2
Vmp1_s2=17.2438 V
Imp1_s2=0.91868 A



Serial no. 90

مراجع

- [10] K. Sundareswaran, P. Sankar, P. S. R. Nayak, S. P. Simon, and S. Palani, "Enhanced Energy Output From a PV System Under Partial Shaded Conditions Through Artificial Bee Colony," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, pp. 198-209, 2015.
- [11] A. Kar and A. Kar, "A New Maximum Power Point Tracking Algorithm for PV Modules under Partial Shading and Rapidly Varying Illumination," in *2009 Annual IEEE India Conference*, pp. 1-4, 2009.
- [12] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, "Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays," in *Power Electronics Conference, COBEP '09. Brazilian*, pp. 1244-1254, 2009.
- [13] K. Kumar, K. R. Prabhu, "Design and Analysis of RBFN-Based Single MPPT Controller for Hybrid Solar and Wind Energy System", *Photovoltaics, IEEE Journal of*, vol. 5, pp. 15308-15317, 2017
- [14] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 24, pp. 1198-1208, 2009
- [۱۵] مهدی سلیمی و مریم پرنادم، «مبدل DC-DC افزاینده جدید مینی بر کلیدزنی سلفی/خازنی با بهره ولتاژ بسیار بالا»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۷، شماره ۱، صفحات ۱۰۷-۱۲۱-۱۳۹۶
- [۱۶] محمدرضا بنائی و حسین اژدر فائقی بناب، «ارائه یک مبدل DC-DC جدید بدون ترانسفورماتور با بهره ولتاژ بهبود یافته»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۱، صفحات ۵۹-۷۱-۱۳۹۵
- [17] E. Koutroulis and F. Blaabjerg, "A New Technique for Tracking the Global Maximum Power Point of PV Arrays Operating Under Partial-Shading Conditions," *Photovoltaics, IEEE Journal of*, vol. 2, pp. 184-190, 2012.
- [18] G. N. Psarros, E. I. Batzelis, and S. A. Papathanassiou, "Partial Shading Analysis of Multistring PV Arrays and Derivation of Simplified MPP Expressions," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, pp. 499-508, 2015.
- [1] T. Esum and P. L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 439-449, 2007.
- [2] C. Kai, T. Shulin, C. Yuhua, and B. Libing, "An Improved MPPT Controller for Photovoltaic System Under Partial Shading Condition," *Sustainable Energy, IEEE Transactions on*, vol. 5, pp. 978-985, 2014.
- [3] M. A. x00E, ki, and S. Valkealahti, "Effect of Photovoltaic Generator Components on the Number of MPPs Under Partial Shading Conditions," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 28, pp. 1008-1017, 2013.
- [4] Ratul Das and K. M. Rahman, "Improved performance low-cost incremental conductance PV MPPT technique", *Electrical and Computer Engineering (ICECE) 2016 9th International Conference on*, pp. 561-574, 2016
- [5] M. Sarvi, S. Ahmadi, and S. Abdi, "A PSO-based maximum power point tracking for photovoltaic systems under environmental and partially shaded conditions," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 23, pp. 201-214, 2015.
- [6] T. Sahu, T. Dixit, and R. Kumar, "Simulation and Analysis of Perturb and Observe MPPT Algorithm for PV Using CUK Converter," *Advance in Electronic and Electric Engineering*, vol. 4, pp. 213-224, 2014.
- [7] C. A. Ramos-Paja, G. Spagnuolo, G. Petrone, M. Vitelli, and J. D. Bastidas, "A multivariable MPPT algorithm for granular control of photovoltaic systems," in *Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium on*, pp. 3433-3437, 2010.
- [8] D. Sera, L. Mathe, T. Kerekes, S. V. Spataru, and R. Teodorescu, "On the Perturb-and-Observe and Incremental Conductance MPPT Methods for PV Systems," *Photovoltaics, IEEE Journal of*, vol. 3, pp. 1070-1078, 2013.
- [9] K. L. Lian, J. H. Jhang, and I. S. Tian, "A Maximum Power Point Tracking Method Based on Perturb-and-Observe Combined With Particle Swarm Optimization," *Photovoltaics, IEEE Journal of*, vol. 4, pp. 626-633, 2014.