

ردیابی نقطه حداکثر توان آرایه‌ی فوتولتائیک در شرایط سایه جزئی با تخمین منحنی توان-ولتاژ

صبا افسری بجزستانی^۱، علی کریم پور^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه برق

۲- دانشیار و عضو هیأت علمی گروه برق

چکیده

در شرایط تابش یکنواخت می‌توان از روش‌های مرسوم ردیابی نقطه حداکثر توان استفاده نمود، در حالی‌که در شرایط سایه‌ی جزئی به دلیل وجود چندین نقطه ماکزیمم توان در مشخصه توان-ولتاژ، این روش‌ها کارا نمی‌باشد. از طرفی بکارگیری روش‌های سخت‌افزاری برای یک واحد ردیابی نقطه حداکثر توان به صورت جداگانه برای هر ماژول، بسیار هزینه‌بر می‌باشد و همچنین استفاده از روش‌های نرم‌افزاری نیز دارای معایبی از جمله ضرورت تنظیمات دوره‌ای و عدم ردیابی انواع الگوهای سایه می‌باشد. از این رو در این مقاله تلاش شده‌است با ارائه یک روش جدید ردیابی نقطه ماکزیمم جهانی، تشخیص نقطه حداکثر توان جهانی در شرایط الگوهای مختلف سایه محقق گردد و بدین ترتیب در مقایسه با روش‌های مرسوم که ممکن است در شرایط سایه جزئی نقطه حداکثر توان محلی را به عنوان نقطه کار بهینه تلقی کنند، به صورت کارا تر و با تلفات توان کمتر عمل می‌نماید. بدین منظور با بکارگیری یک سنسور تابش در هر ماژول و تعیین منحنی تقریبی توان-ولتاژ یک آرایه فوتولتائیک، ولتاژ بهینه متناظر با توان ماکزیمم جهانی معین می‌گردد و با استفاده از کنترلر تناسبی-انتگرالی تلاش می‌شود که نقطه عملکرد سیستم به این ولتاژ بهینه منتقل شود. در نهایت، نتایج شبیه‌سازی مویده کارایی روش پیشنهادی می‌باشد و نشان می‌دهد که با بکارگیری روش جدید، توان خروجی ماژول افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: سیستم فوتولتائیک- ردیابی نقطه ماکزیمم جهانی- شرایط سایه جزئی- کنترلر تناسبی-انتگرالی-روش تپه‌نوردی

۱- مقدمه

امروزه انرژی تولید شده توسط خورشید، یکی از منابع جایگزین انرژی برای مواجه شدن با هزاران چالش جدید می باشد. خورشید منبعی دائمی، رایگان، بدون آلودگی و قابل دسترس در همه نقاط کره زمین می باشد. بسیاری از کشورها به دلیل افزایش قیمت سوخت فسیلی بنابر گرم شدن کره زمین، آلودگی هوا و قوانین سخت زیست محیطی، برای تولید برق از انرژی خورشیدی استفاده کرده اند [۱]. انرژی خورشیدی یکی از نویدبخش ترین منابع تجدیدپذیر انرژی است که در حال حاضر در سراسر جهان برای کمک به برطرف کردن نیاز رو به افزایش تولید برق در حال استفاده می باشد. سریع ترین تکنولوژی در تولید برق از طریق انرژی خورشیدی، فتوولتائیک خورشیدی است. اما بازده کم، خاصیت غیرخطی آرایه‌ی فتوولتائیک و وابستگی به سطح تابش و دما مشکلاتی را در استخراج ماکزیمم توان از آن‌ها ایجاد کرده است [۲].

در میان روش‌های پیشنهادی برای پیدا کردن نقطه توان ماکزیمم (MPP¹)، برخی از آن‌ها بر روی مطالعه تغییرات ناگهانی در سطح تابش متمرکز شده اند [۱]. تفاوت بین این الگوریتم‌ها به عملکرد، سرعت همگرایی و پیچیدگی سخت‌افزاری مربوط است. روش‌های معروف ردیابی نقطه ماکزیمم توان (MPPT²)، اختلال و مشاهده (P&O³)، تپه‌نوردی (HC⁴) و روش هدایت افزایشی (inC⁵) هستند [۱]-[۳]. اما این روش‌ها، در ردیابی MPP زمانی که شرایط تابشی برای همه ماژول‌ها یکنواخت نیست و سایه رخ داده است، موفق نیستند. در این وضعیت، ماژول‌های سایه‌دار بخشی از برق تولید شده را مصرف کرده و به عنوان بار رفتار می کنند که تولید برق کل را کاهش می دهد و ممکن است مشکل نقطه داغ⁶ رخ دهد. به منظور حفاظت ماژول‌ها از مشکل نقطه داغ، یک دیود بای‌پس به طور موازی با هر یک از ماژول‌های PV متصل می شوند. اما منحنی PV در نتیجه اتصال دیود بای‌پس در شرایط سایه جزئی دارای چندین نقطه اوج می شود. بنابراین معادله مشخصه I-V آرایه PV دیگر معتبر نیست.

مرجع [۴] روش‌های MPPT را که در شرایط تابشی غیر یکنواخت و یکنواخت قابل اجرا هستند به دو گروه طبقه‌بندی می کند: الگوریتم‌های مبتنی بر نرم‌افزار [۷-۵] و الگوریتم‌های مبتنی بر سخت‌افزار [۸، ۱۰]. روش‌های مبتنی بر نرم‌افزار قله‌ی جهانی را در میان قله‌های متعدد در شرایط سایه جزئی ردیابی می کند. روش پیشنهادی در [۵]، بر اساس حرکت نقطه کار توسط یک تابع خطی در کل منحنی P-V می باشد، سپس MPPT معمولی برای ردیابی نقطه قله جهانی استفاده می شود. مرجع [۶] روش دو مرحله‌ای مبتنی بر روش P&O بر ردیابی نقطه قله جهانی پیشنهاد کرده است. این روش در ردیابی نقطه MPP، هنگامی که تفاوت بین سطح تابش ماژول‌های سایه‌دار و ماژول بدون سایه بزرگ است و تعداد ماژول‌های سایه‌دار بیشتر از ماژول‌های بدون سایه است، با مشکل مواجه می شود.

از آن‌جا که شبکه عصبی مصنوعی (ANN⁷) در مقایسه با سایر روش‌های بهینه‌سازی سیستم PV موفق تر است، برخی از

¹ maximum power point

² maximum power point tracking

³ Perturbation and Observation

⁴ Hill climbing

⁵ Incremental Conductance

⁶ Hot spot

⁷ artificial neural network

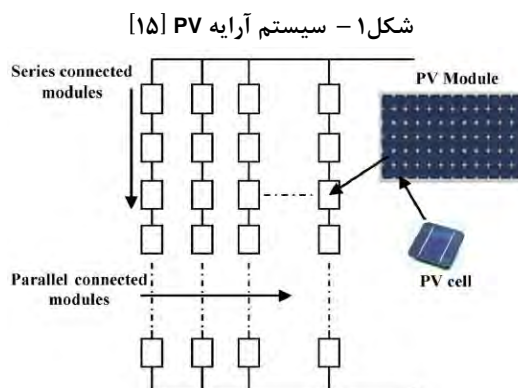
محققان از ANN برای پیدا کردن نقطه قله جهانی در میان نقاط قله‌های محلی استفاده می‌کنند [۱۱،۱۰]. این روش، عملکرد قابل قبولی تحت شرایط تابشی یکنواخت و غیر یکنواخت دارد و خطای قابل اغمازی در ردیابی ولتاژ و توان مرجع دارد، اما دقت و صحت خروجی به طور مستقیم به تعداد ورودی‌ها بستگی دارد. علاوه بر این، ANN باید زمانی که پیکربندی آرایه‌ی PV تغییر می‌کند، دوباره آموزش داده شود. مرجع [۱۲] ردیابی نقطه حداکثر توان جهانی بر اساس الگوریتم جستجوی مستقیم پیشنهاد کرده است. [۱۲] یک روش مبتنی بر بهینه‌سازی توده ذرات (PSO)^۸ را پیشنهاد کرده‌است که برخی از اشکالاتی همچون پیاده‌سازی در زمان واقعی و نوسان در اطراف MPP را کاهش می‌دهد. در میان انواع روش‌های مبتنی بر نرم‌افزار، الگوریتم جستجوی فیبوناچی معمولاً به عنوان روش MPPT استفاده می‌شود. با این حال، ردیابی در شرایط سایه‌ی جزئی با مشکل مواجه می‌شود و نیاز به یک پردازنده قدرتمند دارد. برخلاف روش‌های مبتنی بر نرم‌افزار، الگوریتم‌های مبتنی بر سخت‌افزار سعی در جلوگیری از چند قله‌ای شدن منحنی P-V (در اثر استفاده از دیود بای‌پس) در شرایط تابشی غیریکنواخت دارند. در مرجع [۷]، منحنی P-V با انتخاب یک ترکیب بهینه از نسبت وظیفه‌ها زمانی که شرایط سایه‌ی جزئی رخ می‌دهد، دارای یک MPP است. این توپولوژی از لحاظ اقتصادی به دلیل استفاده از یک سوئیچ اضافی برای هر ماژول، مقرون به صرفه نیست. در این مقاله ابتدا با استفاده از سنسور تابش به تخمین منحنی توان-ولتاژ پرداخته و از آن منحنی ولتاژ متناظر با ماکزیمم توان را یافته و این ولتاژ، به عنوان ولتاژ مرجع شناخته شده و توسط کنترلر PI، ولتاژ عملکرد به این ولتاژ انتقال می‌یابد. این مقاله به این صورت سازمان‌دهی شده‌است: بخش ۲ به رفتار آرایه‌ی فتوولتائیک تحت شرایط یکنواخت و شرایط سایه جزئی می‌پردازد. بخش ۳ آرایه‌ی فتوولتائیک را تحت شرایط سایه جزئی مدل‌سازی می‌کند. در بخش ۴ روش پیشنهادی و بلوک دیاگرام آن بیان می‌شود. در بخش ۵ نتایج شبیه‌سازی برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی ارائه می‌شود. در نهایت نتیجه‌گیری به طور خلاصه در بخش ۶ بیان می‌شود.

۲- ساختار سیستم PV

یک سیستم PV ترکیبی از آرایه‌ی خورشیدی است که این آرایه شامل ماژول‌های سری-موازی است، بطوری که ساختار اصلی در هر ماژول یک سلول خورشیدی است. توان یک سلول خورشیدی با توجه به مواد سازنده‌ی سلول خورشیدی و مساحت سطح، بین ۱ تا ۲ وات تغییر می‌کند. بنابراین برای طراحی ماژول خورشیدی، توان سلول خورشیدی اندازه‌گیری می‌شود، و سپس ماژول‌ها به صورت سری بر اساس خروجی مورد نظر متصل می‌شوند. شکل (۱) یک سیستم PV را نشان می‌دهد. به طور کلی، مشخصه‌ی الکتریکی سیستم PV با توان بر حسب ولتاژ(جریان/سیکل وظیفه) و جریان بر حسب ولتاژ ارائه می‌شود. با استفاده از مدار معادل سلول خورشیدی که در شکل (۲) نشان داده شده، مدل ریاضی جریان تولید شده در آرایه‌ی فتوولتائیک به صورت فرمول (۱) بیان می‌شود [۱۵]:

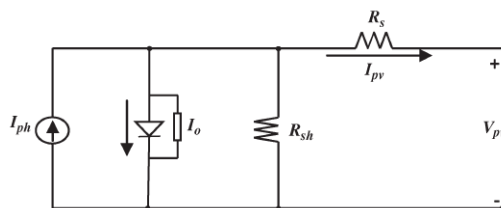
$$I_{PV} = n_p(I_p - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V_{PV} + R_s I_{PV})}{AKTn_s}\right) - 1 \right] - \frac{V_{PV} + R_s I_{PV}}{n_s R_{sh}}) \quad (1)$$

⁸ Particle Swarm Optimization



در فرمول (۱) V_{PV} و I_{PV} به ترتیب ولتاژ خروجی و جریان خروجی آرایه PV را بیان می‌کند. پارامتر R_s و R_{sh} به ترتیب مقاومت‌های سری و موازی سلول خورشیدی است. q شارژ الکترونیکی ($1.6 \times 10^{-19} C$)، پارامتر I_{ph} جریان تولید شده توسط نور، I_0 جریان اشباع معکوس، پارامتر A فاکتور ایده‌آل دیود، پارامتر k ثابت بلتزن ($1.38 \times 10^{-23} J/K$)، T دمای اتصال (به کلوین)، n_p و n_s به ترتیب تعداد سلول‌های متصل به صورت موازی و سری است [۱۵].

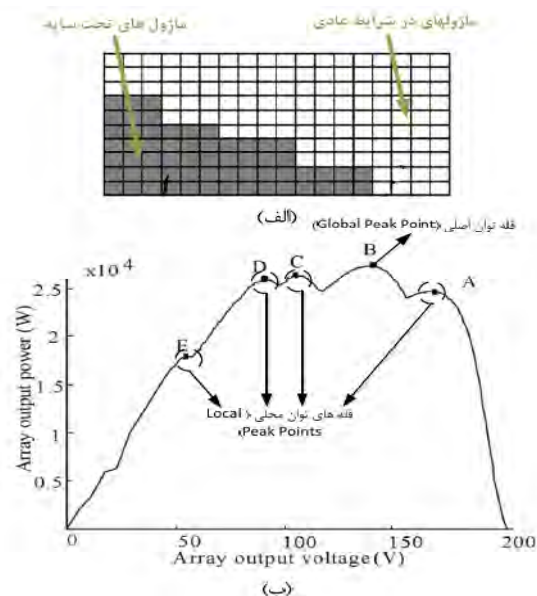
شکل ۲ - مدار معادل سلول PV



منحنی مشخصه سیستم آرایه PV به تابش و درجه حرارت سیستم PV بستگی دارد. رخداد سایه جزئی برای آرایه فتوولتائیک منجر به چندقله‌ای شدن منحنی توان-ولتاژ یا پله‌ای شدن منحنی جریان-ولتاژ می‌شود. این مسئله ردیابی نقطه توان بیشینه را دشوارتر از پیش می‌کند. در شکل (۳-الف) نمونه‌ای از آرایه‌ی خورشیدی با شرایط سایه جزئی و در شکل (۳-ب) منحنی توان-ولتاژ این آرایه است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد منحنی توان-ولتاژ چندقله‌ای شده و در بین پنج قله‌ی توان ماکزیمم بوجود آمده، تنها یکی از آن‌ها نقطه‌ی توان ماکزیمم اصلی است و سایر قله‌ها ماکزیمم محلی می‌باشند.

شکل ۳ - شرایط سایه جزئی الف) آرایه‌ی واقع در شرایط جزئی

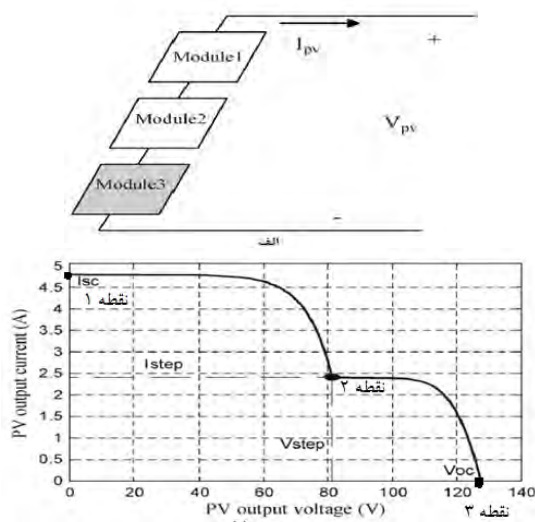
ب) منحنی توان-ولتاژ آرایه‌ی نشان داده‌شده



۳- مدل PV تحت شرایط سایه‌ی جزئی

در شرایط سایه‌ی جزئی، مدل ریاضی سیستم PV در فرمول (۱) دیگر معتبر نیست، زیرا سطح‌های مختلف تابش در اطراف سیستم PV توزیع شده است. بنابراین، یک مدل ریاضی جدید برای ارائه سیستم تحت شرایط سایه‌ی جزئی مورد نیاز است. یک مطالعه‌ی گسترده بر روی اتصالات مختلف ماژول PV انجام شده است تا یک مدل ریاضی کلی PV تحت شرایط سایه‌ی جزئی بدست آید. برای سادگی، سه ماژول PV را که به صورت سری متصل‌اند، در نظر می‌گیریم. بنا بر داده‌ی سلول SP150-PC، جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز هر ماژول PV تحت شرایط سطح تابش نامی به ترتیب $4,4A$ و $43,4V$ است. مشخصه $I-V$ و بلوک دیاگرام سیستم PV در شکل (۴) نشان داده شده است. یکی از سه ماژول تابش 500 W/m^2 را دریافت می‌کند، در حالی که دو ماژول دیگر تابش نامی 1000 W/m^2 را دریافت می‌کنند. سه نقطه قابل توجه در شکل (۴-ب) به صورت زیر است: نقطه‌ی ۱ نقطه‌ی ای است که جریان معادل I_{sc} (جریان اتصال کوتاه ماژول‌های بدون سایه PV) و ولتاژش معادل صفر است، نقطه‌ی ۲ نقطه‌ای است که جریانش I_{step} (جریان اتصال کوتاه ماژول‌های سایه‌دار PV) و ولتاژش V_{step} (مجموع ولتاژ مدار باز ماژول‌های بدون سایه) است نقطه‌ی ۳ نقطه‌ای است که جریانش معادل صفر و ولتاژش معادل V_{oc} (مجموع ولتاژ مدار باز ماژول‌های بدون سایه و ماژول‌های سایه‌دار) است. مدل ریاضی سیستم PV در فرمول (۲) نشان داده شده است، بطوری که n_s^{us} و n_s^s به ترتیب تعداد ماژول‌های بدون سایه و ماژول‌های سایه‌دار است، λ^{us} و λ^s به ترتیب سطح تابش بر روی ماژول‌های بدون سایه و ماژول‌های سایه‌دار است [۱۵].

شکل ۴ - شرایط سایه جزئی الف) آرایه‌ی واقع در شرایط جزئی ب) منحنی توان-ولتاژ آرایه‌ی مربوطه [۱۵]



معادله (۲) تنها برای دو سطح تابش توزیع شده بر روی ماژول‌های سری شده PV معتبر است. در نتیجه معادله (۲) برای سطح‌های تابش بیشتر گسترش داده می‌شود. مدل ریاضی عمومی برای n ماژول سری شده در یک سیستم PV به صورت معادله (۳) می‌باشد. بطوری که n_s^{SN} تعداد ماژول‌های سایه‌دار PV با بالاترین سطح تابش است، و λ^{SN} بالاترین سطح تابش است. متغیر N تعداد سطح‌های تابش توزیع شده است [۱۵].

$$V_{PV} = \begin{cases} \frac{AKTn_s^{us}}{q} \ln \left(\frac{I_{sc} \cdot \lambda^{us} - I_{PV}}{I_0} \right) & I_{PV} > I_{step} \\ \frac{AKTn_s^{us}}{q} \ln \left(\frac{I_{sc} \cdot \lambda^{us} - I_{PV}}{I_0} \right) + \frac{AKTn_s^s}{q} \ln \left(\frac{I_{sc} \cdot \lambda^s - I_{PV}}{I_0} \right) & I_{PV} < I_{step} \end{cases} \quad (2)$$

معمولاً سیستم PV شامل ماژول‌های PV با اتصالات سری-موازی هستند. بنابراین برای بدست آوردن مدل ریاضی برای سیستم PV کلی، مانند شکل (۵-الف) سه ماژول سری شده را با سه ماژول سری دیگر به صورت موازی متصل می‌کنیم. مشخصه I-V سیستم PV در شکل (۵-ب) نشان داده شده است.

$$V_{PV} = \begin{cases} \sum \frac{AKTn_s^{un}}{q} \ln \left(\frac{I_{sc} \cdot \lambda^{un} - I_{PV}}{I_0} \right) & , I_{PV} < I_{Nstep} \\ \vdots \\ \sum \frac{AKTn_s^{us}}{q} \ln \left(\frac{I_{sc} \cdot \lambda^{un} - I_{PV}}{I_0} \right) + \frac{AKTn_s^{s1}}{q} \ln \left(\frac{I_{sc} \cdot \lambda^s - I_{PV}}{I_0} \right) & , I_{1step} < I_{PV} < I_{2step} \\ \sum \frac{AKTn_s^{us}}{q} \ln \left(\frac{I_{sc} \cdot \lambda - I_{PV}}{I_0} \right) + \frac{AKTn_s^{s1}}{q} \ln \left(\frac{I_{sc} \cdot \lambda^{s1} - I_{PV}}{I_0} \right) + \dots + \frac{AKTn_s^N}{q} \ln \left(\frac{I_{sc} \cdot \lambda^{sN} - I_{PV}}{I_0} \right) & , I_{PV} < I_{1step} \end{cases} \quad (3)$$

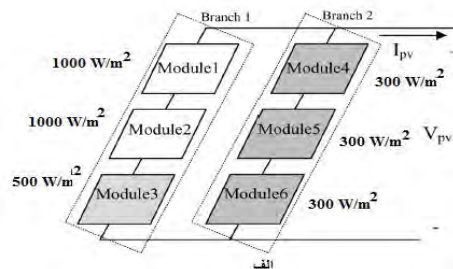
در شکل (۵-ب) منحنی B مشخصه I-V شاخه ۱ و منحنی C مشخصه I-V شاخه ۲ را نشان می‌دهد و منحنی A مشخصه I-V منحنی کل سیستم PV (مجموع منحنی‌های C و B به ازای ولتاژهای یکسان) است. جریان خروجی PV مجموع جریان هر کدام از شاخه‌ها است:

$$I_{PVTotal} = I_{branch1} + I_{branch2} \quad (4)$$

از معادله بالا مدل ریاضی کلی که شامل N ماژول با اتصال موازی در سیستم PV است، بدست می‌آید:

$$I_{PVTotal} = I_{branch1} + I_{branch2} + \dots + I_{branchN} \quad (5)$$

شکل ۵-الف) بلوک دیگرام ماژول‌های PV با اتصالات سری-موازی
 ب) مشخصه I-V جریان و ولتاژ خروجی سیستم PV [۱۵].

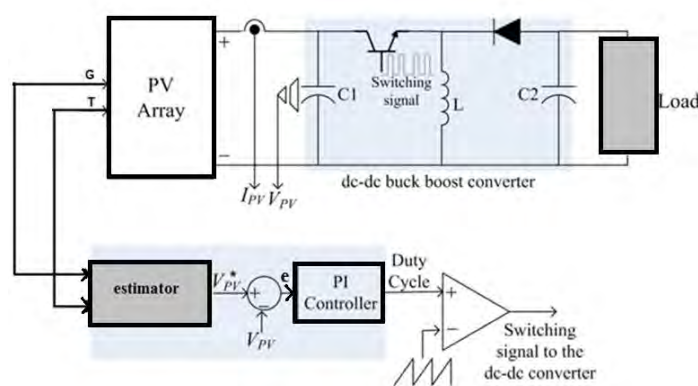


۴- روش پیشنهادی

روش پیشنهادی در شکل (۶) نشان داده شده است. در این روش ابتدا در بلوک تخمین‌گر ولتاژ بهینه (estimator) با داشتن اطلاعات تابش هر ماژول و دمای سلول، همان‌طور که در بخش ۳ توضیح داده شده، منحنی تقریبی P-V یک آرایه فوتولتائیک را با استفاده از فرمول (۳) تحت شرایط سایه‌ی جزئی بدست آورده می‌شود. سپس از منحنی حاصل ولتاژ متناظر با توان

ماکزیمم (V_{dc}^*) را بدست آورده و به سیستم پیشنهاد داده می شود که نقطه عملکرد سیستم را به V_{dc}^* انتقال دهد. بدین منظور از کنترلر تناسبی-انتگرالی (PI) استفاده می شود. ولتاژ V_{dc}^* به عنوان یک سیگنال مرجع برای کنترلر MPPT مبنی بر ولتاژ نیاز است. تفاوت بین V_{dc} و V_{dc}^* ، خطا می باشد که به عنوان ورودی برای کنترلر PI می باشد تا سیگنال کنترلی را برای تنظیم سیکل وظیفه مبدل توان افزایشده، تولید کند.

شکل ۶ - ساختار کنترلی پیشنهادی



برای بدست آوردن اطلاعات تابش هر ماژول، در عمل می بایست به هر ماژول یک سنسور تابش وصل کرده و تابش مربوط به آن را بدست بیاوریم. از آن جایی که تست عملی گران، زمان بر و وابسته به شرایط آب و هوایی است، برای تایید صحت این روش، می توان آن را بر روی نرم افزار MATLAB/SIMULINK پیاده کرد. بنابراین اطلاعات مربوط به تابش هر ماژول توسط کاربر به سیستم کنترلی داده می شود.

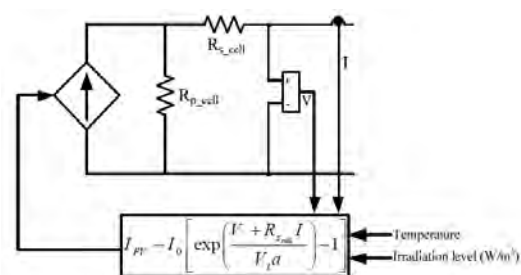
۵- نتایج شبیه سازی

نتایج شبیه سازی روش پیشنهادی برای ردیابی نقطه توان بیشینه در شرایط سایه ی جزئی بررسی می شود. شبیه سازی ها در نرم افزار MATLAB در محیط simulink صورت گرفته اند. برای شبیه سازی آرایه PV از ماژول پلی کریستالین استفاده می شود. برای مدل تک دیودی سلول خورشیدی از مدل پیشنهادی در [۱۶] که در شکل (۷) نشان داده شده است، استفاده می شود. برای شبیه سازی روش ارائه شده، از یک مبدل افزایشده استفاده شده است. ورودی این مبدل به آرایه ی خورشیدی متصل می گردد و خروجی آن نیز به یک باتری به منظور ذخیره سازی انرژی اتصال می یابد. بلوک دیاگرام مدار شبیه سازی شده را می توان در شکل

⁹ Proportional-integral

(۶) مشاهده کرد که این شکل شامل مدل آرایه‌ی فتوولتائیک، کنترلر PI، تخمین گر ولتاژ بهینه، مبدل افزایشنده و یک باتری به عنوان بار می‌باشد. اطلاعات الکتریکی و پارامترهای ماژول فتوولتائیک (پلی کریستالین) و پارامترهای مبدل افزایشنده در جدول (۱) آمده است [۱۶]. فرض شده است که آرایه فتوولتائیک شامل ۶ ماژول سری شده در هر رشته و ۵ رشته موازی می‌باشد.

شکل ۷ - بلوک دیاگرام مدل تک‌دیودی سلول فتوولتائیک [۱۶]



جدول ۱- الف) اطلاعات الکتریکی ماژول پلی کریستالین
 ب) پارامترهای ماژول در شرایط استاندارد ج) پارامترهای مبدل افزایشنده

پارامترهای ماژول		مقادیر	
توان نقطه بهینه	۴۵ وات	$I_{PV,n}$	2.98A
ولتاژ نقطه بهینه	۱۶.۲ ولت	$I_{0,n}$	9.23nA
جریان نقطه بهینه	۲.۷۶ آمپر	η	1.136
ولتاژ مدار باز	۲۰.۵ ولت	R_s	0.5Ω
جریان اتصال کوتاه	۲.۹۸ آمپر	R_p	726Ω
تعداد سلول‌های ماژول	۳۶	J_0	0.0007

ج

ب

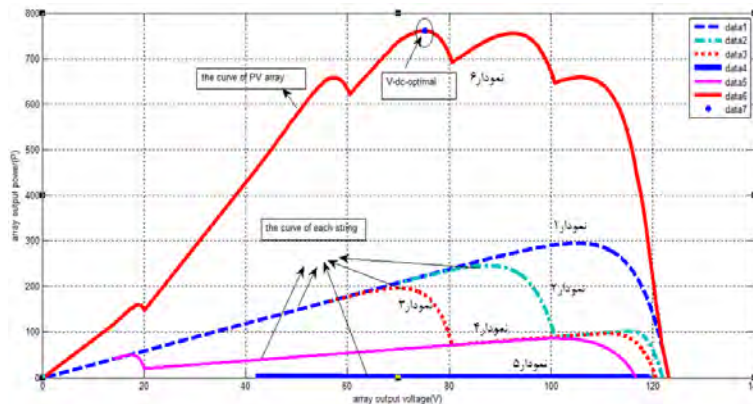
الف

بلوک تخمین گر ولتاژ بهینه با داشتن دما و تابش به تخمین منحنی توان-ولتاژ آرایه‌ی فتوولتائیک می‌پردازد. شکل (۸) آرایه‌ی تحت سایه را نشان می‌دهد. در شکل (۹) نتایج شبیه‌سازی این بلوک را نشان می‌دهد که نمودار ۱ تا ۵ در این شکل، منحنی توان-ولتاژ هر رشته (۵ ماژول سری شده) است و نمودار ۶ منحنی کل آرایه‌ی PV است. این بلوک با توجه به تابش‌های آرایه، ولتاژ بهینه ۷۵ ولت را به سیستم پیشنهاد می‌کند و ولتاژ عملکردی سیستم توسط کنترلر PI به این ولتاژ بهینه انتقال داده می‌شود.

شکل ۸- آرایه‌ی واقع شده در شرایط جزئی

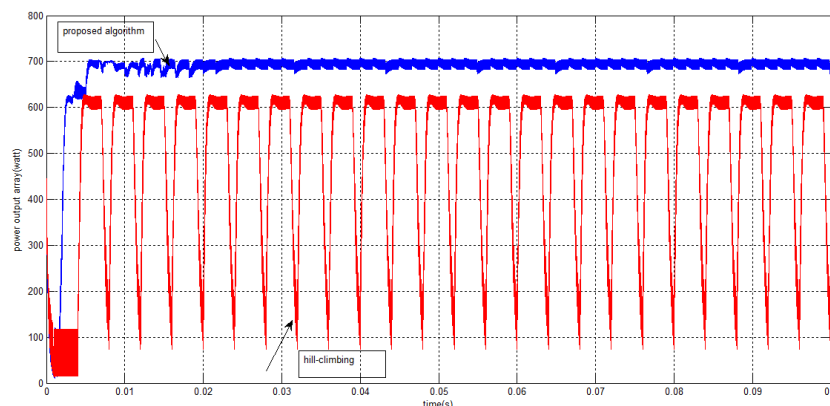
۱۰۰۰ w/m ²	۱۰۰۰ w/m ²	۱۰۰۰ w/m ²	۱۰۰۰ w/m ²	۱۰۰۰ w/m ²
۱۰۰۰ w/m ²	۱۰۰۰ w/m ²	۱۰۰۰ w/m ²	۱۰۰۰ w/m ²	۳۰۰ w/m ²
۱۰۰۰ w/m ²	۱۰۰۰ w/m ²	۱۰۰۰ w/m ²	۱۰۰۰ w/m ²	۳۰۰ w/m ²
۱۰۰۰ w/m ²	۱۰۰۰ w/m ²	۱۰۰۰ w/m ²	۳۰۰ w/m ²	۳۰۰ w/m ²
۱۰۰۰ w/m ²	۱۰۰۰ w/m ²	۳۰۰ w/m ²	۳۰۰ w/m ²	۳۰۰ w/m ²
۱۰۰۰ w/m ²	۳۰۰ w/m ²	۳۰۰ w/m ²	۳۰۰ w/m ²	۳۰۰ w/m ²

شکل ۹- منحنی تخمینی توان-ولتاژ آرایه‌ی توسط بلوک estimator



در ادامه نتیجه این شبیه‌سازی با روش‌های MPPT معمول در صنعت همچون روش تپه‌نوردی در شکل (۱۰) مقایسه می‌شود. در روش تپه‌نوردی در ابتدا سیکل وظیفه مقداردهی می‌شود و با افزایش سیکل وظیفه به یافتن نقطه ماکزیمم توان می‌پردازد. به اولین قله‌ای که در آن تشخیص قله توان ماکزیمم داده شده‌است، توقف کرده و حول آن قله نوسان می‌کند و به سایر قله‌ها توجهی نمی‌کند که ممکن است آن قله یک توان ماکزیمم محلی باشد. اما در روش پیشنهادی سیستم از سردرگمی یافتن قله‌ی ماکزیمم رها شده و سریعاً یک ولتاژ مرجع پیشنهادی را به عنوان نقطه کار در نظر گرفته و به همین دلیل از نوسانات بیش از حد (هم‌چون روش تپه‌نوردی) جلوگیری می‌شود و توان بیشتری را حاصل داده‌است. توان نهایی سیستم تقریباً به ۷۰۰ وات رسیده است، در صورتی که بلوک تخمین‌گر ولتاژ بهینه در ولتاژ بهینه ۷۵ ولت (شکل (۹))، توان ماکزیمم ۷۶۰ وات را تخمین می‌زند. دلیل این خطا این است که منحنی تخمین‌زده شده بدون در نظر گرفتن تلفات در مبدل افزایشدهنده و مقاومت‌های سری و موازی می‌باشد، اما در شبیه‌سازی‌ها این مقاومت‌ها و تلفات در نظر گرفته شده‌است و سبب افت توان در خروجی می‌شود.

شکل ۱۰ - مقایسه روش پیشنهادی با روش تپه‌نوردی



۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش جدید MPPT برای ردیابی قله‌ی جهانی در شرایط سایه‌ی جزئی ارائه شده‌است. در روش پیشنهادی با استفاده از اطلاعات تابش و دما منحنی تقریبی آرایه‌ی خورشیدی بدست آمده‌است و یک ولتاژ مرجع به سیستم پیشنهاد داده می‌شود و نقطه عملکرد سیستم را با استفاده از کنترلر PI به این ولتاژ مرجع انتقال داده می‌شود. از جمله مزایای این روش این است که با تخمین ولتاژ عملکرد بهینه، نقطه کار به نزدیکی نقطه‌ی ماکزیمم توان جهانی انتقال داده شده که مسبب نوسان کمتری در خروجی سیستم شده‌است. همچنین همگرایی سریع‌تری نسبت به روش‌هایی که تمام منحنی توان-ولتاژ را برای یافتن نقطه MPP جهانی جستجو کرده‌اند، دارد. این روش نسبت به روش‌های مرسوم MPPT (همچون تپه‌نوردی) توان و سرعت بالاتری دارد.

مراجع

- [1] Esmar, T., Chapman, P.L., 2007. "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking Techniques". IEEE Transaction on Energy Conversion 22 (2), 439-449.
- [2] Salas, V., Olías, E., Barrado, A., Lázaro, A., 2006." Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems". Solar Energy Materials and Solar Cells, 90 (11), 1555-1578.
- [3] Hohm, D.P., Ropp, M.E. , 2000." Comparative study of maximum power point tracking algorithms using an experimental, programmable, maximum power point tracking test bed" . Photovoltaic specialist conference, 1699-1702.
- [4] CHun, W.N., Zuo, S., Yukita, K., Goto, Y., Ichiyanagi, K., 2010." Research of PV Model and MPPT Methods in Matlab". Power & Energy Engineering Conference.
- [5] Ji, Y.H., Jung, D.Y., Kim, J.G., Kim, J.H., Lee, T.W., 2011. "A Real Maximum Power Point Tracking Method for Mismatching Compensation in PV Array Under Partially Shaded Conditions". IEEE Transaction on Power Electronics, 26 (4), 1001-1009.

- [6] Patel, H., Agarwal, V., 2008. "Maximum Power Point Tracking Scheme for PV Systems Operating Under Partially Shaded Conditions". IEEE Transaction on Industrial Electronics, 55 (4), 1689- 1698.
- [7] Carannante, G., Fraddanno, C., Pagano, 2009. "Experimental Performance of MPPT Algorithm for photovoltaic sources subject to inhomogeneous insulation". IEEE Transaction on Industrial Electronics, 56 (11), 4374-4380.
- [8] Shimizu, T., Hashimoto, O., Kimura, G., 2003. " A Novel High-Performance Utility-Interactive Photovoltaic Inverter System". IEEE Transaction on Power Electronics, 18 (2), 704-711.
- [9] Shimizu, T., Hirakata, M., Kamazawa, T., Watanabe, H., 2001. " Generation Control Circuit for Photovoltaic Modules". IEEE Transaction on Power Electronics, 16 (3), 293-300.
- [10] Syafaruddin, Karatepe, E., Hiyama, T, 2012. "Performance enhancement of photovoltaic array through String and central based MPPT system under non-uniform irradiance conditions". Energy Conversion and Management, 62, 131-140.
- [11] Syafaruddin, Karatepe, E., Hiyama, T., 2009. " Artificial neural network-polar coordinated fuzzy controller based maximum power point tracking control under partially shaded conditions". IET Renewable Power Generation, 3 (2), 239–253.
- [12] Renaudineau, H., Houari, A., Martin, S., Meibody-Tabar, F., Gerardin, B., 2011. "A new approach in tracking maximum power under partially shaded conditions with consideration of converter losses". Solar Energy, 85, 2580-2588.
- [13] Kobayashi, K., Takano, I., Sawada, Y., 2006. "A study of a two stage maximum power point tracking control of a photovoltaic system under partially shaded conditions". Solar Energy Materials and Solar Cells, 90, 2975-2988.
- [14] Salam, Z., Shamsudin, A., Amjad, 2012. "A direct control based maximum power point tracking method for photovoltaic system under partial shading conditions using particle swarm optimization algorithm". Applied Energy, 99, 414-422.
- [15] Bader N. Alajmi, Khaled H. Ahmed, Stephen J. Finney, and Barry W. Williams, 2013. " A Maximum Power Point Tracking Technique for Partially Shaded Photovoltaic Systems in Microgrids". IEEE Transaction on Industrial Electronics VOL. 60, NO. 4 .
- [16] C. S. Tu, Y. J. Su H.L. Tsai, "Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK," in Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, 2008.