

یک روش جدید برای ردیابی نقطه حداکثر توان سرتاسری در آرایه‌های خورشیدی شامل چند ردیف موازی تحت شرایط سایه جزئی

سید مجید هاشم‌زاده^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ محمد هجری^۲، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی سهند - تبریز - ایران - majidhashemzadeh1899@gmail.com

۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی سهند - تبریز - ایران - hejri@sut.ac.ir

چکیده: در این مقاله یک روش جدید برای استخراج نقطه پیک سرتاسری (GMPP^۱) آرایه فتوولتاییک PV^۲ تحت شرایط سایه جزئی (PSC^۳) ارائه شده است. در روش پیشنهادی، نشان داده می‌شود که مستقل از الگو و شدت تابش، موقعیت GMPP همواره در همسایگی پیک سرتاسری یکی از ردیف‌های آرایه PV می‌باشد. لذا، تعداد نقاط پیک محلی مورد آزمون در روش پیشنهادی برخلاف روش‌های موجود که به تعداد سطوح تابشی مختلف در سطح آرایه می‌باشد، مستقل از الگو و شدت تابش بوده و برابر تعداد ردیف‌های موازی در آرایه فتوولتاییک می‌باشد. بر این اساس، برای ردیابی GMPP در PSC، ابتدا GMPP هر ردیف تخمین زده می‌شود و سپس هر کدام از نقاط تخمین زده شده به مبدل الکترونیک قدرت اعمال شده و نقطه‌ای که بیش‌ترین توان را به دست دهد به عنوان GMPP آرایه PV شناخته می‌شود. نتایج عددی و مطالعه مقایسه‌ای با روش‌های مشابه، عمل کرد مطلوب الگوریتم پیشنهادی را در یافتن GMPP از نظر دقت و سرعت، تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: آرایه PV شامل چند ردیف، تخمین، مبدل الکترونیک قدرت، ردیابی نقطه حداکثر توان، سایه جزئی.

A New Method for Global Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Arrays Including Several Parallel Strings under Partial Shading Conditions

S. M. Hashemzadeh¹, MSc. student; M. Hejri², Assistant Professor

1- Faculty of Electrical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran, Email: majidhashemzadeh1899@gmail.com

2- Faculty of Electrical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran, Email: hejri@sut.ac.ir

Abstract: In this paper, a new method for extracting the global maximum power point (GMPP) of a PV array under partial shading conditions (PSCs) is presented. In the proposed method, it is shown that, independent of the pattern and intensity of the radiation, the GMPP position is always in the neighboring of the global peaks of one of the photovoltaic (PV) strings in the PV array. Therefore, in contrast to the existing methods in which the number of local peaks, tested as a GMPP candidate, is dependent on the number of different radiation levels on the array surface, in the proposed technique this number is reduced to the number of parallel strings in the photovoltaic array and is independent of the irradiation pattern on the PV array. As a result, to track the GMPP in PSC, first the GMPP of each PV string is estimated, and then the voltage of each of the estimated points is given to the power electronic converter as a reference voltage to regulate the PV array voltage at the corresponding candidate GMPP voltage. Next, in each case, the produced power is recorded and the voltage that produces the maximum power is known as the final GMPP of the PV array. Numerical results and comparable study with similar methods confirm the desirable performance of the proposed algorithm in finding the GMPP with an acceptable speed and accuracy.

Keywords: Multistring PV arrays, estimation, power electronics converter, maximum power point tracking, partial shading.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۲۹

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۳۱ و ۱۳۹۷/۰۳/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۲۳

نام نویسنده مسئول: محمد هجری

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تبریز - شهر جدید سهند - دانشگاه صنعتی سهند - دانشکده مهندسی برق

۱-مقدمه

تعیین و تخمین نقطه پیک سرتاسری در آرایه‌های خورشیدی شامل چند ردیف موازی تحت شرایط سایه جزئی و بدون نیاز به استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری پیچیده و زمان‌بر، یکی از مهم‌ترین مسائل چالش‌برانگیز در حوزه سیستم‌های فتوولتائیک است. تابش غیریک نواخت در آرایه‌های خورشیدی منجر به وجود آمدن نقاط پیک توان محلی می‌شود که روش‌های مرسوم ردیابی حداکثر توان که در شرایط تابش یک‌نواخت مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳-۱] قادر به شناسایی نقطه پیک سرتاسری نبوده فلذا استفاده از آن‌ها منجر به عدم دستیابی حداکثر توان تولیدی از سیستم فتوولتائیک در شرایط سایه‌جزئی خواهد شد. بر این اساس، باتوجه به هزینه نسبتاً بالای تولید آرایه‌های خورشیدی، راندمان تبدیل پایین آن‌ها، وابستگی میزان تولید انرژی الکتریکی آن‌ها به شرایط آب‌وهوایی و رفتار غیرخطی مشخصه‌های I-V و P-V آن‌ها، مساله دستیابی به نقطه پیک سرتاسری در آرایه‌های PV در کلیه شرایط کاری از اهمیت راهبردی برخوردار است. در این راستا روش‌های بسیار متنوعی برای ردیابی GMPP در آرایه‌های خورشیدی مطرح شده است [۴، ۵]. با این وجود، یافتن روشی که به طور هم‌زمان بتواند از دقت و سرعت هم‌گرایی بالا و سادگی پیاده‌سازی برخوردار باشد هنوز یک مساله چالش‌برانگیز است.

در [۶-۹] برای دستیابی به GMPP در آرایه PV از روش‌های فراابتکاری استفاده شده است. روش‌های فراابتکاری از پیچیدگی الگوریتمی بالایی برخوردار بوده و برای رسیدن به نقطه GMPP به تعداد دفعات تکرار نسبتاً بالایی نیاز دارند. از این‌رو، اجرای این روش‌ها زمان‌بر بوده و از سرعت هم‌گرایی پایینی در ردیابی GMPP برخوردار هستند. چالش‌های اصلی در این روش‌ها انتخاب فضای جستجو، اندازه جمعیت، شرایط اولیه و پارامترهای کنترلی آن‌ها است. با این وجود برتری آن‌ها در عدم نیاز به دانستن مشخصات ماژول‌های PV و استفاده از سنسورهای کمتر ولتاژ و جریان است. در [۱۰]، از روش مبتنی بر مدل و حل معادلات غیرخطی، برای ردیابی GMPP در یک آرایه شامل چند ردیف انجام شده است. پیچیدگی و حجم بالای محاسبات و مشکل همگرایی در صورت انتخاب نادرست شرایط اولیه برای حل معادلات غیر خطی از مشکلات این روش می‌باشد. در [۱۱-۱۴] ارتباط میان پیک‌های منحنی P-V و تعداد سطوح تابشی در آرایه بررسی و این نتیجه حاصل شده است که به‌ازای هر سطح تابش در آرایه یک پیک محلی در منحنی P-V ایجاد می‌شود. در [۱۵] نشان داده شده که هر یک از این نقاط پیک محلی می‌تواند کاندیدای GMPP باشد. بر این اساس، برخی از مقالات سعی کرده‌اند تا با تخمین موقعیت این نقاط پیک محلی و مقایسه آن‌ها با یکدیگر موقعیت GMPP را تخمین بزنند. با این روش، به‌جای اینکه کل منحنی P-V برای یافتن GMPP اسکن شود فقط نقاط پیک بررسی می‌شود. در [۱۶] پدیده سایه جزئی در مورد یک ردیف خورشیدی مورد بررسی قرار گرفته و یک سری فرمول‌های صریح برای شناسایی نقاط حداکثر توان محلی ارائه شده است.

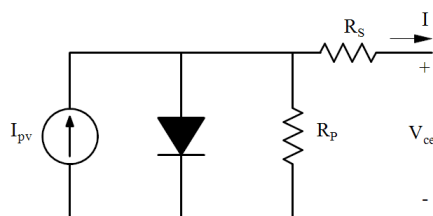
در این روش، ابتدا تمامی نقاط پیک منحنی P-V شناسایی شده و سپس از مقایسه این نقاط، GMPP تشخیص داده می‌شود. در [۱۷]، روش مطرح‌شده در [۱۶]، برای یک آرایه خورشیدی متشکل از چند ردیف موازی با هم، تعمیم داده شده است. کلیه فرمول‌های استفاده‌شده در [۱۶] و [۱۷]، شامل تابش و دمای سطح ماژول‌ها بوده و تمامی روابط با فرض در دسترس بودن اطلاعات تابش و دما حل شده‌اند، در حالی که تابش و دمای سطح ماژول‌ها نیاز به اندازه‌گیری یا تخمین دارند. در [۱۸]، ولتاژ نقطه حداکثر توان MPP از یک رابطه تجربی و برای یک ماژول خاص ارائه شده است که این رابطه مستقل از مقدار تابش می‌باشد. به دلیل نبود مقدار تابش در رابطه ولتاژ MPP ماژول، نمی‌توان تضمین کرد که این روش در الگوهای تابشی مختلف از دقت بالایی برخوردار باشد. همچنین در [۱۸] برای تشخیص این که کدام ماژول بای‌پس شده و کدام ماژول تولید توان می‌کند از مقدار تابش ماژول‌ها استفاده شده است، به این صورت که ماژول‌های با کمترین تابش نسبت به ماژول‌های دیگر در آرایه بای‌پس می‌شوند. در این مقاله فرض شده است که مقدار تابش ماژول‌ها در دسترس بوده و روشی برای تخمین یا اندازه‌گیری آن ارائه نشده است. روش MPPT ارائه‌شده در [۱۹] یک الگوریتم بر مبنای جستجو^۴ می‌باشد که ابتدا تمامی پیک‌های منحنی P-V تخمین زده می‌شود. سپس پیک‌های تخمین‌زده‌شده به‌عنوان مقدار اولیه به الگوریتم تپه‌نوردی (HC^۵) داده می‌شود تا تمامی پیک‌های موجود در منحنی P-V ردیابی شوند. در مرحله نهایی مقدار توان در این پیک‌ها با هم مقایسه شده و پیک سرتاسری شناسایی می‌شود. سرعت عمل کرد این روش‌ها تابع تعداد نقاط پیک محلی در منحنی P-V بوده و با افزایش تعداد نقاط پیک محلی زمان قابل‌توجهی برای دستیابی به نقطه پیک سرتاسری مورد نیاز است.

با توجه به کارهای موجود در زمینه تخمین پیک سرتاسری با استفاده از روش‌های مبتنی بر مدل، می‌توان نتیجه گرفت که علی‌رغم برتری این روش‌ها از نظر سرعت پاسخ‌دهی بالا در قیاس با روش‌های فراابتکاری، همچنان مشکلاتی از قبیل پیچیدگی، حجم بالای محاسبات و مشکل هم‌گرایی در صورت انتخاب نادرست شرایط اولیه برای حل معادلات غیرخطی گریبان‌گیر این روش‌ها است. بنابراین دستیابی به یک روش مبتنی بر مدل که در مقایسه با روش‌های موجود از پیچیدگی و حجم محاسبات کمتری برخوردار بوده و نیازی به حل عددی معادلات ضمنی و غیرخطی حاکم بر آرایه‌های فتوولتائیک نداشته و در عین حال از دقت بالایی برخوردار باشد، همواره یک مساله چالش‌برانگیز برای محققین در این حوزه تحقیقاتی بوده است. در این راستا، این مقاله به ارائه یک روش جدید برای استخراج نقطه پیک سرتاسری (GMPP) آرایه فتوولتائیک PV تحت شرایط سایه جزئی (PSC) می‌پردازد. در روش پیشنهادی، نشان داده می‌شود که مستقل از الگو و شدت تابش، موقعیت GMPP همواره در همسایگی پیک سرتاسری یکی از ردیف‌های آرایه PV می‌باشد. لذا، تعداد نقاط پیک محلی مورد آزمون در روش پیشنهادی

شده است. همچنین بخش‌های ۵ و ۶ نیز به ترتیب مربوط به نتایج شبیه سازی و نتیجه گیری می‌باشند.

۲-مدل شبیه سازی ماژول PV

ماژول PV از اتصال سری سلول‌های PV تشکیل می‌شود. شکل ۱ مدل تک‌دیودی سلول PV را نشان می‌دهد که در این مقاله از آن برای مدل سازی ماژول PV استفاده شده است. مقالات متعددی در زمینه مدل سازی ماژول PV با در نظر گرفتن مدل تک‌دیودی [۲۱، ۲۲]، و مدل دودی PV [۲۳، ۲۴] ارائه شده است. مدل تک‌دیودی سلول PV علاوه بر سادگی محاسبات از دقت قابل قبولی نیز برخوردار است [۱۷]. در این مقاله، روند مدل سازی ماژول PV مطابق روش ارائه شده در [۲۲] می‌باشد. معادله (۱)، رابطه بین ولتاژ و جریان یک ماژول خورشیدی را بیان می‌کند.



شکل ۱: مدل تک‌دیودی سلول خورشیدی

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{aV_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (1)$$

در این رابطه، I_{pv} جریان نوری، I_0 جریان اشباع معکوس دیود موجود در مدل سلول و V_t ولتاژ گرمایی ماژول هستند و به ترتیب از روابط (۲) و (۳) حاصل می‌شوند. R_p و R_s مقاومت‌های سری و موازی، و a ضریب ایده آلی دیود می‌باشد.

$$I_{pv} = (I_{pv,n} + k_i (T - T_n)) \frac{G}{G_n} \quad (2)$$

$$I_0 = \frac{I_{pv} - \frac{V_{oc,n}}{R_p}}{\exp \left(\frac{V_{oc,n}}{aV_t} \right) - 1} \quad (3)$$

در معادلات (۲) و (۳)، G تابش نور خورشید بر سطح ماژول، T دمای سطح ماژول برحسب درجه کلوین، $I_{pv,n}$ و $V_{oc,n}$ به ترتیب جریان نوری و ولتاژ مدار باز ماژول در شرایط تست استاندارد ($G_n = 1000 \frac{W}{m^2}$ & $T_n = 25^\circ C$) هستند. N_s تعداد سلول‌های سری شده در داخل ماژول، q بار الکتریکی ($1.60217646 \times 10^{-19} C$) و k ثابت بولتزمن ($\frac{J}{eK}$) $1.3806503 \times 10^{-23}$ می‌باشد. منحنی P-V ماژول خورشیدی غیرخطی بوده و تحت شرایط تابش یک‌نواخت در سطح ماژول فقط در

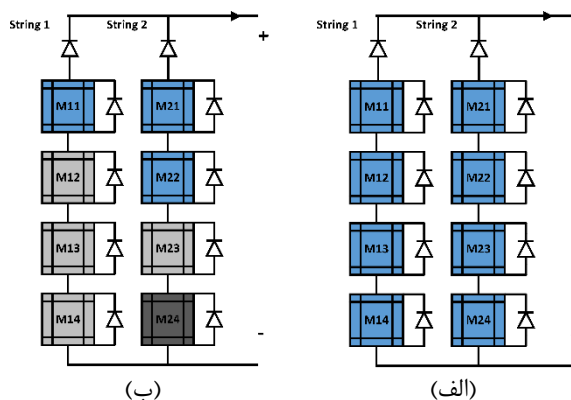
برخلاف روش‌های موجود که به تعداد سطوح تابشی مختلف در سطح آرایه می‌باشد، مستقل از الگو و شدت تابش بوده و برابر تعداد ردیف‌های موازی در آرایه فتوولتاییک می‌باشد. به این ترتیب در شرایط تابشی یکسان و با وجود تنوع تابشی بالا بر روی ماژول‌های تشکیل دهنده یک آرایه فتوولتاییک، تعداد نقاط مورد آزمون برای دستیابی به نقطه پیک سرتاسری در روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های موجود به مراتب کاهش یافته و در نتیجه سرعت دستیابی به نقطه پیک سرتاسری افزایش می‌یابد. از برتری‌های دیگر این روش می‌توان به ساختار ساده الگوریتم آن و عدم نیاز به حل عددی معادلات غیرخطی ناشی از مدل آرایه‌های فتوولتاییک و در نتیجه مرتفع شدن مشکل تضمین هم‌گرایی عددی و انتخاب شرایط اولیه مناسب ذکر نمود. مضاف بر این، نتایج شبیه سازی و مطالعات مقایسه‌ای با روش‌های موجود، حکایت از دقت بالای روش پیشنهادی در دستیابی به نقطه پیک سرتاسری به ازای گستره وسیعی از الگوی تابشی را دارد. بر این اساس، برای ردیابی GMPP در PSC، ابتدا GMPP هر ردیف تخمین زده می‌شود و سپس هر کدام از نقاط تخمین زده شده به مبدل الکترونیک قدرت اعمال شده و نقطه‌ای که بیش‌ترین توان را بدست دهد به عنوان GMPP آرایه PV شناخته می‌شود. نتایج عددی و مطالعه مقایسه‌ای با روش‌های مشابه، عملکرد مطلوب الگوریتم پیشنهادی را در یافتن GMPP از نظر دقت و سرعت، تأیید می‌کند.

در این مقاله، یک آرایه شامل ۵ ردیف موازی که هر ردیف شامل ۵ ماژول سری شده است به ازای شرایط تابشی مختلف، شبیه سازی شده و این نتیجه به دست آمده که نقطه پیک سرتاسری آرایه در محل نقطه پیک سرتاسری یکی از ردیف‌ها قرار دارد. بر این اساس در این مقاله برای ردیابی GMPP آرایه شامل چند ردیف، ابتدا ولتاژ نقطه پیک سرتاسری هر کدام از ردیف آرایه‌ها با استفاده از روش ارائه شده در [۲۰] تخمین زده می‌شود، سپس ولتاژ هر یک از این نقاط به مبدل الکترونیک قدرت اعمال شده و توان بدست آمده در خروجی آرایه PV ذخیره می‌شود. در نهایت با مقایسه توان‌های حاصل شده، ولتاژ نقطه پیک سرتاسری آرایه کل که بیش‌ترین توان را بدست می‌دهد، از میان ولتاژ نقاط پیک سرتاسری ردیف‌ها انتخاب می‌شود. بر این اساس، تعداد نقاط پیک محلی مورد آزمون در روش پیشنهادی بر خلاف روش‌های موجود که به تعداد سطوح تابشی مختلف در سطح آرایه می‌باشد، مستقل از الگو و شدت تابش بوده و برابر تعداد ردیف‌های موازی در آرایه فتوولتاییک می‌باشد. حجم و پیچیدگی محاسبات بسیار پایین، سرعت و دقت هم‌گرایی بالا به ویژه در مورد آرایه‌های PV با تعداد ماژول‌های زیاد و الگوی تابشی بسیار متغیر در سطح آرایه، از ویژگی‌های اصلی این روش است.

در ادامه این مقاله، در بخش ۲، مدل شبیه سازی ماژول PV ارائه شده است. در بخش ۳، به بررسی عمل کرد آرایه PV تحت شرایط سایه جزئی پرداخته شده و در بخش ۴ روش پیشنهادی برای ردیابی GMPP مطرح

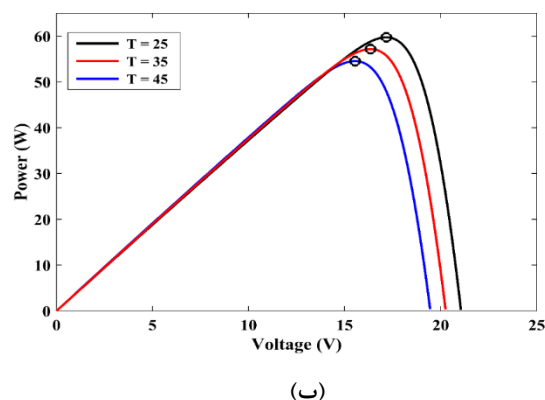
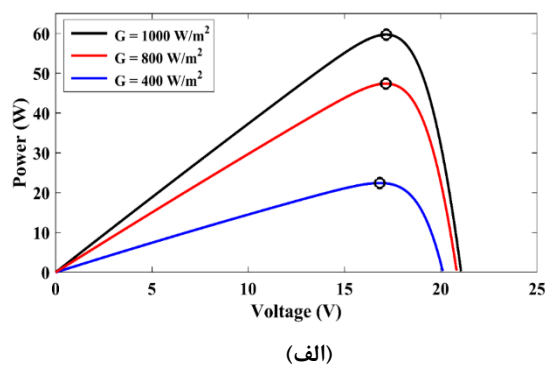
ردیف موازی که هر ردیف ۴ ماژول سری دارند را نشان می‌دهد. در شرایط تابشی یکسان طبق شکل ۳ الف) همه ماژول‌ها تابش یکسانی دریافت می‌کنند. منحنی P-V مربوط به این آرایه، فقط در یک نقطه حداکثر می‌شود. در شرایط تابشی غیر یک‌نواخت یا همان شرایط سایه جزئی که در شکل ۳ ب) آورده شده‌است، منحنی P-V دارای چندین پیک خواهد شد که تعداد این پیک‌ها برای یک ردیف از آرایه برابر با تعداد سطوح تابشی در آن ردیف می‌باشد. منحنی‌های I-V و P-V مربوط به این شرایط به ترتیب در شکل‌های ۴ الف) و ۴ ب) قابل مشاهده هستند. به وجود آمدن پیک‌های مختلف در شرایط سایه جزئی ناشی از به کار بردن دیودهای کنارگذار در آرایه PV می‌باشد.

زمانی که یکی از ماژول‌ها تحت سایه قرار می‌گیرد، جریان تولیدی توسط این ماژول کمتر از جریان ردیفی می‌شود که ماژول در آن حضور دارد. اختلاف جریان میان جریان تولیدی توسط ماژول تحت سایه و جریان ردیف در دو سر ماژول تحت سایه، ولتاژ منفی ایجاد کرده و دیود کنارگذار که به صورت موازی معکوس با ماژول قرار دارد هدایت می‌کند و اختلاف جریان مذکور از مسیر جدیدی که توسط دیود کنارگذار ایجاد شده عبور خواهد کرد. در نهایت می‌توان گفت ماژول تحت سایه توسط دیود کنارگذار استفاده نشود در شرایط تابشی مختلف در منحنی P-V فقط یک پیک ایجاد می‌شود. همچنین در این شرایط فقط از یک ناحیه منحنی I-V می‌توان استفاده کرد؛ درواقع ناحیه‌ای که جریان ردیف محدود به جریان ماژول با کمترین تابش شده باشد. درغیراین صورت احتمال رخ دادن پدیده نقطه داغ در آرایه PV وجود دارد که این پدیده می‌تواند موجب آسیب رسیدن به ماژول‌های تحت سایه شود.



شکل ۳: آرایه PV شامل ۲ ردیف آرایه، الف) شرایط تابشی یک نواخت، ب) شرایط سایه جزئی

یک نقطه حداکثر می‌شود که به این نقطه، نقطه حداکثر توان (MPP) گفته می‌شود. MPP با تغییرات تابش و دمای سطح ماژول تغییر می‌کند. برای بررسی تأثیر تغییرات تابش و دما بر روی منحنی P-V، ماژول خورشیدی با مدل MSX60 شبیه‌سازی شده‌است. نتیجه این شبیه‌سازی در شکل ۲ آورده شده‌است.



شکل ۲: منحنی P-V الف) به ازای تابش‌های مختلف و دمای ثابت

۲۵ °C، ب) به ازای دماهای مختلف و تابش ثابت $1000 \frac{W}{m^2}$

شکل‌های ۲ الف) و ب) به ترتیب منحنی P-V و I-V ماژول خورشیدی را به ازای تابش‌های مختلف و دمای مختلف نشان می‌دهد. باتوجه به شکل ۲ الف) و ب) تغییرات تابش و دمای سطح ماژول PV باعث تغییر نقطه MPP می‌شود. همچنین افزایش تابش به ازای دمای ثابت، باعث افزایش توان بیشینه شده و افزایش دما به ازای تابش ثابت، باعث کاهش مقدار توان بیشینه می‌شود.

۳- بررسی عملکرد آرایه PV در شرایط سایه جزئی

یک آرایه PV از اتصال موازی ردیف‌های PV تشکیل می‌شود که این ردیف‌ها نیز خود مشتمل بر اتصال سری ماژول‌های PV هستند. پدیده سایه جزئی که به طور معمول در یک آرایه PV رخ می‌دهد، به یکسان نبودن تابش ماژول‌های موجود در آرایه گفته می‌شود. سایه جزئی می‌تواند به دلیل حرکت ابر از بالای آرایه یا به دلیل وجود ساختمان‌ها و درختان در مجاورت آرایه رخ دهد [۲۵]. شکل ۳ یک آرایه PV شامل ۲

شده و ضریب x_i در رابطه (۵) صفر می‌گردد. همچنین در لحظات خاموش بودن دیود کنارگذار این ضریب یک بوده و ولتاژ MPP ماژول در رابطه (۵) تاثیرگذار خواهد بود. از این رو برای پی بردن به این که یک ماژول اتصال کوتاه شده است یا در حال تولید توان می‌باشد، از سنسور ولتاژ در دو سر آن استفاده می‌شود تا روشن یا خاموش بودن دیود کنارگذار تشخیص داده شود. در این کار مقادیر تابش و دمای سطح هر ماژول به جای اندازه‌گیری و استفاده از سنسورهای ولتاژ و جریان مطابق تخمین تابش و دما فقط با استفاده از سنسورهای ولتاژ و جریان مطابق روش ارائه شده در [۱۰] به ترتیب به وسیله روابط (۶) و (۷) صورت گرفته است.

$$G_i = \frac{G_n}{I_{ph,n}} \times \left[I_i + I_0 \left[\exp \left(\frac{V_i + I_j R_s}{a V_t} \right) - 1 \right] + \frac{V_i + I_j R_s}{R_p} \right] \quad (6)$$

$$G_i A_m = V_i I_j + U_{pv} A_m (T_i - T_a) \quad (7)$$

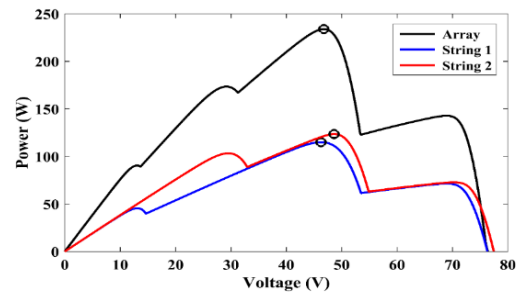
در روابط (۶) و (۷) شماره ماژول، j شماره ردیف، A_m مساحت ماژول، T_a دمای محیط و U_{pv} ضریب تبادل دمایی می‌باشد [۱۰]. مقدار $V_{m,i}$ با استفاده از رابطه (۸) بدست می‌آید.

$$V_{mi} = \frac{V_{mp}}{1 + \delta \ln \left(\frac{G_n}{G_i} \right)} + k_v (T_i - T_n) \quad (8)$$

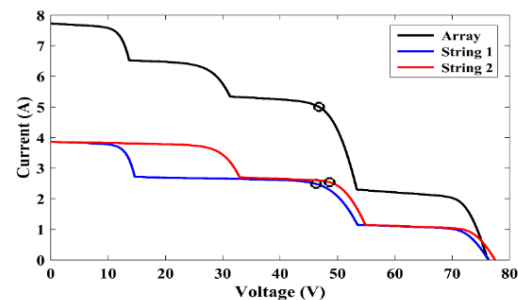
در این رابطه، V_{mp} ولتاژ MPP ماژول در شرایط تست استاندارد، G_n تابش استاندارد، G_i تابش ماژول در سطح ماژول i ام، k_v ضریب دمایی ولتاژ مدار باز، T_n دمای استاندارد و T_i دمای سطح ماژول i ام می‌باشد. همچنین δ یک ضریب بدون واحد می‌باشد که برابر با ۰/۵ در نظر گرفته شده است [۲۱]. در یک ردیف آرایه خورشیدی ماژول‌هایی که حداکثر تابش را دارند در نقطه GMPP ردیف آرایه ولتاژی تقریباً برابر با ولتاژ مدار باز داشته که از مقدار بدست آمده از رابطه (۸) بیشتر می‌باشد. از این رو برای اعمال تأثیر این دسته از ماژول‌ها یک شرط به روش افزوده می‌شود، به این صورت که اگر ولتاژ اندازه‌گیری شده دو سر ماژولی بیشتر از مقدار ولتاژ بدست آمده از رابطه (۸) باشد، ولتاژ MPP این ماژول از رابطه (۹) محاسبه می‌شود.

$$V_m = M \times V_{oc,n} \quad (9)$$

در این رابطه، $V_{oc,n}$ ولتاژ مدار باز نامی و M یک ضریب بدون واحد می‌باشد که برابر با نسبت ولتاژ ثابت شده ماژول در GMPP ردیف آرایه به ولتاژ مدار باز نامی است. برای به دست آوردن مقدار M در [۲۰]، ۵۰ الگوی تابشی مختلف شبیه‌سازی شده و در هر بار شبیه‌سازی، مقدار M برابر با نسبت ولتاژ ثابت شده ماژول در GMPP ردیف آرایه به ولتاژ مدار باز نامی در نظر گرفته شده است. مقدار متوسط M در ۵۰ الگوی تابشی شبیه‌سازی شده برابر با ۰/۷۹ می‌باشد [۲۰]. بعد از به دست آوردن



(الف)



(ب)

شکل ۴: نتیجه شبیه‌سازی آرایه PV شکل ۳ (ب)، (الف) منحنی P-V، (ب) منحنی I-V

۴- روش پیشنهادی برای ردیابی نقطه حداکثر توان سرتاسری در آرایه PV تحت شرایط سایه جزئی

در روش پیشنهادی، ابتدا ولتاژ GMPP تمامی ردیف آرایه‌ها طبق روش گفته شده در [۲۰] محاسبه شده و در مرحله بعد ارتباط میان GMPP تک تک ردیف آرایه‌ها و GMPP آرایه کل استخراج می‌شود. از این رو در گام نخست به محاسبه GMPP ردیف آرایه‌ها پرداخته شده است.

۴-۱- تخمین ولتاژ GMPP ردیف آرایه‌ها

در این روش، ولتاژ GMPP ردیف آرایه‌ها با استفاده از رابطه (۵) که در [۲۰] ارائه شده است تخمین زده می‌شود. از آنجایی که در یک ردیف آرایه ماژول‌های PV با هم سری شده‌اند، از این رو ابتدا ولتاژ ماژول‌ها در GMPP ردیف آرایه محاسبه شده و با استفاده از رابطه (۵) با هم جمع می‌شوند و در نهایت ولتاژ GMPP ردیف آرایه به دست می‌آید.

$$V_{m,string,J} = \sum_{i=1}^{n_s} x_i \times V_{m,i} - (1 - x_i) \times V_d \quad (5)$$

$$J = 1, 2, \dots, N$$

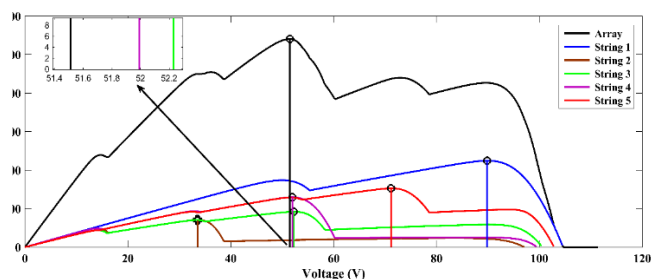
در این رابطه، N تعداد ردیف‌های موازی شده در آرایه PV، n_s تعداد ماژول‌های سری شده در هر ردیف آرایه می‌باشد. همچنین، ولتاژ هدایت دیود، $V_{m,i}$ ولتاژ MPP ماژول‌های موجود در ردیف آرایه و x_i یک ضریب بدون واحد برای اعمال تأثیر دیودهای کنارگذار می‌باشد. زمانی که ماژولی تحت سایه باشد توسط دیودهای کنارگذار اتصال کوتاه

همانطور که در شکل ۶ قابل مشاهده است، نقطه پیک سرتاسری در نزدیکی پیک سرتاسری ردیف ۴ می باشد. مقدار دقیق ولتاژ GMPP آرایه کل برابر با ۵۱/۵۱ V، و ولتاژ ردیف های اول تا پنجم به ترتیب برابر با ۷۱/۱۵ V، ۵۱/۹۹ V، ۵۲/۲۳ V، ۳۳/۵۴ V، ۸۹/۸۴ V شده است.

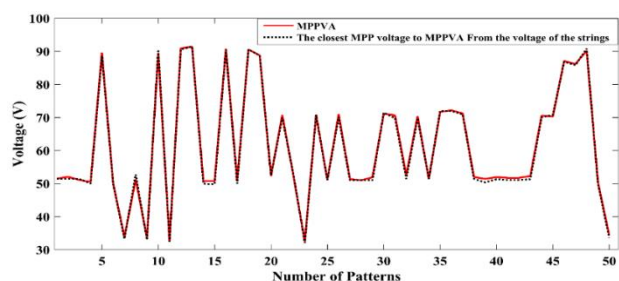
اختلاف میان پیک سرتاسری آرایه کل و نزدیک ترین پیک از میان پیک های سرتاسری تک تک ردیف ها که پیک سرتاسری ردیف چهارم است برابر با ۰/۴۸ V می باشد. باتوجه به شبیه سازی انجام شده می توان این ادعا را کرد که پیک سرتاسری آرایه PV کل در نزدیکی پیک سرتاسری یکی از ردیف های آرایه می باشد. برای بررسی بیشتر این ادعا، آرایه PV نشان داده شده در شکل ۵ به ازای ۵۰ الگوی تابشی مختلف که به صورت تصادفی انتخاب شده اند، شبیه سازی شده است. نتایج شبیه سازی این ۵۰ الگوی تابشی در شکل ۷ قابل مشاهده می باشد.

در شکل ۷، MPPVA ولتاژ نقطه حداکثر توان آرایه کل است که با نمودار پرنک رسم شده است و نمودار نقطه چین، نزدیک ترین ولتاژ GMPP از میان ۵ ولتاژ GMPP مربوط به ردیف آرایه ها، به ولتاژ GMPP آرایه کل می باشد. برای بررسی دقیق تر شبیه سازی انجام شده به ازای ۵۰ الگوی تابشی، در شکل ۸ مقدار خطا میان ولتاژ GMPP آرایه کل و ولتاژ GMPP از میان ۵ ولتاژ GMPP مربوط به ردیف آرایه ها، نشان داده شده است.

همان طور که در شکل ۸ مشاهده می شود، حداکثر خطای موجود، زیر ۲/۵٪ می باشد. همچنین متوسط خطا برابر با ۰/۸۹٪ شده است.



شکل ۶: نتایج شبیه سازی آرایه PV نشان داده شده در شکل ۵ به ازای الگوی تابشی جدول ۲



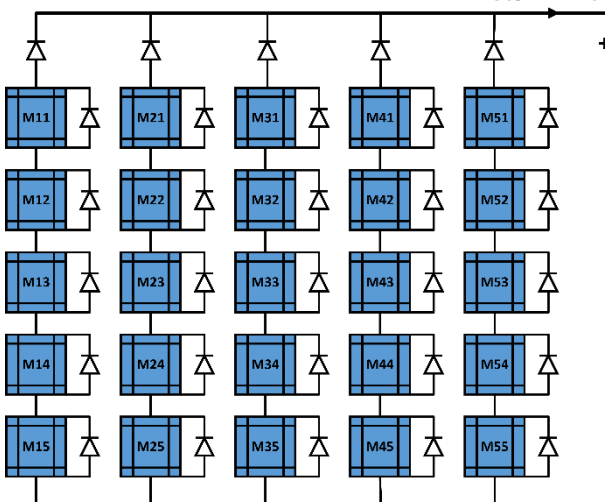
شکل ۷: نتیجه شبیه سازی آرایه PV شکل ۵ به ازای ۵۰ الگوی تابشی مختلف

ولتاژ GMPP تمامی ردیف آرایه های موجود در آرایه PV، در گام بعدی رابطه میان GMPP تک تک ردیف ها و GMPP آرایه کل به دست خواهد آمد.

۴-۲- استخراج ارتباط میان ولتاژ GMPP آرایه PV و ولتاژ GMPP ردیف آرایه ها

برای پی بردن به ارتباط میان ولتاژ GMPP آرایه PV و ولتاژ های GMPP به دست آمده برای ردیف ها، یک آرایه PV شامل ۵ ردیف آرایه که هر ردیف آرایه نیز شامل ۵ ماژول سری شده مطابق شکل ۵ می باشد، شبیه سازی شده و مورد بررسی قرار گرفته است.

آرایه PV نشان داده شده در شکل ۵ به این صورت شبیه سازی شده است که ابتدا جریان خروجی آرایه کل نسبت به ولتاژ خروجی در نظر گرفته شده است. سپس جریان هر ردیف نسبت به ولتاژ خروجی آرایه در نظر گرفته شده و شبیه سازی صورت گرفته است. نتایج این شبیه سازی به ازای الگوی تابشی در نظر گرفته شده مطابق جدول ۱ در شکل ۶ قابل مشاهده است. در جدول ۲ تابش های $(G_{11}, G_{12}, \dots, G_{55})$ به ترتیب مربوط به ماژول های $(M_{11}, M_{12}, \dots, M_{55})$ هستند.



شکل ۵: آرایه PV شامل ۵ ردیف آرایه، هر ردیف آرایه شامل ۵ ماژول سری شده

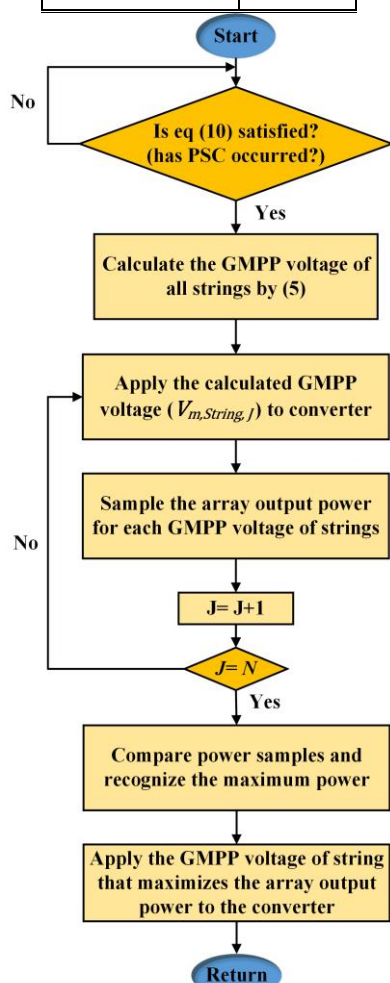
جدول ۱: الگوی تابشی در نظر گرفته شده برای شبیه سازی آرایه PV شکل ۵

String number	Irradiance (W/m^2)				
۱	$G_{11} = 1000$	$G_{12} = 1000$	$G_{13} = 1000$	$G_{14} = 700$	$G_{15} = 700$
۲	$G_{21} = 100$	$G_{22} = 100$	$G_{23} = 1000$	$G_{24} = 600$	$G_{25} = 100$
۳	$G_{31} = 500$	$G_{32} = 200$	$G_{33} = 200$	$G_{34} = 600$	$G_{35} = 900$
۴	$G_{41} = 800$	$G_{42} = 700$	$G_{43} = 100$	$G_{44} = 100$	$G_{45} = 1000$
۵	$G_{51} = 900$	$G_{52} = 800$	$G_{53} = 700$	$G_{54} = 300$	$G_{55} = 600$

ولتاژ ورودی مبدل و ولتاژ GMPP استفاده شده است. پارامترهای طراحی شده برای مبدل بوست در جدول ۲ قابل مشاهده می باشد.

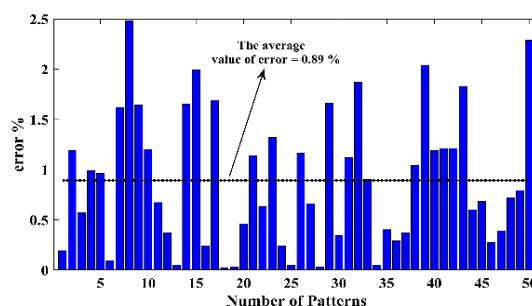
جدول ۲: پارامترهای طراحی شده برای مبدل dc-dc بوست

Designed Parameters	Value
R_L	$22/53 \Omega$
C_o	$200 \mu F$
C_i	$200 \mu F$
L	2 mH
f_s	20 kHz
P_{nam}	$626/43 \text{ W}$
V_{nam}	$59/4 \text{ V}$
I_{nam}	$10/52 \text{ A}$



شکل ۹: فلوجارت مربوط به روش پیشنهادی برای ردیابی GMPP آرایه PV تحت شرایط سایه جزئی

کنترلر ولتاژ به کاررفته شده در این کار از نوع کنترلر خطی k-factor می باشد [۲۷] که تابع تبدیل آن در (۱۱) آورده شده است. همچنین جدول ۳ ضرایب طراحی شده برای کنترل کننده را نشان می دهد.



شکل ۸: خطای موجود میان ولتاژ GMPP آرایه کل و نزدیک ترین ولتاژ GMPP از میان ولتاژ ردیف آرایه ها

برای تشخیص سایه جزئی شرط ارائه شده در رابطه (۱۰) دائماً توسط کنترل کننده بررسی می شود. باید به این نکته توجه داشت که با تغییر تابش ماژول های موجود در آرایه، توان، ولتاژ و جریان خروجی آرایه تغییر خواهد کرد.

$$|V_n - V_{n-1}| > V_{threshold} \quad (10)$$

در رابطه (۱۰) با مقایسه ولتاژ آرایه در هر لحظه (V_n) با ولتاژ لحظه گذشته (V_{n-1}) و اعمال مقدار ولتاژ آستانه ($V_{threshold}$) برابر با $1/5 \text{ V}$ ، تشخیص داده می شود که سایه جزئی رخ داده است [۲۶].

باتوجه به نتایج حاصل شده از شبیه سازی ۵۰ الگوی تابشی برای آرایه شامل ۵ ردیف موازی، در این مقاله برای ردیابی GMPP، الگوریتم ارائه شده در فلوجارت شکل ۹ پیشنهاد شده است. در گام نخست رابطه (۱۰) توسط کنترل کننده بررسی می شود تا رخ دادن سایه جزئی که ناشی از تغییرات تابش است، تشخیص داده شود. در گام دوم، ولتاژ GMPP تک ردیف ها محاسبه می شود. در گام سوم، ولتاژ GMPP ردیف اول به مبدل اعمال می شود. در گام چهارم، از توان خروجی آرایه نمونه برداری شده و ذخیره می شود. مراحل گفته شده در گام سوم و چهارم به ازای تمامی ردیف آرایه ها تکرار می شود. در گام پنجم، توان های نمونه برداری شده باهم مقایسه شده و حداکثر توان تشخیص داده می شود. در گام آخر، ولتاژ GMPP ردیفی که حداکثر توان را در خروجی آرایه کل ایجاد می کند به عنوان ولتاژ GMPP آرایه به مبدل اعمال شده و مبدل در آن نقطه کاری عمل می کند.

۵- نتایج شبیه سازی و تحلیل نتایج

برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی برای ردیابی نقطه حداکثر توان، از یک مبدل الکترونیک قدرت dc-dc بوست^۶ به همراه کنترل کننده ولتاژ ورودی مبدل استفاده شده است. از آنجایی که خروجی الگوریتم ردیابی نقطه حداکثر توان ولتاژ GMPP می باشد، از این رو برای این که ولتاژ ورودی مبدل برابر با ولتاژ GMPP تخمین زده شده توسط الگوریتم پیشنهادی باشد از یک کنترل کننده ولتاژ برای صفر کردن خطای میان

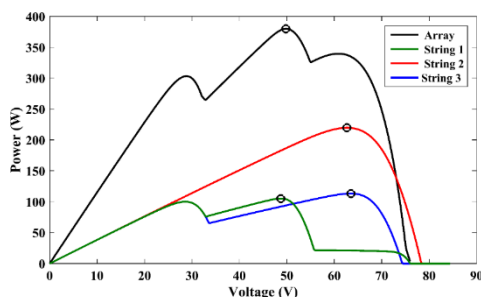
به ازای ولتاژ GMPP ردیف اول نمونه برداری شده و این توان نمونه برداری شده ذخیره می شود. ولتاژ GMPP ردیف های دوم و سوم نیز به مبدل اعمال شده و از توان خروجی آرایه به ازای این توان ها نمونه برداری شده است.

در مرحله بعد سه توان نمونه برداری شده باهم مقایسه می شوند. بعد از تشخیص حداکثر توان، ولتاژ GMPP ردیف آرایه ای که بیشترین توان را در خروجی آرایه ایجاد می کند. به عنوان ولتاژ GMPP آرایه PV کل به مبدل اعمال شده و مبدل در این نقطه کاری عمل می کند.

جدول ۴: الگوی تابشی در نظر گرفته شده برای شبیه سازی سیستم

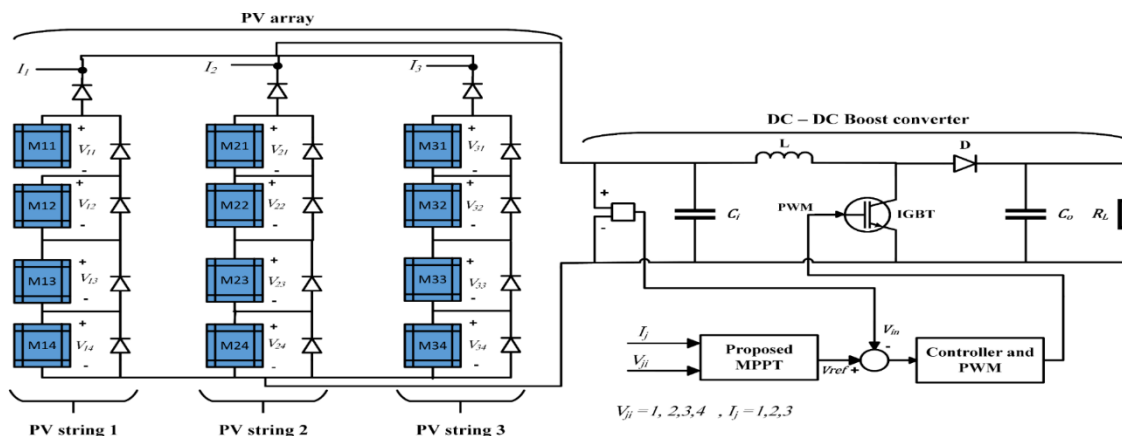
نشان داده شده در شکل ۱۰

String number	Irradiance (W/m^2)			
۱	$G_{11} = 1000$	$G_{12} = 1000$	$G_{13} = 600$	$G_{14} = 100$
۲	$G_{21} = 1000$	$G_{22} = 1000$	$G_{23} = 1000$	$G_{24} = 1000$
۳	$G_{31} = 1000$	$G_{32} = 1000$	$G_{33} = 500$	$G_{34} = 500$



شکل ۱۱: منحنی P-V مربوط به آرایه نشان داده شده در شکل ۱۰ با

در نظر گرفتن الگوی تابشی جدول ۴



شکل ۱۰: سیستم کلی شبیه سازی شده شامل مبدل بوست، آرایه PV، سنسورهای جریان و ولتاژ و بخش کنترلی

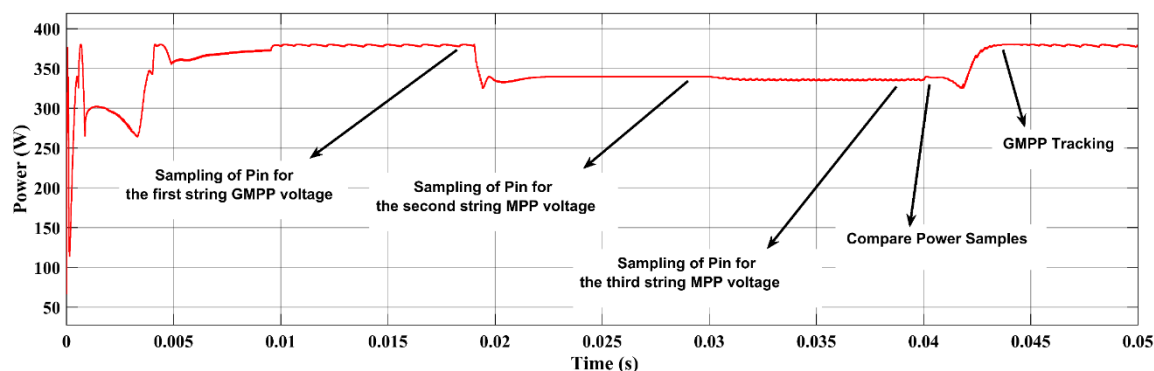
$$G_c(s) = \frac{k_c(1+s/\omega_z)^2}{s(1+s/\omega_p)^2} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، k_c بهره dc کنترل کننده، ω_z و ω_p نیز به ترتیب فرکانس صفر و فرکانس قطب برحسب rad/s هستند.

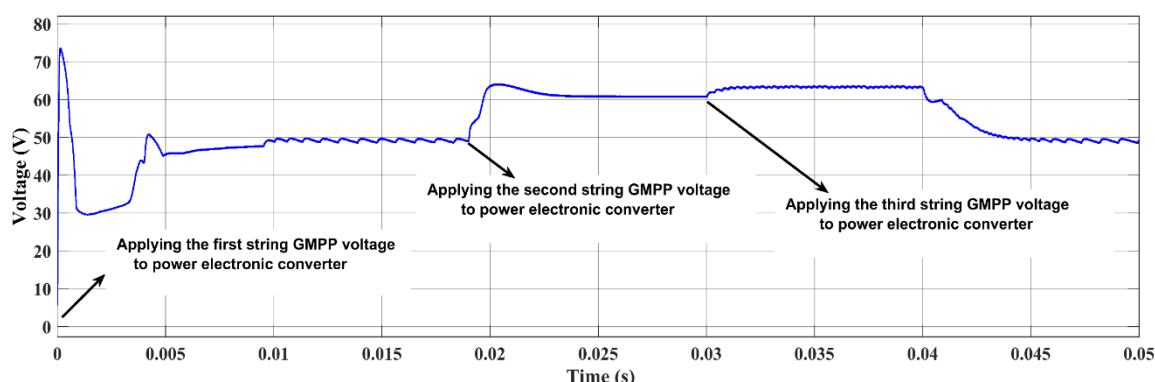
جدول ۳: ضرایب طراحی شده برای کنترل کننده k-factor

Designed Parameters	Value
f_c	۲ kHz
ϕ_{boost}	۱۵۰
k_{boost}	۷/۵۹
f_z	۰/۲۶۳ kHz
f_p	۱۵/۱۸ kHz
k_c	۹/۷

برای بررسی عمل کرد روش پیشنهادی آرایه PV به صورت ۳ ردیف موازی که هر ردیف شامل ۴ ماژول سری است، شبیه سازی شده است. سیستم کلی شبیه سازی شامل آرایه PV، مبدل بوست، سنسورهای جریان و ولتاژ و بخش کنترلی در شکل ۱۰ آورده شده است. منحنی P-V مربوط به آرایه نشان داده شده در شکل ۱۰ با در نظر گرفتن الگوی تابشی جدول ۴ در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۱۱ قابل مشاهده است GMPP آرایه کل در نزدیکی یکی از GMPP ردیف آرایه ها می باشد. نتیجه شبیه سازی آرایه PV نشان داده شده در شکل ۱۰ با در نظر گرفتن الگوی تابشی جدول ۴ در شکل ۱۲، الف و ب) نشان داده شده است. نتیجه شبیه سازی آرایه PV نشان داده شده در شکل ۱۰ با در نظر گرفتن الگوی تابشی جدول ۴ در شکل ۱۲، الف و ب) نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۱۲ قابل مشاهده است، ابتدا ولتاژ GMPP ردیف اول به مبدل اعمال شده است. سپس از توان خروجی آرایه



(الف)



(ب)

شکل ۱۲: نتیجه شبیه‌سازی آرایه PV نشان داده شده در شکل ۱۰، (الف) شکل موج توان خروجی آرایه، (ب) شکل موج توان خروجی آرایه

و [۱۷] به ترتیب برابر با ۰/۷۹٪، ۵/۰۵٪ و ۶/۹۴٪ می‌باشد. همچنین میانگین زمان ردیابی در این مقایسه برای روش پیشنهادی، [۱۹] و [۱۷] به ترتیب ۰/۰۴۶ S، ۰/۱۲۶ S و ۰/۰۱۵ S می‌شود.

جدول ۵: الگوهای تابشی در نظر گرفته شده برای ردیابی GMPP در آرایه نشان داده شده در شکل ۱۰

Patterns	Irradiance ($\frac{W}{m^2}$)			
Pattern ۱	$G_{11} = 1000$	$G_{12} = 1000$	$G_{13} = 600$	$G_{14} = 100$
	$G_{21} = 1000$	$G_{22} = 1000$	$G_{23} = 1000$	$G_{24} = 1000$
	$G_{31} = 1000$	$G_{32} = 1000$	$G_{33} = 100$	$G_{34} = 100$
Pattern ۲	$G_{11} = 600$	$G_{12} = 100$	$G_{13} = 1000$	$G_{14} = 1000$
	$G_{21} = 500$	$G_{22} = 900$	$G_{23} = 900$	$G_{24} = 1000$
	$G_{31} = 1000$	$G_{32} = 1000$	$G_{33} = 1000$	$G_{34} = 100$
Pattern ۳	$G_{11} = 1000$	$G_{12} = 1000$	$G_{13} = 100$	$G_{14} = 100$
	$G_{21} = 900$	$G_{22} = 900$	$G_{23} = 200$	$G_{24} = 200$
	$G_{31} = 1000$	$G_{32} = 1000$	$G_{33} = 800$	$G_{34} = 400$
Pattern ۴	$G_{11} = 1000$	$G_{12} = 500$	$G_{13} = 1000$	$G_{14} = 100$
	$G_{21} = 1000$	$G_{22} = 800$	$G_{23} = 900$	$G_{24} = 500$
	$G_{31} = 1000$	$G_{32} = 900$	$G_{33} = 800$	$G_{34} = 100$

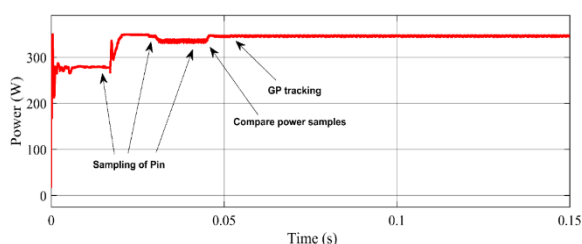
برای بررسی بیش‌تر عمل‌کرد روش پیشنهادی، الگوهای تابشی مختلفی مطابق جدول ۵ در نظر گرفته شده و برای آرایه PV شکل ۱۰ شبیه‌سازی شده‌اند. همچنین روش پیشنهادی از نظر دقت و سرعت ردیابی نقطه حداکثر توان با روش‌های ارائه شده در [۱۹] و [۱۷] مقایسه شده‌است. نتایج این بخش از شبیه‌سازی و مقایسه ۳ روش مذکور در جدول ۶ ارائه شده‌است. در جدول ۶، V_{act} ولتاژ واقعی GMPP، P_{act} حداکثر توان قابل دسترسی، $V_{est, mpp}$ ولتاژ تخمین زده شده، P_{mpp} حداکثر توان ردیابی شده، E_{EV} خطا در تخمین ولتاژ GMPP و E_{PT} خطا در ردیابی حداکثر توان می‌باشد. به ترتیب از روابط (۱۲) و (۱۳) به دست می‌آیند. همچنین زمان ردیابی توان بیشینه را نشان می‌دهد.

$$E_{VE} = \frac{|V_{est, mpp} - V_{act}|}{V_{act}} \times 100 \quad (12)$$

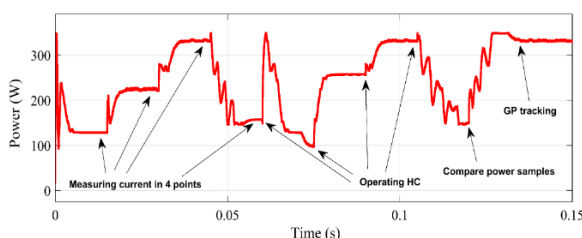
$$E_{PT} = \frac{|P_{mpp} - P_{act}|}{P_{act}} \times 100 \quad (13)$$

همان‌طور که در جدول ۶ قابل مشاهده است حداکثر خطای روش پیشنهادی و روش‌های ارائه شده در [۱۹] و [۱۷] تخمین ولتاژ GMPP، به ترتیب ۳/۲۲٪، ۸/۲۸٪ و ۱۲/۹۳٪ شده‌است. حداکثر خطا در ردیابی توان بیشینه برای روش پیشنهادی و روش‌های ارائه شده در [۱۹]

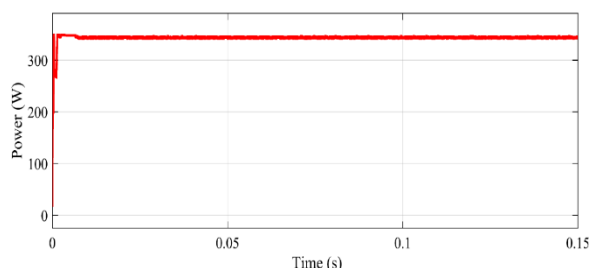
روش [۱۷] را نشان می‌دهد. در این روش به دلیل این که تمامی محاسبات به وسیله معادلات صریح در داخل کنترل کننده صورت می‌گیرد، سرعت ردیابی بسیار بالا می‌باشد. مطابق شکل ۱۴ زمان ردیابی توسط روش پیشنهادی، روش [۱۹] و روش [۱۷] به ترتیب برابر با ۰/۰۵۲، ۰/۱۳۶ و ۰/۰۱ شده است. همچنین خطا در ردیابی توان بیشینه برای روش پیشنهادی، روش [۱۹] و [۱۷] به ترتیب ۰/۵۱٪، ۴/۷۹٪ و ۱/۶۵٪ می‌باشد.



(الف)



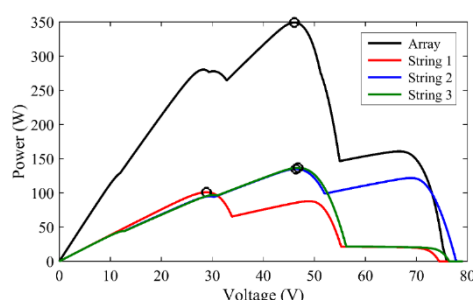
(ب)



(ج)

شکل ۱۴: شکل موج توان خروجی آرایه PV نشان داده شده در شکل ۱۰ به ازای الگوی تابشی ۴ از جدول ۶، الف) توان ردیابی شده به وسیله روش پیشنهادی (ب) توان ردیابی شده به وسیله روش ارائه شده در [۱۹]، ج) توان ردیابی شده به وسیله روش ارائه شده در [۱۷].

شکل ۱۳ منحنی P-V مربوط به آرایه شکل ۱۰ به ازای الگوی تابشی ۴ در جدول ۵ می‌باشد. همان طور که در شکل ۱۳ قابل مشاهده است، ولتاژ GMPP ردیف یک ۲۸/۸۴ V و ولتاژ GMPP ردیف های دوم و سوم به ترتیب برابر با ۴۶/۳۷ V و ۴۶/۸۲ V شده است. از طرفی ولتاژ GMPP آرایه کل برابر ۴۶/۰۸ V است که بسیار نزدیک به ولتاژ GMPP ردیف دوم می‌باشد. با توجه به الگوریتم پیشنهادی برای ردیابی توان بیشینه، هر ۳ ولتاژ GMPP مربوط به ۳ ردیف وجود در آرایه به مبدل اعمال شده و توان خروجی آرایه به ازای این ولتاژها نمونه برداری و مقایسه می‌شوند. در نهایت ولتاژی که بیشترین توان را در خروجی آرایه به دست دهد، به عنوان ولتاژ GMPP آرایه کل انتخاب خواهد شد. شکل ۱۴ الف) شکل موج توان ردیابی شده در خروجی آرایه شکل ۱۰ به ازای الگوی تابشی ۴ از جدول ۵ به وسیله روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. شکل ۱۴ ب) توان ردیابی شده توسط روش [۱۹] را نشان می‌دهد. در این روش به دلیل نیاز به اندازه گیری جریان به ازای ولتاژهای مختلف برای آگاهی از تعداد پیک های منحنی P-V زمان ردیابی توان بیشینه افزایش یافته است. در این روش بعد از تشخیص تعداد پیک های منحنی P-V و طول هر گام در منحنی I-V ولتاژهای پیشنهادی برای هر پیک توسط الگوریتم تپه نوردی (HC) به مبدل اعمال شده و بعد از نمونه برداری از توان خروجی آرایه به ازای ولتاژهای مذکور و مقایسه توان های نمونه برداری شده، توان بیشینه و در نهایت ولتاژ GMPP تشخیص داده می‌شود.



شکل ۱۳: منحنی های P-V آرایه شکل ۱۰ به ازای الگوی تابشی ۴ از جدول ۵

همچنین به دلیل این که در روش [۱۹] ولتاژ تمامی پیک های منحنی P-V به مبدل اعمال می‌شود، در صورت افزایش تعداد سطوح ولتاژ و در نتیجه تعداد پیک های منحنی P-V زمان ردیابی و در نهایت سرعت ردیابی توان بیشینه کاهش می‌یابد. شکل ۱۴ ج) توان ردیابی شده توسط

جدول ۶: نتایج شبیه سازی و مقایسه دقت و سرعت روش پیشنهادی با روشهای [۱۹] و [۱۷] به ازای الگوهای تابشی ارائه شده در جدول ۵

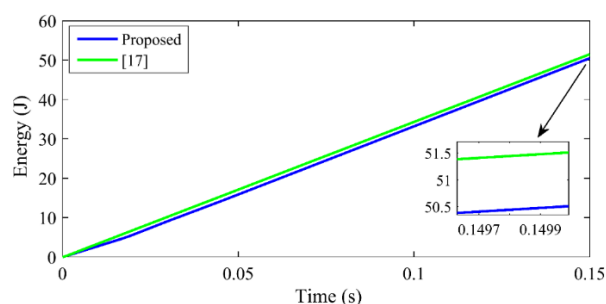
Shading Pattern	V_{act} (V)	P_{act} (W)	Tracking Methods	$V_{est, mpp}$ (V)	P_{mpp} (W)	E_{EV} %	E_{PT} %	Tracking Time (sec)
Pattern ۱	۴۹/۷۹	۳۰۴/۰۹	Proposed	۴۹/۴	۳۰۳/۳	۰/۷۸	۰/۲۶	۰/۰۴
			[۱۹]	۵۰/۶۴	۳۰۱/۴	۰/۸۸	۱/۷	۰/۱۲۴
			[۱۷]	۵۱/۷۸	۲۹۲/۳۱	۳/۹۹	۳/۸۷	۰/۰۱۸
Pattern ۲	۴۴/۷۳	۳۹۴/۰۳	Proposed	۴۶/۱۷	۳۹۱/۲	۳/۲۲	۰/۷۲	۰/۰۴۵
			[۱۹]	۴۲/۲۲	۳۸۶/۷	۵/۶۱	۱/۸۶	۰/۱۳۴

			[۱۷]	۴۶/۱۴	۳۹۱/۳	۳/۱۵	۰/۶۹	۰/۰۱۱
Pattern ۳	۲۸/۰۶	۲۸۳/۵۴	Proposed	۲۸/۸۱	۲۸۱/۳	۲/۶۷	۰/۷۹	۰/۰۵
			[۱۹]	۳۰/۳۸	۲۶۹/۲	۸/۲۶	۵/۰۵	۰/۱۱
			[۱۷]	۳۱/۶۹	۲۶۳/۸۵	۱۲/۹۳	۶/۹۴	۰/۰۲۲
Pattern ۴	۴۶/۰۸	۳۴۹/۲۷	Proposed	۴۷/۰۲	۳۴۷/۵	۲/۰۴	۰/۵۱	۰/۰۵۲
			[۱۹]	۴۲/۲۶	۳۳۲/۵۲	۸/۲۸	۴/۷۹	۰/۱۳۶
			[۱۷]	۴۷/۶۹	۳۴۳/۵	۳/۴۹	۱/۶۵	۰/۰۱

مراجع

- [1] M. A. G. De Brito, L. Galotto, L. P. Sampaio, G. d. A. e Melo, and C. A. Canesin, "Evaluation of the main MPPT techniques for photovoltaic applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 3, pp. 1156-1167, 2013.
- [2] T. Eswam and P. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439-449, 2007.
- [3] B. Subudhi and R. Pradhan, "A comparative study on maximum power point tracking techniques for photovoltaic power systems," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 1, pp. 89-98, 2013.
- [4] A. Mohapatra, B. Nayak, P. Das, and K. B. Mohanty, "A review on MPPT techniques of PV system under partial shading condition," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 80, pp. 854-867, 2017.
- [5] M. Ramli, S. Twaha, K. Ishaque, and Y. A. Al-Turki, "A review on maximum power point tracking for photovoltaic systems with and without shading conditions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 144-159, 2017.
- [6] L. L. Jiang, D. Maskell, and J. C. Patra, "A novel ant colony optimization-based maximum power point tracking for photovoltaic systems under partially shaded conditions," *Energy and Buildings*, vol. 58, pp. 236-227, 2013.
- [7] S. Mohanty, B. Subudhi, and P. K. Ray, "A new MPPT design using grey wolf optimization technique for photovoltaic system under partial shading conditions," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 7, no. 1, pp. 181-188, 2016.
- [8] K. Sundareswaran, S. Peddapat, and S. Palani, "MPPT of PV systems under partial shaded conditions through a colony of flashing fireflies," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 29, no. 2, pp. 463-472, 2014.
- [9] K. Sundareswaran, P. Sankar, P. 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, no. 1, pp. 198-209, 2015.
- [10] Y. Mahmoud and E. F. El-Saadany, "Fast power peaks estimator for partially shaded PV systems," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 31, no. 1, pp. 206-217, 2016.
- [11] A. Maki and S. Valkealahti, "Effect of photovoltaic generator components on the number of MPPs under partial shading conditions," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 28, no. 4, pp. 1008-1017, 2013.
- [12] A. Maki and S. M. Valkealahti, "Power losses in long string and parallel-connected short strings of series-connected silicon-based photovoltaic modules due to partial shading conditions," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 27, no. 1, pp. 173-183, 2012.
- [13] E. Paraskevadaki and A. Papathanassiou, "Evaluation of MPP voltage and power of mc-Si PV modules in partial shading

روش پیشنهادی و روش ارائه شده در [۱۷] از نظر ردیابی توان عمل کرد مطلوبی داشته و دقت ردیابی آن‌ها نزدیک به هم می‌باشد. از این رو، توانایی روش پیشنهادی و روش [۱۷] در استخراج انرژی از آرایه به‌ازای الگوی تابشی ۴ از جدول ۶ در شکل ۱۵ آورده شده است. همانطور که از این شکل مشاهده می‌شود، مقدار انرژی حاصل از آرایه به‌وسیله روش پیشنهادی و روش [۱۷] بسیار نزدیک به هم می‌باشند.



شکل ۱۵: شکل موج‌های انرژی استخراج شده از آرایه به‌وسیله روش پیشنهادی و روش ارائه شده در [۱۷]

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش جدیدی برای ردیابی نقطه حداکثر توان سرتاسری در آرایه PV تحت شرایط سایه جزئی ارائه شد. روش پیشنهادی در این مقاله بدون نیاز به حل عددی معادلات غیرخطی مربوط به آرایه، ولتاژ GMPP ردیف آرایه‌های موجود در آرایه را تخمین می‌زند. همچنین براساس شبیه‌سازی‌های انجام شده این نتیجه حاصل شد که ولتاژ GMPP آرایه PV در نزدیکی ولتاژ GMPP یکی از ردیف آرایه‌هایی است که در داخل آرایه موازی شده‌اند. بر این اساس، در این مقاله الگوریتمی برای ردیابی GMPP در یک آرایه PV شامل چندین ردیف آرایه موازی شده ارائه شد. نتایج ردیابی GMPP در یک آرایه PV به ازای الگوهای تابشی مختلف نشان‌دهنده دقت و سرعت قابل قبول روش پیشنهادی می‌باشد. حداکثر خطا در تخمین ولتاژ GMPP به‌ازای الگوهای تابشی مختلف زیر ۴٪ و خطا در ردیابی حداکثر توان زیر ۱٪ شده است. همچنین در شبیه‌سازی‌های انجام شده میانگین زمان ردیابی توان بیشینه برابر با ۰/۰۴۶ S می‌باشد.

- [۲۰] سید مجید هاشم‌زاده، ردیابی نقطه حداکثر توان در ژنراتورهای فوتوولتائیک تحت شرایط سایه جزئی، کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، صفحه ۱-۹۴، ۱۳۹۶.
- [21] M. Hejri and H. Mokhtari, "On the comprehensive parametrization of the photovoltaic (PV) cells and modules," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 7, no. 1, pp. 250-258, 2017.
- [22] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. Ruppert Filho, "Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 5, pp. 1198-1208, 2009.
- [23] J. Gow and C. M. Manning, "Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies," *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, vol. 146, no. 2, pp. 193-200, 1999.
- [24] M. Hejri, H. Mokhtari, M. R. Azizian, M. Ghandhari, and L. Soder, "On the parameter extraction of a five-parameter double-diode model of photovoltaic cells and modules," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 4, no. 3, pp. 915-923, 2014.
- [25] J. P. Ram and N. Rajasekar, "A novel flower pollination based global maximum power point method for solar maximum power point tracking," *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016.
- [26] C. Manickam, G. Raman, G. R. Raman, S. I. Ganesan, and N. Chilakapati, "Efficient global maximum power point tracking technique for a partially shaded photovoltaic string," *IET Power Electronics*, vol. 9, no. 14, pp. 2637-2644, 2016.
- [27] N. Mohan, *First Course on Power Electronics*, Minnesota Power Electronics Research & Education, 2009.

conditions," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 3, pp. 923-932, 2011.

- [14] H. Patel and V. Agarwal, "MATLAB-based modeling to study the effects of partial shading on PV array characteristics," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, no. 1, pp. 302-310, 2008.
- [15] K. Chen, S. Tian, Y. Cheng, and L. Bai, "An improved MPPT controller for photovoltaic system under partial shading condition," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, no. 3, pp. 978-985, 2014.
- [16] E. I. Batzelis, I. Routsolias, and S. A. Papathanassiou, "An explicit PV string model based on the lambert W function and simplified MPP expressions for operation under partial shading," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, no. 1, pp. 301-312, 2014.
- [17] 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, no. 2, pp. 499-508, 2015.
- [18] S. Moballegh and J. Jiang, "Modeling, prediction, and experimental validations of power peaks of PV arrays under partial shading conditions," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, no. 1, pp. 293-300, 2014.
- [19] A. Ramyar, H. Iman-Eini, and S. Farhangi, "Global maximum power point tracking method for photovoltaic arrays under partial shading conditions," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 4, pp. 2855-2864, 2017.

زیرنویس‌ها

¹Global Maximum Power Point

²Photovoltaic

³Partial Shading Condition

⁴Search Based

⁵Hill Climbing

⁶Boost