

کاهش اثر سایه‌های متقابل بر اساس پیکربندی مجدد آرایه‌های خورشیدی با هدف کاهش تلفات اُهمی

بابک یاری^۱، رضا قندهاری^۲، علی بدری^۳، مجید حروفیانی^۴

۱- دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران ایران babakyari73.by@gmail.com

۲- دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران ایران r_ghandehari@sr.u.ac.ir

۳- دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران ایران ali.badri@sr.u.ac.ir

۴- شرکت برق منطقه‌ای خراسان مشهد ایران m.horoufiyani@krec.com

سوخت‌ها از انرژی‌های تجدیدپذیر که مهم‌ترین آن‌ها انرژی خورشید و انرژی باد است، بهره‌برداری می‌کنند. انرژی خورشیدی بزرگترین منبع انرژی‌های تجدیدپذیر است که به صورت رایگان در دسترس همه قرار دارد [۱]. اما در بهره‌برداری از این انرژی موانعی فنی و اقتصادی خاصی وجود دارد که بازده سیستم‌های فتوولتائیک را کاهش می‌دهد و به مرور زمان باعث وارد شدن خسارت‌های فیزیکی به این سیستم‌ها می‌شوند [۲]. یکی از مهم‌ترین این عوامل، سایه اندازی آرایه‌های خورشیدی بر روی همدیگر به دلیل نزدیک بودن ستون‌های نصب آن‌ها می‌باشد. این سایه‌ها با ایجاد ناهمجوری جریان تولیدی بین ردیف‌های مختلف آرایه سبب کاهش بازده سیستم فتوولتائیک حدود ۵ تا ۱۰ درصد در ساختمان‌ها و ۳ تا ۶ درصد در مزارع خورشیدی در طول سال می‌شود [۳-۵].

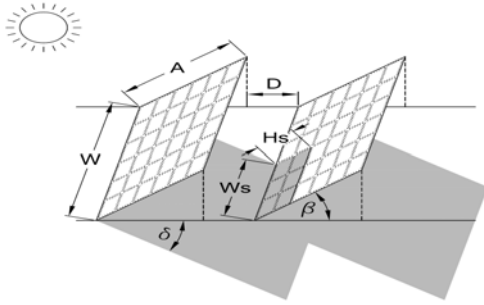
آرایه‌های خورشیدی از آرایه $m \times n$ ماژول تشکیل شده‌اند که در آرایه‌های خورشیدی امروزی به صورت سری و یا سری-موازی به یکدیگر متصل می‌شوند. چهار نوع متفاوت از آرایش ماژول‌های آرایه‌های سیستم فتوولتائیک وجود داد که عبارت اند از: SP، BL، TCT و HC. طبق بررسی‌های صورت گرفته آرایش TCT نسبت به بقیه آرایش‌ها در مواقع وجود سایه بازده بهتری دارد و پیاده‌سازی آن نیز ساده‌تر می‌باشد [۶]. تاکنون روش‌های مختلفی مانند استفاده از دیود بای پس، راهکارهای الکترونیک قدرت، پیکربندی مجدد ثابت و پیکربندی مجدد دینامیکی جهت کاهش اثر سایه‌ها ارائه شده است. در این میان پیکربندی مجدد ثابت یک روش موثر و مقرون به صرفه جهت کاهش اثرات سایه‌های متقابل است که با جابجایی مکان فیزیکی ماژول‌ها اثر ناهمجوری در ردیف‌های مختلف آرایه خورشیدی را کاهش می‌دهد [۷-۱۰]. در [۱۱] الگوریتمی جهت کاهش آثار سایه‌های

چکیده — سایه‌های متقابل ناشی از سایه‌اندازی آرایه‌های خورشیدی بر یکدیگر در مکان‌هایی با محدودیت زمین و تمایل به تولید بیشتر باعث ایجاد تلفات زیادی در توان تولیدی نیروگاه خورشیدی می‌شود. پیکربندی مجدد آرایه‌ها برای پخش نمودن هرچه بیشتر این سایه‌های قابل پیش‌بینی از جمله راهکارهای موثر برای حل این مشکل می‌باشد. در این مقاله، روشی برای پیکربندی آرایه‌های خورشیدی با اتصالات پایه TCT با هدف پخش نمودن حداکثری سایه و نیز کاهش تلفات اُهمی اتصالات ارائه شده است. این روش ضمن کاهش اثرات سایه‌های متقابل یک طرفه، تلفات اُهمی ناشی از مقاومت سیم‌های ارتباطی بین ماژول‌های آرایه را نیز کاهش می‌دهد. مقایسه‌های انجام شده بین این روش پیکربندی پیشنهادی و نیز روش‌های مطرحی که در تابع هدف بهینه‌سازی تلفات اُهمی هادی‌های ارتباطی را لحاظ نکرده‌اند، افزایش بهره‌وری قابل توجهی را در شرایط سایه متقابل نشان می‌دهند. این نتایج برای یک سال بهره‌برداری از یک نیروگاه خورشیدی محاسبه و مقایسه شده‌اند.

واژه‌های کلیدی — آرایه خورشیدی، پیکربندی مجدد، سایه‌های متقابل، تلفات اُهمی، افزایش بهره‌وری.

۱. مقدمه

در چند دهه گذشته با پیشرفت زندگی انسان‌ها، نیاز به استفاده از انرژی الکتریکی افزایش یافته است. استفاده از سوخت‌های فسیلی برای تامین این نیاز باعث ایجاد آلودگی زیست محیطی و افزایش گازهای گلخانه‌ای شده است. در سال‌های اخیر، کشورهای زیادی برای کاهش وابستگی به این



شکل ۱- سایه اندازه‌ی متقابل یک طرفه آرایه‌های فتوولتائیک

با توجه به شکل (۱) در صورتی که زاویه نصب صفحات رو به جنوب و شیب آن‌ها یکسان باشد سایه‌های یک طرفه مستطیلی شکل با ابعاد زیر خواهیم داشت [۱۰]:

$$W_s = W - (D + A \cos \beta) \frac{\sin \beta |\sin(\gamma_s - \gamma_c)|}{\tan \alpha \cos \beta + \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma_c)} \quad (1)$$

$$H_s = A \left\{ 1 - \left(\frac{D + A \cos \beta}{\left(\frac{A \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma_c)}{\tan \alpha} \right) + A \cos \beta} \right) \right\} \quad (2)$$

در روابط (۱) و (۲)، α و γ_s به ترتیب زاویه عرضی و طولی خورشید و γ_c زاویه نصب صفحات خورشیدی نسبت به خط واصل بین دو استوا می‌باشد و D فاصله بین صفحات، β شیب نصب آن‌ها، A و W ابعاد صفحات را نشان می‌دهند. به طور کلی سایه ایجاد شده در قبل از ظهر محلی در جهت خلاف طلوع خورشید و در بعد از ظهر محلی در خلاف جهت غروب خورشید بر روی آرایه ایجاد می‌گردد. ویژگی‌های اصلی این سایه متقابل یک طرفه ایجاد شده عبارت اند از:

(۱) سایه‌ها الگوی مستطیلی داشته و ابعاد آن‌ها به موقعیت خورشید در آسمان بستگی دارند.

(۲) اگر صفحات به سمت خط استوا تنظیم شده باشند ($\gamma_c = 0$) سایه ایجاد شده تمام پهنای صفحات را در ظهر می‌پوشاند ($\gamma_s = 0$). در غیر اینصورت اگر $\gamma_c \neq 0$ ، کل پهنای صفحات وقتی $\gamma_c = \gamma_s$ باشد سایه می‌شود.

(۳) اگر $\gamma_c = 0$ باشد ابعاد سایه برای تمام دوره‌های قبل و بعد از ظهر یکسان بوده و در طرف‌های مختلف آرایه قرار می‌گیرند.

متقابل یک طرفه ارائه شده است. سایه‌های یک طرفه به سایه‌هایی گفته می‌شود که اصولاً در یک سمت آرایه ایجاد می‌شود. و در [۱۲] روشی جهت پیکربندی مجدد آرایه‌هایی با ابعاد محدود (آرایه‌هایی که تعداد سطرها از تعداد ستون‌های آن بیشتر باشد) و برای پخش سایه‌های جزئی ارائه شده است. اما یکی از عیب‌هایی که در اکثر روش‌های پیکربندی مجدد ثابت آرایه شده وجود دارد عدم توجه به افزایش طول سیم‌های ارتباطی بین ماژول‌ها در جابجایی مکان فیزیکی ماژول‌ها است که باعث تلفات زیادی می‌شود.

در این مقاله پیکربندی ثابت جدیدی ارائه شده است که بر خلاف روش‌های قبلی که پیکربندی را فقط برای کاهش اثر سایه‌ها و برای آرایه‌های با ابعاد محدود ارائه کرده‌اند، ضمن توجه به کاهش تلفات ناشی از سایه‌های متقابل، تلفات اهمی ناشی از افزایش طول سیم‌کشی بین ماژول‌ها در پیکربندی مجدد را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. این راهکار در افزایش بهره‌وری از نیروگاه‌های خورشیدی با ابعاد مختلف (تعداد سطر و ستون‌های متفاوت یا مساوی) تاثیر قابل توجهی دارد و می‌تواند به افزایش تولید در واحد سطح به ویژه در ساختمان‌هایی با زمین محدود یا گران‌قیمت، منجر شود. [۱۲-۱۳].

۲. سایه‌های متقابل یک طرفه

یکی از انواع الگوهای سایه در نیروگاه‌های فتوولتائیک سایه‌اندازی ناشی از سایر آرایه‌ها یا سایه‌های متقابل یک طرفه می‌باشد. این الگوهای سایه عموماً در نیروگاه‌هایی با صفحات خورشیدی ثابت و در مکان‌هایی که با محدودیت زمین به لحاظ کمیت و قیمت رخ می‌دهد. این موضوع بخاطر کاهش بازده کلی نیروگاه با توجه به مسائل فنی و اقتصادی برای طراح نیروگاه‌ها اهمیت پیدا می‌کند. جهت تعیین ساختار الگوهای سایه‌های متقابل یک طرفه، نیاز به تعیین ابعاد سایه ایجاد شده متناسب با مختصات جغرافیایی محل نصب آرایه‌ها، موقعیت خورشید در آسمان در بازه‌های زمانی مختلف و همچنین مشخصات فیزیکی و نصبی صفحات (مانند ابعاد صفحات، زاویه نصب نسبت به محور و شیب صفحه) می‌باشد [۱۰]. شکل (۱) سایه‌اندازی آرایه‌های خورشیدی بر روی یکدیگر و الگوی سایه ایجاد شده را نشان می‌دهد.

در سیستم‌های فتوولتائیک (PV) که تعداد زیادی ستون از آرایه‌ها با فاصله کم وجود دارد اگر پهنای آرایه‌ها (W) از فاصله بین ستون‌های نصب آرایه (CW) کمتر باشد سایه در یک سمت آرایه اتفاق می‌افتد که به آن سایه متقابل یک طرفه می‌گویند [۱۱].

۴. مقاومت اهمی سیم ارتباطی بین ماژول‌ها

در روش‌هایی که تا به حال جهت کاهش اثر سایه ارائه شده است افزایش طول سیم ارتباطی بین ماژول‌ها و در نتیجه آن افزایش تلفات اهمی در نظر گرفته نشده است. این افزایش طول هادی‌ها قابل توجه است و لازم است برای یک چیدمان بهینه تلفات ناشی از آن لحاظ شود. پیکربندی ارائه شده در این مقاله با در نظر گرفتن طول و قطر سیم‌های ارتباطی بین ماژول‌ها انجام شده است و همانطور که در نتایج خواهیم دید این روش تا حد ممکن طول سیم و به طبع آن تلفات ناشی از عبور جریان در این هادی‌ها را کاهش می‌دهد. طول سیم را می‌توان از رابطه (۳) بدست آورد.

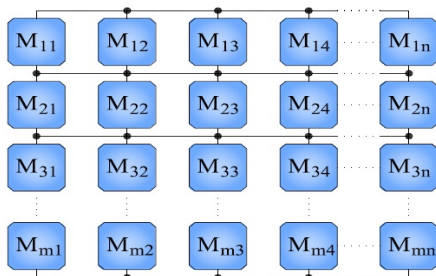
$$L = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n-1} \sqrt{(x_{i,j}^{OP} - x_{i,j+1}^{IP})^2 + (y_{i,j}^{OP} - y_{i,j+1}^{IP})^2} \quad (3)$$

در این رابطه، IP و OP، بخش ورودی و خروجی ماژول‌ها را نشان می‌دهند و همچنین رابطه مقاومت و تلفات آن به صورت زیر به دست می‌آید:

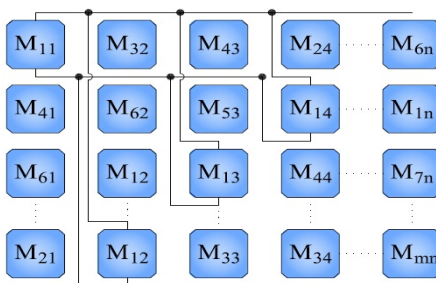
$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (4)$$

$$P_{\text{loss}} = RI^2 \quad (5)$$

در این روابط S سطح مقطع سیم و ρ مقاومت ویژه سیم مسی می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۲- آرایش TCT ماژول‌های یک آرایه خورشیدی $m \times n$:

(الف) قبل از پیکربندی، (ب) پس از پیکربندی مجدد ثابت

(۴) در نیمکره شمالی W مطابق با فاصله بین طرف راست صفحات و چپ سایه برای دوره قبل از ظهر و فاصله بین طرف چپ صفحات و راست سایه برای بعد از ظهر تعیین می‌شود و این شرایط برای نیمکره جنوبی برعکس است.

(۵) به دلیل کمترین مقدار زاویه ارتفاع در کوتاه‌ترین روز سال بالاترین مقدار HS در این روز اتفاق می‌افتد. کوتاه‌ترین روز سال ۳۰ آذر برای نیمکره شمالی و ۳۱ خرداد برای نیمکره جنوبی است. در استوا روزها در تمام سال تقریباً طول یکسانی دارند.

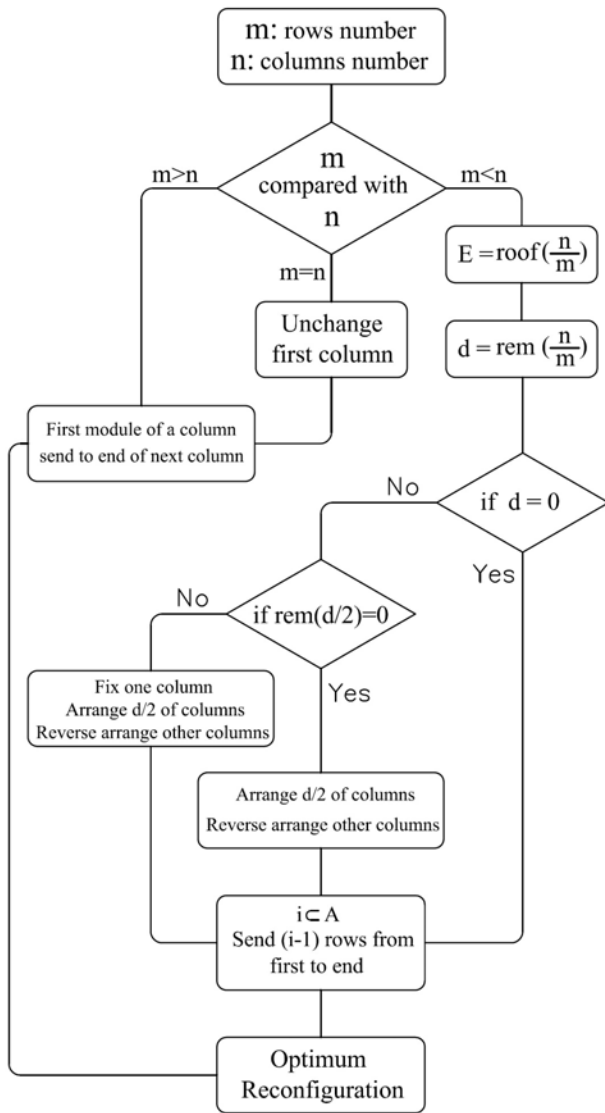
۳. پیکربندی مجدد ثابت

پیکربندی مجدد آرایه‌های خورشیدی یکی از روش‌های کاهش اثرات سایه‌ها به شمار می‌رود. هدف اصلی از انجام پیکربندی مجدد در یک آرایه، پراکنده ساختن سایه در ردیف‌های مختلف آرایش TCT و متعادل‌سازی جریان تولیدی توسط ردیف‌ها است. این متعادل‌سازی سبب کاهش اثر ناهم‌جوری و به دنبال آن سبب کاهش تلفات در آرایه می‌گردد. پیکربندی مجدد آرایه‌های خورشیدی به دو گروه پیکربندی اتصالات الکتریکی (دینامیکی) و پیکربندی مجدد محل قرارگیری ماژول‌ها در آرایه (ثابت) تقسیم می‌شود. در پیکربندی مجدد دینامیکی، با استفاده از کلید زنی ماژول‌ها متناسب با تابش دریافتی در ردیف‌های مختلف آرایه قرار می‌گیرند. اما در پیکربندی مجدد ثابت، محل فیزیکی ماژول‌ها بدون تغییر در اتصالات الکتریکی آن‌ها تغییر می‌یابند.

چینش‌های متفاوت ماژول‌ها در پیکربندی‌های مجدد سبب ایجاد نتایج مختلف در شرایط سایه می‌گردد. به عبارت دیگر در صورتی که پیکربندی به گونه‌ای صورت پذیرد که ماژول‌های سایه شده، در مسیرهای سری جریان (ردیف‌ها) بصورت یکسان پراکنده گردند در این حالت پیکربندی مجدد انجام شده مطلوب‌ترین حالت چیدمان برای رفع الگوی سایه را در برداشته و هر چه پراکندگی ماژول‌های ردیف سایه شده کمتر و تجمع در برخی از ردیف‌ها افزایش یابد پیکربندی ضعیف‌تر می‌باشد. با توجه به قابل پیش‌بینی بودن الگوی سایه‌های متقابل، طراحی پیکربندی بر مبنای این سایه‌ها می‌تواند در افزایش توان خروجی آرایه بسیار موثر باشد [۱۳-۱۲]. برای نمایش بهتر اصول پیکربندی مجدد ثابت، یک آرایه $m \times n$ قبل و بعد از پیکربندی مجدد محل قرارگیری ماژول‌ها در شکل (۲) نشان داده شده است.

نصب می‌گردند. در صورتی که ستون‌های باقی مانده بر ۲ بخش پذیر نباشند، آن تعداد که بر دو بخش پذیر است مانند قسمت قبل چینش شده و تنها یک ستون باقی می‌ماند که بدون تغییر در یک سمت آرایه قرار می‌گیرد.

فلوچارت شکل (۳) روند محاسبه مکان ماژول‌ها را مطابق آنچه گفته شد، به صورت کامل نشان می‌دهد. در شکل (۴) پیکربندی بهینه با استفاده از این روش، پیکربندی آرایش TCT ساده و پیکربندی ارائه شده در [۱۱]، برای یک آرایه ۹×۹ نشان داده شده است.



شکل ۳- فلوچارت روند پیکربندی روش پیشنهادی

۵. پیکربندی پیشنهادی آرایه‌ها

هدف از پیکربندی مجدد و پیدا نمودن پیکربندی بهینه متعادل نمودن جریان تولیدی در مسیرهای سری جریان در آرایه (ردیف‌ها) برای هر یک از الگوهای سایه متقابل می‌باشد. این کار سبب متعادل‌سازی جریان و ایجاد حداکثر ولتاژ خروجی می‌گردد. بطور کلی با یکسان در نظر گرفتن شدت تابش در تمام نقاط سایه شده، شرط پراکنده نمودن مناسب ماژول‌های سایه شده رعایت تعداد حداقل و حداکثر ماژول‌های سایه شده در هر ردیف است [۱۲-۱۳]. ضمناً، فرض بر این است که الگوی سایه ایجاد شده بر روی آرایه یک یا چند ردیف را بطور کامل فراگرفته است.

بنابراین برای آرایه‌های خورشیدی با تعداد ردیف m و تعداد ستون n جهت کاهش اثر سایه‌ها و تلفات اهمی پیکربندی مجدد ثابت بصورت سه حالت زیر ارائه می‌شود:

(۱) اگر $m=n$ باشد در اینصورت ماژول‌های ستون اول ($n=1$) را ثابت نگه داشته و برای $n-1$ ستون بعدی، ماژول اولین ردیف ستون قبل از خودش، به آخرین ردیف آن ستون انتقال می‌یابد.

(۲) اگر $m > n$ باشد در اینصورت در ستون اول، ماژول اولین ردیف آن ستون به ردیف آخر آن ستون برده می‌شود و برای $n-1$ ستون بعدی مانند حالت قبل عمل می‌شود.

(۳) اگر $m < n$ باشد، در ابتدا تعداد ماژول‌ها در هر ردیف (یا تعداد ستون-ها) بر تعداد ردیف‌ها مطابق رابطه (۶) تقسیم شده و مقدار صحیح کمتر آن انتخاب می‌شود.

$$E = \text{roof} \left(\frac{n}{m} \right) \quad (6)$$

E در رابطه (۶) تعداد ماژول‌ها (یا ستون‌های) هر زیر مجموعه است. در صورتی که باقی‌مانده تقسیم تعداد ستون‌ها به ردیف‌ها صفر شود، ستون‌ها بطور کامل در زیرمجموعه‌ها تقسیم می‌گردند و بدون تغییر در اتصالات الکتریکی، تعداد E ستون اول بدون جابجایی باقی مانده و سپس اولین ردیف E ستون دوم به ردیف آخر برده می‌شود. بطور کلی برای i زیر مجموعه E ، ردیف $(i-1)$ زیر مجموعه از ابتدا به انتها برده می‌شود. در صورتی که باقی مانده E صفر نباشد، اگر ستون‌های باقی مانده بر ۲ بخش پذیر باشند آنگاه به دو گروه تقسیم شده و با چینی بر عکس همدیگر در یک سمت آرایه

۶. بررسی نتایج شبیه‌سازی

شکل ۴- آرایه خورشیدی ۹×۹ الف) آرایش TCT ساده، ب) پیکربندی بدون در نظر گرفتن تلفات اهمی (پ) پیکربندی مجدد پیشنهادی.

فرض بر این است که هر ماژول از ۱۲ سلول سری تشکیل شده است. محیط جغرافیایی منطقه مورد مطالعه شهر تهران بوده و برای سادگی تمام روزهای سال آفتابی در نظر گرفته شده است. نقطه کار تعیین شده برای هر پیکربندی نقطه کار ماکزیمی است که از مشخصه ولتاژ-جریان آرایه بدست آمده است. در تحلیل نتایج درصد بهبود توان خروجی آرایه (MP%) در یک پیکربندی نسبت به دیگری از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۰]:

$$MP_{\%} = \frac{MP_1 - MP_2}{MP_1} \times 100 \quad (7)$$

حداقل فاصله بین آرایه‌های فتولتائیک در نیروگاه‌های خورشیدی با مشخصات فوق برای آنکه هیچ سایه‌اندازی بر روی آنها ایجاد نشود ۱٫۷ متر است. در این مقاله به دلیل در نظر گرفتن محدودیت زمین، فواصل بین آرایه-ها ۷ متر در نظر گرفته شده است. کاهش این فاصله سبب افزایش ظرفیت نصب آرایه‌ها در واحد سطح نیروگاه شده و از طرف دیگر توان تولیدی آرایه‌ها را به دلیل سایه‌اندازی کاهش می‌دهد. با فاصله در نظر گرفته شده سایه اندازی مطابق روابط (۱) و (۲) از روز ۱۹۸ ام شروع شده و تا روز ۳۵۱ ام ادامه می‌یابد. در این مقاله برای بررسی نتایج، توان تولیدی آرایه برای کل روزهای سال محاسبه شده است.

جدول ۱- مشخصات ماژول

مقدار	پارامتر
۳/۶ [w]	توان (w)
۶ [V]	ولتاژ نقطه کار ماکزیم (V _{mpp})
۶۰۰ [mA]	جریان نقطه کار ماکزیم (I _{mpp})
۷/۲ [V]	ولتاژ مدار باز (V _{oc})
۶۵۵ [mA]	جریان اتصال کوتاه (I _{sc})
۱۷۰×۱۷۰×۲/۸ [mm]	ابعاد (A×W×L)

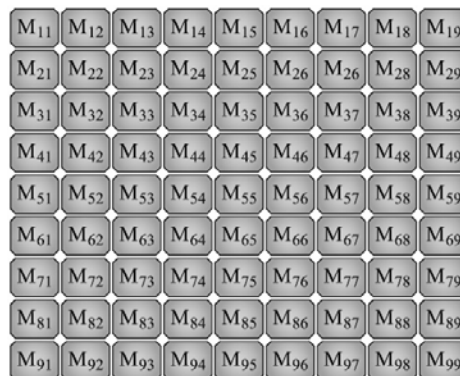
در ارزیابی سالیانه بهبود توان پیکربندی ارائه شده، توان تولیدی سه گروه آرایه خورشیدی در طول سال تعیین شده است:

(۱) گروه اول آرایه‌ای با پیکربندی TCT ساده؛

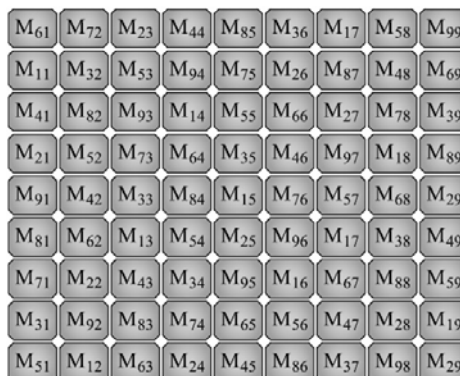
(۲) گروه دوم آرایه‌ای با پیکربندی بدون در نظر گرفتن تلفات اهمی؛

(۳) گروه سوم آرایه‌ای با طرح پیکربندی ارائه شده.

برای بررسی کارایی روش ارائه شده جهت بهبود بازده سیستم فتولتائیک در مقابل سایه‌های قابل پیش‌بینی متقابل یک طرفه، یک آرایه ۹×۹ در نظر گرفته شده است. برای نمایش بهتر نتایج، آرایش‌ها TCT در نظر گرفته شده‌اند که نسبت به آرایش‌های سری به مراتب بازده بهتری را در شرایط سایه به همراه دارند. کلیه برنامه‌نویسی‌ها و شبیه‌سازی‌ها در نرم افزار متلب و سیمولینک پیاده سازی شده‌اند. همچنین مشخصات ماژول های مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها و شرایط استاندارد (شدت تابش ۱۰۰۰ وات بر متر مربع و ۲۵ درجه سلسیوس) در جدول (۱) ارائه شده است.



(الف)



(ب)



(پ)

نتیجه گیری

در این مقاله برای کاهش اثرات سایه‌های متقابل یکطرفه در نیروگاه‌های خورشیدی احداث شده در زمین‌های محدود یا گران قیمت، روش پیکربندی جدیدی ارائه گردید. در روش مذکور پیکربندی مجدد بدون تغییر در اتصال الکتریکی ماژول‌ها و براساس حداکثر پراکندگی در الگوی سایه مطرح شده و با هدف افزایش بهره‌وری در شرایط سایه متقابل و نیز کاهش تلفات اهمی، انجام شده است. با این روش جریان تولیدی در ردیف‌های مختلف آرایه متعادل شده و اثر ناهمجوری و تلفات هادی‌های ارتباطی بین ماژول‌ها کاهش می‌یابد. براساس نتایج بدست آمده، در مقایسه با آرایش‌های ارائه شده دیگر و نیز آرایش TCT ساده، پیکربندی پیشنهادی تا ۶۴٪ درصد در بهره‌وری بیشتر از آرایه موثر بوده است.

مراجع

- [1] A. Tabanjat, M. Becherif and D. Hissel, Reconfiguration solution for shaded PV panels using switching control, Renewable Energy Journal, vol. 82, pp. 4-13, 2015.
- [2] K. Gillingham, H. Deng, R. Wiser, N. Darghouth, G. Nemet, G. Barbose, V. Rai and C. Dong, Deconstructing Solar Photovoltaic Pricing, Energy Journal, vol. 37, no. 3, 2016.
- [3] M. Drif, P. J. Perez, J. Aguilera, and J. D. Aguilar, "A new estimation method of irradiance on a partially shaded PV generator in grid connected photovoltaic system," Renew. Energy, vol. 33, no. 9, pp. 2048-2056, Feb. 2008.
- [4] The German Energy Society. "Planning and Installing Photovoltaic Systems: A Guide for Installers Architects, and Engineers" 2nd ed. London, Sterling, VA: Earth scan, 2008, pp. 152-157.
- [5] M. Garcia, J. A. Vera, L. Marroyo, E. Lorenzo, and M. Pérez, "Solar tracking PV plants in Navarra: A 10 MW assessment," Progress in Photovoltaics: Res. Applicat., vol. 17, no. 5, pp. 337-346, Aug. 2009.
- [6] N. D. Kaushika and N. K. Gautam, "Energy yield simulations of interconnected solar PV arrays," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 18, no. 1, p.p. 127-134, 2003.
- [7] C. Olalla, D. Clement, M. Rodriguez, and D. Maksimovic, "Architectures and control of sub module integrated DC-DC converters for photovoltaic applications," IEEE Trans. Power Electron., vol. 28, no. 6, pp. 2980-2997, Jun. 2013.
- [8] E. Koutroulis and F. Blaabjerg, "A new technique for tracking the global maximum power point of PV arrays operating under partial- shading conditions," IEEE J. Photovoltaic, vol. 2, no. 2, pp. 184-190, Apr. 2012.
- [9] M. Horoufiyany, R. Ghandehari. "Optimization of the Sudoku based reconfiguration technique for PVarrays power enhancement under mutual shading conditions". Sol. Energy (2017).
- [10] M. Horoufiyany, R. Ghandehari. "Optimization of the Sudoku based reconfiguration technique for PVarrays power enhancement under mutual shading conditions". Sol. Energy (2017).
- [11] M. Horoufiyany, R. Ghandehari. "Optimal fixed reconfiguration scheme for PV arrays power enhancement under mutual shading conditions". IET Renewable Power Generation, 2017.
- [12] H. Sahu, S. Nayak and S. Mishra, "Maximizing the Power Generation of a Partially Shaded PV Array", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 4, no. 2, pp. 626-637, 2014.

با توجه به اهمیت افزایش طول سیم ارتباطی بین ماژول‌ها در پیکربندی مجدد و سعی بر کاهش اثر تلفات اهمی ناشی از مقاومت سیم بر روی توان خروجی سیم با قطر ۲/۵ میلی‌متر مربع در محاسبه توان تولیدی آرایه‌های گروه دوم و سوم در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به عدم نیاز به بحث در مورد تلفات اهمی در آرایش TCT ساده، در نتایج، اثر مقاومت اهمی برای این آرایه لحاظ نشده است و طول سیم در هر کدام از آرایه‌ها با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شده است. توان تولیدی هر سه آرایه در روز-های با سایه‌اندازی و روزهای بدون سایه‌اندازی با در نظر گرفتن تلفات اهمی و بدون در نظر گرفتن تلفات اهمی مطابق جدول (۲) و طول سیم و درصد تلفات آن مطابق جدول (۳) به دست آمده است.

جدول ۲- توان تولیدی (وات-ساعت) آرایه‌ها در گروه‌های مختلف

آرایه		گروه اول	گروه دوم	گروه سوم
بدون تلفات اهمی	روزهای بدون سایه	۳۹۴۷۷۵	۳۹۴۷۷۵	۳۹۴۷۷۵
	روزهای سایه‌دار	۱۲۰۳۳۲	۱۸۵۷۰۶	۱۸۳۶۳۳
	کل سال	۵۱۵۲۰۷	۵۸۰۴۸۱	۵۷۸۴۰۸
با تلفات اهمی	روزهای بدون سایه	۳۹۴۷۷۵	۳۶۹۱۶۰	۳۸۱۲۰۲
	روزهای سایه‌دار	۱۲۰۳۳۲	۱۷۸۵۷۲	۱۸۰۰۳۷
	کل سال	۵۱۵۲۰۷	۵۴۷۷۳۲	۵۶۱۲۳۹

جدول ۳- طول سیم و درصد تلفات ناشی از آن در گروه‌های مختلف

آرایه	گروه اول	گروه دوم	گروه سوم
طول سیم (متر)	۲۴/۵	۱۰۵/۵	۵۲/۶
تلفات اهمی	٪ ۱/۳	٪ ۵/۶	٪ ۲/۹۶

همانطور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، طول سیم در پیکربندی ارائه شده نسبت به پیکربندی گروه دوم به میزان قابل توجهی کاهش یافته است و این باعث کاهش تلفات ناشی از آن به میزان ۶۴٪ درصد شده است. با مقایسه نتایج بدست آمده در جدول (۲) می‌توان مشاهده کرد بدون در نظر گرفتن تلفات اهمی، آرایه خورشیدی گروه دوم بیشترین تولید را داشته و در طول یک سال ۰/۳۵ درصد نسبت به آرایه گروه سوم تولید بیشتری دارد. اما با در نظر گرفتن تلفات اهمی ناشی از افزایش طول سیم، آرایه گروه سوم بیشترین میزان تولید را دارد که در روزهای بدون سایه ۱۵٪ درصد، روزهای سایه دار ۰/۸۱ درصد و در کل سال ۲/۴ درصد توان تولیدی بیشتری نسبت به آرایه گروه دوم دارد. همچنین در روزهایی که سایه وجود دارد توان آرایه گروه سوم ۳۳/۱ درصد نسبت به گروه اول افزایش یافته است که این نشان دهنده بهینه بودن این پیکربندی نسبت به آرایه TCT می‌باشد.

کاهش اثر سایه‌های متقابل بر اساس پیکربندی مجدد آرایه‌های خورشیدی با هدف کاهش تلفات اهمی

سی و سومین کنفرانس بین‌المللی برق - ۱۳۹۷ تهران، ایران

[13] H. Sahu and S. Nayak, , "Extraction of Maximum Power From a PV Array Under Nonuniform Irradiation Conditions", IEEE Transactions on electronic devices, vol. 63, no. 12, December 2016.