ردیابی بیشینه توان سلول خورشیدی تحت رخداد سایه جزئی با اینورتر متصل به شبکه سه فاز

نویسندگان: احسان حسن‌زاده- ehsan690@gmail.com
احمد آل احمد- a.ahmad@nit.ac.ir

چکیده: الگوریتم‌های مرسوم ردیابی بیشینه توان، توانایی یافتن نقطه بیشینه توان در یک آرایه خورشیدی در شرایط سایه جزئی را ندارند. زیرا منحنی توان-ولتاژ یک آرایه خورشیدی در شرایط سایه جزئی بیش از یک قله دارد و الگوریتم‌های مرسوم توانایی تشخیص و ردیابی قله اصلی را ندارد. در این مقاله یک روش جدید برای ردیابی نقطه بیشینه توان در شرایط سایه جزئی ارائه می‌کند که ترکیبی از الگوریتم مشاهده و دنباله‌روی و الگوریتم ولتاژ ثابت است. این الگوریتم جدید از رفتارشناسی یک آرایه خورشیدی در شرایط سایه جزئی به‌دست‌آمده و براین اساس عمل می‌کند که ولتاژ نقطه بیشینه توان در شرایط مختلف از جمله سایه جزئی چندان تغییر نمی‌کند. این الگوریتم در یک نمونه آزمایشگاهی با توان نامی ***100w*** آزمایش شد. نتایج آزمایش صحت عملکرد سامانه را دریافتن قله اصلی بیشینه توان در شرایط سایه جزئی را تأیید می‌کند.

کلیدواژه: سامانه ولتاژ خورشیدی؛ ردیابی بیشینه توان؛ سلول خورشیدی؛ سایه جزئی.

۱ - مقدمه

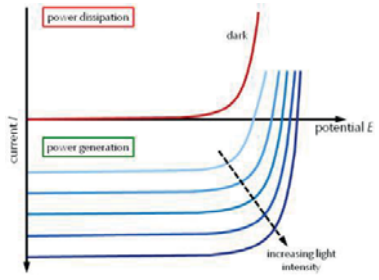
امروزه، مصرف بالای سوخت‌های فسیلی مشکلات مختلف زیست‌محیطی را سبب شده است. بنابراین گرایش به استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر روبه افزایش است. در این میان انرژی خورشیدی به دلیل رایگان بودن، در دسترس بودن، فراوانی و پاک بودن در زمین و فضا، انتخاب مناسبی به نظر می‌رسد. یکی از راه‌های استفاده از انرژی خورشیدی، تولید انرژی الکتریکی به‌وسیله سلول خورشیدی است. ازآنجایی‌که توانمندی سلول خورشیدی وابسته به شرایط تابشی و دمایی می‌باشد و هم‌چنین بازده سلول خورشیدی پایین می‌باشد، بنابراین ردیابی بیشینه توان تولیدی امری ضروری است[۱]. برای دست‌یابی به یک سطح توان مناسب در یک نیروگاه خانگی و یا صنعتی تعدادی سلول خورشیدی بااتصال سری-موازی (ارائه خورشیدی) در کنار هم قرار می‌دهند. در این حالت به علت گستردگی مکان نصب ارائه خورشیدی قرار گرفتن برخی از سلول‌ها در سایه اجسام اطراف محل نصب، امری اجتناب‌ناپذیر است. به شرایطی که قسمتی از ارائه خورشیدی در سایه قرارگرفته است را حالت سایه جزئی می‌نامند. در شرایط سایه جزئی ردیابی نقطه بیشینه توان کمی پیچیده‌تر از حالت بدون سایه است. زیرا منحنی توان خروجی ارائه خورشیدی دارای چند قله خواهد بود که دراین‌بین پیدا کردن قله ماکزیمم اهمیت دارد[۱].

در میان روش‌های ردیابی بیشینه توان در شرایط بدون سایه می‌توان به الگوریتم‌های مشاهده و دنبال کردن[۱] [۳]، هدایت افزایشی[۲][۱۲]، ولتاژ ثابت[۳][۱۳]،کسری از جریان اتصال کوتاه[۳][۱۴]، کسری از ولتاژ مدارباز[۴][۱۵]، منطق فازی[۵] [۱۶]اشاره نمود. اما این روش‌ها در ردیابی نقطه ماکزیمم توان (MPPT[۶]) زمانی که شرایط تابشی برای همه ماژول‌ها یکنواخت نیست و سایه رخداده است ، موفق نیستند. در این وضعیت، ماژول‌های سایه‌دار بخشی از برق تولیدشده را مصرف کرده و به‌عنوان بار رفتار می‌کنند که تولید برق کل را کاهش می‌دهد. حتی ممکن است مشکل نقطه داغ[۷]رخ دهد[۲-۴]. به‌منظور حفاظت ماژول‌ها از مشکل نقطه داغ ، یک دیود بای پس به‌طور موازی به هر یک از ماژول‌های PV متصل می‌شود. معمولاً برای تعیین قله بیشینه توان واقعی در شرایط سایه جزئی، کل نمودار توان-ولتاژ یک ارائه جاروب می‌شود[۵] و همه نقاط در حافظه پردازنده نگهداری می‌شود. پس از بررسی این نقاط، مشخصه جریان-ولتاژ قله بیشینه توان تعیین و نقطه کار ارائه خورشیدی به این نقطه منتقل می‌شود. این نوع

عملکرد فقط زمانی قابل‌اجرا است که ارائه خورشیدی به یک مبدل افزاینده غیر ایزوله[۸] متصل باشد. اما معمولاً در نیروگاه‌ها با توان بزرگ (بزرگ‌تر از 20Kw) برای افزایش بازده سامانه ولتاژ خورشیدی، مبدل افزاینده غیر ایزوله حذف می‌شود و ارائه خورشیدی مستقیم به یک انورتر متصل به شبکه متصل می‌گردد. در این شرایط جاروب کامل منحنی توان-ولتاژ ارائه خورشیدی به علت محدودیت‌های انورتر متصل به شبکه امکان‌پذیر نمی‌باشد در این مقاله روشی ارائه‌شده است که نسبت به روش‌های موجود هزینه اضافی را به سیستم تحمیل نمی‌کند و به مشخصات الکتریکی و ساختار ماژول‌ها هم نیاز ندارد. این روش که به سهولت پیاده‌سازی می‌شود به‌راحتی نقطه بیشینه توان را در شرایط سایه جزئی تعیین می‌کند. در این مقاله ابتدا سلول خورشیدی به‌صورت کامل معرفی می‌شود. در بخش ۳ رفتار سلول خورشیدی در شرایط سایه جزئی بررسی خواهد شد و روش پیشنهادی در بخش ۴ آمده است. در انتها نیز صحت عملکرد این الگوریتم با شبیه‌سازی و پیاده‌سازی نمونه آزمایشگاهی نشان داده‌شده است.

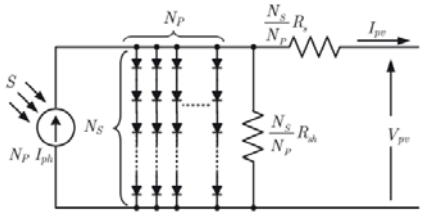
۲- سلول خورشیدی

سلول خورشیدی شامل چند پیوند PN بااتصال سری-موازی است که در معرض تابش نور خورشید قرار می‌گیرد. *«شکل ۱»* منحنی مشخصه یک پیوند PN به ازای دریافت تابش‌های مختلف را نشان می‌دهد. منحنی مشخصه یک پیوند PN با دریافت نور خورشید به سمت پایین محور ولتاژ حرکت می‌کند. چنانچه نقطه کار این پیوند در ناحیه سوم قرار گیرد می‌تواند یک تولیدکننده توان الکتریکی باشد. زیرا جریان آن منفی و ولتاژ آن مثبت است.



شکل ۱: منحنی مشخصه یک پیوند PN در معرض تابش نور.

برای دست‌یابی به سطح توان بزرگ، تعدادی پیوند PN بااتصال سری-موازی در کنار هم قرار می‌گیرند. این مجموعه سلول خورشیدی نامیده می‌شود. برای یک سلول خورشیدی می‌توان مدار معادل *«شکل ۲»* را ترسیم کرد.



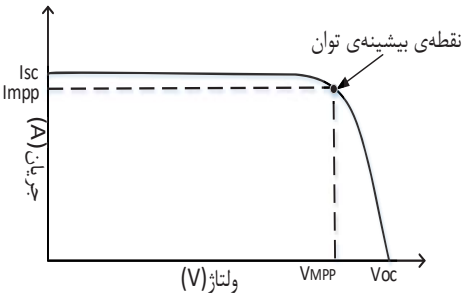
شکل ۲: مدار معادل سلول خورشیدی.

بر اساس *«شکل۲»* معادله غیرخطی جریان تولیدی سلول خورشیدی به‌صورت رابطه (۱) می‌باشد.

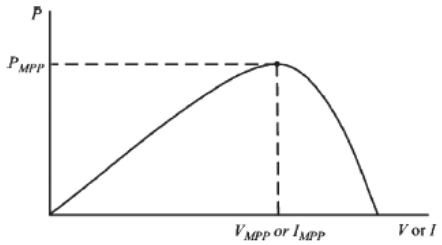
$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_0 (e^{\frac{q(\frac{V_{PV}}{N_s} + I_{pv}\frac{R_s}{N_p})}{KT}} - 1) - \frac{N_p \frac{V}{N_s} + I_{pv} R_s}{R_{sh}} \quad (۱)$$

که در این رابطه Ipv جریان خروجی حاصل از سلول خورشیدی، Iph میزان جریان تولیدشده در سلول خورشیدی،I0 میزان جریان اشباع معکوس،Vpv مقدار ولتاژ خروجی سلول خورشیدی،Rs میزان مقاومت سری، Rsh میزان مقاومت موازی ، qمیزان بار الکترون (1.6*10-19c) ، K مقدار ثابت بولتزمن (1.38*10-23)، Np تعداد سلول خورشیدی موازی و Ns تعداد سلول خورشیدی سری می‌باشد.

با درنظرگرفتن رابطه (۱)، منحنی مشخصه جریان-ولتاژ و توان-ولتاژ سلول خورشیدی، به ترتیب در «شکل۳» و «شکل۴» به ازای توان تابشی و دمای ثابت، نشان داده‌شده است[۳].



شکل ۳: منحنی مشخصه جریان-ولتاژ سلول خورشیدی.

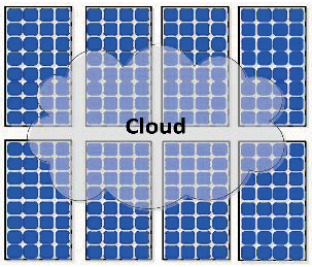


شکل ۴: منحنی مشخصه توان برحسب ولتاژ یا جریان سلول خورشیدی.

سه مؤلفه مهم یک سلول خورشیدی که شامل جریان اتصال کوتاه(I_{sc})، ولتاژ مداربار(V_{oc}) و نقطه کار بیشینه توان (MPP[۹]) می‌باشد که در «شکل۳» نشان داده‌شده است. اگر سلول خورشیدی در نقطه MPP گرایش شود بیشترین توان را تحویل می‌دهد. ازآنجاکه بازده تبدیل سلول‌های خورشیدی پایین و در حدود ۱۷-۹ درصد می‌باشد، باید نقطه‌ی کار سلول خورشیدی در مکانی از نمودار جریان برحسب ولتاژ سلول خورشیدی قرار بگیرد که حداکثر توان تولیدی به مصرف‌کننده تحویل گردد. بنابراین ردیابی نقطه بیشینه توان[۲] در سلول خورشیدی امری ضروری می‌باشد.

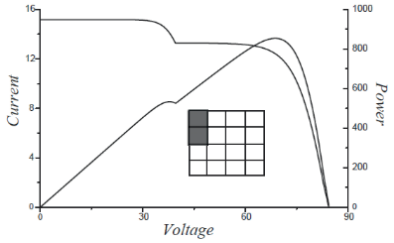
۳- سایه جزئی

استفاده از یک سلول خورشیدی به‌صورت منفرد نمی‌تواند تمام نیازهای یک محیط صنعتی و یا یک‌بار پرمصرف را تأمین کند. به همین دلیل معمولاً تعدادی سلول را به‌صورت متصل‌به‌هم به کار می‌برند، که به آن ارائه خورشیدی گفته می‌شود. از جمع توان‌های تولیدی هر یک از این سلول‌ها منحنی توان-ولتاژ یک ارائه به‌دست می‌آید. به علت سطح وسیع ارائه خورشیدی، قرار گرفتن قسمتی از این ارائه در سایه اجسام جانبی اجتناب‌ناپذیر است. با توجه به «شکل۵» فرض کنید به دلیل وجود تکه‌ای ابر در آسمان و یا براثر افتادن یک برگ و یا نشستن یک پرنده تابش خورشید در قسمتی از ارائه کمتر گردد، به‌این‌ترتیب سطح تعدادی از سلول‌ها نسبت به سایر سلول‌ها دارای تابش کمتری خواهد بود و منحنی توان برحسب ولتاژ آن تغییر می‌کند. به‌این‌ترتیب به بعضی از سلول‌ها تابش کمتری می‌رسد. معمولاً در ساخت هر سلول خورشیدی در کارخانه تولیدکننده، روش‌هایی به کار می‌رود که به کمک آن شرایطی ایجاد شود تا پیوندهای خورشیدی سری شده در یک سلول، دارای مشخصه‌های توان-ولتاژی یکسانی باشند.



شکل ۵: وجود ابر بر روی ارائه خورشیدی.

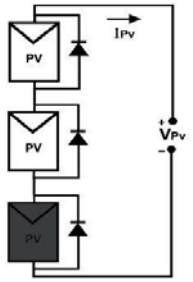
بدیهی است منحنی حاصل از جمع این منحنی‌های توان-ولتاژی طبق «شکل۶»، دست‌کم دارای دو قله خواهد بود که حاصل منحنی در حالت بدون سایه و یک منحنی با تابش کمتر (سایه جزئی) می‌باشد. موضوع مهم در این شرایط پیدا کردن قله بیشینه توان واقعی است. زیرا گاهی اوقات روش‌های مرسوم ردیابی نقطه بیشینه توان قله فرعی را به‌عنوان قله بیشینه توان تشخیص می‌دهند.



شکل ۶: نمودار جریان و توان برحسب ولتاژ سلول خورشیدی در شرایط سایه جزئی.

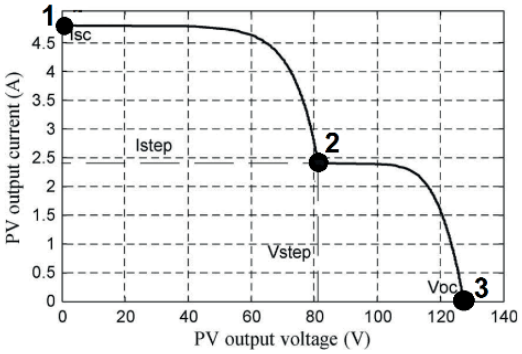
در شرایط سایه جزئی ، مدل ریاضی سیستم PV در رابطه (۱) دیگر معتبر نیست زیرا سطح‌های مختلف تابش بر روی سلول خورشیدی توزیع‌شده است . بنابراین یک مدل ریاضی جدید برای ارائه سیستم تحت شرایط سایه جزئی موردنیاز می‌باشد.

به‌عنوان نمونه، سه سلول خورشیدی بااتصال سری در نظر گرفته شد به‌گونه‌ای که طبق «شکل۷» یکی از سه پنل تابش $500W/m^2$ را دریافت می‌کند، درحالی‌که دو پنل دیگر تابش $1000W/m^2$ را دریافت می‌کنند.



شکل ۷: وجود سایه بر روی ارائه خورشیدی.

برای این ارائه خورشیدی منحنی جریان-ولتاژ به‌صورت «شکل۸» خواهد بود .



شکل ۸: منحنی جریان-ولتاژ «شکل۶».

در «شکل۸» سه‌نقطه مشخص‌شده است ، نقطه ۱، نقطه‌ای است که جریانش معادل I_{sc} (جریان اتصال کوتاه پنل های بدون سایه PV) و ولتاژش معادل صفر است. نقطه ۲، نقطه‌ای است که جریانش I_{step} (جریان اتصال کوتاه پنل های سایه‌دار PV) و ولتاژش V_{step} (مجموع ولتاژ مدارباز پنل های بدون سایه PV) است و نقطه ۳، نقطه‌ای است که جریانش معادل صفر و ولتاژش معادل V_{oc} (مجموع ولتاژ مدارباز پنل های بدون سایه و پنل های سایه‌دار PV) است[۵].

مدل ریاضی این ارائه در روابط (۲) و (۳) نشان داده‌شده است[۵].

$$V_{Pv}=\frac{AKTn_s^{us}}{q}\ln\left(\frac{I_{sc}.\lambda^{us}-I_{pv}}{I_o}\right) \qquad I_{pv}>I_{step} \qquad (۲)$$

$$V_{Pv}=\frac{AKTn_s^{us}}{q}\ln\left(\frac{I_{sc}.\lambda^{us}-I_{pv}}{I_o}\right)+\frac{AKTn_s^{s}}{q}\ln\left(\frac{I_{sc}.\lambda^{s}-I_{pv}}{I_o}\right) \qquad I_{pv}<I_{step} \qquad (۳)$$

بطوریکه n_s^{us} و n_s^{s} به ترتیب تعداد پنل های بدون سایه و پنل های سایه‌دار است ، و λ^{us} و λ^{s} به ترتیب سطح تابش بر روی پنل های بدون سایه و سایه‌دار می‌باشد.

روابط (۲) و (۳) تنها برای دو سطح تابش توزیع‌شده بر روی پنل های سری شده PV معتبر است. درنتیجه روابط (۲) و (۳) برای سطح تابش‌های بیشتر گسترش داده می‌شود و مدل ریاضی عمومی برای n پنل سری در یک سیستم PV به‌صورت روابط (۴) و (۵) و (۶) می‌باشد[۵].

$$V_{Pv}=\sum\frac{AKTn_s^{us}}{q}\ln\left(\frac{I_{sc}.\lambda^{un}-I_{pv}}{I_o}\right) \qquad I_{pv}>I_{Nstep} \qquad (۴)$$

$$V_{Pv}=\sum\frac{AKTn_s^{us}}{q}\ln\left(\frac{I_{sc}.\lambda^{un}-I_{pv}}{I_o}\right)+\frac{AKTn_s^{s1}}{q}\ln\left(\frac{I_{sc}.\lambda^{s}-I_{pv}}{I_o}\right) \qquad I_{1step}<I_{pv}<I_{2step} \qquad (۵)$$

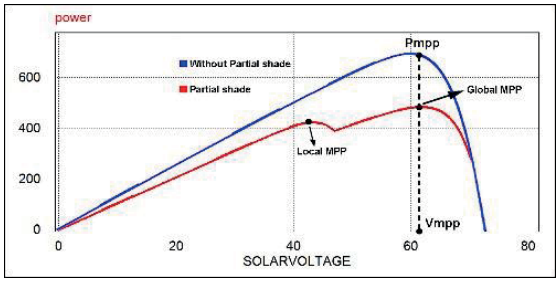
$$V_{Pv}=\sum\frac{AKTn_s^{us}}{q}\ln\left(\frac{I_{sc}.\lambda-I_{pv}}{I_o}\right)+\frac{AKTn_s^{s1}}{q}\ln\left(\frac{I_{sc}.\lambda^{s1}-I_{pv}}{I_o}\right)+\ldots+\frac{AKTn_s^{sN}}{q}\ln\left(\frac{I_{sc}.\lambda^{sN}-I_{pv}}{I_o}\right) \qquad I_{pv}<I_{1step} \qquad (۶)$$

بطوریکه n_s^{sN} پنل های سایه‌دار PV با بالاترین سطح تابش و λ^{sN} بالاترین سطح تابش است و متغیر N تعداد سطح‌های تابش توزیع‌شده است.

۴- الگوریتم پیشنهادی

همواره دستیابی به یک الگوریتم ردیابی بیشینه توان سلول خورشیدی تحت رخداد سایه جزئی مطلوب است. الگوریتم‌های مشاهده و دنبال کردن و ولتاژ ثابت به دلیل سادگی، ارزان‌قیمت بودن و عدم وابستگی الگوریتم به پارامترهای محیطی مانند دما و تابش از روش‌های محبوب می‌باشند. سرعت ردیابی الگوریتم مشاهده و دنبال کردن پایین است اما نقطه بیشینه توان تولیدی را با دقت بالا پیدا می‌کند، درحالی‌که سرعت ردیابی الگوریتم ولتاژ ثابت بالا اما دقت آن پایین است. ایده پیشنهادی بر اساس بهره‌گیری از روش‌های مشاهده و دنبال کردن و ولتاژ ثابت است که نقطه بیشینه توان در شرایط سایه جزئی با دقت و سرعت‌بالا ردیابی گردد.

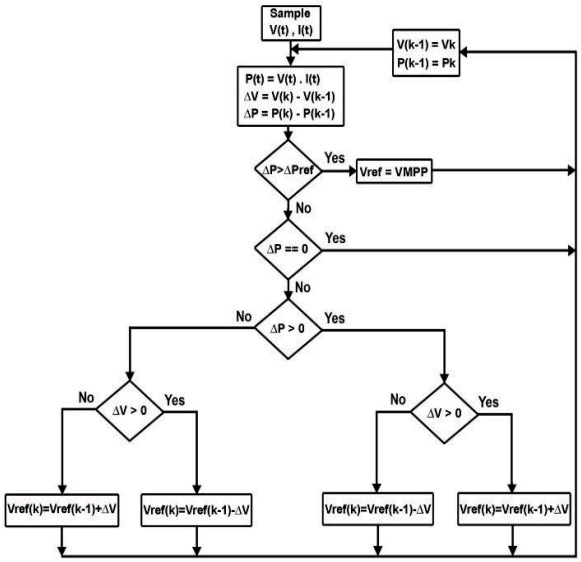
«شکل۹» نمودار توان-ولتاژ ارائه خورشیدی تحت شرایط سایه جزئی و بدون سایه را نشان می‌دهد به‌طوری‌که منطبق بر هم رسم شده‌اند .



شکل ۹: نمودار توان-ولتاژ سیستم PV تحت سایه و بدون سایه.

همان‌طوری که در «شکل۹» مشاهده می‌گردد با تغییر تابش و ورود به شرایط سایه جزئی تغییر چندانی در ولتاژ ارائه خورشیدی ایجاد نمی‌شود، به همین منظور در شرایط سایه جزئی می‌توان از روش ولتاژ ثابت برای تخمین نقطه بیشینه توان استفاده نمود. الگوریتم پیشنهادی در «شکل۱۰» آمده است.

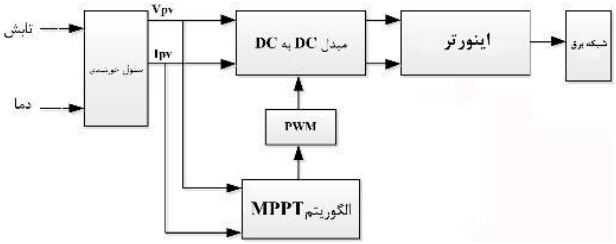
اساس الگوریتم پیشنهادی بدین‌صورت است که چنانچه تغییرات توان از میزان تغییرات مرجع کمتر باشد یعنی شرایط بدون سایه جزئی بوده و سایه قابل‌ملاحظه‌ای وجود ندارد و ردیابی بیشینه توان توسط الگوریتم مشاهده و دنبال کردن انجام می‌گردد و اگر تغییرات توان از میزان تغییرات مرجع بیشتر باشد، حالت سایه جزئی رخداده که الگوریتم به روش ولتاژ ثابت سریعاً با ثابت نگاه‌داشتن ولتاژ خروجی ارائه خورشیدی، نقطه کار آن را در نزدیکی نقطه بیشینه‌ی توان تثبیت می‌نماید. پس از تثبیت ولتاژ سلول خورشیدی حول نقطه بیشینه توان، الگوریتم مشاهده و دنبال‌روی نقطه کار ارائه خورشیدی را به‌دقت به نقطه بیشینه توان می‌رساند. در این روش نیازی به جاروب کامل منحنی توان-ولتاژ ارائه خورشیدی نیست. هم‌چنین تخمین نقطه بیشینه توان به‌سرعت انجام می‌شود.



شکل ۱۰: الگوریتم پیشنهادی.

۵- ساختار سامانه ولتاژ خورشیدی متصل به شبکه

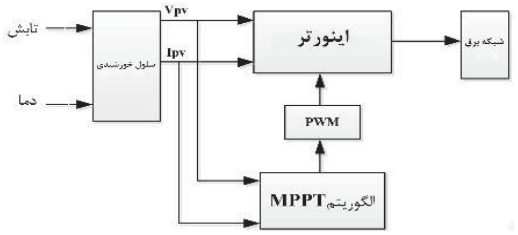
اغلب سامانه‌های ولتاژ خورشیدی شامل یک مبدل افزاینده DC و یک انورتر متصل به شبکه است «شکل۱۱». در این ساختار وظیفه ردیابی نقطه بیشینه توان و هم‌چنین تنظیم ولتاژ DC در ورودی انورتر متصل به شبکه بر عهده مبدل افزاینده DC می‌باشد.



شکل ۱۱: سامانه ولتاژ خورشیدی با مبدل افزاینده DC.

با افزایش توان خروجی و با چیدمان مناسب سلول‌های خورشیدی می‌توان به سطح مناسب ولتاژ برای ورودی انورتر متصل به شبکه دست‌یافت. بنابراین در این شرایط

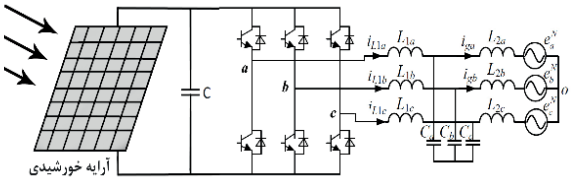
(توان‌های بزرگ‌تر از 20Kw) مبدل افزاینده DC حذف می‌شود تا بازده سیستم افزایش یابد. طبق «شکل۱۲» در این ساختار وظیفه ردیابی بیشینه توان بر عهده انورتر متصل به شبکه است.



شکل ۱۲: سامانه ولتاژ خورشیدی بدون مبدل افزاینده DC.

در این نوع از سامانه‌های ولتاژ خورشیدی، ولتاژ DC در ورودی انورتر نباید از محدوده تعیین‌شده کوچک‌تر شود. زیرا عملکرد انورتر متصل به شبکه مختل خواهد شد. بنابراین در این نوع از سامانه ولتاژ خورشیدی امکان جاروب کامل منحنی توان-ولتاژ ارائه خورشیدی برای یافتن قله بیشینه توان واقعی وجود ندارد.

«شکل۱۳» شماتیک یک انورتر سه فاز متصل به شبکه با فیلتر LCL مدنظر این مقاله را نشان می‌دهد.

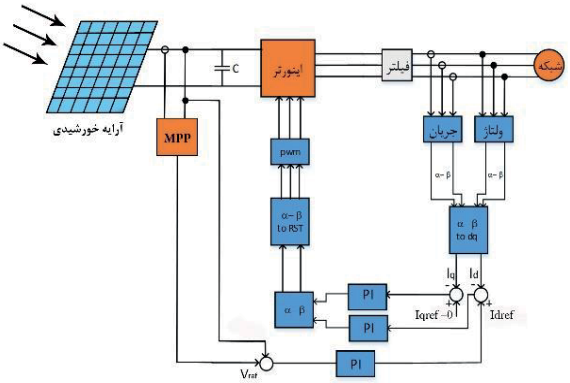


شکل ۱۳: سامانه ولتاژ خورشیدی بر روی انورتر متصل به شبکه سه فاز با فیلتر LCL.

فیلتر LCL از حساسیت‌های کمتری نسبت به پارامترهای شبکه برخوردار است. جهت طراحی مناسب پارامترهای این نوع فیلتر، در نظر گرفتن عواملی چون ضربان جریان خروجی انورتر، تغییرات توان غیرفعال خازن و نسبت القاگر طرف شبکه به انورتر، بسیار مهم است. مزیت فیلتر LCL نسبت به فیلتر L این است که در حجم بسیار کوچک‌تر هارمونی فرکانس‌های کلیدزنی را به‌خوبی تضعیف و خواسته‌های استانداردهای متداول را رعایت می‌کند[۷].

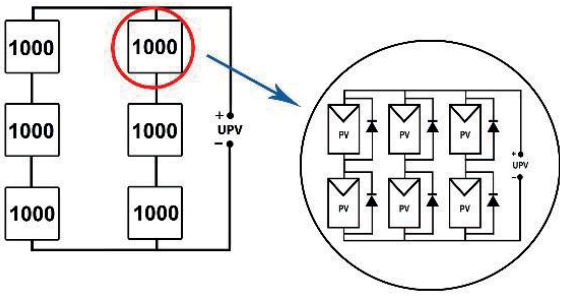
۶- نتایج شبیه‌سازی

الگوریتم پیشنهادشده برای یک سامانه ولتاژ خورشیدی 20Kw شبیه‌سازی‌شده است. بلوک دیاگرام سامانه در «شکل۱۴» آمده است. شبیه‌سازی در نرم‌افزار PSIM انجام‌شده و برای ارائه خورشیدی از سلول‌های پلی‌کریستالین استفاده‌شده است.



شکل ۱۴: ساختار کنترلی پیشنهادی.

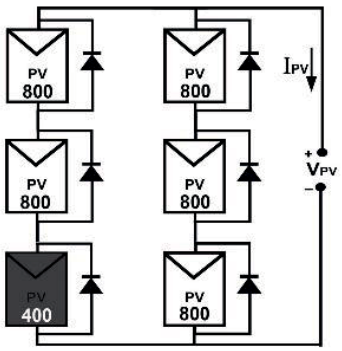
ارائه خورشیدی در این شبیه‌سازی شامل ۶ بلوک است که در هر بلوک نیز از ۶ سلول خورشیدی بااتصال سری-موازی استفاده‌شده است «شکل۱۵». همانگونه که پیش‌تر بیان شد فیلتر خروجی انورتر، از نوع LCL است تا به‌خوبی هارمونی‌های فرکانس کلیدزنی در محدوده موردنظر استاندارد تضعیف نماید.



شکل ۱۵: چیدمان ارائه خورشیدی.

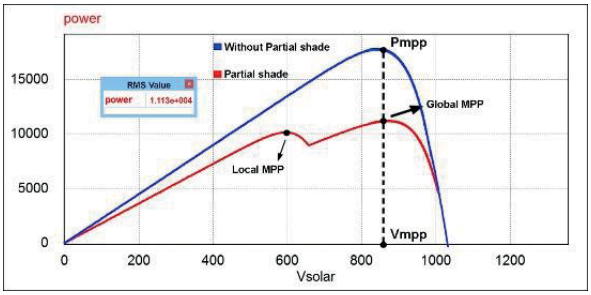
شبیه‌سازی برای دو حالت مختلف سایه جزئی اجرا و نتایج بررسی‌شده است.

شبیه‌سازی اول طبق تابش‌های مشخص‌شده پنل‌های «شکل۱۶»، انجام‌شده است. نمودار توان-ولتاژ این شبیه‌سازی در «شکل۱۷» آمده است.



شکل ۱۶: رخداد سایه جزئی شبیه‌سازی اول

.



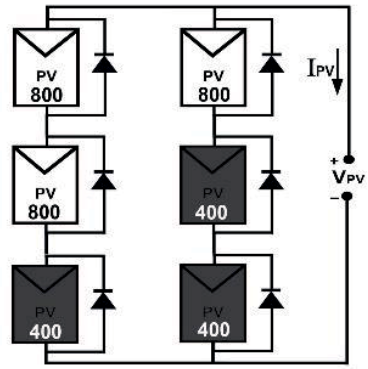
شکل ۱۷: نمودار توان-ولتاژ سیستم PV شبیه‌سازی اول.

با توجه به نوع تابش در این شبیه‌سازی، منحنی توان-ولتاژ دارای دو قله است. نتایج شبیه‌سازی «جدول ۱» نشان می‌دهد الگوریتم پیشنهادی به‌خوبی قله اصلی را تخمین زده است.

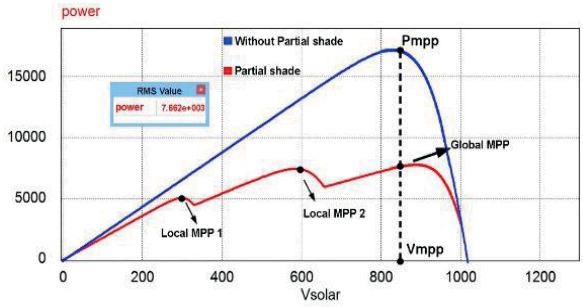
جدول ۱: توان قله‌های ماکزیمم و توان ردیابی شده شبیه‌سازی اول.

توان ماکزیمم قله فرعی	توان ماکزیمم قله اصلی	توان ردیابی شده
10000w	11200w	11130w

شبیه‌سازی دوم طبق تابش‌های مشخص‌شده «شکل۱۸» انجام‌شده است. نمودار توان-ولتاژ این شبیه‌سازی در «شکل۱۹» آمده است.



شکل ۱۸: رخداد سایه جزئی شبیه‌سازی دوم.



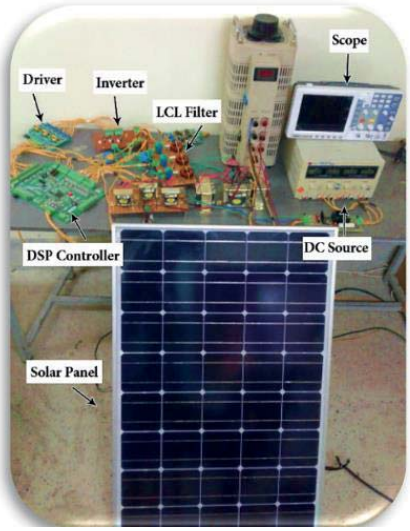
شکل ۱۹: نمودار توان-ولتاژ سیستم PV شبیه‌سازی دوم.

با توجه به نوع تابش در این شبیه‌سازی، منحنی توان-ولتاژ دارای سه قله است. نتایج شبیه‌سازی «جدول ۲» نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی به‌خوبی قله اصلی را تخمین زده است.

جدول ۲: توان قله‌های ماکزیمم و توان ردیابی شده شبیه‌سازی دوم.

توان ماکزیمم قله فرعی اول	توان ماکزیمم قله فرعی دوم	توان ماکزیمم قله اصلی	توان ردیابی شده
۵۰۰۰w	۷۵۰۰w	۷۸۵۰w	۷۶۶۲w

برای صحت سنجی الگوریتم پیشنهادی یک نمونه آزمایشگاهی با توان نامی 100w طبق شکل «شکل۲۵» پیاده‌سازی شده است.



شکل ۲۰: سیستم سامانه ولتاژ خورشیدی پیاده‌سازی شده در آزمایشگاه.

مشخصات این انورتر در «جدول ۳» و سلول خورشیدی متصل به آن در «جدول ۴» آمده است.

جدول ۳: پارامترهای طراحی مبدل DC به AC.

پارامتر طراحی	اندازه
توان ورودی انورتر	100W
ولتاژ خطDC	20V
فرکانس کلیدزنی	10KHz
ولتاژ شبکه	8V
ظرفیت خازن فیلتر	220nF
اندازه‌ی القاگر طرف انورتر	300µH
اندازه‌ی القاگر طرف شبکه	300µH

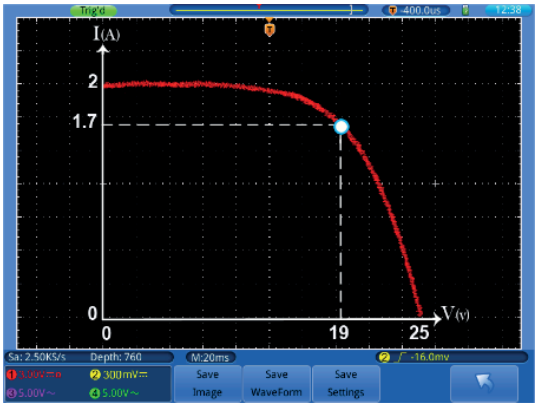
جدول ۴: مشخصات پنل خورشیدی.

پارامتر	نماد	اندازه
بیشینه توان نامی	P_{MPP}	۱۰۰W
ولتاژ در بیشینه توان	V_{MPP}	۲۰,۴۵V
جریان در بیشینه توان	I_{MPP}	۴,۸۹A
ولتاژ مدارباز	V_{OC}	۲۵V
جریان اتصال کوتاه	I_{SC}	۵,۱۹A
ضریب دمایی جریان	$\alpha I_{SC}(\%/^{\circ}C)$	+۰,۰۲۴
ضریب دمایی ولتاژ	$\beta V_{OC}(\%/^{\circ}C)$	-۰,۳۵۶

برای بررسی صحت عملکرد سیستم ابتدا منحنی مشخصه ارائه خورشیدی در شرایط تابش کامل و تابش با سایه جزئی استخراج‌شده است.

۷- نتایج آزمایشگاهی

در «شکل۲۱» منحنی جریان-ولتاژ برای شرایط تابش کامل داده‌شده است. با توجه به تابش موجود بیشینه توان به‌دست‌آمده حدود 32w بوده است.



شکل ۲۱: نمودار جریان- ولتاژ سلول خورشیدی در شرایط تابش کامل.

در این شرایط نمودار جریان- ولتاژ سلول خورشیدی دارای یک قله ماکزیمم می‌باشد.

آزمایش دوم طبق «شکل۲۲» بخشی از پنل خورشیدی تحت سایه قرارگرفته است.



شکل ۲۲: پنل خورشیدی تحت رخداد سایه جزئی.

در «شکل۲۳» منحنی جریان-ولتاژ برای شرایط تابش با سایه جزئی داده‌شده است.



شکل ۲۳: نمودار جریان- ولتاژ سلول خورشیدی تحت رخداد سایه جزئی.

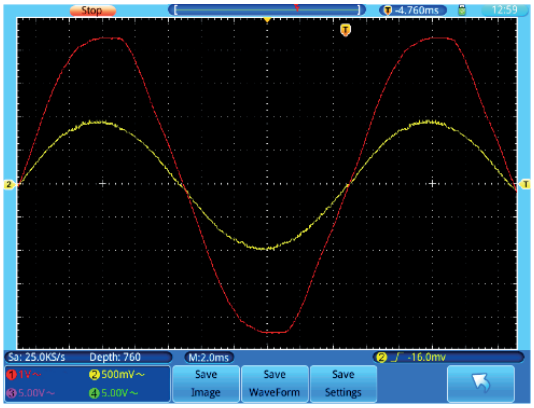
در این شرایط نمودار جریان- ولتاژ سلول خورشیدی دارای دو قله ماکزیمم می‌باشد. این آزمایش نیز یک‌بار توسط الگوریتم مشاهده و دنبال کردن و یک‌بار توسط الگوریتم پیشنهادی تکرار شده است که نتایج آن طبق «جدول ۵» می‌باشد.

جدول ۵: نتایج حاصل از آزمایش دوم.

نوع الگوریتم	ولتاژ	جریان	توان دریافتی
مشاهده و دنبال کردن	15.38v	1.58A	24.30W
الگوریتم پیشنهادی	18.96v	1.43A	27.11W

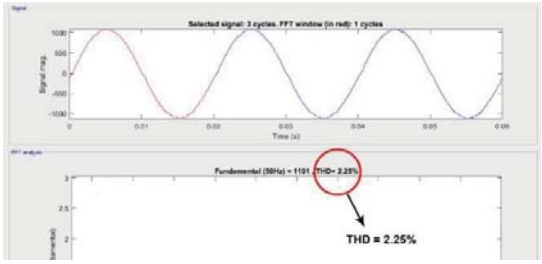
با توجه به نتایج به‌دست‌آمده نکته مهمی که مشخص می‌گردد، ناتوان بودن الگوریتم مشاهده و دنبال کردن در ردیابی بیشینه توان سلول خورشیدی تحت رخداد سایه جزئی می‌باشد به‌طوری‌که در قله فرعی می‌ماند و نقطه کار همان قله را به سیستم معرفی می‌کند اما الگوریتم پیشنهادی قله اصلی که قله ماکزیمم توان است را ردیابی می‌کند. این آزمایش به‌خوبی صحت الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد.

«شکل۲۴» ولتاژ و جریان شبکه را منطبق بر هم نشان می‌دهد که کاملاً هم‌فاز می‌باشند.



شکل ۲۴: شکل موج ولتاژ و جریان شبکه.

THD جریان تزریق‌شده به شبکه طبق استاندارد IEEE1547 در فرکانس 50Hz باید کمتر از ۵% باشد که در «شکل۲۵» میزان THD جریان از خروجی اسیلوسکوپ توسط نرم‌افزار متلب به مقدار ۲,۲۵% به‌دست‌آمده که خواسته استاندارد نیز به‌درستی برآورده شده است.



شکل ۲۵: THD جریان تزریق‌شده به شبکه.

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش جدید MPPT برای ردیابی بیشینه توان سلول خورشیدی تحت رخداد سایه جزئی ارائه‌شده است. در روش پیشنهادی با استفاده از اطلاعات تابشی ابتدا

شرط رخداد سایه جزئی بررسی می‌گردد. در صورت ورود به حالت سایه جزئی، کنترل‌کننده با تثبیت ولتاژ خروجی سلول خورشیدی، نقطه کار سلول خورشیدی را نزدیک به نقطه بیشینه توان قرار می‌دهد. سپس الگوریتم مشاهده و دنبال‌روی، دقیقاً نقطه کار را به نقطه بیشینه توان می‌رساند. ازجمله مزایای این روش این است که با تخمین ولتاژ عملکرد بهینه ، نقطه کار به نزدیکی نقطه ماکزیمم توان اصلی انتقال داده می‌شود، بنابراین الگوریتم نیاز ندارد کل نمودار توان-ولتاژ سلول خورشیدی را جاروب کند. زیرا جاروب کل منحنی توان-ولتاژ سبب نوسانات در خروجی سیستم می‌شود. هم‌چنین برای این کار سامانه ولتاژ خورشیدی باید مجهز به یک افزاینده DC باشد. در الگوریتم پیشنهادی الزامی برای استفاده از افزاینده DC در سامانه ولتاژ خورشیدی وجود ندارد. بنابراین در توان‌های بزرگ با حذف مبدل افزاینده DC و اتصال مستقیم سلول خورشیدی به ورودی انورتر متصل به شبکه، بازده سامانه افزایش می‌یابد.

الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم‌های مختلف در مقالات معتبر در شرایط سایه جزئی طبق «جدول ۶» مقایسه شده است.

جدول ۶: مقایسه نتایج حاصل از روش پیشنهادی با سایر مقالات.

سال انتشار	الگوریتم	هزینه	پیچیدگی	بازده	سرعت
۲۰۱۲	تغییرات ولتاژ و جریان[۱۰]	زیاد	متوسط	%۹۹	۱۵ms
۲۰۱۲	تغییرات جریان به جریان[۹,۸]	زیاد	متوسط	%۹۹	۱۴ms
۲۰۱۲	تغییرات توان و تغییرات جریان[۱۱]	زیاد	زیاد	%۹۹	۱۰ms
	الگوریتم پیشنهادی	کم	کم	%۹۹	۷ms

همان‌گونه که در «جدول ۶» مشاهده می‌گردد، علاوه بر سرعت و بازده بالا الگوریتم پیشنهادی، هزینه پیاده‌سازی و پیچیدگی آن نیز بسیار کم می‌باشد. این الگوریتم جدید در یک نمونه آزمایشگاهی با توان نامی ۱۰۰w آزمایش‌شده است. این نمونه آزمایشگاهی شامل یک انورتر سه فاز با فیلتر خروجی LCL بدون مبدل افزاینده DC است.

1-Petrub and Observe Algorithm (P&O)
2- Incremental Conductance(IC)
3- Constant Voltage (CV)
4- Fractional Open Circuit Voltage (Fractional V_{oc})
5-Fuzzy Logic
6- Maximum Power Point Tracking
7- hot spot
8- Boost
9- Maximum Power \point
10- Maximum Power Point Tracking

۹- مراجع

[1] D. S. Sun, B. M. Ge, X. Y. Yan, D. Q. Bi, H. Zhang, Y. S. Liu, A. B. H,B. B. L, and F. Z. Peng, "Modeling, impedance design, and efficiencyanalysis of quasi-Z source module in power cascaded multilevel photovoltaic system," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 11, pp.6108-6117, Nov. 2014.

[2] E. Mamarelis, G. Petrone, and G. sliding-mode- Spagnuolo, "Design of a controlled SEPIC for PV MPPT applications," Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 7, pp. IEEE 3387-3398, Jul. 2014.

[3] Femia N, Granozio D, Petrone G, adaptive Spagnuolo G, Vitelli M. "Predictive & MPPT perturb and observe method", IEEE Aerospace and Electronic Transactions on Systems, pp. 934-950, 2007.

[4] Houssamo I, Locment F, Sechilariu M. photovoltaic "Maximum power tracking for power system", Development and experimental of two algorithms. Renewable comparison Energy, pp. 2381-2387, 2010.

[5] Bader N. Alajmi, Khaled H. Ahmed, Stephen J. Finney, and Barry W. Point Williams,2013. " A Maximum Power Tracking Technique for Partially Shaded Photovoltaic Systems in Microgrids". IEEE

Industrial Electronics VOL. 60, Transaction on NO. 4 .

[6] Murat ÜNLÜ, Sabri ÇAMUR, A New Maximum Power Point Tracking Method for PV Systems under Partially Shaded Conditions, 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Istanbul, Turkey, 13-17 May 2013

[7] Xing Wei, L.X., Zhilei Yao and Chunying Gong, Design of LCL Filter for Wind Power Inverter. Department of Aero-Power Sci-tech Center, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China, 2010.

[8]Berkouk, D.L.n.A.A.M.n.A.N.L.n.A.B.M.n.A.E.M., Input output feedback linearization control and variable step size MPPT algorithm of a grid-connected photovoltaic inverter. Renewable .Energy, 2011

[9] A. Kouchaki1, H. Iman-Eini2, B. Asaei, Maximum Power Point Tracking Algorithm Based on I-V Characteristic of PV Array under Uniform and Non-Uniform Conditions,2012IEEE International Conference,2012 malaysia.

[10]Young-Hyok Ji Doo-Yong Jung Chung-Yuen Won Byoung-Kuk Lee Jin-Wook Kim Maximum Power Point Tracking Method for PV Array under Partially Shaded Condition, 2012IEEE International Conference,2012 malaysia.

[11]Kashif Ishaque, Zainal Salam, An Improved Particle Swarm Optimization (PSO)–Based MPPT for PV With Reduced Steady-State Oscillation, IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 27, NO. 8, AUGUST 2012

[12]L. M. Dezso Sera, Tamas Kerekes, Sergiu Viorel Spataru, and Remus Teodorescu, "On the Perturb-and-Observe and Incremental Conductance MPPT Methods for PV Systems," IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS, vol. 3, p. 9, JULY 2013 2013.

[13]A. L. Enrico Dallago, Davide Miotti,Giuseppe Venchi, "Direct MPPT algorithm for PV sources with only voltage measurements," IEEE Transactions on Power Electronics, p. 9, 2015.

[14]S. L. R. Faranda, "Energy comparison of MPPT techniques for PV systems," WSEAS Trans., vol. 3, p. 2, Jun 2008.

[15]P. L. C. Trishan Esram, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," IEEE TRANSACTIONS ENERGY CONVERSION, vol. 22, p. 11, 2007.

[16] A. Messai, A.M., A. Guessoum, S.A. Kalogirou, Maximum power point tracking using a GA optimized fuzzy logic controller and its FPGA implementation. ELSEVIER, 2010: p.13.