تحلیل و بررسی عملکرد دیود های بای پس در ساختار پنل خورشیدی و ارائه راه حل مناسب جهت افزایش بازدهی آن

محمد علی شمسی نژاد و حسن الیاسی

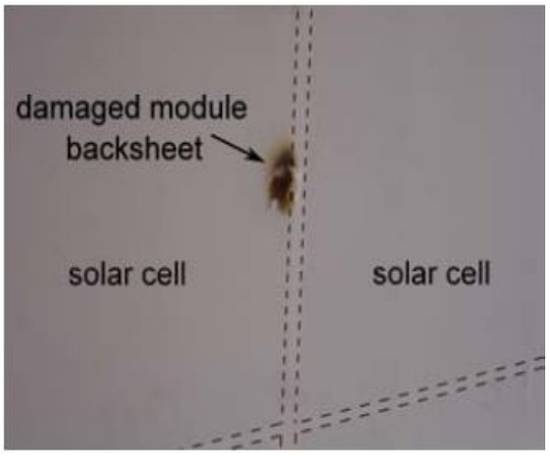
چکیده - دیودهای کنارگذر(Bypass Diod) یکی از پرکاربردترین روش‌ها جهت حفاظت پنل‌های خورشیدی و افزایش بازدهی آن در شرایط سایه است. ما در این مقاله به نحوه کار این دیودها با شکل مداری رایج پنل‌ها در نیروگاه‌های خورشیدی در مقابل سایه می‌پردازیم. بعد از درک رفتار این پنل‌ها روشی را ارائه می‌دهیم که موجب افزایش راندمان پنل‌های خورشیدی می‌شود. .برای تحقق هدف فوق ابتدا پنل‌های خورشیدی را با استفاده از نرم‌افزار سیمولینک متلب شبیه سازی کردیم و توپولوژی رایج را با توپولوژی ارایه شده در شرایط سایه مقایسه کرده‌ایم.شیوه ارایه شده علاوه بر حفاظت کامل پنل خورشیدی در مقابل سایه،موجب افزایش راندمان در این شرایط می‌شود.

***واژه‌های کلیدی*- افزایش بازدهی ، دیود بای‌پس، ساختار مداری، سایه‌های جزیی**

۱- مقدمه

بازدهی پنل خورشیدی به شدت تابش ، درجه حرارت، توپولوژی مداری آرایه‌ها و افتادن سایه بر آن تأثیر دارد[۱]. سایه های نا متقارن بر روی پنل فتوولتاییک یکی از مشکلات استفاده از این سیستم‌ها می‌باشد که به دلایل زیادی همچون درختان،ساختمان‌های مجاور و تیر های چراغ برق و یا سایه یک پنل بر دیگری ممکن است اتفاق بیفتد. در نیروگاه‌های خورشیدی معمولاً سایه‌ها به دلیل مجاورت با پنل‌های دیگر اتفاق می‌افتد.

سایه می‌تواند تأثیرات بدی بر روی پنل خورشیدی داشته باشد زیرا : ۱) سلول سایه شده بایاس معکوس می‌شود و در نتیجه این سلول به عنوان بار محسوب می‌شود و باعث تلفات بیشتر موجب کاهش بازدهی پنل می‌شود. ۲) توان تلف شده باعث افزایش گرمای موضعی می‌شود که این نواحی به hot spot معروفند. ۳) ولتاژ معکوس افتاده بر روی سلول اگر از ولتاژ حداکثر معکوس بیشتر باشد می‌تواند موجب سوختن سلول شده و آن را تخریب کند [۳]،[۲]. شکل (۱) پشت صفحه پنل خورشیدی را نشان می‌دهد که در اثر قرار گرفتن سایه در آن نقطه داغ (hot spot) به وجود آمده و موجب آسیب رسیدن به پنل شده است [۴].



شکل ۱- آسیب‌دیدگی پنل در شرایط سایه

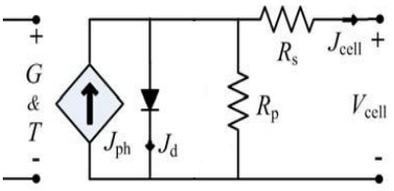
۲- مدار معادل سلول‌های فتوولتاییک

هر سلول خورشیدی یک پیوند PN می‌باشد که مدار معادل الکتریکی آن در شکل (۲) نشان داده شده است [۵]. منبع جریان J_{ph} نشان دهنده اثر جریان نوری است که به دو عامل شدت تابش و دما وابستگی زیادی دارد. مقادیر R_s و R_p از برگه‌های اطلاعاتی،یا طبق روش‌های استاندارد از منحنی مشخصه سلول در شرایط نامی تعیین می‌شود.علاوه بر مشخصه‌های محیطی،جنس ماده نیمه‌هادی و تکنولوژی ساخت نیز در مدل‌سازی و تعیین پارامترهای سلول تأثیرگذارند.برای مثال سیلیکان را می‌توان به سه دسته فرم بی‌شکل (Amorphous)، چندکریستالی (Poly-crystaline) و تک‌کریستالی (Mono-crystaline) در ساخت سلول‌های خورشیدی به کار گرفت که هر یک مشخصات و ویژگی خاص خود را دارند.این ویژگی‌های متفاوت مستقیماً بر مقدار ضرایب دمایی و تابشی،پارامترهای مدل و حتی بر توپولوژی مدار نیز تأثیر می‌گذارد. برای مثال در سلول‌های ساخته شده از سیلیکان

محمد علی شمسی نژاد، دانشگاه بیرجند،عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، بیرجند (email: mshamsi@birjand.ac.ir)

حسن الیاسی، دانشگاه بیرجند،دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر بیرجند، (eliasihassan@gmail.com)

تک‌کریستالی مقدار مقاومت موازی زیاد بوده،طوری که می‌توان R_p را از مدل حذف نمود [۶].



شکل ۲- مدار معادل سلول خورشیدی

با توجه به مدار معادل روابط زیر برقرار است:

$$J_{cell} = J_{ph} - J_d - J_{R_p} \quad (۱)$$

$$J_d = J_o\left[e^{\frac{V_D}{n V_T}} - 1\right] \quad (۲)$$

$$J_{ph} = \frac{s}{s_{ref}}[J_{sc} + \alpha(T - T_{ref})] \quad (۳)$$

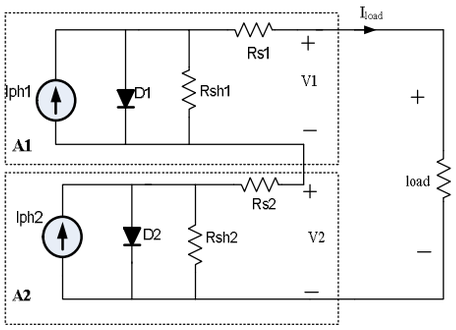
$$V_T = \frac{\kappa T}{q} \quad (۴)$$

$$J_{R_p} = \frac{R_s . J_{cell} + V_{cell}}{R_p} \quad (۵)$$

که در این روابط S شدت تابش و S_{ref} شدت تابش در شرایط استاندارد بر حسب $\frac{w}{m^2}$ و T دمای نقطه کار سلول و T_{ref} دما در شرایط استاندارد بر حسب کلوین و α ضریب جریان فتوولتاییک بر حسب $\frac{A}{^\circ C}$ و V_T ولتاژ حرارتی و κ ثابت بولتزمن و q بار الکترون می‌باشد. شرایط استاندارد توسط Christian Bendel تعریف شده است که این شرایط با حروف اختصاری STC نشان داده شده است[۸]۰ در این شرایط داریم: $S_{ref}= 1000\frac{w}{m^2}$ و T_{ref}=298k . R_s و R_{sh} به ترتیب روی جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز تأثیر بسزایی دارند[۸] .

۳- آنالیز آرایه‌های خورشیدی تحت شرایط سایه

آرایه های فتوولتاییک برای رسیدن به سطح ولتاژ دلخواه به صورت سری در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند[۹] . شکل (۳) دو آرایه را که با یکدیگر سری و به یک بار متصل شده‌اند را نشان می‌دهد. هر یک از آرایه‌ها نماینده ۱۶ سلول سری هستند که هرکدام از این سلول‌ها دارای مشخصات نامی V_{oc}=0.625V و I_{sc}=2.66A می‌باشند.



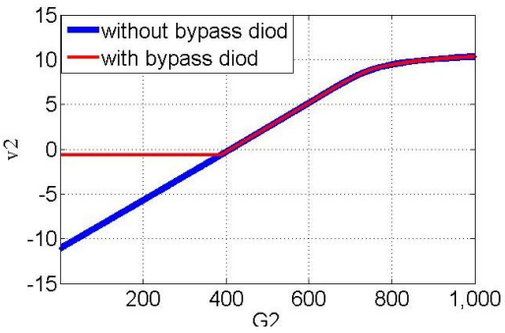
شکل ۳- دو آرایه سری شده و متصل به بار

ابتدا فرض می‌کنیم یکی از آرایه‌ها (A1) در شرایط STC بوده و دیگری (A2) در معرض تغییرات شدت تابش قرار گرفته باشد به طوری که جریان فوتونی (I_{ph1}) بیشتر از جریان فوتونی (I_{ph2}) است. حال اگر $I_{load} \le I_{ph2}$ باشد دیود D_2 بایاس مستقیم می‌شود و در اینجا مشکلی برای آرایه سایه شده نیست. اما اگر $I_{load} \ge I_{ph2}$ باشد آن گاه جریان دیود برابر با $I_{D2} = I_{ph2} - I_{load}$ که این جریان یک مقدار منفی است و این دیود بایاس معکوس می‌شود و مانند یک مقاومت بزرگ عمل می‌کند [۱۰]. در این شرایط ولتاژ V_2 منفی بوده و این ولتاژ منفی با افزایش جریان بار کوچک‌تر می‌شود. اگر اندازه این ولتاژ از ولتاژ حداکثر معکوس V_{D2} بیشتر باشد باعث سوختن آرایه می‌شود. حال اگر به دو سر V_2 یک دیود بای پس قرار دهیم حالت‌های زیر به وجود می‌آید:

۱) $I_{ph2} \ge I_{load} \rightarrow D_2 = on \rightarrow D_{bypass} = off \rightarrow V_2 \cong V_{D2} \rightarrow I_{bypass} = 0$

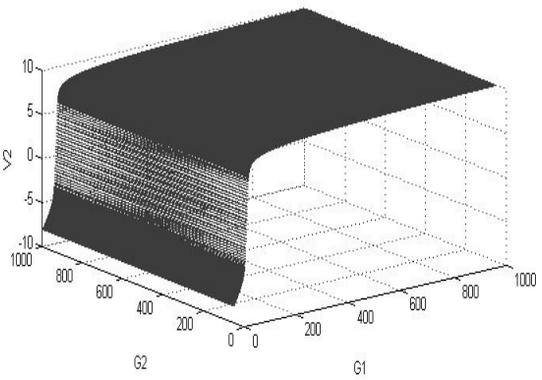
۲) $I_{ph2} \le I_{load} \rightarrow D_2 = off \rightarrow D_{bypass} = on \rightarrow V_2 \cong V_{bypass} \rightarrow I_{bypass} = I_{load}$

دو فرآیند بالا نشان می‌دهد که با افزایش سایه یا به عبارتی کاهش جریان I_{ph2} دیود بای پس وارد مدار شده و مانع عبور جریان از آرایه سایه شده می‌شود و عمل حفاظت را انجام می‌دهد شکل (۴) که نشان دهنده تغییرات ولتاژ V_2 بر حسب تغییرات شدت تابش G2 را نشان می‌دهد و نحوه عملکرد دیود بای پس را در شرایط سایه نشان می‌دهد. این نمودار مشخص می‌کند که در حالت بدون دیود بای پس در بارهای کم آرایه وارد ناحیه منفی می‌شود و این در حالی است که وقتی دو سر آرایه دیود بای پس می‌گذاریم قبل از این که وارد این ناحیه شود دیود عمل می‌کند و دو سر آن را اتصال کوتاه می‌کند و عمل حفاظت را انجام می‌دهد.



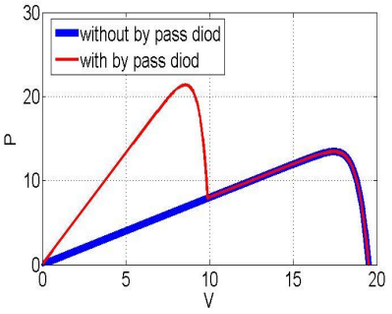
شکل ۴- نمودار تغییرات ولتاژ A2 بر حسب تغییرات شدت تابش در دو حالت بدون دیود بای پس و با دیود بای پس.

البته باید به این نکته توجه داشت که شدت تابش G_1 تأثیر بسزایی در ولتاژ V_2 دارد•شکل (۵) تغیرات ولتاژ V_2 بر حسب G_1 و G_2 شبیه سازی شده است. در این شکل مشخص است که به ازای مقادیر کم G1 ولتاژ V2 کمتر می‌شود و در سایه های بیشتر ولتاژ منفی می‌شود.



شکل ۵- نمودار تغییرات ولتاژ A2 بر حسب تغییرات شدت تابش‌های G1 و G2

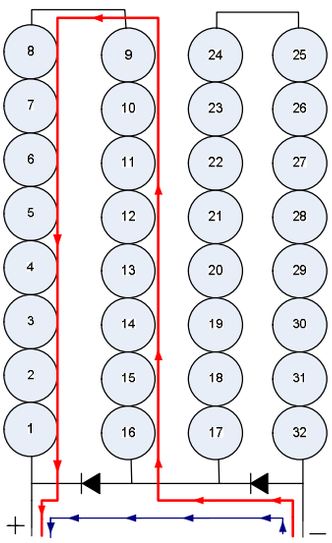
همان طور که گفته شد در شرایط سایه ، آرایه سایه شده (بدون دیود بای پس) مانند یک بار عمل می‌کند و از آرایه های دیگر توان می‌کشد ولی هنگامی که از دیود بای پس استفاده می‌شود این آرایه‌ها در بار های پایین کنار گذاشته می‌شوند و دیگر توان مصرف نمی‌کنند پس نقش دیگر این دیودها افزایش بازدهی تحت این شرایط می‌باشد. برای آشکار شدن این نقش پنل را در دو حالت بدون/ با دیود بای پس را شبیه سازی می‌کنیم. شکل (۶) مشخصه توان ولتاژ در هر دو حالت است. در این شکل مشخص است که در حالت با دیود بای پس در ولتاژهای پایین، سطح توان افزایش می‌یابد و موجب افزایش بازدهی پنل می‌شود.



شکل۶- مشخصه توان- ولتاژ در حالت‌های بدون دیود بای‌پس و با دیود بای‌پس

۴- تأثیر سایه بر پنل‌های خورشیدی با ساختار مداری رایج در کاربرد نیروگاهی

شکل (۷) توپولوژی رایج مورد استفاده در پنل‌های صنعتی را نشان می‌دهد[۱۲],[۱۱]. این ساختار مداری حفاظت از آرایه‌ها را در شرایط سایه به دلیل حضور دیود های بای پس انجام می‌دهد. به طور مثال فرض کنید اگر یکی یا مجموعه ای از سلول‌های ۱۷ تا ۳۲ مورد تعرض سایه قرار گیرند و جریان فوتونی آن‌ها مطابق آنچه در قسمت قبل بیان شد کمتر از جریان بار باشد دیود بای پس مربوط به آن‌ها عمل می‌کند و عمل حفاظت انجام می‌شود. جریان مشخص شده با رنگ قرمز همان جریان باری است که در این شرایط از دیود بای پس می‌گذرد. اما در مورد توان می‌توان گفت وقتی دیود بای پس در شرایط ذکر شده عمل می‌کند فقط نیمی از پنل توان تولید می‌کند.



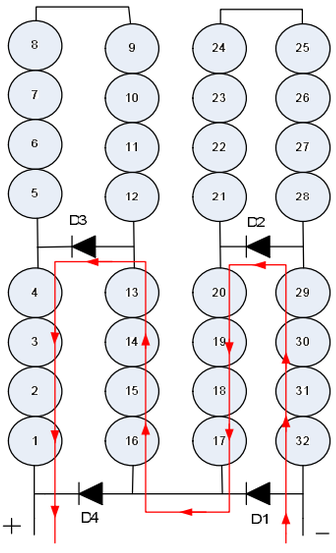
شکل ۷- ساختار مداری رایج

همان طور که قبلاً گفته شد اغلب تشکیل سایه بر روی پنل‌ها در نیروگاه‌ها به دلیل مجاورت با پنل های دیگر می‌باشد. یعنی در

شکل(۷) ابتدا سلول‌های ۸،۹،۲۴،۲۵ در سایه‌ی پنل جلویی قرار می‌گیرد و این چنین سایه پیش روی می‌کند و تمام پنل را فرا می‌گیرد. اگر سایه به گونه ای باشد که جریان فوتونی آرایه‌ها نتواند جریان مورد نیاز بار را تأمین کند آنگاه هر دو دیود بای پس وارد عمل می‌شود و از به وجود آمدن نقاط داغ (hot spot) جلوگیری می‌کند و جریان بار با رنگ آبی مشخص شده است. طبیعی است در این حالت تأمین توان میسر نیست که در قسمت بعد روشی ارایه می‌دهیم که موجب بهبود بازدهی مدار می‌شود.

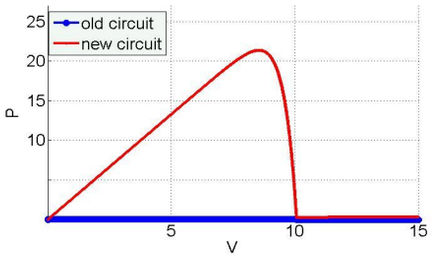
۵- ارایه ساختار مداری جدید جهت افزایش بازدهی در شرایط سایه

در هنگام طراحی باید دو هدف تحقق یابد :۱) حفاظت کامل پنل در شرایط سایه. ۲) افزایش بازدهی مدار در هنگام افزایش سایه. هدف ۱ را می‌توان با استفاده از دیود های بای پس به شکل ساختار مدار قبلی (شکل ۸) تحقق بخشید. اما برای رسیدن به هدف ۲ باید تأثیر سلول‌های سایه شده بر سلول‌ها در شرایط عادی را با پیشروی سایه محدود کرد. شکل(۸) ساختار اصلاح شده ای می‌باشد که دو هدف بالا را برآورده می‌کند.

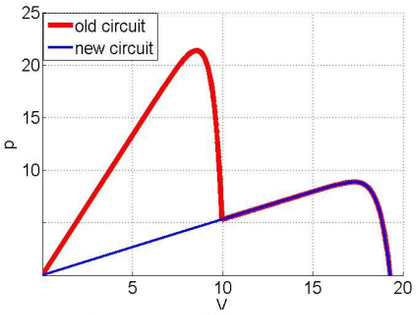


شکل ۸- ساختار مداری اصلاح شده

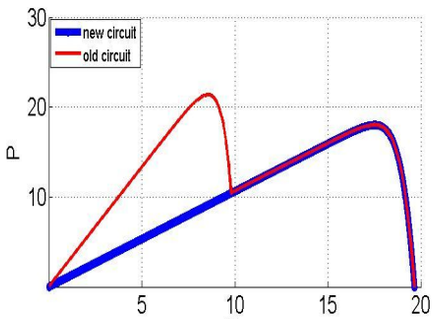
دو دیود اضافه شده جهت محدود کردن اثرات سایه بر روی توان خروجی استفاده شده است. اگر شرایط قسمت قبل یعنی پیشروی سایه در پنل از ناحیه سلول‌های ۸،۹،۲۴،۲۵ را برای این پنل بررسی کنیم خواهیم دید که با افزایش سایه و کمبود جریان فوتونی در این نواحی دیود های ۲،۳ عمل می‌کنند و جهت جریان مشخص شده بر روی شکل جاری می‌شود. همان طور که در شکل می‌بینیم در این شرایط مجموعه های دیگر که در شرایط سایه نیستند بار مورد نظر را تأمین می‌کنند. شکل (۹) دو حالت قبل را با یکدیگر در شرایط مختلف سایه مقایسه می‌کند. منظور از افزایش شدت سایه (shadowing) ،کاهش شدت تابش می باشد. در شکل (۹-الف) قسمت بالایی پنل به صورت کامل در سایه قرار دارد(shadowing=100%) و قسمت پایین تحت شرایط سایه نمی‌باشد. همان طور که در این شکل می‌بینیم تولید توان در مدار جدید در ولتاژهای پایین امکان پذیر می‌شود. در شکل‌های بعد شدت سایه در این نواحی کمتر می‌شود. به طوری که شکل (۹-ب) در شدت سایه ۸۰ درصد (shadowing=80%) و شکل (۹-ج) شدت سایه ۶۰ درصد (shadowing=60%) و شکل (۹-د) در شدت سایه ۴۰ درصد (shadowing=40%) دو مدار با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



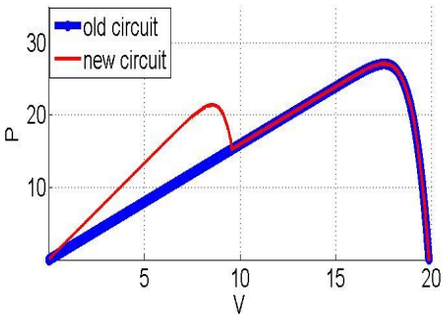
شکل ۹- الف- shadowing=100%



شکل ۹- ب- shadowing=80%



شکل ۹- ج-shadowing=60%

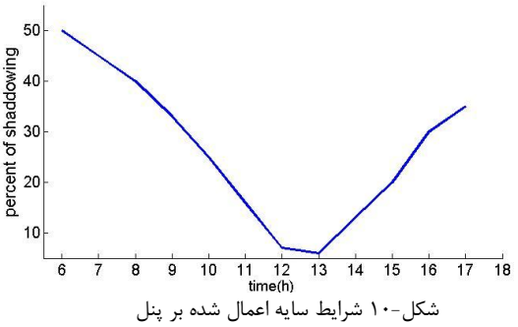


شکل ۹- د- shadowing=40%

شکل ۹- مقایسه مشخصه توان ولتاژ در دو مدار در شدت سایه های متفاوت

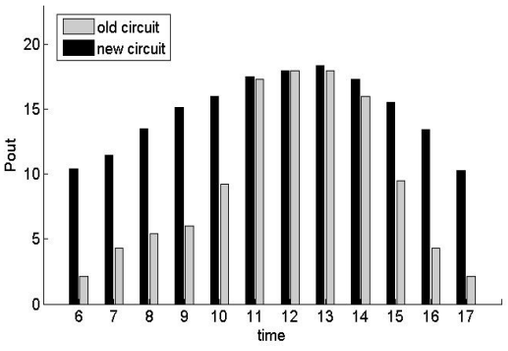
همان طور که در شکل‌های بالا می‌بینیم در ولتاژهای پایین مدار جدید موجب افزایش توان و بهبود بازدهی پنل خورشیدی می‌شود. این شرایط برای سایه های بیشتر (به طور مثال شکل ۹- الف) حساس‌تر می‌باشد.

اگر فرض کنیم شرایط سایه مانند شکل(۱۰) به هر دو مدار اعمال شود می توانیم عملکرد مدارها را در این شرایط در ساعات مختلف روز با یکدیگر مقایسه کرد.



شکل-۱۰ شرایط سایه اعمال شده بر پنل

شکل(۱۱) توان تولیدی این پنل را در ساعات مختلف روز در دو مدار با یکدیگر مقایسه می‌کند. در این نمودار مشخص است در یک بار مقاومتی ثابت مدار جدید در ساعات آغازین و پایانی روز که احتمال سایه بیشتر است، از لحاظ تولید توان بهتر عمل می‌کند.



شکل-۱۱ مقایسه توان تولیدی دو مدار در ساعات مختلف روز

۶- نتایج

در این مقاله در ابتدا عملکرد دیودهای کنار گذار (Bypass Diod) را از لحاظ توان تولیدی و حفاظت پنل خورشیدی در شرایط مختلف سایه بررسی و سپس توپولوژی رایج و مورد استفاده در صنعت را در این شرایط شبیه سازی کردیم. همان طور که نتایج نشان می‌دهد، این توپولوژی نمی‌تواند در شدت سایه های بالا بار مورد نظر را تأمین کند. برای این کار نیاز به اصلاح ساختار مداری پنل داریم. ساختار مداری ارائه شده توانست در ولتاژهای پایین و جایی که جریان بار بر جریان فوتونی غلبه دارد، مشخصه توان-ولتاژ را بهبود بخشد. این بدان معناست که اصلاح ساختار مداری به خوبی روی بازدهی مدار تأثیر می‌گذارد.

۷-مراجع

[1] H. Patel and V. Agarwal, "Maximum Power Point Tracking Scheme for PV Systems Operating Under Partially Shaded Conditions," *IEEE Ton Industrial Electronics, Vols. 55, no. 4*, pp. 1689-1698, April 2008.

[2] W. Herrmann, W. Wiesner, W. Waassen, Hot spots investigations on PV modules—new concepts for a test standard and consequences for module design with respect to by-pass diodes, *Proceedings of the 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference,* 1997, pp. 1129–1132.

[3] M. Klenk, S. Keller, L. Weber, C. Marckmann, A. Boueke, H. Nussbaumer, P. Fath, R. Burkhart, Investigation of the hot-spot behavior and formation in crystalline silicon POWER cells, PV in Europe, From PV technology to energy solutions, *Proceedings of the International Conference*, 2002, pp. 272–275.

[4] F.Fertig, S.Rein, M.schubert,W.Warta, "Impact of junction breakdown in multi-crystaline silicon solar cells hot spot formation and module performance", 26th European PV Solar Energy Conf ,germany, 5-9 september 2011.

[5] S. Silvestre , A. Boronat, A. Chouder, "Study of bypass diodes configuration on PV modules",S. Silvestre et al. / Applied Energy 86 ,2009,pp. 1632–1640.

[6] A.Geotzberges,J.knobloch,B.voss,Crystalline silicon solar cells,Translated By R.waddington,John wiley&sons ltd,1998.

[7] Bendel, A. Wagner, 'Photovoltaic measurement relevant to the energy yield', WCPEC-3 World Conference on Photo voltaic Energy Conversion, 2003, pp. 2227-2230.

[8] A. S. Masoum, F. Padovan, M.A.S. Masoum," Impact of Partial Shading on Voltage- and Current-Base Maximum Power Point Tracking of Solar Modules

[9] Y.J. Wang, and P.C. Hsu, "Analytical modelling of partial shading and different orientation of photovoltaic modules," IET Renewable Power Generation, vol. 4, issue 3, pp. 272-282, 2010.

[10] R.Ramaprabha and Dr.B.L.Mathur," Modelling and Simulation of Solar PV Array under Partial Shaded Conditions ",*Proc. of IEEE Int. Conf. on Sustainable Energy Technologies, pp. 12 –16,* Singapore, 2008.

[11] www.solaredge.com

[12] E. Karatepe, M. Boztepe, M. Colak," Development of a suitable model for characterizing photovoltaic arrays with shaded solar cells" SinceDirect,Splar Energy 81,2007,pp977-992.