

شبیه‌سازی جامع مدل دودیود سلول‌های خورشیدی در محیط SimPowerSystems به صورت توابع صریح ریاضی

احمد دهقان‌زاده^۱ غلامرضا فراهانی^۲ مصطفی رجبی‌مشهدی^۳

۱- فارغ‌التحصیل دکتری- پژوهشکده مهندسی برق و فناوری اطلاعات- سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران- تهران- ایران
a.dehghanzadeh@irost.ir

۲- استادیار پژوهشکده مهندسی برق و فناوری اطلاعات- سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران- تهران- ایران
farahani.gh@irost.ir

۳- معاون برنامه ریزی و امور اقتصادی- شرکت توانیر- تهران- ایران
m.rajabi.m@tavanir.org.ir

چکیده: در این مقاله، با استفاده از نظریه تون و همچنین تابع غیرخطی لمبرت، مدل دودیود نوینی برای سلول‌های خورشیدی به صورت رابطه صریح ریاضی ارائه می‌گردد. در مقایسه با مدل‌های صریح موجود در منابع که در حالت‌های خاص ضرایب انتشار $n_2 = 2n_1$ و $n_2 = n_1$ ارائه شده‌اند، مدل این مقاله، طیف گسترده‌ای از سلول‌های خورشیدی سیلیکونی را با ضرایب انتشار دلخواه دیودها در برمی‌گیرد. با بدست آوردن پارامتر تنظیم‌کننده مدل (α) و با استفاده از داده‌های واقعی، قابلیت مدل پیشنهادی در برازش مدل کلاسیک در شرایط استاندارد دما و تابش با خطای کمتر از 10^{-5} اعتبارسنجی شده است. همچنین با شبیه‌سازی تغییرات شرایط محیطی، عملکرد مدل پیشنهادی در گستره تابش‌های ۵۰ تا ۱۱۰۰ وات بر مترمربع بررسی شده است. در پایان با ترکیب سری و موازی سلول‌ها و ارائه تحلیلی نقطه توان بیشینه با استفاده از مدل پیشنهادی، مدل دودیود ماژول‌های خورشیدی در محیط SimPowerSystems جهت استفاده در کاربردهای پژوهشی و صنعتی به طور جامع شبیه‌سازی شده است.

کلمات کلیدی: سلول‌های خورشیدی، مدل دو دیود، توابع صریح، شبیه‌سازی در SimPowerSystems، توان بیشینه

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۰۶

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۰۲

نام نویسنده‌ی مسئول: احمد دهقان‌زاده

نشانی نویسنده‌ی مسئول: تهران - بزرگراه آزادگان - احمدآباد مستوفی - خیابان انقلاب - سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران - پژوهشکده مهندسی برق و فناوری اطلاعات.

۱- مقدمه

با توجه به مدار معادل الکترونیکی سلول‌های PV در شکل (۱)، بیان ریاضی مشخصه جریان-ولتاژ (I-V) در خروجی این سلول‌ها به صورت معادله (۱) بدست می‌آید [۳، ۴]:

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left(e^{\frac{V + IR_s}{n_1 V_T}} - 1 \right) - I_{s2} \left(e^{\frac{V + IR_s}{n_2 V_T}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (1)$$

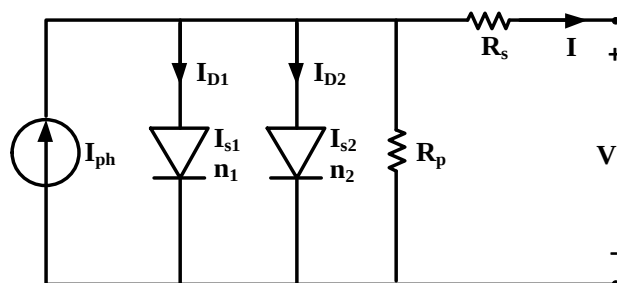
که در آن، I : جریان خروجی سلول PV، V : ولتاژ خروجی سلول PV، V_T : ولتاژ حرارتی، T : دمای سلول PV، I_{s1} : جریان اشباع معکوس^۵ ناشی از بازترکیب^۶ در ناحیه شبه‌خنثی^۷ (جریان نفوذی^۸)، I_{s2} : جریان اشباع معکوس ناشی از بازترکیب در ناحیه تهی^۹ یا بار-فضا^{۱۰}، I_{ph} : جریان ناشی از نور خورشید که رابطه خطی با مقدار تابش دارد، n_1 : ضریب انتشار دیود اول، n_2 : ضریب انتشار دیود دوم، R_s : مقاومت سری و R_p : مقاومت موازی می‌باشد.

اساساً رابطه (۱)، یک معادله ضمنی غیرخطی جریان نسبت به ولتاژ خروجی می‌باشد که برای حل آن نیاز به روش‌های عددی داریم [۳، ۵]. روش‌هایی مانند گوسین^{۱۱}، نیوتن-رافسون و بهینه‌سازی ذرات انبوه (PSO^{۱۲}) در منابع استفاده شده‌اند [۶-۸]. روش‌های عددی رویکردی مطلوب برای شبیه‌سازی بی‌درنگ^{۱۳} سلول‌های PV نمی‌باشند؛ زیرا آن‌ها به مقادیر اولیه برای شروع الگوریتم نیاز دارند و ممکن است با مقادیر خاصی از شرایط اولیه و اگر اگردند. همچنین روش‌های عددی حجم محاسبات بالایی را به منظور همگرایی بر سیستم تحمیل می‌کنند. در مقابل، توابع صریح، به علت عدم نیاز به محاسبات بازگشتی، بازده محاسباتی را در شبیه‌سازی‌های تکرارشونده افزایش می‌دهند. همچنین این توابع برای شناسایی پارامترهای سلول‌های PV بسیار کارآمد می‌باشند [۹-۱۳]. علاوه بر این با قابلیت مشتق‌پذیری مستقیم می‌توان نقطه توان بیشینه را در سیستم‌های PV با سرعت محاسباتی بالا ردیابی کرد [۱۴-۱۷].

شایان ذکر است که به علت سادگی برای مدل‌های تک‌دیود، تابع صریح جریان-ولتاژ به صورت تحلیلی محاسبه می‌گردد [۹، ۱۸] اما تا کنون در حالت کلی، رابط صریحی برای مدل دو دیود سلول‌های PV ارائه نگردیده است؛ در حقیقت برای مدل دو دیود با مقاومت سری در حالت خاص $n_2 = 2n_1$ و همچنین با مقاومت سری و موازی در حالت بسیار محدودکننده $n_2 = n_1$ ، توابع دقیق و صریحی ارائه گردیده‌اند [۱۹، ۲۰]. در بخش دوم، با استفاده از تابع غیرخطی لمبرت و نظریه تونن^{۱۴}، مدل تقریبی و صریحی برای تابع جریان سلول‌های PV در حالت دو دیود ارائه می‌گردد. همچنین در بخش سوم، مدل پیشنهادی با داده‌های عملی موجود در منابع در شرایط استاندارد محیطی (STC^{۱۵}) اعتبارسنجی می‌گردد. با توجه به اینکه داده‌های عملی فقط در شرایط خاص STC در دسترس می‌باشد، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB، کفایت و توانایی مدل پیشنهادی در برازش منحنی جریان-ولتاژ موجود در تابش‌های گسترده‌ای ارزیابی می‌گردد.

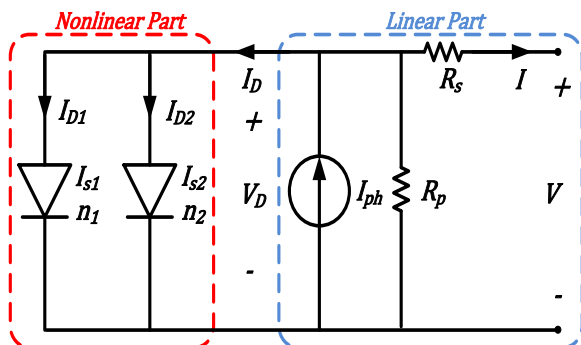
با الهام از نظریه نیمه‌رساناها و از حل معادلات نفوذ حامل‌های اقلیت^۱ در پیوند p-n سلول‌های فتوولتائیک (PV^۲)، مدل الکترونیکی این سلول‌ها به صورت مدار شکل (۱) بدست می‌آید. سلول‌های PV به صورت یک منبع جریان ایده‌آل موازی با دو دیود و R_p مدل می‌شوند که مجموعه آن‌ها به صورت سری با R_s قرار می‌گیرند [۱]. منبع جریان ایده‌آل جریان حاصل از پدیده فوتوالکتریک می‌باشد که به شدت تابش خورشید وابسته است. دیودها رفتار پیوند p-n را منعکس می‌کنند. اگرچه افزایش تعداد دیودها دقت مدل را بالا می‌برد، اما پیچیدگی مدل به شدت افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، با یک دیود نیز می‌توان رفتار جریان-ولتاژ سلول‌های PV را مدل کرد اما مدل‌های تک دیودمدل دقیقی جهت بررسی ویژگی‌های سلول‌های PV در تابش‌های پایین نمی‌باشند. در حقیقت، پدیده دیگری در پیوند p-n منجر به نشت بخشی از جریان فوتوالکتریک می‌گردد که در تابش‌های کوچک نمود بیشتری پیدا می‌کند [۲]. این مقاله به طور خاص به مدل‌های دو دیود می‌پردازد. پارامترهای n_1 و n_2 ضرایب انتشار^۳ دیودها می‌باشند که به عنوان ضریب ایده‌آل بودن^۴ نیز شناخته می‌شوند. ضریب انتشاربین مقادیر یک تا دو تغییر می‌کند که وابسته به فرایند تولید و ماده نیمه-رسانا است و در موارد بسیاری تقریباً یکمی باشد.

مقاومت سری R_s در سلول PV به عنوان مدل توان تلف شده ناشی از گردش جریان در قسمت‌های مختلف سلول PV می‌باشد که در مدل الکتریکی بین کاتد دیودها و پایانه خروجی قرار می‌گیرد. این مقاومت مجموع مقاومت‌های اتصال بین فلز بیس و لایه نیمه‌رسانا دوپینگ توسط p، مقاومت لایه‌های بیس و امیتر، مقاومت اتصال لایه دوپینگ توسط n و فلز لایه بالایی، مقاومت شبکه و مقاومت‌های اجزای دیگر می‌باشد. مقاومت موازی R_p در سلول PV به عنوان مدل جریان‌های نشتی در پیوند p-n می‌باشد که در مدل الکتریکی به طور موازی با دیودها قرار می‌گیرد. این مقاومت ناشی از تلفات جریان اتصال کوتاه محلی در لایه امیتر یا مقاومت‌های مرزهای پیرامون نیمه‌رسانا می‌باشد که عمدتاً به فرایند ساخت سلول PV بستگی دارد.

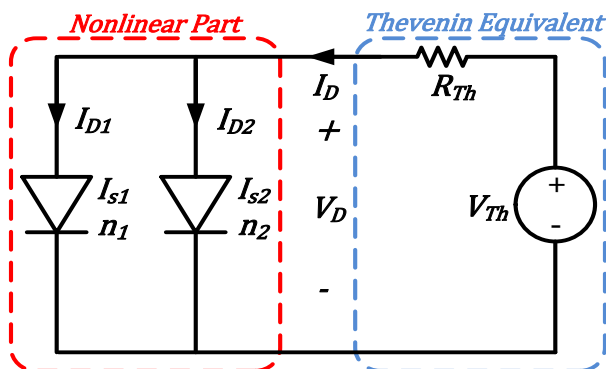


شکل (۱): مدل دو دیود سلول PV شامل مقاومت‌های سری و موازی

با ضرب دو طرف معادله (۵) در $\frac{aR_{Th}}{n_1 V_T} e^{\frac{aR_{Th}(I_{D1}+I_{s1})}{n_1 V_T}}$ خواهیم داشت:

$$\frac{aR_{Th}(I'_{D1} + I_{s1})}{n_1 V_T} e^{\frac{aR_{Th}(I'_{D1}+I_{s1})}{n_1 V_T}} = \frac{I_{s1} aR_{Th}}{n_1 V_T} e^{\frac{V_{Th} + I_{s1} aR_{Th}}{n_1 V_T}} \quad (۶)$$


شکل (۲): جداسازی المان‌های خطی و غیرخطی در مدل دو دیود



شکل (۳): جایگزینی معادل تونن در بخش خطی مدل دو دیود

با استفاده از تعریف تابع لمبرت در [۲۲] و به کارگیری آن در معادلات (۵) و (۶)، جریان عبوری از دیود اول با رابطه (۷) توصیف می‌شود:

$$I'_{D1} = \frac{n_1 V_T}{aR_{Th}} \text{Lambert } w \left(\frac{I_{s1} aR_{Th}}{n_1 V_T} e^{\frac{V_{Th} + I_{s1} aR_{Th}}{n_1 V_T}} \right) - I_{s1} \quad (۷)$$

متعاقباً با تکرار روابط (۵) تا (۷) برای دیود دوم خواهیم داشت:

$$I'_{D2} = \frac{n_2 V_T}{aR_{Th}} \text{Lambert } w \left(\frac{I_{s2} R_{Th}}{n_2 V_T} e^{\frac{V_{Th} + I_{s2} R_{Th}}{n_2 V_T}} \right) - I_{s2} \quad (۸)$$

با توجه به شکل (۴)، مجموع جریان عبوری از دیودها به صورت زیر می‌باشد:

$$I_D = I'_{D1} + I'_{D2} \quad (۹)$$

علاوه براین ولتاژ دو سر دیودها با معادله (۱۰) بیان می‌گردد:

$$V_D = V_{Th} - I_D R_{Th} \quad (۱۰)$$

در بخش چهارم نیز با ارائه پارامتر تنظیم‌کننده مدل پیشنهادی، نقطه توان بیشینه (MPP^{16}) به صورت تحلیلی محاسبه شده و مدل جامع دو دیود سلول‌های خورشیدی در گستره وسیعی از تابش و دما در محیط SimPowerSystems نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی می‌گردد. در پایان دست‌آوردهای مقاله به طور مختصر در بخش پنجم منعکس می‌گردد.

۲- مبانی نظری مدل پیشنهادی

مدل دو دیود سلول‌های PV به همراه مقاومت‌های سری و موازی در شکل (۱) معرفی شده است. با جابجایی المان‌های خطی و غیرخطی در مدار الکترونیکی مذکور می‌توان این مدل را به صورت شکل (۲) نشان داد. بدین ترتیب می‌توان رابطه جریان-ولتاژ خروجی سلول را با معادله (۲) بیان کرد:

$$I = I_{ph} - G_p V_D - I_D \quad (۲)$$

که در آن ولتاژ دو سر دیودها و I_D جریان عبوری از آن‌ها است. همچنین G_p معکوس R_p به مفهوم رسانایی پارازیتی موازی می‌باشد که به منظور سادگی در روابط ریاضی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با جداسازی بخش‌های خطی و غیرخطی مدار معادل الکترونیکی سلول-های PV می‌توان از قضیه تونن در مدارهای الکتریکی برای ساده‌سازی بخش خطی استفاده کرد که در شکل (۳) قابل مشاهده است. این ایده کمک می‌کند تا پنج متغیر I , V , I_{ph} , R_s و R_p را به اختصار با دو متغیر ولتاژ معادل تونن V_{Th} و مقاومت معادل تونن R_{Th} در نظر گرفت. این متغیرها با استفاده از نظریه مدارهای الکتریکی با معادلات زیر توصیف می‌گردند:

$$R_{Th} = \frac{R_s}{1 + G_p R_s} \quad (۳)$$

$$V_{Th} = \left(\frac{V}{R_s} + I_{ph} \right) R_{Th} \quad (۴)$$

همانطور که در [۲۱] ارائه شده است، اگر R_{Th} را با مضرب‌های مشخصی از R_{Th} به صورت سری با دیودها جایگزین کنیم، می‌توان در نهایت رابطه جریان-ولتاژ را به صورت صریح اما تقریبی بیان نمود.

در این پژوهش مضرب a برای دیود اول و مقدار واحد یک برای دیود دوم در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده است مقاومت‌های aR_{Th} و R_{Th} به ترتیب به صورت سری با دیودهای اول و دوم قرار گرفته‌اند. بدین ترتیب می‌توان جریان عبوری از هر دیود را به طور جداگانه به صورت تحلیلی بدست آورد. معادله دیود شاکلی برای دیود اول به صورت زیر می‌باشد:

$$I'_{D1} + I_{s1} = I_{s1} e^{\frac{V_{Th} - I'_{D1} aR_{Th}}{n_1 V_T}} \quad (۵)$$

مربوط به دو نوع سلول سیلیکونی پلی کریستالی ($P-Si^{18}$) و ماژول سیلیکونی مونوکریستالی ($Mono-Si^{19}$) به ارزیابی مدل پیشنهادی می پردازیم. مقاله های [۲۴] و [۲۷] با استفاده از بستر آزمایشگاهی، پارامترهای معادله (۱) را به ترتیب برای سلول $P-Si$ و ماژول $Mono-Si$ در STC محاسبه نموده اند که در جدول (۱) لیست شده اند. بدین ترتیب با تولید داده توسط معادله (۱)، می توان توانایی مدل پیشنهادی را در مطابقت با مدل کلاسیک بررسی کرد.

جدول (۱): پارامترهای مدل دو دیود برای سلول $P-Si$ و ماژول $Mono-Si$ مورد استفاده برای ارزیابی مدل پیشنهادی در STC

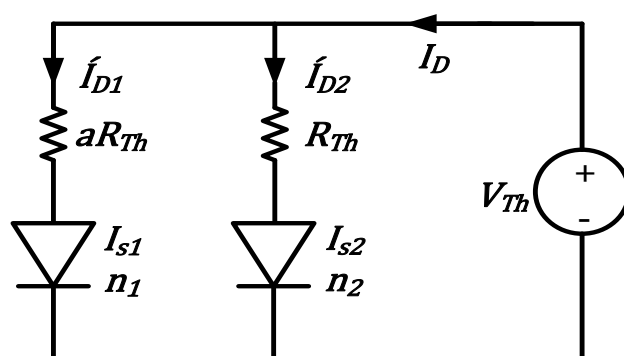
ماژول $Mono-Si$	سلول $P-Si$	پارامترهای سلول و ماژول PV	
		مشترک در مدل های ضمنی و صریح	
		پارامتر مربوط به مدل پیشنهادی	
		$I_{ph}(A)$	
5.55	4.69×10^{-2}		
		$I_{s1}(A)$	
6.45×10^{-9}	6.11×10^{-11}		
		$I_{s2}(A)$	
3.62×10^{-5}	9.15×10^{-7}		
		$R_s(\Omega)$	
11.7×10^{-3}	4.88×10^{-1}		
		$R_p(\Omega)$	
6.34×10^{-1}	3.23×10^{-2}		
		n_1	
1.21	1		
		n_2	
2.72	2		
		a	
1.46	1.39		

بدون هیچ تغییری در تعریف و مقدار پارامترهای معادله (۱)، مقدار پارامتر a برای مدل پیشنهادی با استفاده از روش های برازش منحنی بدست می آید که با پس زمینه خاکستری در جدول (۱) ثبت شده است. در شکل های (۵) و (۶)، قابلیت مدل پیشنهادی در ایجاد رفتار $I-V$ مربوط مدل دو دیود نشان داده شده است. مجموع مربعات خطا (SSE^{20}) برای سلول $P-Si$ و ماژول $Mono-Si$ به ترتیب $10^{-7} \times 8.22$ و $10^{-5} \times 1.43$ محاسبه شده است که خطای قابل قبولی برای تضمین صحت مدل پیشنهادی در STC می باشد.

با جایگذاری رابطه (۹) و (۱۰) در رابطه (۲) رابطه جریان نسبت به ولتاژ خروجی سلول PV به صورت معادله (۱۱) بیان می گردد. این مدل که به صورت صریح $I = f(V)$ بدست آمده است، از نظر حجم محاسباتی برای تحلیل رفتار سلول های PV به صورت نظری و کاربردی سودمند است.

$$I = \frac{I_{ph} + I_{s1} + I_{s2} - G_p V}{1 + R_s G_p} - \frac{n_1 V_T}{a R_s} \text{Lambert } w \left(\frac{I_{s1} a R_s}{n_1 V_T (1 + R_s G_p)} e^{\frac{V_s + I_{ph} R_s + I_{s1} a R_s}{n_1 V_T (1 + R_s G_p)}} \right) - \frac{n_2 V_T}{R_s} \text{Lambert } w \left(\frac{I_{s2} R_s}{n_2 V_T (1 + R_s G_p)} e^{\frac{V_s + I_{ph} R_s + I_{s2} R_s}{n_2 V_T (1 + R_s G_p)}} \right) \quad (11)$$

در این بخش، فرض شده است که بتوان R_{Th} را با مضارب مشخصی از R_{Th} به صورت سری با دیودها جایگزین کرد. اساساً این فرضیه منجر به حل مستقل جریان عبوری از هر دیود گردیده است که در نهایت رابطه صریح جریان-ولتاژ خروجی سلول PV را نتیجه داده است. غیرخطی گری های ناشی از وجود دیودها در مدل الکترونیکی موجب پیچیدگی در تحلیل مداری این مدل شده است؛ با استفاده از تقریب تکه ای-خطی (PWL^{19}) دیودها می توان در حالت های خاصی مقدار a را به صورت تحلیلی محاسبه کرد اما در حالت کلی برای بدست آوردن آن باید از روش های برازش منحنی استفاده کرد که در بخش ۳ توضیح داده می شود [۲۳].



شکل (۴): جایگزینی مقاومت R_{Th} با دو مقاومت aR_{Th} و R_{Th} .

۳- اعتبارسنجی مدل پیشنهادی

۳-۱- ارزیابی مدل با داده های واقعی

رابطه جریان-ولتاژ ضمنی مدل دو دیود سلول های PV که با معادله (۱) بیان شده است، به طور مفصل در مقاله های متعددی بررسی شده است [۲۴-۲۶]. در این بخش با استفاده از داده های عملی

جدول (۲): مشخصات سلول P-Si جهت مطالعات شبیه سازی

مقدار	مشخصات
۷۰.۵۶۹	V_{oc}
۸۲.۹۸	I_{sc}
۰.۰۳ Ω	$R_s(T_0, G_0)$
۶ Ω	$R_p(T_0)$
$۱.۷ \times 10^{-1} / ^\circ K$	k_{ph}
$۲ \times 10^{-1} / ^\circ K$	v_T
۵۰۰ Ω.W	φ_G
$-۸ \times 10^{-1} / ^\circ K$	ψ_T

$$I_{ph}(T, G) = \frac{G}{G_0} I_{ph}(T_0, G_0) [1 + k_{ph}(T - T_0)]$$

$$I_{si}(T) = I_{si}(T_0) \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{n_i}} e^{\left(\frac{E_g(T)}{n_i V_T} - \frac{E_g(T_0)}{n_i V_{T0}} \right)}, \quad i = 1 \text{ or } 2$$

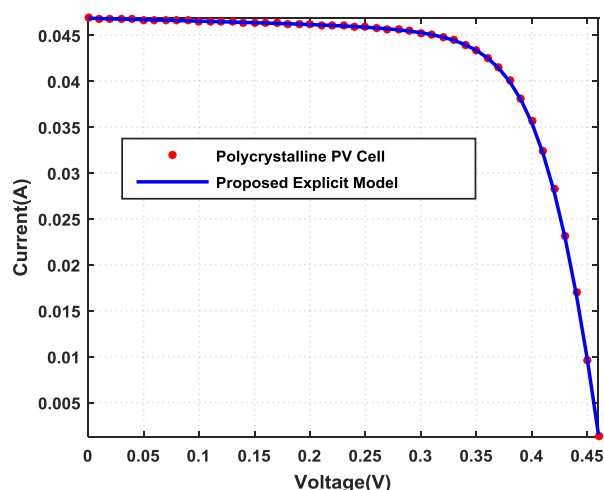
$$E_g(T) = 1.17 - 4.37 \times 10^{-4} \frac{T^2}{T + 636}$$

$$R_s(T, G) = R_s(T_0, G_0) + \varphi_G \left(\frac{1}{G} - \frac{1}{G_0} \right) + v_T (T - T_0)$$

$$R_p(T) = R_p(T_0) e^{\psi_T (T - T_0)}$$

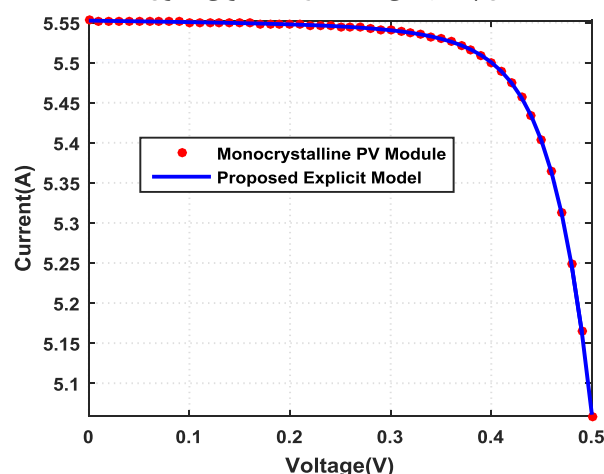
(۱۲)

بنابراین می توان صحت مدل پیشنهادی را نسبت به تغییرات تابش بررسی کرد. بدین منظور، از مدل ضمنی کلاسیک برای تولید داده های جریان و ولتاژ در T_0 و تابش های از ۵۰ تا ۱۱۰۰ W/m^2 با پله های ۱۵۰ W/m^2 استفاده شده است. همانطور که در شکل (۷) نشان داده شده است، با برازش منحنی به داده های تولیدی، منحنی های I-V مدل پیشنهادی با کمینه کردن خطای برازش بدست آمده اند. برای بررسی خطای برازش، اختلاف بین جریان مدل ضمنی و مدل پیشنهادی در ولتاژهای بین صفر تا ولتاژ مدار باز محاسبه شده است. منحنی های خطا در شکل (۸) رسم شده است؛ مقدار خطا در نزدیکی های ولتاژ مدار باز افزایش می یابد. علاوه بر این در شدت روشنایی های بالا، مقدار خطا نیز بالا می رود. با این حال در بدترین حالت، مقدار خطا از ۰.۰۲ تجاوز نمی کند که حاکی از قابلیت مدل پیشنهادی در شبیه سازی رفتار تابع ضمنی جریان- ولتاژ سلول های PV است.



شکل (۵): مشخصه های I-V برای مدل کلاسیک (نقطه چین) و برای

مدل پیشنهادی (خط) در STC برای سلول P-Si



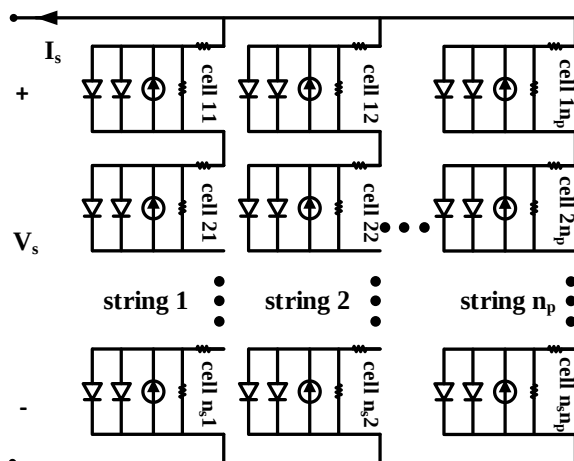
شکل (۶): مشخصه های I-V برای مدل کلاسیک (نقطه چین) و برای

مدل پیشنهادی (خط) در STC برای ماژول Mono-Si

۲-۳- ارزیابی مدل با داده های مدل کلاسیک

معادله (۱) شامل پارامترهای I_{ph} , I_{s1} , I_{s2} , R_s و R_p می باشد که به صورت طبیعی مقادیر آن ها به متغیرهای محیطی مانند دما و تابش وابسته است. این مقادیر به صورت عملی در گستره وسیعی از دما و تابش در دسترس نمی باشند. به منظور بررسی درستی مدل پیشنهادی در خارج از STC، روابط موجود در معادله (۱۲) به منظور بروزسانی پارامترهای مذکور نسبت به تغییرات دما و تابش ارائه می گردند. این معادلات مربوط به یک سلول P-Si می باشد که به طور کامل در [۲۸] به آن پرداخته شده است. در رابطه (۱۲)، k_{ph} , v_T , φ_G و ψ_T ضرایب دمایی و تابشی، و E_g شکاف انرژی^{۲۱} می باشند. مقادیر $I_{ph}(T_0, G_0)$, $I_{s1}(T_0)$, $I_{s2}(T_0, G_0)$ و $R_p(T_0)$ با استفاده از داده های ارائه شده توسط سازندگان سلول های PV در STC مانند ولتاژ مدار باز V_{oc} ، جریان اتصال کوتاه I_{sc} ، ولتاژ نقطه توان بیشینه V_{mp} و جریان نقطه توان بیشینه I_{mp} محاسبه می گردد. مشخصات سلول P-Si مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۲) ذکر شده است.

می‌گردد. شایان ذکر است که دیودهای بای پس^{۲۲} و سدکننده^{۲۳} در این شکل به منظور سادگی تصویر حذف شده‌اند.



شکل (۹): ماژول PV شامل n_s سلول سری و n_p رشته موازی

$$X(V_s) = \text{Lambert } w \left(\frac{I_{s1} a R_s}{n_1 V_T (1 + R_s G_p)} e^{\frac{V_s + n_s I_{ph} R_s + n_s I_{s1} a R_s}{n_s n_1 V_T (1 + R_s G_p)}} \right) \quad (13)$$

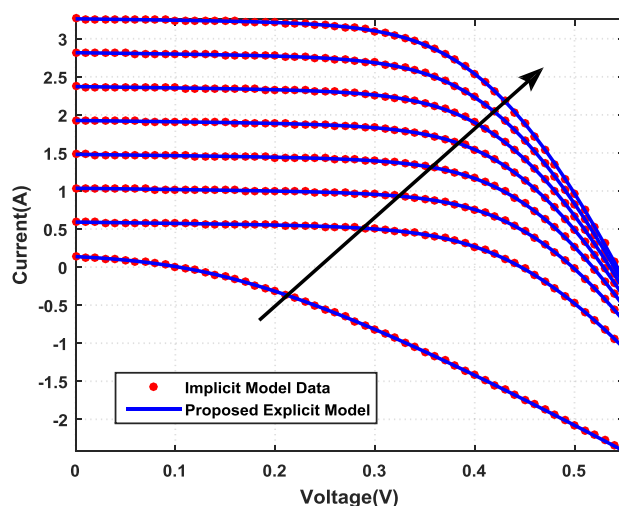
$$Y(V_s) = \text{Lambert } w \left(\frac{I_{s2} R_s}{n_2 V_T (1 + R_s G_p)} e^{\frac{V_s + n_s I_{ph} R_s + n_s I_{s2} R_s}{n_s n_2 V_T (1 + R_s G_p)}} \right) \quad (14)$$

$$I_s = f(V_s) = \frac{n_p}{1 + R_s G_p} \left(I_{ph} + I_{s1} + I_{s2} - \frac{G_p V_s}{n_s} \right) - \frac{n_p V_T}{R_s} \left(\frac{n_1}{a} X(V_s) + n_2 Y(V_s) \right) \quad (15)$$

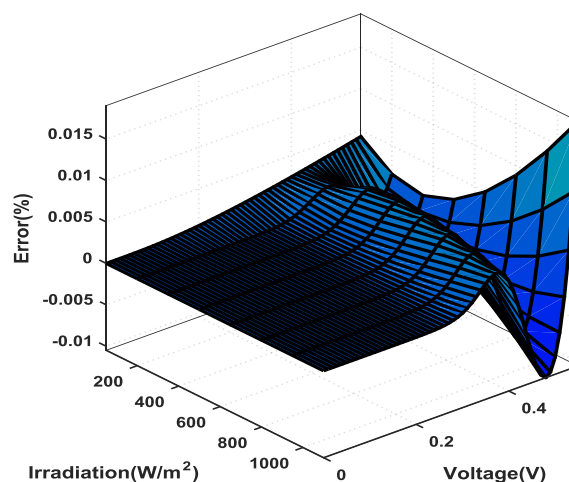
با توجه به اینکه معادله (۱۵) به صورت تابع صریح جریان از ولتاژ می‌باشد، با مشتق‌گیری مستقیم می‌توان نقطه توان بیشینه ماژول PV را به صورت دقیق محاسبه نمود. با تعریف رابطه (۱۶):

$$y = \text{Lambert } w(u(x)) \Leftrightarrow \frac{dy}{dx} = \frac{\frac{du(x)}{dx} \text{Lambert } w(u(x))}{u(x)(1 + \text{Lambert } w(u(x)))} \quad (16)$$

به سادگی مشتق تابع رابطه (۱۵) به صورت (۱۷) ارائه می‌گردد:



شکل (۷): منحنی‌های I-V مدل کلاسیک دیود (نقطه چین) و مدل پیشنهادی (خط) در T_0 و تابش‌های از ۵۰ تا 1100 W/m^2 با پله‌های 150 W/m^2 جهت پیکان افزایش تابش را نشان می‌دهد

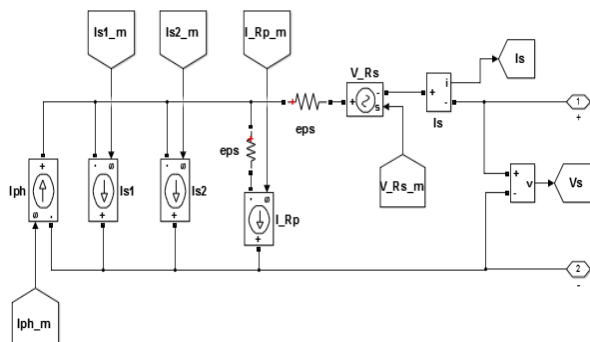


شکل (۸): خطای جریان مدل کلاسیک دیود و مدل پیشنهادی در T_0 و تابش‌های از ۵۰ تا 1100 W/m^2 با پله‌های 150 W/m^2

۴- ساخت ماژول PV در محیط SimPowerSystems

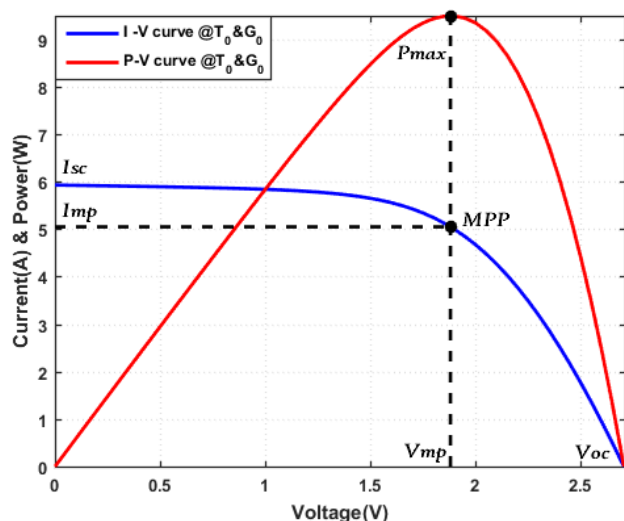
ماژول‌های PV از ماتریس‌های سلول‌های PV به صورت سری و موازی و مزارع خورشیدی از ماتریس‌های ماژول‌های PV به صورت سری و موازی ساخته می‌شوند. مشخصه الکتریکی ماژول‌ها و مزارع PV به ترتیب از ترکیب مشخصات الکتریکی سلول‌ها و ماژول‌های PV بدست می‌آیند [۲۹-۳۱].

با فرض اینکه توابع لمبرت مورد استفاده در رابطه (۱۱) را برای ماژول PV با معادلات (۱۳) و (۱۴) بیان کنیم، مدل پیشنهادی برای ماژول‌های PV به صورت معادله (۱۵) قابل ارائه می‌باشد. رابطه ذیل، جریان ماژول PV شامل n_p رشته PV را دست می‌آورد. قابل ذکر است که هر رشته شامل n_s سلول PV می‌باشد. شیوه اتصال سلول‌های PV با مدل دو دیود برای ساخت ماژول‌های PV در شکل (۸) مشاهده



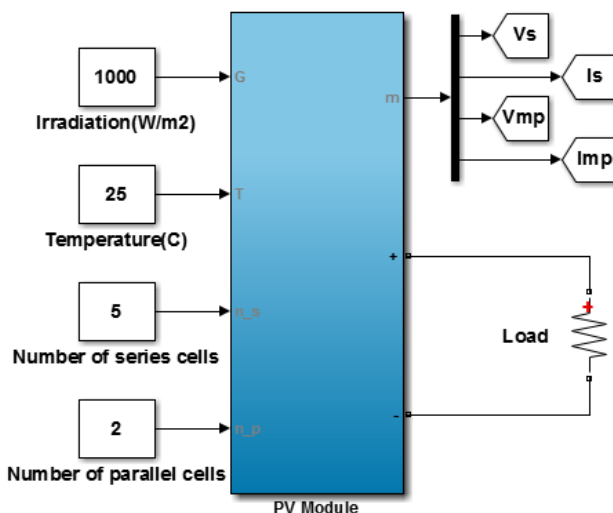
شکل (۱۱): مدار معادل الکترونیکی ماژول PV

ماژول PV در نرم افزار متلب با استفاده از مدل تک دیود و با فرض مقدار ثابت R_p نسبت به دما ارائه شده است. مدل های تک دیود از دقت لازم برای بررسی رفتار سلول های خورشیدی در تابش های محدود برخوردار نیستند [۲]. مدل دو دیود این مقاله با محاسبه همزمان مقادیر جریان و ولتاژ در MPP و با در نظر گرفتن تلفات جریانی مضاعف در تابش های محدود، گزینه مناسبی برای شبیه سازی های سلول های PV در کاربردهای صنعتی می باشند. به صورت نمونه ماژول PV پیشنهادی با ورودی های مشخص شده در شکل (۱۰) شبیه سازی شده است. درحقیقت با انتخاب ۵ سلول سری و ۲ رشته موازی منحنی های I-V و P-V در شکل (۱۲) رسم شده است. نقطه مربوط به توان بیشینه نیز در ولتاژ ۱,۸۸ ولت، جریان ۵,۰۵ آمپر و در نتیجه توان ۹,۴۹ وات بدست آمده که در شکل (۱۲) مشخص شده است. شایان ذکر است که این مدل به همراه کنترل کننده های PI و همچنین کنترل کننده های پیش بین با مجموعه ورودی های متناهی و پیوسته در شرایط مختلف محیطی آزمایش شده است که نتایج آن در مرجع [۳۲] گزارش شده است.



شکل (۱۲): منحنی های I-V و P-V ماژول خورشیدی و محاسبه نقطه توان بیشینه به روش پیشنهادی

$$\frac{dI_s}{dV_s} = g(V_s) = \frac{-n_p}{n_s R_s (1 + R_s G_p)} \left(R_s G_p + \frac{X(V_s)}{a(1 + X(V_s))} + \frac{Y(V_s)}{(1 + Y(V_s))} \right) \quad (17)$$



شکل (۱۰): مدل پیشنهادی ماژول PV در SimPowerSystems

همچنین می دانیم که در MPP مشتق توان نسبت به ولتاژ از معادله (۱۸) تبعیت می کند. بنابراین با جایگذاری (۱۷) در رابطه (۱۸)، ولتاژ و جریان در نقطه توان بیشینه ماژول های PV بدست می آید.

$$\left. \frac{dP_s}{dV_s} \right|_{V_{mp}} = \left(I_s + V_s \frac{dI_s}{dV_s} \right) \bigg|_{V_{mp}} = 0 \quad (18)$$

برای شبیه سازی مدل پیشنهادی در محیط SimPowerSystems، همانطور که شکل (۱۰) نشان می دهد، مقادیر دما و تابش و همچنین تعداد سلول های سری و موازی به عنوان ورودی ماژول PV در نظر گرفته شده است. همچنین مقادیر لحظه ای ولتاژ و جریان خروجی ماژول، مقادیر ولتاژ و جریان در نقطه توان بیشینه و همچنین شیب منحنی در MPP، در خروجی قابل مشاهده می باشد. مدار داخلی ماژول PV مربوط به شکل (۱۰) در شکل (۱۱) نشان داده شده است. از منبع وابسته جریان برای مدل کردن جریان فوتوالکتریک استفاده شده است. برای به روزرسانی پارامترهای ماژول خورشیدی از معادله (۱۲) استفاده شده است. جریان مربوط به دیودها نیز n_p برابر جریان سلول های PV در نظر گرفته شده است. در مورد مقاومت های R_s و R_p نیز به علت عدم وجود مقاومت های متغیر در کتابخانه سیمولینک متلب از منابع وابسته ولتاژ و جریان استفاده شده است.

- series and shunt resistances," Photovoltaics, IEEE Journal of, vol. 2, pp. 261-268, 2012.
- [۳] M. C. Di Piazza and G. Vitale, Photovoltaic Sources: Modelling and Emulation: Springer Science & Business Media. ۲۰۱۲ ,
- [۴] D. Rekioua and E. Matagne, Optimization of photovoltaic power systems: modelization, simulation and control: Springer Science & Business Media, 2012.
- [۵] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, Power electronics and control techniques for maximum energy harvesting in photovoltaic systems: CRC press, 2012.
- [۶] M. De Blas, J. Torres, E. Prieto, and A. Garcia, "Selecting a suitable model for characterizing photovoltaic devices," Renewable energy, vol. 25, pp. 371-380, 2002.
- [۷] D. Sera, R. Teodorescu, and P. Rodriguez, "PV panel model based on datasheet values," in Industrial Electronics, 2007. ISIE 2007. IEEE International Symposium on, 2007, pp. 2392-2396.
- [۸] A. Chatterjee, A. Keyhani, and D. Kapoor, "Identification of photovoltaic source models," Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol. 26, pp. 883-889, 2011.
- [۹] F. Ghani, M. Duke, and J. Carson, "Numerical calculation of series and shunt resistance of a photovoltaic cell using the Lambert W-function: experimental evaluation," Solar Energy, vol. 87, pp. 246-253, 2013.
- [۱۰] J. Cubas, S. Pindado, and M. Victoria, "On the analytical approach for modeling photovoltaic systems behavior," Journal of Power Sources, vol. 247, pp. 467-474, 2014.
- [۱۱] A. Al Nabulsi and R. Dhaouadi, "Efficiency optimization of a DSP-based standalone PV system using fuzzy logic and dual-MPPT control," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 8, pp. 573-584, 2012.
- [۱۲] C. Chellaswamy and R. Ramesh, "Parameter extraction of solar cell models based on adaptive differential evolution algorithm," Renewable Energy, vol. 97, pp. 823-837, 2016.
- [۱۳] E. I. Batzelis and S. A. Papathanassiou, "A Method for the Analytical Extraction of the Single-Diode PV Model Parameters," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 7, pp. 504-512, 2016.
- [۱۴] G. Farivar, B. Asaei, and S. Mehrnami, "An analytical solution for tracking photovoltaic module MPP," Photovoltaics, IEEE Journal of, vol. 3, pp. 1053-1061, 2013.
- [۱۵] E. Batzelis, G. E. Kampitsis, S. Papathanassiou, and S. N. Manias, "Direct MPP Calculation in
- از آنجایی که مدل کلاسیک دو دیود سلول های PV به طور ذاتی یک رابطه ریاضی ضمنی می باشد، برای حل آن ها در شبیه سازی های بی درنگ و همچنین در الگوریتم های شناسایی پارامتر، به روش های عددی نیاز است؛ در مقابل، شیوه صریح ارائه مدل پیشنهادی به مراتب از حجم تلاش محاسباتی می کاهد. بر اساس آنچه که در [۲] گزارش شده است، به طور معمول، مدل های صریح بازده محاسباتی را تا ده مرتبه نسبت به مدل های ضمنی افزایش می دهند. علاوه بر این، مدل پیشنهادی این پژوهش، نسبت به مدل ارائه شده در آن مقاله، از دو برتری برخوردار است؛ اول اینکه مدل این پژوهش در مقایسه با مدل صریح موجود که دارای دو پارامتر تنظیم کننده مدل می باشد، از یک پارامتر a استفاده می کند که از پیچیدگی مدل کاسته و در نتیجه موجب بهبود بازده محاسباتی می گردد. در مقابل، مجموع مربعات خطا برای سلول P-Si و ماژول Mono-Si به ترتیب $۱۰^{-۷} \times ۸,۲۲$ و $۱۰^{-۵} \times ۱,۴۳$ محاسبه شده است که با وجود استفاده از یک پارامتر a نسبت به دو پارامتر در مرجع [۲]، دقت مدل تحت تاثیر قرار نگرفته است. دوم اینکه در مدل پیشنهادی مفهوم و مقدار تمامی پارامترهای I_{s1} , I_{ph} , I_{s2} , R_s و R_p مربوط به مدل کلاسیک حفظ شده است. در حقیقت، مدل پیشنهادی از همان رابطه کلاسیک (۱۲) به منظور بروزرسانی پارامترهای مذکور نسبت به تغییرات دما و تابش استفاده می نماید. این یک دست آورد مهم نسبت به تابع صریح موجود در منابع برای مدل دو دیود سلول های PV می باشد که در آن نیاز به توسعه معادلات جدید برای بروزرسانی تمامی پارامترها می باشد. همچنین مدل پیشنهادی این پژوهش نسبت به مدل های ارائه شده در مقاله های [۳۳] و [۲۰] که به ترتیب در حالت های خاص $n_2 = n_1$ و $n_2 = 2n_1$ ارائه گردیده اند، گستره وسیع تری از انواع سلول های PV را مدل می کند.
- شایان ذکر است که همانطور که در شکل (۷) نشان داده شده است، مقدار ولتاژ مدار باز سلول های PV در تابش های محدود شدیداً کاهش می یابد؛ مقدار این کاهش تا حد بسیار زیادی به مقدار R_p وابسته است [۳۴]. همچنین جریان خروجی سلول PV با توجه جهت آن در شکل (۲) مثبت می باشد؛ در حقیقت قسمت منفی جریان در نمودارهای I-V شکل (۷) کاربردی نیستند و فقط جهت اعتبارسنجی مدل پیشنهادی از نقطه نظر ریاضی رسم گردیده اند.

مراجع

- [۱] K. L. Kennerud, "Analysis of performance degradation in CdS solar cells," IEEE Transactions on aerospace and electronic systems, pp. 912-917, 1969.
- [۲] A. Ortiz-Conde, D. Lugo-Munoz, and F. J. Garcia-Sanchez, "An explicit multiexponential model as an alternative to traditional solar cell models with

emitters," International journal of electronics, vol. 92, pp. 525-537, 2005.

- [۲۷] V. Khanna, B. Das, D. Bisht, and P. Singh, "A three diode model for industrial solar cells and estimation of solar cell parameters using PSO algorithm," Renewable Energy, vol. 78, pp. 105-113, 2015.
- [۲۸] M. Taherbaneh, A. Rezaie, H. Ghafoorifard, K. Rahimi, M. Menhaj, and J. Milimonfared, "Evaluation of two-diode-model of a solar panel in a wide range of environmental conditions," International Journal of Electronics, vol. 98, pp. 357-377, 2011.
- [۲۹] F. Keynia, F. Sayadi, and S. Esmaeili, "Two step Voltage and Reactive Power Control in Electrical Distribution Networks Based on Electrical Load and Output Forecasting," Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, vol. 15, pp. 43-54, 2018.
- [۳۰] M. Sabahi, A. Ashraf gandomi, and S. Saeidabadi, "Grid-Tie Multicell Inverter with High Safety and Ability to Obtain Maximum Power from Solar Cells," Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, vol. 13, pp. 95-104, 2016.
- [۳۱] H. Zarebidaki and R. Faez, "Designing and Simulation of Quantum Well Triple-Junction Solar Cell," Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, vol. 13, pp. 51-58, 2017.
- [۳۲] A. Dehghanzadeh, G. Farahani, and M. Maboodi, "Maximum Power Point Tracking of a Photovoltaic System Using Modified Incremental Algorithm and Model Predictive Control," Journal of Control, 2018.
- [۳۳] A. Ortiz-Conde, F. J. García-Sánchez, J. Muci, and A. Sucre-González, "A review of diode and solar cell equivalent circuit model lumped parameter extraction procedures," Facta universitatis-series: Electronics and Energetics, vol. 27, pp. 5, ۱۰۲-۷, ۲۰۱۴.
- [۳۴] G. E. Bunea, K. E. Wilson, Y. Meydbray, M. P. Campbell, and D. M. De Ceuster, "Low light performance of mono-crystalline silicon solar cells," in Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on, ۲۰۰۶ pp. 1312-1314.
- Terms of the Single-Diode PV Model Parameters," Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol. 30, pp. 226-236, 2015.
- [۱۶] A. Dehghanzadeh and G. Farahani, "A Survey on Maximum Power Point Tracking Techniques in Solar Installations," presented at the International Conference on New Research Achievements in Electrical and Computer Engineering, Tehran, 2016.
- [۱۷] H. A. Sher, A. F. Murtaza, A. Noman, K. E. Addoweesh, K. Al-Haddad, and M. Chiaberge, "A New sensorless hybrid MPPT algorithm based on fractional short-circuit current measurement and P&O MPPT," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 6, pp. 1426-1434, 2015.
- [۱۸] L. Peng, Y. Sun, Z. Meng, Y. Wang, and Y. Xu, "A new method for determining the characteristics of solar cells," Journal of power sources, vol. 227, pp. 131-136, 2013.
- [۱۹] M. Suthar, G. Singh, and R. Saini, "Comparison of mathematical models of photo-voltaic (PV) module and effect of various parameters on its performance," in Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS), 2013 International Conference on, 2013, pp. 1354-1359.
- [۲۰] S.-x. Lun, S. Wang, G.-h. Yang, and T.-t. Guo, "A new explicit double-diode modeling method based on Lambert W-function for photovoltaic arrays," Solar Energy, vol. 116, pp. 69-82, 2015.
- [۲۱] D. Lugo-Muñoz, J. Muci, A. Ortiz-Conde, F. J. Garcia-Sanchez, M. De Souza, and M. A. Pavanello, "An explicit multi-exponential model for semiconductor junctions with series and shunt resistances," Microelectronics Reliability, vol. 51, pp. 2044-2048, 2011.
- [۲۲] E. I. Batzelis, "Simple PV Performance Equations Theoretically Well Founded on the Single-Diode Model," IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 7, pp. 1400-1409, 2017.
- [۲۳] A. Dehghanzadeh, G. Farahani, H. Vahedi, and K. Al-Haddad, "Explicit double-exponential modeling methods for photovoltaic cells," in Industrial Technology (ICIT), 2017 IEEE International Conference on, 2017, pp. 423-428.
- [۲۴] J. Gow and C. Manning, "Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies," in Electric Power Applications, IEE Proceedings-, 1999, pp. 193-200.
- [۲۵] L. Castaner and S. Silvestre, Front Matter: Wiley Online Library, 2002.
- [۲۶] G. Mahanama* and H. Reehal, "Dark and illuminated characteristics of crystalline silicon solar cells with ECR plasma CVD deposited

- 1 Minority Carrier Diffusion
- 2 Photovoltaic
- 3 Emission Coefficient
- 4 Ideality Factor
- 5 Dark saturation current
- 6 Recombination
- 7 Quasi-neutral region
- 8 Diffusion
- 9 Depletion
- 10 Space-charge region
- 11 Gaussian
- 12 Particle Swarm Optimization
- 13 Real time
- 14 Thevenin's theorem
- 15 Standard Test Condition
- 16 Maximum Power Point
- 17 Piecewise Linear
- 18 Polycrystalline Silicon
- 19 Monocrystalline Silicon
- 20 Sum Square Error
- 21 Band gap energy
- 22 Bypass Diode
- 23 Block Diode

