

## افزایش راندمان یک سیستم فتوولتائیک مجهز به ذخیره ساز جهت اتصال به شبکه

اسماعیل حیدری نقدعلی<sup>۱\*</sup>، سامان نمازیان<sup>۲\*\*</sup>

۱- استاد دانشکده فنی حرفه ای شهرستان مرو دشت

۲- دانشجوی رشته مهندسی برق قدرت، دانشکده فنی حرفه ای شهرستان مرو دشت

\*[Esmailheidari66@gmail.com](mailto:Esmailheidari66@gmail.com) , \*\*[Samann4837@gmail.com](mailto:Samann4837@gmail.com)

ارسال: آبان ماه ۹۸ پذیرش: آذر ماه ۹۸

### چکیده

این پژوهش ابتدا یک بررسی بر روی انواع باتری‌ها انجام می‌دهد و بهترین و مناسبترین باتری برای اتصال به سلول‌های خورشیدی را معرفی می‌کند و سپس یک مدل دقیق از سلول خورشیدی متصل به شبکه و یک روش کنترلی برای دریافت بیشینه توان از سلول خورشیدی را مورد بررسی قرار می‌دهد. در نهایت یک سیستم فتوولتائیک به همراه مبدل آن در نرم افزار متلب شبیه سازی شده که نتایج بدست آمده برای پایداری توان خروجی سیستم فتوولتائیک و ذخیره ساز باتری و تامین انرژی مصرف کننده رضایت بخش بوده است.

کلید واژه ها : انرژی های تجدید پذیر ، سیستم ذخیره ساز انرژی باتری (BESS)، نقطه بیشینه توان ، بارهای محلی.

### ۱- مقدمه

امروزه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به شدت در حال افزایش است. افزایش چشم گیر مصرف انرژی، طبیعت تجدیدناپذیر سوخت‌های فسیلی، هزینه‌های سنگین سوخت‌های فسیلی، نگرانی‌های موجود در زمینه زیست محیطی و مشکلاتی از این قبیل، عوامل اصلی در توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشند. در این بین انرژی‌های باد و خورشیدی از مهمترین منابع تجدید پذیر محسوب می‌شوند. که به دلایلی از قبیل راندمان بالا، عدم انتشار گازهای آلاینده و ساختار انعطاف پذیر، پتانسیل بالایی در تبدیل به منابع سبز در آینده ای نزدیک را خواهند داشت [۱]. در این مطالعه روشی مبتنی بر برنامه ریزی غیر خطی برای انتخاب ظرفیت بهینه و محل نیروگاه های بادی متصل به شبکه بر اساس سناریوهای مختلف ارائه شده که هدف این روش کم کردن هزینه ها و بیشینه سازی انرژی بر مترمربع است [۲]. در بین این روش ها نیاز به یک بررسی و مقایسه ی این روش ها با یکدیگر می باشد. می توان گفت که هر کدام از این روش ها کاربرد خاصی داشته و طراح می بایستی بر اساس شرایط مورد نیاز، مناسبترین روش را انتخاب کند. می توان این مبدل ها را از نقطه نظر بازده، ایزولاسیون، قابلیت پیاده سازی MPPT، پیچیدگی طراحی و بازه توان مورد بحث و مقایسه

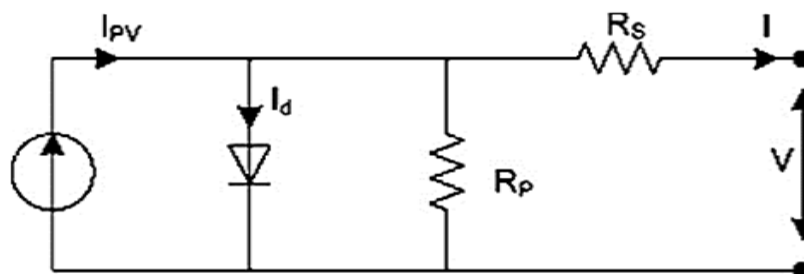
قرار داد. شبکه توزیع اکتیو نیز منجر به مفهوم جدیدی به نام ریزشبکه شده- است. با توجه به حضور منابع تولید پراکنده ماهیت ریزشبکه‌ها تا حد زیادی با شبکه‌های قدیمی متفاوت خواهد بود، بنابراین مسائل فنی و کنترلی آن‌ها باید متفاوت باشد. این تفاوت می‌تواند پایه بسیاری از تحقیقات در این زمینه شود، چون ماهیت ریزشبکه‌ها طوری است که قابلیت استقلال از شبکه بالا دست را دارند [۳] و همچنین در سال‌های اخیر پیشرفت فناوری‌های تولید برق از منابع تجدیدپذیر، پیشرفت در تجهیزات سیستم‌های مدیریت هوشمند و همچنین روند تجدید ساختار و ایجاد بازارهای رقابتی در صنعت برق همگی به رشد و توسعه تولیدات پراکنده شتاب بخشیده اند [۴].

روش‌های مختلفی برای طراحی بهینه و کمینه سازی هزینه‌های نیروگاه‌های بادی و خورشیدی ارائه شده است [۲] امکان سنجی اقتصادی سیستم ترکیبی، فتوولتائیک با ذخیره سازی باتری در این مطالعه انجام شده است [۳] اندازه یابی بهینه یک سیستم ترکیبی بادی- خورشیدی مستقل از شبکه در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته شده است [۴]. در این مطالعه روشی مبتنی بر برنامه ریزی غیر خطی برای انتخاب ظرفیت بهینه و محل نیروگاه‌های بادی متصل به شبکه بر اساس سناریوهای مختلف ارائه شده که هدف این روش کم کردن هزینه‌ها و بیشینه سازی انرژی بر مترمربع است [۵].

روش‌های مختلفی برای دنبال کردن نقطه بیشینه توان ارائه گشته است که از جمله‌ی آنها می‌توان به روش برازش منحنی [۳-۴]، روش جریان اتصال کوتاه کسری [۵]، روش ولتاژ مدار باز کسری [۶]، روش مبتنی بر جدول جستجو [۷-۸]، روش کنترل تک-سیکل [۹-۱۱]، روش‌های مبتنی بر فیدبک ولتاژ و جریان [۱۲-۱۵]، روش انحراف و مشاهده (P&Q) و روش بالارفتن از تپه [۱۶-۲۰] اشاره کرد.

## ۲- مدل سیستم فتوولتائیک

شکل (۱) مدار معادل پنل‌های خورشیدی را نشان می‌دهد. پنل‌های خورشیدی از چندین سلول فتوولتائیک سری یا موازی با اتصالات خارجی سری موازی تشکیل می‌گردد. معادله (۱) ویژگی‌های  $V-I$  پنل‌های خورشیدی را نشان می‌دهد و جدول (۱) انواع مازول‌های سیستم فتوولتائیک و جدول (۲) پارامترهای این سیستم را نشان داده شده است.



شکل ۱- مدار معادل پنل‌های خورشیدی

$$I = I_{PV} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{V + R_s I}{a V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (1)$$

که در آن  $I_{PV}$  جریان فتوولتائیک،  $I_0$  جریان معکوس اشباع،  $a$  ثابت دیود ایده آل،  $(V_t = N_s K T q^{-1})$  ولتاژ حرارتی،  $N_s$  تعداد سلول‌های سری،  $q$  بار الکترون،  $k$  ثابت بولتزمن،  $p-n$  دمای اتصال،  $R_p$  و  $R_s$  مقاومت معادل سری و موازی پنل‌های خورشیدی

است.  $I_{pv}$  دارای یک رابطه خطی با شدت نور بوده و همچنین با تغییرات درجه حرارت تغییر می کند.  $I_0$  وابسته به تغییرات درجه حرارت است. مقادیر  $I_{pv}$  و  $I_0$  با توجه به معادلات زیر محاسبه می شود:

$$I_{pv} = (I_{pv,n} + k_1 \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (2)$$

$$I_0 = \frac{I_{sc,n} + K_I \Delta T}{\exp\left(\frac{V_{oc,n} + K_V \Delta T}{aV_t}\right) - 1} \quad (3)$$

که در آن  $V_{oc,n}$ ,  $I_{pv,n}$ ,  $I_{sc,n}$  به ترتیب جریان فتوولتائیک، جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز در شرایط استاندارد ( $T_n = 25\text{ C}$ ) می باشند.  $K_I$  ضریب جریان اتصال کوتاه به دما ( $\Delta T = T - T_n$ ) انحراف دما از دمای استاندارد،  $G$  شدت نور و  $K_V$  نسبت ضریب ولتاژ مدار باز به درجه حرارت می باشد. ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه و ولتاژ-جریان مربوط به حداکثر توان، سه نقطه مهم از مشخصه I-V پنل های خورشیدی می باشد که به وسیله تغییرات شرایط جوی تغییر می کنند. استفاده از رابطه (۴) و (۵) که از معادلات مدل PV مشتق شده است، جریان اتصال کوتاه ولتاژ مدار باز در شرایط مختلف جوی می تواند محاسبه شود.

$$I_{sc} = (I_{sc,n} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (4)$$

$$V_{oc} = V_{oc,n} + K_V \Delta T \quad (5)$$

### ۳- روش ردیابی ماکزیم توان خروجی (MPPT)

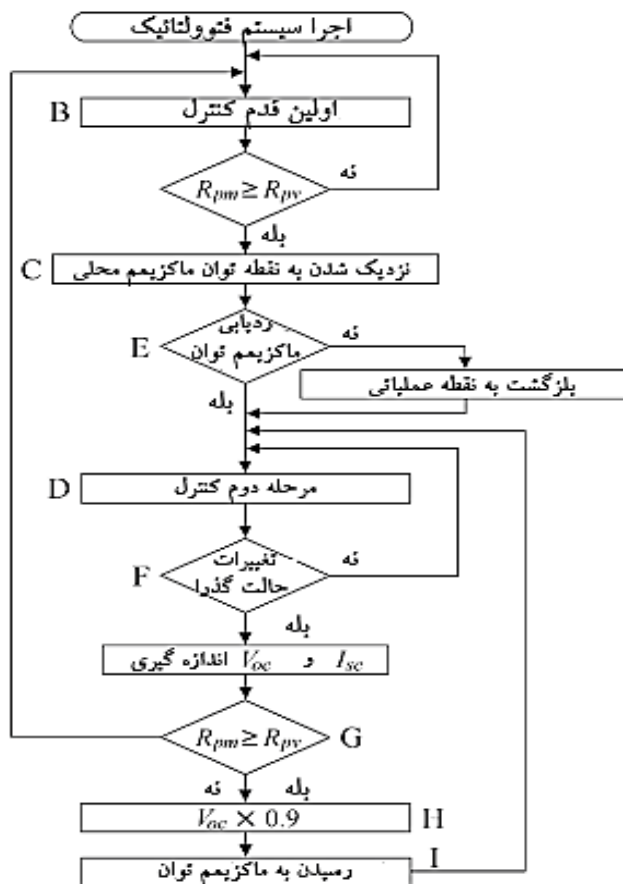
در سال ۲۰۱۱ Moradi and Reisi یک شاخه جدید از روش به عنوان "روش ترکیبی" معرفی شده است. الگوریتم MPPT پیشنهاد شده از دو بخش، محاسبه نقطه تنظیم و میزان سازی دقیق تشکیل شده است که در مرحله اول ولتاژ نقطه توان حداکثر (VMPP) بر اساس ولتاژ مدار باز و معادله (۵) تخمین زده شده و سپس، در مرحله دوم نقطه دقیق توان حداکثر با استفاده از  $dv/dI$  با دامنه کوچک و ثابت و اختلالات متعدد ردیابی شده است. الگوریتم کلی روش پیشنهادی در شکل (۲) نشان داده شده است. در این روش علاوه بر  $V_{oc}$ ,  $K_I$ ,  $K_V$  که توسط کارخانه سازنده داده می شود،  $R_S$  و  $R_P$  نیز مقادیر اولیه می باشند. این سه مقدار با جایگزین کردن سه نقطه  $(0, I_{sc,n})$ ,  $(V_{oc,n}, 0)$  و  $(V_{MPP,n}, I_{MPP,n})$  در شرایط استاندارد ( $G_n = 100\text{ W m}^{-2}$ ,  $T_n = 25\text{ C}$ ) در معادله (۱) و حل مجموعه معادله زیر تعیین می گردد.

$$\begin{aligned} I_{sc,n} &= I_{pv,n} - I_{o,n} \left( \exp\left(\frac{I_{sc,n} R_s}{aV_{T,n}}\right) - 1 \right) - \frac{I_{sc,n} R_s}{R_p} K_I \Delta T \frac{G}{G_n} \\ 0 &= I_{pv,n} - I_{o,n} \left( \exp\left(\frac{V_{oc,n}}{aV_{T,n}}\right) - 1 \right) - \frac{V_{oc,n}}{R_p} \rightarrow a, R_s, R_p \\ I_{MPP,n} &= I_{pv,n} - I_{o,n} \left( \exp\left(\frac{I_{MPP,n} R_s}{aV_{T,n}}\right) - 1 \right) - \frac{I_{MPP,n} R_s}{R_p} \end{aligned} \quad (6)$$

مقادیر لحظه ای ولتاژ، جریان و درجه حرارت پنل های خورشیدی اندازه گیری شده و  $I_{pv}$  که علاوه بر درجه حرارت تنها متغیر وابسته به شدت نور می باشد. با استفاده از معادله (۷) محاسبه می شود. در این معادله  $V_T$  و  $I_0$  به درجه حرارت وابسته اند و  $v_t = N_s K T q^{-1}$  به صورت رابطه (۲) قابل استفاده اند.

$$I_{PV} = I - I_o \left( \exp \left( \frac{V + I R_s}{a V_T} \right) - 1 \right) + \frac{V + I R_s}{R_p} \quad (7)$$

با دانستن  $I_{PV}$ ، معادله (۸)،  $I_{sc}$  را محاسبه نموده و این معادله  $m$  بار تکرار شده و در هر تکرار،  $I_{sc}$  در تکرار قبلی جایگزین خواهد شد (معادله ۸). به دلیل همگرایی جریان اتصال کوتاه، پس از  $m$  تکرار  $I_{sc}$  دیگر تفاوت چندانی نخواهد داشت. علاوه بر این به دلیل اینکه  $m$  یک عدد صحیح کوچک است.  $I_{PV}$  که در ابتدا تخمین زده شده بود، بسیار نزدیک به  $I_{sc}$  خواهد بود. به عبارت دیگر در چند تکرار  $I_{sc}$  با یک تقریب قابل قبول یافته خواهد شد.



شکل ۲- فلوچارت روش پیشنهادی MPPT

$$I_{sc,1} = I_{PV}$$

$$I_{sc,2} = I_{PV} - I_o \left( \exp \left( \frac{I_{sc,1} R_s}{a V_T} \right) - 1 \right) - \frac{I_{sc,1} R_s}{R_p} \dots \quad (8)$$

$$I_{sc,m+1} = I_{PV} - I_o \left( \exp \left( \frac{I_{sc,m} R_s}{a V_T} \right) - 1 \right) - \frac{I_{sc,m} R_s}{R_p}$$

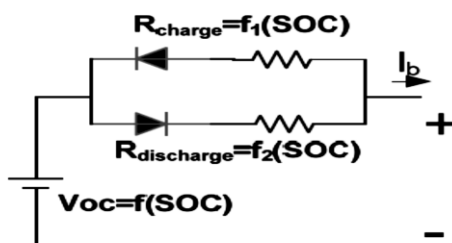
$$m = 1, 2, \dots, m, I_{sc} = I_{sc, m+1}$$

در این روش پیشنهادی، حلقه تکرار تنظیم دقیق به منظور اصلاح محاسبه  $I_{sc}$  به جهت جبران اثر خطای اندازه گیری و امکان عدم تطابق با پنل های خورشیدی استفاده شده است. در این روش، در صورت بروز تغییرات کوچک دما و  $I_{PV}$ ، حلقه تکرار تنظیم دقیق،

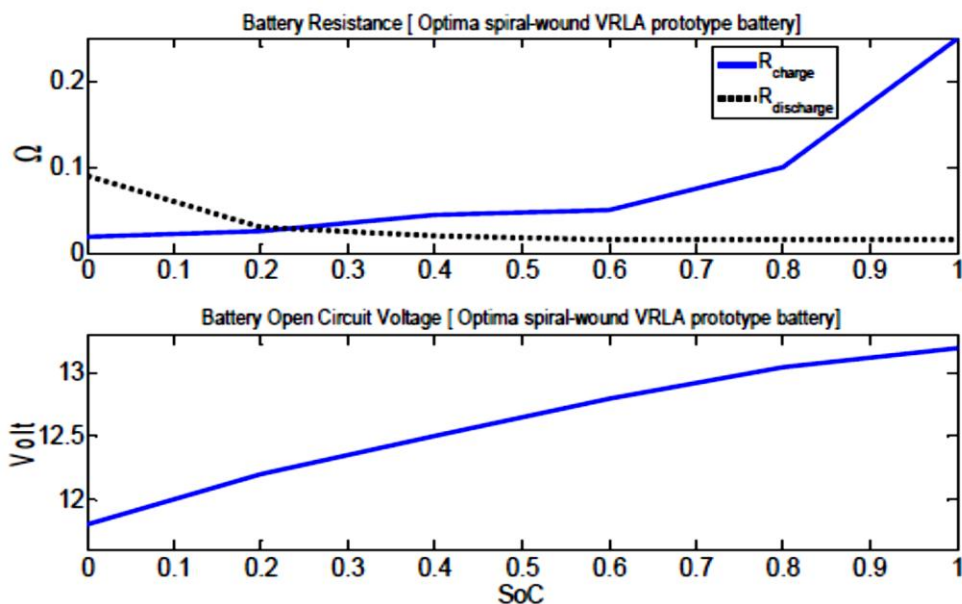
توان خروجی را تنظیم می‌نماید. از آنجا که  $I_{pv}$  در صورت تغییر شدت تابش متفاوت خواهد بود، می‌توان نتیجه گرفت که تکرار تنظیم دقیق تا زمانی که شرایط جوی تقریباً ثابت شود اجرا خواهد شد.

#### ۴- سیستم ذخیره سازی انرژی و مدلسازی باتری

یک مدل معتبر و معروف باتری، مدل مقاومت داخلی است که در آن مقاومت درونی باتری در حالت‌های شارژ و دشارژ، متفاوت و متناسب با وضعیت شارژ است. ولتاژ مدار باز نیز متناسب با وضعیت شارژ تعریف می‌گردد. در شکل (۳) این مدل نشان داده شده است و شکل (۴) نیز مقادیر مقاومت درونی و ولتاژ مدار باز را برای یک باتری نمونه نشان می‌دهد.

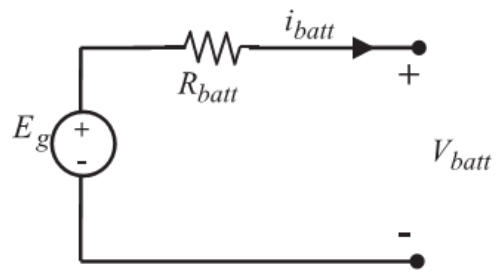


شکل ۳- مدل مقاومت درونی باتری



شکل ۴- ولتاژ مدار باز و مقاومت درونی یک باتری نمونه

#### ۵- مدل باتری



شکل ۵- مدار معادل باتری

$$V_{batt} = E_g - i_{batt}R_{batt} \quad (۹)$$

*Archive of SID*  $V_{batt}$ : ولتاژ خروجی باتری،  $i_{batt}$ : جریان خروجی باتری،  $R_{batt}$ : مقاومت خروجی باتری و  $E_g$ : ولتاژ باتری است.

$$E_g = E_{g0} - k \frac{Q}{Q - \int i_{batt} dt} + A \exp\left(B \cdot \int i_{batt} dt\right) \quad (10)$$

$E_g$ : ولتاژ باتری،  $E_{g0}$ : ولتاژ ثابت باتری،  $i_{batt}$ : جریان خروجی باتری،  $A$ : ولتاژ نمای در مدل باتری،  $B$ : ظرفیت نمایی در مدل باتری و  $Q$ : ظرفیت باتری است.

$$SoC(t_i) = \frac{1}{Q(t_i)} \int_{\infty}^{t_i} \eta_c(t) I_{batt}(t) dt \quad (11)$$

$SoC$ : حالت شارژ باتری،  $Q$ : ظرفیت باتری،  $\eta_c$ : راندمان شارژ باتری و  $i_{batt}$ : جریان خروجی باتری است.

$$Q(t) = \frac{C_{nominal} C_{t \text{ coef}}}{\left(1 + A_{cap} \left(\frac{I_{batt}(t)}{I_{nominal}}\right)^{B_{cap}}\right) (1 + \alpha \Delta T(t) + \beta c \Delta T^2(t))} \quad (12)$$

$Q$ : ظرفیت باتری،  $C_{nominal}$ : نرخ ظرفیت باتری،  $A$ : ولتاژ نمایی در مدل باتری،  $B$ : ظرفیت نمایی در مدل باتری،  $\alpha, \beta$ : ضریب دما در مدل باتری،  $\Delta T$ : تغییرات دما نسبت به مقدار مرجع ۲۵ درجه سانتی گراد است.

$$I_{nominal} = \frac{C_{nominal}}{n} \quad \text{برای } n \text{ ساعت} \quad (13)$$

$I_{nominal}$ : جریان دشارژ اسمی نسبت به نرخ ظرفیت باتری،  $C_{nominal}$ : نرخ ظرفیت باتری و  $n$ : میزان ساعات است.

## ۶- شبیه سازی و تجزیه و تحلیل داده ها

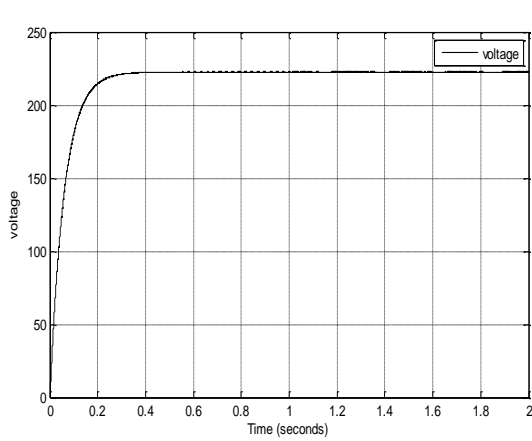
سیستم های هیبرید به دلیل خواص جالب توجه که از خود نشان داده اند در سالهای اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته اند. در این فصل ابتدا سیستم فتوولتائیک و عملکرد آن به تفصیل مورد بررسی قرار می گیرد. سپس سیستم فتوولتائیک که در آن کنترل کننده (ردیابی ماکزیم نقطه توان) توان خروجی را بر اساس نمونه گیری ولتاژ و جریان گسترش داده که مورد تحلیل و بررسی در شرایط تغییرات تابشی قرار می گیرد. سپس سیستم کنترلی متفاوت در سیستم ذخیره ساز باتری پیشنهاد شده است که شارژ و دشارژ باتری بر اساس کنترل توان و توان پیشنهادی بار کنترل گردیده است که باعث افزایش عمر باتری و عملکرد بهتر آن می شود. در پایان نیز به منظور رسیدن به یک نتیجه قابل قبول ساختار تکمیل شده سیستم های پیشنهادی با هم دیگر بصورت هیبرید به طور کامل با نرم افزار متلب مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار می گیرد. که جریان، ولتاژ و توان به ترتیب در شکل (۶)(۷)(۸) نمایش داده شده است.

جدول ۱- بازده ماژول های مختلف فتوولتائیک

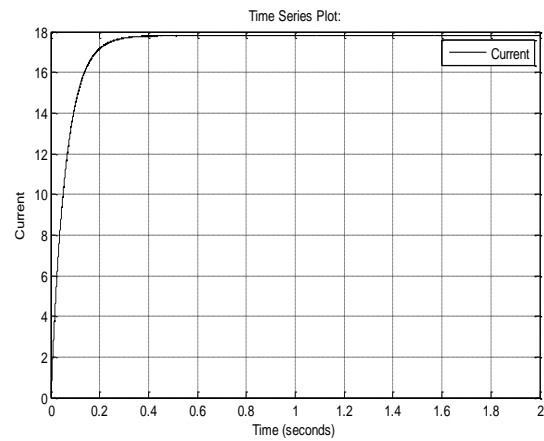
بازده (%)	ماژول
12.50-15	تک کریستال سیلیکون
11-14	پلی کریستال سیلیکون
10-13	مس ایندیم گالیم سلنید CIGS
9-12	کادمیم تلورید CdTe
5-7	سیلیکون آمورف

جدول ۲- پارامترهای سیستم فتوولتائیک

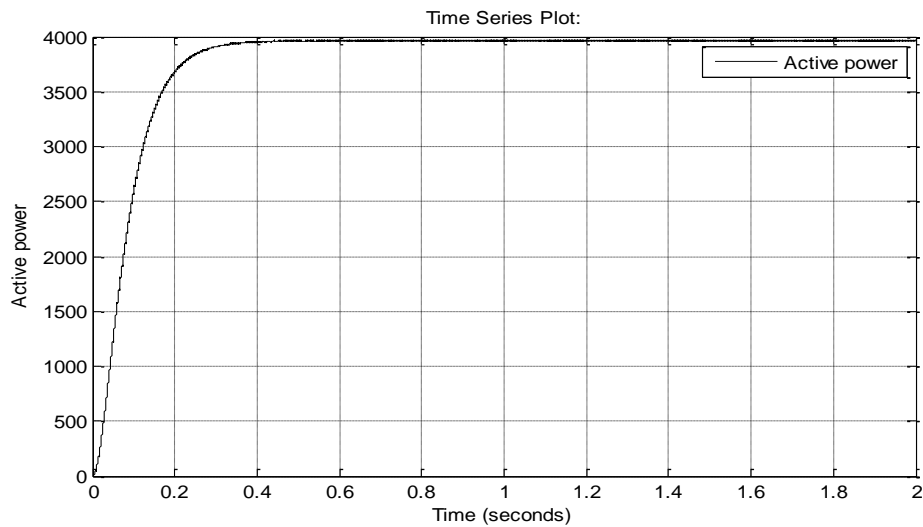
نماد	توضیحات	مقدار
$P_{nom}$	توان نامی	4Kw
$V_{nom}$	ولتاژ نامی	220v
Q	الکترون	$1.602 \times 10^{-19}c$
K	ثابت بولتزمن	$1.38 \times 10^{-23} J/K$
$I_{sc}$	جریان اتصال کوتاه	5.09261A
$V_{oc}$	ولتاژ اتصال کوتاه	59.2619V
T	درجه حرارت	25°



شکل ۷- ولتاژ بار سیستم



شکل ۶- جریان بار سیستم

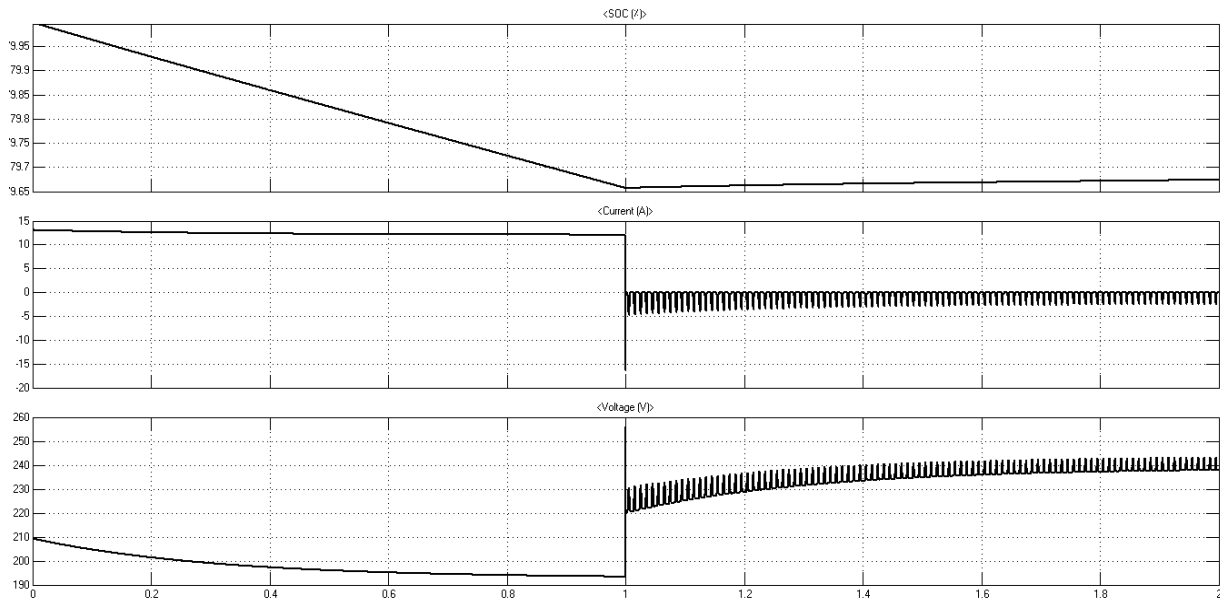


شکل ۸- توان اکتیو بار سیستم

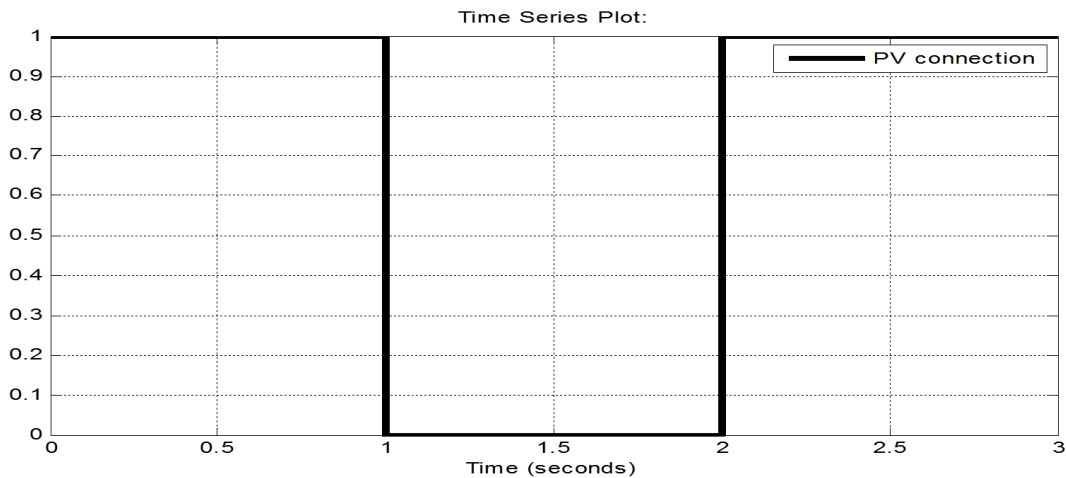


جدول ۳- پارامترهای سیستم ذخیره ساز باتری

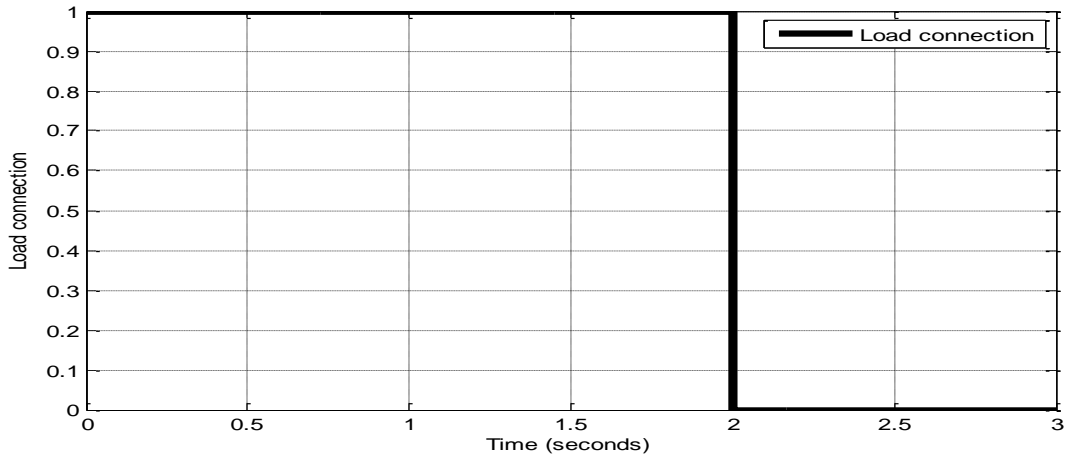
نماد	توضیحات	مقدار
نوع باتری		Lithium-ion
$P_{nom}$	توان نامی	4Kw
$V_{nom}$	ولتاژ نامی	220v
نرخ ظرفیت		18.18Ah
$f_s$	فرکانس سوئیچینگ	100khz



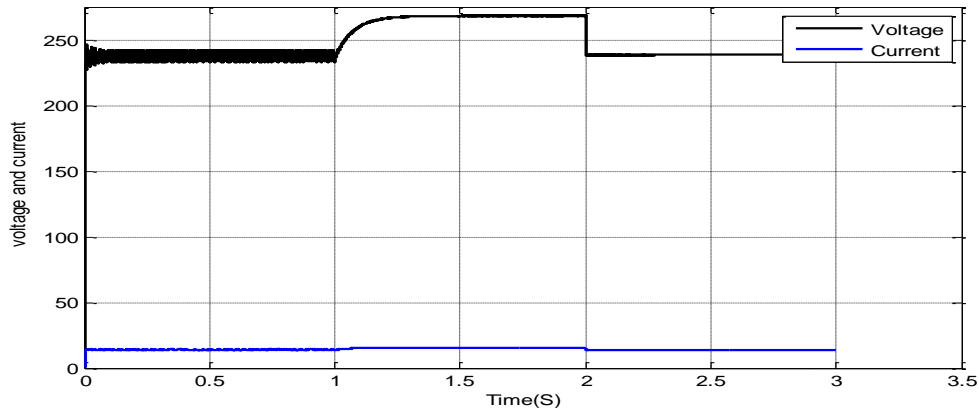
شکل ۹- از بالا Soc، جریان و ولتاژ (از ۰ تا ۱ باتری در حال شارژ و از ۱ تا ۲ در حال شارژ باتری)



شکل ۱۰- حالت اتصال سیستم فتوولتائیک

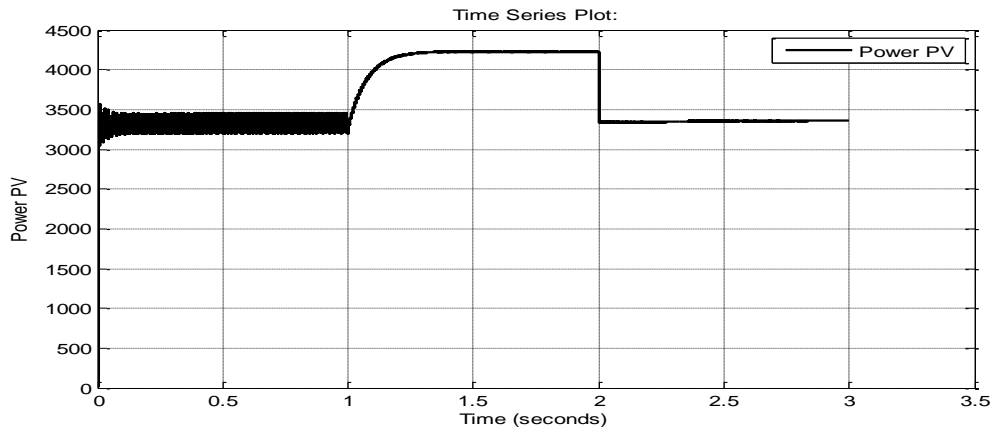


شکل ۱۱- حالت اتصال بار به سیستم هیبرید فتوولتائیک و باتری



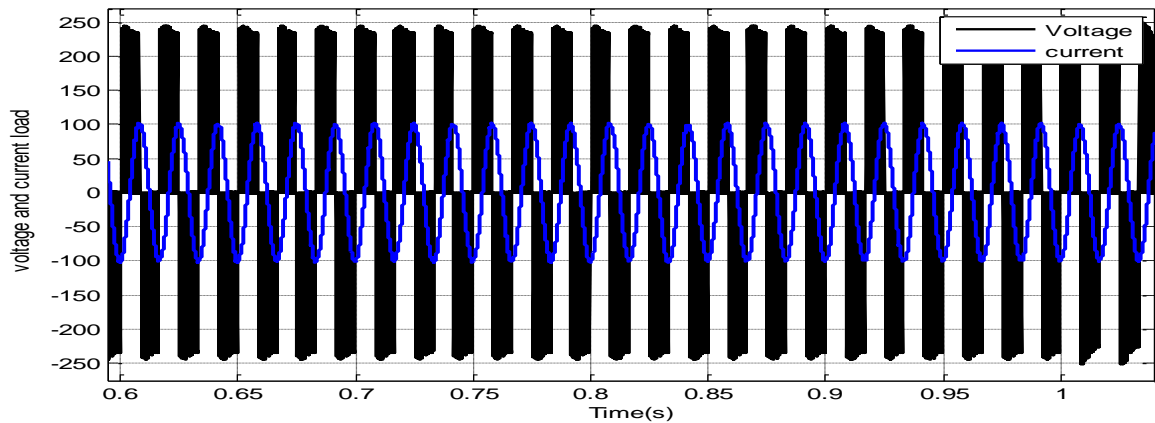
شکل ۱۲- ولتاژ و جریان خروجی سیستم فتوولتائیک

(سیستم فتوولتائیک بصورت دائم در حال تولید است فقط توسط بریکر از بار و باتری در زمان ۱ تا ۲ جدا شده است)

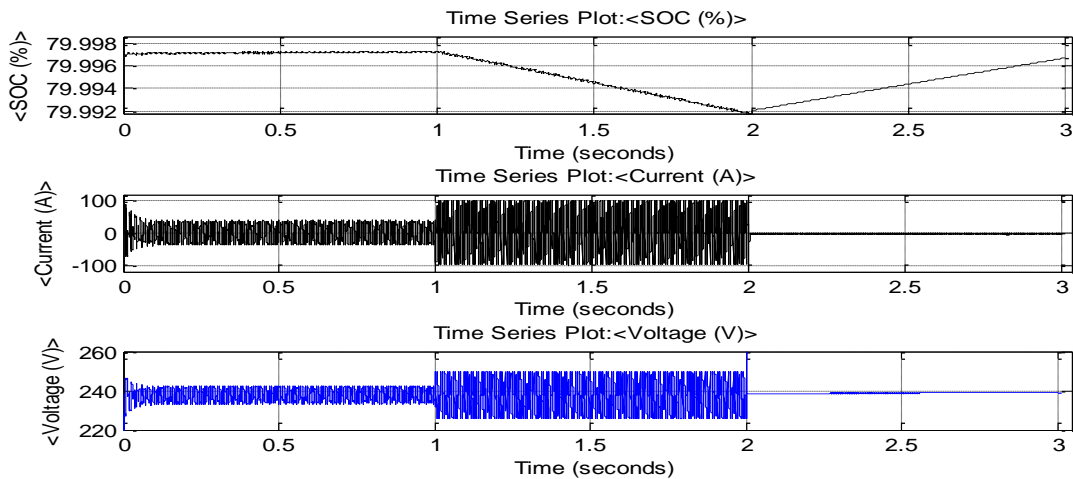


شکل ۱۳- توان خروجی سیستم فتوولتائیک

(سیستم فتوولتائیک بصورت دائم در حال تولید است فقط توسط بریکر از بار و باتری در زمان ۱ تا ۲ جدا شده است)



شکل ۱۴- ولتاژ و جریان خروجی بار



شکل ۱۵- SOC، ولتاژ و جریان باتری

### نتیجه گیری و پیشنهادات

#### ۷- نتیجه گیری

سلول‌های خورشیدی بسته به شرایطی که در آن قرار دارند مانند شرایط آب و هوایی، تابش و... دارای یک نقطه بیشینه توان<sup>۱</sup> می‌باشند. بنابراین نیاز به یک روشی که همواره سلول خورشیدی را در نقطه ماکزیمم توان قرار بدهد وجود دارد تا بتوان بیشینه توان و در نتیجه بهره‌وری را در سلول خورشیدی داشته باشیم. انرژی خورشیدی که توسط سلول‌های خورشیدی جذب می‌شوند، باید به گونه‌ای تبدیل گردند که قابل انتقال به بارهای محلی و شبکه باشند که این کار با استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت انجام می‌گیرد. استفاده از مبدل‌هایی با بازدهی بالا و هزینه‌ی اولیه و ثابت پایین ضروری به نظر می‌رسد. با مشاهده نتایج حاصل از شبیه‌سازی به این نتیجه می‌رسیم در شرایطی که سیستم فتوولتائیک قادر به تغذیه بار نیست در حالت سایه یا شب به خوبی سیستم ذخیره ساز باتری می‌تواند وظیفه

<sup>۱</sup>- Maximum Power Point (MPP)

خود را انجام داده و همانگونه که نشان داده شده SOC باتری که بیانگر حالت شارژ باتری است از ۸۰ درصد رو به کاهش گذشته و در زمان ۲ ثانیه برابر ۷۹.۹۹۲ درصد شده و توان مورد نیاز بار را تامین می کند شایان ذکر است در شرایطی که بار یا مصرف کننده ای به خروجی متصل نیست یا مصرفی ندارد (از زمان ۲ تا ۳ ثانیه) - سیستم ذخیره ساز باتری در صورت در دسترس بودن توان فتوولتائیک حتی در حالت سایه قادر به شارژ باتری است همانگونه که در شکل از زمان ۲ تا ۳ ثانیه نشان داده شده است SOC یا حالت شارژ باتری از ۷۹.۹۹۲ درصد رو به افزایش گذاشته و در زمان ۳ ثانیه برابر ۷۹.۹۹۹ درصد می شود.

#### ۸- پیشنهادات

در این پروژه به ارائه سیمولینک در محیط متلب بر اساس مدل مازول PV و سیستم ذخیره ساز باتری پرداخته شد. بوسیله مدل مطرح شده شماتیک شبیه سازی آرایه PV متفاوتی می توان ساخته شود و پارامترهای تابش و درجه حرارت هر مدل مازول PV نیز می تواند به صورت مستقل تعریف شود. مدل شبیه سازی آرایه PV به ما اجازه بررسی ویژگیهای آرایه PV را تحت شرایط مختلف درجه حرارت و تابش گوناگون به خصوص تحت تابش غیر یکنواخت می دهد. عملکرد مهم دیگر مدل مطرح شده این است که شبیه سازی سیستم ترکیبی PV و ذخیره ساز باتری بدست آمده بوسیله این مدل می تواند بصورت مسقل و به صورت متصل به شبکه به کار خود ادامه دهد. این مدل نه تنها به بررسی رفتار سیستم PV و ذخیره ساز باتری می پردازد، بلکه همچنین به استراتژی کنترل MPPT نیز اعتبار می بخشد. همچنین پیشنهاد می شود که در ساعات پیک بار از سیستم فتوولتائیک استفاده کرد و در ساعت بی باری یا کم باری سیستم ذخیره ساز در مدار قرار گیرد و توان مصرفی مصرف کنندگان را تامین نماید.

#### ۹- مراجع

1. Lei, L., 2011. Study on Maximum Power Point Tracking of Partially Shaded Photovoltaic System. Chongqing University, Chongqing, China. Liu, Y.L., Zhou, H., Cheng, Z., 2010. MPPT control method of PV system based on PSO. *Comput. Eng.* 36 (15), 265-267.
2. Li, X.D., Yao, X., 2012. Cooperatively coevolving particle swarms for large scale optimization. *IEEE Trans. Evol. Comput.* 16 (2), 210-224. Maki, A., Valkealahti, S., 2013. Effect of photovoltaic generator components on the number of MPPs under partial shading conditions. *IEEE Trans. Energy Convers.* 28 (4), 1008-1017.
3. Moreton, R., Lorenzo, E., Narvarte, L., 2015. Experimental observations on hot-spots and derived acceptance/rejection criteria. *Sol. Energy* 118, 28-40.
4. Nafeh, A.E.S.A., 2011. A modified MPPT control loop for PV/battery-charging system using PI controller optimally tuned with GA. In. *J. Numer. Modell. - Electron. Networks Dev. Fields* 24 (2), 111-122.
5. Piegari, L., Rizzo, R., 2010. Adaptive perturb and observe algorithm for photovoltaic maximum power point tracking. *Renew Power Generation IET* 4 (4), 317-328.
6. Pierro, M., Bucci, F., Cornaro, C., 2015. Full characterization of photovoltaic modules in real operating conditions: theoretical model, measurement method and results. *Photovoltaics* 23 (4), 443-461.
7. Radjai, T., Rahmani, L., Mekhilef, S., Gaubert, J.P., 2014. Implementation of a modified incremental conductance MPPT algorithm with direct control based on a fuzzy duty cycle change estimator using dSPACE. *Sol. Energy* 110, 325-337.
8. Renaudineau, H. et al., 2015. APSO-based global MPPT technique for distributed PV power generation. *IEEE Trans. Industr. Electron.* 62 (2), 1047-1058.
9. Shaiek, Y., Smida, M.B., Sakly, A., Mimouni, M.F., 2013. Comparison between conventional methods and GA approach for maximum power point tracking of shaded solar for PV generators. *Sol. Energy* 90 (4), 107-122.
10. Shi, J.Y., Zhang, W., 2014. MPPT for PV systems based on a dormant PSO algorithm. *Electric Power Syst. Res.* 123, 100-107.

11. Tey, K.S., Mekhilef, S., 2014. Modified incremental conductance algorithm for photovoltaic system under partial shading conditions and load variation. *IEEE Trans. Industr. Electron.* 61 (10), 5384–5392.
12. Vinnichenko, N.A., Uvarov, A.V., Znamenskaya, I.A., Ay, H., Wang, T.H., 2014. Solar car aerodynamic design for optimal cooling and high efficiency. *Sol. Energy* 103(6), 183–190.
13. Wu, Z., Xia, X., 2015. Optimal switching renewable energy system for demand side management. *Sol. Energy* 114, 278–288.
14. Yin, C. et al., 2015. Fractional-order adaptive minimum energy cognitive lighting control strategy for the hybrid lighting system. *Energy Build.* 87 (7), 176–184.
15. Zan, B.L., Song, Y.D., Wang, L., Wang, Y.H., Du, X.Q., Zeng, Y., 2013. An improved P&O MPPT method for photovoltaic power system. *Energy and power technology PTS 1 and 2*, 805–806, pp. 45–51.
16. Wu Libo; Zhao Zhengming; Liu Jianzheng, "A Single-Stage Three-Phase Grid-Connected Photovoltaic System With Modified MPPT Method and Reactive Power Compensation," *IEEE Transactions On Energy Conversion*, , Vol.22, No.4, 2007.
17. J. F. Jockell, S Rahman, "Application of High Resolution Insolation Data for Photovoltaic System Design Analysis," *IEEE Proceedings Southeastcon '89. 'Energy and Information Technologies in the Southeast'*. 9-12 April 1989, Page(s):1430 – 1435, vol.3.
18. A. R. Oliva, J. C. Balda, "A PV dispersed generator: a power quality analysis within the IEEE 519," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.18, no.2, pp. 525-530, April 2003.
19. J.H.R. Enslin, P.J.M. Heskes, "Harmonic interaction between a large number of distributed power inverters and the distribution network," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.19, no.6, pp. 1586-1593, Nov. 2004.
20. A. Kotsopoulos, P.J.M. Heskes, M.J. Jansen, "Zero-crossing distortion in grid-connected PV inverters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.52, no.2, pp. 558-565, April 2005.
21. E. C. Kern Jr., E. M. Gulachenski, G. A. Kern, "Cloud effects on distributed photovoltaic generation: slow transients at the Gardner, Massachusetts photovoltaic experiment," *Experiment*, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 4, pp. 184-190, 1989.
23. A. Gross, J. Bogensperger, and D. Thyr, "Impacts of large scale photovoltaic systems on the low voltage network," *Solar Energy*, Vol. 59, Issue 4-6, 1997.
24. S. Conti, S. Raiti, G. Tina, and U. Vagliasindi, "Study of the Impact of PV Generation on Voltage Profile in LV Distribution Networks," *Proc. IEEE Power Tech, Porto, Portugal*, Vol.4, Sept. 10-13, 2001.
25. G. M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. John Wiley & Sons, 2004.
26. W. Achim, B. Ronnie and J. Johan, "Testing the islanding protection function of photovoltaic inverters", *IEEE Trans, Energy Convers*, vol.18, no.1, pp. 157–62, 2003.
27. I. J. Balaguer, L. Qin, Y. Shuitao, U. Supatti and P. Fang Zheng, "Control for Grid-Connected and Intentional Islanding Operations of Distributed Power Generation," *IEEE Trans, Industrial Electronics*, vol. 58, pp. 147-157, 2011.
28. F. Blaabjerg, Z. Chen, and S. B. Kjaer, "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems," *IEEE Trans, Power Electron.*, vol. 19, pp. 1184–1194, 2004.
29. A. Kulkarni, V. John, "Mitigation of Lower Order Harmonics in a Grid-Connected Single-Phase PV Inverter," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 28, no. 11, 2013.
30. W. L. Yu, T.-P. Lee, G.-H. Yu, Q. S. Chen, H. J. Chiu, Y.-K. Lo, and F. Shi, "A DSP-based single-stage maximum power point tracking pv inverter," in *Proc. 25th IEEE Annu. Conf. Appl. Pow. Electr.*, China, Jun. 12–15, pp. 948–952, 2010.
31. O. L-Lapeña, M. T. Penella, and M. Gasulla, "A new MPPT method for low-power solar energy harvesting," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 9, pp. 3129–3138, Sep. 2010.