

## اخذ بیشترین انرژی از سیستمهای فوتو ولتائیک

### چکیده:

حداکثر انرژی الکتریکی که توسط یک سیستم فوتو ولتائیک با بازده مشخص تامین می گردد در اندازه و جهت ثابت تابش خورشید و درجه حرارت معین محیط در بهترین نقطه کار آن یعنی ولتاژی که در آن جریان خروجی بگونه ایست که حاصل ضرب آن در جریان مزبور بیشترین مقدار ممکن است ایجاد می شود. بنابر این در طراحی نوین سیستمهای PV تاکید بر روی پیدا کردن نقطه کار با بیشترین انرژی تولید شده است. این امر باعث ایجاد روش نوینی با عنوان "مقایسه وزن سه نقطه ای" شده است که از مشکلات نوسان و خطای سیستم خواهد کاست. در این مقاله یک الگوریتم قوی برای تعیین MPPT و روش مقایسه وزنی سه نقطه ای بمنظور جلوگیری از نوسان در روش قدیمی P&O پیشنهاد می شود. همچنین یک سیستم سخت افزاری با قیمت پایین معرفی می گردد. این سیستم شامل یک مبدل کمکی به همراه یک میکرو کنترلر بر روی یک تراشه منفرد میباشد که مستقیماً مبدل را بر اساس اندازه گیریهای انرژی خروجی آرایه PV کنترل میکند. آزمایشهای تجربی، کارایی این روش را تایید نموده اند.

### 1 - مقدمه

در میان منابع انرژیهای تجدید پذیر، نسل فوتو ولتائیک با روندی رو به رشد، از اهمیت ویژه ای برخوردار شده است زیرا هزینه سوخت ندارد، موجب آلودگی محیط زیست نمی شود، هزینه نگهداری آن بسیار پایین است و موجب انتشار سرو صدا نخواهد گشت.

ماژولهای استاندارد PV، LCPV و HCPV که همگی را می توان در دسته بندی PV جای داد هنوز به نسبت قیمت زیادی دارند بنابر این کنترل "تعقیب و یافتن نقطه کارکرد با بیشترین انرژی تولیدی" که از این پس آنرا بنام MPPT مینامیم در آنها بسیار ضروری است.

مقدار انرژی تولیدی توسط یک سیستم PV به ولتاژ کاری سلول های آن بستگی دارد. در یک سیستم PV نقطه بیشترین تولید انرژی MPP با تغییر میزان تابش و درجه حرارت تغییر میکند. منحنی های V-I و V-P ویژگیهای یک نقطه منحصر بفرد را که در آن بیشترین انرژی تولیدی بدست می آید مشخص میکنند. در نقطه MPP سیستم PV با بیشترین بازده کار میکند. به همین خاطر، روشهای زیادی برای تعیین MPPT ایجاد شده است.

اخیراً تحقیقات متعددی با بکارگیری منطق فuzzy (نه درست- نه غلط) برای حل این مشکل بکارگرفته شده است.

در MPPT اکثر طرحهای کنترلی از تکنیک انحراف و مشاهده (P&O) استفاده میکنند زیرا انجام آن بسیار آسان است ولی مشکل نوسان در آنها اجتناب ناپذیر میباشد. در این تحقیق یک تکنیک انحراف و مشاهده توسعه یافته، یک روش مقایسه وزنی ۳ نقطه ای بر مبنای یک هسته کنترل شامل یک تراشه منفرد هشت بیتی با استفاده از یک مبدل کمکی جهت تنظیم ولتاژ خروجی PV برای ردیابی MPP بکار گرفته شده است. مدلهای مشابهی برای سیستم PV و الگوریتمهای MPPT با نتایج تجربی ارائه شده است.

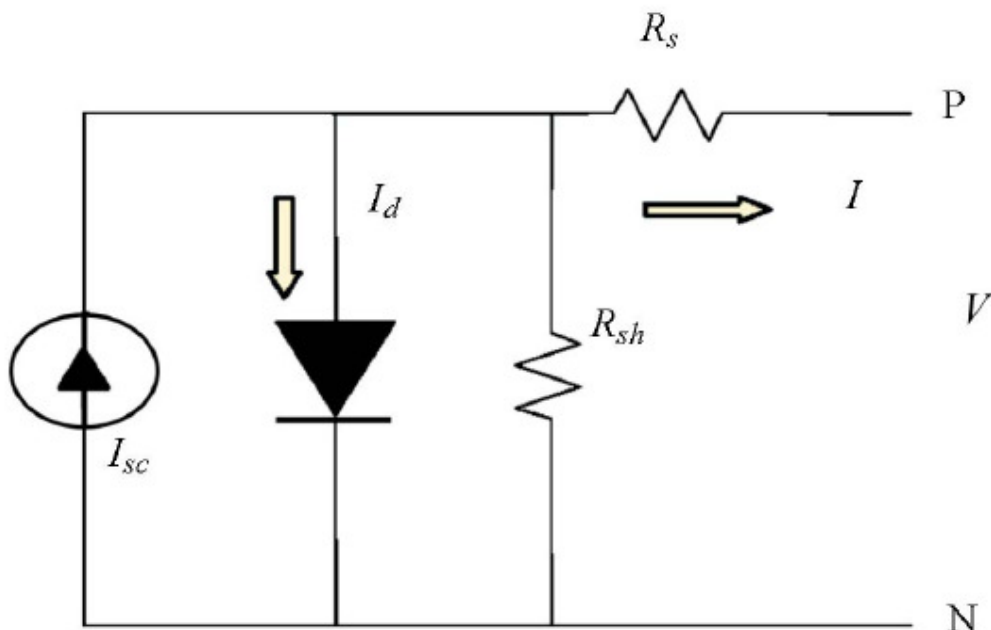
در تحقیق حاضر بخش ۲ اصول ابتدایی سیستم‌های PV را معرفی میکند، بخش ۳ و ۴ روش مرسوم P&O و الگوریتم پیشنهادی مقایسه وزنی ۳ نقطه ای را توصیف میکند، بخش ۵ ساختار پیشنهادی سیستم PV را نشان میدهد، بخش ۶ نتایج تجربی را به تصویر میکشد و بالاخره نتایج در آخرین بخش به تصویر کشیده شده است.

## ۲- مدل ریاضی

پنل های PV ، مجموعه ای از سلولهای خورشیدی هستند که معمولاً دارای یک اتصال نیمه هادی p-n میباشند که مدار معادل آنها در شکل ۱ نشان داده شده است. ویژگیهای ولت - آمپر این آرایه ها با معادله ۱ بیان می گردد.

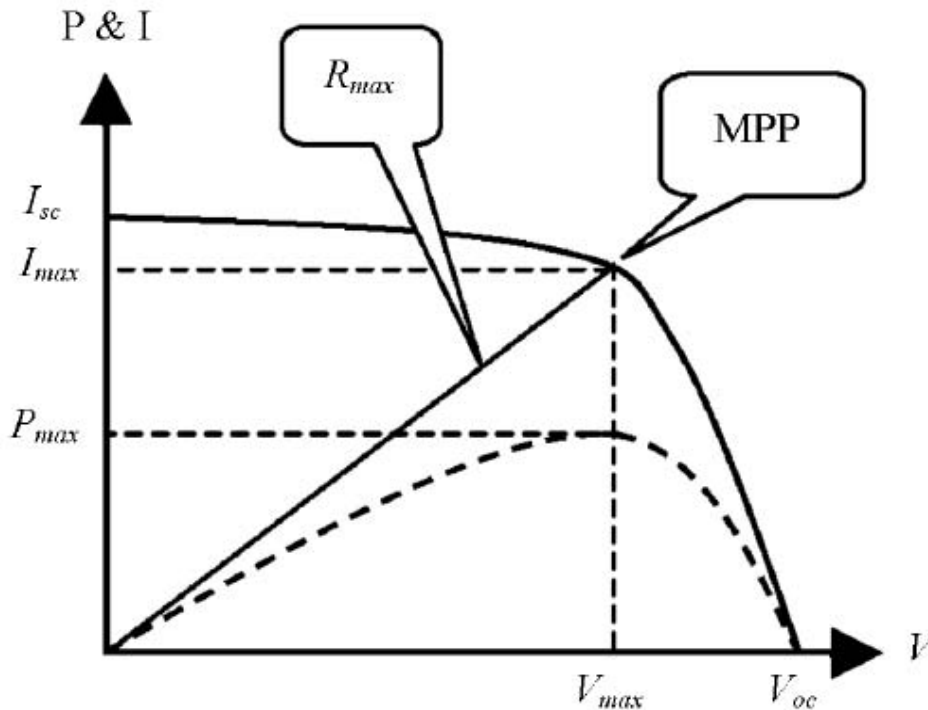
$$I = I_{sc} - I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{q(V + R_S I)}{nkT_k} \right] - 1 \right\} - \frac{V + R_S I}{R_{sh}} \quad (1)$$

در معادله فوق  $V$  و  $I$  به ترتیب معرف ولتاژ و جریان خروجی PV ،  $R_S$  و  $R_{sh}$  مقاومت‌های سری و موازی سلول،  $q$  شارژ الکترونیکی،  $I_{sc}$  جریان تولید شده توسط نور،  $I_0$  جریان اشباع شده برگشتی،  $n$  یک ضریب بدون بعد،  $k$  ثابت بولتزمن و  $T_k$  درجه حرارت برحسب کلون میباشند.



شکل ۱ : مدار معادل آرایه های PV

معادله ۱ همانگونه که در شکل ۲ نشان داده شده است در شبیه سازیهای کامپیوتری برای تعیین مشخصات خروجی یک سلول خورشیدی بکار می رود.



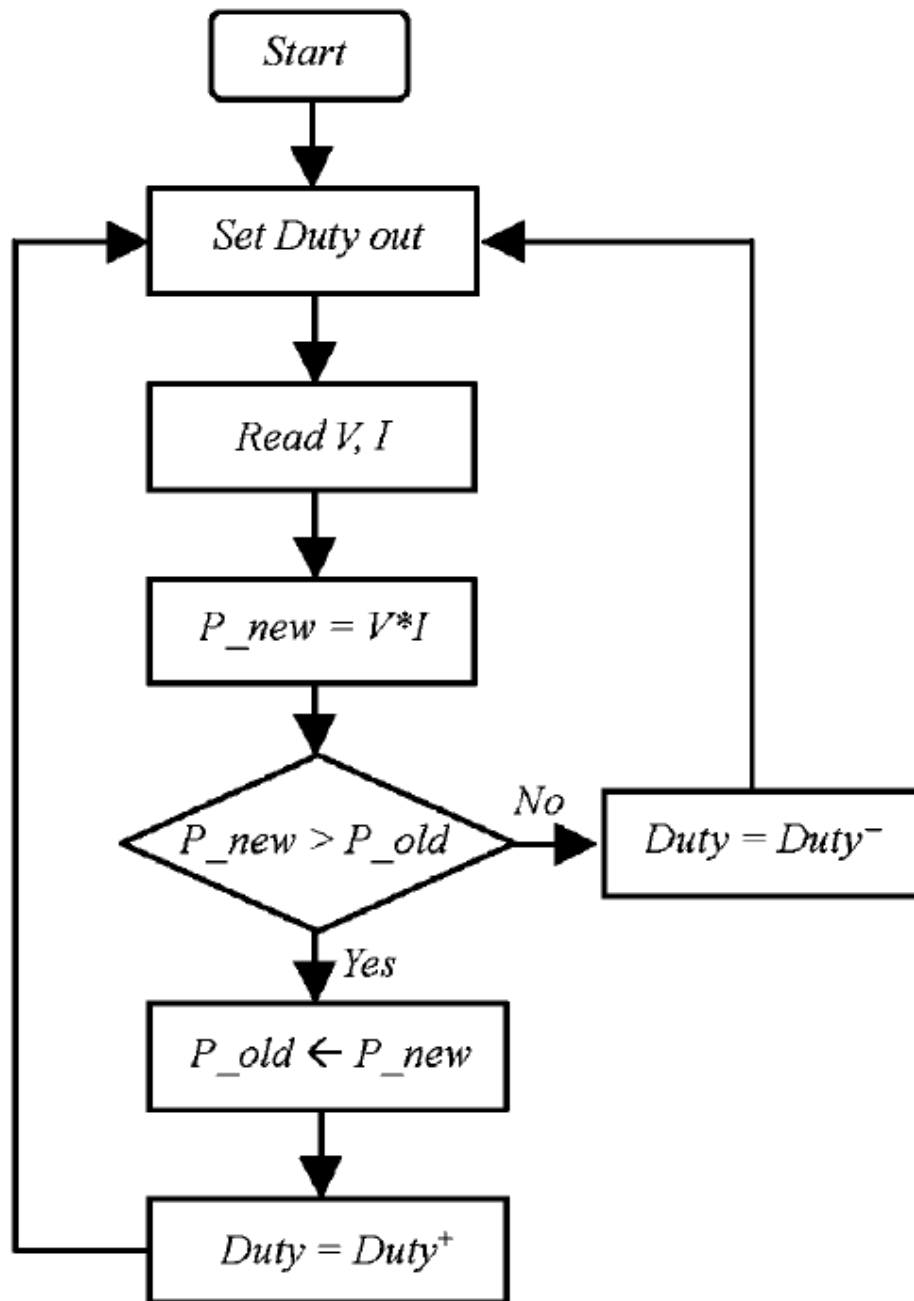
**شکل ۲ : مشخصات ولت - آمپر یک سلول خورشیدی**

این منحنی به وضوح نشان میدهد که مشخصات خروجی یک سلول خورشیدی خطی نیست و بشدت متأثر از تابش خورشید، درجه حرارت و شرایط بارگذاری میباشد. هر منحنی دارای یک MPP است که در آن نقطه، پیل خورشیدی با بیشترین بازده ممکن کار میکند.

### **۳- تعقیب نقطه با بیشترین انرژی**

تکنیکهای متعددی برای یافتن MPP پیشنهاد شده است ولی دو الگوریتم بطور متداول برای یافتن MPPT بکار میرود: روش انحراف و مشاهده (P&O) و روش افزایش میزان انتقال (IncCond).

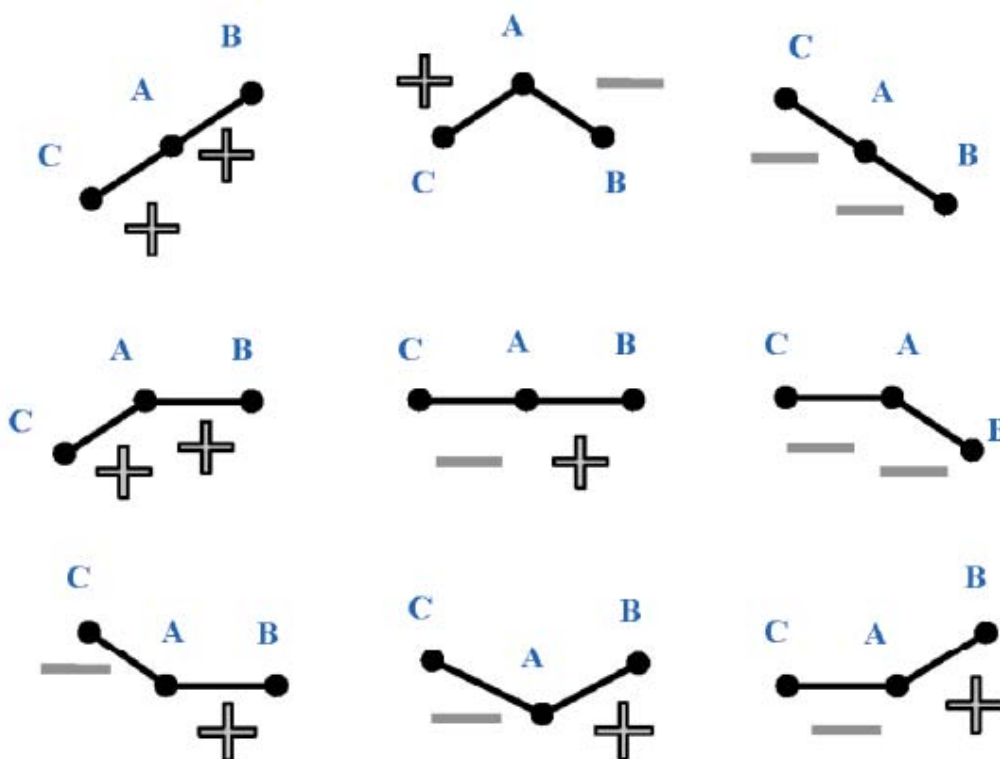
استفاده از روش P&O بسیار متداول و گسترده و انجام آن بسیار آسان است. شکل ۳ نمودار کنترلی روش P&O را نشان میدهد. تعقیب کننده MPP با افزایش یا کاهش مقطعی ولتاژ آرایه خورشیدی کار میکند. اگر یک انحراف معین، منجر به افزایش (کاهش) انرژی خروجی PV گردد، انحراف بعدی در همان جهت (یا جهت مخالف) تولید میشود. در شکل ۳ جعبه Set Duty Out معرف انحراف ولتاژ سلول خورشیدی و Duty+ و Duty- بیانگر انحرافات متعاقب آن در همان جهت یا جهت مخالف میباشد.



شکل ۲ : نمودار کنترلی الگوریتم P&O

## ۴- روش مقایسه وزن سه نقطه ای

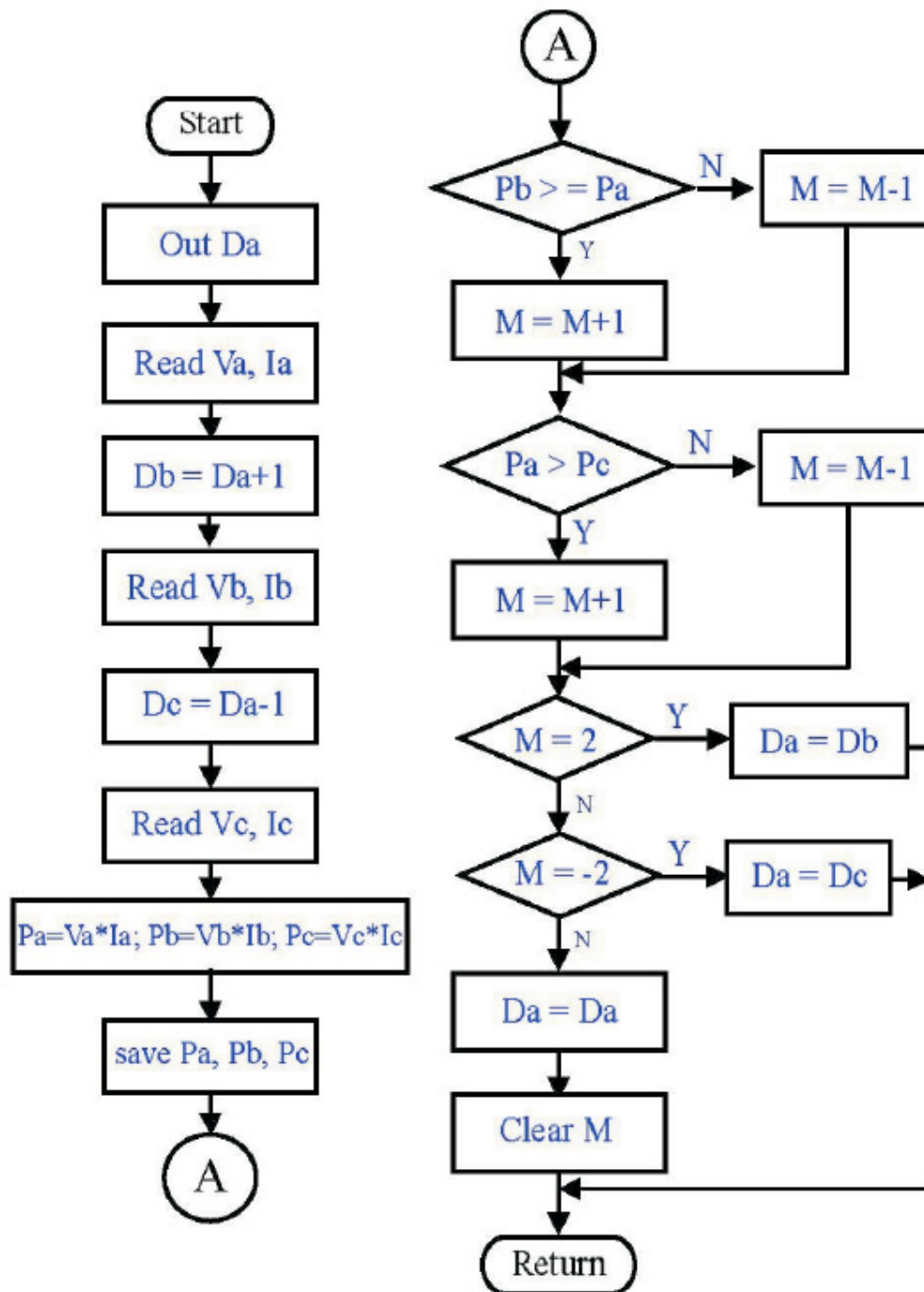
روش P&O فقط دو نقطه را با هم مقایسه میکرد که یکی از آنها نقطه عملکرد جاری و دیگری نقطه ای پس از ایجاد انحراف در سیستم بمنظور مشاهده تغییرات انرژی و به تبع آن، تصمیم گیری در مورد کاهش یا افزایش ولتاژ آرایه خورشیدی بود. این روش در محدوده MPP نوسان دارد که نتیجه آن کاهش توان PV میباشد بخصوص در مواقعی که تابش خورشید با سرعت تغییر میکند. به همین منظور روش مقایسه وزن سه نقطه ای پیشنهاد شد تا مجبور نباشیم زمانی که تابش خورشید با سرعت تغییر میکند یا زمانی که انحراف در سیستم رخ میدهد و یا خطایی در خواندن اطلاعات بروز میکند، سرعت به نقطه کارکرد نزدیک شویم. مجدداً تصریح میشود که MPPT در تغییرات اندک تابش خورشید میتواند بصورت دقیق مورد ردیابی واقع شود.



شکل ۴ : آرایه های ممکن سه نقطه اغتشاش

الگوریتم مقایسه وزن سه نقطه ای عبارت است از اینکه ولتاژ انتهایی آرایه خورشیدی را در مقاطع زمانی مختلف منحرف کنیم و انرژی خروجی PV را روی سه نقطه از منحنی ولت- آمپر با هم مقایسه نماییم. این سه نقطه عبارتند از نقطه عملکرد جاری A، نقطه ای مانند B که نسبت به نقطه A دچار انحراف شده است و نقطه ای مانند C که به اندازه نقطه B ولی در جهت مخالف آن نسبت به نقطه A دچار منحرف گردیده است. در شکل ۴ تمام ۹ حالت ممکن نمایش داده شده است. در این حالات برای نقاط A و B اگر انرژی نقطه B بر حسب وات بزرگتر یا مساوی با انرژی نقطه A باشد، این حالت را به عنوان وزن مثبت در نظر میگیریم و در حالت برعکس، به عنوان وزن

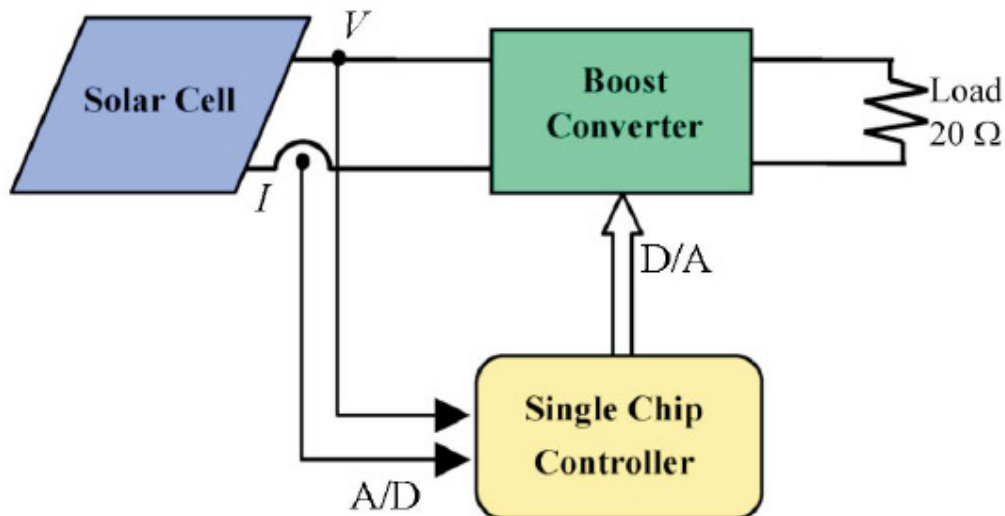
منفی در نظر گرفته میشود. همچنین برای نقاط A و C وقتی که انرژی نقطه C بر حسب وات کمتر از انرژی نقطه A باشد، این حالت به عنوان وزن مثبت و در حالت برعکس بعنوان وزن منفی در نظر گرفته میشود. برای سه نقطه اندازه گیری شده، اگر دو نقطه دارای وزن مثبت باشند، سیکل کاری مبدل باید افزایش یابد. برعکس اگر دو نقطه از سه نقطه فوق دارای وزن منفی باشند، سیکل کاری مبدل باید کاهش یابد. درحالات دیگر با یک نقطه وزنی مثبت و یک نقطه وزنی منفی، MPP حاصل شده است یا تابش خورشید سرعت تغییر کرده و سیکل کاری نباید تغییر کند. در دیاگرام ۵ روش مقایسه وزنی سه نقطه ای تشریح شده است.



شکل ۵: الگوریتم مقایسه وزنی ۳ نقطه ای

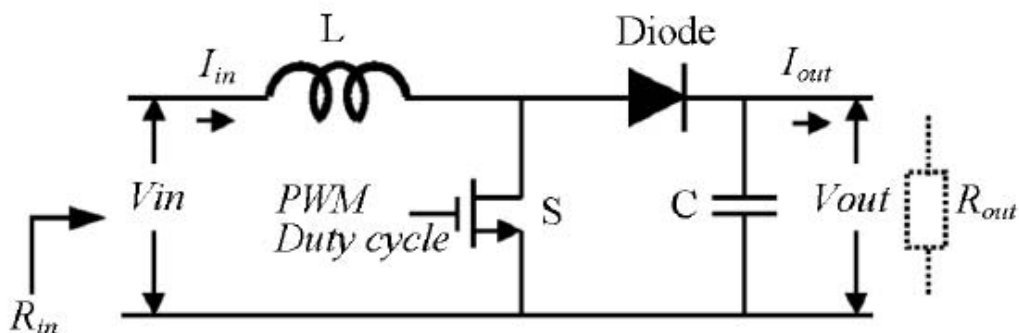
## ۵- ساختار سیستم PV

در شکل ۶ ساختار یک سیستم PV پیشنهادی نشان داده شده است. این سیستم شامل یک آرایه خورشیدی ۷۵ وات، یک ولتاژ باز ۲۱ ولت، یک جریان مدار کوتاه ۴/۶ آمپر، یک مبدل A/D و D/A، یک مقاومت ۲۰ اهم / ۱۰۰ وات جهت بارگذاری و یک واحد کنترلی بر روی یک تراشه منفرد میباشد.



شکل ۶ : ساختار یک سیستم PV

شکل ۷ مدارهای مبدل کمکی را که به خروجی سلول خورشیدی وصل شده است نشان میدهد. جریان خروجی با عرض پالس ترانزیستور (Duty cycle) کنترل و متوسط ولتاژ خروجی با معادله ۲ تعیین میگردد.



شکل ۷ : مدارهای مبدل کمکی

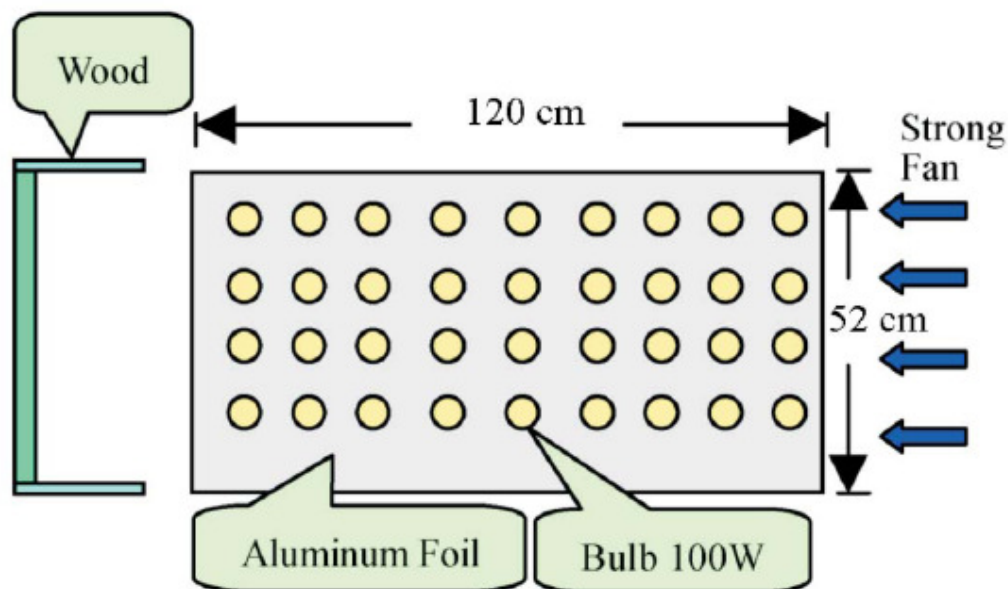
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{(1-D)} \quad (2)$$

در این معادله  $V_{in}$  و  $V_{out}$  ولتاژهای خروجی و ورودی مبدل و  $D$  عرض پالس سویچ  $S$  میباشد. اگر مبدل را ایده آل فرض کنیم انرژی ورودی و خروجی آن مساوی خواهد بود و معادلات ۳ و ۴ را خواهیم داشت:

$$I_{out} = I_{in} * (1 - D) \quad (3)$$

$$R_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{V_{out}}{I_{out}} (1 - D)^2 = R_{out} (1 - D)^2 \quad (4)$$

از معادله ۴ معلوم می شود که وقتی بار خروجی ( $R_{out}$ ) ثابت باشد، مقدار مقاومت  $R_{in}$  میتواند با تغییر عرض پالس تغییر نماید. بنابراین نقطه کاری سلول خورشیدی میتواند توسط عرض پالس کنترل شود. یک منبع خورشیدی جهت مقایسه نتایج تحت شرایط محیطی یکسان برای حالات مختلف تست، شبیه سازی شده است. شکل ۸ ساختار منبع خورشیدی شبیه سازی شده را با بیشترین انرژی  $32.68\text{mA}/\text{cm}^2$  نشان میدهد.

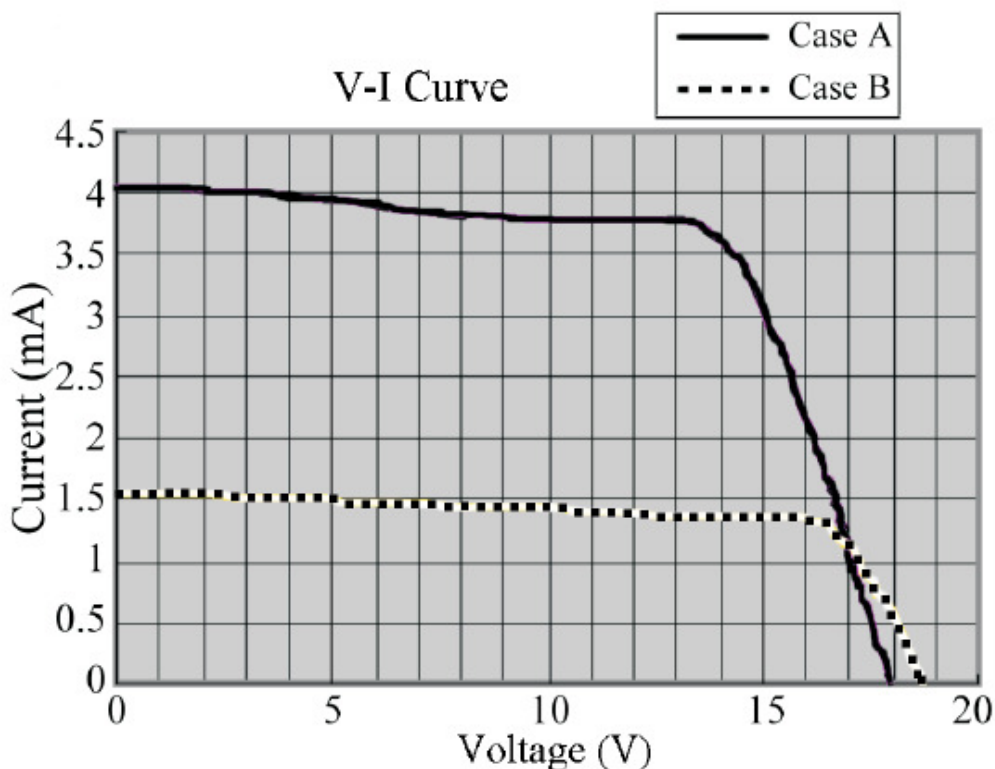


شکل ۸ : ساختار منبع خورشیدی شبیه سازی شده

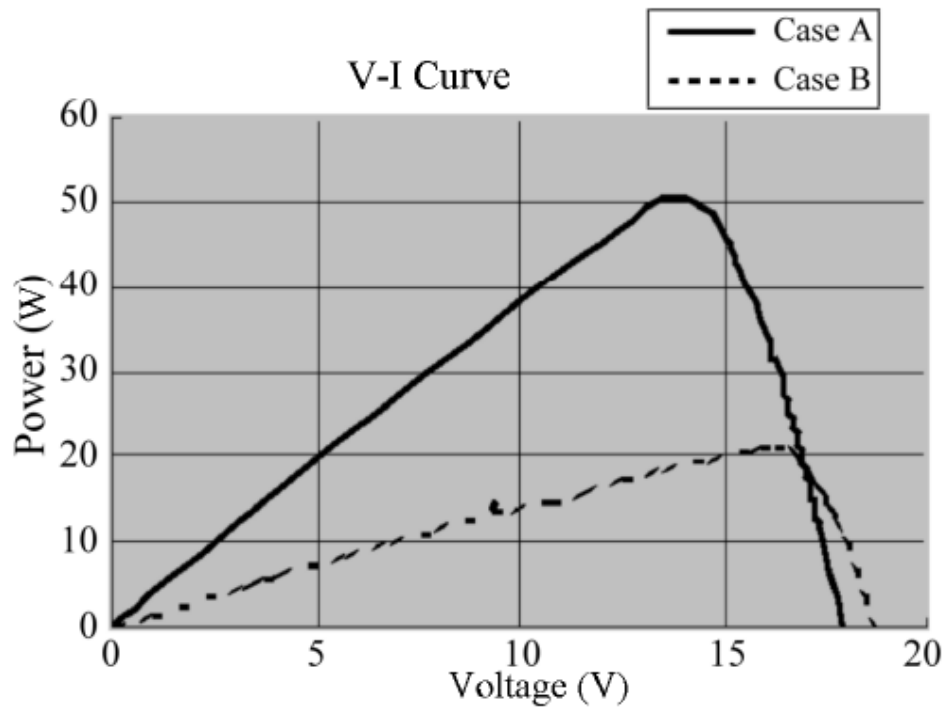


## ۶- نتایج شبیه سازی

یک نمونه اولیه MPPT با روشی که توضیح داده شد در آزمایشگاه مورد آزمایش قرار گرفت. آرایه های PV انرژی ماکزیممی بالغ بر ۷۵ وات تولید میکردند. یک ولتاژ ۲۱ ولتی مدار باز و یک جریان ۴/۶ آمپری مدار بسته با انرژی خورشیدی یک کیلو وات بر متر مربع و دمای محیط ۲۵ درجه سانتیگراد، دیگر شرایط محیطی را تشکیل میدادند. پنل PV با دو انرژی خورشیدی مختلف شبیه سازی شد: در حالت اول  $32.68 \text{ mA/cm}^2$  و در حالت دوم  $12.49 \text{ mA/cm}^2$  تا سیستم پیشنهادی تحت این شرایط ویژه مزبور مورد آزمایش قرار گیرد. شکل های ۹ و ۱۰ نمودارهای ولت-آمپر و ولت-انرژی را در این دو حالت و در دمای ۶۵ درجه سانتیگراد نشان میدهند.

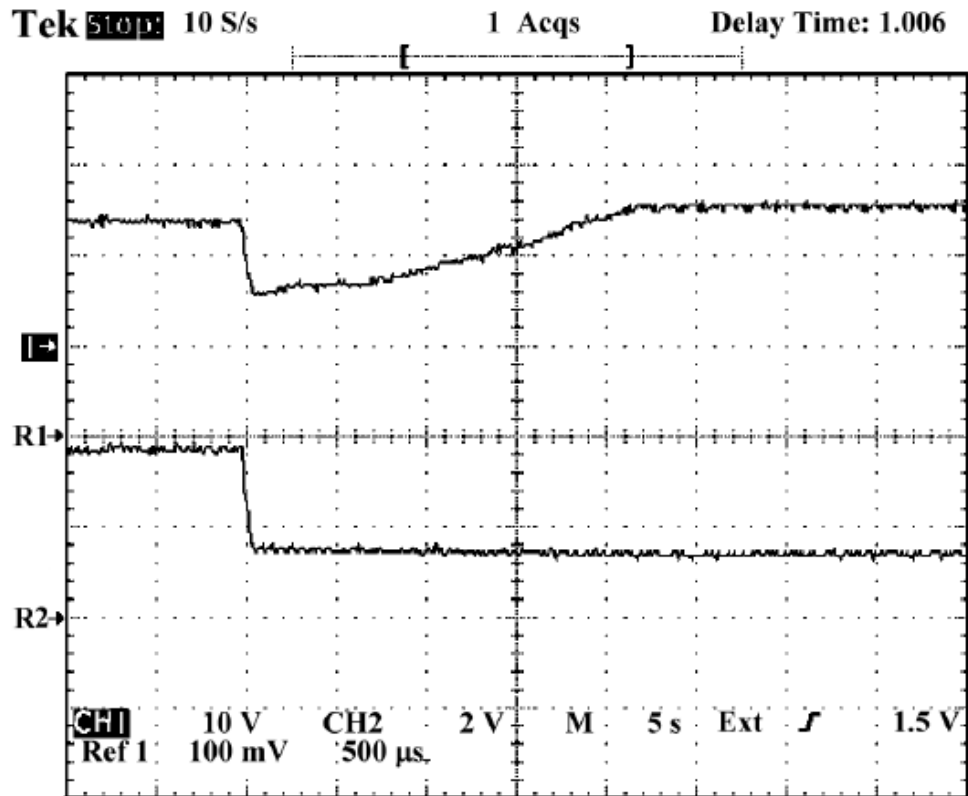


شکل ۹ : منحنی ولت-آمپر در حالات A و B در  $65^{\circ}\text{C}$



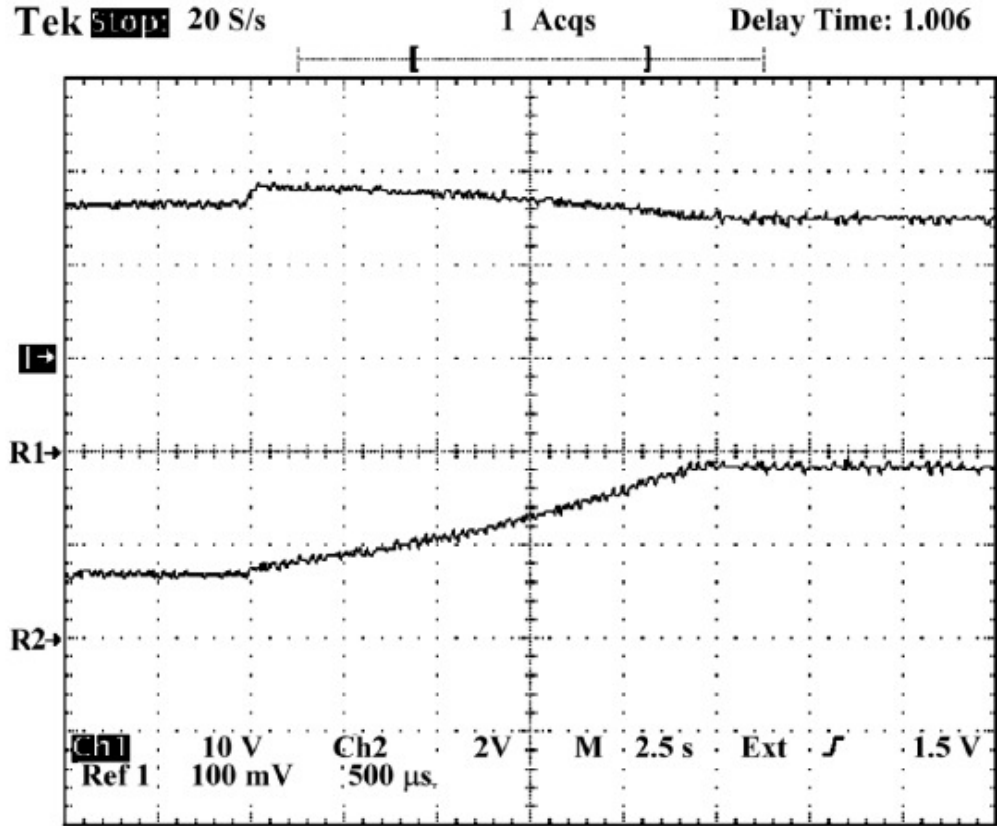
شکل ۱۰ : منحنی ولت-انرژی در حالات A و B در  $65^{\circ}C$

نمودارهای ۱۱ و ۱۲ شکل امواج ولتاژ خروجی (CH1) و جریان (CH2) را نشان میدهند. انرژی خورشیدی در شکل ۱۱ از نقطه A تا B و در شکل ۱۲ از نقطه B تا A تغییر میکند.



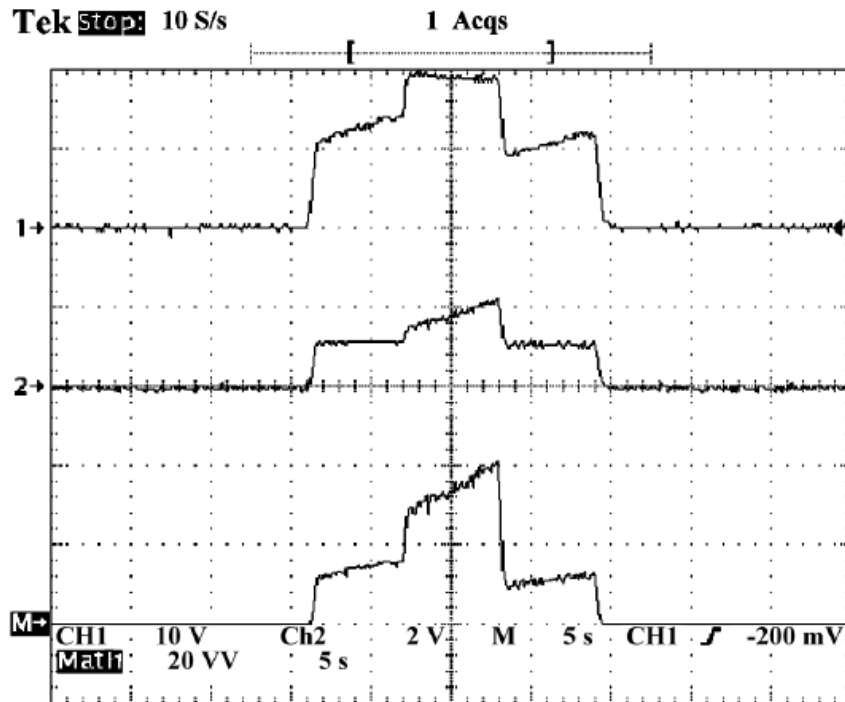
شکل ۱۱: ولتاژ و جریان خروجی از یک آرایه PV ( انرژی خورشیدی از نقطه A تا B تغییر میکند )

در حالت A مشخصات MPP عبارت است از ۱۳/۶۵ ولت، ۲/۷۶ آمپر و ۵۱/۳۳۴ وات.  
 در حالت B مشخصات MPP عبارت است از ۱۶/۱۴ ولت، ۱/۳۲ آمپر و ۲۱/۳۰۵ وات.  
 از شکل ۱۱ و ۱۲ در می یابیم که نقاط کاری یک پنل PV در دو حالت فوق، متفاوت میباشد.



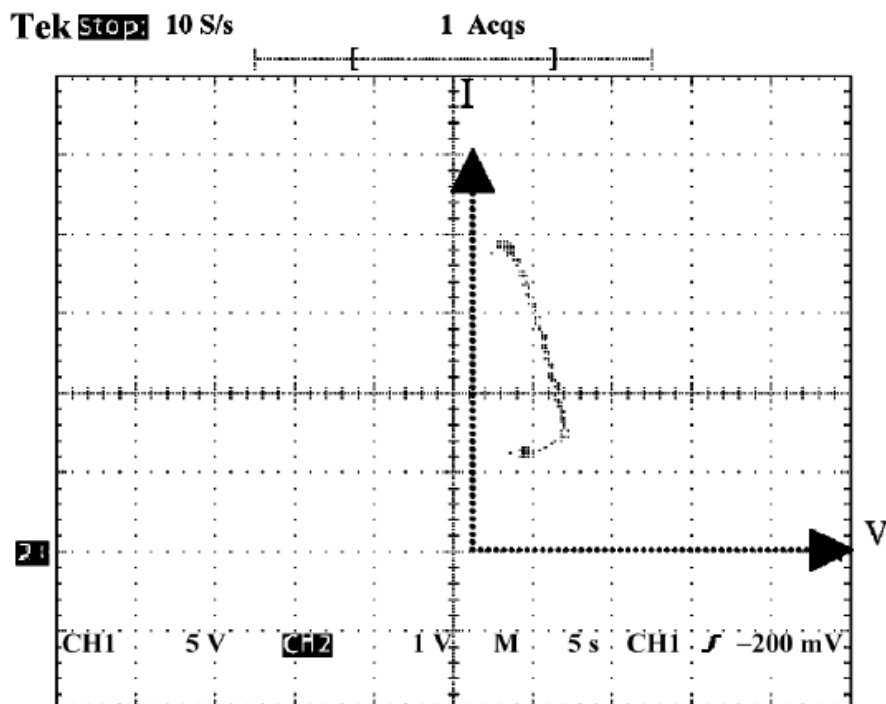
**شکل ۱۲ : ولتاژ و جریان خروجی یک آرایه PV ( انرژی خورشیدی از نقطه B تا A تغییر میکند )**

در نمودار ۱۲ شکل امواج ولتاژ (CH1) ، جریان (CH2) و انرژی (CHM) با تغییرات یکنواخت انرژی از صفر تا B و نهایتاً تا نقطه A و سپس کاهش به نقطه B و نهایتاً صفر با همان نرخ تغییر، نشان داده شده است. این نمودار آشکار میسازد که نرخ تغییر ولتاژ و جریان با هم تفاوت دارد. در ابتدا ولتاژ PV با انرژی خورشیدی سرعت افزایش می یابد ولی تغییرات جریان کند است. همچنانکه انرژی خورشیدی افزایش پیدا میکند نرخ تغییرات ولتاژ کندتر میشود ولی جریان با سرعت افزایش می یابد. وقتی درجه حرارت افزایش می یابد، ولتاژ کم میشود.



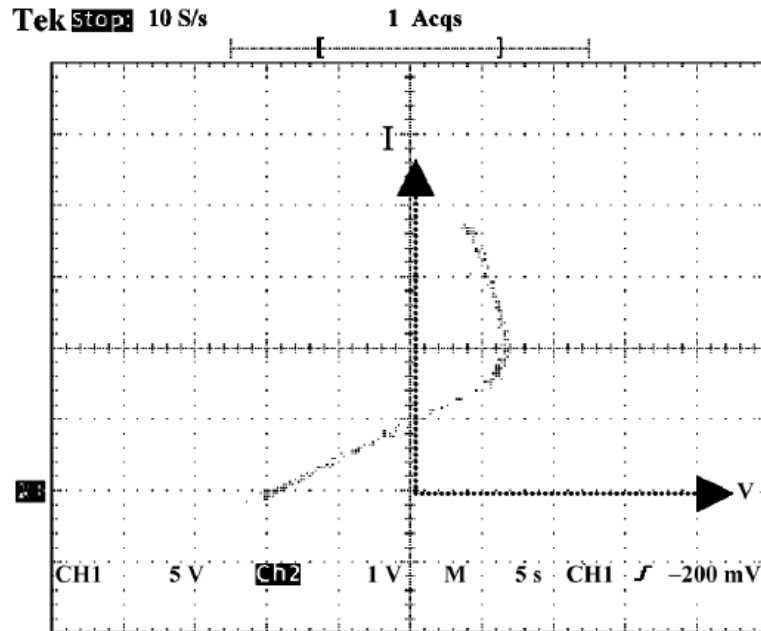
شکل ۱۳ : شکل موج ولتاژ، جریان و انرژی با تغییرات یکنواخت انرژی خورشیدی از صفر تا B و نهایتاً A و سپس کاهش تا B و نهایتاً صفر با همان نرخ تغییر.

این گرایش، ویژگیهای سلولهای خورشیدی را بیان میدارد. شکل ۱۴ نمودار ولت-آمپر را وقتی انرژی خورشیدی به آرامی از نقطه B تا A افزایش می یابد نشان میدهد.



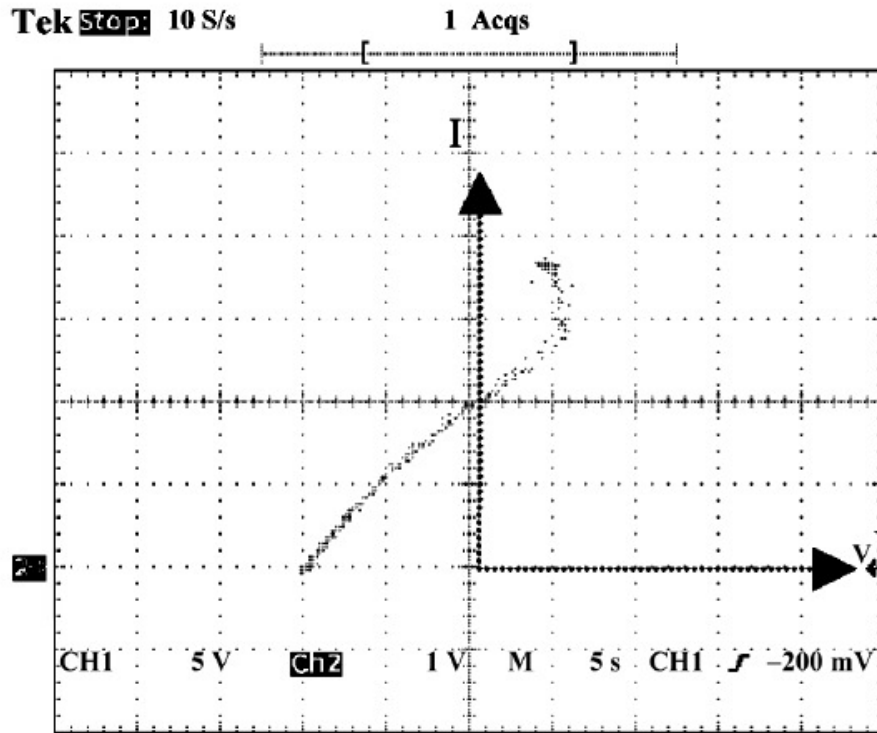
شکل ۱۴ : منحنی ولت-آمپر زمانی که انرژی خورشیدی به آهستگی از B تا A افزایش پیدا میکند

شکل ۱۵ منحنی ولت-آمپر را وقتی انرژی خورشیدی به آرامی از صفر تا A افزایش می یابد نشان میدهد.



شکل ۱۵ : منحنی ولت-آمپر وقتی انرژی خورشیدی به آرامی از صفر تا A افزایش می یابد

شکل ۱۶ منحنی ولت-آمپر را وقتی انرژی خورشیدی بسرعت از صفر تا A افزایش می یابد نشان میدهد



شکل ۱۶: منحنی ولت-آمپر وقتی انرژی خورشیدی سرعت از صفر تا A افزایش می یابد

شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ نشان می‌دهند که بدون توجه به چگونگی تغییر شار انرژی نورانی، نقطه انرژی خروجی بخوبی قابل ردیابی است و بر روی MPP ثابت باقی میماند.