



An overview of the electronical methods of maximum power point tracking in solar cells

Mohammad Montazeri¹

Abstract

One of the most important cases in using solar cells is tracking the maximum power point of the PV output, which is done in order to increase the efficiency of these systems. In fact, a system is in the highest efficiency when it is at the maximum point of its output. Until now, the operation methods for tracking the maximum power point have been obtained. Electronic methods have the advantage of lower maintenance and repair costs and have been studied more in recent years. In this study, the different types of electronic methods used for tracking the power of solar cells have been introduced, the advantages and disadvantages of each have been mentioned and compared.

Keywords: Electricity, Solar cell, Photovoltaic, Maximum power tracking, Electronic methods.

¹ Master's student of Renewable Energy Engineering, Faculty of Modern Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran



مروری بر روش های الکترونیکی ردیابی نقطه ی حداکثر توان در سلول های خورشیدی

محمد منتظری^۱

چکیده

یکی از مواردی که به هنگام استفاده از سلول های خورشیدی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است، ردیابی نقطه ی حداکثر توان خروجی می باشد که به منظور افزایش بازدهی این سیستم ها انجام می پذیرد. در واقع یک سیستم فوتولتائیک، زمانی دارای بیشترین بازدهی می باشد که توان خروجی در نقطه ی حداکثر خود قرار می گیرد. تا به حال روش های مختلفی برای ردیابی نقطه ی حداکثر توان معرفی و ارزیابی شده است. روش های الکترونیکی دارای مزیت هزینه های نگهداری و تعمیرات کمتر بوده و در سال های اخیر بیشتر مورد مطالعه قرار گرفته اند. در این پژوهش، انواع روش های الکترونیکی به کار گرفته شده برای ردیابی نقطه ی حداکثر توان سلول های خورشیدی معرفی گردیده، مزایا و معایب هر یک از آن ها ذکر و با یکدیگر مقایسه شده اند. واژگان کلیدی: انرژی الکترونیکی، سلول های خورشیدی، فوتولتائیک، ردیابی نقطه حداکثر توان، روش های الکترونیکی.

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی انرژی های تجدیدپذیر، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۱. مقدمه

امروزه با توجه به رشد مصرف انرژی الکتریکی در جهان، استفاده از منابع تولید پراکنده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. کاهش تلفات، افزایش قابلیت اطمینان، بهبود کیفیت توان و سایر مزایای سیستم‌های تولید پراکنده از عوامل رشد و توسعه‌ی این صنایع می‌باشند. سیستم‌های فوتولتائیک یکی از انواع منابع تولید انرژی الکتریکی است که با استفاده از انرژی خورشید قادر به تولید توان الکتریکی می‌باشد. این سیستم‌ها به عنوان صنایع تولید پراکنده در ریزشبکه‌ها و شبکه‌های برق سراسری مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده از مبدل‌های انرژی خورشیدی در سراسر جهان روز به روز در حال افزایش می‌باشد. در کنار تمام مزیت‌های موجود برای سیستم‌های خورشیدی، یکی از عمده‌ترین معایب این سیستم‌ها بازدهی پایین آن‌ها می‌باشد. در واقع نقطه‌ی کار پنل‌های فوتولتائیک به شدت تحت تأثیر شرایط آب‌وهوایی است؛ بنابراین قرار داشتن نقطه کار این سیستم‌ها در حالت بهینه، یکی از نیازهای مبرم و ضروری قلمداد می‌شود.

محققین از مدت‌ها پیش تلاش برای یافتن روش‌های حداکثر کردن انرژی دریافتی از منابع تجدیدپذیر به خصوص سلول‌های خورشیدی را آغاز کرده‌اند. در این موضوع، ابتدا سیستم‌های مکانیکی مختلف طراحی شد که با حرکت پنل‌های فوتولتائیک، همواره بیشترین شدت تابش را از خورشید دریافت کنند. نوع دیگر این سیستم‌ها، ردیاب‌های الکتریکی هستند که با نام ردیاب نقطه‌ی حداکثر توان^۱ شناخته می‌شوند و بر اساس تغییرات جریان و ولتاژ سلول جهت دستیابی به حداکثر توان عمل می‌کنند. تا به امروز طراحی‌ها و الگوریتم‌های مختلفی برای MPPT ارائه شده است که هر کدام ویژگی‌ها و نقاط ضعف و قوت خاص خود را دارند. لازم به ذکر است که MPPT تنها مختص سلول‌های خورشیدی نمی‌باشد و برای سایر انرژی‌های تجدیدپذیر مانند پیل سوختی، سیستم ترموالکتریک و غیره نیز کاربرد دارد. در این پژوهش انواع روش‌های مهم مطرح شده برای ردیابی نقطه‌ی توان حداکثر^۲ در سلول‌های خورشیدی معرفی گردیده است.

سلول‌های خورشیدی را از نظر نحوه‌ی استفاده می‌توان به سه دسته تقسیم کرد که شامل سیستم‌های جدا از شبکه، سیستم‌های متصل به شبکه و سیستم‌های ترکیبی با سایر انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد.

عملکرد یک سلول خورشیدی به شرایط محیطی بستگی دارد؛ در نتیجه حداکثری توان استخراجی از سلول به سه عامل مهم شدت تابش، دمای سلول و پروفایل بار وابسته است. منحنی مشخصه‌ی I-V پنل نیز تابع شدت تابش و دما می‌باشد، به نحوی که تغییر تابش و دما به ترتیب باعث تغییر جریان و ولتاژ پنل می‌شوند. سلول‌های خورشیدی باید به نحوی تنظیم

¹ Maximum Power Point Tracker (MPPT)

² Maximum Power Point (MPP)

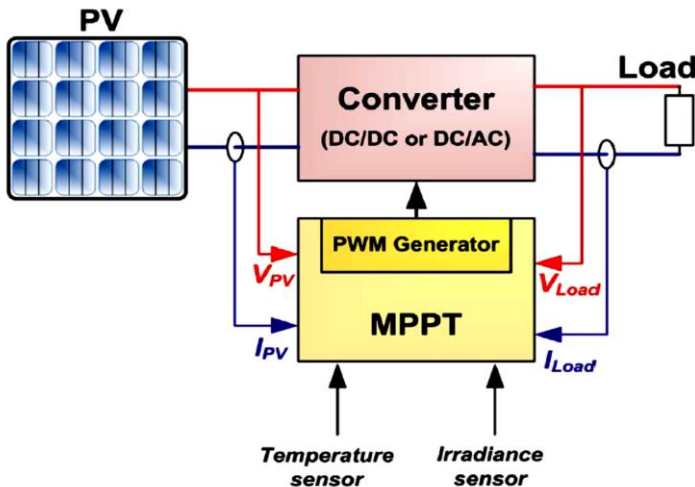




شوند که برای هر شدت تابش و در هر دمایی در MPP خود فعالیت کنند. عاملی که میزان توان یک سلول خورشیدی را مشخص می‌کند، امپدانس بار می‌باشد که مقداری متغیر است. زمانی که بار به طور مستقیم به سلول خورشیدی متصل باشد، محل تقاطع مشخصه‌ی بار و سلول، میزان توان خروجی را تعیین می‌کند که ممکن است از MPP فاصله‌ی زیادی داشته باشد. افزودن یک مبدل DC/DC بین سلول و باتری که شامل سیستم‌های کنترلی نیز باشد، می‌تواند به نگه داشتن سلول در نقطه‌ی MPP کمک کند که به این مبدل‌ها MPPT می‌گویند. ورودی مبدل توسط PV تامین شده و خروجی آن را باتری و بار تشکیل می‌دهند. یک سیستم محاسباتی، دوره‌ی عملکرد^۱ و میزان امپدانس مبدل را مشخص می‌کند تا پنل حول نقطه‌ی MPP کار کند. تلفات این مبدل‌ها نیز باید بسیار اندک باشد تا بازدهی سیستم کاهش شدیدی پیدا نکند.

چندین راه برای هماهنگی پنل PV و پروفایل بار وجود دارد. برای این کار یک سیستم متشکل از یک مبدل DC/DC یا DC/AC بوده و یک سیستم نیز برای محاسبات MPP می‌باشد که مبدل به عنوان یک مدار هماهنگی امپدانس عمل می‌کند. سیستم محاسباتی MPP میزان جریان و ولتاژ ورودی و خروجی و شرایط محیطی را اندازه‌گیری کرده و توان مبدل را با تعیین دوره‌ی عملکرد سیگنال کنترلی مبدل تنظیم می‌کند. طرح سیستم ذکر شده در شکل ۱ قابل مشاهده است. (Hossain, Khan et al. 2011)

بازدهی یک نیروگاه PV به بازدهی پنل PV، مبدل و الگوریتم MPPT بستگی دارد. بازدهی پنل و مبدل وابسته به نوع ساخت آن‌ها بوده و چندان قابل تغییر نیست اما بهبود سیستم MPPT با استفاده از روش‌های کنترلی مختلف میسر می‌باشد و می‌تواند به افزایش توان PV منجر شود.



شکل ۱: نمای کلی PV به همراه سیستم MPPT

¹ Duty Cycle

تا به حال الگوریتم‌های متعددی طراحی شده‌اند که از جنبه‌های مختلفی با یکدیگر تفاوت دارند که از میان آن می‌توان به بازدهی، سرعت همگرایی، پیچیدگی، سنسورهای مورد نیاز، هزینه و... اشاره کرد که در ادامه به دسته‌بندی و معرفی این الگوریتم‌ها پرداخته خواهد شد.

۲. مدل‌سازی MPPT

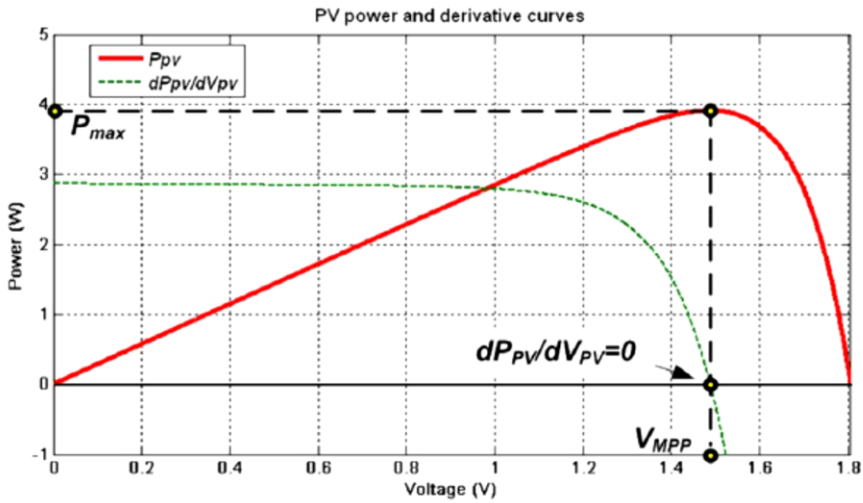
همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، تابش خورشید و دما بسیار بر خروجی پنل PV اثر می‌گذارند. این شرایط محیطی در طول روز ثابت نیستند و این امر باعث می‌شود MPP نیز با توجه به شرایط دما و تابش روی یک منحنی جابجا شود. زمانی که سلول در نزدیکی MPP کار نکند تلفات سیستم بالا می‌رود؛ پس نیاز است نقطه‌ی کار سلول در نزدیکی MPP باقی بماند. منحنی‌های توان-ولتاژ و جریان-ولتاژ سلول PV به ترتیب در شکل ۲ و ۳ قابل مشاهده هستند. نقطه‌ی MPP می‌تواند به وسیله‌ی مدل‌های محاسباتی به دست آید که می‌توان وابستگی توان سلول به پارامترهای مختلف را به شکل رابطه‌ی (۱) نمایش داد:

$$P_{PV} = F(V_{PV}(t) \times I_{PV}(t) \times \gamma(t)) \quad (1)$$

γ در این معادله نماینده‌ی تمامی متغیرها به جز ولتاژ و جریان می‌باشد و به پارامترهای سلول و شرایط محیطی دیگر وابسته است. شیوه‌ی ردیابی MPP بر پایه‌ی تنظیم ولتاژ خروجی سلول جهت دستیابی به حداکثر توان خروجی در هر شرایط محیطی (دما و تابش) می‌باشد. سیستم MPPT از صفر بودن مشتق توان نسبت به ولتاژ در نقطه‌ی MPP استفاده می‌کند که در سمت چپ این نقطه مقدار مشتق مثبت بوده و در سمت راست آن منفی می‌باشد. این مطلب در معادلات (۲) و شکل ۲ ملموس مشخص شده است.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = 0 \quad \text{when} \quad V_{PV} = V_{MPP} \\ \frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} > 0 \quad \text{when} \quad V_{PV} < V_{MPP} \\ \frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} < 0 \quad \text{when} \quad V_{PV} > V_{MPP} \end{array} \right. \quad (2)$$





شکل ۲: منحنی توان-ولتاژ و مشتق ولتاژ نسبت به توان

ردیاب به گونه‌ای تنظیم می‌گردد که از رابطه‌ی زیر پیروی کند:

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} \times \frac{dV_{PV}}{dt} > 0 \quad (3)$$

با مشتق‌گیری از توان نسبت به ولتاژ خواهیم داشت:

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{d(V_{PV}I_{PV})}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \quad (4)$$

در MPP مشتق توان نسبت به ولتاژ برابر صفر است پس:

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = 0 \rightarrow \frac{V_{PV}}{I_{PV}} = - \frac{dV_{PV}}{dI_{PV}} \quad (5)$$

میزان خطا را در این حالت با نماد ε نمایش می‌دهند و عبارت است از:

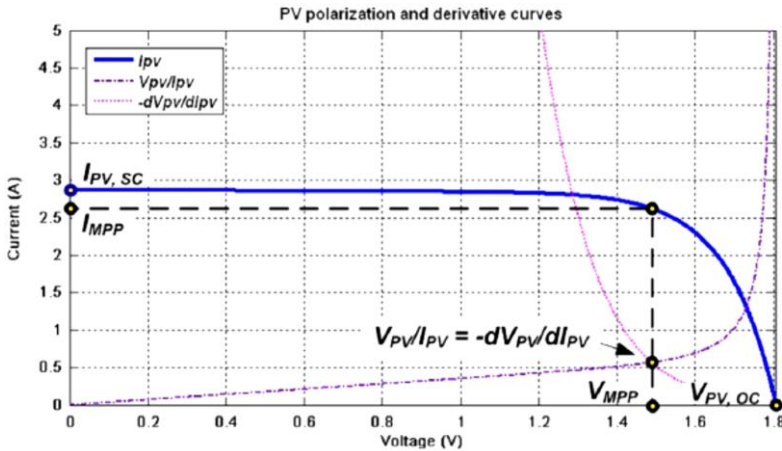
$$\varepsilon = \frac{V_{PV}}{I_{PV}} + \frac{dV_{PV}}{dI_{PV}} \quad (6)$$

از ترکیب معادلات (۲) و (۶) خواهیم داشت:

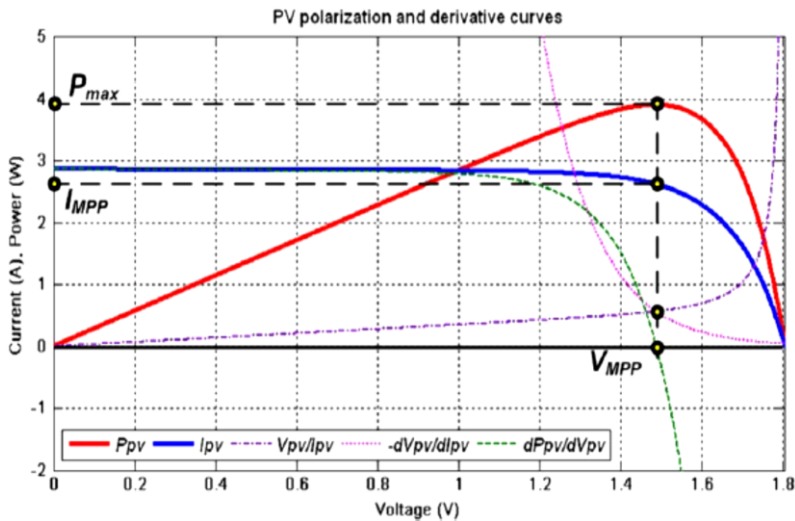
$$\begin{aligned} \varepsilon = 0 &\leftrightarrow \frac{V_{PV}}{I_{PV}} = - \frac{dV_{PV}}{dI_{PV}} && \text{at the MPP} \\ \varepsilon > 0 &\leftrightarrow \frac{V_{PV}}{I_{PV}} > - \frac{dV_{PV}}{dI_{PV}} && \text{left to the MPP} \\ \varepsilon < 0 &\leftrightarrow \frac{V_{PV}}{I_{PV}} < - \frac{dV_{PV}}{dI_{PV}} && \text{right to the MPP} \end{aligned} \quad (7)$$



در شکل ۳ می‌توان قسمت‌های مختلف معادله‌ی (۷) را مشاهده کرد که در آن، مقدار I_{PV} از تقاطع منحنی‌های $\frac{V_{PV}}{I_{PV}}$ و $\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}}$ حاصل می‌شود. مقدار $V_{PV} = V_{MPP}$ نیز مطابق شکل ۴ از تقاطع منحنی‌های $\frac{V_{PV}}{I_{PV}}$ و $\frac{dV_{PV}}{dI_{PV}}$ به دست می‌آید. (Boualem Bendib 2015)



شکل ۳: منحنی جریان ولتاژ، ولتاژ تقسیم بر جریان و مشتق ولتاژ نسبت به جریان سلول PV



شکل ۴: تمام منحنی مشخصه‌های سلول PV جهت یافتن MPP

روش‌های مختلفی برای ردیابی MPP وجود دارد. مواردی که برای انتخاب از میان این روش‌ها باید در نظر گرفته شوند عبارتند از: سختی اجرا، سنسورها، بازدهی، هزینه و کاربرد. از زمانی که سلول‌های PV به عنوان منابع جدا از شبکه به کار گرفته شدند، تحقیقات بسیاری



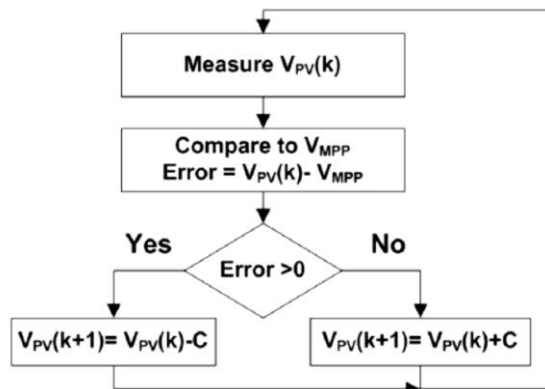
برای استخراج حداکثر توان از آن‌ها انجام شد. تاکنون انواع مختلفی از الگوریتم‌های MPPT طراحی شده‌اند که می‌توان آن‌ها را بر حسب شیوه و تکنیک ردیابی به ۵ دسته تقسیم کرد:

۱. تکنیک‌های ردیابی با پارامترهای ثابت: از مقادیر ثابت و از پیش تعیین شده‌ی پارامترهای سلول استفاده می‌کند.
۲. تکنیک‌های ردیابی با اندازه‌گیری و مقایسه: مقادیر خروجی سلول (ولتاژ و جریان و یا تابش و دما) را اندازه‌گیری کرده و با مقدار از قبل مشخص شده‌ی MPP مقایسه می‌کند.
۳. تکنیک‌های ردیابی با سعی و خطا: مقادیر خروجی سلول را اندازه‌گیری کرده و با توجه به آن برای مسیر ادامه‌ی کار سلول تصمیم‌گیری می‌کند.
۴. تکنیک‌های ردیابی با استفاده از محاسبات ریاضی: محل قرارگیری MPP را با توجه به معادلات سلول و استفاده از محاسبات ریاضی تعیین می‌کند.
۵. تکنیک‌های ردیابی با روش پیش‌بینی هوشمند: از یک روند هوشمند استفاده کرده و محل قرارگیری MPP را در مشخصه‌ی سلول پیش‌بینی می‌کند. (Nabil Karami, 2017).

۳. تکنیک‌های ردیابی با استفاده از پارامترهای ثابت

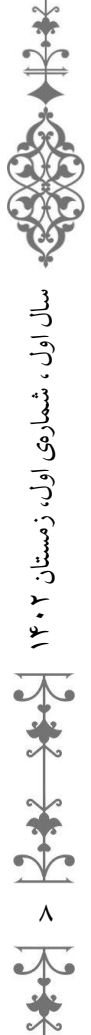
۱-۳. روش ولتاژ ثابت ۱

از این روش به عنوان ساده‌ترین روش MPPT یاد می‌شود. در این روش، همواره تلاش می‌شود نقطه‌ی عملکرد پنل PV به وسیله‌ی تنظیم ولتاژ در نزدیکی V_{MPP} که از روی منحنی مشخصه‌ی آن به دست آمده است نگه داشته شود. این روش که در شکل ۵ نیز نمایش داده شده است، اثر تابش و دما را در نظر نگرفته و فقط از ولتاژ پنل بهره می‌گیرد. در نتیجه نقطه‌ی عملکرد دقیقاً روی MPP تئوری نخواهد افتاد.



شکل ۵: فلوجارت روش CV

¹ Constant Voltage Method (CV) / The Best Fixed Voltage Method (BFV)



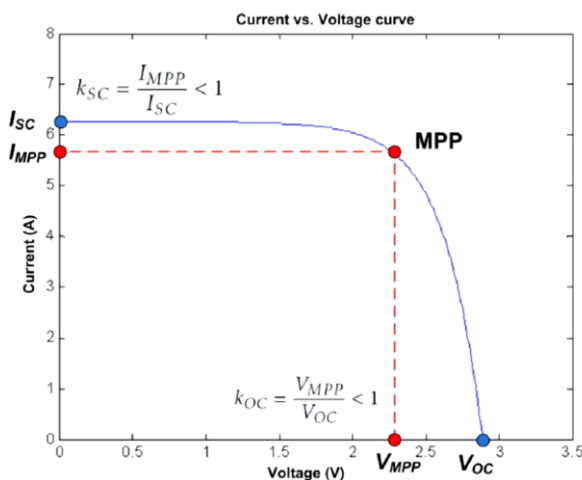
مدار CV تنها متشکل از یک سنسور ولتاژ می‌باشد که اندازه‌ی ولتاژ پنل را اندازه‌گیری کرده و دوره‌ی عملکرد مبدل DC/DC رابه وسیله‌ی آن تنظیم می‌کند. لازم به ذکر است زمانی که پنل در تابش‌های پایین عمل می‌کند، روش CV بازدهی بالاتری از برخی روش‌های دیگر که در ادامه ذکر می‌شوند (مانند P&O و IC)، خواهد داشت. این نکته باعث می‌شود که CV در ترکیب با دیگر روش‌های MPPT به یک روش مناسب با بازدهی بالا بیانجامد.

۳-۲. روش ولتاژ مدار باز^۱

مزیت روش ولتاژ مدار باز این است که ولتاژ خروجی PV با ولتاژ مدار باز آن (V_{OC}) رابطه‌ای تقریباً خطی دارد، به نحوی که می‌توان آن‌ها را با یک ضریب به نام k_{OC} به یکدیگر مرتبط ساخت که مقدار آن به ضریب پرتشدگی^۲ پنل، تکنولوژی ساخت سلول و شرایط محیطی وابسته است. این نسبت در رابطه‌ی (۸) نشان داده شده است. رابطه‌ی بین جریان و ولتاژ MPP و جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز نیز در شکل ۶ مشخص می‌باشد.

$$V_{MPP} = k_{OC} V_{OC} \quad (k_{OC} < 1) \quad (8)$$

فلوچارت این روش در شکل ۷ نمایش داده شده است. در این سیستم برای اندازه‌گیری V_{OC} ، مدار به طور مکرر قطع و وصل خواهد شد که هر بار MPP مطابق معادله‌ی (۸) محاسبه گردیده و ولتاژ عملکرد مدار بر طبق آن تنظیم خواهد شد. اگرچه این روش ظاهراً ساده به نظر می‌رسد، اما انتخاب مقدار بهینه‌ی ضریب k کار سختی می‌باشد که محدوده‌ی ضریب k_{OC} به صورت تجربی در بازه‌ای بین 0.73 و 0.8 به دست آمده است. سعی می‌شود برای V_{OC} مقدار ثابتی برای شرایط مختلف آب و هوایی در نظر گرفته شود. صحت این روش به دقت در انتخاب k_{OC} وابسته می‌باشد. (Saleh Elkelani Babaa 2014)



شکل ۶: رابطه‌ی بین $V_{MPP} - V_{OC}$ و $I_{MPP} - I_{SC}$

¹ Open-Circuit Voltage Method

² Fill Factor (FF)

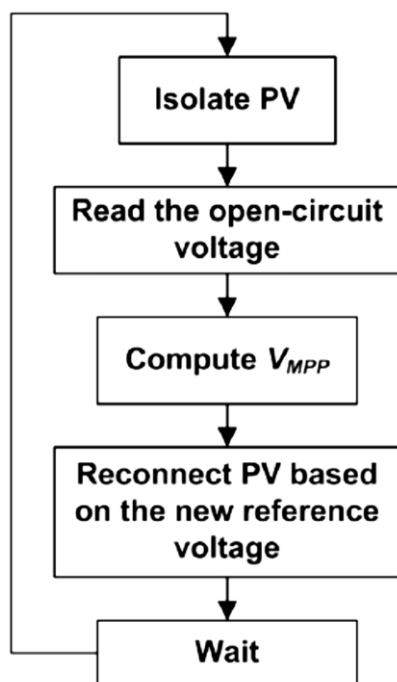


۳-۳. روش جریان اتصال کوتاه

مشابه روش قبل، این روش نیز بر مبنای خطی بودن رابطه‌ی بین I_{SC} و I_{MPP} می‌باشد. لذا رابطه‌ی این دو پارامتر مانند معادله‌ی (۹) قابل نوشتن می‌باشد. همانند روش قبل، مقدار k_{SC} وابسته به تکنولوژی ساخت سلول PV، شرایط محیطی و ضریب پرتشنگی خواهد بود. این ضریب برای پنل‌های پلی کریستالی حدود ۰/۸۵ محاسبه شده است.

$$I_{MPP} = k_{SC} I_{IC} \quad (k_{SC} < 1) \quad (9)$$

هر چند دقیقه، مقدار k_{SC} با اندازه‌گیری جریان اتصال کوتاه مدار محاسبه می‌شود. در نتیجه در این روش نیز وقفه‌های پیاپی در مدار خواهیم داشت.



شکل ۷: الگوریتم روش ولتاژ مدار باز

۳-۴. روش ولتاژ مدار باز پیلوت^۱

این تکنیک مشکل دو روش قبلی در ایجاد وقفه‌های متناوب در مدار را جبران می‌کند. در این روش مقدار ولتاژ مدار باز، از روی یک سلول که از لحاظ الکتریکی به بقیه‌ی شبکه وصل نمی‌باشد، خوانده می‌شود و مقدار ضریب k_{OC} به دست آمده، برای محاسبه‌ی V_{MPP} طبق رابطه‌ی (۱۰) استفاده می‌گردد.

$$V_{MPP} = k_{OC} V_{OC_{pilot}} \quad (k_{OC} < 1) \quad (10)$$

¹ Open-Circuit Voltage Pilot PV Cell Method



در این روش تنها از یک حلقه‌ی فیدبک کنترلی استفاده می‌شود که وقفه‌های متوالی ایجاد نمی‌کند. اما صحت آن می‌تواند به واسطه‌ی وجود سایه‌ی جزئی روی پنل و نیز عدم هماهنگی کافی سلول پیلوت و پنل اصلی کاهش یابد.

۳-۵. روش گرادیان دما^۱

ولتاژ مدار باز در سلول PV با دمای سلول رابطه‌ی خطی دارد که این مطلب بعداً در معادله‌ی (۱۴) نشان داده خواهد شد. این رابطه در حال حاضر به صورت معادله‌ی (۱۱) قابل نمایش است.

$$V_{OC} \cong V_{OC_{STC}} + (T - T_{STC}) \frac{dV_{OC}}{dT} \quad (11)$$

که در آن $V_{OC_{STC}}$ نشان‌دهنده‌ی ولتاژ مدار باز در دمای استاندارد (STC)، T بیانگر دمای واقعی سلول، T_{STC} برابر با دمای سلول در شرایط دمایی استاندارد و $\frac{dV_{OC}}{dT}$ گرادیان دما می‌باشد. بنابراین با اندازه‌گیری دمای واقعی، ولتاژ مدار باز قابل محاسبه است و MPP مطابق رابطه‌ی (۸) به دست می‌آید.

۳-۶. روش پارامتری دما^۲

مقدار ولتاژ MPP را می‌توان مطابق رابطه‌ی تجربی (۱۲) با دمای محیط مرتبط کرد.

$$V_{MPP} \cong (u + Sv) - T(w + Sy) \quad (12)$$

که در آن مقادیر u ، v ، w و y پارامترهای PV در تابش‌های مختلف S می‌باشند. این روش نیازمند اندازه‌گیری دقیق مقدار دما و شدت تابش جهت محاسبه‌ی ولتاژ بهینه می‌باشد.

۳-۷. روش فیدبک ولتاژ یا جریان^۳

این روش مشابه روش ولتاژ ثابت می‌باشد که متشکل از یک روش کنترلی ساده است. این تکنیک از یک سیستم کنترلی ساده برای تنظیم ولتاژ (یا جریان) در یک مقدار ثابت استفاده می‌کند؛ بنابراین میزان اختلافات ولتاژ (یا جریان) سلول PV به صورت پیوسته مقدار دوره‌ی عملکرد مبدل را کنترل می‌کند. این سیستم اقتصادی است و تنها یک حلقه‌ی فیدبک دارد اما اثر شرایط مختلف محیطی را لحاظ نمی‌کند. شکل ۹ نمایی از این سیستم را نمایش می‌دهد.

۳-۸. روش افت ولتاژ اتصال pn^۴

مشخصه‌ی دمایی سلول PV مشابه دیود pn می‌باشد. دیودها در پشت پنل PV نصب می‌شوند تا تغییر دما در سطح سلول به وسیله‌ی افت ولتاژ در پیوند pn شناسایی گردد و به دنبال آن ولتاژ ورودی رادیاب به دست آید. ولتاژ مرجع طبق معادله‌ی (۱۳) به دست می‌آید.

¹ The Temperature Gradient Algorithm (TG)

² The Temperature Parametric Method (TP)

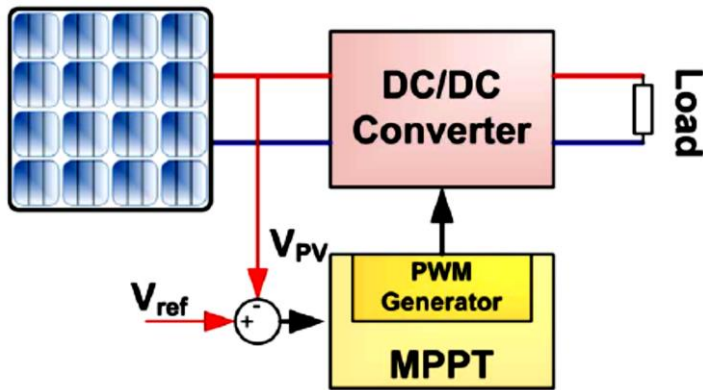
³ Feedback Voltage or Current Method

⁴ P-n Junction drop Voltage Tracking Technique (Excellent Operating Point Tracker)

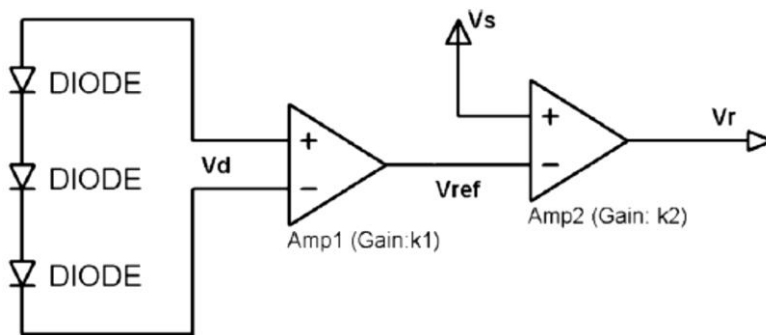


$$V_r = k_2(V_s - V_{ref}) = k_2(V_s - k_1V_d) \quad (13)$$

که در آن V_s ولتاژ خروجی پنل PV، V_{ref} ولتاژ مرجع به دست آمده از طریق تقویت افت ولتاژ پیوند pn یعنی V_d و k_1 و k_2 به ترتیب ضرایب تقویت کننده‌های ۱ و ۲ می‌باشند. در این روش تنها اثر دما لحاظ می‌شود و از تغییر تابش چشم‌پوشی می‌شود؛ در نتیجه خطای این سیستم بالاست. (Robert Faranda 2008) طرح این سیستم در شکل ۱۰ مشخص است.



شکل ۹: فیدبک ولتاژ با مدولاسیون PWM



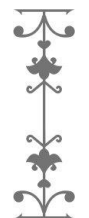
شکل ۱۰: مدار کنترلی ردیاب ولتاژ ثابت

۴. تکنیک‌های ردیابی با اندازه‌گیری و مقایسه

۴-۱. روش جدولی^۱

این روش بر مبنای مقایسه‌ی تمام شرایط محیطی از پیش اندازه‌گیری شده با مقادیر واقعی آن‌ها می‌باشد. در هر دوره، یک ولتاژ عملیاتی جدید V_{MPP} به وسیله‌ی سیستم کنترل‌کننده تعیین می‌شود که این کار با مقایسه‌ی دما و تابش اندازه‌گیری شده با مقادیر داخل جدول صورت می‌پذیرد. جدول مشخصات را کارخانه‌ی تولیدکننده ارائه می‌دهد. این سیستم برای در بر داشتن گستره‌ی وسیعی از اطلاعات، نیاز به حافظه‌ی بلندمدت قوی خواهد داشت.

¹ Look-up Table Method



۴-۲. روش حداکثرکردن جریان یا ولتاژ بار^۱

زمانی که یک پنل PV به یک مبدل توان متصل می‌شود، حداکثرکردن توان PV موجب حداکثرکردن توان بار نیز خواهد شد. برعکس این ماجرا نیز برقرار می‌باشد، به شرطی که تلفات مبدل ناچیز در نظر گرفته شود. انواع بار را از لحاظ الکتریکی می‌توان به ۴ دسته‌ی مقاومتی، منبع ولتاژی، منبع جریانی و ترکیب آن‌ها تقسیم نمود. برای نوع منبع ولتاژی و منبع جریانی، به ترتیب جریان خروجی و ولتاژ بار باید حداکثر شود و برای انواع دیگر بارها می‌توان از ولتاژ یا جریان استفاده کرد؛ در نتیجه در این روش فقط نیاز به یک سنسور خواهد بود. در سیستم‌های PV عموماً از باتری به عنوان ذخیره‌ساز انرژی و به عبارتی بار سیستم استفاده می‌گردد. علاوه بر این از یک فیدبک مثبت نیز جهت کنترل مبدل استفاده می‌شود، به نحوی که جریان بار حداکثر شده و پنل در نزدیکی MPP کار کند. این روش با فرض عدم وجود تلفات در مبدل مطرح شد و به همین دلیل تا حدودی خطا دارد.

۴-۳. روش کنترل خطی جریان

این روش با استفاده از چندین معادله‌ی جبری به دست آمده و به آسانی قابل پیاده‌سازی بوده و ردیابی نقطه‌ی توان حداکثر در آن دائمی خواهد بود. مشخصه‌ی I-V به شکل معادله‌ی (۱۴) قابل نوشتن است.

$$I_{PV} = I_{ph} - I_s(e^{\lambda(V_{PV} + I_{PV}R_s)} - 1) \quad (14)$$

که در آن $\lambda = q/(AkT)$ ، A ضریب ایده‌آلی، k ثابت بولتزمن و T دمای سلول می‌باشد. برای کنترل‌کننده پیشنهادی، منحنی اولیه با استفاده از رابطه‌ی $f(P_{PV}, I_{PV})=0$ در مشخصه‌ی P-I به دست می‌آید.

$$f(P_{PV}, I_{PV}) = P_{PV} - V_{PV}I_{PV} = P_{PV} - \frac{1}{\lambda}I_{PV} \ln \left[\frac{I_{ph} + I_s - I_{PV}}{I_s} \right] - I_{PV}^2 R_s = 0 \quad (15)$$

از طرفی در MPP داریم:

$$\frac{dP_{PV}}{dI_{PV}} = 0 \quad (16)$$

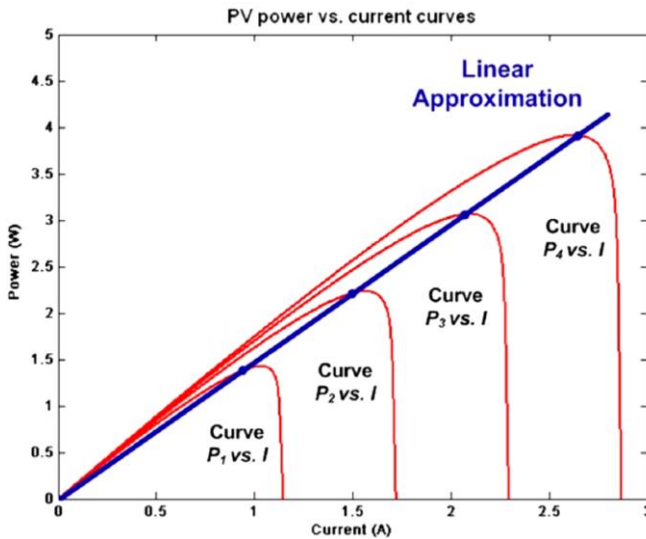
با استفاده از معادلات (۱۴) و (۱۵) دومین معادله‌ی توان خروجی به دست می‌آید:

$$g(P_{PV}, I_{PV}) = P_{PV} - \frac{1}{\lambda}I_{PV} \ln \frac{I_{PV}^2/\lambda}{(P_{PV} - I_{PV}^2 R_s)I_s} - I_{PV}^2 R_s = 0 \quad (17)$$

¹ Load Current or Load Voltage Maximization



در واقع در این روش، معادله‌ی (۱۷) برای یک PV می‌تواند با یک رابطه‌ی خطی تقریب زده شده و برنامه‌نویسی را آسان کند. در شکل ۱۱ این مطلب قابل درک می‌باشد. (Nabil Karami, 2017)



شکل ۱۱: محل قرارگیری MPP در تقاطع خط تقریبی با مشخصه‌ی سلول

۵. تکنیک‌های ردیابی با سعی و خطا

۵-۱. روش جریان PV^۱

این روش بر مبنای حداکثر کردن توان خروجی با استفاده از جریان PV می‌باشد. با توجه به این که سیستم خورشیدی از طریق یک مبدل DC/DC به باتری متصل است، ولتاژ خروجی یا همان V_{bat} مقدار ثابتی در نظر گرفته می‌شود و ارتباطی با دوره‌ی عملکرد مبدل (D) ندارد. طرح کلی این سیستم در شکل ۱۲ قابل مشاهده است. ولتاژ باتری از طریق دوره‌ی عملکرد مبدل طبق معادله‌ی (۱۸) با ولتاژ سلول رابطه دارد.

$$V_{bat} = \frac{t_{on}}{T} V_{PV} = D V_{PV} \quad (18)$$

که در آن T دوره‌ی تناوب و t_{on} زمان ۱ بودن سیگنال PWM می‌باشد. توان ورودی مبدل برابر است با:

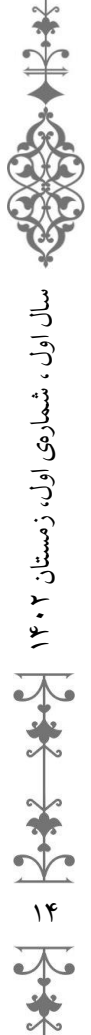
$$P_{in} = V_{PV} I_{PV} \quad (19)$$

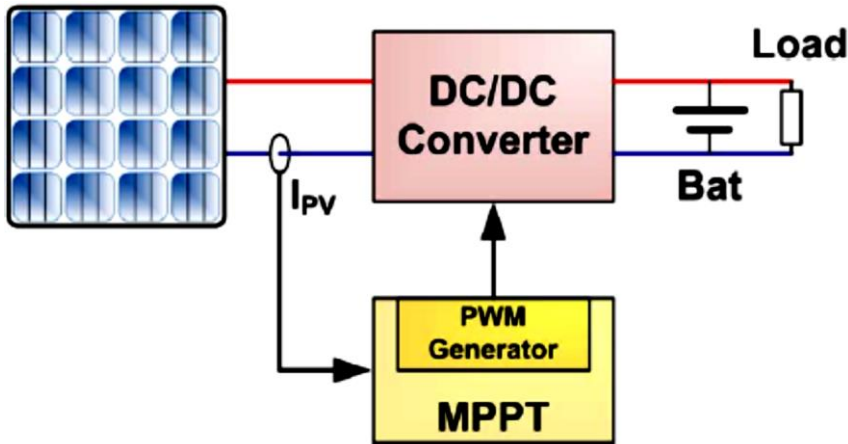
از جایگذاری معادله‌ی (۱۸) در معادله‌ی (۱۹) به دست خواهد آمد:

$$P_{in} = V_{bat} \frac{I_{PV}}{D} = V_{bat} P_{Buck}^* \quad (20)$$

$$P_{Buck}^* = \frac{I_{PV}}{D} \quad (21)$$

¹ The Only-current Photovoltaic Method





شکل ۱۲: طرح کلی روش جریان PV

الگوریتم این روش در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. روند ردیابی با D اولیه آغاز می‌شود. در این حالت ابتدا جریان PV اندازه‌گیری شده و P_{Buck}^* محاسبه می‌شود، سپس D به اندازه ΔD_1 افزایش می‌یابد. پس از تغییر D ، بلافاصله جریان PV دوباره اندازه‌گیری شده و P_{Buck}^* جدید محاسبه می‌گردد. با داشتن مقادیر قدیمی و جدید P_{Buck}^* ، کنترل‌کننده بر اساس معادلات (۲۲) و (۲۳) تصمیم‌گیری می‌کند که مقدار دوره‌ی عملکرد را کاهش یا افزایش دهد و این مراحل تا زمانی که سلول خورشیدی به نقطه‌ی MPP برسد، به طور مرتب تکرار می‌شود.

$$\Delta P = P_{Buck}^*(t + \Delta t) - P_{Buck}^*(t) \quad (22)$$

$$\Delta D = D(t + \Delta t) - D(t) \quad (23)$$

استفاده از جریان PV به عنوان مزیت بزرگ این روش در مقایسه با دیگر روش‌ها بیان می‌شود. به علاوه این روش به هنگام تغییرات سریع شرایط آب و هوایی عملکرد خوبی خواهد داشت.

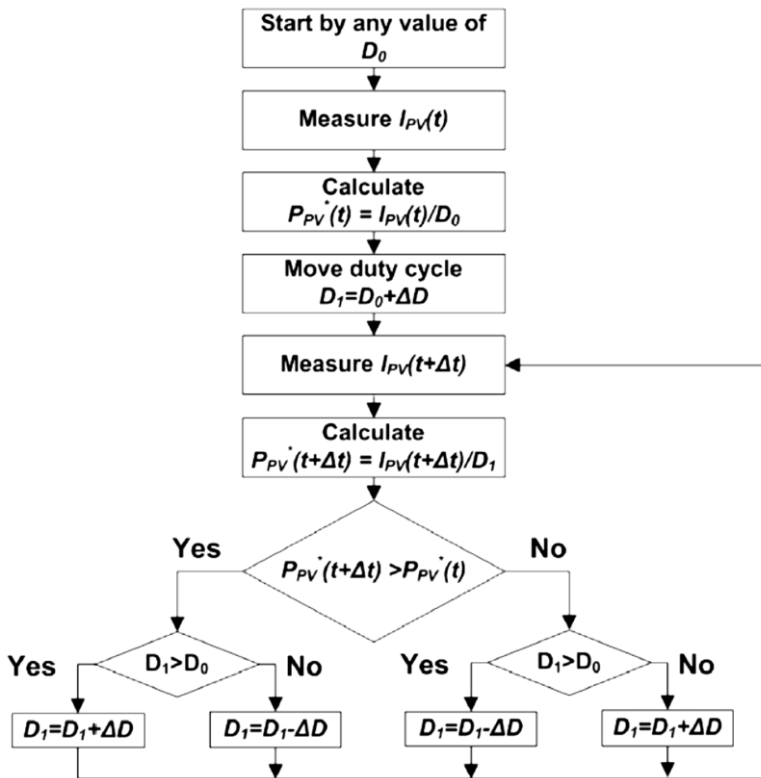
۵-۲. روش کنترل خروجی PV بدون حسگر^۱

این روش برای نیروگاه‌هایی مناسب می‌باشد که فقط جریان بار توسط سیستم ردیاب در نظر گرفته می‌شود. در یک منبع انرژی بزرگ PV، افت ولتاژ در طول بار قابل چشم‌پوشی است؛ بنابراین استخراج بیشترین جریان می‌تواند تقریباً به منزله‌ی دریافت بیشترین توان باشد. طرح کلی و فلوچارت مربوط به الگوریتم این روش به ترتیب در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ قابل ملاحظه هستند. سیستم مبدل توان به وسیله‌ی سیگنال PWM کنترل می‌شود و ساختار مدار کنترلی

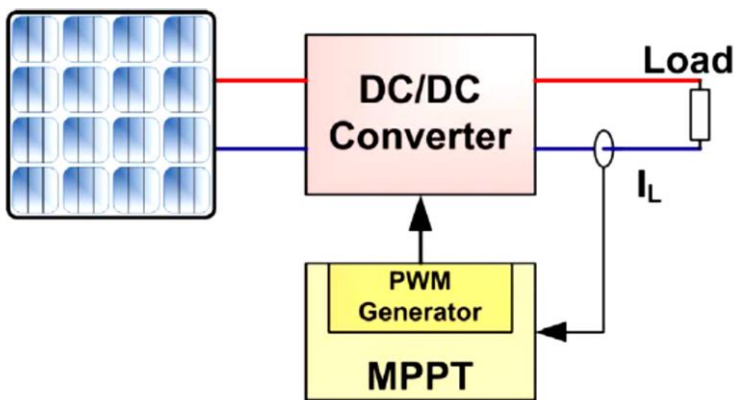
^۱ PV Output Senseless Control Method (POS)



ساده می باشد. در یک سیستم PV بزرگ، این روش می تواند با بازدهی و امنیت بالا به کار گرفته شود از آنجایی که فیدبک ولتاژ و جریان از پنل نداریم.

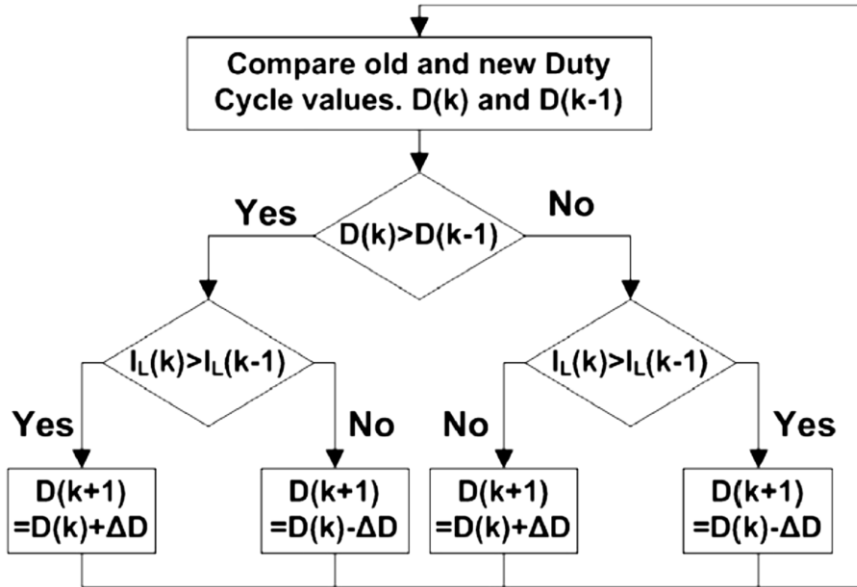


شکل ۱۳: فلوجارت روش سلول PV



شکل ۱۴: طرح کلی روش POS





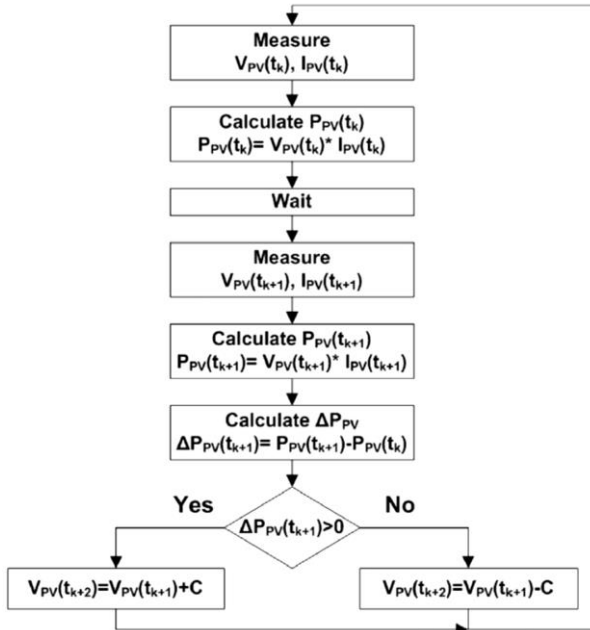
شکل ۱۵: فلوچارت روش POS

۳-۵. روش اغتشاش و مشاهده^۱

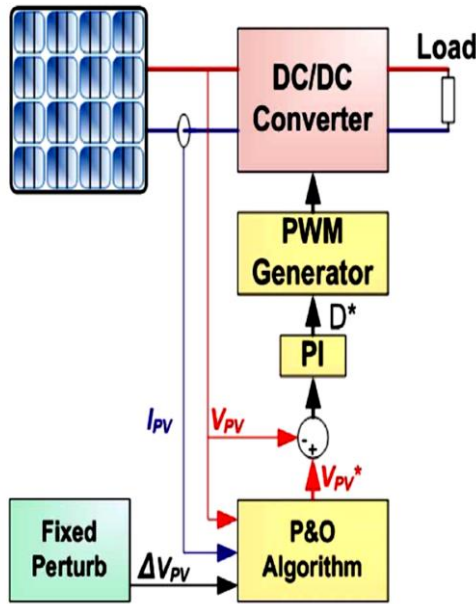
روش P&O یکی از پر استفاده ترین روش های MPPT است که بر مبنای سعی و خطا می باشد. در هر دوره عملکردی، جریان و ولتاژ PV به وسیله کنترل کننده ردیاب اندازه گیری و توان حقیقی PV محاسبه می شود؛ سپس با تغییر ولتاژ عملکرد و ملاحظه تغییرات توان، در نقطه ی کار سلول اغتشاش ایجاد می کند. در این حالت اگر توان افزایش یابد، جهت اغتشاش بعدی مشابه خواهد بود اما اگر توان با تغییر ولتاژ کاهش یابد، جهت اغتشاش بعد باید در خلاف جهت قبل باشد. این روند تا حصول MPP به طور بی وقفه ادامه دارد. در واقع در نقطه ای که در آن $\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = 0$ صدق کند، حداکثر توان قابل دستیابی می شود. فلوچارت و طرح کلی مربوط به این روش به ترتیب در شکل های ۱۶ و ۱۷ نمایش داده شده است.

از مزایای اصلی روش P&O عدم نیاز به مشخصه ی سلول و قابلیت پیاده سازی برای انواع پنل ها می باشد. تقسیم بندی اغتشاش ها مهم ترین مسئله ای است که در این روش باید مدنظر قرار گیرد. اگر پله ها بزرگ باشند سرعت عملیات بالا رفته اما از دقت کاسته می شود و در صورت کوچک بودن پله ها زمان افزایش یافته اما پاسخ دقیق تر خواهد بود. بنابراین با توجه به هر کاربرد باید تقسیم بندی خاصی انتخاب و صورت گیرد. به علاوه در صورتی که اندازه ی پله ها متغیر باشد می توان پاسخ بهتری دریافت کرد. (IV Banu 2013)

¹ Perturb and Observe Method (P&O)



شکل ۱۶: فلوجارت روش P&O

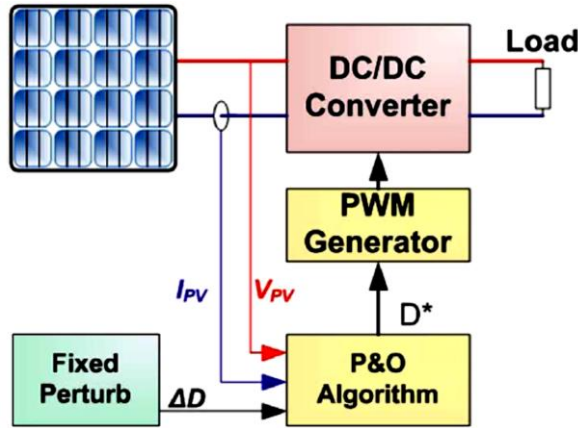


شکل ۱۷: طرح کلی روش P&O



۴-۵. روش تعدیل یافته P&O^۱

در این روش، به جای استفاده از ولتاژ پنل به عنوان عامل متغیر، مقدار دوره‌ی عملکرد مبدل در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب عملیات کنترل راحت‌تر خواهد بود، چرا که پس از بلاک MPPT هیچگونه هیستریزیس به وجود آمده رخ نخواهد داد. اندازه‌ی اغتشاش در این حالت ثابت و برابر با مقدار پیش‌فرض می‌باشد بنابراین هم‌چنان بحث بهینه‌سازی برای رسیدن به یک پله‌ی معین وجود دارد. طرح کلی این روش در شکل ۱۸ مشخص شده است.



شکل ۱۸: طرح کلی روش تعدیل یافته‌ی P&O

۵-۵. روش معمولی P&O با اغتشاش تطبیقی^۲

در این روش مقدار پله متغیر می‌باشد و ابتدا میزان تغییر ولتاژ برابر با ۱۰٪ از مقدار ولتاژ مدار باز در نظر گرفته می‌شود. پس از هر پله‌ی موفق، اندازه‌ی پله‌ی بعدی تقسیم بر دو می‌گردد تا زمانی که به مقدار ۰/۵٪ از ولتاژ مدار باز برسد. این روش نیز به طور کامل دقیق نمی‌باشد، چرا که ولتاژ مدار باز، خود به شرایط محیطی وابسته است؛ پس نمی‌توان این روش را به عنوان یک روش کاملاً تطبیقی در نظر گرفت. طرح کلی این روش در شکل ۱۹ قابل مشاهده است.

۶-۵. روش تعدیل یافته‌ی P&O با اغتشاش تطبیقی^۳

در این روش مقدار دوره‌ی عملکرد مبدل از طریق رابطه‌ی (۲۴) به دست می‌آید.

$$d(k) = d(k - 1) \pm \frac{\Delta P / \Delta d}{P/d} \quad (24)$$

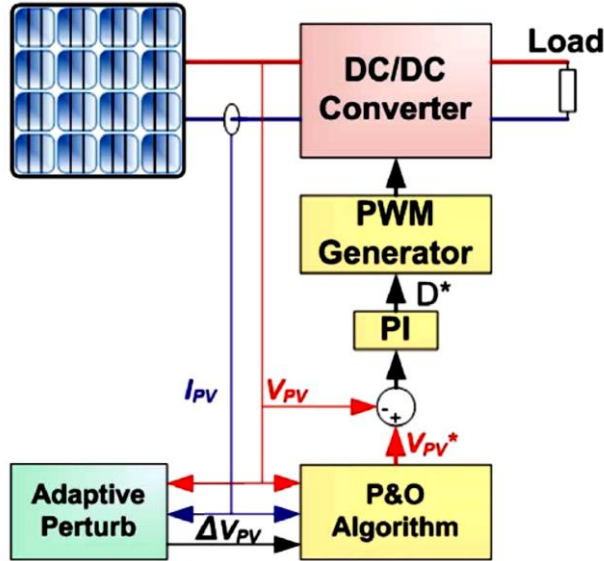
¹ Modified P&O with Fixed Perturbation Step

² Conventional P&O with Adaptive Perturbation

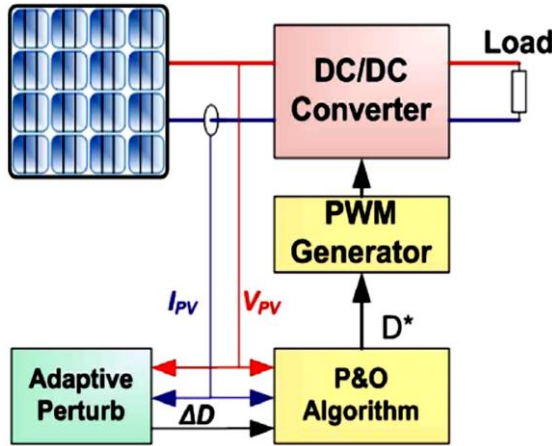
³ Modified P&O with Adaptive Perturbation



در این حالت سیستم عملکرد، دقت بالایی خواهد داشت اما بار محاسباتی بسیار زیاد می‌گردد. طرح کلی این روش در شکل ۲۰ مشخص است.



شکل ۱۹: روش معمولی P&O با اغتشاش تطبیقی



شکل ۲۰: طرح کلی روش تعدیل یافته‌ی P&O با اغتشاش تطبیقی

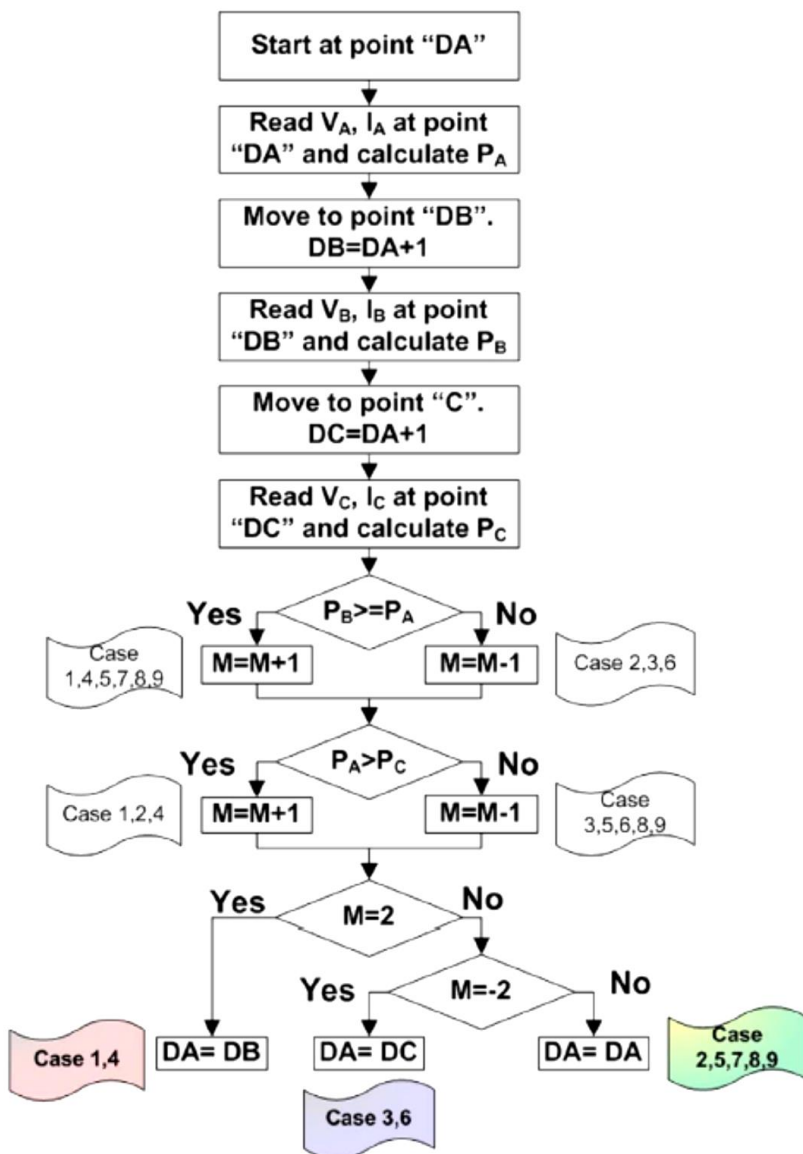
۵-۷. روش مقایسه‌ی وزنی ۳ نقطه‌ای^۱

فلوچارت این روش در شکل ۲۱ نمایش داده شده است. این سیستم برخلاف روش P&O که دو نقطه را با یکدیگر مقایسه می‌کرد، از ۳ نقطه بهره می‌گیرد. این سه نقطه که در شکل ۲۲ نیز مشخص هستند عبارتند از:

^۱ Three-point Weight Comparison Method



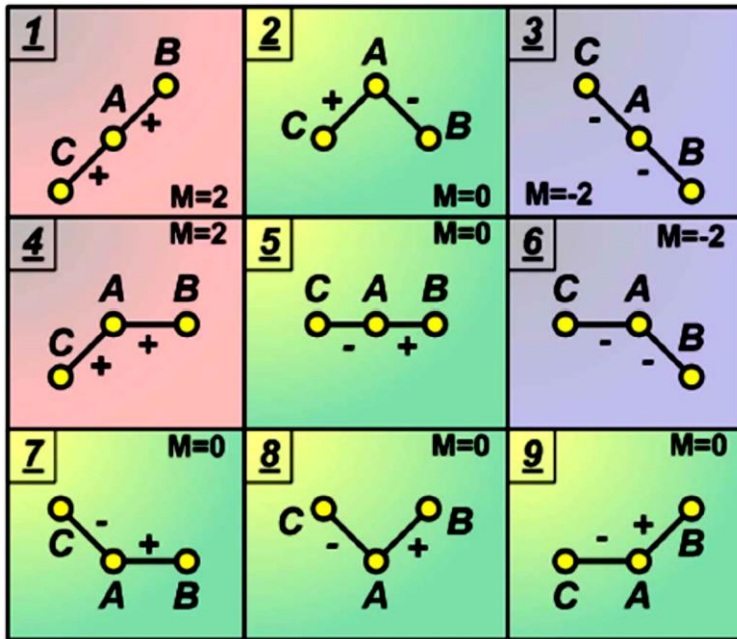
- نقطه‌ی جریان عملکرد A
 - نقطه‌ی B، تغییر یافته‌ی A
 - نقطه‌ی C، تغییر یافته‌ی A به میزان ۲ برابر در خلاف جهت B
- در نتیجه ۹ سناریوی مختلف به وجود خواهد آمد تا MPP به دست آید. در شکل ۲۲ این ۹ حالت قابل مشاهده هستند.



شکل ۲۱: فلوجارت روش مقایسه‌ی وزنی ۳ نقطه‌ای



در این روش اگر توان در B بزرگتر یا مساوی با توان در A باشد، وضعیت مثبت و در غیر این صورت وضعیت منفی در نظر گرفته می‌شود. زمانی که توان در C از توان در A کوچکتر باشد، وضعیت مثبت خواهد بود و بالعکس. حال اگر دو نقطه از سه نقطه به دست آمده مثبت باشند، مقدار دوره‌ی عملکرد مبدل افزایش خواهد یافت و در صورتی که منفی باشند، اندازه‌ی دوره‌ی عملکرد مبدل تغییرات منفی خواهد داشت. در نهایت، زمانی که یکی مثبت و دیگری منفی باشد، MPPT حاصل می‌شود.



شکل ۲۲: حالت احتمالی متغیر در روش مقایسه‌ی وزنی ۳ نقطه‌ای

۵-۸. روش جستجوی آنلاین MPP^۱

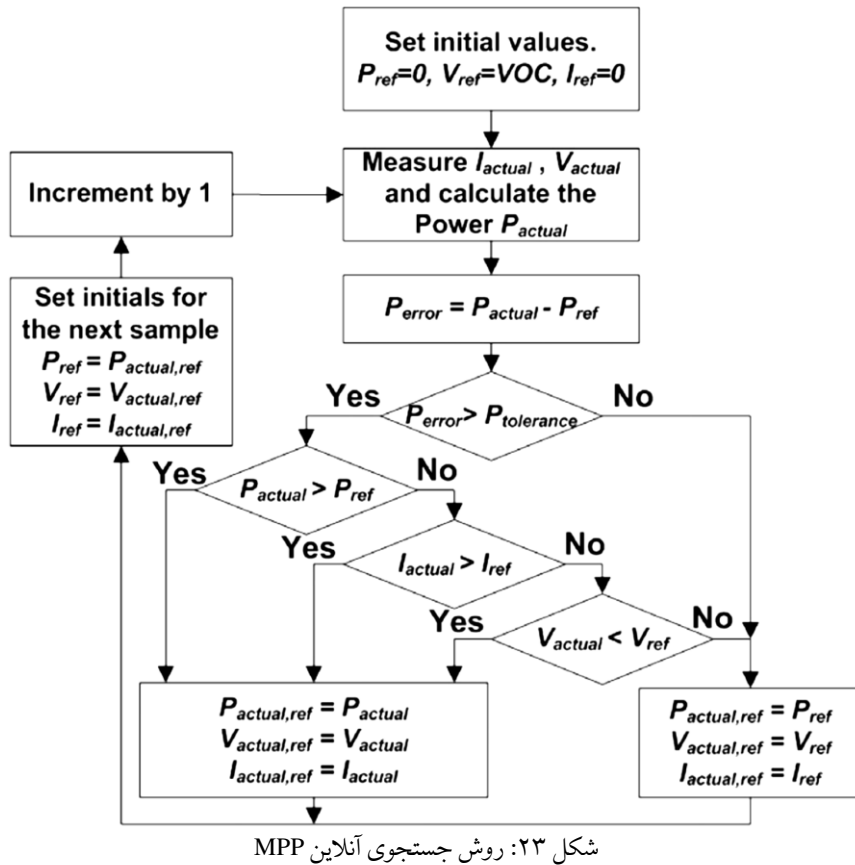
مبنای این روش، مقایسه‌ی حداکثر توان مرجع با توان واقعی می‌باشد که به اختلاف این دو مقدار، خطای حداکثر توان اطلاق می‌شود. پنل PV زمانی در حالت MPP خواهد بود که مقدار این خطا صفر باشد.

در ابتدا پارامترهای اولیه‌ی MPP یعنی توان P_{ref} و جریان I_{ref} صفر در نظر گرفته می‌شوند و ولتاژ V_{ref} برابر ولتاژ مدار باز پنل قرار داده می‌شود. در هر مرحله نمونه‌برداری، مقدار خطا ($P_{error} = P_{ref} - P_{actual}$) محاسبه شده و با حداکثر خطای قابل قبول $P_{tolerance}$ مقایسه می‌شود. اگر P_{error} از $P_{tolerance}$ کوچکتر باشد، آن‌گاه مقادیر P_{ref} ، I_{ref} و V_{ref} بدون تغییر خواهند ماند و به عنوان مقادیر عملیاتی قرار داده می‌شوند. هر گاه P_{error} از $P_{tolerance}$ بیشتر باشد، سیستم به دنبال یک MPP جدید خواهد رفت. چنانچه P_{actual} از $P_{tolerance}$ بیشتر باشد، مقادیر P_{actual} ،

¹ On-line MPP Search Algorithm



V_{actual} و I_{actual} به ترتیب به عنوان $P_{actual,ref}$ ، $V_{actual,ref}$ و $I_{actual,ref}$ قرار خواهند گرفت و این بار به عنوان مرجع استفاده خواهند شد. در واقع این روش بر مبنای توان بار عمل می‌کند به طوری که ولتاژ خروجی پنل (V_{actual}) در این روش تغییر یافته و میزان جریان بار ($I_{actual,ref}$) برای رسیدن به MPP افزایش یا کاهش داده می‌شود. لازم به ذکر است که این روش برای بارهای کوچک پاسخگو نخواهد بود. شکل ۲۳ فلوجارت این سیستم را نمایش می‌دهد. (Saravana Selvan 2016)



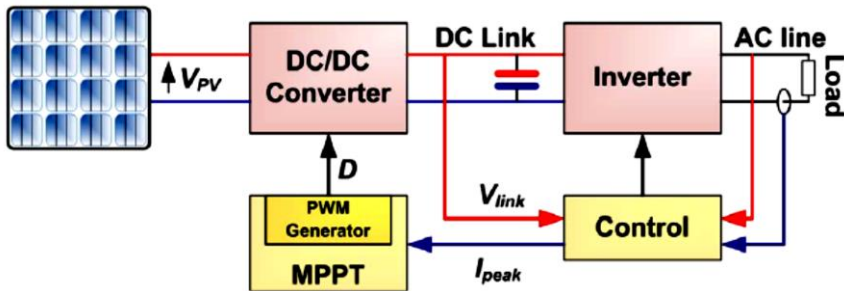
۹-۵. روش کنترل خازن با لینک DC^۱

این روش مختص یک سیستم PV که به یک مبدل AC متصل است، ارائه شده که طرح کلی این سیستم در شکل ۲۴ مشخص شده است. در این حالت ولتاژ ورودی V_{PV} و ولتاژ خروجی V_{link} با معادله‌ی (۲۵) به یکدیگر مرتبط می‌شوند.

$$D = 1 - \frac{V_{PV}}{V_{link}} \quad (25)$$

^۱ DC-Link Capacitor Droop Control Method

که در آن D برابر با دوره‌ی عملکرد اینورتر ایده‌آل می‌باشد. نحوه‌ی کار این سیستم بر اساس شناسایی افت ولتاژ در خازن لینک DC می‌باشد (V_{link}). با در نظر گرفتن مقدار ثابت برای V_{link} ، افزایش جریان اینورتر به منزله‌ی افزایش توان PV خواهد بود. این افزایش جریان نباید به بیش از حد توان PV شود؛ چنانچه این اتفاق بیفتد، مقدار V_{link} کاهش خواهد یافت. بنابراین قبل رخ دادن این اتفاق، مقدار I_{peak} مبدل در حداکثر خود قرار خواهد گرفت.



شکل ۲۴: طرح کلی روش کنترل خازن با لینک DC

۱۰-۵. روش تنظیم مجدد آرایه^۱

در این روش آرایه‌های PV در ترکیبات سری و موازی مختلف به گونه‌ای قرار می‌گیرند که مقدار MPP دارای مشخصات خاصی باشد که باعث می‌شود این روش زمان زیادی را در بر گیرد. در این حالت یک آرایه‌ی خورشیدی به دو پنل تقسیم خواهد شد که یکی به عنوان پنل ساده و دیگری خود به چند پنل بخش‌بندی می‌شود. اتصال پنل‌ها می‌تواند به صورت سری، موازی یا سری-موازی باشد.

۱۱-۵. روش $MPPT$ با یک نشانگر متغیر^۲

این تکنیک متشکل از مبدل باک^۳ به همراه PV و بار می‌باشد که مبدل باک شامل یک فیلتر AC است. در این روش یک رابطه بین حداقل مقدار نشانگر و جریان PV مدل‌سازی می‌شود تا MPP به دست آید. حداقل مقدار اندوکتانس در یک مبدل باک برای عملکرد صحیح آن از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$L_{min} = \frac{R_L(1-D)}{2f_s} \quad (26)$$

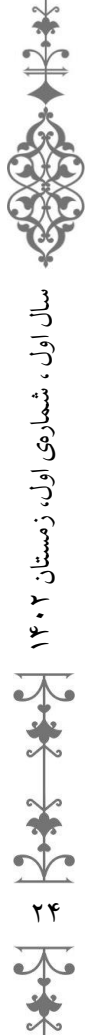
که در آن R_L مقاومت بار، D دوره‌ی عملکرد مبدل باک و f_s فرکانس کلیدزنی می‌باشد. رابطه‌ی جریان ورودی I_{PV} و جریان خروجی I_L مبدل باک به صورت زیر خواهد بود:

$$I_{PV} = I_L D \quad (27)$$

¹ Array Reconfiguration Method

² MPPT with a Variable Indicator

³ Buck Converter



از طرفی امپدانس ورودی R_i و خروجی R_L مبدل به صورت زیر با یکدیگر مرتبط می‌باشند:

$$R_i = \frac{V_{PV}}{I_{PV}} = \frac{1}{D} \frac{V_L}{I_L} = \frac{1}{D} R_L \quad (28)$$

که در آن V_L و I_L به ترتیب ولتاژ و جریان بار هستند.

از ترکیب معادلات (۲۸-۲۶) حداقل اندوکتانس به دست خواهد آمد:

$$L_{min} = \frac{D(1-D)V_{PV}}{2f_s I_L} = \frac{D^2(1-D)V_{PV}}{2f_s I_{PV}} \quad (29)$$

با در نظر گرفتن ولتاژ ثابت PV برای تمامی شدت‌های تابش، L_{min} تابعی از D و I_L خواهد بود.

۶. تکنیک‌های ردیابی با استفاده از محاسبات ریاضی

۶-۱. ردیابی نقطه‌ی حداکثر توان بر مبنای فضای حالت^۱

در این روش، سیستم PV با یک فضای حالت تعریف می‌شود و از یک کنترل‌کننده فیدبک دینامیکی غیرخطی متغیر با زمان برای ردیابی MPP استفاده می‌کند. این روش سریع می‌باشد و به تغییر در پارامترهای PV و نیز شرایط محیطی وابسته نیست. این روش هنوز به صورت عملی مورد استفاده قرار نگرفته است.

۶-۲. روش جهت‌یابی مختصات خطی^۲

این سیستم با استفاده از تکرار، معادله‌ی MPP مربوط به مشخصه‌های آرایه‌ی PV را حل می‌کند، به گونه‌ای که معادله را تغییر می‌دهد تا یک مقدار مشخص برای MPP به دست آید که برای این کار از مقادیر ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه و دیگر مقادیر تعیین‌کننده‌ی مشخصه‌ی آرایه‌ی PV استفاده می‌کند.

۶-۳. روش استفاده از منحنی^۳

در این روش توان پنل بر حسب ولتاژ آن به صورت زیر مدل می‌شود:

$$P_{PV} = aV_{PV}^3 + bV_{PV}^2 + cV_{PV} + d \quad (30)$$

که در آن a، b، c و d ضرایب به دست آمده با نمونه‌برداری از توان، ولتاژ و جریان PV هستند.

در این حالت ولتاژ MPP به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$V_{MPP} = \frac{-b\sqrt{b^2 - 3ac}}{3a} \quad (31)$$

این محاسبات باید با سرعت بالایی تکرار شوند تا دقت بالاتری حاصل گردد. این روش نیاز به دانستن پارامترهای فیزیکی PV و مشخصات ساخت آن می‌باشد و شرایط محیطی نیز دقیقاً باید در آن لحاظ شوند. در نتیجه نیازمند حافظه‌ی زیاد و سیستم پردازنده‌ی قدرتمند می‌باشد.

¹ State-based MPPT Method

² Linear Reoriented Coordinates Method (LRCM)

³ Curve-fitting Method



۶-۴. روش دیفرانسیلی^۱

در این روش محل MPP با حل معادله‌ی (۳۲) به دست می‌آید:

$$\frac{dP_{PV}}{dt} = V_{PV} \quad \text{and} \quad \frac{dI_{PV}}{dt} + I_{PV} \frac{dV_{PV}}{dt} = 0 \quad (32)$$

این سیستم نیازمند یک پردازنده‌ی قوی برای حل معادله‌ی بالا می‌باشد. در واقع در این روش ۸ مرحله محاسبات وجود دارد که عبارتند از:

- اندازه‌گیری V_{PV}
- اندازه‌گیری I_{PV}
- اندازه‌گیری تغییرات ولتاژ dV_{PV} در حین زمان اغتشاش dt
- اندازه‌گیری تغییرات جریان dI_{PV} در حین زمان اغتشاش dt
- محاسبه‌ی حاصل ضرب V_{PV} و dI_{PV}
- محاسبه‌ی حاصل ضرب I_{PV} و dV_{PV}
- محاسبه‌ی حاصل جمع دو سطر قبلی
- مقایسه‌ی حاصل جمع محاسبه شده با یک اغتشاش مشابه در سمت دیگری از نقطه‌ی عملکرد

چنانچه مجموع حاصل شده غیر صفر باشد، یک مرحله محاسباتی دیگر نیز اضافه خواهد شد که جهت تنظیمات مورد نیاز برای رسیدن به MPP را مشخص خواهد کرد.

۶-۵. روش کنترل اسلاید^۲

این روش بر مبنای محاسبه‌ی تغییرات توان PV بر حسب تغییرات ولتاژ آن می‌باشد. در این روش معادله ۳۳ مطرح است:

$$S = \frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \quad (33)$$

که در آن S مشخص‌کننده‌ی جهت ولتاژ عملکرد بر حسب محل MPP است. در این روش، ردیابی نقطه حداکثر با استفاده از کنترل مبدل DC/DC صورت می‌پذیرد. این در حالی است که از پارامتر u برای مدل کردن این روش مطابق با رابطه‌ی (۳۴) استفاده می‌شود، که صفر بودن این پارامتر به معنای باز بودن و یک بودن آن به معنای بسته بودن کلید بسته است.

$$\begin{cases} u = 0 & S \geq 0 \\ u = 1 & S < 0 \end{cases}$$

¹ Differentiation Method

² Slide Control Method



۶-۶. روش کنترل فیدبک dP/dI یا dP/dV

در این روش مقدار شیب dP_{PV}/dV_{PV} یا dP_{PV}/dI_{PV} از روی منحنی توان محاسبه می‌شود و به وسیله‌ی مبدل نقطه‌ای که شیب در آن صفر است، شناسایی صورت می‌گیرد. با توجه به علامت به دست آمده از دوره‌های قبلی، مقدار دوره‌ی عملکرد مبدل می‌تواند صعودی یا نزولی باشد تا MPP حاصل شود.

۶-۷. روش هدایت صعودی^۱

روش IC نیز بر مبنای دیفرانسیل توان PV نسبت به ولتاژ آن می‌باشد و MPP زمانی رخ می‌دهد که حاصل دیفرانسیل صفر باشد. در واقع این روش از معادلات (۳۵) و (۳۶) استفاده می‌کند:

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{d(V_{PV}I_{PV})}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = 0 \quad (35)$$

$$\frac{V_{PV}}{I_{PV}} = - \frac{dV_{PV}}{dI_{PV}} \quad (36)$$

معادلات (۳۵) و (۳۶) در شکل‌های ۳ و ۴ نیز نمایش داده شده‌اند و مقادیر dV_{PV} و dI_{PV} از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$dV_{PV}(t_2) \approx \Delta V_{PV}(t_2) = V_{PV}(t_2) - V_{PV}(t_1) \quad (37)$$

$$dI_{PV}(t_2) \approx \Delta I_{PV}(t_2) = I_{PV}(t_2) - I_{PV}(t_1) \quad (38)$$

در معادله‌ی (۳۶) مشتق اول، دور یا نزدیک بودن نقطه‌ی عملکرد PV نسبت به MPP را تعیین می‌کند. فلوجارت مربوط به این روش در شکل ۲۴ مشخص شده است.

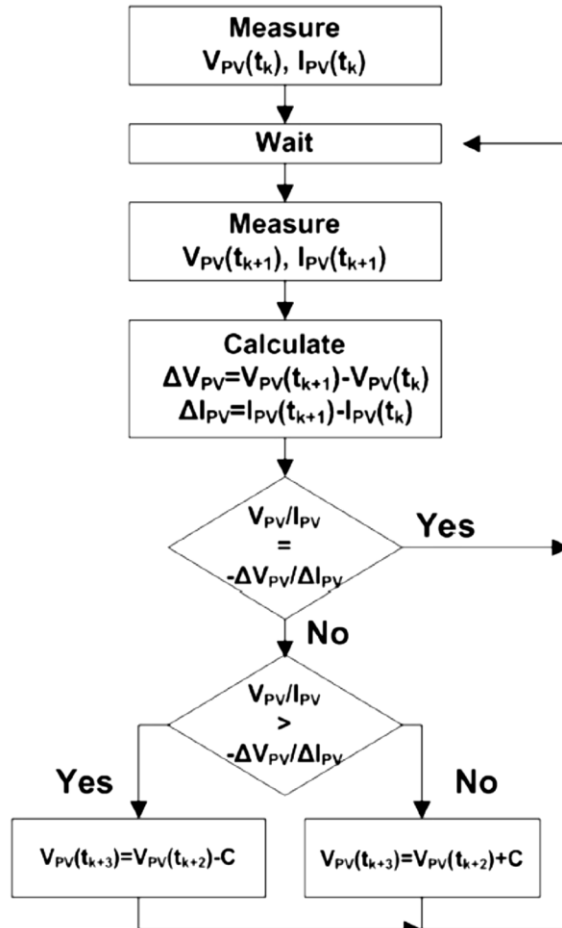
$$\frac{V_{PV}}{I_{PV}} = - \frac{\Delta V_{PV}}{\Delta I_{PV}} \quad \text{at MPP}$$

$$\frac{V_{PV}}{I_{PV}} < - \frac{\Delta V_{PV}}{\Delta I_{PV}} \quad \text{left to MPP}$$

$$\frac{V_{PV}}{I_{PV}} > - \frac{\Delta V_{PV}}{\Delta I_{PV}} \quad \text{right to MPP}$$

¹ Incremental Conductance Method (IC)





شکل ۲۴: فوجارت روش IC

این روش در شرایط متغیر آب و هوایی پاسخ خوبی ارائه می کند؛ هم چنین نسبت به روش P&O نوسانات کمتری حول MPP دارد. البته در شرایطی که روش P&O کاملاً بهینه شده باشد، بازدهی آن با روش IC تقریباً برابر خواهد بود. با تمام این ها روش کنترل فیدبک به مدار کنترلی پیچیده ای نیاز خواهد داشت. (Ghislain Remy 2011)

۶-۸. روش کنترل صعودی با پله ی متغیر^۱

در این سیستم مشکل روش IC معمولی برطرف شده است. عملکرد این سیستم به نحوی است که دور بودن MPP باعث ایجاد پله های بزرگ تر می شود و با نزدیک شدن به آن، پله ها کوچک می گردند. این روش سرعت پاسخ گویی بالا و نوسانات پایینی دارد که از مزیت های آن عنوان می شود.

¹ Variable Step Incremental Conductance Method

۶-۹. روش خازن انگلی^۱

مشابه روش IC می‌باشد با این تفاوت که اثر خازن انگلی سلول PV یعنی C_{ap} در آن لحاظ شده است. این اثر خازنی مزاحم باعث ایجاد خلل در عملکرد PV می‌شود. روش PC سیگنال خطا را کاهش می‌دهد و از آن برای به دست آوردن محل MPP استفاده می‌کند. با اضافه کردن تأثیر جریان خازنی خواهیم داشت:

$$C = k \left(\frac{V_{PV}(n)I_{PV}(n) - V_{PV}(n-1)I_{PV}(n-1)}{V_{PV}(n) - V_{PV}(n-1)} \right) \quad (40)$$

که در آن $V_{PV}(n)$ و $I_{PV}(n)$ مقادیر ولتاژ و جریان PV در n امین نمونه برداری هستند و k ضریب تنظیم می‌باشد. در نتیجه برای جریان و ولتاژ داریم:

$$I_C(t) = C_{ap} \frac{dV_{PV}}{dt} \quad (41)$$

$$I_{PV}(t) = F(V_{PV}(t)) + C_{ap}V_{PV}(t) \quad (42)$$

$$P_{PV}(t) = [F(V_{PV}(t)) + C_{ap}\dot{V}_{PV}(t)]V_{PV}(t) \quad (43)$$

برای رسیدن به MPP باید داشته باشیم:

$$\frac{dP_{PV}(t)}{dV_{PV}(t)} = \frac{dF(V_{PV}(t))}{dV_{PV}(t)}V_{PV}(t) + F(V_{PV}(t)) = 0 \quad (44)$$

$$\frac{dF(V_{PV}(t))}{dV_{PV}(t)} = -\frac{F(V_{PV}(t))}{V_{PV}(t)} \quad (45)$$

سمت چپ معادله (۴۵) هدایت صعودی و سمت راست آن هدایت آنی را نشان می‌دهد. با مشتق گیری مجدد مقدار حداکثر به دست می‌آید:

$$\frac{dF(V_{PV}(t))}{dV_{PV}(t)} + C \left(\frac{\ddot{V}_{PV}(t)}{\dot{V}_{PV}(t)} + \frac{\dot{V}_{PV}(t)}{V_{PV}(t)} \right) + \frac{F(V_{PV}(t))}{V_{PV}(t)} = 0 \quad (46)$$

۶-۱۰. روش β

در واقع در این روش MPP توسط سیستم تخمین زده می‌شود. رابطه زیر برای β از طریق آنالیز مشخصه‌ی جریان-ولتاژ سلول خورشیدی حاصل می‌شود:

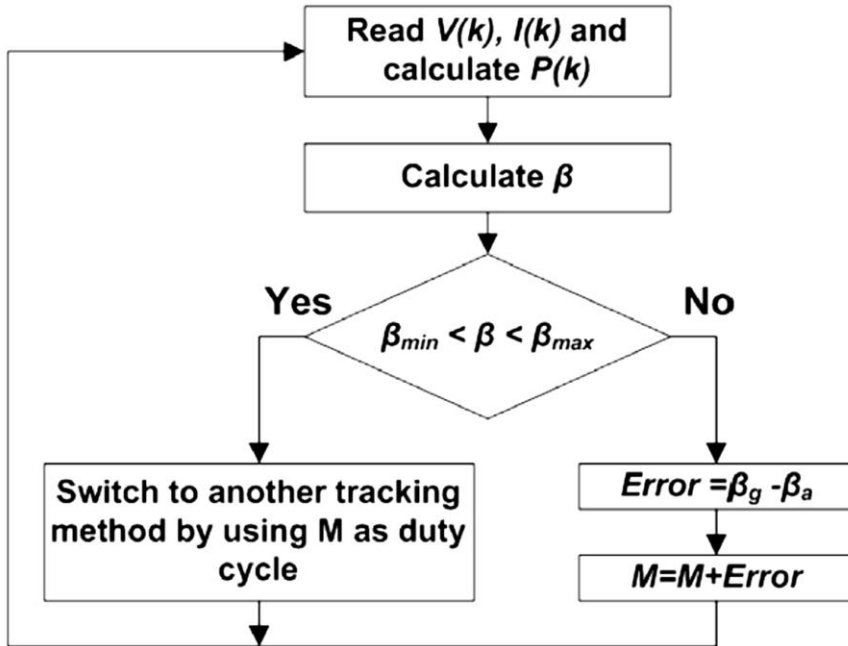
$$\beta = \ln \left(\frac{I_{PV}}{V_{PV}} \right) - cV_{PV} = \ln(I_s c) \quad (47)$$

که در آن I_s نماینده‌ی جریان اشباع معکوس و c به عنوان ثابت دیود می‌باشد. در واقع می‌توان گفت مقدار β فقط به دما وابسته است و بستگی به تابش نخواهد داشت. زمانی که دما در یک محدوده‌ی مشخصی تغییر نماید، اندازه‌ی β در MPP نیز در یک محدوده، متغیر خواهد بود، به نحوی که β_{min} مربوط به کمترین دما و تابش می‌باشد و بالعکس. برای شروع کار در این روش از β_g و β_a به عنوان محدوده‌های β استفاده می‌شود که به ترتیب بیانگر مقدار β در

¹ Parasitic Capacitance Method (PC)



محتمل ترین شرایط دمایی پنل و β در آن لحظه می باشند. فلوجارت این سیستم در شکل ۲۵ قابل مشاهده است.



شکل ۲۵: فلوجارت روش β

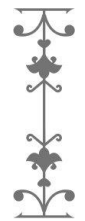
آزمایش‌ها نشان داده‌اند زمانی که توان خروجی PV در نزدیکی MPP باشد، مقدار β در محدوده‌ی کوچکی نوسان خواهد کرد. از همین ویژگی برای تعیین محل MPP استفاده می‌شود. در صورت استفاده از پله‌های صعودی بزرگ، سرعت کار بسیار بالا می‌باشد ولی پله‌های کوچک باعث افزایش دقت خواهند شد و سیستم سرعت قابل قبولی نیز خواهد داشت.

۶-۱۱. روش محاسبه V_{MPP} و I_{MPP}

در این روش، مقادیر جریان و ولتاژ MPP با توجه به معادله‌ی استاندارد جریان PV به دست می‌آید. پس از انجام محاسبه، از یک فیدبک کنترلی جهت وادار کردن سیستم به عملکرد در MPP استفاده می‌گردد. رابطه‌ی توان PV به صورت زیر می‌باشد:

$$P_{PV} = V_{PV}I_{PV} = I_{PV} \left[V_s + \beta(T - T_{ref}) + R_s I_s - \frac{I_{PV}}{N_p} [R_s + k(T - T_{ref})] \right] N_s \quad (48)$$

که در آن V_s و I_s به ترتیب ولتاژ و جریان خروجی پنل، T و T_{ref} به ترتیب دمای واقعی و دمای استاندارد، β ضریب دمایی، R_s مقاومت سری پنل، k ضریب تصحیح منحنی و N_s تعداد



پنل‌های سری شده هستند. از مشتق P_{PV} نسبت به I_{PV} مقادیر ولتاژ و جریان MPP به صورت ذیل به دست خواهند آمد:

$$I_{MPP} = \frac{N_P V_s + \beta(T - T_{ref}) + R_s I_s}{2 R_s + k(T - T_{ref})} \quad (49)$$

$$V_{MPP} = \frac{N_s}{2} V_s + \beta(T - T_{ref}) + R_s I_s \quad (50)$$

۷. تکنیک‌های ردیابی با روش پیش‌بینی هوشمند

۷-۱. روش کنترلی منطق فازی^۱

ردیاب‌هایی که بر اساس منطق فازی ساخته می‌شوند، هوشمند هستند؛ زیرا حتی اگر ورودی آن‌ها دقیق نباشد، MPP را پیدا و دنبال می‌کنند. عموماً کنترل فازی از سه مرحله تشکیل شده است: فازی کردن^۲، جدول مشاهده^۳ و غیرفازی کردن^۴. در مرحله اول مدل سازی، متغیرهای عددی ورودی به متغیرهای قابل فهم برای سیستم ترجمه می‌شود که خود پنج حالت فازی دارد: منفی بزرگ^۵، منفی کوچک^۶، صفر^۷، مثبت کوچک^۸ و مثبت بزرگ^۹. ورودی‌های کنترل‌کننده منطق فازی عموماً یک خطا (E) و تغییرات در خطا (ΔE) می‌باشد که نحوه‌ی به دست آوردن آن‌ها در معادلات (۵۱) و (۵۲) مشخص شده است.

$$E(n) = \frac{V_{PV}(n)I_{PV}(n) - V_{PV}(n-1)I_{PV}(n-1)}{V_{PV}(n) - V_{PV}(n-1)} \quad (51)$$

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n-1) \quad (52)$$

پس از محاسبه‌ی E ، ΔE و ترجمه‌ی آن‌ها به متغیرهای مدنظر، خروجی کنترل‌کننده فازی مطابق شکل ۲۶ به دست خواهد آمد که میزان تغییرات دوره‌ی عملکرد مبدل با توجه به آن شناسایی می‌شود. در مرحله‌ی غیرفازی کردن، نتیجه از طریق کنترل‌کننده از زبان منطق فازی به سیگنال آنالوگ قابل تشخیص برای مبدل تبدیل می‌شود. این روش در شرایط آب و هوایی متغیر به خوبی کار می‌کند اما نیاز به محاسبات خطای صحیح و دقیق دارد. (Hossain, Khan et al. 2011)

¹ Fuzzy Logic Control

² Fuzzification

³ Rule-base Lookup Table

⁴ Defuzzification

⁵ Negative Big (NB)

⁶ Negative Small (NS)

⁷ Zero (ZE)

⁸ Positive Small (PS)

⁹ Positive Big (PB)



ΔE E	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

شکل ۲۶: جدول روش منطق فازی

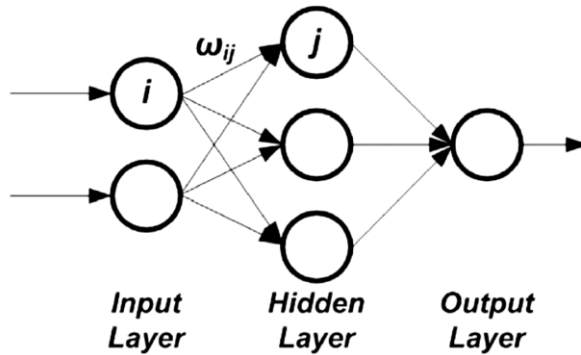
۲-۷. روش استفاده از شبکه‌ی عصبی^۱

استفاده از شبکه‌ی عصبی نیز از روش‌های هوشمند MPPT عنوان می‌شود. این روش متشکل از سه لایه به نام‌های لایه‌های ورودی، مخفی و خروجی می‌باشد که در شکل ۲۷ نمایش داده شده‌اند. مقادیر ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه یا شرایط محیطی مثل دما، تابش یا ترکیبی از آن‌ها می‌تواند به عنوان ورودی‌های سیستم در نظر گرفته شود. خروجی سیستم، سیگنال ارسالی برای تعیین مقدار دوره‌ی عملکرد مبدل خواهد بود و الگوریتم داخل لایه‌ی مخفی، کار تبدیل ورودی به خروجی دلخواه را انجام خواهد داد. برای ارتباط بین گره‌ها از وزن‌گذاری استفاده می‌شود که در شکل ۲۷ نیز وزن بین دو گره i و j به صورت w_{ij} قابل مشاهده می‌باشد.

در واقع روش شبکه‌ی عصبی بر مبنای وزن‌گذاری ارتباط میان گره‌ها از طریق عملیات-های تمرینی خاصی می‌باشد، به نحوی که پارامترهای PV در یک بازه‌ی طولانی ماهیانه یا سالیانه مورد ضبط و آزمایش قرار می‌گیرند تا مقدار دقیق وزن هر شاخه تعیین شود. نقطه ضعف اصلی این سیستم، منحصر بودن آن برای یک نوع سلول است؛ یعنی نمی‌توان سیستمی ساخت که روی هر نوع PV با هر مشخصاتی عمل کند بلکه فقط می‌تواند برای یک PV با پارامترهای معین طراحی شود. به علاوه با تغییر مشخصه‌های PV در طول زمان، اندازه‌گیری و محاسبات مجدد برای حفظ دقت شبکه‌ی عصبی ضروری خواهد بود. (F. N. Tajuddin 2015)

¹ Neural Network





شکل ۲۷: لایه‌های شبکه عصبی

۳-۷. روش دنبال کردن ازدحامی بیولوژیکی^۱

این روش هوشمند از حرکت دسته‌جمعی جانوران به خصوص پرندگان یا حشرات الگو گرفته شده است. هوش ازدحامی یک تکنیک هوش مصنوعی در بردارنده‌ی اطلاعات یافت شده از رفتارهای جمعی در سیستم‌های غیر متمرکز می‌باشد. یکی از معروف‌ترین انواع هوش ازدحامی، روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۲ است؛ که از رفتار پرندگان و حرکت ماهی‌ها استنباط شده است. در روش پیشنهاد شده برای MPPT، هر پنل PV به عنوان یک ذره محسوب شده و MPP به عنوان هدف متحرک می‌باشد. هر پنل PV به گونه‌ای طراحی می‌شود که با استفاده از الگوریتم Bio-MPPT به دنبال نقطه‌ی حداکثر توان خود باشد. بنابراین با پیاده‌سازی تنظیمات ذکر شده روی یک سیستم PV، تمام پنل‌های یک آرایه به عنوان slave برای یک پنل به عنوان master فرض خواهند شد و هر پنل کنترل‌کننده خود را خواهد داشت که با کنترل‌کننده master در ارتباط خواهد بود تا MPP حاصل شود. میزان بازدهی این روش به صورت تجربی ۱۲/۱۹٪ از روش P&O بالاتر بیان شده است.

¹ Biological Swarm Chasing Algorithm

² Particle Swarm Optimization Method (PSO)

H. B. F. K. Boualem Bendib, "A survey of the most used MPPT methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 637-648, 2015 .

M. A. V. P. Saleh Elkelani Babaa, "Overview of Maximum Power Point Tracking Control Methods for PV Systems," *Journal of Power and Energy Engineering*, 2014 .

M. I. Hossain, S. A. Khan, M. Shafiullah and M. J. Hossain, "Design and implementation of MPPT controlled grid connected photovoltaic system," in *IEEE Symposium on Computers & Informatics*, 2011 .

M. I. Hossain, S. A. Khan, M. Shafiullah and M. J. Hossain, "Design and implementation of MPPT controlled grid connected photovoltaic system," in *IEEE Symposium on Computers & Informatics*, 2011 .

M. S. A. S. M. A. M. F. N. Tajuddin, "Perturbative methods for maximum power point tracking (MPPT) of photovoltaic (PV) systems: a review," *International Journal of Energy Research*, vol. 39, no. 9, 2015 .

N. M. R. O. Nabil Karami, "General review and classification of different MPPT Techniques," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 1-18, 2017 .

O. B. C. M. H. D. Ghislain Remy, "Review of MPPT Techniques for Photovoltaic Systems," *Laboratoire de Genie Electrique de Paris*, 2011 .

O. B. C. M. H. D. Ghislain Remy, "Review of MPPT Techniques for Photovoltaic Systems," *Laboratoire de Genie Electrique de Paris*, 2011 .

P. N. U. Saravana Selvan, "A Review on Photo Voltaic MPPT Algorithms," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, pp. 567-582, 2016 .

R. B. M. I. IV Banu, "Comparative analysis of the perturb-and-observe and incremental conductance MPPT methods," in *8TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED TOPICS IN ELECTRICAL ENGINEERING (ATEE)*, 2013 .

S. L. Robert Faranda, "Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems," *WSEAS Transactions on Power Systems*, 2008.

