Scientific-Research Quarterly Journal of Technical Science
Khatam Al-Nabieen University
Volume 1, Issue 1, Winter 2024

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

Mohammad Montazeri[1]

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

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]

فصلنامه علمی - تحقیقی علوم فنی
دانشگاه خاتم‌النبیین(ص)
سال اول ، شماره‌ی اول، زمستان ۱۴۰۲
صفحه ۳۴-۱

مروری بر روش‌های الکترونیکی ردیابی نقطه‌ی حداکثر توان در سلول‌های خورشیدی

محمد منتظری[۱]

چکیده

یکی از مواردی که به هنگام استفاده از سلول‌های خورشیدی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است، ردیابی نقطه‌ی حداکثر توان خروجی می‌باشد که به منظور افزایش بازدهی این سیستم‌ها انجام می‌پذیرد. در واقع یک سیستم فوتوولتاییک، زمانی دارای بیشترین بازدهی می‌باشد که توان خروجی در نقطه‌ی حداکثر خود قرار می‌گیرد. تا به حال روش‌های مختلفی برای ردیابی نقطه‌ی حداکثر توان معرفی و ارزیابی شده است. روش‌های الکترونیکی دارای مزیت هزینه‌های نگهداری و تعمیرات کمتر بوده و در سال‌های اخیر بیشتر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در این پژوهش، انواع روش‌های الکترونیکی به‌کارگرفته شده برای ردیابی نقطه‌ی حداکثر توان سلول-های خورشیدی معرفی گردیده، مزایا و معایب هر یک از آن‌ها ذکر و با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

واژگان کلیدی: انرژی الکتریکی، سلول‌های خورشیدی، فتوولتائیک، ردیابی نقطه حداکثر توان، روش‌های الکترونیکی.

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه تهران، تهران، ایران

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]

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 فوتوولتاییک 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 فوتوولتاییک 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 فوتوولتاییک، همواره بیشترین شدت تابش را از خورشید دریافت کند. نوع دیگر این سیستم‌ها، ردیاب‌های الکتریکی هستند که با نام ردیاب نقطه‌ی حداکثر توان[1] 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[2] 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)

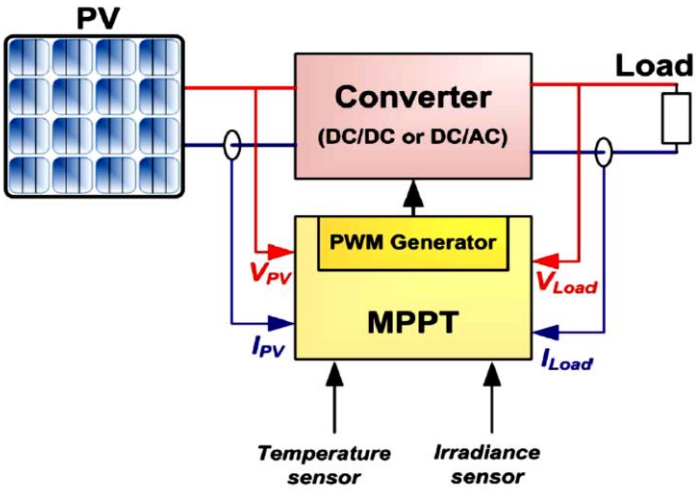
[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]

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 باطری که شامل سیستم‌های کنترلی نیز باشد، می‌تواند به نگه داشتن سلول در نقطه‌ی MPP کمک کند که به این مبدل‌ها MPPT می گویند. ورودی مبدل توسط PV تامین شده و خروجی آن را باطری و بار تشکیل می‌دهند. یک سیستم محاسباتی، دوره‌ی عملکرد[1] 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

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]

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

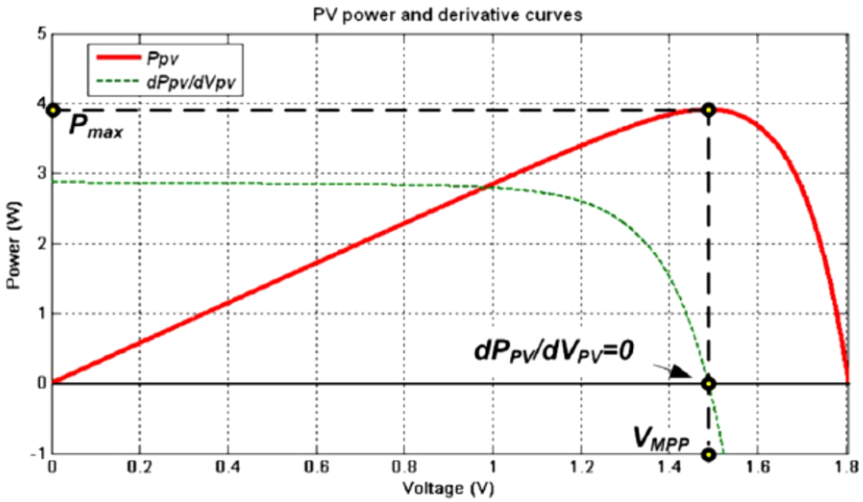
همان طور که پیش‌تر اشاره شد، تابش خورشید و دما بسیار بر خروجی پنل PV اثرمی‌گذارند. این شرایط محیطی در طول روز ثابت نیستند و این امر باعث می‌شود MPP نیز با توجه به شرایط دما و تابش روی یک منحنی جابجا شود. زمانی که سلول در نزدیکی MPP کار نکند تلفات سیستم بالا می‌رود؛ پس نیاز است نقطه‌ی کار سلول در نزدیکی 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 به‌دست آید که می‌توان وابستگی توان سلول به پارامترهای مختلف را به شکل رابطه‌ی (۱) نمایش داد:

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

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.

$$\begin{cases} \dfrac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = 0 & \text{when} \quad V_{PV} = V_{MPP} \\ \dfrac{dP_{PV}}{dV_{PV}} > 0 & \text{when} \quad V_{PV} < V_{MPP} \\ \dfrac{dP_{PV}}{dV_{PV}} < 0 & \text{when} \quad V_{PV} > V_{MPP} \end{cases} \tag{2}$$

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]



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

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

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} \times \frac{dV_{PV}}{dt} > 0 \tag{3}$$

با مشتق‌گیری از توان نسبت به ولتاژ خواهیم داشت:

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

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

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

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

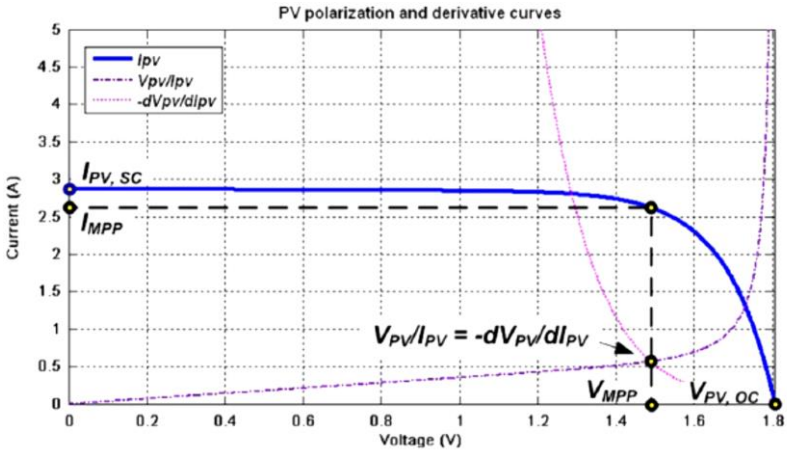
$$\varepsilon = \frac{V_{PV}}{I_{PV}} + \frac{dV_{PV}}{dI_{PV}} \tag{6}$$

از ترکیب معادلات (۲) و (٦) خواهیم داشت:

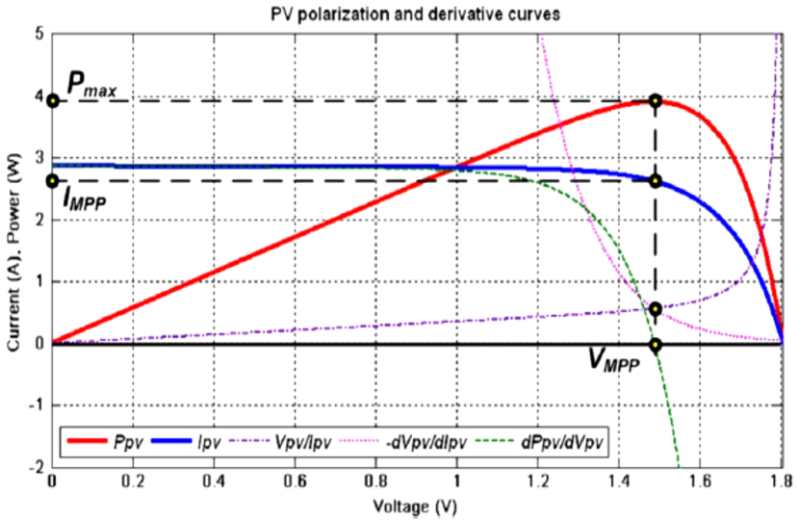
$$\begin{aligned} \varepsilon = 0 &\leftrightarrow \frac{V_{PV}}{I_{PV}} = -\frac{dV_{PV}}{dI_{PV}} && at\ the\ MPP \\ \varepsilon > 0 &\leftrightarrow \frac{V_{PV}}{I_{PV}} > -\frac{dV_{PV}}{dI_{PV}} && left\ to\ the\ MPP \\ \varepsilon < 0 &\leftrightarrow \frac{V_{PV}}{I_{PV}} < -\frac{dV_{PV}}{dI_{PV}}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

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]

در شکل ۳ می‌توان قسمت‌های مختلف معادله‌ی (۷) را مشاهده کرد که در آن، مقدار I_{PV} = I_{MPP} از تقاطع منحنی‌های $\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}}$ و $\frac{V_{PV}}{I_{PV}}$ حاصل می‌شود. مقدار $V_{PV} = V_{MPP}$ نیز مطابق شکل ٤ از تقاطع منحنی‌های $\frac{dV_{PV}}{dI_{PV}}$ و $\frac{V_{PV}}{I_{PV}}$ به‌دست می‌آید.(Boualem Bendib 2015)



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



شکل ٤: 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

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]

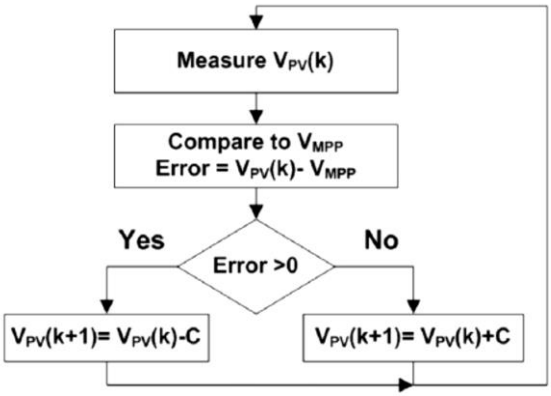
برای استخراج حداکثر توان از آن‌ها انجام شد. تاکنون انواع مختلفی از الگوریتم‌های MPPT طراحی شده‌اند که می‌توان آن‌ها را بر حسب شیوه و تکنیک ردیابی به ۵ دسته تقسیم کرد:

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 وجریان 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.
٤. 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

۳-۱. روش ولتاژ ثابت[1]

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 به‌دست 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: فلوچارت روش CV

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

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]

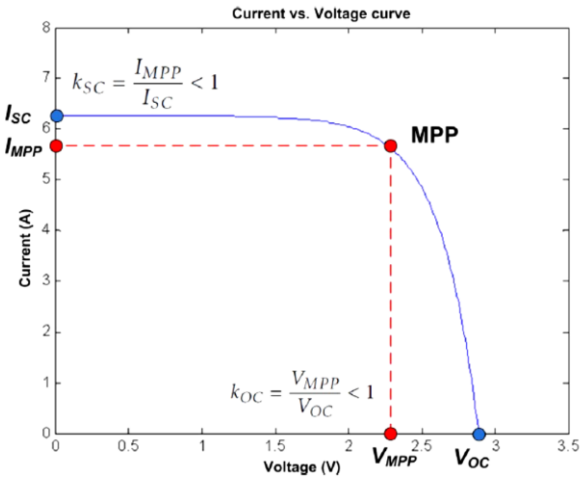
مدار CV تنها متشکل از یک سنسور ولتاژ می‌باشد که اندازه‌ی ولتاژ پنل را اندازه‌گیری کرده و دوره‌ی عملکرد مبدل DC/DC رابه وسیله‌ی آن تنظیم می‌کند. لازم به ذکر است زمانی که پنل در تابش‌های پایین عمل می‌کند، روش CV بازدهی بالاتری از برخی روش‌های دیگر که در ادامه ذکر می‌شوند (مانند P&O و IC)، خواهد داشت. این 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[1]

مزیت روش ولتاژ مدار باز این است که ولتاژ خروجی PV با ولتاژ مدار باز آن (V_{OC}) رابطه‌ای تقریبا خطی دارد، به نحوی که می‌توان آن‌ها را با یک ضریب به نام k_{OC} به یکدیگر مرتبط ساخت که مقدار آن به ضریب پرشدگی[2] 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 ٦ مشخص می‌باشد.

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

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 ظاهرا ساده به نظر می‌رسد، اما انتخاب مقدار بهینه‌ی ضریب k کار سختی می‌باشد که محدوده‌ی ضریب k_{OC} به صورت تجربی در بازه‌ای بین ۰/۷۳ و ۰/۸ به‌دست 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 ٦: رابطه‌ی بین $I_{MPP} - I_{SC}$ و $V_{MPP} - V_{OC}$

[1] Open-Circuit Voltage Method
[2] Fill Factor (FF)

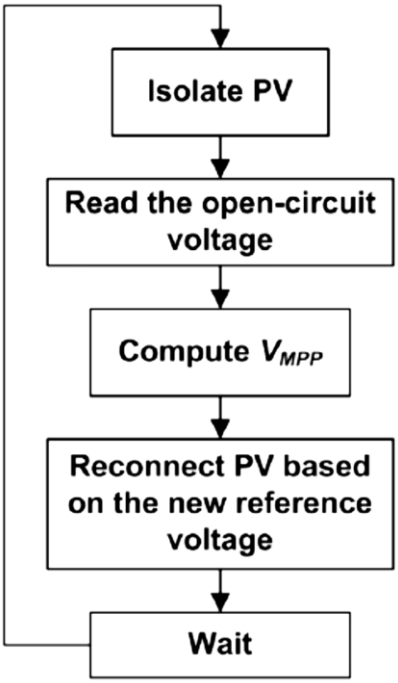
[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]

۳-۳. روش جریان اتصال کوتاه

مشابه روش قبل، این روش نیز برمبنای 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 پرشدگی خواهد بود. این ضریب برای پنل‌های پلی‌کریستالی حدود ۰/۸۵ محاسبه شده است.

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

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

۳-٤. روش ولتاژ مدار باز پیلوت[1]

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} به‌دست آمده، برای محاسبه‌ی V_{MPP} طبق رابطه‌ی (۱۰) استفاده می‌گردد.

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

[1] Open-Circuit Voltage Pilot PV Cell Method

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]

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[1]

ولتاژ مدار باز در سلول PV با دمای سلول رابطه‌ی خطی دارد که این مطلب بعدا در معادله‌ی (۱٤) نشان داده خواهد شد. این رابطه در حال حاضر به صورت معادله‌ی (۱۱) قابل نمایش است.

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

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) به‌دست می‌آید.

۳-٦. روش پارامتری دما[2]

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

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

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[3]

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 [4]

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 ردیاب به‌دست آید. ولتاژ مرجع طبق معادله‌ی (۱۳) به‌دست می‌آید.

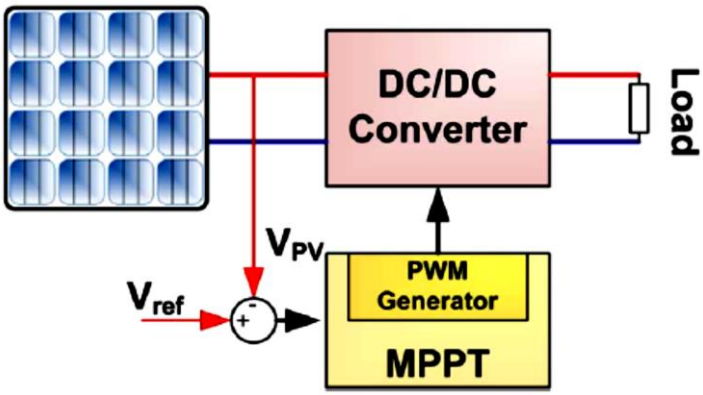
---

[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)

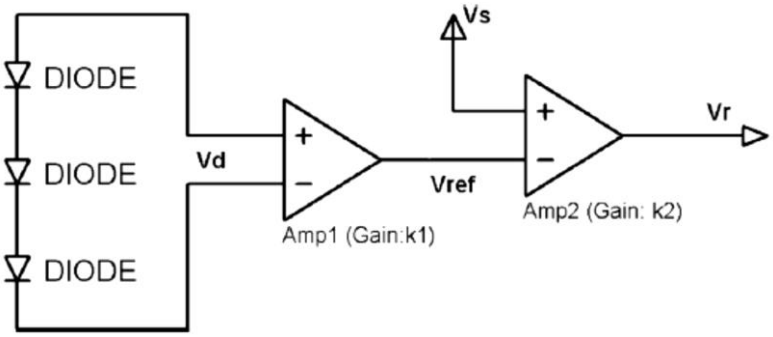
[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]

$$V_r = k_2(V_s - V_{ref}) = k_2(V_s - k_1 V_d) \quad (13)$$

که در آن V_s ولتاژ خروجی پنل PV، V_{ref} ولتاژ مرجع به‌دست آمده از طریق تقویت افت ولتاژ پیوند pn یعنی V_d و k_1 و k_2 به ترتیب ضرایب تقویت‌کننده‌های 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

٤. تکنیک‌های ردیابی با اندازه‌گیری و مقایسه

٤-١. روش جدولی[1]

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

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]

٤-٢. روش حداکثرکردن جریان یا ولتاژ بار[1]

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 ٤ 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 عموما از باطری 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.

٤-٣. 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 (١٤) قابل نوشتن است.

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

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 به‌دست می‌آید.

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

از طرفی در MPP داریم:

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

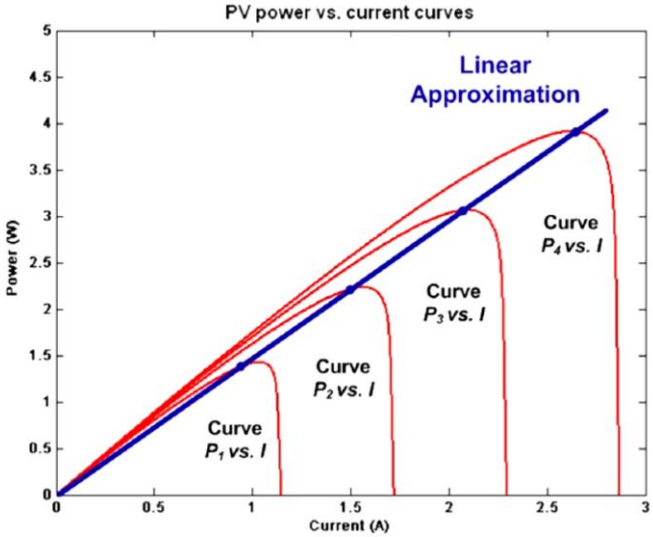
با استفاده از معادلات (١٤) و (١٥) دومین معادله‌ی توان خروجی به‌دست می‌آید:

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

[1] Load Current or Load Voltage Maximization

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]

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[1]

این روش بر مبنای حداکثرکردن توان خروجی با استفاده از جریان PV می‌باشد. با توجه به این که سیستم خورشیدی از طریق یک مبدل DC/DC به باطری 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 باطری از طریق دوره‌ی عملکرد مبدل طبق معادله‌ی (۱۸) با ولتاژ سلول رابطه دارد.

$$V_{bat} = \frac{t_{on}}{T} V_{PV} = DV_{PV} \tag{18}$$

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

$$P_{in} = V_{PV} I_{PV} \tag{19}$$

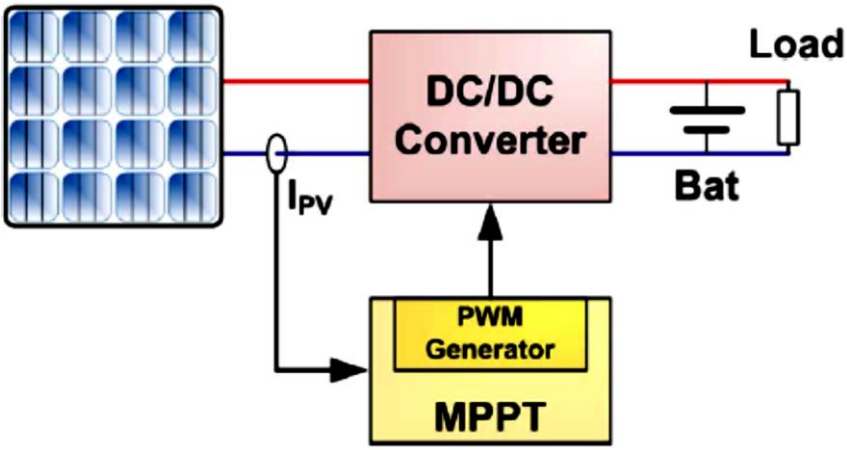
از جایگذاری معادله‌ی (۱۸) در معادله‌ی (۱۹) به‌دست خواهد آمد:

$$P_{in} = V_{bat} \frac{I_{PV}}{D} = V_{bat} P^*_{Buck} \tag{20}$$

$$P^*_{Buck} = \frac{I_{PV}}{D} \tag{21}$$

[1] The Only-current Photovoltaic Method

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]



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 اندازه‌ی 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.

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

$$\Delta D = D(t+\Delta t) - D(t) \tag{23}$$

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.

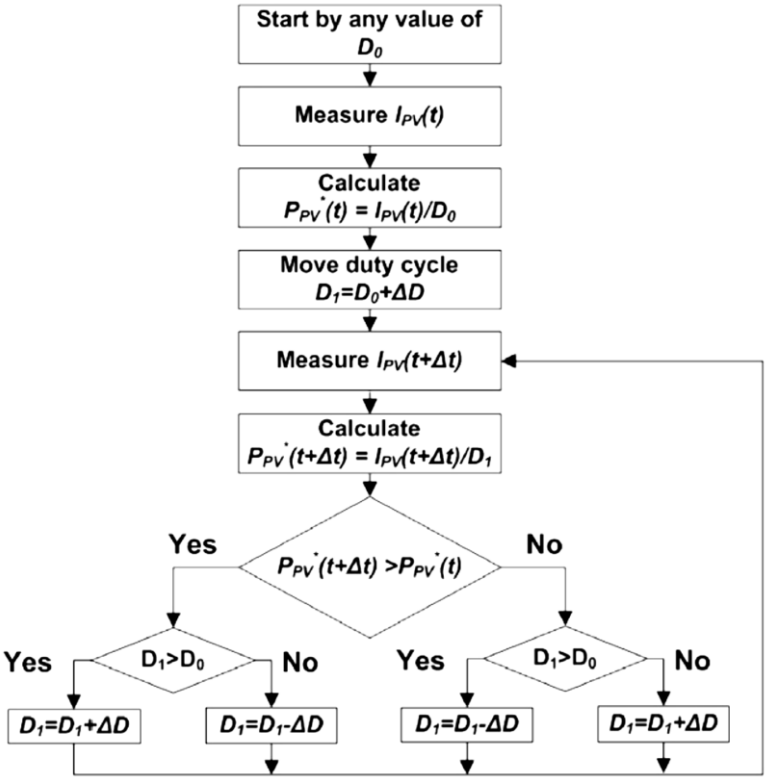
۵-۲. روش کنترل خروجی PV بدون حسگر[1]

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 تقریبا 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

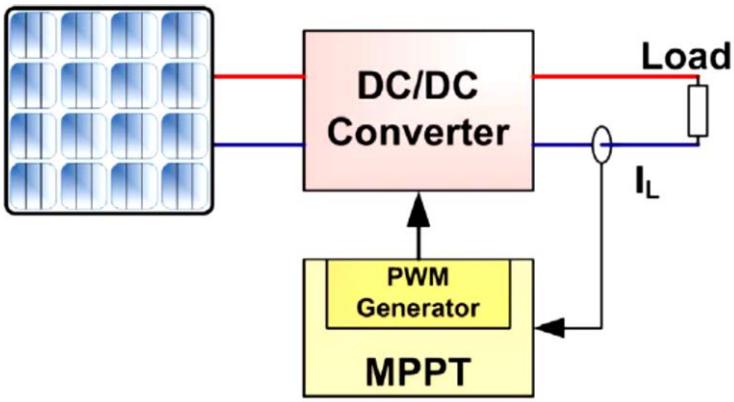
[1] PV Output Senseless Control Method (POS)

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]

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

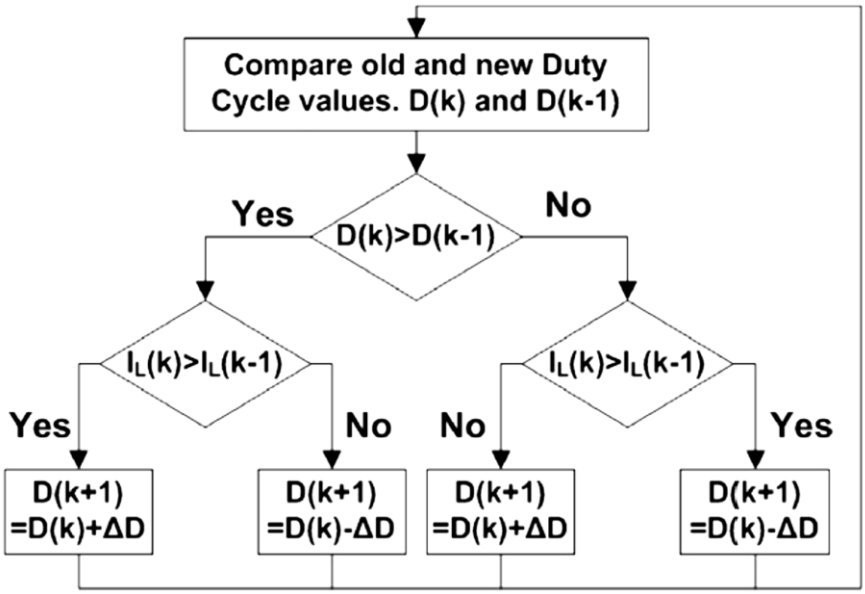


شکل ۱۳: فلوچارت روش سلول PV



شکل ۱٤: طرح کلی روش POS

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]



شکل ۱۵: فلوچارت روش POS

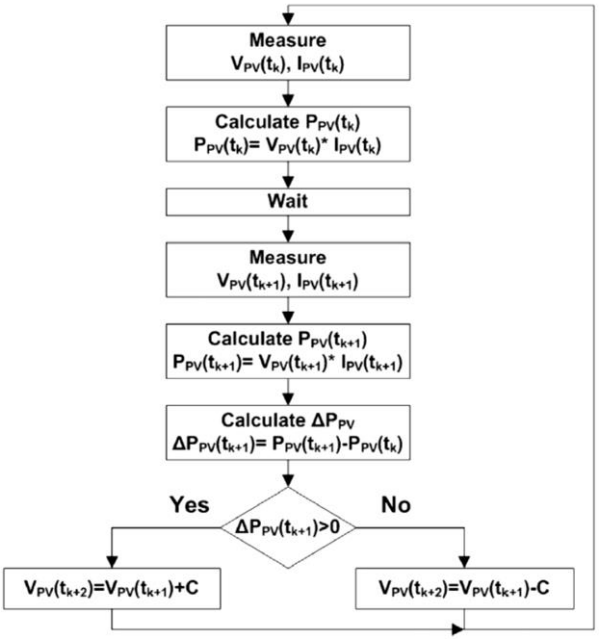
۵-۳. روش اغتشاش و مشاهده[1]

روش P&O یکی از پراستفاده‌ترین روش‌های MPPT است که بر مبنای سعی و خطا می‌باشد. در هر دوره عملکردی، جریان و ولتاژ PV به وسیله‌ی کنترل‌کننده ردیاب اندازه‌گیری و توان حقیقی PV محاسبه می‌شود؛ سپس با تغییر ولتاژ عملکرد و ملاحظه‌ی تغییرات توان، در نقطه‌ی کار سلول اغتشاش ایجاد می‌کند.در این حالت اگر توان افزایش یافت، 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 بی‌وقفه ادامه دارد. در واقع در نقطه‌ای که در آن $\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = 0$ صدق کند، حداکثر توان قابل دستیابی می‌شود. فلوچارت و طرح کلی مربوط به این روش به ترتیب در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نمایش داده شده است.

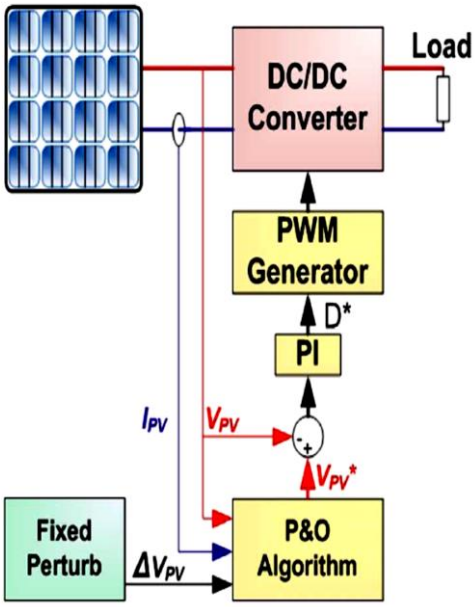
از مزایای اصلی روش P&O عدم نیاز به مشخصه‌ی سلول و قابلیت پیاده‌سازی برای انواع پنل‌ها می‌باشد. تقسیم‌بندی اغتشاش‌ها مهم‌ترین مسئله‌ای است که در این روش باید مدنظر قرار گیرد. اگر پله‌ها بزرگ باشند سرعت عملیات بالا رفته اما از دقت کاسته می‌شود و در صورت کوچک بودن پله‌ها زمان افزایش یافته اما پاسخ دقیق‌تر خواهد بود. بنابراین با توجه به هر کاربرد باید تقسیم‌بندی خاصی انتخاب و صورت گیرد. به علاوه در صورتی که اندازه‌ی پله‌ها متغیر باشد می‌توان پاسخ بهتری دریافت کرد.(IV Banu 2013)

[1] Perturb and Observe Method (P&O)

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]



شکل ۱۶: فلوچارت روش P&O

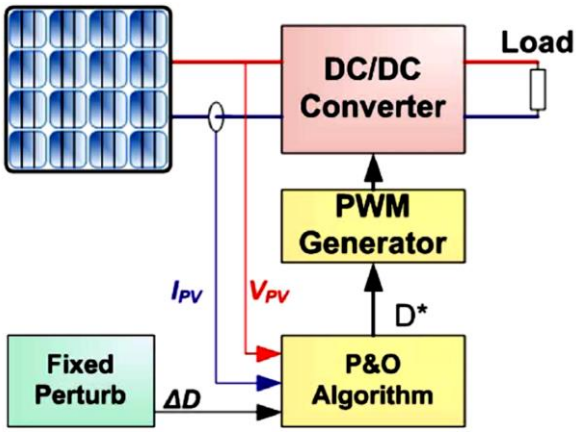


شکل ۱۷: طرح کلی روش P&O

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]

۵-٤. روش تعدیل یافته P&O[1]

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 هیسترزیس 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[2]

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 کاملا تطبیقی در نظر گرفت. طرح کلی این روش در شکل ۱۹ قابل مشاهده است.

۵-٦. روش تعدیل یافته‌ی P&O با اغتشاش تطبیقی[3]

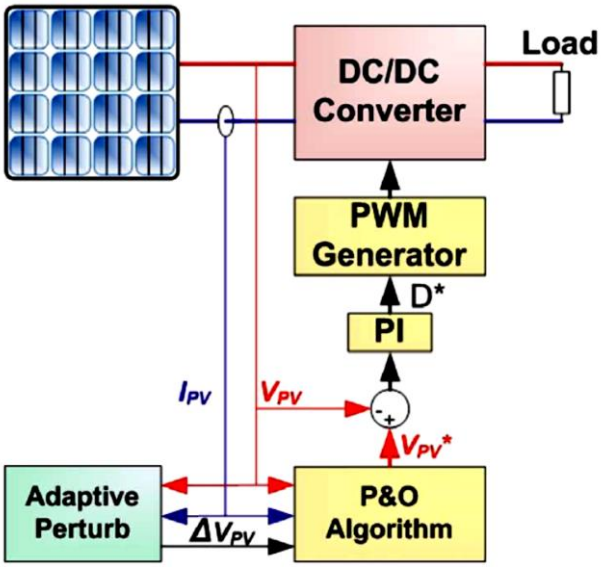
در این روش مقدار دوره‌ی عملکرد مبدل از طریق رابطه‌ی (۲٤) به‌دست می‌آید.

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

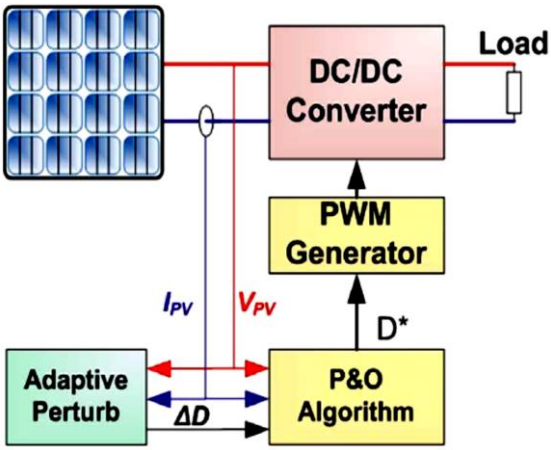
[1] Modified P&O with Fixed Perturbation Step
[2] Conventional P&O with Adaptive Perturbation
[3] Modified P&O with Adaptive Perturbation

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]

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[1]

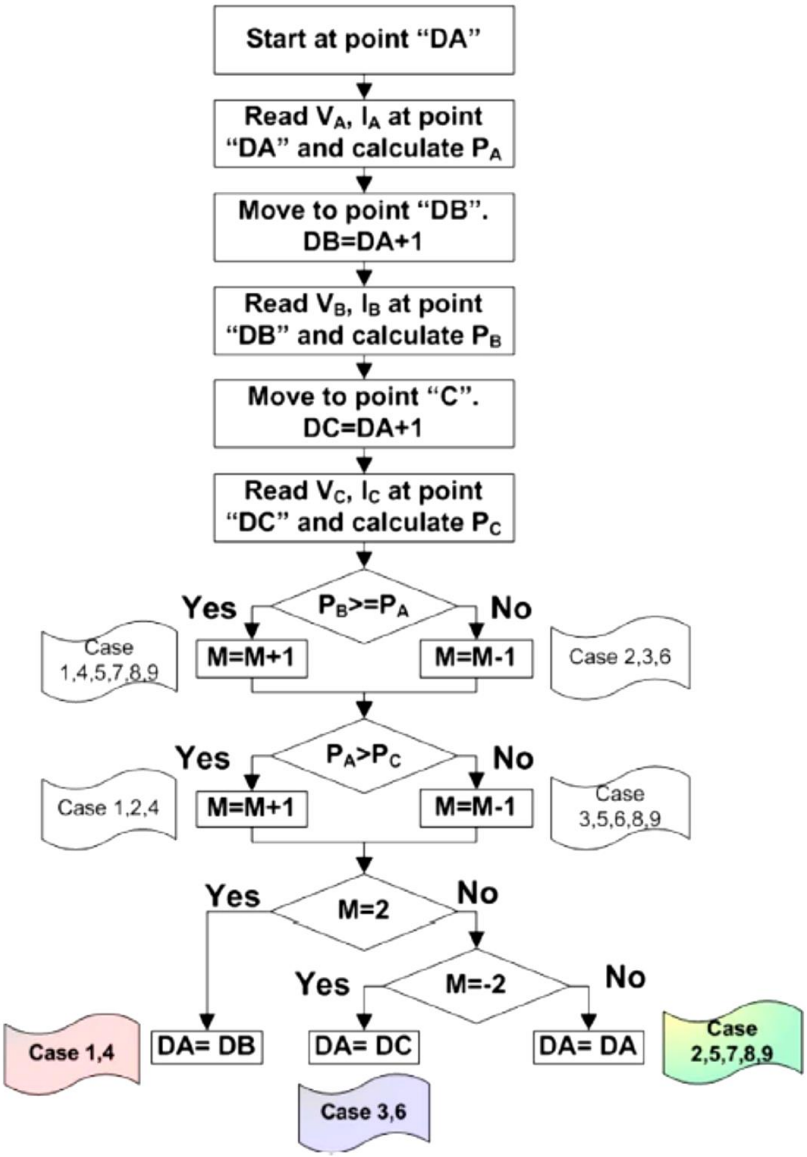
فلوچارت این روش در شکل ۲۱ نمایش داده شده است. این سیستم برخلاف روش P&O که دو نقطه را با یکدیگر مقایسه می‌کرد، از ۳ نقطه بهره می‌گیرد. این سه نقطه که در شکل ۲۲ نیز مشخص هستند عبارتند از:

[1] Three-point Weight Comparison Method

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]

- نقطه‌ی جریان عملکرد A
- نقطه‌ی B، تغییر یافته‌ی A
- نقطه‌ی C، تغییر یافته‌ی A به میزان ۲ برابر در خلاف جهت B

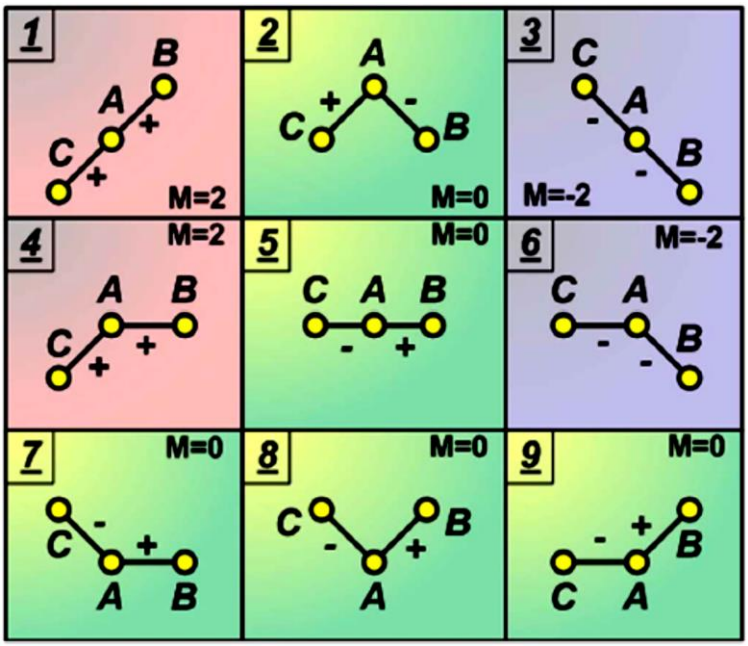
در نتیجه ۹ سناریوی مختلف به وجود خواهد آمد تا MPP به‌دست آید. در شکل ۲۲ این ۹ حالت قابل مشاهده هستند.



شکل ۲۱: فلوچارت روش مقایسه‌ی وزنی ۳ نقطه‌ای

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]

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[1]

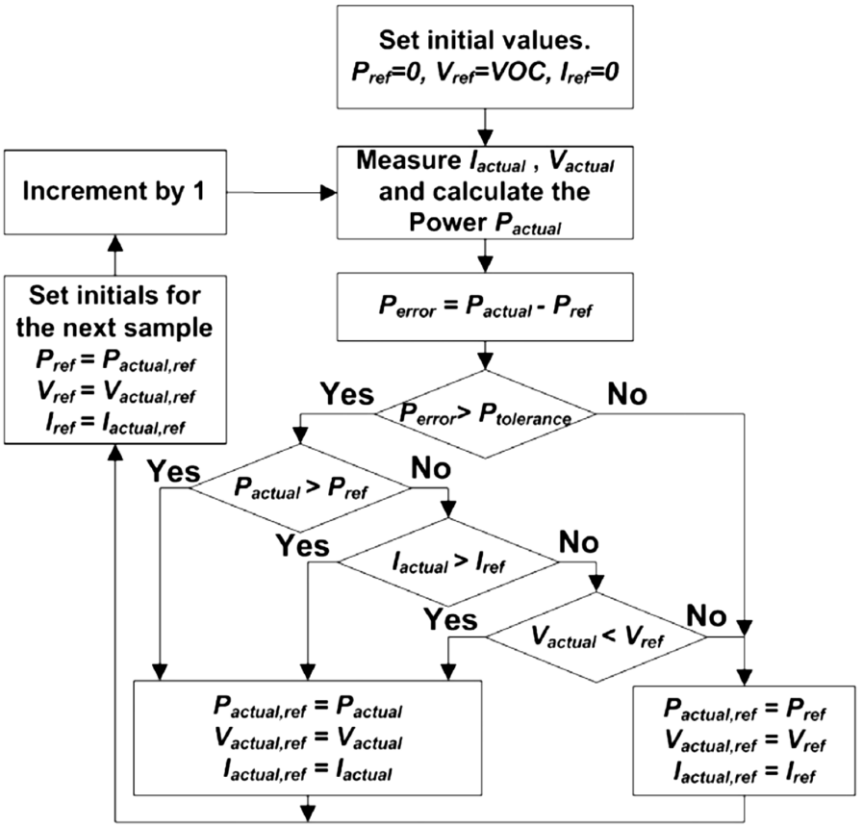
مبنای این روش، مقایسه‌ی حداکثر توان مرجع با توان واقعی می‌باشد که به اختلاف این دو مقدار، خطای حداکثر توان اطلاق می‌شود. پنل PV زمانی در حالت MPP خواهد بود که مقدار این خطا صفر باشد.

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

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]

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 فلوچارت این سیستم را نمایش می‌دهد.(Saravana Selvan 2016)



شکل ۲۳: روش جستجوی آنلاین MPP

۵-۹. روش کنترل خازن با لینک DC[1]

این روش مختص یک سیستم PV که به یک مبدل AC متصل است، ارائه شده که طرح کلی این سیستم در شکل ۲٤ مشخص شده است. در این حالت ولتاژ ورودی V_{PV} و ولتاژ خروجی V_{link} با معادله‌ی (۲۵) به یکدیگر مرتبط می‌شوند.

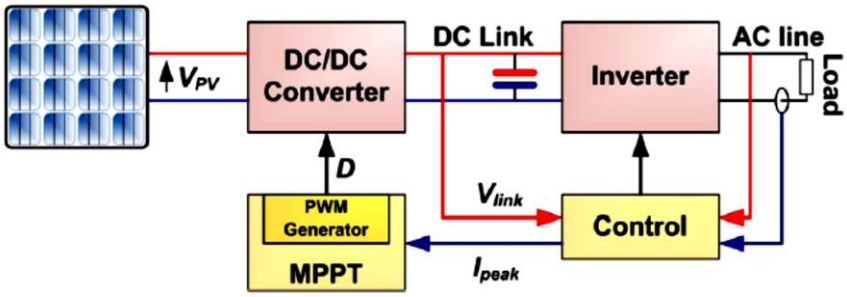
$$D = 1 - \frac{V_{PV}}{V_{link}} \tag{25}$$

[1] DC-Link Capacitor Droop Control Method

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]

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 ۲٤: طرح کلی روش کنترل خازن با لینک DC

۵-۱۰. روش تنظیم مجدد آرایه[1]

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.

۵-۱۱. روش MPPT با یک نشانگر متغیر[2]

این تکنیک متشکل از مبدل باک[3] 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 به‌دست آید. حداقل مقدار اندوکتانس در یک مبدل باک برای عملکرد صحیح آن از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

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

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:

$$I_{PV} = I_L D \tag{27}$$

[1] Array Reconfiguration Method
[2] MPPT with a Variable Indicator
[3] Buck Converter

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]

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

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

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

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

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

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[1]

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[2]

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 به‌دست آید که برای این کار از مقادیر ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه و دیگر مقادیر تعیین کننده‌ی مشخصه‌ی آرایه‌ی PV استفاده می‌کند.

۶-۳. روش استفاده از منحنی[3]

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

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

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:

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

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 دقیقا 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

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]

٦-٤. روش دیفرانسیلی[1]

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

$$\frac{dP_{PV}}{dt} = V_{PV} \qquad and \qquad \frac{dI_{PV}}{dt} + I_{PV}\frac{dV_{PV}}{dt} = 0 \tag{32}$$

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 حاصل‌ضرب V_{PV} و dI_{PV}
- محاسبه‌ی حاصل‌ضرب I_{PV} و dV_{PV}
- محاسبه‌ی حاصل‌جمع دو سطر قبلی
- مقایسه‌ی حاصل‌جمع 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.

٦-٥. روش کنترل اسلاید[2]

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

$$S = \frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV}\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \tag{33}$$

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 (۳٤) 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

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]

۶-۶. روش کنترل فیدبک dP/dV یا dP/dI

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

۶-۷. روش هدایت صعودی[1]

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:

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

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

معادلات (۳۵) و (۳۶) در شکل‌های ۳ و ٤ نیز نمایش داده شده‌اند و مقادیر dV_{PV} و dI_{PV} از روابط زیر به‌دست می‌آیند:

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

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

در معادله‌ی (۳۶) مشتق اول، دور یا نزدیک بودن نقطه‌ی عملکرد PV نسبت به MPP را تعیین می‌کند. فلوچارت مربوط به این روش در شکل ۲٤ مشخص شده است.

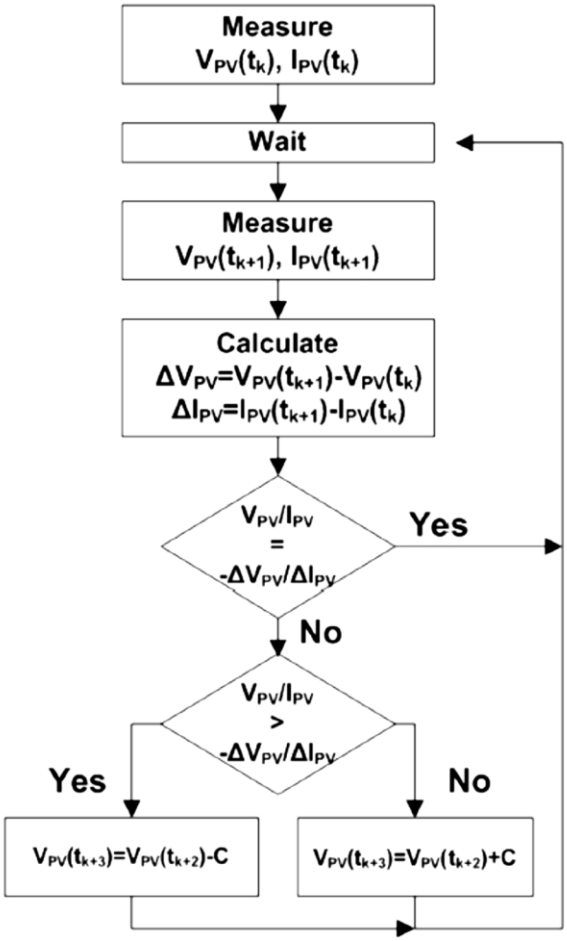
$$\frac{V_{PV}}{I_{PV}} = -\frac{\Delta V_{PV}}{\Delta I_{PV}} \quad at\ MPP$$

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

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

[1] Incremental Conductance Method (IC)

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]



شکل ۲٤: فوچارت روش IC

این روش در شرایط متغیر آب و هوایی پاسخ خوبی ارائه می‌کند؛ هم‌چنین 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 پیچیده‌ای نیاز خواهد داشت.(Ghislain Remy 2011)

٦-٨. روش کنترل صعودی با پله‌ی متغیر[1]

در این سیستم مشکل روش IC معمولی برطرف شده است. عملکرد این سیستم به نحوی است که دور بودن MPP باعث ایجاد پله‌های بزرگ‌تر می‌شود و با نزدیک شدن به آن، پله‌ها کوچک می‌گردند. این روش سرعت پاسخ‌گویی بالا و نوسانات پایینی دارد که از مزیت‌های آن عنوان می‌شود.

[1] Variable Step Incremental Conductance Method

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]

۶-۹. روش خازن انگلی[1]

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 به‌دست آوردن محل MPP استفاده می‌کند. با اضافه کردن تأثیر جریان خازنی خواهیم داشت:

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

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

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

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

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

برای رسیدن به MPP باید داشته باشیم:

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

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

سمت چپ معادله‌ی (٤٥) هدایت صعودی و سمت راست آن هدایت آنی را نشان می‌دهد. با مشتق‌گیری مجدد مقدار حداکثر به‌دست می‌آید:

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

۶-۱۰. روش β

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

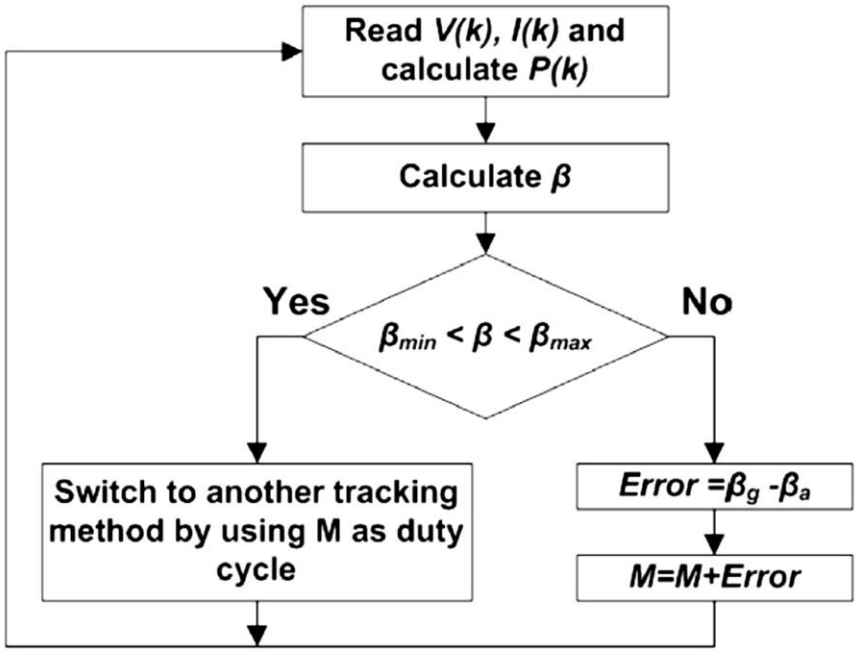
$$\beta = ln\left(\frac{I_{PV}}{V_{PV}}\right) - cV_{PV} = ln(I_s c) \tag{47}$$

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، متغیرخواهد 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)

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]

محتمل‌ترین شرایط دمایی پنل و β در آن لحظه می‌باشند. فلوچارت این سیستم در شکل ۲۵ قابل مشاهده است.



شکل ۲۵: فلوچارت 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 محاسبه‌ی I_{MPP} و V_{MPP}

در این روش، مقادیر جریان و ولتاژ MPP با توجه به معادله‌ی استاندارد جریان PV به‌دست 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:

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

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

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]

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

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

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

۷. تکنیک‌های ردیابی با روش پیش‌بینی هوشمند

۷-۱. روش کنترلی منطق فازی[1]

ردیاب‌هایی که بر اساس منطق فازی ساخته می‌شوند، هوشمند هستند؛ زیرا حتی اگر ورودی آن‌ها دقیق نباشد، MPP را پیدا و دنبال می‌کنند. عموما کنترل فازی از سه مرحله تشکیل شده است: فازی‌کردن[2]، جدول مشاهده[3] و غیرفازی‌کردن[4]. در مرحله‌ی اول مدل‌سازی، متغیرهای عددی ورودی به متغیرهای قابل فهم برای سیستم ترجمه می‌شود که خود پنج حالت فازی دارد: منفی بزرگ[5]، منفی کوچک[6]، صفر[7]، مثبت کوچک[8] و مثبت بزرگ[9]. ورودی‌های کنترل‌کننده منطق فازی عموما یک خطا (E) و تغییرات در خطا (ΔE) می‌باشد که نحوه‌ی به‌دست 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 غیرفازی‌کردن، 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)

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]

E \ ΔE	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

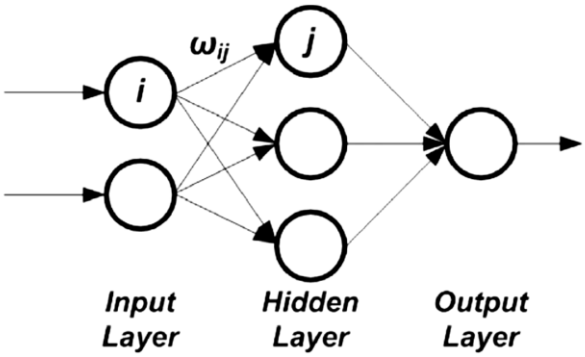
۷-۲. روش استفاده از شبکه‌ی عصبی[1]

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.(M. (F. N. Tajuddin 2015

[1] Neural Network

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]



شکل ۲۷: لایه‌های شبکه عصبی

۷-۳. روش دنبال‌کردن ازدحامی بیولوژیکی[1]

این روش هوشمند از حرکت دسته‌جمعی جانوران به خصوص پرندگان یا حشرات الگو گرفته شده است. هوش ازدحامی یک تکنیک هوش مصنوعی دربردارنده‌ی اطلاعات یافت شده از رفتارهای جمعی در سیستم‌های غیرمتمرکز می‌باشد. یکی از معروف‌ترین انواع هوش ازدحامی، روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات[2] 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)

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]

فهرست منابع

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.

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-07-31]