

تولید توان ثابت در مزارع خورشیدی با استفاده از الگوریتم کنترل ریدیابی انعطاف پذیر توان، به منظور ارتقاء شاخص های پدافندی

سید حامد کاظمی^۱، آرش دهستانی کلاگر^{۲*}، محمدرضا علیزاده پهلوانی^۳

۱- دانشجوی دکتری، ۲- استادیار، ۳- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۱، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۸)

چکیده

دسترسی گسترده به منابع انرژی در سامانه های فتوولتائیک، موجب شده که این نوع سامانه ها از دیدگاه پدافند غیرعامل مورد توجه قرار گرفته و بتوانند جایگزین خوبی برای سوخت های فسیلی در صورت وقوع شرایط خاص و غیرطبیعی باشند. از آنجا که بازده کاری سامانه های فتوولتائیک با تغییر زاویه تابش به شدت تغییر می کند، لذا نیاز به روش های کنترلی مناسب جهت دستیابی به توان دلخواه، ضروری قلمداد می شود. الگوریتم ریدیابی انعطاف پذیر توان یکی از روش هایی است که بدین منظور به کار می رود. هدف این الگوریتم، تنظیم توان خروجی سلول خورشیدی در مقدار توان مرجع است؛ که مقدار این توان مرجع بر اساس شرایط عملیاتی و الزامات شبکه تعیین می شود. الگوریتم پیشنهادی پس از مشاهده و تشخیص شرایط عملیاتی، ولتاژ گام را محاسبه کرده و در نهایت ولتاژ مرجع را نیز به دست می آورد. الگوریتم های پیشین دارای معایبی همچون نوسانات توان، ناپایداری ناشی از تغییر شرایط محیطی و دینامیک آهسته می باشند. در این راستا، الگوریتم پیشنهادی معایب الگوریتم های قبل را برطرف می سازد. به عنوان مثال، ممکن است به دلیل عبور ابرها شرایط محیطی ناپایداری به وجود بیاید که در این وضعیت، الگوریتم پیشنهادی نه تنها نوسانات توان را به حداقل می رساند، بلکه دارای دینامیک سریع و دقت بالایی بوده و در عین حال پایداری خود را نیز حفظ می کند.

کلیدواژه ها: الزامات شبکه، ریدیابی انعطاف پذیر توان، شرایط عملیاتی، فتوولتائیک، نوسانات توان، ولتاژ گام

Constant Power Generation in Solar Farms Using Flexible Power Point Tracking Algorithm to Improve Passive Defense Indices

Dehestani Kolagar^{*}, M. R. Alizadeh Pahlavani

Assistant Professor, Malik Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 30/08/2020; Accepted: 08/01/2022)

Abstract

The widespread access to energy sources in photovoltaic systems has made these types of systems considered from the passive defense point of view and can be an efficient alternative to fossil fuels in the event of special and abnormal conditions. Since the efficiency of photovoltaic systems changes drastically with changing the angle of radiation, the need for appropriate control techniques to achieve the desired power is considered necessary and inevitable. Flexible power point tracking algorithm is one of the techniques used for this purpose. The purpose of this algorithm is to adjust the output power of the solar cell in the reference power value. The reference power value is determined based on operating conditions and network requirements. The proposed algorithm, after observing and detecting operating conditions, calculates the step voltage and finally obtains the reference voltage. The previously proposed algorithms have disadvantages such as power fluctuations, instability due to changing environmental conditions and slow dynamics. In this regard, the proposed algorithm eliminates the disadvantages of the previous algorithms. For example, environmental conditions may be unstable due to the passage of clouds. In this situation, the proposed algorithm not only minimizes power fluctuations, but also has fast dynamics and high accuracy, while maintaining its stability.

Keywords: Network requirements; Flexible power point tracking; Operating conditions; Photovoltaic; Power Oscillations; Step voltage

۱. مقدمه

بیشتر کاربردها به منظور به حداکثر رساندن توان استخراج شده از یک سامانه PV، و افزایش بازده کلی تبدیل توان استفاده می‌شوند [۲]. چندین الگوریتم MPPT، که از نظر عملکرد و پیچیدگی کاملاً با هم متفاوت هستند، در مقالات مختلف معرفی شده‌اند [۳-۹]. هر روش دارای مزایا و معایب مختلفی از جنبه‌های گوناگون مانند بازدهی محاسباتی، سرعت ردیابی نقطه حداکثر توان، عملکرد تحت وضعیت سایه جزئی و نوسانات توان در حالت پایدار می‌باشند. از بین الگوریتم‌های MPPT، الگوریتم اغتشاش و مشاهده^۳ (P&O) [۱۰-۱۲]، و الگوریتم رسانایی افزایشی^۴ (INC) [۱۳، ۱۴]، بیشترین استفاده را دارند. در [۱۵، ۱۶] نشان داده شده است که عملکرد ردیابی این دو الگوریتم در هر دو حالت استاتیکی و دینامیکی یکسان است. در بعضی از مقالات، روش‌های مدرنی مانند الگوریتم‌های مبتنی بر روش کنترل پیش‌بین [۱۷، ۱۸] و یا الگوریتم‌هایی متکی بر هوش محاسباتی، همچون کنترل کننده فازی [۱۹] و کنترل کننده مبتنی بر شبکه عصبی [۲۰]، ارائه شده‌اند. اما به طور کلی نصب و راه‌اندازی هر چه بیشتر نیروگاه‌های فتوولتائیک متصل به شبکه^۵ (GCPVPPs)، در صورتی که ظرفیت برق شبکه ثابت بماند، ممکن است منجر به اضافه ولتاژ در شبکه برق در زمان‌های اوج تولید شود (به عنوان مثال ساعات ظهر در یک روز) [۲۱]. به منظور مقابله با مسائلی از این قبیل، کدهای شبکه و یا استانداردها به صورت پیوسته به روزرسانی می‌شوند [۲۲، ۲۳]. به عنوان مثال کد شبکه کشور دانمارک نیازمند یک نیروگاه GCPVPPs با توان بالاتر از ۱۱ kVA است تا در صورت لزوم، توان خروجی را به یک مقدار خاص محدود نماید [۲۲]. با محدود کردن توان خروجی GCPVPPs، از توان اضافی موجود می‌توان برای کاربردهای جانبی استفاده کرد. علاوه بر این، کنترل محدوده توان که به عنوان تولیدکننده توان ثابت نیز شناخته می‌شود [۲۱، ۲۴]، کنترل میزان ذخیره توان [۲۵] و کنترل میزان سرعت رمپ [۲۶] (همان کنترل سطح شیب‌دار توان)، توسط انواع کدهای شبکه در GCPVPPs صورت می‌گیرد. بنابراین الگوریتم‌های ردیابی نقطه حداکثر توان موجود در GCPVPPs باید توسط الگوریتم‌های ردیابی انعطاف‌پذیر توان^۶ (FPPT) جایگزین شوند تا این ملزومات برآورده شوند.

به منظور مقایسه بهتر و درک نحوه عملکرد الگوریتم‌های FPPT، شکل (۱) ارائه شده است. در شکل (۱)، نحوه ردیابی نقطه حداکثر/انعطاف‌پذیر توان در یک نیروگاه فتوولتائیک نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱) در طول حالت عملکرد FPPT، اگر مقدار توان مرجع^۷ P_{fpp} (که توسط اپراتورهای

آمار و سوابق جنگ‌های گذشته حاکی از این است که پدافند عامل به تنهایی قادر به مقابله با سلاح‌های مدرن و مخرب جهت جلوگیری از اثرات ویرانگر آن بر مراکز حیاتی، حساس و مهم نبوده و لذا بکارگیری اصول و معیارهای پدافند غیرعامل می‌تواند به تکمیل زنجیره دفاعی، کمک مؤثر و قابل توجهی داشته باشد. صنعت برق هر کشور به عنوان فناوری زیرساختی در اداره امور کشور، بسیار حساس و حیاتی بوده و در اولویت‌های اولیه تهاجم دشمن قرار دارد. تجربیات و نتایج جنگ‌های اخیر نشان می‌دهد که خسارت وارده ناشی از تهاجم دشمن به تأسیسات زیربنایی برقی، از کار افتادن کارخانه‌ها حیاتی و اساسی کشور، وقفه در فعالیت پایگاه‌های حساس نظامی بوده و از سوی دیگر، قطع طولانی مدت برق شهروندان، تضعیف روحیه آنان و فشار غیرمستقیم بر دستگاه‌های نظامی کشور را به دنبال خواهد داشت. تجربه جنگ ایران و عراق نشان داده است که نیروگاه‌ها، خطوط انتقال و پست‌های برق از جمله اولین تأسیساتی هستند که مورد آسیب قرار می‌گیرند. در طول جنگ تحمیلی پنج نیروگاه مهم کشور در مجموع بیش از ۲۰ بار مورد تهاجم جنگنده‌های دشمن قرار گرفتند [۱]. با توجه به مباحث فوق، ضرورت تقویت و ارتقاء شاخص‌های پدافند غیرعامل در صنعت برق بیش از پیش احساس می‌شود. اصول پدافند غیرعامل در حوزه تولید انرژی الکتریکی عبارت‌اند از: مکان‌یابی، استتار یا اختفا، پراکندگی و مقاومت‌سازی یا استحکام. استفاده از منابع تولید انرژی در مقیاس کوچک، میزان وابستگی به شبکه‌های گسترده‌ی برق را کاهش خواهد داد. سرمایه‌گذاری و توسعه منابع تولید پراکنده مزایایی از قبیل تنوع‌بخشی به منابع و حامل‌های انرژی، عدم وابستگی به یک یا دو حامل انرژی (بخصوص در شرایط تحریم)، مهیاسازی ساختار بازار برق، افزایش بازده تولید انرژی از طریق تولید هم‌زمان برق و حرارت را به همراه دارد. لذا سامانه‌های فتوولتائیک به دلیل ارتقاء شاخص پراکندگی، از دیدگاه پدافند غیرعامل منابعی استراتژیک به شمار رفته و می‌تواند جایگزین خوبی برای سوخت‌های فسیلی باشد. علاوه بر موارد فوق، از دیگر مزایای سامانه‌های فتوولتائیک می‌توان به طول عمر زیاد (حدود ۲۰ سال)، قابلیت استفاده در سامانه‌های متحرک، نگهداری آسان، قابلیت نصب و راه‌اندازی در شرایط جغرافیایی خاص مانند مناطق کوهستانی و صعب‌العبور و عدم وابستگی به شبکه در نقاط دور دست اشاره نمود. دلایل فوق موجب شده است که استفاده از فتاوری فتوولتائیک در سال‌های اخیر رونق قابل توجهی یابد. اما از جمله چالش‌های پیش رو، تغییرات مشخصات ولتاژ-جریان و توان خروجی رشته‌های فتوولتائیک^۱ (PV) با تغییر تابش نور خورشید و دما است. بر این اساس، الگوریتم‌های ردیابی نقطه حداکثر توان^۲ (MPPT) در

^۳ Perturb & Observe

^۴ Incremental Conductance

^۵ Grid-Connected Photovoltaic Power Plants

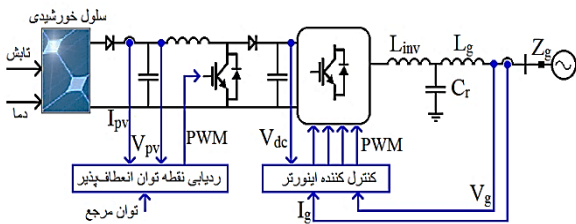
^۶ Flexible Power Point Tracking

^۷ PV Panel Flexible Power Point

^۱ Photovoltaic

^۲ Maximum Power Point Tracking

عملکرد سامانه ارائه شده در شکل (۲) به این صورت است که در ابتدا آرایه PV، ورودی‌های تابش و دما را گرفته و این انرژی را به برق DC تبدیل کرده و در اختیار سامانه قرار می‌دهد.



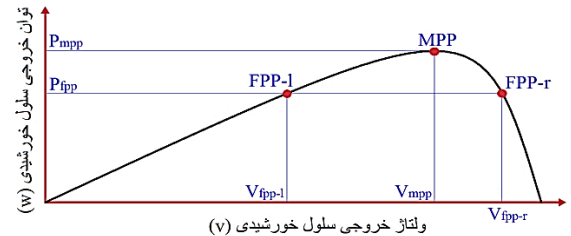
شکل ۲. نمای کلی مدار و ساختار کنترلی یک دو مرحله‌ای GCPVPPS در مسیری یک دیود یکسوساز قرار داده شده تا از برگشت جریان جلوگیری کند. پس از عبور از آن، انرژی الکتریکی در خازن ذخیره شده و سبب ایجاد جریان در سلف خواهد شد. جریان عبوری از سلف، متناسب با حالت کلیدزنی که توسط حلقه کنترلی تعیین می‌شود، مسیر خود را انتخاب می‌کند. این کلیدزنی به گونه‌ای انجام می‌شود که توان مرجع درخواستی، ردیابی گردد. پس از آن، جریان از طریق دیود بعدی به خازن می‌رسد که این خازن نقش صاف کننده شکل موج ولتاژ را ایفا می‌کند. در نهایت، ولتاژ DC به کمک اینورتر متناوب شده و پس از عبور از فیلتر LCL به شبکه تحویل داده می‌شود. شرح دقیق این ساختار قبلاً گزارش شده است [۲۵].

در این بخش دلایل اهمیت نیروگاه‌های فتوولتائیک از دید پدافند غیرعامل و ضرورت افزایش بازده کاری آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، مروری بر کارهای پیشین و مقدمه‌ای از الگوریتم پیشنهادی هم ارائه گردید. در بخش دوم، اهداف الگوریتم پیشنهادی و چگونگی رفع معایب الگوریتم‌های پیشین توضیح داده می‌شود. در بخش سوم، اصول کارکرد الگوریتم پیشنهادی شامل تشخیص مد عملیاتی (گذرا یا ماندگار)، نحوه محاسبه ولتاژ گام و نیز نحوه محاسبه ولتاژ مرجع ارائه خواهد شد. در ادامه، در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی شامل نمودارهای ردیابی توان و ولتاژ تحت شرایط مختلف، بررسی می‌گردد. در نهایت، در بخش پنجم مقاله، نتیجه‌گیری کلی تحقیق حاضر ارائه خواهد شد.

۲. اهداف الگوریتم کنترلی پیشنهادی

وجود مشکلاتی از قبیل ناپایداری‌های ناشی از تغییر شرایط محیطی، نوسانات توان، اضافه ولتاژ و اضافه بار در الگوریتم‌های پیشین موجب شده که هدف الگوریتم پیشنهادی رفع این معایب و دستیابی به دینامیک سریع باشد. در واقع هدف از کنترل الگوریتم FPPT، تنظیم توان خروجی سامانه فتوولتائیک است تا در یک نقطه خاص ثابت شود. معمولاً الگوریتم FPPT مبتنی بر روش P&O عمداً ولتاژ PV را از MPP دور می‌کند تا توان خروجی را کاهش دهد. شکل (۳-الف) این موضوع را به خوبی

شبکه تعیین می‌شود) بزرگ‌تر از بیشترین توان موجود باشد، الگوریتم FPPT مانند الگوریتم‌های ردیابی حداکثر توان عمل کرده و نقطه حداکثر توان^۱ (MPP) را ردیابی می‌کند. اما اگر P_{fpp} کوچک‌تر از MPP باشد نقطه عملکرد رشته PV به سمت راست یا چپ MPP منتقل شده (به ترتیب به صورت FPP-1 و FPP-r) و الگوریتم FPPT توان ثابت P_{fpp} را ردیابی می‌کند.



شکل ۱. ردیابی نقطه حداکثر/انعطاف‌پذیر توان در یک نیروگاه فتوولتائیک

چندین الگوریتم FPPT در مقالات مختلف ارائه شده است. برخی از این الگوریتم‌ها تجهیزات ذخیره‌ساز انرژی اضافی، خازن‌ها و موارد مشابه را برای تأمین ویژگی‌های مورد نیاز در نظر می‌گیرند [۲۹-۲۷]. دسته‌ی دیگری از الگوریتم‌های FPPT موجود، یا کنترل کننده ولتاژ سامانه PV را برای به دست آوردن FPPT تغییر می‌دهند [۳۰-۳۳] یا مستقیماً ولتاژ مرجع مربوط به توان مرجع PV (یا V_{fpp-1} یا V_{fpp-r}) را محاسبه می‌کنند که در شکل (۱) نشان داده شده است [۳۴]. الگوریتم FPPT پیشنهادی در این مقاله، علاوه بر این که می‌تواند برای استخراج حداکثر توان از رشته‌های PV مورد استفاده قرار گیرد، قادر است توان PV را بر اساس تقاضا به مقدار مورد نیاز نیز محدود نماید. الگوریتم FPPT پیشنهادی در حالیکه در طول حالت عملکرد محدودکننده توان به دینامیک سریع دست می‌یابد، هنگام کار در حالت MPPT نیز عملکردی مشابه با عملکرد الگوریتم‌های MPPT معمولی خواهد داشت. محاسبه زمان گام برای همه حالت‌های عملیاتی ثابت است؛ که در نتیجه از پیچیدگی طراحی کنترلی کننده برای حالت‌های مختلف عملیاتی می‌کاهد. علاوه بر این، الگوریتم FPPT پیشنهادی قادر است نقطه عملیاتی پنل PV را به سمت راست یا چپ MPP انتقال دهد. این قابلیت می‌تواند در GCPVPP‌های تک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای اجرایی شود. عملکرد الگوریتم پیشنهادی بر یک GCPVPP دو مرحله‌ای تکفاز ۳ کیلو ولت آمپر ارزیابی شده است که شمای کلی آن در شکل (۲) نشان داده شده است. سامانه GCPVPP دو مرحله‌ای شامل یک اینورتر تمام پل متصل به شبکه است که ملزومات اتصال به شبکه را فراهم می‌سازد. مبدل تقویت کننده dc-dc نیز کنترل FPPT را برای سامانه فراهم می‌کند؛ در حالیکه توان مرجع مورد نیاز^۲ (P_{ref}) از کنترل کننده شبکه محاسبه و اخذ می‌شود. به طور کلی

^۱ Maximum Power Point

^۲ Power Reference

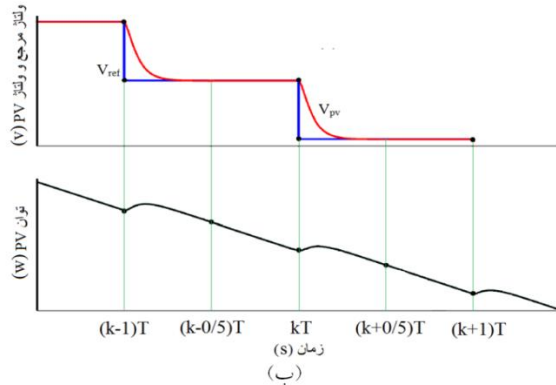
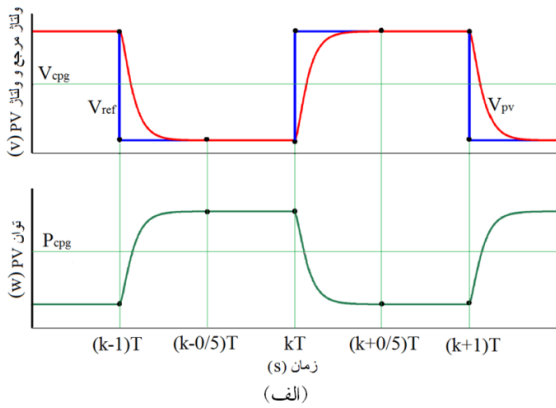
شکل (۳-الف) قابل ملاحظه است، ولتاژ متناظر با توان مرجع، V_{p-ref} است. با توجه به شکل (۴-الف)، در زمان $t = (k-1)T$ الگوریتم محاسبه ولتاژ مرجع، یک ولتاژ مرجع به صورت $k(-)$ $V_{ref}(1)$ تعریف می‌کند. به علاوه، یک اندازه‌گیری اضافی برای ولتاژ و توان PV هم در لحظه $t = (k - \frac{1}{2})T$ انجام می‌شود. پس از آن، کنترل‌کننده برای تنظیم ولتاژ PV (V_{pv}) در نیم دوره تناوب نمونه‌برداری طراحی شده است. در نتیجه ولتاژ V_{pv} در لحظه $t = (k - \frac{1}{2})T$ ، به مقدار مرجع مربوطه، یعنی $V_{ref}(k-1)$ می‌رسد و توان خروجی PV (P_{pv}) نیز به مقدار $P_{pv}(k-0.5)$ افزایش می‌یابد. بین زمان‌های $t = (k - \frac{1}{2})T$ و $t = kT$ ، ولتاژ مرجع از طریق الگوریتم محاسبه ولتاژ مرجع تغییر نمی‌کند. بنابراین P_{pv} در این بازه ثابت می‌ماند.

با توجه به بحث‌های فوق، به منظور شناسایی تغییرات محیطی (تابش و دما) دو پارامتر تعریف می‌شود. پارامتر اول dp_1 بوده و تغییرات توان بین لحظات $t = (k-1)T$ و $t = (k - \frac{1}{2})T$ را محاسبه می‌نماید. یعنی داریم:

$$dp_1 = P_{pv} \left(k - \frac{1}{2} \right) - P_{pv}(k-1) \quad (1)$$

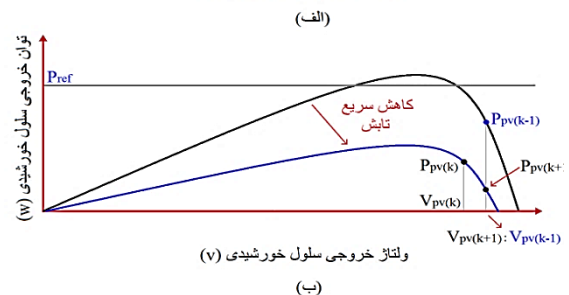
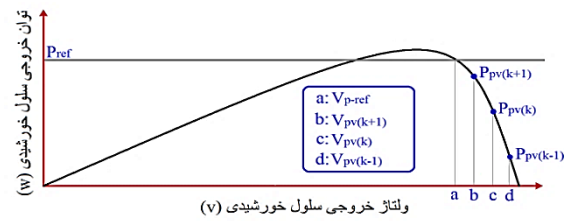
پارامتر دوم هم dp_2 است که تغییرات توان بین لحظات $t = kT$ و $t = (k - \frac{1}{2})T$ را محاسبه می‌کند. یعنی داریم:

$$dp_2 = P_{pv}(k) - P_{pv} \left(k - \frac{1}{2} \right) \quad (2)$$



شکل ۴. اندازه‌گیری‌های اضافی متوالی در الف) شرایط محیطی ثابت (ب) تغییرات سریع تابش

نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۳-الف) ولتاژ $V_{pv}(k-1)$ و ولتاژ PV در زمان $t = (k-1)T$ است؛ که k نشانگر k امین بازه نمونه‌برداری و T زمان نمونه‌برداری است. سپس ولتاژ مرجع به $V_{pv}(k)$ در $t = (k-1)T$ تغییر کرده و کنترل‌کننده ولتاژ PV را به این مقدار در زمان $t = kT$ تنظیم می‌کند. بر این اساس، توان لحظه‌ای پنل PV از $P_{pv}(k-1)$ به $P_{pv}(k)$ تغییر می‌نماید. در این شرایط، تغییرات ولتاژ دارای مقدار منفی است، یعنی $V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1) < 0$ که منجر به تغییرات مثبت توان خواهد شد ($V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1) > 0$). دلیل این اختلاف علامت ولتاژ و توان، شیب منفی نمودار در سمت راست MPP است که موجب می‌شود تغییرات ولتاژ و تغییرات توان همواره قرینه باشند. با توجه به شکل (۳-الف)، بر اساس مثبت یا منفی بودن تغییرات ولتاژ و جریان، الگوریتم FPPT برای کاهش ولتاژ در این مرحله تصمیم دیگری می‌گیرد که منجر به افزایش توان PV شده و به توان مرجع نزدیک‌تر می‌شود. با این وجود، با کاهش سریع تابش ممکن است خطاهای ردیابی بزرگی پدیدار شود که در شکل (۳-ب) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۳-ب)، الگوریتم FPPT در لحظه $t = (k-1)T$ ولتاژ را کاهش می‌دهد اما کاهش سریع تابش در فاصله زمانی بین $t = kT$ و $t = (k-1)T$ منجر به کاهش توان PV خواهد شد. مقدار مطلق کاهش توان ناشی از کاهش تابش، از مقدار مطلق افزایش توان ناشی از تغییر ولتاژ PV بیشتر است. از این رو، تغییرات توان منفی خواهد شد و الگوریتم مرسوم FPPT ممکن است برای مرحله بعد تصمیم اشتباهی بگیرد. ولتاژ و منحنی‌های توان پنل‌های PV در حین کار FPPT و در حالت پایدار در شکل (۴) آورده شده است.



شکل ۳. تأثیر تغییرات ولتاژ مرجع بر پنل‌های PV در طول الف) شرایط محیطی ثابت (ب) تغییرات سریع تابش

در شکل (۴-الف) می‌توان دید که نقطه عملیاتی در حالت پایدار در اطراف P_{cpg}^1 در حال نوسان است. همان‌طور که در

¹ Constant Power Generation

ماندگار) مشخص می‌گردد. این مورد برای دستیابی به دینامیک سریع در طی نوسانات گذرا و توان پایین در مدهای حالت پایدار لازم است. خروجی بلوک «ارزیابی مد عملیاتی» به‌عنوان ورودی بلوک «محاسبه ولتاژ گام» استفاده می‌شود. پس از آن، الگوریتم محاسبه ولتاژ گام تطبیقی برای محاسبه ولتاژ گام با توجه به مد عملیاتی و تغییر پارامترهای توان PV وارد عمل می‌شود. مقدار ولتاژ گام محاسبه‌شده توسط این بلوک به‌عنوان ورودی بلوک «محاسبه ولتاژ مرجع»، جهت تعیین ولتاژ PV مرجع و به‌منظور تنظیم توان PV در مقدار مرجع آن استفاده می‌شود. اجرا و نحوه عملکرد این قسمت‌ها در ادامه به تفصیل ارائه می‌شود. در الگوریتم پیشنهادی، تغییرات ولتاژ PV بین مراحل محاسبه فعلی و قبلی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$dv = V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1) \quad (4)$$

چنانچه تغییرات ولتاژ روند صعودی داشته باشد مقدار dv مثبت، و اگر روند نزولی داشته باشد مقدار dv منفی خواهد بود. پارامتر dv در تعیین ولتاژ گام نقش به‌سزایی دارد که در بخش ۳-۲ به تفصیل شرح داده می‌شود.

۳-۱. الگوریتم ارزیابی مد عملیاتی

در روش مورد استفاده، دو مد عملیاتی عمده وجود دارد که در شکل (۶-الف) نشان داده شده است. توان آستانه $(dp_{th})^1$ نیز جهت ایجاد تفکیک بین دو مد عملیاتی تعریف می‌شود. بر این اساس، مدهای عملیاتی مذکور به‌صورت زیر قابل توصیف هستند:

$$dp^* \leq dp_{th} \quad \text{حالت ماندگار:} \quad (5)$$

$$dp^* \geq dp_{th} \quad \text{حالت گذرا:} \quad (6)$$

که در آن خطای dp^* به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$dp^* = P_{pv}(k) - P_{ref} \quad (7)$$

در عبارت فوق، $P_{pv}(k)$ توان PV لحظه‌ای در لحظه‌ی $t = kT$ است. در حالت پایدار، خطای dp^* نزدیک به صفر است. درحالی‌که در حالت گذرا به‌دلیل تغییر در زاویه تابش خورشید این خطا می‌تواند نسبتاً بزرگ باشد. با توجه به شکل (۶)، در شرایطی که سامانه PV در وضعیت MPP کار کند، روابط (۵) و (۶) می‌تواند منجر به انتخاب اشتباه مد عملیاتی شود. این وضعیت تحت دو شرط زیر ممکن است اتفاق بیفتد:

الف) کنترل‌کننده طوری تنظیم شده باشد که به جای کار کردن در وضعیت FPPT، حداکثر توان را از سامانه PV استخراج کند. در این حالت کنترل‌کننده، حداکثر توان PV در دسترس را به‌عنوان توان مرجع در نظر می‌گیرد. (شکل (۶-ب))

ب) به‌خاطر سایه جزئی یا دلایل دیگر، حداکثر توان PV موجود (P_{mpp}) ، از توان مرجع ثابت در حین کار FPPT کوچک‌تر شود.

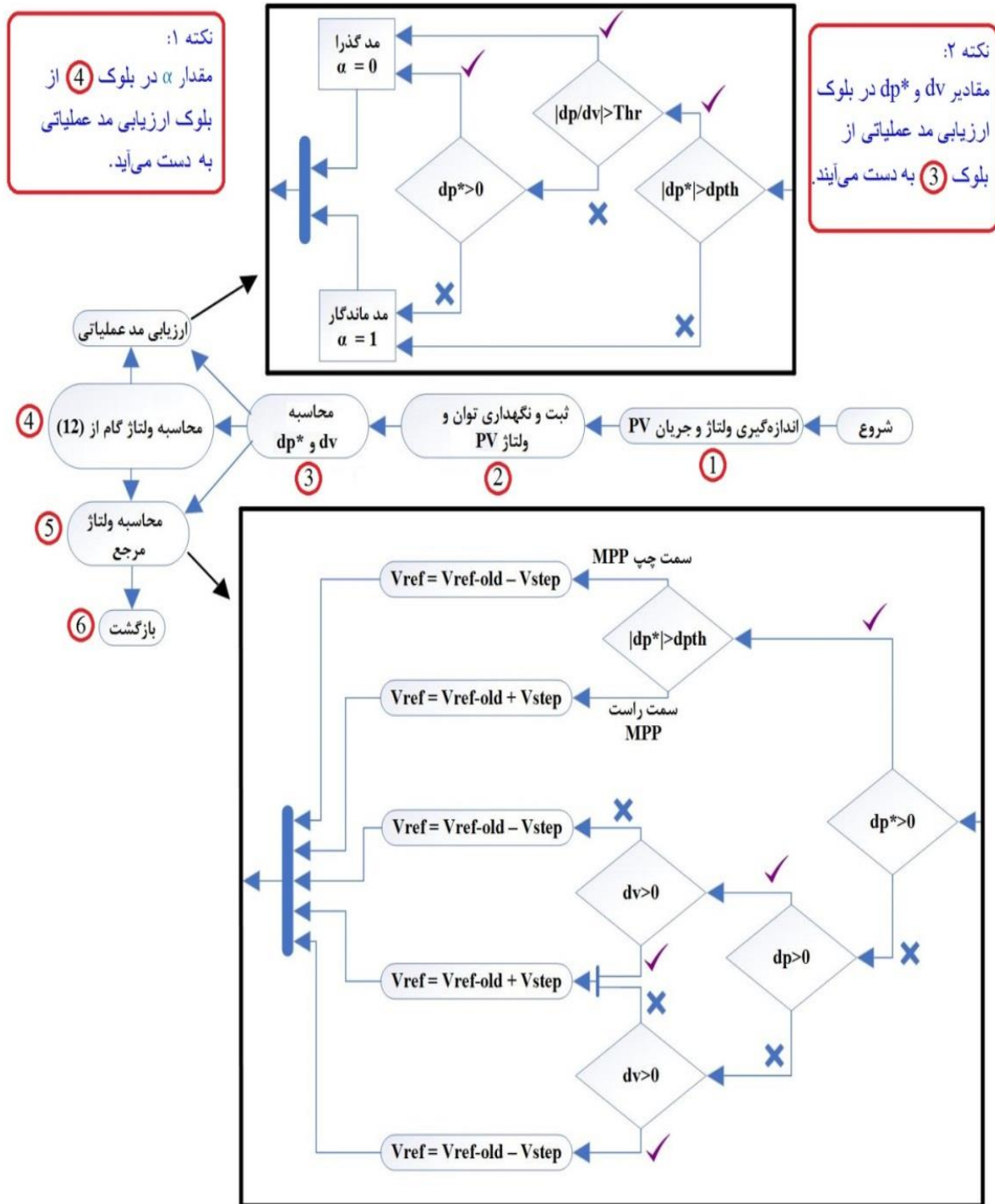
بدیهی است که در حالت پایدار، یعنی شرایطی که تابش ثابت باشد، dp_2 نزدیک به صفر است. از آنجایی‌که ولتاژ PV در بازه‌ی $t = (k - \frac{1}{2})T$ تا $t = kT$ تغییر نمی‌کند، قابل استنتاج است که مقدار نسبتاً بزرگ dp_2 ناشی از تغییر شرایط محیطی است. تأثیر تغییرات سریع تابش در پارامترهای فوق در شکل (۳-ب) نشان داده شده است. جریان نقطه عملیاتی در پنل PV در همان نقطه عملیاتی، مانند شکل (۴-الف) است. با این وجود، یک کاهش خطی سریع تابش در نظر گرفته شده است. به‌علاوه، ولتاژ مرجع در زمان $t = (k-1)T$ بر روی مقدار $V_{ref}(k-1)$ تنظیم می‌شود. درحالی‌که توان P_{pv} به‌دلیل کاهش تابش، به‌مقدار $P_{pv}(k-0.5)$ در لحظه $t = (k - \frac{1}{2})T$ کاهش می‌یابد. در بازه $t = (k - \frac{1}{2})T$ تا $t = kT$ ولتاژ مرجع تغییر نمی‌کند؛ اما توان PV کاهش خواهد یافت. در نتیجه، dp_1 در این شرایط منفی خواهد بود؛ درحالی‌که در حالت پایدار مثبت است. همچنین dp_2 نیز با دامنه نسبتاً زیاد منفی است که نشان‌دهنده نمونه‌ای از اثر تغییرات در شرایط محیطی است؛ اگرچه در حالت پایدار مقدار آن نزدیک به صفر است. لازم به ذکر است که dp_1 شامل اطلاعات مربوط به تغییر توان است که این امر خود ناشی از ترکیب اثر تغییر تابش و تغییرات عمدی در ولتاژ مرجع است. استفاده از پارامتر dp_1 در محاسبه ولتاژ مرجع می‌تواند در اثر تغییرات محیطی، نقطه عملیاتی را به یک جهت نادرست منتقل کند. بنابراین پارامتر dp برای جدا کردن اثر تغییرات محیطی از اثر تغییرات عمدی ولتاژ مرجع، به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$dp = dp_1 - dp_2 \quad (3)$$

تغییر در پارامترهای محیطی (تابش و دما) در یک دوره محاسبه، خطی فرض می‌شود. همچنین، هرگونه تغییر در پارامترهای محیطی منجر به تغییر توان PV می‌گردد. با خطی فرض کردن این تغییرات محیطی (در هر دوره محاسبه)، اثر این تغییرات بر روی پارامترهای dp_1 و dp_2 یکسان خواهد بود. لذا با توجه به رابطه (۳)، تأثیر تغییرات محیطی بر پارامتر dp از بین می‌رود. در نتیجه، پارامتر dp فقط اطلاعات مربوط به تغییرات توان PV ناشی از تغییرات ولتاژ مرجع را دربر می‌گیرد. به این ترتیب الگوریتم محاسبه ولتاژ مرجع، در حالتی که شرایط محیطی به‌سرعت در حال تغییر است، مسیر اشتباه را ردیابی نمی‌کند.

۳. الگوریتم پیشنهادی تولید توان ثابت

بلوک دیاگرام الگوریتم تطبیقی FPPT پیشنهادی در شکل (۵) نشان داده شده است. پارامترهای P_{pv} و V_{pv} با یک نمونه‌برداری با تناوب $T = 2$ (s) اندازه‌گیری می‌شوند. لازم به ذکر است که نمونه‌برداری اضافی باعث افزایش پیچیدگی محاسباتی الگوریتم نمی‌شود. الگوریتم تطبیقی FPPT پیشنهادی از سه بخش تشکیل شده است که با یک دوره محاسبه T اجرا می‌شود. در مرحله اول مد عملیاتی سامانه PV (به‌عنوان مثال حالت گذرا یا حالت



شکل ۵. بلوک دیاگرام الگوریتم تطبیقی تولیدکننده توان ثابت

dp^* منفی گردد ($dp^* < 0$). به‌منظور دستیابی به دینامیک سریع، این وضعیت بایستی به‌عنوان حالت گذرا در نظر گرفته شود.

بعد از تشخیص مد عملیاتی، پارامتر α به شرح زیر خواهد بود:

$$\alpha = 0 \quad \text{حالت ماندگار:} \quad (۸)$$

$$\alpha = 1 \quad \text{حالت گذرا:} \quad (۹)$$

مهم‌ترین مزیت این الگوریتم، کاهش نوسانات توان در مقایسه با الگوریتم‌های MPPT متداول است.

۳-۲. اصول محاسبه ولتاژ گام

نحوه تعیین ولتاژ گام (V_{step}) در طراحی الگوریتم FPPT بسیار حائز اهمیت است. اگر V_{step} خیلی بزرگ باشد، دینامیک سریع در حالت گذرا حاصل می‌شود؛ اما در حالت ماندگار نوسانات توان زیاد خواهد بود. از طرفی هم اگر V_{step} خیلی کوچک باشد، نوسانات توان در حالت ماندگار کاهش خواهد یافت؛ اما دسترسی به دینامیک سریع در حالت گذرا امکان‌پذیر نخواهد بود. بنابراین، جهت محاسبه ولتاژ گام مطلوب در هر لحظه، الگوریتم مناسبی ارائه می‌شود. یکی از اهداف الگوریتم FPPT پیشنهادی، ارائه عملکرد مشابه در مقایسه با الگوریتم‌های MPPT متداول است. در این راستا، یک ولتاژ گام ثابت که ولتاژ گام بهینه جهت عملکرد MPPT است، می‌تواند در الگوریتم FPPT استفاده شود:

$$V_{step} = V_{step-b} \quad (۱۰)$$

در رابطه فوق، V_{step-b} ولتاژ گام بهینه برای عملکرد MPPT است. زمانیکه ولتاژ گام ثابت V_{step-b} جهت اجرای الگوریتم FPPT به تصویب رسید، دینامیک سامانه در محیط‌هایی که به‌سرعت در حال تغییر هستند، آهسته می‌شود. چون شیب منحنی P-V در اطراف MPP نزدیک به صفر است. در نتیجه، یک ولتاژ گام بزرگ‌تر باید در حالت گذرا استفاده شود تا دینامیک سامانه بهبود یابد. اصلاح ولتاژ گام می‌تواند طبق رابطه زیر انجام شود:

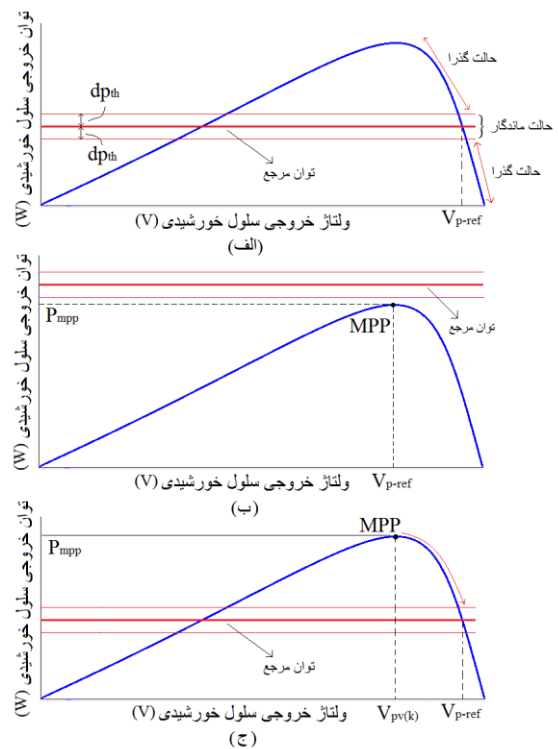
$$V_{step} = \alpha \times V_{step-b} + (1 - \alpha) \times V_{step-tr} \quad (۱۱)$$

که در آن $V_{step-tr}$ ولتاژ گام مربوط به حالت گذرا بوده و بزرگ‌تر از V_{step-b} است. اما این الگوریتم هنوز دارای دو ایراد است:

الف) عملکرد FPPT در سمت راست MPP با منابع توان نسبتاً کوچک، حتی اگر ولتاژ گام برابر با V_{step-b} شود، چون شیب منحنی زیاد است، منجر به نوسانات بزرگ توان خواهد شد. این امر به این معنی است که مقادیر ولتاژ گام کوچک‌تر باید برای نقاط عملیاتی با مقادیر $\frac{dp}{dv}$ بزرگ‌تر استفاده شوند تا نوسانات توان همچنان اندک باقی بماند.

ب) دینامیک گذرا می‌تواند منجر به انحراف زیاد توان لحظه‌ای از توان مرجع (خطاهای توان) شود. با توجه به شکل (۷-الف)

دو مورد فوق در شکل (۶-ب) نشان داده شده‌اند. الگوریتم محاسبه ولتاژ مرجع قادر است ولتاژ MPP را در شرایط فوق محاسبه نماید.



شکل ۶. مدهای عملیاتی مختلف از سامانه PV تولیدکننده توان ثابت (الف) در حالت ماندگار (ب) MPP در حالت ماندگار و توان مرجع از حداکثر توان PV موجود بیشتر است (ج) MPP در حالت گذرا و توان مرجع از حداکثر توان PV موجود کمتر است

به‌منظور دستیابی به نوسانات توان مشابه یا کوچک‌تر، در مقایسه با الگوریتم‌های متداول MPPT، باید اطمینان حاصل کرد که این شرایط به‌عنوان حالت کار پایدار طبقه‌بندی می‌شود. با توجه به اینکه شیب منحنی پل‌های P-V ($\frac{dp}{dv}$) در MPP نزدیک به صفر است، مقدار مطلق $\frac{dp}{dv}$ با یک مقدار آستانه (Thr) مقایسه می‌شود تا در صورت نزدیک بودن نقطه عملیاتی فعلی به MPP، این موضوع مشخص شود. اگر نقطه عملیاتی به وضعیت MPP نزدیک نباشد ($\frac{dp}{dv} < Thr$)، می‌توان نتیجه گرفت که سامانه PV در حالت گذرا قرار دارد. لازم به ذکر است که اگر نقطه عملیاتی فعلی نزدیک به MPP باشد، دو حالت مختلف می‌تواند اتفاق بیفتد: الف) با توجه به شکل (۶-ب)، توان مرجع از MPP بزرگ‌تر باشد. این وضعیت باید به‌عنوان حالت ماندگار در نظر گرفته شود. با توجه به (۷)، در این مد عملیاتی dp^* مثبت خواهد بود.

ب) توان مرجع در زمان محاسبه فعلی از P_{mpp} کوچک‌تر باشد. این وجود، با توجه به شکل (۶-ج)، نقطه عملیاتی هنوز در وضعیت MPP قرار دارد. این شرایط عملیاتی موجب می‌شود که

¹ Threshold

۳-۳. اصول محاسبه ولتاژ مرجع

الگوریتم محاسبه ولتاژ مرجع برای طرح پیشنهادی در شکل ۵ ارائه شده است. اگر توان لحظه‌ای سامانه کمتر از توان مرجع باشد، یعنی $dp^* < 0$ ، از الگوریتم P&O مرسوم استفاده می‌شود تا نقطه عملیاتی در راستای افزایش توان به سمت MPP سوق یابد. اگر توان لحظه‌ای از توان مرجع بیشتر باشد، بر اساس ناحیه عملیاتی در نظر گرفته شده، یعنی طرف راست یا چپ MPP، ولتاژ مرجع به ترتیب افزایش یا کاهش می‌یابد. عملکرد الگوریتم P&O به این صورت است که در ابتدا مقدار dp ارزیابی می‌شود. اگر فرض کنیم که مقدار آن مثبت باشد، دو وضعیت پیش خواهد آمد. یا مقدار dv مثبت است که در این صورت باید مقدار ولتاژ گام را به ولتاژ مرجع قبلی اضافه کرد و به عنوان ولتاژ مرجع جدید در نظر گرفت، یا اینکه مقدار dv منفی است که در این صورت باید مقدار ولتاژ گام را از ولتاژ مرجع قبلی تفریق کرد و به عنوان ولتاژ مرجع جدید لحاظ نمود. اما اگر مقدار dp را منفی فرض کنیم، یا مقدار dv مثبت است که در این صورت ولتاژ مرجع جدید از تفاضل ولتاژ مرجع قبلی از ولتاژ گام به دست می‌آید، و یا اینکه مقدار dv منفی است که در این صورت ولتاژ مرجع جدید از حاصل جمع ولتاژ مرجع قبلی و ولتاژ گام به دست خواهد آمد. به عبارت دیگر، اگر dp و dv هم‌علامت باشند، مقدار ولتاژ گام به ولتاژ مرجع قبلی اضافه می‌شود و به عنوان ولتاژ مرجع جدید در نظر گرفته می‌شود و اگر dp و dv غیر هم‌علامت باشند، مقدار ولتاژ گام از ولتاژ مرجع قبلی تفریق و به عنوان ولتاژ مرجع جدید در نظر گرفته می‌شود.

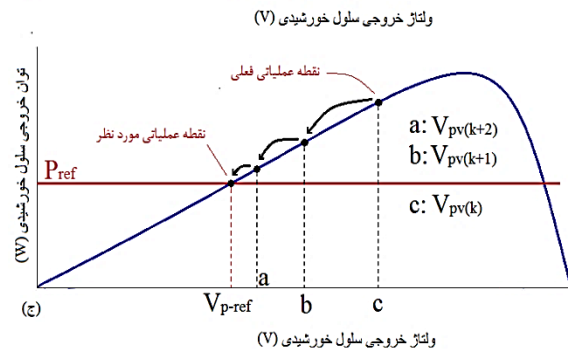
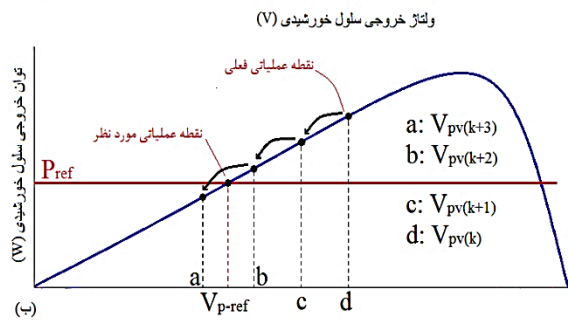
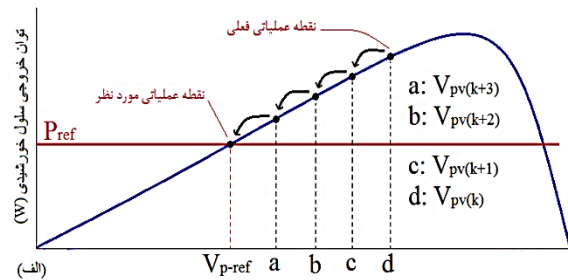
۴. نتایج شبیه‌سازی

در جدول (۱) پارامترهای سامانه PV دوحلای متصل به شبکه آمده است. همچنین عملکرد الگوریتم FPPT پیشنهادی تحت تغییر سریع تابش در شکل (۸) ارائه شده است. شکل (۸-الف) ردیابی توان مرجع تحت تغییرات سریع تابش و با فرض $P_{ref} = 2 (kw)$ را نشان می‌دهد. همانطوریکه پیش از این اشاره شد، اگر بیشترین توان موجود از توان مرجع کمتر باشد، الگوریتم پیشنهادی مانند الگوریتم‌های MPPT مرسوم عمل کرده و P_{avail} را ردیابی می‌کند. اما بعد از اینکه حداکثر توان موجود از مقدار P_{ref} فراتر رود، الگوریتم پیشنهادی در حالت FPPT عمل کرده و توان مرجع را ردیابی می‌کند. شکل (۸-ب) ردیابی توان مرجع را تحت تغییرات سریع تابش و با فرض $P_{ref} = 1 (kw)$ ، نشان می‌دهد. با دقت در شکل (۸-الف) و (۸-ب) می‌توان دریافت که ردیابی توان مرجع در حالی که مقدار $P_{ref} = 2 (kw)$ باشد، بهتر صورت گرفته است. لازم به ذکر است که حالت‌های گذرای ایجاد شده در شکل (۸-ب) به دلیل تغییرات ناگهانی P_{avail} نسبت به P_{ref}

استفاده از مقادیر ولتاژ گام کوچک، زمان پاسخ را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر، با استفاده از مقادیر زیاد ولتاژ گام در حالت گذرا، ممکن است نقطه عملیاتی فراتر از ناحیه پایداری باشد که در آن نوسانات توان زیاد خواهد بود. شکل (۷-ب) موضوع فوق را به خوبی نمایش می‌دهد. در این وضعیت، نقطه عملیاتی فراتر از ناحیه حالت ماندگار نوسان می‌کند. برای حل این مشکلات، الگوریتم محاسبه ولتاژ گام به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$V_{step} = \left[\alpha \left(1 - k_1 \left| \frac{dp}{dv} \right| \right) + (1 - \alpha) k_2 \times dp^* \right] \times V_{step-tr} \quad (12)$$

که در آن α توسط الگوریتم ارزیابی مد عملیاتی در بخش قبلی مشخص شده و k_1 و k_2 نیز ثابت‌هایی هستند که در جدول (۱) مقادیر آن‌ها آمده است. در این روش مقدار V_{step} به خطای بین توان لحظه‌ای و توان مرجع بستگی دارد. در حالت گذرا با خطاهای بزرگ، ولتاژ گام نیز بزرگ می‌شود که موجب کاهش زمان پاسخ خواهد شد. بنابراین زمانی که توان PV به مقدار مرجع آن نزدیک می‌شود، ولتاژ گام کوچک خواهد شد. شکل (۷-ج) این موضوع را به خوبی نشان می‌دهد.



شکل ۷. اصول الگوریتم محاسبه ولتاژ گام در طول حالت گذرا (الف) ولتاژ گام ثابت کوچک (ب) ولتاژ گام ثابت بزرگ (ج) ولتاژ گام تطبیقی پیشنهادی

¹ Instantaneous Maximum Available Power from the PV Panels

توان و دینامیک آهسته را برطرف می‌سازد. علاوه بر موارد فوق، ردیابی توان دلخواه توسط الگوریتم پیشنهادی سبب شده است که نگرانی‌هایی مانند اضافه ولتاژ و اضافه بار، که در الگوریتم‌های پیشین وجود داشت، از بین برود.

جدول ۱. پارامترهای سامانه PV دمرحله‌ای متصل به شبکه

مقدار	نماد	پارامتر
۱۰۰۰ (uF)	C_{pv}	خازن سمت PV
۱۱۰۰ (uF)	C_{dc}	خازن لینک DC
۲ (V)	V_{step-b}	ولتاژ گام بهینه در عملکرد MPPT
۰/۰۰۱۵	K_1	پارامترهای محاسبه‌ی ولتاژ گام در سمت راست
۰/۰۰۳	K_2	
۰/۰۰۸	K_1	پارامترهای محاسبه‌ی ولتاژ گام در سمت چپ
۰/۰۰۶	K_2	
۱۰۰ W	d_{ph}	توان آستانه

به‌منظور مقایسه بهتر الگوریتم FPPT پیشنهادی با الگوریتم‌های پیشین، جدول (۲) ارائه شده است. در جدول (۲) الگوریتم پیشنهادی از نظر بازده محاسباتی، سرعت ردیابی، قیمت و پیچیدگی ساختار با الگوریتم‌های رایج مقایسه شده است. در الگوریتم FPPT پیشنهادی، از آنجا که محاسبه زمان گام برای همه حالت‌های عملیاتی ثابت است، در نتیجه پیچیدگی طراحی کنترل‌کننده به نسبت کاهش یافته است. هر یک از الگوریتم‌های فوق، با توجه به ویژگی‌هایی که دارند، می‌توانند در کاربردهای خاصی مورد استفاده قرار گیرند. الگوریتم پیشنهادی با توجه به بازدهی و سرعت ردیابی آن، می‌تواند در نیروگاه‌های فتوولتائیک متصل به شبکه به‌منظور تولید توان ثابت مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۲. مقایسه الگوریتم‌های پیشین با الگوریتم پیشنهادی

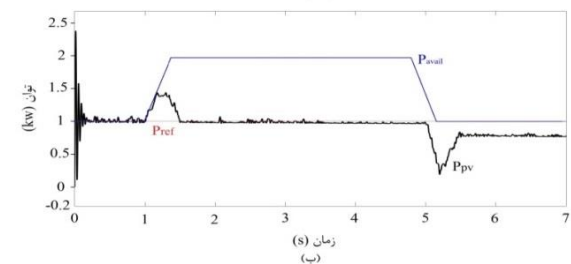
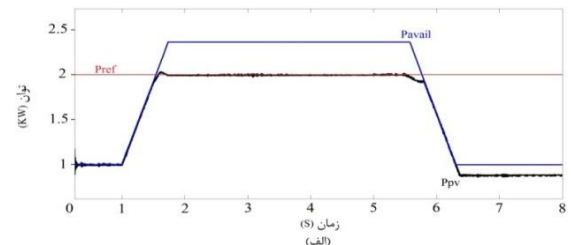
پیچیدگی	قیمت	سرعت	بازدهی	الگوریتم
ساده	گران	متغیر	متوسط	روش P&O [۱۰]
متوسط	گران	متغیر	متوسط	رسانایی افزایشی [۱۳]
پیچیده	گران	سریع	خیلی بالا	کنترل‌کننده فازی [۱۹]
ساده	ارزان	متوسط	پایین	ولتاژ مدار باز [۳۵]
پیچیده	گران	آهسته	بالا	جریان رفت و برگشتی [۳۶]
متوسط	ارزان	متوسط	پایین	جریان اتصال کوتاه [۳۷]
متوسط	گران	خیلی سریع	خیلی بالا	الگوریتم پیشنهادی

۵. نتیجه‌گیری

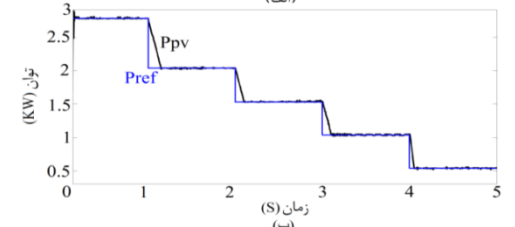
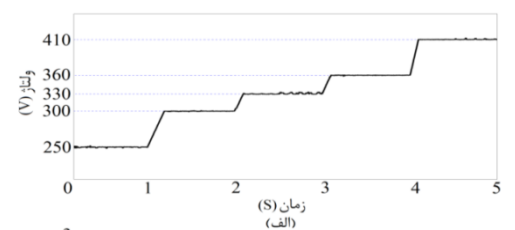
در این مقاله یک الگوریتم تطبیقی ردیابی انعطاف‌پذیر توان FPPT برای محاسبه ولتاژ مرجع در پنل‌های PV ارائه شده است.

است. این حالت‌ها در الگوریتم‌های پیشین بسیار بیشتر بوده و در الگوریتم پیشنهادی سعی بر کاهش آن‌ها شده است. همچنین حالت‌های گذرای مذکور در شکل (۸-الف) نیز قابل مشاهده هستند اما به دلیل اختلاف کمتر P_{avail} و P_{ref} این خطاها مقدار کمتری دارند.

در شکل (۹-الف) تغییرات ولتاژ PV در الگوریتم FPPT پیشنهادی تحت شرایط تغییر صعودی توان مرجع مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در شکل (۹-ب) نیز تغییرات توان PV در الگوریتم FPPT پیشنهادی تحت شرایط تغییر نزولی توان مرجع بررسی شده است. با دقت در شکل (۹-ب) می‌توان دریافت که با وجود تغییرات پی‌درپی در توان مرجع، عمل ردیابی به خوبی صورت گرفته است و پاسخ دینامیکی سریعی نیز حاصل شده است.



شکل ۸. عملکرد الگوریتم FPPT پیشنهادی تحت تغییر سریع تابش (الف) توان مرجع برابر با ۲ (kw) (ب) توان مرجع برابر با ۱ (kw)



شکل ۹. عملکرد الگوریتم FPPT پیشنهادی تحت تغییر توان مرجع (الف) تغییرات صعودی ولتاژ (ب) تغییرات نزولی توان

با توجه به مباحث فوق و با دقت در شکل‌های (۸) و (۹) می‌توان دریافت که الگوریتم پیشنهادی، معایب الگوریتم‌های پیشین همچون ناپایداری ناشی از تغییر شرایط محیطی، نوسانات

- Adaptive P&O MPPT Controller for PV Applications"; IEEE 23rd Int. Sympos. Ind. Electron. 2014, 1876-1881.
- [12] Subudhi, B.; Pradhan, R. "A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems"; IEEE Trans. Sustain. Energy 2012, 4, 89-98.
- [13] Tey, K. S.; Mekhilef, S. "Modified Incremental Conductance Algorithm for Photovoltaic System under Partial Shading Conditions and Load Variation"; IEEE Trans. Ind. Electron. 2014, 61, 5384-5392.
- [14] Reinhardt, A.; Egarter, D.; Konstantinou, G.; Christin, D. "Worried About Privacy? Let Your PV Converter Cover Your Electricity Consumption Fingerprints"; IEEE Inter. Conf. on Smart Grid Comm. 2015, 25-30.
- [15] Sera, D.; Mathe, L.; Kerekes, T.; Spataru, S. V.; Teodorescu, R. "On the Perturb-and-Observe and Incremental Conductance MPPT Methods for PV Systems"; IEEE J. Photovolt. 2013, 3, 1070-1078.
- [16] De Brito, M. A. G.; Galotto, L.; Sampaio, L. P.; Melo, G. D. A.; Canesin, C. A. "Evaluation of the Main MPPT Techniques for Photovoltaic Applications"; IEEE Trans. Ind. Electron. 2013, 60, 1156-1167.
- [17] Errouissi, R.; Al-Durra, A.; Muyeen, S. M. "A Robust Continuous-Time MPC of A DC-DC Boost Converter Interfaced with a Grid-Connected Photovoltaic System"; IEEE J. Photovolt. 2016, 6, 1619-1629.
- [18] Mosa, M.; Shadmand, M. B.; Balog, R. S.; Rub, H. A. "Efficient Maximum Power Point Tracking Using Model Predictive Control for Photovoltaic Systems under Dynamic Weather Conditions"; IET Renew. Power Gener. 2017, 11, 1401-1409.
- [19] Wu, T. F.; Chang, C. H.; Chen, Y. H. "A Fuzzy-Logic-Controlled Single-Stage Converter for PV-Powered Lighting System Applications"; IEEE Trans. Ind. Electron. 2000, 47, 287-296.
- [20] Wu, J.; Zhao, K.; Jiang, Y.; Cheng, L.; Liu, Q.; Xue, Y.; Peng, K. "Maximum Power Point Tracking Algorithm for Laser Power Beaming Based on Neural Networks"; IEEE Int. Conf. Cloud Computing and Internet of Things 2018, 292-295.
- [21] Yang, Y.; Blaabjerg, F.; Zou, Z. "Benchmarking of Grid Fault Modes in Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic Systems"; IEEE Trans. Ind. App. 2013, 49, 2167-2176.
- [22] Energinet, D. "Technical Regulation 3.2.2 for PV Power Plants with A Power Output above 11 kW"; Danish Grid Codes, 2015.
- [23] Tafti, H. D.; Maswood, A. I.; Konstantinou, G.; Pou, J.; Kandasamy, K.; Lim, Z.; Ooi, G. H. "Low-Voltage Ride-Thorough Capability of Photovoltaic Grid-Connected Neutral-Point-Clamped Inverters with Active/Reactive Power Injection"; IET Renew. Power Gener. 2017, 11, 1182-1190.
- [24] Tafti, H. D.; Maswood, A. I.; Konstantinou, G.; Pou, J.; Blaabjerg, F. "A General Constant Power Generation Algorithm for Photovoltaic Systems"; IEEE Trans. Power Electron. 2018, 33, 4088-4101.
- [25] Sangwongwanich, A.; Yang, Y.; Blaabjerg, F. "A Sensorless Power Reserve Control Strategy for Two-Stage Grid-Connected PV Systems"; IEEE Trans. Power Electron. 2017, 32, 8559-8569.
- [26] Chamana, M.; Chowdhury, B. H.; Jahanbakhsh, F. "Distributed Control of Voltage Regulating Devices in the Presence of High PV Penetration to Mitigate Ramp-Rate Issues"; IEEE Trans. Smart Grid. 2018, 9, 1086-1095.
- [27] Kakimoto, N.; Takayama, S.; Satoh, H.; Nakamura, K. "Power Modulation of Photovoltaic Generator for

این الگوریتم توان خروجی دلخواه و قابل دسترس را از سلول‌های خورشیدی استخراج می‌کند. هدف اصلی الگوریتم پیشنهادی مقابله با چالش‌های سامانه PV به‌منظور استفاده و به‌کارگیری در سامانه‌های پدافند غیرعامل و ارتقاء شاخص‌های آن است. محاسبه ولتاژ گام تطبیقی بر اساس خطای توان لحظه‌ای، می‌تواند با وجود تغییرات سریع محیطی (مانند تابش و دما)، دینامیک و ردیابی سریعی را برای ما فراهم آورد. در الگوریتم پیشنهادی، اثرات تغییر در شرایط محیطی از اثرات تغییر ولتاژ رشته‌های PV جدا شده و نوسانات توان در حالت پایدار به حداقل رسیده است. همچنین اگر توان مرجع هدف، از حداکثر توان PV بزرگ‌تر باشد، الگوریتم پیشنهادی در حداکثر نقطه توان عمل می‌کند که عملکرد آن قابل مقایسه با الگوریتم‌های MPPT معمولی است.

۶. مراجع‌ها

- [1] Ghaffarpour, R.; Hashemi, Y.; Ehsan, M. "Involving Defensive Approach in Unit Commitment Scheduling and Presenting Probability Model of Plants Inaccessibility"; Adv. Defence Sci. & Technol. 2019, 5, 231-246 (In Persian).
- [2] Sajadian, S.; Ahmadi, R. "Model Predictive-Based Maximum Power Point Tracking for Grid-Tied Photovoltaic Applications Using A Z-Source Inverter"; IEEE Trans. Power Electron. 2016, 31, 7611-7620.
- [3] Jeon, Y. T.; Lee, H.; Kim, K. A.; Park, J. H. "Least Power Point Tracking Method for Photovoltaic Differential Power Processing Systems"; IEEE Trans. Power Electron. 2017, 32, 1941-1951.
- [4] Tousei, S. M. R.; Moradi, M. H.; Basir, N. S.; Nemati, M. "A Function Based Maximum Power Point Tracking Method for Photovoltaic Systems"; IEEE Trans. Power Electron. 2016, 31, 2120-2128.
- [5] Teng, J. H.; Huang, W. H.; Hsu, T. A.; Wang, C. Y. "Novel and Fast Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Generation"; IEEE Trans. Ind. Electron. 2016, 63, 4955-4966.
- [6] Ghasemi, M. A.; Foroushani, H. M.; Parmiani, M. "Partial Shading Detection and Smooth Maximum Power Point Tracking of PV Arrays under PSC"; IEEE Trans. Power Electron. 2015, 31, 6281-6292.
- [7] Renaudineau, H.; Donatantonio, F.; Fontchastagner, J.; Petrone, G.; Spagnuolo, G.; Martin, J. P.; Pierfederici, S. "A PSO-Based Global MPPT Technique for Distributed PV Power Generation"; IEEE Trans. Ind. Electron. 2014, 62, 1047-1058.
- [8] Ricco, M.; Manganiello, P.; Monmasson, E.; Petrone, G.; Spagnuolo, G. "FPGA-Based Implementation of Dual Kalman Filter for PV MPPT Applications"; IEEE Trans. Ind. Inform. 2015, 13, 176-185.
- [9] Libo, W.; Zhengming, Z.; Jianzheng, L. "A Single-Stage Three-Phase Grid-Connected Photovoltaic System with Modified MPPT Method and Reactive Power Compensation"; IEEE Trans. Energy Convers. 2007, 22, 881-886.
- [10] Manganiello, P.; Ricco, M.; Monmasson, E.; Petrone, G.; Spagnuolo, G. "On-Line Optimization of the P&O MPPT Method by Means of the System Identification"; IEEE Ind. Electron. Conf. 2013, 1786-1791.
- [11] Ricco, M.; Manganiello, P.; Petrone, G.; Monmasson, E.; Spagnuolo, G. "FPGA-Based Implementation of An

- [33] Park, S. M.; Park, S. Y. "Power Weakening Control of the Photovoltaic Battery System for Seamless Energy Transfer in Microgrids"; Proc. APEC 2013, 2971–2976.
- [34] Gomez-Merchan, R.; Vazquez, S.; Alcaide, A. M.; Tafti, H. D.; Leon, J. I.; Pou, J.; Rojas, C. A.; Kouro, S.; Franquelo, L. G. "Binary Search-Based Flexible Power Point Tracking Algorithm for Photovoltaic Systems"; IEEE Trans. Ind. Electron. 2020, 68, 5909–5920.
- [35] Baimel, D.; Tapuchi, S.; Levron, Y.; Belikov, J. "Improved Fractional Open Circuit Voltage MPPT Methods for PV Systems"; Electronics 2019, 8, 321.
- [36] Kobayashi, K.; Takano, I.; Sawada, Y.; "A Study on A Two Stage Maximum Power Point Tracking Control of A Photovoltaic System under Partially Shaded Insolation Conditions"; IEEE Power and Energy Society General Meeting 2003, 2612–2617
- [37] Sher, H. A.; Murtaza, A. F.; Noman, A.; Addoweesh, K. E.; Al-Haddad, K.; Chiaberge, M. "A New Sensorless Hybrid MPPT Algorithm Based on Fractional Short-Circuit Current Measurement and P&O MPPT"; IEEE Trans. Sustain. Energy 2015, 6, 1426–1434.
- Frequency Control of Power System"; IEEE Trans. Energy Conversion 2009, 24, 943–949.
- [28] Beniwal, N.; Hussain, I.; Singh, B. "Control and Operation of A Solar PV-Battery-Grid-Tied System in Fixed and Variable Power Mode"; IET Gener. Transm. & Distr. 2018, 12, 2633–2641.
- [29] Hernandez, J. C.; Bueno, P. G.; Sanchez-Sutil, F. "Enhanced Utilityscale Photovoltaic Units with Frequency Support Functions and Dynamic Grid Support for Transmission Systems"; IET Renew. Power Gener. 2017, 11, 361–372.
- [30] Tafti, H. D.; Townsend, C. D.; Konstantinou, G.; Pou, J. "A Multi-Mode Flexible Power Point Tracking Algorithm for Photovoltaic Power Plants"; IEEE Trans. Power Electron. 2019, 34, 5038–5042
- [31] Yang, Y.; Blaabjerg, F.; Wang, H. "Constant Power Generation of Photovoltaic Systems Considering the Distributed Grid Capacity"; Proc. APEC 2014, 379–385.
- [32] Tafti, H. D.; Maswood, A. I.; Konstantinou, G.; Pou, J.; Acuna, P. "Active/Reactive Power Control of Photovoltaic Grid-Tied Inverters with Peak Current Limitation and Zero Active Power Oscillation During Unbalanced Voltage Sags"; IET Power Electron. 2018, 11, 1066–1073.

