Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 14, No. 3, 2023
Research Paper

Constant Power Generation in Cascaded H-Bridge Inverter-based Photovoltaic Systems Based on Flexible Power Point Tracking

Mina Haghighat[1], Mehdi Niroomand [1*], Hossein Dehghani Tafti[2]
[1] Department of Electrical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran
[2] Department of Electrical, Electronic and Computer Engineering, University of Western Australia, Crawley WA 6009, Australia.

Abstract:
Traditionally, photovoltaic power plants use Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithms to produce maximum electrical energy. However, with the increase of grid-installed photovoltaic power plants, power system operators have faced new challenges such as overload, overvoltage, and proper performance during grid voltage disturbances. As a result, network standards and codes have been updated in the direction of photovoltaic systems that are more controllable and compatible with the network. To provide various grid support functions, such as frequency response and voltage support, the Constant Power Generation (CPG) control algorithm is established by grid codes. For this purpose, MPPT algorithms have been replaced by flexible power point tracking (FPPT) algorithms. This paper proposes an algorithm to control photovoltaic systems based on a multi-level cascaded full-bridge (CHB) inverter to achieve constant power generation control by the FPPT method. The required power reference is distributed among the sub-modules of the CHB converter according to the available power of each sub-module in such a way that, as much as possible, each sub-module is loaded equally. Then, the FPPT algorithm with an adaptive voltage step is used to set the power of each sub-module in its reference value. The voltage step is calculated adaptively based on the observed condition (transient or steady state) so that the tracking performance has fast dynamics. The effectiveness of the proposed algorithm is evaluated by simulating a 500-kW photovoltaic system directly connected to a 4.7 kV grid.

Keywords: Photovoltaic systems, active power control, flexible power point tracking (FPPT), Constant power generation (CPG), H-bridge converter.

This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).
https://doi.org/10.22108/ISEE.2023.136164.1605

مقاله پژوهشی

تولید توان ثابت در سیستم‌های فتوولتائیک مبتنی بر اینورتر تمام‌پل آبشاری براساس ردیابی نقطه توان انعطاف‌پذیر

مینا حقیقت [۱]، مهدی نیرومند*[۲]، حسین دهقانی تفتی [۳]

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
m_haghighat@eng.ui.ac.ir
۲-دانشیار گروه برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
mehdi_niroomand@eng.ui.ac.ir
۳-استادیار دانشگاه وسترن، استرالیا
hossein002@e.ntu.edu.sg

چکیده: نیروگاه‌های فتوولتائیک به‌صورت سنتی برای تولید حداکثر انرژی الکتریکی از الگوریتم‌های ردیابی نقطه بیشینه توان (MPPT) استفاده می‌کنند؛ با این حال، با افزایش نیروگاه‌های فتوولتائیک نصب‌شده به شبکه، اپراتورهای سیستم قدرت با چالش‌های جدیدی مانند اضافه بار، اضافه ولتاژ و عملکرد در هنگام اختلال ولتاژ شبکه مواجه شده‌اند؛ درنتیجه، استانداردها و کدهای شبکه در جهت سیستم‌های فتوولتائیک کنترل‌پذیرتر و سازگارتر با شبکه به‌روزرسانی شده‌اند. برای ارائه عملکردهای مختلف پشتیبانی از شبکه، مانند پاسخ فرکانسی و پشتیبانی ولتاژ، الگوریتم کنترل تولید توان ثابت (CPG) توسط کدهای شبکه وضع شده است. به همین منظور، الگوریتم‌های MPPT با الگوریتم‌های ردیابی نقطه توان انعطاف‌پذیر (FPPT) جایگزین شده‌اند. این مقاله یک الگوریتم برای کنترل سیستم‌های فتوولتائیک مبتنی بر اینورتر تمام‌پل آبشاری (CHB) چندسطحی برای دستیابی به کنترل تولید توان ثابت با روش FPPT پیشنهاد می‌کند. مرجع توان مورد نیاز بین زیرماژول‌های مبدل CHB با توجه به توان موجود هر زیرماژول به‌گونه‌ای توزیع می‌شود که تا حد امکان هر زیرماژول به یک اندازه بارگذاری شود. سپس برای تنظیم توان هر زیرماژول در مقدار مرجع آن از الگوریتم FPPT با گام ولتاژ تطبیقی استفاده می‌شود. گام ولتاژ براساس شرایط مشاهده‌شده (حالت گذرا یا پایدار) به‌صورت تطبیقی محاسبه می‌شود تا عملکرد ردیابی دارای دینامیک سریع باشد. اثربخشی الگوریتم ارائه‌شده با شبیه‌سازی یک سیستم فتوولتائیک ۵۰۰ کیلووات که مستقیماً به یک شبکه ۴٫۷ کیلوولت متصل است، ارزیابی شده است.

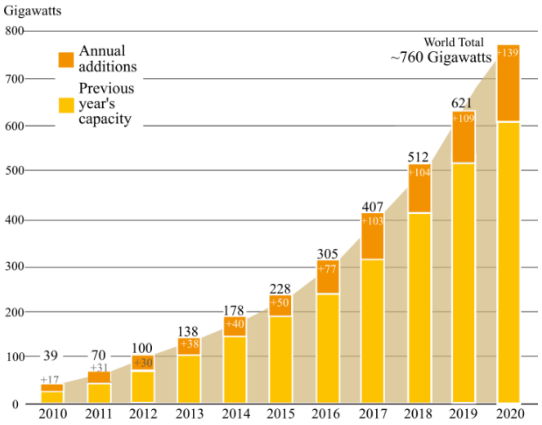
واژه‌های کلیدی: سیستم‌های فتوولتائیک، کنترل توان اکتیو، دنبال کردن نقطه توان انعطاف‌پذیر (FPPT)، تولید توان ثابت (CPG)، مبدل تمام‌پل آبشاری

۱- مقدمه

با کمبود سوخت‌های فسیلی، افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از آلودگی‌های زیست‌محیطی و گرمایش زمین، همراه با تقاضای بالای مصرف انرژی برای صنعتی‌سازی و تولید، صنعت برق در سال‌های اخیر بیش از پیش بر تکامل منابع انرژی تجدیدپذیر متمرکز شده است. با توجه به مزایای متمایز تولید سیستم‌های PV[۱]، مانند کاهش هزینه پنل‌های PV، هزینه پایین تعمیر و نگهداری و نصب آسان برای هر ظرفیت دلخواه، سیستم‌های PV به‌سرعت درحال توسعه‌اند [۱]. طبق گزارشات در سال ۲۰۲۰ ظرفیت PV نصب‌شده جهانی بیش از ۷۵۰ گیگاوات است [۲].

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۰۴
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۲۱
نام نویسندهٔ مسئول: مهدی نیرومند
نشانی نویسندهٔ مسئول: ایران، اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشکده فنی و مهندسی

ظرفیت تولید برق جهانی به روش فتوولتائیک و افزایش سالیانه آن در شکل ۱ نشان داده شده است.

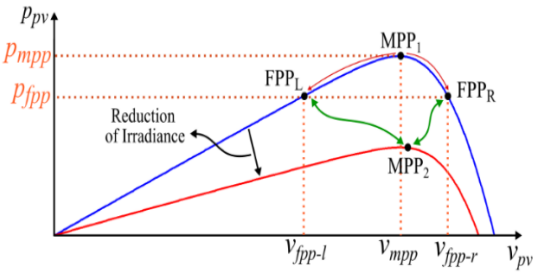


شکل (۱): ظرفیت تولید برق جهانی PV و افزایش سالیانه آن [۲].

با افزایش نصب نیروگاه‌های فتوولتائیک، شبکه با چالش‌های مختلفی مواجه می‌شود؛ برای مثال، اگر مقدار توان تولیدشده از آرایه‌های فتوولتائیک از تقاضای بار در طول دوره‌های اوج تولید برق (به‌طور مثال، در اواسط روز) بیشتر شود، سیستم قدرت ممکن است بیش از حد بارگذاری شود و درنتیجه، دستگاه‌های حفاظتی فعال شوند [۳-۵]. برای اطمینان از پایداری و کیفیت توان سیستم، اپراتورهای سیستم الزامات جدیدی را برای اتصال سیستم‌های PV به شبکه وضع می‌کنند [۶] که کدها و استانداردهای شبکه نامیده می‌شوند. هدف از این الزامات جدید، کاهش اثرات نامطلوب نفوذ بالای سیستم‌های PV نصب‌شده بر شبکه است. به‌طور مثال، طبق کد شبکه برق کشور دانمارک، یک نیروگاه فتوولتائیک متصل به شبکه با توان خروجی بالاتر از ۱۱ کیلوولت آمپر باید بتواند در صورت نیاز، توان خروجی را به مقدار ثابت معینی محدود کند که کنترل تولید توان ثابت CPG[۲] نامیده می‌شود [۷]. با محدود کردن توان خروجی سیستم فتوولتائیک، توان اضافی موجود برای ارائه عملکردهای جانبی مانند پشتیبانی ولتاژ و پاسخ فرکانسی استفاده می‌شود [۸]. با توجه به خواسته‌های فوق، راه‌حل‌هایی برای تحقق این الزامات بررسی شده است. یکی از راه‌حل‌های اولیه، استفاده از ذخیره‌کننده‌های انرژی است. در این روش، دستگاه‌های ذخیره انرژی (به‌طور مثال، باتری‌ها) برای تنظیم توان خروجی سیستم‌های PV کنترل (شارژ / تخلیه) می‌شوند؛ با این حال، یکی از نگرانی‌های عمدهٔ این روش، هزینه اولیه معرفی‌شده توسط سیستم‌های ذخیره انرژی است. علاوه بر این، طول عمر محدودتر باتری‌ها موجب افزایش هزینه تعمیر و نگهداری سیستم کلی می‌شود [۹-۱۰].

کنترل توان اکتیو انعطاف‌پذیر را می‌توان مستقیماً در سیستم‌های PV با جایگزینی الگوریتم‌های MPPT[۳] با الگوریتم‌های ردیابی نقطه توان انعطاف‌پذیر (FPPT[۴]) به دست آورد [۱۱]. با توجه به شکل ۲، الگوریتم‌های FPPT توان خروجی PV (p_{pv}) را در مقدار مرجع (p_{fpp}) مورد نیاز کدهای شبکه تنظیم می‌کنند. چندین الگوریتم FPPT با پاسخ دینامیکی سریع و نوسانات توان کم در حالت پایدار در [۱۲-۱۴] معرفی شده است.

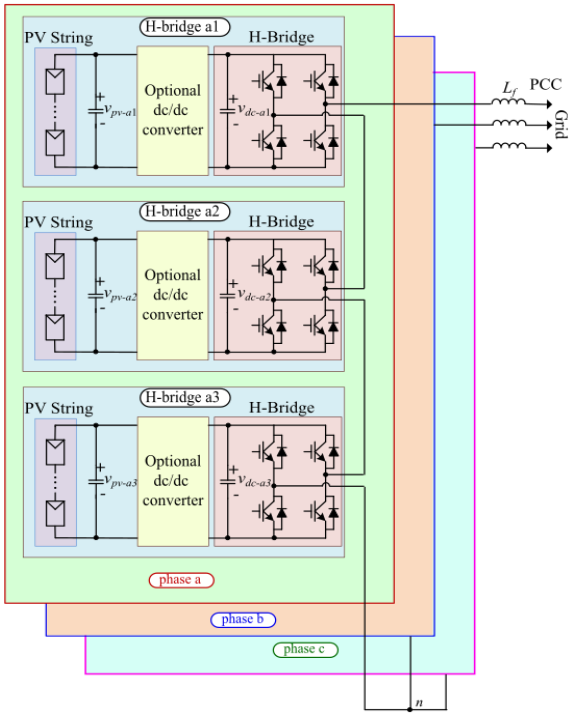
اگرچه تاکنون الگوریتم‌های پیشرفته FPPT در تحقیقات قبلی معرفی شده است، پیاده‌سازی آنها بر سیستم‌های PV مبتنی بر مبدل چندسطحی[۵] که راه‌حل مناسبی برای نیروگاه‌های PV در مقیاس متوسط و بزرگ‌اند، دارای چالش‌های متعدد است و ممکن است اجرای کنترل توان رضایت بخش نباشد. درواقع روش‌های پیشین FPPT تنها برای یک اینورتر PV مناسب‌اند. هنگامی که زیرماژول‌های[۶] متعدد در سیستم درگیرند، اگر توان محدودشده به‌درستی توزیع نشود، زیرماژول‌ها می‌توانند به‌طور نابرابر بارگذاری شوند؛ درنتیجه، سیستم ممکن است فراتر از ناحیهٔ مجاز خود کار کند (بعضی از زیرماژول‌ها بیش از حد مدوله شوند) [۱۵-۱۶].



شکل (۲): نقاط توان انعطاف‌پذیر (FPP) سیستم‌های PV با کنترل ردیابی نقطه توان انعطاف‌پذیر (FPPT) [۱۱].

مبدل تمام‌پل آبشاری[۷] (CHB) چندسطحی در شکل ۳، یک انتخاب مناسب برای سیستم‌های PV در مقیاس متوسط و بزرگ معرفی شده است؛ زیرا ۱) تلفات قطعات نیمه‌هادی به دلیل فرکانس کم سوئیچینگ پایین است و ۲) اتصال مستقیم به شبکه‌های ولتاژ متوسط نیاز به ترانسفورماتورهای فرکانس خط حجیم و گران قیمت را از بین می‌برد.

در تحقیقات گذشته تعادل بین فازی و بین ولتاژهای خازن پل در این مبدل مطالعه شده است [۱۷]. با توجه به اینکه تاکنون کنترل CPG به‌صورت گسترده بر سیستم‌های PV مبتنی بر اینورتر CHB اجرا نشده است، در این مقاله یک الگوریتم جدید برای دستیابی به کنترل CPG در سیستم‌های PV مبتنی بر CHB ارائه شده است. الگوریتم CPG ارائه‌شده از گام ولتاژ تطبیقی استفاده می‌کند. گام ولتاژ تطبیقی برای مکان نقطه عملکردی و شرایط مشاهده‌شده (حالت پایدار یا گذرا) اعمال می‌شود؛ بنابراین، منجر به دینامیک سریع در زمان ردیابی مرجع توان و نوسانات توان پایین در حالت پایدار خواهد شد. الگوریتم کنترل روی مبدل DC-DC اجرا می‌شود تا کنترل CPG برای این نوع سیستم فراهم شود. توان محدودشده بین زیرماژول‌ها به گونه‌ای توزیع می‌شود تا بارگذاری بین زیرماژول‌ها متعادل باشد و با کنترل هماهنگ همه زیرماژول‌ها ذخیره کل توان حفظ خواهد شد. با توجه به اینکه توزیع توان بین زیرماژول‌ها تا حد امکان به‌طور یکسان انجام می‌شود، از مدولاسیون بیش از حد زیرماژول‌ها و عدم تعادل لینک DC جلوگیری می‌شود. با استفاده از شبیه‌سازی Simulink/MATLAB اثربخشی الگوریتم پیشنهادی بر یک اینورتر CHB تکفاز با ۵ عدد زیرماژولِ متصل به شبکه ۴٫۷ کیلوولت، ارزیابی می‌شود.



شکل (۳): ساختار سیستم PV متصل به شبکه با مبدل CHB هفت سطحی.

در ادامه، مقاله به‌صورت زیر تقسیم‌بندی شده است: در بخش ۲ الگوریتم کنترل پیشنهادی شامل کنترل پیشنهادی برای اینورتر و مبدل DC-DC توضیح داده شده است. نتایج شبیه‌سازی در بخش ۳ ارائه شده‌اند. همچنین، نتایج کار ارائه‌شده در بخش ٤ خلاصه شده‌اند.

۲- الگوریتم کنترل پیشنهادی

الگوریتم کنترل پیشنهادی برای سیستم PV مبتنی بر CHB به دو بخش تقسیم می‌شود. در زیربخش اول کنترل پیشنهادی برای اینورتر CHB توضیح داده شده است. زیربخش دوم کنترل پیشنهادی برای مبدل DC-DC ارائه می‌شود که شامل الگوریتم توزیع توان بین زیرماژول‌ها و الگوریتم FPPT ارائه‌شده برای کنترل مبدل DC-DC هر زیرماژول است. با کنترل هماهنگ تمام زیرماژول‌ها مراجع توان توسط الگوریتم توزیع توان به زیرماژول‌ها ارسال می‌شود و هر زیرماژول مرجع توان ارسالی را دنبال خواهد کرد. فرض بر این است که ساختار سیستم مشابه شکل ۳ باشد. همچنین، فرض بر این است که سیستم N سطحی

باشد. سیستم مدنظر به شبکه توزیع متصل خواهد شد و شبکه با یک منبع ولتاژ و امپدانس سری معادل می‌شود. جزئیات کنترل پیشنهادی در ادامه ارائه می‌شود:

۲-۱- کنترل پیشنهادی برای اینورتر CHB

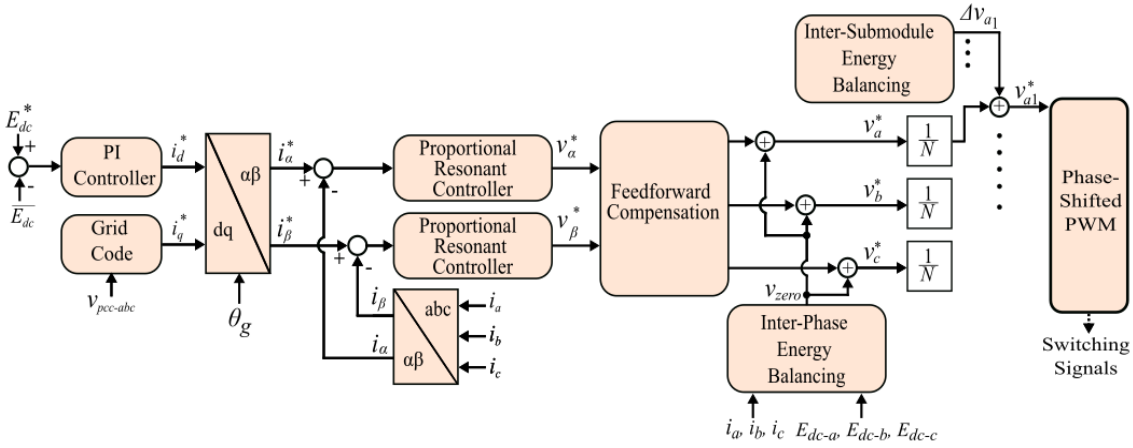
یک نمای کلی از ساختار کنترل اینورتر CHB معرفی‌شده با N سطح در قاب αβ در شکل ٤ ارائه شده است. برای اینورتر CHB طرح کنترلی مطابق شکل ٤ پیاده سازی شده است. ولتاژهای شبکه $\boldsymbol{v_{pcc-abc}}$ برای تعیین مرجع جریان راکتیو مورد نیاز i_q^* با توجه به کدهای شبکه استفاده می‌شوند؛ در حالی که کل انرژی ذخیره‌شده در خازن‌های لینک DC به یک کنترل‌کننده PI وارد می‌شود تا مرجع جریان اکتیو i_d^* محاسبه شود. مراجع جریان قاب dq محاسبه و سپس به قاب αβ منتقل می‌شوند. کنترل‌کننده جریان که در قاب αβ پیاده‌سازی می‌شود، مراجع ولتاژ را براساس خطای بین مراجع جریان (i_α^* و i_β^*) و جریان‌های شبکه لحظه‌ای (i_α و i_β) محاسبه می‌کند. ولتاژهای فیلترشده پیشخور[۸] از شبکه به مرجع ولتاژ محاسبه‌شده از کنترل‌کننده جریان اضافه می‌شوند تا ولتاژ خروجی مبدل تولید شود. درنهایت، یک کنترل برای برقراری تعادل انرژی بین سه‌فاز و همچنین، بین زیرماژول‌های یک فاز اجرا می‌شود. کنترل‌کننده اینورتر CHB برای حفظ میانگین انرژی خازن $\bar{E}_{dc}$ با کنترل توان اکتیو تزریق‌شده به شبکه استفاده می‌شود. $\bar{E}_{dc}$ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\bar{E}_{dc} = \frac{\sum_{x=a}^{x=c}\sum_{j=1}^{N} e_{dc-xi}}{N \times 3} \qquad x \in \{a,b,c\} \tag{۱}$$

در رابطه (۱) شماره زیرماژول هر فاز با i مشخص شده است. همچنین، e_{dc-xi} انرژی خازن زیرماژول xi است که مطابق زیر محاسبه می‌شود:

$$e_{dc-xi} = \frac{1}{2} \times C_{dc} \times v^2{}_{dc-xi} \tag{۲}$$

که $\boldsymbol{v_{dc-xi}}$ ولتاژ خازن زیرماژول است که در شکل ۳ نیز نشان داده شده است. در رابطه (۲) مقدار خازن هر زیرماژول با $\boldsymbol{C_{dc}}$ نشان داده شده است.



شکل (٤): طرح کنترل اینورتر CHB معرفی‌شده

مطابق شکل ٤ خطای بین میانگین انرژی تمام ماژول‌ها $\bar{E}_{dc}$ و مرجع انرژی ماژول E_{dc}^* به کنترل‌کننده PI داده می‌شود تا مرجع جریان i_d^* را محاسبه کند. خطاهای بین مراجع جریان محاسبه‌شده و جریان‌های فاز لحظه‌ای که به مختصات αβ (i_α و i_β) تبدیل شده‌اند، به کنترل‌کننده‌های تشدید متناسب (PR) وارد می‌شوند. مراجع ولتاژ v_α^* و v_β^* محاسبه‌شده به بلوک جبران پیشخور داده می‌شوند که به ولتاژهای شبکه لحظه‌ای تبدیل‌شده به مختصات αβ اضافه می‌شود. این ویژگی پاسخ گذرا سیستم را با نوسانات ولتاژ شبکه افزایش می‌دهد. درنهایت، بلوک «تعادل انرژی بین

فازها» و «تعادل انرژی بین زیرماژول‌ها» برای حفظ تعادل انرژی بین سه‌فاز و بین زیرماژول‌های هر فاز استفاده می‌شود.

همان‌طور که از ساختار مبدل CHB (شکل ۳) مشاهده می‌شود، این ساختار دارای لینک‌های DC مجزا است. مشکل ناشی از عملکرد مستقل چندین لینک DC این است که توان تولیدشده با پنل‌های PV متصل به هر پل می‌تواند نابرابر باشد. این عدم تعادل توان می‌تواند حتی ناشی از تابش غیریکنواخت خورشیدی، دمای نابرابر محیط یا تخریب پنل‌ها باشد؛ با این حال، بیشتر کدهای شبکه، جریان‌های متعادل سه فاز را الزامی می‌کنند [۱۸]؛ بنابراین، روش‌های کنترل اصلاح‌شده برای ارائه جریان‌های سه فاز متعادل به شبکه مورد نیاز است؛ در غیر این صورت، ممکن است مبدل از شبکه جدا شود. ماهیت مشکل عدم تعادل توان در تحویل جریان‌های متعادل سه فاز به شبکه با تولید توان PV نامتعادل در هر پل نهفته است. مشکل، بیشتر به دو دسته طبقه‌بندی می‌شود: ۱) عدم تعادل توان بین‌فازی (خوشه‌ای)، که زمانی رخ می‌دهد که هر فاز مقدار متفاوتی توان تولید می‌کند و ۲) عدم تعادل توان بین پل، که زمانی اتفاق می‌افتد که هر پل در همان پایه فاز، مقدار متفاوتی توان تولید می‌کند. تاکنون الگوریتم‌های زیادی برای حل عدم تعادل بین‌فازی و بین‌پل مبدل CHB ارائه شده‌اند. در این مقاله از روش ارائه‌شده در [۱۵] برای حفظ تعادل بین‌فازی و بین‌پل استفاده شده است. جزئیات این بلوک‌های کنترلی در [۱۵] ارائه شده است.

با توجه به شکل ٤، بدون اجرای الگوریتم تعادل بین‌فاز و بین‌پل، برای اجرای مودلاسیون شیفت فاز اینورتر، یک مرجع ولتاژ ثابت v_a^*/N به هر زیرماژول فرستاده می‌شود. برای تولید ولتاژ کنترلی مودلاسیون شیفت فاز، مرجع ولتاژ ارسالی به هر زیرماژول بر ولتاژ لینک DC زیرماژول مربوطه، تقسیم و درنهایت، با موج حامل دندانه‌اره‌ای مقایسه می‌شود. چنانچه زیرماژولی توان کمتری تولید کند، ولتاژ لینک DC آن کاهش می‌یابد و دامنه ولتار کنترلی از دامنه موج حامل فراتر خواهد رفت و موجب مودلاسیون بیش از حد زیرماژول مربوطه خواهد شد؛ بنابراین، کیفیت ولتاژ خروجی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. درواقع، بلوک «تعادل انرژی بین فازها» باعث می‌شود توان یکسانی از هر زیر ماژول، کشیده و تعادل بین زیرماژول‌ها حفظ شود.

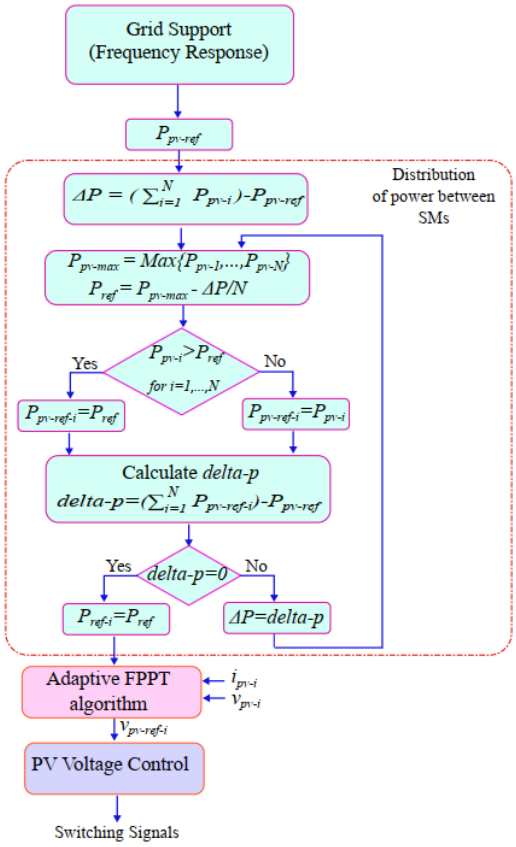
۲-۲- الگوریتم کنترل پیشنهادی برای مبدل‌های DC-DC

یک نمای کلی از کنترل‌کننده پیشنهادی برای هر مبدل DC-DC سیستم PV مبتنی بر CHB در شکل ۵ ارائه شده است. بلوک پشتیبانی فرکانس شبکه، مرجع توان مورد نیاز سیستم P_{pv-ref} را براساس فرکانس شبکه و نیاز شبکه محاسبه می‌کند. سپس مرجع توان مورد نیاز برای کل سیستم PV به تناسب بین زیرماژول‌ها تقسیم می‌شود.

الگوریتم توزیع توان بین زیرماژول‌ها، مقدار توان مرجع هر زیرماژول را با توجه به توان پنل‌ها و مقدار رزرو مورد نیاز (ΔP) تنظیم می‌کند. روند اجرای الگوریتم به این صورت است که ابتدا مجموع توان زیرماژول‌ها محاسبه می‌شود و با توجه به مرجع توان مورد نیاز سیستم P_{pv-ref} مقدار رزرو مورد نیاز (ΔP) مطابق زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^{N} P_{pv-i} - P_{pv-ref} \quad (۳)$$

که N تعداد زیرماژول‌ها و P_{pv-i} توان پنل زیرماژول i ام است. سپس یک مرجع توان برای محدودکردن توان هر زیرماژول محاسبه می‌شود. مرجع توان برای هر زیرماژول به‌گونه‌ای محاسبه می‌شود که توان پنل PV با مقدار بیشینه انتخاب می‌شود. سپس مقدار $\frac{1}{N}$ رزرو مورد نیاز از آن کسر خواهد شد که مطابق رابطه زیر است:



شکل (۵): الگوریتم پیشنهادی برای کنترل مبدل DC-DC هر زیرماژول

$$P_{pv-max} = Max\{P_{pv-1}, P_{pv-2}, \dots, P_{pv-N}\} \quad (۴)$$

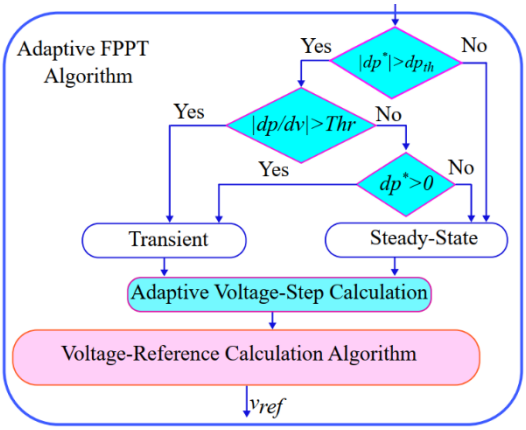
$$P_{ref} = P_{pv-max} - \Delta P/N \quad (۵)$$

در رابطه (۴) P_{pv-max} مقدار بیشینه توان پنل PV در بین پنل‌های موجود است. $P_{pv-1}, P_{pv-2}, \dots, P_{pv-N}$ توان پنل‌های اول تا N ام است. همچنین، P_{ref} مقدار مرجعی است که برای توان هر زیرماژول در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین، N تا زیرماژول مراجع ارسالی از الگوریتم توزیع توان را اجرا خواهند کرد. اگر توان هر زیرماژول از مقدار P_{ref} بیشتر باشد، توان زیرماژول مربوطه به این سطح محدود خواهد شد. در غیر این صورت، زیرماژول مربوطه توان قبلی خود را دنبال خواهد کرد. در مرحله بعد مراجع توان محاسبه‌شده برای زیرماژول‌ها جمع خواهند شد. با توجه به مراجع توان محاسبه‌شده و مرجع توان مورد نیاز سیستم P_{pv-ref} مقدار رزرو مورد نیاز مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^{N} P_{pv-ref-i} - P_{pv-ref} \quad (۶)$$

اگر مقدار رزرو محاسبه‌شده برابر صفر بود، به این معنا است که P_{pv-ref} توسط زیرماژول‌ها فراهم می‌شود؛ در غیر این صورت، روند توضیح داده شده تا زمانی ادامه می یابد که کل توان مورد نیاز سیستم فراهم شود. با اجرای این الگوریتم توزیع توان کل بین مبدل‌های PV طوری انجام می‌شود که بارگذاری بین زیرماژول‌ها تا حد امکان به‌طور یکسان انجام می‌شود و درنتیجه، از مدولاسیون بیش از حد زیرماژول‌ها و عدم تعادل بین آنها جلوگیری می‌شود.

در مرحله بعد از یک الگوریتم FPPT مبتنی بر ولتاژ تطبیقی برای محاسبه مرجع ولتاژ PV در هر زیرماژول اینورتر $v_{pv-ref-i}$ پیاده‌سازی می‌شود. ساختار الگوریتم FPPT برای کنترل مبدل DC-DC در شکل ۶ نشان داده شده است. این الگوریتم به دلیل استفاده از گام ولتاژ تطبیقی دارای دینامیک سریع و نوسانات توان پایین در هنگام تنظیم توان PV در مقدار مرجع آن خواهد بود. ذکر این نکته الزامی است که اگر مجموع توان در دسترس تمامی زیرماژول‌ها کمتر از مرجع توان مورد نیاز سیستم باشد، تمامی زیرماژول‌ها حداکثر توان موجود خود را تزریق خواهند کرد.



شکل (۶): الگوریتم FPPT برای کنترل مبدل DC-DC

انتخاب گام ولتاژ بین دو نقطه عملکردی متوالی در

دینامیک و نوسانات توان در هنگام تنظیم توان هر زیرماژول در مقدار مرجع آن بسیار مهم است. اگر گام ولتاژ بین دو نقطه عملکردی متوالی مقدار بزرگی باشد، پاسخ دینامیکی پرسرعتی در طول گذار (تغییرات تابش) خواهیم داشت و عملکرد ردیابی به‌خوبی انجام می‌شود؛ اما نوسانات توان بزرگی در حالت پایدار (تابش ثابت) به وجود خواهد آمد. اگر گام ولتاژ مقدار کوچکی باشد، نوسانات توان پایین در حالت پایدار به دست می‌آید و تلفات توان کمینه خواهد شد؛ اما منجر به پاسخ دینامیکی کند خواهد شد؛ بنابراین، گام ولتاژ باید متغیر باشد تا عملکرد هم در حالت گذار و هم در حالت پایدار بهبود یابد. درواقع، ولتاژ آرایه PV در مد عملکرد CPG در رنج وسیعی بسته به شرایط (حالت گذار یا پایدار) تغییر می‌کند؛ بنابراین، مقادیر گام ولتاژ نیز باید در حالت پایدار یا گذرا متفاوت باشد. پس شرایط عملکردی (حالت گذار یا پایدار) باید در ابتدا آشکار شود. در اینجا مقدار آستانه dp_{th} برای جداسازی دو شرایط عملکردی تعریف شده است.

$$\begin{aligned} |dp^*| &\le dp_{th} \quad steady-state \\ |dp^*| &> dp_{th} \quad transient \end{aligned}$$

که در رابطه (۷) dp^* مطابق رابطه زیر تعریف شده است:

$$dp^* = p_{pv}(k) - p_{ref-i} \tag{۸}$$

در حالت پایدار خطای dp^* نزدیک صفر است؛ در حالی که در طول گذار دارای مقدار نسبتاً بزرگی است که به علت تغییرات در تابش خورشید است. تعریف فوق می تواند به‌آسانی در کنترل‌کننده اجرا شود؛ اما اجرای این مقایسه ساده به‌تنهایی کافی نیست و ممکن است شرایط عملکردی اشتباه تشخیص داده شود. زمانی که سیستم در مد MPPT فعالیت می‌کند، ممکن است این انتخاب خطا انجام شود. تحت دو شرایط این انتخاب خطا رخ خواهد داد:

۱) زمانی که توان مرجع مطابق p_{ref-i} در مقدار بزرگتری از توان بیشینه نامی تنظیم شده باشد.

۲) به علت سایه جزیی یا دلایل دیگر، بیشینه توان PV موجود P_{mpp} کمتر از توان مرجع p_{ref-i} در طول مد CPG است.

در شرایط ذکرشده الگوریتم باید قادر باشد ولتاژ متناظر با نقطه توان حداکثر V_{mpp} را محاسبه کند و به‌منظور دستیابی به نوسانات توان کوچک باید تضمین کرد شرایط ذکرشده در قسمت حالت پایدار طبقه بندی شده‌اند. شیب منحنی توان - ولتاژ (P-V) پنل PV در MPP نزدیک صفر است؛ بنابراین، مقدار $\left|\frac{dp}{dv}\right|$ با یک مقدار آستانه Thr مقایسه می‌شود. اگر نقطه عملکردی نزدیک به MPP نباشد، در این صورت $\left|\frac{dp}{dv}\right|$ بزرگ‌تر از مقدار آستانه است و سیستم PV در مد گذرا است و بنابراین، از یک گام ولتاژ بزرگ برای دستیابی به دینامیک سریع استفاده می‌شود. توجه کنید اگر نقطه عملکردی نزدیک به MPP باشد، دو شرایط ممکن است رخ دهد: ۱) مرجع توان بزرگ‌تر از P_{mpp} باشد که این شرط باید در حالت پایدار قرار گیرد؛ در این حالت dp^* مثبت است. ۲) مرجع توان کوچک‌تر از P_{mpp} باشد؛ این حالت باید در مد گذرا دسته‌بندی شود. در این شرایط dp^* منفی است؛ بنابراین، از تعیین علامت dp^* برای تمایز بین دو شرط فوق استفاده می‌شود.

درنهایت یک کنترل‌کننده ولتاژ معمولی برای تنظیم ولتاژ PV در هر زیرماژول به مقدار مرجع آن و تولید سیگنال‌های کلیدزنی اجرا می‌شود.

۳- ارائه نتایج

اثربخشی الگوریتم کنترل پیشنهادی برای اجرای پشتیبانی فرکانس و کنترل CPG در سیستم‌های PV مبتنی بر CHB با شبیه‌سازی بر یک سیستم PV ۵۰۰ کیلووات متصل مستقیماً به یک شبکه ۴٫۷ کیلوولت، ارزیابی می‌شود. نتایج این کار در شکل ۷، ۸ و ۹ نشان داده شده‌اند. نتایج سیستم مورد مطالعه برای سه حالت افزایش و کاهش ناگهانی مرجع توان سیستم و هچنین تغییرات ناگهانی تابش ارائه شده‌اند. پارامترهای دقیق سیستم در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

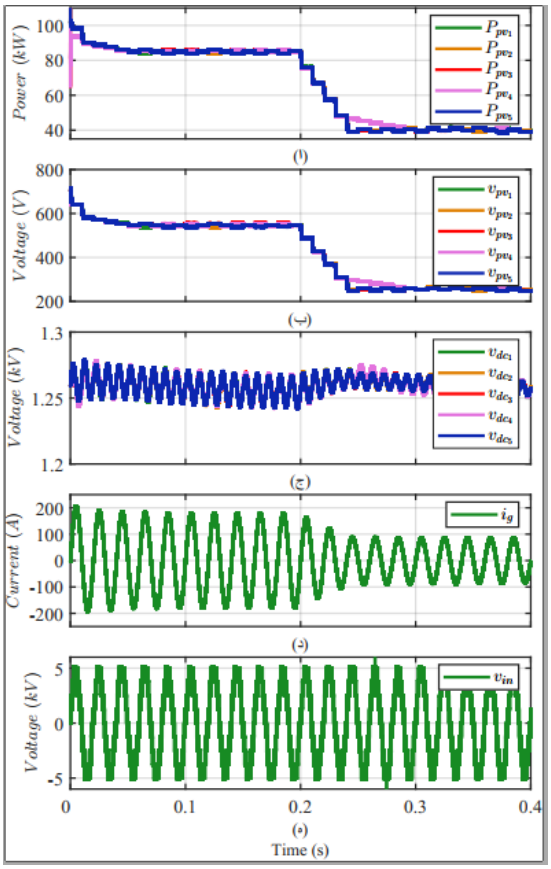
جدول (۱): پارامترهای سیستم مورد مطالعه

پارامتر	مقدار
حداکثر توان پنل PV ساب ماژول‌ها p_{mpp}	۱۱۰، ۱۱۰، ۱۰۰، ۹۰، ۹۰ کیلووات
ولتاژ MPP پنل‌های PV	۷۴۰،۷۴۰، ۷۰۰، ۶۷۰، ۶۷۰ ولت
خازن پنل PV، C_{pv}	۱ mF
فرکانس سوئیچینگ مبدل‌های DC-DC	۵۰ kHz
ولتاژ شبکه	۴,۷ kV
فرکانس شبکه	۵۰ Hz
ولتاژ لینک DC، v_{dc-i}	۱,۲۷ kV
خازن لینک DC، C_{dc}	۳ mF
سلف فیلتر متصل به شبکه، L_f	۹ mH
فرکانس حامل مبدل CHB	۲ kHz
تعداد زیرماژول‌ها	۵

حالت اول: با توجه به شکل ۷، مرجع توان سیستم P_{pv-ref} به‌طور ناگهانی در زمان ۰/۲ ثانیه کاهش داده شده است. براساس شکل ۷، قبل از زمان ۰/۲ ثانیه هر مبدل DC-DC توان ۸۵ کیلووات را از رشته PV مربوطه استخراج می‌کند. در این حالت، با توجه به توان سیستم PV که ۵۰۰ کیلووات است، ذخیره توان ۷۵ کیلووات در سیستم حفظ می‌شود. همان‌طور که از توان PV پنج زیرماژول در شکل ۷ مشاهده می‌شود، همه زیرماژول‌ها مرجع یکسان ۸۵ کیلووات را دنبال می‌کنند که ازطریق الگوریتم توزیع توان پیشنهادی فراهم شده است.

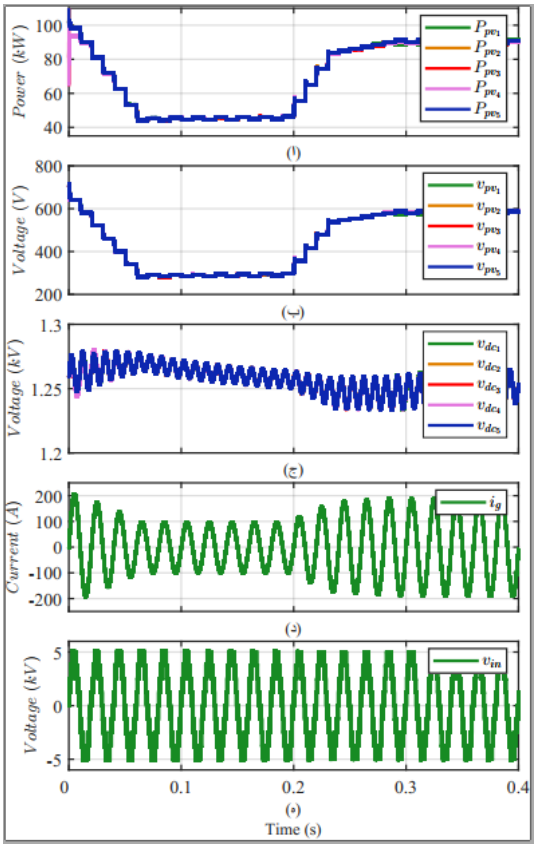
پس از تشخیص افزایش فرکانس شبکه در زمان ۰/۲ ثانیه، الگوریتم کنترل پیشنهادی با کاهش ولتاژ PV و جابه جا کردن نقطه عملیات در سمت چپ نقطه حداکثر توان (نقطه FPP_L در شکل ۲)، توان هر رشته PV را از ۸۵ کیلووات به ۴۰ کیلووات در کمتر از ۰/۰۵ ثانیه کاهش می‌دهد. مشاهده می‌شود تمام رشته‌های PV مرجع توان جدید را دنبال می‌کنند. علاوه بر این، ولتاژ لینک DC زیرماژول‌های مختلف تحت هر دو شرایط عملیاتی، با الگوریتم‌های تعادل انرژی بین زیرماژول‌های پیاده سازی‌شده، متعادل می‌شوند. جریان خروجی اینورتر در شکل ۷ (د)، پس از تشخیص افزایش فرکانس شبکه کاهش می‌یابد که کاهش توان تزریق‌شده به شبکه را تأیید می‌کند.

ولتاژ خروجی اینورتر CHB نیز در شکل ۷ (ه) نشان داده شده است که ولتاژ خروجی چند سطحی اینورتر را در هر دو شرایط کاری نشان می‌دهد.



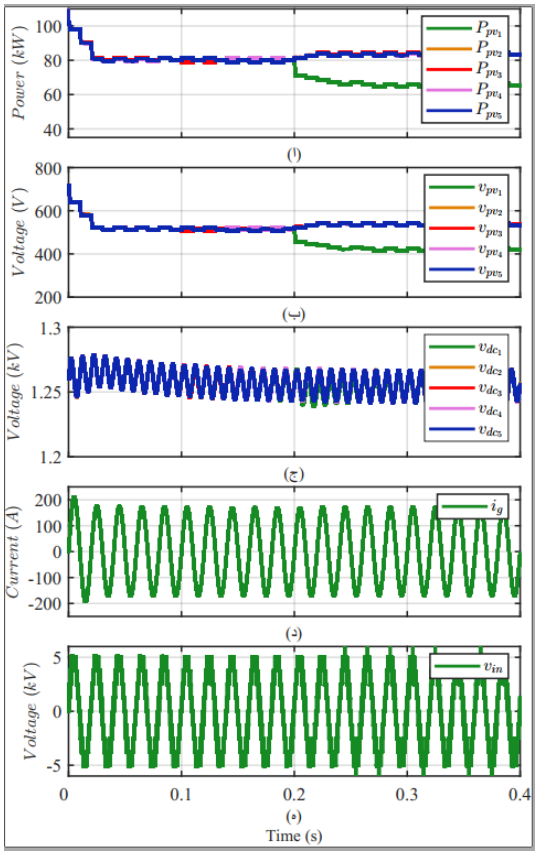
شکل (۷): عملکرد الگوریتم کنترل پیشنهادی تحت افزایش ناگهانی فرکانس شبکه: (ا) توان PV زیرماژول‌های اول تا پنجم؛ (ب) ولتاژ PV زیرماژول‌های اول تا پنجم؛ (ج) ولتاژ لینک DC زیرماژول‌های اول تا پنجم و (د) جریان خروجی اینورتر و (ه) ولتاژ خروجی اینورتر.

حالت دوم: در زمان ۰/۲ ثانیه مرجع توان سیستم P_{pv-ref} به‌طور ناگهانی افزایش داده می‌شود. در این مورد، مقادیر توان خروجی رشته‌های PV از مقدار ۴۵ کیلووات به ۹۰ کیلووات برای پشتیبانی از شبکه افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۸ (ج) و ۸ (د)، ولتاژهای خازن لینک DC در تمامی شرایط عملیاتی متعادل‌اند و پس از تشخیص کاهش فرکانس در شبکه، جریان تزریقی به شبکه افزایش می‌یابد.



شکل(۸): عملکرد الگوریتم کنترل پیشنهادی تحت کاهش ناگهانی فرکانس شبکه: (ا) توان PV زیرماژول‌های اول تا پنجم، (ب) ولتاژ PV زیرماژول‌های اول تا پنجم، (ج) ولتاژ لینک DC زیرماژول‌های اول تا پنجم، (د) جریان خروجی اینورتر و (ه) ولتاژ خروجی اینورتر.

حالت سوم: در این حالت مطالعه، قبل از زمان ۰٫۲ ثانیه، مقدار ذخیره توان ۱۰۰ کیلووات برای سیستم در نظر گرفته شده است. مطابق شکل (۹) قبل از زمان ۰/۲ ثانیه مقادیر توان خروجی رشته‌های PV مقدار ۸۰ کیلووات است و مقدار ذخیره ۱۰۰ کیلووات با توجه به توان سیستم (۵۰۰ کیلووات) فراهم شده است. در زمان ۰/۲ ثانیه، تابش زیرماژول اول از $1000\ W/m^2$ به $600\ W/m^2$ به‌طور ناگهانی کاهش می‌یابد؛ بنابراین، توان موجود زیرماژول اول از ۱۱۰ کیلووات به ٦٦ کیلووات کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه مقدار ذخیره ۱۰۰ کیلووات باید توسط سیستم فراهم شود؛ درنتیجه، مقادیر توان خروجی سایر زیرماژول‌ها از مقدار ۸۰ کیلووات به ۸۳٫۵ کیلووات افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۹ (ج)، ولتاژهای خازن لینک DC در تمامی شرایط عملیاتی متعادل‌اند.



شکل(۹): عملکرد الگوریتم کنترل پیشنهادی تحت کاهش ناگهانی تابش: (ا) توان PV زیرماژول‌های اول تا پنجم، (ب) ولتاژ PV زیرماژول‌های اول تا پنجم، (ج) ولتاژ لینک DC زیر ماژول‌های اول تا پنجم، (د) جریان خروجی اینورتر و (ه) ولتاژ خروجی اینورتر.

نتایج ارائه‌شده کارایی راه‌حل کنترل پیشنهادی را ازنظر دینامیک سریع، نوسانات توان پایین در حالت پایدار و دقت بالا برای سیستم PV متصل به شبکه را تأیید می‌کند. همچنین، با توجه به نتایج ارائه‌شده مشاهده می‌شود توان مورد نیاز سیستم به‌طور یکسان بین زیرماژول‌ها توزیع می‌شود؛ بنابراین، تعادل سیستم حفظ خواهد شد. نتایج ارائه‌شده تأیید می‌کند سیستم PV با کنترل پیاده‌سازی‌شده با سرعت بسیار بالا در تنظیم فرکانس شرکت می‌کند.

٤- نتیجه گیری

در این مقاله یک الگوریتم برای دستیابی به کنترل CPG براساس الگوریتم FPPT برای کنترل سیستم PV مبتنی بر CHB متصل به شبکه ارائه شده است. مرجع توان مورد نیاز برای سیستم بین زیرماژول‌ها براساس حداکثر توان موجود و محدودیت اعمال‌شده توسط پاسخ فرکانسی توزیع می‌شود. با الگوریتم پیشنهادی، مرجع توان مورد نیاز برای سیستم بین زیرماژول‌ها به گونه‌ای توزیع می‌شود تا بارگذاری بین همه مبدل‌های PV را متعادل کند و با کنترل هماهنگ همه مبدل‌ها ذخیره کل توان را حفظ کند و بنابراین، تعادل ولتاژ لینک DC حفظ شود. همچنین، استفاده از الگوریتم FPPT تطبیقی برای تنظیم توان در مقدار مرجع آن باعث دینامیک سریع خواهد شد. اثربخشی الگوریتم پیشنهادی با نتایج شبیه‌سازی تأیید شده است. نتایج شبیه‌سازی دینامیک سریع الگوریتم پیشنهادی و اعتبار آن را برای سیستم‌های PV در مقیاس متوسط و بزرگ نشان می‌دهند. براساس نتایج ارائه‌شده سیستم PV به‌سرعت و در کمتر از ۰/۰۵ ثانیه توان مرجع را دنبال می‌کند و در تنظیم فرکانس شرکت می‌کند. همچنین، نتایج ارائه‌شده گویای نوسانات توان پایین در حالت پایدارند.

مراجع

[1] M. A. Atefat, F. Jahanbani Ardakani, "Maximum Power Point Tracking of Solar System Using Improved Flower Pollination Algorithm", *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 49-60, 2021.

[2] REN21, "Renewables 2020: Global status report (GRS)", 2020. [Online]. Available: http://www.ren21.net/.

[3] Q. Bi, G. Zhou, and Q. Tian, "Improved Flexible Power Point Tracking Algorithm for PV System Under Fast-Changing Irradiance Conditions", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 38, No. 3, pp. 4061-4071, 2023.

[4] L. Cristaldi, M. Faifer, C. Laurano, R. Ottoboni, E. Petkovski, and S. Toscani, "Power Generation Control Algorithm for the Participation of Photovoltaic Panels in Network Stability", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 72, Art no. 9000809, pp. 1-9, 2023.

[5] R. Shah, N. Mithulananthan, R. Bansal, and V. Ramachandaramurthy, "A review of key power system stability challenges for large-scale PV integration", *Renewable and Sustain. Energy Reviews*, Vol. 41, pp. 1423-1436, 2015.

[6] IEEE recommended practice for interconnecting distributed resources with Electric Power Systems Distribution Secondary Networks, *IEEE Std 1547.6 (Revision IEEE Std 1547-2003)*, 2018.

[7] Energinet.dk, "Technical regulation 3.2.2 for PV power plants with a power output above 11 kW", Tech. Rep. Doc. 14/17997-39, 2015.

[8] M. Haghighat, M. Niroomand, and H. D. Tafti, "An adaptive power ramp rate control method for photovoltaic systems", *IEEE Journal of Photovoltaics*, pp. 1–8, 2021.

[9] S. Adhikari and F. Li, "Coordinated V-f and P-Q control of solar photovoltaic generators with MPPT and battery storage in microgrids", *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 5, No. 3, pp. 1270-1281, May 2014.

[10] A. Saez-de-Ibarra, A. Milo, H. Gaztanaga, V. Debusschere, and S. Bacha, "Co-optimization of storage system sizing and control strategy for intelligent photovoltaic power plants market integration", *IEEE Trans. Sustain. Energy*, Vol. 7, No. 4, pp. 1749–1761, 2016.

[11] H. Dehghani Tafti, G. Konstantinou, C. D. Townsend, G. G. Farivar, A. Sangwongwanich, Y. Yang, J. Pou, and F. Blaabjerg, "Extended functionalities of photovoltaic systems with flexible power point tracking: Recent advances", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 35, pp. 9342-9356, 2020.

[12] H. Dehghani Tafti, C. D. Townsend, G. Konstantinou, and J. Pou, "A multi-mode flexible power point tracking algorithm for photovoltaic power plants", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 34, No. 6, pp. 5038–5042, 2019.

[13] H. Dehghani Tafti, A. I. Maswood, G. Konstantinou, J. Pou, and F. Blaabjerg, "A general constant power generation algorithm for photovoltaic systems", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 33, No. 5, pp. 4088-4101, 2018.

[14] H. Dehghani Tafti, A. Sangwongwanich, Y. Yang, J. Pou, G. Konstantinou, and F. Blaabjerg, "An adaptive control scheme for flexible power point tracking in photovoltaic systems", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 34, pp. 5451-5463, Jun. 2019.

[15] H. Dehghani Tafti, A. I. Maswood, G. Konstantinou, C. D. Townsend, P. Acuna,

and J. Pou, "Flexible control of photovoltaic grid-connected cascaded H-bridge converters during unbalanced voltage sags", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 65, No. 8, pp. 6229-6238, 2018.

[16] Y. Pan, A. Sangwongwanich, Y. Yang, X. Liu, M. Liserre and F. Blaabjerg, "Flexible Active Power Control of Distributed Photovoltaic Systems With Integrated Battery Using Series Converter Configurations", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 10, No. 6, pp. 6891-6909, 2022.

[17] Y. Yu, G. Konstantinou, B. Hredzak, and V. G. Agelidis, "Power balance optimization of cascaded H-bridge multilevel converters for largescale photovoltaic integration", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 31, pp. 1108-1120, 2016.

[18] *IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*, IEEE Standard 1547, 2003.

---

[1] Photovoltaic
[2] Constant Power Generation
[3] Maximum Power Point Tracking
[4] Flexible Power Point Tracking
[5] Multilevel Converter
[6] Sub-modules
[7] Cascaded H-Bridge
[8] Feedforward