

Control and Protection of The Droop-Controlled Grid-Connected Solar Inverter with The Ability of FRT Under The Grid Voltage and Frequency Drop

Abdolhossein Saleh*

Electrical Engineering Department, Malayer University, Malayer, Iran
E-mail: hosein.saleh@malayeru.ac.ir

Abstract

In this paper a new control scheme is proposed to protect the two-stage grid-connected solar inverter with ability of Low Voltage Ride-Through (LVRT). In the proposed scheme, the power injection to the grid is regulated by controlling the voltage/frequency produced by the inverter. In the grid voltage drop condition, the solar inverter has the ability to inject reactive power into the grid in proportion to the voltage drop magnitude, and the inverter output voltage reference is determined by the droop control. To limit the inverter output current in the grid voltage drop condition, with the aim of maintaining the stability, a floating voltage drop characteristic has been proposed. Also, in the proposed scheme, a new integrated power tracking algorithm is presented, which in addition to tracking the maximum power in normal conditions, in the drop voltage conditions, if there is no empty capacity in the inverter to inject reactive power, it reduces the received power from the solar cells to allows the inverter to be protected against excessive current increase. The efficiency of the proposed method is shown by the time domain simulation in the MATLAB/SIMULINK environment and implementation in the way of processor in the loop.

Keywords

Grid-connected solar inverter, droop control, overcurrent protection, integrated power tracking algorithm, fault-ride through.

Introduction

In order to limit the output current of the inverters, there are two method: 1) the use of current limiting circuits at the output of the inverter and 2) the use of Fault Ride Through (FRT) methods. Current limiting circuits and saturation units are commonly used in current control loops. This combination may cause fluctuation of the output power of the inverter or instability. Therefore, it is better to protect against current increase with the help of controllers. Different control schemes proposed in state-of-the-art articles. In this article, a new control scheme is proposed to protect a two-stage grid connected solar inverter against overcurrent.

Proposed Work and Methodology

The proposed control scheme in this article included two main parts: i) a new solar arrays power tracking algorithm and ii) modified Droop controllers. The solar cell power tracking algorithm proposed in this article, in addition to tracking the maximum power in normal conditions, in the condition of voltage drop, if the inverter does not have empty capacity to inject reactive power corresponding to the voltage drop in the network, it will automatically reduce the power received from solar cells. It reduces in such a way that in addition to injecting more reactive power into the grid, the output current of the inverter does not exceed the allowed value and protects the inverter from increasing current. The used modified droop, in order to provide more accurate current protection, instead of reducing the voltage reference by increasing the reactive power, will decrease this reference signal by increasing the reactive current. To limit the output current of the inverter in the condition of high voltage drop of the grid, instead of changing the slope of the voltage drop characteristic, with the aim of maintaining stability, the width from the origin of this characteristic is reduced by use of a supplementary control signal. In order to show the effectiveness of the proposed control scheme, the simulation results in three case studies are presented and analyzed. In the first case study, the conditions of voltage drop in the grid are investigated in such a way that different voltage drops are applied in different time intervals. Also, in the process of voltage drop, sunlight is also changed. In the second case study, the condition of frequency drop in the grid along with the irradiation change will be investigated, and finally, in the third case study, the condition of simultaneous voltage and frequency drop will be investigated. Finally, the performance of the proposed control schemes is investigated by time-domain simulation and implementation by PIL method. In the PIL implementation method, the controllers are implemented on the STM32F407VG processor and the power circuit in the MATLAB/SIMULINK environment and the communication between them is established with serial communication. The output results show the appropriate and correct performance of the proposed methods.

Conclusion

In this paper, a new control scheme was presented for the control and protection of a grid-connected two-stage solar inverter in the V/F control mode with the ability to inject reactive power in the condition of grid voltage drop. The performance of the proposed control scheme was investigated with simulations and implementation using the PIL method. Different case studies were considered to demonstrate the effectiveness of the proposed control scheme. These case studies include voltage drop conditions, frequency drop conditions and simultaneous voltage and frequency drop conditions in the grid. The output results show the appropriate and correct performance of the proposed method.

کنترل و حفاظت اینورتر خورشیدی متصل به شبکه مجهز به کنترل دروپ با قابلیت گذر از خطای افت ولتاژ و افت فرکانس در شبکه

عبدالحسین صالح

استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

چکیده

در این مقاله طرح کنترلی جدیدی جهت حفاظت اینورتر خورشیدی دو طبقه‌ای متصل به شبکه با قابلیت گذر از خطا پیشنهاد می‌شود. در طرح پیشنهادی، تزریق توان به شبکه با کنترل ولتاژ/فرکانس تولیدی اینورتر تنظیم می‌گردد. در شرایط خطای افت ولتاژ در شبکه، اینورتر خورشیدی توانایی تزریق توان راکتیو به شبکه را متناسب با میزان افت ولتاژ دارد و مرجع اندازه ولتاژ خروجی اینورتر توسط کنترل دروپ تعیین می‌شود. جهت محدود کردن جریان خروجی اینورتر در شرایط افت ولتاژ شبکه، با هدف حفظ پایداری، مشخصه افی ولتاژ شناور پیشنهاد شده است. در طرح پیشنهادی یک الگوریتم ردیابی توان یکپارچه جدید نیز ارائه شده است که علاوه بر ردیابی حداکثر توان در شرایط عادی، در شرایط افت ولتاژ در صورت عدم وجود ظرفیت خالی در اینورتر برای تزریق توان راکتیو، توان دریافتی از سلول‌های خورشیدی را چنان کاهش می‌دهد که اینورتر در برابر افزایش جریان بیش از حد محافظت گردد. کارایی روش پیشنهادی به کمک شبیه سازی در نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK و پیاده سازی به شیوه پردازنده در حلقه نشان داده می‌شود.

کلمات کلیدی

اینورتر خورشیدی متصل به شبکه، کنترل دروپ، حفاظت جریان زیاد، الگوریتم ردیابی توان یکپارچه، قابلیت گذر از خطا.

نام نویسنده مسئول: عبدالحسین صالح

ایمیل نویسنده مسئول: hosein.saleh@malayeru.ac.ir

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۲۶

تاریخ(های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۰۷

۱- مقدمه

شرایط شبکه قدرت که یک شبکه اهمی باشد و یا یک شبکه سلفی می‌تواند تبدیل به دو سیستم تک-ورودی تک-خروجی گردد [۲]. در خصوص منابع تولید پراکنده متصل به شبکه علاوه بر پایداری سیستم تحت کنترل دروپ [۳-۵] حفاظت این منابع در برابر افزایش جریان تحت شرایط افت فرکانس/ولتاژ در شبکه نیز بایستی مورد توجه قرار گیرد [۶-۱۰]. به منظور محدود کردن جریان خروجی این منابع دو راهکار وجود دارد: ۱) استفاده از مدارات محدود کننده جریان در خروجی منبع [۱۱] و ۲) استفاده از روش‌های گذر از خطا (FRT^۱) [۱۳، ۱۲]. مدارات محدود کننده جریان و واحدهای اشباع کننده معمولاً به همراه حلقه‌های کنترل جریان مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ترکیب ممکن است سبب نوسان توان خروجی منبع و یا ناپایداری گردد [۱۴]. بنابراین مطلوب است که به کمک کنترل کننده‌ها حفاظت در برابر افزایش جریان انجام شود. در مرجع [۱۵] یک روش محدود سازی جریان بر مبنای کنترل دروپ برای اینورتر تکفاز متصل به شبکه ارائه شده است که در شرایط عادی و شرایط خطا، هدف کنترل جریان و محافظت را برآورده می‌سازد. در مرجع [۱۶] با ایجاد قابلیت گذر از ولتاژ کم (LVRT^۲) در یک اینورتر خورشیدی متصل به شبکه مجهز به کنترل دروپ اصلاح شده، حفاظت در برابر افزایش جریان در شرایط غیرعادی ولتاژ شبکه رقم خورده است. در [۱۷] نویسندگان به منظور حفاظت اینورتر متصل به شبکه، کنترل دروپ را به گونه ای اصلاح کرده‌اند که مشخصه های P- ω و Q-V شناور بوده و با کاهش عرض از مبدأ این مشخصه‌ها در شرایط افزایش توان خروجی اینورتر، کنترل توان و محدودسازی آن صورت می‌گیرد. البته قابل ذکر است در این مرجع جریان

امروزه نفوذ نیروگاه‌های خورشیدی در سیستم‌های قدرت به عنوان یک منبع تولید انرژی الکتریکی از منابع تجدیدپذیر رو به افزایش است. پایداری سیستم‌های قدرت به دلیل وابسته بودن تولید توان این نیروگاه‌ها به شرایط آب و هوایی تحت تأثیر قرار می‌گیرد و در صورت عدم کنترل مناسب توان تولیدی آن‌ها ممکن است سبب ناپایداری و نوسان توان در شبکه گردند. این در حالی است که اگر این منابع به درستی و تحت کنترل کننده‌های مناسبی مورد بهره‌برداری قرار گیرند می‌توانند شبکه را در زمان رخداد شرایط اضطراری مانند شرایط افت فرکانس و/یا افت اندازه ولتاژ حمایت نمایند. به طور معمول نیروگاه‌های خورشیدی متصل به شبکه در مد کنترل PQ مورد بهره برداری قرار می‌گیرند. به عبارتی تحت ولتاژ و فرکانس شبکه به تزریق توان اکتیو و راکتیو به شبکه می‌پردازند. اما در این مد عملکردی در صورتی که در شبکه به دلیل کمبود توان اکتیو/راکتیو افت فرکانس/ولتاژ رخ دهد، این منابع نمی‌توانند شبکه را تحت این شرایط حمایت نمایند. راهکارهایی برای این مسئله در مقالات دیده شده است. مکانیسم کنترل دروپ به منظور شرکت دادن منابع تولید پراکنده در تأمین بخشی از تقاضای جدید توان اکتیو/راکتیو در شرایط گذرا تا قبل از تعیین میزان سهم هر نیروگاه از میزان تقاضای جدید طی یک توزیع بهینه تولید توسط کنترل سطح بالاتر، استفاده می‌گردد [۱]. در واقع هدف از به کارگیری این کنترل حفظ پایداری سیستم در شرایط گذرا می‌باشد تا زمانی که مقادیر مرجع توان توسط کنترل سطح بالاتر تعیین گردد. کنترل دروپ یک سیستم دو-ورودی دو-خروجی می‌باشد. این کنترل بسته به

² Low Voltage Ride Through

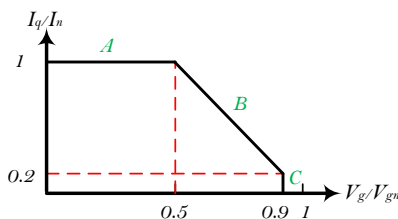
¹ Fault Ride Through

LCL [۱۸] و یک خط به شبکه بالادستی با ولتاژ ۴۰۰ V

جدول ۱- پارامترهای مختلف ساختار اینورتر خورشیدی و شبکه

توضیحات	اندازه	پارامتر
آرایه های خورشیدی		
حداکثر توان	≈ ۱۰۰ kW	P _{MPPT}
ولتاژ نقطه MPP	۲۷۳/۵ V	V _{mpp}
جریان نقطه MPP	۳۶۸/۲۸ A	I _{mpp}
مبدل افزایش دهنده		
خازن ورودی	μ ۱۰۰۰ F	C _{in}
خازن های خروجی	μ ۱۲۰۰ F	C _{out1} , C _{out2}
فرکانس کلیدزنی	۲۰ kHz	f _{sw}
اینورتر و فیلتر		
فرکانس کلیدزنی	۱۵ kHz	f _{sw}
	۸۰۰ V	V _{DC}
	μ ۲/۳۲۵ H	L _{f1}
	μ ۷ H	L _{f2}
	μ ۱۰۰ F	C _f
شبکه و خط		
	۴۰۰ V	V _{L-L}
	۵۰ Hz	f
	۰/۰۶+j۰/۴۷۱	Z _l

قابلیت گذر از خطا براساس کدهای شبکه بایستی تزیق نماید مشخص می شود. با توجه به جریان نامی اینورتر، میزان جریان اکتیو (I_a) قلیل تولید در این شرایط مشخص و توان اکتیوی که بایستی در این شرایط از آرایه های خورشیدی دریافت شود تعیین می گردد. در شکل ۲ نمودار جریان راکتیو مقرر شده تزیقی به شبکه توسط اینورتر خورشیدی بر حسب عمق افت ولتاژ در شبکه نشان داده شده است [۱۹]. این نمودار دارای سه بخش می باشد: (۱) ناحیه C شرایط عادی شبکه را نشان می دهد. تا زمانی که ولتاژ در شبکه بیشتر از ۰/۹ بر واحد باشد، لزومی به تزیق جریان راکتیو وجود ندارد؛ (۲) ناحیه B میزانی از تزیق جریان راکتیو را بر اساس میزان ولتاژ تا افت ولتاژ ۰/۵ بر واحد مشخص می کند؛ و (۳) ناحیه A بحرانی ترین ناحیه است که از افت ولتاژهای بیشتر از ۰/۵ بر واحد شروع می شود و بایستی همه ظرفیت اینورتر به تزیق توان راکتیو اختصاص یابد.



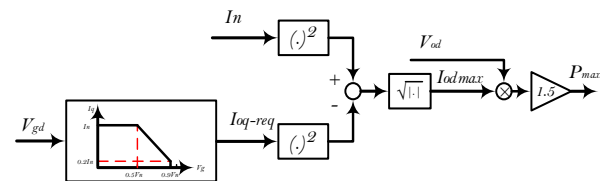
شکل ۲- نمودار جریان راکتیو تزیقی اینورتر خورشیدی بر اساس عمق افت ولتاژ شبکه

حداکثر توان اکتیو قابل تزیق توسط اینورتر خورشیدی که با توجه به شرایط شبکه توسط الگوریتم ردیابی توان مشخص می شود طبق رابطه (۱) و مطابق دیاگرام نشان داده شده در شکل ۳ تعیین می گردد.

$$P_{max} = \frac{3}{2} V_{gd} * I_{dmax}$$

$$I_{dmax} = \sqrt{I_n^2 - I_{q-req}^2}$$

$$I_{q-req} = \begin{cases} 0 & V_{gd} > 0.9 p.u. \\ 0.2I_n - 2 \frac{I_n}{V_n} (V_{gd} - 0.9V_{gdn}) & 0.5 < V_{gd} < 0.9 p.u. \\ I_n & V_{gd} < 0.5 \end{cases} \quad (1)$$



شکل ۳- دیاگرام محاسبه کننده حداکثر توان اکتیو قابل تزیق توسط اینورتر خورشیدی

این میزان حداکثر توان اکتیو قابل تزیق توسط اینورتر خورشیدی می تواند دو حالت داشته باشد: یا بزرگتر مساوی حداکثر توانی است که در حال حاضر توسط آرایه های خورشیدی قابل تولید است و یا کمتر از آن می باشد. در صورتی که بزرگتر مساوی باشد نتیجه می شود که اینورتر دارای ظرفیت کافی برای تزیق جریان راکتیو جدید را دارد و همزمان که حداکثر توان بایستی از آرایه های خورشیدی دریافت و به شبکه تزیق شود، جریان راکتیو لازم نیز تزیق می گردد و اینورتر دچار اضافه جریان نخواهد شد. اما در حالتی که کمتر باشد بدین معناست که حداکثر توانی که توسط آرایه های خورشیدی تولید و به شبکه تزیق می شود بایستی محدود گردد و به میزان تعیین شده توسط الگوریتم کاهش یابد تا ظرفیت اینورتر برای تولید و تزیق جریان راکتیو مورد نیاز شبکه آزاد شود. در این حالت بایستی دیوتی سایکل مبدل DC/DC افزایش دهنده چنان

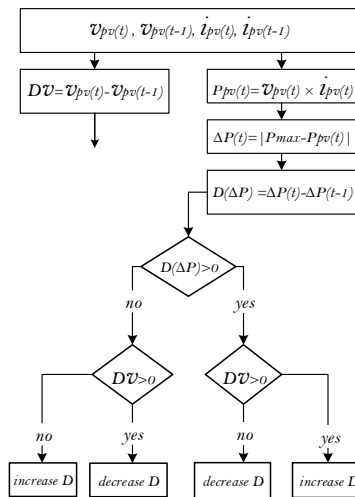
و فرکانس ۵۰ Hz متصل شده است. پارامترهای مختلف این ساختار در جدول ۱ آورده شده است.

۳- طرح کنترلی پیشنهادی

در این بخش به ارائه و تشریح کامل زیربخش های طرح کنترلی پیشنهادی پرداخته می شود. طرح کنترلی مورد استفاده در این مقاله دارای سه بخش زیر شامل (۱) الگوریتم ردیابی توان یکپارچه پیشنهادی، (۲) کنترل کننده دروپ ولتاژ-جریان راکتیو و فرکانس- جریان اکتیو پیشنهادی و (۳) کنترل کننده داخلی متداول می باشد.

۳-۱- الگوریتم ردیابی توان یکپارچه پیشنهادی

اینورترهای خورشیدی متصل به شبکه به طور معمول به گونه ای کنترل می شوند که حداکثر توان قابل استحصال از سلول های خورشیدی را به شبکه تزیق نمایند. زمانی که اینورتر خورشیدی با قابلیت گذر از خطا با تمام ظرفیت خود در حال تزیق توان می باشد دیگر امکان تزیق توان راکتیو در شرایط افت ولتاژ در شبکه را نخواهد داشت. به کمک الگوریتم ردیابی توان، میزان توان مورد نیاز از سلول های خورشیدی دریافت می شود که ممکن است با توجه به شرایط افت ولتاژ و عدم وجود ظرفیت کافی در اینورتر برای تزیق همزمان توان راکتیو، توانی غیر از حداکثر توان قلیل تولید توسط آرایه های خورشیدی باشد. این کاهش میزان توان دریافتی از آرایه های خورشیدی به منظور آزاد کردن بخشی از ظرفیت اینورتر برای تولید توان راکتیو مورد نیاز شبکه می باشد. در الگوریتم ردیابی توان پیشنهادی با توجه به عمق افت ولتاژ در شبکه، میزان جریان راکتیوی (I_q) که اینورتر خورشیدی بر اساس الزامات



شکل ۶- فلوجارت الگوریتم ردیابی توان یکپارچه پیشنهادی

متناظر با نقطه حداکثر توان در نظر گرفته می‌شود به گونه ای که بر روی توان خروجی آرایه تأثیر منفی نداشته و تنها منجر به جلوگیری از ردیابی نامناسب نقطه کار گردد. همچنین به منظور آن که در حوالی نقطه کار مطلوب شکل ۵ (ب) با توجه به تغییرات شدید ΔP نسبت به تغییرات دیوتی سایکل نوسان توان کاهش یابد، در حوالی این نقطه کار پله های تغییر دیوتی سایکل به طور خودکار کوچک انتخاب می‌گردد.

۳-۲- کنترل کننده دروپ فرکانس - جریان اکتیو (i_a- ω) و ولتاژ -

جریان راکتیو (i_q- v) شناور پیشنهادی

در طرح کنترلی به کار گرفته شده در این مقاله تزریق توان اکتیو و راکتیو به شبکه با استفاده از تنظیم ولتاژ و فرکانس تولیدی اینورتر خورشیدی صورت می‌پذیرد چرا که این روش امکان گذر از حالت عملکرد متصل به شبکه به حالت عملکرد جزیره‌ای را با کمترین نوسانات حالت گذرا فراهم می‌آورد. بنابراین مقادیر مرجع برای فرکانس (ω_{ref}) و ولتاژ تولیدی (v_o) توسط اینورتر بایستی توسط کنترل کننده سطح بالاتر تعیین گردد. تعیین این مقادیر مرجع با استفاده از کنترل کننده‌های دروپ اصلاح شده صورت می‌گیرد. اصلاحاتی که به منظور ایجاد قابلیت حفاظت اینورتر خورشیدی متصل به شبکه در حالت گذر از خطای افت ولتاژ و فرکانس شبکه بر روی کنترل کننده دروپ متداول در این مقاله صورت می‌گیرد در زیر تشریح می‌گردد.

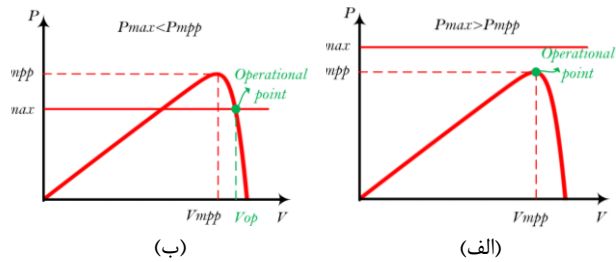
الف) تغییر مشخصه‌های دروپ $\omega - p_g$ و $v - q_g$ متداول به ترتیب به

مشخصه‌های دروپ $\omega - i_q$ و $v - i_d$

با توجه به آن که افزایش جریان در اینورتر خورشیدی بایستی مورد حفاظت قرار گیرد در مشخصه‌های دروپ $\omega - p_g$ و $v - q_g$ به جای p_g و q_g به ترتیب i_{gd} و i_{gq} جایگزین می‌گردد و مشخصه‌های دروپ به $\omega - i_{gd}$ و $v - i_{gq}$ تحت یک نگاشت خطی تبدیل می‌شوند. زیرا در زمان خطای افت ولتاژ به دلیل کاهش سطح ولتاژ میزان توان ممکن است افزایش زیادی نداشته باشد و این در حالیست که جریان ممکن است به شدت بالا رفته باشد و این مورد توسط مشخصه دروپ متداول دیده نمی‌شود. روابط دروپ تحت این اصلاح در معادلات (۲) و (۳) آورده شده‌اند.

در رابطه (۲) مقدار مرجع میزان جریان اکتیوی است که توسط اینورتر خورشیدی به شبکه تزریق می‌گردد و متناسب با توانی است که از آرایه‌های خورشیدی توسط مبدل DC/DC افزایش یافته دریافت می‌شود. این مقدار مرجع با

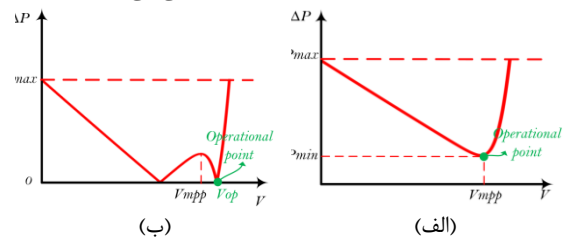
تغییر نماید که توان دریافتی از آرایه‌های خورشیدی مطابق با مقدار تعیین شده باشد. شکل ۴ دو حالت فوق و نقطه کار مناسب آرایه خورشیدی را نشان می‌دهد.



شکل ۴- نمودار P-V آرایه خورشیدی و نقطه کار آن در شرایط: (الف) $P_{max} < P_{mpp}$ و (ب) $P_{max} > P_{mpp}$

در الگوریتم ردیابی توان یکپارچه پیشنهادی به منظور آنکه همانند روش‌های پیشنهادی در مقالات [۱۳] و [۲۰] نیاز به تفکیک بین دو حالت $P_{max} < P_{mpp}$ و $P_{max} > P_{mpp}$ نباشد، ضمن آن که توان متناسب نیز ردیابی شود، مشخصه P-V جدیدی از روی نمودارهای ارائه شده در شکل ۴ (الف) و (ب) که در شکل ۵ نشان داده شده است استخراج می‌شود. مشخصه نشان داده شده در این شکل از قدر مطلق تفاضل میان P_{max} و مشخصه P-V آرایه خورشیدی حاصل می‌شود و محور عمودی آن $\Delta P = |P_{max} - P|$ می‌باشد که در حالت $P_{max} > P_{mpp}$ دارای یک نقطه کمینه با مقدار بزرگتر مساوی صفر و در حالت $P_{max} < P_{mpp}$ دارای دو نقطه کمینه برابر صفر می‌باشد.

همانطور که از مشخصه ΔP -V آرایه خورشیدی در شکل ۵ مشاهده می‌شود نقطه کار آرایه در هر دو حالت مورد بررسی بر اساس فلوجارت الگوریتم پیشنهادی که در شکل ۶ آورده شده است قابل ردیابی می‌باشد.



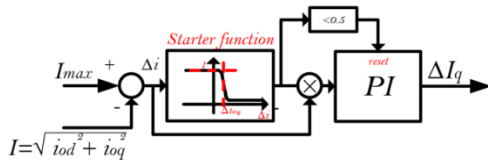
شکل ۵- نمودار ΔP -V آرایه خورشیدی و نقطه کار آن در شرایط:

(الف) $P_{max} > P_{mpp}$ و (ب) $P_{max} < P_{mpp}$

برای ردیابی نقطه کار مطلوب در هر دو حالت، الگوریتم پیشنهادی با افزایش ولتاژ دو سر آرایه تغییرات ΔP را اندازه‌گیری می‌کند. در صورتی که ΔP کاهش یابد یعنی نقطه کار فعلی آرایه در سمت چپ نقطه کار مطلوب قرار دارد و بایستی ولتاژ همچنان افزایش یابد و اگر ΔP افزایش یابد به معنی آن است که در سمت راست نقطه کار مطلوب قرار گرفته است و بایستی ولتاژ دو سر آرایه کاهش یابد. همچنین در صورتی که با کاهش ولتاژ دو سر آرایه ΔP کاهش یابد یعنی نقطه کار در سمت راست و در صورتی که افزایش یابد یعنی در سمت چپ نقطه کار مطلوب قرار دارد که در حالت اول بایستی همچنان ولتاژ دو سر آرایه تا رسیدن به نقطه کار مطلوب کاهش و در حالت دوم بایستی افزایش یابد. قابل ذکر است که در مشخصه شکل ۵ (ب) نقطه کار دیگری با ولتاژ کمتر نیز موجود است که توان متناسب را نتیجه می‌دهد اما به دلیل ولتاژ پایین‌تر، نقطه کار مناسبی نمی‌باشد. برای جلوگیری از ردیابی نقطه کار با ولتاژ کمتر در زمان انتقال مشخصه شکل (الف) به مشخصه شکل ۵ (ب) در حین خطا، مقدار دیوتی سایکل همواره به میزان کوچکی کمتر از مقدار

نمودن جریان راکتیو تزریقی به شبکه کاهش می‌یابد. به منظور تنظیم میزان کاهش عرض از مبدأ مشخصه، یک سیگنال کنترلی تکمیلی ΔI_q مطابق شکل ۹ طی پردازش‌هایی که بر روی اختلاف میان قله جریان خروجی اینورتر ($I = \sqrt{i_{od}^2 + i_{oq}^2}$) و ماکزیمم جریان مجاز (I_{max}) صورت می‌پذیرد، تولید می‌گردد. ΔI_q رابطه (۳) را به رابطه (۴) تغییر می‌دهد. همانطور که در این رابطه مشاهده می‌شود سیگنال کنترلی تکمیلی ΔI_q سبب پایین آمدن نمودار مانند شکل ۸ (ب) شده است.

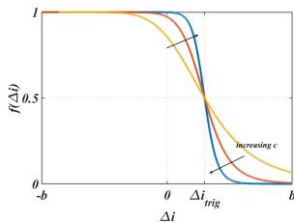
$$\begin{aligned} v &= v_0 - n_{iq}(i_{gq} - i_{gq}^* + \Delta I_q) \\ &= \frac{v_0 + n_{iq}i_{gq}^*}{v'} - n_{iq}\Delta I_q - n_{iq}i_{gq} \\ &= (v' - n_{iq}\Delta I_q) - n_{iq}i_{gq} \end{aligned} \quad (4)$$



شکل ۹- تولید سیگنال کنترلی تکمیلی کاهش دهنده عرض از مبدأ مشخصه دروپ با هدف محدود کردن جریان خروجی اینورتر در زمان خطای افت ولتاژ و تزریق جریان راکتیو به شبکه

همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود سیگنال کنترلی ΔI_q با عبور دادن سیگنال خطای Δi از یک کنترل کننده تناسبی- انتگرالی (PI) حاصل می‌شود. به منظور آنکه سیگنال کنترلی تکمیلی ΔI_q تا قبل از رسیدن جریان خروجی اینورتر به مقدار بیشینه خود اجازه افزایش جریان راکتیو را به اینورتر بدهد سیگنال خطای Δi قبل از ورود به کنترل کننده PI از یک تابع راه انداز که تابع آن در رابطه (۵) آورده شده عبور می‌کند. این تابع راه‌انداز تا زمانی که Δi بزرگتر از یک مقدار حدقلبی باشد و جریان تا رسیدن به مقدار بیشینه خود فاصله دارد خروجی صفر خواهد داد و در صورتی که Δi از حد Δi_{trig} کمتر باشد خروجی برابر یک خواهد داد. قابل ذکر است که این تابع مانند یک سوئیچ عمل می‌کند با این تفاوت که عمل انتقال از یک حالت به حالت دیگر می‌تواند بسیار نرم صورت گیرد. با استفاده از این قابلیت تابع راه‌انداز انتخاب شده می‌توان عمل محدود کردن جریان را قبل از رسیدن جریان به مقدار بیشینه خود شروع کرد به گونه‌ای که بالازدگی جریان خروجی به کمک این مشخصه دروپ بهبود یافته کنترل گردد.

$$f(\Delta i) = \frac{1}{1 + \frac{(b - \Delta i_{trig})c}{\Delta i}} \quad (5)$$



شکل ۱۰- تابع راه‌انداز

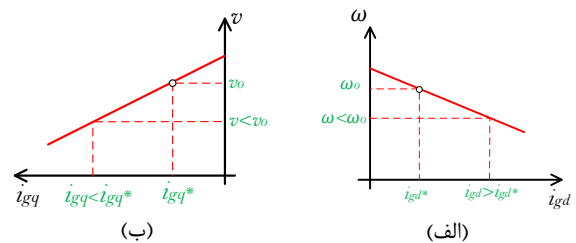
کنترل کننده PI به واسطه داشتن انتگرال گیر با وجود آن که سیگنال خطای ورودی اش صفر شده است در صورتی که بازنشانی نشود آخرین مقدار خروجی خود را نگه می‌دارد. بنابراین خروجی کنترل کننده PI در زمانی که جریان اینورتر از مقدار بیشینه خود فاصله می‌گیرد به مقدار صفر بازنشانی می‌گردد. زیرا در این شرایط سیگنال کنترلی تکمیلی ΔI_q مورد نیاز نیست و بایستی مقدار آن صفر گردد.

کنترل سطح ولتاژ لینک DC خازنی توسط یک کنترل کننده PI تعیین می‌شود. در این رابطه ω_0 برابر فرکانس شبکه ω_g انتخاب می‌شود. در این حالت با تغییرات فرکانس در شبکه، مرجع جریان اکتیو به درستی دنبال می‌شود و مانع از تغییر ولتاژ لینک خازنی در حالت ماندگار و ناپایدار شدن سیستم می‌گردد. در رابطه (۳) نیز مقدار مرجع میزان جریان راکتیوی است که در حالت ماندگار می‌تواند توسط اینورتر خورشیدی به شبکه تزریق گردد. این مقدار مرجع توسط اپراتور شبکه و از روی توان راکتیو مورد نیازی که در حالت ماندگار بایستی توسط اینورتر خورشیدی به شبکه تزریق گردد تعیین می‌شود که معمولاً برابر صفر در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{aligned} \omega &= \omega_0 - m_p(p_g - p_g^*) = \omega_0 - m_p\left(\frac{3}{2}v_{od}\right)(i_{gd} - i_{gd}^*) = \\ &= \omega_0 - m_{id}(i_{gd} - i_{gd}^*) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} v &= v_0 - n_q(q_g - q_g^*) = v_0 - n_q\left(-\frac{3}{2}v_{od}\right)(i_{gq} - i_{gq}^*) = \\ &= v_0 - n_{iq}(i_{gq} - i_{gq}^*) \end{aligned} \quad (3)$$

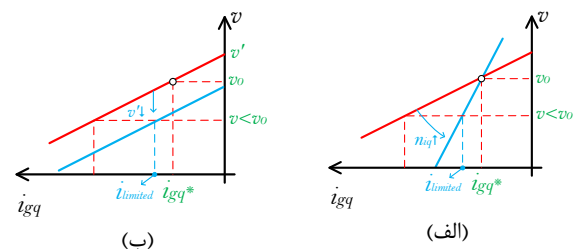
مشخصه‌های دروپ مربوط به روابط (۲) و (۳) در شکل ۷ نشان داده شده اند.



شکل ۷- مشخصه‌های دروپ (الف) $\omega - i_{gd}$ و (ب) $v - i_{gq}$

ب) شناور نمودن مشخصه دروپ $v - i_{gq}$ در شرایط تزریق جریان راکتیو و محدود کردن جریان تزریقی

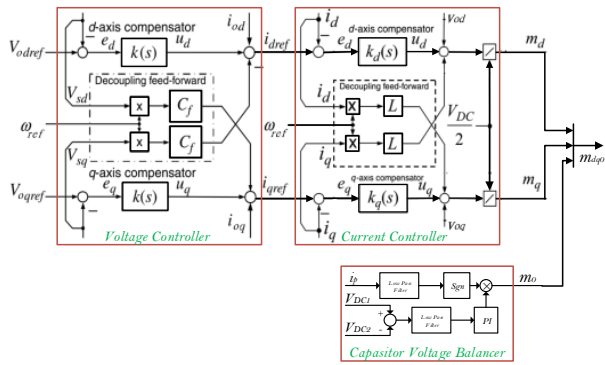
در حالی که در شبکه افت ولتاژ اتفاق افتد جریان راکتیو کشیده شده از اینورتر خورشیدی به دلیل ایجاد اختلاف بین اندازه ولتاژ خروجی اینورتر و ولتاژ شبکه افزایش می‌یابد ($|V_o| > |V_g|$). همانطور که در شکل ۷ (ب) مشاهده می‌شود بر اساس مشخصه دروپ مورد استفاده با افزایش اندازه جریان راکتیو خروجی اینورتر، کنترل کننده دروپ ولتاژ خروجی اینورتر را کاهش داده تا این افزایش جریان راکتیو خروجی متناسب با ظرفیت اینورتر افزایش یابد. به منظور محدود کردن افزایش جریان راکتیو خروجی اینورتر به کمک کنترل کننده دروپ دو راهکار وجود دارد: (۱) افزایش شیب مشخصه دروپ $v - i_{gq}$ و (۲) کاهش عرض از مبدأ و شناور کردن مشخصه $v - i_{gq}$ که در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸- محدود کردن جریان به کمک مشخصه دروپ با: (الف) افزایش شیب مشخصه و (ب) کاهش عرض از مبدأ مشخصه

پایداری سیستم تحت کنترل دروپ، حساسیت زیادی نسبت به شیب مشخصه دروپ (n_{iq}) دارد و ممکن است با افزایش شیب، سیستم ناپایدار گردد [۲۱]. بنابراین در روش پیشنهادی عرض از مبدأ مشخصه به منظور محدود

مرجع را برای حلقه کنترل جریان فراهم می‌سازد و در نهایت کنترل کننده جریان مقادیر مولفه‌های d و q اندیس مدولاسیون (m_{dq}) را تولید می‌کند. همچنین در ساختار اینورتر خورشیدی مورد استفاده در این مقاله چون از اینورتر سه سطحی استفاده شده است کنترل ولتاژ خازن‌های لینک DC نیز بایستی مورد توجه قرار گیرد به گونه‌ای که در روند بهره‌برداری اینورتر خورشیدی، ولتاژ این خازن‌ها همواره با یکدیگر برابر باشد. این کنترل مولفه صفر اندیس مدولاسیون (m_0) را ایجاد می‌کند.



شکل ۱۳- کنترل کننده داخلی

۴- نتایج شبیه سازی و پیاده سازی به روش PIL

در این بخش نتایج شبیه سازی و پیاده سازی به روش PIL ارائه می‌گردد. شبیه سازی‌ها به کمک محیط Simulink نرم افزار MATLAB انجام شده است. در این شبیه سازی‌ها از مدل سوئیچ‌زنی مبدل افزایشنده DC-DC و اینورتر استفاده شده است.

به منظور پیاده سازی کنترل کننده‌های ارائه شده به روش PIL، مدار قدرت اینورتر خورشیدی در محیط Simulink نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی شده است و کنترل کننده‌ها بر روی پردازنده STM32F407VG برنامه‌ریزی شده است. ارتباط بین پردازنده و نرم‌افزار MATLAB با استفاده از درگاه ارتباط سریال برقرار شده است.

۴-۱- نتایج شبیه سازی

به منظور نشان دادن کارایی طرح کنترلی پیشنهادی نتایج شبیه سازی در سه مطالعه موردی در این بخش ارائه و مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در مطالعه موردی اول شرایط افت ولتاژ در شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد به گونه‌ای که در فواصل زمانی مختلف افت ولتاژهای مختلفی اعمال می‌گردد. همچنین روند افت ولتاژها تابش نور خورشید نیز تغییر داده می‌شود. در مطالعه موردی دوم شرایط افت فرکانس در شبکه به همراه تغییر تابش و در نهایت در مطالعه موردی سوم شرایط افت همزمان ولتاژ و فرکانس مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در نتایج شبیه سازی ولتاژها بر حسب ولت (V)، جریان‌ها بر حسب آمپر (A)، توان‌ها بر حسب وات (W) و فرکانس بر حسب رادیان بر ثانیه (rad/s) می‌باشد.

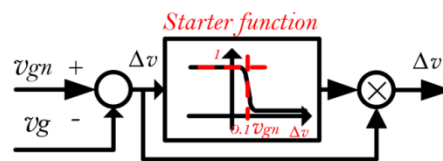
الف) شرایط افت ولتاژ در شبکه

در این مطالعه موردی به بررسی افت‌های ولتاژ پی در پی در شبکه و عملکرد اینورتر خورشیدی تحت این شرایط پرداخته شده است. افت ولتاژهای اعمال شده در زمان‌های ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ ثانیه به ترتیب ۲۰V، ۱۰۰V، ۵۰V و ۱۵۰V می‌باشد و در نهایت در زمان ۳/۵ ثانیه ولتاژ شبکه به حالت عادی خود برمی‌گردد. به منظور بررسی عملکرد سیستم و همچنین طرح کنترلی پیشنهادی نتایج شبیه سازی در سه سناریوی مختلف زیر ارائه می‌شود:

ج) جلوگیری از تزریق جریان راکتیو در افت ولتاژهای کم با استفاده از سیگنال پیشخور افت ولتاژ

با افت ولتاژ در شبکه و ایجاد اختلاف در اندازه ولتاژ خروجی اینورتر و اندازه ولتاژ شبکه، جریان راکتیوی حتی در افت ولتاژهای کمتر از ۰/۱ p.u. از اینورتر طبق مشخصه دروپ مورد استفاده مطابق رابطه (۴) کشیده خواهد شد. این در حالیست که مطابق نمودار شکل ۲ در ولتاژهای بالای ۰/۹ p.u. نیازی به تزریق جریان راکتیو توسط اینورتر خورشیدی به شبکه نیست. به منظور جلوگیری از این تزریق جریان، میزان این افت ولتاژها به عنوان یک سیگنال پیشخور به کمک دیاگرام بلوکی شکل ۱۱ تولید و رابطه (۴) را به شکل رابطه (۶) تغییر می‌دهد. تابع راه‌انداز مورد استفاده همانند تابع داده شده در رابطه (۵) می‌باشد.

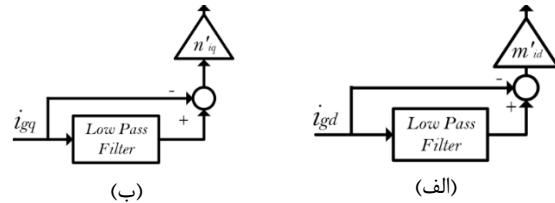
$$v = (v' - n_{iq}\Delta I_q - \Delta v) - n_{iq}i_{gq} \quad ; \quad (\Delta v = 0 \text{ if } v_g < 0.9 \text{ p.u.}) \quad (6)$$



شکل ۱۱- دیاگرام بلوکی تولید سیگنال پیشخور افت ولتاژ

د) محدود کردن نوسان جریان‌های i_{gd} و i_{gq} در حالت‌های گذرا

به منظور میرا کردن نوسان‌های جریان‌های تحت کنترل i_{gd} و i_{gq} در زمان‌های گذرا، مقادیر لحظه‌ای این کمیت‌ها با مقادیر فیلتر شده آن‌ها مقایسه شده و به کمک یک کنترل کننده تناسبی با ضریب مناسب m'_{id} و n'_{iq} به رابطه مربوط به کنترل کننده دروپ مورد استفاده اضافه می‌شود. این جملات اضافه شده تنها در بازه‌های زمانی حالت گذرا مقدار دارند و در حالت دائمی مقادیرشان صفر بوده و تأثیری بر مشخصه کنترل دروپ در حالت دائم ندارند. حلقه کنترلی مربوطه در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود. روابط نهایی دروپ تحت این بهبود در معادلات (۷) و (۸) نمایش داده شده‌اند.



شکل ۱۲- حلقه‌های کنترلی محدود کننده نوسانات (الف): i_{gd} و (ب): i_{gq} در حالت گذرا

$$\omega = \omega_0 - m_{id}(i_{gd} - i_{gd}^*) + m'_{id}(I_{gd} - i_{gd}) \quad (7)$$

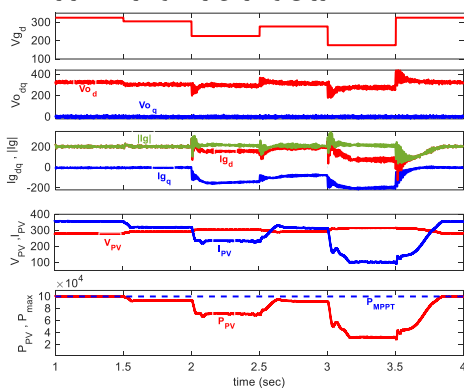
$$v = (v' - n_{iq}\Delta I_q - \Delta v) - n_{iq}i_{gq} + n'_{iq}(I_{gq} - i_{gq}) \quad (8)$$

در روابط بالا I_{gd} و I_{gq} به ترتیب سیگنال‌های فیلتر شده i_{gd} و i_{gq} می‌باشند. همچنین در رابطه (۸) $n'_{iq} < 0$ همچنان که $n_{iq} < 0$

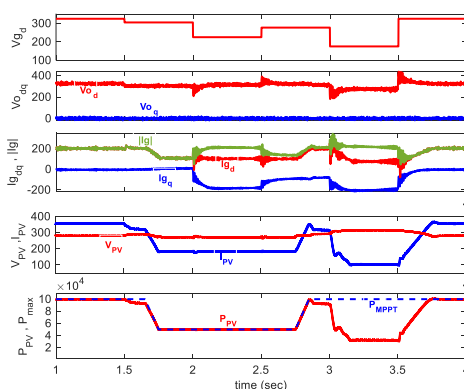
۳-۳- کنترل کننده داخلی

مقادیر مرجع ولتاژ (v_{ref}) و فرکانس (ω_{ref}) که توسط کنترل کننده‌های دروپ فراهم گردیده است توسط کنترل کننده داخلی که دیاگرام بلوکی آن در شکل ۱۳ نمایش داده شده است ردیابی می‌گردد. در کنترل داخلی دو حلقه کنترلی جریان و ولتاژ وجود دارد که حلقه کنترل ولتاژ مقدم بوده و مقادیر

نتایج این شبیه سازی در شکل ۱۵ مشاهده می شود. در $t=1/5$ s که افت ولتاژ $20V$ اعمال می شود به دلیل آن که طرح کنترلی پیشنهادی فعال است، مطابق رابطه (۱) تزریق جریان راکتیوی در این زمان مشاهده نمی شود. در بازه زمانی در $t=1/5$ s تا $t=2$ s کنترل کننده برای جلوگیری از تزریق جریان راکتیو ولتاژ خروجی اینورتر را کاهش می دهد. از آنجایی که توان حداکثر دریافتی از آرایه های خورشیدی با تزریق حداکثر جریان اکتیوی برابر $205A$ به شبکه تحویل داده می شود و در این بازه زمانی ولتاژ خروجی اینورتر کاهش یافته است لذا P_{max} در الگوریتم ردیاب توان پیشنهادی به مقداری کمتر از میزان حداکثر توان کاهش یافته که در نهایت سبب کاهش توان دریافتی از آرایه های خورشیدی و دریافت توان $92/8$ kW و محافظت در برابر افزایش جریان می شود. در $t=2$ s که افت ولتاژ $10V$ اعمال شده است الگوریتم ردیاب توان پیشنهادی توان دریافتی از آرایه های خورشیدی را با توجه به میزان افت ولتاژ شبکه به منظور آزاد کردن ظرفیت اینورتر کاهش می دهد و چون افزایش جریان خروجی کنترل و حفاظت شده است با کاهش مناسب ولتاژ خروجی اینورتر دامنه جریان خروجی اینورتر $|I_g|$ در حالت دائمی به $205A$ محدود شده است. در $t=3$ s با افزایش افت ولتاژ به $15V$ ، افزایش تزریق جریان راکتیو به $196A$ رسیده است و با توجه به تزریق جریان اکتیو $74A$ ، $|I_g|$ به $210A$ رسیده است. در $t=3/5$ s ولتاژ شبکه به حالت عادی خود برگشته است و همانطور که مشاهده می شود مجدداً توان حداکثر $100kW$ به شبکه تزریق و جریان راکتیو نیز به صفر رسیده است.



شکل ۱۵- نتایج شبیه سازی در شرایط افت ولتاژ در شبکه و تابش ثابت تحت کنترل و حفاظت پیشنهادی



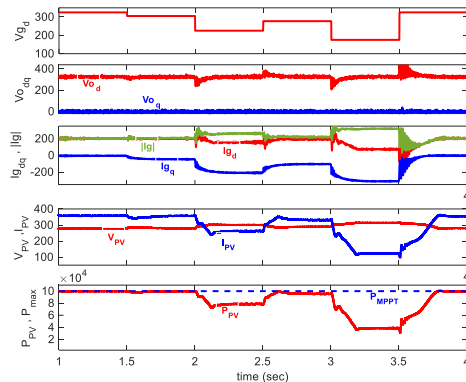
شکل ۱۶- نتایج شبیه سازی در شرایط افت ولتاژ در شبکه و تابش متغیر تحت کنترل و حفاظت پیشنهادی

۳- افت های ولتاژ پی در پی در شبکه و کاهش تابش نور خورشید به $500W/m^2$ در حالی که سیستم ردیابی توان پیشنهادی و طرح کنترلی حفاظت کننده پیشنهادی فعال می باشد:

نتایج این شبیه سازی در شکل ۱۶ مشاهده می شود. عملکرد سیستم تحت ردیاب توان و طرح کنترلی پیشنهادی مانند سناریوی ۲ می باشد با این تفاوت

۱- افت های ولتاژ پی در پی در شبکه و تابش ثابت نور خورشید $1000W/m^2$ در حالی که سیستم ردیابی توان پیشنهادی فعال است اما طرح کنترلی حفاظت کننده پیشنهادی غیر فعال می باشد:

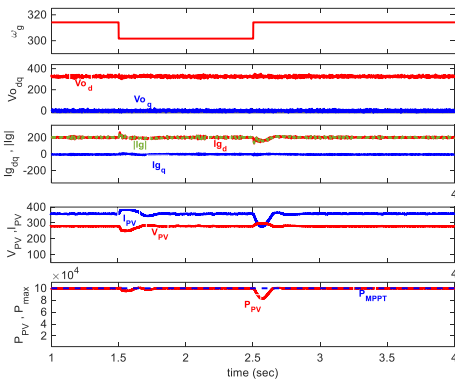
نتایج این شبیه سازی در شکل ۱۴ مشاهده می شود. همان طور که در این شکل مشاهده می شود تا قبل از زمان $1/5$ ثانیه ولتاژ شبکه در حالت عادی خود بوده و مؤلفه محور d ولتاژ شبکه V_{gd} برابر $326V$ می باشد. حداکثر توان آرایه های خورشیدی که تقریباً برابر $100kW$ می باشد توسط الگوریتم ردیاب توان تحت ولتاژ $V_{pv} \approx 279V$ و جریان $I_{pv} \approx 358A$ از طریق مبدل افزایش یافته دریافت و با تزریق جریان اکتیوی برابر $205A$ ، به شبکه تحویل داده می شود.



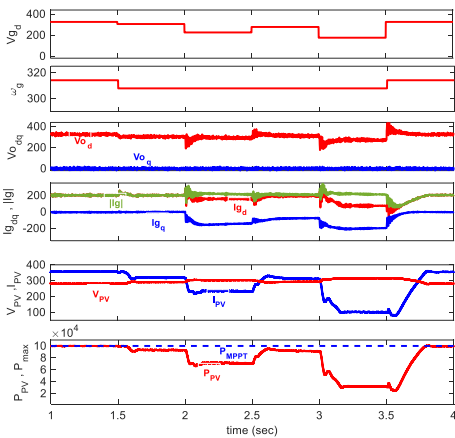
شکل ۱۴- نتایج شبیه سازی در شرایط افت ولتاژ در شبکه و تابش ثابت و بدون حفاظت اینورتر در برابر افزایش جریان

در $t=1/5$ s افت ولتاژ $20V$ اعمال می شود. از آنجایی که این میزان افت ولتاژ کمتر از 0.1 pu می باشد، مطابق رابطه (۱) جریان راکتیوی نباید به شبکه تزریق گردد. اما به دلیل آن که طرح کنترلی پیشنهادی غیر فعال است بر اساس مشخصه دروپ، تزریق جریان راکتیوی حدود $46A$ در این زمان مشاهده می شود. در $t=2$ s افت ولتاژ شدیدتری برابر با $10V$ اعمال شده است که سبب افزایش تزریق جریان راکتیو تا $219A$ شده است. در بازه زمانی 2 تا $2/5$ ثانیه الگوریتم ردیاب توان پیشنهادی توان دریافتی از آرایه های خورشیدی را با توجه به میزان افت ولتاژ شبکه به منظور آزاد کردن ظرفیت اینورتر کاهش می دهد اما چون در برابر افزایش جریان خروجی کنترل و حفاظتی وجود ندارد دامنه جریان خروجی اینورتر $|I_g|$ تا $260A$ بالا رفته است. در $t=2/5$ s افت ولتاژ به $5V$ کاهش یافته است که سبب کاهش تزریق جریان راکتیو به $205A$ رسیده است. در $t=3$ s افت ولتاژ به $15V$ افزایش یافته است که سبب افزایش تزریق جریان راکتیو تا $310A$ شده است و با توجه به تزریق جریان اکتیو $74A$ ، با وجود کاهش در تولید توان اکتیو و رسیدن توان اکتیو تولیدی به حدود 32 kW توسط ردیاب توان پیشنهادی مطابق با میزان افت ولتاژ و در ادامه تزریق جریان اکتیو کمتر، $|I_g|$ به $318A$ رسیده است. در $t=3/5$ s ولتاژ شبکه به حالت عادی خود برگشته است. همانطور که مشاهده می شود مجدداً توان حداکثر $100kW$ دریافت و به شبکه تحویل داده می شود. همچنین تزریق جریان راکتیو نیز به صفر رسیده است. قابل توجه است در بازه های زمانی که افت ولتاژ در شبکه وجود دارد، الگوریتم ردیاب توان به منظور آزاد کردن ظرفیت اینورتر جهت تزریق جریان راکتیو، نقطه کار جدیدی را با توانی کمتر از توان حداکثر مطابق با میزان افت ولتاژ شبکه در ولتاژ های V_{pv} با مقادیری بالاتر از ولتاژ V_{pv} متناظر با نقطه حداکثر توان را رقم می زند.

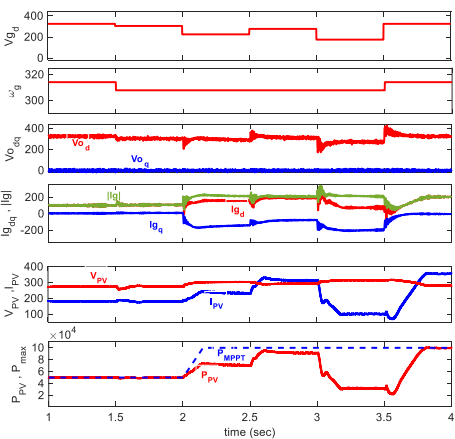
۲- افت های ولتاژ پی در پی در شبکه و تابش ثابت نور خورشید $1000W/m^2$ در حالی که سیستم ردیابی توان پیشنهادی و طرح کنترلی حفاظت کننده پیشنهادی فعال می باشد:



شکل ۱۸- نتایج شبیه سازی در شرایط افت فرکانس در شبکه و تابش ثابت تحت کنترل و حفاظت پیشنهادی



شکل ۱۹- نتایج شبیه سازی در شرایط افت همزمان ولتاژ و فرکانس در شبکه و تابش ثابت تحت کنترل و حفاظت پیشنهادی



شکل ۲۰- نتایج شبیه سازی در شرایط افت همزمان ولتاژ و فرکانس در شبکه و تابش متغیر تحت کنترل و حفاظت پیشنهادی

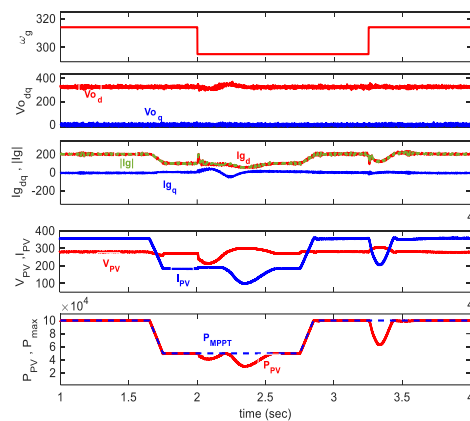
ج) شرایط افت همزمان ولتاژ و فرکانس در شبکه

در این مطالعه در زمان $t=1/5s$ افت همزمان فرکانس به اندازه ۱ Hz و افت‌های ولتاژ پی در پی همانند مطالعات موردی قبل اعمال می‌شود. همانطور که از نتایج شبیه سازی نشان داده شده در شکل ۱۹ تحت تابش ثابت $1000 W/m^2$ و در شکل ۲۰ تحت افزایش تابش از $500 W/m^2$ به $1000 W/m^2$ مشاهده می‌شود طرح کنترلی پیشنهادی عملکرد مناسبی را از خود نشان داده و در شرایط افزایش جریان مانع از تجاوز دامنه جریانی خروجی اینورتر I_{gq} از مقدار بیشینه خود شده است.

که در بازه زمانی $t=1/5s$ تا $t=2/5s$ که تابش نور خورشید به $500 W/m^2$ و حداکثر توان آرایه‌ها به $50 kW$ کاهش یافته است، اینورتر برای تزریق جریان راکتیو دارای ظرفیت خالی می‌باشد. لذا در این بازه ردياب توان پیشنهادی سبب کاهش توان اکتیو تولیدی آرایه‌ها نشده است.

ب) شرایط افت فرکانس در شبکه

در این مطالعه به بررسی عملکرد اینورتر خورشیدی تحت کنترل‌های پیشنهادی در دو حالت تابش و تغییر تابش بین $1000 W/m^2$ و $500 W/m^2$ و تابش ثابت $1000 W/m^2$ در ادامه افت فرکانس در شبکه پرداخته شده است. ولتاژ شبکه بدون تغییر در مقدار $326V$ ثابت می‌ماند. همانطور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود پس از افت کامل تابش در $t=1/5s$ ، توان دریافتی از آرایه‌های خورشیدی به مقدار $50 kW$ رسیده است. در $t=2s$ فرکانس شبکه با افتی برابر $3 Hz$ به $47 Hz$ کاهش یافته است. در این شرایط با توجه به عقب افتادن فاز شبکه از فاز ولتاژ خروجی اینورتر خورشیدی، توان اکتیو تزریقی به شبکه از طرف اینورتر شروع به افزایش می‌کند، این در حالیست که توان دریافتی از آرایه‌های خورشیدی افزایشی نداشته است. این عدم تعادل بین توان تزریقی به شبکه و توان دریافتی از آرایه‌های خورشیدی سبب کاهش ولتاژ خازن‌های لینک DC می‌گردد. این کاهش ولتاژ به دلیل آن‌که تغییرات دیوتی سایکل D مبدل افزایشده تغییرات کندتری نسبت به این افت ولتاژ دارد سبب کاهش ولتاژ دو سر آرایه‌های خورشیدی V_{pv} و در نتیجه کاهش توان دریافتی از آرایه‌ها می‌گردد. پس از طی شدن حالت گذرای ولتاژ خازن‌های لینک DC، توان دریافتی از آرایه‌ها بر روی مقدار $50 kW$ مجدداً تنظیم می‌گردد. در $t=3/25s$ فرکانس شبکه به مقدار $50 Hz$ برمی‌گردد توان دریافتی از آرایه‌های خورشیدی در بازه گذرا بیشتر از توان تزریقی به شبکه می‌گردد و این باعث افزایش گذرای ولتاژ لینک خازنی شده و چون دیوتی سایکل مبدل افزایشده تغییرات کندی دارد باعث افزایش ولتاژ دو سر آرایه V_{pv} شده که نتیجه این افزایش باز هم کاهش گذرای توان دریافتی از آرایه‌ها می‌گردد. نهایتاً توان دریافتی بر روی مقدار $100 kW$ برمی‌گردد.



شکل ۱۷- نتایج شبیه سازی در شرایط افت فرکانس در شبکه و تابش متغیر تحت کنترل و حفاظت پیشنهادی

در شکل ۱۸ نیز نتایج شبیه سازی اینورتر خورشیدی تحت تابش ثابت و افت فرکانسی برابر $2 Hz$ در $t=1/5s$ مشاهده می‌گردد. همانطور که از نتایج مشخص است عملکرد تحت طرح کنترلی پیشنهادی در این حالت نیز بسیار مطلوب بوده و دامنه جریانی خروجی اینورتر I_{gq} به $205A$ محدود شده است.

پیشنهادی به کمک شبیه سازی و همچنین پیاده سازی به روش PIL تحت سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج خروجی نشان دهنده عملکرد مناسب و صحیح روش‌های پیشنهادی می‌باشد.

مراجع

[1] G. Raman, J. C.-H. Peng, and H. H. Zeineldin, "Optimal Damping Recovery Scheme for Droop-Controlled Inverter-Based Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 4, pp. 2805-2815, Jul. 2020.

[2] A. Saleh, "A New Current Limiting Strategy Based on $I_d - \omega$ and $I_q - V$ Droop Characteristics for Grid-Connected Distributed Generations," *Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering (Formerly Recent Patents on Electrical & Electronic Engineering)*, vol. 16, no. 3, pp. 272-286, May 2023.

[3] M. Eskandari and A. V. Savkin, "On the Impact of Fault Ride-Through on Transient Stability of Autonomous Microgrids: Nonlinear Analysis and Solution," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 12, no. 2, pp. 999-1010, Mar. 2021.

[4] Y. Peng, Z. Shuai, X. Liu, Z. Li, J. M. Guerrero, and Z. J. Shen, "Modeling and Stability Analysis of Inverter-Based Microgrid Under Harmonic Conditions," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 2, pp. 1330-1342, Mar. 2020.

[5] M. Ganjian-Aboukheili, M. Shahabi, Q. Shafiee, and J. M. Guerrero, "Seamless Transition of Microgrids Operation From Grid-Connected to Islanded Mode," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 3, pp. 2106-2114, May 2020.

[6] X. Guo, W. Liu, and Z. Lu, "Flexible Power Regulation and Current-Limited Control of the Grid-Connected Inverter Under Unbalanced Grid Voltage Faults," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 9, pp. 7425-7432, Sep. 2017.

[7] A. Camacho, M. Castilla, J. Miret, A. Borrell, and L. G. de Vicuna, "Active and Reactive Power Strategies With Peak Current Limitation for Distributed Generation Inverters During Unbalanced Grid Faults," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 3, pp. 1515-1525, Mar. 2015.

[8] S. Dedeoglu, and G. C. Konstantopoulos, "Three-Phase Grid-Connected Inverters Equipped with Nonlinear Current-Limiting Control," 2018, pp. 38-43.

[9] S. Dedeoglu, G. C. Konstantopoulos, and A. G. Paspatis, "Grid-Supporting Three-Phase Inverters With Inherent Root Mean Square Current Limitation Under Balanced Grid Voltage Sags," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 11, pp. 11379-11389, Nov. 2021.

[10] X. Lu, J. Wang, J. M. Guerrero, and D. Zhao, "Virtual-Impedance-Based Fault Current Limiters for Inverter Dominated AC Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 1599-1612, May 2018.

[11] Z. Chen, X. Pei, M. Yang, L. Peng, and P. Shi, "A Novel Protection Scheme for Inverter- Interfaced Microgrid (IIM) Operated in Islanded Mode," *IEEE Transactions on Power Electronics*, pp. 1-1, 2017.

[12] I. Sadeghkhani, M. E. Hamedani Golshan, J. M. Guerrero, and A. Mehrizi-Sani, "A Current Limiting Strategy to Improve Fault Ride-Through of Inverter Interfaced Autonomous Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 5, pp. 2138-2148, Sep. 2017.

[13] E. Afshari, et al., "Control Strategy for Three-Phase Grid-Connected PV Inverters Enabling Current Limitation Under Unbalanced Faults," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 11, pp. 8908-8918, Nov. 2017.

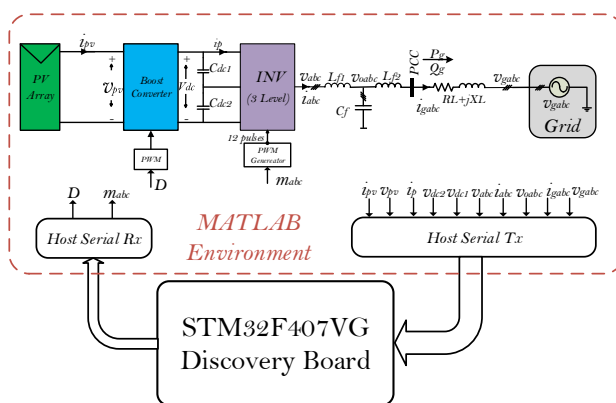
[14] Y. Geng, L. Zhu, X. Song, K. Wang, and X. Li, "A Modified Droop Control for Grid-Connected Inverters With Improved Stability in the Fluctuation of Grid Frequency and Voltage Magnitude," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 75658-75669, 2019.

[15] Q.-C. Zhong, and G. C. Konstantopoulos, "Current-Limiting Droop Control of Grid-Connected Inverters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 7, pp. 5963-5973, Jul. 2017.

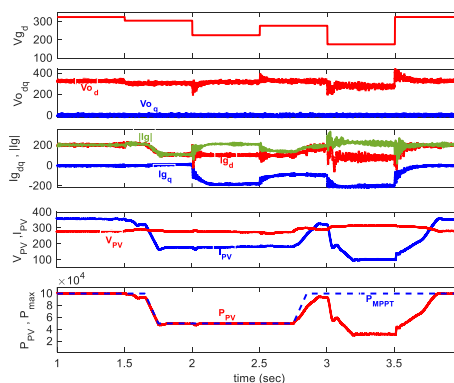
[16] S. Yazdani, M. Ferdowsi, M. Davari, and P. Shamsi, "Advanced Current-Limiting and Power-Sharing Control in a PV-Based Grid-Forming Inverter Under Unbalanced Grid Conditions," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 8, no. 2, pp. 1084-1096, Jun. 2020.

۲-۴- نتایج پیاده سازی به روش PIL

به منظور بررسی قابلیت پیاده سازی آزمایشگاهی طرح کنترلی پیشنهادی در این مقاله، الگوریتم ردیابی توان یکپارچه پیشنهادی، کنترل کننده دروب پیشنهادی و کنترل کننده داخلی بر روی برد دیسکآوری STM32F407VG که یک برد ریزپردازنده پرکاربرد [۲۲] می‌باشد پیاده‌سازی شده است و به کمک ارتباط سریال بین این برد و محیط شبیه ساز MATLAB که در آن مدار قدرت مربوط به اینورتر خورشیدی پیاده‌سازی شده است شبیه سازی به روش PIL اجرا گردیده است. دیگرام بلوکی نحوه پیاده سازی در شکل ۲۱ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود کمیت‌های درگاه سریال برای پردازنده ارسال می‌شود و پس از انجام پردازش‌ها توسط کنترل کننده‌های پیاده شده بر روی ریزپردازنده بر روی این کمیت‌های ورودی، سیگنال‌های اندیس مدولاسیون m_{abc} و دیوتی سایکل D به عنوان خروجی تولید و از طریق درگاه سریال برای مدار قدرت در محیط شبیه ساز MATLAB ارسال می‌گردد. نتایج خروجی در شکل ۲۲ نمایش داده شده است. در این مطالعه سناریوی سوم از مطالعه موردی (الف) اجرا شده است. همانطور که مشاهده می‌شود الگوریتم ردیاب توان و همچنین طرح کنترلی و حفاظتی پیشنهادی در این حالت نیز عملکرد مطلوب و تقریباً مشابه نتایج شبیه سازی را از خود نشان می‌دهد.



شکل ۲۱- دیگرام بلوکی پیاده سازی به روش PIL



شکل ۲۲- نتایج پیاده سازی به روش PIL

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله طرح کنترلی جدیدی برای کنترل و حفاظت یک اینورتر خورشیدی دو طبقه متصل به شبکه در مد کنترلی ولتاژ-فرکانس با قابلیت تزریق توان راکتیو در شرایط افت ولتاژ در شبکه ارائه شد. طرح کنترلی پیشنهادی در این مقاله شامل دو بخش اصلی ردیاب توان جدید از آرایه‌های خورشیدی و کنترل کننده‌های دروب اصلاح شده بود. عملکرد طرح‌های کنترلی

- [19] V. L. Srinivas, B. Singh and S. Mishra, "Fault Ride-Through Strategy for Two-Stage Grid-Connected Photovoltaic System Enabling Load Compensation Capabilities," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, no. 11, pp. 8913-8924, 2019.
- [20] M. Mansouri Takantape and M. Hamzeh, "Improvement of Small Signal Stability of Islanded Microgrids by Adding the Selective Dynamic Droop Gains," TABRIZ JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING, 50 2 (2020): 875-887.
- [21] S. M. Haj Seyed Aboutorabi and M. Sarvi, "A new method for solar array maximum power point determining and tracking," TABRIZ JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING, 49 4 (2020): 1559-1567.
- [17] A. Saleh, A. Rastegarnia, A. Farzamia, and K. T. T. Kin, "Power and Current Limiting Strategy Based on Droop Controller With Floating Characteristic for Grid-Connected Distributed Generations," IEEE Access, vol. 10, pp. 13966-13973, 2022.
- [18] M. Heidari, M. A. Shamsi-Nejad and M. Monfared, "Reducing the Dc-Link Capacitance for Grid-Connected Solar Inverters with Shunt Power Decoupling Circuit," TABRIZ JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING, 49 4 (2020): 1577-1590, A. Al-Shetwi, S. Muhamad, F. Blaabjerg, and Y. Yang, "Fault ride-through control of grid-connected photovoltaic power plants: A review," Solar Energy, vol. 180, pp. 340-350, 2019.