

حذف نوسانات توان اکتیو تزریقی سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه در شرایط افت ولتاژ

سعید عباسی^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ علی اصغر قدیمی^۲، استادیار؛ امیرحسین ابوالمعصومی^۳، استادیار

۱، ۲ و ۳- گروه مهندسی برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اراک - اراک - ایران

Email: s-abbasi@arshad.araku.ac.ir, a-ghadimi@araku.ac.ir, a-abolmasumi@araku.ac.ir

چکیده: با گسترش روزافزون استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک، سازگاری و عملکرد مناسب آن‌ها در شرایط رخداد خطاهای مختلف از دو منظر اقتصادی متصل باقی ماندن در شبکه و منظر فنی حداقل بودن آسیب‌های وارده به شبکه حائز اهمیت است. در این راستا این مقاله روشی کاربردی جهت بهبود عملکرد سیستم PV متصل به شبکه هنگام رخداد خطای افت ولتاژ (که از خطاهای بسیار محتمل می‌باشد) ارائه داده است. در هنگام بروز خطای افت ولتاژ دو اتفاق مهم نوسان توان اکتیو تزریقی و همچنین عدم عملکرد صحیح سیستم سنکرون‌ساز با شبکه حادث می‌شود که خود باعث بغرنج‌تر شدن وضعیت شبکه خواهند شد. لذا با هدف بهبود شرایط در این حالت، روش کنترل توان توالی‌های مثبت و منفی (PNSC) با تولید جریان مرجع مناسب برای حذف نوسانات توان اکتیو تزریقی به شبکه و همچنین کاهش نوسانات ولتاژ سمت DC مبدل ارائه شده است. جهت تزریق جریان مرجع اشاره شده، کنترل جریان تناسبی-رزونانسی مورد استفاده قرار گرفته و نحوه طراحی آن به‌طور دقیق تشریح شده است. همچنین به‌منظور سنکرون‌سازی اینورتر با شبکه، حلقه قفل فرکانس انتگرال‌گیر دوگانه مرتبه دوم تعمیم‌یافته (DSOGI-FLL) جایگزین سیستم متعارف حلقه قفل‌کننده فاز (SRF-PLL) (که در شرایط نامتعادل ولتاژ شبکه دچار خطا در تخمین فاز می‌شود) شده است، درنهایت پس از ارائه روش‌های طراحی سیستم‌های فوق‌الذکر، شبیه‌سازی روی یک سیستم نمونه در محیط نرم‌افزار Matlab/Simulink® انجام و با روش‌های مرسوم مقایسه انجام شده است. نتایج حاصله نشان از بهبود شرایط سیستم در هنگام بروز خطا نسبت به روش‌های مرسوم دارد.

واژه‌های کلیدی: سیستم فتوولتائیک، کنترل جریان تناسبی-رزونانسی، کنترل توان، شبکه نامتعادل.

Removing the Oscillations of Injected Active Power of Grid Connected PV System under Grid Voltage Sag

S. Abbasi¹, MSc Student; A. A. Ghadimi², Assistant Professor; A. H. Abolmasoumi³, Assistant Professor

1, 2, 3- Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran,

Emails: s-abbasi@arshad.araku.ac.ir, a-ghadimi@araku.ac.ir, a-abolmasoumi@araku.ac.ir

Abstract: The development of high power grid-connected photovoltaic (PV) systems and their adaptability with grid conditions is a crucial issue. In fault conditions, it can be considered with two sides, first being connected with the grid due to economical problems, second minimizing damages into the grid due to technical problems. The improvement of grid-connected PV systems performance under grid voltage sag (which is the most probable faults) is proposed in this paper. In point of common coupling in case of voltage sag, the active power will oscillating and the grid synchronization system would not work properly, which both are detrimental for unbalanced grid. In order to improve the performance of the exchanged power between the converter and the unbalanced grid, method of Positive-Negative-Sequence Control (PNSC: able to remove oscillation of active power) is suggested. This method is also effective to reduce the oscillations in DC voltage that can be detrimental for DC-link capacitor. In order to track the desired unbalanced reference current generated by PNSC, a proportional-resonant (PR) current controller has been designed. Furthermore, instead of Synchronous Reference Frame Phase Locked Loop (SRF-PLL) which suffers the distorted response in polluted grid, a Double Second-Order Generalized Integrator-Frequency Locked Loop (DSOGI-FLL) is used to synchronize inverter with the grid. Finally, to validate the proposed approach, the whole system is simulated via MatLab/Simulink® and simulation results have been compared with conventional method. Results verify the grid condition has improved in comparison with implementing the conventional method.

Keywords: Photovoltaic system, PR current control, power control, unbalanced grid voltage.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۲۸

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۴/۰۲/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۴/۳۱

نام نویسنده مسئول: علی اصغر قدیمی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اراک - میدان سردشت - پردیس دانشگاه اراک - دانشکده فنی و مهندسی - گروه مهندسی برق

۱- مقدمه

نسبت به کنترل PI بسیار ساده تر بوده و توانایی ردیابی سیگنال مرجع سینوسی با خطای حالت ماندگار صفر را دارا است، مقایسه عملکرد کنترل جریان PR با PI و تحلیل عملکرد حالت گذرای سیستم در [۱۲]، [۱۳] انجام شده است.

در [۱۴] با اضافه کردن فیدبک جریان به کنترلر PR در شرایط نامتعادل شبکه، ردیابی جریان مرجع بهبود بخشیده شده است، در [۱۵] به طراحی کنترلر تناسبی-انتگرالی-رزونانسی (PIR^V) برای تنظیم ولتاژ DC و تعیین فرکانس شبکه پرداخته شده است و همچنین در [۱۶] کنترلر تناسبی-رزونانسی (PR) برای کنترل جریان VSC^A در شرایط متعادل ولی هارمونیک برای استفاده در فیلتر اکتیو اعمال شده و عملکرد PLL را بهبود بخشیده است، در حالی که در هیچ یک از این مطالعات روشی برای تولید جریان مرجع برای سیستم کنترل به منظور بهبود شرایط شبکه ارائه نشده است. در [۱۷] محاسبات تولید جریان مرجع و استفاده از کنترلر PR در شرایط نامتعادل شبکه انجام شده ولی به نیاز به پیاده سازی سیستم سنکرون ساز دقیق جهت عملکرد مناسب سیستم توجهی نشده است. در [۱۸] مدل ریاضی VSC و کنترل آن با جبران ساز PR در حالت نامتعادل شبکه در قاب مرجع dq ارائه شده ولی عملکرد آن برای سیستم PV سه فاز متصل به شبکه و نیاز به سیستم سنکرون ساز دقیق بررسی نشده است. سیستم های توربین بادی هم روش کنترلی مشابهی دارند که در [۱۹] به منظور بهبود عملکرد DG در شبکه نامتعادل، کنترلر جریان PR با بهبود در عملکرد سیستم سنکرون ساز ارائه شده که هدف بهبود تزریق توان راکتیو و عکس العمل بخش های مکانیکی توربین طی خطا است. نهایتاً در [۲۰] روش های کنترل توان مرور شده ولی به چگونگی پیاده سازی آن و عملکردشان در سیستم PV اشاره ای نشده است.

کنترلر جریان رزونانسی PR قابلیت ردیابی سیگنال مرجع سینوسی با حذف اغتشاشات را دارد، ولی مشکل اصلی کنترلر جریان رزونانسی عملکرد روبه بدتر شدن در شرایط نامتعادل در شبکه قدرت است [۸]. در این شرایط هارمونیک های ولتاژ شبکه و عدم تعادل فازها شکل موج جریان را خراب می کند، همچنین هارمونیک های داخلی ولتاژ که معمولاً با تغییرات سرعت ادوات چرخان ایجاد می شود. بنابراین هارمونیک های جریان به علت دقت بالای کنترلر رزونانسی در ردیابی افزایش می یابند. راه حل این مشکل محاسبه جریان های مرجع از روی توالی های مثبت و منفی به طور جداگانه بوده و به این منظور در این مقاله روش کنترل توان توالی های مثبت و منفی ($PNSC^+$) برای تولید جریان مرجع مناسب ارائه داده شده است. این روش در شرایط متعادل و نامتعادل شبکه با جدا کردن توالی های مثبت و منفی فیدبک شکل موج ولتاژ شبکه، عملکرد مطلوبی از خود نشان می دهد. علاوه بر این سیستم سنکرون ساز پیشرفته و جدید حلقه قفل فرکانس با فیلتر فعال ($DSOGI-FLL^{(1)}$) با هدف رفع مشکل سنکرونیزاسیون برای سیستم PV متصل به شبکه ارائه شده است و نشان داده شده که در شرایط نامتعادل شبکه به خاطر سنکرون شدن با فرکانس، عملکرد بهتری

امروزه سیستم های تولید پراکنده^۱ (DG) به طور گسترده ای مورد توجه قرار گرفته اند، چراکه راه حل مؤثری برای افزایش تولید برق بدون افزایش گازهای گلخانه ای می باشند. یکی از این منابع تولید پراکنده که انرژی خورشیدی را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می کند سیستم فتوولتائیک (PV) است و به دو صورت متصل به شبکه یا جدا از شبکه مورد بهره برداری قرار می گیرد. این سیستم ها مخصوصاً در مناطق دور دست از نظر اقتصادی به صرفه هستند [۱، ۲]. در حالت متصل به شبکه کیفیت توان شبکه از سیستم PV تأثیر می پذیرد. از طرف دیگر شرایط شبکه تأثیر عمده ای روی عملکرد سیستم PV خواهد گذاشت [۳-۵].

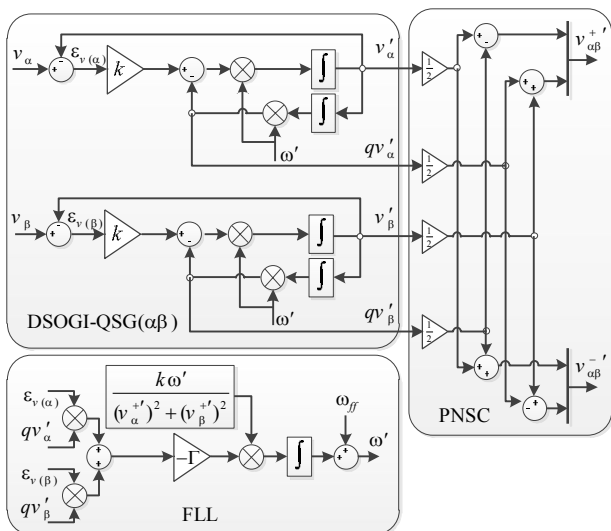
بر اساس مقررات بین المللی شبکه های تولید پراکنده^۲ در شرایط غیرعادی شبکه از جمله خطاهای شبکه، افت ولتاژها، بارهای غیرخطی و بارهای نامتعادل، بهتر است منابع DG مذکور حتی الامکان در شبکه باقی بمانند تا سیستم از اغتشاش عبور کند [۶]. تحت شرایط نامتعادلی و افت ولتاژ در محل اتصال مبدل (PCC^2) جریان تزریقی مبدل به دلیل عملکرد کنترلرهای متعارف طراحی شده از حالت سینوسی خارج می شود. کنش بین این جریان تزریقی و ولتاژ نامتعادل شبکه منجر به نوسانات غیرقابل کنترل توان اکتیو و راکتیو مبادله شده با شبکه خواهد شد که این شرایط تأثیر مخربی روی شبکه خواهد گذاشت [۷]. این فرایند به دلیل عملکرد نامطلوب سیستم سنکرون ساز و روش کنترلر جریان رخ خواهد داد. در سیستم های متعارف کنترلی، اینورتر توسط حلقه قفل شونده فاز (PLL) با شبکه سنکرون می شود. در شرایط عادی بهره برداری از شبکه PLL قاب مرجع سنکرون (SRF^3) پاسخ مناسبی داشته در حالی که تحت شرایط نامتعادل ولتاژ شبکه عملکرد دقیقی ندارد [۸]. نوسانات توان روی ولتاژ خازن لینک DC تأثیرگذار است و باعث نوسان آن می شود. در کنترلر متعارف سیستم PV جریان مرجع مبدل از روی ولتاژ لینک DC ساخته می شود، بنابراین نوسانات تولید شده روی تولید جریان مرجع تأثیرگذار می باشند. در پی آن جریان مرجع در قاب dq نوسانی و نامناسب خواهد شد و به این ترتیب کنترلر PI در ردیابی آن با خطای حالت ماندگار مواجه خواهد بود. لذا طراحی سیستم جدید و بازنگری در این بخش ها ضروری است.

امروزه تحقیقات گسترده ای روی عملکرد سیستم های PV تحت شرایط غیرعادی شبکه و تأثیر متقابل این سیستم با شبکه انجام شده است. تحت شرایط خطا، مدل سازی سیستم PV متصل با VSI^4 و CSI^5 به همراه حلقه های کنترلی در [۹] آمده است ولی برای بهبود عملکرد سیستم کنترلی روشی ارائه نشده است. در [۱۰] از کنترلر PI به منظور تزریق توان به شبکه قدرت استفاده شده است که با توجه به نیاز به تفکیک توالی ها و فیلترهای مختلف دارای پیچیدگی محاسباتی زیادی است. در [۱۱] کنترلر جریان تناسبی-رزونانسی (PR) برای سیستم PV سه فاز ارائه شده است که این کنترل کننده از نظر حجم محاسباتی

الگوریتم دقیق و سریع INC^{۱۲} با فیدبک کنترلی [۲۵] استفاده شده است. بر روی اینورتر منبع ولتاژ آن یک حلقه کنترلی تودرتو قرار دارد، یکی حلقه کنترل جریان که در آن از کنترلر تناسبی-رزونانسی استاندارد استفاده شده است و از نظر کنترلی، حلقه کنترل داخلی است، دیگری حلقه کنترل ولتاژ است که از دیدگاه کنترلی، حلقه کنترل خارجی بوده و دو وظیفه بر عهده دارد (۱) ثابت نگه داشتن ولتاژ خازن لینک DC با استفاده از یک کنترلر PI به منظور عدم ذخیره توان در خازن (۲) تولید جریان نامتعادل مناسب برای کنترل جریان در شرایط خطا، به منظور تزریق توان اکتیو ثابت به شبکه و کاهش نوسانات ولتاژ سمت DC. مدل سازی هر یک از بلوک های معرفی شده در ادامه آمده است.

۲-۱- سیستم سنکرون ساز FLL

در شبکه قدرت منشأ نامتعادلی ولتاژ می تواند تأثیر بارهای غیرخطی یا خطاهای گذرای شبکه باشد. در حالتی که بردارهای ولتاژ نامتعادل باشند می بایست توالی های این سیگنال نامتعادل با تکنیک های تشخیص، مشخص شوند و در سیستم کنترل برای ورودی این سیستم حذف شوند. علاوه بر این مبدل های متصل به توربین های بادی یا سیستم فتوولتائیک جریان توالی مثبت را با فرکانس اصلی تزریق می کنند و جریان توالی منفی و هارمونیک ها را به منظور عدم نوسان توان و محافظت از مبدل قدرت، یا تزریق جریان راکتیو نامتعادل برای جبران ولتاژ نامتعادل شبکه در PCC تزریق می کند [۲۵]. بنابراین تشخیص توالی مثبت فرکانس اصلی شبکه سه فاز، اصلی ترین وظیفه سیستم سنکرونیزاسیون است. در SRF-PLL متعارف بردار ولتاژ به قاب مرجع سنکرون برده می شود و مکان زاویه، برای قاب مرجع dq با حلقه فیدبک که جزء q را صفر می کند قابل کنترل است [۲۰]. این PLL برای شبکه های متعادل مناسب بوده ولی در شبکه های نامتعادل



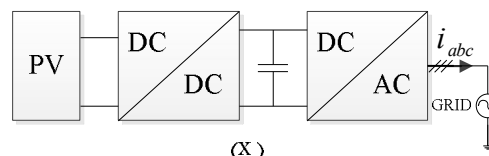
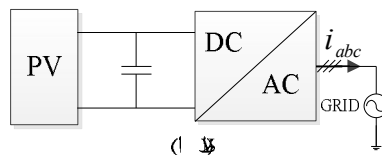
شکل ۳: بلوک دیگرام DSOGI-FLL

برای استخراج جزء d دچار مشکل می شود ولی FLL با انتگرال گیر دوگانه مرتبه دوم تعمیم یافته (DSOGI-FLL) با استفاده از

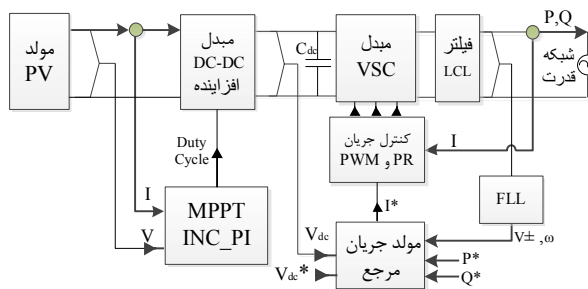
نسبت به حلقه قفل فاز (SRF-PLL) دارد. در این مقاله بهبود عملکرد سیستم تحت اجرای روش کنترل توان PNSC حاصل خواهد شد، حال آن که عملکرد بهینه این روش مستلزم پیاده سازی با کنترل جریان تناسبی-رزونانسی و یک الگوریتم سنکرون ساز دقیق و سریع است که تحت شرایط خطای شبکه نیز به عملکرد مناسب خود ادامه دهد. لذا در این مقاله استفاده از ترکیب روش های فوق الذکر که در هیچ یک از مطالعات گذشته استفاده نشده، به پاسخی بهینه از پیاده سازی روش PNSC منتج شده است.

۲-۲- مدل سازی سیستم PV برای شرایط نامتعادل شبکه

در [۲۲، ۲۱] معادلات حالت سیستم PV سه فاز متصل با اینورتر و فیلتر LCL آمده و تحلیل سیگنال کوچک در مد dq انجام شده و رفتار دینامیکی سیستم PV نشان داده شده است. مولد فتوولتائیک را می توان توسط مبدل منبع ولتاژ (VSC) به دو صورت تک مرحله ای و دومرحله ای به شبکه قدرت متصل نمود که هر دو این حالت ها در شکل ۱ نشان داده شده اند [۲۳]. در این مطالعه از مدل دومرحله ای استفاده شده که هم عمومیت بیشتری دارد و هم به دلیل تفکیک کنترلرهای اینورتر از MPPT، پیچیدگی کمتری دارد [۲۱]. در این نوع ساختار عموماً از مبدل DC-DC بوست استفاده می شود که عرض باند زمان عملکرد آن را کنترلر MPPT تعیین می کند.



شکل ۱: اینورتر PV (الف) تک مرحله ای، (ب) دومرحله ای



شکل ۲: بلوک دیگرام کلی سیستم PV متصل به شبکه

در شکل ۲ کل سیستم PV متصل به شبکه به صورت دیگرام بلوکی نشان داده شده است. در این سیستم بلوک کنترلی FLL در هر شرایطی از شبکه قدرت، وظیفه سنکرون کردن اینورتر PV را با شبکه بر عهده خواهد داشت. این امر از طریق تفکیک توالی های مثبت و منفی سیگنال فیدبک ولتاژ شبکه صورت می پذیرد [۲۴]. در بلوک MPPT که وظیفه جذب بیشترین توان از آرایه خورشیدی را بر عهده دارد، از

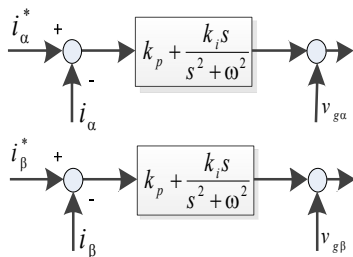
بدون تغییر بماند پس از رسیدن به نقطه MPP سیستم بدون تغییر باقی خواهد ماند.

$$\frac{dp}{dv} = \frac{d(v \cdot i)}{dv} = i + v \frac{di}{dv} = 0 \quad (2)$$

در روش IC مشتق توان نسبت به ولتاژ، در نقطه MPP صفر است. از آنجایی که این روش در کنترلر دیجیتال پیاده‌سازی می‌شود، تشخیص نقطه صفر با قدرت تفکیک‌پذیری این کنترلر به ندرت اتفاق می‌افتد. به این منظور در پیاده‌سازی این روش از یک کنترلر PI ساده گسسته، در کنترلر دیجیتال استفاده شده که باعث حذف خطا بین کنداکتانس واقعی و کنداکتانس افزایشی می‌شود. علاوه بر این، کنترلر PI می‌تواند نوسانات حالت ماندگار که ناشی از ضعف تفکیک کنترلر دیجیتال است را کاهش دهد. همچنین این روش قادر است در شرایطی که توان انتقالی فاصله زیادی با نقطه MPP دارد یک راه‌حل تطبیق‌پذیر مناسب باشد، به این صورت که با افزایش سایز پله‌ها سریع‌تر به نقطه MPP نزدیک شود و سپس با کاهش سایز پله‌ها در نزدیکی نقطه MPP دقت ردیابی را افزایش دهد.

۲-۳- کنترل جریان تناسبی-رزونانسی

به‌منظور تزریق توان اکتیو و راکتیو مناسب به شبکه در حالتی که شبکه نامتعادل داریم، جریان تزریقی مبدل در محل اتصال به شبکه، باید ارتباط مشخصی با ولتاژ آن در آن نقطه داشته باشد. بدین منظور کنترلرهای جریان برای کنترل مبدل‌های متصل به شبکه طراحی می‌شوند. یک کنترلر PI در جهت قاب سنکرون (dq) به‌علاوه یک کنترلر PI در قاب خلاف جهت سنکرون (قابی که در جهت خلاف با توجه به قاب ولتاژ جهت دار dq می‌چرخد) معادل یک کنترلر تناسبی-رزونانسی در قاب ساکن است.



شکل ۵: بلوک دیاگرام کنترلر PR استاندارد ایده‌آل

در کنترلر PI از زاویه فاز ولتاژ شبکه استفاده می‌شود، درحالی‌که کنترلر PR از فرکانس شبکه استفاده می‌کند. از آنجاکه زاویه فاز توالی‌ها ارتباطی باهم ندارند، در کنترلر سنکرون به دو حلقه کنترلی برای جریان‌های نامتعادل نیاز است، یکی برای توالی مثبت و دیگری برای توالی منفی، درحالی‌که مقدار فرکانس شبکه برای هر دو یکسان است. بنابراین استفاده از یک کنترلر رزونانسی برای هر دو توالی مثبت و منفی کفایت می‌کند. علاوه بر این در شرایط نامتعادل شبکه، کنترلر PR به دلیل سنکرون شدن با فرکانس توسط FLL، عملکرد بهتر و مقاوم‌تری نسبت به کنترلر PI دارد که با PLL با شبکه سنکرون خواهد شد. بلوک

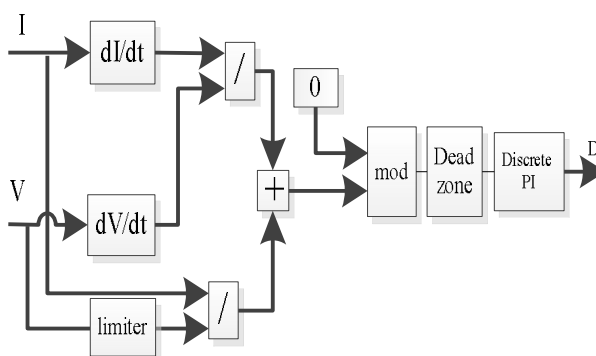
فیلترهای فعال DSOGI اجزای متعادل سیگنال را به‌صورت لحظه‌ای استخراج می‌کند و مناسب برای استفاده در سیستم‌های سه‌فاز است [۲۶]. در شکل ۳ هرکدام از بلوک‌های SOGI-QSG^{۱۳} یک فیلتر فعال با انتگرال‌گیر مرتبه دوم بوده که قابلیت تبدیل سیگنال سینوسی ورودی به سیگنال مربعی خروجی را دارند، همچنین در حذف هارمونیک‌های مرتبه بالا نیز مؤثرند. خروجی آن‌ها وارد مجزا کننده توالی مثبت و منفی (PNSC^{۱۴}) می‌شود. به‌منظور پاسخ خطی برای حلقه تطبیق فرکانس در DSOGI از یک حلقه قفل فرکانس FLL با بلوک دیاگرام نشان داده شده در شکل ۳، استفاده می‌شود که در آن Γ گین FLL به‌منظور تنظیم زمان نشست است.

$$t_{s(FLL)} \approx \frac{5}{\Gamma} \quad (1)$$

همچنین ω_{ff} پیش‌خور فرکانس اصلی شبکه برحسب رادیان بر ثانیه است. در این روش DSOGI امکان انجام تخمین مجزا برای اجزای متقارن ولتاژ ورودی سه‌فاز را در دستگاه کارترین $\alpha\beta$ فراهم می‌کند. همچنین فرکانس شبکه با استفاده از انتگرال‌گیر تعمیم‌یافته (GI^{Δ}) مهیا خواهد شد [۲۴].

۲-۲- MPPT با روش INC با فیدبک کنترلی

در [۲۷، ۲۵] روش INC با فیدبک کنترلی از نظر ردیابی و دقت، عملکرد بسیار مناسبی داشته و وابستگی به نوع PV ندارد. همچنین از نظر پیچیدگی متوسط ارزیابی شده که برای این مطالعه مناسب خواهد بود. روش کنداکتانس افزایشی بر اساس این واقعیت بنا شده که شیب منحنی توان در نقطه بیش‌ترین مقدار خود صفر و در سمت چپ آن نقطه مثبت و در سمت راست آن منفی است [۲۵]. این روش بر نسبت I/V که همان کنداکتانس است استوار است و مانند روش P&O^{۱۶} نیاز به دو سنسور ولتاژ و جریان دارد ولی نیازی به محاسبه توان نیست.



شکل ۴: بلوک دیاگرام INC با کنترلر PI

نقطه MPP با مقایسه کنداکتانس لحظه‌ای (I/V) با کنداکتانس افزایشی (dI/dV) دنبال می‌شود. بنابراین طبق رابطه (۲) و شکل ۴ علامت عبارت $(dI/dV) + (I/V)$ جهت درست افزایش یا کاهش کنداکتانس را برای رسیدن به MPP نشان می‌دهد، اگر شرایط جوی

خوب آن در شرایط نامتعادل شبکه و توانایی حذف اغتشاشات زودگذر و همچنین ردیابی سیگنال سینوسی سه‌فاز نامتعادل، بدون خطای حالت ماندگار است.

۳- روش کنترل توان پیشنهادی

در شرایط نامتعادل سیستم توزیع، نوسانات توان اکتیو و راکتیو به علت کنش بین ولتاژ و جریان با توالی‌های مختلف رخ می‌دهد. این امر باعث آسیب رساندن به مبدل، خازن لینک DC و همچنین ایجاد اغتشاش در پاسخ MPPT خواهد شد [۲۳]. باهدف تزریق توان ثابت به شبکه، کنترل توان لحظه‌ای مبادله شده با آن و حذف مؤلفه‌های نوسانی، نیاز به طراحی روش خاص کنترلی دارد. از این رو، با توجه به شرایط ولتاژ شبکه می‌بایست جریانی تزریق نمود که تثبیت توان را تضمین کند. توان‌های اکتیو و راکتیو را در حوزه زمان می‌توان به صورت روابط (۵) و (۶) نوشت.

$$p = V \cdot I = v^+ i^+ + v^- i^- + v^+ i^- + v^- i^+ = \bar{p} + \tilde{p} \quad (5)$$

$$q = |V \times I| = v_{\perp}^+ i^+ + v_{\perp}^- i^- + v_{\perp}^+ i^- + v_{\perp}^- i^+ = \bar{q} + \tilde{q} \quad (6)$$

مشخص است توان تزریقی، شش ضریب برای تنظیم دارد. در اتصال مبدل قدرت به شبکه، ولتاژ مبدل توسط شبکه تعیین می‌شود، بنابراین برای کنترل توان تزریقی چهار درجه آزادی عملکرد وجود دارد که اعم‌اند از $i_{\alpha}^+, i_{\beta}^+, i_{\alpha}^-, i_{\beta}^-$ بنابراین با تزریق تنها جریان نامتعادل قادر به تنظیم چهار پارامتر توان خواهیم بود. این بدان معنی است که اگر نوسانات توان اکتیو را حذف کنیم کنترلی روی نوسانات توان راکتیو نخواهیم داشت و برعکس.

در تزریق توان به شبکه قدرت دو مورد اهمیت ویژه‌ای دارد، یکی نوسانات توان تزریقی و دیگری مقدار هارمونیک‌های سیگنال جریان تزریقی [۸] که در روش ارائه‌شده هم نوسانات توان حذف می‌شود و هم سیگنال جریان تزریقی به شبکه بدون هارمونیک خواهد بود. روش PNSC با تنظیم دقیق توالی‌ها قادر به محاسبه جریان‌های مرجعی است که توانایی حذف نوسانات توان تزریقی به شبکه را داراست. این روش یادآور برخی روش‌های کنترلی یکسوسازهای فعال است. با این تفاوت که این روابط عمومی‌تر بوده و امکان استفاده در قاب‌های مرجع dq, α, β, abc ($m < \theta$ قطبی) را دارند. در این روش مؤلفه‌های اکتیو و راکتیو جریان تعیین و جهت ردیابی به کنترل‌کننده PR پیشنهادی اعمال می‌شوند. در محاسبات جریان مرجع $|v|$ نرم سیگنال بردار ولتاژ شبکه است به صورت زیر است:

$$|v|^2 = v_a^2 + v_b^2 + v_c^2 = v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2 = v_d^2 + v_q^2 \quad (7)$$

رابطه (۷) نشان می‌دهد که روش ارائه‌شده قابلیت اعمال در قاب‌های مرجع مختلف و با کنترلرهای مختلف را دارد.

محاسبه جریان‌های مرجع با تنظیم دقیق توالی‌های مثبت و منفی ولتاژ امکان‌پذیر خواهد بود. با فرض تعیین دقیق توالی‌های مثبت و

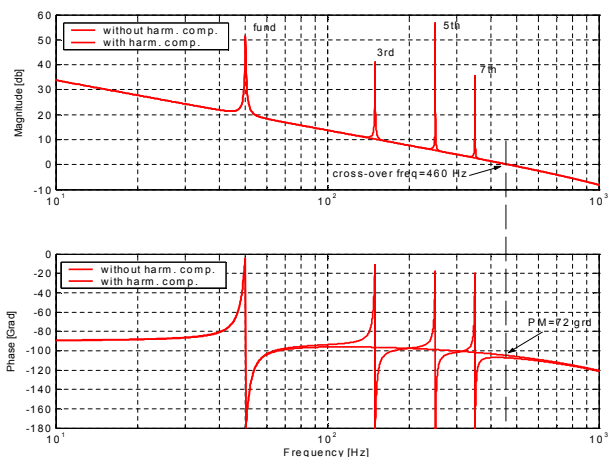
دیاگرام یک حلقه کنترل PR استاندارد ایده‌آل در شکل ۵ نشان داده شده است.

در حالت نامتعادل شبکه، زاویه فاز توالی‌ها باهم ارتباطی ندارند بنابراین نیاز به دو حلقه کنترلی PI داریم ولی مقدار فرکانس شبکه برای هر دو توالی یکسان است.

$$v(s)_{\alpha\beta} = v(s)_{\alpha\beta} + v(s)_{\alpha\beta} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} v(s)_{\alpha} \\ v(s)_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_p + \frac{k_i BWs}{s^2 + BWs + \omega^2} & 0 \\ 0 & k_p + \frac{k_i BWs}{s^2 + BWs + \omega^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{\alpha} \\ \Delta i_{\beta} \end{bmatrix} \quad (4)$$

رابطه (۳) نشان می‌دهد که بردار ولتاژ در قاب ساکن، شامل توالی‌های مثبت و منفی است و رابطه (۴) معادلات حالت حلقه کنترلی نشان داده‌شده در شکل ۵ است و بیانگر این واقعیت است که یک کنترلر تناسبی-رزونانسی با توانایی ردیابی سیگنال سینوسی، برای جبران‌سازی هم‌زمان خطای توالی‌های مثبت و منفی کافی است و به دلیل قطری بودن ماتریس انتقال آن، برخلاف قاب مرجع سنکرون dq هیچ ارتباطی بین سیگنال‌های محورهای ساکن abc یا $\alpha\beta$ وجود ندارد. طبق رابطه (۴) و از روی دیاگرام بود شکل ۶ این کنترلر در فرکانس شبکه، گین بی‌نهایت داشته و این موضوع خطای حالت ماندگار صفر و ردیابی سیگنال سینوسی با اصلی فرکانس شبکه را تضمین می‌کند [۱۶].



شکل ۶: دیاگرام بود جبران‌ساز تناسبی-رزونانسی استاندارد و با جبران‌ساز روی یک شکل

کنترلر رزونانسی استاندارد از موازی کردن دو جبران‌ساز رزونانسی حاصل می‌شود، حال طبق توضیحات فوق اگر شکل موج مرجع حاوی هارمونیک نیز باشد، می‌توان با موازی کردن جبران‌ساز رزونانسی که در فرکانس هارمونیک موردنظر تنظیم شده باشد، آن جریان را ردیابی کرد. که دیاگرام بود آن در شکل ۶ نشان داده شده است. اگرچه در روش ارائه‌شده در این مقاله نیازی به تزریق جریان هارمونیک به شبکه نیست و کنترلر PR استاندارد ایده‌آل نشان داده‌شده در شکل ۵ پاسخگو خواهد بود. دلیل استفاده از کنترلر رزونانسی در این مطالعه، عملکرد

با استفاده از این تعریف، بخش ثابت و نوسانی توان راکتیو به صورت (۱۷) و (۱۸) محاسبه می‌شود.

$$\bar{Q} = v_{\perp}^{+} i_q^{*+} + v_{\perp}^{-} i_q^{*-} \quad (17)$$

$$\tilde{Q} = v_{\perp}^{+} i_q^{*-} + v_{\perp}^{-} i_q^{*+} \quad (18)$$

با همان فرض صفر بودن توان نوسانی، به همان ترتیب محاسبات قبل برای توان راکتیو خواهیم داشت:

$$\tilde{Q} = 0 \rightarrow i_q^{*+} = \frac{\bar{Q}}{|v_{\perp}^{+}|^2 - |v_{\perp}^{-}|^2} (v_{\perp}^{+} - v_{\perp}^{-}) \quad (19)$$

ولی از آنجا که ضریب توان یک مدنظر است، این جریان مرجع جزء q صفر خواهد شد. بنابراین جریان مرجع کل به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$i^{*} = i_p^{*+} + i_q^{*+} \quad (20)$$

با توجه به این جریان‌ها، توان‌های لحظه‌ای اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$p = \underbrace{v_{\perp}^{+} i_p^{*+} + v_{\perp}^{-} i_p^{*-}}_p + \underbrace{v_{\perp}^{+} i_q^{*+} + v_{\perp}^{-} i_q^{*-}}_0 \quad (21)$$

$$\underbrace{v_{\perp}^{+} i_p^{*-} + v_{\perp}^{-} i_p^{*+}}_0 + \underbrace{v_{\perp}^{+} i_q^{*-} + v_{\perp}^{-} i_q^{*+}}_{\tilde{p}}$$

$$q = \underbrace{v_{\perp}^{+} i_q^{*+} + v_{\perp}^{-} i_q^{*-}}_{\tilde{Q}} + \underbrace{v_{\perp}^{+} i_p^{*+} + v_{\perp}^{-} i_p^{*-}}_0 \quad (22)$$

$$\underbrace{v_{\perp}^{+} i_q^{*-} + v_{\perp}^{-} i_q^{*+}}_0 + \underbrace{v_{\perp}^{+} i_p^{*-} + v_{\perp}^{-} i_p^{*+}}_{\tilde{q}}$$

در روابط (۲۱) و (۲۲) جملات اول و دوم نماینده توان اکتیو و راکتیو تزریقی ثابت هستند. جملات سوم و چهارم که جزو عاملان نوسان اند که به دلیل ضرب نقطه‌ای بین دو جزء با توالی یکسان و شیفت ۹۰ درجه صفرند. جملات پنجم و ششم نیز عامل نوسانی بوده و به خاطر شرایط اولیه تعیین شده در روابط (۱۳) و (۱۹) صفر هستند. حال تنها جملات هفتم و هشتم عامل نوسانی هستند که برای حصول ضریب توان واحد، جریان مرجع جزء q را صفر قرار می‌دهیم، با این کار بخش نوسانی توان اکتیو تزریقی و بخش ثابت توان راکتیو تزریقی صفر خواهند شد.

منفی ولتاژ شبکه توسط سیستم سنکرون ساز FLL به صورت v^{+} و v^{-} جریان تزریقی سیستم به صورت زیر قابل تفکیک است:

$$i^{*} = i^{*+} + i^{*-} \quad (8)$$

$$i^{+} = i_p^{+} + i_q^{+} \quad (9)$$

$$i^{-} = i_p^{-} + i_q^{-} \quad (10)$$

که i_p و i_q به ترتیب مؤلفه اکتیو و راکتیو جریان است. از طرفی توان تزریقی در این حالت به صورت دو مؤلفه توان ثابت \bar{p} و توان نوسانی \tilde{p} به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$\bar{p} = v^{+} i_p^{*+} + v^{-} i_p^{*-} \quad (11)$$

$$\tilde{p} = v^{+} i_p^{*-} + v^{-} i_p^{*+} \quad (12)$$

با توجه با این که هدف روش کنترلی حذف اکتیو نوسانی است فرض می‌شود فقط توان اکتیو ثابت به شبکه می‌رسد و توان نوسانی که حاصل تأثیر ولتاژ و جریان با توالی‌های مختلف است، صفر است بنابراین:

$$\tilde{p} = 0 \rightarrow i_p^{*-} = -\frac{v^{+} i_p^{*+}}{|v^{+}|^2} v^{-} \quad (13)$$

با ترکیب روابط (۱۱) و (۱۳):

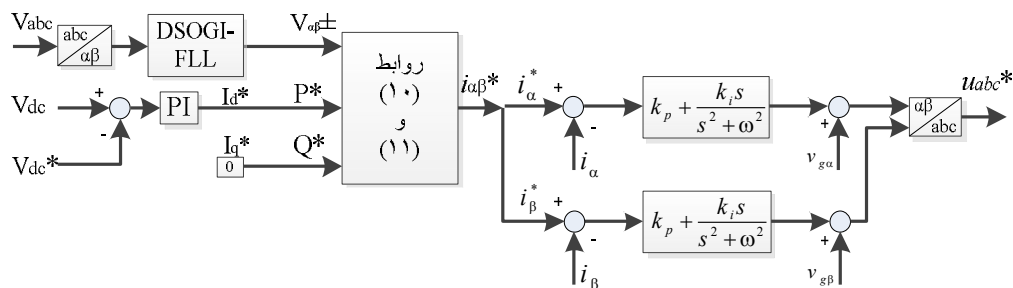
$$i_p^{*+} = \frac{\bar{p}}{|v^{+}|^2 - |v^{-}|^2} v^{+} \quad (14)$$

لذا مؤلفه اکتیو جریان مرجع به صورت (۱۵) خواهد بود:

$$i_p^{*+} = \frac{\bar{p}}{|v^{+}|^2 - |v^{-}|^2} (v^{+} - v^{-}) \quad (15)$$

برای محاسبه توان راکتیو ابتدا می‌بایست ولتاژ قائم v_{\perp} ۹۰ درجه پیش‌فاز نسبت به v به صورت زیر تعریف گردد:

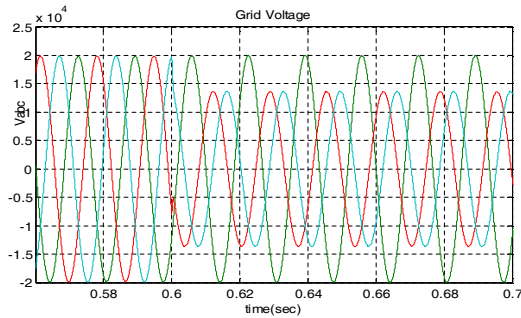
$$v_{\perp\alpha\beta} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} v_{\alpha\beta} \quad (16)$$



شکل ۷: حلقه کنترل جریان تزریقی اینورتر با روش ارائه شده

کل حلقه کنترل جریان اینورتر به همراه سیستم سنکرون ساز و روش ارائه شده، در شکل ۷ نشان داده شده است.

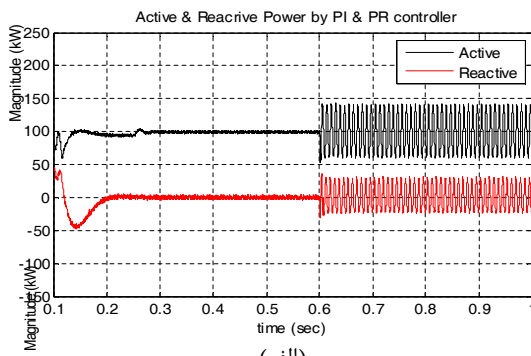
به این ترتیب توان اکتیو تزریقی ثابت و بدون نوسان به همراه توان راکتیو با مقدار متوسط صفر با نوسانات حول این نقطه حاصل می‌شود.



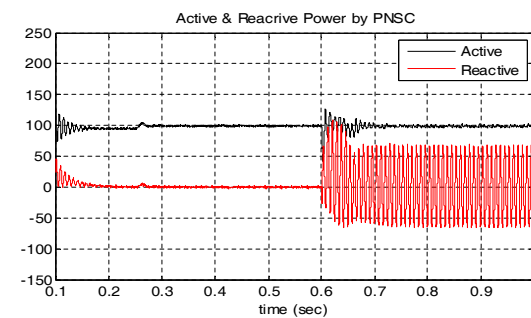
شکل ۹: ولتاژ شبکه

در مقام مقایسه جهت سنجش اعتبار روش پیشنهادی می‌توان به شکل ۱۰ اشاره کرد که عملکرد مؤثر روش ارائه‌شده را نشان می‌دهد. در ابتدا دو سیکل به FLL زمان داده شده که با شبکه سنکرون شود، سپس تا زمان ۰/۱ ثانیه دینامیک حالت گذرای سیستم است که نشان‌دهنده پاسخ سریع آن است. تا لحظه ۰/۲ ثانیه دینامیک بهتر سیستم کنترلی ارائه‌شده نسبت به سیستم کنترلی متعارف با کنترلر PI نشان داده شده است.

در لحظه ۰/۲۵ ثانیه الگوریتم MPPT ارائه‌شده وارد مدار می‌شود که افزایش ۵ کیلوواتی توان را به همراه دارد. علاوه بر این در شکل ۱۰ با مقایسه (الف) و (ب) تا قبل از رخداد خطا مشخص است که روش کنترل توان ارائه‌شده، عملکرد مناسبی در شرایط متعادل شبکه داشته و حتی اغتشاشات توان اکتیو و راکتیو را به صفر رسانده است. همچنین عملکرد مؤثر روش ارائه‌شده در کاهش نوسانات توان اکتیو لحظه‌ای تزریقی به شبکه، از لحظه ۰/۶ ثانیه به بعد نشان داده شده که به‌وضوح مشخص است باعث کاهش ۱۰۰ درصدی نوسانات آن شده است.



(الف)



(ب)

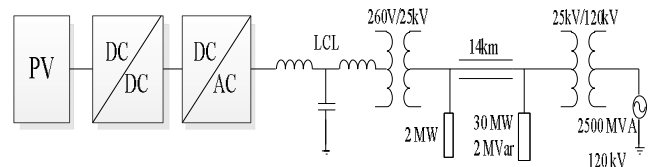
شکل ۱۰: توان اکتیو و راکتیو لحظه‌ای؛ (الف) روش کنترل متعارف توان با کنترلر PI، (ب) با روش کنترل توان پیشنهادی

۴- سنجش اعتبار مدل و تحلیل عملکرد

سیستم شبیه‌سازی‌شده، مولد فتوولتائیک ۱۰۰ کیلووات متصل به شبکه قدرت از طریق VSC سه‌فاز سه‌پایه (3-leg) با فیلتر LCL متصله است. همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است ترانسفورماتور ΔY با بار محلی اهمی ۲MW سه‌فاز و خط انتقال ۱۴ کیلومتری بین PV و شبکه سه‌سیمه قرار دارد که بعد از خط این انتقال بار اهمی-سلفی ۳۰MW و ۲MVar واقع شده است. دیاگرام تک‌خطی این سیستم در شکل ۸ نشان داده شده است. منبع ولتاژ با سطح اتصال کوتاه ۲۵۰۰MVA و ولتاژ ۱۲۰kV از طریق یک ترانسفورماتور ۱۲۰kV/۲۵kV یک بار اهمی-سلفی ۳۰MW و ۲MVar و یک خط انتقال ۱۴km مبین شبکه قدرت بوده که به منبع خورشیدی متصل شده است. این شبکه قدرت مورد استفاده، شبکه نمونه ارائه‌شده در خود نرم‌افزار MATLAB است. مقادیر پارامترهای این سیستم شبیه‌سازی‌شده در جدول ۱ آمده است.

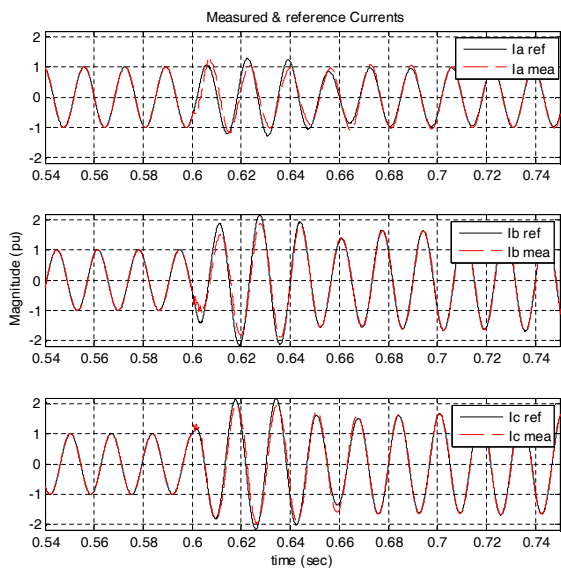
جدول ۱: مقادیر پارامترهای سیستم PV

مقادیر نامی	کمیت
۱۰۰ kVA	توان ظاهری
۱۰۰ kW	توان اکتیو
۰ Var	توان راکتیو
۵۰۰ V	ولتاژ لینک DC
۲۵۰ μ H	سلف سمت مبدل
۲ m Ω	مقاومت پارازیتی سمت مبدل
۴۵ μ F	خازن فیلتر
۰/۶ Ω	مقاومت میراگر فیلتر
۰/۲۲ mH	سلف سمت شبکه
۲/۷ m Ω	مقاومت پارازیتی سمت شبکه
۲۶۰ V/۲۵ kV	ترانسفورماتور ایزولاتور
۵۰ Hz	فرکانس شبکه
۱۰ kHz	فرکانس نمونه‌برداری
۳ kHz	فرکانس کلیدزنی



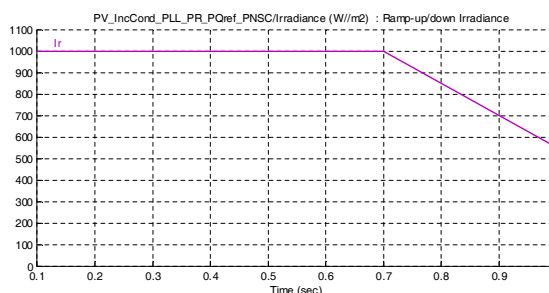
شکل ۸: دیاگرام تک‌خطی سیستم مورد مطالعه

ولتاژ شبکه در محل اتصال ترانس به شبکه (PCC) در شکل ۹ نشان داده شده است که در لحظه ۰/۶ ثانیه خطای افت ولتاژ دو فاز نوع C (voltage sag type C) رخ داده است که در پیاده‌سازی آن در محیط شبیه‌ساز نرم‌افزار MATLAB از دو مولد و دو سوئیچ استفاده شده است.

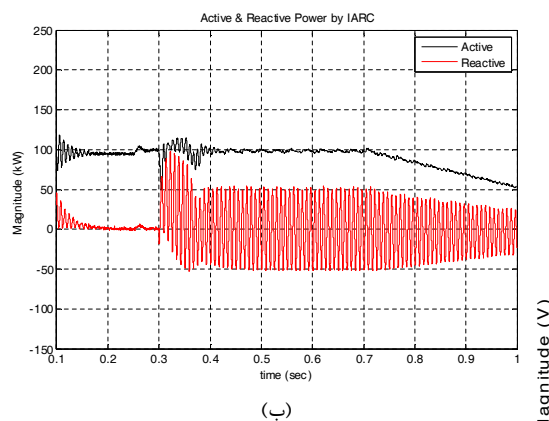


شکل ۱۲: شکل موج جریان‌های مرجع تولیدشده به همراه جریان‌های ردیابی شده تزریقی به شبکه

شکل ۱۲ جریان‌های مرجع سه‌فاز تولیدشده را به همراه جریان‌های ردیابی شده و تزریقی به شبکه، در لحظه رخداد خطا نشان می‌دهد که بیانگر تولید جریان نامتعادل مناسب و ردیابی دقیق کنترلر آن است.



شکل ۱۳: منحنی تغییرات تابش خورشید

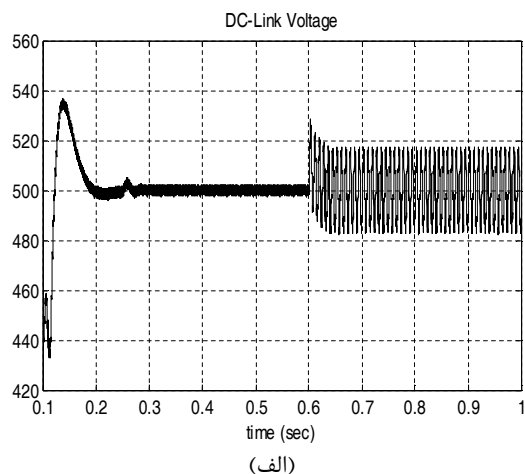


(ب)

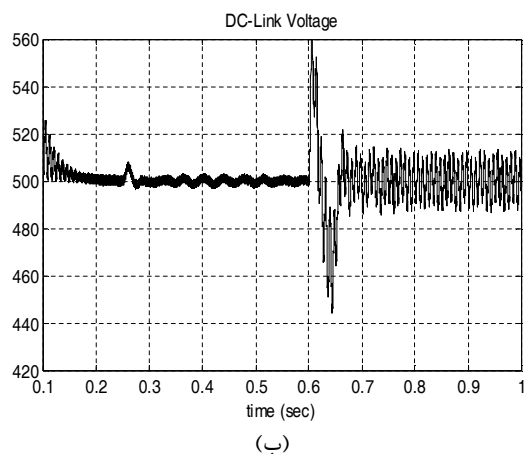
شکل ۱۴: توان لحظه‌ای با اعمال تغییرات شدت تابش خورشید

سیستم ارائه‌شده با رخداد خطا در لحظه ۰/۳ ثانیه تحت شرایط تغییرات شدید تابش به صورت شیب از 1000 W/m^2 تا 550 W/m^2 در

به‌منظور حذف هم‌زمان نوسانات توان اکتیو و راکتیو نیاز به تزریق جریان نامتعادل هارمونیکی به شبکه قدرت است که پیاده‌سازی آن نیاز به کنترلر به‌مراتب پیچیده‌تر از روش ارائه‌شده در مقاله را دارد [۸] و علاوه بر این تزریق جریان هارمونیکی به شبکه خسارت‌هایی را برای بار محلی^{۱۷} متصله در پی خواهد داشت، لذا از مزایای این روش سادگی در پیاده‌سازی کنترلر و تزریق فقط جریان نامتعادل به شبکه بوده است و از آنجاکه بار محلی اهمی بوده و توان راکتیو مرجع روی صفر تنظیم شده است میزان تلفات در توان تبادل شده حداقل است. ولتاژ خازن لینک DC مبدل در شکل ۱۱ به نمایش درآمده است که نشان‌دهنده کاهش ۴۵ درصدی نوسانات ولتاژ سمت DC مبدل بوده است. با توجه به شکل ۱۱ ب در لحظه افت ولتاژ، یک جهش در ولتاژ DC رخ داده که در مدت‌زمان کمتر از ۰/۰۵ ثانیه به پایداری رسیده است. با بررسی‌های صورت‌گرفته این نوسانات عمدتاً می‌تواند به دلیل محاسباتی بودن الگوریتم‌های نرم‌افزاری در شبیه‌سازی‌ها رخ دهد.



(الف)



(ب)

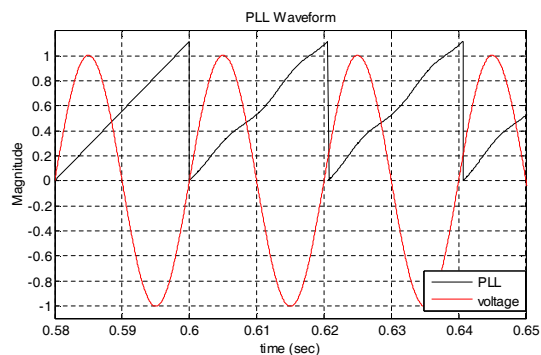
شکل ۱۱: ولتاژ سمت DC مبدل؛ (الف) بدون کنترل توان، (ب) با کنترل توان روش پیشنهادی

شبکه، با تنظیم دقیق توالی‌های مثبت و منفی جریان مرجع نوسانات توان اکتیو تزریقی به شبکه را کاملاً حذف و نوسانات ولتاژ خازن لینک DC را نیز کاهش داده است. همچنین از سیستم DSOGI-FLL برای سنکرونیزاسیون استفاده و پاسخ آن در شرایط نامتعادل ولتاژ، با سیستم SRF-PLL مقایسه شده است. علاوه بر این، برای MPPT روش INC_PI به کار گرفته شده است که عملکرد دقیق و پاسخ سریع دارد.

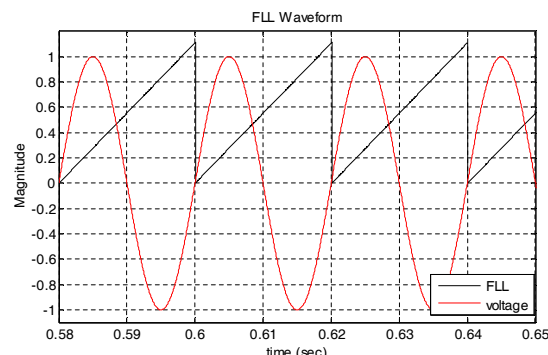
مراجع

- [1] Piegari, L. and R. Rizzo, "Adaptive perturb and observe algorithm for photovoltaic maximum power point tracking." *Renewable Power Generation, IET*, 4(4): p. 317-328, 2010.
- [2] Fathi, S.H., H. Rastegar, and A.A. Ghadimi, "Control of islanded industrial networks with fuel cell based distributed generation units and ultra-capacitor storage device." *European Transactions on Electrical Power*, 21(1): p. 801-823, 2011.
- [3] Barker, P.P. and R.W. de Mello. *Determining the impact of distributed generation on power systems. I. Radial distribution systems.* in Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE, 2000.
- [4] Paatero, J.V. and P.D. Lund, "Effects of large-scale photovoltaic power integration on electricity distribution networks." *Renewable Energy*, 32(2): p. 216-234, 2007.
- [5] Razavi, F., S.A. Hosseini, M. Karami, A.A. Ghadimi and S.S. Karimi Madahi, *Determining the optimal capacity and place of DGs using GA algorithm: voltage profile improvement and loss reduction.* in ECTI-CON 2011, IEEE Conf. 2011: Thailand, Khon Kaen, May 17-19. p. 848-851, 2011.
- [6] Honrubia-Escribano, A., et al. *Power quality survey of a photovoltaic power plant.* in Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2013 IEEE 39th. 2013.
- [7] Camacho, A., et al., "Flexible Voltage Support Control for Three-Phase Distributed Generation Inverters Under Grid Fault." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 60(4): p. 1429-1444, 2013.
- [8] Teodorescu, R., M. Liserre, P. Rodriguez, *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems.* 2011: John Wiley & Sons Ltd, 2011.
- [9] Dash, P.P. and M. Kazerani, "Dynamic Modeling and Performance Analysis of a Grid-Connected Current-Source Inverter-Based Photovoltaic System." *Sustainable Energy, IEEE Transactions on*, 2(4): p. 443-450, 2011.
- [10] Mirhosseini, M., et al. "Positive- and negative-sequence control of grid-connected photovoltaic systems under unbalanced voltage conditions," in *Power Engineering Conference (AUPEC), Australasian Universities*, pp. 1-6, 2013.
- [11] M. Castilla, J. Miret, A. Camacho, J. Matas, and L.G. de Vicuna, "Reduction of Current Harmonic Distortion in Three-Phase Grid-Connected Photovoltaic Inverters via Resonant Current Control," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 60, pp. 1464-1472, 2013.
- [12] A.R. Dash, B.C. Babu, K.B. Mohanty and R. Dubey, *Analysis of PI and PR Controllers for Distributed Power*

دمای ثابت آزموده شده و عملکرد مناسبی از خود نشان داده است که نتایج آن در شکل ۱۳ و شکل ۱۴ آمده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۵: فاز ولتاژ شبکه تشخیص داده شده با: الف) SRF-PLL، ب) DSOGI-FLL

DSOGI-FLL

در شکل ۱۵ پاسخ سیستم SRF-PLL با FLL ارائه شده، مقایسه و بررسی شده که نوسانات پاسخ PLL و عدم دقت آن در تخمین فاز ولتاژ شبکه در لحظه رخداد خطا به وضوح مشخص است که منجر به عملکرد نامناسب دائم سیستم سنکرون ساز خواهد شد در حالی که این نقیصه در سیستم DSOGI-FLL استفاده شده وجود نداشته و تشخیص آن در فاز و فرکانس، بعد از رخداد خطا نیز دقیق است.

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه یک روش کاربردی به منظور کنترل سیستم‌های PV متصل به شبکه قدرت ارائه شده است که در شرایط عادی و یا هنگام رخداد خطا عملکرد سیستم را بهبود می‌بخشد. به همین منظور سیستم PV سه فاز دومرحله‌ای با توان ۱۰۰ kW متصل به شبکه به همراه VSC و مبدل DC-DC بوست و کنترلرهای آن‌ها از جمله کنترل جریان PR و کنترل ولتاژ PI سمت DC، در شرایطی که تابش خورشید و دمای محیط ثابت در نظر گرفته شده‌اند، در محیط MatLab/Simulink® شبیه‌سازی شده و صحت بهبود عملکرد سیستم ارائه شده در شبکه قدرت نشان داده شده است. به همین منظور روش PNSC برای کنترل توان ارائه شده است که در شرایط نامتعادلی برای بهبود اوضاع

- Azevedo e Melo and C. A. Canesin, "Evaluation of the Main MPPT Techniques for Photovoltaic Applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 3, pp. 1156-1167, 2013.
- [26] P. Rodriguez, A. Luna, M. Ciobotaru, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, "Advanced Grid Synchronization System for Power Converters under Unbalanced and Distorted Operating Conditions," in *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on*, 2006, pp. 5173-5178, 2006.
- [27] T. Esum and P.L. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439-449, 2007.
- زیرنویس‌ها
-
- ¹ Distributed Generator
² National Grid Code
³ Point of Common-Coupling
⁴ Synchronous Reference Frame Phase-Locked Loop
⁵ Voltage Source Inverter
⁶ Current Source Inverter
⁷ Proportional Integral Resonant
⁸ Voltage Source Converter
⁹ Positive-/Negative-Sequence Control
¹⁰ Double Second-Order Generalized Integrator-Frequency Locked Loop
¹¹ Duty Cycle
¹² Incremental Conductance
¹³ Quadrature Signal Generator based on a Second Order Generalized Integrator
¹⁴ Positive-/Negative-Sequence Calculation
¹⁵ Generalized Integrator
¹⁶ Perturb and Observe
¹⁷ Local
- Generation System under Unbalanced Grid Faults. International Conference on Power and Energy Systems (ICPS)*, 2011.
- [13] A. Vidal, F.D. Freijedo, A.G. Yepes, P.F. Comesna, J. Malvar, O. Lopez and J.D. Gandoy, "Assessment and Optimization of the Transient Response of Proportional-Resonant Current Controllers for Distributed Power Generation Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electron*, vol. 60, no. 4, pp. 1367-1383, 2013.
- [14] S. Hong, Z. Ying, S. Yu-long, S. Lei, and S. Xiao-feng, "Research on control strategy of three-phase grid-connected inverter under distorted and unbalanced voltage conditions, in Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)," *2014 IEEE Conference and Expo*, pp. 1-6, 2014.
- [15] Y. Qingzeng, W. Xiaojie, Y. Xibo, G. Yiwen, and Z. Qi, "Minimization of the DC Component in Transformerless Three-Phase Grid-Connected Photovoltaic Inverters," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 30, pp. 3984-3997, 2015.
- [16] R. Teodorescu, F. Blaabjerg, F. Blaabjerg, M. Liserre and P.C. Loh "Proportional-Resonant Controllers and Filters for Grid-Connected Voltage-Source Converters," *IEEE Proc.-Electr. Power Appl.*, vol. 153, no. 5, pp. 750-762, 2006.
- [17] H. Huang, Y. Xu, and L. Yang, "Control scheme of PV inverter under unbalanced grid voltage," in *PES General Meeting | Conference & Exposition, IEEE*, pp. 1-5, 2014.
- [18] H. Jiabing and H. Yikang, "Modeling and Control of Grid-Connected Voltage-Sourced Converters Under Generalized Unbalanced Operation Conditions," *IEEE Transactions. on Energy Conversion*, vol. 23, no. 3, pp. 903-913, 2008.
- [19] S. Abulanwar, Zhe Chen, F. Iov, "Improved FRT Control Scheme for DFIG Wind Turbine Connected to a Weak Grid," *Proceedings of the 5th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC, IEEE Press*, 2013.
- [20] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre and A.V. Timbus, "Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electron*, vol. 53, no. 5, pp. 1398-1409, 2006.
- [21] A. Yazdani and P.P. Dash, "A Control Methodology and Characterization of Dynamics for a Photovoltaic (PV) System Interfaced With a Distribution Network," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 24, pp. 1538-1551, 2009.
- [22] E. Figueres, G. Garcera, J. Sandia, F. Gonzalez-Espin, and J.C. Rubio, "Sensitivity Study of the Dynamics of Three-Phase Photovoltaic Inverters With an LCL Grid Filter," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 56, pp. 706-717, 2009.
- [23] T. Messo, J. Jokipii, J. Puukko and T. Suntio, "Determining the Value of DC-Link Capacitance to Ensure Stable Operation of a Three-Phase Photovoltaic Inverter," *IEEE Transactions Power Electron*, vol. 29, no. 2, pp. 665-673, 2014.
- [24] P. Rodriguez, A. Luna, I. Etxeberria, J.R. Hermoso, R. Teodorescu, "Multiple Second Order Generalized Integrators for Harmonic Synchronization of Power Converters," *Energy Conversion Congress and Exposition, 2009. ECCE. IEEE*, pp. 2239-2246, 2009.
- [25] M.A.G. de Bitro, L. Galotto, L. P. Sampaio, G. de