شماره پیاپی ۷۶

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؛ امیر حسین 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 خطاه ای 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 می شود 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 DD مبدل ارائه شده است. همچنین جریان مرجع اشاره شده، کنترل جریان تناسبی -رزونانسی مورداستفاده قرار گرفته و نحوه طراحی آن به طور دقیق تشریح شده است. همچنین بهمنظور سنکرون سازی اینورتر با شبکه، حلقه قفل فرکانس انتگرال گیر دوگانه مرتبه دوم تعمیم یافته (DD مبدل ارائه شده است. همچنین قفل کننده فاز (SRF-PLL) (که در شرایط نامتعادل ولتاژ شبکه دچار خطا در تخمین فاز می شود) شده است، می متل ماراحی میستمهای فوقالذکر، شبیه سازی روی یک سیستم نمونه در محیط نرم افزار ® Matlab/Simulink انجام و با روشهای مرسوم مقایسه انجام شده سیستمهای فوقالذکر، شبیه سازی روی یک سیستم نمونه در محیط نرمافزار هتوست از انجام و با روش های مرسوم مقایسه انجام شده

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-abolmasumi@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 (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: علیاصغر قدیمی نشانی نویسنده مسئول: ایران – اراک – میدان سردشت – پردیس دانشگاه اراک – دانشکده فنی و مهندسی – گروه مهندسی برق

۱ – مقدمه

امروزه سیستمهای تولید پراکنده ((DG) بهطور گستردهای موردتوجه قرار گرفتهاند، چراکه راهحل مؤثری برای افزایش تولید برق بدون افزایش گازهای گلخانهای میباشند. 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 بهرهبرداری قرار می گیرد. این سیستمها مخصوصاً در مناطق دوردست ازنظر اقتصادی بهصرفه هستند [۱، ۲]. در حالت متصل به شبکه کیفیت توان شبکه از سیستم PV تأثیر می پذیرد. از طرف دیگر شرایط شبکه تأثیر عمدهای روی عملکرد سیستم PV خواهد گذاشت شرایط شبکه تأثیر عمدهای روی عملکرد سیستم PV

بر اساس مقررات بین المللی شبکههای تولید پراکنده ٔ در شرایط غيرعادي شبكه ازجمله خطاهاي شبكه، افت ولتاژها، بارهاي غيرخطي 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^{*}) 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 سنکرونساز و روش کنترل جریان رخ خواهد داد. در سیستمهای متعارف کنترلی، اینورتر توسط حلقه قفل شونده فاز (PLL) با شبکه سنکرون میشود. در شرایط عادی بهرهبرداری از شبکه PLL قاب مرجع سنکرون (*SRF-PLL) پاسخ مناسبی داشته درحالیکه 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 کنترل متعارف سیستم PV جریان مرجع مبدل از روی ولتاژ لینک DC ساخته می شود، بنابراین نوسانات تولید شده روی تولید جریان مرجع تأثیرگذار میباشند. در پی آن جریان مرجع در قاب dq نوسانی و نامناسب خواهد شد و بهاین ترتیب کنترلر PI در ردیابی آن با خطای حالت ماندگار مواجه خواهد بود. لذا طراحی سیستم جدید و بازنگری در این بخشها ضروری است.

امروزه تحقیقات گستردهای روی عملکرد سیستمهای PV تحت شرایط غیرعادی شبکه و تأثیر متقابل این سیستم با شبکه انجام شده است. تحت شرایط خطا، مدلسازی سیستم PV متصل با ^۵اVS و ^۲CSI به همراه حلقههای کنترلی در [۹] آمده است ولی برای بهبود عملکرد سیستم کنترلی روشی ارائه نشده است. در [۱۰] از کنترلر IP بهمنظور تزریق توان به شبکه قدرت استفاده شده است که با توجه به نیاز به تفکیک توالیها و فیلترهای مختلف دارای پیچیدگی محاسباتی زیادی است. در [۱۱] کنترل جریان تناسبی-رزونانسی (PR) برای سیستم PV سهفاز ارائه شده است که این کنترلکننده ازنظر حجم محاسباتی

نسبت به کنترل PI بسیار سادهتر 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) برای تنظیم ولتاژ DC و تعیین فرکانس شبکه پرداخته شده است و همچنین در [۱۶] کنترلر تناسبی-رزونانسی (PR) برای کنترل جریان ^VSC در شرايط متعادل ولى هارمونيكي براي استفاده در فيلتر اكتيو اعمال شده و عملکرد PLL را بهبود بخشیده است، درحالیکه در هیچیک از این مطالعات روشي براي توليد جريان مرجع براي سيستم كنترل بهمنظور 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 پیادهسازی سیستم سنکرونساز 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 ولى عملكرد آن براى سيستم PV سەفاز متصل به شبكه و نياز به سیستم سنکرونساز دقیق بررسی نشده است. سیستمهای توربین بادی هم روش کنترلی مشابهی دارند که در [۱۹] بهمنظور بهبود عملکرد DG در شبکه نامتعادل، کنترل جریان PR با بهبود در عملکرد سيستم سنكرونساز ارائه شده كه هدف بهبود تزريق توان راكتيو و عکس العمل بخشهای مکانیکی توربین طی خطا است. نهایتا در [۲۰] روشهای کنترل توان مرور شده ولی به چگونگی پیادهسازی آن و عملکردشان در سیستم PV اشارهای نشده است.

كنترل جريان رزونانسى PR قابليت رديابى سيگنال مرجع سینوسی با حذف اغتشاشات را دارد، ولی مشکل اصلی کنترل جریان رزونانسی عملکرد روبه بدتر شدن در شرایط نامتعادل در شبکه قدرت است [۸]. در این شرایط هارمونیکهای ولتاژ شبکه و عدم تعادل فازها شکل موج جریان را خراب میکند، همچنین هارمونیکهای داخلی ولتاژ که معمولاً با تغییرات سرعت ادوات چرخان ایجاد می شود. بنابراین هارمونیکهای جریان به علت دقت بالای کنترل رزونانسی در ردیابی افزایش می یابند. راه حل این مشکل محاسبه جریان های مرجع از روی توالیهای مثبت و منفی به طور جداگانه بوده و به این منظور در این مقاله روش کنترل توان توالیهای مثبت و منفی (*PNSC) برای تولید جریان مرجع مناسب ارائه داده شده است. این روش در شرایط متعادل و نامتعادل شبکه با جدا کردن توالیهای مثبت و منفی فیدبک شکل موج ولتاژ شبکه، عملکرد مطلوبی از خود نشان میدهد. علاوه بر این سيستم سنكرونساز پيشرفته و جديد حلقه قفل فركانس با فيلتر فعال (DSOGI-FLL') باهدف رفع مشكل سنكرونيزاسيون براي سيستم PV متصل به شبکه ارائه شده است و نشان داده شده که در شرایط نامتعادل شبکه به خاطر سنکرون شدن با فرکانس، عملکرد بهتری

نسبت به حلقه قفل فاز (SRF-PLL) دارد. در این مقاله بهبود عملکرد سیستم تحت اجرای روش کنترل توان PNSC حاصل خواهد شد، حال آنکه عملکرد بهینه این روش مستلزم پیادهسازی با کنترل جریان تناسبی-زرونانسی و یک الگوریتم سنکرونساز دقیق و سریع است که تحت شرایط خطای شبکه نیز به عملکرد مناسب خود ادامه دهد. لذا در این مقاله استفاده از ترکیب روشهای فوق الذکر که در هیچیک از مطالعات گذشته استفاده نشده، به پاسخی بهینه از پیادهسازی روش PNSC

۲- مدلسازی سیستم PV برای شرایط نامتعادل شبکه

در [۲۱، ۲۲] معادلات حالت سیستم PV سهفاز 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 میتوان توسط مبدل منبع ولتاژ (VSC) به دو صورت تکمرحلهای و دومرحلهای به شبکه قدرت متصل نمود که هردوی این حالتها در شکل ۱ نشان داده شدهاند [۳۳]. در این مطالعه از مدل دومرحلهای 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^{۱۱} آن را کنترلر MPPT تعیین می کند.



شکل ۱: اینورتر PV؛ الف) تکمرحلهای، ب) دومرحلهای



شکل ۲: بلوک دیاگرام کلی سیستم **PV** متصل به شبکه در شکل ۲ کل سیستم PV متصل به شبکه بهصورت دیاگرام 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 توالیهای مثبت و منفی سیگنال فیدبک ولتاژ شبکه صورت میپذیرد [۲۴]. در بلوک MPPT که وظیفه جذب بیشترین توان از آرایه خورشیدی را بر عهده دارد، از

الگوریتم دقیق و سریع ۱۰۲ 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 ازنظر 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 نگهداشتن ولتاژ خازن لینک DC با استفاده از یک کنترلر PI بهمنظور عدم ذخیره توان در خازن ۲) تولید جریان نامتعادل مناسب برای کنترل جریان در شرایط خطا، بهمنظور تزریق توان اکتیو ثابت به شبکه و کاهش نوسانات ولتاژ سمت DC. مدل سازی هر یک از بلوکهای معرفی شده در ادامه آمده

FLL سيستم سنكرونساز

در شبکه قدرت منشأ نامتعادلی ولتاژ میتواند تأثیر بارهای غیرخطی یا خطاهای گذرای شبکه باشد. در حالتی که بردارهای ولتاژ نامتعادل باشند میبایست توالیهای این سیگنال نامتعادل با تکنیکهای تشخیص، مشخص شوند و در سیستم کنترل برای ورودی این سیستم حذف شوند. علاوه بر این مبدلهای متصل به توربینهای بادی یا سیستم فتوولتائیک جریان توالی مثبت را با فرکانس اصلی تزریق میکنند و جریان توالی منفی و هارمونیکها را بهمنظور عدم نوسان توان و محافظت از مبدل قدرت، یا تزریق جریان راکتیو نامتعادل برای تشخیص توالی مثبت فرکانس اصلی تزریق میکند [۲۵]. بنابراین تشخیص توالی مثبت فرکانس اصلی شبکه سهفاز، اصلیترین وظیفه سیستم سنکرونیزاسیون است. در SRF-PLL متعارف بردار ولتاژ به قاب مرجع سنکرون برده میشود و مکان زاویه، برای قاب مرجع pb با حلقه فیدبک که جزء p را صفر میکند قابل کنترل است [۲۰]. این



سی ۲۰ بوت یا درم مشکل می شود ولی FLL باری استخراج جزء d دچار مشکل می شود ولی FLL با انتگرال گیر دوگانه مرتبه دوم تعمیمیافته (DSOGI-FLL) با استفاده از

فیلترهای فعال DSOGI اجزای متعادل سیگنال را بهصورت لحظهای استخراج می کند و مناسب برای استفاده در سیستمهای سهفاز است [۲۶]. در شکل ۳ هرکدام از بلوکهای ۲GGI-QSG' یک فیلتر فعال با انتگرال گیر 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 (۲)SOGI می شود. 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 می شود که در آن ۲ گین FLL بهمنظور تنظیم زمان نشست است.

$$t_{s(RL)} \approx \frac{5}{\Gamma} \tag{1}$$

همچنین $_{\mathscr{T}}^{0}$ 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 کارتزین $_{\alpha\beta}^{\alpha}$ فراهم میکند. همچنین فرکانس شبکه با استفاده از انتگرال گیر تعمیمیافته ($_{\alpha}^{\alpha}$ GI) مهیا خواهد شد [۲۴].

MPPT -۲-۲ با روش INC با فیدبک کنترلی

در [۲۵، ۲۷] روش INC با فیدبک کنترلی ازنظر ردیابی و دقت، عملکرد بسیار مناسبی داشته و وابستگی به نوع PV ندارد. همچنین ازنظر 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 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 (*I/V*)+(*I/V*) جهت درست افزایش یا کاهش کنداکتانس را برای رسیدن به MPP نشان میدهد، اگر شرایط جوی

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

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

در روش IC مشتق توان نسبت به ولتاژ، در نقطه MPP صفر است. ازآنجایی که این روش در کنترلر دیجیتال پیادهسازی می شود، تشخیص نقطه صفر با قدرت تفکیک پذیری این کنترلر به ندرت اتفاق می افتد. به این منظور در پیاده سازی این روش از یک کنترلر IP ساده گسسته، در کنترلر دیجیتال استفاده شده که باعث حذف خطا بین کنداکتانس واقعی و کنداکتانس افزایشی می شود. علاوه بر این، کنترلر IP می تواند 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 راه حل تطبیق پذیر مناسب باشد، به این صورت که با افزایش سایز پله ها سریعتر به نقطه MPP دقت نزدیک شود و سپس با کاهش سایز پله ها در نزدیکی نقطه MPP دقت ردیابی را افزایش دهد.

۲-۳- کنترل جریان تناسبی-رزونانسی

به منظور 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 می شوند. یک کنترلر IP در جهت قاب سنکرون (*d*p) به علاوه یک کنترلر IP در قاب خلاف جهت سنکرون (قابی که در جهت خلاف با توجه به قاب ولتاژ جهت دار *dp* می چرخد) معادل یک کنترلر تناسبی -رزونانسی در قاب ساکن است.



شکل ۵: بلوک دیاگرام کنترلر PR استاندارد ایدهآل

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

دیاگرام یک حلقه کنترل PR استاندارد ایده آل 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.

$$v\left(s\right)_{a\beta} = v\left(s\right)_{a\beta} + v\left(s\right)_{a\beta} \tag{(7)}$$

$$\begin{bmatrix} v(s)_{*} \\ v(s)_{*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{*} + \frac{k_{*}BWs}{s^{2} + BWs + \omega^{2}} & 0 \\ 0 & k_{*} + \frac{k_{*}BWs}{s^{2} + BWs + \omega^{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{*} \\ \Delta i_{*} \end{bmatrix}$$
(*)

رابطه (۳) نشان می دهد که بردار ولتاژ در قاب ساکن، شامل توالیهای مثبت و منفی است و رابطه (۴) معادلات حالت حلقه کنترلی نشان داده شده در شکل ۵ است و بیانگر این واقعیت است که یک کنترلر تناسبی-رزونانسی با توانایی ردیابی سیگنال سینوسی، برای جبران سازی هم زمان خطای توالیهای مثبت و منفی کافی است و به دلیل قطری بودن ماتریس انتقال آن، برخلاف قاب مرجع سنکرون *pb* هیچ ارتباطی بین سیگنالهای محورهای ساکن *ab* و یا α_{β} وجود ندارد. طبق رابطه (۴) و از روی دیاگرام بود شکل ۶ این کنترلر در فرکانس شبکه، گین بی نهایت داشته و این موضوع خطای حالت ماندگار صفر و ردیابی سیگنال سینوسی با اصلی فرکانس شبکه را



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

کنترلر رزونانسی استاندارد از موازی کردن دو جبرانساز رزونانسی حاصل می شود، حال طبق توضیحات فوق اگر شکل موج مرجع حاوی هارمونیک نیز باشد، می توان 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 ارائه شده در این مقاله نیازی به تزریق جریان هارمونیکی به شبکه نیست و کنترلر PR استاندارد ایده آل نشان داده شده در این مطالعه، عملکرد خواهد بود. دلیل استفاده از کنترلر رزونانسی در این مطالعه، عملکرد

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 می دهد. این امر باعث آسیب رساندن به مبدل، خازن لینک DC و همچنین ایجاد اغتشاش در پاسخ MPPT خواهد شد [۳۳]. باهدف تزریق توان ثابت به شبکه، کنترل توان لحظهای مبادله شده با آن و حذف مؤلفههای نوسانی، نیاز به طراحی روش خاص کنترلی دارد. ازاینرو، با توجه به شرایط ولتاژ شبکه می بایست جریانی تزریق نمود که تثبیت توان را تضمین کند. توانهای اکتیو و راکتیو را در حوزه زمان می توان به صورت روابط (۵) و (۶) نوشت.

$$p = V I = v^{+}i^{+} + v^{-}i^{-} + v^{+}i^{-} + v^{-}i^{+} = \overline{p} + \widetilde{p}$$
 (a)

$$q = |V \times I| = v_{\perp}^{+} i^{+} + v_{\perp}^{-} i^{-} + v_{\perp}^{+} i^{-} + v_{\perp}^{-} i^{+} = \overline{q} + \tilde{q}$$
(8)

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 $\bar{a}_{\beta}^{-}, i_{\alpha}^{-}, i_{\beta}^{+}, i_{\alpha}^{-}, i_{\beta}^{-}$ 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 عمومی تر بوده و امکان استفاده در قابهای مرجع راکتیو جریان تعیین و جهت ردیابی به کنترل کننده PR پیشنهادی اعمال میشوند. در محاسبات جریان مرجع ² با نرم سیگنال بردار ولتاژ شبکه است به صورت زیر است:

$$|v|^{2} = v_{a}^{2} + v_{b}^{2} + v_{c}^{2} = v_{a}^{2} + v_{\beta}^{2} = v_{d}^{2} + v_{q}^{2}$$
(Y)

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

منفی ولتاژ شبکه توسط سیستم سنکرونساز FLL بهصورت $^+$ و u - جریان تزریقی سیستم بهصورت زیر قابل تفکیک است:

$$i^* = i^{*+} + i^{*-}$$
 (A)

$$i^{+} = i_{p}^{+} + i_{q}^{+}$$
 (9)

$$i^{-} = i_{p}^{-} + i_{q}^{-} \tag{(1)}$$

که i_{q} و i_{q} به ترتیب مؤلفه اکتیو و راکتیو جریان است. از طرفی توان تزریقی در این حالت به صورت دو مؤلفه توان ثابت \overline{p} و توان نوسانی \widetilde{p} به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود:

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

$$\tilde{p} = v^{+} i_{p}^{*-} + v^{-} i_{p}^{*+}$$
(17)

با توجه با این که هدف روش کنترلی حذف اکتیو نوسانی است فرض می شود فقط توان اکتیو ثابت به شبکه می رسد و توان نوسانی که حاصل تأثیر ولتاژ و جریان با توالی های مختلف است، صفر است بنابراین:

$$\tilde{p} = 0 \to i_p^{*-} = -\frac{v^+ i_p^{*+}}{|v^+|^2} v^-$$
(17)

با تركيب روابط (۱۱) و (۱۳):

$$i_{p}^{*+} = \frac{\overline{p}}{|v^{+}|^{2} - |v^{-}|^{2}}v^{+}$$
(14)

لذا مؤلفه اکتیو جریان مرجع بهصورت (۱۵) خواهد بود:

$$i_{p}^{*} = \frac{\overline{p}}{|v^{+}|^{2} - |v^{-}|^{2}} (v^{+} - v^{-})$$
(1Δ)

۹۰)
$$V_{\perp}$$
 محاسبه توان راکتیو ابتدا میبایست ولتاژ قائم V_{\perp} (۹۰ درجه پیش فاز نسبت به ۷) به صورت زیر تعریف گردد:
 $v_{\perp \alpha \beta} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} v_{\alpha \beta}$

$$\bar{Q} = v_{\perp}^{+} i_{q}^{*+} + v_{\perp}^{-} i_{q}^{*-}$$
(1Y)

$$\tilde{Q} = v_{\perp}^{+} i_{q}^{*-} + v_{\perp}^{-} i_{q}^{*+}$$
(1A)

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

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

ولی ازآنجاکه ضریب توان یک مدنظر است، این جریان مرجع جزء q صفر خواهد شد. بنابراین جریان مرجع کل بهصورت زیر حاصل میشود:

$$i^* = i_p^* + i_q^* \tag{(Y \cdot)}$$

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

$$p = \underbrace{v^{+} i_{p}^{+} + v^{-} i_{p}^{-}}_{p} + \underbrace{v^{+} i_{q}^{+} + v^{-} i_{q}^{-}}_{0} + \underbrace{v^{+} i_{p}^{-} + v^{-} i_{p}^{+} + v^{+} i_{q}^{-} + v^{-} i_{q}^{+}}_{0}$$
((1))

$$q = \underbrace{v_{\perp}^{+} i_{q}^{+} + v_{\perp}^{-} i_{q}^{-}}_{Q} + \underbrace{v_{\perp}^{+} i_{p}^{+} + v_{\perp}^{-} i_{p}^{-}}_{0} + \underbrace{v_{\perp}^{+} i_{q}^{-} + v_{\perp}^{-} i_{q}^{+}}_{Q} + \underbrace{v_{\perp}^{+} i_{p}^{-} + v_{\perp}^{-} i_{p}^{+}}_{q}}_{q}$$
(77)

در روابط (۲۱) و (۲۲) جملات اول و دوم نماینده توان اکتیو و راکتیو تزریقی ثابت هستند. جملات سوم و چهارم که جزو عاملان نوساناند که به دلیل ضرب نقطه ای 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 *p* را صفر قرار می دهیم، با این کار بخش نوسانی توان اکتیو تزریقی و بخش ثابت توان راکتیو تزریقی صفر خواهند شد.



شکل ۷: حلقه کنترل جریان تزریقی اینورتر با روش ارائهشده

کل حلقه کنترل جریان اینورتر به همراه سیستم سنکرونساز و روش ارائهشده، در شکل ۷ نشان داده شده است. بهاینترتیب توان اکتیو تزریقی ثابت و بدون نوسان به همراه توان راکتیو با مقدار متوسط صفر با نوسانات حول این نقطه حاصل میشود.

۴- سنجش اعتبار مدل و تحلیل عملکرد

سیستم شبیهسازی شده، مولد فتوولتائیک ۱۰۰ کیلووات متصل به شبکه قدرت از طریق VSC سهفاز سهپایه (leg-3) با فیلتر LCL متصله است. همان طور که در شکل ۸ مشخص است ترانسفورماتور ۲۵ با بار محلی اهمی ۲MW سهفاز و خط انتقال ۱۴ کیلومتری بین P۷ و شبکه سه سیمه قرار دارد که بعد از خط این انتقال بار اهمی-سلفی ۳۰MW رفتار ۲MVA واقع شده است. دیاگرام تکخطی این سیستم در شکل ۸ نشان داده شده است. منبع ولتاژ با سطح اتصال کوتاه ۲۵۰۰۷ و ولتاژ ۱۲۰k۷ از طریق یک ترانسفورماتور ۲۵۰۷/۱۲۰k۷ یک بار اهمی-سلفی ۳۰MW و ۲۵۷۲ و یک خط انتقال ۱۴km مبین شبکه قدرت بوده که به منبع خورشیدی متصل شده است. این شبکه قدرت مورداستفاده، شبکه نمونه ارائه شده در خود نرم افزار MATLAB است. مقادیر پارامترهای این سیستم شبیه مازی شده در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: مقادیر پارامترهای سیستم PV

مقادیر نامی	کمیت
v•• kVA	توان ظاهری
۱۰۰ kW	توان اکتيو
• Var	توان راكتيو
$\diamond \cdots V$	ولتاژ لينک DC
۲۵· µН	سلف سمت مبدل
۲mΩ	مقاومت پارازیتی سمت مبدل
40 µF	خازن فيلتر
\cdot /9 Ω	مقاومت ميراگر فيلتر
۰/۲۲ mH	سلف سمت شبکه
γ/γ m Ω	مقاومت پارازیتی سمت شبکه
tg. V/ta kV	ترانسفورماتور ايزولاتور
۵۰ Hz	فركانس شبكه
۱۰ kHz	فركانس نمونهبرداري
۳ kHz	فركانس كليدزني



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 دوفاز نوعC (voltage sag type C) رخ داده است که در پیاده سازی آن در محیط شبیه ساز نرم افزار MATLAB از دو مولد و دو سوئیچ استفاده شده است.



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 می شود 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 لحظه ای تزریقی به شبکه، از لحظه ۲/۶ ثانیه به بعد نشان داده شده که به وضوح مشخص است باعث کاهش ۱۰۰ درصدی نوسانات آن شده است.





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^{۷۱} متصله در پی خواهد داشت، لذا از مزایای این روش سادگی در پیادهسازی کنترلر و تزریق فقط جریان نامتعادل به شبکه بوده است و ازآنجاکه 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 ۱۱ب 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.



روش پیشنهادی

حذف نوسانات توان اكتيو . . .



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.



سیستم ارائهشده با رخداد خطا در لحظه ۰/۳ ثانیه تحت شرایط تغییرات شدید تابش به صورت شیب از ۱۰۰۰ W/m² در

دمای ثابت آزموده شده و عملکرد مناسبی از خود نشان داده است که

حذف نوسانات توان اكتيو . . .

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 رای 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

- 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. 1429-144, 2013.
- [8] Teodorescu, R., M.Liserre, P.Rodriguez, Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems. 2011: John Wily & 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



شكل ۱۵: فاز ولتاژ شبكه تشخيص دادهشده با؛ الف) SRF-PLL& ب) 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 بهوضوح مشخص است که منجر به عملکرد نامناسب دائم سیستم سنکرونساز خواهد شد درحالی 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- نتیجهگیری

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 می بخشد. به همین منظور سیستم PV سهفاز دومرحلهای با توان N۰۰kW متصل به شبکه به همراه VSC و مبدل DC-DC بوست و کنترلرهای آنها از جمله کنترل جریان PR و کنترل ولتاژ PI کسمت DC، در شرایطی که تابش خورشید و دمای محیط ثابت در نظر گرفته شدهاند، در محیط ®MatLab/Simulink شبیه سازی 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. Esram 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.

زيرنويسها

- 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 Convertor
- ⁹ Positive-/Negative-Sequence Control
- ¹⁰ Double Second-Order Generalized Integrator-Frequency Locked Loop
- ¹¹ Duty Cycle
- ¹² Incremental Conductance
- ¹³Quadrature 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 gridconnected 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. Etxeberría, J.R. Hermoso, R. Teodorescu, "Multiple Second Order Generalized Integrators for Harmonic Synchronization of Power Converters," <u>Energy Conversion Congress and Exposition</u>, <u>2009. ECCE. IEEE</u>, pp. 2239-2246, 2009.
- [25] M.A.G. de Bitro, L. Galotto, L. P. Sampaio, G. de