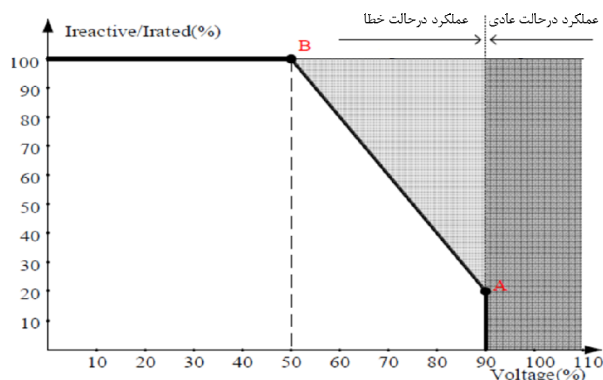


بهبود پایداری گذرای مبدل متصل به شبکه هنگام افت ولتاژ شدید با تکنیک امپدانس مجازی

امید عبدلی، مهدی قلی‌پور شهرکی و رحمت‌الله هوشمند



شکل ۱: منحنی تزریق توان راکتیو جهت گذر از خطا [۳].

سیستم قدرت به همراه داشته باشد. در نتیجه می‌بایست روشی به منظور ایجاد شرایط عملکرد بی‌وقفه منابع پراکنده در طول خطای شبکه ارائه شود [۲]. برخی از استانداردهای شبکه بیان می‌کنند که سیستم‌های تولید پراکنده باید هنگام افت ولتاژ شبکه، جریان راکتیو به شبکه تزریق کنند تا ولتاژ شبکه به حالت نامی خود برگردد که این حالت قابلیت گذر از افت ولتاژ یا LVRT^۳ نامیده می‌شود [۳]. منحنی LVRT جهت تزریق توان راکتیو مورد نیاز طبق تبیین دستورالعمل‌های شبکه در شکل ۱ نشان داده شده است. به عنوان مثال، اگر افت ولتاژ در شبکه بیش از پنجاه درصد باشد، مبدل می‌بایست از تمامی ظرفیت خود برای تزریق توان راکتیو استفاده کند.

به طور کلی روش‌های کنترل LVRT باید ویژگی‌های تشخیص سریع تغییر ولتاژ، محاسبه توان اکتیو و راکتیو مرجع، محدود کردن جریان به منظور جلوگیری از اضافه جریان، کنترل ولتاژ لینک DC و کنترل مبدل DC به DC (در سیستم‌های فتوولتائیک دومرحله‌ای) را داشته باشند [۴]. علاوه بر آن، کنترل‌کننده می‌بایست در برابر تغییرات پارامترهای سیستم و رخداد انواع خطا مقاوم بوده و بتواند در تمامی شرایط، سیگنال‌های مرجع مناسب را با توجه به دستورالعمل‌های شبکه تولید کرده و به خوبی آن را دنبال کند. روش‌های کنترلی مقاوم و محاسباتی زیادی همچون کنترل مد لغزشی و کنترل عصبی برای بهبود قابلیت گذر از خطا در مقالات معرفی شده‌اند [۵] و [۶].

مقالات متعددی، مروری کلی بر روش‌ها و تکنیک‌های تا کنون مطرح شده در زمینه توانایی گذر از خطای میکروگریدها انجام داده‌اند. در [۷] تا [۱۱] روش‌های مختلف برای پیاده‌سازی قابلیت LVRT در سیستم‌های فتوولتائیک و بادی مرور شده‌اند. مبحثی دیگر از تحقیقات انجام شده در مورد توانایی گذر از خطا در میکروگریدهای مبتنی بر اینورتر، مبحث

چکیده: با افزایش نفوذ منابع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر، دستورالعمل‌های شبکه خواستار عدم قطع این مبدل‌ها از شبکه هنگام رخداد خطا می‌باشند. این مبدل‌ها همچنین می‌بایست با تزریق توان راکتیو به رفع خطا کمک کنند. از آنجایی که شبکه‌های برق سلفی خالص نبوده و دارای مقاومت اهمی نیز هستند، این شبکه‌ها هنگام رخداد خطا با مشکل ناپایداری مبدل روبه‌رو می‌شوند. مبدل‌ها که جهت سنکرون ماندن با شبکه از حلقه قفل فاز (PLL) استفاده می‌کنند، هنگام رخداد خطای افت ولتاژ سنگین، دیگر قادر به حفظ پایداری با شبکه نیستند. در نتیجه این مبدل‌ها قادر به گذر از خطا نبوده و می‌بایست از شبکه جدا شوند. این مقاله با ارائه روشی جدید مبتنی بر امپدانس مجازی در هنگام رخداد افت ولتاژ سنگین، پایداری سنکرون با شبکه برق را حفظ می‌کند. این روش نیاز به تخمین تقریبی امپدانس شبکه دارد و مبدل را مجازاً با نقطه‌ای که اتصال قوی تری دارد سنکرون می‌کند. با استفاده از روش پیشنهادی در هنگام افت ولتاژ، مبدل به شبکه متصل مانده و می‌تواند به شبکه توان راکتیو تزریق کند. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Matlab درستی روش پیشنهادی برای بهبود پایداری گذرای مبدل را نشان می‌دهد.

کلیدواژه: امپدانس مجازی، PLL، مبدل متصل به شبکه، پایداری گذرا، افت ولتاژ.

۱- مقدمه

یکی از مشکلات جهانی، کمبود انرژی و افزایش آلودگی هوا بر اثر استفاده از سوخت‌های فسیلی است. این موضوع موجب گرایش به منابع انرژی تجدیدپذیری همچون انرژی بادی و خورشیدی (PV) شده است. این نوع از تولید توان، تولید پراکنده (DG) و منابع انرژی به عنوان منابع انرژی توزیع شده نامیده می‌شوند [۱]. در سال‌های گذشته اپراتورهای شبکه، اجازه عملکرد را به تولید پراکنده در شرایط رخداد خطا نمی‌دادند و در صورت وقوع خطا آنها را از شبکه خارج می‌کردند؛ اما در سال‌های اخیر با افزایش سهم این منابع در تأمین توان در سیستم قدرت، از دست دادن ناگهانی منابع پراکنده در طی خطای شبکه می‌تواند مشکلات زیادی را در

این مقاله در تاریخ ۱۶ مرداد ماه ۱۳۹۹ دریافت و در تاریخ ۸ فروردین ماه ۱۴۰۰ بازنگری شد.

امید عبدلی، گروه برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، (email: omid.abdoli@yahoo.com).

مهدی قلی‌پور شهرکی (نویسنده مسئول)، گروه برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، (email: e.gholipour@eng.ui.ac.ir).

رحمت‌الله هوشمند، گروه برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، (email: hooshmand_r@eng.ui.ac.ir).

1. Photovoltaic
2. Distributed Generation

روش VTG^6 بررسی شده که دارای محاسبات ریاضی پیچیده‌ای نیست. علاوه بر آن یک معیار با عنوان حاشیه زاویه ولتاژ خط $(MTVA)^7$ در این مقاله تعریف شده که برای ارزیابی خطر ناپایداری گذرا هنگام LVRT استفاده گردیده است. همچنین با توجه به معیار تعریف شده، یک روش کنترلی بر اساس امپدانس خط برای کاهش احتمال ناپایداری گذرا پیشنهاد شده است. در این روش اینورتر در هنگام افت ولتاژ شدید می‌بایست جهت پایدارماندن، مقداری توان اکتیو نیز تزریق کند. نسبت تزریق توان اکتیو به راکتیو برابر با نسبت مقاومت به راکتانس خط است و بنابراین می‌بایست مقدار امپدانس خط نیز معلوم باشد.

یکی از روش‌های موجود جهت بهبود پایداری، استفاده از امپدانس مجازی در حلقه کنترلی می‌باشد. مرجع [۲۳] رفتار سیگنال کوچک توربین بادی هنگام افت ولتاژ شدید را بررسی کرده و یک روش کنترلی با استفاده از خازن مجازی پیشنهاد داده است. این روش مستقیماً ولتاژ ورودی PLL را کنترل نموده و نیازی به تغییر پارامترهای درونی کنترل کننده ندارد و می‌تواند تأثیر امپدانس بالای خط را کاهش دهد و مشکل ناپایداری‌های نوسانی سیگنال کوچک را حل کند. در [۲۴] یک امپدانس مجازی در اندازه‌گیری‌های ولتاژ استفاده شده برای سنکرون‌سازی شبکه پیشنهاد گردیده تا محدوده ظرفیت انتقال توان در شبکه‌های ضعیف را گسترش دهد. این امپدانس مجازی می‌تواند استفاده شود تا سیستم کنترل VSC را به یک نقطه مجازی دور در شبکه متصل کند. سنکرون شدن به یک نقطه مجازی قوی‌تر در شبکه باعث می‌شود که ولتاژ تخمین زده شده کمتر تحت تأثیر عملکرد مبدل قرار گیرد.

در این مقاله، ناپایداری گذرای مبدل هنگام اتصال به شبکه AC ضعیف بررسی شده است. با فرض دانستن مقدار امپدانس خط، روشی بر مبنای امپدانس مجازی جهت ارتقای پایداری گذرای مبدل پیشنهاد داده شده است. با استفاده از این روش، ولتاژ ورودی PLL را مجازاً به نقطه قوی‌تری در شبکه متصل کرده تا بتواند فرکانس شبکه را به خوبی دنبال کند و اثر ولتاژ نقطه اتصال را در استخراج سیگنال‌های مرجع جریان کاهش دهد که به همین دلیل، نیازی به تخمین دقیق امپدانس نیز نمی‌باشد. با استفاده از تکنیک امپدانس مجازی در ورودی کنترل PLL می‌توان بدون نیاز به تغییر تطبیقی متغیرهای کنترلی، حتی در شرایط افت ولتاژ بسیار شدید نیز پایداری را تضمین نمود.

در ادامه در بخش دوم سیستم مورد مطالعه معرفی شده است. مفهوم ناپایداری گذرا در مبدل‌های متصل به شبکه در بخش سوم شرح داده شده است. در بخش چهارم، روش بر مبنای امپدانس مجازی جهت افزایش پایداری گذرای مبدل بیان گردیده است. نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار Matlab در بخش پنجم آمده و نهایتاً در بخش ششم به نتیجه‌گیری پرداخته شده است.

۲- سیستم مورد مطالعه

ساختار شبکه مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده و فرض بر این است که اینورتر به یک منبع DC ثابت و بدون تغییرات متصل است. این منبع می‌تواند سیستم فتوولتائیک یا توربین بادی باشد. پس از عبور از فیلتر، DG به شبکه متصل می‌شود و ولتاژ و جریان در نقطه اتصال مشترک $(PCC)^8$ و V_{PCC} و I_{PCC} نامیده شده‌اند. خطا در نقطه‌ای از شبکه

پایداری می‌باشد. انواع مختلف پایداری از جمله پایداری سیگنال کوچک و سیگنال بزرگ بررسی گردید و مدل‌های آنالیز متفاوتی برای آنها مطالعه شده است. ضمناً برخی از مقالات، تأثیر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر را بر روی پایداری کل سیستم بررسی نمودند و برخی به بررسی پایداری خود اینورتر و توانایی پایدارماندن آن هنگام رخداد خطا در سیستم می‌پردازند [۱۲].

برای پایداری سیگنال کوچک مبدل‌های تولید پراکنده تحقیقات زیادی صورت گرفته است [۱۳]. در [۱۴] نتیجه‌گیری شده که هرچه شبکه ضعیف‌تر، کمبود ولتاژ بیشتر و پهنای باند PLL بیشتر باشد، احتمال این که کنترل کننده جریان باعث ناپایداری شود بیشتر است. البته آنالیز سیگنال کوچک تنها در همسایگی نقطه کار حالت دایم مؤثر می‌باشد و در سال‌های اخیر به پایداری سیگنال بزرگ مبدل‌ها نیز توجه زیادی شده است. در تحقیق انجام شده در [۱۵]، برای یک سیستم مبدل منبع ولتاژ (VSC) مدل غیر خطی مرتبه پنج مطالعه گردیده و نتیجه‌گیری شده که همانند پایداری گذرای سیستم‌های قدرت مرسوم، پایداری گذرای سیستم‌های قدرت بر اساس الکترونیک قدرت نیز این گونه تعیین می‌شود که حالت سیستم درون یا خارج از محدوده نقطه تعادل باشد. در [۱۶] بهبود پایداری گذرا و قابلیت LVRT در سیستم‌های قدرت مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر با هماهنگی کنترل کننده‌های SSSC^۹ و PSS^{۱۰} انجام شده است. در [۱۷] بر اساس یک مدل سیگنال بزرگ مقایسه‌ای بین پایداری گذرای کنترل کننده‌های متفاوت در حالت grid-forming انجام شده است.

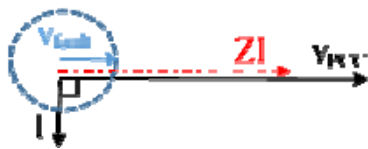
بسیاری از منابع طبیعی در مناطق دور واقع شده‌اند که این فاصله زیاد انتقال، باعث اتصال ضعیف شبکه می‌شود. یافته‌های تحقیقاتی نشان می‌دهد که اتصال ضعیف می‌تواند بر پایداری اثر منفی داشته باشد. همچنین اثبات شده که در صورت رخداد خطا، حلقه قفل فاز (PLL) ممکن است قابلیت دوباره سنکرون شدن مبدل‌ها را از دست بدهد که در مقالات به عنوان از دست رفتن سنکرونیزم یا LOS^{۱۱} شناخته می‌شود. البته از دست رفتن پایداری مبدل‌ها در سایر ساختارهای کنترلی مبدل‌ها، همچون کنترل افقی که از PLL استفاده نمی‌کنند نیز گزارش شده است [۱۸]. به عنوان مثال، ناپایداری گذرا می‌تواند برای VSC با کنترل افقی هنگامی که جریانش به اشباع می‌رود اتفاق بیفتد [۱۹].

هنگام LVRT، ولتاژ ترمینال مبدل‌ها حساس بوده و با تغییر جریان خروجی مبدل، تغییر نموده که این موضوع جهت دوباره سنکرون شدن مبدل‌ها با شبکه توسط PLL مشکل ایجاد می‌کند. روش‌های مختلفی برای بررسی پایداری سنکرون کردن در مبدل‌های متصل به شبکه هنگام رخداد خطاهای متقارن وجود دارد. روش آنالیز حالت دایم، شبه‌استاتیک و PLL مشابه با ماشین سنکرون که در [۲۰] مروری کلی بر این روش‌ها انجام گردیده و مزایا و معایب هر یک بررسی شده است.

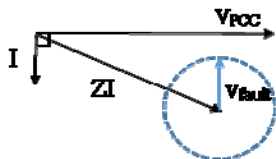
برای غلبه بر مشکل پایداری در [۲۱] با استفاده از روش PLL مشابه با ماشین سنکرون و استفاده از معیار سطوح برابر، روشی مبنی بر تغییر مرجع توان اکتیو برای ارتقای پایداری سنکرون پیشنهاد گردیده و ویژگی‌های آن با چند روش دیگر موجود در این زمینه مقایسه شده است. در [۲۲] شکل و مکانیسم ناپایداری گذرای ولتاژ-فرکانس با استفاده از

1. Voltage Source Converter
2. Static Synchronous Series Compensator
3. Power System Stabilizer
4. Phase Locked Loop
5. Loss of Synchronism

6. Voltage-Vector-Triangle Graphic
7. Margin of the Transmission Line's Voltage Angle
8. Point of Common Coupling



شکل ۵: نمایش برداری شبکه سلفی با تزریق توان راکتیو خالص.



شکل ۶: نمایش برداری شبکه سلفی - مقاومتی با تزریق توان راکتیو خالص.

$$V_F = V_{PCC} - ZI \quad (1)$$

هنگامی که شبکه سلفی باشد ($Z = 0 + j\omega l_g$) و فقط توان راکتیو به شبکه تزریق شود، هیچ گونه ناپایداری رخ نخواهد داد. دیگرام برداری ولتاژ در این حالت در شکل ۵ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود ولتاژ نقطه اتصال مشترک و ولتاژ مکان خطا هم‌جهت بوده و نیازی به تبادل توان اکتیو نمی‌باشد.

اما در صورتی که شبکه دارای مقاومت نیز باشد ($Z = r + j\omega l_g$) و تنها توان راکتیو تزریق شود، احتمال ناپایداری گذرا وجود دارد که این حالت نیز در شکل ۶ نشان داده شده است. در این حالت افت ولتاژ در مکان خطا شدید است و شبکه قادر نخواهد بود که توان اکتیو مورد نیاز را تأمین کند. به عنوان راه حل، علاوه بر توان راکتیو، توان اکتیو نیز باید تزریق شود تا مانند شکل ۵، ولتاژ نقطه خطا و PCC هم‌راستا شوند. در [۲۲] روشی ارائه شده که با انتخاب مقادیر مرجع جریان طبق (۲) می‌توان پایداری گذرای میدل را بهبود داد

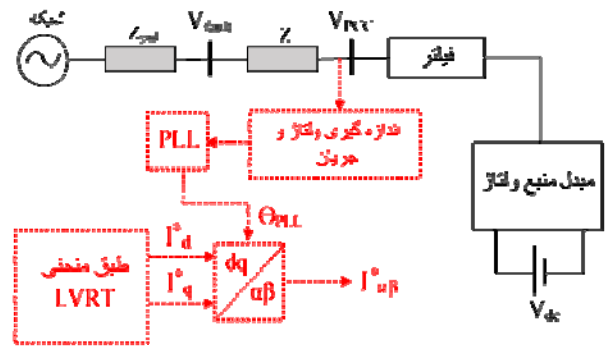
$$\frac{I_q}{I_d} = -\frac{\omega l_g}{r} \quad (2)$$

با انتخاب مقادیر مرجع طبق (۲)، ZI و V_{PCC} هم‌جهت خواهند شد. در این روش باید امپدانس نقطه اتصال DG تا مکان خطا مشخص باشد. همچنین با این کار دیگر اینورتر نمی‌تواند طبق خواست دستورالعمل‌های شبکه از تمامی ظرفیت خود برای تولید توان راکتیو استفاده کند و حداکثر حمایت خود از کمبود ولتاژ را انجام دهد، بلکه جهت بهبود پایداری مقادیر توان اکتیو نیز باید تزریق شود که البته این کار لازمه پایداری میدل می‌باشد [۲۰].

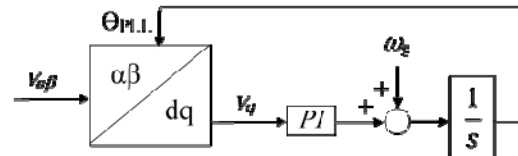
۴- روش پیشنهادی

با فرض مشخص بودن امپدانس نقطه اتصال DG تا مکان خطا، در این مقاله روشی جدید بر مبنای امپدانس مجازی پیشنهاد شده تا بتوان با بهبود پایداری گذرای میدل، احتمال گذر از افت ولتاژ را ارتقا داد. با استفاده از امپدانس مجازی در حلقه کنترلی PLL هنگام رخداد خطا، در عوض سنکرون کردن میدل با نقطه اتصال مشترک و استفاده از V_{PCC} به عنوان ورودی حلقه قفل فاز، میدل را با نقطه‌ای مجازی که اتصال قوی‌تری دارد سنکرون می‌کنیم.

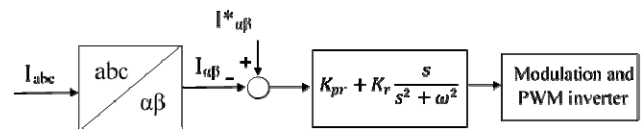
اگر مقدار امپدانس مجازی را برابر با امپدانس شبکه (Z) در نظر بگیریم و برای ولتاژ ورودی PLL در عوض $V_{PCC} - ZI$ ، V_{PCC} را استفاده کنیم، توانسته‌ایم PLL را با نقطه خطا که مقدار فرکانس ثابتی دارد سنکرون کنیم



شکل ۲: سیستم مورد مطالعه.



شکل ۳: ساختار PLL.



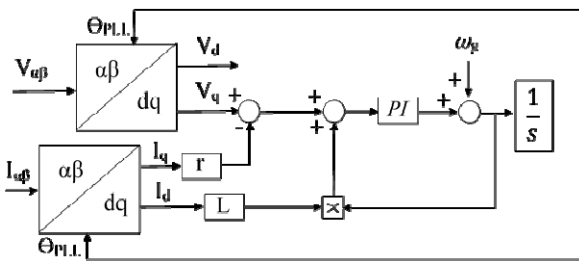
شکل ۴: حلقه کنترل جریان.

رخ داده که ولتاژ در نقطه خطا برابر با V_{fault} و امپدانس نقطه اتصال تا مکان خطا برابر با $Z = r + j\omega l_g$ می‌باشد.

کنترل سیستم بدین صورت است که مقدار ولتاژ نقطه اتصال اندازه‌گیری و به PLL فرستاده می‌شود. مقادیر جریان اکتیو و راکتیو مرجع در محور dq و با توجه به دستورالعمل شبکه انتخاب می‌شوند که با توجه به منحنی تزریق توان راکتیو نشان داده شده در شکل ۲، هنگامی که افت ولتاژ بیشتر از پنجاه درصد باشد، تمامی ظرفیت اینورتر می‌بایست جهت تزریق توان راکتیو استفاده شود. جریان‌های مرجع با استفاده از PLL به محور ثابت $\alpha\beta$ انتقال داده می‌شوند. PLL استفاده شده از نوع SRF-PLL مرسوم می‌باشد که ساختار آن در شکل ۳ نشان داده شده است. جریان‌های میدل باید این جریان‌های مرجع را دنبال کنند و بدین منظور، تفاضل سیگنال‌های استخراج شده مرجع جریان و جریان‌های اندازه‌گیری شده وارد حلقه کنترل جریان می‌شوند که این حلقه کنترلی در شکل ۴ آمده است. این حلقه کنترلی از کنترل کننده PR که قابلیت بسیار خوبی در تعقیب سیگنال‌های سینوسی دارد استفاده می‌کند. در نهایت با استفاده از مدولاسیون بردار فضایی، سیگنال‌های کلیدزنی اینورتر تولید می‌شوند.

۳- ناپایداری گذرا

قدرت اتصال بین PCC و شبکه توسط نسبت اتصال کوتاه (SCR)^۱ در نقطه اتصال تعریف می‌شود. یک SCR پایین به علت امپدانس معادل زیاد شبکه وجود دارد که باعث ناپایداری PLL یا همان LOS می‌شود. همان طور که بیان شد در شبکه‌های ضعیف و هنگام افت ولتاژ شدید، ناپایداری رخ می‌دهد و PLL دیگر قادر نخواهد بود که با شبکه سنکرون باقی بماند. طبق شکل ۲، (۱) برقرار است



شکل ۸: ساختار PLL.

جدول ۲: پارامترهای سیستم کنترلی.

مقدار	توضیح	نماد
۲	بهره تناسبی در PLL	K_p
۲۵	بهره انتگرالی در PLL	K_i
۲۰	بهره تناسبی در کنترل کننده PR	K_{pr}
۱۰e۳	بهره انتگرالی در کنترل کننده PR	K_r

با نقطه‌ای که اتصال قوی‌تری دارد سنکرون نمود و پایداری گذرای آن را ارتقا داد.

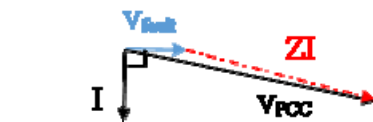
۵- شبیه‌سازی

جهت بررسی درستی روش پیشنهادی، ساختار نشان داده شده در شکل ۲ با استفاده از نرم‌افزار Matlab شبیه‌سازی گردیده است. فیلتر استفاده‌شده در این شبکه از نوع LCL می‌باشد که پارامترهای آن همراه با سایر پارامترهای شبکه در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. همچنین پارامترهای کنترلی سیستم شامل کنترل کننده PLL و کنترل کننده PR در حلقه کنترل جریان در جدول ۲ آورده شده‌اند.

در حالت اول از تکنیک امپدانس مجازی استفاده نشده و پایداری مبدل در شرایط افت ولتاژ شبکه بررسی شده است. ابتدا فرض گردیده که شبکه بدون خطا بوده و ولتاژ آن در مقدار نامی خود قرار دارد. تمامی ظرفیت اینورتر به تولید توان اکتیو اختصاص یافته و هیچ گونه توان راکتیوی به شبکه تزریق نمی‌شود.

فرض شده که در لحظه ۰/۵ ثانیه خطایی در شبکه رخ داده و مقدار ولتاژ آن به ۰/۴ پریونیت کاهش می‌یابد (مقدار دامنه ولتاژ از ۳۲۷ به ۱۳۱). نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود اینورتر می‌تواند با شبکه سنکرون باقی بماند. از طرفی طبق دستورالعمل شبکه تمامی ظرفیت مبدل به تولید توان راکتیو اختصاص یافته تا حمایت بیشینه از افت ولتاژ را جهت دارابودن قابلیت گذر از خطا داشته باشد و هیچ گونه توان اکتیوی به شبکه تزریق نمی‌شود. حال اگر افت ولتاژ سنگین‌تری در شبکه رخ دهد و ولتاژ شبکه در لحظه ۰/۵ ثانیه به مقدار ۰/۰۵ پریونیت افت پیدا کند، دیگر PLL نمی‌تواند با شبکه سنکرون باقی بماند. نتایج این حالت در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود در لحظه رخداد خطا (۰/۵ ثانیه) فرکانس نقطه اتصال شروع به افت می‌کند و مبدل دیگر نمی‌تواند با شبکه سنکرون باقی بماند.

حال با استفاده از روش پیشنهادی، در عوض سنکرون کردن PLL با نقطه اتصال مشترک، PLL را با نقطه‌ای مجازی که اتصال قوی‌تری دارد سنکرون می‌کنیم. با فرض دانستن مقدار امپدانس شبکه (Z) این نقطه مجازی همان مکان رخداد خطا می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در شرایطی یکسان در لحظه ۰/۵ ثانیه ولتاژ شبکه به ۰/۰۵ پریونیت افت می‌یابد، ولی با استفاده از روش پیشنهادی PLL



شکل ۷: نمایش برداری ولتاژها هنگام استفاده از تکنیک امپدانس مجازی.

جدول ۱: پارامترهای شبکه مورد مطالعه.

مقدار	توضیح	نماد
۷۳۵ kVA	توان نامی	S_b
۴۰۰ V	ولتاژ نامی شبکه (خط به خط)	V_b
۵۰ Hz	فرکانس نامی	f
۶۵۰ V	ولتاژ لینک DC	V_{DC}
۱۰ kHz	فرکانس سوئیچینگ	f_{sw}
۵ mH	اندوکتانس فیلتر در سمت مبدل	L_{cf}
۳ mH	اندوکتانس فیلتر در سمت شبکه	L_{gf}
۲ μF	خازن فیلتر	C_F
۵ mH	اندوکتانس خط	L_g
۱ Ω	مقاومت خط	r

$$Z_{virtual} = r_{virtual} + j\omega l_{virtual} = Z = r + j\omega l_g \quad (۳)$$

مقدار ورودی PLL در این حالت برابر است با

$$V_{PCC} - Z_{virtual}I = V_{PCC} - ZI = V_{fault} \quad (۴)$$

با این کار می‌توان اثر امپدانس خط که عاملی اصلی در ناپایداری گذرا می‌باشد را جبران‌سازی نمود. لازم به ذکر است که حتی اگر تخمین امپدانس نیز دقیق نباشد، باز توانسته‌ایم ولتاژ PLL را به نقطه‌ای قوی‌تر و نه لزوماً نقطه خطا، سنکرون کنیم و احتمال رخداد ناپایداری را کاهش دهیم.

با فرض برابری امپدانس مجازی با امپدانس خط می‌توان دیگرام برداری ولتاژ را طبق شکل ۷ ترسیم نمود. بدیهی است که در این حالت با این که مرجع جریان اکتیو صفر ($I_d^* = 0$) و مرجع جریان راکتیو برابر با ۱- پریونیت ($I_q^* = -1 \text{ p.u.}$) تنظیم شده است (فاز جریان برابر با ۹۰- درجه می‌باشد)، مقداری توان اکتیو نیز مبادله می‌شود چون PLL دیگر با ولتاژ نقطه اتصال مشترک سنکرون نمی‌شود، بلکه با ولتاژ در مکان خطا سنکرون می‌شود.

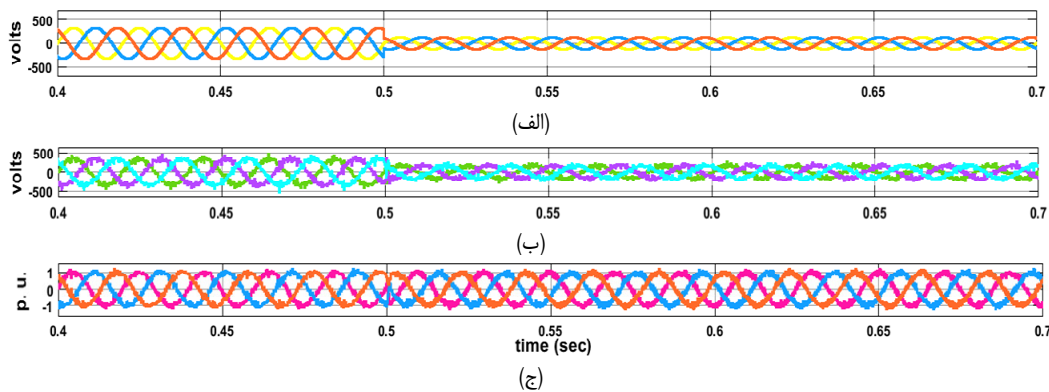
برای پیاده‌سازی تکنیک کنترلی پیشنهادی می‌بایست جریان تزریقی به شبکه توسط مبدل در نقطه اتصال را اندازه‌گیری نمود و با دانستن مقدار امپدانس شبکه، مقدار ولتاژ ورودی PLL را هنگام خطا به $V_{PCC} - ZI$ تغییر داد. به منظور ساده‌کردن محاسبات می‌توان ابتدا جریان اندازه‌گیری شده را به محور dq منتقل نمود و تنها پارامترهای مؤثر در ولتاژ محور q (V_q) را به آن اضافه کرد چون تنها ولتاژ محور q در محاسبات PLL مورد نیاز می‌باشد. با استفاده از (۴) می‌توان نوشت

$$\text{input of PLL} = V_{PCC} - Z_{virtual}I = V_{PCC} - (r_{virtual} + j\omega l_{virtual})I \quad (۵)$$

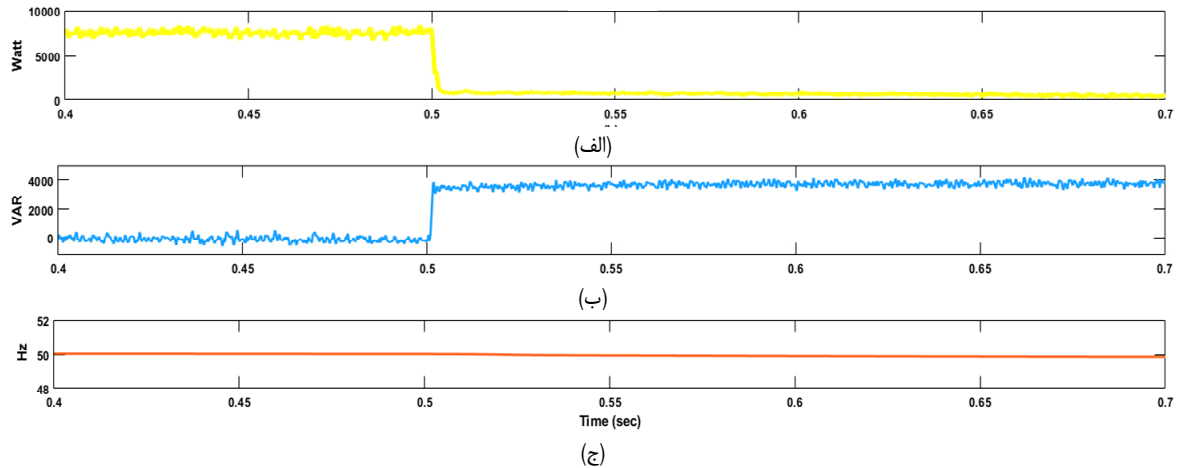
با تبدیل ولتاژ و جریان به قاب مرجع dq ولتاژ ورودی PLL در محور q طبق (۶) به دست می‌آید

$$Q \text{ axis input of PLL} = V_{PCCq} - r_{virtual}I_q + \omega l_{virtual}I_d \quad (۶)$$

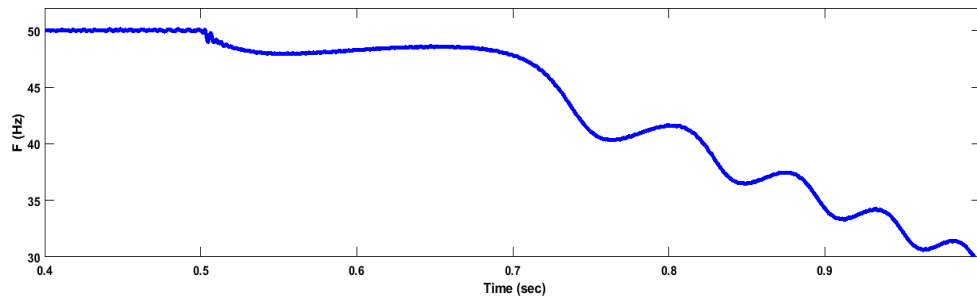
ساختار پیشنهادی برای PLL بر مبنای استفاده از امپدانس مجازی هنگام رخداد خطا در شکل ۸ آمده است. بدین طریق می‌توان به سادگی مبدل را



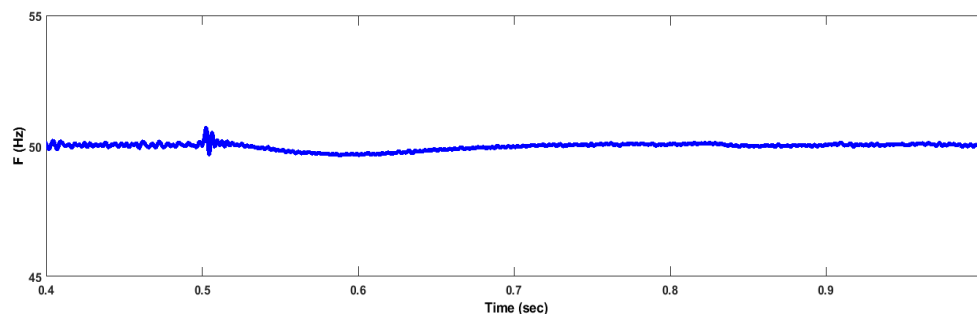
شکل ۹: (الف) ولتاژ شبکه، (ب) ولتاژ در نقطه اتصال مشترک و (ج) جریان تزریقی در نقطه اتصال مشترک.



شکل ۱۰: (الف) توان اکتیو تزریقی مبدل در نقطه اتصال مشترک، (ب) توان راکتیو تزریقی مبدل در نقطه اتصال مشترک و (ج) فرکانس در نقطه اتصال مشترک.



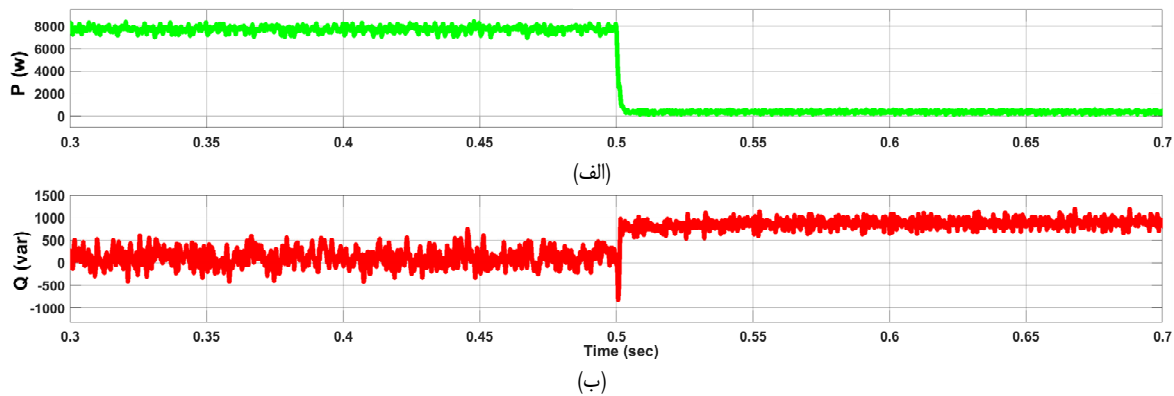
شکل ۱۱: فرکانس خروجی PLL در صورت رخداد افت ولتاژ سنگین ۰/۰۵ پریونیت.



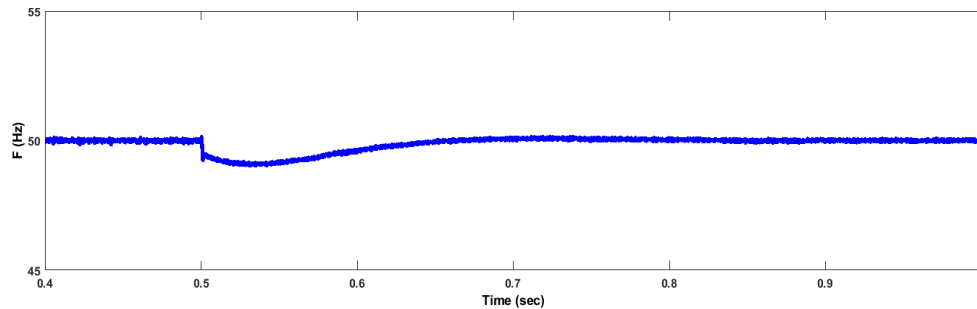
شکل ۱۲: فرکانس خروجی PLL با استفاده از روش پیشنهادی در صورت رخداد افت ولتاژ سنگین ۰/۰۵ پریونیت.

۰/۶ اهم در نظر گرفته شده و فرکانس خروجی PLL در این حالت در شکل ۱۴ آمده است. همان طور که مشاهده می‌شود مبدل همچنان می‌تواند با شبکه سنکرون باقی بماند. قابل ذکر است که روش پیشنهادی می‌تواند به خوبی در مقادیر متفاوت مقاومت و اندوکتانس طول خط عمل کرده و عملکرد PLL را بهبود دهد. جهت بررسی بیشتر کارکرد روش پیشنهادی در خطوط با طول متفاوت،

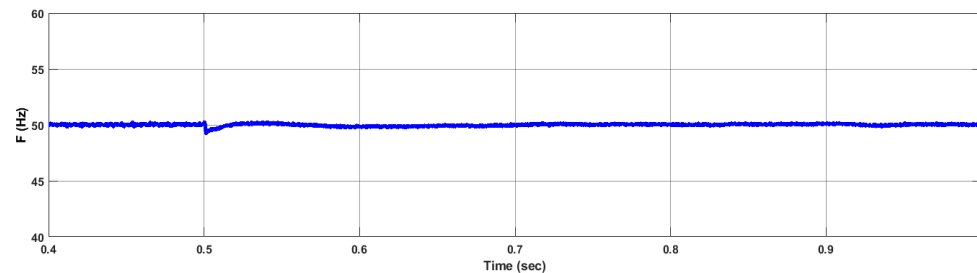
می‌تواند با نقطه مجازی که فرکانس ثابتی دارد سنکرون باقی بماند. مقدار توان اکتیو و راکتیو در این حالت در شکل ۱۳ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که مقدار توان اکتیو انتقالی در این حالت صفر نیست بلکه حدوداً ۳۴۰ وات می‌باشد و توان راکتیو حدود ۹۳۰ وار است. جهت بررسی کارایی روش کنترلی در شرایطی که مقدار امپدانس مجازی دقیقاً برابر با امپدانس شبکه نباشد، مقدار امپدانس مجازی برابر با



شکل ۱۳: (الف) توان اکتیو تزریقی مبدل در نقطه اتصال مشترک و (ب) توان راکتیو تزریقی مبدل در نقطه اتصال مشترک.



شکل ۱۴: فرکانس خروجی PLL با استفاده از روش پیشنهادی با امپدانس مجازی برابر با ۰/۶ اهم.



شکل ۱۵: فرکانس خروجی PLL با استفاده از روش پیشنهادی با مقدار مقاومت ۱/۶ و اندوکتانس ۸ میلی هانری.

اصطلاح فریز^۱ می‌کنند. این روش در مقایسه با روش پیشنهادی ما بسیار ساده‌تر می‌باشد چون نیاز به بلوکی اضافی جهت ارتقای عملکرد PLL ندارد. اما عیب آن این است که قادر به تشخیص پرش فاز نمی‌باشد و کاهش ولتاژ اغلب با پرش فاز همراه است. همچنین روش فریز کردن ممکن است عملکرد بعد از خطا را دچار مشکل کند.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی بر مبنای امپدانس مجازی جهت بهبود پایداری گذرای مبدل متصل به شبکه ضعیف هنگام افت ولتاژ سنگین ارائه شد. با استفاده از روش پیشنهادی، هنگام رخداد خطا PLL با نقطه‌ای قوی‌تر در شبکه که فرکانس ثابتی دارد سنکرون می‌شود. اگر مقدار امپدانس مجازی دقیقاً برابر با امپدانس دیده‌شده از نقطه اتصال مبدل تا مکان خطا باشد، این نقطه همان مکان رخداد خطا است. ولی اگر تخمین امپدانس دقیق نباشد نیز پایداری مبدل حفظ می‌شود، چون با استفاده از روش پیشنهادی مبدل توانسته است با نقطه‌ای قوی‌تر در شبکه و نه لزوماً نقطه رخداد خطا سنکرون شود. بدین طریق می‌توان بدون تغییر پارامترهای کنترلی PLL حتی در شرایطی که افت ولتاژ بسیار سنگین است، پایداری مبدل را حفظ

مقدار امپدانس خطا برابر با مقاومت ۱/۶ اهم و اندوکتانس ۸ میلی هانری در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۱۵ آمده است. جهت مقایسه روش پیشنهادی با روش ارائه‌شده در [۲۲] در شرایط یکسان خطایی رخ می‌دهد. مطابق با روش ارائه‌شده در [۲۲] جهت بهبود پایداری گذرای مبدل، مقادیر مرجع جریان اکتیو و راکتیو طبق (۲) انتخاب می‌شود. بدین طریق هنگام رخداد خطا مقدار جریان اکتیو مرجع ۰/۵۳۷ پریونیت و مقدار جریان راکتیو مرجع ۰/۸۴۳- پریونیت انتخاب می‌شوند. با این انتخاب مراجع جریان، پایداری گذرای مبدل حفظ شده و با شبکه سنکرون باقی می‌ماند. مقدار توان اکتیو انتقالی در این حالت ۵۳۰ وات و مقدار توان راکتیو حدود ۸۴۰ وار می‌باشد. در مقایسه با روش پیشنهادی توان راکتیو کمتری منتقل شده است (در روش پیشنهادی ۹۳۰ وار توان راکتیو در شرایط یکسان انتقال می‌یابد). با توجه به اهمیت تزریق توان راکتیو برای گذر از خطا و این که مبدل می‌بایست از حداکثر ظرفیت خود برای پشتیبانی از ولتاژ شبکه استفاده کند، این موضوع می‌تواند حایز اهمیت باشد.

روش دیگری جهت ارتقای پایداری گذرای مبدل در [۲۵] بیان گردیده است. در این روش هنگام رخداد خطا عملکرد PLL را متوقف و به

- [17] D. Pan, X. Wang, F. Liu, and R. Shi, "Transient stability of voltage-source converters with grid-forming control: a design-oriented study," *IEEE J. of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 8, no. 2, pp. 1019-1033, Jun. 2019.
- [18] D. Pan, X. Wang, F. Liu, and R. Shi, "Transient stability analysis of droop-controlled grid-connected converters with inertia emulating low-pass filters," in *Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE'19*, pp. 34-40, Baltimore, MD, USA, 29 Sept.-3 Oct. 2019.
- [19] L. Huang, H. Xin, Z. Wang, L. Zhang, K. Wu, and J. Hu, "Transient stability analysis and control design of droop-controlled voltage source converters considering current limitation," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 10, no. 1, pp. 578-591, Jan. 2017.
- [20] M. G. Taul, X. Wang, P. Davari, and F. Blaabjerg, "An overview of assessment methods for synchronization stability of grid-connected converters under severe symmetrical grid faults," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 34, no. 10, pp. 9655-9670, Oct. 2019.
- [21] X. He, H. Geng, R. Li, and B. C. Pal, "Transient stability analysis and enhancement of renewable energy conversion system during LVRT," *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 11, no. 3, pp. 1612-1623, Jul. 2020.
- [22] J. Pei, et al., "Characteristic analysis and risk assessment for voltage-frequency coupled transient instability of large-scale grid-connected renewable energy plants during LVRT," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 7, pp. 5515-5530, Jul. 2020.
- [23] P. Sun, et al., "Virtual capacitance control for improving dynamic stability of the DFIG-based wind turbines during a symmetrical fault in a weak AC grid," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 1, pp. 333-346, Jan. 2021.
- [24] J. A. Suul, S. D'Arco, P. Rodriguez, and M. Molinas, "Impedance-compensated grid synchronization for extending the stability range of weak grids with voltage source converters," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 6, pp. 1315-1326, Apr. 2016.
- [25] B. Weise, "Impact of K-factor and active current reduction during fault-ride-through of generating units connected via voltage-sourced converters on power system stability," *IET Renewable Power Generation*, vol. 9, no. 1, pp. 25-36, Jan. 2015.

امید عبدلی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق گرایش سیستم‌های قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۵ در دانشگاه اصفهان به پایان رسانده است و هم‌اکنون دانشجوی دکتری در دانشگاه اصفهان در رشته مهندسی برق (سیستم‌های قدرت) می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: کیفیت توان در سیستم‌های توزیع، میدل‌های متصل به شبکه، تولید پراکنده و پایداری گذرا در سیستم‌های قدرت.

مهدی قلی‌پور در سال ۱۳۶۶ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی اصفهان و در سال ۱۳۷۰ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه تهران دریافت نمود. در سال ۷۹ جهت تحصیل در مقطع دکترا به فرانسه اعزام و در سال ۸۲ موفق به اخذ درجه دکترا در مهندسی برق از دانشگاه نانسی ۱ گردید. وی از سال ۱۳۸۹ در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه اصفهان مشغول به فعالیت گردید و هم‌اکنون دانشیار گروه مهندسی برق دانشکده فنی مهندسی دانشگاه اصفهان می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده شامل موضوعاتی مانند: کاربرد ادوات FACTS، فیلترهای اکتیو، حالت‌های گذار در سیستم‌های قدرت و میکروگرید می‌باشد.

رحمت‌الله هوشمند تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۶۸ و ۱۳۷۰ از دانشگاه فردوسی مشهد و دانشگاه تهران و در مقطع دکتری مهندسی برق - قدرت در سال ۱۳۸۲ از دانشگاه تربیت مدرس تهران به پایان رسانده است و هم‌اکنون استاد گروه مهندسی برق دانشکده فنی مهندسی دانشگاه اصفهان می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: شبکه‌های هوشمند، منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته.

و سیگنال‌های مرجع جریان را به خوبی کنترل نمود. همچنین بدون نیاز به تغییر سیگنال‌های مرجع جریان مقدار کمی توان اکتیو برای حفظ پایداری میدل به شبکه تزریق می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار Matlab نیز بررسی گردید که تأییدی بر درستی عملکرد روش پیشنهادی می‌باشد.

مرجع

- [1] I. Series, *Microgrids and Active Distribution Networks*, the Institution of Engineering and Technology, 2009.
- [2] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. Rodriguez, *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*, John Wiley & Sons, 2011.
- [3] C. Y. Tang, Y. T. Chen, and Y. M. Chen, "PV power system with multi-mode operation and low-voltage ride-through capability," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 12, pp. 7524-7533, Dec. 2015.
- [4] E. Afshari, et al., "Control strategy for three-phase grid-connected PV inverters enabling current limitation under unbalanced faults," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 11, pp. 8908-8918, Nov. 2017.
- [5] L. Djilali, E. N. Sanchez, F. Ornelas-Tellez, A. Avalos, and M. Belkheiri, "Improving microgrid low-voltage ride-through capacity using neural control," *IEEE Systems J.*, vol. 14, no. 2, pp. 2825-2836, Jun. 2019.
- [6] A. Mojallal and S. Lotfifard, "Enhancement of grid connected PV arrays fault ride through and post fault recovery performance," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 10, no. 1, pp. 546-555, Jan. 2017.
- [7] D. Eltigani and S. Masri, "Challenges of integrating renewable energy sources to smart grids: a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 52, pp. 770-780, Dec. 2015.
- [8] H. Tian, F. Gao, C. Ma, G. He, and G. Li, "A review of low voltage ride-through techniques for photovoltaic generation systems," in *Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE'14*, pp. 1566-1572, Pittsburgh, PA, USA, 14-18 Sept. 2014.
- [9] A. Q. Al-Shetwi, M. Z. Sujod, F. Blaabjerg, and Y. Yang, "Fault ride-through control of grid-connected photovoltaic power plants: a review," *Solar Energy*, vol. 180, pp. 340-350, Mar. 2019.
- [10] L. Niu, X. Wang, L. Wu, F. Yan, and M. Xu, "Review of low voltage ride-through technology of doubly-fed induction generator," *The J. of Engineering*, vol. 2019, no. 16, pp. 3106-3108, Mar. 2019.
- [11] O. P. Mahela, N. Gupta, M. Khosravy, and N. Patel, "Comprehensive overview of low voltage ride through methods of grid integrated wind generator," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 99299-99326, 2019.
- [12] H. Shin, J. Jung, S. Oh, K. Hur, K. Iba, and B. Lee, "Evaluating the influence of momentary cessation mode in inverter-based distributed generators on power system transient stability," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 35, no. 2, pp. 1618-1626, Mar. 2019.
- [13] S. Mortazavian and Y. A. R. I. Mohamed, "Dynamic analysis and improved lvr performance of multiple dg units equipped with grid-support functions under unbalanced faults and weak grid conditions," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 33, no. 10, pp. 9017-9032, Oct. 2017.
- [14] X. Wang, J. Yao, J. Pei, P. Sun, H. Zhang, and R. Liu, "Analysis and damping control of small-signal oscillations for VSC connected to weak AC grid during LVRT," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 34, no. 3, pp. 1667-1676, Sept. 2019.
- [15] Z. Yang, R. Ma, S. Cheng, and M. Zhan, "Nonlinear modeling and analysis of grid-connected voltage source converters under voltage dips," *IEEE J. of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 8, no. 4, pp. 3281-3292, Dec. 2020.
- [16] A. Movahedi, A. H. Niasar, and G. B. Gharehpetian, "LVRT improvement and transient stability enhancement of power systems based on renewable energy resources using the coordination of SSSC and PSSs controllers," *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, no. 11, pp. 1849-1860, Aug. 2019.