کنترل مقاوم توان‌های اکتیو و راکتیو یک اینورتر تکفاز متصل به شبکه بر اساس فازور دینامیک جریان

امیرحسین عشقی[۱]، محمد مهدی رضائی*[۲] ، شاهرخ شجاعیان[۲]

۱- دانشجوی دکتری تخصصی، گروه برق، دانشکده فنی و مهندسی، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، اصفهان، ایران، amirhossein.eshghi@iaukhsh.ac.ir

۲- استادیار، گروه برق، دانشکده فنی و مهندسی، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، اصفهان، ایران، mm.rezaei@iaukhsh.ac.ir, shojaeian@iaukhsh.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۷

چکیده: نیاز به استفاده از انرژی‌های پاک و حضور مصرف کننده‌های مختلف تکفاز و سه‌فاز، استفاده حداکثری از منابع تولید پراکنده (DG) تکفاز و سه‌فاز را در شبکه‌های توزیع ضروری می‌سازد. حضور تولیدات پراکنده در شبکه، به علت نیاز به اینورتر جهت مبادله توان با شبکه و به دلیل ساختار غیرخطی اینورترها، نیازمند به کارگیری روش‌های کنترلی با عملکرد دینامیکی و ماندگار مناسب در مقابل تغییرات و اغتشاشات ناگهانی می‌باشد. در این مقاله، به منظور کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو یک اینورتر تکفاز متصل به باس بی‌نهایت با ولتاژ ثابت، یک کنترل کننده مقاوم جریان براساس کنترل مود لغزشی در دستگاه مختصات dq سنکرون معرفی می‌شود. به واسطه مدل‌سازی اینورتر تکفاز به صورت یک اینوتر سه فاز متعادل مجازی و به کمک فازور دینامیک (DP) جریان خروجی اینورتر، امکان کنترل مستقل توان‌های اکتیو و راکتیو اینورتر فراهم می‌شود. عملکرد این کنترل کننده به ازای سناریوهای مختلف تغییرات پله‌ای، عدم قطعیت پارامترها و اغشاشات خارجی از طریق شبیه سازی در نرم افزار MATLAB مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: تولید پراکنده، اینورتر تکفاز، کنترل مود لغزشی (SMC)، فازور دینامیک (DP)

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.4.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 2 – Summer 2021

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، با توجه به پیشرفت‌های حاصله در الکترونیک قدرت، کارایی و بازدهی منابع تولید پراکنده به طور چشمگیری بهبود یافته است. امروزه به واسطه افزایش استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر (RES) از قبیل انرژی خورشید، باد، ژئوترمال و ... برای تولید برق و نیز اتخاذ سیاست‌های تشویقی در خصوص به‌کارگیری واحدهای تولید پراکنده مبتنی بر این انرژی‌ها ، روش‌های سنتی بهره‌برداری از شبکه تغییر یافته است [۱]. DG ها، واحدهایی با ظرفیت تولید کم هستند که معمولاً در نزدیکی مراکز بار نصب می‌شوند [۲]. حضور DG در شبکه، مزایایی از قبیل تأمین توان پشتیبان در هنگام وقوع قطعی در شبکه، تأمین توان راکتیو و تنظیم ولتاژ شبکه، کاهش هزینه‌های انتقال، فراهم نمودن امکان فروش انرژی الکتریکی مازاد در بازار برق، احداث و راه‌اندازی درکسری از زمان مورد نیاز جهت احداث نیروگاه‌های بزرگ و ... دارد[۱].

با به‌کارگیری سیستم‌های تولید پراکنده به صورت منفرد، بروز مسائلی از قبیل قیمت بالای تولید، محدودیت ظرفیت، قابلیت اطمینان و امنیت پایین، گریزناپذیر خواهد بود. بنابراین برای بیشینه کردن ظرفیت‌های فنی و اقتصادی سیستم‌های تولید پراکنده و همچنین تأمین بارهایی که به قابلیت اطمینان بالایی نیاز دارند، محققان مفهوم جدیدی را به نام ریزشبکه (MG) مطرح ساخته‌اند. MG، یک سیستم توزیع کوچک محلی است که معمولاً شامل یک یا چند DG، بار و تجهیزات ذخیره سازی انرژی بوده و می‌تواند هم به صورت متصل به شبکه و هم به صورت مستقل از شبکه (به صورت جزیره‌ای) کار کند [۳]. در حالت متصل به شبکه، MG در نقطه اتصال مشترک (PCC) متصل به شبکه کار می‌کند که به دلیل ظرفیت نسبتاً کوچک DG ها، ولتاژ باس ها و فرکانس سیستم به طور غالب تحت تأثیر شبکه اصلی خواهد بود. در این شرایط، وظیفه اصلی هر واحد DG تولید مقادیر از پیش تعیین‌شده توان اکتیو و راکتیو می باشد [۴,۵]. در حالت متصل به شبکه، جهت اتصال DG به شبکه و امکان انتقال توان تولید شده، معمولاً از مبدل‌های الکترونیک قدرت (PECs) یا اینورترها استفاده می‌شود. در این راستا در شبکه‌های توزیع تکفاز، از اینورتر منبع ولتاژی (VSI) تکفاز استفاده می‌شود [۶] که به خاطر ساختار نامتعادل خود، مشکلات عمده‌ای را در خصوص پایداری MG ایجاد می‌کند. عملکرد مناسب MG در هر دو مد کاری متصل به شبکه و مستقل از شبکه و لزوم دستیابی به پاسخ دینامیکی سریع در مقابل تغییرات ناگهانی بار، اغتشاشات شبکه و عدم قطعیت پارامترهای سیستم، نیازمند روش‌های کارآمد کنترل توان و تنظیم ولتاژ و فرکانس است.

در زمینه کنترل اینورترهای تکفاز متصل به شبکه، تکنیک‌های مختلفی در مقالات ارائه شده است که برخی از پرکاربردترین آنها عبارتند از:

کنترل کننده تناسبی–رزونانسی (PR) : یک کنترل کننده خطی در دستگاه مختصات ساکن بوده و از مزایای آن، می توان بهره بسیار بالا در فرکانس شبکه و حذف خطای حالت ماندگار و از عیوب آن، می‌توان پاسخ گذرای نامناسب و ناپایداری در برابر تغییرات پله‌ای پارامترهای سیستم را نام برد [۶].

کنترل کننده تناسبی–انتگرالی در دستگاه مختصات سنکرون (SRFPI) : یک کنترل کننده خطی در دستگاه مختصات سنکرون است و از آنجا که کمیت‌های AC فرکانس اصلی سیستم در دستگاه سنکرون به کمیت‌های DC تبدیل می‌شوند، استفاده از کنترل کننده PI سبب دستیابی به خطای حالت ماندگار صفر شده و لذا در سیستم‌های سه‌فاز به وفور مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین در صورت تنظیم صحیح بهره‌های تناسبی و انتگرالی، پاسخ دینامیکی بسیار مناسبی را فراهم می‌کند [۷,۸]. البته باید در نظر داشت که کنترل کننده PI اصولاً یک تنظیم کننده به حساب می آید.

کنترل کننده مود لغزشی (SM) : یک کنترل کننده غیر خطی با طراحی، اجرا و تنظیم ضرایب ساده و مقاوم در برابر عدم قطعیت و تغییرات پله‌ای پارامترهای سیستم و اغتشاشات می باشد که در سیستم-های سه‌فاز [۵,۹,۱۰]. و تکفاز [۱۱,۱۲] مورد استفاده قرار می‌گیرد. مشکل اصلی [۱۱,۱۲] عدم استفاده از سطح لغزش تناسبی- انتگرالی و در نتیجه ایجاد خطای ماندگار در جریان خروجی اینورتر می‌باشد. به علاوه، کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو به صورت مستقل از یکدیگر انجام نمی‌شود.

کنترل مستقل توان‌های اکتیو و راکتیو در دستگاه مختصات دو محوری امکان‌پذیر است. به منظور استفاده از دستگاه مختصات دو محوری در حالت تکفاز، وجود یک سیگنال مجازی عمود بر سیگنال اصلی نیاز است [۱۳]. در [۱۴] از سیگنالی با ۹۰ تأخیر فاز نسبت به سیگنال اصلی استفاده شده است. وجود تأخیر زمانی، پاسخ دینامیکی سیستم را دچار اختلال می‌کند [۱۳]. در [۱۵] از سیگنال اصلی و تبدیل هیلبرت آن استفاده شده که امکان جبران افت ولتاژ ناشی از افزایش ناگهانی بار را فراهم می‌کند. در عین حال، اصلی‌ترین عیب استفاده از تبدیل هیلبرت، پیچیدگی و محاسبات طولانی آن می‌باشد. در [۸,۱۶] از یک ساختار انتگرال‌گیر مرتبه دوم تعمیم یافته (SOGI) استفاده شده که عملکرد اینورتر را در حضور شکل موج ولتاژ دارای اعوجاج بهبود می‌بخشد. به کمک ساختار SOGI در ترکیب با یک حلقه قفل فاز دیجیتال (DPLL)، علاوه بر امکان تنظیم توان‌های اکتیو و راکتیو خروجی اینورتر، امکان کاهش هارمونیک‌های جریان و نیز کاهش شدید نوسانات ولتاژ و جریان در خروجی یک ماژول فتوولتائیک فراهم شده است. البته باید توجه داشت که انتقال مدل یک سیستم نامتعادل به دستگاه مختصات سنکرون یا ساکن به علت وجود مولفه توالی منفی سبب ایجاد نوسان‌هایی با فرکانس دو برابر در خروجی خواهد شد.

مدل‌سازی یک سیستم نامتعادل با استفاده از مفهوم فازور دینامیک (DP)، کمک می کند مولفه‌های نامتعادل AC به مولفه‌های DC تبدیل شوند [۱۷]. تاکنون، فازورهای دینامیک در مدل‌سازی اینورترهای قدرت و MG مورد استفاده واقع شده اند. در [۱۷-۱۹] تعیین محدوده پایداری

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.4.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 2 – Summer 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

سیستم و رفتار دینامیکی MG با استفاده از مفهوم فازورهای دینامیک محقق شده است.

در این مقاله، به منظور کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو یک اینورتر تکفاز متصل به شبکه بی‌نهایت با ولتاژ و فرکانس ثابت، از یک کنترل کننده مقاوم بر پایه کنترل مود لغزشی (SMC) جریان در دستگاه مختصات dq سنکرون مجازی استفاده شده است و بدین ترتیب کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو به صورت مستقل از یکدیگر امکان‌پذیر می‌باشد. در کنترل کننده پیشنهادی، اینورتر تکفاز به عنوان یک اینورتر سه‌فاز متعادل مجازی در نظر گرفته شده و با استفاده از DP جریان خروجی اینورتر، معادلات کنترلی مود لغزشی در دستگاه مختصات dq سنکرون مجازی پیاده‌سازی می‌شوند. به منظور بررسی کارآیی روش کنترلی پیشنهادی، شبیه سازی کامپیوتری در محیط نرم افزار MATLAB انجام شده و نتایج، بیانگر عملکرد دینامیکی و مانگار بسیار مناسب کنترل کننده پیشنهادی در مقابل تغییرات پله‌ای و عدم قطعیت پارامترهای سیستم و اغتشاشات خارجی از قبیل افت ولتاژهای آنی می‌باشند.

سازماندهی و ساختار مقاله به شرح زیر است. ابتدا در بخش دوم، به تبیین مفهوم فازورهای دینامیکی پرداخته شده است. سپس در بخش سوم، ضمن معرفی سیستم تحت مطالعه، طراحی کنترل کننده پیشنهادی تشریح شده است. در بخش چهارم به تحلیل نتایج حاصل از شبیه سازی پرداخته شده است و در نهایت، در بخش پنجم نتیجه گیری مقاله ارائه گردیده است.

۲- مفهوم فازور دینامیک

در این قسمت، ابتدا مفهوم DP شرح داده می‌شود و سپس کنترل کننده پیشنهادی طراحی می گردد.

در روش میانگین سازی تعمیم یافته (GAM)، یک سیگنال متغیر با زمان توسط ضرایب مرتبه صفر، یک یا هر مرتبه دیگری به نام فازورهای دینامیک تخمین زده می‌شود. ایده اصلی DP بر پایه این ویژگی است که هر شکل موج مختلط در حوزه زمان مانند $x(t)$ در بازه زمانی $\tau \in (t-T,t]$ توسط سری فوریه رابطه (۱) بیان می شود [۶,۲۰]:

$$x(\tau)=\sum_{k=-\infty}^{\infty} X_k(t)e^{jk\omega_s\tau} \qquad (۱)$$

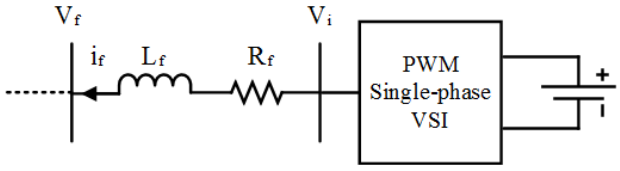
در رابطه (۱)، $\omega_s=\frac{2\pi}{T}$ و $X_k(t)$ ضرایب مختلط سری فوریه یا فازور می‌باشند. k اُمین فازور دینامیک یا متغیر با زمان در زمان t، $X_k(t)$، از انتگرال‌گیری در بازه زمانی مربوطه به کمک رابطه (۲) به دست می آید.

$$X_k(t)=\frac{1}{T}\int_{t-T}^{t} x(\tau)e^{-jk\omega_s\tau}d\tau=\langle x\rangle_k(t) \qquad (۲)$$

در رابطه (۲)، $\langle x\rangle_k(t)$ مقدار متوسط فازور k اُم در بازه زمانی $(t-T,t]$ و T پریود مولفه اصلی است.

۳- طراحی کنترل کننده پیشنهادی

با مدل‌سازی یک DG تکفاز در حالت متصل به شبکه بی‌نهایت، به صورت یک DG سه‌فاز متعادل مجازی و با فرض آنکه پارامترهای سیستم نامی باشند، معادلات دینامیکی ولتاژ و جریان در دستگاه مختصات dq سنکرون برحسب پریونیت باتوجه به شکل (۱) از رابطه (۳) به‌دست می‌آیند.



شکل (۱): نمای مداری DG تکفاز متصل به شبکه بی‌نهایت

$$\begin{bmatrix} v_{qi} \\ v_{di} \end{bmatrix}^{pu} = (R_f)^{pu}\begin{bmatrix} i_{qf} \\ i_{df} \end{bmatrix}^{pu} + \left(\frac{X_{Lf}^{pu}}{\omega}\right)\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_{qf} \\ i_{df} \end{bmatrix}^{pu} + \left(X_{Lf}^{pu}\right)\begin{bmatrix} i_{df} \\ -i_{qf} \end{bmatrix}^{pu} + \begin{bmatrix} v_{qf} \\ v_{df} \end{bmatrix}^{pu} \qquad (۳)$$

با بازنویسی رابطه (۳) خواهیم داشت:

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_{qf} \\ i_{df} \end{bmatrix}^{pu} = \left(\frac{\omega}{X_{Lf}^{pu}}\right)\left\{\begin{bmatrix} v_{qi} \\ v_{di} \end{bmatrix}^{pu} - (R_f)^{pu}\begin{bmatrix} i_{qf} \\ i_{df} \end{bmatrix}^{pu} - \left(X_{Lf}^{pu}\right)\begin{bmatrix} i_{df} \\ -i_{qf} \end{bmatrix}^{pu} - \begin{bmatrix} v_{qf} \\ v_{df} \end{bmatrix}^{pu}\right\} \qquad (۴)$$

اگر $a=\frac{1}{X_{Lf}^{pu}}$ و $b=R_f^{pu}$ پارامترهای نامی فیلتر باشند، رابطه (۴) را می‌توان به صورت رابطه (۵) نوشت.

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_{qf} \\ i_{df} \end{bmatrix}^{pu} = (\omega a)\left\{\begin{bmatrix} v_{qi} \\ v_{di} \end{bmatrix}^{pu} - b\begin{bmatrix} i_{qf} \\ i_{df} \end{bmatrix}^{pu} - \left(\frac{1}{a}\right)\begin{bmatrix} i_{df} \\ -i_{qf} \end{bmatrix}^{pu} - \begin{bmatrix} v_{qf} \\ v_{df} \end{bmatrix}^{pu}\right\} \qquad (۵)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.4.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 2 – Summer 2021

هدف از طراحی کنترل‌کننده پیشنهادی این است که از طریق کنترل جریان خروجی اینورتر، توان‌های اکتیو و راکتیو DG مقادیر مرجع خود را دنبال کنند. لذا ابتدا باتوجه به روابط (۶,۷)، مقادیر مرجع جریان‌های دو محوری خروجی اینورتر را برحسب پریونیت در دستگاه مختصات dq سنکرون به دست می آوریم.

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{qf} & v_{df} \\ -v_{df} & v_{qf} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qf} \\ i_{df} \end{bmatrix} \quad (۶)$$

$$\begin{bmatrix} i_{qf}^{ref} \\ i_{df}^{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{qf} & v_{df} \\ -v_{df} & v_{qf} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P^{ref} \\ Q^{ref} \end{bmatrix} \quad (۷)$$

در این صورت، هدف کنترل کننده این است که مولفه‌های دو محوری جریان خروجی اینورتر در دستگاه مختصات dq سنکرون مقادیر مرجع خود را دنبال کنند. لذا برای هر مولفه، خطای آن نسبت به مقدار مرجع مربوطه به صورت رابطه (۸) تعریف می‌شود.

$$\begin{bmatrix} e_q \\ e_d \end{bmatrix}^{pu} = \begin{bmatrix} i_{qf}^{ref} \\ i_{df}^{ref} \end{bmatrix}^{pu} - \begin{bmatrix} i_{qf} \\ i_{df} \end{bmatrix}^{pu} \quad (۸)$$

در رابطه (۸) ، i_{qf}^{ref} و i_{qf} به ترتیب مقادیر مرجع و لحظه‌ای مولفه q جریان خروجی اینورتر برحسب پریونیت در دستگاه مختصات dq سنکرون و e_q اختلاف آن‌ها و همچنین i_{df}^{ref} و i_{df} به ترتیب مقادیر مرجع و لحظه‌ای مولفه d جریان خروجی اینورتر بر حسب پریونیت در دستگاه مختصات dq سنکرون و e_d اختلاف آن‌ها می باشد.

به منظور صفر کردن خطای مولفه‌های q و d جریان خروجی اینورتر، سطوح لغزش تناسبی – انتگرالی به صورت رابطه (۹) در نظر گرفته می‌شوند.

$$\begin{bmatrix} S_q \\ S_d \end{bmatrix}^{pu} = \begin{bmatrix} e_q \\ e_d \end{bmatrix}^{pu} + k_e \int_0^t \begin{bmatrix} e_q \\ e_d \end{bmatrix}^{pu} d\tau \quad (۹)$$

در رابطه (۹) ، $k_e = diag\begin{bmatrix} k_{eq}, k_{ed} \end{bmatrix}$ یک ماتریس قطری از ضرایب ثابت و مثبت به عنوان بهره‌های کنترل کننده است.

طبق تئوری SMC، به منظور آنکه حالات سیستم به سطوح لغزش برسند باید شرط زیر برقرار گردد [۵].

$$\frac{d}{dt} S^{pu} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} S_q \\ S_d \end{bmatrix}^{pu} = 0 \quad (۱۰)$$

با در نظر گرفتن رابطه (۹)، به رابطه (۱۱) می رسیم.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} S_q \\ S_d \end{bmatrix}^{pu} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e_q \\ e_d \end{bmatrix}^{pu} + k_e \begin{bmatrix} e_q \\ e_d \end{bmatrix}^{pu} = 0 \quad (۱۱)$$

از رابطه (۸) نتیجه می‌شود که:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} S_q \\ S_d \end{bmatrix}^{pu} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{qf}^{ref} \\ i_{df}^{ref} \end{bmatrix}^{pu} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{qf} \\ i_{df} \end{bmatrix}^{pu} + k_e \begin{bmatrix} e_q \\ e_d \end{bmatrix}^{pu} = 0 \quad (۱۲)$$

با جایگذاری رابطه (۵) در رابطه (۱۲) و با توجه به رابطه (۱۰)، قانون کنترل به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_{qi} \\ v_{di} \end{bmatrix}^{pu} &= b \begin{bmatrix} i_{qf} \\ i_{df} \end{bmatrix}^{pu} + \left(\frac{1}{a}\right) \begin{bmatrix} i_{df} \\ -i_{qf} \end{bmatrix}^{pu} + \begin{bmatrix} v_{qf} \\ v_{df} \end{bmatrix}^{pu} \\ &+ \left(\frac{1}{\omega a}\right) k_e \begin{bmatrix} e_q \\ e_d \end{bmatrix}^{pu} + \left(\frac{1}{\omega a}\right) \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{qf}^{ref} \\ i_{df}^{ref} \end{bmatrix}^{pu} \end{aligned} \quad (۱۳)$$

به منظور تحقق هم‌زمان فاز رسیدن و فاز لغزش، قانون کنترل طبق رابطه (۱۴) تغییر خواهد کرد [۱۰].

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_{qi} \\ v_{di} \end{bmatrix}^{pu} &= b \begin{bmatrix} i_{qf} \\ i_{df} \end{bmatrix}^{pu} + \left(\frac{1}{a}\right) \begin{bmatrix} i_{df} \\ -i_{qf} \end{bmatrix}^{pu} \\ &+ \begin{bmatrix} v_{qf} \\ v_{df} \end{bmatrix}^{pu} + \left(\frac{1}{\omega a}\right) k_e \begin{bmatrix} e_q \\ e_d \end{bmatrix}^{pu} \\ &+ \left(\frac{1}{\omega a}\right) \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{qf}^{ref} \\ i_{df}^{ref} \end{bmatrix}^{pu} + k_s \begin{bmatrix} sgn(S_q) \\ sgn(S_d) \end{bmatrix}^{pu} \end{aligned} \quad (۱۴)$$

در رابطه (۱۴)، $k_s = diag\begin{bmatrix} k_{sq}, k_{sd} \end{bmatrix}$ ماتریس قطری از ضرایب ثابت مثبت به عنوان بهره‌های کنترل کننده بوده و تابع sign نیز از رابطه (۱۵) به دست می‌آید.

$$sgn(x) = \frac{|x|}{x} \quad (۱۵)$$

برای جلوگیری از چترینگ ناخواسته در اطراف سطوح لغزش، به جای تابع sign از تابع saturation در رابطه (۱۶) استفاده کرده و به رابطه (۱۷) می‌رسیم.

$$sat(x) = \begin{cases} sgn(x) & |x| > \lambda \\ x/\lambda & |x| \le \lambda \end{cases} \quad (۱۶)$$

در رابطه (۱۶)، λ یک عدد ثابت و مثبت می باشد.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.4.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 2 – Summer 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

$$\begin{bmatrix} v_{qi} \\ v_{di} \end{bmatrix}^{pu} = b\begin{bmatrix} i_{qf} \\ i_{df} \end{bmatrix}^{pu} + \left(\frac{1}{a}\right)\begin{bmatrix} i_{df} \\ -i_{qf} \end{bmatrix}^{pu} + \begin{bmatrix} v_{qf} \\ v_{df} \end{bmatrix}^{pu} + \left(\frac{1}{\omega a}\right)k_e\begin{bmatrix} e_q \\ e_d \end{bmatrix}^{pu} + \left(\frac{1}{\omega a}\right)\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_{qf}^{ref} \\ i_{df}^{ref} \end{bmatrix}^{pu} + k_s\begin{bmatrix} sat(S_q) \\ sat(S_d) \end{bmatrix}^{pu} \quad (۱۷)$$

اثبات پایداری کنترل کننده پیشنهادی از طریق پایداری لیاپانوف قابل بررسی می‌باشد. تابع مثبت معین لیاپانوف را به صورت رابطه (۱۸) در نظر می‌گیریم.

$$W = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} S_q & S_d \end{bmatrix}^{pu}\begin{bmatrix} S_q \\ S_d \end{bmatrix}^{pu} \quad (۱۸)$$

با مشتق‌گیری از رابطه (۱۸) نسبت به زمان، به رابطه (۱۹) می‌رسیم.

$$\frac{dW}{dt} = \begin{bmatrix} S_q & S_d \end{bmatrix}^{pu}\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} S_q \\ S_d \end{bmatrix}^{pu} \quad (۱۹)$$

با استفاده از روابط (۵,۱۰)، در نهایت، به رابطه (۲۰) خواهیم رسید.

$$\frac{dW}{dt} = -\omega a\begin{bmatrix} S_q & S_d \end{bmatrix}^{pu}\left(\begin{bmatrix} k_{sq}\, sat(S_q) \\ k_{sd}\, sat(S_d) \end{bmatrix}\right) \quad (۲۰)$$

با توجه به اینکه رابطه (۲۰)، یک تابع منفی معین را نشان می‌دهد، کنترل کننده پیشنهادی، پایدار مجانبی می‌باشد. پارامترهای سیستم و پارامترهای کنترل‌کننده پیشنهادی به ترتیب در جدول (۱) و (۲) بیان شده‌اند.

جدول (۱): پارامترهای سیستم

مقاومت فیلتر	0.2 Ω
اندوکتانس فیلتر	500 µH
فرکانس سوئیچینگ اینورتر	5250 Hz

جدول (۲): پارامترهای کنترلی

λ	1
k_{eq}	30
k_{ed}	30
k_{sq}	22
k_{sd}	9
P^{ref}	0.48 pu
Q^{ref}	0

۴- نتایج شبیه سازی

در این قسمت، یک DG تکفاز متصل به شبکه بی‌نهایت به کنترل کننده پیشنهادی مجهز شده و عملکرد کنترل کننده به ازای سناریوهای مختلفی اعم از تغییرات پله‌ای و عدم قطعیت پارامترهای سیستم و نیز اغتشاشات خارجی از قبیل افت ولتاژ آنی با انجام شبیه‌سازی در محیط نرم افزار MATLAB مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبیه سازی، در قالب نمودارهای دامنه جریان خروجی اینورتر، دامنه ولتاژ باس شبکه بی‌نهایت و توان‌های اکتیو و راکتیو اینورتر همگی بر حسب پریونیت رسم شده‌اند. بمنظور ارزیابی عملکرد کنترل کننده پیشنهادی، نتایج حاصل از روش کنترل مود لغزشی تطبیقی، که در نمودارها به اختصار با "ASMC" نشان داده شده است، با یک روش مبتنی بر کنترل کننده تناسبی انتگرالی "PI" مقایسه شده است. در روش مبتنی بر کنترل کننده PI، ولتاژهای مرجع اینورتر بجای تعیین توسط رابطه (۱۷)، از رابطه (۲۱) بدست آمده است.

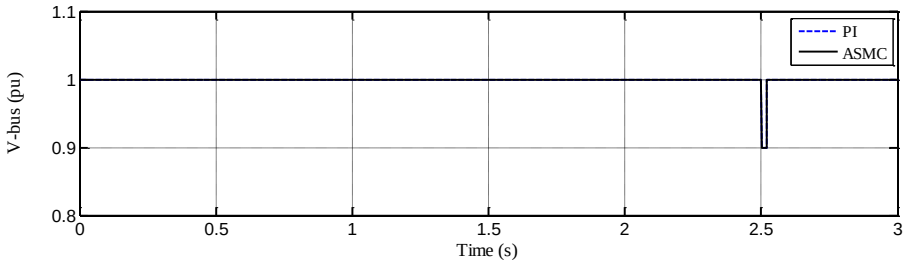
$$\begin{bmatrix} v_{qi} \\ v_{di} \end{bmatrix}^{pu} = k_p\begin{bmatrix} e_q \\ e_d \end{bmatrix}^{pu} + k_i\int\begin{bmatrix} e_q \\ e_d \end{bmatrix}^{pu} dt + \left(\frac{1}{a}\right)\begin{bmatrix} i_{df} \\ -i_{qf} \end{bmatrix}^{pu} \quad (۲۱)$$

لازم به ذکر است که بمنظور انجام یک مقایسه منصفانه، ضرایب کنترل کننده PI بطوری تنظیم شده است که بهترین عملکرد را از خود به نمایش بگذارد. در شبیه سازی ها با فرض آنکه سیستم در حالت ماندگار و دائمی قرار دارد، جهت ارزیابی عملکرد کنترل کننده در مقابل عدم قطعیت پارامترهای سیستم، از $t = 0$ s ، ۲۵٪ افزایش در مقاومت فیلتر و ۲۰٪ کاهش در اندوکتانس آن در نظر گرفته شده است. همچنین به منظور بررسی تأثیر تغییرات پله‌ای پارامترها، از $t = 0.5$ s ، مقدار مرجع توان اکتیو DG به میزان ۲۵٪ و از $t = 1.5$ s ، مقدار مرجع توان راکتیو آن به میزان ۱۰٪ افزایش یافته است. در نهایت، به منظور بررسی کارایی کنترل کننده پیشنهادی در مقابل اغتشاشات خارجی، در $t = 2.5$ s ، یک افت ولتاژ آنی به میزان ۱۰٪ به مدت یک سیکل در ولتاژ باس بی‌نهایت در نظر گرفته شده است.

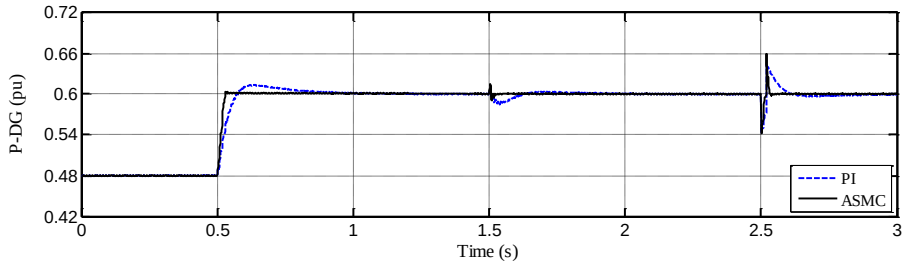
شکل (۲)، دامنه ولتاژ باس بی‌نهایت را برحسب پریونیت نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، دامنه ولتاژ باس بی‌نهایت در همه زمان‌ها مقدار ثابت ۱ پریونیت است به جز زمان $t = 2.5$ s که به مدت یک سیکل به ۰/۹ پریونیت کاهش یافته است.

شکل های (۵)-(۳) نشان می دهند پس از عدم قطعیت پارامتری ایجاد شده از زمان $t = 0$ s، همانند روش PI که ذاتا مقاوم خوبی در مقابل عدم قطعیت ها دارد، کنترل کننده پیشنهادی نیز کارایی قابل قبولی به نمایش گذاشته است و عدم قطعیت اعمال شده، خللی در عملکرد کنترل کننده ایجاد نکرده است.

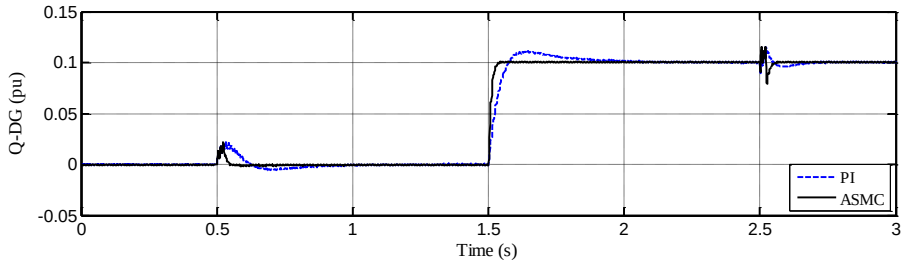
[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.4.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 2 – Summer 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]



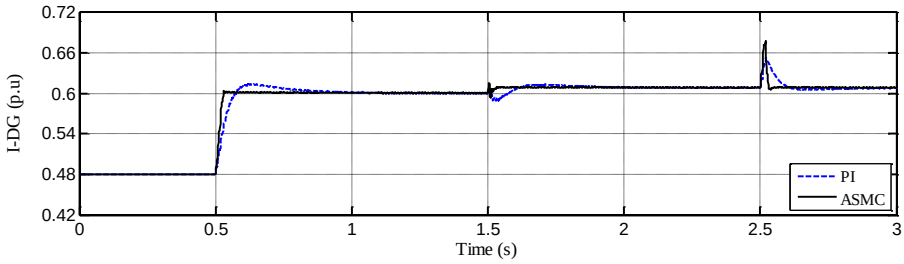
شکل (۲): دامنه ولتاژ باس بی‌نهایت برحسب پریونیت



شکل (۳): توان اکتیو DG برحسب پریونیت



شکل (۴): توان راکتیو DG برحسب پریونیت



شکل (۵): دامنه جریان خروجی اینورتر برحسب پریونیت

با بررسی شکل های (۵)-(۳)، در نزدیکی زمان $t = 0.5$ s مشاهده می‌شود که با افزایش پله ای مقدار مرجع توان اکتیو، مقدار واقعی توان اکتیو در روش پیشنهادی با سرعت و حالت گذرای مناسبی آن را تعقیب کرده است. شکل های (۴) و (۵) نشان می دهند از آنجا که توان راکتیو خروجی DG صفر می باشد، با افزایش توان اکتیو خروجی DG، اندازه جریان خروجی نیز متناسب با آن می یابد. بررسی شکل (۴) نیز موید این است که توان راکتیو خروجی نیز به خوبی مقدار مرجع (صفر) را دنبال می کند. حالت گذرای مشاهده شده در زمان $t = 0.5$ s به این دلیل است که با افزایش ناگهانی جریان خروجی، ولتاژ اینورتر نیز بطور ناگهانی تغییر یافته که منجر به بروز حالت گذرا در توان راکتیو شده است، اما پس از رسیدن جریان به حالت مانای خود، ولتاژ خروجی اینورتر چنان تنظیم شده است که توان راکتیو خروجی دومرتبه به مقدار مرجع صفر همگرا شود.

بررسی شکل های (۵)-(۳) در نزدیکی زمان $t = 1.5$ s نشان دهنده آن است که با افزایش مقدار مرجع توان راکتیو بصورت پله ای، کنترل کننده پیشنهادی توانسته است مقدار واقعی توان راکتیو را با سرعت و حالت گذرای بسیار مناسبی به مرجع جدید همگرا کند. از آنجا که تا پیش از این، توان راکتیو خروجی DG صفر بود و بنابراین جریان خروجی کاملا همفاز با ولتاژ بود، بر اساس قانون جمع آثار می توان گفت، افزایش توان راکتیو منجر به اضافه شدن یک جریان کاملا پس فاز به جریان

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.4.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 2 – Summer 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

قبلی شده و بنابراین افزایش اندازه جریان ناشی از افزایش توان راکتیو کمتر محسوس خواهد بود. به همین دلیل است که حالت گذرای مشاهده شده در توان اکتیو نیز شدت کمتری دارد و توان اکتیو در روش پیشنهادی به طور مناسبی به مقدار مرجع خود باز می گردد.

همچنین مشاهده می‌شود که به علت وقوع افت ولتاژ آنی در لحظه $t = 2.5\ s$ در باس بی‌نهایت، کلیه متغیرها با یک حالت گذرا مواجه می‌شوند و طبق رابطه (۷) ، افزایش محسوسی در جریان خروجی اینورتر رخ می‌دهد. اما بلافاصله و پس از برطرف شدن این اغتشاش، مجدداً کمیت‌ها پس از یک حالت گذرای مناسب به مقادیر مرجع قبلی خود باز می گردند.

بررسی شکل های (۵)-(۳) نشان می دهد تمامی متغیرها در روش PI حالت گذرای شدیدتری دارند و در حقیقت هم از سرعت پایین تر و هم از اورشوت بالاتری برخوردار هستند. از آنجا که این دو ویژگی با هم در تعارض هستند، تغییر ضرایب کنترل کننده PI تنها یکی از این ویژگی ها را بهبود می دهد و باعث بدتر شدن ویژگی دیگر می شود. این در حالی است که روش پیشنهادی کارایی بسیار مناسبی را در مقابل عدم قطعیت های پارامتری، تغییر پله ای مقادیر مرجع و اغتشاشات خارجی به نمایش گذاشته است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، به منظور کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو یک اینورتر تکفاز متصل به شبکه بی‌نهایت با ولتاژ ثابت، یک کنترل کننده مقاوم جریان بر اساس کنترل مود لغزشی معرفی گردیده است. در کنترل کننده پیشنهادی، اینورتر تکفاز به صورت یک اینورتر سه‌فاز متعادل مجازی مدل‌سازی شده و بدین ترتیب به کمک فازور دینامیک جریان خروجی امکان کنترل اینورتر در دستگاه مختصات dq سنکرون فراهم شده است. رفتار و عمکرد کنترل کننده به ازای سناریوهای مختلف از قبیل تغییرات پله‌ای و عدم قطعیت پارامترهای سیستم و نیز اغتشاشات خارجی از قبیل افت ولتاژ آنی توسط شبیه سازی کامپیوتری در محیط نرم افزار MATLAB مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج، بیانگر عملکرد پایدار و مقاوم کنترل کننده نسبت به تغییرات مختلف می باشند.

مراجع

[1] S. Choudhury. "A comprehensive review on issues, investigations, control and protection trends, technical challenges and future directions for Microgrid technology." International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 30, No. 9 (2020): e12446.

[2] M. Gholami, , and A. Zakariazadeh. "Olympic ranking–based allocation of distributed generation units in distribution networks." International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 30, No. 2 (2020): e12220.

[3] A. Chatterjee, and K. B. Mohanty. "A nested control strategy for single phase power inverter integrating renewable energy systems in a microgrid." In 2016 National Power Systems Conference (NPSC), IEEE, pp. 1-6, 2016.

[4] S. D. Panjaitan, R. Kurnianto, B. W. Sanjaya, and M. C. Turner. "Control of Parallel Inverters for High Power Quality and Sharing Accuracy in Single-Phase AC Microgrids." In 2018 UKACC 12th International Conference on Control (CONTROL), IEEE, pp. 50-55, 2018.

[5] M. M. Rezaei, and J. Soltani. "Robust control of an islanded multi-bus microgrid based on input–output feedback linearisation and sliding mode control." IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 9, No. 15, pp. 2447-2454, 2015.

[6] Z. Shuai, Y. Peng, J. M. Guerrero, Y. Li, and Z. J. Shen. "Transient response analysis of inverter-based microgrids under unbalanced conditions using a dynamic phasor model." IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 66, No. 4, pp. 2868-2879, 2018.

[7] C. Y. Wu, Y. J. Chen, and J. W. Cao. "Power pulsation decoupling and power control of a single-phase voltage source inverter in a renewable energy conversion system." In 2018 IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI), pp. 1199-1202, 2018.

[8] L. Chang, Z. Geng, and M. Mao. "Single-Phase Voltage Source Inverter with Power Decoupling and Reactive Power Control." In 2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC), pp. 1-6, 2018.

[9] M. M. Rezaei, and J. Soltani. "Sliding Mode Control of a Grid-Connected Distributed Generation Unit under Unbalanced Voltage Conditions." automatika, Vol. 57, No. 1 pp. 89-98, 2016.

[10] M. M. Rezaei, and J. Soltani. "A robust control strategy for a grid-connected multi-bus microgrid under unbalanced load conditions." International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 71, pp. 68-76, 2015.

[11] F. Sebaaly, H. Vahedi, H. Y. Kanaan, and K. Al-Haddad. "Design of pulse width modulator based sliding-mode control (SMC-PWM) for sensor-less Single-Phase Packed U-Cell Inverter." In IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Vol. 1, pp. 4700-4705, 2019.

[12] H. Makhamreh, and O. Kukrer. "Discrete time sliding mode control of single phase lcl grid-inverter." In 2017 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), pp. 84-88, 2017.

[13] L. Ibarra, P. Ponce, R. Ayyanar, and A. Molina. "A Non-Adaptive Single-Phase PLL Based on Discrete Half-Band Filtering to Suppress Severe Frequency Disturbances." Energies, Vol. 13, No. 7, 2020.

[14] D. Kanavaros, G. Oriti, and A. L. Julian. "Novel implementation and comparison of active and reactive power flow control methods in a single phase grid-connected microgrid." IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 56, No. 2, pp. 1631-1639, 2020.

[15] W. Chen, K. Peng, C. Yang, Y. Wang, and Z. Fu. "Traction substation power signal characteristics and transient power quality evaluation method." In 2019 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm), pp. 1-7, 2019.

[16] C. Y. Wu, Y. J. Chen, and J. W. Cao. "Power pulsation decoupling and power control of a single-phase voltage source inverter in a renewable energy conversion system." In 2018 IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI), pp. 1199-1202, 2018.

[17] A. Coronado-Mendoza, M. A. Pérez-Cisneros, J. A. Dominguez-Navarro, V. Osuna-Enciso, V. Zúñiga-Grajeda, and K. J. Gurubel-Tun. "Dynamic phasors

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.4.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 2 – Summer 2021

modeling for a single phase two stage inverter." Electric Power Systems Research, Vol. 140, pp. 854-865, 2016.
[18] D. Venkatramanan, and V. John. "Dynamic phasor modeling and stability analysis of SRF-PLL-based grid-tie inverter under islanded conditions." IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 56, No. 2, pp. 1953-1965, 2019.
[19] M. R. Mahmud, A. F. Abdou, and H. Pota. "Stability Analysis of Grid-Connected Photovoltaic Systems with Dynamic Phasor Model." Electronics, Vol. 8, No. 7, p. 747, 2019.
[20] M. Parimi, M. Monika, M. Rane, S. Wagh, and A. Stankovic. "Dynamic phasor-based small-signal stability analysis and control of solid state transformer." In 2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS), pp. 1-6, 2016.

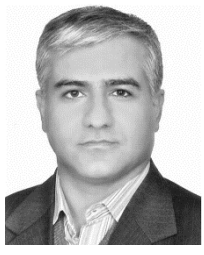
رزومه



امیرحسین عشقی در اصفهان متولد شده است (۱۳۶۵). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد (۱۳۸۷)، کارشناسی‌ارشد مهندسی برق-قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه (۱۳۸۹) سپری کرده است و در حال حاضر دانشجوی دکتری تخصصی رشته مهندسی برق- قدرت در دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر می-باشد. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه کنترل میکروگریدهای تکفاز و سه‌فاز می باشد.



محمدمهدی رضایی متولد (۱۳۶۱) اصفهان است. تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی‌ارشد مهندسی برق- قدرت در دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران (۱۳۸۸) و در مقطع دکتری مهندسی برق- قدرت در دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران (۱۳۹۴) سپری کرده است. ایشان در حال حاضر استادیار گروه مهندسی برق- قدرت در دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر می‌باشد. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه-مندی ایشان در زمینه کنترل، بهینه سازی و بهره برداری از سیستم های قدرت، منابع تولید پراکنده و ریزشبکه‌ها می‌باشد.



شاهرخ شجاعیان متولد (۱۳۵۴) اصفهان است. تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت در دانشگاه صنعتی اصفهان (۱۳۷۶) و (۱۳۷۹)، دکتری مهندسی برق-قدرت در دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران (۱۳۹۱) سپری کرده است. ایشان در حال حاضر استادیار گروه مهندسی برق-قدرت در دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر می‌باشد. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه کنترل غیرخطی، پایداری و قابلیت اطمینان سیستم های قدرت می باشد.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.4.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 2 – Summer 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

Robust Control of Active and Reactive Power of a Single Phase Grid – connected Inverter Based on the Current Dynamic Phasor

Amirhossein Eshghi[1], Mohammad Mahdi Rezaei*[2], Shahrokh Shojaeian[2]

1-PhD student, Department of Electrical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr/Isfahan, Iran, amirhossein.eshghi@iaukhsh.ac.ir

2- Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr/Isfahan, Iran, mm.rezaei@iaukhsh.ac.ir, shojaeian@iaukhsh.ac.ir

Abstract: Due to the need to use clean energy sources and the existence of different single/three phase consumers, the maximum use of single/three phase distributed generation (DG) units in the distribution system becomes crucial. The presence of DG units in the network, because of the need to inverters for exchanging power with the network and nonlinear structure of the inverters, requires control methods with high dynamic and steady-state performance with respect to sudden changes and disturbances. In this paper, a robust current controller based on the sliding mode control (SMC) in the synchronous dq reference frame is introduced for controlling active and reactive powers of a single phase inverter connected to the infinite bus with constant voltage. By modelling the single phase inverter as a virtual balanced three phase inverter and using the dynamic phasor of the inverter output current, decoupled control of active and reactive powers of the inverter is possible. The performance of the controller for various scenarios of step changes, uncertainty of parameters and external disturbances is evaluated through computer simulations in the MATLAB environment.

Keywords: Distributed Generation, Single phase inverter, Sliding Mode Control (SMC), Dynamic Phasor (DP)

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.4.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 2 – Summer 2021