

Dynamic Response and Low-Voltage Ride-Through Improvement for A DFIG, Using an Integral Sliding Mode Controller with an Adjustable Reactive Power Reference Value**Hamid Moghadassi^{1,2}, M.Sc, Mohammadreza Moradian^{1,2}, Assistant Professor**¹Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran²Smart Microgrid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
moradian@iaun.ac.ir, moqaddasi67@yahoo.com**Abstract**

In this paper, a sliding mode controller with an adjustable reactive power reference value is proposed. To improve the performance of the controller in a steady-state, an Integral Sliding Mode Control is designed and used. In addition, to improve the low-voltage ride-through capability in the fault condition, a reactive power controller with an adjustable reference value is proposed. The performance of this control system, during the power track, is compared with two other control systems that have a fixed reference for reactive power and are based on SMC and PI controllers in 9 different fault modes. These 9 different modes include one-phase, two-phase, and three-phase short circuit faults in the sub-synchronous, synchronous, and super-synchronous mode of operation for DFIG. The proposed method has been implemented in Simulink/MATLAB software. The simulation results confirm the capability and effectiveness of the proposed control system in comparison with two other aforementioned control systems.

Keywords: decoupled power control, doubly fed induction generator, low-voltage ride-through, sliding mode control**Received:** 20 October 2021**Revised:** 20 November 2021**Accepted:** 1 January 2022**Corresponding Author:** Dr. Mohammadreza Moradian

بهبود پاسخ دینامیکی ژنراتور القایی دوسو تغذیه در برابر ولتاژ پایین شبکه به کمک سیستم کنترلی مبتنی بر حالت لغزش انتگرالی با مرجع توان راکتیو متغییر

حمید مقدسی^{۱،۲}، دانش آموخته ارشد، محمدرضا مرادیان^{۱،۲}، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق - واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۲- مرکز تحقیقات ریزشبکه‌های هوشمند - واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران
moradian@iaun.ac.ir, moqaddasi67@yahoo.com

چکیده: در این مقاله به منظور بهبود پاسخ دینامیکی ژنراتور القایی دوسو تغذیه (DFIG)، یک سیستم کنترلی جدید مبتنی بر کنترل کننده سطح لغزش پیشنهاد شده است. به این منظور کنترل مستقل توان‌های اکتیو و راکتیو خروجی ژنراتور از طریق یک کنترل کننده مد لغزشی (SMC) که در برابر اغتشاشات خارجی و نامعینی‌های سیستم مقاوم است، کنترل می‌گردد. برای بهبود عملکرد کنترل در حالت ماندگار، مدل انتگرالی کنترل کننده مد لغزشی (ISMC) و برای بهبود قابلیت عبور از ولتاژ پائین (LVRT) ژنراتور در شرایط وقوع خطا، کنترل کننده توان راکتیو با مرجع متغیر مبتنی بر کنترل کننده متناسب-انتگرال گیر (PI) پیشنهاد شده است. عملکرد کنترل کننده پیشنهادی در مدت زمان ردیابی توان مرجع، با دو سیستم کنترلی دیگر که مرجع ثابتی برای توان راکتیو داشته و مبتنی بر کنترل کننده‌های SMC و PI هستند در ۹ حالت مختلف خطا مقایسه شده است. خطاهای تک فاز به زمین، دو فاز به زمین و سه فاز به زمین در حالت‌های زیر سنکرون، سنکرون و فوق سنکرون حالت-های مختلف مورد نظر در مقایسه سیستم‌های کنترلی هستند. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار سیمولینک متلب، نشان-دهنده رفتار حالت گذرای مناسب‌تر و به ویژه فراجهدش‌های کمتر جریان، ولتاژ لینک DC و توان اکتیو خروجی در سیستم کنترل پیشنهادی در مقایسه با دو سیستم دیگر در شرایط وقوع انواع خطا بوده است.

کلمات کلیدی: ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه، قابلیت عبور از ولتاژ پایین، کنترل مستقل توان، کنترل کننده مد لغزشی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۷/۲۸

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۸/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۱

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمدرضا مرادیان

نشانی نویسنده‌ی مسئول: نجف‌آباد - بلوار دانشگاه - دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد - دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

در دو دهه اخیر، تولید توان بادی با استفاده از ژنراتور القایی دو سو تغذیه^۱ (DFIG) رشد زیادی داشته است. این امر به علت مزایای DFIG نسبت به سایر ژنراتورهای استفاده شده در صنعت برق بادی اجتناب‌ناپذیر است [۲،۱]. برخی از این مزایا شامل ظرفیت کمتر و قیمت پایین‌تر مبدل‌های قدرت مورد نیاز (حدود ۳۰ درصد توان نامی)، تلفات انرژی کمتر، عملکرد چهار ربعی توان، عملکرد سرعت متغیر (در محدوده $\pm 33\%$ درصد سرعت سنکرون)، و قابلیت کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو هستند [۴،۳]. هنگام وقوع خطا در شبکه متصل به توربین بادی مجهز به DFIG، دو مسئله تشخیص بروز خطا و محدودسازی اثر خطا حائز اهمیت است [۶،۵]. این امر به منظور محافظت از سیم پیچ استاتور و مبدل‌های الکتریکی سمت روتور انجام می‌شود [۸،۷].

در کنار این مزایا، DFIG ها دارای دو مشکل اساسی حساسیت سیستم به اغتشاشات شبکه به ویژه افت ولتاژ و نوسانات توان خروجی ژنراتور هستند. از آنجائی که سیم‌پیچ استاتور ژنراتور مستقیماً به شبکه متصل شده است، افت ولتاژ ناگهانی در شبکه می‌تواند منجر به جاری شدن جریان بیش از حد تحمل مبدل سمت رتور شده و آسیب جدی به این مبدل تحمیل گردد [۹]. به بیان دیگر افت ولتاژ ترمینال‌های خروجی، باعث القای ولتاژهای ضد محرکه بزرگ در رتور شده و این امر منجر به عبور جریان گذرای شدید از رتور و افزایش ولتاژ لینک DC در مبدل قدرت و در نتیجه آسیب دیدن مبدل الکترونیک قدرت می‌گردد [۱۱،۱۰]. تحقیقات فراوانی به‌منظور ارائه روش‌هایی برای افزایش قابلیت عبور از ولتاژ پایین^۲ (LVRT) در DFIG صورت پذیرفته است [۱۳،۱۲]. این روش‌ها در دو دسته روش‌های سخت‌افزاری (پسیو) و نرم‌افزاری (اکتیو) دسته‌بندی می‌گردند. روش‌های سخت‌افزاری با افزودن تجهیزاتی اضافی مانند شبکه مقاومتی [۱۵،۱۴]، تجهیزات تزریق توان راکتیو مانند بانک‌های خازنی [۱۶] یا تجهیزات ذخیره‌ساز انرژی به سیستم [۱۸،۱۷]، شرایط محدودسازی جریان در مبدل سمت رتور را برای شرایط خطا فراهم می‌نمایند. از سوی دیگر در روش‌های نرم‌افزاری با طراحی سیستم کنترلی مناسب در مبدل‌های موجود [۱۹] یا سیستم کنترل پیچ‌پره‌های توربین بادی [۲۱،۲۰]، مشکل گذر از ولتاژ پائین حل می‌گردد.

امروزه روش‌های سخت‌افزاری به‌واسطه نیاز به تجهیزات اضافی و بروز آثار ثانویه، نسبت به روش‌های نرم‌افزاری کمتر مورد توجه هستند. در بین روش‌های نرم‌افزاری نیز سیستم‌های کنترلی مبتنی بر کنترل‌کننده متناسب-انتهگرال‌گیر^۳ (PI)، علی‌رغم سادگی، به دلیل ساختار غیرخطی سیستم و مشکلات تنظیم مداوم ضرائب کنترلی از اقبال کمتری برخوردار بوده‌اند. در مرجع [۲۲] با معرفی یک مبدل منبع جریان، سیستم کنترل جریان لینک DC را از طریق مبدل سمت شبکه فراهم نموده و از این طریق سیستم را برای گذر از ولتاژ پایین تقویت نموده است. در این مرجع مشکلات کموتاسیون کلیدهای دو مبدل بهبود یافته، فرکانس کلیدزنی کاهش و تلفات کلیدزنی حداقل شده است. علاوه بر آن امکان تعقیب حداکثر توان باد و کنترل مستقل توان‌های اکتیو و راکتیو خروجی نیز فراهم گردیده است.

استفاده از یک یکسوساز با ظرفیت کم به‌صورت موازی با مبدل سمت شبکه در مرجع [۲۳] پیشنهاد شده است. این یکسوساز قادر است شرایط گذر از ولتاژ پایین ژنراتور را با تزریق مازاد توان لینک DC به شبکه و تثبیت ولتاژ این لینک بهبود بخشد. مهمترین مشکل سیستم کنترلی پیشنهادی در این مرجع می‌تواند عملکرد مناسب آن تنها در حالت فوق سنکرون دانست. علاوه بر امکان تزریق مازاد توان در حالت‌های گذرا به شبکه، به‌منظور ممانعت از آثار ثانویه، می‌توان توازن توان را با بخش مکانیکی سیستم برقرار نمود [۲۴]. در این تحقیق با کنترل مناسب مبدل‌های سمت شبکه و سمت رتور در زمان افت ولتاژ شبکه، امکان توازن توان و تثبیت ولتاژ لینک DC با ایجاد تبادل انرژی با بخش مکانیکی و تاثیرگذاری بر سرعت محور فراهم شده است. این سیستم کنترلی قادر خواهد بود که در شرایط بروز خطا و افت ولتاژ شبکه، تزریق توان به شبکه را تداوم بخشیده و منجر به افت ولتاژ ثانویه نگردد. در شرایط شبکه نامتقارن و در حضور هارمونیک‌ها، از کنترل‌کننده رزونانسی و خطی‌سازی فیدبک حالت برای کنترل توان استاتور استفاده شده است [۲۵].

با عنایت به ساختار غیرخطی سیستم ژنراتور DFIG، و وجود انواع نامعینی‌ها و اغتشاشات سیستم، استفاده از کنترل‌کننده‌های غیرخطی بیش از پیش مورد توجه واقع شده است [۲۷،۲۶]. در این بین استفاده از خانواده کنترل‌کننده‌های حالت لغزش نیز به واسطه ویژگی‌های منحصر به فردی چون مقاوم بودن در برابر انواع اغتشاشات، نامعینی‌های پارامتریک و غیر پارامتریک

سیستم و پاسخ دینامیکی سریع و عملکرد مناسب در برابر دینامیک‌های مدل نشده سیستم، رشد قابل توجه داشته است [۲۹،۲۸]. در کنترل‌کننده مد لغزشی^۴ (SMC) حالت‌های سیستم طی یک فرآیند کنترلی به سطح لغزش تعریف شده می‌رسند که به این مرحله اصطلاحاً فاز رسیدن گفته می‌شود. این مرحله با افزودن توابع سوئیچینگ مناسبی چون تابع علامت یا تابع اشباع تضمین می‌گردد. پس از آن در فاز لغزش، سیستم کنترلی حالت‌های سیستم را ضمن لغزاندن بر روی سطح لغزش تعریف شده به سمت نقطه هدف هدایت خواهد کرد [۳۰]. بر اساس آنچه در پیشینه تحقیق بررسی گردید، در بین روش‌های نرم‌افزاری موجود، استفاده از کنترل‌کننده SMC با مرجع توان راکتیو متغییر کنترل شده‌ای که بتواند شرایط LVRT ژنراتور DFIG را در انواع خطاهای سه‌فاز، دوفاز و تک‌فاز و در هر سه حالت عملکرد زیرسنکرون، سنکرون و فوق‌سنکرون بهبود بخشد، کمتر مورد توجه واقع گردیده است.

در این مقاله، یک سیستم کنترل غیرخطی مبتنی بر حالت لغزش انتگرالی برای کنترل همزمان و مستقل توان‌های اکتیو و راکتیو تحویلی به شبکه طراحی شده است. به‌منظور بهبود قابلیت عبور از ولتاژ پائین ژنراتور در شرایط وقوع خطا نیز یک کنترل‌کننده توان راکتیو با مرجع متغیر پیشنهاد شده است. در این سیستم براساس خطای ولتاژ شبکه نسبت به مقدار نامی، مقدار مرجع توان راکتیو تولیدی ژنراتور، به کمک یک کنترل‌کننده PI متداول تعیین می‌گردد. بدیهی است که در شرایط بروز انواع خطا و با افزایش میزان خطای ولتاژ، سیستم کنترلی پیشنهادی قادر خواهد بود که مقدار مرجع توان راکتیو تزریقی به شبکه را به میزان مناسبی افزایش داده و از این طریق به افزایش ولتاژ شبکه و بهبود شرایط گذر از ولتاژ پایین کمک نماید. کارایی این سیستم کنترلی در ۹ حالت مختلف که شامل خطاهای تک فاز به زمین، دو فاز به زمین و سه فاز به زمین در حالت‌های زیر سنکرون، سنکرون و فوق سنکرون است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. شبیه‌سازی سیستم در محیط سیمولینک متلب انجام شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم پیشنهادی با نتایج سیستمی که در آن مقدار مرجع توان راکتیو ثابت بوده و کنترل‌کننده انتخابی در آنها یکبار کنترل‌کننده حالت لغزش و بار دیگر کنترل‌کننده متداول PI باشد [۳۱]، مقایسه گردیده است. مقایسه این نتایج، حاکی از کارآمدی هر چه بیشتر سیستم پیشنهادی در بهبود حالت‌های گذرای سیستم در شرایط وقوع خطا نسبت به سیستم‌های کنترلی قبل بوده است.

۲- مدل‌سازی دینامیکی DFIG

یک ژنراتور القایی دوسو تغذیه در واقع یک ماشین القایی با رتور سیم‌بندی شده است که مطابق شکل (۱) اتصال سیم‌پیچ استاتور با شبکه مستقیم بوده و سیم‌پیچ رتور از طریق یک جفت مبدل پشت به پشت با لینک DC مشترک به شبکه متصل شده است [۳۳،۳۲]. معادلات بیان‌کننده رفتار دینامیکی DFIG در مرجع‌های [۳۴] و [۳۵] آمده است. برای پیاده‌سازی کنترل برداری با جهت‌یابی شار استاتور کافی است محور d در امتداد بردار شار استاتور انتخاب شود. بر این اساس مولفه‌های شار استاتور در دستگاه دو محوری (d, q) برابرند با:

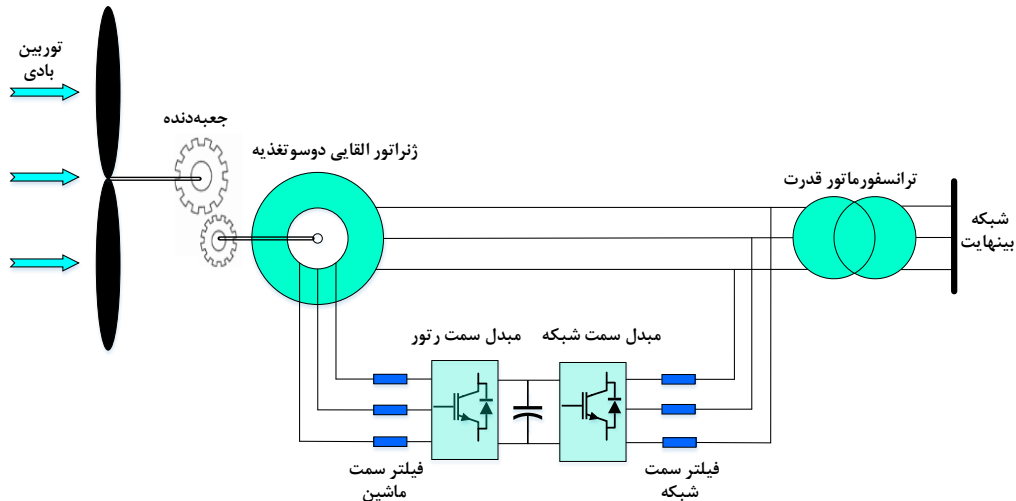
$$\begin{cases} \Phi_{ds} = \Phi_s \\ \Phi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

روابط ولتاژ-جریان روتور ژنراتور القایی دوسو تغذیه در دستگاه مرجع شار استاتور مطابق (۲) و (۳) می‌باشند.

$$V_{dr} = R_r I_{dr} - g \omega_s \left(L_r - \frac{L_m^r}{L_s} \right) I_{qr} \quad (2)$$

$$V_{qr} = R_r I_{qr} + g \omega_s \left(L_r - \frac{L_m^r}{L_s} \right) I_{dr} + g \left(\frac{L_m V_s}{L_s} \right) \quad (3)$$

که در آن V_{dr} و V_{qr} مولفه‌های دومحوری ولتاژ رتور، I_{dr} و I_{qr} مولفه‌های دومحوری جریان رتور، R_r مقاومت هر فاز از سیم‌پیچی رتور، g برابر با نسبت ω_r/ω_s ، L_r ، L_s و L_m به ترتیب اندوکتانس‌های رتور، استاتور و مغناطیس‌کننده، ω_s سرعت سنکرون و V_s اندازه فازور ولتاژ شبکه است.



شکل (۱): ساختار کلی ژنراتور القایی دوسو تغذیه

Figure (1): The DFIG general system

توان‌های اکتیو و راکتیو در DFIG در دستگاه دو محوری (d,q) بر حسب جریان‌های استاتور یا رتور به صورت رابطه‌های (۴) و (۵) بیان می‌شوند:

$$P_s = V_s I_{qs} = -V_s \left(\frac{L_m}{L_s} \right) I_{qr} \quad (۴)$$

$$Q_s = V_s I_{ds} = \left(\frac{V_s^2}{\omega_s L_s} \right) - \left(\frac{V_s L_m}{L_s} I_{dr} \right) \quad (۵)$$

که در آن P_s و Q_s توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی ژنراتور هستند.

۳- طراحی سیستم کنترل مبتنی بر حالت لغزش انتگرالی با مرجع توان راکتیو متغیر

در این بخش طراحی یک سیستم کنترلی مبتنی بر حالت لغزش انتگرالی با مرجع توان راکتیو متغیر^۵ (ISMCQV)، برای تنظیم مستقل توان‌های اکتیو و راکتیو تحویلی به شبکه بیان می‌گردد. ابتدا سیگنال خطای متغیرهای توان اکتیو و راکتیو مطابق رابطه‌های (۶) و (۷) تعریف می‌گردند [۳۶]:

$$e_p = P_{ref} - P_s \quad (۶)$$

$$e_q = Q_{ref} - Q_s \quad (۷)$$

اکنون سطوح لغزش انتگرالی برای متغیرهای توان اکتیو و راکتیو مطابق رابطه‌های (۸) و (۹) تعریف می‌شوند.

$$s_p = \dot{e}_p + C_p e_p \quad (۸)$$

$$s_q = \dot{e}_q + C_q e_q \quad (۹)$$

که در آن C_p و C_q ضرایب کنترلی ثابت و مثبتی هستند که مقدار آنها بر روی سرعت پاسخ‌گویی سیستم تاثیرگذار هستند. پس از طی شدن فاز رسیدن و در مدت زمان فاز لغزش مقدار سطوح تعریف شده در رابطه‌های فوق و مشتق آنها نسبت به زمان برابر صفر فرض می‌شوند.

$$s_p = \dot{s}_p = s_q = \dot{s}_q = 0 \quad (۱۰)$$

اکنون به کمک معادله‌های (۴) الی (۱۰) می‌توان برای مرجع جریان‌های دوماحوری رتور معادله‌های (۱۱) و (۱۲) را به دست آورد:

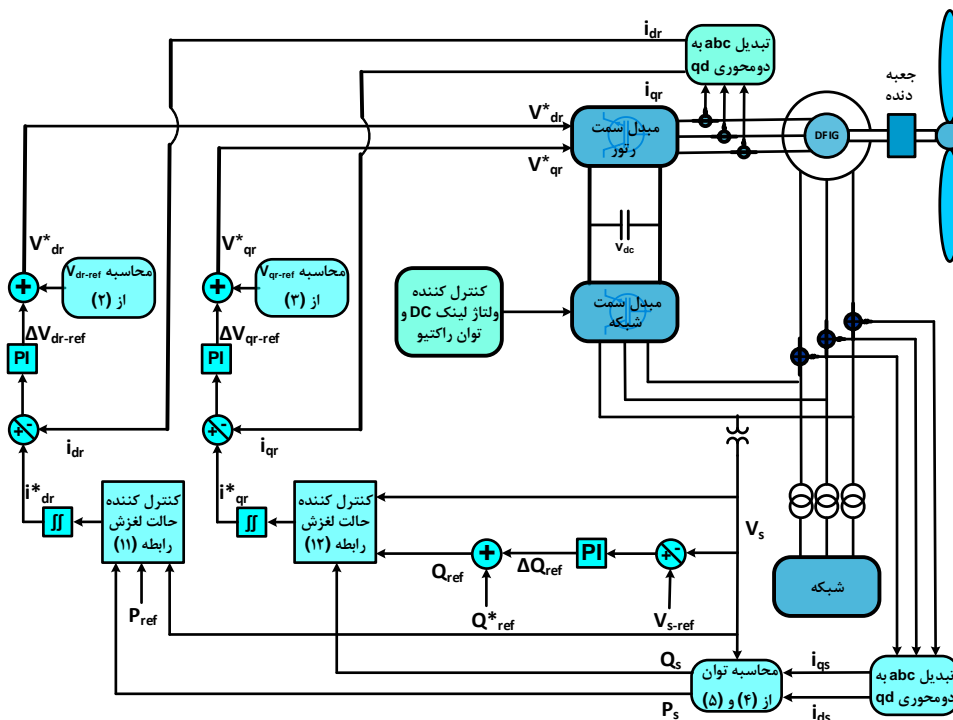
$$\frac{d^2 I_{dr}^*}{dt^2} = \frac{-L_s}{V_s L_m} \left[\frac{d^2 P_{ref}}{dt^2} + C_p \frac{dP_{ref}}{dt} + C_p \frac{V_s L_m}{L_s} I_{dr}^* + K_p |s_p| \right] \quad (۱۱)$$

$$\frac{d^2 I_{qr}^*}{dt^2} = \frac{-L_s}{V_s L_m} \left[\frac{d^2 Q_{ref}}{dt^2} + C_q \frac{dQ_{ref}}{dt} + C_q \frac{V_s L_m}{L_s} I_{qr}^* + K_q |s_q| \right] \quad (12)$$

با دو مرتبه انتگرال‌گیری از معادله‌های (۱۱) و (۱۲)، می‌توان معادله مربوط به جریان‌های دوجوری مرجع روتور را تعیین کرد. در این مقاله به منظور بهبود شرایط گذر از ولتاژ پائین ژنراتور در شرایط وقوع خطا، مقدار مرجع توان راکتیو سیستم کنترلی به کمک کنترل‌کننده PI متداول کنترل می‌گردد. به همین منظور ولتاژ خروجی ژنراتور، با مقدار نامی آن مقایسه شده و خطای حاصل، از یک کنترل‌کننده PI ساده عبور داده می‌شود. خروجی این کنترل‌کننده می‌تواند میزان تغییرات مقدار مرجع توان راکتیو ژنراتور در نظر گرفته شده و با مقدار مرجع مبنای سیستم جمع شده تا مقدار مرجع متغیر توان راکتیو خروجی ژنراتور مشخص گردد. بر این اساس تنها در شرایطی که ولتاژ شبکه تغییر کند و با مقدار نامی خود نیز برابر نباشد، مرجع توان راکتیو تولیدی ژنراتور تغییر نموده و با تزریق مقدار مناسبی از توان راکتیو، امکان محدود نمودن تغییرات سطح ولتاژ را فراهم ساخته و به پایداری سیستم کمک شایانی خواهد نمود. بلوک دیاگرام سیستم کنترلی پیشنهادی در این مقاله در شکل (۲) نمایش داده شده است.

۴- نتایج شبیه‌سازی

به‌منظور بررسی عملکرد سیستم کنترلی پیشنهادی، یک ژنراتور القایی دوسو تغذیه ۱/۵ مگاواتی متصل به شبکه با پارامترهای موجود در مرجع [۳۱] در محیط سیمولینک متلب شبیه‌سازی شده است. عملکرد سیستم در ۹ حالت مختلف که شامل خطاهای تکفاز به زمین، دو فاز به زمین و سه فاز به زمین در حالت‌های زیر سنکرون، سنکرون و فوق‌سنکرون هستند بررسی شده و عملکرد سیستم پیشنهادی در این مقاله ISMCQV با عملکرد کنترل‌کننده‌های حالت لغزش انتگرالی^۶ (ISMC) و کنترل‌کننده PI ارائه شده در مرجع [۳۱] مقایسه شده است. شایان ذکر است که انواع خطا در محدوده زمانی ۳/۰۳ ثانیه تا ۳/۲۸ ثانیه اعمال شده و مقادیر مرجع توان اکتیو (P_{ref}) و راکتیو خروجی (Q_{ref}) استاتور از ابتدا بر روی یک مگاوات و صفر مگاوار تنظیم و در لحظه ۵ ثانیه به‌صورت پله‌ای به ۱/۲ مگاوات و -۰/۵ مگاوار تغییر و مجدداً در لحظه ۸ ثانیه به‌صورت پله‌ای به مقادیر مرجع اولیه خود بازگردانده شده‌اند.



شکل (۲): سیستم کنترلی پیشنهادی

Figure (1): The Proposed control system

۴-۱- انواع خطا در حالت فوق سنکرون

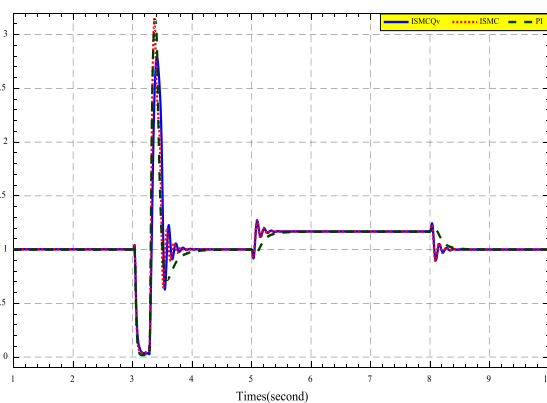
در این بخش، سرعت چرخش محور را ۲۰ درصد فراتر از سرعت سنکرون ($\omega_r=1.2\omega_s$) در نظر گرفته و انواع خطاهای سه فاز به زمین، دو فاز به زمین و تکفاز به زمین بر روی ترمینال‌های خروجی ژنراتور اعمال و عملکرد سیستم‌های کنترلی، شبیه‌سازی و ارزیابی می‌شود.

۴-۱-۱- خطای سه فاز به زمین

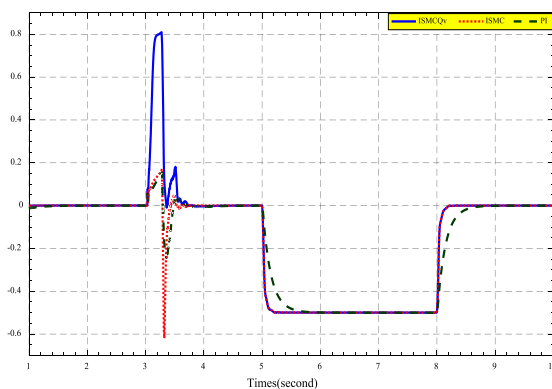
خطای سه فاز به زمین در ترمینال‌های خروجی DFIG اعمال و برخی از نتایج شبیه‌سازی شامل توان راکتیو خروجی استاتور، ولتاژ لینک DC و مولفه‌های جریان روتور در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود کنترل‌کننده ISMCQV در لحظه وقوع خطا، دامنه ولتاژ شبکه را نسبت به دو کنترل‌کننده دیگر بهبود داده (بیش از دو برابر) و باعث کاهش دامنه جریان اتصال کوتاه شبکه در لحظه وقوع خطا شده است. تزریق توان راکتیو در لحظه وقوع خطا باعث می‌گردد تا فراجهدش توان اکتیو و به خصوص ولتاژ لینک DC کاهش چشم‌گیری داشته باشند.

۴-۱-۲- خطای دو فاز به زمین

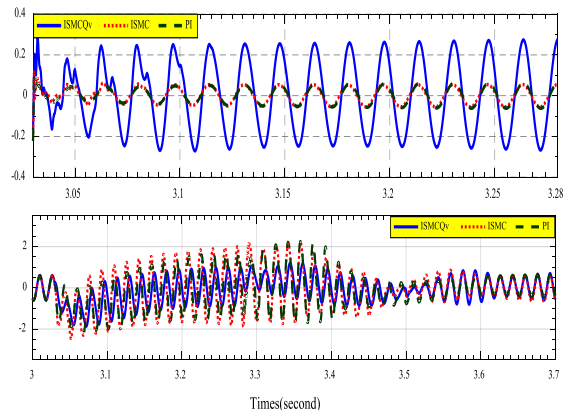
در این حالت یک خطای دو فاز به زمین روی فازهای B و C ترمینال‌های خروجی DFIG در حالت فوق سنکرون اعمال می‌گردد. شکل (۴) فرم تغییرات ولتاژها و جریان‌های سه‌فاز خروجی استاتور، توان اکتیو، و ولتاژ لینک DC را در خطای دو فاز برای حالت فوق سنکرون نشان می‌دهد.



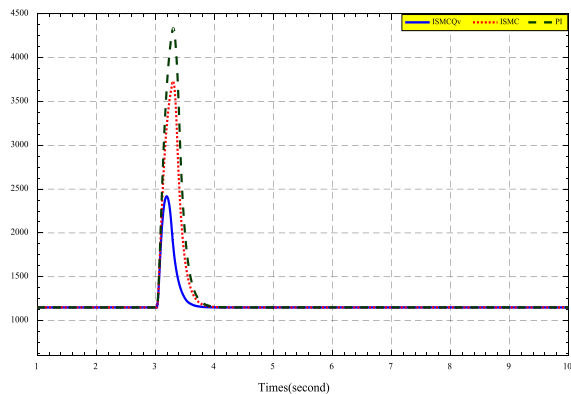
(ب) توان اکتیو خروجی استاتور



(د) توان راکتیو خروجی استاتور



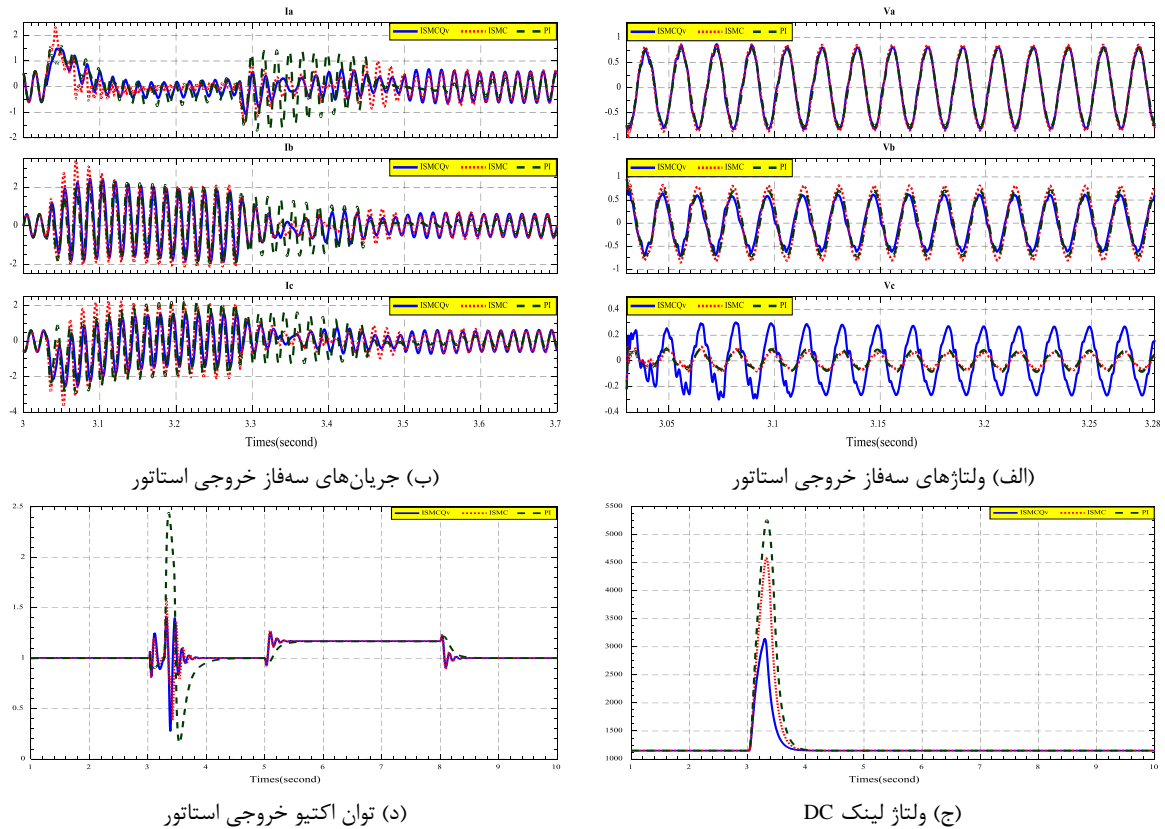
(الف) ولتاژ و جریان فاز ترمینال خروجی



(ج) ولتاژ لینک DC

شکل (۳): نتایج خطای سه‌فاز به زمین در حالت فوق سنکرون

Figure (3): The super-synchronous mode results for three-phase fault, (a) Output terminal phase-voltage and current, (b) Stator output active power, (c) DC-link voltage, (d) Stator output reactive power



شکل (۴): نتایج خطای دوفاز به زمین در حالت فوق سنکرون
 Figure (4): The super-synchronous mode results for two-phase fault, (a) Three-phase voltage of stator output, (b) Three-phase current of stator output, (c) DC-link voltage, (d) Stator output active power

همان‌طور که دیده می‌شود، کنترل‌کننده ISMCQv در لحظه وقوع خطا، دامنه ولتاژ شبکه را نسبت به دو کنترل‌کننده دیگر بهبود داده و باعث کاهش دامنه جریان اتصال کوتاه شبکه در لحظه وقوع خطا می‌شود. علاوه بر آن، تزریق توان راکتیو در لحظه وقوع خطا باعث می‌گردد تا فراجاهش توان اکتیو و ولتاژ لینک DC در مقایسه با دو روش کنترلی دیگر کاهش داشته باشد.

۴-۱-۳- خطای تک فاز به زمین

در این حالت یک خطای تکفاز به زمین بر روی فاز C ترمینال‌های خروجی DFIG در حالت فوق سنکرون اعمال می‌گردد. شکل (۵) فرم تغییرات جریان‌های دوماحوری استاتور و رتور را به همراه تغییرات توان‌های اکتیو و راکتیو خروجی در حالت خطای تکفاز به زمین برای حالت فوق سنکرون نشان می‌دهد. نتایج این حالت نیز بیانگر آن بوده که کنترل‌کننده پیشنهادی ISMCQv عملکرد بهتری از خود نشان داده و قابلیت عبور از ولتاژ پائین‌تری را در سیستم رقم زده است.

۴-۲- انواع خطا در حالت سنکرون

انواع خطاهای سه فاز به زمین، دو فاز به زمین و تکفاز به زمین بر روی ترمینال‌های خروجی ژنراتور مورد بحث در شرایط سرعت سنکرون ($\omega_r = \omega_s$) اعمال و عملکرد سیستم‌های کنترلی، شبیه‌سازی و ارزیابی شده است. نمونه‌ای از نتایج شبیه‌سازی انواع خطاهای حالت سنکرون در شکل (۶) آمده است.

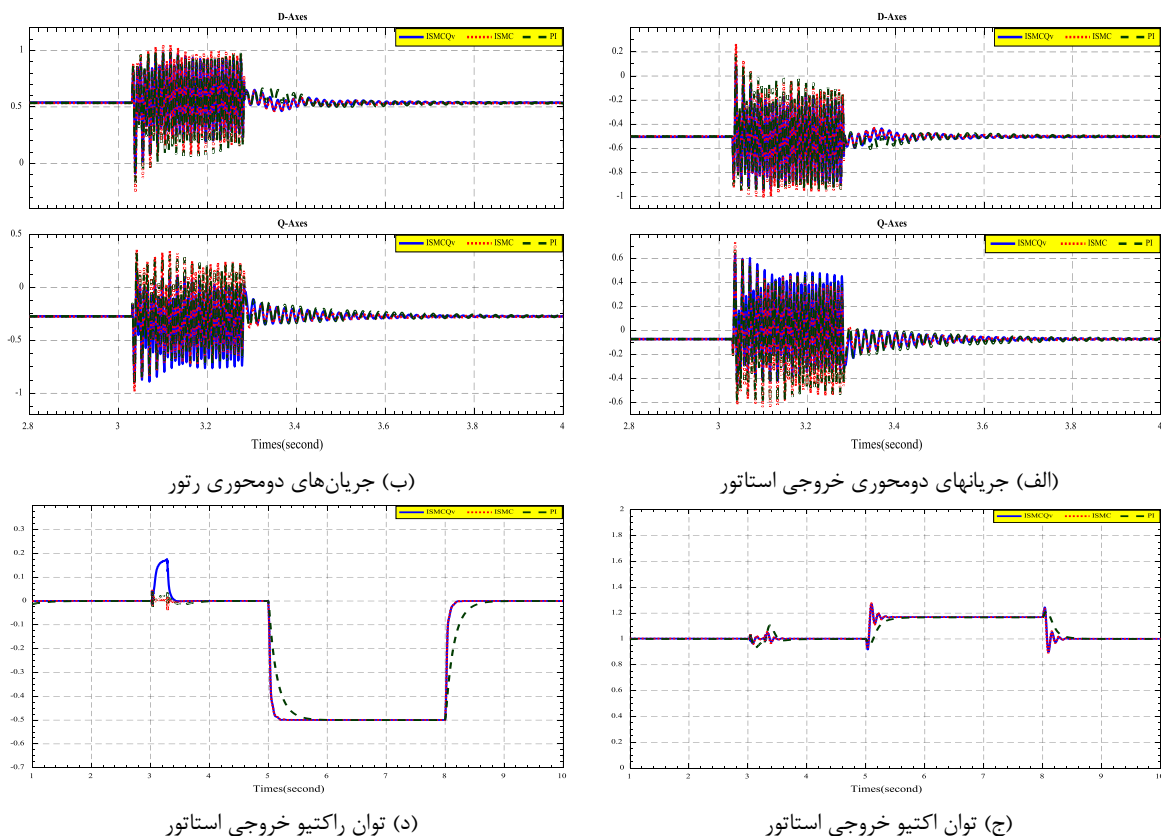
۴-۳- انواع خطا در حالت زیرسنکرون

انواع خطاهای بیان شده در بخش ۴-۱، در حالت زیر سرعت سنکرون ($\omega_r=0.8\omega_s$) نیز بر روی ترمینال‌های خروجی DFIG اعمال و عملکرد سیستم‌های کنترلی، شبیه‌سازی و ارزیابی می‌شود. بخشی از نتایج شبیه‌سازی انواع خطاهای فوق‌الذکر مربوط به حالت زیر سنکرون در شکل (۷) آمده است.

۴-۴- مقایسه عددی نتایج شبیه‌سازی

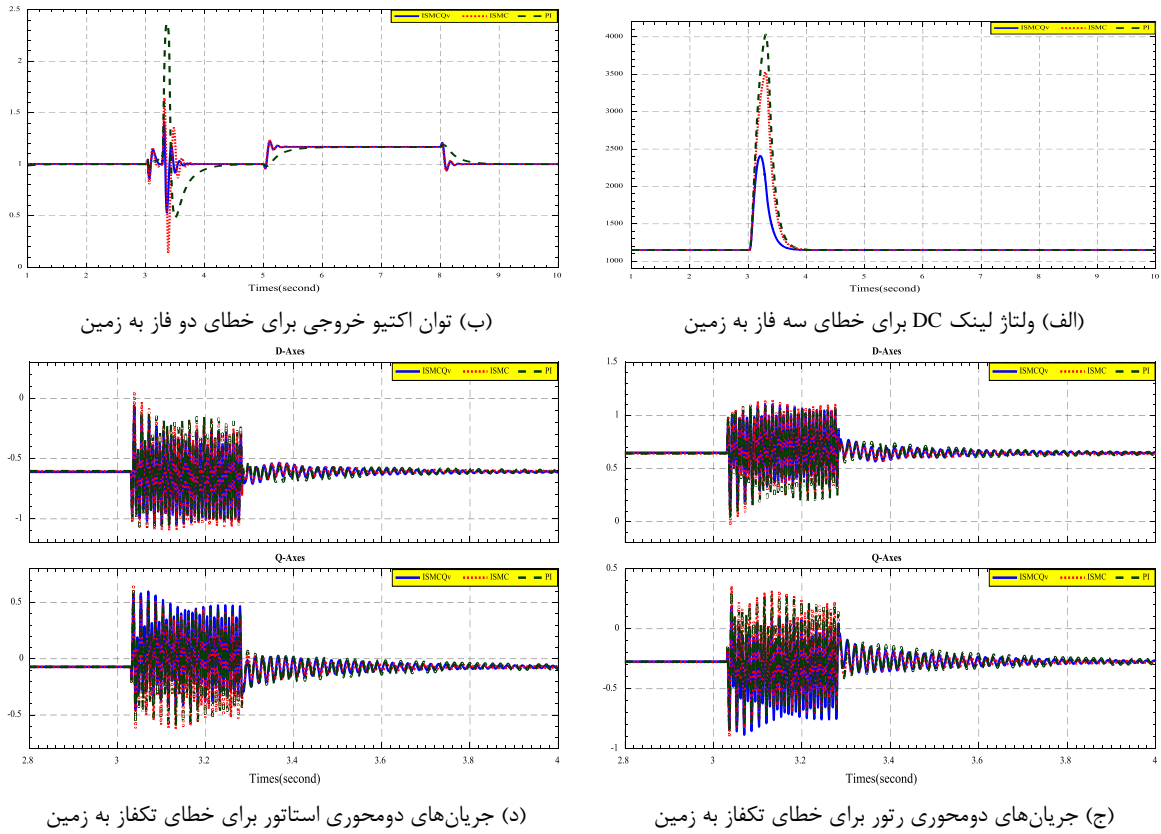
به منظور قیاس عددی و شناسایی دقیق نقاط قوت سیستم کنترلی پیشنهادی، مقدار فراجش ولتاژ لینک DC و فراجش توان اکتیو خروجی در زمان بروز خطا، برای ۹ حالت شبیه‌سازی فوق‌الذکر در شکل (۸) آمده و به صورت عددی و میله‌ای مقایسه شده است. بر این اساس در تمامی حالت‌های شبیه‌سازی، فراجش ولتاژ لینک DC و فراجش توان اکتیو خروجی ژنراتور با کنترل‌کننده ISMCQV به مراتب کمتر از مقدار مشابه با کنترل‌کننده ISMC یا PI سنتی بوده است. مقادیر عددی به همراه نمودار ستونی فراجش شدت جریان‌های خروجی ژنراتور برای سه حالت فوق سنکرون، سنکرون و زیرسنکرون و انواع خطای مورد بحث در شکل (۹) نشان داده شده است.

همان‌طور که از نمودارهای میله‌ای شکل‌های (۸) و (۹) دیده می‌شود، کنترل‌کننده پیشنهادی ISMCQV در تمامی حالت‌های مورد بررسی، عملکرد بهتری نسبت به دو کنترل‌کننده دیگر داشته است. در لحظه وقوع خطا، سیستم کنترلی ISMCQV با تزریق توان راکتیو بیشتر و البته متناسب با میزان افت ولتاژ شبکه، دامنه ولتاژ شبکه را نسبت به دو کنترل‌کننده دیگر بهبود بخشیده و همین امر باعث کاهش دامنه جریان اتصال کوتاه شبکه گردیده است. از سوی دیگر تزریق توان راکتیو در لحظه وقوع خطا باعث می‌گردد تا فراجش توان اکتیو و به خصوص ولتاژ لینک DC به‌طور چشم‌گیری کاهش پیدا کنند.



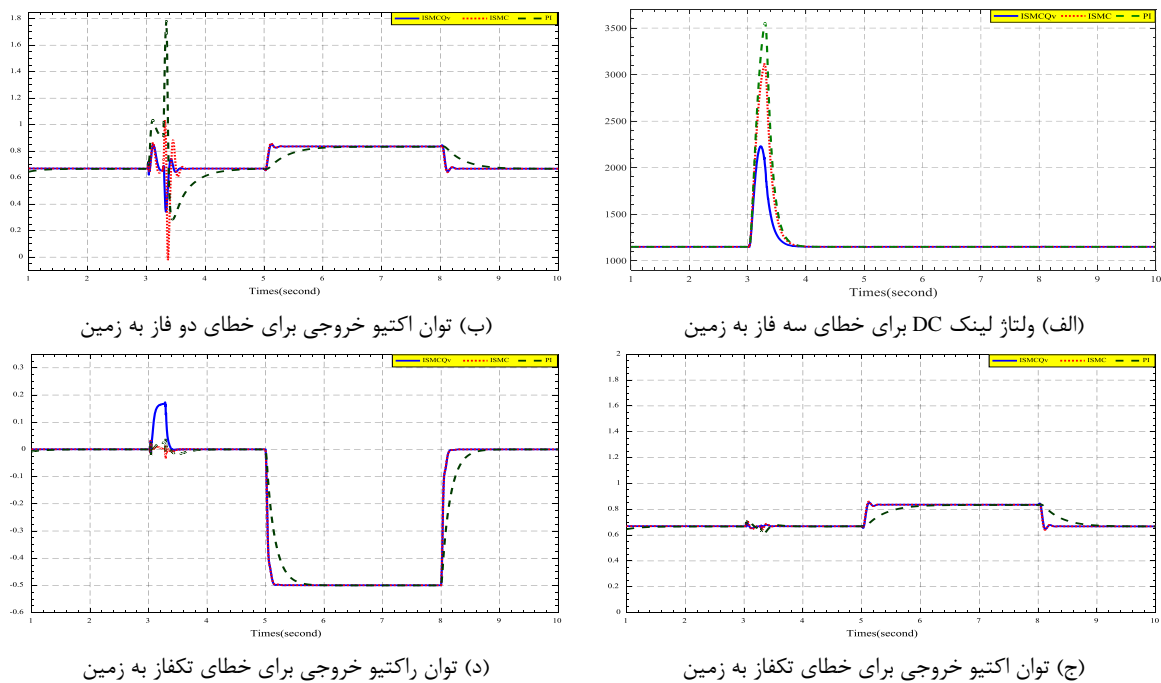
شکل (۵): نتایج خطای تکفاز به زمین در حالت فوق سنکرون

Figure (5): The super-synchronous mode results for single-phase fault, (a) Two-axis stator output currents, (b) Two-axis rotor currents, (c) Stator output active power, (d) Stator output reactive power



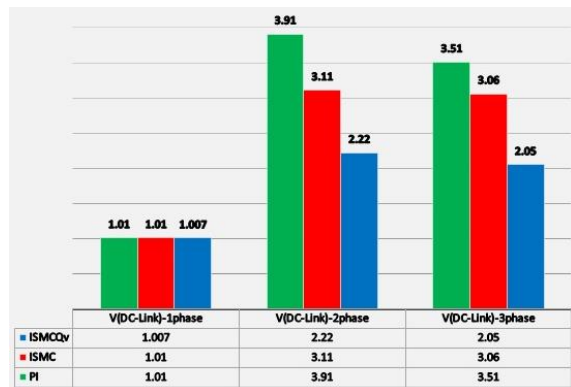
شکل (۶): نتایج حالت سنکرون

Figure (6): The synchronous mode results, (a) DC-link voltage for three-phase to ground fault, (b) The output active power for two-phase to ground fault, (c) Two-axis rotor currents for single-phase fault to ground, (d) Two-axis stator currents for single-phase to ground fault

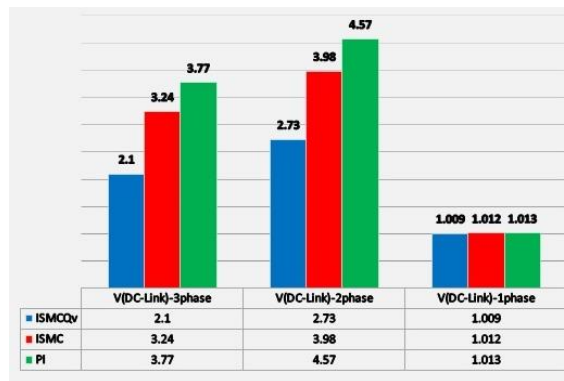


شکل (۷): نتایج حالت زیرسنکرون

Figure (7): The sub-synchronous mode results, (a) DC-link voltage for three-phase to ground fault, (b) The output active power for two-phase to ground fault, (c) Two-axis rotor currents for single-phase fault to ground, (d) Two-axis stator currents for single-phase to ground fault



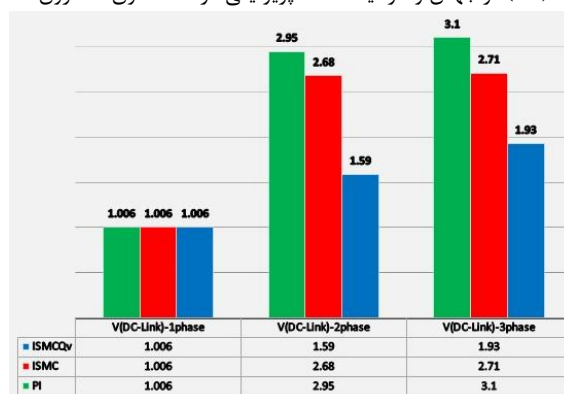
(ب) فراجهش ولتاژ لینک DC پریونیتی در حالت سنکرون



(الف) فراجهش ولتاژ لینک DC پریونیتی در حالت فوق سنکرون



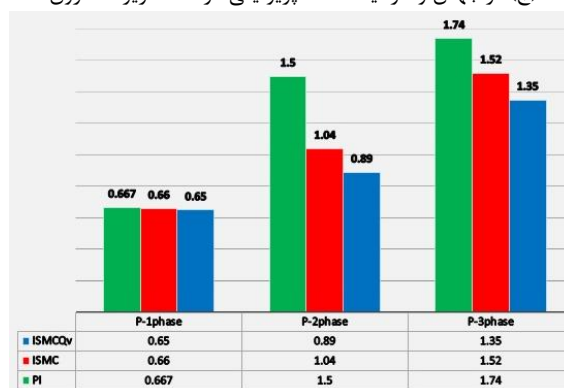
(د) فراجهش توان اکتیو پریونیتی در حالت فوق سنکرون



(ج) فراجهش ولتاژ لینک DC پریونیتی در حالت زیر سنکرون



(و) فراجهش توان اکتیو پریونیتی در حالت زیر سنکرون



(ه) فراجهش توان اکتیو پریونیتی در حالت سنکرون

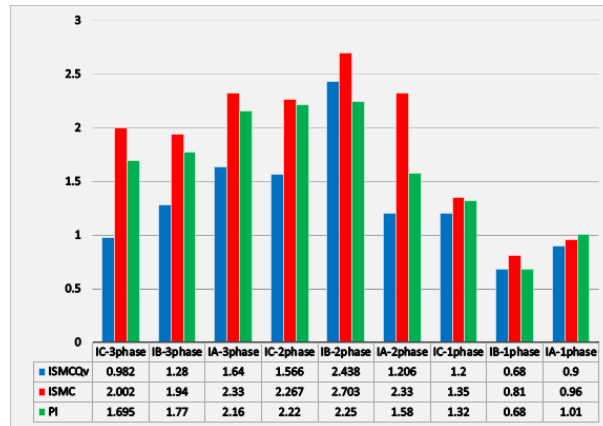
شکل (۸): مقایسه میله‌ای فراجهش ولتاژ لینک DC و توان اکتیو خروجی ژنراتور برای انواع خطا در حالت‌های فوق سنکرون، سنکرون و

زیر سنکرون

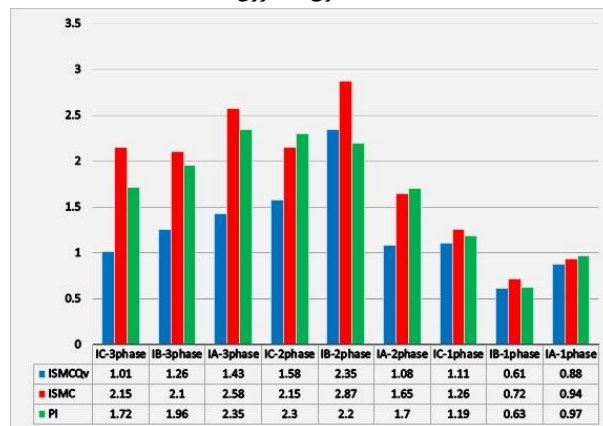
Figure (8): A bar-chart comparison for DC-link voltage and generator output active power overshoots for all types of faults in sub-synchronous, synchronous, and super-synchronous modes, (a) The DC-link voltage overshoot in super-synchronous mode (pu), (b) The DC-link voltage overshoot in synchronous mode (pu), (c) The DC-link voltage overshoot in sub-synchronous mode (pu), (d) The active power overshoot in super-synchronous mode (pu), (e) The active power overshoot in synchronous mode (pu), (f) The active power overshoot in sub-synchronous mode (pu)

۵- نتیجه‌گیری

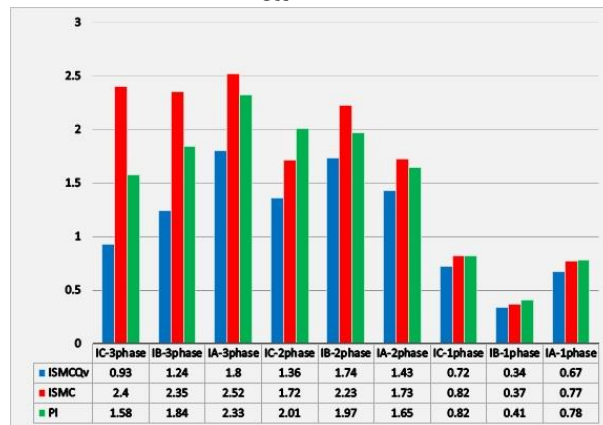
در این مقاله یک سیستم کنترلی مبتنی بر حالت لغزش انتگرالی برای کنترل مستقل توان‌های اکتیو و راکتیو تحویلی به شبکه از طریق سیم‌پیچی استاتور در یک ژنراتور القایی دوستغذیه پیشنهاد شده است. به منظور بهبود شرایط گذر از ولتاژ پایین ژنراتور، سیستم کنترلی پیشنهادی را به یک کنترل‌کننده مقدار مرجع توان راکتیو تجهیز شده و بر اساس افت ولتاژ ترمینال-های خروجی ژنراتور، مقدار مرجع توان راکتیو تزریقی به شبکه، به کمک یک کنترل‌کننده PI سنتی تنظیم شده است.



(الف) فوق سنکرون



(ب) سنکرون



(ج) زیرسنکرون

شکل (۹): مقایسه میله‌ای فراجهدش جریان خروجی ژنراتور برای انواع خطا در حالت‌های مختلف

Figure (9): A bar-chart comparison for generator output current overshoots for all types of faults, (a) super-synchronous, (b) synchronous, (c) sub-synchronous modes

عملکرد کنترل کننده پیشنهادی با کنترل کننده سنتی PI و همچنین کنترل کننده سطح لغزش انتگرالی با مرجع ثابت توان راکتیو در ۹ حالت مختلف مقایسه شده است. خطاهای تک فاز به زمین، دو فاز به زمین و سه فاز به زمین در شرایط زیر سنکرون، سنکرون و فوق سنکرون، ۹ حالتی هستند که شبیه‌سازی رفتاری آنها برای هر سه نوع کنترل کننده مورد نظر در محیط سیمولینک متلب پیاده‌سازی شده است. سیستم کنترلی پیشنهادی با تزریق توان راکتیو بیشتر در زمان وقوع خطا، شرایط گذر از ولتاژ پایین در ژنراتور را بهبود بخشیده است. بر اساس نتایج بدست آمده، کنترل کننده پیشنهادی در تمامی

حالت‌های ذکر شده، عملکرد بهتری نسبت به دو کنترل‌کننده دیگر در زمان وقوع خطا از خود نشان داده است و بطور خاص باعث کاهش فراجهدش‌های مربوط به جریان خطا، ولتاژ لینک DC و توان اکتیو خروجی ژنراتور شده است.

سپاسگزاری

این مقاله از پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد در دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد استخراج شده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از همکاران حوزه پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی و داوران محترم که ما را در انجام و ارتقای کیفی این مقاله یاری نموده‌اند، اعلام نمایند.

References

مراجع

- [1] B. Beltran, M.E.H. Benbouzid, T. Ahmed-Ali, "Second-order sliding mode control of a doubly fed induction generator driven wind turbine", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 27, no. 2, pp. 261-269, June 2012 (doi:10.1109/TEC.2011.2181515).
- [2] K. Khani, G. Shahgholian, "Analysis and optimization of frequency control in isolated microgrid with double-fed induction-generators based wind turbine", *Journal of International Council on Electrical Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 24-37, Feb. 2019 (doi: 10.1080/22348972.2018.1564547).
- [3] G. Iwanski, W. Koczara, "DFIG-based power generation system with UPS function for variable-speed applications", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 8, pp. 3047-3054, Aug. 2008 (doi: 10.1109/TIE.2008.918473).
- [4] M. Moradian, A. Soltani-Mohammadi, "A new control system for a dual stator-winding cage rotor induction generator in direct grid connected condition with maximum power point tracking of wind turbine", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 9, no. 35, pp. 3-10, Dec. 2019 (doi: 20.1001.1.232-23871.1397.9.35.1.4) (in Persian).
- [5] M. Mahdavian, N. Wattanapongsakorn, G. Shahgholian, S.H. Mozafarpour, M. Janghorbani, S.M. Shariatmadar, "Maximum power point tracking in wind energy conversion systems using tracking control system based on fuzzy controller", *IEEE/ECTICON*, pp. 1-5, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2014 (doi: 10.1109/ECTICon.2014.6839750).
- [6] A. Mitra, D. Chatterjee, "Active power control of DFIG-based wind farm for improvement of transient stability of power systems", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 31, No. 1, pp. 82-93, Jan. 2016 (doi: 10.1109/TPWRS.2015.2397974).
- [7] J. Ouyang, T. Tang, J. Yao, M. Li, "Active voltage control for DFIG-based wind farm integrated power system by coordinating active and reactive powers under wind speed variations", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 34, no. 3, pp. 1504-1511, Sept. 2019 (doi: 10.1109/TEC.2019.2905673).
- [8] M. Zamani, G. H. Riahy, N. Abdolghani, M. H. Zamani, G. Shahgholian, "Utilization of thermal energy storage for reducing battery bank size of hybrid (wind-PV) systems", *Proceeding of the IEEE/ICCEP*, pp. 709-714, Ischia, Italy, June 2011 (doi: 10.1109/ICCEP.2011.6036358).
- [9] J. Morren, S.W.D. Haan, "Ridethrough of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip", *IEEE Trans. on energy conversion*, vol. 20, no. 2, pp. 435-441, June 2005 (doi: 10.1109/TEC.2005.84-5526).
- [10] S. Soleymani, B. Fani, M.R. Yousefi, "Transient performance improvement of wind turbines with doubly fed induction generators using active damping control strategy", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 6, no. 24, pp. 3-16, March 2016 (doi: 20.1001.1.23223871.1394.6.24.1.1) (in Persian).
- [11] M. Fooladgar, E. Rok-Rok, B. Fani, G. Shahgholian, "Evaluation of the trajectory sensitivity analysis of the DFIG control parameters in response to changes in wind speed and the line impedance connection to the grid DFIG", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 5, no. 20, pp. 37-54, March 2015 (doi: 20.1001.1.23223871.1393.5.20.4.9) (in Persian).
- [12] R. Liu, J. Yao, X. Wang, P. Sun, J. Pei, J. Hu, "Dynamic stability analysis and improved LVRT schemes of DFIG-based wind turbines during a symmetrical fault in a weak grid", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 35, no. 1, pp. 303-318, Jan. 2020 (doi: 10.1109/TPEL.2019.2911346).
- [13] E. Gatavi, A. Hellany, M. Nagrial, J. Rizk, "An integrated reactive power control strategy for improving low voltage ride-through capability", *Chinese Journal of Electrical Engineering*, vol. 5, no. 4, pp. 1-14, Dec. 2019 (doi: 10.23919/CJEE.2019.000022).

- [14] M. Rahimi, M. Parniani, "Efficient control scheme of wind turbines with doubly fed induction generators or low-voltage ride-through capability enhancement", *IET Renewable Power Generation*, vol. 4, no. 3, pp. 242-252, June 2010 (doi: 10.1049/IET-RPG.2009.0072).
- [15] Y. Qu, L. Gao, G. Ma, H. Song, S. Wang, "Conjoint analysis of crowbar switching scheme and its resistance based on statistical sampling for LVRT of DFIG", *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 7, no. 3, pp. 558-567, May 2019 (doi: 10.1007/s40565-018-0444-y).
- [16] S.M. Muyeen, R. Takahashi, T. Murata, J. Tamura, M.H. Ali, Y. Matsumura, A. Kuwayama, T. Matsumoto, "Low voltage ride through capability enhancement of wind turbine generator system during network disturbance", *IET Renewable Power Generation*, vol. 3, no. 1, pp. 65-74, March 2009 (doi: 10.1049/iet-rpg:20070116).
- [17] Y. Shen, D. Ke, Y. Sun, D. S. Kirschen, W. Qiao, X. Deng, "Advanced auxiliary control of an energy storage device for transient voltage support of a doubly fed induction generator", *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 7, no. 1, pp. 63-76, Jan. 2016 (doi: 10.1109/TSTE.2015.2472299).
- [18] H. Jiang, C. Zhang, "A method of boosting transient stability of wind farm connected power system using S magnetic energy storage unit", *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, vol. 29, no. 2, pp. 1-5, March 2019 (doi: 10.1109/TASC.2019.2892291).
- [19] R. Asghar, F. Rehman, Z. Ullah, A. Aman, K. Iqbal, A.A. Nawaz, "Modified switch type fault current limiter for low-voltage ride-through enhancement and reactive power support of DFIG-WT under grid faults", *IET Renewable Power Generation*, vol. 14, no. 9, pp. 1481-1490, July 2020 (doi: 10.1049/iet-rpg.2019.1058).
- [20] M.J. Hossain, H.R. Pota, V.A. Ugrinovskii and R.A. Ramos, "Simultaneous STATCOM and pitch angle control for improved LVRT capability of fixed-speed wind turbines", *IEEE. Trans. Sustainable Energy*, vol. 1, no. 3, pp. 142-151, Oct. 2010 (doi: 10.1109/TSTE.2010.2054118).
- [21] E. Hosseini, G. Shahgholian, "Output power levelling for DFIG wind turbine system using intelligent pitch angle control", *Automatika*, vol. 58, no. 4, pp. 363-374, 2017 (doi: 10.1080/00051144.2018.1455017).
- [22] I. Abdelsalam, G.P. Adam, D. Holliday, B.W. Williams, "Modified back-to-back current source converter and its application to wind energy conversion system", *IET Power electronics*, vol. 8, no. 1, pp. 103-111, Jan. 2015 (doi: 10.1049/iet-pel.2014.0190).
- [23] L. Saihi, B. Berbaoui, H. Glaoui, "Robust control H_∞ fuzzy of a doubly fed induction generator integrated to wind power system", *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, vol. 14, no. 1, pp. 59-69, 2020.
- [24] L. Yang, Z. Xu, J. Ostergaard, Z.Y. Dong, K.P. Wong, "Advanced control strategy of DFIG wind turbines for power system fault ride through", *IEEE. Trans. Power Systems*, vol. 27, no. 2, pp. 713-722, May 2012 (doi: 10.1109/TPWRS.2011.2174387).
- [25] A.E. Leon, J.M. Mauricio, J.A. Solsona, "Fault ride through enhancement of DFIG-based wind generation considering unbalanced and distorted conditions", *IEEE. Trans. Energy Conversion*, vol. 27, no. 3, pp. 775-783, Sept. 2012 (doi: 10.1109/TEC.2012.2204756).
- [26] I.K. Amin, M.N. Uddin, "Nonlinear control operation of DFIG-based WECS incorporated with machine loss reduction scheme", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 35, no. 7, pp. 7031-7044, July 2020 (doi: 10.1109/TPEL.2019.2955021).
- [27] C. Wu, P. Cheng, H. Nian, F. Blaabjerg, "Rotor current oriented control method of DFIG-DC system without stator side sensors", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 11, pp. 9958-9962, Nov. 2020 (doi: 10.1109/TIE.2019.2956415).
- [28] M.F. Rahman, M.E. Haque, T. Lixin, Z. Limin, "Problems associated with the direct torque control of an interior permanent-magnet synchronous motor drive and their remedies", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 4, pp. 799-809, Aug. 2004 (doi: 10.1109/TIE.2004.831728).
- [29] D. Sun, X. Wang, H. Nian, Z. Q. Zhu, "A sliding-mode direct power control strategy for DFIG under both balanced and unbalanced grid conditions using extended active power", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 33, no. 2, pp. 1313-1322, Feb. 2018 (doi: 10.1109/TPEL.2017.2686980).
- [30] M. Moradian, J. Soltani, "Sliding mode control of a new wind-based isolated three-phase induction generator system with constant frequency and adjustable output voltage", *Journal of Power Electronics*, vol. 16, no. 2, pp. 675-684, 2016 (doi: 10.6113/JPE.2016.16.2.675).
- [31] A.M. Kassem, K.M. Hasaneen, A.M. Yousef, "Dynamic modeling and robust power control of DFIG driven by wind turbine at infinite grid", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 44, no. 1, pp. 375-382, Jan. 2013 (doi: 10.1016/j.ijepes.2011.06.038).
- [32] G. Shahgholian, "Analysis and simulation of dynamic performance for DFIG-based wind farm connected to a distribution system", *Energy Equipment and Systems*, Vol. 6, No. 2, pp. 117-130, June 2018 (doi: 10.22059/EES.2018.31531).

- [33] A. Jafari, G. Shahgholian, "Analysis and simulation of a sliding mode controller for mechanical part of a doubly-fed induction generator based wind turbine", IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 11, no. 10, pp. 2677-2688, July 2017 (doi:10.1049/iet-gtd.2016.1969).
- [34] G. Abad, J. Lopez, M. Rodriguez, L. Marroyo, G. Iwanski, "Doubly fed induction machine: modeling and control for wind energy generation", John Wiley and Sons, 2011.
- [45] M. Tavoosi, B. Fani, E. Adib, "Stability analysis and control of dfig based wind turbine using FBC strategy", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 4, no. 15, pp. 31-42, Dec. 2013 (dor: 20.1001.1.23223871.1392.4.15.4.2) (in Persian).
- [36] O.P. Mahela, N. Gupta, M. Khosravy, N. Patel, "Comprehensive overview of low voltage ride through methods of grid integrated wind generator", IEEE Access, vol. 7, pp. 99299-99326, July 2019 (doi: 10.1109/ACCESS.2019.2930413).

زیر نویس ها

1. Doubly fed induction generator
2. Low voltage ride through
3. Proportional Integral controller
4. Sliding mode control
5. Integral sliding mode control Q variable
6. Integral sliding mode control