

Effect of Gearbox Ratio and Reactive Power Generation on Power Systems Transient Stability with High Penetration of DFIGs

Shahriar Abbasi¹

¹Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, National University of Skills (NUS), Tehran, Iran
shabbasi@nus.ac.ir

Abstract:

The effect of increasing penetration of Doubly-Fed Induction Generator (DFIG)-based wind farms on power system transient stability is investigated in this work. The time-domain simulation is done and the impact of such factors as the power system strength and the reactive power compensation by DFIG on transient stability are analyzed by increasing the wind power penetration. Unlike other research works, in this paper, the effect of the reactive power compensation by DFIG has been investigated comprehensively, in terms of converter rating. Moreover, since the rated rotor speed of DFIG has a significant impact on the electrical torque and machine currents and on the other hand, the rated rotor speed of DFIG can be chosen arbitrarily by adjusting the gearbox ratio; in an innovative approach, the gearbox ratio is analyzed as one of the factors affecting the transient stability improvement. Accordingly, simulation results indicate that in all cases, the grid situation improves in terms of power system transient stability by decreasing the rated rotor speed of the DFIG.

Article Type: Research

Received: 30. 08. 2024

Revised: 16. 05. 2025

Accepted: 12. 07. 2025

Corresponding author: Sh. Abbasi

Corresponding author's address: No. 4, East Brazil Street, Vanak Square, Tehran, Central Building of National University of Skills., Tehran, Iran.



1. Motivation of the work

Until now, some research works are done on analyzing the impact of the reactive power compensation by DFIG on transient stability of electrical power systems. Unlike the previous research works, in this paper, the effect of the reactive power compensation by DFIG has been investigated comprehensively, in terms of converter rating. This is a research gap. Moreover, since the rated rotor speed of DFIG has a significant impact on the electrical torque and machine currents and on the other hand, the rated rotor speed of DFIG can be chosen arbitrarily by adjusting the gearbox ratio; in an innovative approach, the gearbox ratio is analyzed as one of the factors affecting the transient stability improvement.

2. Contributions

The main contributions of this paper can be summarized as follows:

- Investigating the effect of variations of the nominal speed of the DFIG rotor by adjusting the gearbox ratio on improving the transient stability of the power system. Since the nominal speed of the DFIG rotor has a significant effect on the electric torque and current of the machine, this parameter is studied as one of the factors affecting the improvement of transient stability. The simulation results show that the transient stability of the power system improves in all operating conditions of the power system by reducing the nominal speed of the DFIG rotor.
- Investigating the effect of generated active power by DFIG (by changing the wind farm equivalent machine capacity) and generated reactive power by DFIG on improving the transient stability of the power system.

3. Procedures

In power system stability analysis, low-frequency dynamics in the time interval 0.1–10 s after the fault occurrence is importance. Therefore, fast-damping dynamics are neglected. In this paper, a two-axis model with a static excitation system for the SG is used for the transient stability study. The components of the DFIG are: aerodynamic system, drive system, induction generator, and power electronic converters. For this, the DFIG components are modeled separately.

The aerodynamic system of a wind turbine is usually modeled with an algebraic model and its mechanical dynamics are ignored in stability studies.

Also, in this paper, the blade pitch control is not considered and similar to previous studies, the wind speed is assumed to be constant. At each wind speed, there is an optimal speed for the wind turbine at which the power extracted from the wind turbine is maximum.

There are two different operating modes for DFIG. In sub-rating mode, the nominal wind speed value is higher than the wind speed and the DFIG must follow the maximum torque curve. However, in nominal mode, the

nominal wind speed value is lower than the wind speed and the turbine speed and torque must be limited to their nominal values.

Three case studies were conducted for transient stability analysis of power systems with increasing wind power penetration (WPP). In these cases, respectively, in order to more accurately study the impact of DFIG-based WPP increase on the transient stability of power systems: a) wind generation of 15 to 30%, b) wind generation of 30 to 60%, and c) wind generation of 60 to 95% of the total generation capacity.

4. Findings

Three case studies were conducted for transient stability analysis of power systems with increasing wind power penetration (WPP). In these cases, respectively, in order to more accurately study the impact of DFIG-based WPP increase on the transient stability of power systems: a) wind generation of 15 to 30%, b) wind generation of 30 to 60%, and c) wind generation of 60 to 95% of the total generation capacity. In all three cases, if the wind power generation rate is limited to about 0.7 per unit of installed capacity, the critical clear time (CCT) increases as the WPP in the system increases. However, when the wind power generation rate exceeds 0.7 per unit, the trend is reversed and the CCT value decreases sharply with increasing WPP.

Also, since the inertia of DFIG is less than that of synchronous generator (SG), when the wind power in the grid increases, the oscillations of the power system due to disturbances also increase and multi-oscillation transient instability occurs.

5. Conclusion

According to the simulation results, reactive power compensation by DFIG has a favorable effect on the transient stability of power systems. However, as the reactive power generation by DFIG increases, its rotor current increases, leading to an increase in the size of the corresponding converter.

In this paper, in order to prevent the increase in the size of the converter, the external reactive power compensation at the DFIG bus was proposed. It was also shown that the transient stability conditions of the power system are improved by reducing the nominal rotor speed from 1.2 to 1 per unit.

Finally, the effect of power system robustness on its transient stability was investigated. It was shown that with increasing power system robustness, the CCT value increases and transient stability conditions improve.

تأثیر نسبت جعبه‌دنده و تولید توان راکتیو بر پایداری گذرای سیستم‌های قدرت در حضور نفوذ بالای DFIG‌ها

شهریار عباسی^۱

۱- استادیار- گروه مهندسی برق- دانشگاه ملی مهارت - تهران- ایران

shabbasi@nus.ac.ir

چکیده: در این مقاله، تأثیر افزایش نفوذ تولید توان بادی (WPP) مبتنی بر ژنراتور القایی دو سو تغذیه (DFIG) بر پایداری گذرای سیستم‌های قدرت بررسی شده است. بر اساس مدار معادل DFIG متصل به سیستم قدرت، از شکل تعادل جریان برای معادلات شبکه استفاده می‌شود. با این کار، مطالعه پایداری گذرا تسهیل می‌شود. بنابراین، شکل تعادل جریان معادلات شبکه به یک مدل صنعتی ترجیح داده شده است. بر این اساس، ارزیابی پایداری گذرا با استفاده از شبیه‌سازی حوزه زمان انجام شده و تأثیر عواملی مانند استحکام سیستم قدرت و جبران‌سازی توان راکتیو توسط DFIG بر پایداری گذرا همراه با افزایش نفوذ تولید توان بادی تجزیه و تحلیل می‌شود. برخلاف سایر کارهای تحقیقاتی، در این مقاله، اثر جبران‌سازی توان راکتیو توسط DFIG از نظراندازه مبدل (converter rating) به طور جامع بررسی شده است. به علاوه، سرعت نامی روتور DFIG تأثیر قابل توجهی بر گشتاور الکتریکی و جریان ماشین دارد. از طرف دیگر، سرعت نامی روتور DFIG را می‌توان با تنظیم نسبت جعبه‌دنده به دلخواه انتخاب کرد. لذا در یک رویکرد نوآورانه، نسبت جعبه‌دنده به عنوان یکی از عوامل موثر بر بهبود پایداری گذرای شبکه تحلیل می‌شود. بر این اساس، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در همه موارد، وضعیت پایداری گذرا سیستم قدرت با کاهش سرعت نامی روتور DFIG بهبود می‌یابد.

کلمات کلیدی: ژنراتور القایی دوسو تغذیه، نسبت جعبه‌دنده، ارزیابی پایداری گذرا، زمان رفع بحرانی

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۹

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۱

نام نویسنده‌ی مسئول: شهریار عباسی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: تهران، میدان ونک، خیابان برزیل شرقی، پلاک ۴ ساختمان مرکزی دانشگاه ملی مهارت

۱- مقدمه

امروزه استفاده گسترده از سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌ها منجر به انتشار بالای گازهای گلخانه‌ای شده است. به همین دلیل بیشتر کشورها به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر روی آورده‌اند. در این راستا، استفاده از انرژی باد با سرعت بیشتری نسبت به سایر منابع انرژی تجدیدپذیر توسعه یافته است [۱-۳]. با در نظر گرفتن آخرین گزارش شورای جهانی انرژی بادی، صنعت بادی جهانی در سال ۲۰۲۱، با تقریباً ۹۴ گیگاوات ظرفیت اضافه شده در سطح جهان، تنها ۱.۸ درصد از رکورد رشد در سال ۲۰۲۰ عقب مانده است. بنابراین، مجموع ظرفیت نصب شده نیروگاه بادی در حال حاضر به ۸۳۷ گیگاوات می‌رسد که به این ترتیب، به جلوگیری از بیش از ۱.۲ میلیارد تن CO_2 در سطح جهان کمک می‌کند [۴].

معمولاً، وضعیت پایداری گذرای سیستم‌های قدرت بر اساس توان متعارف و تنها با در نظر گرفتن ژنراتورهای سنکرون (SGs) در مطالعات ارزیابی شده است [۵-۶]. در صورتی که نفوذ تولید توان بادی (WPP) در سیستم‌های قدرت قابل توجه نباشد، مزارع بادی در هنگام وقوع خطا از سیستم قدرت جدا می‌شوند [۶]. با این حال، از آنجایی که WPP در حال افزایش است، بررسی تأثیر آنها بر رفتار دینامیکی سیستم‌های قدرت ضروری است. همچنین در فناوری‌های موجود تولید توان بادی، ژنراتور القایی دوسو تغذیه (DFIG) در حال حاضر یک فناوری بسیار جذاب است و بیشترین کاربرد را در زمینه صنعتی دارد [۷-۹]. بر این اساس، در دهه اخیر، ارزیابی پایداری گذرا با در نظر گرفتن تأثیر نفوذ بالای تولید توان بادی مبتنی بر DFIG به موضوعی هیجان‌انگیز میان محققان تبدیل شده است.

مقایسه ادغام یک SG معمولی با یک DFIG در سیستم قدرت در هنگام وقوع یک خطای ۳ فاز، به عنوان یکی از اولین کارهای انجام شده در این زمینه مورد توجه قرار گرفته است [۱۰]. همچنین روش جدیدی برای ارزیابی پایداری گذرا (TSA) در مرجع [۱۱] پیشنهاد شده است. برای ارائه بینشی عمیق‌تر به حضور مزارع بادی، ارزیابی حاشیه انرژی گذرا بر اساس فرمول تابع انرژی گذرا برای سیستم‌های چند ماشینی استفاده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سیستم‌های قدرت با ادغام مزارع بادی نسبت به سیستم‌های بدون توربین‌های بادی در زمانی که زمان رفع خطا، WPP و افت ولتاژ کمتر از آستانه‌های خاص هستند، حساسیت کمتری دارند. مرجع [۱۱] توزیع جغرافیایی منابع بادی در سیستم قدرت را در نظر گرفته است که نشان می‌دهد مناطقی از سیستم قدرت با نرخ تولید برق یکسان در نیروگاه‌های بادی و ژنراتورهای معمولی تأثیر نامطلوبی بر پایداری گذرای سیستم دارند. همچنین مطالعه جامعی در [۱۲] انجام شده است که موارد زیر را تایید می‌کند: (۱) ناپایداری سیستم قدرت با افزایش ظرفیت توربین‌های بادی افزایش می‌یابد. (۲) تراکم تولید توان بادی مبتنی بر DFIG پاسخ سیستم را به اختلالات کوچک بهبود می‌بخشد. (۳) خطای شروع شده در نزدیکی DFIG باعث اثرات نامطلوب بیشتری بر پایداری گذرا نسبت به خطای

نزدیک به SG می‌شود. در مرجع [۱۳]، از شبیه‌سازی ضمنی همزمان^۴ در حوزه زمان-دامنه (T-D) استفاده شده و مدل مناسبی برای TSA ارائه شده است. در مرجع [۱۴]، همچنین اثر نادیده گرفتن گذرای استاتور در مدل‌سازی DFIG بررسی شده است. بر این اساس، از نظر پایداری گذرا، نتایج به دست آمده بسیار مشابه است. با توجه به موقعیت‌های مختلف تراکم تولید توان بادی مبتنی بر DFIG در سیستم‌های قدرت، مطالعات قادر به توضیح دقیق رفتار گذرای سیستم‌های قدرت در حضور نیروی باد نبوده و نتایج ارائه شده در مقالات مذکور در بالا محدود است.

تأثیر تراکم تولید توان بادی مبتنی بر DFIG بر پایداری گذرای سیستم‌های قدرت از دیدگاه‌های مختلف توسط سایر محققان مورد مطالعه قرار گرفته است. در این راستا، در مقالات [۱۵] و [۱۶]، تأثیر عملکرد و کنترل DFIG بر پایداری زاویه روتور بررسی شده و نشان داده شده که با روش پیشنهادی می‌توان پایداری گذرای سیستم قدرت را بهبود داد. در مرجع [۱۷]، یک روش کنترل پایداری زاویه روتور با استفاده از ویژگی‌های دامنه فاز ولتاژ گذرای سیستم قدرت پیشنهاد شده است. بر این اساس، تغییرات در هر دو زاویه فاز و دامنه ولتاژ شبکه برای تجزیه و تحلیل اثر DFIG بر پایداری گذرای سیستم قدرت با تراکم DFIG در نظر گرفته می‌شود. اینرسی مجازی به طور گسترده در سیستم‌های قدرت متشکل از منابع انرژی توزیع شده (سیستم‌های تبدیل انرژی بادی) اجرا می‌شود. بر این اساس، یک استراتژی برنامه‌ریزی اینرسی مجازی بهینه برای بهبود پایداری سیستم قدرت با حجم زیادی از منابع تجدیدپذیر مبتنی بر DFIG در مرجع [۱۸] پیشنهاد شده است. همچنین، یک روش ساده اما مؤثر برای TSA احتمالی سیستم قدرت با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و همبستگی‌های مزرعه بادی در مرجع [۱۹] نشان داده شده است. نویسندگان [۱۸ و ۱۹]، TSA سیستم‌های قدرت را برای مطالعات برنامه‌ریزی یکپارچه سازی نیروگاه‌های بادی دریایی مطالعه کرده‌اند. علاوه بر این، در مقاله [۲۲]، تأثیر سطوح مختلف WPP، پیکربندی شبکه و فاصله الکتریکی بر نرخ اولیه تغییر مقادیر فرکانس در سیستم قدرت چهار ناحیه‌ای برای سیستم قدرت کشور کرواسی بررسی شده است.

به طور کلی، در مقاله جاری، تأثیر WPP مبتنی بر DFIG بر پایداری گذرا سیستم‌های قدرت بررسی شده است. از آنجا که معمولاً از سیستم SMIB^۶ (به عنوان یک سیستم آزمایشی معمول برای مطالعات ارزیابی پایداری گذرا) برای تجزیه و تحلیل TSA در حضور توربین‌های بادی استفاده می‌شود [۶، ۱۰، ۲۳ - ۲۹]. در این مقاله نیز از این سیستم استفاده شده است. در این مقاله، سه مورد مطالعه برای TSA سیستم‌های قدرت با افزایش WPP پیشنهاد شده است. در این موارد، به ترتیب به منظور مطالعه دقیق‌تر تأثیر افزایش WPP مبتنی بر DFIG بر پایداری گذرا سیستم‌های قدرت، سه حالت الف) تولید بادی ۱۵ تا ۳۰ درصد، ب) تولید بادی ۳۰ تا ۶۰ درصد و ج) تولید بادی ۶۰ تا ۹۵ درصد از ظرفیت تولید کل در نظر گرفته شده است. در هر سه حالت، اگر میزان

$$P_{tw} = (0.5)\rho\pi R^2 C_p(\lambda, \beta) V_w^3 \quad (1)$$

که،

$$\lambda = (\omega_t \cdot R) / V_w \quad (2)$$

همچنین در این مقاله، کنترل گام زاویه تیغه مد نظر نبوده و مشابه پژوهش‌های قبلی، سرعت باد ثابت فرض می‌شود [۳۰ و ۳۴]. در هر سرعت باد، یک سرعت بهینه برای توربین بادی وجود دارد که در آن توان استخراج شده از توربین بادی حداکثر $(C_{p,max}, \lambda_{opt})$ می‌گردد. بر این اساس، با ترکیب روابط (۱) و (۲)، معادلات قدرت و گشتاور توربین بادی را می‌توان به صورت روابط (۳) و (۴) بازنویسی کرد [۱۷].

$$P_{tw,max} = K_{opt} \omega_t^3 \quad (3)$$

$$T_{tw,max} = K_{opt} \omega_t^2 \quad (4)$$

که،

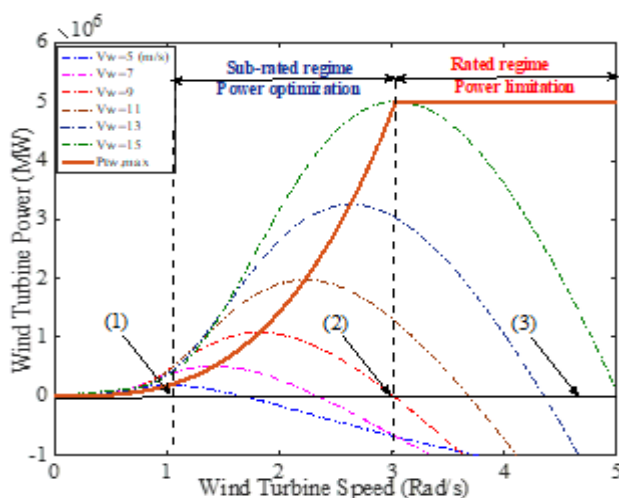
$$K_{opt} = ((0.5)\rho\pi R^5 C_{p,max}) / \lambda_{opt}^3$$

با سرعت باد ۱۵ متر بر ثانیه، منحنی سرعت - گشتاور بهینه (قدرت) برای DFIG به صورت شکل ۱ است.

مطابق شکل ۱، دو مد عملیاتی مختلف برای DFIG وجود دارد. در مد درجه‌بندی فرعی، مقدار سرعت نامی باد بالاتر از سرعت باد است و DFIG باید منحنی حداکثر گشتاور را دنبال کند. با این حال، در مد نامی، مقدار سرعت نامی باد کمتر از سرعت باد بوده و سرعت و گشتاور توربین باید به مقادیر نامی آنها محدود شود.

سرعت نامی روتور را می‌توان به طور دلخواه با تنظیم نسبت جعبه‌دنده انتخاب کرد و سرعت روتور نامی تأثیر قابل توجهی بر گشتاور الکتریکی و جریان ماشین دارد، اما به دلیل دامنه کم، تأثیر کمی بر ولتاژ روتور دارد [۳۰]. انتخاب سرعت نامی بالاتر روتور منجر به گشتاور الکتریکی کمتری می‌شود، زیرا گشتاور با رابطه (۵) تعریف می‌شود.

$$T_{e,rated} = P_{ag,rated} / \omega_{r,rated} \quad (5)$$



تولید توان بادی به حدود ۰.۷ در واحد ظرفیت نصب شده محدود باشد، با افزایش WPP در سیستم، زمان رفع بحرانی (CCT) افزایش می‌یابد. با این حال، زمانی که نرخ تولید توان بادی از ۰.۷ در واحد تجاوز کند، روند معکوس شده و با افزایش WPP از مقدار CCT به شدت کاسته می‌شود. همچنین از آنجایی که اینرسی DFIG کمتر از SG است، زمانی که توان بادی در شبکه بیشتر می‌شود، نوسانات سیستم قدرت ناشی از اختلالات نیز بیشتر شده و ناپایداری گذرا چند نوسانی رخ می‌دهد. علاوه بر این، تأثیر عواملی مانند توان راکتیو تولیدی DFIG، تغییر در سرعت نامی روتور DFIG (نسبت جعبه‌دنده)، و استحکام سیستم قدرت بر پایداری گذرا با افزایش WPP بررسی شده است. بر این اساس، عمده‌ترین نوآوری‌های این مقاله را می‌توان به شرح زیر جمع بندی کرد:

- بررسی اثر تغییر سرعت نامی روتور DFIG با تنظیم نسبت جعبه‌دنده بر بهبود پایداری گذرای سیستم قدرت. سرعت نامی روتور در DFIG را می‌توان به طور دلخواه با تنظیم نسبت جعبه‌دنده تنظیم کرد [۳۰]. از آنجایی که سرعت نامی روتور DFIG تأثیر قابل توجهی بر گشتاور الکتریکی و جریان ماشین دارد، این پارامتر به عنوان یکی از عوامل مؤثر بر بهبود پایداری گذرا مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که وضعیت پایداری گذرای سیستم قدرت در همه شرایط عملکردی سیستم قدرت با کاهش سرعت نامی روتور DFIG بهبود می‌یابد.

- بررسی اثر P_{DFIG} (با تغییر ظرفیت ماشین معادل مزرعه بادی) و Q_{DFIG} بر بهبود پایداری گذرای سیستم قدرت. در مرجع [۱۵] تنها تأثیر Q_{DFIG} ، و در مرجع [۱۶] تنها P_{DFIG} بر روی وضعیت پایداری گذرا بررسی شده است. برخلاف مراجع [۱۵] و [۱۶]، در این مقاله، تأثیر P_{DFIG} و Q_{DFIG} به طور جامع بررسی شده است. بر این اساس، مدل سازی اجزای سیستم قدرت و نحوه اتصال ماشین به شبکه به ترتیب در بخش‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. سپس، نتایج شبیه‌سازی در بخش ۴ بیان شده است. بخش ۵ به نتیجه‌گیری اختصاص داده شده است.

۲- مدل سازی تجهیزات

در هر تحلیل پایداری سیستم‌های قدرت، دینامیک فرکانس پایین در بازه زمانی ۰.۱-۱۰ ثانیه پس از رخداد خطا حایز اهمیت است [۶ و ۳۱]. بنابراین، از دینامیک با میرایی سریع صرف‌نظر می‌شود. در این مقاله، در مطالعه پایداری گذرا، از یک مدل دو محوره به همراه یک سیستم تحریک استاتیکی برای SG استفاده شده است [۳۲ و ۳۳]. اجزای DFIG عبارتند از: سیستم آبرودینامیک، سیستم محرکه، ژنراتور القایی و مبدل‌های الکترونیک قدرت. در ادامه، اجزا DFIG به صورت جداگانه مدل سازی شده است.

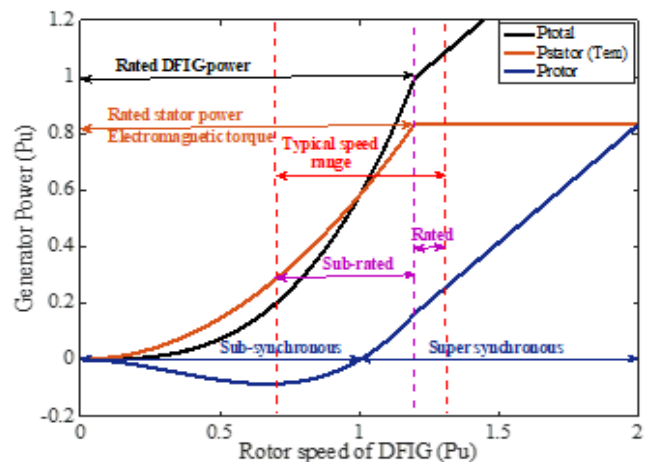
سیستم آبرودینامیکی توربین بادی معمولاً به صورت رابطه (۱) با یک مدل جبری مدل شده و در مطالعات پایداری، دینامیک مکانیکی آن صرف‌نظر می‌شود [۱۳ و ۲۵].

است. از سوی دیگر، هدف GSC کنترل ضریب توان در هر زمان و ثابت نگه داشتن ولتاژ رابط dc است [۲۵]. از نظر سرعت، کنترل‌کننده‌های جریان حلقه داخلی مبدل‌های الکترونیک قدرت در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی بسیار سریع هستند و ملاحظات نظری نشان داده‌اند که سرعت عملکرد بسیار سریع‌تر از گذراهای الکترومکانیکی مورد مطالعه در تحلیل پایداری سیستم قدرت است. بنابراین، عملکرد آنها تأثیر قابل توجهی بر مطالعات پایداری گذرا سیستم‌های قدرت ندارد. به این ترتیب، یک جریان مرجع جدید را می‌توان در ۱۰ میلی ثانیه یا کمتر تولید کرد و باید توجه داشت که ۱۰ میلی ثانیه یک مرحله زمانی عادی در شبیه‌سازی دینامیکی سیستم‌های قدرت است [۱۳، ۲۴ و ۲۵]. در نتیجه، سرعت عمل کنترل‌کننده‌های جریان را می‌توان آنی در نظر گرفت.

بر این اساس، با توجه به آنی بودن کنترل GSC، جریان AC GSC به گونه‌ای است که توان اکتیو تزریق شده به شبکه با RSC در ضریب توان واحد مطابقت دارد. بنابراین، انتقال توان اکتیو روتور به طور کامل توسط GSC انجام شده و ولتاژ رابط dc ثابت می‌ماند [۱۳]. لذا در این مقاله، مبدل‌ها ایده‌آل فرض شده (GSC به عنوان منبع جریان و RSC به عنوان منبع ولتاژ مدل می‌شود) و ولتاژ رابط dc ثابت است. با توجه به آنچه در بالا گفته شد، مدل مورد استفاده برای DFIG بر اساس دو فرض اساسی است: (۱) گذراهای الکترومغناطیسی در استاتور و انشعاب بین اینورترها و شبکه را می‌توان نادیده گرفت. این فرض تأثیر قابل توجهی بر نوسانات الکترومکانیکی ندارد و به حل معادلات استاتور همراه با معادلات شبکه کمک می‌کند. (۲) فرض می‌شود که کنترل جریان آنی بوده و دینامیک حلقه‌های کنترل جریان ناچیز است. ثابت زمانی کنترل جاری حدود یک سیکل (۱۰ میلی ثانیه) است که بسیار سریع‌تر از مقیاس زمانی مطالعات پایداری گذرا (از مرتبه ثانیه) است. بنابراین، دینامیک سریع چنین سیستم کنترلی هیچ تأثیری بر نوسانات الکترومکانیکی ندارد.

۳- نحوه اتصال ماشین به شبکه

هنگام تشریح نحوه اتصال ماشین به شبکه، معادلات شبکه استخراج شده و مدل‌سازی دینامیکی تکمیل می‌شود. لازم به ذکر است که شبیه‌سازی پایداری گذرا به طور کلی با استفاده از مدل معادله جبری دیفرانسیل (DAE) با معادلات شبکه در فرم تعادل جریان ساده‌سازی می‌شود، زیرا ماتریس ورود به شبکه تنها زمانی که یک اختلال در حال رخ دادن است باید مجدداً اصلاح شود [۳۲]. در همین راستا، شکل ۲ دیگرام برداری نحوه اتصال قاب‌های مرجع همزمان ماشین‌ها (قاب مرجع dq) و شبکه (قاب مرجع DQ) را نشان می‌دهد.



شکل (۱): قدرت مرجع نوعی (گشتاور الکترومغناطیسی) نسبت

به سرعت روتور

بنابراین، از نظر مقدار نامی مبدل، مقدار بالاتر سرعت نامی روتور به دلیل ایجاد دامنه کمتر جریان‌های ماشین بهتر است. بنابراین، در این مقاله، سرعت نامی روتور DFIG برابر با ۱.۲ در واحد انتخاب می‌شود. همچنین با توجه به مطالعات تجربی و شبیه‌سازی‌های سیستم قدرت، یک مدل دو جرمی برای سیستم محرکه توربین بادی هنگام مطالعه پایداری ترجیح داده می‌شود [۳۴ و ۳۵]. بنابراین، در این مقاله از مدل محرکه-قطار^۶ دو جرمی برای DFIG استفاده می‌شود. به طور معمول، گذرای استاتور ناهمزمان بوده و از SGها در مطالعات دینامیکی سیستم‌های قدرت صرف‌نظر می‌شود. بنابراین، جریان‌ها و ولتاژها به عنوان فازور در شبیه‌سازی پایداری گذرا نشان داده می‌شوند [۱۳ و ۲۹]. بر این اساس، گذراهای استاتور نیز در این مقاله نادیده گرفته می‌شوند. بنابراین، معادلات دینامیکی ژنراتور القایی به صورت زیر بیان می‌شود (روابط (۶-۱۰)) [۲۵ و ۳۶].

$$V_{qs} = -r_s i_{qs} + e'_q - L'_s i_{ds} \quad (6)$$

$$V_{ds} = -r_s i_{ds} + e'_d + L'_s i_{qs} \quad (7)$$

$$\frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} e'_d = \frac{1}{T_0} (-e'_d + (L_{ss} - L'_s) i_{qs}) + (1 - \omega_r) e'_q - \frac{L_m}{L_{rr}} V_{qr} \quad (8)$$

$$\frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} e'_q = -\frac{1}{T_0} (e'_q + (L_{ss} - L'_s) i_{ds}) - (1 - \omega_r) e'_d + \frac{L_m}{L_{rr}} V_{dr} \quad (9)$$

که،

$$T_e = e'_d i_{ds} + e'_q i_{qs} \quad (10)$$

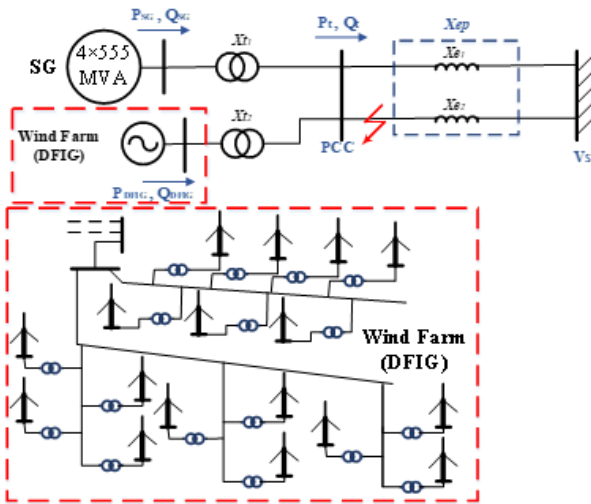
$$e'_d = -\frac{L_m}{L_{rr}} \lambda_{qr} \quad T_0 = \frac{L_{rr}}{R_r}, \quad L'_s = \left(L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_{rr}} \right),$$

$$e'_q = \frac{L_m}{L_{rr}} \lambda_{dr}$$

همچنین، سیستم کنترل الکتریکی DFIG از دو قسمت مبدل سمت روتور^۸ (RSC) و مبدل سمت شبکه^۹ (GSC) تشکیل شده است. هدف RSC محدود کردن سرعت روتور در مد عملیاتی نامی و به حداکثر رساندن توان استخراج شده از توربین بادی در مد عملیاتی با رتبه فرعی

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این مقاله، یک سیستم تک ماشین شین بینهایت SMIB (شکل ۴ [۳۸]) برای ارزیابی پایداری گذرا به کار گرفته شده است. توان پایه ۲۲۲۰ مگا وولت آمپر متشکل از ۴ واحد تولیدی با ظرفیت تولید ۵۵۵ مگا وولت آمپر برای تک ماشین SG در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۴، تک ماشین SM به واسطه ترانسفورماتور و خط انتقال به شین بینهایت IB متصل می‌باشد. برای بررسی اثر WPP بر پایداری گذرای سیستم‌های قدرت، یک مزرعه بادی به سیستم قدرت پایه در شین نقطه اتصال مشترک^{۱۱} (PCC) اضافه شده است. مشابه سایر پژوهش‌های انجام شده در این حوزه، مزرعه بادی به عنوان یک ماشین واحد معادل مدل‌سازی شد. بر این اساس، با استفاده از مدار معادل DFIG و سیستم قدرت، شبیه‌سازی T-D انجام شده و وضعیت پایداری گذرا به طور جامع ارزیابی می‌شود. سایر مشخصات سیستم قدرت و SMIB در پیوست الف موجود است.



شکل (۴) طرح سیستم SMIB.

۴-۱- اثر نفوذ تولید توان بادی

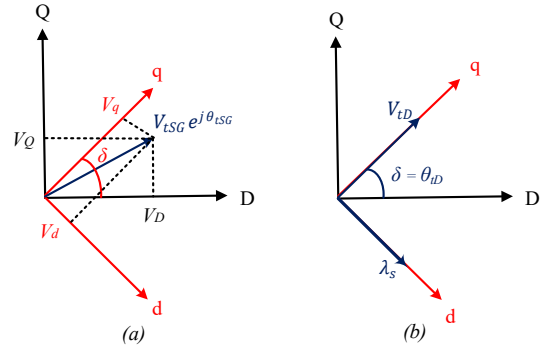
فرض شده است که در نتیجه خطا (اتصال کوتاه سه فاز در خط Xe2)، ولتاژ شین PCC به ۰.۲ در واحد کاهش یابد. در این مقاله، برای تحلیل دقیق‌تر تأثیر افزایش WPP بر وضعیت پایداری گذرا، ۳ حالت را بررسی می‌کنیم. با افزایش WPP در سیستم قدرت مورد مطالعه، ظرفیت ماشین معادل مزرعه بادی نیز افزایش می‌یابد.

حالت الف - افزایش WPP مبتنی بر DFIG (ظرفیت ماشین معادل ۵۵۵ مگاوات) از ۱۵ تا ۳۰ درصد.

حالت ب - افزایش WPP مبتنی بر DFIG (ظرفیت ماشین معادل ۱۱۱۰ مگاوات) از ۳۰ تا ۶۰ درصد.

حالت ج - افزایش WPP مبتنی بر DFIG (ظرفیت ماشین معادل ۲۲۲۰ مگاوات) از ۶۰ تا ۹۵ درصد.

در هر حالت، تأثیر افزایش WPP بر پایداری گذرا سیستم قدرت تحلیل شده است. نرخ تولید توان بادی به صورت تصادفی متغیر فرض



شکل (۲) دیاگرام برداری ماشین (SG و DFIG) و قاب مرجع شبکه.

$$V_{tSG} e^{j\theta_{tSG}} = (V_D + jV_Q) = (V_d + jV_q) e^{j(\delta - \frac{\pi}{2})} \quad (11)$$

بر این اساس، مدل DAE معادلات شبکه در شکل تعادل جریان را می‌توان برای SG به صورت معادلات (۱۲)-(۱۳) بیان کرد [۳۲].

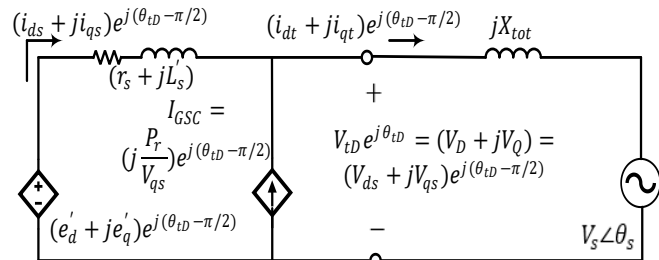
$$R_s I_d - (X'_q + X_{tot}) I_q - E'_d + V_s \sin(\delta - \theta_s) = 0 \quad (12)$$

$$R_s I_q + (X'_d + X_{tot}) I_d - E'_q + V_s \cos(\delta - \theta_s) = 0 \quad (13)$$

به طور مشابه، شکل ۲-ب ارتباط بین قاب مرجع DFIG dq و قاب مرجع DQ سیستم قدرت را نشان می‌دهد. بنابراین، معادله ولتاژ پایانه DFIG به صورت زیر است:

$$V_{tD} e^{j\theta_{tD}} = (V_D + jV_Q) = (V_{ds} + jV_{qs}) e^{j(\delta - \pi/2)} \quad (14)$$

با استفاده از روش کنترل برداری کلاسیک در مدل‌سازی DFIG [۳۷]، شار استاتور DFIG با محور d تراز می‌شود. پس، $V_s = V_{ds} + jV_{qs}$ ، $V_{ds} = 0$ ، $V_{qs} = |V_s|$ ، $\delta = \angle V_s$. به این ترتیب و با توجه به نکات بیان شده، مدار معادل DFIG متصل به شبکه به صورت شکل ۳ می‌باشد.

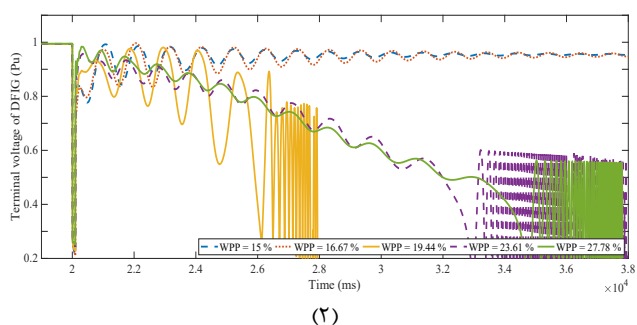


شکل (۳) مدار معادل DFIG متصل به شبکه.

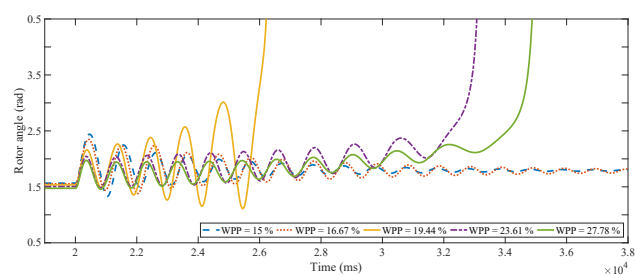
بنابراین، معادلات شبکه در شکل تعادل جریان با استفاده از مدار معادل توسعه یافته برای DFIG به صورت روابط (۱۵)-(۱۶) به دست می‌آیند.

$$-V_{qs} \cos \theta_{tD} - \left(X_{tot} \left(i_{qs} + \frac{P_r}{V_{qs}} \right) \sin \theta_{tD} \right) + (X_{tot} i_{ds} \cos \theta_{tD}) + V_s \cos \theta_s = 0 \quad (15)$$

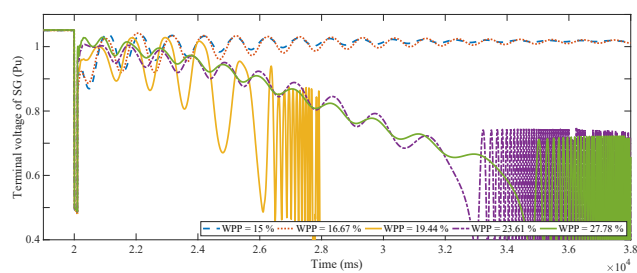
$$-V_{qs} \sin \theta_{tD} + \left(X_{tot} \left(i_{qs} + \frac{P_r}{V_{qs}} \right) \cos \theta_{tD} \right) + (X_{tot} i_{ds} \sin \theta_{tD}) + V_s \sin \theta_s = 0 \quad (16)$$



شکل (۵): منحنی DFIG برای حالت الف (۱) توان اکتیو (۲) ولتاژ ترمینال

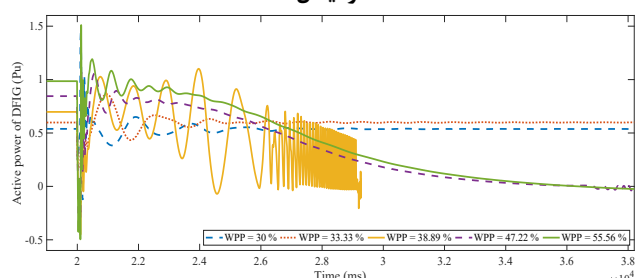


(۱)

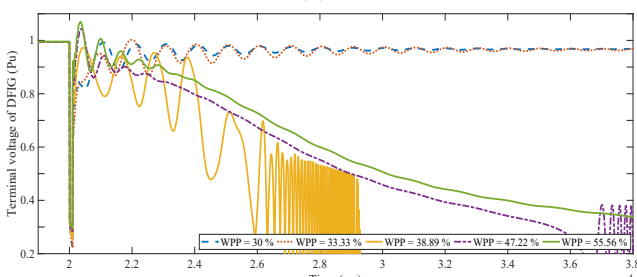


(۲)

شکل (۶): منحنی SG برای حالت الف (۱) زاویه روتور (۲) ولتاژ ترمینال



(۱)



(۲)

شکل (۷): منحنی DFIG برای حالت ب (۱) توان حقیقی (۲) ولتاژ شین

شده است. نرخ WPP نسبت تولید توان بادی به کل توان تحویل شده به شین بی نهایت در حالت پایه است. برای انجام شبیه سازی TSA و T-D، فرض می شود که پاسخ زمانی دینامیک سیستم ۲۰ ثانیه در شرایط عملیاتی حالت پایدار شبیه سازی شده و سپس خطا رخ می دهد. در این قسمت زمان رفع عیب برای تمامی موارد مقدار ثابت ۰.۱ ثانیه در نظر گرفته شده است. به این ترتیب، شبیه سازی ها انجام شده و P_{DFIG} و ولتاژ شین DFIG و زاویه روتور و ولتاژ شین SG پایش می شود. در حالت الف، نتایج شبیه سازی به صورت شکل های ۵ و ۶ است.

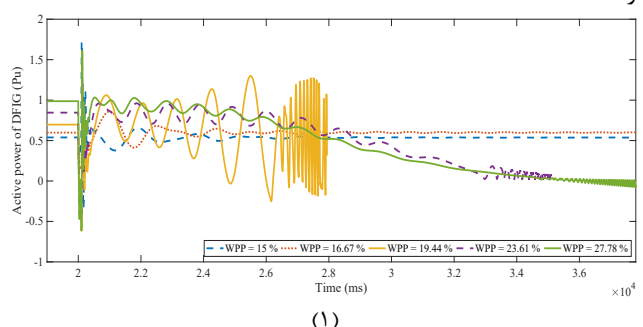
مطابق شکل (۱)۶، تا زمانی که WPP در سیستم قدرت به ۱۶.۶۷٪ محدود شده باشد، وضعیت شبکه پایدار است. با این حال، هنگامی که WPP به ۱۹.۴۴٪ افزایش می یابد، شبکه یک ناپایداری زاویه روتور چند نوسانی را تجربه می کند. پس از آن، وضعیت شبکه با افزایش بیشتر (۲۳.۶۱٪ و ۲۷.۷۸٪) در WPP ناپایدار می گردد.

برای حالت ب نیز شبیه سازی به روش مشابه انجام شده است و P_{DFIG} و ولتاژ شین DFIG و همچنین ولتاژ شین و زاویه روتور SG پایش شده اند که نتایج آن در شکل های ۷ و ۸ نشان داده شده است.

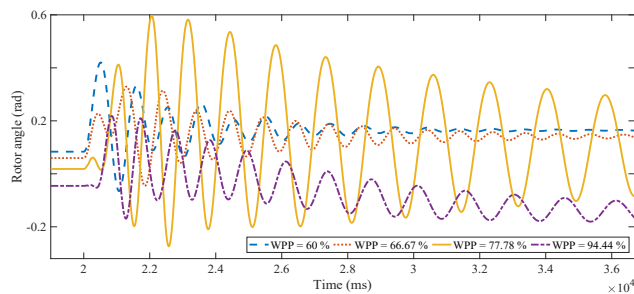
در این حالت، زمانی که WPP به ۳۳.۳۳٪ افزایش می یابد، وضعیت شبکه پایدار است. با این حال، هنگامی که WPP به ۳۸.۸۹ و ۴۷.۲۲٪ افزایش می یابد، شبکه یک ناپایداری زاویه روتور چند نوسانی را تجربه می کند. مطابق شکل (۱)۸، برای نرخ WPP 55.56 درصد، منحنی زاویه روتور به طور جداگانه ارائه شده است. مشاهده می شود که سیستم در این حالت به دلیل افزایش زاویه روتور ناپایدار (چند نوسانی) خواهد بود.

در حالت ج، شبیه سازی T-D به طور مشابه با تنظیم مدت زمان خطا ۱۰۰ میلی ثانیه انجام و نتایج در شکل های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است.

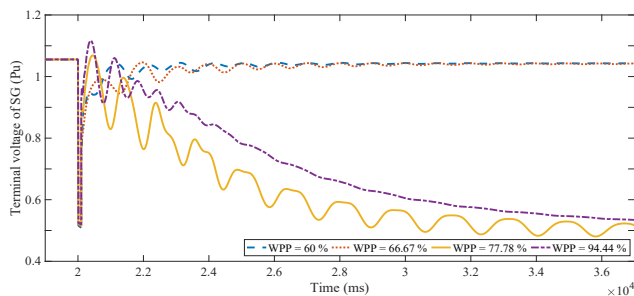
با توجه به شکل (۱)۱۰، هنگامی که WPP تا یک آستانه خاص (۶۶.۶۷٪) افزایش می یابد، وضعیت پایداری گذرا مناسب است. با این حال، هنگامی که WPP به افزایش خود ادامه می دهد، شبکه با ناپایداری گذرا و افت ولتاژ شدید مواجه می شود. برای تحلیل نتایج به دست آمده، CCT با استفاده از شبیه سازی T-D بدست آمده و نتایج در جدول ۱ ارائه شده است.



(۱)

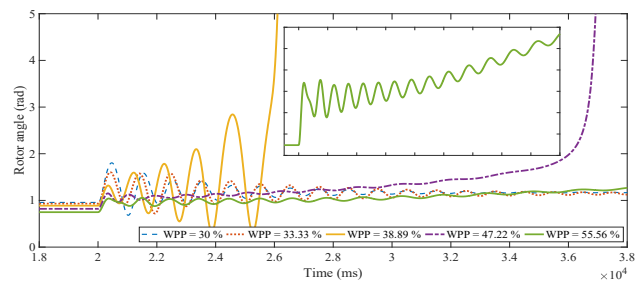


(۱)

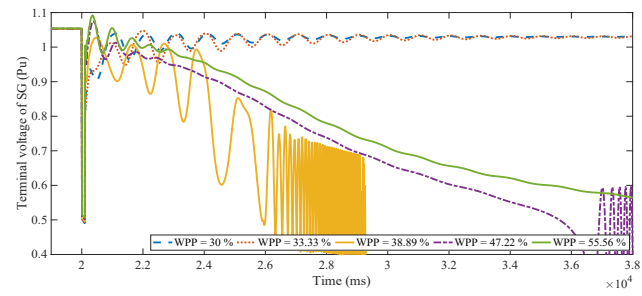


(۲)

شکل (۱۰): منحنی SG برای حالت ج (۱) زاویه روتور (۲) ولتاژ شین



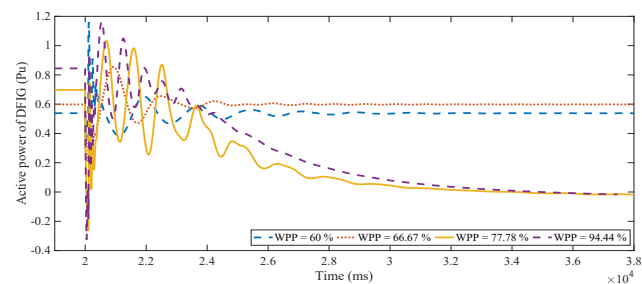
(۱)



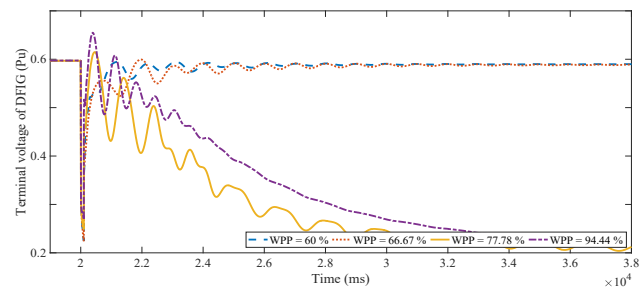
(۲)

شکل (۸): منحنی SG برای حالت ب (۱) زاویه روتور (۲) ولتاژ شین

با توجه به جدول ۱ دو نکته قابل درک است. نخست، برای هر مورد، زمانی که WPP افزایش می‌یابد، CCT نیز در مقایسه با شرایط حالت پایه افزایش می‌یابد. بنابراین، شرایط پایداری گذرا در ابتدا بهبود می‌یابد. با افزایش WPP تا یک مقدار آستانه از پیش تعیین شده، CCT همچنان در حال افزایش است و سپس کاهش می‌یابد. بر این اساس، شرایط پایداری گذرا در ابتدا با افزایش WPP بهبود می‌یابد، اما در ادامه وضعیت بدتر می‌شود. نکته مهم در اینجا این است که در هر یک از سه حالت بررسی شده، زمانی که نرخ توان تولید توان بادی به حدود ۰.۷ در واحد (آستانه معینی) محدود می‌شود، CCT با افزایش WPP در سیستم افزایش می‌یابد. اما، زمانی که نرخ تولید توان بادی از ۰.۷ در واحد تجاوز کند، روند معکوس شده و CCT با افزایش WPP بسیار کاهش می‌یابد. دوم این‌که، به دلیل اینرسی کمتر DFIG در مقایسه با SG، هر چه تولید توان بادی در شبکه بیشتر باشد، نوسانات شبکه ناشی از اغتشاش بیشتر است. طبق آخرین ردیف جدول ۱، زمانی که میزان تولید توان بادی به حدود ۰.۷ در واحد محدود می‌شود، ناپایداری گذرا در اولین نوسان به دلیل گشتاور همگام‌سازی ناکافی در سیستم قدرت رخ می‌دهد. با این حال، هنگامی که نرخ تولید توان بادی از ۰.۷ در واحد تجاوز می‌کند، ناپایداری گذرا چند نوسانی به دلیل گشتاور میرایی ناکافی رخ می‌دهد. لازم به ذکر است که سرعت نامی روتور DFIG 1.2 در واحد در نظر گرفته می‌شود و فرض می‌شود که DFIG تبادل توان راکتیو با شبکه ندارد.

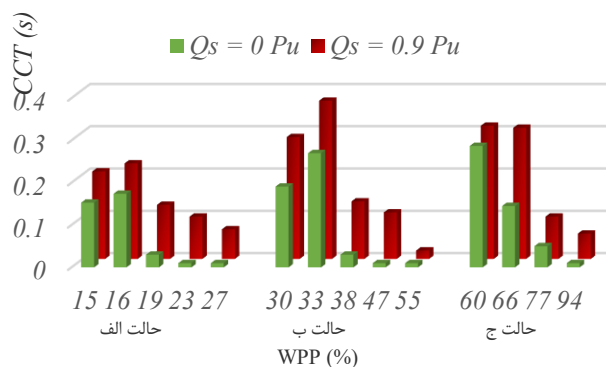


(۱)



(۲)

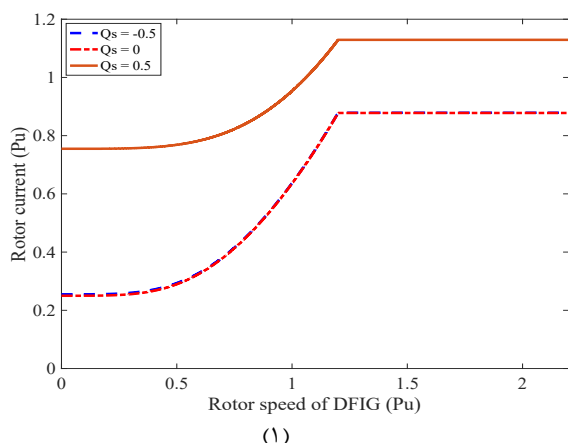
شکل (۹): منحنی DFIG برای حالت ج (۱) توان حقیقی (۲) ولتاژ شین



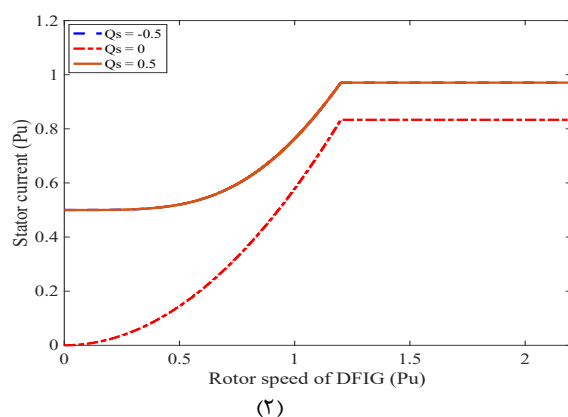
شکل (۱۱): اثر توان راکتیو DFIG روی پایداری گذرا (CCT)

سیستم قدرت

با افزایش Q_{DFIG} ، جریان استاتور و روتور افزایش می‌یابد. بر این اساس، با در نظر گرفتن نرخ‌های Q_{DFIG} در سه حالت مختلف ۰.۵-، ۰-، و ۰.۵+ در واحد، منحنی‌های جریان‌های روتور و استاتور در حالت پایدار برای مدهای عملکرد نامی و فرعی در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



(۱)



(۲)

شکل (۱۲): جریان‌های روتور و استاتور DFIG (۱) جریان روتور (۲)

جریان استاتور

مطابق شکل ۱۲، زمانی که Q_{DFIG} ۰.۵ در واحد باشد، جریان استاتور و به ویژه جریان روتور، به طور قابل توجهی در هر دو مد افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، برای کاهش اندازه مبدل الکترونیکی قدرت، معمولاً فرض می‌شود که DFIG هیچ تبادل توان راکتیو با شبکه ندارد [۱، ۱۲ و ۲۵]. بنابراین، اگر هدف افزایش Q_{DFIG} برای بهبود پایداری گذرا سیستم باشد،

جدول (۱): مقایسه مقادیر CCT با افزایش WPP

نوع ناپایداری	CCT (s)	WPP (%)	P_t (Pu)	Q_t (Pu)	S_b (MVA)	حالت
اولین نوسان	0.126-0.127	0	0.9	0.436	2220	حالت پایه
اولین نوسان	0.153-0.154	15				
اولین نوسان	0.174-0.175	16.67				
چند نوسانی	0.057-0.058	19.44	3.6	1.744	555	حالت الف
چند نوسانی	0.02-0.03	23.61				
چند نوسانی	0.01-0.02	27.78				
اولین نوسان	0.191-0.192	30				
اولین نوسان	0.270-0.271	33.33				
چند نوسانی	0.043-0.044	38.89	1.8	0.872	1110	حالت ب
چند نوسانی	0.025-0.035	47.22				
چند نوسانی	0.02-0.03	55.56				
اولین نوسان	0.287-0.288	60				
چند نوسانی	0.145-0.146	66.67	0.9	0.436	2220	حالت ج
چند نوسانی	0.04-0.05	77.78				
چند نوسانی	0.03-0.04	94.44				

۴-۲- اثر توان راکتیو DFIG

در این زیربخش، اثر توان راکتیو DFIG (Q_{DFIG}) بر وضعیت پایداری گذرای سیستم بررسی می‌شود. از آنجایی که بازیابی ولتاژ پس از رفع عیب توسط DFIG ضعیف‌تر از SG است، مقدار Q_{DFIG} از نظر TSA یک مسئله حیاتی است [۷]. برای انجام این کار، در تمام حالات، نرخ Q_{DFIG} به ۰.۹ در واحد افزایش می‌یابد. فرض بر این است که خطای اتصال کوتاه مانند زیر بخش ۴-۱ است. بر این اساس، CCT با شبیه‌سازی TSA در حوزه T-D محاسبه می‌شود. نتایج شبیه‌سازی به دست آمده در این بخش در شکل ۱۱ ارائه شده است.

مطابق شکل ۱۱، در همه حالات، با افزایش Q_{DFIG} مقدار CCT نیز افزایش یافته و وضعیت پایداری گذرا بهبود می‌یابد. به علاوه، زمانی که WPP تا یک مقدار آستانه مشخص افزایش می‌یابد، CCT نیز افزایش می‌یابد، اما در ادامه از مقدار CCT کاسته می‌شود.

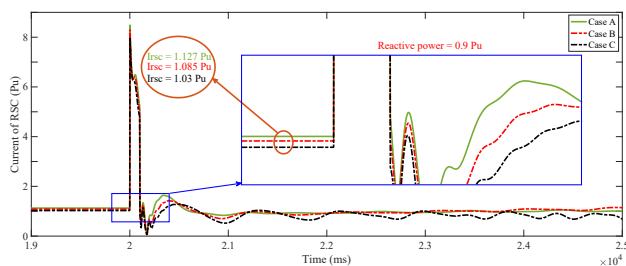
از توان راکتیو تولید شده توسط DFIG در شرایط عملیاتی کنترل توان راکتیو تامین می‌شود. بر این اساس، دیگر توان راکتیو GSC برابر با صفر نیست. پس،

$$P_{GSC} = P_r, Q_{GSC} = \alpha Q_{tot}; \alpha \neq 0 \Rightarrow Q_{GSC} \neq 0 \\ \Rightarrow Q_s = (1 - \alpha) Q_{tot}$$

بنابراین، در این حالت، جریان GSC به صورت رابطه (۱۷) تغییر کرده و در مدار معادل DFIG قرار می‌گیرد:

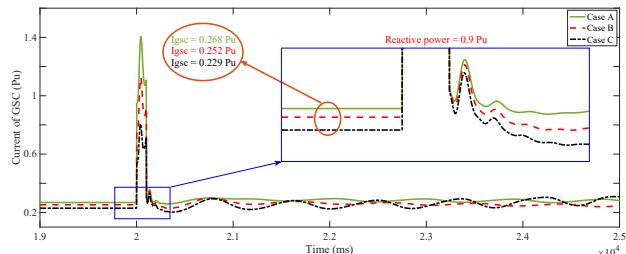
$$I_{GSC} = \frac{P_{GSC} - jQ_{GSC}}{-jV_{qs}} \quad (17)$$

بنابراین، در این بخش فرض می‌شود که توان راکتیو ۰.۳ در هر واحد توسط GSC و توان راکتیو ۰.۶ در واحد توسط استاتور تامین می‌شود. یعنی در کل توان راکتیو ۰.۹ در واحد تولید شده توسط DFIG را تولید شده است. جریان‌های RSC و GSC به ترتیب در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده‌اند.



شکل (۱۵): جریان حالت پایدار RSC در همه حالت‌ها با حداکثر

استخراج توان از مزرعه بادی (سناریو ۲)



شکل (۱۶): جریان حالت پایدار GSC در همه حالت‌ها با استخراج

حداکثری توان از مزرعه بادی (سناریو ۲)

در این حالت، جریان RSC حدود ۱۳ درصد افزایش می‌یابد و درصد افزایش کمتری را نسبت به سناریوی ۱ دارد. در حالی که جریان GSC 26.8 درصد افزایش یافته و درصد افزایش بیشتری نسبت به سناریوی ۱ دارد.

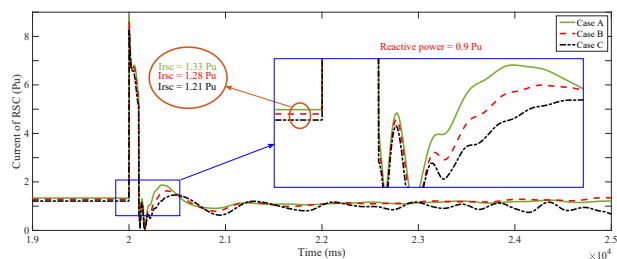
مرجع [۱۵] یکی از کارهای انجام شده در این زمینه است که در آن، تأثیر QDFIG بر وضعیت پایداری گذرای سیستم بررسی شده است. در این مرجع صرفاً نشان داده شده است که، تولید توان راکتیو توسط DFIG تأثیر مطلوبی بر پایداری گذرای سیستم دارد. به هر حال در زیربخش جاری و با توجه به آنچه در بالا بیان شد، تأثیر QDFIG بر بهبودی وضعیت پایداری گذرای سیستم به طور جامع مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌ها، تولید توان راکتیو توسط DFIG تأثیر مطلوبی بر پایداری گذرای سیستم دارد. با این حال، با توجه به اینکه DFIG چگونه توان راکتیو را در هر دو سناریو مورد نظر تامین

جریان حالت پایدار روتور DFIG و در نتیجه اندازه مبدل باید افزایش یابد.

به طور کلی، توان راکتیو را می‌توان به دو روش توسط DFIG به شبکه تزریق کرد [۳۰]: سناریو ۱: فرض می‌شود که هیچ بخشی از توان راکتیو توسط روتور تامین نمی‌شود. به این ترتیب GSC با ضریب توان واحد عمل می‌کند و تمام توان راکتیو از استاتور به شبکه منتقل می‌شود. همان‌طور که در بخش ۳ بیان شد، مدار معادل ارائه شده برای DFIG در این مقاله بر این اساس به دست آمده است. سناریوی ۲: در این حالت، بخشی از توان راکتیو DFIG توسط GSC تامین می‌شود و بنابراین GSC با ضریب توان واحد عمل نمی‌کند.

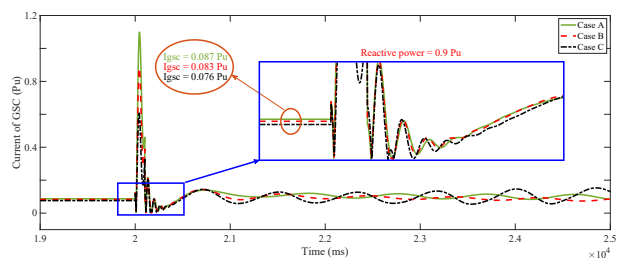
در سناریوی ۱، فرض می‌شود که تمام توان راکتیو تولید شده توسط DFIG که برابر با ۰.۹ در واحد است، توسط استاتور تامین می‌شود و جریان روتور در حالت پایدار در نظر گرفته می‌شود. در اینجا نیز شرایط خطا در سیستم قدرت مانند قسمت قبل است. شکل ۱۳ جریان روتور DFIG را برای همه موارد نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، جریان روتور حالت پایدار بین ۲۱ تا ۳۳ درصد برای هر سه مورد افزایش یافته است. علاوه بر این، هرچه ظرفیت مزرعه بادی کمتر باشد، به دلیل افزایش توان راکتیو تولیدی، جریان روتور نیز بیشتر می‌شود. بنابراین، اندازه RSC نیز باید در این حالت افزایش یابد.

از طرفی، در این حالت تمام توان راکتیو تولید شده توسط استاتور DFIG تامین و به شبکه تزریق می‌شود. بنابراین، GSC با ضریب توان واحد عمل می‌کند. در شکل ۱۴، جریان GSC برای همه موارد نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۴، جریان GSC در این حالت بسیار کم است. بنابراین، در مورد اندازه مبدل، این وضعیت تامین توان راکتیو توسط DFIG باعث افزایش ظرفیت GSC نمی‌شود.



شکل (۱۳): جریان حالت پایدار RSC در همه حالت‌ها با حداکثر

استخراج توان از مزرعه بادی (سناریو ۱)



شکل (۱۴): جریان حالت پایدار GSC در همه حالت‌ها با استخراج

حداکثری توان از مزرعه بادی (سناریو ۱)

در سناریوی B، GSC در ضریب توان واحد عمل نمی‌کند و بخشی

منظور، با تغییر نسبت جعبه‌دنده در هر سه حالت، سرعت نامی روتور از ۱.۲ در واحد به ۱ در واحد کاهش یافته و TSA انجام می‌شود. همچنین فرض شده است که، شرایط رخداد خطا در سیستم مشابه زیربخش ۴-۱ بوده و پاسخ زمانی دینامیک سیستم در شرایط عملکردی حالت پایدار ۲۰ ثانیه شبیه‌سازی شده و سپس خطا رخ می‌دهد. زمان رفع خطا در همه موارد به طور مداوم ۰.۱ ثانیه در نظر گرفته می‌شود. در اینجا، شاخص پایداری گذرا TSI برای مقایسه شرایط پایداری گذرا استفاده می‌شود. TSI در رابطه (۱۸) نشان داده شده است [۱۵]. با توجه به این رابطه، سیستم پایدار گذرا است اگر $\eta > 0$.

$$\eta = \frac{360 - \rho_{max}}{360 + \rho_{max}} \times 100 \quad (18)$$

بر این اساس، شبیه‌سازی برای حالت الف انجام شده و منحنی تغییرات زاویه روتور SG برای نرخ‌های مختلف WPP به صورت شکل ۱۸ است. در شکل ۱۸(۱)، با نرخ

هنگامی که نرخ WPP برابر با ۱۵ و ۱۶.۶۷ درصد باشد، شبکه با زمان رفع خطا ۰.۱ ثانیه پایدار است. در این حالت، با تنظیم سرعت نامی روتور روی ۱ در واحد، مقدار TSI بیشتر از سرعت نامی روتور ۱.۲ در واحد خواهد بود که منجر به بهبود حاشیه پایداری می‌شود. به علاوه، با افزایش WPP، با تغییر سرعت نامی روتور از ۱.۲ به ۱ در هر واحد، وضعیت شبکه به پایدار بر می‌گردد. بنابراین، زمانی که سرعت نامی روتور در مقدار ۱ در واحد تنظیم شود، شرایط پایداری گذرا با افزایش WPP بهتر می‌شود. این موضوع در شکل ۱۸(۳) با نرخ $WPP = 19.44\%$ و در شکل ۱۸(۴) با نرخ $WPP = 23.61\%$ قابل رویت است.

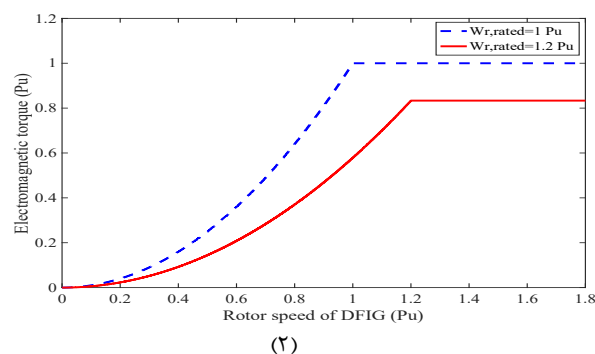
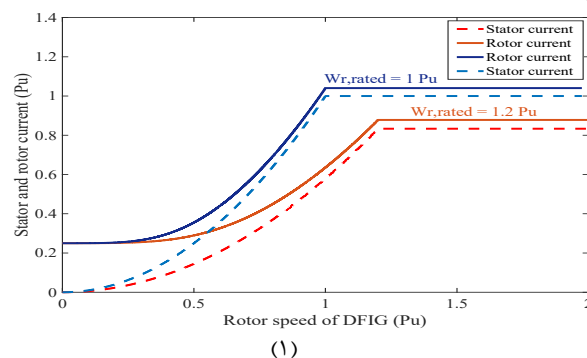
به طور مشابه، شبیه‌سازی برای حالت ب با زمان ثابت رفع خطا ۰.۱ ثانیه اجرا و منحنی تغییرات زاویه روتور SG در شکل ۱۹ ارایه داده شده است. زمانی که نرخ WPP برابر با ۳۰ و 33.33% باشد، شبکه پایدار است. با تنظیم سرعت نامی روتور در مقدار ۱ در واحد، مقادیر TSI به ترتیب 60.28% و 60.98% بیشتر از حالت با سرعت نامی روتور ۱.۲ در واحد به ترتیب 55.38% و 59.38% است. در نتیجه در این حالت، با کاهش سرعت نامی روتور حاشیه پایداری بهبود می‌یابد. علاوه بر این، با افزایش WPP، می‌توان مشاهده کرد که با تغییر سرعت روتور از ۱.۲ به ۱ در هر واحد، شرایط شبکه از ناپایدار به پایدار تبدیل می‌گردد. بنابراین، همان‌طور که نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد، زمانی که سرعت نامی روتور ۱ در واحد است، شرایط پایداری گذرا نیز با افزایش WPP بهبود می‌یابد.

در آخر، شبیه‌سازی برای حالت ج انجام شده و منحنی تغییرات زاویه روتور SG در شکل ۲۰ نشان داده شده است. مطابق شکل ۲۰، در تمامی حالات شبیه‌سازی شده، اگر WPP افزایش یابد، با تنظیم سرعت نامی روتور در مقدار ۱ در واحد، مقدار TSI افزایش یافته و بهبودی پایداری گذرای شبکه را به دنبال دارد. با تنظیم سرعت نامی روتور در مقدار ۱ در واحد، برای نرخ‌های WPP 60% ، 66.67% ، 77.78% و 94.44% مقادیر TSI به ترتیب برابر 67.81% ، 69.13% ، 71.60% و 72.69% است. بنابراین مطابق نتایج شبیه‌سازی، در همه موارد، شرایط

می‌کند، افزایش جریان در روتور منجر به افزایش رتبه مبدل می‌شود. پس، یکی از راه حل‌های ارائه شده در این مقاله برای جلوگیری از افزایش اندازه مبدل می‌تواند استفاده از دستگاه‌های جبران‌ساز توان راکتیو خارجی در شین DFIG باشد.

۴-۳- اثر تغییر سرعت نامی روتور DFIG

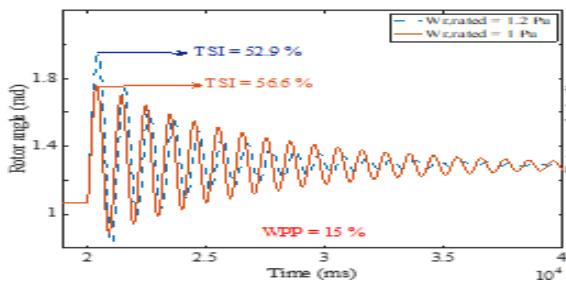
سرعت نامی روتور را می‌توان به طور دلخواه با تنظیم نسبت جعبه‌دنده انتخاب کرد و سرعت نامی روتور تأثیر قابل توجهی بر گشتاور الکتریکی و جریان ماشین دارد، اما به دلیل دامنه کم، تأثیر کمی بر ولتاژ روتور دارد [۳۰]. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، از نظر اندازه مبدل، ترجیح بر مقادیر بالاتر سرعت نامی روتور است زیرا دامنه جریان‌های ماشین را کمتر می‌کند [۱، ۳۰ و ۳۸]. بر این اساس، در تمام بخش‌های قبلی، سرعت نامی روتور DFIG برابر ۱.۲ در واحد در نظر گرفته شده است. از سوی دیگر، باید توجه داشت که انتخاب مقادیر بالاتر برای سرعت نامی روتور باعث ایجاد گشتاور الکتریکی کمتری می‌شود. این موضوعی است که در مطالعات قبلی به آن پرداخته نشده است. شکل ۱۷ تأثیر تغییر سرعت نامی روتور را با انجام شبیه‌سازی حالت پایدار برای DFIG نشان می‌دهد.



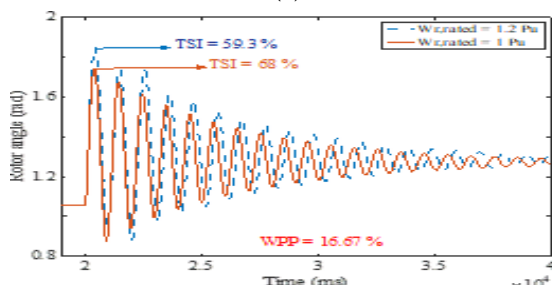
شکل (۱۷): جریان‌های استاتور و روتور و گشتاور الکترومغناطیس با مقادیر مختلف سرعت نامی روتور

همان‌طور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، با کاهش سرعت نامی روتور به ۱ در واحد، جریان حالت پایدار DFIG افزایش می‌یابد و وضعیت پایداری سیستم با توجه به اندازه مبدل بدتر می‌شود. با این حال، با توجه به تأثیر سرعت نامی روتور بر گشتاور الکترومغناطیسی، تأثیر تغییر سرعت نامی روتور DFIG بر پایداری گذرای سیستم قدرت در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد که نوآوری عمده این مقاله می‌باشد. بدین

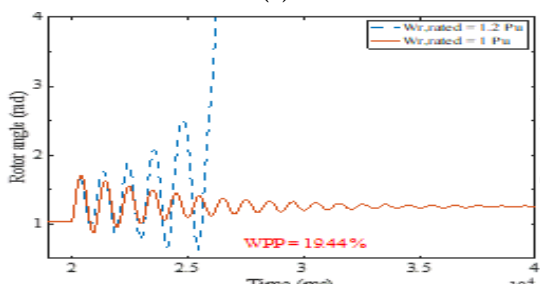
سیستم بهبود یافته است. در نتیجه، مقدار مقاومت اهمی استاتور DFIG یکی از پارامترهای مؤثر بر پایداری گذرای سیستم‌های قدرت است.



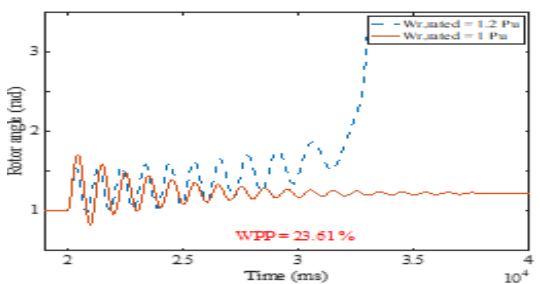
(۱)



(۲)



(۳)



(۴)

شکل (۱۸): تغییرات زاویه روتور SG نسبت به تغییرات سرعت نامی روتور DFIG در حالت الف

پایداری گذرا با کاهش سرعت نامی روتور از ۱.۲ به ۱ در واحد بهبود می‌یابد.

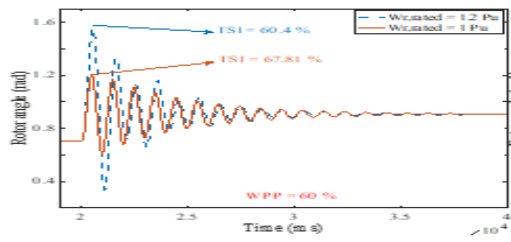
با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، زمانی که سرعت نامی روتور برابر با ۱.۲ در واحد باشد، دامنه جریان‌های روتور تا حدودی کوچک‌تر است. همچنین از نظر اندازه مبدل، وضعیت بهتر اما شرایط پایداری گذرا مطلوب نیست. با این حال، زمانی که سرعت نامی روتور برابر با ۱ در هر واحد باشد، شرایط پایداری گذرا بهبود می‌یابد، در حالی که اندازه مبدل تا حدودی افزایش می‌یابد. بنابراین مشاهده می‌گردد که نسبت جعبه‌دنده به دلیل تأثیر آن بر تغییر مقدار سرعت نامی روتور DFIG می‌تواند به عنوان پارامتری مؤثر بر پایداری گذرا در نظر گرفته شود.

۴-۴- اثر استحکام سیستم قدرت و پارامترهای DFIG

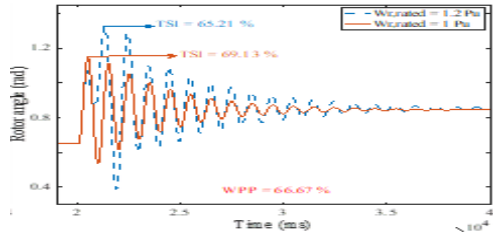
در این زیربخش، به مطالعه اثر استحکام سیستم قدرت روی پایداری گذرای سیستم می‌پردازیم. سیستم قدرت پایه شکل ۴ به دلیل فاصله الکتریکی زیاد (راکتانس خط انتقال) بین PCC و شبکه، یک شبکه الکتریکی ضعیف است. در این زیربخش، به منظور بررسی اثر استحکام سیستم قدرت، فاصله الکتریکی در چند مرحله کاهش می‌یابد. در اینجا، شرایط رخداد خطا در سیستم قدرت مانند بخش قبل است. بر این اساس، مقادیر CCT با استفاده از TSA برای هر یک از حالات الف، ب و ج به دست آمده و نتایج در شکل ۲۱ نشان داده شده است.

برای حالات الف و ب، زمانی که مقدار WPP در یک سیستم قدرت ضعیف کم است، CCT طولانی‌تر است. همچنین با افزایش مقدار WPP در این سیستم قدرت، CCT نیز افزایش می‌یابد زیرا استحکام سیستم قدرت افزایش یافته است. مطابق شکل ۲۱، در حالت ج، مقدار CCT به طور کلی با کاهش مقدار راکتانس خط انتقال و در نتیجه تقویت سیستم قدرت افزایش می‌یابد. بنابراین، شرایط پایداری گذرا بهبود می‌یابد. با این حال، در این حالت، هر چه WPP کمتر باشد، CCT بیشتر می‌گردد. در نتیجه، با افزایش استحکام سیستم قدرت، وضعیت پایداری گذرای آن به طور کلی بهبود می‌یابد.

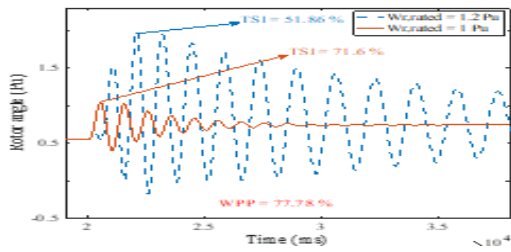
در بخش پایانی، هدف بررسی تأثیر پارامترهای DFIG بر پایداری گذرای سیستم با نفوذ WPP است. بدین منظور، اثر مقاومت اهمی استاتور DFIG بر پایداری گذرای سیستم قدرت مطالعه می‌شود. در اجرای شبیه‌سازی، تمامی پارامترهای DFIG ثابت نگه داشته شده و صرفاً مقدار مقاومت اهمی استاتور DFIG را در سه حالت مختلف به مقادیر ۰.۰۰۵، ۰.۰۱ و ۰.۰۵ اهم تنظیم می‌کنیم. سپس، TSA برای همه موارد اجرا و مقدار CCT محاسبه می‌شود. بر اساس نتایج شبیه‌سازی ارائه شده در جدول ۲، مقدار CCT با افزایش مقدار مقاومت اهمی استاتور DFIG افزایش می‌یابد. از این رو، شرایط پایداری گذرای



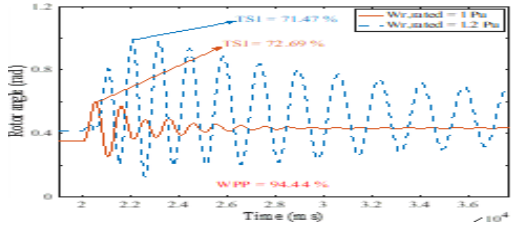
(۱)



(۲)

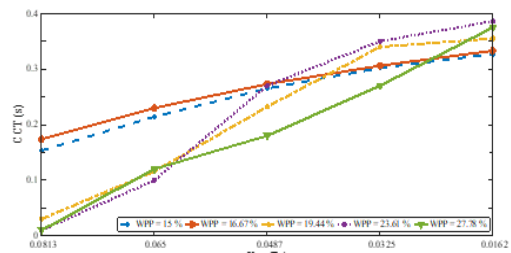


(۳)

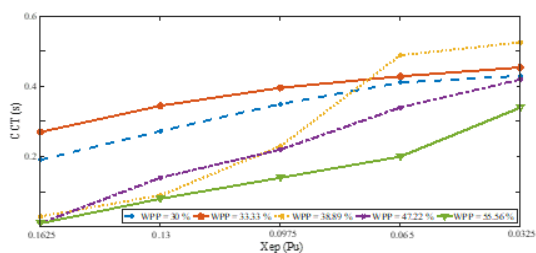


(۴)

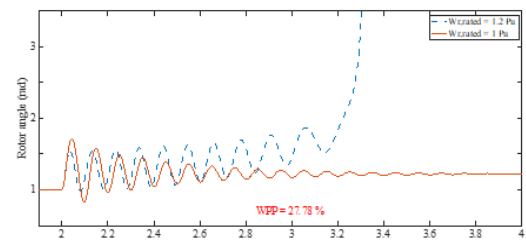
شکل (۲۰): تغییرات زاویه روتور SG نسبت به تغییرات سرعت نامی روتور DFIG در حالت ج



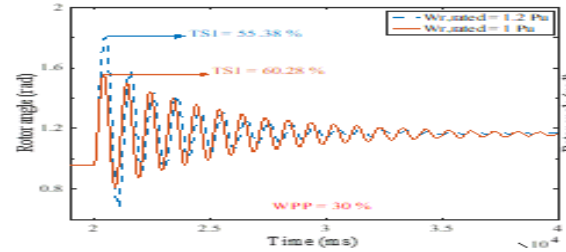
(۱)



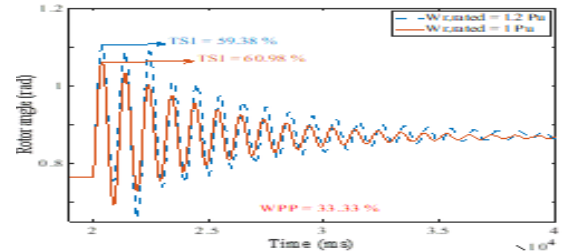
(۲)



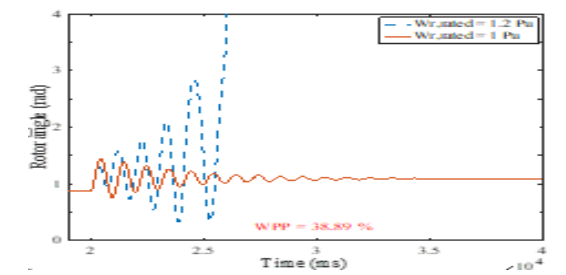
(۱)



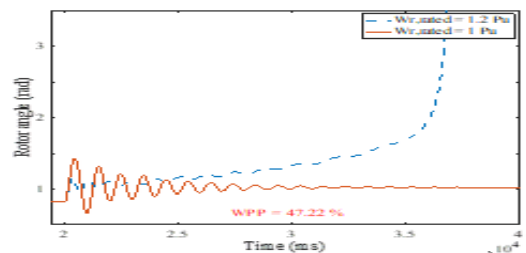
(۲)



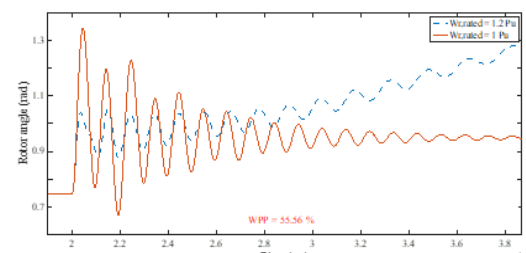
(۳)



(۴)



(۵)



(۶)

شکل (۱۹): تغییرات زاویه روتور SG نسبت به تغییرات سرعت نامی روتور DFIG در حالت ب

۵- نتیجه گیری

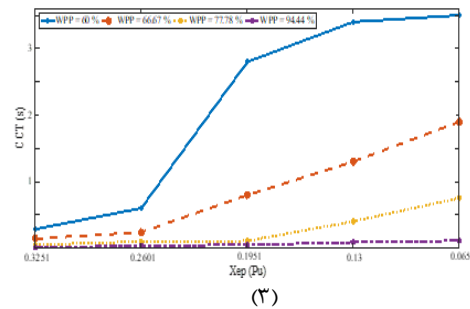
در این مقاله، اثر نفوذ WPP بر پایداری گذرای سیستم‌های قدرت به طور جامع بررسی شد. بدین منظور، TSA در یک سیستم معمول SMIB به عنوان یک سیستم قدرت انجام شد. در ابتدا نحوه اتصال DFIG به شبکه به صورت ساده بیان شد. سپس معادلات شبکه مدل DAE در فرم تعادل جریان با استفاده از مدار معادل DFIG متصل به شبکه استخراج گردید. بر این اساس، تأثیر عواملی مانند جبرانسازی توان راکتیو توسط DFIG، تغییر سرعت نامی روتور DFIG و استحکام سیستم قدرت بر پایداری گذرای سیستم همراه با افزایش WPP بررسی شد. سه مورد مطالعه برای TSA سیستم‌های قدرت با افزایش WPP بررسی شد. در این موارد، به ترتیب به منظور مطالعه دقیق‌تر تأثیر افزایش WPP مبتنی بر DFIG بر پایداری گذرا سیستم‌های قدرت، سه حالت الف) تولید بادی ۱۵ تا ۳۰ درصد، ب) تولید بادی ۳۰ تا ۶۰ درصد و ج) تولید بادی ۶۰ تا ۹۵ درصد از ظرفیت تولید کل در نظر گرفته شد. در هر سه حالت، اگر میزان تولید توان بادی به حدود ۰.۷ در واحد ظرفیت نصب شده محدود باشد، با افزایش WPP در سیستم، زمان رفع بحرانی (CCT) افزایش می‌یابد. با این حال، زمانی که نرخ تولید توان بادی از ۰.۷ در واحد تجاوز کند، روند معکوس شده و با افزایش WPP از مقدار CCT به شدت کاسته می‌شود. همچنین از آنجایی که اینرسی DFIG کمتر از SG است، زمانی که توان بادی در شبکه بیشتر می‌شود، نوسانات سیستم قدرت ناشی از اختلالات نیز بیشتر شده و ناپایداری گذرا چند نوسانی رخ می‌دهد. همچنین مطابق نتایج شبیه‌سازی، جبرانسازی توان راکتیو توسط DFIG تأثیر مطلوبی بر پایداری گذرای سیستم‌های قدرت دارد. با این حال، با افزایش تولید توان راکتیو توسط DFIG، جریان روتور آن افزایش یافته و افزایش اندازه مبدل مربوطه را به دنبال دارد. در این مقاله به منظور ممانعت از افزایش اندازه مبدل، جبرانسازی خارجی توان راکتیو در شین DFIG پیشنهاد شد. همچنین نشان داده شد که، شرایط پایداری گذرای سیستم قدرت با کاهش سرعت نامی روتور از ۱.۲ به ۱ در واحد بهبود می‌یابد. در انتها، اثر استحکام سیستم قدرت بر پایداری گذرای آن بررسی شد. نشان داده شد، با افزایش استحکام سیستم قدرت، مقدار CCT افزایش یافته و شرایط پایداری گذرا بهبود می‌یابد.

ضمایم

پیوست الف: پارامترها و مشخصات سیستم قدرت SMIB مورد مطالعه (توان پایه ۲۲۲۰ مگا ولت آمپر).

جدول الف: پارامترها و مشخصات سیستم قدرت SMIB

سیستم SMIB		مزرعه بادی با DFIG		SG و سیستم تحریک آن	
f_B	60 [Hz]	V_s	0.90081 [Pu]	L_m	4 [Pu]
X_d	1.81 [Pu]	θ_s	0 [deg]	L_{ss}	$1.01L_m$ [Pu]
X_q	1.76 [Pu]	X_{t1}	0.15 [Pu]	L_{rr}	$1.005L_{ss}$ [Pu]
X'_d	0.3 [Pu]	X_{t2}	0.04 [Pu]	r_s	0.005 [Pu]
X'_q	0.65 [Pu]	X_{e1}	0.5 [Pu]	r_r	$1.1r_s$ [Pu]



شکل (۲۱): منحنی CCT با تغییر استحکام سیستم قدرت (۱) حالت الف (۲) حالت ب (۳) حالت ج

جدول (۲): مقادیر CCT با افزایش مقاومت اهمی استاتور DFIG

حالات	حالات الف				حالات ب				حالات ج					
WPP (%)	15	16.67	19.44	23.61	27.78	30	33.33	38.89	47.22	55.56	60	66.67	77.78	94.44
r_s	0.005	0.03-0.04	0.01	0.33-0.34	0.05	0.6-0.7	0.005	0.04-0.05	0.01	0.4-0.5	0.05	0.85-0.88	0.005	0.145-0.146
	0.01	0.18-0.19	0.05	0.7-0.8	0.005	0.287-0.288	0.01	0.386-0.387	0.05	0.775-0.776	0.005	0.02-0.03	0.01	0.1-0.11
	0.05	0.36-0.37	0.005	0.025-0.035	0.01	0.09-0.1	0.05	0.29-0.3	0.005	0.043-0.044	0.01	< 0.1	0.05	0.32-0.33
CCT (s)	0.005	0.27-0.271	0.01	0.29-0.291	0.05	0.311-0.312	0.005	0.191-0.192	0.01	0.208-0.209	0.05	0.268-0.269	0.005	0.01-0.02
	0.01	< 0.1	0.05	0.24-0.25	0.005	0.02-0.03	0.01	< 0.1	0.05	0.23-0.24	0.005	0.057-0.058	0.01	< 0.1
	0.05	0.229-0.23	0.005	0.174-0.175	0.01	0.185-0.186	0.05	0.195-0.196	0.005	0.153-0.154	0.01	0.164-0.165	0.05	0.179-18

ولتاژ شین بینهایت	$V_s \angle \theta_s$
طول تیغه	R
توان و گشتاور مستخرج از توربین بادی	$T_{tw} P_{tw}$
چگالی هوا	ρ
راکتانس کل	X_{tot}
بخش‌های حقیقی و موهومی اندازه ولتاژ DFIG در	$V_{ds} + jV_{qs}$
محور dq	
ضریب عملکرد	C_p
توان‌های اکتیو و راکتیو کل	$P_t + jQ_t$
زاویه تیغه	β
بخش‌های حقیقی و موهومی اندازه ولتاژ روتور DFIG	$V_{dr} + jV_{qr}$
در محور dq	
سرعت تیغه	V_w
شار استاتور	λ_s
سرعت توربین بادی	ω_t
سرعت الکتریکی پایه	ω_{elB}
مقاومت اهمی استاتور DFIG	r_s
سرعت نامی روتور DFIG	$\omega_{r, rated}$
سرعت روتور DFIG	ω_r
ژنراتور سنکرون	SG
ژنراتور القایی دوسو تغذیه	$DFIG$
ضمنی همزمان	SI
زمان رفع بحرانی	CCT
مبدل سنت روتور	RSC

R_s	0.003 [Pu]	X_{e2}	0.93 [Pu]	H_t	4 [s]
H	3.5 [s]	P_t	0.9 [Pu]	H_g	0.1 H_t [s]
D	0	Q_t	0.436 [Pu]	K	0.3 [Pu /el.rad]
T'_{d0}	8 [s]			C	0.01 [Pu.s /el.rad]
T'_{q0}	1 [s]			β	0
K_A	2			V_w	15 [m/s]
T_A	0.015 [s]			$P_{tw, rated}$	5 [MW]
				R	40.05 [m]
				ρ	1.225 [kg /m ³]

نمادها (سبک تیترا عادی)

توان فاصله هوایی	P_{ag}
MVA پایه	S_B
بخش‌های حقیقی و موهومی اندازه جریان کل	$i_{at} + ji_{qt}$
DFIG در محور dq	
جریان مبدل سمت شبکه	I_{GSC}
بخش‌های حقیقی و موهومی اندازه جریان کل	$i_{ds} + ji_{qs}$
DFIG در محور dq	
بخش‌های حقیقی و موهومی اندازه ولتاژ داخلی	$e'_d + je'_q$
DFIG در محور dq	
اندوکتانس متقابل DFIG	L_m
نسبت سرعت نوک ($C_{p, max} = 8.10$ برابر C_p)	λ_{opt}
حداکثر مقدار C_p (β برابر ۰ درجه = ۰.۴۸)	$C_{p, max}$
مقاومت استاتور ژنراتور سنکرون	R_s
توان‌های اکتیو و راکتیو مبدل سمت شبکه	$P_{GSC} + jQ_{GSC}$
نسبت سرعت نوک	λ
توان راکتیو کل (DFIG)	$Q_{tot} (Q_{DFIG})$
مقاومت اهمی روتور DFIG	r_r
ولتاژ ترمینال DFIG	$V_{tD} \angle \theta_{tD}$
توان اکتیو روتور DFIG	P_r
نسبت جعبه‌دنده	n_{gb}
توان حقیقی نامی توربین بادی	$P_{tw, rated}$
توان راکتیو نامی استاتور DFIG	Q_s
اندوکتانس‌های استاتور و روتور DFIG	L_{ss}, L_{rr}
شار روتور DFIG روی محور dq	$\lambda_{dr}, \lambda_{qr}$
شار استاتور DFIG روی محور dq	$\lambda_{ds}, \lambda_{qs}$
نفوذ تولید توان بادی	WPP
ارزیابی پایداری گذرا	TSA
زمان -دامنه	$T-D$
معادله دیفرانسیلی-جبری	DAE
مبدل سمت شبکه	GSC
علامت TSI	η
حداکثر تفکیک زاوی	ρ_{max}
بخش‌های حقیقی و موهومی اندازه ولتاژ در محور DQ	$V_D + jV_Q$
ولتاژ ترمینال SG	$V_{tSG} \angle \theta_{tSG}$
بخش‌های حقیقی و موهومی اندازه ولتاژ در محور dq	$V_d + jV_q$

مراجع

- [1] M. A. Chowdhury, W. X. Shenb, N. Hosseinzadehc, H. R. Potad, "Transient stability of power system integrated with doubly fed induction generator wind farms", IET Renewable Power Generation, Vol. 9, No. 2, pp. 184-194, 2015.
- [2] T. A. Taj, H. M. Hasanien, A. I. Alolah, S. M. Mueyen, "Transient stability enhancement of a grid-connected wind farm using an adaptive neuro-fuzzy controlled-flywheel energy storage system", IET Renewable Power Generation, Vol. 9, No. 7, pp. 792-800, 2015.
- [3] Golzari-kolur H, Bathaee S M, Amraee T. Generation Rescheduling to Ensure Small-Signal Stability in The Presence of Renewable Energy Sources. Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers 2024; 21 (4) :23-38
- [4] Global Wind Energy Council (GWEC). [online]. Available: <https://gwec.net>
- [5] Azimi S M, Rahimi H, Mirzabeigi A. Stabilization and control of power systems using under frequency load shedding due to spinning reverse. Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers 2023; 20 (4) :163-172
- [6] J. G. Slootweg, S. W. H. de Haan, H. Polinder, W. L. Kling, "General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 1, pp. 144-151, 2003.
- [7] A. Kadri, H. Marzougui, A. Aouiti, F. Bacha, "Energy management and control strategy for a DFIG wind

- grid configuration on transient RoCoF: The case of the Croatian power system", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 121, pp. 106075, 2020.
- [23] M. A. Chowdhury, W. X. Shenb, N. Hosseinzadehc, H. R. Potad, "Quantitative assessment and comparison of fault responses for synchronous generator and wind turbine generators based on modified transient energy function", *IET Renewable Power Generation*, Vol. 8, No. 5, pp. 474-483, 2014.
- [24] Y. Lei, A. Mullane, G. Lightbody, R. Yacamini, "Modeling of the wind turbine with a doubly fed induction generator for grid integration studies", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 21, No. 1, pp. 257-264, 2006.
- [25] F. Mei, B. Pal, "Modal analysis of grid-connected Doubly Fed Induction Generators", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 22, No. 3, pp. 728-736, 2007.
- [26] Y. Zhang, J. Bank, E. Muljadi, Y. H. Wan, D. Corbus, "Angle instability detection in power systems with high-wind penetration using synchrophasor measurements", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 1, No. 4, pp. 306-314, 2013.
- [27] M. A. Chowdhury, W. X. Shenb, N. Hosseinzadehc, H. R. Potad, "Comparative study on fault responses of synchronous generators and wind turbine generators using transient stability index based on transient energy function", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 51, pp. 145-152, 2013.
- [28] M. G. Gracia, M. P. Comech, J. Sallan, A. Llombart, "Modelling wind farms for grid disturbance studies", *Renewable Energy*, Vol. 33, No. 9, pp. 2109-21, 2008.
- [29] J. B. Ekanayake, L. Holdsworth, X. G. Wu, N. Jenkins, "Dynamic modeling of doubly fed induction generator wind turbines", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 18, No. 2, pp. 803-809, 2003.
- [30] F. Mei, "Small signal modeling and analysis of doubly fed induction generators in wind power applications", Ph.D. dissertation, Imperial College London, Univ. London, London, U.K., 2007.
- [31] P. Kundur, "Power system stability and control", New York, McGraw-Hill, 1994.
- [32] P. W. Sauer, M. A. Pai, "Power system dynamics and stability", Upper Saddle River, NJ, pp. Prentice-Hall, 1998.
- [33] H. R. Shabani, M. Kalantar, A. Hajizadeh, "Real-Time Transient Instability Detection in the Power System with High DFIG-Wind Turbine Penetration via Transient Energy", *IEEE Systems Journal*, Vol. 16, No. 2, pp. 3013-3024, 2022.
- [34] A. Mitra, D. Chatterjee, "A sensitivity based approach to assess the impacts of integration of variable speed wind farms on the transient stability of power systems", *Renewable Energy*, Vol. 60, pp. 662-671, 2013.
- [35] H. R. Shabani, M. Kalantar, "Real-time transient stability detection in the power system with high penetration of DFIG-based wind farms using transient energy function", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 133, pp. 107319, 2021.
- [36] A. Mitra, D. Chatterjee, "Active Power Control of DFIG-Based Wind Farm for Improvement of Transient Stability of Power Systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 31, No. 1, pp. 82-93, 2016.
- [37] M. V. A. Nunes, J. A. P. Lopes, H. H. Zurn, U. H. Bezerra, R. G. Almeida, "Influence of the variable-speed wind generators in transient stability margin of the conventional generators integrated in electrical grids", turbine/fuel cell hybrid system with super capacitor storage system", *Energy*, Vol. 192, pp. 116518, 2020.
- [8] P. K. Gayen, D. Chatterjee, S. K. Goswami, "An improved low-voltage ride-through performance of DFIG based wind plant using stator dynamic composite fault current limiter", *ISA Transactions*, Vol. 62, pp. 333-348, 2016.
- [9] A. R. A. Jerin, P. Kaliannan, U. Subramaniam, "Improved fault ride through capability of DFIG based wind turbines using synchronous reference frame control based dynamic voltage restorer", *ISA Transactions*, Vol. 70, pp. 465-474, 2017.
- [10] E. Muljadi, C. P. Butterfield, B. Parsons, A. Ellis, "Effect of variable speed wind turbine generator on stability of a weak grid", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 22, No. 1, pp. 29-36, 2017.
- [11] L. Meegahapola, T. Littler, "Characterisation of large disturbance rotor angle and voltage stability in interconnected power networks with distributed wind generation", *IET Renewable Power Generation*, Vol. 9, No. 3, pp. 272-283, 2015.
- [12] M. A. Chowdhury, W. X. Shenb, N. Hosseinzadehc, H. R. Potad, "A review on transient stability of DFIG integrated power system", *International Journal of Sustainable Engineering*, Vol. 8, No. 6, pp. 405-416, 2015.
- [13] P. Ledesma, J. Usaola, "Doubly fed induction generator model for transient stability analysis", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 20, No. 2, pp. 388-397, 2005.
- [14] P. Ledesma, J. Usaola, "Effect of neglecting stator transients in doubly fed induction Generators models", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 19, No. 2, pp. 459-461, 2004.
- [15] M. Edrah, K. L. Lo, O. Anaya-Lara, "Impacts of high penetration of DFIG wind turbines on rotor angle stability of power systems", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 6, No. 3, pp. 759-766, 2015.
- [16] E. Munkhchuluun, L. Meegahapola, "Impact of active power recovery rate of DFIG wind farms on first swing rotor angle stability", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 14, No. 25, pp. 6041-6048, 2020.
- [17] D. Zheng, J. Ouyang, X. Xiong, M. Li, "Rotor angle stability control for DFIG- integrated power system considering phase- amplitude characteristics of transient-grid voltage", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 13, No. 16, pp. 3549-3555, 2019.
- [18] L. Xiong, P. Li, F. Wu, J. Wang, "Stability Enhancement of Power Systems with High DFIG-Wind Turbine Penetration via Virtual Inertia Planning", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 34, No. 2, pp. 1352-1361, 2019.
- [19] Z. Yue, Y. Liu, Y. Yu, J. Zhao, "Probabilistic transient stability assessment of power system considering wind power uncertainties and correlations", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 117, pp. 105649, 2020.
- [20] A. Sajadi, R. M. Kolacinski, K. Clark, K. A. Loparo, "Transient Stability Analysis for Offshore Wind Power Plant Integration Planning Studies-Part I: Short Term Faults", *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 55, No. 1, pp. 182-192, 2019.
- [21] A. Sajadi, R. M. Kolacinski, K. Clark, K. A. Loparo, "Transient Stability Analysis for Offshore Wind Power Plant Integration Planning Studies-Part II: Long Term Faults", *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 55, No. 1, pp. 193-202, 2019.
- [22] J. Đaković, M. Krpan, P. Ilak, T. Baškarad, I. Kuzle, "Impact of wind capacity share, allocation of inertia and

IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, No. 4, pp. 692-701, 2004.

[38] H. R. Shabani, M. Kalantar, A. Hajizadeh, "Investigation of the closed-loop control system on the DFIG dynamic models in transient stability studies", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 131, pp. 107084, 2021.

زیر نویس ها

¹ Wind power penetration

² Doubly fed induction generator

³ Transient stability assessment

⁴ Simultaneous implicit

⁵ Time - Domain

⁶ Single machine infinite bus

⁷ Drive-Train

⁸ Rotor side converter

⁹ Grid side converter

¹⁰ Point of common connection