

An Analysis of the Impact of Wind Power Generation on the Transient Stability of Power Systems

Shahriar Abbasi^{1*}, Hamid Reza Shabani², Mohsen Kalantar³

¹Department of Electrical and Computer Engineering, Kermanshah Branch, Technical and Vocational University (TVU), Kermanshah, Iran

shabbasi@tvu.ac.ir

²School of Electrical Engineering Iran University of Science and Technology Tehran, Iran

hamid_barq@yahoo.com

³School of Electrical Engineering Iran University of Science and Technology Tehran, Iran

kalantar@iust.ac.ir

Keywords:

power system stability
doubly fed induction generator (DFIG)
closed-loop control
renewable energy sources
power electronics converter

Abstract: Due to renewable generation increment in power systems and the complexity of control and protection of them, the evaluation of transient stability is necessary. This paper aims at analyzing the impact of wind power generation on the transient stability of power systems. To this end, doubly fed induction generator (DFIG) converters were first investigated in a closed-loop control mode. More detailed controls were used for the rotor side converter. Controls of the DC link converter on the network side were assumed to be ideal. Then, through using Gershgorin's theory, a new approach to adjust converter control parameters was presented. The simulation results in different operating modes confirmed the capability of this method in adjusting the converter's control parameters. Also, by using performed simulations, the effect of increasing wind power production penetration and the changes of reactive power compensation by DFIG on the transient stability of power system were investigated. Finally, the effect of power system strength and DFIG parameters change, in the presence of DFIG-based wind power generation, on transient stability was analyzed. The simulation results showed that an increase in wind power generation initially led to an improvement and finally to the weakening of the transient stability of the system. In fact, this paper provides a professional and valuable perspective towards the investors and operators of the power systems with wind power generation from the viewpoint of transient stability.

Original Research Article

Paper History:

Received: 20/04/2023

Revise: 24/10/2023

Accepted: 4/11/2023

How to cite this article: Abbasi, Sh., Shabani, H. R., Kalantar M., "An Analysis of the Impact of Wind Power Generation on the Transient Stability of Power Systems", Energy Engineering and Management, Vol. 13, No. 3, PP. 2-15, Autumn 2023.

<https://doi.org/10.22052/eem.2023.252833.1010>

© 2023 University of Kashan Press.

This is an open access article under the CC BY license. (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Introduction

This paper tries to analyze the impact of wind power generation on the transient stability of power systems. To this end, doubly fed induction generator (DFIG) converters were first investigated in a closed-loop control mode. More detailed

controls were used for the rotor side converter. Controls of the DC link converter on the network side were assumed to be ideal. Then, through using Gershgorin's theory, a new approach to adjust converter control parameters was presented. The simulation results in different operating modes

confirmed the capability of this method in adjusting the converter's control parameters. Also, by using performed simulations, the effect of increasing wind power production penetration and the changes of reactive power compensation by DFIG on the transient stability of power system were investigated. Finally, the effect of power system strength and DFIG parameters change, in the presence of DFIG-based wind power generation, on transient stability was analyzed. The simulation results showed that an increase in wind power generation initially led to an improvement and finally to the weakening of the transient stability of the system. In fact, this paper provides a professional and valuable perspective towards the investors and operators of the power systems with wind power generation from the viewpoint of transient stability.

Material and Methods

This article tries to cover a research gap in the transient stability of power systems. Its aim is to evaluate the transient stability (TSA) of power systems using time domain (*T-D*) simulation on a single machine infinite bus (SMIB) system with an increased penetration of wind power generation. In fact, this article provides a specialized and valuable perspective towards the operators of power systems from the perspective of the impact of wind power generation on the transient stability of power systems. The proposed method can be implemented in real and larger-scale power systems.

The SMIB system is considered as the basic power system. In order to investigate the effect of the presence of wind power generation on the transient stability, a wind power generation farm with real data was added to this basic system. The wind farm was modeled as a single equivalent machine with aggregated wind turbines.

Firstly, the method of modeling DFIG converters in a closed-loop control mode was described. Since RSC controls had a significant effect on the generator speed/torque dynamics and system stability, more detailed controls were used for RSC. While, the grid side converter (GSC) was assumed to be ideal. Then, a new approach for the adjustment of the converter control parameters, using Gershgorin theory, was presented. In this approach, the method of adjusting proportional gain (P gain) was described step by step. Based on this, under different conditions, TSA was performed and the results were analyzed. Based on the simulation results, an increase in the penetration of wind power generation initially led to an improvement and finally to the weakening of the transient stability of power systems. In fact,

this article provides a specialized and valuable perspective to the investors and operators of power systems in the presence of wind power generation from the perspective of transient stability.

Results

The aim of this paper was to evaluate the transient stability (TSA) of power systems using time domain (*T-D*) simulation. Based on the simulation results, an increase in the penetration of wind power generation initially led to an improvement and finally to the weakening of the transient stability of power systems. Also, as the power system increased, its transient stability improved while CCT increased. Since the stator resistance of SG can affect the transient stability of the power system, when the stator resistance increases, the CCT increases about few tens *ms*.

Conclusion and Discussion:

The obtained simulation results showed that:

- In the investigated system, increasing the wind power production up to 25% level led to an increase in the improvement of transient stability.
- Beyond this level, it weakened the transient stability.
- Also, when the reactive power compensation by DFIG increased from 0 to 0.85 pu, the transient stability condition of the studied system was improved and CCT increased. Also, the effect of power system strength and the change of electrical parameters of DFIG on transient stability was analyzed.
- As the system strength increased (i.e., X_{ep} decreases from 0.0813 to 0.0488 pu) the CCT value was almost doubled.
- Increasing the stator resistance from 0.0025 to 0.01 pu led to an increase in a few tens ms of a second in CCT.
- The simulation results showed that in the DFIG closed-loop control, the high frequency modes were not eliminated by ignoring the stator transients.
- Also, with an increase in the penetration of wind power production, the value of CCT increased initially. But after reaching a threshold value, an increase in the penetration of wind power generation led to a decrease in CCT.
- This issue showed a relationship between the penetration level of wind power production in the power system and the transient stable state of that system.

تحلیل اثر تولید توان بادی روی پایداری گذرای سیستم‌های قدرت

شهریار عباسی^{۱*}، حمیدرضا شعبانی^۲، محسن کلانتر^۳

^۱ استادیار، گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده فنی و حرفه‌ای استان کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

shabbasi@tvu.ac.ir

^۲ پژوهشگر پسادکتر، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

hamid_barq@yahoo.com

^۳ استاد، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

kalantar@iust.ac.ir

واژه‌های کلیدی:

پایداری سیستم قدرت
ژنراتور القایی دوسو تغذیه (DFIG)
کنترل حلقه بسته
منابع انرژی تجدیدپذیر
مبدل الکترونیک قدرت

مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱/۳۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۸/۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۸/۱۳

چکیده: به دلیل افزایش نفوذ تولید تجدیدپذیر در سیستم‌های قدرت و پیچیده شدن موضوع کنترل و حفاظت این سیستم‌ها، ارزیابی پایداری گذرای آن‌ها به چالش مهمی تبدیل شده است. هدف این مقاله، تحلیل اثر نفوذ تولید توان بادی روی پایداری گذرای سیستم‌های قدرت است. در ابتدا، مبدل‌های ژنراتور القایی دوسو تغذیه (DFIG) در مد کنترل حلقه بسته بررسی می‌شوند. برای مبدل سمت روتور کنترل‌های با جزئیات بیشتری استفاده شده و کنترل‌های مبدل لینک dc سمت شبکه ایدئال فرض می‌گردد. سپس براساس تئوری گرشگورین، یک رویکرد جدید برای تنظیم پارامترهای کنترل مبدل ارائه می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در حالت‌های مختلف عملکرد مؤید قابلیت این روش در تنظیم پارامترهای کنترل مبدل است. همچنین به کمک شبیه‌سازی‌های انجام شده، اثر افزایش نفوذ تولید توان بادی و تغییر جبران‌سازی توان راکتیو به کمک DFIG روی پایداری گذرای سیستم قدرت بررسی می‌گردد. در نهایت، اثر استحکام سیستم قدرت و تغییر پارامترهای DFIG در حضور تولید توان بادی مبتنی بر DFIG روی پایداری گذرا تحلیل شده است. براساس نتایج شبیه‌سازی، افزایش نفوذ تولید توان بادی در ابتدا منجر به بهبود و در نهایت، تضعیف پایداری گذرای سیستم‌های قدرت می‌شود. در واقع، این مقاله دیدگاه تخصصی و ارزشمندی را به سرمایه‌گذاران و بهره‌برداران سیستم‌های قدرت در حضور تولید توان بادی از منظر پایداری گذرا ارائه می‌نماید.

۱. مقدمه

امروزه، تولید توان بادی به‌عنوان یکی از منابع تولید تجدیدپذیر با رشد قابل توجهی در جهان رو به افزایش است؛ تا آنجا که تولید توان بادی سهم قابل توجهی در تولید توان الکتریکی دارد [۱-۲]؛ اما اثر منفی نفوذ بالای تولید توان بادی روی پایداری گذرای سیستم‌های قدرت به چالش مهمی در سیستم‌های قدرت مدرن امروزی تبدیل شده است [۳-۴]. همچنین به دلیل نرخ نسبتاً پایین توان مبدل‌های الکترونیک قدرت و راندمان بالای انرژی، ژنراتور القایی دوسو تغذیه (DFIG) به‌عنوان فناوری مهمی در مزارع تولید توان بادی استفاده می‌شود [۵-۷]. بنابراین لازم است اثر مزارع تولید توان بادی مبتنی بر DFIG روی تحلیل پایداری گذرای سیستم‌های قدرت به‌صورت دقیق مطالعه گردد [۸-۹].

از جمله مطالعات اولیه انجام‌شده در این راستا، بررسی اثر ورود تولید توان بادی روی میرایی نوسانات ایجادشده پس از رخداد یک اغتشاش^۲ در سیستم قدرت است. در حضور رخداد یک خطای سه‌فاز، ورود ژنراتور سنکرون (SG)^۳ به سیستم قدرت با ورود DFIG مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند در مقایسه با SG، DFIG تأثیر مطلوبی روی میرایی نوسانات دارد [۱۰]. در مرجع [۱۱]، دینامیک‌های DFIG کنترل‌شده حلقه‌بسته به‌منظور تحلیل پایداری سیگنال کوچک ارائه شده است. در مرجع [۱۲]، یک روش نوین تنظیم برای کنترل‌کننده‌های مبدل سمت روتور (RSC)^۴ پیشنهاد شده است. اثر چشم‌پوشی از گذراهای استاتور در مدل‌سازی DFIG در مرجع [۱۳] مورد مطالعه قرار گرفته است. در مرجع [۱۴]، رابطه بین پایداری زاویه‌ای روتور SGها و تولید توان بادی تشریح شده است. نتایج به‌دست‌آمده مؤید این موضوع است که اعمال رویکردهای کنترلی مناسب از قبیل کنترل ولتاژ پایانه در مزارع تولید توان بادی می‌تواند منجر به کاهش نیاز توان راکتیو SGها گردد. در مرجع [۱۵]، یک روش تحلیل حساسیت براساس اطلاعات حوزه فرکانسی به کمک الگوریتم‌های ابتکاری برای کنترل بهینه تولید توان بادی مبتنی بر DFIG ارائه شده است. در ابتدا، این روش تحلیل حساسیت برای شناسایی پارامترهای بحرانی استفاده شده و سپس برای یافتن مقادیر بهینه پارامترهای کنترلی از الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات (PSO)^۵ استفاده شده است.

به‌طور کلی، در مواردی نفوذ بالای تولید توان بادی می‌تواند منجر

به بهبود پایداری گذرای سیستم قدرت گردد [۳ و ۱۶]. اما در سایر موارد، پایداری گذرا در ابتدا افزایش، و سپس با افزایش ظرفیت مزارع تولید توان بادی مبتنی بر DFIG کاهش می‌یابد [۱۷].

با توجه به نکات مذکور، می‌توان استنتاج کرد که در پژوهش‌های انجام‌شده توافق جامعی در مورد اثر مطلوب یا نامطلوب نفوذ DFIGها روی پایداری گذرای سیستم‌های قدرت وجود ندارد و این خلأ تحقیقاتی کاملاً محسوس است؛ لذا تحقیقات بیشتری برای روشن‌سازی اثر نفوذ DFIGها روی پایداری گذرای سیستم‌های قدرت لازم است [۱۸-۱۹].

این مقاله سعی بر پوشش این خلأ تحقیقاتی دارد و هدف آن، ارزیابی پایداری گذرا (TSA)^۶ سیستم‌های قدرت به کمک شبیه‌سازی حوزه زمان (T-D)^۷ روی یک سیستم تک‌ماشین شین بی‌نهایت (SMIB)^۸ با افزایش نفوذ تولید توان بادی است. در واقع این مقاله، دیدگاه تخصصی و ارزشمندی به بهره‌برداران سیستم‌های قدرت از منظر تأثیر تولید توان بادی روی پایداری گذرا ارائه می‌دهد. روش پیشنهادی قابلیت اجرا در سیستم‌های واقعی با مقیاس بزرگ‌تر را دارد.

بدین منظور، نخست نحوه مدل‌سازی مبدل‌های DFIG در مد کنترل حلقه‌بسته تشریح می‌گردد. از آنجا که کنترل‌های RSC اثر قابل توجهی روی دینامیک‌های سرعت/گشتاور ژنراتور و پایداری سیستم دارند، کنترل‌های با جزئیات بیشتری برای RSC استفاده شده است؛ درحالی‌که مبدل سمت شبکه (GSC)^۹ ایدئال فرض شده است [۲۰]. سپس یک رویکرد جدید برای تنظیم پارامترهای کنترل مبدل با استفاده از تئوری گرشگورین ارائه شده است [۲۰، ۲۱]. در این رویکرد، نحوه تنظیم بهره تناسبی^{۱۰} (بهره P) به‌صورت گام‌به‌گام شرح داده شده است. بر این اساس، تحت شرایط مختلف، TSA انجام شده و نتایج به‌دست‌آمده تحلیل شده است. براساس نتایج شبیه‌سازی، افزایش نفوذ تولید توان بادی در ابتدا منجر به بهبود و در نهایت، تضعیف پایداری گذرای سیستم‌های قدرت می‌شود. در واقع این مقاله دیدگاه تخصصی و ارزشمندی را به سرمایه‌گذاران و بهره‌برداران سیستم‌های قدرت در حضور تولید توان بادی از منظر پایداری گذرا ارائه می‌نماید.

ادامه این مقاله بدین‌سان سازمان‌دهی شده است: در بخش ۲، سیستم SMIB مورد مطالعه ارائه شده است. بخش ۳ به مدل‌سازی

6. Transient Stability Analysis
7. Time-Domain
8. Single Machine Infinite Bus
9. Grid Side Converter
10. Proportional Gain

1. Doubly Fed Induction Machine
2. Disturbance
3. Synchronous GENERATOR
4. Rotor Side Converter
5. Particle Swarm Optimization

سیستم قدرت و DFIG و بخش ۴ به کنترل حلقه‌بسته برای DFIG اختصاص داده شده است. نتایج شبیه‌سازی و تحلیل آن‌ها در بخش ۵ و نتیجه‌گیری از این مقاله در بخش ۶ ارائه شده است.

۲. سیستم SMIB مورد مطالعه

در این مقاله، از یک سیستم SMIB جدید برای TSA استفاده شده است. بدین منظور، سیستم SMIB موجود در مرجع [۱۱] به‌عنوان سیستم قدرت پایه در نظر گرفته شده است. به‌منظور بررسی اثر حضور تولید توان بادی روی پایداری گذرا، یک مزرعه تولید توان بادی با داده‌های موجود در مراجع [۱۲ و ۲۰] به این سیستم پایه اضافه شده است. مزرعه تولید توان بادی به‌صورت یک تک‌ماشین معادل به‌همراه توربین‌های بادی تجمیع شده مدل شده است. طرح‌واره سیستم قدرت مورد مطالعه در شکل (۱) ارائه شده است.

۳. مدل‌سازی سیستم قدرت و DFIG

۳.۱. مدل دینامیکی SG

برای مطالعات پایداری گذرا، یک مدل دومحوره به‌همراه یک سیستم تحریک استاتیکی برای SG استفاده شده است [۲۲].

۳.۲. مدل دینامیکی DFIG

به‌طور کلی، یک مدل جبری برای نمایش سیستم آیرودینامیکی^۱ توربین بادی استفاده می‌شود [۵]. همچنین، مدل دوجرمی^۲ برای DFIG استفاده شده است. به‌علاوه، معادلات دینامیکی مدل مرتبه کامل^۳ (FOM) ژنراتور القایی در قاب مرجع سنکرون^۴ برحسب عبارات در واحد^۵ (pu) استفاده شده که فرض شده است محور q ۹۰ درجه جلوتر از محور d می‌باشد [۲۳]. در این مقاله، از گذراهای استاتور چشم‌پوشی شده است.

الف. مبدل سمت روتور

کنترل‌های RSC به روش‌های مختلفی نشان داده شده‌اند. در صورتی که کنترل حلقه بیرونی بسته باشد، نقطه تنظیم جریان روتور از سیگنال خطا توسط کنترل‌کننده دریافت می‌شود. کنترل‌های RSC با استفاده از یک بهره^۶ P ساده، یک کنترل‌کننده PI یا یک کنترل‌کننده PID^۶ ایجاد می‌شوند [۱۲ و ۲۰]. در این پژوهش، از کنترل‌کننده PI مرسوم استفاده شده است. کنترل‌های RSC متشکل از دو حلقه جداگانه‌اند. حلقه‌های کنترلی مرسوم RSC در مراجع [۱۲ و ۱۵] نشان

داده شده‌اند.

با توجه به شکل (۲)، ولتاژ RSC با اعمال محدودیت‌هایی روی گشتاور الکتریکی و توان رکتیو تعیین می‌گردد:

$$V_r = V_{r,ref}$$

که

$$T_e = T_{e,ref} \text{ و } Q_s = Q_{s,ref}$$

همچنین، معادلات جبری دیفرانسیلی^۷ (DAE) (ها)

کنترل‌کننده‌های RSC به‌صورت روابط (۱) تا (۶) نوشته می‌شوند:

$$\frac{d\phi_{Te}}{dt} = T_{e,err} = T_{e,ref} - T_e \quad (۱)$$

$$\frac{d\phi_{iq}}{dt} = K_{Te} T_{e,err} + \frac{K_{Te}}{T_{Te}} \phi_{Te} - I_{qr} \quad (۲)$$

$$V_{qr} = K_{iq} K_{Te} T_{e,err} + K_{iq} \frac{K_{Te}}{T_{Te}} \phi_{Te} - K_{iq} I_{qr} + \frac{K_{iq}}{T_{iq}} \phi_{iq} \quad (۳)$$

$$\frac{d\phi_{Qs}}{dt} = Q_{s,err} = Q_{s,ref} - Q_s \quad (۴)$$

$$\frac{d\phi_{id}}{dt} = K_{Qs} Q_{s,err} + \frac{K_{Qs}}{T_{Qs}} \phi_{Qs} - I_{dr} \quad (۵)$$

$$V_{dr} = K_{id} K_{Qs} Q_{s,err} + K_{id} \frac{K_{Qs}}{T_{Qs}} \phi_{Qs} - K_{id} I_{dr} + \frac{K_{id}}{T_{id}} \phi_{id} \quad (۶)$$

مطابق DAE‌های کنترل‌کننده‌ها، کنترل توان رکتیو در محورهای

d و q اجرا شده و کنترل گشتاور در نظر گرفته شده است.

ب. مبدل سمت شبکه

هدف از GSC ثابت نگه داشتن ولتاژ لینک dc و کنترل ضریب قدرت است [۲۰]. در این مقاله، GSC با یک منبع جریان مدل شده و ولتاژ dc ثابت فرض شده است. همچنین، فرض بر این است که GSC در ضریب قدرت واحد بهره‌برداری می‌شود [۵]:

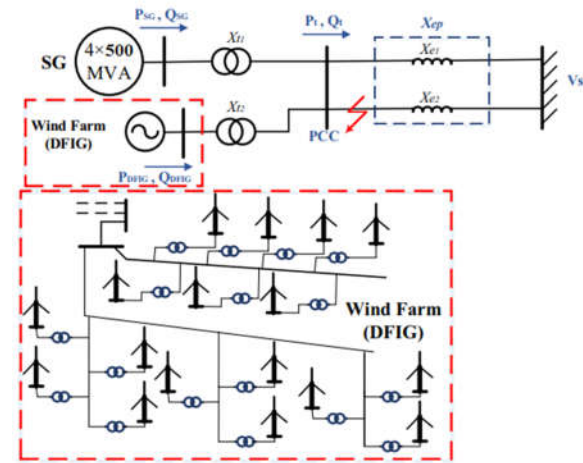
$$I_{GSC} = I_{GSC,ref}$$

که

$$P_{GSC} = P_r \text{ و } Q_{GSC} = 0$$

بر این اساس، RSC به‌صورت یک منبع ولتاژ کنترل‌شده و GSC به‌صورت یک منبع جریان کنترل‌شده مدل شده‌اند. این نحوه مدل‌سازی مبدل پشت به پشت برای لحاظ کردن جزئیات بیشتری از کنترل RSC بوده، درحالی‌که دینامیک‌های GSC ایدئال فرض شده است. از آنجاکه کنترل‌های RSC تأثیر بارزی روی دینامیک‌های سرعت/گشتاور ژنراتور دارند، کنترل‌های با جزئیات بیشتری برای RSC استفاده شده است. این در حالی است که کنترل‌های GSC ایدئال فرض شده است؛ زیرا تأثیر آن‌ها روی پایداری سیستم ناچیز

می‌گردد. جنبه دوم مرتبط با مکان‌یابی مدهای استاتور، و جنبه آخر مرتبط با مکان‌یابی مد الکتریکی روتور است.

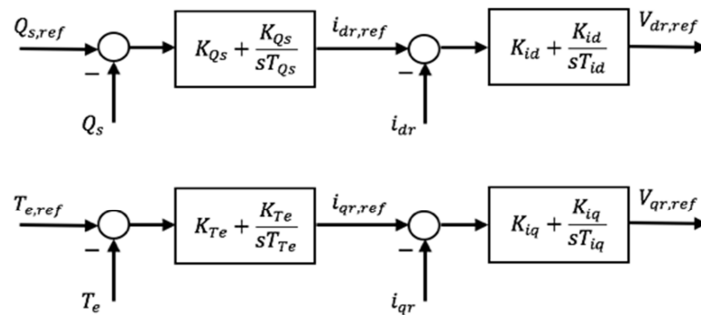


شکل (۱): طرح‌واره کلی CPF

بوده و آن‌ها غالباً دینامیک‌های لینک dc را تحت‌تأثیر قرار می‌دهند [۲۰].

۴. کنترل حلقه‌بسته برای DFIG

هدف این بخش استفاده از یک رویکرد تنظیم برای کنترل‌کننده‌های PI مرسوم کنترل‌کننده RSC است. پارامترهای K و T برای هر کنترل‌کننده PI (شکل ۲) به‌منظور پایداری و عملکرد مطلوب انتخاب شده‌اند. مطابق نمایش Root-loci، ثابت زمانی‌ها انتگرال (ضرایب I) عمدتاً روی سرعت عمل انتگرال اثر گذاشته، درحالی‌که پایداری DFIG حلقه‌بسته غالباً توسط بهره‌های P تعیین می‌گردد [۲۰ و ۱۲]. از آنجاکه موضوعات مرتبط با پایداری در اینجا بررسی شده‌اند، بحث روی بهره‌های P متمرکز می‌شود. بر این اساس، رفتار DFIG از سه جنبه تحلیل شده است: جنبه اول در ارتباط با تعیین رابطه بین خروجی‌ها و ورودی‌ها در شرایط حالت دائم است. در این جنبه، علامت بهره‌های P تعیین



شکل (۲): کنترل حلقه‌بسته RSC

در سرعت‌های بالا و زیرسنکرون^۳ تولید توان داشته باشد.

الف. اثر نقطه تنظیم کنترل‌محور d

همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده، علامت بهره‌های گذر i_{dr} به $Q_{s,ref}$ و V_{dr} به i_{dr} در تنظیم کنترل‌کننده‌های PI حائز اهمیت است. همچنین، اثر سطوح مختلف $Q_{s,ref}$ روی مؤلفه‌های متعامد و مستقیم جریان و ولتاژ روتور در شکل (۴) نمایش داده شده است. با فرض اینکه سرعت روتور برابر $0.7 pu$ باشد، اگر $Q_{s,ref}$ از $0.5 pu$ به $-0.5 pu$ کاهش یابد، i_{dr} از 0.755 به -0.255 افزایش می‌یابد. بنابراین، بهره گذر i_{dr} به $Q_{s,ref}$ منفی است. از طرفی، هنگامی که i_{dr} از 0.755 به -0.255 افزایش می‌یابد، V_{dr} از 0.036 به -0.107 کاهش می‌یابد. بنابراین، بهره گذر V_{dr} به i_{dr} نیز منفی است.

۱.۴. علامت بهره‌های P

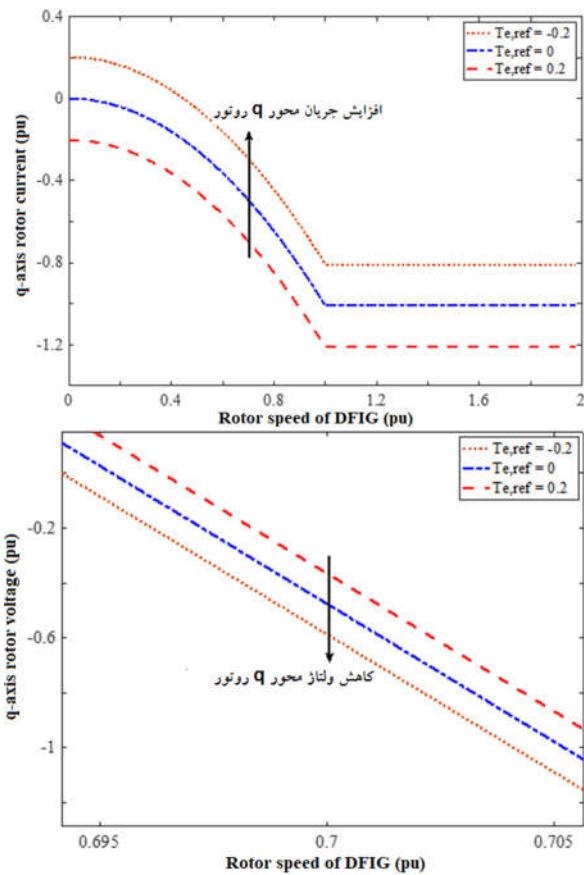
برای تعیین علامت بهره‌های P، بایستی عملکرد حالت ماندگار تحلیل گردد و روابط بین ورودی‌ها و خروجی‌های کنترل روی محورهای d و q برای کنترل‌کننده RSC تعیین گردد. با اجرای شبیه‌سازی، مشخصات حالت ماندگار DFIG به‌ازای $\omega_{r,rated} = 1/2 pu$ و $Q_s = 0$ در شکل (۳) نشان داده شده است. همچنین سرعت نامی^۱ باد $15 m/s$ فرض شده است. شکل (۳) توان ورودی P_m به‌ازای سرعت‌های مختلف باد و شارش توان اکتیو DFIG در استاتور و روتور به‌ازای سرعت‌های مختلف استاتور را نشان می‌دهد. در حالت زیر نامی^۲، DFIG می‌تواند به‌صورت بهینه در گستره وسیعی از سرعت باد و سرعت روتور عمل کند. همچنین، از آنجاکه توان اکتیو روتور DFIG می‌تواند در هر دو جهت جاری گردد، DFIG می‌تواند

1. Rated
2. Sub-Rated

ب. اثر نقطه تنظیم^۱ کنترل محور q

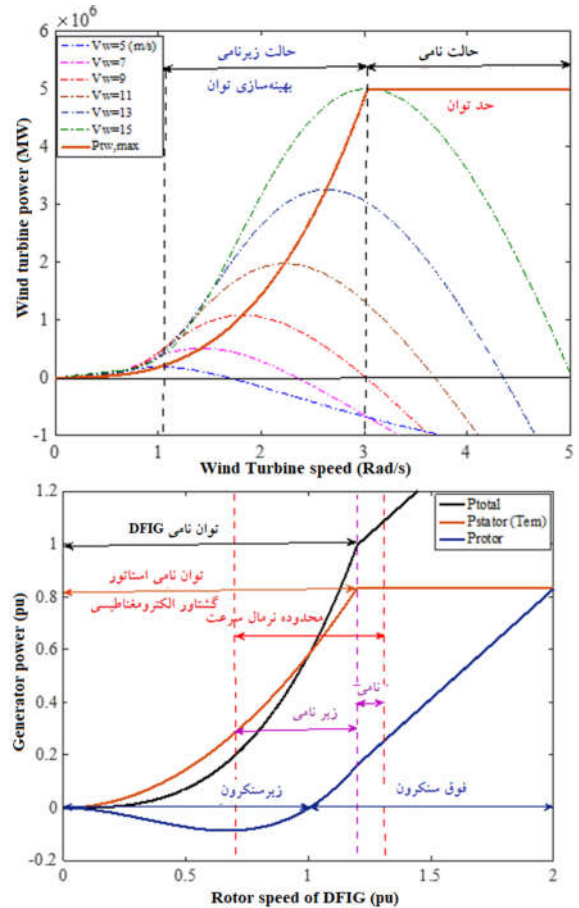
به منظور تحلیل اثر $T_{e,ref}$ در یک سرعت مشخص روتور، سطوح مختلفی از $T_{e,ref}$ بررسی شده است ($pu -0.2$, 0 , $pu 0.2$). بر این اساس، اثر $T_{e,ref}$ روی مؤلفه‌های مستقیم و متعامد جریان و ولتاژ روتور در شکل (۵) نشان داده شده است. در این زیربخش $Q_{s,ref} = 0$ همچنین در اینجا با فرض اینکه سرعت روتور برابر است، بهره‌های گذر i_{qr} به T_e و V_{qr} به i_{qr} قابل تعیین است. هنگامی که $T_{e,ref}$ از 0.2 به -0.2 کاهش می‌یابد، i_{qr} از 0.6969 به -0.292 افزایش می‌یابد. بنابراین، گین گذر i_{qr} به T_e منفی است. به طور مشابه، با افزایش i_{qr} ، V_{qr} کاهش می‌یابد. بنابراین، گین گذر و V_{qr} به i_{qr} نیز منفی است.

مطابق شکل (۵)، هنگامی که T_e کم است، مقدار i_{qr} زیاد است؛ این بدین معناست که بهره گذر i_{qr} به T_e منفی بوده و یک بهره P منفی K_{Te} باید استفاده شود. به طور مشابه، هنگامی که i_{qr} بالاست، مقدار V_{qr} پایین است. بنابراین، بهره K_{iq} نیز باید منفی باشد. به طور مشابه، بهره‌های K_{id} و K_{Qs} باید منفی باشند.

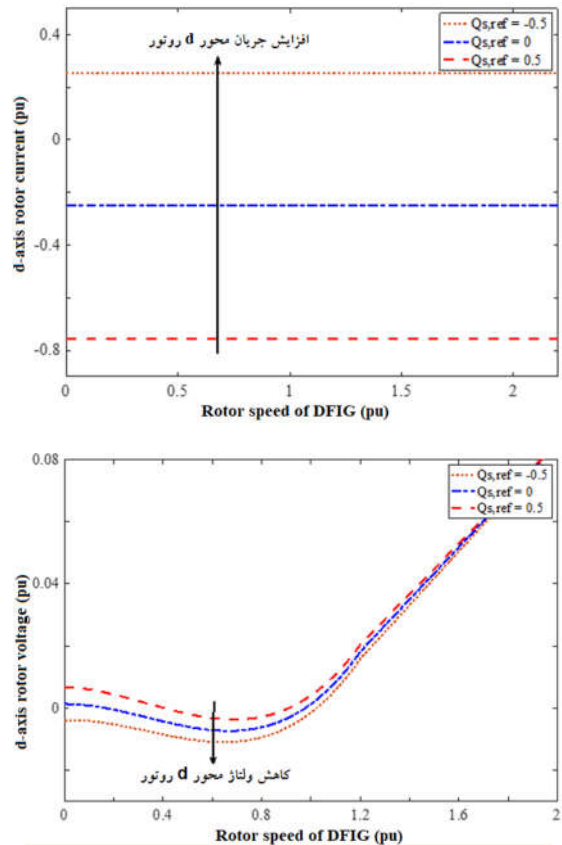


شکل (۵): جریان و ولتاژ محور q روتور DFIG با تغییر $T_{e,ref}$

1. Setting Point



شکل (۳): گشتاور الکترومغناطیسی و توان ورودی نوعی DFIG



شکل (۴): جریان و ولتاژ محور d روتور DFIG با تغییر $Q_{s,ref}$

اگر $K_{iq} < 0, e'_{qso} < 0 \rightarrow K_{Te} \geq K_{Te,th}$

که

$$K_{Te,th} = \frac{\omega_s}{e'_{qso}} \left(\frac{1}{K_{iq} K_{mrr}} \left(\frac{L'_s T_1}{\omega_{el}} - R_1 \right) + K_{mrr} \right) \quad (11)$$

همچنین، برای اینکه مد محور d استاتور در LHP حوالی T_2 $(-T_2 < a_{22})$ باشد (T_2) عنصری با قسمت حقیقی مثبت است)، مقدار آستانه بهره P برای KQs از رابطه (۸) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\text{اگر } K_{id} < 0 \rightarrow K_{Qs} \leq K_{Qs,th} \quad (12)$$

که

$$K_{Qs,th} = \frac{1}{V_{qso}} \left(\frac{1}{K_{id} K_{mrr}} \left(\frac{L'_s T_2}{\omega_{el}} - R_1 \right) + K_{mrr} \right) \quad (13)$$

۳.۴. دامنه بهره‌های P

براساس نتایج شبیه‌سازی‌ها و مقادیر ویژه^۳ به دست آمده در مدهای مختلف، هرچقدر قدر مطلق KQs و KTe بزرگ‌تر باشد، پایداری مدهای روتور نیز بیشتر می‌شود. بنابراین، در تنظیم بهره‌های P، لازم است بین مکان مدهای استاتور و روتور مسامحه ایجاد گردد. به دلیل عملکرد سریع کنترل‌های مبدل، در مرحله اول لازم است مجموعه مناسبی برای بهره‌های P تعیین گردد تا نتیجه پایداری برای FOM ارائه گردد. پس از تضمین پایداری گذراهای روتور و استاتور، ساده‌سازی مدل انجام می‌شود. از طرفی، مقادیر مرسوم زمان‌های I برای کنترل‌کننده‌های بیرونی گشتاور/ قدرت و کنترل‌کننده‌های جریان به ترتیب از مرتبه ۱۰ ms و ۱ ms هستند [۲۴]. لذا براساس نکات مذکور، مقادیر بهره‌های P و زمان‌های I در این تحقیق به صورت جدول (۱) انتخاب می‌گردد:

جدول (۱): مقادیر انتخابی برای بهره‌های P و زمان‌های I

K_{Qs}	K_{Te}	K_{id}	K_{iq}	T_{Qs}	T_{Te}	T_{id}	T_{iq}
-۲	-۲/۵	-۰/۵	-۱	۰/۰۵	۰/۰۲۵	۰/۰۰۵	۰/۰۰۲۵

۵. نتایج شبیه‌سازی و تحلیل آن‌ها

طرح سیستم قدرت مورد مطالعه برای بررسی اثر تولید توان بادی روی پایداری گذرا در شکل (۱) ارائه شده است؛ که در آن، یک مزرعه بادی مبتنی بر DFIG با ظرفیت ۵۰۰ MW به صورت یک واحد تولید بادی متمرکز به سیستم قدرت پایه متصل شده است. فرض شده است که خطای اتصال کوتاه سه‌فاز در خط با راکتانس X_{e2} رخ داده و با خروج خط رفع می‌گردد؛ در نتیجه این خطا، ولتاژ شین نقطه اتصال مشترک^۴ (PCC) ۰/۳ pu افت می‌کند.

۲.۴. مقادیر حد بهره‌های P

در این مرحله، مقادیر حد بهره‌های P با در نظر گرفتن مکان و پایداری مدهای استاتور تعیین می‌گردد. بر این اساس، می‌توان مکان مدهای استاتور را به صورت تحلیلی با استفاده از تئوری گرشگورین^۱ [۱۲، ۲۰] روی ماتریس حالت DFIG حلقه بسته متصل به شبکه ارزیابی کرد. تئوری گرشگورین بیان می‌کند که مقادیر ویژه ماتریس حالت A روی دیسک‌های واحدی در صفحه مختلط قرار دارند که عناصر قطری ماتریس A مرکز دیسک‌ها و مجموع عناصر غیرقطری A شعاع دیسک‌ها هستند. بنابراین، هنگامی که تمام عناصر قطری دارای بخش حقیقی منفی باشند، تمام دیسک‌ها دارای مراکز در نیم‌صفحه چپ^۲ (LHP) می‌باشند. فرض کنید A یک ماتریس $n \times n$ باشد. در این صورت اجتماع دیسک‌های زیر، موسوم به دیسک‌های گرشگورین، تمامی مقادیر ویژه A را در بر می‌گیرد:

$$|z - a_{ii}| \leq \sum_{j=1, j \neq i}^n |a_{ij}|; i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

همچنین، اجتماع هر k دیسک گرشگورین که $(n-k)$ تای دیگر را قطع نکنند، دقیقاً شامل k مقدار ویژه A با احتساب تکرار است [۲۰].

عناصر قطری ماتریس حالت در FOM مربوط به DFIG حلقه بسته به صورت زیر هستند [۱۲ و ۲۰]:

$$a_{11} \approx \frac{\omega_{el}}{L'_s} (-R_1 + (k_{mrr})^2 K_{iq} - K_{mrr} K_{iq} K_{Te} \left(\frac{e'_{qso}}{\omega_s} \right)) \quad (8)$$

$$a_{22} \approx \frac{\omega_{el}}{L'_s} (-R_1 + (k_{mrr})^2 K_{id} - K_{mrr} K_{id} K_{Qs} V_{qso}) \quad (9)$$

همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، مقادیر a_{11} و a_{22} وابسته به نقطه کار، پارامترهای ماشین و بهره‌های P است. در قاب گرشگورین، با تنظیم متناسب بهره‌های P، می‌توان مدهای استاتور را در نواحی مطلوب LHP حوالی a_{11} و a_{22} قرار داد. برای مثال، برای اینکه مد محور q استاتور در LHP حوالی $(-a_{11})$ $(Tl - Tl)$ عنصر با بخش حقیقی مثبت است) قرار گیرد، مقدار آستانه بهره P KTe از رابطه (۸) و به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\text{اگر } K_{iq} < 0, e'_{qso} > 0 \rightarrow K_{Te} \leq K_{Te,th} \quad (10)$$

سیستم است [۲۲]. در این مطالعه، مقادیر CCT به صورت جدول (۲) می باشد.

در مقایسه با حالت پایه، در ابتدا با افزایش نفوذ تولید توان بادی مقدار CCT نیز افزایش می یابد که این موضوع دال بر بهبود پایداری گذرای سیستم است. این حالت تا رسیدن نفوذ تولید توان بادی به سطح آستانه مشخصی (در اینجا ۲۵٪) ادامه دارد. اما فراتر از این آستانه، با افزایش نفوذ تولید توان بادی مقدار CCT کاهش می یابد. به طور خلاصه، افزایش نفوذ تولید توان بادی در ابتدا منجر به بهبود پایداری گذرای سیستم قدرت و سپس تضعیف آن را به دنبال دارد.

جدول (۲): CCT با افزایش نفوذ تولید توان بادی

سیستم SMIB	نفوذ تولید توان بادی مبتنی بر DFIG (%)	CCT (s)
حالت پایه	۰	۰/۲۰۵-۰/۲۰۶
با تولید توان بادی	۱۵	۰/۲۳۱-۰/۲۳۲
مبتنی بر DFIG	۱۸	۰/۲۵۵-۰/۲۵۵
	۲۲	۰/۲۸۸-۰/۲۸۹
	۲۵	۰/۳۳۴-۰/۳۳۵
	۲۸	۰/۳۲۹-۰/۳۳۰

۲.۵. اثر تغییر جبران سازی توان راکتیو توسط DFIG

در این زیر بخش، اثر جبران سازی توان راکتیو توسط DFIG روی پایداری گذرای سیستم مورد نظر بررسی می گردد. با توجه به بازیابی ضعیف تر ولتاژ توسط DFIG در مقایسه با SG پس از رفع خطا، جبران سازی توان راکتیو مسئله مهمی در TSA در حضور DFIG است.

به منظور تحلیل اثر جبران سازی توان راکتیو توسط DFIG روی پایداری گذرا، میزان توان راکتیو DFIG از ۰ تا ۰/۸۵ pu افزایش می یابد. شرایط وقوع خطا در سیستم قدرت مشابه آنچه در بخش قبل ذکر شد است. برای این کار، شبیه سازی T-A و TSA انجام شده و CCT محاسبه می گردد. نتایج به دست آمده در شکل (۷) ارائه شده است.

با افزایش توان راکتیو تولید شده توسط DFIG مقدار CCT نیز افزایش می یابد که به معنای بهبود پایداری گذرای سیستم است. به علاوه، مشابه بخش الف، مقدار CCT نیز در این حالت با افزایش میزان نفوذ تولید توان بادی تا آستانه مشخصی افزایش و سپس کاهش می یابد.

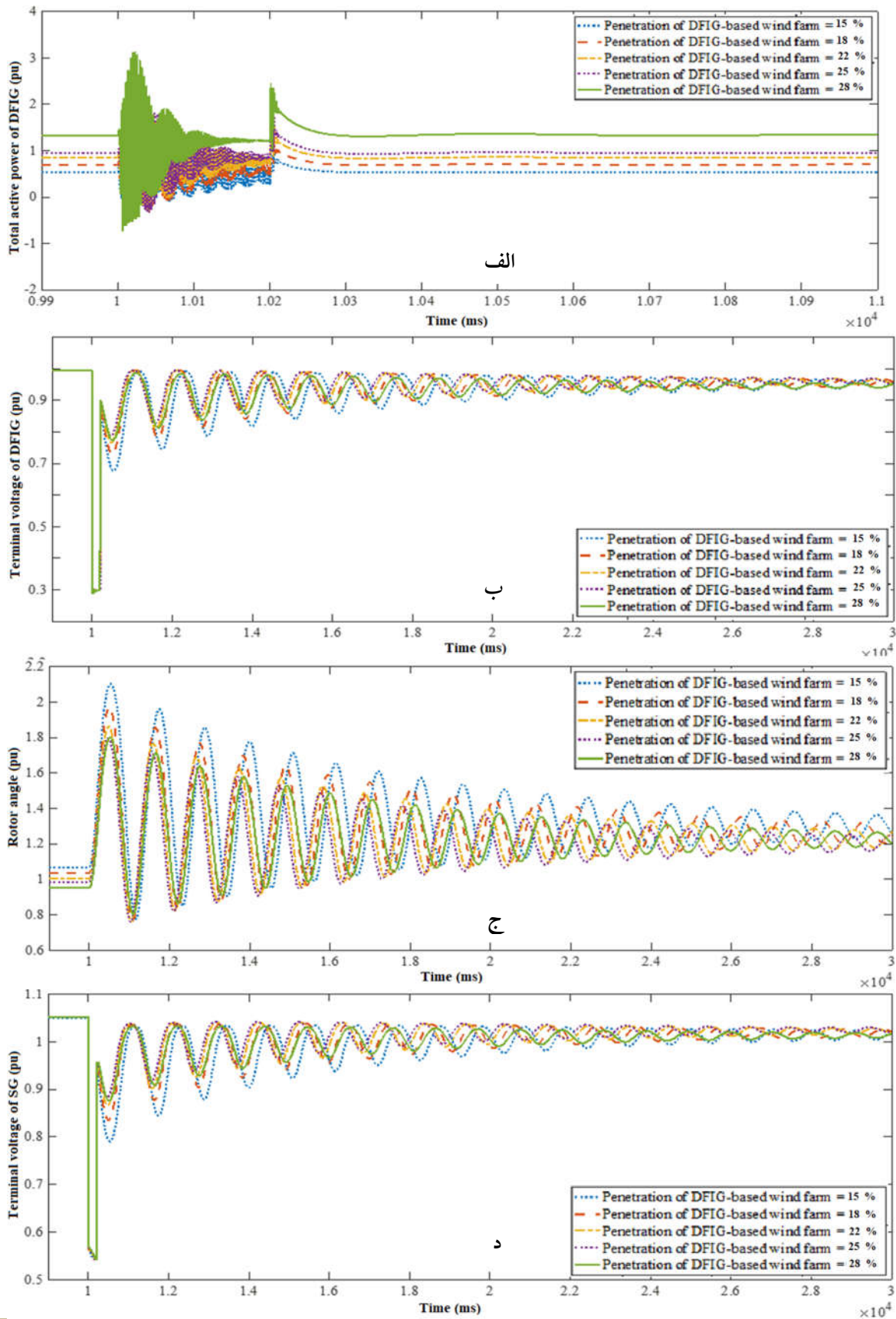
بنابراین، هدف این مقاله تحلیل پایداری زاویه ای روتور در حضور یک اغتشاش بزرگ در یک سیستم SMIB با افزایش نفوذ تولید توان بادی است. در اینجا، شبیه سازی T-D برای TSA استفاده می شود. در این روش، بایستی معادلات به صورت گام به گام در حوزه زمان حل شوند که روش هم زمانی ضمنی (SI)^۱ ابزاری مؤثر برای این کار است [۲۲]. در روش SI، با انتگرال گیری عددی دوزنقه ای در هر گام زمانی، معادلات دیفرانسیل غیرخطی به معادلات جبری غیرخطی تبدیل شده و مجموع معادلات جدید با روش نیوتن-رافسون^۲ حل می شوند.

۱.۵. اثر افزایش نفوذ تولید توان بادی

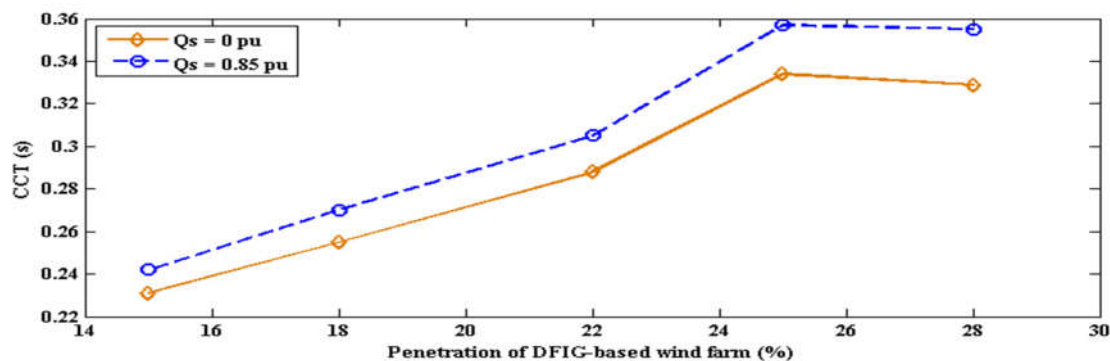
در این بخش، اثر افزایش نفوذ تولید توان بادی روی پایداری گذرای سیستم قدرت بررسی می شود. توان بادی تولید شده به گونه ای تنظیم شده است که تولید آن شامل سه سطح مختلف ۱۵، ۱۸ و ۲۲٪ برای حالت بهره برداری زیرنامی^۳ و دو سطح مختلف ۲۵ و ۲۸٪ برای حالت بهره برداری نامی باشد. در تمام حالات، زمان رفع خطا روی ۰/۲ s تنظیم شده و شبیه سازی T-D برای TSA اجرا شده است. پاسخ زمانی دینامیک های سیستم در حالت ماندگار تا ۱۰ s شبیه سازی شده و سپس خطا رخ می دهد. پس از اجرای شبیه سازی ها، منحنی های توان اکتیو کل (الف) و ولتاژ پایانه DFIG (ب)، همچنین منحنی های زاویه روتور SG (ج) و ولتاژ و روتور SG (د) در شکل (۶) نشان داده شده است. مطابق نتایج به دست آمده (شکل ۶)، واضح است که در DFIG با کنترل حلقه بسته اگر فقط از گذراهای استاتور چشم پوشی شود، مد فرکانس بالا در پاسخ دینامیکی سیستم قدرت حذف نمی گردد. بر این اساس، در مطالعه پایداری گذرا که نقطه تقاطع در نوسانات فرکانس پایین قرار دارد، باید از دینامیک های الکتریکی روتور و استاتور چشم پوشی شود.

با در نظر گرفتن شرایط مختلف از نفوذ DFIG ها در سیستم های قدرت، رفتار گذرای سیستم های قدرت در حضور تولید توان بادی مطالعه و نتایج ارائه شده است. بدین سان، اثر افزایش نفوذ تولید توان بادی روی پایداری گذرا بررسی می گردد. برای این کار، شبیه سازی T-D اجرا و برای همه حالت ها زمان بحرانی رفع خطا^۴ (CCT) محاسبه شده است؛ منظور از CCT حداکثر زمان ماندگاری خطا در صورت حفظ پایداری گذرای

1. Simultaneous Implicit
2. Newton-Raphson
3. Sub Rated
4. Critical Clearing Time



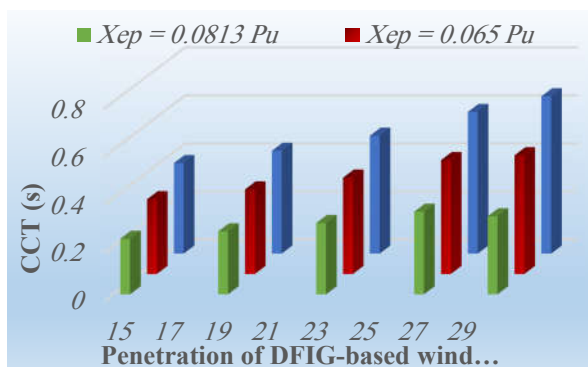
شکل (۶): پاسخ دینامیکی متغیرهای دینامیکی و جبری DFIG و SG: الف) توان حقیقی کل DFIG (ب) ولتاژ ترمینال DFIG (ج) زاویه روتور (د) ولتاژ ترمینال SG



شکل (۷): مقایسه CCTها همراه با افزایش توان راکتیو تولیدشده توسط DFIG

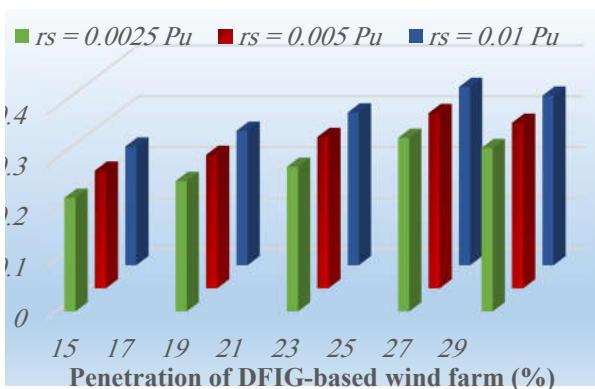
۳.۵. اثر استحکام سیستم

با توجه مشخصات سیستم قدرت شکل (۱) و مقدار زیاد راکتانس خط انتقال بین شبکه و PCC، می توان گفت که سیستم قدرت یک سیستم ضعیف است. بنابراین در این بخش، به منظور مطالعه پایداری گذرا، مقدار راکتانس سیستم قدرت برای دستیابی به سیستم مستحکم تر کاهش می یابد. به علاوه، فرض می شود که میزان نفوذ تولید توان بادی ۱۵، ۱۸، ۲۲، ۲۵ و ۲۸ درصد باشد. در این حالت نیز، شرایط رخداد خطا مشابه آن است که پیش تر ذکر شد. با این شرایط، TSA با استفاده از شبیه سازی $T-D$ اجرا و CCT محاسبه می شود. نکته قابل توجه، رابطه بین CCT و استحکام سیستم قدرت است که این رابطه به ازای سطوح مختلف نفوذ تولید توان بادی در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل (۸): مقادیر CCT با تغییر استحکام سیستم قدرت

با افزایش نفوذ تولید توان بادی در سیستم قدرت، مقدار CCT افزایش می یابد و سیستم قدرت مستحکم تر می شود. این موضوع به معنای بهبود پایداری گذرای سیستم قدرت به دلیل افزایش استحکام آن است.



شکل (۹): مقدار CCT با تغییر مقدار مقاومت استاتور DFIG

۴.۵. اثر پارامترهای ماشین

به عنوان آخرین بخش شبیه سازی، یکی از پارامترهای الکتریکی پایه در DFIG یعنی مقاومت استاتور آن انتخاب و اثر آن روی پایداری گذرای سیستم بررسی می گردد. مطابق نتایج شبیه سازی، با ثابت ماندن سایر پارامترها و تغییر مقاومت استاتور DFIG، تغییرات قابل توجهی در TSA رؤیت می گردد. به ازای سه مقدار مختلف مقاومت استاتور، TSA انجام شده است. در هر حالت، سطح نفوذ تولید توان بادی متغیر فرض شده و شرایط رخداد خطا مشابه بخش های قبلی است. با این شرایط، شبیه سازی $T-D$ انجام شده و CCT محاسبه می گردد که نتایج آن در شکل (۹) نشان داده شده است. مشاهده می گردد که افزایش مقاومت استاتور DFIG منجر به بهبود پایداری گذرای سیستم قدرت می شود.

۵.۵. مقایسه با نتایج مرجع [۲۵]

شایان ذکر است که همین گروه نویسندگان تلاش تحقیقی مشابهی در مرجع [۲۵] برای بررسی اثر تولید توان بادی روی پایداری گذرای سیستم های قدرت انجام داده اند؛ اما عمده تمرکز مرجع [۲۵] روی اثر نسب گیربکس DFIG و توان راکتیو تولیدی آن روی پایداری گذرای سیستم قدرت است. در تحقیق جاری، عمده تمرکز روی اثر تولید توان بادی مبتنی بر DFIG و اثر پارامترهای استاتور و استحکام سیستم قدرت روی پایداری گذرای سیستم

آستانه، افزایش نفوذ تولید توان بادی کاهش CCT را به دنبال دارد. این موضوع بیانگر رابطه بین سطح نفوذ تولید توان بادی در سیستم قدرت و وضعیت پایداری گذرای آن سیستم است.

قدرت است. همچنین، مقادیر پارامترهای شبیه‌سازی و خروجی‌های اخذشده در مقالات مذکور تفاوت‌های عمده‌ای با همدیگر دارند.

ضمن اینکه مقادیر پارامترهای شبیه‌سازی و خروجی‌های اخذشده در مقالات مذکور تفاوت‌های عمده‌ای با همدیگر دارند، در بخش‌های مشترک مرجع [۲۵] و مقاله جاری، یعنی اثر توان راکتیو DFIG و استحکام سیستم رو پایداری گذرای سیستم قدرت، در هر دو مقاله در کل نتایج مشابهی اخذ شده است.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، تحلیل پایداری گذرای TSA یک سیستم SMIB همراه با افزایش تولید توان بادی انجام شده است. برای این کار، TSA در شرایط مختلف سیستم انجام شد و اثر افزایش نفوذ تولید توان بادی در سیستم قدرت و اثر جبران‌سازی توان راکتیو توسط DFIG مورد مطالعه قرار گرفت. ملاحظه گردید که در سیستم مورد بررسی، افزایش نفوذ تولید توان بادی تا سطح ۲۵ درصد منجر به افزایش بهبود پایداری گذرا و فراتر از این سطح باعث تضعیف پایداری گذرا می‌شود. همچنین وقتی که جبران‌سازی توان راکتیو توسط DFIG از ۰ به ۰/۸۵ pu افزایش یافت، وضعیت پایداری گذرای سیستم مورد مطالعه بهبود گردید و CCT افزایش یافت.

همچنین اثر استحکام سیستم قدرت و تغییر پارامترهای الکتریکی DFIG روی پایداری گذرا تحلیل شد. با افزایش استحکام سیستم (کاهش Xep از ۰/۸۱۳ به ۰/۰۴۴۸ pu) تقریباً مقدار CCT دوبرابر شده است. افزایش مقاومت استاتور از ۰/۰۲۵ به ۰/۰۱ pu منجر به افزایش چندصدم ثانیه CCT شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در کنترل حلقه‌بسته DFIG، با نادیده گرفتن گذراهای استاتور مدهای فرکانس بالا حذف نمی‌شوند. همچنین با افزایش نفوذ تولید توان بادی مقدار CCT در ابتدا افزایش می‌یابد. اما پس از رسیدن به یک مقدار

فهرست علائم

متغیر حالت کنترلر بیرونی (pu)	ϕ_{Te}
جریان محور q روتور DFIG (pu)	i_{qr}
جریان محور d روتور DFIG (pu)	i_{dr}
جریان مبدل سمت شبکه (pu)	I_{GSC}
متغیر حالت کنترلر بیرونی (pu)	ϕ_{Qs}
توان راکتیو استاتور DFIG (pu)	Q_s
کل توان راکتیو DFIG (Q_{DFIG}) (pu)	Q_{tot}
توان راکتیو مبدل سمت شبکه (pu)	Q_{GSC}
توان راکتیو روتور DFIG (pu)	P_r
توان اکتیو مبدل سمت شبکه (pu)	P_{GSC}
متغیر حالت محور q کنترلر داخلی (pu)	ϕ_{iq}
متغیر حالت محور d کنترلر داخلی (pu)	ϕ_{id}
ولتاژ روتور DFIG (pu)	V_r
گشتاور الکتریکی توربین بادی (pu)	T_e
ولتاژ محور d روتور DFIG (pu)	V_{dr}
ولتاژ محور q روتور DFIG (pu)	V_{qr}
ولتاژ داخلی محور q DFIG (pu)	e'_{qs}
ولتاژ محور q استاتور DFIG (pu)	V_{qs}

مراجع

- [1] Mahvash, H., Taher, S.A., "A look-up table based approach for fault ride-through capability enhancement of a grid connected DFIG wind turbine", Sustainable Energy, Grids and Networks, Vol. 10, pp. 128-140, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2016.12.001>
- [2] Abbasi, S., Abdi, H., "Multiobjective transmission expansion planning problem based on ACOPF considering load and wind power generation uncertainties", International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 27, No. 6, p. e2312, 2017. <https://doi.org/10.1002/etep.2312>
- [3] Falehi, A.D., Rafiee, M., "LVRT/HVRT Capability enhancement of DFIG wind turbine using optimal design and control of novel PI-Dμ-AMLI based DVR", Sustainable Energy, Grids and Networks, Vol. 16, pp. 111-125, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2018.06.001>

- [4] Edrah, M., Lo, K.L., Anaya-Lara, O., "Impacts of high penetration of DFIG wind turbines on rotor angle stability of power systems", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 6, pp. 759-766, 2015. <https://doi.org/10.1109/TSSTE.2015.2412176>
- [5] Rashid, G., Hasan, A.M., "Transient stability enhancement of Doubly Fed Induction Machine-based wind generator by bridge-type fault current limiter", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 30, pp. 939-947, 2015. <https://doi.org/10.1109/TEC.2015.2400220>
- [6] Kumar, V., Pandey, A.S., Sinha, S.K., "Stability improvement of DFIG-based wind farm integrated power system using ANFIS controlled STATCOM", Energies, Vol. 13, No. 18, p. 4707, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13184707>
- [7] Safaeinejad, A., Rahimi, M., "wind energy conversion system based on dual stator winding induction generator for supplying autonomous AC load" Energy Engineering and Management Vol. 12, No. 1, pp. 56-63, 2022. <https://doi.org/10.22052/12.1.56>
- [8] Konstantinopoulos, S., Chow, J.H., "Active power control of DFIG wind turbines for transient stability enhancement", IEEE Open Access Journal of Power and Energy, Vol. 10, pp. 208-221, 2022. <https://doi.org/10.1109/OAJPE.2022.3194865>
- [9] Ebrahim, A., Rahimi, M., Faraji, A., "Control and stability improvement of combined wind-battery system with a permanent magnet synchronous generator supplying active load" Energy Engineering and Management, Vol. 13, No. 1, pp. 12-29, 2023. <https://doi.org/10.22052/jjeem.2023.113603>
- [10] Muljadi, E., Butterfield, C.P., Parsons, B., Ellis, A., "Effect of variable speed wind turbine generator on stability of a weak grid", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 22, pp. 29-36, 2007. <https://doi.org/10.1109/TEC.2006.889602>
- [11] Pal, B. C., Mei, F., "Modelling adequacy of the doubly fed induction generator for small-signal stability studies in power systems", IET Renewable Power Generation, Vol. 2, pp. 181-190, 2008. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg:20070128>
- [12] Mei, F., Pal, B.C., "Modelling of doubly-fed induction generator for power system stability study", IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century 2008. <https://doi.org/10.1109/PES.2008.4596214>
- [13] Ledesma, P., Usaola, J., "Effect of neglecting stator transients in doubly fed induction Generators models", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, pp. 459-461, 2004. <https://doi.org/10.1109/TEC.2004.827045>
- [14] Vittal, E., O'Malley, M., Keane, A., "Rotor angle stability with high penetrations of wind generation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 27, pp. 353-362, 2012. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2011.2161097>
- [15] Tang, Y., Ju, P., He, H., Qin, C., Wu, F., "Optimized control of DFIG-based wind generation using sensitivity analysis and particle swarm optimization", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 4, pp. 509-520, 2013. <https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2237795>
- [16] Chowdhury, M.A., Shenb, W.X., Hosseinzadehc, N., Potad, H.R., "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. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.02.025>
- [17] Chowdhury, M.A., Shenb, W.X., Hosseinzadehc, N., Potad, H.R., "A review on transient stability of DFIG integrated power system", International Journal of Sustainable Engineering, Vol. 8, pp. 405-416, 2015. <https://doi.org/10.1080/19397038.2015.1050480>
- [18] Xu, P., Zhao, W., Li, F., "Transient stability analysis method of grid-connected DFIG based on direct method", In 2022 4th International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEEECT) IEEE, pp. 675-679 2022. <https://doi.org/10.1109/CEEECT55960.2022.10030669>
- [19] Zheng, R., Liu, Q., Jiang, Y., Chen, S., Hu, W., "Transient stable region of power systems incorporating stochasticity of variable renewable energies and system contingencies", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 144, p. 108523, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108523>
- [20] Mei, F., "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. <https://doi.org/10.1080/19397038.2015.1050480>
- [21] Ville, L.D., "Optimizing gershgorin for symmetric matrices", Linear Algebra and its Applications, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.laa.2019.04.034>
- [22] Sauer, P.W., Pai, M.A., "Power system dynamics and stability", Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1998. <https://doi.org/10.1080/19397038.1998.1050910>
- [23] Mitra, A., Chatterjee, D., "Active power control of DFIG-based wind farm for improvement of transient stability of power systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 31, pp. 82-93, 2016. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2397974>
- [24] Sorensen, P., Hansen, A.D., Lund, T., Bindner, H., "Reduced models of doubly fed induction generator system for wind turbine simulations", Wind Energy, Vol. 9, pp. 299-311, 2005. <https://doi.org/10.1002/we.172>
- [25] Shabani, H.R., Hajizadeh, A., Kalantar, M.,

Lashgari, M., Nozarian, M., "Transient stability analysis of DFIG-based wind farm-integrated power system considering gearbox ratio and

reactive power control", *Electrical Engineering*, pp. 1-17, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00202-023-01906-3>.