

طراحی کنترل کننده میراساز دینامیکی کارآمد برای DFIG با در نظر گرفتن آنالیز مقادیر ویژه و گشتاور میراساز

امین علوی اشکفتکی^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد^۱؛ عبدالرضا ربیعی^۲، دانشیار^۲؛ عباس کارگر^۳، دانشیار^۳؛ صمد تقی پور بروجنی^۴، دانشیار^۴

۱- گروه مهندسی برق - دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه شهرکرد - شهرکرد - ایران - alavi@stu.sku.ac.ir

۲- گروه مهندسی برق - دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه شهرکرد - شهرکرد - ایران - rabiee@eng.sku.ac.ir

۳- گروه مهندسی برق - دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه شهرکرد - شهرکرد - ایران - kargar@iee.org

۴- گروه مهندسی برق - دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه شهرکرد - شهرکرد - ایران - s.taghipour@eng.sku.ac.ir

چکیده: پایداری ژنراتور سنکرون و بهبود آن، از مهم‌ترین مسائل سیستم قدرت است. پایداری می‌تواند از نوع ماندگار، دینامیکی یا گذرا باشد که در این مقاله، پایداری دینامیکی مطالعه می‌شود. در شبکه قدرت شامل تولیدات بادی مبتنی بر ژنراتور القایی از دو سو تغذیه (DFIG)، بهره‌گیری از قابلیت‌های DFIG، روش مؤثری برای بهبود پایداری دینامیکی ژنراتور سنکرون است. در این مقاله، یک کنترل کننده میراساز دینامیکی (DDC) در باند توان راکتیو DFIG ارائه شده است که با الگوریتم ژنتیک تنظیم می‌شود. به این منظور، از دو فیدبک تغییرات سرعت ژنراتور سنکرون و گشتاور الکترومغناطیسی DFIG استفاده می‌گردد. برای نشان دادن تأثیر کنترل کننده پیشنهادی، از آنالیز مقادیر ویژه و گشتاور میراساز استفاده می‌شود که این موضوع، نیازمند مطالعه سیگنال کوچک سیستم می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی تأییدکننده توانایی کنترل کننده در بهبود پایداری دینامیکی ژنراتور سنکرون است.

واژه‌های کلیدی: پایداری دینامیکی، ژنراتور سنکرون، ژنراتور القایی از دو سو تغذیه (DFIG)، کنترل کننده میراساز دینامیکی (DDC)، مقادیر ویژه، گشتاور میراکننده، مطالعه سیگنال کوچک، الگوریتم ژنتیک.

An Applicable Dynamic Damping Controller Design for DFIG Considering Eigenvalues and Damping Torque Analysis

A. Alavi Eshkaftaki¹, MS Student; A. Rabiee², Associated Professor;
A. Kargar³, Associated Professor; S. Taghipour Boroujeni⁴, Associated Professor

1- Faculty of Technical and Engineering, Shahrekord University (SKU), Shahrekord, Iran, Email: alavi@stu.sku.ac.ir

2- Faculty of Technical and Engineering, Shahrekord University (SKU), Shahrekord, Iran, Email: rabiee@eng.sku.ac.ir

3- Faculty of Technical and Engineering, Shahrekord University (SKU), Shahrekord, Iran, Email: kargar@iee.org

4- Faculty of Technical and Engineering, Shahrekord University (SKU), Shahrekord, Iran, Email: s.taghipour@eng.sku.ac.ir

Abstract: The stability of synchronous generator and its improvement is one of the important problems in power systems. Stability can be divided into steady state, dynamic and transient stability. The dynamic stability is studied in this paper. DFIG capabilities will be one of the effective ways to improve the stability of synchronous generator in the power network including wind generations based on doubly fed induction generator (DFIG). In this paper, a dynamic damping controller (DDC) is suggested in the reactive power band of DFIG tuned by genetic algorithm. For this purpose, two feedbacks, i.e., synchronous generator speed differences and DFIG electromagnetic torque are used. Eigenvalues and damping torque analysis are used for demonstrating the effectiveness of the suggested controller, requiring system small signal study. The simulation results verify that the controller has the ability to improve dynamic stability of synchronous generator.

Keywords: Dynamic stability, synchronous generator, doubly fed induction generator (DFIG), dynamic damping controller (DDC), eigenvalues, damping torque, small signal analysis, genetic algorithm.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۰۹

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۱۴

نام نویسنده مسئول: عبدالرضا ربیعی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - شهرکرد - بلوار رهبر - دانشگاه شهرکرد - دانشکده فنی مهندسی

۱- مقدمه

پایداری ژنراتور سنکرون یکی از مسائل مهم در سیستم قدرت است. یک ژنراتور سنکرون پایدار در وضعیت نرمال در حالت تعادل بوده و پس از پایان یافتن اختلال نیز، در حالت متعادل باقی خواهدماند. این پایداری بسته به نوع اختلال، می تواند از نوع دینامیکی یا گذرا باشد [۲،۱]. نفوذ تولیدات بادی در سیستم قدرت، قابل توجه است. به همین علت، عملکرد تولیدات پراکنده، در مسائل کنترلی شبکه قدرت تأثیرگذار می باشد. همچنین، نفوذ تولیدات پراکنده در مسائل بهره برداری، برنامه ریزی و توسعه سیستم های قدرت نیز در نظر گرفته می شوند [۵،۴،۳]. یکی از ژنراتورهای متداول در ساختار توربین های بادی، DFIG است [۷،۶]. این توربین ها برای تولید انرژی در شبکه قرار می گیرند. ولی در حین اختلال نیز، می توانند پایداری دینامیکی ژنراتور سنکرون را بهبود دهند. بنابراین در این مقاله، به بهبود عملکرد دینامیکی ژنراتور سنکرون، با استفاده از DFIG پرداخته می شود.

میراسازی نوسانات توان توسط ژنراتور سنکرون و پایدارسازی سیستم قدرت (PSS) و DFIG به همراه کنترل کننده میراساز آن، در یک سیستم چندماشینه مقایسه شده است [۸]. نتایج نشان می دهد که کنترل کننده پیشنهادی در DFIG، نسبت به PSS، عملکرد بهتری داشته است. همچنین، میرا کردن نوسانات بین ناحیه ای و پیشگی توسط کنترل کننده های میراساز نوسان توان در DFIG نیز بررسی شده است [۹]. یکی از این کنترل کننده ها براساس آنالیز مقادیر ویژه و دیگری بر مبنای الگوریتم های بهینه سازی طراحی شده اند. نکته قابل توجه، استفاده از یک فیدبک در ساختار کنترل کننده های مذکور است.

برای افزایش پایداری گذرای یک شبکه شامل واحد سنکرون، مزرعه بادی DFIG و نیروگاه خورشیدی، از سه روش کنترلی شامل کنترل منطق فازی، کنترل غیرخطی ایستا (SNC) و محدودکننده جریان خطای مقاوم متغیر (VR-FCL) فازی استفاده شده است [۱۰]. در مقاله مذکور، برای بهبود پایداری گذرا، استفاده از مقدار مناسب مقاومت در VR-FCL پیشنهاد شده است. همچنین، به منظور حداکثر نمودن میراسازی نوسانات بین ناحیه ای، یک کنترل کننده میراساز مبتنی بر مدل لغزشی مرتبه دو در DFIG ارائه شده است [۱۱]. این کنترل کننده، از مدولاسیون توان راکتیو DFIG و فیدبک تغییرات فرکانس بهره می گیرد. نکته قابل توجه آن است که در مقاله مذکور، یک کنترل کننده مقاوم نسبت به تغییرات پارامترها ارائه شده و در آن، مطالعات پایداری دینامیکی و آنالیز سیگنال کوچک انجام نشده است. به منظور بررسی تأثیر DFIG بر پخش توان و دینامیک سیستم، آنالیز سیگنال کوچک DFIG متصل به شبکه انجام شده است [۱۲]. ولی در آن، از یک کنترل کننده میراساز مجزا در DFIG، برای بهبود دینامیک سیستم استفاده نگردیده است. در [۱۳] نیز، مشابه [۹]، تأثیر DFIG بر دینامیک سیستم و حالت ماندگار آن مطالعه شده است که تأکید بیش تر این مقاله بر تولیدات انبوه بادی است که از طریق

خطوط بلند به شبکه متصل می شوند. هم چنین یک کنترل کننده تطبیقی نیز برای DFIG به منظور بهبود دینامیک و حالت ماندگار سیستم طراحی شده که در آن، از یک کنترل کننده میراساز مجزا استفاده شده است؛ اما، مطالعات سیگنال کوچک صرف نظر گردیده است.

برای میرا کردن نوسانات زیرسنکرون، یک کنترل کننده برای DFIG پیشنهاد شده است [۱۴]. کنترل کننده از نوع تطبیقی بوده و نسبت به تغییر پارامترها حساس نیست؛ ولی در آن، آنالیز سیگنال کوچک انجام نشده است. همچنین، تأثیر توربین بادی توان بالا مبتنی بر DFIG بر یک شبکه ضعیف مطالعه شده است [۱۵]. نتایج نشان می دهد که DFIG عملکرد میراکنندگی مناسبی در این زمینه داشته است. یک طرح مبتنی بر سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار برای کاهش نوسانات توان و ارتقای پایداری دینامیکی مزرعه بادی داخل دریا پیشنهاد شده است [۱۶]. در این مرجع، یک کنترل کننده میراساز از نوع PID^۲ با استفاده از تئوری مودال^۳ طراحی شده است. هدف اصلی این مقاله، بهبود پایداری دینامیکی خود DFIG بوده و روی بهبود پایداری سیستم و ژنراتور سنکرون تمرکز نشده است.

برای کم کردن تأثیر ماهیت تصادفی تولیدات بادی بر پایداری شبکه، یک روش کنترلی نوین برای میرا کردن نوسانات ژنراتور سنکرون و DFIG، در یک سیستم چندماشینه ارائه شده است [۱۷]. برای تنظیم کردن کنترل کننده ها، از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO) استفاده شده است. همچنین از الگوریتم (PSO)، در طراحی کنترل کننده های DFIG به منظور میرا کردن نوسانات بین ناحیه ای نیز استفاده گردیده است [۱۸]. برای عملی شدن این طرح، از سیستم اندازه گیری ناحیه گسترده (WAMS)^۴ بهره گرفته می شود. در این مقاله تنها از فیدبک اختلاف فرکانس واحدهای مختلف استفاده شده است و همچنین برای مطالعه دینامیکی سیستم، هیچ گونه آنالیز سیگنال کوچک، مقادیر ویژه و گشتاور میراساز صورت نگرفته است. در [۱۹]، یک طرح کنترل اینرسی مبتنی بر محدودیت گشتاور یک DFIG مطرح می شود که از کنترل فرکانس سیستم قدرت پشتیبانی می نماید. در صورتی که انحراف فرکانس رخ دهد، طرح پیشنهادی، از میزان بالای انرژی جنبشی چرخان در DFIG استفاده نموده تا فرکانس سیستم را بهبود دهد. همچنین، برای میرا نمودن نوسان توان، یک طرح سلسله مراتبی دوسطحی شامل کنترل کننده های محلی و ناحیه گسترده میراساز نوسان توان توسط DFIG و PSS پیشنهاد می گردد [۲۰]. کنترل کننده میراساز نصب شده در DFIG، تنها از فیدبک توان عبوری از خط انتقال بهره گرفته و شامل آنالیز گشتاور میراساز ژنراتور سنکرون نمی باشد.

امکان بهبود پایداری یک سیستم قدرت دو ناحیه ای شامل مزرعه های بادی ساحلی و در داخل دریا، توسط جبران ساز سنکرون ایستا (STATCOM)^۵ مورد ارزیابی قرار گرفته است [۲۱]. همچنین، از استراتژی کنترل پیش بین با رویکرد کنترل توان اکتیو و راکتیو

$$E_{fd}^{\square} = \frac{v_{ref} - v_t}{\tau_a} \times K_a - \frac{E_{fd}}{\tau_a} \quad (۴)$$

که در این روابط:

$$T_{e,synch} = v_d \times i_d + v_q \times i_q \quad (۵)$$

$$E_q' = \frac{x_{md}}{x_f + x_{md}} \times \psi_f \quad (۶)$$

$$E_{fd} = \frac{x_{md}}{R_{fd}} \times v_{fd} \quad (۷)$$

$$v_t = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} \quad (۸)$$

توضیح متغیرها، پارامترها و ورودی‌های ژنراتور سنکرون مربوط به روابط (۱) تا (۸) و همچنین سایر روابط موجود در ادامه مقاله، در پیوست آورده شده است. با توجه به معادلات (۱) تا (۴)، متغیرهای مستقل ژنراتور سنکرون به ترتیب δ ، ω ، Δ ، E_q' و E_{fd} بوده و ورودی‌های آن نیز به ترتیب $T_{m,synch}$ و v_{ref} هستند.

۳- مدل ریاضی DFIG

برای مدل‌سازی DFIG از مدل مرتبه پنج ژنراتور القایی استفاده می‌شود [۲۴]. لازم به ذکر است که روابط (۹) تا (۱۸) در واحد پریونیت هستند.

$$\psi_{qs}^{\square} = \omega \times (v_{qs} - \omega \times \psi_{ds} - R_s i_{qs}) \quad (۹)$$

$$\psi_{ds}^{\square} = \omega \times (v_{ds} + \omega \times \psi_{qs} - R_s i_{ds}) \quad (۱۰)$$

$$\psi_{qr}' = \omega \times (v_{qr}' - (\omega - \omega_r) \times \psi_{dr}' - R_r' i_{qr}') \quad (۱۱)$$

$$\psi_{dr}' = \omega \times (v_{dr}' + (\omega - \omega_r) \times \psi_{qr}' - R_r' i_{dr}') \quad (۱۲)$$

$$\omega_r = \frac{T_{e,DFIG} - T_{m,DFIG}}{2 \times H} \quad (۱۳)$$

که در روابط فوق:

$$i_{qs} = \frac{x_{lr} + x_m}{x_{lr}x_m + x_{lr}x_{ls} + x_{ls}x_m} \psi_{qs} - \frac{x_m}{x_{lr}x_m + x_{lr}x_{ls} + x_{ls}x_m} \psi_{qr}' \quad (۱۴)$$

$$i_{ds} = \frac{x_{lr} + x_m}{x_{lr}x_m + x_{lr}x_{ls} + x_{ls}x_m} \psi_{ds} - \frac{x_m}{x_{lr}x_m + x_{lr}x_{ls} + x_{ls}x_m} \psi_{dr}' \quad (۱۵)$$

$$i_{qr}' = \frac{x_{ls} + x_m}{x_{lr}x_m + x_{lr}x_{ls} + x_{ls}x_m} \psi_{qr}' - \frac{x_m}{x_{lr}x_m + x_{lr}x_{ls} + x_{ls}x_m} \psi_{qs} \quad (۱۶)$$

$$i_{dr}' = \frac{x_{ls} + x_m}{x_{lr}x_m + x_{lr}x_{ls} + x_{ls}x_m} \psi_{dr}' - \frac{x_m}{x_{lr}x_m + x_{lr}x_{ls} + x_{ls}x_m} \psi_{ds} \quad (۱۷)$$

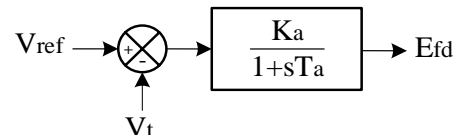
مزرعه‌های بادی، به منظور بهبود پایداری یک سیستم قدرت، استفاده شده است [۲۲]. در این راستا از سیستم ذخیره انرژی ابرخازنی (SCES) و جبران‌ساز سری سنکرون استاتیکی (SSSC) بهره گرفته شده که تنها دارای یک فیدبک هستند.

هدف این مقاله، بهبود پایداری دینامیکی ژنراتور سنکرون با استفاده از کنترل کننده میراساز دینامیکی پیشنهادی برای DFIG است. شایان ذکر است که DDC، برای دستیابی به عملکرد بهتر، از دو فیدبک (تغییرات سرعت ژنراتور سنکرون و گشتاور الکترومغناطیسی DFIG) استفاده شده که در باند توان راکتیو DFIG، قرار دارد. تاکنون در هیچ‌یک از مقالات فوق، از دو فیدبک استفاده نشده است؛ در حالی که، که با این روش پیشنهادی، پایداری دینامیکی ژنراتور سنکرون، شکل محسوسی بهبود خواهد یافت. پارامترهای کنترل کننده پیشنهادی، توسط الگوریتم ژنتیک تنظیم می‌شوند. به منظور تحلیل نتایج، از آنالیز مقادیر ویژه و گشتاور میراساز استفاده می‌شود. بدیهی است که هر چه مقادیر ویژه ژنراتور سنکرون از محور موهومی فاصله بیشتری داشته باشند، سیستم پایدارتر خواهد بود. گشتاور میراساز بیشتر در ژنراتور سنکرون، باعث بهبود بیشتر پایداری دینامیکی آن خواهد شد. برای محاسبه مقادیر ویژه و گشتاور میراساز، مدل سیگنال کوچک سیستم موردنیاز است. در واقع هدف از آنالیز سیگنال کوچک، مقادیر ویژه و گشتاور میراساز، فراهم نمودن بستری است که بتوان میزان بهبود در پایداری دینامیکی ژنراتور سنکرون را به شکل تحلیلی به نمایش درآورده و بررسی نمود.

در ادامه مقاله به ترتیب مدل ریاضی ژنراتور سنکرون، معادلات DFIG، روابط کنترل کننده‌های DFIG، کنترل کننده میراساز دینامیکی (DDC) پیشنهادی، الگوریتم ژنتیک، شبکه نمونه، شبیه‌سازی و نتیجه‌گیری ارائه می‌شوند.

۲- مدل ریاضی ژنراتور سنکرون

برای استخراج معادلات حاکم بر ژنراتور سنکرون، از مدل کاهش مرتبه آن (مرتبه سه) استفاده می‌شود که البته با در نظر گرفتن تنظیم کننده اتوماتیک ولتاژ (AVR) نشان داده شده در شکل ۱، مدل مرتبه چهار به دست می‌آید [۲۳]. لازم به ذکر است که تمامی روابط زیر در واحد پریونیت هستند.



شکل ۱: بلوک دیگرام AVR

$$\dot{\delta} = \omega \times \Delta \omega \quad (۱)$$

$$\Delta \omega = \frac{T_{m,synch} - T_{e,synch} - D \times \Delta \omega}{2 \times H} \quad (۲)$$

$$E_q' = \frac{E_{fd} - E_q' - (x_d - x_d') \times i_d}{\tau_{do}} \quad (۳)$$

اعمال می کند. الگوریتم ژنتیک اغلب به عنوان روشی برای بهینه سازی توابع شناخته می شود [۲۵].

در این مقاله نیز برای به دست آوردن پارامترهای بهینه کنترل کننده میراساز دینامیکی (DDC)، از روش مذکور استفاده می شود. تابع هدف، بیشینه نمودن گشتاور میراساز ژنراتور سنکرون است. هر چه گشتاور میراساز ژنراتور سنکرون بیش تر باشد، از نظر دینامیکی وضعیت بهتری خواهد بود. الگوریتم ژنتیک یک روش کمینه ساز است و بنابراین تابع برازندگی (در اینجا گشتاور میراساز)، با علامت منفی در نظر گرفته می شود.

برای پیاده سازی الگوریتم ژنتیک، یک جمعیت اولیه با تعداد ۵۰ کروموزوم فرض می شود. ژن های این کروموزوم یعنی ضرایب کنترل کننده پیشنهادی در شکل ۶ نشان داده شده است.

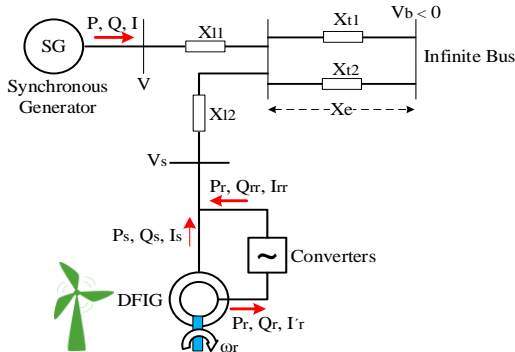
پارامترهای کنترل کننده میراساز دینامیکی			
K_1	K_2	K	τ

شکل ۶: ژن های انتخابی در الگوریتم ژنتیک

درصد کروموزوم های دو رگه حاصل از عملگر تقاطع 0.8 ، روش ایجاد آن از نوع پراکنده و همچنین درصد کروموزوم های جهش یافته 0.2 و الگوی تولید آن از نوع متحدالشکل فرض می شود. معیار توقف الگوریتم ژنتیک، خطا (اختلاف جواب های به دست آمده در تکرار فعلی با تکرار قبلی) است که برابر 10^{-6} در نظر گرفته شده است.

۷- شبکه نمونه

شبکه نمونه مورد استفاده، در شکل ۷ ارائه شده است. این شبکه شامل ژنراتور سنکرون، توربین بادی مبتنی بر DFIG، خط انتقال و شین بی نهایت است. به دلیل آن که تمامی معادلات حاکم بر ژنراتور سنکرون، DFIG و کنترل کننده های آن به شکل تحلیلی مطرح گردید، معادلات حاکم بر شبکه نیز با توجه به شکل ۷، به صورت تحلیلی مطابق روابط (۴۰) تا (۴۵) ارائه می شوند.



شکل ۷: شبکه نمونه

$$X_e = X_{t1} // X_{t2} \quad (26)$$

$$V = v_q - j \times v_d, \quad V_s = v_{qs} - j \times v_{ds} \quad (27)$$

$$I = i_q - j \times i_d, \quad I_s = i_{qs} - j \times i_{ds}, \quad (28)$$

$$I'_r = i'_{qr} - j \times i'_{dr}, \quad I_{rr} = i_{qrr} - j \times i_{drr}$$

روابط بین ولتاژ و جریان در ژنراتور سنکرون، به شکل زیر است:

به منظور مطالعه سیگنال کوچک سیستم، آنالیز مقادیر ویژه و گشتاور میراساز، معادله دیفرانسیل متناظر با این کنترل کننده، در رابطه (۲۳) ارائه شده است. همان گونه که در شکل ۴ نیز مشخص است، با لحاظ کردن این کنترل کننده، یک واحد به متغیرهای حالت سیستم اضافه می شود که این متغیر با x_I نام گذاری شده است.

$$\dot{x}_I = \frac{K \times K_2 \times (T_{e,ref,DFIG} - T_{e,DFIG})}{\tau} + \frac{K \times K_1 \times \Delta \omega}{\tau} - \frac{x_I}{\tau} \quad (23)$$

با در نظر گرفتن کنترل کننده میراساز دینامیکی پیشنهادی، معادلات دیفرانسیل مربوط به روابط (۲۰) و (۲۲) نیز بایستی اصلاح شوند که در روابط (۲۴) و (۲۵) ارائه شده اند.

$$f_2 = K_{i2} \times (x_I + Q_{ref} - Q_s) \quad (24)$$

$$v'_{dr} = f_2 + K_{p2} \times (x_I + Q_{ref} - Q_s) \quad (25)$$

در معادلات فوق، K ، K_1 ، K_2 و τ به ترتیب بهره اصلی کنترل کننده، بهره فیدبک تغییرات سرعت ژنراتور سنکرون، بهره فیدبک گشتاور الکترومغناطیسی DFIG و ثابت زمانی کنترل کننده می باشند. این چهار ضریب کنترلی، درجه آزادی بیش تری را برای میراسازی مطلوب تر نوسانات دینامیکی فراهم می کنند.



شکل ۵: بلوک دیاگرام عملکرد کنترل کننده پیشنهادی

در فیدبک تغییرات سرعت ژنراتور سنکرون، نیاز به مقدار مرجعی وجود ندارد چرا که این تغییرات سرعت در حالت ماندگار برابر صفر می باشد. فیدبک مذکور دارای بهره ثابت K_1 است. در مورد فیدبک گشتاور الکترومغناطیسی DFIG که بهره آن مقدار ثابت K_2 است، از مقادیر مرجع و لحظه ای آن استفاده می شود. لازم به ذکر است که مقدار گشتاور الکترومغناطیسی مرجع DFIG با گشتاور محرکه ماندگار آن برابر است.

ترکیب این فیدبک ها از کنترل کننده ای عبور می نماید که بهره و ثابت زمانی آن به ترتیب k و τ هستند. نهایتاً، سیگنال x_I تولیدی به همراه مقادیر مرجع و لحظه ای توان راکتیو DFIG از کنترل کننده PI عبور کرده و سیگنال v'_{dr} را تولید می نماید. با توجه به معادله (۲۳)، با در نظر گرفتن کنترل کننده میراساز دینامیکی، یک واحد به متغیرهای حالت سیستم اضافه خواهد شد (تعداد متغیرهای حالت از ۱۱ به ۱۲ افزایش می یابد).

۶- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک، یکی از الگوریتم های مبتنی بر روند تکاملی است. این الگوریتم، راه حل های بالقوه یک مسئله را در قالب کروموزوم های ساده ای کد نموده و سپس عملگرهای ترکیبی را بر روی این ساختارها

۸-۱ سناریوی اول: افزایش گشتاور مکانیکی ژنراتور سنکرون

در این سناریو فرض بر آن است که گشتاور مکانیکی ژنراتور سنکرون از ۰/۷ پریونیت به میزان ۰/۸ تا ۰/۸ پریونیت در ثانیه ۴۰ از شبیه‌سازی افزایش پیدا کند. اطلاعات این سناریو در جدول ۱ قید شده‌اند.

جدول ۱: اطلاعات گام اول

ولتاژ مرجع ژنراتور سنکرون (V_{ref})	۱/۰۶ پریونیت
گشتاور محرک DFIG ($T_{m,DFIG}$)	-۰/۳ پریونیت
گشتاور مرجع DFIG ($T_{e,ref,DFIG}$)	-۰/۳ پریونیت
توان راکتیو مرجع DFIG (Q_{ref})	۰ پریونیت

در شکل ۸، برخی از خروجی‌های شبیه‌سازی، در دو حالت استفاده از کنترل کننده میراساز دینامیکی و عدم استفاده از آن را با یکدیگر مقایسه می‌کند. با توجه به شکل ۸، در صورت حضور کنترل کننده میراساز دینامیکی، دامنه نوسانات و همین‌طور زمان نشست آن‌ها، به صورت قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند که در نتیجه، پایداری دینامیکی ژنراتور سنکرون، بهبود شایان ذکری خواهد داشت. این موضوع در متغیرهای ژنراتور سنکرون و به خصوص زاویه قدرت آن مشهود است. زمان نشست از حدود ۱۸ ثانیه به ۴ ثانیه و بالازدگی نیز از حدود ۸۰ درصد به ۲۰ درصد، کاهش پیدا کرده است.

لازم به ذکر است که پس از پایان یافتن اختلال، متغیرهای ژنراتور سنکرون و DFIG به نقطه کار جدید می‌رسند. با توجه به نمودار توان راکتیو DFIG مشخص است که فقط در مدت زمان نوسانات دینامیکی سیگنال کنترلی توسط DDC تولید می‌شود و پس از آن مقدار این سیگنال برابر صفر خواهد شد.

۸-۲ سناریوی دوم: افزایش ولتاژ مرجع AVR

در سناریوی دوم، ولتاژ مرجع AVR به اندازه ۰/۱ پریونیت در ثانیه ۳۵ از شبیه‌سازی افزایش پیدا می‌کند. برخی از اطلاعات این گام در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۲: اطلاعات گام دوم

توان خروجی ژنراتور سنکرون	۰/۷ پریونیت
گشتاور محرک DFIG ($T_{m,DFIG}$)	-۰/۳ پریونیت
گشتاور مرجع DFIG ($T_{e,ref,DFIG}$)	-۰/۳ پریونیت
توان راکتیو مرجع DFIG (Q_{ref})	۰ پریونیت

در شکل ۹ برخی از متغیرهای ژنراتور سنکرون و DFIG در دو حالت به نمایش گذاشته شده‌اند. در این قسمت نیز دقیقاً مشابه وضعیتی که در گام قبلی بررسی گردید، تأثیر DDC بر پایداری دینامیکی ژنراتور سنکرون و متغیرهای آن مانند زاویه قدرت کاملاً مشهود است. مثلاً در نمودار زاویه قدرت ژنراتور سنکرون، زمان نشست

$$i_d = \frac{E'_q - v_q}{X_d} \quad (29)$$

$$i_q = \frac{v_d}{X_q} \quad (30)$$

هم‌چنین روابط مربوط به توان اکتیو و راکتیو استاتور و روتور DFIG عبارت‌اند از [۲۴]:

$$P_s = v_{ds} \times i_{ds} + v_{qs} \times i_{qs} \quad (31)$$

$$Q_s = v_{qs} \times i_{ds} - v_{ds} \times i_{qs} \quad (32)$$

$$P_r = v'_{dr} \times i'_{dr} + v'_{qr} \times i'_{qr} \quad (33)$$

$$Q_r = v'_{qr} \times i'_{dr} - v'_{dr} \times i'_{qr} \quad (34)$$

در صورتی که از تلفات توان اکتیو در مبدل‌ها صرف‌نظر شود و توان خروجی مبدل سمت شبکه نیز در نظر گرفته نشود، آن‌گاه:

$$I_{rr} = i_{qrr} - j \times i_{drr} = \left(\frac{P_r + j \times Q_{rr}}{v_{qs} - j \times v_{ds}} \right)^* \Big|_{Q_{rr}=0} \Rightarrow \quad (35)$$

$$I_{rr} = \left(\frac{P_r}{v_{qs} + j \times v_{ds}} \right) = \frac{P_r \times v_{qs}}{v_{qs}^2 + v_{ds}^2} - j \frac{P_r \times v_{ds}}{v_{qs}^2 + v_{ds}^2}$$

معادلات حاکم بر شبکه عبارت‌اند از:

$$V = jX_{l1} \times I - jX_e \times (I - I_s - I_{rr}) + (V_b \times \cos(\delta) - j V_b \times \sin(\delta)) \quad (36)$$

$$V_s = jX_{l2} \times I + jX_{l2} \times (I_s + I_{rr}) \quad (37)$$

با توجه به معادلات (۳۶) و (۳۷):

$$v_q = V_b \times \cos(\delta) + (X_{l1} + X_e) i_d - X_e \times (i_{ds} + i_{drr}) \quad (38)$$

$$v_d = V_b \times \sin(\delta) - (X_{l1} + X_e) i_q + X_e \times (i_{qs} + i_{qrr}) \quad (39)$$

$$v_{qs} = v_q - X_{l1} \times i_d - X_{l2} \times (i_{ds} + i_{drr}) \quad (40)$$

$$v_{ds} = v_d + X_{l1} \times i_q + X_{l2} \times (i_{qs} + i_{qrr}) \quad (41)$$

۸- شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی، شبکه نمونه شکل ۷ که مشخصات کامل آن به تفصیل در پیوست ذکر شده‌است، مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای تحلیل نتایج و بررسی میزان بهبود پایداری دینامیکی، از آنالیز مقادیر ویژه و گشتاور میراساز استفاده می‌شود. برای این منظور از دستوره‌های linmod و findop در نرم‌افزار Matlab استفاده می‌شود. دستور linmod مدل را خطی‌سازی کرده و خروجی آن ماتریس‌های فضای حالت هستند و findop نیز نقطه کار سیستم را پیدا می‌نماید. شبیه‌سازی برای دو سناریو از اختلال دینامیکی زیر انجام می‌گیرد:

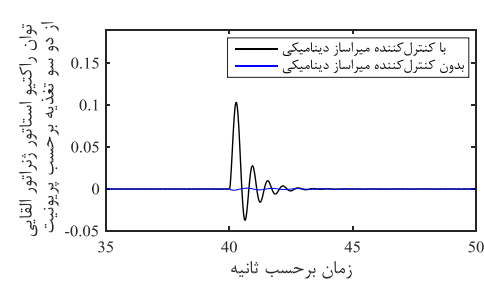
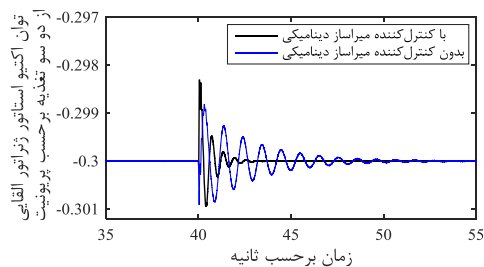
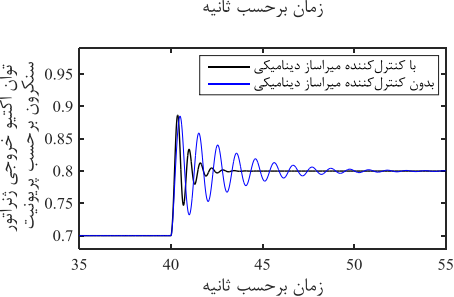
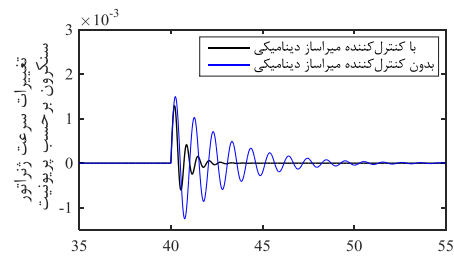
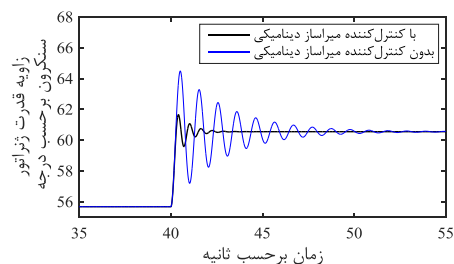
الف) افزایش گشتاور مکانیکی ژنراتور سنکرون

ب) افزایش ولتاژ مرجع AVR

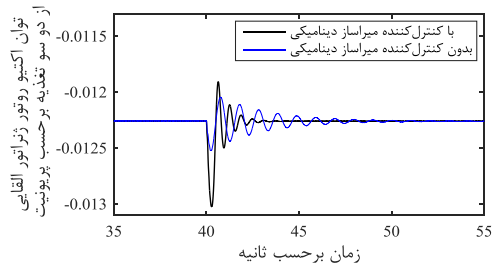
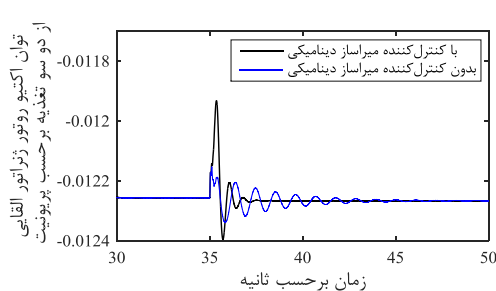
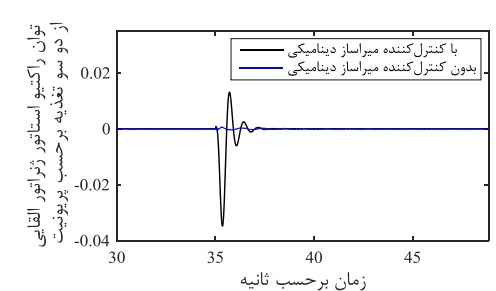
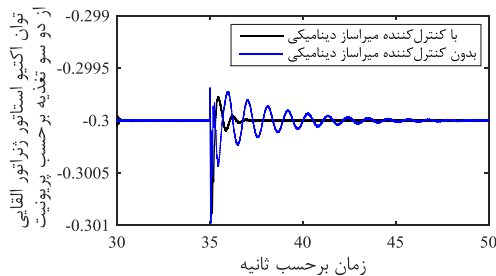
آنالیز مقادیر ویژه و گشتاور میراساز ژنراتور سنکرون برای سناریوهای اول و دوم یکسان است. ضمن این‌که مقادیر ضرایب کنترلی DDC که خروجی الگوریتم ژنتیک هستند، در پیوست آورده شده‌اند.

از حدود ۱۵ ثانیه به ۳ ثانیه و بالازدگی از حدود ۹۰ درصد به ۳۰ درصد، کاهش یافته است.

بهبود پایداری دینامیکی به طور مشابه در سایر متغیرهای ژنراتور سنکرون نیز مشهود است. در مدت زمان نوسانات دینامیکی، سیگنال تولید شده توسط DDC، مقدار توان راکتیو، ولتاژ و توان روتور DFIG را تحت تأثیر قرار می دهد. پس از میراشدن نوسانات، مقدار این سیگنال صفر می شود و توان راکتیو DFIG نیز به مقدار مرجع خود خواهد رسید.



شکل ۸: تأثیر گذاری کنترل کننده میراساز دینامیکی بر پایداری دینامیکی ژنراتور سنکرون (گام اول)



از آن جایی که نقطه کار سیستم، قبل از اختلال برای سناریوهای اول و دوم یکسان است، بنابراین ماتریس A ، مقادیر ویژه، فرکانس مورد مطالعه و گشتاور میراساز، برای هر دو سناریو یکسان است. در جدول ۳، مقایسه مقادیر ویژه ژنراتور سنکرون در صورت استفاده از کنترل کننده میراساز و عدم استفاده از آن ارائه شده است که در انتهای جدول نیز فرکانس مورد مطالعه و گشتاور میراساز، که از رابطه (۴۳) به دست می آید، آورده شده اند [۲].

$$T_d = \text{Real} \left(\frac{\Delta T_{e, \text{synch}}}{\Delta \omega} \right) = \frac{\omega'}{\omega \omega} \text{Imag} \left(\frac{\Delta T_{e, \text{synch}}}{\Delta \delta} \right) \quad (43)$$

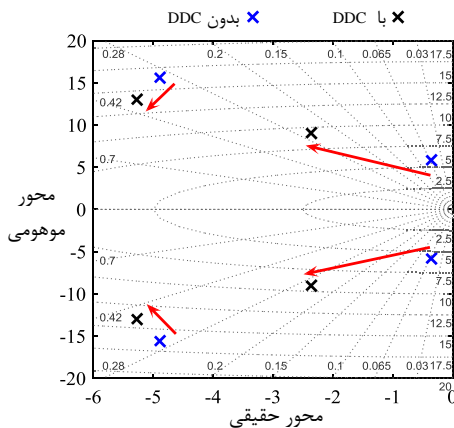
که در رابطه فوق، T_d و ω' به ترتیب گشتاور میراساز و فرکانس مورد مطالعه می باشند. فرکانس مورد مطالعه، فرکانس مقادیر ویژه مکانیکی ژنراتور سنکرون است.

جدول ۳: مقایسه مقادیر ویژه و گشتاور میراساز در صورت حضور یا عدم حضور

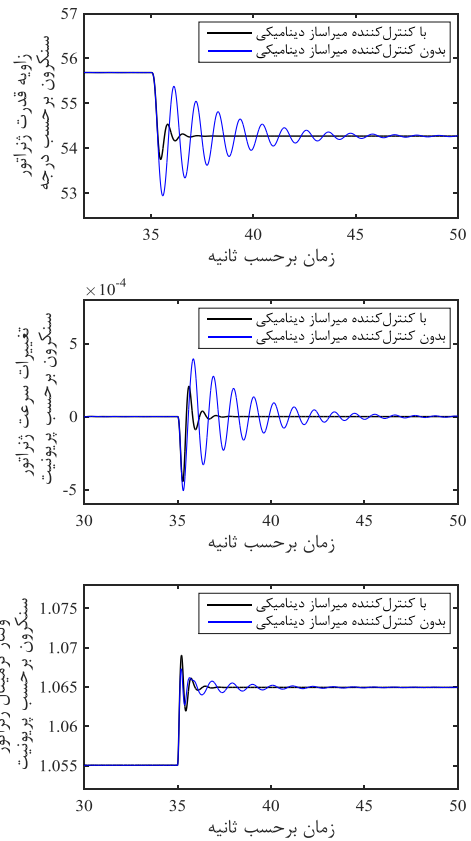
DDC		
بدون DDC	با DDC	
$-0.3519 \pm 5.7991j$	$-2.36 \pm 9.0927j$	مقادیر ویژه مکانیکی ژنراتور سنکرون
$-5.2760 \pm 15.608j$	$-5.2760 \pm 12.9927j$	مقادیر ویژه الکتریکی ژنراتور سنکرون
5.7991	9.0927	فرکانس مقادیر ویژه مکانیکی ژنراتور سنکرون
7.5898	26.4331	گشتاور میراساز

با توجه به نتایج به دست آمده برای مقادیر ویژه، مشاهده می گردد که قطب های سیستم، مخصوصاً قطب های مکانیکی ژنراتور سنکرون، با تأثیر گذاری DDC، از محور موهومی دور شده که این موضوع در شکل ۱۰ نیز نشان داده شده است.

نکته دیگر بهبود گشتاور میراساز است. هر چه این گشتاور بیش تر باشد، پایداری دینامیکی ژنراتور سنکرون نیز بیش تر خواهد شد. در نمودار شکل ۱۱، میزان بهبود در آنالیز مقادیر حقیقی قطب های ژنراتور سنکرون، گشتاور میراساز، زمان نشست و بلازدگی نمودار زاویه قدرت ژنراتور سنکرون را در سناریوهای اول و دوم نشان می دهد.



شکل ۱۰: بهبود موقعیت قطب های ژنراتور سنکرون (فلش قرمز رنگ بیان گر این واقعیت است)



شکل ۹: تأثیر گذاری کنترل کننده میراساز دینامیکی بر پایداری دینامیکی ژنراتور سنکرون (گام دوم)

۸ گام سوم: آنالیز مقادیر ویژه و گشتاور میراساز

برای نشان دادن میزان بهبود در پایداری دینامیکی ژنراتور سنکرون، علاوه بر مقایسه زمان نشست و بلازدگی، از آنالیز مقادیر ویژه و گشتاور میراکننده استفاده می شود. برای این منظور مقادیر ویژه ماتریس A در توصیف فضای حالت مطابق رابطه (۴۲) بررسی می شود. برای یافتن ماتریس A ، همان گونه که مطرح گردید از دستور linmod استفاده شده و خطی سازی حول نقطه کار که از دستور findop به دست می آید، انجام می گیرد. متغیرهای حالت سیستم (۱۲ متغیر حالت) و نقاط کار عبارتند از:

$$\dot{X} = AX + BU \quad (42)$$

$$X = \begin{bmatrix} E'q \\ \delta \\ \psi_{ds} \\ \psi_{dr} \\ \psi_{qs} \\ \psi_{qr} \\ f1 \\ x1 \\ f2 \\ E'fd \\ \omega_r \\ \Delta\omega \end{bmatrix}_{12 \times 1}, \quad X_0 = \begin{bmatrix} E'q_0 \\ \delta_0 \\ \psi_{dso} \\ \psi_{dro} \\ \psi_{qso} \\ \psi_{qro} \\ f1_0 \\ x1_0 \\ f2_0 \\ E'fd_0 \\ \omega_{ro} \\ \Delta\omega_0 \end{bmatrix}_{12 \times 1} = \begin{bmatrix} 0.903 \\ 0.972 \\ 0.816 \\ 0.868 \\ -0.652 \\ -0.619 \\ 0.41 \\ 0.237 \\ 1.98 \\ 1.05 \\ 0 \end{bmatrix}_{12 \times 1}$$

E'_q	ولتاژ القا شده ناشی از ψ_f	x_d	راکتانس محور d
E'_{fd}	ولتاژ ناشی از v_{fd}	\dot{x}_d	راکتانس گذرای محور d
$T_{e,synch}$	گشتاور الکترومغناطیسی	τ_{do}	ثابت زمانی گذرای محور d
v_t	ولتاژ ترمینال	x_{md}	راکتانس مغناطیس کنندگی d
v_d	ولتاژ ترمینال محور d	x_f	راکتانس سیم پیچ تحریک
i_d	جریان خروجی محور d	R_{fd}	مقاومت سیم پیچ تحریک
v_q	ولتاژ ترمینال محور q	$T_{m,synch}$	گشتاور محرک
i_q	جریان خروجی محور q	v_{ref}	ولتاژ ترمینال مرجع
ψ_f	شار مدار تحریک	K_a	بهره AVR
v_{fd}	ولتاژ سیم پیچ تحریک	τ_a	ثابت زمانی AVR
ω_o	سرعت سنکرون		

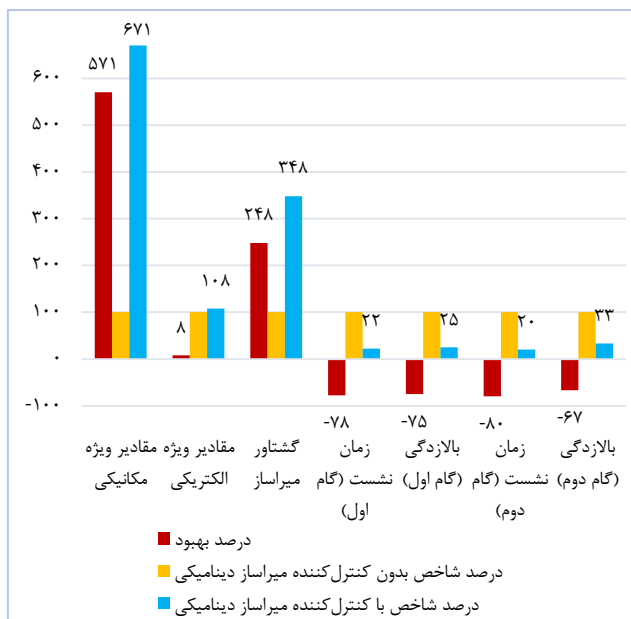
DFIG			
ψ_{qs}	شار محور q استاتور	v'_{qr}	ولتاژ محور q روتور
ψ_{ds}	شار محور d استاتور	v'_{dr}	ولتاژ محور d روتور
ψ'_{qr}	شار محور q روتور	ω_o	سرعت سنکرون
ψ'_{dr}	شار محور d روتور	H	ثابت اینرسی
ω_r	سرعت روتور DFIG	Ω	سرعت قاب مرجع
i_{qs}	جریان محور q استاتور	R_s	مقاومت سیم پیچ استاتور
i_{ds}	جریان محور d استاتور	R'_r	مقاومت سیم پیچ روتور
i'_{qr}	جریان محور q روتور	x_{ls}	راکتانس سیم پیچ استاتور
i'_{dr}	جریان محور d روتور	x_{lr}	راکتانس سیم پیچ روتور
$T_{e,DFIG}$	گشتاور الکترومغناطیسی	x_m	راکتانس مغناطیس کنندگی
v_{qs}	ولتاژ محور q استاتور	$T_{m,DFIG}$	گشتاور محرک
v_{ds}	ولتاژ محور d استاتور		

مقادیر پارامترهای ژنراتور سنکرون، DFIG، کنترل کننده های آن، DDC و شبکه به شرح زیر می باشند. توجه به این نکته نیز الزامی است که تمامی مقادیر در سیستم واحد مطرح شده اند.

DFIG		ژنراتور سنکرون	
100π	ω_o	100π	ω_o
۴	H	۰	D
100π	ω	۵	H
۰/۰۱	R_s	۱/۸	x_d
۰/۰۲	R'_r	۰/۱	\dot{x}_d
۰/۰۱	x_{ls}	۱۰	τ_{do}
۰/۰۱	x_{lr}	۴۰۰	K_a
۵	x_m	۰/۱	τ_a

شبکه نمونه		DDC		کنترل کننده های DFIG	
۰/۰۵	X_{l1}	۲/۵۲۱	K	۰/۱	K_{p1}
۰/۰۲۵	X_{l2}	۴۹/۹۳۸	K_I	۱۰	K_{i1}
۰/۶	X_{l1}	۰/۹۹۸	K_2	۰/۱	K_{p2}
۰/۶	X_{l2}	۰/۱۰۵	τ	۱۰	K_{i2}
۱	V_b				

همان طور که در نمودار شکل ۱۱ نیز مشخص است، تمامی شاخص های مطالعات پایداری دینامیکی ژنراتور سنکرون در صورت استفاده از کنترل کننده میراساز پیشنهادی به شکل قابل توجهی بهبود یافته اند.



شکل ۱۱: نمودار میزان بهبود در شاخص های مختلف پایداری دینامیکی

۹- نتیجه

در این مقاله به بهبود پایداری ژنراتور سنکرون توسط DFIG پرداخته شد. به همین منظور DDC پیشنهادی و ساختار آن ارائه گردید و کارایی آن به ازای دو اختلال در شبکه نمونه مورد ارزیابی قرار گرفت. نقاط قوت این مقاله استفاده از دو فیدبک در DDC، مطالعه سیگنال کوچک، آنالیز مقادیر ویژه و گشتاور میراساز می باشد. ضمن این که پارامترهای DDC نیز توسط الگوریتم ژنتیک تنظیم شدند. نتایج به دست آمده نشان دهنده زمان نشست و همین طور بالا زدگی کم تر، در صورت استفاده از کنترل کننده بود. هم چنین معیارهای دیگر پایداری دینامیکی همانند آنالیز مقادیر ویژه و گشتاور میراساز ژنراتور سنکرون نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از مقادیر ویژه و همین طور گشتاور میراساز ژنراتور سنکرون، نشان می دهد که این شاخص ها تا حدود ۶ برابر نیز بهبود یافته است. هم چنین نتایج تأیید کننده توانایی کنترل کننده در بهبود پایداری دینامیکی ژنراتور سنکرون است.

پیوست

نام گذاری های انجام گرفته برای ژنراتور سنکرون و DFIG در جداول زیر ارائه شده اند.

ژنراتور سنکرون			
δ	زاویه قدرت	D	ضریب میرایی
$\Delta\omega$	تغییرات سرعت	H	ثابت اینرسی

مراجع

[1] P. Kundur, "Power System Stability and Control," New York, NY, McGraw-Hill, 1994.

- [14] J. Taherhadi, M. Jafarian and M. N. Asefi, "Using adaptive control in DFIG-based wind turbines to improve the subsynchronous oscillations of nearby synchronous generators," in *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 2, pp. 362-369, 2017.
- [15] E. Muljadi, C. P. Butterfield, *et al.*, "Effect of Variable Speed Wind Turbine Generator on Stability of a Weak Grid," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 1, pp. 29-36, 2007.
- [16] L. Wang, J. Y. Yu and Y. T. Chen, "Dynamic stability improvement of an integrated offshore wind and marine-current farm using a flywheel energy-storage system," in *IET Renewable Power Generation*, vol. 5, no. 5, pp. 387-396, 2011.
- [17] H. Huang and C. Y. Chung, "Coordinated Damping Control Design for DFIG-Based Wind Generation Considering Power Output Variation," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 4, pp. 1916-1925, 2012.
- [18] M. Mokhtari and F. Aminifar, "Toward Wide-Area Oscillation Control Through Doubly-Fed Induction Generator Wind Farms," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 6, pp. 2985-2992, 2014.
- [19] M. Kang, K. Kim, E. Muljadi, J. W. Park and Y. C. Kang, "Frequency Control Support of a Doubly-Fed Induction Generator Based on the Torque Limit," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 6, pp. 4575-4583, 2016.
- [20] T. Surinkaew and I. Ngamroo, "Hierarchical Co-Ordinated Wide Area and Local Controls of DFIG Wind Turbine and PSS for Robust Power Oscillation Damping," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 7, no. 3, pp. 943-955, 2016.
- [21] L. Wang, C. H. Chang, B. L. Kuan and A. V. Prokhorov, "Stability Improvement of a Two-Area Power System Connected With an Integrated Onshore and Offshore Wind Farm Using a STATCOM," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 2, pp. 867-877, 2017.
- [۲۲] محسن دارابیان و ابوالفضل جلیلود، «کنترل پیشبین با رویکرد بهبود پایداری نوسانات سیستم قدرت در حضور مزارع بادی با استفاده از سیستم ذخیره انرژی ابرخازنی و SSSC»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۱، صفحه ۵۹-۷۳، تابستان ۱۳۹۵.
- [23] W. Du, J. Bi, C. L. and T. Littler, "Damping torque analysis of power systems with DFIGs for wind power generation," in *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 1, pp. 10-19, 2017.
- [24] M. V. A. Nunes, J. A. P. Lopes, H. H. Zurn, U. H. Bezerra and R. G. Almeida, "Influence of the variable-speed wind generators in transient stability margin of the conventional generators integrated in electrical grids," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, no. 4, pp. 692-701, 2004.
- [25] D. T. Larose, "Genetic Algorithms," in *Data Mining Methods and Models*, Wiley-IEEE Press, pp.240-264, 2006.
- [2] K. Padiyar, "Power System Dynamics Stability and Control," India, Bangalore, *BS Publications*, 2008.
- [۳] زهره فرقانی، رحمت‌الله هوشمند، امین خدابخشیان و معین رستگاری، «بررسی عملکرد هماهنگ نیروگاه بادی و تلمبه ذخیره‌ای در بازار روز پیش و خدمات جانبی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۰، شماره ۲، صفحه ۶۳-۷۵، پاییز ۱۳۸۹.
- [۴] محمدرضا کریمی، جمشید آقایی و امین رحیمی رضایی، «به‌کارگیری بهینه‌سازی استوار جهت مقابله با عدم قطعیت نیروگاه‌های بادی در برنامه‌ریزی توسعه تولید»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۷، شماره ۲، صفحه ۶۶۵-۶۷۶، تابستان ۱۳۹۶.
- [۵] مهدی منظری توکلی، امیر عبداللهی و مسعود رشیدی‌نژاد، «برنامه‌ریزی مشارکت امنیت مقید امکانی - احتمالاتی واحدهای نیروگاهی با استفاده از مدل Z-number»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۷، شماره ۳، صفحه ۱۲۲۳-۱۲۳۶، پاییز ۱۳۹۶.
- [6] E. Hau, "Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics," London, UK, *Springer*, 2006.
- [7] O. Anaya-Lara, N. Jenkins, J. Ekayanake, P. Cartwright and M. Hughes, "Wind Energy Generation Modeling and Control," London, UK, *Wiley*, 2009.
- [8] M. Edrah, K. L. Lo and O. Anaya-Lara, "Reactive power control of DFIG wind turbines for power oscillation damping under a wide range of operating conditions," in *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 15, pp. 3777-3785, 2016.
- [9] M. Ramirez, G. Calderon and R. Castellanos, "Effect of PODCs for DFIG Based Wind Farms in the Inter-area and Torsional Oscillation Damping," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 8, pp. 3648-3654, 2016.
- [10] M. K. Hossain and M. H. Ali, "Transient Stability Augmentation of PV/DFIG/SG-Based Hybrid Power System by Nonlinear Control-Based Variable Resistive FCL," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, no. 4, pp. 1638-1649, 2015.
- [11] K. Liao, Z. He, Y. Xu, G. Chen, Z. Y. Dong and K. P. Wong, "A Sliding Mode Based Damping Control of DFIG for Interarea Power Oscillations," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 8, no. 1, pp. 258-267, 2017.
- [12] W. Du, J. Bi, J. Cao and H. F. Wang, "A Method to Examine the Impact of Grid Connection of the DFIGs on Power System Electromechanical Oscillation Modes," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 5, pp. 3775-3784, 2016.
- [13] L. J. Cai and I. Erlich, "Doubly Fed Induction Generator Controller Design for the Stable Operation in Weak Grids," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, no. 3, pp. 1078-1084, 2015.

⁸ Static Synchronous Compensator⁹ Super Capacitor Energy Storage System¹⁰ Static Synchronous Series Compensator¹¹ Automatic Voltage Regulator¹² Crossover¹³ Mutation¹ Power System Stabilizer² Static Nonlinear Controller³ Variable Resistive-Type Fault Current Limiter⁴ Proportional-Integral-Derivative⁵ Modal Theory⁶ Particle Swarm Optimization⁷ Wide Area Measurement System