

بهبود رفتار گذرای توربین‌های بادی مبتنی بر DFIG با به کارگیری استراتژی کنترلی با محاسبات درجه کسری

سمانه جناب^(۱) - بهادر فانی^(۲) - حسین قسوری^(۳)

(۱) کارشناس ارشد - دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات اصفهان

(۲) استادیار - دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد

(۳) استادیار - دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کاشان

تاریخ پذیرش: پاییز ۱۳۹۲

تاریخ دریافت: بهار ۱۳۹۲

خلاصه: باتوجه به گسترش روز افزون استفاده از توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دوسو تغذیه (DFIG) موضوع حفظ اتصال آنها به شبکه و پایداری در برابر خطا از اهمیت زیادی برخوردار است. بنابراین محور اصلی این مقاله بهبود رفتار گذرای ژنراتور هنگام نوسان در سرعت باد می‌باشد. در مقاله حاضر کنترل‌کننده‌ای با محاسبات درجه کسری PI^λ معرفی می‌گردد. همچنین با استفاده از کنترل برداری، توجه به مودهای بحرانی الکتریکی ژنراتور، اثرات پارامترهای مختلف کنترل‌کننده‌ها و تاثیر نقطه کار بر روی این مودها پاسخ گذرای ژنراتور بررسی شده است. با استفاده از نتایج مطالعات پیشین نقش مؤثر کنترل‌کننده‌های روتور بر رفتار گذرای ژنراتور آشکار است. این نتایج در ارائه روش جدید کنترلی PI^λ برای بهبود قابلیت گذر از خطا در مقایسه با کنترل‌کننده‌های کلاسیک PI نقش مهمی را ایفا می‌کنند. با بکارگیری کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی در مبدل سمت روتور RSC و کنترل برداری بر روی شار استاتور جهت جداسازی کنترل توان اکتیو و راکتیو نتایج ایده‌آل محقق می‌گردد. در مقایسه با استراتژی کنترلی کلاسیک PI، روش پیشنهادی از طریق توسعه حوزه جذب دینامیک‌های داخلی سیستم پایدار می‌شود و رفتار تحت نوسانات سرعت باد را از طریق کنترل ولتاژ روتور کنترل می‌کند. در این روش نه تنها به نحو مؤثری قابلیت گذر از خطا بهبود می‌یابد، بلکه کنترل پذیری ژنراتور در حین اختلال نیز حفظ شده است. نتایج حاصل از مطالعات نظری توسط شبیه سازی حوزه زمان تأکید بر کاهش پیک و نوسانات پاسخ گذرای توربین بادی مبتنی بر DFIG دارند.

کلمات کلیدی: توربین بادی، ژنراتور القایی با تغذیه دوپل، کنترل‌کننده با محاسبات درجه کسری، رفتار گذرا.

Transient Performance Improvement of Wind Turbines with Doubly Fed Induction Generators Using Fractional Order Control Strategy

Samaneh Jenab⁽¹⁾ - Bahador Fani⁽²⁾ - Hossein Ghasvari⁽³⁾

(1) MSc - Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Science & Research Branch, Isfahan

sa.jenab@yahoo.com

(2) Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Najafabad Branch

fani@iaun.ac.ir

(3) Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Kashan University

Ghasvari49@yahoo.com

Application of fractional order proportional integral (FOPI) controller to improve transient performance of wind turbine (WT) with Doubly fed induction generator (DFIG) is presented and studied in this paper. By small signal analysis, it is found that the dynamic behavior of the DFIG based WT, during the variation of operating conditions, is strongly affected by the stator dynamics. Since the DFIG electrical dynamics are nonlinear, the linear control (PI) scheme cannot work properly under change in wind speed and stator modes are not damped appropriately. The proposed fractional order controller generalizes the conventional integer order PI controller whose integral order is a fractional number rather than integer. This expansion can provide more flexibility in achieving control objectives. By time domain simulations, a comparative analysis is made with respect to the standard PI controller to demonstrate effectiveness of the fractional order PI (PI^λ) controller during wind speed perturbation.

Index Terms: Doubly fed induction generator, fractional order controller, transient performance.

گذرای ماشین مبتنی بر کنترل کننده‌ی درجه کسری، سریعتر به حالت ماندگار رسیده است.

۲- معادلات توصیف کننده‌ی DFIG

سیستم توربین بادی مبتنی بر DFIG به همراه کنترل کننده‌های مختلف که متشکل از دو مبدل منبع ولتاژ که به صورت پشت به پشت با لینک DC میانی به یکدیگر وصل شده‌اند و حلقه‌های لغزان روتور که از این طریق به شبکه وصل می‌شود در شکل (۱) نشان داده شده‌اند. مبدل طرف روتور RSC^۵ و مبدل طرف شبکه GSC^۶ نامیده می‌شوند. معادلات توصیف کننده یک ماشین القایی روتور سیم‌پیچی شده در قاب مرجع dq به وسیله کنترل برداری شار استاتور با فرض‌های صورت گرفته در مدل سازی سیستم به این شرح است که مقادیر تمامی این پارامترها به صورت پریونیت داده شده‌اند. جهت مثبت جریان برای استاتور و روتور به سمت ژنراتور و در مورد فیلتر سمت شبکه، جهت مثبت جریان به سمت مبدل GSC در نظر گرفته شده است. از تلفات مبدل‌ها به علت ناچیز بودن صرف نظر می‌شود. به علاوه تأثیر کلیدزنی مبدل‌ها در نظر گرفته نشده و فرض می‌شود که آنها منابع ولتاژ سینوسی هستند. مدل سازی سیستم بر اساس فرکانس اصلی صورت پذیرفته است و از اثر هارمونیک‌ها صرف نظر شده است. مبدل‌های RSC و GSC به روش مدلاسیون پهنای باند^۷ فرکانس بالا کنترل می‌شوند و پاسخ سریع و هارمونیک کم را نتیجه می‌دهند [۱۱-۱۲]. مدل ریاضی DFIG با شرح جزئیات در دستگاه مرجع شار استاتور به صورت معادلات حالت بیان شده است. کنترل کننده‌های قسمت‌های مختلف سیستم به صورت تناسبی-انتگرالی^۸ $(k_p + k_i / s)$ در نظر گرفته شده که در آن k_p و k_i به ترتیب بهره‌های تناسبی و انتگرالی می‌باشند، و توجه به این نکته که در کنترل کننده با محاسبات درجه کسری سمت روتور، S دارای یک توان λ می‌باشد $k_p + k_i / s^\lambda$ ، که مقدارش از بین صفر تا دو با توجه به بزرگترین ناحیه پایداری که ایجاد می‌کند، مشخص می‌گردد. معادلات ولتاژ توصیف کننده:

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega \psi_{qs} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} \quad (۱)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega \psi_{ds} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} \quad (۲)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + \omega_2 \psi_{dr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} \quad (۳)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} + \omega_2 \psi_{qr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} \quad (۴)$$

شار پیوندی در معادلات فوق توسط روابط زیر داده می‌شود:

$$\psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (۵)$$

$$\psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (۶)$$

$$\psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (۷)$$

$$\psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (۸)$$

محدود کردن جریان روتور در طول خطا است [۹-۱۲]. در واقع با به کارگیری این استراتژی کنترلی رفتار دینامیکی روتور بهبود یافته و از دینامیک‌های استاتور مستقل می‌شوند. ولی این روش می‌تواند در پایداری دینامیک‌های دیگر سیستم تأثیرات منفی داشته باشد. ثابت شده است، رفتار گذرای ماشین در هنگام وقوع اختلالاتی مانند تغییرات سرعت باد از طریق توسعه‌ی حوزه جذب دینامیک‌های استاتور بهبود می‌یابد [۱۰]. در این صورت با اضافه کردن کنترل کننده‌ای با محاسبات درجه کسری PI^λ بروی جریان روتور شکل (۱) و به دنبال آن کنترل ولتاژ روتور سعی بر توسعه‌ی حوزه جذب دینامیک‌های استاتور شده است. در بیشتر تحقیقات مربوط به کاربرد کنترل کننده‌ی درجه کسری بروی توربین بادی مبتنی بر ژنراتورهای مختلف، دینامیک‌های داخلی مبدل الکترونیک قدرت جهت آنالیز پایداری سیستم قدرت در نظر گرفته نمی‌شوند در حالی که همان طور که گفته شد، اثرات دینامیک‌های استاتور (داخلی) از طریق دینامیک‌های روتور (خارجی) در رفتار ماشین منعکس می‌گردند [۱۳-۱۴]. در [۱۵] که کنترل عناصر قدرت در مدار روتور DFIG به وسیله‌ی کنترل کننده PI^h انجام می‌شود، جهت بررسی اثر توربین باد مبتنی بر DFIG روی دینامیک‌های سیستم قدرت، مدل ساده شده‌ای در نظر گرفته شده، چنانکه از جریان گذاری استاتور و اثر مؤلفه DC جریان چشم پوشی شده است. در [۱۶-۱۷] برای کنترل مبدل سمت روتور، یک کنترل کننده‌ی فازی و کنترل کننده‌ی درجه کسری پیشنهاد گردیده است و کارایی آنها با برنامه‌های کنترل خطی مرسوم مقایسه شده است. کاربرد این برنامه‌های کنترلی برای بهبود رفتار دینامیکی سیستم قدرت در طول افت ولتاژ شبکه می‌باشند. در [۱۸] اثر کنترل کننده‌های درجه کسری روی کارایی دینامیکی سیستم‌های قدرت متصل شده به یک مزرعه‌ی بادی مبتنی بر DFIG، گزارش شده است. جدا از مطالعات پایداری گذرا، بروی آنالیز پایداری سیگنال کوچک مزرعه‌ی باد مبتنی بر DFIG وصل به شبکه، تحقیق گردیده است. این مطالعات عموماً روشی قطعی برای آنالیز پایداری در نظر می‌گیرند. با توجه به اینکه توان باد ماهیتاً متغیر است، آنالیز پایداری قطعی می‌تواند فقط منجر به حل برای شرایط بهره برداری خاص گردد و نتایج ممکن است محافظه کارانه یا خوش بنیانه باشند.

در این مقاله توربین بادی مبتنی بر DFIG با استراتژی کنترلی درجه کسری که قابلیت کنترل انعطاف پذیری را به طور بالقوه دارد، به عنوان منبع تولید بادی انتخاب می‌گردد. همچنین رفتار گذرای DFIG تحت شرایط نامتعادل وزش باد بررسی و کنترل می‌گردد. در روش پیشنهادی، با استفاده از شبیه سازی حوزه زمان بروی توربین بادی مبتنی بر DFIG و ایجاد اختلالی در سرعت وزش باد، بین رفتار گذرای DFIG مجهز به کنترل کننده‌ی درجه کسری و کنترل کننده‌ی کلاسیک مقایسه‌ای صورت گرفته است. سپس چندین معیار از جمله فراجش، زمان اوج و زمان نشست پاسخ سیستم تحت تست، برای یک سیگنال ورودی مورد ملاحظه قرار می‌گیرد، که مشاهده می‌شود رفتار

مراحل طراحی کنترل با استفاده از الگوریتم درجه کسری و استفاده از پاسخ فرکانسی تابع تبدیل سیستم انجام می‌شود. پاسخ فرکانسی تابع تبدیل روتور با توجه به مقادیر پارامترها در جدول پیوست، به صورت زیر است:

$$G(j\omega) = R_p(\omega) + jI_p(\omega) = \frac{1}{a(j\omega) + b} \quad (17)$$

$$a = \frac{L}{\omega_b}, \quad b = R_r$$

در این مقاله، کنترل‌کننده‌ی طراحی شده با دو بهره و مقادیر مختلف $k_d=0$ و k_i, k_p که همان کنترل‌کننده‌ی PI^λ است، مقادیر $0 < \lambda < 2$ می‌باشد:

$$C(j\omega) = K_p + \frac{K_i}{(j\omega)^\lambda} = K_p + \frac{K_i}{\omega^\lambda} \left\{ \cos\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right) - j \sin\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right) \right\} \quad (18)$$

با توجه به فرمول (۱۷)، (۱۸) و مقادیر پارامترهای DFIG، در معادله مشخصه، با قرار دادن $C(j\omega), G(j\omega)$ در (۱۹) و تفکیک آن به دو قسمت حقیقی و موهومی روابط زیر:

$$\Delta(j\omega) = 1 + G(j\omega)C(j\omega) = 0$$

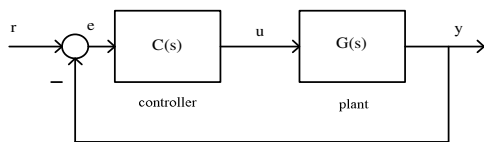
$$1 + C(j\omega)G(j\omega) = 1 + (R_p + jI_p) \cdot \left(K_p + \frac{K_i}{\omega^\lambda} \{ \cos(\lambda) - j \sin(\lambda) \} \right) = 0 \quad (19)$$

از برابر صفر قرار دادن قسمت حقیقی و موهومی، معادلات زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{cases} \omega^\lambda R_p(\omega)k_p + X_{Ri}k_i = -\omega^\lambda \\ \omega^\lambda I_p(\omega)k_p + X_{Ii}k_i = 0 \end{cases} \quad (20)$$

که:

$$X_{Ri} = \cos\left(\frac{\pi}{2}\lambda\right) \cdot R_p(\omega) + \sin\left(\frac{\pi}{2}\lambda\right) \cdot I_p(\omega) \quad (21)$$



شکل (۲): سیستم کنترل فیدبک واحد

Fig. (2): A general SISO afractional order control system structure

$$X_{Ii} = \cos\left(\frac{\pi}{2}\lambda\right) \cdot I_p(\omega) - \sin\left(\frac{\pi}{2}\lambda\right) \cdot R_p(\omega) \quad (22)$$

از حل معادلات برای $\omega \neq 0$ روابط k_p, k_i برحسب ω به صورت زیر به دست می‌آید:

$$k_p = \frac{-R_p(\omega) + \cot\left(\frac{\pi}{2}\lambda\right) I_p(\omega)}{|G_p(j\omega)|^2} \quad (23)$$

در روابط فوق I_m اندوکتانس متقابل و L_s, L_r به ترتیب اندوکتانس‌های خودی استاتور و روتور می‌باشند. معادله گشتاور الکترومغناطیسی ماشین در سیستم پریونیت به شکل زیر است:

$$T_e = \psi_{qr} i_{dr} - \psi_{dr} i_{qr} \quad (9)$$

با جایگذاری روابط قبلی خواهیم داشت:

$$T_e = \frac{L_m}{L_s} (\psi_{qs} i_{dr} - \psi_{ds} i_{qr}) \quad (10)$$

همچنین روابط توان اکتیو و راکتیو DFIG به صورت زیر خواهد بود: [۱۰]

$$P = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} + v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr} \quad (11)$$

$$Q = v_{ds} i_{qs} - v_{qs} i_{ds} + v_{dr} i_{qr} - v_{qr} i_{dr} \quad (12)$$

۱-۲- معادلات توصیف‌کننده‌ی روتور با محاسبات درجه کسری این محاسبات حاصل تعمیم اپراتور مشتق و انتگرال درجه صحیح

$a D_t^r$ است که t, a حدود اپراتور و $r \in R$ درجه اپراتور است. اپراتور مشتق-انتگرال گیر $a D_t^r$ به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۹-۲۲]:

$$a D_t^r = \begin{cases} \frac{d^r}{dt^r} & , r > 0 \\ 1 & , r = 0 \\ \int_a^t (d\tau)^{-r} & , r < 0 \end{cases} \quad (13)$$

جهت محاسبه مشتق و انتگرال درجه کسری معمولاً از تعریف caputo استفاده می‌شود [۲۱]:

$$a D_t^r f(t) = \frac{1}{\Gamma(r-n)} \int_a^t \frac{f^{(n)}(\tau)}{(t-\tau)^{r-n-1}} d(\tau) \quad (14)$$

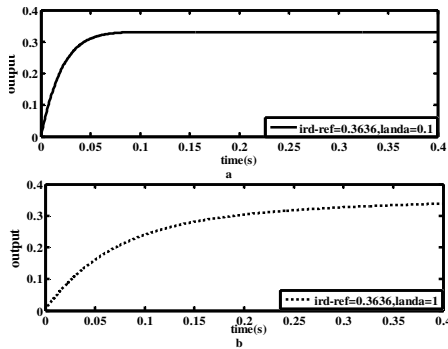
$$, n-1 < r < n, n \in Z$$

تابع گاما برای اعداد مثبت و حقیقی m به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Gamma(m) = \int_0^\infty e^{-\tau} \tau^{m-1} d\tau \quad (15)$$

برای یافتن مجموعه کنترل‌کننده‌های PID پایدارساز از پاسخ فرکانسی سیستم استفاده شده است، و ناحیه پایدار در فضای پارامترهای کنترل‌کننده رسم می‌گردد، که با تعمیم این روش نیز راهی برای یافتن مجموعه کنترل‌کننده‌های درجه کسری برای سیستم‌های دلخواه ارائه شده در شکل (۲) است. ناحیه پایدار با استفاده از پاسخ فرکانسی سیستم و در فضای فرکانس به دست می‌آید. با توجه به سیستم کنترل فیدبک واحد، برای یافتن ناحیه پایدار در فضای پارامترها از مقادیر پارامترهایی که سبب پایداری مرزی معادله مشخصه حلقه بسته سیستم می‌شوند، استفاده شده است. با جایگذاری $s = j\omega$ در معادله مشخصه حلقه بسته:

$$\Delta(j\omega) = 1 + G(j\omega)C(j\omega) = 0 \quad (16)$$



شکل (۴): پاسخ زمانی مربوط کنترل جریان روتور DFIG با $k_p = 0.1$
 Fig (4): Step response of rotor current control ($k_p = 0.1$)

۲-۲- مدل سازی کنترل کننده های مبدل طرف روتور

جهت طراحی کنترل کننده جریان روتور ابتدا لازم است تا مدل ژنراتور القایی روتور سیم پیچی شده که در DFIG به کار می رود، در مرجع سنکرون به دست آورده شود. از روابط (۱) تا (۸) دینامیک های روتور (بر حسب جریان روتور و شار استاتور) چنین به دست می آید:

$$\frac{L_r}{\omega_b} \frac{di_{dr}}{dt} = -R_r i_{dr} + \omega_2 L_r i_{qr} - e_d + v_{dr} \quad (26)$$

$$\frac{L_r}{\omega_b} \frac{di_{qr}}{dt} = -R_r i_{qr} - \omega_2 L_r i_{dr} - e_q + v_{qr} \quad (27)$$

$$\dot{L}_t = L_t - (L_m^2 / L_s) \quad (28)$$

$$\dot{R}_t = L_t + (L_m^2 / L_s^2) R_s \quad (29)$$

$$e_d = \frac{L_m}{L_s} (V_{ds} + \omega_1 \psi_{qs} - \frac{R_s}{L_s} \psi_{ds}) \quad (30)$$

$$e_q = \frac{L_m}{L_s} (V_{qs} - \omega_1 \psi_{ds} - \frac{R_s}{L_s} \psi_{qs}) \quad (31)$$

$$V_{dr} = (K_{P-dr} + \frac{K_{I-dr}}{S \lambda}) (i_{dr-ref} - i_{dr}) - \omega_2 L_r i_{qr} + e_d \quad (32)$$

$$V_{qr} = (K_{P-qr} + \frac{K_{I-qr}}{S \lambda}) (i_{qr-ref} - i_{qr}) - \omega_2 L_r i_{dr} + e_q \quad (33)$$

همان طور که از شکل (۵) ملاحظه می شود ورودی کنترل کننده های PI^λ جریان روتور، سیگنال های خطای تولید شده از مقایسه سیگنال های واقعی جریان dq روتور i_{dqr} و سیگنال های مرجع جریان های روتور $i_{dqr-ref}$ می باشند.

سپس با جبران مؤلفه های تزویج عرضی و ولتاژهای ضد محرکه الکتریکی، سیگنال ولتاژهای روتور شکل می گیرند. e_d, e_q توابعی بر حسب شار و ولتاژ استاتور هستند. همان طور که گفته شد، این دو ولتاژ BEMF روتور نامیده می شوند. همچنین اثر دینامیک های استاتور روی دینامیک های روتور را منعکس می کنند و نقش مهمی در رفتار گذاری DFIG دارند. عبارت $\omega_2 L_r i_{qr}$ در رابطه (۲۷) و $\omega_2 L_r i_{dr}$ در رابطه (۲۶) عبارتی کوپل شده اند، با جبران این عبارات به وسیله به

$$k_i = \frac{-\omega^2 I_p(\omega)}{\sin(\frac{\pi}{2} \lambda) |G_p(j\omega)|^2} \quad (24)$$

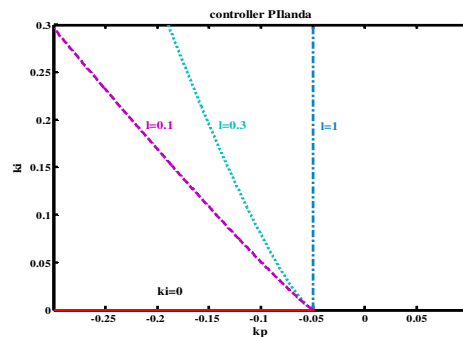
$$|G_p(j\omega)|^2 = R_p^2(\omega) + I_p^2(\omega) \quad (25)$$

با شبیه سازی کنترل کننده درجه کسری با استفاده از پاسخ فرکانسی روتور و به ازای λ های مختلف کسری، ناحیه مربوط به k_p, k_i شکل (۳)، با توجه به روابط (۲۳) و (۲۴) رسم شده است. جهت رسم ناحیه پایدار در فضای پارامترها، از مقادیر پارامترهایی که سبب پایداری مرزی در معادله مشخصه حلقه بسته سیستم می شوند، استفاده شده است. با استفاده از مقادیر مختلف k_p, k_i در نواحی مختلف شکل (۳)، محدوده ناحیه پایدار با توجه به رفتار سیستم در شبیه سازی پاسخ زمان به دست می آید. نتایج شبیه سازی پاسخ زمانی هر دو کنترل کننده با $k_p = 0.1$ در شکل (۴) به دست آمده است. بهبود پاسخ گذرا در محدوده های منطقی، هدف از کنترل می باشد که با توجه به شکل (۴) ملاحظه می شود که کنترل کننده PI^λ سریع تر در مقایسه با PI به مقدار نهایی خود رسیده است. با این روش به سرعت و به راحتی می توان روابط بین پارامترها را به دست آورد. همچنین برای به دست آوردن ناحیه پایدار چون روند طراحی بر اساس پاسخ فرکانسی صورت می پذیرد، نیازی به وجود رابطه دقیق سیستم نیست. در نتیجه از این روش می توان برای انواع سیستم ها از جمله سیستم های تأخیردار استفاده کرد. ملاحظات لازم در انتخاب پارامترهای کنترل کننده های ژنراتور جهت بهبود رفتار گذرا در هنگام اختلال در نظر گرفته شده که در جدول (۱) قرار داده شده است.

Table (1): Parameters of the PI, PI^λ

جدول (۱): پارامترهای کنترل کننده های PI و PI^λ

$i_{rd-ref} = 0.3636$	$\lambda=1$ PI	$\lambda=0.1$ PI^λ
k_p	0.1	0.1
k_i	0.4	0.4



شکل (۳): نواحی مختلف سیستم کنترل جریان روتور DFIG با کنترل کننده درجه کسری بازای λ های مختلف

Fig. (3): The stability boundary curves for PI^λ controller for different λ values

حداکثر آن تجاوز کرد کنترل زاویه پره وارد عمل شده و توان ورودی به توربین را محدود خواهد کرد [۲۳].

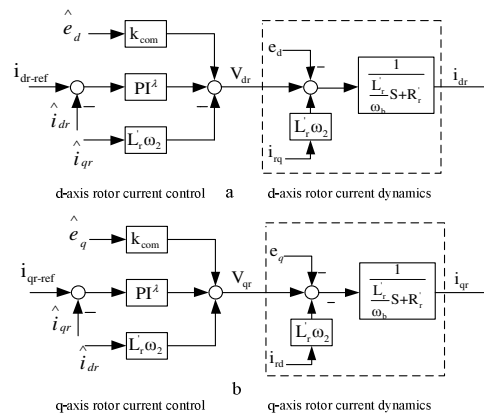
۳- بهبود رفتار گذرا به وسیله طراحی کنترل کننده‌ی با محاسبات درجه کسری

همان طور که گفته شد رفتار گذرای ماشین از طریق توسعه‌ی حوزه جذب دینامیک‌های استاتور بهبود می‌یابد. در این صورت با استراتژی کنترلی با محاسبات درجه کسری PI^λ بر روی جریان روتور و بالطبع کنترل ولتاژ روتور سعی بر توسعه‌ی حوزه جذب دینامیک‌های استاتور شده است. با بررسی‌های به عمل آمده این نتیجه گرفته شده است که دو مد با میرایی ضعیف متناظر با فرکانس طبیعی نزدیک شبکه وجود دارند که متغیرهای استاتور (Ψ_{ds}, γ) سهم مشارکت بالایی در این مد ضعیف دارند. این مدها مدهای استاتور نامیده می‌شوند و اثر قابل توجهی روی کارایی گذرای DFIG می‌گذارند [۲۴-۲۸]. این مدها تحت شرایط عملکردی خاص ممکن است سیستم را ناپایدار گردانند. اما معمولاً در تحقیقات از مدهای استاتور چشم پوشی می‌شود در حالی که این مدها اثر مهمی روی رفتار گذرای DFIG دارند. با توجه به رابطه حوزه جذب دینامیک‌های استاتور [۸] واضح است که پایداری دینامیک‌های صفر به شرایط بهره‌برداری i_{dq0}, i_{dr0} نتیجتاً به PF استاتور و به پارامترهای شبکه از قبیل L_e, R_e تحت کاهش ولتاژ کوچکتر از مقدارش در شرایط نرمال، بستگی دارد. بنابراین حد پایداری دینامیک‌های صفر تحت کاهش ولتاژ، کاهش می‌یابد. دینامیک‌های صفر سیستم DFIG به وسیله تنظیم و کنترل جریان‌های فیلتر شبکه و روتور در مقدار مرجعشان به دست می‌آیند. که در [۸] این امر با کنترل کننده کلاسیک PI مورد بررسی قرار گرفته است، که به وسیله این استراتژی پاسخ‌گذاری سیستم DFIG بهبود یافته است. هدف این تحقیق افزایش حوزه جذب دینامیک‌های استاتور و متعاقباً داشتن پاسخ‌گذاری بهتری نسبت به سیستم مبتنی بر کنترل کننده کلاسیک PI می‌باشد. در ادامه رفتار سیستم مبتنی بر این کنترل کننده‌ی پیشنهادی در هنگام بروز اختلال در سرعت باد نسبت به سیستم مبتنی بر کنترل کننده کلاسیک بررسی خواهد شد، و با استفاده از نتایج شبیه‌سازی ثابت می‌شود که پاسخ‌گذاری سیستم DFIG با وجود کدام کنترل کننده سریع‌تر به پایداری رسیده است.

۴- شبیه‌سازی کنترلی DFIG مبتنی بر کنترل کننده درجه کسری PI^λ

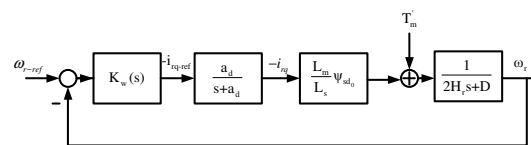
ثابت شده است که دینامیک‌های الکتریکی DFIG برای شرایط معین بهره‌برداری در فاز غیرمینیمم هستند [۲۹]. بنابراین یک محدودیت بر روی پاسخ گذرا دارند. همچنین نشان داده شد که دینامیک‌های DFIG تحت جبران ولتاژهای شبکه و BEMF روتور به صورت یک سیستم خطی که در برگیرنده دینامیک‌های داخلی و خارجی است، رفتار می‌کند. دینامیک‌های داخلی شامل دینامیک‌های استاتور بوده و

کارگیری کنترل برداری، حلقه‌های کنترل جریان روتور i_{dr}, i_{qr} از هم دیگر جدا می‌شوند. در شکل (۵) ولتاژهای BEFM به عنوان اغتشاش در دینامیک‌های جریان روتور بیان شده‌اند. به منظور کاهش خطا می‌توان ولتاژهای BEFM را به وسیله کنترل کننده‌های جریان روتور با به کارگیری رابطه feedforward جبران نمود. ضرایب کنترل کننده PI^λ در جدول (۱) به روش جایابی قطب^۱ طراحی شده است. مولفه‌های dq جریان‌های مرجع روتور یعنی i_{dr-ref}, i_{qr-ref} از حلقه کنترل سرعت شکل (۶)، تولید می‌شود. در حالی که i_{dr-ref} از حلقه کنترل توان راکتیو شکل (۷)، سمت استاتور محاسبه می‌شود [۸]. مرجع توان راکتیو Q_{s-ref} از روی مرجع توان اکتیو و i_{dr} ضرب توان قدرت مطلوب تعیین می‌شود.



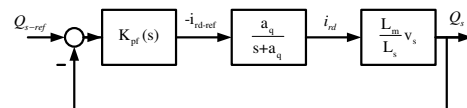
شکل (۵): حلقه‌های کنترل جریان روتور

Fig. (5): Rotor current control loops



شکل (۶): کنترل کننده سرعت روتور (استخراج حداکثر توان)

Fig. (6): Rotor speed controller (maximum power extraction)



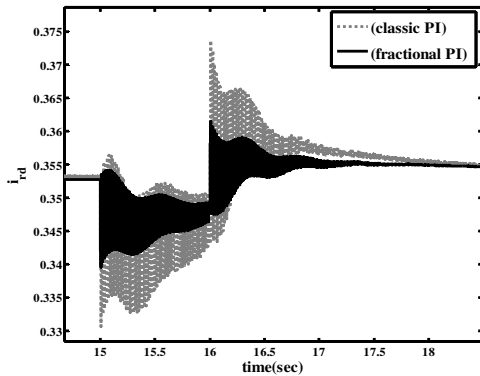
شکل (۷): کنترل توان راکتیو از طریق کنترل جریان محور d روتور

Fig. (7): Reactive power controller

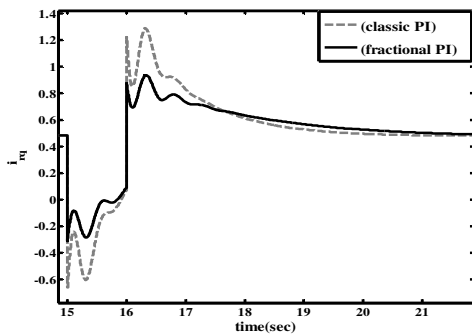
نحوه محاسبه سرعت مرجع ω_{r-ref} بدین صورت است که ابتدا سرعت حقیقی روتور اندازه گیری شده و سپس مقدار i_{qr} از طریق مؤلفه V_{qr} با استفاده از یک کنترل کننده تناسبی-انتگرال گیر PI^λ به DFIG تزریق می‌شود. این الگوریتم کنترلی تا حداکثر توان مکانیکی توربین قابل اعمال خواهد بود. در زمانی که توان مکانیکی توربین از مقدار

محور d وابسته‌اند، با ایجاد اختلال، زمان صعود و نوسانات پاسخ‌گذرا در سیستم کنترلی درجه کسری بررسی شده است. با بهبود رفتار جریان روتور محور d و ولتاژ روتور محور d کنترل شده، دینامیک‌های استاتور که همان دینامیک‌های داخلی سیستم هستند را پایدار کرده و در نتیجه به دلیل وابستگی دینامیک‌های خارجی سیستم به دینامیک‌های داخلی، رفتار کل سیستم بهبود می‌یابد. منشأ نوسانات، شار پیوندی استاتور می‌باشد و همانطور که در شکل (۱۴) و (۱۵) مشاهده می‌کنید، رفتار مدهای استاتور، که میرایی ضعیف داشتند با کنترل کننده درجه کسری بهبود یافته‌اند که نتیجه به دست آمده حاکی از آن است که حوزه جذب دینامیک‌های استاتور توسعه یافته‌اند. همین‌طور پاسخ گذرا در پارامترهای دیگر سیستم از جمله جریان و ولتاژ فیلتر سمت شبکه، جریان و ولتاژ استاتور، توان راکتیو و گشتاور الکترومغناطیسی، شار استاتور با وجود این کنترل کننده معرفی شده، بهبود یافته است.

شکل (۱۹) رفتار ولتاژ لینک dc واسط و اثر مؤلفه‌ی q جریان فیلتر سمت شبکه را نشان می‌دهد. نوسانات ولتاژ لینک dc خازن در مدار واسط دو مبدل از این جهت که تعیین کننده ظرفیت نامی مبدل‌ها می‌باشد، دارای اهمیت است.



شکل (۸): جریان روتور محور d در سرعت‌های مختلف باد
Fig. (8): D-axis rotor current control at different wind speeds



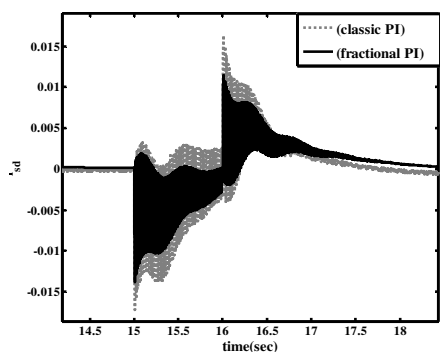
شکل (۹): جریان روتور محور q در سرعت‌های مختلف باد
Fig. (9): Q-axis rotor current control at different wind speeds

نقش مهمی روی رفتار گذرای DFIG دارند، این دینامیک‌ها DFIG را به سمت یک رفتار نامتعادل پس از رفع خطا یا بروز اختلال می‌برند. روش پیشنهادی ترکیبی از کنترل برداری و کنترل درجه کسری است که دینامیک‌های داخلی را از طریق توسعه حوزه جذب پایدار کند و رفتار پس از اختلال در سرعت باد را از طریق کنترل ولتاژ روتور بهبود دهد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که روش کنترلی پیشنهادی در شرایط نامعلوم پارامترهای ژنراتور نیز روش توانایی می‌باشد. در شبیه‌سازی جهت یافتن اثرات پهنای باند حلقه بسته جریان روتور و میرایی موثر آن روی رفتار گذرای DFIG، متصل به باس بینهایت با ایجاد اختلال در سرعت وزش باد، پاسخ گذرای سیستم مورد نظر به وسیله‌ی دو کنترل کننده PI و PI^{λ} بررسی و مقایسه شده است. این اغتشاش در حالتی که سرعت باد بیش از حداکثر سرعت باد نامی باشد به این صورت است که، در زمان ۱۵ ثانیه سرعت باد با تغییر ۱ پله‌ای از ۹ متر بر ثانیه به ۱۰ متر بر ثانیه برسد و در زمان ۱۶ ثانیه سرعت به مقدار اصلی یعنی ۹ متر بر ثانیه باز گردانده شود.

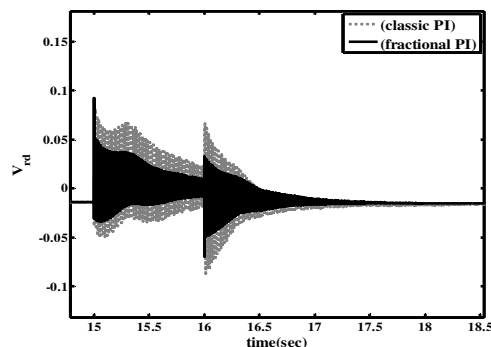
پاسخ گذرای سیستم بر حسب دو فاکتور بررسی می‌گردد:

- ۱- سرعت پاسخ که با زمان صعود و زمان اوج تعریف می‌شود.
- ۲- نزدیکی پاسخ به پاسخ مطلوب که با فراجاهش و زمان نشست نشان داده می‌شود.

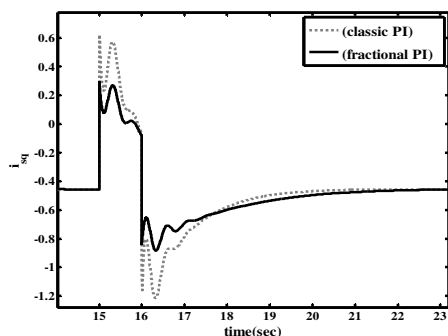
زمان صعود و خطای ردیابی حالت ماندگار نسبت به کنترل کننده کلاسیک PI مقایسه شده است که در این صورت توانایی تنظیم سیستم، با رفتار بهینه بیشتر می‌گردد. قابلیت تنظیم رفتار گذرا و حالت ماندگار از جمله مزایای بارز سیستم‌های کنترلی است. برای طراحی و تحلیل این سیستم کنترلی جدید باید رفتارهای آن به دقت مورد بررسی قرار گیرد. آنگاه بر اساس رفتارهای مطلوب سیستم کنترلی، پارامترهای سیستم تنظیم گردیده تا پاسخ مطلوب به دست آید. سیستم کنترلی، سیستم کنترل بهینه نامیده می‌شود که در آن پارامترهای سیستم کنترل طوری طراحی شوند که شاخص به یک مقدار مینیمم برسد. نتایج در حالت استفاده از کنترل درجه کسری با نتایج کنترل کلاسیک که در [۸] مورد استفاده قرار گرفته است، به طور هم‌زمان نمایش داده شده‌اند و موفقیت‌آمیز بودن عملکرد کنترل کننده‌ی درجه کسری در بهبود رفتار گذرای DFIG در مقایسه با روش کنترل کلاسیک تحت شرایط اختلال باد نشان داده شده است. در ابتدا جریان روتور محور d شبیه‌سازی شده است و چنانکه قبلاً ذکر گردید، با کنترل این جریان، توان راکتیو مبادله شده با شبکه، توسط RSC نیز کنترل می‌گردد. در نتیجه‌ی تنظیم گشتاور الکتریکی با مبدل طرف روتور، سرعت توربین بادی تنظیم می‌شود. تنظیم سرعت بیشتر برای گرفتن توان بهینه از باد استفاده می‌شود. با این حال امکان کنترل توان اکتیو و توان راکتیو به این سیستم قابلیت گردش در شبکه را نیز می‌دهد [۳۰]. تزریق توان راکتیو تنها با $pitch$ یا $active stall$ کنترل نمی‌شود و البته با مبدل PWM سمت ماشین هم کنترل می‌گردد. همانطور که گفته شد، دینامیک‌های استاتور به جریان روتور



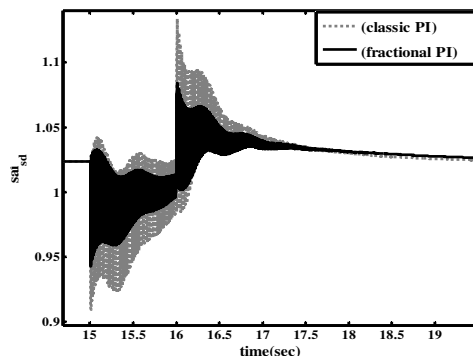
شکل (۱۴): جریان استاتور محور d در سرعت‌های مختلف باد
Fig. (14): D-axis stator current control at different wind speeds



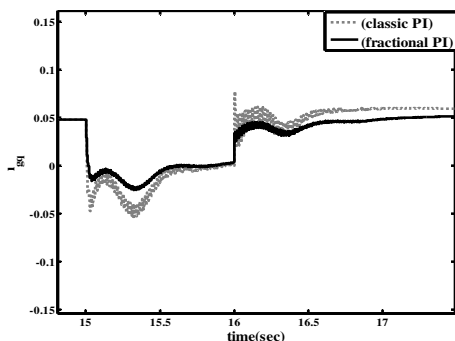
شکل (۱۰): ولتاژ روتور محور d با ایجاد اختلال در سرعت باد
Fig. (10): D-axis rotor voltage control at different wind speeds



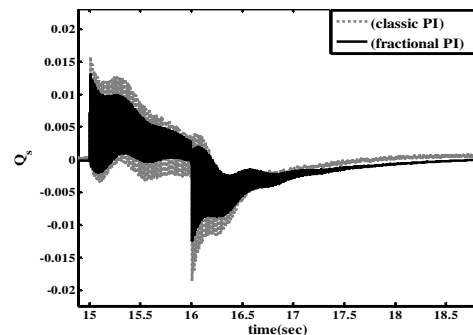
شکل (۱۵): جریان استاتور محور q با ایجاد اختلال در سرعت باد
Fig. (15): Q-axis stator current control at different wind speeds



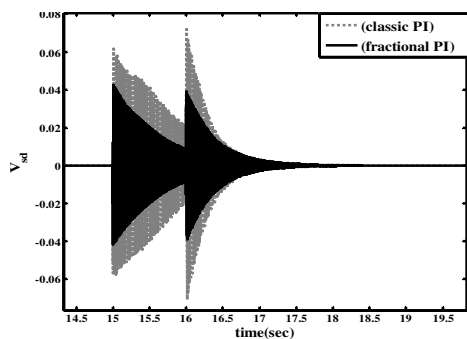
شکل (۱۱): توان راکتیو با ایجاد اختلال در سرعت باد
Fig. (11): Reactive power control at different wind speeds



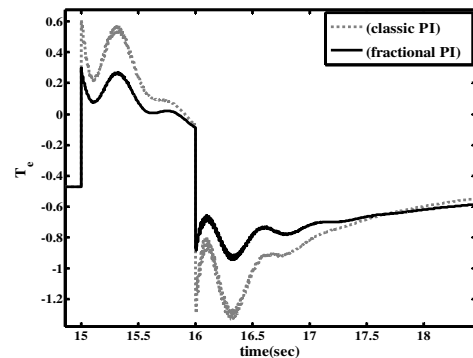
شکل (۱۶): جریان فیلتر سمت شبکه محور q با ایجاد اختلال در سرعت باد
Fig. (16): Q-axis grid filter current control at different wind speeds



شکل (۱۲): ψ_{ds} با ایجاد اختلال در سرعت باد
Fig. (12): D-axis Stator flux control at different wind speeds



شکل (۱۷): ولتاژ استاتور محور d با ایجاد اختلال در سرعت باد
Fig. (17): D-axis stator voltage control at different wind speeds

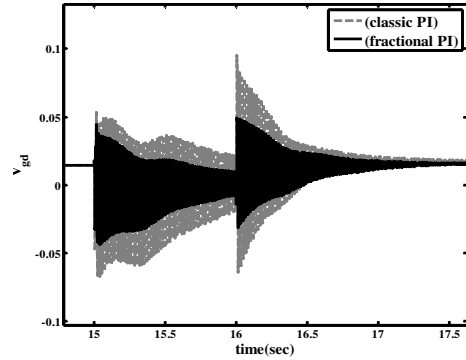


شکل (۱۳): T_e با ایجاد اختلال در سرعت باد
Fig. (13): Electrical torque control at different wind speeds

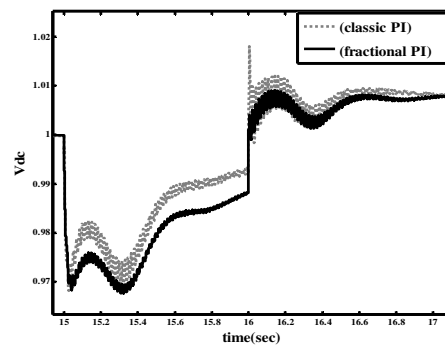
محاسبات درجه کسری به آن ویژگی‌های ممتازی افزوده است و آن را به کنترل‌کننده‌ای با انعطاف‌پذیری بالاتر بخصوص در تأمین حد فاز و حد بهره مطلوب، پاسخ بهتر و ناحیه پایداری بزرگتر نسبت به کنترل‌کننده PID تبدیل کرده است. با استفاده از پاسخ فرکانسی سیستم و کنترل درجه کسری، DFIG کنترل می‌گردد، به نحوی که با استفاده از PI^λ با افزایش وسعت حوزه جذب دینامیک‌های استاتور نسبت به PI و جبران اثرات ولتاژ BEMF و شبکه به وسیله عبارت پیشرو و با جداسازی محورهای dq با کنترل‌برداری، دینامیک‌های داخلی را سریع‌تر پایدار می‌کند و در نتیجه دینامیک‌های خارجی ماشین نیز بهبود می‌یابد و مستقل از دینامیک‌های استاتور می‌گردد. نتیجه به دست آمده، سیستم توربین بادی در طول اختلال و یا بروز خطایی در سیستم قدرت به شبکه قدرت متصل باقی می‌ماند و به صورت خودکار به پایداری سیستم کمک می‌کند و کنترل‌کننده پیشنهادی رفتار دینامیکی سیستم را تحت اختلال بهبود می‌دهد. به طور کلی از تحلیل دو روش بررسی شده شامل طراحی کنترل‌کننده کلاسیک PI و درجه کسری PI^λ نتایج زیر حاصل می‌گردد: روش اول دقیق و دارای روندی منظم برای یافتن مجموعه کنترل‌کننده کلاسیک پایدارساز است اما از پایداری کمتری برخوردار است. روش جدید از محاسبات در حوزه فرکانس برخوردار است و این خصوصیت سبب افزایش استفاده از آن، برای دسته وسیعی از سیستم‌ها از جمله سیستم‌هایی که تابع تبدیل دقیقی از آنها در دست نیست، می‌شود. روش پیشنهادی با به کارگیری روند کنترل‌کننده کلاسیک و استفاده از نحوه محاسبات درجه کسری روشی منسجم، دقیق و مطمئن محسوب می‌شود. خصوصیت بارز این روش، عمومیت استفاده از آن بدون ایجاد تغییر در روند الگوریتم برای دسته وسیعی از سیستم‌ها است. با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، قابلیت شناسایی کنترل‌کننده‌ای که بتواند پاسخ‌های زمانی مطلوب را تأمین کند، دارا است. در پایان از بررسی نتایج حاصل از مقایسه این کنترل‌کننده با کنترل‌کننده PI در برخورد با سیستم‌های درجه کسری، می‌توان با قطعیت گفت که کنترل‌کننده درجه کسری از قابلیت تنظیم بهتر، پاسخ زمانی مطلوب‌تر و حتی ناحیه پایداری بزرگتری برخوردار خواهد بود و حتی می‌توان گفت که کنترل‌کننده درجه کسری به نسبت کنترل‌کننده کلاسیک، قوی‌تر عمل می‌کند.

پی‌نوشت:

- 1 - Back to Back
- 2 - Doubly Fed Induction Generator
- 3 - Back EMF voltages
- 4 - Fractional order
- 5 - Rotor side converter
- 6 - Grid side converter
- 7- PWM
- 8- Proportional Integral
- 9- Pole placement



شکل (۱۸): ولتاژ فیلتر سمت شبکه d در سرعت‌های مختلف باد
Fig. (18): D-axis grid filter voltage control at different wind speeds



شکل (۱۹): ولتاژلینک dc در سرعت‌های مختلف باد
Fig. (19): DC-link voltage control at different wind speeds

هر چه نوسانات ولتاژ خازن، در شرایط اختلال بیشتر باشد، به مبدل با ظرفیت بالاتری احتیاج است، و اگر نوسانات ولتاژ dc از حد مجاز ظرفیت مبدل‌ها بالاتر برود، از مدار خارج می‌شوند و ادامه بهره‌برداری از آنها مقدور نمی‌باشد. با توجه به شکل (۱۹) مشاهده می‌گردد که نوسانات ولتاژ واسط dc دو مبدل با کنترل مبتنی بر درجه کسری کاهش یافته است.

با استفاده از کنترل‌کننده درجه کسری در حلقه کنترلی جریان روتور و بررسی اثرات جریان کنترل شده در کل سیستم توربین بادی، شبیه‌سازی با ورودی پله به دلیل نامشخص بودن سیگنال ورودی واقعی سیستم، انجام شد. با بررسی‌های به عمل آمده از روی شبیه‌سازی‌ها نتایج حاصل مطابق با این بود که رفتارگذرای توربین بادی همراه با DFIG مبتنی بر کنترل‌کننده درجه کسری تحت اختلال باد نسبت به کنترل‌کننده کلاسیک بهبود یافته است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله کنترل‌کننده درجه کسری PI^λ پایدارساز معرفی شده است. در روش ارائه شده سعی بر این بود که پیشنهادی شامل نقاط قوت بیشتری نسبت به کنترل‌کننده‌های PI داده شود و بتواند نقاط ضعف آن را برطرف نماید. وجود درجه آزادی λ در کنترل‌کننده با

Table (2): Parameters of the 1.76MVA, 575-V DFIG WT
جدول (۲): مشخصه‌های ماشین القایی DFIG [A]

اندوکتانس نشی استاتور ۳/۰۷ پریونیت	تعداد قطب ۴
اندوکتانس نشی روتور ۳/۰۵۶ پریونیت	توان نامی ۷۶ مگا ولت آمپر
اندوکتانس متقابل ۲/۹ پریونیت	ولتاژ نامی ۵۷۵ ولت
اندوکتانس نشی شبکه ۰/۳ پریونیت	فرکانس نامی ۶۰ هرتز
مقاومت شبکه ۰/۰۳ پریونیت	مقاومت استاتور ۰/۰۷۰۶ پریونیت
	مقاومت روتور ۰/۰۰۵ پریونیت

References

- [1] M. Liserre, R. Cardenas, M. Molinas, J. Rodriguez, "Overview of multi-MW wind turbines and wind parks", IEEE Trans. on Ind. Electron., Vol. 58, No. 4, pp. 1081-1095, Apr. 2011.
- [2] Sh. Zhang, K. Tseng, "Advanced control of Series voltage compensation to enhance wind turbine ride through", IEEE Trans. on Power Elec., Vol. 27, No. 2, pp. 763-772, Feb. 2012.
- [3] B. Beltran, M. El Hachemi Benbouzid, "Second-order sliding mode control of a doubly fed induction generator driven wind turbine", IEEE Trans. on Energy Conv., Vol. 27, No. 2, pp. 261-269, June 2012.
- [4] E. Tremblay, S. Atayde, A. Chandra, "Comparative study of control strategies for the doubly fed induction generator in wind energy conversion systems: a DSP-based implementation approach", IEEE Trans. Sustain Energy, Vol. 2, No. 3, pp. 288-297, 2011.
- [5] S.M.R. Kazemi, H. Goto, G. Hai-Jiao, O. Ichinokura, "Review and critical analysis of the research papers published till date on maximum power point tracking in wind energy conversion system", IEEE/ECCE, pp. 4075-4082, 2010.
- [6] M.A. Abdullah, AHM Yatim, Tan CW, Saidur R, "A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems", Renew Sustain Energy, Vol. 16, No. 5, pp. 3220-3227, 2012.
- [7] C.H. Lee, Fu-Kai Chang, "Fractional-order PID controller optimization via improved electromagnetism-like algorithm", Expert Systems with Applications, Vol. 37, No. 12, pp. 8871-8878, 2010.
- [8] M. Rahimi, M. Parniani, "Transient performance improvement of wind turbine with doubly fed induction generators using nonlinear control strategy", IEEE Trans. Energy Conv., Vol. 25, No. 2, pp. 514-525, June, 2010.
- [9] K. Rothenhagen, F.W. Fuchs, "Doubly fed induction generator model-based fault detection and control loop reconfiguration", IEEE Trans. on Ind. Electron., Vol. 56, No. 10, pp. 4229-4238, Oct. 2009.
- [10] C. Dongyoung, Kyo-Beum Lee, "Variable structure control of the active and reactive powers for a DFIG in wind turbines", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 46, No. 6, pp. 2545, Dec. 2010.
- [11] A. Bertani, C. Bossi, F. Fornari, S. Massucco, S. Spelta, F. Tivegna, "Amicroturbine generation system for grid connected and islanding operation", IEEE/PES, 2004.
- [12] M. Shahabi, M.R. Haghifam, M. Mohamadian, S.A. Nabavi-Niaki, "Microgrid dynamic performance improvement using doubly fed induction wind generator", IEEE Trans. on Energy Conv., Vol. 24, No. 1, pp. 137-145, March 2009.
- [13] D. Torregrossa, D. Paire, F. Peyraut, B. Fahimi, "Mitigation of electromagnetic vibration radiated by PMSM in fractional-horsepower drives by optimal choice of the carrier frequency", IEEE Trans. on Ind. Elec., Vol. 59, No. 3, March 2012.
- [14] M. Evangelos, T. sampouris, E. Minos. Beniakar, G. Antonios, "Geometry optimization of PMSMs comparing full and fractional pitch winding configurations for aerospace actuation applications", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 48, No. 2, Feb. 2012.
- [15] Sh. Shao, E. Abdi, R. McMahon, "Low-cost variable speed drive based on a brushless doubly-fed motor and a fractional unidirectional converter", IEEE Trans. on Ind. Elec., Vol. 59, No. 1, Jan. 2012.
- [16] L. Wen, Y. Hori Fellow, "IEEE vibration suppression using single neuron-based PI fuzzy controller and fractional-order disturbance observer", IEEE Trans. on Ind. Elec., Vol. 54, No. 1, Feb. 2007.
- [17] R. Melicio, J. Catalao, V. Mendes, "Fractional-order control and simulation of wind turbines with full-power converters", IEEE/MELECON, 2010.
- [18] R. Melicio, V.M.F. Mende, J.P.S. Catalao, "Wind energy systems with power-electronic converters and fractional-order controllers", Nstituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisbon, Portugal 2012.
- [19] B. Khalfa, A. Charef, "Control quality enhancement using fractional $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller", Int. Journal of Sys. Science, Vol. 40, No. 8, pp. 875-888, 2009.
- [20] K. Lee Yung, M.J. Watkins, "Determination of a stabilizing fractional-order PID controllers", IEEE/ACC, 2011.
- [21] G.R. Enrique, J.M. Rosário, J.T. Machado, "Fractional order calculus: basic concepts and engineering applications", Mathematical Problems in Eng., 2010.
- [22] Li. Yan-Ling, Yue Sun, Xin Dai, " μ -synthesis for frequency uncertainty of the ICP system", IEEE Trans. on Ind. Elec., Vol. 60, No. 1, Jan. 2013.

- [23] N.R. Ullah, B. Kankar, B. Torbjörn, "Wind as reactive power ancillary service providers – technical and economic issues", *IEEE Trans Energy Convers*, Vol. 24, No. 3, pp. 661-6672, 2009.
- [24] R. Cárdenas, R. Peña, S. Alepuz, G. Asher, "Overview of control systems for the operation of DFIGs in wind energy applications", *IEEE Trans. on Ind. Elec.*, Vol. 60, No. 7, pp. 2776-2798, July 2013.
- [25] H.T. Jadhav, Ranjit Roy, "A comprehensive review on the grid integration of doubly fed induction generator", *Elec. Pow. and Energy Sys.*, Vol. 49, pp. 8-18, 2013.
- [26] G.D. Marques, M.S. Duarte, "Stator flux active damping methods for field-oriented doubly fed induction generator", *IEEE Trans. on Energy Conv.*, Vol. 27, No. 3, pp. 799-896, Sep. 2012 .
- [27] Xu. Hailiang, Hu. Jiabing, He.Yikang, "Integrated modeling and enhanced control of DFIG under unbalanced and distorted grid voltage conditions", *IEEE Trans. on Energy Conv.*, Vol. 27, No. 3, pp. 725-736, Sep. 2012.
- [28] A. Karthikeyan, C. Nagamani, G. Saravana Ilango, "A versatile rotor position computation algorithm for the power control of a grid-connected doubly fed induction generator", *IEEE Trans. on Energy Conv.*, Vol. 27, No. 3, pp. 697-706, Sep. 2012.
- [29] M. Rahimi, M. Parniani, "Dynamic behavior analysis of doubly-fed induction generator wind turbines – The influence of rotor and speed controller parameters", *Elec. Power and Energy Sys.*, Vol. 32, pp. 464-477, 2010.
- [30] M. Kayikci, J.V. Milanovic, "Reactive power control strategies for DFIG-based plants", *IEEE Trans. Energy Conv.*, Vol. 22, No. 2, pp. 389–396, Jun. 2007.

