

بهبود رفتار گذرای توربین‌های بادی مبتنی بر DFIG با به کارگیری استراتژی کنترلی با میرایی فعال

سعید سلیمانی^(۱) - بهادر فانی^(۲) - محمدرضا یوسفی^(۲)

(۱) کارشناسی ارشد- اداره آموزش و پرورش شهرستان مبارکه، مبارکه، اصفهان

(۲) استادیار - دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، اصفهان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۹/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۹/۲۹

خلاصه: در این پژوهش ابتدا درباره مشخصات دینامیکی توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی دو سو تغذیه بحث می‌شود. DFIG نسبت به کمبود ولتاژ پایانه ژنراتور بسیار حساس است. زیرا افت ولتاژ عمیق باعث القای ولتاژهای ضد محرکه‌ی بزرگ در روتور می‌شود که این امر منجر به عبور جریان گذرای شدید از روتور و افزایش ولتاژ لینک DC در مبدل قدرت و در نتیجه آسیب دیدن مبدل الکترونیک قدرت می‌گردد. ولتاژهای نیروی ضد محرکه‌ی القایی (BACK EMF) در DFIG اثرهای دینامیکی استاتور را روی جریان‌های دینامیکی روتور منعکس می‌کند و نقش مهمی روی جریان هجومی روتور در ضمن کمبود ولتاژ ژنراتور دارد. جبران‌سازی این ولتاژها می‌تواند قابلیت اتصال به شبکه ژنراتور را بهبود دهد و جریان‌های گذرای روتور را محدود کند. طرح کنترل خطی به طور مناسب تحت کمبود ولتاژهای بزرگ نمی‌تواند کار کند، در این مورد از کنترل‌کننده با میرایی فعال جهت بهبود حالت گذرا و پایداری استفاده می‌شود. دیدگاه پیشنهاد شده حالت‌های دینامیکی داخلی را از طریق کنترل ولتاژ روتور پایدار می‌کند و رفتار دینامیکی DFIG را بعد از برطرف شدن خطا بهبود می‌بخشد. نتایج حاصل از مطالعات نظری توسط شبیه‌سازی حوزه زمان کاهش پیک و نوسانات پاسخ گذرای توربین بادی مبتنی بر DFIG را نشان می‌دهند.

کلمات کلیدی: توربین بادی، میرایی فعال، پهنای باند، ژنراتور القایی با تغذیه دو سو، FOC.

Transient Performance Improvement of Wind Turbines with Doubly Fed Induction Generators Using Active Damping Control Strategy

Saeed Soleymani⁽¹⁾ - Bahador Fani⁽²⁾ - Mohammad Reza Yousofi⁽²⁾

(1) MSc - Department of Mobarakeh City Education, Mobarakeh, Isfahan, Iran
ssoleimani49@yahoo.com

(2) Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Najafabad Branch,
Najafabad, Esfahan, Iran
bahador_fani@yahoo.com
Shahgholian@iaun.ac.ir

This paper Analytically investigates the effects of system and controller parameters and operating conditions on the dynamic and transient behavior of wind turbines (WTs) with doubly-fed induction generators (DFIGs) under voltage dips and wind speed fluctuations. Also, it deals with the design considerations regarding rotor and speed controllers. The poorly damped electrical and mechanical modes of the system are identified, and the effects of system parameters, and speed/rotor controllers on these modes are investigated by modal and sensitivity analyses. The results of theoretical studies are verified by time domain simulations. It is found that the dynamic behavior of the DFIG-based WT under voltage dips is strongly affected by the stator dynamics. Further, it is shown that the closed loop bandwidth of the rotor current control, rotor current damping, DFIG power factor and the rotor back-emf voltages have high impact on the stator modes and consequently on the DFIG dynamic behavior. Moreover, it is shown that the dynamic behavior of DFIG-based WT under wind speed fluctuation is significantly dependent on the bandwidth and damping of speed control loop.

Index Terms: Doubly fed induction generator, active damping, transient performance. ride-through capability, Bandwidth.

۱- مقدمه

جهان امروز با چالش‌های فراوانی در بخش تولید انرژی مواجه است. در سالهای اخیر انرژی‌های تجدیدپذیر به دلیل کاهش آلودگی زیست محیطی ناشی از تولید انرژی الکتریکی مورد توجه قرار گرفته‌اند. استفاده از انرژی باد به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر دارای توجیه اقتصادی، در بسیاری از کشورهای جهان رو به فزونی گذاشته است. ژنراتور القایی دو سو تغذیه در واقع همان ژنراتور القایی روتور سیم‌پیچی شده است که استاتور آن مستقیماً به شبکه الکتریکی متصل است و روتور آن از طریق دو مبدل الکترونیک قدرت پشت به پشت با حلقه لغزان به شبکه متصل می‌گردد. بین دو مبدل یک خازن که به آن خازن لینک dc گفته می‌شود، قرار می‌گیرد. این خازن به عنوان ذخیره کننده انرژی و به منظور ثابت نگاه داشتن ولتاژ (کاهش ریبیل ولتاژ) به کار می‌رود. وظیفه مبدل سمت روتور، کنترل توان اکتیو و راکتیو ماشین است. مبدل سمت شبکه ولتاژ لینک dc را کنترل می‌کند، همچنین می‌تواند برای تزریق توان راکتیو و کنترل ولتاژ بکار رود. مزایای توربین‌های بادی مجهز به ژنراتور القایی دو سو تغذیه عبارتند از: ثابت بودن فرکانس الکتریکی شبکه و تنظیم فرکانس الکتریکی روتور. توان نامی مبدل‌های الکترونیک قدرت مورد استفاده در توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی دو سو تغذیه به اندازه ۳۰٪ ظرفیت ماشین است. کمبود ولتاژ بخش عمده اختلالات متداول سیستم قدرت را تشکیل می‌دهد. تحقیقات انجام شده سهم این نوع اختلال را ۹۲ درصد برآورد می‌کند [۲،۱]. از آنجا که ژنراتورهای القایی نیز مثل ژنراتور سنکرون ولی با کیفیتی متفاوت با مسائل پایداری روبرو هستند، مهم است که مسایل پایداری آنها به شبکه ارزیابی گردد [۴،۳]. تحقیقات زیادی در زمینه قابلیت متصل بودن به شبکه و بررسی رفتار دینامیکی DFIG انجام شده است [۶،۵]. اخیراً با توجه به نفوذ گسترده و روبه رشد ژنراتورهای بادی در شبکه قدرت، موضوع پایدار نگه داشتن و حفظ اتصال نیروگاه‌های بادی به شبکه در برابر خطاها و کمبود ولتاژ شبکه از اهمیت زیادی برخوردار گشته است. همچنین تأثیر و مشارکت نیروگاه بادی در کنترل اغتشاشات رخ داده در یک سیستم قدرت بهم پیوسته بسیار مهم است. نیروگاه‌های بادی در برابر نوسانات دینامیکی ولتاژ بخصوص اتصال کوتاه و کمبود ولتاژهای شدید و ناگهانی بسیار حساس و ناپایدار هستند.

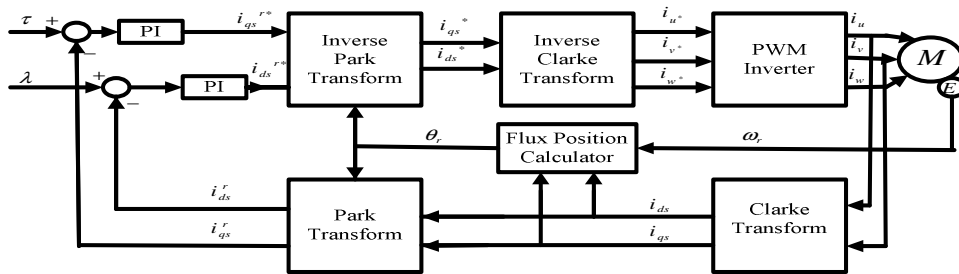
این امر در مورد توربین‌های بادی که از ژنراتور القایی استفاده می‌کنند، بیشتر است. علت آن نیاز ژنراتور القایی به توان راکتیو و بالا بودن جریان مغناطیسی کنندگی می‌باشد [۷]. جبران‌سازی ولتاژهای ضد محرکه روتور یکی از روش‌های مؤثر استفاده شده در محدود کردن جریان‌های هجومی روتور و بهبود حالت‌های دینامیکی است [۹،۸]. کنترل‌کننده‌های خطی تحت کمبود ولتاژهای بزرگ نمی‌توانند به طور مناسب کار کنند. در بعضی مواقع، جهت کنترل جریان روتور، از کنترل‌کننده‌های شبکه عصبی استفاده شده است، اما لزوم جداسازی مؤلفه‌های dq جریان روتور از معایب آن محسوب می‌شود. روش کنترل مستقیم توان ژنراتور القایی دو سو تغذیه، از روش کنترل مستقیم شار

و گشتاور موتورهای القایی نتیجه شده است [۱۰]. در [۱۱] از روش کنترل مستقیم توان برای کنترل توان‌های ژنراتور استفاده شده است. در این مراجع، ابتدا توان‌های اکتیو و راکتیو استاتور به ترتیب با توان‌های مرجع مربوطه مقایسه و خطای آنها به کنترل‌کننده هیستریزس تزریق می‌شود. در نهایت براساس خروجی هیستریزس و موقعیت شار استاتور یا روتور با توجه به جدول سوئیچینگ از پیش تعیین شده، سوئیچینگ مبدل الکترونیک قدرت سمت روتور صورت می‌پذیرد. فرکانس سوئیچینگ در این روش متغیر است، به طوری که این موضوع باعث افزایش هزینه‌ی مربوطه به ادوات الکترونیک قدرت مبدل می‌شود. از دیگر معایب این روش، آن است که هارمونیک‌های زیادی در نتیجه پیاده‌سازی آن تولید می‌شود. از طرفی برای جلوگیری از رخ دادن رزونانس، استفاده از فیلتر هم محدودیت دارد [۱۲]. مهمترین مرحله جهت پایداری سیستم‌های قدرت، بررسی نوسان اول است. اگر پایداری نوسان اول را داشته باشیم، پایداری سیستم قابل برگشت است. در غیر این صورت سیستم ناپایدار می‌شود [۱۳] بنابراین سیستم باید دارای پاسخ دینامیکی سریع باشد. یکی از مهمترین کنترل‌کننده‌هایی که در صنعت به علت سادگی و ارزان بودن زیاد استفاده می‌شود کنترل‌کننده‌ی تناسبی انتگرالی PI است. اما این کنترل‌کننده در برخی موارد دارای عیوبی از جمله افزایش درجه‌ی سیستم (افزایش قطب سیستم) و امکان ناپایداری سیستم برای ضریب بهره تناسبی بزرگ می‌باشد. به طور کلی از تعدادی کنترل‌کننده در توربین بادی DFIG استفاده می‌شود که شامل حلقه‌های کنترل جریان محور q و d روتور، حلقه‌های کنترل سرعت که توسط جریان و ولتاژ q روتور کنترل می‌شود. حلقه‌های کنترل توان راکتیو به دست آوردن جریان محور d روتور می‌باشد. با اعمال کنترل برداری در مبدل سمت روتور در راستای میدان استاتور، توان اکتیو و راکتیو به صورت مستقل کنترل می‌شود. برای پیاده‌سازی کنترل برداری ژنراتور القایی دو سو تغذیه از کنترل‌کننده‌های PI استفاده شده است، که علاوه بر عیوبی که در بالا گفته شده، عیب اصلی کنترل‌کننده PI مقاوم نبودن آن در شرایط تغییر جزئی پارامترهای سیستم و نقطه کار است [۱۴]. در بعضی مواقع از کنترل‌کننده‌های غیرخطی برای این امر استفاده شده است. اما پیچیدگی پیاده‌سازی این نوع کنترل‌کننده‌ها از عیوب آنها محسوب می‌شود [۱۵]. مدل‌سازی دینامیکی قسمت‌های مکانیکی، الکتریکی و کنترل‌کننده‌های PI روتور نشان می‌دهد که پهنای باند این کنترل‌کننده‌ها کم است که باعث کندی پاسخ سیستم می‌شود. بنابراین در این پژوهش، افزایش پهنای باند کنترل‌کننده پیشنهاد می‌گردد. برای بهبود عملکرد کنترل‌کننده‌های PI حلقه‌ی کنترل جریان روتور، حلقه کنترل سرعت روتور و حلقه کنترل قدرت راکتیو، پهنای باند کنترل‌کننده‌ها با میرایی فعال افزایش داده می‌شود و اثرات آن روی پارامترهای کنترلی بررسی می‌شود. با افزایش پهنای باند، ردیابی سیستم و سرعت ردیابی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین اثرات پهنای باند روی مدهای استاتور، پارامترهای کنترل‌کننده‌ها، گشتاور الکتریکی، مدهای مکانیکی، حالت‌های گذرا و نوسانات سرعت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۱- کنترل در راستای میدان FOC^۱

و شار روتور به صورت مستقیم اندازه‌گیری می‌نماید. در روش غیرمستقیم IFOC^۲ زاویه لغزش بین روتور و استاتور بر اساس مشخصات روتور محاسبه شده و با موقعیت فیزیکی روتور جمع می‌شود. وظیفه واحد محاسبه موقعیت شار در شکل (۱)، محاسبه θ_r در IFOC است و موقعیت فیزیکی روتور همیشه با انکودر افزایشی نصب شده روی محور روتور به دست می‌آید. در حال حاضر DFOC کاربرد صنعتی نداشته و FOC مرسوم و متداول در واقع IFOC می‌باشد. برای کنترل مناسب دینامیک موتور القایی در IFOC^۱ باید مولفه‌های i_{ds}^r ، i_{qs}^r با دقت کنترل شوند. به این منظور در دو حلقه‌ی بسته کنترل مجزا، اختلاف مقدار مطلوب و مقدار واقعی اندازه‌گیری شده از موتور به یک کنترل کننده PI داده می‌شود. خروجی کنترل کننده‌های PI در سیستم مختصات دوار مبتنی بر جهت شار و روتور توسط تبدیل معکوس کلارک به سیستم سه فاز منتقل و به اینورتر اعمال می‌شوند. روابط (۱) و (۲) به ترتیب بیانگر تبدیل معکوس پارک و کلارک می‌باشند.

پاسخ‌های دینامیکی ضعیف موتور القایی با کنترل اسکالر و در طرف مقابل این ایده به تدریج تکمیل شد و امروزه به عنوان کنترل برداری جایگاه موتور القایی را چنان ارتقاء داده که بسیاری از کاربردهای موتور DC را به خود اختصاص داده است [۱۶]. کنترل برداری تلاش می‌کند تا دو مؤلفه عمود بر هم را در یک موتور AC تولید کند تا امکان کنترل مستقل جریان مولد گشتاور از جریان مولد شار فراهم شده و پاسخی سریع ایجاد شود. برای بررسی امکان حذف تداخل ذاتی موجود در جریان‌های مولد گشتاور موتور القایی، تئوری کنترل برداری مورد توجه قرار گرفت. شکل (۱) دیاگرام بلوکی الگوریتم FOC را نشان می‌دهد τ گشتاور و λ شار مغناطیسی مطلوب است. شرط لازم برای کنترل مستقل شار و گشتاور در FOC، صحت جهت‌یابی شار روتور و به عبارت بهتر هم راستا بودن i_{ds}^r با بردار شار روتور می‌باشد و این امر مشروط به داشتن زاویه θ_r است. بسته به روش تعیین θ_r ، FOC به دو روش مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شود. در روش مستقیم DFOC^۲ یک سنسور اثر هال و یا یک سیم‌پیچ درون موتور تعبیه شده



شکل (۱): دیاگرام بلوکی الگوریتم FOC را نشان می‌دهد.
Fig. (1): Block diagram of the FOC algorithm.

$$P_{ww} = C_p(\lambda, \theta) P_{wind} = C_p(\lambda, \theta) \frac{1}{2} \rho A v_{wind}^3 \quad (۳)$$

$$T_{ww} = \frac{P_{ww}}{w_{mech}} l = \frac{w_{mech} R}{V_{wind}} = TSR \quad (۴)$$

P_{ww} توان خروجی و T_{ww} گشتاور خروجی توربین بادی می‌باشند. در روابط فوق C_p ضریب قدرت توربین نامیده می‌شود و همواره بین صفر تا ۰/۴۴۷۷ قرار خواهد داشت V_{wind} سرعت باد درست قبل از برخورد با پره‌هاست w_{mech} در رابطه‌ی (۴) سرعت زاویه‌ای شفت توربین بر حسب رادیان مکانیکی بر ثانیه می‌باشد. همان طور که در رابطه‌ی (۳) نیز مشهود است؛ C_p تابع θ, λ می‌باشد. در واقع نسبت سرعت خطی نوک پره توربین به سرعت باد می‌باشد. R شعاع هر پره و πR^2 مساحتی است که پره‌ها هنگام چرخش جاروب می‌کنند. θ نیز زاویه پیش‌ش زاویه پره‌ها می‌باشد. رابطه (۵) ارتباط بین C_p, θ, λ را نشان می‌دهد.

$$C_p(\lambda, \theta) = C_1 \left(C_2 \frac{1}{\lambda} - C_3 \theta - C_4 \theta^2 - C_5 \right) \exp \left(- C_6 \frac{1}{\lambda} \right) \quad (۵)$$

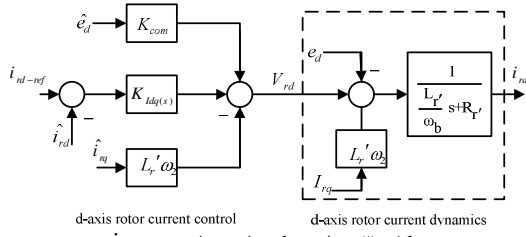
با توجه به اینکه هدف، علاوه بر کنترل دقیق گشتاور، کنترل سرعت می‌باشد، مطابق شکل (۱) حلقه‌ی کنترلی گشتاور شکل (۱) در کنار حلقه‌ی کنترلی سرعت قرار می‌گیرد. FOC با استفاده از اطلاعات دریافتی، مولفه‌های مولد شار و گشتاور را به صورت مستقل کنترل نموده و ولتاژ، جریان و فرکانس مناسب را از طریق اینورتر PWM^۴ به موتور اعمال می‌نماید.

$$\begin{bmatrix} i_{ds}^r \\ i_{qs}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & -\sin \theta_r \\ \sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^* \\ i_{qs}^* \end{bmatrix} \quad (۱)$$

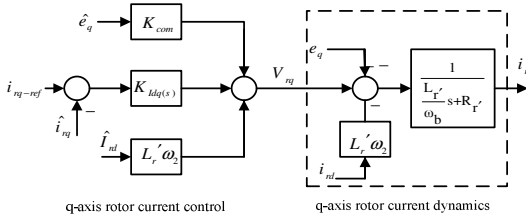
$$\begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^* \\ i_{qs}^* \end{bmatrix} \quad (۲)$$

۲-۱- توان مکانیکی استخراج شده از باد توسط توربین

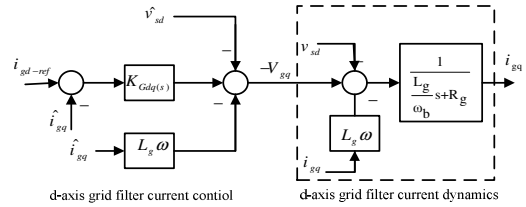
توان مکانیکی و گشتاوری که از باد توسط چرخش توربین استخراج می‌شود، همواره برابر ضریبی از توان باد می‌باشد. این توان از روابط (۳) و (۴) قابل محاسبه است [۱۷].



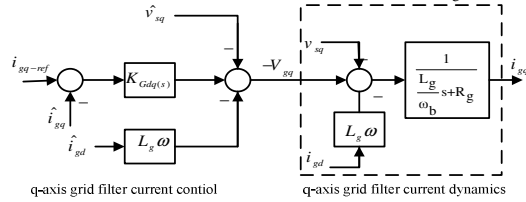
شکل (۳): حلقه‌ی کنترلی جریان روتور i_{rd}
Fig. (3): Rotor current control loop i_{rd}



شکل (۴): حلقه‌ی کنترلی جریان روتور
Fig. (4): Rotor current control loop



شکل (۵): حلقه‌ی کنترلی جریان فیلتر شبکه i_{gd}
Fig. (5): Flow control loop filter network i_{gd}



شکل (۶): حلقه‌ی کنترلی جریان فیلتر شبکه i_{gq}
Fig. (5): Flow control loop filter network i_{gq}

در اینجا $i_{rdq-ref}$ مؤلفه‌های جریان مرجع d-q روتور را نشان می‌دهد. در رابطه‌ی (۱۰) K_{com} می‌تواند صفر یا یک باشد. این معنی را می‌دهد که ولتاژهای نیروی ضد محرکه‌ی القایی به وسیله کنترل‌کننده‌های جریان روتور جبران می‌شوند و این معنی را می‌رساند که آنها جبران نمی‌شوند.

۱-۶- مدل فیلتر طرف شبکه

فیلتر نشان داده شده در شکل (۲)، شامل یک اندوکتانس L_g و مقاومت R_g می‌باشد و حالت‌های دینامیکی آن به صورت رابطه‌ی (۱۱) توصیف می‌شود. در اینجا اندیس g مقادیر فیلتر شبکه را نشان می‌دهد و V_{gdq} و i_{gdq} به ترتیب مؤلفه‌های d-q ولتاژ ترمینال ژنراتور و جریان و ولتاژ فیلتر طرف شبکه هستند. V_g از مبدل طرف شبکه تغذیه می‌شود. حلقه‌های کنترلی جریان d-q فیلتر طرف شبکه، تحت جبران متغیرهای تزویج متقابل در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است. در این شکل، ولتاژهای V_{sdq} و V_{sqd} به عنوان اختلال نشان داده

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda + 0.80\theta} - \frac{0.035}{1 + \theta^3} \quad (۶)$$

۳-۱- مدل روتور حالت‌های دینامیکی روتور بر حسب جریان روتور و فلوی استاتور به صورت زیر اثبات و توصیف می‌شود:

$$\frac{L_r'}{\omega_b} \frac{di_{rdq}}{dt} = -R_r' i_{rdq} - j\omega_2 L_r' i_{rdq} - e_{dq} + V_{rdq} \quad (۷)$$

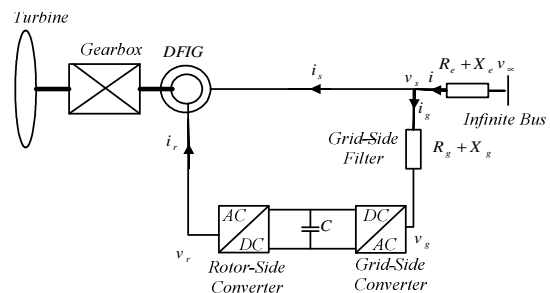
$$L_r' = L_r - \frac{L_m^2}{L_s}, R_r' = R_r + \left(\frac{L_m}{L_s}\right)^2 R_s \quad (۸)$$

$$e_{dq} = \frac{L_m}{L_s} \left(V_{sdq} - j\omega_r \psi_{sdq} - \frac{R_s}{L_s} \psi_{sdq} \right) \quad (۹)$$

ω_r سرعت روتور و معادل رابطه $\omega_r = \omega - \omega_2$ می‌باشد. متغیرهای e_d و e_q توابعی از فلوی استاتور و ولتاژ استاتور هستند. این متغیرها، ولتاژهای نیروی ضد محرکه القایی روتور نامیده می‌شوند و اثرات حالت‌های دینامیکی استاتور را روی حالت‌های دینامیکی جریان روتور منعکس می‌کنند و نقش مهمی در عملکرد گذرای DFIG دارند. با جبران‌سازی ترم‌های تزویج متقابل عرضی $\omega_2 L_r' i_{rq}$ و $\omega_2 L_r' i_{rdq}$ حلقه‌های کنترلی جریان d-q روتور، مستقل می‌شوند. ولتاژهای نیروی ضد محرکه‌ی القایی e_d و e_q به عنوان اختلال در حلقه‌های کنترلی جریان در شکل‌های (۳) و (۴) معرفی می‌شوند. بالانویس $\hat{\cdot}$ در شکل‌ها متغیرهای اندازه‌گیری شده یا محاسبه شده در ورودیهای کنترلی را مشخص می‌کنند. به منظور کاهش ردیابی خطا، و بهبود دینامیکی جریان‌های روتور ولتاژهای نیروی ضد محرکه‌ی القایی به وسیله کنترل‌کننده‌های متغیرهای جریان به صورت پیشخور جبران می‌شوند. با در نظر گرفتن کنترلی روتور به صورت PI و همچنین با ساختار کنترلی شکل‌های (۳) و (۴) تحت جبران‌سازی ترم‌های تزویج متقابل، ولتاژ d-q روتور می‌تواند به صورت رابطه‌ی (۱۰) بیان می‌شود.

$$V_{rdq} = K_{p-idq} (i_{rdq-ref} - i_{rdq}) + \quad (۱۰)$$

$$\frac{K_{i-idq}}{s} (i_{rdq-ref} - i_{rdq}) + j\omega_2 L_r' i_{rdq} + K_{com} e_{dq}$$

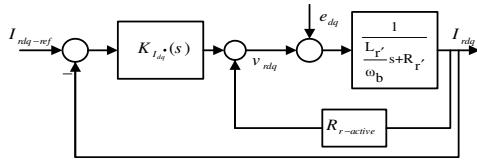


شکل (۲): توربین به همراه DFIG متصل شده به باس بی‌نهایت
Fig. (2): Turbines with DFIG connected to an infinite bus

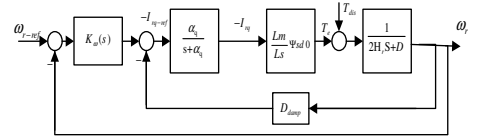
$$\Psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd}, \Psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \quad (22)$$

۲-۱- بهبود عملکرد گذرای توربین‌های بادی مجهز به ژنراتورهای

القایی دو سو تغذیه با استفاده از استراتژی میرایی فعال ولتاژهای نیروی ضد محرکه‌ی القایی (BACK EMF) در DFIG اثرهای دینامیکی استاتور را روی جریان‌های دینامیکی روتور منعکس می‌کند و نقش مهمی روی جریان هجومی روتور در ضمن کمبود ولتاژ ژنراتور دارد. جبران‌سازی این ولتاژها می‌تواند قابلیت متصل به شبکه ژنراتور را بهبود دهد و جریان‌های گذرای روتور را محدود کند.



شکل (۸): حلقه‌ی کنترل جریان رتور با میرایی مؤثر
Fig. (8): Rotor current control loop with active damping



شکل (۹): حلقه‌ی کنترل سرعت با میرایی مؤثر
Fig. (9): Speed control loop with active damping

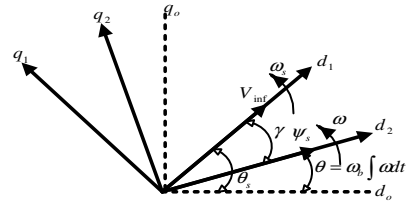
حالت‌های دینامیکی داخلی و خارجی DFIG به ترتیب شامل حالت‌های دینامیکی استاتور و روتور می‌باشند. در این مورد از کنترل‌کننده با میرایی فعال استفاده می‌کنیم. در میان راهکارهای مختلف برای به کارگیری توربین‌های بادی سرعت متغیر، سیستم ژنراتور القایی تغذیه دابل دارای مشهوریت بیشتری شده است. شکل (۲) بلوک دیاگرام توربین بادی مجهز به DFIG را که از طریق امپدانس معادل شبکه به یک باس بی‌نهایت متصل شده، نشان می‌دهد. از نقطه نظر کارایی، سیستم تولید توان به سه فاز عملکردی دسته‌بندی می‌شود: قبل از وقوع خطا، موقع وقوع خطا و پس از برطرف شدن خطا. مطلوب است که توربین‌های بادی به صورت متصل به شبکه باقی بمانند و به طور فعال در ضمن وقوع خطاها و پس از برطرف شدن آنها و اختلالات شبکه جهت پایداری سیستم، مشارکت داشته باشند. نشان داده می‌شود که حالت‌های دینامیکی استاتور، دارای میرایی اندکی می‌باشند. با توجه به اینکه مقاومت رتور R'_r خیلی کوچک‌تر از اندوکتانس L'_r می‌باشد، بنابراین پاسخ جریان روتور به ولتاژ ضد محرکه روتور کند است. برای حل این مشکل پهنای باند حلقه باز سیستم باید افزایش یابد که این کنترل، میرایی فعال نامیده می‌شود. پهنای باند در واقع قدر مطلق قطب سیستم روتور است. حلقه کنترل جریان با میرایی فعال در شکل (۸) نشان داده شده با توجه به شکل (۸)، برای بهبود پهنای باند حلقه بسته باید رابطه‌ی (۲۴) را داشته باشیم. $\alpha_{s-active}$ پهنای باند با میرایی فعال و $R_{r-active}$ مقاومت میرایی فعال می‌باشد.

می‌شوند. به منظور کاهش ردیابی خطا، این ولتاژها با استفاده از متغیرهای پیشخور نشان داده شده در شکل‌های (۵) و (۶) جبران می‌شوند.

$$\frac{L_g}{\omega_b} \frac{di_{gdq}}{dt} = -R_g i_{gdq} - j\omega L_g i_{gdq} - V_{gdq} + V_{sdq} \quad (11)$$

۷-۱- مدل کردن استاتور متصل به شبکه

با در نظر گرفتن کنترل برداری در راستای فلوی استاتور کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو ممکن می‌شود. در مدل مرجع گردان، متغیرهای d-q در حالت ماندگار ثابت‌اند که برای مدل سیگنال کوچک در یک نقطه کار انتخابی مناسب می‌باشد.



شکل (۷): دیاگرام فازوری در دستگاه dq
Fig. (7): Phasor diagrams in the dq set

هدف از این قسمت معرفی مدل دینامیکی یک سیستم تک ماشینه متصل به شین بی‌نهایت در دستگاه مرجع d-q با در نظر گرفتن راستای میدان استاتور می‌باشد. در روابط فوق Ψ ، v و i به ترتیب معرف شار، ولتاژ و جریان هستند. اندیسهای s و r به ترتیب کمیت‌های استاتور و روتور را نشان می‌دهند. L_r و L_s اندوکتانس‌های خودی استاتور و روتور هستند، L_m اندوکتانس متقابل، ω_2 فرکانس لغزش روتور، ω_b فرکانس زاویه‌ای اساسی و ω سرعت قاب مرجع d-q منطبق با فلوی استاتور می‌باشد. همچنین R_r و R_s مقاومت‌های استاتور و روتور هستند.

$$\Psi_{sd} = \Psi_s \quad \Psi_{sq} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{d\Psi_{qs}}{dt} = \omega_b (V_{qs} - R_s i_{qs} - \omega \Psi_{ds}) \quad (13)$$

$$\frac{d\Psi_{ds}}{dt} = \omega_b (V_{ds} - R_s i_{ds} + \omega \Psi_{qs}) \quad (14)$$

$$T_e = \frac{L_m (\Psi_{qs} i_{dr} - \Psi_{ds} i_{qr})}{L_s} \quad (15)$$

$$\Psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr}, \Psi_{ds} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (16)$$

$$\Psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds}, \Psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (17)$$

$$P_s = V_{dr} i_{dr} + V_{qr} i_{qr}, P_r = V_{dr} i_{dr} + V_{qr} i_{qr} \quad (18)$$

$$Q_s = V_{ds} i_{qs} - V_{qs} i_{ds} \quad (19)$$

$$\frac{L_e}{\omega_b} \frac{di_d}{dt} = -R_e i_d + \omega L_e i_q - V_{sd} + V_{\%d} \quad (20)$$

$$V_{sd} = R_s i_{sd} - \omega \Psi_{sq} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\Psi_{sd}}{dt} \quad (21)$$

کاهش ولتاژ و نوسانات سرعت باد داریم بر روی سیستم تحلیل می‌کند. مشتق‌گیری از معادلات دینامیکی ماشین حول نقطه‌ی تعادل مدل فضای حالت سیستم معادلات سیگنال کوچک به دست می‌آیند. شکل کلی مدل فضای حالت ماشین به صورت زیر است [۱۹].

$$\dot{x} = f(x, z, u) = Ax + Bu \quad (28)$$

$$x = \begin{bmatrix} \Psi_{sd}, \gamma, i_{rd}, X_5, X_6, X_7, X_8 \\ \omega_r, \beta, \omega_t, i_{gq}, X_{14}, X_{15}, V_{dc}, X_{17} \end{bmatrix}^T$$

$$u = [\omega_{r-ref}, Q_{s-ref}, V_{dc-ref}, V_{inf}, V_w, I_{gd}]^T$$

معادلات حالت سیستم از روابط (۲۹) تا (۴۶) به دست می‌آید.

$$\frac{d\Psi_{sd}}{dt} = \left(\frac{\omega_b L_s}{L_s + L_e} \right) \begin{bmatrix} -\frac{R_s + R_e}{L_s} \Psi_{sd} \\ + \frac{R_s + R_e}{L_s} L_m i_{rd} - R_e i_{gd} \\ - \frac{L_e L_m}{L_s} \omega_{irq} + L_e \omega_{igq} \\ + \left(\frac{L_e L_m}{\omega_b L_s} \right) \left(\frac{\omega_b}{L'_r} \right) (-R'_r i_{rd} + V_{rrd}) \\ - \left(\frac{L_e}{\omega_b} \right) \left(\frac{\omega_b}{L_g} \right) (-R_g i_{gd} + V_{ggd}) + V_\psi \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \omega_b (\omega_s - \omega) \quad (30)$$

$$\frac{di_{rd}}{dt} = \left(\frac{\omega_b}{L'_r} \right) (-R'_r - R_{r-active}) i_{rd} + V_{rrd} \quad (31)$$

$$\frac{di_{rq}}{dt} = \left(\frac{\omega_b}{L'_r} \right) (-R'_r - R_{r-active}) i_{rq} + V_{rrq} \quad (32)$$

$$\frac{dx_5}{dt} = K_{i-idq} (i_{rd-ref} - i_{rd}) \quad (33)$$

$$\frac{dx_6}{dt} = K_{i-idq} (i_{rq-ref} - i_{rq}) \quad (34)$$

$$\frac{dx_7}{dt} = K_{I\omega} (\omega_{r-ref} - \omega_r) \quad (35)$$

$$\frac{dx_8}{dt} = K_{I-pf} (Q_{s-ref} - Q_s) \quad (36)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{T_e + K_s \beta + D (\omega_t - \omega_r)}{2H_r} \quad (37)$$

$$\frac{d\beta}{dt} = \omega_b (\omega_t - \omega_r) \quad (38)$$

$$\frac{d\omega_t}{dt} = \frac{T_m - K_s \beta - D (\omega_t - \omega_r)}{2H_t} \quad (39)$$

$$\frac{di_{gd}}{dt} = \frac{\omega_b}{L_g} (-R_g i_{gd} + V_{ggd}) \quad (40)$$

$$\frac{di_{gq}}{dt} = \frac{\omega_b}{L_g} (-R_g i_{gq} + V_{ggq}) \quad (41)$$

$$\alpha_s = \frac{R'_r}{L'_r} \omega_b \quad (23)$$

$$\alpha_{s-active} = \frac{R'_r + R_{r-active}}{L'_r} \omega_b \quad (24)$$

۲-۲- مدل مکانیکی توربین بادی و کنترل کننده سرعت

مدل مکانیکی توربین بادی شامل توربین، جعبه دنده، محورها و دیگر قطعات مکانیکی می‌باشد. مدل‌های مکانیکی دو جرمی DFIG در مرجع [۱۸] آورده شده‌اند:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{T_e + K_s \beta + D (\omega_t - \omega_r)}{2H_r} \quad (25)$$

$$\frac{d\omega_t}{dt} = \frac{T_m - K_s \beta - D (\omega_t - \omega_r)}{2H_t} \quad (26)$$

$$\frac{d\beta}{dt} = \omega_b (\omega_t - \omega_r) \quad (27)$$

که ω_t و ω_r به ترتیب سرعت‌های ژنراتور و توربین (بر حسب پرینیت) هستند، β زاویه پیچشی شافت (بر حسب رادیان)، و H_t و H_r به ترتیب ثابت‌های اینرسی ژنراتور و توربین هستند (بر حسب ثانیه)،

K_s ضریب سختی محور (بر حسب پرینیت بر رادیان الکتریکی) و D ضریب میرایی (بر حسب پرینیت) و T_m ، T_e به ترتیب گشتاور الکتریکی ژنراتور و گشتاور مکانیکی توربین هستند (بر حسب پرینیت) با در نظر گرفتن راستای فلوی استاتور، سرعت روتور به وسیله مؤلفه جریان و ولتاژ q روتور (V_{rq}, i_{rq}) کنترل می‌شوند. طرح کنترلی استفاده شده برای کنترل سرعت در شکل (۹) نشان داده شده است. در این شکل،

a_q پهنای باند حلقه کنترل جریان محور q روتور می‌باشد و کنترل کننده سرعت به صورت $T'_m = K_s \beta + D \omega_t$ با به کارگرفتن یک کنترل کننده PI برای

کنترل کننده سرعت $K_w(s) = K_{pw} + \left(\frac{K_{iw}}{s} \right)$ یک متغیر میراکننده‌ی فعال برای افزایش پهنای باند حلقه باز $\alpha_t = \frac{D}{2H_r}$ به مقدار

در کنترل کننده نشان داده در شکل (۹)، می‌تواند استفاده شود و در نتیجه پاسخ دینامیکی سرعت روتور بهبود می‌یابد.

استفاده شده است.

استفاده شده است.

استفاده شده است.

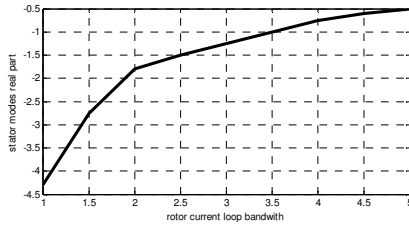
استفاده شده است.

استفاده شده است.

استفاده شده است.

استفاده شده است.

استفاده شده است.



شکل (۱۱): تغییرات بخش حقیقی مدهای

استاتور نسبت به تغییر پهنای

Fig. (11): Changes of the real modes v.s change of the width of the stator

مد λ_{12} مد الکترومکانیکی و متغیر ω_r بسترین تاثیر را دارد. مد λ_{13} مد دارای میرایی ضعیفی است. مدهای $\lambda_{14,15}$ مربوط به v_{dc} و میرایی ضعیفی دارد. مد λ_{16} مد الکترومکانیکی و متغیر X_{16} بیشترین تاثیر را دارد. مد λ_{17} مد الکترومکانیکی و متغیر X_{14} بیشترین تاثیر را دارد. ضرائب مشارکت نشان می‌دهند که پس از γ, ψ_{sd} متغیرهای حالت i_{rd}, i_{rd} بیشترین اثر را روی مدهای میرایی کوچک استاتور $\lambda_{3,4}$ دارند. به طور معمول با افزایش پهنای باند کنترل حلقه بسته‌ی جریان رتور α_{dq} دینامیک‌های جریان رتور بهبود می‌یابد، خطای تعقیب متغیرهای حالت رتور کاهش و گذراهای جریان رتور محدود می‌شود. اما باید دید که اثر تغییر پهنای باند α_{dq} در مدهای ناکافی میرایی استاتور چگونه است. شکل (۱۰) قسمت حقیقی مدهای استاتور نسبت α_{dq} را نشان می‌دهد با توجه به شکل (۱۱) با افزایش پهنای باند α_{dq} با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها میرایی مدهای استاتور کاهش قابل توجهی دارند

۲-۴- حساسیت مدهای استاتور نسبت به جریان d رتور

در حالت کلی توان راکتیو از رابطه‌ی (۴۷) به دست می‌آید. با کنترل برداری در راستای شار استاتور، و پس از ساده کردن روابط توان راکتیو مستقیماً متناسب با i_{rd} از رابطه‌ی (۴۸) به دست می‌آید. بیشترین اثر روی مدهای ناکافی میرا شده‌ی استاتور را خود متغیرهای حالت استاتور دارند و این متغیرهای حالت نسبت به تغییرات i_{rd} بسیار اثرپذیرند. i_{rd} علاوه بر گذر از P.F واحد به سمت P.F پیش فاز Leading که منجر به تزریق توان راکتیو DFIG به شبکه می‌شود، میرایی مدهای استاتور را نیز به طور عمده کاهش می‌دهد. به طور معمول کنترل و تولید توان راکتیو توسط مبدل RSC در حالت افزایش i_{rd} و کارکردن DFIG در مُد Leading P.F در شرایط عادی موجب بهبود پروفیل ولتاژ شبکه، شاخص کیفیت توان و در شرایط پس از خطا می‌تواند به بازیابی ولتاژ شبکه کمک نماید اما میرایی مدهای دینامیکی استاتور را خراب می‌کند. (جدول (۲) را نگاه کنید).

۲-۵- جبران ولتاژهای BEMF رتور

با گنجاندن عبارت پیشرو $k_{com} e_{dq}$ در حلقه‌ی کنترل جریان رتور، ولتاژهای BEMF رتور که منعکس‌کننده‌ی دینامیک‌های استاتور در معادلات دینامیکی رتور هستند با هدف کاهش خطای تعقیب متغیرهای رتور از مراجعشان جبران می‌شود.

$$\frac{dx_{14}}{dt} = K_{i-g} (i_{gd-ref} - i_{gd}) \quad (42)$$

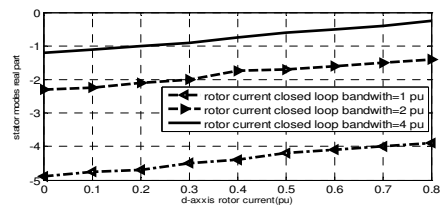
$$\frac{dx_{15}}{dt} = K_{i-g} (i_{gq-ref} - i_{gq}) \quad (43)$$

$$\frac{dx_{\beta}}{dt} = K_{i-\beta} (P_g - P_{g-ref}) \quad (44)$$

$$\frac{d\beta_p}{dt} = \frac{1}{T_{\beta}} (\beta_{p-ref} - \beta_p) \quad (45)$$

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \left(\frac{\omega_b}{CV_{dc}} \right) (P_{Tr} - P_{gg}) \quad (46)$$

بردار ستونی X بردار حالت، و عناصر آن، متغیر حالت نامیده می‌شوند. بردار ستونی u بردار ورودی‌های سیستم بردار کنترل است که سیگنال‌های خارجی هستند که بر عملکرد سیستم تأثیر می‌گذارند. با تحلیل مُدال سیستم با مشخصات داده شده در ضمیمه از جدول تحلیل مُدال (۱) نتایج زیر به دست می‌آید: مدهای جریان رتور $\lambda_{1,2}$ بسیار سریع و متغیرهای i_{dr} و i_{gr} بیشترین مشارکت را در این مدها دارند. بخش حقیقی این مدها تقریباً برابر با پهنای باند حلقه بسته‌ی جریان رتور α_{dq} است. بنابراین بزرگ بودن این پهنای باند منجر به میرایی سریع‌تر این مدها می‌گردد. مدهای $\lambda_{3,4}$ مدهای دینامیکی استاتور دارای میرایی ضعیفی هستند. فرکانس طبیعی نزدیک به فرکانس شبکه دارند. γ, ψ_{sd} بیشترین مشارکت را در این مدها دارند. در بین کلیه‌ی مدهای سیستم این مدها بالاترین اثر را روی رفتار گذرای و رفتار پس از گذرا DFIG دارند. دینامیک‌های رتور بهبود و از دینامیک‌های استاتور مستقل شوند و جریان هجومی رتور در طول خطاهای افت شدید ولتاژ، کاهش می‌یابد و نوسانات ولتاژ لینک DC حذف می‌گردد. مد λ_5 متناظر است با متغیر X_5 و میرایی سریعی دارد. مد λ_6 مدهای الکترومکانیکی است و متغیرهای β اثر زیادی روی این مد دارند. مد λ_6 متناظر است با متغیر ω_r و میرایی ضعیفی دارد. مد λ_7 مربوط به فیلتر طرف شبکه است و میرایی ضعیفی دارد. مد λ_8 متناظر است با متغیر ω_r و QS میرایی سریعی دارد. مدهای $\lambda_{9,10}$ متناظر است با متغیر ω_r و QS میرایی سریعی دارد. مد λ_{11} مربوط به فیلتر طرف شبکه است و میرایی ضعیفی دارد.



شکل (۱۰): بخش حقیقی مدهای استاتور نسبت به تغییرات i_{rd} تحت چند پهنای باند مشخصه حلقه‌ی بسته‌ی جریان رتور

Fig. (10): The real modes of the stator to changes under the closed loop bandwidth characteristic of the rotor

Table (1): Modal Parameters

جدول (۱): پارامترهای مدال

مدها	فرکانس نوسان	نسبت میرایی	متغیرهای حالت با بیشترین ضریب مشارکت
$\lambda_1 = -1173.9$	0	1	$I_e = I_{\psi} = 49.83\%$
$\lambda_2 = -1208.3$	0	1	$I_{\psi} = I_e = 49.83\%$
$\lambda_3 = -2.1 + 367j$	58.011	0.0058	$\psi_{sd} = 97.54\%$
$\lambda_4 = -2.1 - 367j$	58.011	0.0058	$x_5 = 98.85\%$
$\lambda_5 = -601.8$	0	1	$\omega = 99.36\%$
$\lambda_6 = -59.6$	0	1	$\omega_1 = 97.42\%$
$\lambda_7 = -2.6 + 13j$	2.072	0.1969	$I_{\psi} = I_{\psi} = 49.34\%$
$\lambda_8 = -2.6 - 13j$	2.072	0.1969	$x_{15} = 99.4\%$
$\lambda_9 = -1259.4$	0	1	$x_7 = x_8 = 42.8\%$
$\lambda_{10} = -2$	0	1	$x_9 = x_{10} = 49.28\%$
$\lambda_{11} = -1.9$	0	1	$I_{\psi} = I_{\psi} = 42.5\%$
$\lambda_{12} = -0.4 + 0.2j$	0.034	1	$\omega_1 = 99.92\%$
$\lambda_{13} = -0.4 - 0.2j$	0.034	0.8766	$\gamma = 93.87\%$
$\lambda_{14} = -0.5$	0	0.8766	$x_{17} = 99.92\%$
$\lambda_{15} = -0.5$	0	1	$\psi_{sk} = 99.92\%$
$\lambda_{16} = -1$	0	1	$x_6 = 94.57\%$
$\lambda_{17} = -1$	0	1	$x_{14} = 99.3\%$

Table (2): Power factor as a function of the rotor stator

جدول (۲): ضریب قدرت استاتور به صورت تابعی از جریان روتور

I_{rd}	0.172	0.345	0.689	0.862
ضریب قدرت	0.984	1	0.916	0
	lag		lead	lead

$$Q_s = V_{sd} I_{sq} - V_{sq} I_{sd} \quad (47)$$

$$Q_s = \frac{\omega_s}{L_s} \psi_{sd} (L_m i_{rd} - \psi_{sd}) \quad (48)$$

با توجه به رابطه‌ی (۹) ولتاژهای BEMF روتور وابسته به متغیرهای حالت استاتور هستند و این امکان وجود دارد که با جبران این ولتاژها (میرایی $k_{com} = 1$) مدهای دینامیکی استاتور $\lambda_{3,4} = -0.42 \pm 375j$ تحت تأثیر قرارگیرد. نسبت با حالت بدون جبران ولتاژهای BEMF میرایی بسیار کمتر شده است. و بقیه مدها تقریباً بدون تغییر باقی می‌مانند. اگر چه جبران e_{dq} منجر به کاهش خطای تعقیب جریان رتور می‌شود اما کاهش میرایی مدهای استاتور را به دنبال دارد. پس برای طراحی حلقه‌های داخلی کنترل جریان باید مسامحه‌ای بین میزان کارایی جبران این ولتاژها و پایداری مدهای استاتور صورت گیرد.

۲-۶- حساسیت مدهای استاتور نسبت به امیدانس شبکه:

در تحلیل مدال انجام شده فرض شد که سیستم DFIG بدون امیدانس به شبکه متصل شده است. نسبت اتصال کوتاه SCR در

نقطه‌ی PCC بی‌نهایت فرض شده است. در این قسمت برای بررسی اثر وصل DFIG با امیدانس به شبکه روی میرایی مدهای استاتور، برای نقطه PCC، SCR را برابر 10pu در نظر می‌گیریم. با R_e/L_e نتایج تحلیل مدال در این حالت نشان می‌دهد $\lambda_{3,4} = -14.04 \pm 331j$ که وجود امیدانس شبکه باعث بهبود میرایی مدهای استاتور شده است در حالی که دیگر مدها تقریباً بدون تغییر مانده‌اند.

۲-۷- حساسیت مقادیر ویژه و عامل مشارکت

حساسیت بیان تأثیرپذیری کار سیستم بر اثر تغییرات پارامترهای سیستم است.

$$\frac{\lambda_i}{a_{ki}} = \psi_{ik} \phi_{ji} \quad (49)$$

حساسیت مقدار ویژه λ_i به عنصر a_{ki} از ماتریس حالت مساوی حاصل ضرب عنصر ویژه ψ_{ik} و عنصر بردار ویژه راست ϕ_{ji} می‌باشد. عامل مشارکت که به عنوان اندازه‌ای از رابطه بین متغیرهای حالت و مدها می‌باشد که بردار ویژه‌ی راست و چپ را به صورت زیر ترکیب می‌کند.

$$P_i = [P_{i1} P_{i2} \dots P_{in}]^T = \begin{bmatrix} \psi_{i1} \times \psi_{i1} \\ \psi_{i2} \times \psi_{i2} \\ \vdots \\ \psi_{in} \times \psi_{in} \end{bmatrix} \quad (50)$$

$$P_{ki} = \frac{\lambda_i}{kk} = \psi_{ik} \phi_{ki} \quad (51)$$

که در آن ϕ_{ki} ، k امین ورودی بردار ویژه راست ϕ_i است. ψ_{ik} ، k امین ورودی بردار ویژه چپ ψ_i است. عنصر $P_{ki} = \phi_{ki} \cdot \psi_{ik}$ ضریب مشارکت نامگذاری شده است که سنجشی از مشارکت نسبی k امین متغیر حالت در k امین مد و بالعکس می‌باشد. از آنجا که ϕ_{ki} فعالیت x_k در k امین مد را اندازه‌گیری کرده، ψ_{ik} سهم این فعالیت را وزن‌دهی می‌کند، حاصل ضرب P_{ki} مشارکت خالص را اندازه‌گیری می‌کند. همچنین تأثیر ضرب کردن عناصر بردارهای ویژه چپ و راست در بدون بعد کردن P_{ki} ظاهر می‌شود. به عبارت دیگر، مستقل از انتخاب واحدها می‌باشد.

۲-۸- آنالیز حساسیت مدهای استاتور

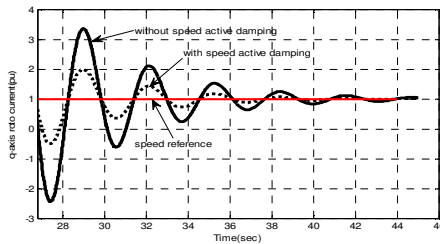
همان طور که مشاهده شد مدهای استاتور دارای میرایی ضعیفی هستند. این مدها اثر قابل توجهی روی کارایی گذرای DFIG به ویژه حین و پس از خطا دارند. در ادامه حساسیت این مدها نسبت به مواردی از قبیل α_{dq} ، میرایی مؤثر حلقه‌ی کنترل جریان روتور، ولتاژهای BEMF روتور بررسی می‌شود. ضرائب مشارکت در جدول (۱) نشان می‌دهند که پس از ψ_{sd} ، γ ، متغیرهای حالت I_{rd} و I_{rq} بیشترین اثر را روی مدهای میرایی کوچک استاتور $\lambda_{3,4}$ دارند. به طور معمول با افزایش پهنای باند کنترل حلقه بسته‌ی جریان رتور α_{dq} دینامیک‌های جریان رتور بهبود می‌یابد، خطای تعقیب متغیرهای حالت رتور کاهش و گذراهای جریان رتور محدود می‌شود. اما باید دید که اثر تغییر پهنای باند α_{dq} در مدهای ناکافی میرایی استاتور چگونه است. شکل (۱۰)

(۲) واضح است که افزایش i_{rd} علاوه بر گذر از P.F واحد به سمت P.F پیش فاز (Leading) که منجر به تزریق توان راکتیو DFIG به شبکه می‌شود، میرایی مدهای تحت جبران e_{dq} نشان می‌دهد. اگرچه جبران e_{dq} منجر به کاهش خطای تعقیب جریان رتور می‌شود اما کاهش میرایی مدهای استاتور را به دنبال دارد. پس برای طراحی حلقه‌های داخلی کنترل جریان باید مسامحه‌ای بین میزان کارایی جبران این ولتاژها و پایداری مدهای استاتور صورت گیرد.

$$\frac{\lambda_3}{R_{r-active}} = \frac{\lambda_4}{a_{33}} \frac{a_{33}}{R_{r-active}} + \frac{\lambda_3}{a_{44}} \frac{a_{44}}{R_{r-active}} \quad (52)$$

۹-۲- تحلیل حساسیت مدهای مکانیکی

مطابق جدول (۱) میرایی مدهای مکانیکی $\lambda_{12,13}$ نسبتاً کوچک است. متغیرهای حالت اثر گذار در این مدها ω_r و γ هستند که هر دو وابسته به ω_r می‌باشند. بنابراین می‌توان با تغییر پهنای باند کنترل سرعت پهنای باند حلقه باز $\alpha_r = \frac{D}{2H_r}$ و پهنای باند حلقه بسته $\alpha_\omega = \frac{k_{P-\omega} L_m \Psi_{s0}}{2H_r L_s}$ با روشهایی مثل میرایی مؤثر، میرایی این مدها را افزایش داد. یادآور می‌شویم که متغیرهای حالت با بالاترین اثرگذاری در مدهای $\lambda_{5,6}$ ، ω_r و β هستند که β نیز وابسته به ω_r بوده، و در نتیجه می‌توان با پهنای باند کنترلر سرعت روی این مدها نیز اثر گذاشت [۲۰، ۲۱].



شکل (۱۳): پاسخ DFIG به تغییر پله در مرجع سرعت ژنراتور جریان محور Q روتور

Fig. (13): DFIG response to step changes in the Q-axis current generator rotor reference rate

برای ایجاد تغییر در پهنای باند حلقه‌ی باز می‌توان از میرایی مؤثر استفاده نمود: $\alpha = \frac{D}{2H_r} + \frac{L_m}{2H_r L_s \Psi_{sd}}$ برای بررسی و تأیید مفید بودن استفاده از روش میرایی مؤثر، شبیه‌سازی حوزه‌ی زمان با ایجاد یک تغییر پله‌ای در مرجع سرعت توربین باد ω_{ref} به $1.2pu$ و $1.3pu$ در $t=28sec$ انجام شده است و نتایج در شکل (۱۱) آمده است. طبق رابطه $\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{T_e + K_s \beta + D(\omega_r - \omega_r)}{2H_r}$ و $T_e = -\frac{L_m}{L_s} \Psi_{sd} i_{rq}$ سرعت روی گشتاور الکتریکی و گشتاور الکتریکی روی جریان محور Q رتور تأثیرگذار است. به همین خاطر در شکل (۱۲) اثر میرایی مؤثر سرعت روی این جریان نیز بررسی شده است. نتایج بیانگر بهبود کارایی دینامیکی DFIG تحت میرایی مؤثر سرعت بوده و همچنین نشان می‌دهند که زمان نشست و بالازدگی نیز بهبود یافته است.

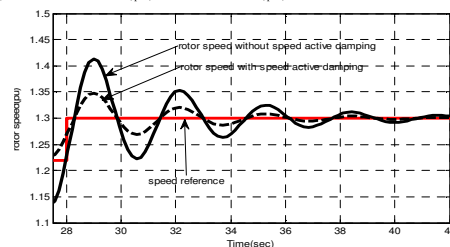
قسمت حقیقی مدهای استاتور نسبت α_{dq} را نشان می‌دهد و همان طور که می‌بینید با افزایش پهنای باند α_{dq} با ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها میرایی مدهای استاتور کاهش قابل توجهی دارند. برای واضح‌تر شدن این موضوع، آنالیز حساسیت مدهای استاتور $\lambda_{3,4}$ نسبت به پهنای باند α_{dq} را به صورتی که در ادامه می‌آید، انجام می‌دهیم. اگر بخواهیم، تأثیر یک متغیر حالت را روی یک مد بسنجیم باید از مد نسبت به آن متغیر مشتق‌گیری کنیم $P_{ki} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kk}}$ ، λ_i مد مورد نظر و k a_{kk} آمین المان قطری ماتریس حالت است. در واقع با این کار حساسیت مد به متغیر حالت معین می‌شود. با توجه به توضیحات داده شده در این قسمت به دنبال $P_{31} = \frac{\lambda_3}{a_{33}}$ و $P_{41} = \frac{\lambda_4}{a_{44}}$ هستیم. المانهای a_{33} و a_{44} از معادلات (۵۰) به دست می‌آیند.

$$a_{44} = -\frac{\omega_b}{L'_r} (R'_r + k_{P-iq} + R_{r-active}) \quad (50)$$

$$a_{33} = -\frac{\omega_b}{L'_r} (R'_r + k_{P-id} + R_{r-active})$$

$$\frac{\lambda_3}{\alpha_{d(pu)}} = \frac{\lambda_3}{a_{33}} \frac{a_{33}}{\alpha_{d(pu)}} = P_{31} \frac{a_{33}}{\alpha_{d(pu)}} = P_{31} (-\omega_b) \quad (51)$$

$$\frac{\lambda_4}{\alpha_{q(pu)}} = \frac{\lambda_4}{a_{44}} \frac{a_{44}}{\alpha_{q(pu)}} = P_{41} \frac{a_{44}}{\alpha_{q(pu)}} = P_{41} (-\omega_b)$$



شکل (۱۲): پاسخ DFIG به تغییر پله در مرجع سرعت ژنراتور سرعت روتور

Fig. (12): DFIG response to step change in the rotor speed reference

از آنالیز حساسیت فوق مشاهده می‌شود که با زیاد شدن α_{dq} میرایی مد λ_3 استاتور کاهش خواهد یافت با استفاده از داده‌های مسأله مقادیر رابطه‌ی (۵۱) به ترتیب $1.92+j0.1885$ ، $2.37+j0.226$ به دست می‌آید و این اثر در مورد α_q بیشتر است. همچنین افزایش مقاومت رتور به طور پسیو یا اکتیو میرایی مؤثر $R_{r-active}$ می‌تواند میرایی مدهای استاتور را کاهش دهد. با استفاده از داده‌های مسأله، مقادیر رابطه‌ی (۵۲) مقدار حساسیت $13.84+j1.34$ به دست می‌آید همان طور که مشاهده می‌نمایید حساسیت مد استاتور به $R_{r-active}$ بسیار زیاد است و وجود میرایی مؤثر حلقه‌ی کنترل جریان رتور می‌تواند به طور قابل توجهی میرایی مدهای استاتور را کاهش دهد. در تغییرات i_{rd} بسیار اثر پذیرند. با توجه به مقدار به دست آمده از جدول

۳-۱- شبیه‌سازی حوزه‌ی زمان

در این بخش اثرات پارامترهای α_{dq} ، میرایی مؤثر حلقه‌ی کنترلی جریان روتور، ولتاژهای BEMF روتور، جریان محور d روتور و ضریب توان DFIG و سرانجام اثر نسبت امپدانس شبکه $(\frac{R_e}{X_e})$ روی رفتار گذرای DFIG به وسیله‌ی شبیه‌سازی حوزه‌ی زمان رسیدگی می‌شود.

۳-۲- تأثیر پهنای باند حلقه‌ی بسته‌ی جریان روتور و میرایی مؤثر جریان روتور

برای رسیدن به این هدف یک Dip ولتاژ ۳۰٪ با طول زمان ۳۰۰ میلی ثانیه در $t=18\text{sec}$ در ترمینال DFIG ایجاد شده است. نقاط بهره‌برداری DFIG قبل از خطا: $S_0 = -0.24$ (sleep) $i_{rd0} = 0.3\text{pu}$, $P_{e0} = 0.6\text{pu}$ ، نشان می‌دهند. در شکل (۱۴) پاسخ‌ها با ۲ پهنای باند ۱ پریونیت و ۴ پریونیت به نمایش درآمده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که افزایش پهنای باند کنترل هرچند مواردی مثل بهبود دینامیک جریان روتور، محدودیت گذرای کاهش بالازدگی (فراجهش) جریان روتور، گشتاور الکتریکی و شار استاتور و کاهش خطای تعقیب جریان روتور را به دنبال دارد اما منجر به نوسانی بودن پاسخ گذرا با زمان نشست بزرگ می‌شود و می‌توان نتیجه گرفت که پاسخ گذرای DFIG در حین خطا خراب می‌گردد. لذا برای انتخاب پهنای باند کنترل جریان روتور باید مسامحه‌ای بین بالازدگی و زمان نشست پاسخ‌ها در نظر گرفت. در شکل (۱۵) پاسخ‌ها در ۲ حالت میرایی مؤثر و بدون میرایی مؤثر آورده شده‌اند در هر دو حالت پهنای باند کنترل جریان روتور ۱ پریونیت است. در حالتی که میرایی مؤثر داریم بالازدگی پاسخ‌هایی مثل گشتاور الکتریکی، شار استاتور و جریان روتور محدود شده است اما زمان نشست کلیه‌ی پاسخ‌ها و نیز بالازدگی پاسخ ولتاژهای روتور زیاد شده است.

۳-۳- تأثیر ولتاژهای BEMF روتور

در این قسمت یک Dip ولتاژ ۳ فازه با طول زمان ۳۰۰ میلی ثانیه در ترمینال DFIG اعمال شده است. شکل (۱۷) رفتار گذرای DFIG را در دو حالت جبران و بدون جبران ولتاژهای BEMF نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود با جبران ولتاژهای e_{dq} ($k_{com} = 1$) بالازدگی در جریان‌های روتور پس از رفع خطا کاهش یافته است اما زمان نشست این دو کمیت زیاد شده است. در حالت جبران سایر کمیت‌های مشاهده شده دارای بالازدگی بزرگتری هستند و همچنین زمان نشست آنها نیز افزایش دارد. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که جبران ولتاژهای BEMF موجب کاهش حد پایداری DFIG می‌شود.

۳-۴- تأثیر جریان محور d روتور و ضریب توان DFIG

همان طور که قبلاً نیز نشان داده شد دینامیک‌های استاتور وابسته به جریان محور d روتور هستند. در این مرحله برای نمایش این مطلب، شبیه‌سازی حوزه‌ی زمان با ایجاد Dip ولتاژ ۳۰٪ به طول ۳۰۰ میلی ثانیه در $t=18\text{sec}$ انجام شده است. شکل (۱۶) کمیت‌های شار

استاتور، گشتاور الکتریکی و جریان‌های روتور و غیره را در دو حالت $i_{rd-ref} = 0.3\text{pu}$ ($P.F=1$) و $i_{rd-ref} = 0.6\text{pu}$ در این حالت DFIG توان راکتیو ۰/۱۵ پریونیت به شبکه تزریق می‌کند یعنی در مد Leading P.F کار قرار دارد نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌کنید با افزایش اندازه‌ی i_{rd} حد پایداری DFIG در حین خطا (۱۸ تا ۱۸/۳) ثانیه، کوچک شده است. اما پس از خطا ثانیه ۱۸/۳ به بعد بر عکس می‌شود. این دلیلی است بر این که میرایی مدهای حساس استاتور و در نتیجه رفتار گذرای DFIG با افزایش جریان i_{rd} خراب می‌شود.

۳-۷- تأثیر نسبت امپدانس شبکه $(\frac{R_e}{X_e})$

نسبت $\frac{R_e}{X_e}$ به دلیل اثرگذاری در میرایی مدهای استاتور در رفتار گذرای DFIG تأثیرگذار است. یک Dip ولتاژ ۳۰٪ در $t=18\text{sec}$ در DFIG ایجاد شده است. نتایج در دو مقدار $\frac{R_e}{X_e} = 0.1$ و $\frac{R_e}{X_e} = 0.3$ در شکل (۱۷) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که رفتار گذرای DFIG در حالت $\frac{R_e}{X_e}$ بزرگ‌تر بهبود یافته و نوسانات و زمان نشست کوچک‌تری حاصل شده است.

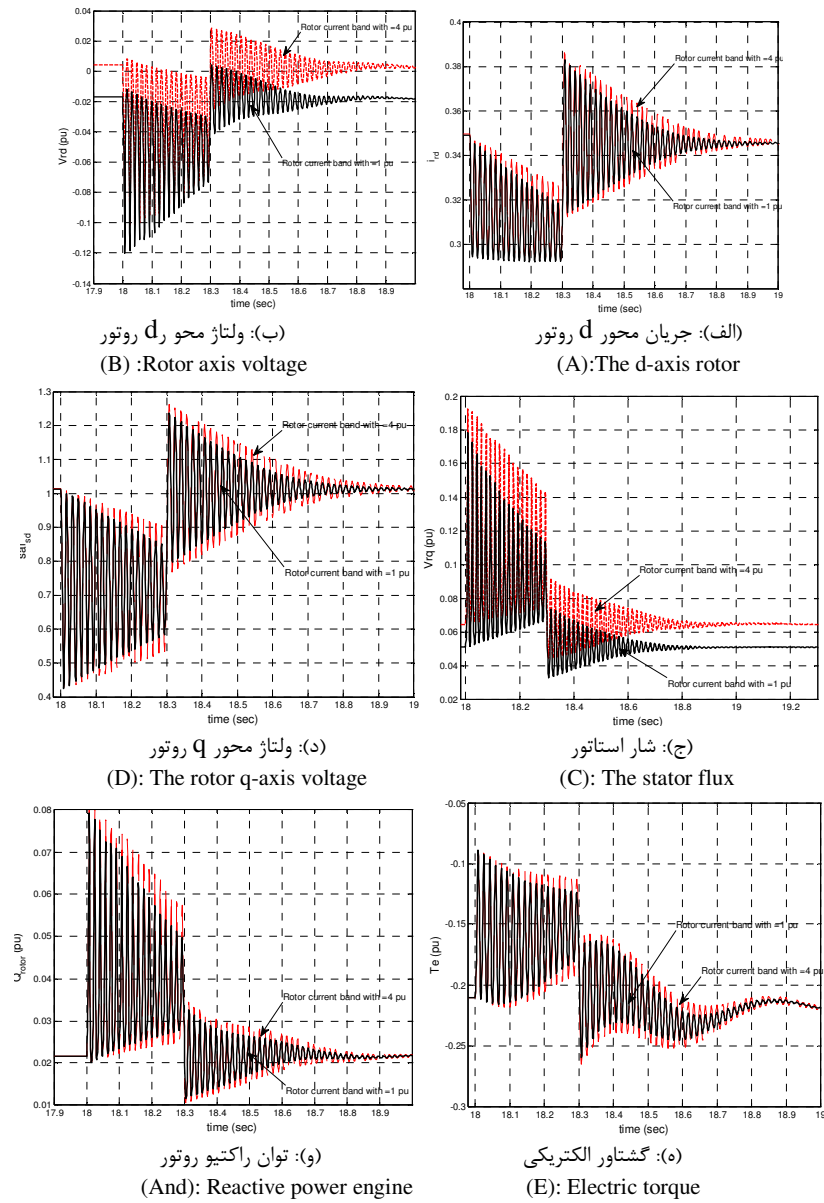
۳-۶- تأثیر نسبت امپدانس شبکه $(\frac{R_e}{X_e})$ ، جریان محور d روتور، ضریب توان DFIG، جبران ولتاژهای BEMF روتور، پهنای باند حلقه بسته‌ی جریان روتور و میرایی مؤثر جریان روتور

امپدانس شبکه نسبت $(\frac{R_e}{X_e})$ ، جریان محور d روتور، ضریب توان DFIG، جبران ولتاژهای BEMF روتور، پهنای باند حلقه بسته‌ی جریان روتور و میرایی مؤثر جریان روتور همزمان به DFIG اعمال می‌شود. مشاهده می‌شود که رفتار گذرای DFIG در این حالت بهبود یافته و نوسانات و زمان نشست کوچک‌تری حاصل شده است.

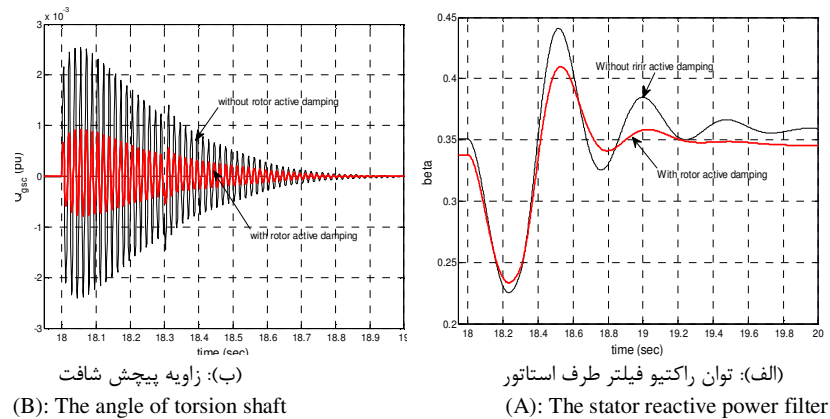
۱۵- نتیجه‌گیری

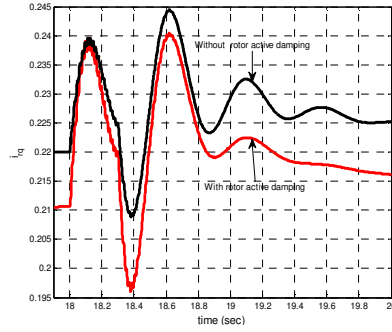
ولتاژهای نیروی ضدمحرکه‌ی القایی در DFIG اثرهای دینامیکی استاتور را روی جریان‌های دینامیکی روتور منعکس می‌کند و نقش مهمی روی جریان هجومی روتور در ضمن کمبود ولتاژ ژنراتور دارد. جبران‌سازی این ولتاژها می‌تواند جریان‌های گذرای روتور را محدود کند. طرح کنترل خطی به طور مناسب تحت کمبود ولتاژهای بزرگ نمی‌تواند کار کند.

زمان بهبود پاسخ‌های گذرا را نشان می‌دهد افزایش پهنای باند، ردیابی سیستم و سرعت ردیابی را بیشتر می‌کند. این پژوهش در مورد ویژگی‌های دینامیکی و بهبود عملکرد گذرا در توربین‌های باد با DFIGها بحث شد. تجزیه و تحلیل و ردیابی مقادیر ویژه برای شناسایی عدم بی‌ثباتی استفاده شد.

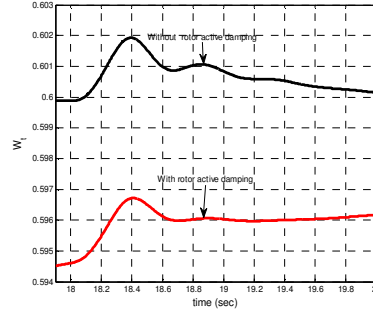


شکل (۱۴): پاسخ حوزه‌ی زمان برخی کمیت‌های DFIG با Dip ولتاژ ۳۰٪ در $t=18\text{sec}$ و تغییر پهنای باند
 Fig. (14): Time domain response (some quantities DFIG) with voltage Dip 30% at $t = 18\text{sec}$ and change bandwidth

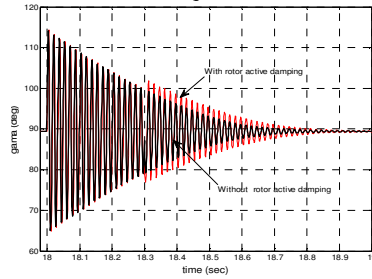




(د): جریان محور q روتور
(D): The q-axis rotor

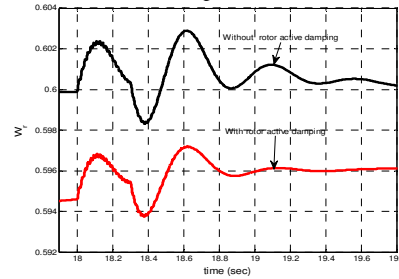


(ج): سرعت توربین
(C): Speed turbine



(ه): سرعت روتور

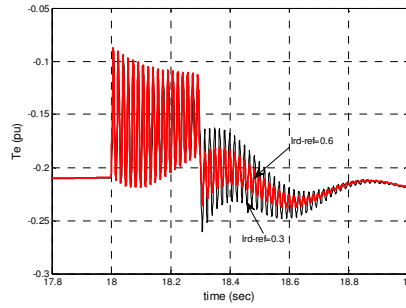
(و): زاویه بین محور d روتور و محور d استاتور
(d): The angle between the rotor and the stator shaft



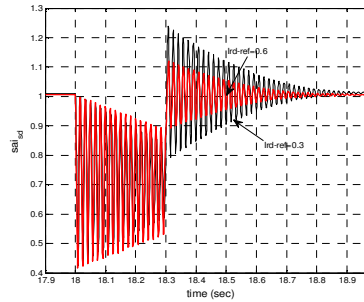
(E): The rotor speed

شکل (۱۵): پاسخ حوزه‌ی زمان برخی کمیت‌های DFIG با Dip ولتاژ ۳۰٪ در t=18sec با میرایی فعال

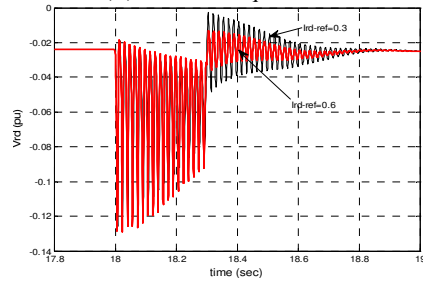
Fig. (15): Time domain response (some quantities DFIG) with voltage Dip 30% at t = 18sec with active damping



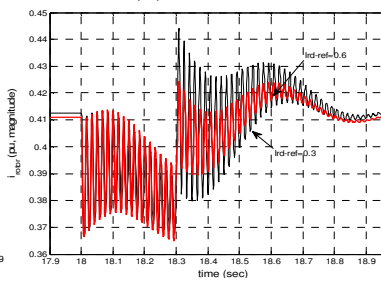
(ب): گشتاور الکتریکی
(B): Electric torque



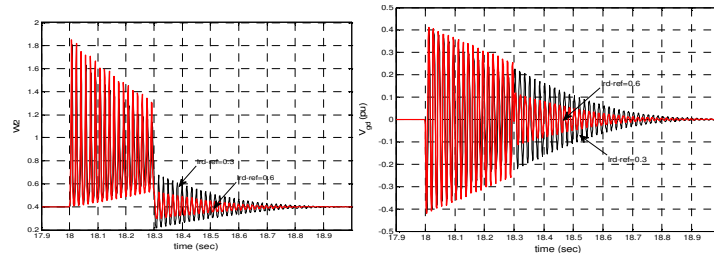
(الف): شار محور d استاتور
(A): The stator flux



(د): جریان روتور
(D): The rotor



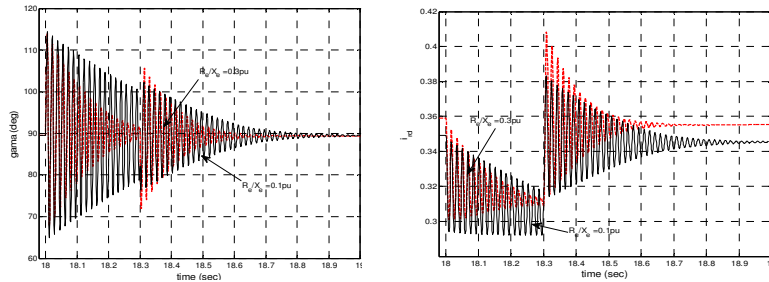
(ج): ولتاژ محور d روتور
(C): The rotor shaft voltage



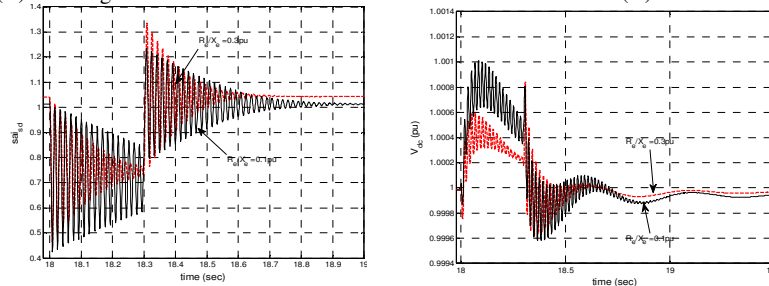
(د): توان راکتیو فیلتر طرف استاتور
(And): The stator active power filter
(ه): سرعت لغزش روتور
(E): Slip speed of the rotor

شکل (۱۶): پاسخ حوزه‌ی زمان برخی کمیت‌های DFIG با Dip ولتاژ ۳۰٪ در t=18sec با تاثیر جریان محور d روتور

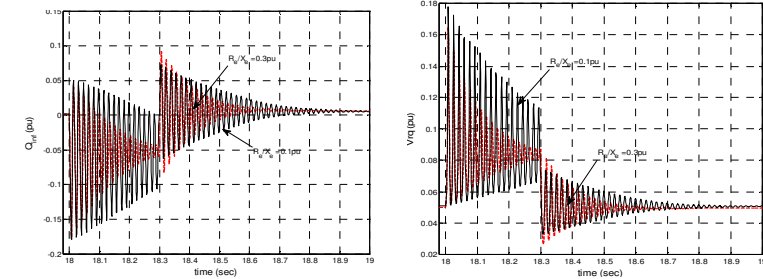
Fig. (16): Time domain response (some quantities DFIG) with voltage Dip 30% at t = 18sec with the impact of the d-axis rotor



(ج): زاویه محور d روتور و محور d استاتور
(C): The angle of the rotor axis and the axis of the stator
(ز): جریان محور d روتور
(G): The rotor axis



(ی): شار محور d استاتور
(A): The stator flux
(ط): ولتاژ لینک dc
(I): Voltage dc link



(ل): توان راکتیو طرف شبکه بی‌نهایت
(L): Reactive power grid side infinity
(ک): ولتاژ محور q روتور
(K): The rotor shaft voltage

شکل (۱۷): پاسخ حوزه‌ی زمان برخی کمیت‌های DFIG با Dip ولتاژ ۳۰٪ در t=18sec با تاثیر نسبت $\frac{R_e}{X_e}$

Fig. (17): Time domain response (some quantities DFIG) with voltage Dip 30% at t = 18sec with the effect of $\frac{R_e}{X_e}$

طریق کنترل ولتاژ رتور می‌تواند دینامیک رتور را بهبود ببخشد. و قادر است قابلیت اتصال را در حین خطا افزایش دهد. با این حال نشان داده شد که دینامیک‌های استاتور می‌تواند ضعیف شود و رفتار گذرای DFIG بعد از برطرف شدن خطا بدتر شود. همچنین نشان داده شد که دینامیک‌های DFIG تحت جبران EMF رتور و ولتاژ شبکه به

در این مورد از کنترل‌کننده با میرایی فعال استفاده شد. برای بهبود عملکرد کنترل‌کننده‌های PI حلقه‌ی کنترل جریان روتور، حلقه کنترل سرعت روتور و حلقه کنترل قدرت راکتیو، پهنای باند کنترل‌کننده‌های را با میرایی فعال افزایش داده شد که شبیه سازی در حوزه فرکانس و از بین بردن اثرات دینامیکی استاتور در دینامیک‌های جریان رتور از

بعد از خطای DFIG و ولتاژ کنترل رتور را بهبود می‌بخشد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که روش کنترل پیشنهادی بسیار قوی عمل می‌کند. پی‌نوشت:

- 1-Field oriented Control
- 2-Direct Foc
- 3-Indirect Foc
- 4-Puls Width Modoulation
- 5-Doubly fed Induction Generator

عنوان یک سیستم تا حدی خطی شامل دینامیک‌های داخلی و خارجی است. دینامیک‌های داخلی شامل دینامیک استاتور نقش مهمی در رفتار گذرای DFIG دارد. آنها می‌توانند DFIG را برای بعد از خطا ناپایدار کنند. از آنجا که دینامیک‌های الکتریکی DFIG غیرخطی هستند، طرح کنترل خطی نمی‌تواند تحت افت ولتاژ زیاد عمل کند. کنترل‌کننده PI با میرایی فعال دینامیک‌های داخلی را پایدار و رفتار

References

- [1] T. Ackerman, Wind power in power systems. J. Wiley & Sons, Ltd., 2012.
- [2] M. Mahdavian, N. Wattanapongsakorn, Gh. Shahgholian, S.H. Mozafarpour, M. Janghorbani, S.M. Shariatmadar, "Maximum power point tracking in wind energy conversion systems using tracking control system based on fuzzy controller", IEEE/ECTICON, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2014.
- [3] R. Pena, J.C. Clare, G.M. Asher, "Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation", Proceeding of the IEE/EPA, Vol. 143, No. 3, pp. 231-241, May 1996.
- [4] Gh. Shahgholian, Kh. Khani, M. Moazzami, "Frequency control in autanamous microgrid in the presence of DFIG based wind turbine", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, Vol. 6, No. 23, pp. 3-12, Autumn 2015 (in Persian).
- [5] L. Xu, W. Cheng, "Torque and reactive power control of a doubly fed induction machine by position sensorless scheme", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 31, No. 3, pp. 636-642, May/June 1995.
- [6] M. Fooladgar, E. Rok-Rok, B. Fani, Gh. Shahgholian, Evaluation of the trajectory sensitivity analysis of the DFIG control parameters in response to changes in wind speed and the line impedance connection to the grid DFIG", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, Vol. 5, No. 20, pp. 37-54, winter 2015 (in Persian).
- [7] T.J. Hammons, "Integrating renewable energy sources into European grids", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 30, No. 8, pp. 462-475, Oct. 2008.
- [8] T. Lobos, J. Rezmer, P. Janik, H. Amarís, M. Alonso, C. Álvarez, "Application of wavelets and Prony method for disturbance detection in fixed speed wind farms", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 31, No. 9, pp. 429-436, Oct. 2009.
- [9] M. Tavoosi, B. Fani, E. Adib, "Stability analysis and control of DFIG based wind turbine using FBC strategy", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, Vol. 4, No. 15, pp. 31-42, Autumn 2013 (in Persian).
- [10] J. Lopez, P. Sanchis, X. Roboam, L. Marroyo, "Dynamic behavior of the doubly fed induction generator during three-phase voltage dips", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 22, No. 3, pp. 709-717, Sep. 2007.
- [11] J. Morren, S.W.H. de Haan, "Short-circuit current of wind turbines with doubly fed induction generator", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 22, No. 1, pp. 174-180, March 2007.
- [12] J. López, E. Gubía, P. Sanchis, X. Roboam, L. Marroyo, "Wind turbines based on doubly fed induction generator under asymmetrical voltage dips", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 23, No. 1, pp. 321-330, March 2008.
- [13] L. Holdsworth, X.G. Wu, J.B. Ekanayake, N. Jenkins, "Comparison of fixed speed and doubly-fed induction wind turbines during power system disturbances", IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, Vol. 150, No. 3, pp. 343-352, May 2003.
- [14] M.V.A. Nunes, J.A.P. Lopes, H.H. Zurn, U.H. Bezerra, R.G. Almeida, "Influence of the variable-speed wind generators in transient stability margin of the conventional generators integrated in electrical grids", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 19, No. 4, pp. 692-701, Dec. 2004.
- [15] A.A. El-Sattar, N.H. Saad, M.Z.S. El-Dein, "Dynamic response of doubly fed induction generator variable speed wind turbine under fault", Electric Power Systems Research, Vol. 78, No. 7, pp. 1240-1246, July 2008.
- [16] F. Wu, X.P. Zhang, K. Godfrey, P. Ju, "Small signal stability analysis and optimal control of a wind turbine with doubly fed induction generator", IET Generation, Transmission and Distribution, Vol. No. 5, pp. 751-760, 2007.
- [17] F. Wu, X. Zhang, K. Godfrey, P. Ju, "Modeling and Control of Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator", Proceeding of the IEEE/PSCE, pp. 1404-1409, Atlanta, GA, Oct./Nov. 2006.
- [18] F. Mei, B. Pal, "Modal analysis of grid-connected doubly fed induction generators", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 22, No. 3, pp. 728-736, Sep. 2007.
- [19] F. Mei, B.C. Pal, "Modelling and small-signal analysis of a grid connected doubly-fed induction generator", Proceeding of the IEEE/PES, Vol. 3, pp. 2101 - 2108, June 2005.
- [20] Gh. Shahgholian, P. Shafaghi, "State space modeling and eigenvalue analysis of the permanent magnet DC motor drive system", IEEE/ICECT, pp. 63-67, Kuala Lumpur, Malaysia, May 2010.
- [21] Gh. Shahgholian, J. Faiz, "The effect of power system stabilizer on small signal stability in single-machine infinite-bus", International Journal of Electrical and Engineering, Vol. 4, No. 2, pp.45-53, 2010.