

بررسی اثر پارامترهای کنترل کننده های روتور بر روی رفتار دینامیکی توربین های بادی ژنراتور القایی دو سو تغذیه

سعید سلیمانی^۱، بهادر فانی^۱ و غضنفر شاهقلیان^۲

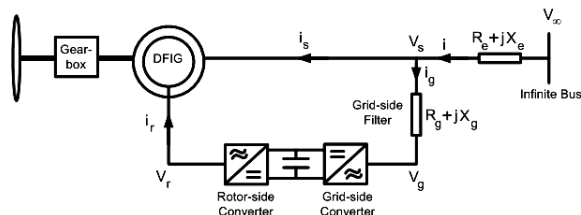
^۱ کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد ssoleimani49@yahoo.com

^۱ عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد bahador_fani@yahoo.com

^۲ عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد ، Shahgholian@iaun.ac.ir

چکیده - این مقاله ابتدا درباره مشخصات دینامیکی توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی تغذیه دوپل بحث می نماید. ولتاژهای نیروی ضد محرکه ی القایی (Back Emf) در DFIG اثرهای دینامیکی استاتور بر روی جریان های دینامیکی روتور منعکس می کند و نقش مهمی روی جریان هجومی روتور در ضمن افت ولتاژ ژنراتور دارد. جبران سازی این ولتاژها می تواند قابلیت ride-through ژنراتور را بهبود دهد و جریان های گذرای روتور را محدود کند. حالت های دینامیکی داخلی و خارجی DFIG به ترتیب شامل حالت های دینامیکی استاتور و روتور می باشند. دینامیک های الکتریکی DFIG غیر خطی هستند. طرح کنترل خطی به طور مناسب تحت افت ولتاژهای بزرگ و نوسانات سرعت باد نمی تواند کار کند. پیشنهاد ما افزایش پهنای باند و مشخصه افتی سرعت-جریان است. دیدگاه پیشنهاد شده حالت های دینامیکی داخلی را از طریق کنترل ولتاژ روتور پایدار می کند و رفتار دینامیکی DFIG را می بخشد.

کلید واژه- دینامیک های داخلی، ژنراتور القایی دو سو تغذیه، مشخصه افتی-جریان، توربین باد



شکل ۱: توربین باد با ژنراتور القایی دو سو تغذیه متصل به باس بی نهایت

درباره ی رفتارهای گذرا و دینامیکی DFIG ها [۳]، [۴]، ارائه شده است. در این نوشته تحلیل های میرایی فعال و مشخصه افتی سرعت-جریان استفاده می شود و عملکرد پس از خطای ژنراتور را بهبود دهد. نشان داده می شود که حالت های دینامیکی DFIG تحت جبران سازی EMF روتور و ولتاژهای شبکه، تا حدی به صورت یک سیستم خطی شده شامل حالت های دینامیکی خارجی و داخلی می باشد. طرح کنترل خطی به طور مناسب تحت افت ولتاژهای بزرگ نمی تواند کار کند، دیدگاه پیشنهاد شده یک ترکیب انتگرال گیر تناسبی (PI) و میرایی فعال و مشخصه افتی سرعت-جریان که حالت های دینامیکی داخلی را پایدار می سازد نتایج تحلیل های تئوری به وسیله شبیه سازی ها در حوزه زمان و مدال بررسی می شوند.

۲-مدلسازی توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی تغذیه دوپل در راستای فلوی استاتور

۱-مقدمه

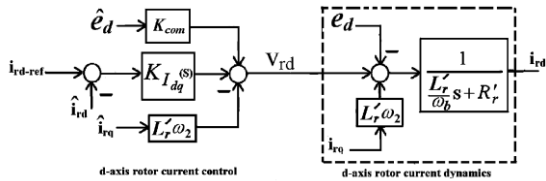
در میان راهکارهای مختلف برای به کارگیری توربین های بادی سرعت متغیر، سیستم ژنراتور القایی تغذیه دوپل (DFIG) دارای مشهوریت بیشتری شده است. استاتور DFIG به طور مستقیم به شبکه قدرت متصل می شود و سیم پیچهای روتور از یک مبدل منبع ولتاژ پشت به پشت با حلقه های لغزان تغذیه می شود. شکل (۱) بلوک دیاگرام توربین بادی مجهز به DFIG را که از طریق امپدانس معادل شبکه به یک باس بی نهایت متصل شده، نشان می دهد. ویژگی مشترک تمام مقاله های نوشته شده در رابطه با DFIG، کنترل برداری در راستای میدان (FOC) می باشد که کنترل جداگانه توان های اکتیو و راکتیو را ممکن می سازد. این مقاله تحلیل های انجام شده در جهت بهبود عملکرد گذرای DFIG را با در نظر گرفتن راستای فلوی استاتور مدلسازی نموده و مورد مطالعه قرار داده است. در این مقاله بهبود عملکرد گذرا به وسیله میرایی فعال و مشخصه افتی سرعت-جریان انجام شده است. توانایی توربین بادی برای باقی ماندن اتصال آن در شبکه در ضمن وقوع خطاها و افت ولتاژها به عنوان میزان قابلیت عملکرد توربین بادی در ولتاژهای پایین تعیین می شود [۴]. خطای جریان روتور است که از محدوده خودش تجاوز می نماید و مسئله دوم اضافه ولتاژ خط ارتباط DC می باشد. چندین مقاله

۳- مدل فیلتر طرف شبکه (grid-side filter):

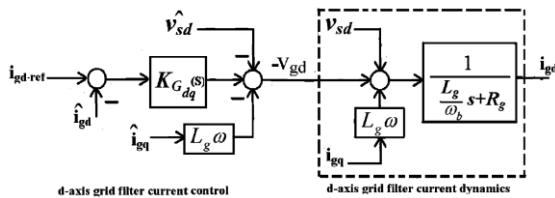
فیلتر نشان داده شده در شکل (۱)، شامل یک اندوکتانس L_g و مقاومت R_g می باشد و حالت های دینامیکی آن به صورت زیر توصیف می شود:

$$\frac{L_g}{\omega_b} \frac{di_{gdq}}{dt} = -R_g i_{gdq} - j\omega L_g i_{gdq} - V_{gdq} + V_{sdq} \quad (۶)$$

در اینجا اندیس g مقادیر فیلتر شبکه را نشان می دهد و V_{sdq} ، i_{gdq} و V_{gdq} به ترتیب مؤلفه های d-q ولتاژ ترمینال ژنراتور و جریان و ولتاژ فیلتر طرف شبکه هستند. V_g از مبدل طرف شبکه تغذیه می شود. حلقه های کنترل جریان d-q فیلتر طرف شبکه، تحت جبران متغیرهای تزویج متقابل (cross-coupling) در شکل (۳) نشان داده شده است. در این شکل، ولتاژهای V_{sd} و V_{sq} به عنوان اختلال نشان داده می شوند. به منظور کاهش ردیابی خطا، این ولتاژها با استفاده از متغیرهای پیشخور نشان داده شده در شکل های (۳) جبران می شوند.



شکل ۲: حلقه ی کنترل جریان روتور



شکل ۳: حلقه ی کنترل جریان فیلتر شبکه

با در نظر گرفتن کنترل برداری در راستای فلوی استاتور روابط زیر را داریم:

$$\psi_{sq} = 0 \quad \psi_{sd} = \psi_s \quad (۷)$$

۴- مدل مکانیکی توربین بادی و کنترل کننده سرعت:

مدل مکانیکی WT شامل توربین، جعبه دنده، محورها و دیگر قطعات مکانیکی می باشد. مدل های مکانیکی دو جرمی DFIG در مرجع [۶] آورده شده اند:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{T_e + K_s \beta + D(\omega_t - \omega_r)}{2H_r} \quad (۸)$$

$$\frac{d\omega_t}{dt} = \frac{T_m - K_s \beta - D(\omega_t - \omega_r)}{2H_t} \quad \frac{d\beta}{dt} = \omega_b(\omega_t - \omega_r) \quad (۹)$$

هدف از این قسمت معرفی مدل دینامیکی یک سیستم تک ماشین متصل به شین بی نهایت در دستگاه مرجع d-q با در نظر گرفتن راستای فلوی استاتور می باشد. معادلات اساسی زیر برای مدل ژنراتور DFIG استفاده می شوند [۶]:

$$V_{sdq} = R_s i_{sdq} + j\omega \psi_{sdq} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{sdq}}{dt} \quad (۱)$$

$$V_{rdq} = R_r i_{rdq} + j\omega_2 \psi_{rdq} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{rdq}}{dt} \quad (۲)$$

$$\psi_s = L_s i_s + L_m i_r \quad \psi_r = L_m i_s + L_r i_r \quad (۳)$$

روابط فوق ψ ، V و i به ترتیب معرف شار، ولتاژ و جریان هستند. اندیسهای s و r، به ترتیب کمیت های استاتور و روتور را نشان می دهند. L_s و L_r اندوکتانس های خودی استاتور و روتور هستند، L_m اندوکتانس متقابل، ω_2 فرکانس لغزش روتور، ω_b فرکانس زاویه ای اساسی و ω سرعت قاب مرجع d-q منطبق با فلوی استاتور می باشد. همچنین R_s و R_r مقاومت های استاتور و روتور هستند. گشتاور الکترومکانیکی و توان راکتیو تزریق شده توسط سیم پیچ های استاتور به شبکه به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$Q_s = V_{sd} i_{sq} + V_{sq} i_{sd} \quad (۴)$$

$$T_e = \frac{L_m}{L_s} (\psi_{sq} i_{rd} - \psi_{sd} i_{rq})$$

حالت های دینامیکی روتور برحسب جریان روتور و فلوی استاتور به صورت زیر اثبات و توصیف می شود:

$$\frac{L_r'}{\omega_b} \frac{di_{rdq}}{dt} = -R_r' i_{rdq} - j\omega_2 L_r' i_{rdq} - e_{dq} + V_{rdq} \quad (۵)$$

متغیرهای e_d و e_q ، ولتاژهای نیروی ضد محرکه القایی روتور نامیده می شوند و اثرات حالت های دینامیکی استاتور را روی حالت های دینامیکی جریان روتور منعکس می کنند. با جبران سازی ترم های تزویج متقابل $\omega_2 L_r' i_{rq}$ (cross-coupling) و $\omega_2 L_r' i_{rd}$ با استفاده از کنترل کننده های جریان d-q روتور، حلقه های کنترل جریان d و q روتور مجزا خواهند شد. حلقه های کنترل جریان d-q روتور، تحت جبران سازی ترم های تزویج متقابل (cross-coupling) در شکل (۲) نشان داده شده است.

راست و چپ در شناسایی رابطه بین حالت ها و مدها، آن است که عناصر بردارهای ویژه به واحدها و مقیاس بندی متناظر با متغیرهای حالت وابسته هستند. یکی از روش های حل این مسأله ماتریس مشارکت است که به عنوان اندازه ای از رابطه بین متغیرهای حالت و مدها می باشد که بردار ویژه راست و چپ را به صورت زیر ترکیب می کند.

$$P_{ki} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kk}} = \psi_{ik} \varphi_{ki} \quad P_i = [P_{i1} P_{i2} \dots P_{in}]^T = \begin{bmatrix} \varphi_{i1} \cdot \psi_{i1} \\ \varphi_{i2} \cdot \psi_{i2} \\ \vdots \\ \varphi_{in} \cdot \psi_{in} \end{bmatrix} \quad (12)$$

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 $P_{ki} = \varphi_{ki} \cdot \psi_{ik}$ ضریب مشارکت نامگذاری شده است که سنجشی از مشارکت نسبی k امین متغیر حالت در i امین مد و بالعکس می باشد. از آنجا که φ_{ki} فعالیت x_k در i امین مد را اندازه گیری کرده، ψ_{ik} سهم این فعالیت را وزن دهی می کند، حاصل ضرب P_{ki} مشارکت خالص را اندازه گیری می کند. همچنین تأثیر ضرب کردن عناصر بردارهای ویژه چپ و راست در بدون بعد کردن P_{ki} ظاهر می شود. به عبارت دیگر، مستقل از انتخاب واحدهاست.

۶- شبیه سازی در حوزه زمان و فرکانس

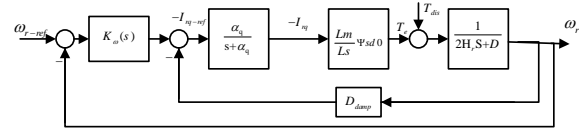
مطالعات مربوط به رفتار دینامیکی توربین های باد مجهز به DFIG در دو دسته کلی قرار می گیرد. مطالعات مبتنی بر شبیه سازی در حوزه زمان که نمایشی از رفتار دینامیکی DFIG است و مطالعات مبتنی بر تحلیل مقادیر ویژه و تحلیل پاسخ فرکانسی (تحلیل مودال) که مدهای پایداری و فعل و انفعالات بین مدهای دینامیکی را مشخص می کند. این مقاله رفتار دینامیکی توربین باد مجهز به DFIG که متصل به باس بی نهایت است را بررسی می کند و اثرات پارامترهای کنترل کننده رتور و سرعت و شرایط بهره برداری را در حالتی که کاهش ولتاژ و نوسانات سرعت باد داریم بر روی سیستم تحلیل می کند.

۷- آنالیز مودال و پایداری سیگنال کوچک

مشق گیری از معادلات دینامیکی ماشین حول نقطه ی تعادل مدل فضای حالت سیستم (معادلات سیگنال کوچک) بدست می آیند. شکل کلی مدل فضای حالت ماشین به صورت زیر است:

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

که ω_r و ω_l به ترتیب سرعت های ژنراتور و توربین (پریونیت) هستند، θ زاویه پیچشی شافت (در رادیان)، H_r و H_l به ترتیب ثابت های اینرسی ژنراتور و توربین هستند (در ثانیه)، K_s ضریب سختی محور (در پریونیت بر رادیان الکتریکی) و D ضریب میرایی (در پریونیت) و T_e و T_m به ترتیب گشتاور الکتریکی ژنراتور و گشتاور مکانیکی توربین هستند (در پریونیت). با در نظر گرفتن راستای فلوی استاتور، سرعت روتور به وسیله مؤلفه جریان و ولتاژ q روتور (V_{rq}, i_{rq}) کنترل می شوند. طرح کنترلی استفاده شده برای کنترل سرعت در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴: حلقه کنترل سرعت

با در نظر گرفتن کنترل برداری در راستای فلوی استاتور، ولتاژ ترمینال و توان راکتیو مبادله شده بین ژنراتور و شبکه به وسیله مؤلفه d جریان ها و ولتاژهای روتور کنترل می شوند [۱]. براساس رابطه (۶) توان راکتیو تزریق شده توسط استاتور به شبکه به صورت زیر می تواند اثبات و نوشته شود:

$$Q_s = \frac{\omega_s}{L_s} \psi_{sd} (L_m i_{rd} - \psi_{sd}) \quad (10)$$

این مقاله جنبه های اساسی پایداری سیستم های دینامیکی توربین بادی دو سو تغذیه را بررسی کرده و روش های تحلیلی را در مطالعه ی پایداری DFIG را ارائه می کند. و عوامل مؤثر بر آنها را شناسایی خواهد کرد. تأثیر افزایش پهنای باند و میرایی فعال در حالات دینامیکی و گذرا روتور در شرایط اختلال کمبود ولتاژ و نوسان سرعت باد توسط نرم افزار مطلب در حوزه ی فرکانس و زمان شبیه سازی می شود.

۵- حساسیت مقادیر ویژه

حساسیت بیان تأثیر پذیری کار سیستم بر اثر تغییرات پارامترهای سیستم است.

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{ki}} = \psi_{ik} \varphi_{ji} \quad (11)$$

حساسیت مقدار ویژه λ_i به عنصر a_{ki} از ماتریس حالت مساوی حاصل ضرب عنصر ویژه چپ φ_{ik} و عنصر بردار ویژه راست φ_{ji} می باشد. یک مسأله در به کارگیری مجزای بردارهای ویژه

مشارکت در جدول (۱) نشان می دهند که پس از γ, ψ_{sd} متغیرهای حالت i_{rd} و i_{rq} بیشترین اثر را روی مدهای میرایی کوچک استاتور ($\lambda_{1,2}$) دارند. به طور معمول با افزایش پهنای باند کنترل حلقه بسته ی جریان رتور (α_{dq}) دینامیک های جریان رتور بهبود می یابد، خطای تعقیب متغیرهای حالت رتور کاهش و گذراهای جریان رتور محدود می شود. اما باید دید که اثر تغییر پهنای باند α_{dq} در مدهای ناکافی میرای استاتور چگونه است. شکل (۵) قسمت حقیقی مدهای استاتور نسبت α_{dq} را نشان می دهد و همان طور که می بینید با افزایش پهنای باند α_{dq} (با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها) میرایی مدهای استاتور کاهش قابل توجهی دارند. برای واضح تر شدن این موضوع، آنالیز حساسیت مدهای استاتور ($\lambda_{1,2}$) نسبت به پهنای باند α_{dq} را به صورت تیکه در ادامه می آید، انجام می دهیم اگر بخواهیم، تأثیر یک متغیر حالت را روی یک مُد بسنجیم باید از مُد نسبت به آن متغیر مشتق گیری کنیم $P_{ki} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kk}}$ ، λ_i مُد مورد نظر و k a_{kk}

أمین المان قطری ماتریس حالت است. در واقع با این کار حساسیت مُد به متغیر حالت معین می شود. با توجه به توضیحات داده شده در این قسمت ما به دنبال $P_{31} = \frac{\partial \lambda_1}{\partial a_{33}}$ و $P_{41} = \frac{\partial \lambda_1}{\partial a_{44}}$ هستیم.

المانهای a_{33} و a_{44} از معادلات (۹) و (۴) به دست می آیند:

$$a_{44} = -\frac{\omega_b}{L'_r} (R'_r + k_{P-iq} + R_{r-active}) \quad (14)$$

$$\frac{\partial \lambda_1}{\partial \alpha_{d(pu)}} = \frac{\partial \lambda_1}{\partial a_{33}} \frac{\partial a_{33}}{\partial \alpha_{d(pu)}} = P_{31} \frac{\partial a_{33}}{\partial \alpha_{d(pu)}} = P_{31} (-\omega_b)$$

$$\frac{\partial \lambda_1}{\partial \alpha_{q(pu)}} = \frac{\partial \lambda_1}{\partial a_{44}} \frac{\partial a_{44}}{\partial \alpha_{q(pu)}} = P_{41} \frac{\partial a_{44}}{\partial \alpha_{q(pu)}} = P_{41} (-\omega_b)$$

از آنالیز حساسیت فوق مشاهده می شود که با زیاد شدن α_{dq} میرایی مُد λ_3 استاتور کاهش خواهد یافت و این اثر در مورد α_q بیشتر است. همچنین افزایش مقاومت رتور به طور پسیو یا اکتیو (میرایی مؤثر $R_{r-active}$) می تواند میرایی مدهای استاتور را کاهش دهد. همان طور که مشاهده می نمایید حساسیت مد استاتور به $R_{r-active}$ بسیار زیاد است و وجود میرایی مؤثر حلقه ی کنترل جریان رتور می تواند به طور قابل توجهی میرایی مدهای استاتور را کاهش دهد. در تغییرات i_{rd} بسیار اثر پذیرند. با توجه به مقدار به دست آمده واضح است که افزایش i_{rd} علاوه

$$x = [\psi_{sd}, \gamma, i_{rd}, i_{rq}, X_5, X_6, X_7, X_8, \omega_r, \beta, \omega_t, i_{gq}, X_{14}, X_{15}, v_{dc}, X_{17}]^T$$

$$z = [V_s, T_m]^T \quad (13)$$

$u = [\omega_{r-ref}, Q_{s-ref}, v_{dc-ref}, v_{inf}, v_w, I_{gd}]^T$
بردار ستونی x بردار حالت، و عناصر آن x_i ، متغیر حالت نامیده می شوند. بردار ستونی u ، بردار ورودی های سیستم (بردار کنترل) است که سیگنال های خارجی هستند که بر عملکرد سیستم تأثیر می گذارند از جدول تحلیل مدال (۱) نتایج زیر بدست می آید:

مدهای جریان رتور $\lambda_{1,2}$ بسیار سریع اند و متغیرهای i_{rd} و i_{rq} بیشترین مشارکت را در این مدها دارند. بخش حقیقی این مدها تقریباً برابر با پهنای باند حلقه بسته ی جریان رتور (α_{dq}) است. بنابراین بزرگ بودن این پهنای باند منجر به میرایی سریع تر این مدها می گردد. مد λ_3 مد دینامیکی استاتور دارای میرایی ضعیفی هستند (با فرکانس طبیعی نزدیک به فرکانس شبکه). γ, ψ_{sd} بیشترین مشارکت را در این مدها دارند. در بین کلیه ی مدهای سیستم این مدها بالاترین اثر را روی رفتار گذرای DFIG دارند. مد λ_4 متناظر است با متغیر X_5 و میرایی سریعی دارد. مد λ_5 ، مدهای الکترومکانیکی است و متغیرهای β اثر زیادی روی این مد دارند. مد λ_6 متناظر است با متغیر ω_t و میرایی ضعیفی دارد. مد λ_7 مربوط به فیلتر طرف شبکه و میرایی ضعیفی دارد. مد λ_8 متناظر است با متغیر ω_r و Q_s میرایی سریعی دارد. مد $\lambda_{9,10}$ متناظر است با متغیر ω_r و Q_s میرایی سریعی دارد. مد λ_{11} مربوط به فیلتر طرف شبکه و میرایی ضعیفی دارد. مد λ_{12} مد الکترومکانیکی و متغیر ω_r بشتترین تأثیر را دارد. مد λ_{13} مد دینامیکی استاتور دارای میرایی ضعیفی هستند (با فرکانس طبیعی نزدیک به فرکانس شبکه). γ, ψ_{sd} بیشترین مشارکت را در این مدها دارند. در بین کلیه ی مدهای سیستم این مدها بالاترین اثر را روی رفتار گذرای DFIG دارند. مدهای $\lambda_{14,15}$ مربوط به v_{dc} و میرایی ضعیفی دارد. مد λ_{16} مد الکترومکانیکی و متغیر X_{16} بشتترین تأثیر را دارد. مد λ_{17} مد الکترومکانیکی و متغیر X_{14} بشتترین تأثیر را دارد.

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 حلقه ی کنترل جریان رتور، ولتاژهای BEMF رتور بررسی می شود. ضرائب

گرفت. در حالتی که میرایی مؤثر داریم بالازدگی پاسخهایی مثل گشتاور الکتریکی، شار استاتور و جریان رتور محدود شده است رتور زیاد شده است اما زمان نشست کلیه پاسخها و نیز بالازدگی پاسخ ولتاژهای

جدول (۱) پارامترهای مدال حالت عادی

مدها	فرکانس نوسان	نسبت میرایی	متغیرهای حالت یا بیشترین ضریب مشارکت
$\lambda_1 = -1173.9$	0	1	$I_{dq} = I_{gr} = 49.83\%$
$\lambda_2 = -1208.3$	0	1	$I_{dq} = I_{gr} = 49.83\%$
$\lambda_3 = -2.1 + 367j$	58.0197	0.0058	$\Psi_{sd} = 97.54\%$
$\lambda_4 = -2.1 - 367j$	58.0197	0.0058	$x_5 = 98.85\%$
$\lambda_5 = -601.8$	0	1	$\omega = 99.36\%$
$\lambda_6 = -59.6$	0	1	$\omega_1 = 97.42\%$
$\lambda_7 = -2.6 + 13j$	2.0724	0.1969	$I_{dq} = I_{gr} = 49.34\%$
$\lambda_8 = -2.6 - 13j$	2.0724	0.1969	$x_{15} = 99.4\%$
$\lambda_9 = -1259.4$	0	1	$x_7 = x_8 = 42.8\%$
$\lambda_{10} = -2$	0	1	$x_7 = x_8 = 49.28\%$
$\lambda_{11} = -1.9$	0	1	$I_{dq} = I_{gr} = 42.5\%$
$\lambda_{12} = -0.4 + 0.2j$	0.0344	0.8766	$\omega_1 = 99.92\%$
$\lambda_{13} = -0.4 - 0.2j$	0.0344	0.8766	$\gamma = 93.87\%$
$\lambda_{14} = -0.5$	0	1	$x_{17} = 99.92\%$
$\lambda_{15} = -0.5$	0	1	$v_{dc} = 99.92\%$
$\lambda_{16} = -1$	0	1	$x_6 = 94.57\%$
$\lambda_{17} = -1$	0	1	$x_{14} = 99.3\%$

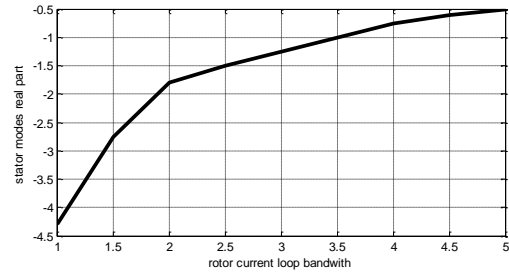
۱۰- تحلیل حساسیت مدهای مکانیکی:

مطابق جدول (۱) میرایی مدهای مکانیکی ($\lambda_{10,11}$) نسبتاً کوچک است. متغیرهای حالت اثرگذار در این مدها ω_r و x_7 هستند که هر دو وابسته به ω_r می باشند. بنابراین می توان با تغییر پهنا باند کنترل سرعت (پهنای باند حلقه باز $\alpha_r = \frac{D}{2H}$) و پهنا باند حلقه بسته ($\alpha_\omega = \frac{k_{p-\omega} L_m \Psi_{s0}}{2H_s L_s}$) با روشهایی مثل میرایی مؤثر،

میرایی این مدها را افزایش داد. شکل (۴) تغییرات بخش حقیقی مد مکانیکی λ_{10} ، مد مکانیکی λ_{11} و مدهای الکترومکانیکی $\lambda_{5,6}$ را نشان می دهد (یادآور می شویم 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 می توان با پهنا باند کنترل

بر گذر از P.F واحد به سمت P.F پیش فاز (Leading) که منجر به تزریق توان راکتیو DFIG به شبکه می شود، میرایی مدهای

$$\frac{\partial \lambda_1}{\partial R_{r-\text{active}}} = \frac{\partial \lambda_1}{\partial a_{33}} \frac{\partial a_{33}}{\partial R_{r-\text{active}}} + \frac{\partial \lambda_1}{\partial a_{44}} \frac{\partial a_{44}}{\partial R_{r-\text{active}}} \quad (15)$$



شکل (۵) تغییرات بخش حقیقی مدهای استاتور نسبت به تغییر پهنا

استاتور را نیز به طور عمده کاهش می دهد. به طور معمول کنترل و تولید توان راکتیو توسط مبدل RSC (در حالت با گنجاندن عبارت پیشرو $(k_{com} e_{dq})$ در حلقه ی کنترل جریان رتور، ولتاژهای BEMF رتور که منعکس کننده ی دینامیک های استاتور در معادلات دینامیکی رتور هستند را با هدف کاهش خطای تعقیب متغیرهای رتور از مراجعشان جبران می کنند. طبق روابط (۴) واضح است که ولتاژهای BEMF رتور وابسته به متغیرهای حالت استاتور هستند و این امکان وجود دارد که با جبران این ولتاژها ($k_{com} = 1$) میرایی مدهای دینامیکی استاتور ($\lambda_{3,4}$) تحت تأثیر قرار گیرد. جدول (۱) مدهای سیستم را تحت جبران e_{dq} نشان می دهد. (تحلیل مودال). اگرچه جبران e_{dq} منجر به کاهش خطای تعقیب جریان رتور می شود اما کاهش میرایی مدهای استاتور را به دنبال دارد. پس برای طراحی حلقه های داخلی کنترل جریان باید مسامحه ای بین میزان کارایی جبران این ولتاژها و پایداری مدهای استاتور صورت گیرد.

۹- شبیه سازی حوزه ی زمان:

نتایج نشان می دهند که افزایش پهنا باند کنترل هر چند مواردی مثل بهبود دینامیک جریان رتور، محدودیت گذرای کاهش بالازدگی (فراجهش) جریان رتور، گشتاور الکتریکی و شار استاتور و کاهش خطای تعقیب جریان رتور را به دنبال دارد اما منجر به نوسانی بودن پاسخ گذرا با زمان نشست بزرگ می شود و می توان نتیجه گرفت که پاسخ گذرای DFIG در حین خطا خراب می گردد. لذا برای انتخاب پهنا باند کنترل جریان رتور باید مسامحه ای بین بالازدگی و زمان نشست پاسخها در نظر

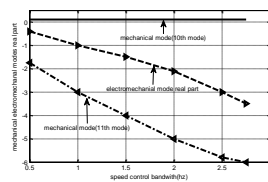
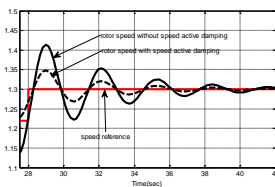
اثر آشفته‌گی سرعت باد و سایه برج بر روی شاخص‌های کیفیت توان توربین-ژنراتور مثل فلیکر، تغییرات ولتاژ و غیره تأثیر دارد. فرکانس تغییرات توان به واسطه پدیده سایه‌برج سه برابر سرعت چرخش توربین می‌باشد. فرکانس نوسان ΔT_m بستگی به سرعت روتور، تعداد قطب‌های ژنراتور، نسبت چرخ دنده، و تعداد پره‌های توربین دارد. ΔT_m را می‌توان به صورت سینوسی طبق رابطه (۱۸) مدل کرد.

$$I_{rq} = -k_{pw}(\omega_{r-ref} - \omega_r) - k_{tw} \int (\omega_{r-ref} - \omega_r) dt + D'_{damp} \cdot \omega_r + k_{droop} + \dots \quad (17)$$

$$\omega_{ls} = \frac{3(1-s)\omega_s}{n_p \cdot n_{gear}} \omega_b$$

$$\Delta T_m(t) = D_{Tm} \sin(\omega_{ls}t + \theta) \quad (18)$$

که ω_{ls} فرکانس نوسان گشتاور، n_p تعداد زوج قطب‌های ژنراتور، n_{gear} نسبت چرخ دنده، S لغزش ژنراتور، ω_s فرکانس سنکرون (۱pu) و ω_b فرکانس زاویه‌ای مبنا می‌باشد. دامنه گشتاور مکانیکی نوسانی حدود $10\% - 20\%$ مقدار حالت پایدار می‌باشد. ω_{ls} معمولاً کوچک است و $n_{gear} = 75$ و $n_p = 3$ برای $s_0 = -0.24$ ، $\omega_{ls} = 0.99Hz$ ، $\omega_b = 377$ را می‌توان در حلقه‌ی کنترل سرعت بعنوان اغتشاش (T_{dis}) قرار داد. همان‌طوری که قبلاً بیان شده، حلقه‌ی کنترل سرعت با پهنای باند زیاد و کنترل‌کننده PI و میرایی فعال، دینامیک‌های مکانیکی را بهبود می‌بخشد، و نوسان را کاهش می‌دهد. نوسانات سرعت زیاد، باعث نوسانی شدن گشتاور الکتریکی و جریان محور q روتور می‌شود، و همچنین مشکلاتی برای کانورتورهای روتور به‌وجود می‌آورد برای کاهش نوسانات در $I_{rq} T_e$ ، در شرایط نوسانات سرعت باد، مطابق شکل منحنی‌های شکل (۷) با 10% نوسان در گشتاور مکانیکی مورد بررسی قرار گرفته. $\Delta T_m = 0.17$ که نتیجه کاهش نوسانات $I_{rq} T_e$ می‌باشد.



شکل (۶) منحنی تغییرات مدهای مکانیکی ($\lambda_{10,11}$) و مدهای الکترومکانیکی ($\lambda_{5,6}$)

شکل (۷) پاسخ DFIG به تغییر پله در مرجع سرعت

سرعت روی این مدها نیز اثر گذاشت. مشاهده می‌شود که با افزایش α_ω میرایی $\lambda_{5,6}$ و λ_{10} افزایش داشته اما λ_{11} بدون تغییر مانده است. این مد که مربوط به متغیر حالت X_7 می‌شود با تغییر پهنای باند حلقه باز (α_T) تحت تأثیر قرار می‌گیرد. برای ایجاد تغییر در پهنای باند حلقه‌ی باز می‌توان از میرایی مؤثر استفاده نمود ($\alpha_T = \frac{D}{2H_r} + \frac{L_m}{2H_r L_s \psi_{sd0}} D_{damp}$). شکل (۷)

تغییرات بخش حقیقی مدهای مکانیکی ($\lambda_{10,11}$) در حالت افزایش D_{damp} را نشان می‌دهد و همان‌طور که ملاحظه می‌کنید حد پایداری در این مدها بهبود یافته است. برای بررسی و تأیید مفید بودن استفاده از روش میرایی مؤثر، شبیه‌سازی حوزه‌ی زمان با ایجاد یک تغییر پله‌ای در مرجع سرعت توربین باد $\omega_{r-ref} = 1.2pu$ به $\omega_{r-ref} = 1.3pu$ در $t=28sec$ انجام شده است و نتایج در شکل (۷) آمده است. طبق رابطه‌ی $T_e = -\frac{L_m}{L_s} \psi_{sd} i_{rq}$ و $\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{T_e + K_s \beta + D(\omega_t - \omega_r)}{2H_r}$ نوسانات سرعت روی گشتاور

الکتریکی و گشتاور الکتریکی روی جریان محور q روتور تأثیرگذار است. به همین خاطر در شکل (۷) 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.

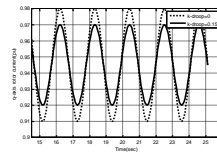
۱۱- تأثیر نوسانات سرعت باد روی رفتار توربین باد مجهز به DFIG:

در این بخش تأثیر نوسانات سرعت باد و گشتاور مکانیکی دور خروجی مشخصات الکتریکی ژنراتور بررسی شده است. مدل گشتاور مکانیکی را می‌توان به شکل رابطه (۱۶) نوشت.

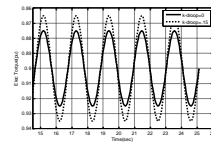
$$T_m(t) = T_{m0} + \Delta T_m \quad (16)$$

که در رابطه فوق T_{m0} گشتاور در نقطه کار و ΔT_m گشتاور سایه برج و آشفته‌گی باد است. توربین‌های بادی با محور افقی دارای پایه یا برج می‌باشند. این برج باعث اغتشاش در جریان باد به هنگام عبور پره از مقابل آن می‌شود. هر زمان یکی از پره‌ها توربین از مقابل پایه عبور می‌کند، پدیده‌ای به نام سایه برج بروز می‌کند. پدیده سایه برج باعث ایجاد تغییرات در توان مکانیکی توربین می‌شود. اگر توربین دارای سه پره باشد، تغییرات توان با فرکانس سه برابر چرخش توربین ظاهر می‌شود. نوسانات توان روی شافت می‌تواند باعث ایجاد نوسان توان خروجی ژنراتور شود.

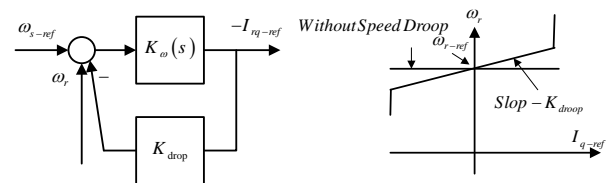
دینامیکی استاتور در دینامیک های جریان رتور از طریق کنترل ولتاژ رتور می تواند دینامیک رتور را بهبود ببخشد. و قادر است ride through را در حین خطا افزایش دهد. با این حال نشان داده شد که دینامیک های استاتور می تواند ضعیف شود و رفتار گذرای DFIG بعد از برطرف شدن خطا بدتر شود. دینامیک های افت الکتریکی از DFIG در فاز غیر خطی برای شرایط عملیاتی خاص و در نتیجه یک محدوده ذاتی برای پاسخ گذرا قابل یافتن است. همچنین نشان داده شد که دینامیک های DFIG تحت جریان EMF رتور و ولتاژ شبکه به عنوان یک سیستم تا حدی خطی شامل دینامیک های داخلی و خارجی است. دینامیک های داخلی شامل دینامیک استاتور نقش مهمی در رفتار گذرای DFIG دارد. آنها می توانند DFIG را برای بعد از خطا ناپایدار کنند. از آنجا که دینامیک های الکتریکی DFIG غیر خطی هستند، طرح کنترل خطی نمی تواند تحت افت ولتاژ زیاد عمل کند. کنترل کننده PI با میرایی فعال و مشخصه افتی سرعت-جریان این مشکل بهبود یافت. که دینامیک های داخلی را پایدار و رفتار بعد از خطای DFIG و ولتاژ کنترل رتور را بهبود می بخشد. نتایج شبیه سازی نشان داد که روش کنترل پیشنهادی تحت پارامتر های ژنراتور بسیار قوی عمل می کند



شکل (۷) تاثیر مشخصه سرعت-جریان روی جریان محور q



شکل (۷ الف) تحت شرایط نوسانات گشتاور مکانیکی با و بدون مشخصه افتی سرعت-جریان محور



شکل (۸) مشخصه افتی سرعت-جریان محور q

۱۲- نتیجه گیری

این مقاله در مورد ویژگی های دینامیکی و بهبود عملکرد گذرا در توربین های باد با DFIG ها بحث شد. تجزیه و تحلیل و ردیابی مقادیر ویژه برای شناسایی عدم بی ثباتی استفاده شد و کنترل کننده PI مشخصه افتی سرعت-جریان برای بهبود عملکرد گذرا مورد استفاده قرار گرفت. از بین بردن اثرات

۱۳- مراجع

[6] E.S Abdin and W.Xu, "Control design and dynamic performance analysis of a wind turbine- induction generator unit," Energy Conversion, IEEE Transaction on, vol 15, pp.91-96, 2000.

[1] P.W. Carlin, A.S. Laxson, and E. Muljadi, "The history and state of the art of variable-speed wind turbine technology," Wind Energy, vol. 6, pp.129-159, 2003.

[2] J. Tamura, T. Yamazaki, M. Ueno, Y. Matsumura, and s. kimoto, "Transient stability simulation of power system including wind generator by PSCAD/EMTDC," Transient stability Proceedings, 2001, p. 5 pp. vol. 4.

[3] O.C.Montero – Hernandez and P.N.Enjeti, "Ride-through for critical loads. Exploring a low-cost approach to maintaining continuous connections between buildings and/or industrial system," Industry Application Magazine, IEEE, vol. 8, pp.45-53, 2002.

[4] W.Christiansen and D.T.Johsen, "Analysis of requirements in selected Grid Codes."

[5] Orlando. S, Henrique. G, Antonio. M, Adriano. C, "Nonlinear control of the doubly-fed induction generator in wind power systems" Renewable Energy vol. 35, pp. 1662-1670, 2010.

Prepared for Orsted-DTU Section of Electric power Engineering, Technical University of Denmark (DTU), 2006.