

## بهبود عملکرد گذرای توربین های بادی مجهز به ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه با

### استفاده از استراتژی میرایی فعال

سعید سلیمانی<sup>۱</sup>، بهادر فانی<sup>۱</sup> و غضنفر شاهقلیان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد ssoleimani49@yahoo.com

<sup>۱</sup> عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد bahador\_fani@yahoo.com

عضو هیات علمی<sup>۲</sup> دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجفآباد ، Shahgholian@iaun.ac.ir

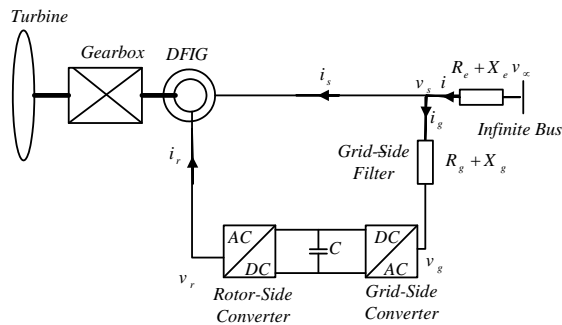
چکیده - در این مقاله ابتدا درباره مشخصات دینامیکی توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی دو سو تغذیه بحث می نماید. ولتاژهای نیروی ضد محرکه ی القایی ( $BACK\ EMF$ ) در  $DFIG$  اثرهای دینامیکی استاتور را روی جریان های دینامیکی روتور منعکس می کند و نقش مهمی روی جریان هجومی روتور در ضمن کمبود ولتاژ ژنراتور دارد. جبران سازی این ولتاژها می تواند قابلیت متصل به شبکه ژنراتور را بهبود دهد و جریان های گذرای روتور را محدود کند. طرح کنترل خطی به طور مناسب تحت کمبود ولتاژهای بزرگ نمی تواند کار کند، در این مورد ما از کنترل کننده با میرایی فعال استفاده می کنیم. دیدگاه پیشنهاد شده حالت های دینامیکی داخلی را از طریق کنترل ولتاژ روتور پایدار می کند و رفتار دینامیکی  $DFIG$  را بعد از برطرف شدن خطا بهبود می بخشد.

کلید واژه - حالت تناوبی باد، پهنای باند، میرایی فعال،  $Foc$ ، ژنراتور القایی دو سو تغذیه.

#### ۱- مقدمه

می کند، همچنین می تواند برای تزریق توان راکتیو و کنترل ولتاژ بکار رود. مزایای توربین های بادی مجهز به ژنراتور القایی دوسو تغذیه عبارتند از با ثابت بودن فرکانس الکتریکی شبکه و تنظیم فرکانس الکتریکی روتور، امکان کنترل سرعت مکانیکی و جذب حداکثر توان از توربین بادی وجود دارد، استهلاک قطعات مکانیکی سیستم کاهش می یابد، توان نامی مبدل های الکترونیک قدرت مورد استفاده در توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی دوسو تغذیه به اندازه ۳۰٪ ظرفیت ماشین است یکی از مهمترین کنترل کننده هایی که در صنعت به علت سادگی و ارزان بودن زیاد استفاده می شود کنترل کننده ی تناسبی انتگرالی PI است. اما این کنترل کننده در برخی موارد دارای عیوبی از جمله افزایش درجه ی سیستم (افزایش قطب سیستم) و امکان ناپایداری سیستم برای ضریب بهره تناسبی  $k_p$  بزرگ می باشد. به طور کلی از تعدادی کنترل کننده در توربین باد  $DFIG$  استفاده می شود که شامل حلقه های کنترل جریان محور  $q$  و  $d$  روتور، حلقه های کنترل سرعت (که توسط جریان و ولتاژ  $q$  روتور کنترل می شود)، حلقه های کنترل توان راکتیو (بدست آوردن جریان محور  $d$  روتور) می باشد. با اعمال کنترل برداری در مبدل سمت روتور در راستای میدان استاتور، توان اکتیو و راکتیو به صورت مستقل کنترل می شود، برای پیاده سازی کنترل برداری ژنراتور القایی دوسو تغذیه از کنترل کننده های PI استفاده شده است، که علاوه بر عیوبی که در بالا گفته شده، عیب اصلی کنترل کننده PI مقاوم

جهان امروز با چالش های فراوانی در بخش تولید انرژی مواجه است. مشکلات زیست محیطی نظیر تغییرات آب و هوایی، گرم شدن زمین، ازدیاد گازهای گلخانه ای از یک سو و همچنین مسائل اجتماعی همچون رشد جمعیت جهانی، افزایش روز افزون تقاضای انرژی، افزایش هزینه های تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی از سوی دیگر باعث ایجاد نگرانی هایی برای بسیاری از کشورهای جهان و بحث مدیریت منابع انرژی گردیده است. در سالهای اخیر انرژی های تجدیدپذیر به دلیل کاهش آلودگی زیست محیطی ناشی از تولید انرژی الکتریکی مورد توجه قرار گرفته اند. استفاده از انرژی باد به عنوان یکی از مهم ترین منابع انرژی تجدیدپذیر دارای توجیه اقتصادی، در بسیاری از کشورهای جهان روبه فزونی گذاشته است. ژنراتور القایی دوسو تغذیه در واقع همان ژنراتور القایی روتور سیم پیچی 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 می گردد. بین دو مبدل یک خازن که به آن خازن لینک  $dc$  گفته می شود، قرار می گیرد. این خازن به عنوان ذخیره کننده انرژی و به منظور ثابت نگاه داشتن ولتاژ (کاهش ریبیل ولتاژ) به کار می رود. وظیفه مبدل سمت روتور، کنترل توان اکتیو و راکتیو ماشین است. مبدل سمت شبکه ولتاژ لینک  $dc$  را کنترل



شکل (۱) توربین به همراه DFIG متصل شده به باس بی نهایت

$$C_p(\lambda, \theta) = C_1 \left( C_2 \frac{1}{\lambda} - C_3 \theta - C_4 \theta^2 - C_5 \right) \exp \left( -C_6 \frac{1}{\lambda} \right) \quad (3)$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda + 0.80\theta} - \frac{0.035}{1 + \theta^3}$$

## ۲- بهبود عملکرد گذرای توربین های بادی مجهز به ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه با استفاده از استراتژی میرایی فعال

در این مقاله ابتدا درباره مشخصات دینامیکی توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی تغذیه دو سو بحث می نماید. ولتاژهای نیروی ضد محرکه ی القایی (BACK EMF) در DFIG اثرهای دینامیکی استاتور را روی جریان های دینامیکی روتور منعکس می کند و نقش مهمی روی جریان هجومی روتور در ضمن کمبود ولتاژ ژنراتور دارد. جبران سازی این ولتاژها می تواند قابلیت متصل به شبکه 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، طرح کنترل خطی به طور مناسب تحت کمبود ولتاژهای بزرگ نمی تواند کار کند، در این مورد ما از کنترل کننده با میرایی فعال استفاده می کنیم. دیدگاه پیشنهاد شده حالت های دینامیکی داخلی را از طریق کنترل ولتاژ روتور پایدار می کند و رفتار دینامیکی DFIG را بعد از برطرف شدن خطا بهبود می بخشد. در میان راهکارهای مختلف برای به کارگیری توربین های بادی سرعت متغیر، سیستم ژنراتور القایی تغذیه دو سو دارای مشهوریت بیشتری شده است. 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. دامنه گسترش استفاده از انرژی باد در سیستم های تولید توان الکتریکی در حال افزایش است. رفتار توربین بادی (WT) تحت خطاها، کمبود ولتاژها و اختلالات بسیار مهم می شوند. از این نقطه نظر، کارایی سیستم

نبودن آن در شرایط تغییر جزئی پارامترهای سیستم و نقطه کار است. در بعضی مواقع از کنترل کننده های غیرخطی برای این امر استفاده شده است. اما پیچیدگی پیاده سازی این نوع کنترل کننده ها از عیوب آنها محسوب می شود. مدل سازی دینامیکی قسمت های مکانیکی، الکتریکی و کنترل کننده های PI روتور نشان می دهد که پهنای باند این کنترل کننده ها کم است که باعث کندی پاسخ سیستم می شود. بنابراین در این مقاله، افزایش پهنای باند کنترل کننده پیشنهاد می گردد. برای بهبود عملکرد کنترل کننده های PI حلقه ی کنترل جریان روتور، حلقه کنترل سرعت روتور و حلقه کنترل قدرت راکتیو، پهنای باند کنترل کننده های را با میرایی فعال افزایش داده می شود و اثرات آن را روی پارامترهای کنترلی بررسی می شود. با افزایش پهنای باند، ردیابی سیستم و سرعت ردیابی مورد ارزیابی قرار می گیرد. همچنین اثرات پهنای باند روی مدهای استاتور، پارامترهای کنترل کننده ها، گشتاور الکتریکی، مدهای مکانیکی، حالت های گذرا و نوسانات سرعت مورد بررسی قرار می گیرد.

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

توان مکانیکی و گشتاوری که از باد توسط چرخش توربین استخراج می شود، همواره برابر ضریبی از توان باد می باشد. این توان از روابط (۱) و (۲) قابل محاسبه است:

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

$$\lambda = \frac{\omega_{mech} R}{V_{wind}} = TSR \quad T_{ww} = \frac{P_{ww}}{\omega_{mech}} \quad (2)$$

$P_{ww}$  توان خروجی و  $T_{ww}$  گشتاور خروجی توربین بادی می باشند، در روابط فوق  $C_p$  ضریب قدرت توربین نامیده می شود و همواره بین ۰ تا ۰/۴۴۷ قرار خواهد داشت.  $v_{wind}$  سرعت باد درست قبل از برخورد با پره ها است.  $\omega_{mech}$  در رابطه (۲) سرعت زاویه ای شفت توربین برحسب رادیان مکانیکی بر ثانیه می باشد. همانطور که در رابطه (۱) نیز مشهود است؛  $C_p$  تابع  $\lambda, \theta$  می باشد. در واقع  $\lambda$  نسبت سرعت خطی نوک پره توربین به سرعت باد می باشد.  $R$  شعاع هر پره و  $\Gamma R^2$  مساحتی است که پره ها هنگام چرخش جاروب می کنند.  $\theta$  نیز زاویه پیش زوایه پره ها می باشد. رابطه (۳) ارتباط بین  $C_p, \lambda, \theta$  را نشان می دهد.

کنترل کننده ها می باشد. این نشان داده می شود که حالت های دینامیکی استاتور، دارای میرایی اندکی می باشد. با توجه به اینکه مقاومت رتور ( $R_r$ ) خیلی کوچک تر از اندوکتانس ( $L_r$ ) می باشد، بنابراین پاسخ جریان رتور به ولتاژ ضد محرکه رتور کند است. برای حل این مشکل پهنای باند حلقه باز سیستم  $\alpha_s$  باید افزایش یابد که این کنترل، میرایی فعال نامیده می شود. حلقه کنترل جریان با میرایی فعال در شکل (۲) نشان داده شده با توجه به شکل (۴)، برای بهبود پهنای باند حلقه بسته باید داشته باشیم:  $\alpha_{s-active}$  پهنای باند با میرایی فعال و  $R_r-active$  مقاومت میرایی فعال می باشد.

$$\alpha_{s-active} = \frac{R_r' + R_r-active}{L_r'} \omega_b \quad (4)$$

### ۳- مدل رتور

حالت های دینامیکی رتور بر حسب جریان رتور و فلوی استاتور به صورت زیر اثبات و توصیف می شود:

$$\frac{L_r'}{\omega_b} \frac{di_{rdq}}{dt} = -R_r' i_{rdq} - j \omega_2 L_r' i_{rdq} - e_{dq} + V_{rdq} \quad (5)$$

$$L_r' = L_r - \frac{L_m^2}{L_s}, R_r' = R_r + \left( \frac{L_m}{L_s} \right)^2 R_s \quad (6)$$

$$e_{dq} = \frac{L_m}{L_s} \left( V_{sdq} - j \omega_1 \psi_{sdq} - \frac{R_s}{L_s} \psi_{sdq} \right) \quad (7)$$

$\omega_r$  سرعت رتور و معادل رابطه  $\omega_r = \omega - \omega_2$  می باشد. متغیرهای  $e_d$  و  $e_q$  در رابطه ی (۵) توابعی از فلوی استاتور و ولتاژ استاتور هستند. این متغیرها، ولتاژهای نیروی ضد محرکه القایی رتور نامیده می شوند و اثرات حالت های دینامیکی استاتور را روی حالت های دینامیکی جریان رتور منعکس می کنند و نقش مهمی در عملکرد گذرای DFIG دارند. با جبران سازی ترم های تزویج متقابل  $\omega_2 L_r' i_{rq}$  و  $\omega_2 L_r' i_{r\theta}$  با استفاده از کنترل کننده های حلقه های کنترل جریان d-q رتور، تحت جبران سازی ترم های تزویج متقابل در شکل (۲) و نشان داده شده است. ولتاژهای نیروی ضد محرکه ی القایی  $e_d$  و  $e_q$  به عنوان اختلال در حلقه های کنترل جریان در شکل های (۲) معرفی می شوند. بالانویس  $\hat{\cdot}$  در شکل ها متغیرهای اندازه گیری شده یا محاسبه شده در ورودیهای کنترل کننده را مشخص می کنند. به منظور کاهش ردیابی خطا، ولتاژهای نیروی ضد محرکه ی القایی به وسیله کنترل کننده های متغیرهای جریان به صورت

تولید توان به سه فاز عملکردی دسته بندی می شود: قبل از وقوع خطا، موقع وقوع خطا و پس از برطرف شدن خطا مطلوب است که توربین های 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. توانایی توربین بادی برای باقی ماندن اتصال آن در شبکه در ضمن وقوع خطاها و کمبود ولتاژها به عنوان میزان قابلیت عملکرد توربین بادی در ولتاژهای پایین تعیین می شود [۱]. تحقیقات قابل توجهی در زمینه قابلیت باقی متصل بودن به شبکه (و بررسی رفتار دینامیکی DFIG مجهز به توربین بادی در موقع وقوع خطاها و کمبود ولتاژها انجام شده است [۲-۴]. بر دو مسئله مهم در رسیدن به الزامات قابلیت متصل بودن به شبکه مربوط به DFIG در ضمن وقوع کمبود ولتاژ باید غلبه نمود. مسئله اول پیک خطای جریان رتور است که از محدوده خودش تجاوز می نماید و مسئله دوم اضافه ولتاژ خط ارتباط DC می باشد. جبران سازی ولتاژهای نیروی ضد محرکه رتور یکی از روشهای موثر استفاده شده در محدود کردن جریان های هجومی رتور در ضمن وقوع خطا می باشد. در حقیقت به وسیله استفاده از این استراتژی کنترل، حالت های دینامیکی رتور بهبود خواهند یافت و از حالت های دینامیکی استاتور مستقل می شوند. اگر چه ما نشان می دهیم که این روش در حالت های دینامیکی دیگر سیستم می تواند ضعیف عمل کند و رفتار DFIG را پس از برطرف شدن خطا بحرانی تر نماید. رفتار ژنراتور توربین پس از برطرف شدن خطا، درحوزه ی مطالعات حالت های گذرای پس از خطا می باشد. این مطالعات تعیین می کند آیا سیستم پس از خطا با افزایش زمان نسبت به یک حالت ماندگار قابل قبول، همگرایی لازم را خواهد داشت. چندین مقاله درباره ی رفتارهای گذرا و دینامیکی DFIG ها [۵]، [۶]، [۷]، وجود دارند. حالت های دینامیکی DFIG تحت جبران سازی EMF رتور 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 کمبود ولتاژهای بزرگ نمی تواند کار کند. دیدگاه پیشنهاد شده یک ترکیب انتگرال گیر تناسبی (PI) و میرایی فعال است که حالت های دینامیکی داخلی را پایدار می سازد و رفتار DFIG را پس از برطرف شدن خطا از طریق کنترل ولتاژ رتور بهبود می بخشد. تحلیل ها در برگیرنده حالت های دینامیکی فیلتر شبکه، رتور و استاتور و

ولتاژها با استفاده از متغیرهای پیشخور نشان داده شده در شکل (۲) جبران می شوند.

#### ۵- مدل کردن استاتور

با در نظر گرفتن کنترل برداری در راستای فلوی استاتور کنترل توان اکتیو و راکتیو را ممکن می سازد در مدل مرجع گردان، متغیرهای d-q در حالت ماندگار ثابت اند که برای مدل سیگنال کوچک در یک نقطه کار انتخابی مناسب می باشد. هدف از این قسمت معرفی مدل دینامیکی یک سیستم تک ماشینه متصل به شین بی نهایت در دستگاه مرجع d-q با در نظر گرفتن راستای میدان استاتور می باشد. روابط فوق  $\psi$ ،  $V$  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،  $\omega_2$  فرکانس لغزش روتور،  $\omega_b$  فرکانس زاویه ای اساسی و  $\omega$  سرعت قاب مرجع d-q منطبق با فلوی استاتور می باشد. همچنین  $R_s$  و  $R_r$  مقاومت های استاتور و روتور هستند.

$$\psi_{sd} = \psi_s \quad \psi_{sq} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{L_e}{\omega_b} \frac{di_d}{dt} = -R_e i_d + \omega L_e i_q - V_{sd} + V_{\text{od}} \quad (11)$$

$$V_{sdq} = R_s i_{sdq} - \omega \psi_{sqd} \pm \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{sdq}}{dt} \quad (12)$$

$$\psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \quad \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \quad (13)$$

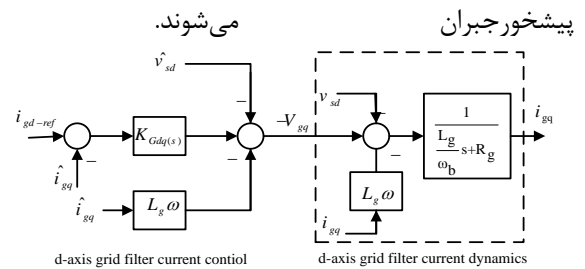
#### ۶- مدل مکانیکی توربین بادی و کنترل کننده سرعت:

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:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{T_e + K_s \beta + D(\omega_t - \omega_r)}{2H_r} \quad (14)$$

$$\frac{d\omega_t}{dt} = \frac{T_m - K_s \beta - D(\omega_t - \omega_r)}{2H_t}, \frac{d\beta}{dt} = \omega_b (\omega_t - \omega_r) \quad (15)$$

که  $\omega_r$  و  $\omega_t$  به ترتیب سرعت های ژنراتور و توربین (پریونیت) هستند،  $\beta$  زاویه پیچشی شافت (در رادیان)، و  $H_r$  و  $H_t$  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



شکل (۲) حلقه ی کنترل جریان فیلتر شبکه  $i_{gd}$

با در نظر گرفتن کنترل کننده های روتور به صورت PI و همچنین با ساختار کنترلی شکل و (۲) تحت جبران سازی ترم های تزویج متقابل، ولتاژ d-q روتور می تواند تعیین شود:

$$V_{rdq} = K_{p-idq} (i_{rdq-ref} - i_{rdq}) + \frac{K_{i-idq}}{s} (i_{rdq-ref} - i_{rdq}) + j\omega_2 L_r' i_{rdq} + K_{com} e_{dq} \quad (8)$$

در اینجا  $i_{rdq-ref}$  مؤلفه های جریان مرجع d-q روتور را نشان می دهد. در رابطه ی (۸)  $K_{com}$  می تواند صفر یا یک باشد.  $K_{com} = 1$  این معنی را می دهد که ولتاژهای نیروی ضد محرکه ی القایی به وسیله کنترل کننده های جریان روتور جبران می شوند و  $K_{com} = 0$  این معنی را می رساند که آنها جبران نمی شوند. با در نظر گرفتن شکل (۲) پهنای باند کنترل حلقه باز جریان در پریونیت به صورت  $\alpha_s = R_r' / L_r'$  می باشد که مقدار نسبتاً کوچکی است.

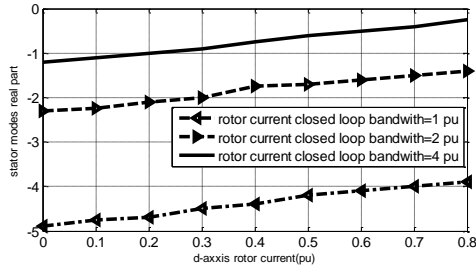
#### ۴- مدل فیلتر طرف شبکه

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:

$$\frac{L_g}{\omega_b} \frac{di_{gdq}}{dt} = -R_g i_{gdq} - j\omega L_g i_{gdq} - V_{gdq} + V_{sdq} \quad (9)$$

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 در شکل (۲) 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

بهره برداری را در حالتی که کاهش ولتاژ و نوسانات سرعت باد داریم بر روی سیستم تحلیل می کند.



شکل (۶) بخش حقیقی مدهای استاتور نسبت به تغییرات  $i_{rd}$  تحت چند پهنای باند مشخصه حلقه ی بسته ی جریان رتور

#### ۸- آنالیز مودال و پایداری سیگنال کوچک

مشتمل بر 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:

$$\dot{x} = f(x, z, u) = Ax + Bu, z = [V_s, T_m]^T$$

$$x = \begin{bmatrix} \psi_{sd}, \gamma, i_{rd}, i_{rq}, x_5, x_6, x_7, x_8 \\ \omega_r, \beta, \omega_t, i_{gq}, x_{14}, x_{15}, v_{dc}, x_{17} \end{bmatrix}^T \quad (17)$$

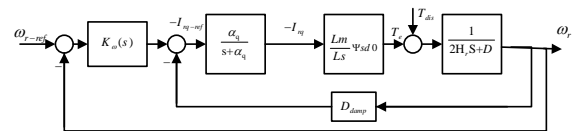
بردار ستونی  $x$  بردار حالت، و عناصر آن  $x_i$  متغیر حالت نامیده می شوند. بردار ستونی  $u$  بردار ورودی های سیستم (بردار کنترل) است که سیگنال های خارجی هستند که بر عملکرد سیستم تأثیر می گذارند.

#### ۹- حساسیت مدهای استاتور نسبت به پهنای باند

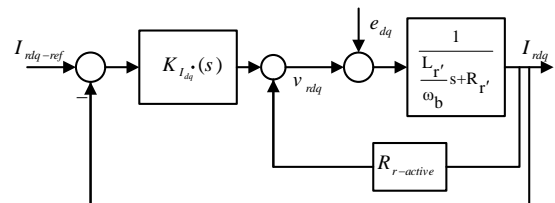
##### حلقه بسته ی جریان رتور:

ضرائب مشارکت نشان می دهند که پس از  $\gamma, \psi_{sd}$ ، متغیرهای حالت  $i_{rd}, i_{rq}$  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 ( $\alpha_{dq}$ ) 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  $\alpha_{dq}$  در مدهای ناکافی میرایی استاتور چگونه است. شکل (۶) قسمت حقیقی مدهای استاتور نسبت  $\alpha_{dq}$  را نشان می دهد و همان طور که می بینید با افزایش پهنای باند  $\alpha_{dq}$  (با

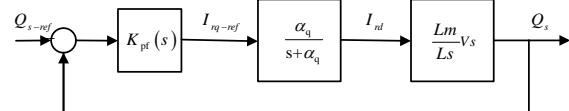
جریان و ولتاژ  $q$  رتور ( $v_{rq}, i_{rq}$ ) کنترل می شوند. طرح کنترلی استفاده شده برای کنترل سرعت در شکل (۳) نشان داده شده است. در این شکل،  $\alpha_q$  پهنای باند حلقه کنترل جریان محور  $q$  رتور می باشد. و  $T_m' = K_s \beta + D \omega_t$  با به کارگرفتن یک کنترل کننده PI برای کنترل کننده سرعت به صورت  $K_w(s) = K_{pw} + \left( \frac{K_{iw}}{s} \right)$  یک متغیر میراکننده ی فعال برای افزایش پهنای باند حلقه باز در کنترل کننده نشان داده در شکل (۳)، می تواند استفاده شود  $(-D/2H_r)$  و در نتیجه پاسخ دینامیکی سرعت رتور بهبود می یابد.



شکل (۳) حلقه ی کنترل سرعت با میرایی مؤثر



شکل (۴) حلقه ی کنترل جریان رتور با میرایی مؤثر



شکل (۵) حلقه ی کنترل توان راکتیو

#### ۷- شبیه سازی در حوزه ی زمان و فرکانس:

به دلیل افزایش کاربرد انرژی باد برای تولید انرژی الکتریکی و گسترش زیاد توان باد به شبکه ی قدرت، رفتار دینامیکی توربین باد در شرایط خطاهای شبکه، کمبود ولتاژ، رفتار نوسانی سرعت باد و اغتشاشات دیگر اهمیت فراوانی یافته است. مطالعات مربوط به رفتار دینامیکی توربین های باد مجهز به DFIG در دو دسته ی کلی قرار می گیرد. مطالعات مبتنی بر شبیه سازی در حوزه ی 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

وجود امپدانس شبکه باعث بهبود میرایی مدهای استاتور شده است در حالی که دیگر مدها تقریباً بدون تغییر مانده اند.

### ۱۳-۱- تأثیر پهنای باند حلقه‌ی بسته‌ی جریان رتور و میرایی مؤثر جریان رتور

برای رسیدن به این هدف یک Dip ولتاژ ۳۰٪ با طول زمان ۳۰۰ میلی ثانیه در  $t=1\text{ms}$  در ترمینال DFIG ایجاد شده است. نقاط بهره‌برداری DFIG قبل از خطا  $S_0 = -0.24$ ,  $P_{e0} = 0.6\text{pu}$ ,  $i_{rd0} = 0.3\text{pu}$  شکل (۷) پاسخ گذرای DFIG را نشان می‌دهند. در شکل (۷) پاسخ‌ها با ۲ پهنای باند ۱ پریونیت و ۴ پریونیت به نمایش در آمده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که افزایش پهنای باند کنترل هرچند مواردی مثل بهبود دینامیک جریان رتور، محدودیت گذرای کاهش بالازدگی (فراجاهش) 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 می‌شود و می‌توان نتیجه گرفت که پاسخ گذرای DFIG در حین خطا خراب می‌گردد. لذا برای انتخاب پهنای باند کنترل جریان رتور باید مسامحه‌ای بین بالازدگی و زمان نشست پاسخ‌ها در نظر گرفت. در شکل (۷) پاسخ‌ها در ۲ حالت میرایی مؤثر و بدون میرایی مؤثر آورده شده‌اند (در هر دو حالت پهنای باند کنترل جریان رتور ۱ پریونیت است). در حالتی که میرایی مؤثر داریم بالازدگی پاسخ‌هایی مثل گشتاور الکتریکی، شار استاتور و جریان رتور محدود شده است اما زمان نشست کلیه‌ی پاسخ‌ها و نیز بالازدگی پاسخ ولتاژهای رتور زیاد شده است.

### ۱۳-۲- تأثیر ولتاژهای BEMF رتور:

در این قسمت یک Dip ولتاژ ۳ فاز با طول زمان ۳۰۰ میلی ثانیه در ترمینال DFIG اعمال شده است. شکل (۸) رفتار گذرای DFIG را در دو حالت جبران و بدون جبران ولتاژهای BEMF نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با جبران ولتاژهای  $e_{dq}$  ( $k_{com} = 1$ ) بالازدگی در جریان‌های رتور کاهش یافته است (پس از رفع خطا) 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.

ثابت نگه داشتن سایر پارامترها) میرایی مدهای استاتور کاهش قابل توجهی دارند.

۱۰- حساسیت مدهای استاتور نسبت به جریان  $d$  رتور: با کنترل برداری شار استاتور، توان راکتیو مستقیماً متناسب با  $i_{rd}$  است  $(Q_s = \frac{\omega_s}{L_s} \psi_{sd} (L_m i_{rd} - \psi_{sd}))$ . بیشترین اثر روی مدهای ناکافی میراشده‌ی 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 کار کردن 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.

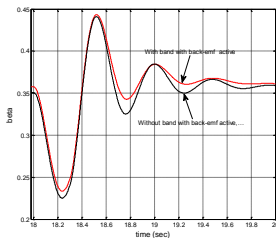
### ۱۱- جبران ولتاژهای BEMF رتور

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

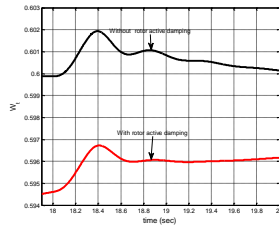
### ۱۲- حساسیت مدهای استاتور نسبت به امپدانس شبکه:

در تحلیل مودال انجام شده فرض شد که سیستم DFIG بدون امپدانس به شبکه متصل شده است (نسبت اتصال کوتاه (SCR) در نقطه‌ی PCC بی‌نهایت). در این قسمت برای بررسی اثر وصل DFIG با امپدانس به شبکه روی میرایی مدهای استاتور، برای نقطه PCC، SCR را برابر 10pu در نظر می‌گیریم ( $|R_e + jX_e| = 0.1\text{pu}$ ) با  $\frac{R}{X} = 0.1$ . نتایج تحلیل مودال در این حالت نشان می‌دهد که

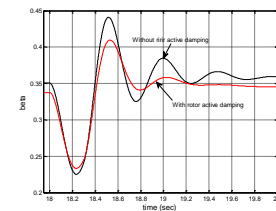
کنترل‌کننده‌های PI حلقه‌ی کنترل جریان روتور، حلقه کنترل سرعت روتور و حلقه کنترل قدرت راکتیو، پهنای باند کنترل‌کننده‌های را با میرایی فعال افزایش داده شده شبیه سازی در حوزه فرکانس و زمان بهبود پاسخ‌های گذرا را نشان می‌دهد افزایش پهنای باند، ردیابی سیستم و سرعت ردیابی را بیشتر می‌کند.



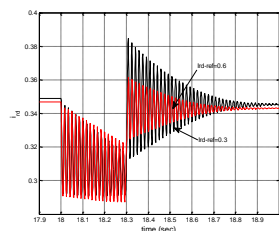
زاویه پیش شافت



سرعت توربین



زاویه پیش شافت



جریان محور d روتور

شکل (۷)

۱۴- تأثیر جریان محور d روتور و ضریب توان DFIG: دینامیک‌های استاتور وابسته به جریان محور d رتور 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 (۷) برخی از کمیت‌ها را در دو حالت  $i_{rd-ref}=0.6\text{pu}$  و  $(P.F=1)i_{rd-ref}=0.3\text{pu}$  (در این حالت DFIG توان راکتیو ۰/۱۵ پریونیت به شبکه تزریق می‌کند یعنی در مد Leading P.F کار قرار دارد) نشان می‌دهد. 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 این‌که میرایی مدهای حساس استاتور و در نتیجه رفتار گذرای DFIG با افزایش جریان  $i_{rd}$  خراب می‌شود.

#### ۱۵- نتیجه‌گیری

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. طرح کنترل خطی به طور مناسب تحت کمبود ولتاژهای بزرگ نمی‌تواند کار کند، در این مورد از کنترل‌کننده با میرایی فعال استفاده شد. برای بهبود عملکرد

#### ۱۶-مراجع

[4] 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.  
[5] 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.  
[6] E.Muljadi, K.Pierce, and P.Migliore, "Control strategy for variable-speed, stall-regulated wind turbines," in American Control Conference, 1998. Proceedings of the 1998, 1998, PP. 1710-1714.  
[7] 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] 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.  
[2] S.Alepuz, S.Busquets-Monge, J.Bordonau, J.A.Martinez-Velasco, C.A.Silva, J.Pontt, and J. Rodriguez, "Control strategies based on symmetrical components for grid-connected converters under voltage dips," Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol.56, pp.2162-2173, 2009.  
[3] W.Christiansen and D.T.Johsen, "Analysis of requirements in selected Grid Codes," Prepared for Orsted-DTU Section of Electric power Engineering, Technical University of Denmark (DTU), 2006.