

## بررسی مقدار حساسیت مسیر نسبت به پارامترهای کنترلی DFIG در برابر تغییر

### سرعت باد

مهدی فولادگر<sup>۱</sup>، بهادر فانی<sup>۱</sup>، غضنفر شاهقلیان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، دانشکده مهندسی برق، Bahman1475@yahoo.com

<sup>۲</sup> دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، دانشکده مهندسی برق، shahgholian@iaun.ac.ir

چکیده - این مقاله استفاده از تحلیل حساسیت مسیر در سیستم‌های تولید پراکنده (DG) را بررسی می‌کند. نشان داده می‌شود که روش ذکر شده می‌تواند در تعیین اثر پارامترهای کنترلی توربین بادی متصل به ژنراتور القایی تغذیه دابل (DFIG) مانند کنترل‌کننده‌های تناسبی و کنترل‌کننده‌های انتگرالی در برابر تغییر سرعت باد بر روی پایداری گذاری سیستم مفید باشد. برای مشخص نمودن مقدار حساسیت توربین بادی متصل به ژنراتور القایی تغذیه دابل نسبت به ۱۰ پارامتر کنترلی در برابر تغییر سرعت باد، متغیرهای حالت سیستم و لغزش DFIG مورد بررسی قرار می‌گیرند. با توجه به بررسی‌ها و شبیه‌سازی‌های انجام گرفته می‌توان به طور کلی به این نتیجه رسید که پارامترهای کنترلی تناسبی از پارامترهای کنترلی انتگرالی اهمیت بیشتری در رفتار DFIG دارند. همچنین پارامترهای کنترلی از نظر اهمیت تأثیرگذاری بر روی رفتار DFIG تقسیم‌بندی می‌شوند.

کلید واژه- ژنراتور القایی تغذیه دابل (DFIG)، توربین بادی (WT)، سیستم‌های تولید پراکنده (DG)، تحلیل حساسیت مسیر (TSA).

$$\dot{x} = f(t, x, p(t)) \quad x(t_0) = x_0 \quad (1)$$

در معادله (۱)،  $x$  یک بردار  $n$  بعدی از متغیرهای حالت است و  $p$  یک بردار  $m$  بعدی از پارامترهای سیستم است که می‌توانند متغیر با زمان باشند و یا این که متغیر با زمان نباشند. برای سادگی، حساسیت مسیر متغیر حالت  $x$  را نسبت به پارامتر  $p$  با  $x_p$  تعریف می‌کنیم و به صورت معادله زیر نشان می‌دهیم:

$$x_p = \frac{\partial x}{\partial p} = s(t) \quad (2)$$

در معادله (۲)  $x_p$  یک ماتریس  $n \times m$  است. حال اگر در پارامتر  $p$  تغییری نسبت به مقدار اولیه آن ایجاد کنیم، حل رابطه (۱) به صورت زیر خواهد بود:

$$x(t, p) = x_0 + \int_{t_0}^t f(t, x(t, p), p) dt \quad (3)$$

زمانیکه  $x_0$  مستقل از  $p$  است مشتق جزئی رابطه (۳) نسبت به پارامتر  $p$  برابر خواهد بود با:

$$\frac{\partial x}{\partial p} = \int_{t_0}^t \left[ \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial p} + \frac{\partial f}{\partial p} \right] dt \quad (4)$$

با جای گذاری رابطه (۲) در (۴) خواهیم داشت:

$$\frac{\partial x}{\partial p} = \int_{t_0}^t \left[ \frac{\partial f}{\partial x} x_p + \frac{\partial f}{\partial p} \right] dt \quad (5)$$

سپس با مشتق‌گیری از رابطه (۵) نسبت به زمان  $(t)$  معادله حساسیت به صورت زیر به دست خواهد آمد:

### ۱- مقدمه

با افزایش سهم تولید DG، اثر آن روی پایداری سیستم‌های توان بسیار مهم می‌شود [۱ و ۲]. روش استاندارد برای افزایش پایداری دینامیکی سیستم‌های توان، روش‌هایی مبتنی بر تابع انرژی گذرا (TEF) می‌باشد. با این وجود این روش‌ها به طور زیادی پیچیده می‌شود. هنگامی که مدل‌ها به صورت دقیق‌تر بررسی می‌شوند، ثنوری حساسیت برای حل این مسئله با استفاده از تحلیل‌های حساسیت مسیر می‌تواند معرفی شود [۳]. در این مقاله، ژنراتور القایی تغذیه دابل متصل به توربین بادی به عنوان DG استفاده می‌شود. تحلیل حساسیت مسیر در یک سیستم SMIB انجام می‌شود که اثرات آن را در افزایش ناحیه‌ی پایداری گذرا نشان می‌دهد.

### ۲- تحلیل‌های حساسیت مسیر و مدل‌سازی سیستم‌های توان

#### ۲-۱- تحلیل‌های حساسیت مسیر

ابتدا اجازه دهید یک سیستم توصیف شده با استفاده از تعدادی معادلات دیفرانسیل در نظر گرفته شود:

۱- جهت مثبت جریان های رتور و استاتور ماشین به سوی ژنراتور فرض شده اند. همچنین جهت مثبت فیلتر سمت شبکه، به سوی مبدل سمت شبکه در نظر گرفته شده اند.  
۲- تمام پارامترها و متغیرهای سیستم پریونیت هستند و به سمت استاتور توربین بادی تغذیه دوپل ارجاع داده شده اند.  
معادلات اساسی زیر برای مدل ژنراتور DFIG استفاده می شوند [۷]:

$$V_{sdq} = R_s i_{sdq} + j \omega \psi_{sdq} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{sdq}}{dt} \quad (8)$$

$$V_{rdq} = R_r i_{rdq} + j \omega_2 \psi_{rdq} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{rdq}}{dt} \quad (9)$$

$$\psi_s = L_s i_s + L_m i_r \quad (10)$$

$$\psi_r = L_m i_s + L_r i_r \quad (11)$$

روابط فوق  $\psi$ ،  $V$  و  $i$  به ترتیب معرف شار، ولتاژ و جریان هستند. اندیسهای  $s$  و  $r$ ، به ترتیب کمیت های استاتور و رتور را نشان می دهند.  $L_s$  و  $L_r$  اندوکتانس های خودی استاتور و رتور هستند،  $L_m$  اندوکتانس متقابل،  $\omega_2$  فرکانس لغزش رتور،  $\omega_b$  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 رتور هستند. گشتاور الکترومکانیکی و توان راکتیو تزریق شده توسط سیم پیچ های استاتور به شبکه به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$T_e = \frac{L_m}{L_s} (\psi_{sq} i_{rd} - \psi_{sd} i_{rq}) \quad (12)$$

$$Q_s = V_{sd} i_{sq} + V_{sq} i_{sd} \quad (13)$$

### الف) مدل رتور

از روابط (۹) - (۱۱)، حالت های دینامیکی رتور برحسب جریان رتور و فلوی استاتور به صورت زیر توصیف می شود:

$$\frac{L'_r}{\omega_b} \frac{di_{rdq}}{dt} = -R'_r i_{rdq} - j \omega_2 L'_r i_{rdq} - e_{dq} + V_{rdq} \quad (14)$$

که  $L'_r$ ،  $R'_r$  و  $e_{dq}$  به صورت زیر تعریف می شوند:

$$L'_r = L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \quad (15)$$

$$\dot{x}_p = \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right) x_p + \left( \frac{\partial f}{\partial p} \right), \quad (6)$$

$$x_p(t_0) = 0$$

حل روابط (۱) و (۶) به ترتیب مسیر حالت و حساسیت مسیر را نتیجه می شوند [۴]. در معادله (۶) ماتریس

$n \times n$  ژاکوبین است که در طول شبیه سازی به طور مداوم در حال تغییر است [۵] و  $\left( \frac{\partial f}{\partial p} \right)$  ماتریسی  $n \times 1$  می باشد که با

توجه به هر پارامتر به دست می آید. بنابراین معادلات تحلیل حساسیت مسیر برای هر پارامتر می تواند به صورت مستقل از معادلات تحلیل حساسیت مسیر پارامترهای دیگر حل شود [۵]-

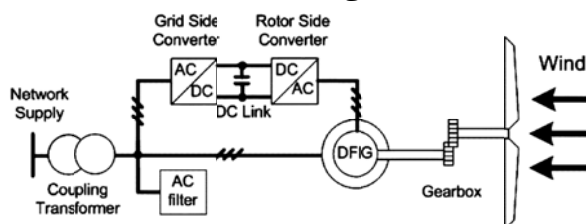
[۶]. با این وجود، حساسیت ها می توانند در یک روش ساده تر با استفاده از روش عددی تعیین شوند. اجازه دهید ما تنها یک پارامتر انتخاب کنیم، برای مثال  $\lambda$  یک متغیر اسکالر باشد و حساسیت ها نسبت به آن مطالعه می شوند. دو مقدار  $\lambda$  انتخاب می شود ( $\lambda_1$  و  $\lambda_2$ ). بردارهای حالت مربوطه  $x_1$  و  $x_2$  به ترتیب محاسبه می شوند. حال حساسیت به صورت زیر تعریف می شود:

$$Sens = \frac{x_2 - x_1}{\Delta \lambda} = \frac{\Delta x}{\Delta \lambda} \quad (7)$$

اگر  $\Delta \lambda$  مقدار کوچکی باشد، حساسیت عددی به مقدار حساسیت مسیر محاسبه شده به صورت تحلیلی خیلی نزدیک می باشد. بنابراین حساسیت مسیر می تواند به صورت عددی محاسبه شود.

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

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 (شکل (۱)).



شکل ۱: دیاگرام ساختاری توربین بادی تغذیه دوپل مدل سازی شده  
مدل سازی بر اساس دو شرط صورت پذیرفته است که این شرطها عبارتند از:

می باشد،  $\omega$  سرعت قاب مرجع d-q بر حسب پریونیت و معادل فرکانس فلوی استاتور می باشد. همچنین  $\omega_s = \left(\frac{1}{\omega_b}\right) \left(\frac{d\theta_s}{dt}\right)$  و  $\omega = \left(\frac{1}{\omega_b}\right) \left(\frac{d\theta}{dt}\right)$  می باشد. متغیرهای  $\theta_s$  و  $\theta$  به ترتیب زاویه ولتاژ باس بی نهایت و زاویه فلوی استاتور در قاب مرجع ثابت هستند و همچنین  $\gamma$  اختلاف بین  $\theta_s$  و  $\theta$  و ولتاژ باس بی نهایت می باشد.

#### (د) 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  $[\lambda]$  آورده شده اند:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{T_e + K_s\beta + D(\omega_t - \omega_r)}{2H_r} \quad (23)$$

$$\frac{d\omega_t}{dt} = \frac{T_m - K_s\beta - D(\omega_t - \omega_r)}{2H_t} \quad (24)$$

$$\frac{d\beta}{dt} = \omega_b(\omega_t - \omega_r) \quad (25)$$

که  $\omega_t$  و  $\omega_r$  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 جریان و ولتاژ q روتور ( $V_{rq}, i_{rq}$ ) کنترل می شوند.

معادله حالت کنترل کننده سرعت به صورت زیر می شود:

$$\frac{dx_7}{dt} = k_{lo}(\omega_{r-ref} - \omega_r) \quad (26)$$

#### (و) کنترل توان راکتیو:

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 [۹]. با در نظر گرفتن رابطه ی (۱۳)، توان راکتیو تزریق شده توسط استاتور به شبکه به صورت زیر می تواند نوشته شود:

$$R'_r = R_r + \left(\frac{L_m}{L_s}\right)^2 R_s \quad (16)$$

$$e_{dq} = \frac{L_m}{L_s} \left( V_{sdq} - j\omega_r \psi_{sdq} - \frac{R_s}{L_s} \psi_{sdq} \right) \quad (17)$$

$\omega_r$  در رابطه (۱۷) سرعت روتور و معادل رابطه  $\omega_r = \omega - \omega_2$  می باشد. متغیرهای  $e_d$  و  $e_q$  در رابطه (۱۴) توابعی از فلوی استاتور و ولتاژ استاتور هستند. این متغیرها، ولتاژهای نیروی ضدمحرکه القایی روتور نامیده می شوند و اثرات حالت های دینامیکی استاتور را روی حالت های دینامیکی جریان روتور منعکس می کنند و نقش مهمی در عملکرد گذرای DFIG دارند.

#### (ب) 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:

$$\frac{L_g}{\omega_b} \frac{di_{gdq}}{dt} = -R_g i_{gdq} - j\omega L_g i_{gdq} - V_{gdq} + V_{sdq} \quad (18)$$

در اینجا اندیس g مقادیر فیلتر شبکه را نشان می دهد و  $i_{gdq}$ ،  $V_{gdq}$  و  $V_{sdq}$  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.

#### (ج) مدل استاتور:

با توجه به روابط (۸)، (۱۰) و (۱۱) و مطابق شکل (۱)، معادلات حالت استاتور به عنوان توابعی از جریان روتور، فیلتر طرف شبکه، فلوی استاتور و ولتاژ باس بی نهایت توصیف می شود:

$$\frac{1}{\omega_b} \frac{L_s + L_e}{L_s} \frac{d\psi_{sd}}{dt} = -\frac{R_s + R_e}{L_s} \psi_{sd} + \frac{R_s + R_e}{L_s} L_m i_{rd} - R_e i_{gd} - \frac{L_e L_m}{L_s} \omega i_{rq} + L_e \omega i_{gq} + \frac{1}{\omega_b} \frac{L_e L_m}{L_s} \frac{di_{rd}}{dt} - \frac{L_e}{\omega_b} \frac{di_{gd}}{dt} + V_\infty \cos \gamma \quad (21)$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \omega_b(\omega_s - \omega) \quad (22)$$

در روابط فوق  $\omega_s$  فرکانس سنکرون و معادل 1P.U

معرفی می شود:

$$\eta = \frac{1}{MAXS} \quad (30)$$

در رابطه‌ی (۳۰) S متغیر حساسیت و شاخص  $\eta$  عکس مقدار بیشینه‌ی حساسیت می باشد.

### ۳- بررسی مقدار حساسیت مسیر نسبت به پارامترهای کنترلی DFIG در برابر تغییر سرعت باد

برای بررسی مقدار حساسیت مسیر نسبت به پارامترهای کنترلی DFIG در برابر تغییر سرعت باد، تغییرات سرعت باد از ۴ متر بر ثانیه تا ۱۲ متر بر ثانیه در نظر گرفته می شود. مقادیر اولیه‌ی پارامترهای مختلف سیستم توربین بادی با DFIG متصل شده به شین بی نهایت در ضمیمه مقاله آورده شده است. شبیه سازی مقادیر  $\eta$  بر اساس متغیرهای حالت و لغزش ژنراتور (رابطه ۲۹) نسبت به پارامتر کنترلی  $K_{p-idqr}$  انجام شده است، که این نتایج در شکل (۲) آمده است. همان طور که در شکل (۲) مشخص گردیده مقادیر  $\eta$  در سرعت باد بین ۶ و ۸ متر بر ثانیه بیشترین مقدار را دارد و در سرعت های بین ۴ و ۶ متر بر ثانیه و ۸ و ۱۲ متر بر ثانیه دارای مقادیر کمتری می باشد. این نشان دهنده‌ی این است که در سرعت های بین ۶ و ۸ متر بر ثانیه DFIG کمترین حساسیت را نسبت به پارامتر کنترلی  $K_{p-idqr}$  دارا می باشد. مقدار حساسیت لغزش ژنراتور در مقابل تغییرات سرعت باد بیشتر از بقیه متغیرهای حالت می باشد. پس از لغزش ژنراتور به ترتیب جریان محور d روتور، ولتاژ اتصال خازنی DC و سرعت روتور دارای بیشترین مقدار حساسیت می باشند.

شبیه سازی مقادیر  $\eta$  نسبت به پارامتر کنترلی  $K_{i-idqr}$  انجام می شود که نتایج مربوط در شکل (۳) آمده است. در شکل (۳) نیز مقادیر  $\eta$  در سرعت باد بین ۶ و ۸ متر بر ثانیه بیشترین مقدار را دارد و در سرعت های بین ۴ و ۶ متر بر ثانیه و ۸ و ۱۲ متر بر ثانیه دارای مقادیر کمتر است. این نتایج کمترین مقدار حساسیت متغیرها را در سرعت های باد بین ۶ و ۸ متر بر ثانیه نسبت به پارامتر کنترلی  $K_{i-idqr}$  و بیشترین مقدار حساسیت را در بازه های دیگر سرعت باد نشان می دهد. در این شکل بیشترین مقدار حساسیت در برابر تغییرات سرعت باد مربوط به ولتاژ لینک DC و پس از آن مربوط به سرعت روتور، لغزش ژنراتور و

$$Q_s = \frac{\omega_s}{L_s} \psi_{sd} (L_m i_{rd} - \psi_{sd}) \quad (27)$$

رابطه‌ی (۲۷) ارتباط مستقیم بین جریان محور d روتور و توان راکتیو استاتور و ضریب توان ژنراتور را نشان می دهد. معادله حالت کنترل کننده توان راکتیو به صورت زیر می باشد:

$$\frac{dx_g}{dt} = k_{l-pq} (Q_{s-ref} - Q_s) \quad (28)$$

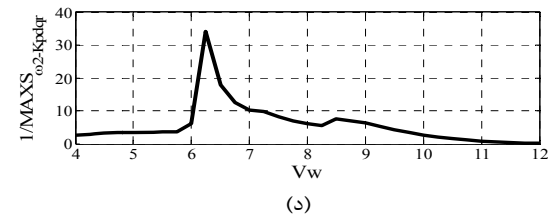
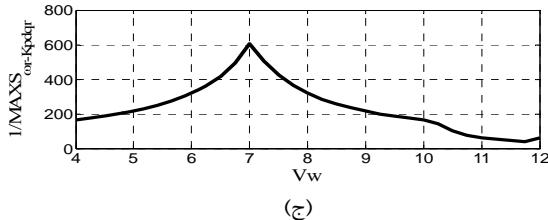
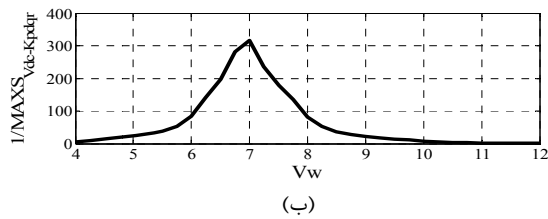
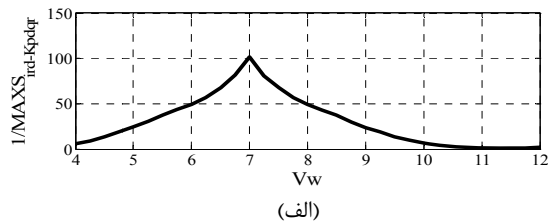
### ۲-۳- تعریف حساسیت مسیر در سیستم توان موجود

همان گونه که در [۱۰] بیان گردیده در ژنراتورهای توربین های بادی، طبیعت ناپایداری از ناپایداری زاویه‌ی روتور ژنراتورهای سنکرون معمول متفاوت است. در توربین های بادی مجهز به DFIG، محدوده‌ی سرعت ژنراتور به طور تقریبی  $\pm 30\%$  حول سرعت سنکرون می باشد. محدوده‌ی بالای سرعت ژنراتور توسط مقدار ظرفیت مبدل پشت به پشت تعیین می شود. اگر سرعت ژنراتور بعد از حذف خطا بالاتر از محدوده‌ی مورد نظر باشد، مبدل، توان لغزش را نمی تواند تامین کند و ژنراتور ناپایدار می شود. در حقیقت، با جبران سازی کامل ولتاژهای نیروی ضد محرکه القایی روتور، دینامیک های جریان روتور از دینامیک های استاتور مستقل خواهند بود و هیچ جریان هجومی روتور اضافه ولتاژ و نوسانی در ولتاژ لینک DC تولید نخواهد شد. بنابراین در اینجا سه متغیر حالت مهم و تأثیرگذار بر رفتار DFIG و همچنین لغزش DFIG معرفی شده، که این متغیرها مطابق رابطه‌ی (۲۹) تعریف می شوند:

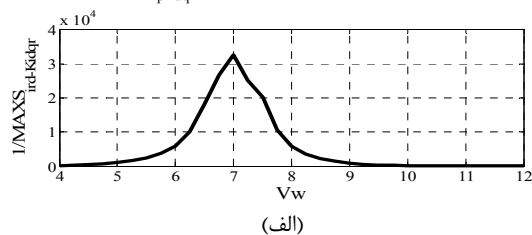
$$X = [i_{rd}, v_{dc}, \omega_r, \omega_2] \quad (29)$$

حساسیت متغیرهای حالت سیستم های توان برای مثال، جریان روتور ژنراتور ( $i_{rd}$ ) و تغییر سرعت پریونیت روتور ( $\Delta\omega_r$ ) می توانند با استفاده از رابطه‌ی (۷) نسبت به تعدادی پارامتر  $\lambda$  محاسبه شوند. این حساسیت ها اطلاعاتی درباره‌ی تأثیر تغییر پارامتر روی متغیرهای حالت و لغزش ژنراتور و وابستگی متغیرهای حالت به پارامترهای کنترلی را نشان می دهد. با این وجود، برای شناختن تمام شرایط سیستم، نیاز است که همه‌ی اطلاعات سیستم جمع آوری گردد و یک شاخص مناسب برای رسیدن به این هدف، تعریف شود. جهت بررسی دقیق مقادیر حساسیت این متغیرها نسبت به تغییرات سرعت باد شاخصی به نام  $\eta$  در [۱۱] معرفی شده که این شاخص مطابق رابطه‌ی (۳۰)

در شکل (۶) نیز می توان کمترین مقدار حساسیت را در سرعت باد بین ۶ و ۸ متر بر ثانیه مشاهده کرد. بیشترین مقدار حساسیت مربوط به لغزش ژنراتور و پس از آن این مقدار حساسیت به ترتیب مربوط به لینک DC، سرعت روتور و جریان محور d روتور می باشد. در این جا نیز وابستگی مقدار لغزش ژنراتور و سرعت روتور نسبت به پارامتر کنترلی  $K_{p-wr}$  کاملاً مشهود است. شبیه سازی مقادیر  $\eta$  نسبت به پارامتر کنترلی  $K_{i-wr}$  بررسی می شود که نتایج مربوطه در شکل (۷) به نمایش در آمده اند. در شکل (۷) کمترین مقدار حساسیت در بازه ی



شکل ۲ مقادیر  $\eta$  بر حسب  $K_{p-idqr}$



جریان محور d روتور است. با مقایسه شکل های (۲) و (۳)، واضح است که حساسیت متغیرهای حالت و لغزش ژنراتور نسبت به پارامتر کنترلی تناسبی  $K_{p-idq}$  در برابر تغییرات سرعت باد بیشتر می باشد.

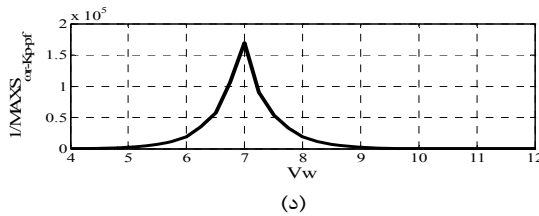
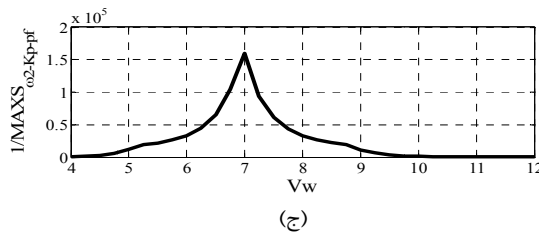
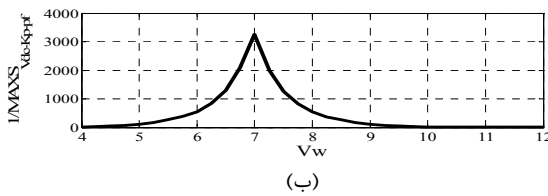
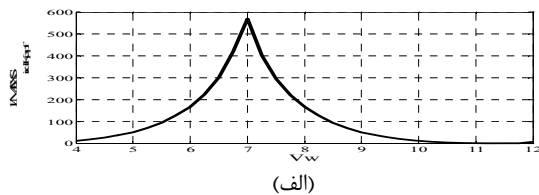
شبیه سازی مقادیر  $\eta$  نسبت به پارامتر کنترلی  $K_{p-pf}$  انجام شده است که نتایج آن در شکل (۴) نشان داده شده است. در شکل (۴) نیز مقادیر  $\eta$  در سرعت باد بین ۶ و ۸ متر بر ثانیه دارای بیشترین مقدار می باشد. این نتایج مقدار کمتر حساسیت متغیرها نسبت به پارامتر کنترلی  $K_{p-pf}$  در بازه ی سرعت باد بین ۶ و ۸ متر بر ثانیه و بیشترین حساسیت را در بازه های دیگر سرعت نشان می دهد. در این شکل بیشترین مقدار حساسیت مربوط به جریان محور d روتور و پس از آن بیشترین مقدار حساسیت به ترتیب مربوط به ولتاژ لینک DC، لغزش ژنراتور و سرعت روتور می باشد. با بررسی شکل (۴) مشخص است که حساسیت جریان محور d روتور نسبت به پارامتر کنترلی  $K_{p-pf}$  به طور قابل ملاحظه ای نسبت به دیگر متغیرهای حالت و لغزش ژنراتور بیشتر می باشد که می تواند نشان دهنده ی وابستگی جریان محور d روتور نسبت به پارامتر کنترلی  $K_{p-pf}$  باشد.

شبیه سازی مقادیر  $\eta$  نسبت به پارامتر کنترلی  $K_{i-pf}$  انجام می شود که نتایج این شبیه سازی در شکل (۵) به نمایش در آمده است. در نمودار شکل (۵) نیز مقادیر  $\eta$  در سرعت باد بین ۶ و ۸ متر بر ثانیه دارای بیشترین مقدار می باشد که نشان دهنده ی حساسیت کمتر متغیرها در سرعت های باد بین ۶ و ۸ متر بر ثانیه و حساسیت بیشتر متغیرها در بازه های دیگر سرعت باد می باشد. با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل (۵) بیشترین مقدار حساسیت مربوط به جریان محور d روتور و پس از آن به ترتیب مربوط به ولتاژ لینک DC، لغزش ژنراتور و سرعت روتور می باشد. با بررسی شکل (۵) نیز مشخص می شود که حساسیت جریان محور d روتور نسبت به پارامتر کنترلی  $K_{i-pf}$  به طور قابل ملاحظه ای نسبت به حساسیت دیگر متغیرها بیشتر می باشد. با مقایسه ی نتایج شکل های (۴) و (۵) مشخص می شود که میزان حساسیت متغیرهای حالت و لغزش ژنراتور نسبت به پارامتر کنترلی  $K_{p-pf}$  بیشتر از مقدار حساسیت آن ها نسبت به پارامتر کنترلی  $K_{i-pf}$  است.

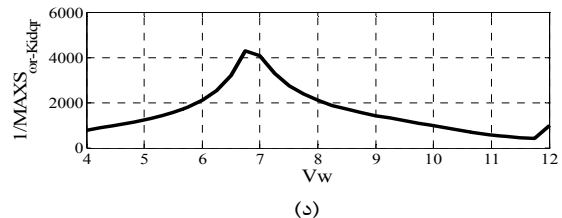
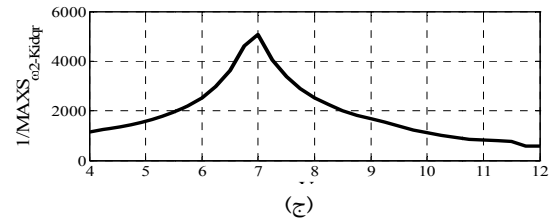
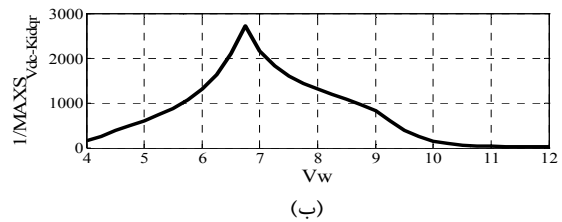
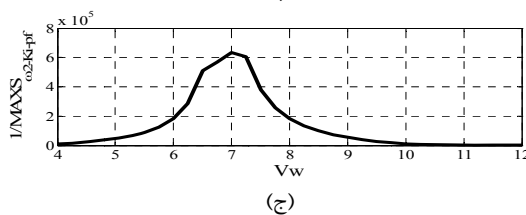
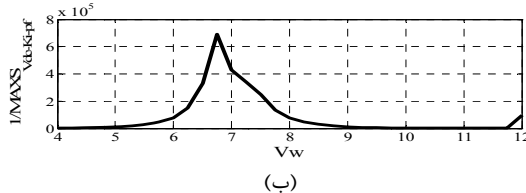
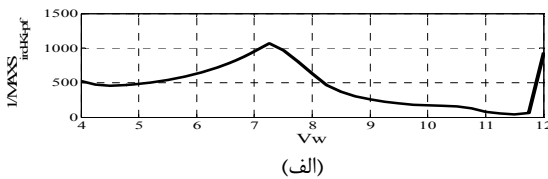
شبیه سازی مقادیر  $\eta$  نسبت به پارامتر کنترلی  $K_{p-wr}$  انجام می شود که این شبیه سازی در شکل (۶) نشان داده شده است.



روتور می باشد. با مقایسه ی نتایج شکل های (۸) و (۹) مشاهده می شود که مقدار حساسیت متغیرها نسبت به پارامتر کنترلی  $K_{p-g}$  از مقدار حساسیت آن ها نسبت به پارامتر کنترلی  $K_{i-g}$  بیشتر است.



شکل ۴ مقادیر  $\eta$  بر حسب  $K_{p-pf}$

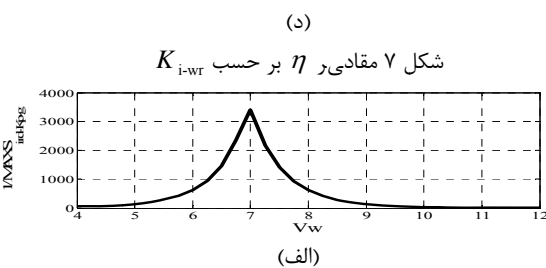
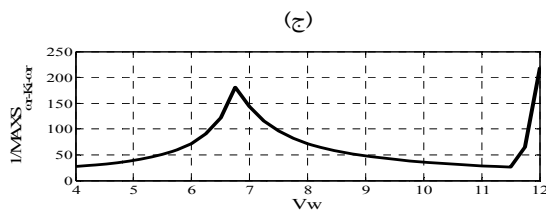
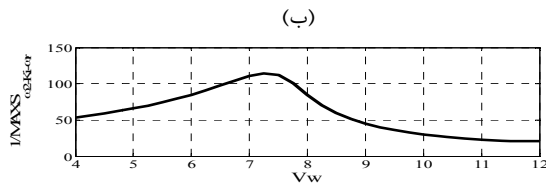
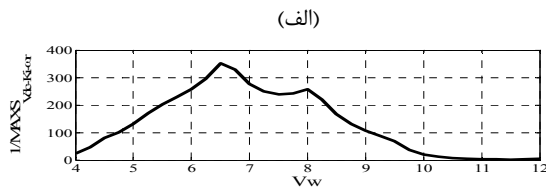


شکل ۳ مقادیر  $\eta$  بر حسب  $K_{i-idqr}$

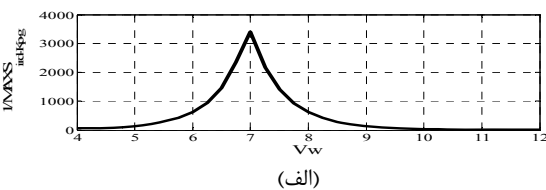
بین ۴ و ۸ متر بر ثانیه و بیشترین حساسیت در دیگر بازه های سرعت می باشد. بیشترین مقدار حساسیت مربوط به لغزش ژنراتور و پس از آن به ترتیب مربوط به سرعت روتور، ولتاژ لینک DC و جریان محور d روتور می باشد. در این شکل وابستگی لغزش ژنراتور و سرعت روتور نسبت به پارامتر کنترلی  $K_{i-wr}$  قابل مشاهده است.

شبیه سازی مقادیر  $\eta$  نسبت به پارامتر کنترلی  $K_{p-g}$  انجام می شود. نتایج شبیه سازی در شکل (۸) به نمایش در آمده اند. در شکل (۸) مثل نتایج شکل های قبلی کمترین مقدار حساسیت در بازه ی تغییرات سرعت باد بین ۶ و ۸ متر بر ثانیه و بیشترین مقدار حساسیت در دیگر بازه های سرعت باد می باشد. بررسی شکل (۸) نشان دهنده ی این موضوع است که بیشترین مقدار حساسیت نسبت به پارامتر کنترلی  $K_{p-g}$  مربوط به ولتاژ لینک DC و پس از آن به ترتیب مربوط به لغزش ژنراتور، جریان محور d روتور و سرعت روتور می باشد.

شبیه سازی مقادیر  $\eta$  نسبت به پارامتر کنترلی  $K_{i-g}$  انجام می شود. نتایج در شکل (۹) نشان داده شده اند. در شکل (۹) نیز کمترین مقدار حساسیت متغیرها در بازه ی تغییرات سرعت باد بین ۶ و ۸ متر بر ثانیه می باشد. بیشترین مقدار حساسیت نسبت به پارامتر کنترلی  $K_{i-g}$  مربوط به ولتاژ لینک DC و پس از آن به ترتیب مربوط به سرعت روتور، لغزش ژنراتور و جریان محور d



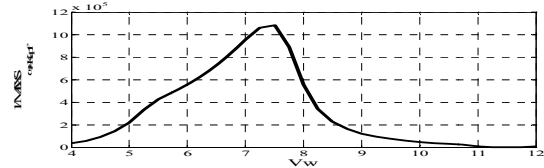
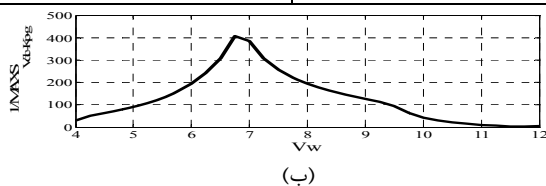
شکل ۷ مقادیر  $\eta$  بر حسب  $K_{i-wr}$



حساسیت ولتاژ لینک DC نسبت به پارامتر کنترلی  $K_{i-vdc}$  به طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به حساسیت دیگر متغیرها نسبت به این پارامتر بیشتر است که نشان دهنده‌ی وابستگی ولتاژ لینک DC نسبت به پارامتر کنترلی  $K_{i-vdc}$  می‌باشد. با مقایسه‌ی نتایج شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نتیجه‌گیری می‌شود که حساسیت متغیرها نسبت به پارامتر کنترلی  $K_{p-vdc}$  بیشتر از حساسیت آن‌ها نسبت به پارامتر کنترلی  $K_{i-vdc}$  است. پارامترهای کنترلی را از نظر اهمیت تأثیرگذاری بر روی رفتار DFIG می‌توان مطابق جدول (۱) تقسیم‌بندی کرد.

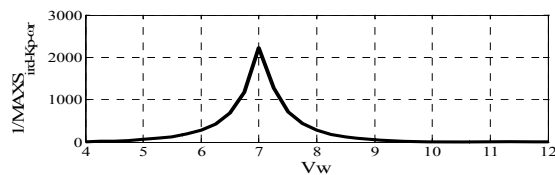
جدول (۱) دسته‌بندی پارامترهای کنترلی تأثیری‌گذار بر رفتار DFIG در برابر تغییری‌رات سرعت باد

$K_{p-idq}$ $K_{p-wr}$ $K_{p-vdc}$	پارامترهای بسیار مهم
$K_{p-g}$ $K_{p-pf}$ $K_{i-wr}$	پارامترهای مهم
$K_{i-idq}$ $K_{i-pf}$ $K_{i-vdc}$ $K_{i-g}$	پارامترهای با اهمیت کمتر



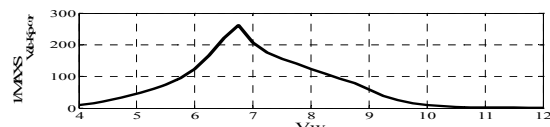
(د)

شکل ۵ مقادیر  $\eta$  بر حسب  $K_{i-pf}$

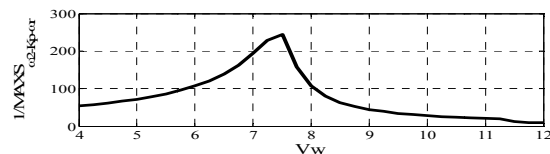


(الف)

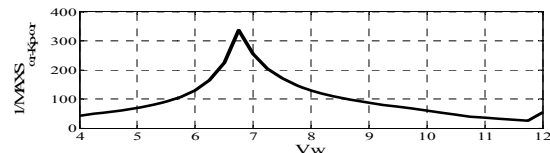
شبیه‌سازی مقادیر  $\eta$  نسبت به پارامتر کنترلی  $K_{p-vdc}$  انجام می‌شود. این نتایج در شکل (۱۰) به نمایش در آمده‌اند. در شکل (۱۰) نیز در بازه‌ی سرعت باد بین ۶ و ۸ متر بر ثانیه کمترین مقدار حساسیت است. همچنین با بررسی این شکل بیشترین مقدار حساسیت مربوط به ولتاژ لینک DC و پس از آن به ترتیب مربوط به لغزش ژنراتور، جریان محور d روتور و سرعت روتور می‌باشد. شبیه‌سازی مقادیر  $\eta$  نسبت به پارامتر کنترلی  $K_{i-vdc}$  انجام می‌شود. نتایج در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در این شکل نیز در بازه‌ی سرعت باد بین ۶ و ۸ متر بر ثانیه دارای کمترین مقدار حساسیت است.



(ب)

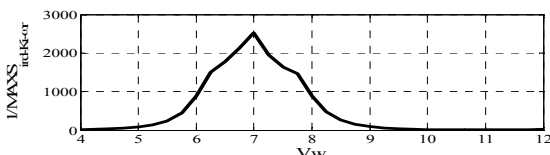


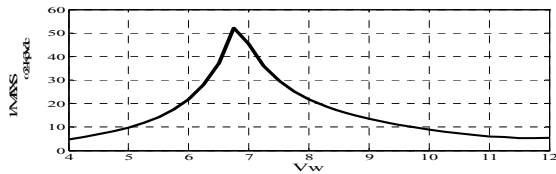
(ج)



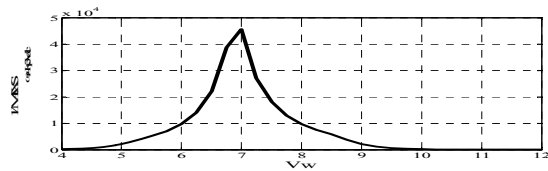
(د)

شکل ۶ مقادیر  $\eta$  بر حسب  $K_{p-wr}$



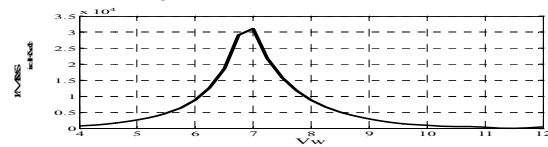


(ا)

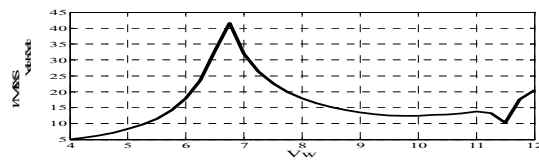


(ب)

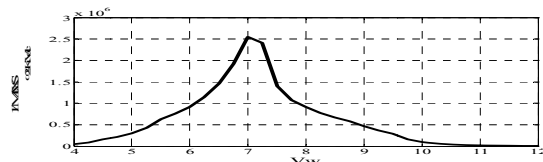
شکل ۱۰ مقادیر  $\eta$  بر حسب  $K_{p-vdc}$



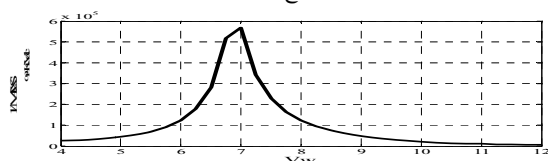
(ج)



(د)



(ه)

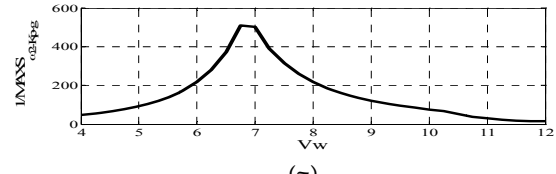


(و)

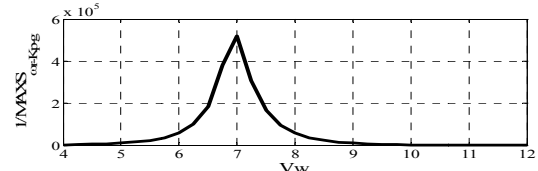
شکل ۱۱ مقادیر  $\eta$  بر حسب  $K_{i-vdc}$

#### ۴- نتیجه گیری

این مقاله تحلیل های حساسیت مسیر یک سیستم توان شامل منبع تولید پراکنده را معرفی می کند. DG استفاده شده در اینجا ژنراتور القایی تغذیه دابل متصل به توربین بادی می باشد. عکس مقدار ماکزیمم شاخص حساسیت های ( $\eta$ ) متغیرهای حالت مانند جریان روتور ژنراتور ( $i_{rd}$ )، تغییر سرعت پروینیت روتور ( $\Delta\omega_r$ )، ولتاژ لینک DC ( $V_{DC}$ ) و همچنین لغزش ژنراتور ( $\omega_2$ ) به عنوان معیاری در مطالعه رفتار DG در

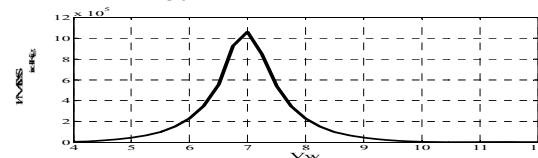


(ا)

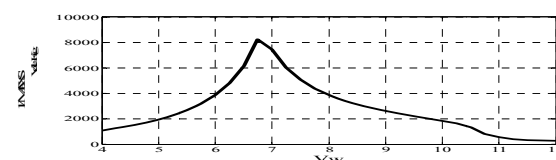


(ب)

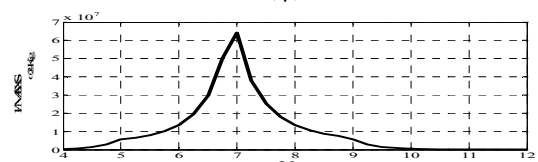
شکل ۸ مقادیر  $\eta$  بر حسب  $K_{p-g}$



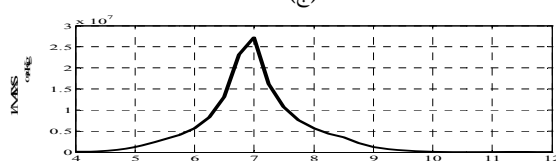
(ج)



(د)

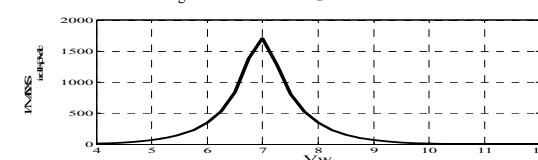


(ه)

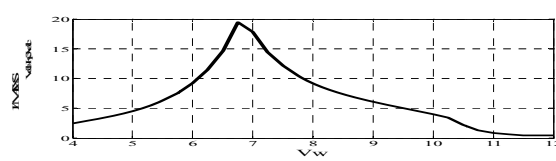


(و)

شکل ۹ مقادیر  $\eta$  بر حسب  $K_{i-g}$



(ا)



(ب)



- generators using nonlinear control strategy" IEEE Trans. Energy Convers., vol. 25, no. 2, pp. 514-525, Jun. 2010.
- [11] D. Chatterjee, A. Ghosh, M. A. Pai "Trajectory sensitivity analysis in Distributed generation systems," International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, pp. 1-6, 2006.

برابر تغییر سرعت باد استفاده می شود. وابستگی رفتار سیستم نسبت به پارامترهای کنترلی در برابر تغییر سرعت باد با استفاده از TS و  $\eta$  نشان داده شد. اثرات پارامترهای مختلف روی پایداری سیستم در یک سیستم SMIB ارزیابی شدند. از شبیه سازی و مطالعاتی که انجام گرفت، مشخص می شود که پارامترهای کنترلی تناسبی نسبت به پارامترهای کنترلی انتگرال گیر دارای اهمیت بیشتری از نظر تأثیرگذاری در رفتار DFIG می باشند. در پایان پارامترهای کنترلی بر اساس میزان اهمیت آنها در رفتار سیستم دسته بندی شدند.

#### ضمیمه

پارامترهای توربین بادی با DFIG متصل به شین بی نهایت

$f_{base} = 60 \text{ HZ}$	$S_{base} = 1.76 \text{ MVA}$	$V_{base} = 575 \text{ V}$
$R_s = 0.00706 \text{ pu}$	$\omega_b = 377 \text{ rad/s}$	$R_r = 0.005 \text{ pu}$
$L_s = 3.07 \text{ pu}$	$L_r = 3.056 \text{ pu}$	$L_m = 2.9 \text{ pu}$
$L_g = 0.3 \text{ pu}$	$R_g = 0.003 \text{ pu}$	$H_r = 0.75 \text{ s}$
$H_t = 4.3 \text{ s}$	$K_s = 0.6$	$D = 1.2 \text{ pu}$
	$\text{pu/elec.rad}$	

#### مراجع

- [1] J.G. Sloopweg and W.L. Kling, "Impacts of distributed generation on power system transient stability," Proc. IEEE PES General Meeting, 610 June 2004, Vol. 2, pp 2150-2155.
- [2] M.K. Donnelly, J.E. Dagle, D.J. Trudnowski, and G.J. Rogers, "Impact of the distributed utility on transmission system stability", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 2, pp 741-46, 1996.
- [3] M. J. Laufenberg and M. A. Pai, "A new approach to dynamic security assessment using trajectory sensitivities," IEEE Trans. Power Systems Vol. 13, No. 3, pp. 953-958, 1998.
- [4] A. Ghosh, D. Chatterjee, P. Bhandiwad and M. A. Pai "Trajectory sensitivity analysis of TCSC compensated power system", Proc. IEEE PES General Meeting, vol. 2, pp.1515 - 1520, 2004
- [5] T. B. Nguyen, "Dynamic security assessment of power systems using trajectory sensitivity approach," Ph.D. dissertation, University of Illinois, Urbana-Champaign, 2002.
- [6] M. J. Laufenberg, "Dynamic sensitivity functions and the stability of power systems with FACTS controllers," Ph.D. dissertation, University of Illinois, Urbana-Champaign, 1997.
- [7] P. Ledesma and J. Usaola, "Doubly fed induction generator model for transient stability analysis," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 20, no. 2, pp. 388-397, Jun. 2004.
- [8] F. Mei and B. Pal, "Modal analysis of grid-connected doubly fed induction generators," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 22, no. 3, pp. 728-736, Sep. 2007.
- [9] T. Ackerman, Wind Power in Power Systems. New York: Wiley, 2005.
- [10] Mohsen Rahimi, Mostafa Parniani "Transient Performance improvement of wind turbines with doubly fed induction