

تحلیل حساسیت مسیر DFIG نسبت به پارامترهای کنترلی در برابر تغییر سرعت باد و تغییر امپدانس خط اتصال DFIG به شبکه

مهدی فولادگر^(۱) - اسماعیل رک رک^(۲) - بهادر فانی^(۳) - غضنفر شاهقلیان^(۳)

(۱) کارشناس ارشد - گروه برق، دانشکده مهندسی برق، واحد نجفآباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجفآباد، اصفهان، ایران

(۲) استادیار - گروه برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرمآباد، ایران

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

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۸/۲۴

خلاصه: 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) در برابر تغییر سرعت باد و تغییر امپدانس خط انتقال بر روی پایداری گذرای 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 و تغییر امپدانس خط انتقال، 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.

کلمات کلیدی: ژنراتور القایی تغذیه دابل (DFIG)، توربین بادی (WT)، سیستم‌های تولید پراکنده (DG)، تحلیل حساسیت مسیر (TSA).

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

Mehdi Fooladgar⁽¹⁾ - Esmail RokRok⁽²⁾ - Bahador Fani⁽³⁾ - Ghazanfar Shahgholian⁽³⁾

(1) MSc. - Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Esfahan, Iran

bahman1475@yahoo.com

(2) Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Faculty Engineering, Lorestan University, Iran

(3) Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Esfahan, Iran

bahador.fani@gmail.com

shahgholian@iaun.ac.ir

Economic and environmental conditions often make large stations and transmission lines, restrictions are placed. Small and medium-sized production units connected to existing systems as a strategy is in progress. These units are usually near the center of the load placed and distributed generators (DG) famous are the DG are allowed types vary, such as induction generators rack squirrel-connected wind turbines, generators fed induction double mounted wind turbines, fuel cells connected to the system by power electronic converters or synchronous generator connected to the turbine combustion [10]. This way sensitivity analysis in systems of distributed generation (DG) is assessed. It is shown that the method can detect the effect of control parameters listed wind turbine connected to a double-fed induction generator (DFIG) Badoou the impedance of the changing the speed of on the stability of the transmission line useful system invested. The control parameters of the importance of influencing the behavior of DFIG are divided.

Index Terms: Double-fed induction generator (DFIG), wind turbines (WT), distributed generation (DG), (TSA).

نویسنده مسئول: مهدی فولادگر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجفآباد، bahman1475@yahoo.com

۱- مقدمه

شرایط اقتصادی و محیطی اغلب روی ساخت ایستگاههای تولیدی وسیع و خطوط انتقال، محدودیت‌هایی را قرار می‌دهند. اتصال واحدهای تولیدی با سایز کوچک و متوسط برای سیستم‌های موجود به عنوان راهکاری در حال پیشرفت می‌باشد. این واحدها معمولاً نزدیک به مراکز بار قرار داده می‌شوند و به تولیدکننده‌های پراکنده (DG) مشهور می‌باشند. DGها می‌توانند در انواع گوناگون باشند، مانند ژنراتورهای القایی قفسه سنجایی متصل شده به توربین بادی، ژنراتورهای القایی تغذیه دابل متصل شده به توربین بادی، سلول‌های سوختی متصل شده به سیستم توسط مبدل‌های الکترونیک قدرت یا ژنراتورهای سنکرون متصل شده به توربین احتراقی، با افزایش سهم تولید DG، اثر آن روی پایداری سیستم‌های قدرت بسیار مهم می‌شود [۷-۱۰]. روش معمول برای مطالعه‌ی افزایش پایداری دینامیکی سیستم‌های قدرت، روش‌هایی مبتنی بر تابع انرژی گذرا (TEF) می‌باشد. با این وجود هنگامی که مدل‌ها به صورت دقیق‌تر بررسی می‌شوند این روش‌ها به طور زیادی پیچیده می‌شود. تئوری حساسیت برای حل این مسئله با استفاده از تحلیل‌های حساسیت مسیر می‌تواند معرفی شود [۸]. این تحلیل روشی برای مطالعه‌ی سیستم‌های قدرت با هر دو معادلات پیوسته و گسسته (سیستم‌های هیبریدی) را گسترش و بیان می‌کند [۹]. یک روش برای کاهش تعداد محاسبات حساسیت مسیر برای به دست آوردن بیشترین کنترل مؤثر در [۱۰] توصیف شده است. استفاده از تحلیل حساسیت مسیر در عملکرد مؤثر ادوات FACTS در یک سیستم توان چند ماشینه در [۱۱] توصیف شده است.

در این مقاله، ژنراتور القایی تغذیه دابل متصل به توربین بادی به عنوان DG در نظر گرفته می‌شود که این DG توسط یک خط انتقال با امپدانس مشخص، به شین بی‌نهایت متصل شده است. سطح توان توربین بادی در محدوده‌ی ۱/۷۶ مگاوات آمپر می‌باشد و مقدار توان خروجی DG در این محدوده نگه داشته می‌شود. در ابتدا روش تحلیل حساسیت مسیر مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد و معادلات مربوط به آن بیان می‌گردد. سپس سیستم با استفاده از معادلات متغیرهای حالت، مدل‌سازی و تحلیل حساسیت مسیر بر روی آن انجام می‌شود. با استفاده از تحلیل مسیر می‌توان مقدار تأثیر پارامترهای کنترلی را، در افزایش ناحیه‌ی پایداری گذرا نشان داد و همچنین مقادیر پارامترهای کنترلی بحرانی سیستم SMIB^۲ را مشخص نمود. این تحلیل، مقدار اهمیت پارامترهای کنترلی در رفتار DFIG را در برابر تغییر سرعت باد و تغییر امپدانس خط انتقال نشان می‌دهد که با توجه به این اطلاعات می‌توان پارامترهای کنترلی را از نظر اهمیت تأثیرگذاری بر روی رفتار DFIG دسته‌بندی نمود.

۲- تحلیل‌های حساسیت مسیر و مدل‌سازی سیستم‌های قدرت

۲-۱- تحلیل‌های حساسیت مسیر

در ابتدا یک سیستم توصیف شده با استفاده از تعدادی معادلات دیفرانسیل در نظر گرفته می‌شود:

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

در معادله‌ی (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 نسبت به پارامتر p را با x_p تعریف می‌کنیم و به صورت معادله زیر نشان می‌دهیم:

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

در معادله‌ی (۲) x_p یک ماتریس $n \times m$ است. حال اگر در پارامتر p تغییری نسبت به مقدار اولیه آن ایجاد کنیم، حل معادله‌ی (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 جایگذاری 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:

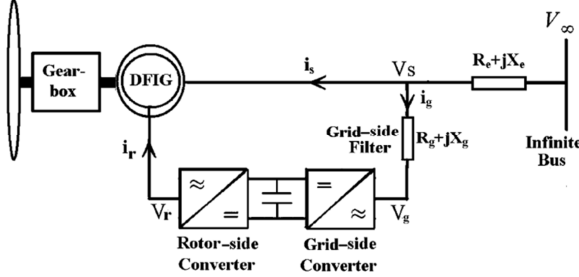
$$\dot{x}_p = \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right) x_p + \left(\frac{\partial f}{\partial p} \right), \quad x_p(t_0) = 0 \quad (6)$$

حل روابط (۱) و (۶) به ترتیب مسیر حالت و حساسیت مسیر را نتیجه می‌دهد [۱۲]. در معادله‌ی (۶) $\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)$ ماتریس $n \times n$ ژاکوبین است که در طول شبیه‌سازی به طور مداوم در حال تغییر است [۱۳] و $\left(\frac{\partial f}{\partial p} \right)$ ماتریسی $n \times 1$ می‌باشد که با توجه به هر پارامتر به دست می‌آید. بنابراین معادلات تحلیل حساسیت مسیر برای هر پارامتر می‌تواند به صورت مستقل از معادلات تحلیل حساسیت مسیر پارامترهای دیگر حل شود. به عبارت دیگر باید برای اعمال تحلیل حساسیت مسیر با توجه به هر پارامتر بر روی سیستم، $2n$ معادله دیفرانسیل در یک زمان حل شود که n تای آن متعلق به معادلات غیرخطی حاکم بر سیستم است (معادله‌ی (۱)) و n تای آن مربوط به معادلات حساسیت نسبت به پارامتر مورد نظر است (معادله‌ی (۶)) [۱۳-۱۴]. با این

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

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

الف) مدل روتور



شکل (۱): توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی تغذیه دابل متصل شده به باس بی‌نهایت

Fig. (1): Wind turbine with DFIG connected to the infinite bus

از روابط (۹)–(۱۱)، حالت‌های دینامیکی روتور بر اساس جریان روتور و فلوی استاتور به صورت زیر توصیف می‌شود:

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

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

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

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

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

ω_r در رابطه (۱۷) سرعت روتور و معادل رابطه $\omega_r = \omega - \omega_2$ می‌باشد. متغیرهای e_d و e_q در رابطه (۱۴) 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 در نظر گرفتن کنترل کننده‌های روتور به صورت PI و $K_{Idq}(s) = K_{p-idq} + \left(\frac{K_{i-idq}}{s} \right)$ ، همچنین با ساختار کنترلی شکل‌های (۲) و (۳) تحت جبران‌سازی متغیرهای تزویج متقابل، ولتاژ d-q روتور می‌تواند تعیین شود:

$$\begin{aligned} V_{rd} + jV_{rq} &= K_{p-idq} ((i_{rd-ref} + i_{rq-ref}) - \\ & (i_{rd} + ji_{rq})) + \frac{K_{i-idq}}{s} ((i_{rd-ref} + i_{rq-ref}) - \\ & (i_{rd} + ji_{rq})) + j\omega_2 L'_r (i_{rd} + ji_{rq}) + K_{com} (e_d + je_q) \end{aligned} \quad (18)$$

وجود، حساسیت‌ها می‌توانند در یک روش ساده‌تر با استفاده از روش عددی تعیین شوند. برای مثال λ به عنوان یک متغیر اسکالر در نظر گرفته شود و حساسیت‌ها نسبت به آن مطالعه شوند. با در نظر گرفتن دو مقدار برای λ (λ_1 و λ_2)، بردارهای حالت مربوطه x_1 و x_2 به ترتیب محاسبه می‌شوند و در نتیجه حساسیت به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Sens = \frac{x_2 - x_1}{\lambda_2 - \lambda_1} = \frac{\Delta x}{\Delta \lambda} \quad (7)$$

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

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

متداول‌ترین نوع ماشین القایی که در این روزها به طور گسترده به کار برده می‌شود DFIM است. این نوع ماشین‌ها می‌توانند به عنوان ژنراتور یا موتور کار کنند. اگر چه تمایل در جهت کاربرد موتوری به دلیل فرسایش مکانیکی حلقه‌های لغزان کمتر است اما در حالت عملکرد ژنراتوری مزیت‌هایی نسبت به دیگر انواع ماشین‌های القایی دارند که از مزیت‌های آن می‌توان به طبیعت سازگاری در برابر تغییرات سرعت باد اشاره نمود. 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 فلوی استاتور می‌باشد (شکل (۱)). مدل‌سازی بر اساس دو شرط صورت پذیرفته است که این شرط‌ها عبارتند از:

۱- جهت مثبت جریان‌های رتور و استاتور ماشین به سوی ژنراتور فرض شده‌اند. همچنین جهت مثبت فیلتر سمت شبکه، به سوی مبدل سمت شبکه در نظر گرفته شده‌اند.

۲- تمام پارامترها و متغیرهای سیستم پریونیت هستند و به سمت استاتور توربین بادی تغذیه دابل ارجاع داده شده‌اند.

معادلات اساسی زیر برای مدل ژنراتور DFIG استفاده می‌شوند [۱۵]:

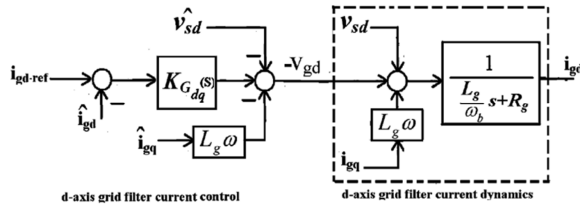
$$V_{sdq} = R_s i_{sdq} + j\omega \psi_{sdq} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{sdq}}{dt} \quad (8)$$

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

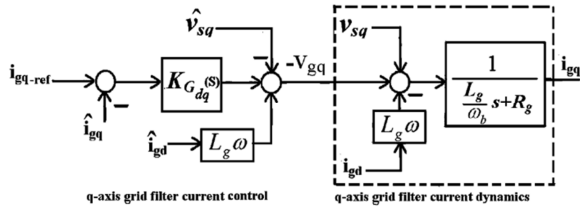
$$\psi_s = L_s i_s + L_m i_r \quad (10)$$

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

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_s و L_r 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_s و R_r مقاومت‌های استاتور و روتور هستند. گشتاور الکترومکانیکی و توان راکتیو تزریق شده توسط سیم‌پیچ‌های استاتور به شبکه به صورت زیر محاسبه می‌شوند:



شکل (۴): حلقه‌ی کنترل جریان فیلتر شبکه i_{gd}
Fig. (4): i_{gd} Grid filter current control loop



شکل (۵): حلقه‌ی کنترل جریان فیلتر شبکه i_{gq}
Fig. (5): i_{gq} Grid filter current control loop

$$\begin{aligned} V_{gd} + jV_{gq} = & \\ -K_{p-g} \left(\begin{array}{c} (i_{gd-ref} + ji_{gq-ref}) \\ (i_{gd} + ji_{gq}) \end{array} \right) - & \\ \frac{K_{i-g}}{s} \left(\begin{array}{c} (i_{gd-ref} + ji_{gq-ref}) \\ (i_{gd} + ji_{gq}) \end{array} \right) - & \\ j\omega L_g (i_{gd} + ji_{gq}) + (V_{sd} + jV_{sq}) & \end{aligned} \quad (20)$$

(ج) مدل استاتور

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

$$\psi_{sd} = \psi_s \quad (21)$$

$$\psi_{sq} = 0 \quad (22)$$

با توجه به روابط (۸)، (۱۰) و (۱۱) و مطابق شکل (۱)، معادلات حالت استاتور به عنوان تابعی از جریان روتور، فیلتر طرف شبکه، فلوی استاتور و ولتاژ باس بینهایت توصیف می‌شود:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\omega_b} \frac{L_s + L_e}{L_s} \frac{d\psi_{sd}}{dt} = & -\frac{R_s + R_e}{L_s} \psi_{sd} \\ + \frac{R_s + R_e}{L_s} L_m i_{rd} - R_e i_{gd} - & \frac{L_e L_m}{L_s} \omega i_{rq} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} + L_e \omega i_{gq} + \frac{1}{\omega_b} \frac{L_e L_m}{L_s} \frac{di_{rd}}{dt} - \frac{L_e}{L_s} \frac{di_{gd}}{dt} + & V_v \cos \gamma \\ \frac{d\gamma}{dt} = \omega_b (\omega_s - \omega) & \end{aligned} \quad (24)$$

در روابط فوق ω_s فرکانس سنکرون و معادل 1 P.U، ω سرعت قاب مرجع d-q بر حسب پریونیت و معادل فرکانس فلوی استاتور می‌باشند.

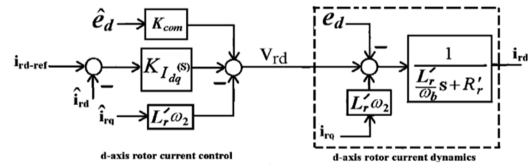
در اینجا $i_{rdq-ref}$ مؤلفه‌های جریان مرجع d-q روتور را نشان می‌دهد. در رابطه‌ی (۱۸) K_{com} می‌تواند صفر یا یک باشد. $K_{com} = 1$ نشان می‌دهد که ولتاژهای نیروی ضد محرکه‌ی القایی به وسیله کنترل کننده‌های جریان روتور جبران می‌شوند و $K_{com} = 0$ نشان‌دهنده‌ی این موضوع است که ولتاژهای نیروی ضد محرکه‌ی القایی به وسیله کنترل کننده‌های جریان روتور جبران نمی‌شوند. با در نظر گرفتن شکل‌های (۲) و (۳)، پهنای باند کنترل حلقه باز جبران روتور به صورت $\alpha_s = R'_r / L'_r$ می‌باشد که این مقدار کوچکی است.

(ب) مدل فیلتر طرف شبکه:

فیلتر نشان داده شده در شکل (۱)، شامل یک اندوکتانس L_g و مقاومت R_g می‌باشد و حالت‌های دینامیکی آن به صورت زیر توصیف می‌شود:

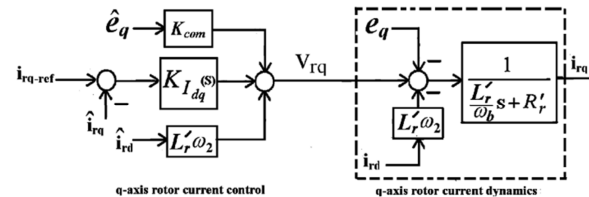
$$\frac{L_g}{\omega_b} \frac{di_{gdq}}{dt} = -R_g i_{gdq} - j\omega L_g i_{gdq} - V_{gdq} + V_{sdq} \quad (19)$$

در اینجا اندیس g مقادیر فیلتر شبکه را نشان می‌دهد و V_{sdq} ، i_{gdq} و V_{gdq} به ترتیب مؤلفه‌های d-q ولتاژ ترمینال ژنراتور و جریان و ولتاژ فیلتر طرف شبکه هستند. V_g از مبدا طرف شبکه تغذیه می‌شود. حلقه‌های کنترل جریان d-q فیلتر طرف شبکه، تحت جبران متغیرهای تزویج متقابل در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است. با در نظر گرفتن کنترل کننده‌های جریان فیلتر شبکه به صورت PI و $K_{Gdq}(s) = K_{p-g} + \left(\frac{K_{i-g}}{s} \right)$ متقابل و ولتاژهای شبکه، ولتاژهای d-q مبدا طرف شبکه مطابق رابطه‌ی (۲۰) تعیین می‌شود. i_{gd-ref} و i_{gq-ref} به ترتیب مؤلفه‌های d و q جریان مرجع فیلتر شبکه را مشخص می‌کند.



شکل (۲): حلقه‌ی کنترل جریان روتور i_{rd}

Fig. (2): i_{rd} Rotor current control loop



شکل (۳): حلقه‌ی کنترل جریان روتور i_{rq}

Fig. (3): i_{rq} Rotor current control loop

(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 جریان‌ها و ولتاژهای روتور کنترل می‌شوند [۱۷]. با در نظر گرفتن رابطه‌ی (۱۳)، توان راکتیو تزریق شده توسط استاتور به شبکه به صورت زیر می‌تواند نوشته شود:

$$Q_s = \frac{\omega_s}{L_s} \Psi_{sd} (L_m i_{rd} - \Psi_{sd}) \quad (۲۹)$$

رابطه‌ی (۲۹) ارتباط مستقیم بین جریان محور d روتور و توان راکتیو استاتور و ضریب توان ژنراتور را نشان می‌دهد. جریان مرجع محور d روتور را می‌توان به وسیله کنترل کننده توان راکتیو نشان داده شده در شکل (۷) تعیین نمود. در این شکل، a_d پهنای باند حلقه کنترل جریان محور d روتور می‌باشد. با استفاده از یک کنترل کننده PI به صورت $K_{pf}(s) = K_{p-pf} + \left(\frac{K_{i-pf}}{s} \right)$ ، معادله حالت کنترل کننده توان راکتیو به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{dx_8}{dt} = k_{I-pq} (Q_{s-ref} - Q_s) \quad (۳۰)$$

۲-۳- تعریف حساسیت مسیر در سیستم قدرت موجود

همان‌گونه که در [۱۸] بیان گردیده در ژنراتورهای توربین‌های بادی، طبیعت ناپایداری از ناپایداری زاویه‌ی روتور ژنراتورهای سنکرون معمول متفاوت است. در توربین‌های بادی مجهز به DFIG، محدوده‌ی سرعت ژنراتور به طور تقریبی $\pm 30\%$ حول سرعت سنکرون می‌باشد. محدوده‌ی بالای سرعت ژنراتور توسط مقدار ظرفیت مبدل پشت به پشت تعیین می‌شود. اگر سرعت ژنراتور بعد از حذف خطا بالاتر از محدوده‌ی مورد نظر باشد، مبدل، توان لغزش را نمی‌تواند تامین کند و ژنراتور ناپایدار می‌شود. در حقیقت، با جبران‌سازی کامل ولتاژهای نیروی ضدحرکه القایی روتور، دینامیک‌های جریان روتور از دینامیک‌های استاتور مستقل خواهند بود و هیچ جریان هجومی روتور و 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 (۳۱) تعریف می‌شوند:

$$X = [i_{rd}, v_{dc}, \omega_r, \omega_2] \quad (۳۱)$$

حساسیت متغیرهای حالت سیستم‌های توان برای مثال، جریان روتور ژنراتور (i_{rd}) و تغییر سرعت پروبیت روتور ($\Delta\omega_r$) می‌تواند با استفاده از رابطه‌ی (۷) نسبت به تعدادی پارامتر λ محاسبه شوند. این حساسیت‌ها اطلاعاتی درباره‌ی تأثیر تغییر پارامتر روی متغیرهای حالت و لغزش ژنراتور و وابستگی متغیرهای حالت به پارامترهای سیستم، نیاز است که همه‌ی اطلاعات سیستم جمع‌آوری گردد و یک شاخص مناسب برای رسیدن به این هدف، تعریف شود. جهت بررسی

همچنین $\omega = \left(\frac{1}{\omega_b} \right) \left(\frac{d\theta}{dt} \right)$ و $\omega_s = \left(\frac{1}{\omega_b} \right) \left(\frac{d\theta_s}{dt} \right)$ می‌باشند.

متغیرهای θ و θ_s به ترتیب زاویه ولتاژ باس بینهایت و زاویه فلوی استاتور در قاب مرجع ثابت هستند و همچنین γ اختلاف بین θ و θ_s و V_∞ ولتاژ باس بینهایت می‌باشد.

(د) مدل مکانیکی توربین بادی و کنترل کننده سرعت

مدل مکانیکی WT شامل توربین، جعبه دنده، محورها و دیگر قطعات مکانیکی می‌باشد. مدل‌های مکانیکی دو جرمی DFIG در مرجع [۱۶] آورده شده‌اند:

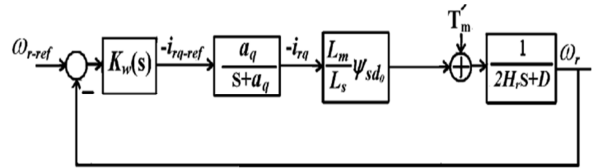
$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{T_e + K_s \beta + D(\omega_t - \omega_r)}{2H_r} \quad (۲۵)$$

$$\frac{d\omega_t}{dt} = \frac{T_m - K_s \beta - D(\omega_t - \omega_r)}{2H_t} \quad (۲۶)$$

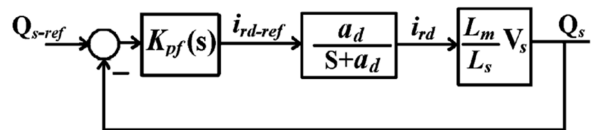
$$\frac{d\beta}{dt} = \omega_b (\omega_t - \omega_r) \quad (۲۷)$$

که ω_t و ω_r به ترتیب سرعت‌های ژنراتور و توربین (برحسب پروبیت)، β زاویه پیچشی شافت (برحسب رادیان)، و H_t و H_r به ترتیب ثابت‌های اینرسی ژنراتور و توربین هستند (برحسب ثانیه). K_s ضریب سختی محور (برحسب پروبیت بر رادیان الکتریکی) و D ضریب میرایی (برحسب پروبیت) و T_m و T_e به ترتیب گشتاور الکتریکی ژنراتور و گشتاور مکانیکی توربین هستند (برحسب پروبیت). 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 (۶) نشان داده شده است. در این شکل، a_q پهنای باند حلقه کنترل جریان محور q روتور و $T'_m = K_s \beta + D\omega_t$ می‌باشد. با به کار گرفتن یک کنترل کننده PI برای کنترل کننده سرعت به صورت $K_w(s) = K_{pw} + \left(\frac{K_{iw}}{s} \right)$ ، معادله حالت کنترل کننده‌ی سرعت به صورت رابطه‌ی (۲۸) می‌شود.

$$\frac{dx_7}{dt} = k_{I\omega} (\omega_{r-ref} - \omega_r) \quad (۲۸)$$



شکل (۶): حلقه کنترل سرعت
Fig. (6): Speed control loop



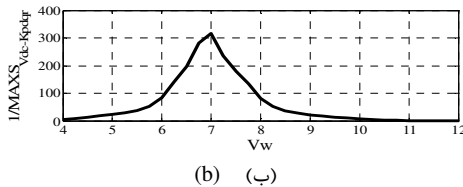
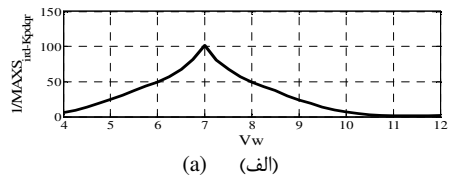
شکل (۷): حلقه کنترل توان راکتیو
Fig. (7): Reactive power control loop

در مرحله‌ی چهارم، شبیه‌سازی مقادیر η نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-pf} انجام می‌شود که نتایج این شبیه‌سازی در شکل (۱۱) به نمایش در آمده است. با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل (۱۱) 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 می‌باشد. با بررسی شکل (۱۱) نیز مشخص می‌شود که حساسیت جریان محور d روتور نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-pf} به طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به حساسیت دیگر متغیرها بیشتر می‌باشد. با مقایسه‌ی نتایج شکل‌های (۱۰) و (۱۱) مشخص می‌شود که میزان حساسیت متغیرهای حالت و لغزش ژنراتور نسبت به پارامتر کنترلی K_{p-pf} بیشتر از مقدار حساسیت آن‌ها نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-pf} است.

در مرحله‌ی پنجم، شبیه‌سازی مقادیر η نسبت به پارامتر کنترلی K_{p-wr} انجام می‌شود که این شبیه‌سازی در شکل (۱۲) نشان داده شده است. بیشترین مقدار حساسیت مربوط به لغزش ژنراتور و پس از آن این مقدار حساسیت به ترتیب مربوط به ولتاژ لینک DC، سرعت روتور و جریان محور d روتور می‌باشد. در این جا نیز وابستگی مقدار لغزش ژنراتور و سرعت روتور نسبت به پارامتر کنترلی K_{p-wr} کاملاً مشهود است.

در مرحله‌ی ششم، شبیه‌سازی مقادیر η نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-wr} بررسی می‌شود که نتایج مربوطه در شکل (۱۳) به نمایش در آمده‌اند. 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 می‌باشد. در این شکل وابستگی لغزش ژنراتور و سرعت روتور نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-wr} قابل مشاهده است.

در مرحله‌ی هفتم، شبیه‌سازی مقادیر η نسبت به پارامتر کنترلی K_{p-g} انجام می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در شکل (۱۴) به نمایش در آمده‌اند. بررسی شکل (۱۴) نشان‌دهنده‌ی این موضوع است که بیشترین مقدار حساسیت نسبت به پارامتر کنترلی K_{p-g} مربوط به ولتاژ لینک DC و سپس مربوط به لغزش ژنراتور، جریان محور d روتور و سرعت روتور می‌باشد.



دقیق مقادیر حساسیت این متغیرها نسبت به تغییر سرعت باد و یا تغییر امپدانس خط شاخصی به نام η در [۱۹] معرفی شده که این شاخص مطابق رابطه‌ی (۳۲) معرفی می‌شود:

$$\eta = \frac{1}{MAXS} \quad (32)$$

در رابطه‌ی (۳۲) S متغیر حساسیت و شاخص η عکس مقدار بیشینه‌ی حساسیت می‌باشد.

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

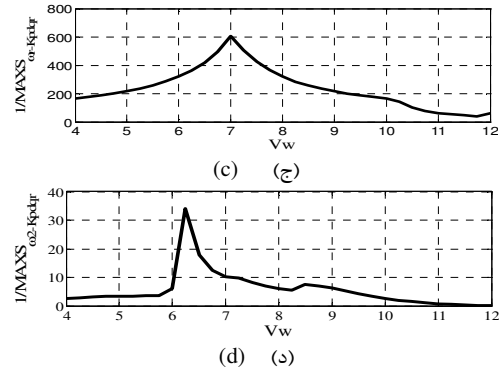
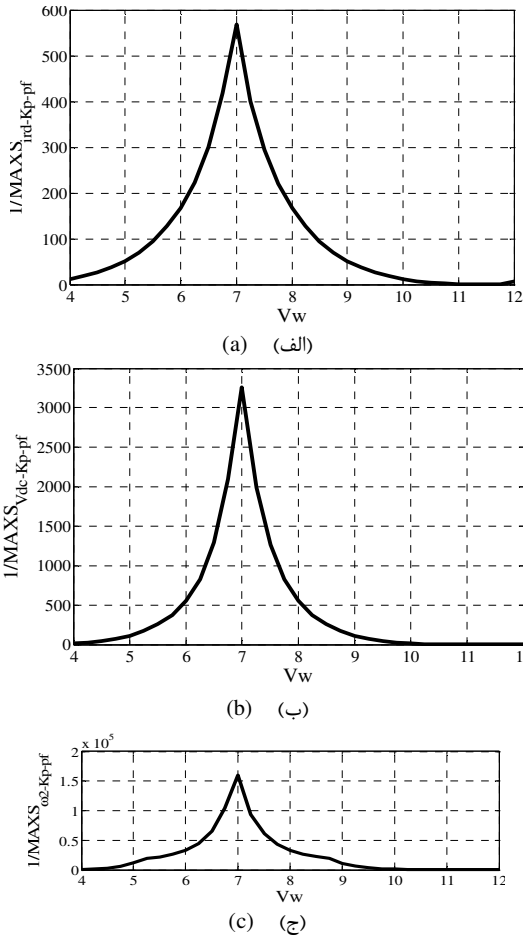
جهت شبیه‌سازی و بررسی مقدار حساسیت مسیر نسبت به پارامترهای کنترلی DFIG در برابر تغییر سرعت باد، تغییرات سرعت باد از ۴ متر بر ثانیه تا ۱۲ متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود. مقادیر اولیه‌ی پارامترهای مختلف سیستم توربین بادی با DFIG متصل شده به شین بینهایت در ضمیمه مقاله آورده شده است. در شبیه‌سازی‌های انجام گرفته به طور کلی می‌توان به این نتیجه دست یافت که کمترین مقدار حساسیت متغیرهای حالت و لغزش DFIG در بازه‌ی تغییرات سرعت باد بین ۶ و ۸ متر بر ثانیه و بیشترین مقدار حساسیت در سرعت‌های باد بین ۴ و ۶ متر بر ثانیه و ۸ و ۱۲ متر بر ثانیه می‌باشد. در مرحله‌ی اول، شبیه‌سازی مقادیر η بر اساس متغیرهای حالت و لغزش ژنراتور (رابطه ۳۷) نسبت به پارامتر کنترلی K_{p-idqr} انجام شده است، که این نتایج در شکل (۸) آمده است. مقدار حساسیت لغزش ژنراتور در مقابل تغییرات سرعت باد بیشتر از بقیه متغیرهای حالت می‌باشد. پس از لغزش ژنراتور به ترتیب جریان محور d روتور، ولتاژ اتصال خازنی DC و سرعت روتور دارای بیشترین مقدار حساسیت هستند.

در مرحله‌ی دوم، شبیه‌سازی مقادیر η نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-idqr} انجام می‌شود. در شکل (۹) بیشترین مقدار حساسیت در برابر تغییرات سرعت باد مربوط به ولتاژ لینک DC و پس از آن مربوط به سرعت روتور، لغزش ژنراتور و جریان محور d روتور است. با مقایسه شکل‌های (۸) و (۹)، واضح است که حساسیت متغیرهای حالت و لغزش ژنراتور نسبت به پارامتر کنترلی تناسبی K_{p-idq} در برابر تغییرات سرعت باد بیشتر است.

در مرحله‌ی سوم، شبیه‌سازی مقادیر η نسبت به پارامتر کنترلی K_{p-pf} انجام شده است که نتایج آن در شکل (۱۰) نشان داده شده است. 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 می‌باشد. با بررسی شکل (۱۰) مشخص است که حساسیت جریان محور d روتور نسبت به پارامتر کنترلی K_{p-pf} به طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به دیگر متغیرهای حالت و لغزش ژنراتور بیشتر می‌باشد که می‌تواند نشان‌دهنده‌ی وابستگی جریان محور d روتور نسبت به پارامتر کنترلی K_{p-pf} باشد.

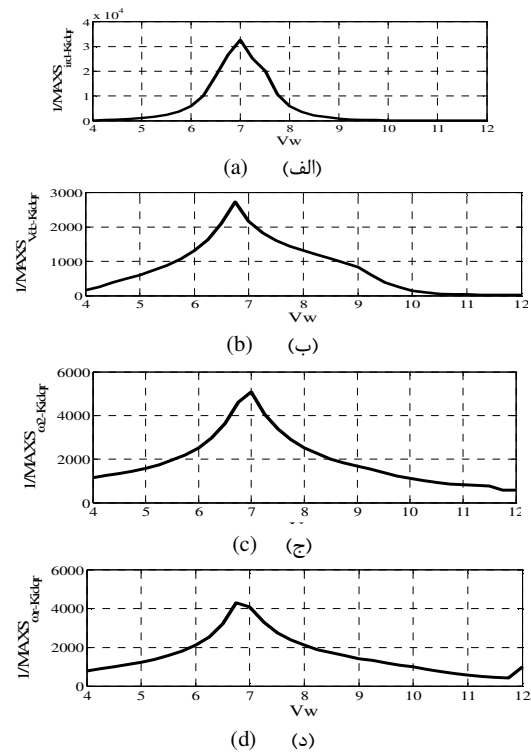
در مرحله ی نهم، شبیه‌سازی مقادیر η نسبت به پارامتر کنترلی K_{p-vdc} انجام می‌شود. این نتایج در شکل (۱۶) به نمایش در آمده‌اند. با بررسی نتایج به دست آمده، بیشترین مقدار حساسیت مربوط به ولتاژ لینک DC و پس از آن به ترتیب مربوط به لغزش ژنراتور، جریان محور d روتور و سرعت روتور می‌باشد. در این شکل حساسیت ولتاژ لینک DC نسبت به حساسیت دیگر متغیرها بیشتر می‌باشد که این نشان‌دهنده‌ی وابستگی تغییرات ولتاژ لینک DC نسبت به پارامتر کنترلی K_{p-vdc} می‌باشد و رابطه‌ی بین نوسانات ولتاژ اتصال خازنی DC را نسبت به تغییرات پارامتر کنترلی K_{p-vdc} نشان می‌دهد.

در مرحله ی دهم، شبیه‌سازی مقادیر η نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-vdc} انجام می‌شود. نتایج در شکل (۱۷) نشان داده شده است. در این شکل همانند شکل‌های قبلی در بازه‌ی سرعت بین ۶ و ۸ متر بر ثانیه متغیرهای حالت و لغزش ژنراتور دارای کمترین مقدار حساسیت هستند ولی در اینجا یک مورد استثناء مشاهده می‌شود که در ادامه بیان می‌گردد.



شکل (۸): مقادیر η بر حسب K_{p-idqr}

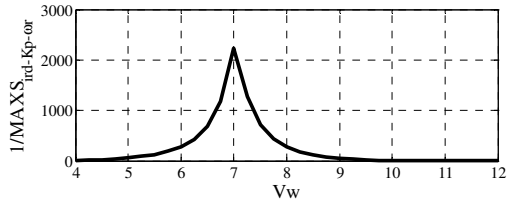
Fig. (8): The values of η in terms of K_{p-idqr}



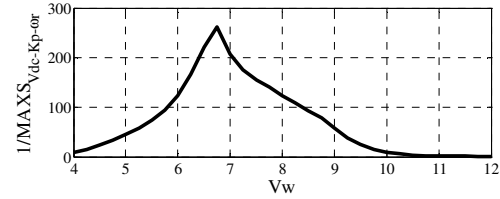
شکل (۹): مقادیر η بر حسب K_{i-idqr}

Fig. (9): The values of η in terms of K_{i-idqr}

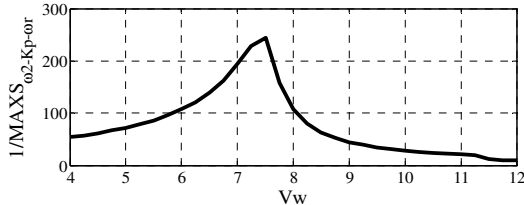
در مرحله ی هشتم، شبیه‌سازی مقادیر η نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-g} انجام می‌شود. نتایج در شکل (۱۵) نشان داده شده‌اند. بیشترین مقدار حساسیت نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-g} مربوط به ولتاژ لینک DC و پس از آن به ترتیب مربوط به سرعت روتور، لغزش ژنراتور و جریان محور d روتور می‌باشد. با مقایسه‌ی نتایج شکل‌های (۱۴) و (۱۵) مشاهده می‌شود که مقدار حساسیت متغیرها نسبت به پارامتر کنترلی K_{p-g} از مقدار حساسیت آن‌ها نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-g} بیشتر است.



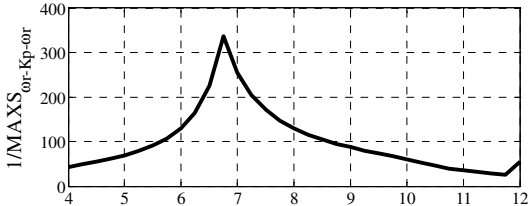
(الف) (ا)



(ب) (ب)



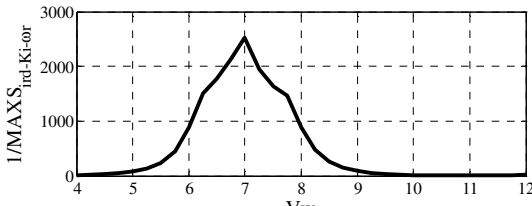
(ج) (ج)



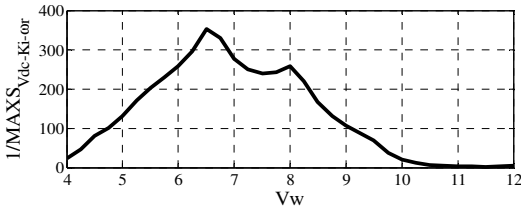
(د) (د)

شکل (۱۲): مقادیر η بر حسب K_{p-wr}

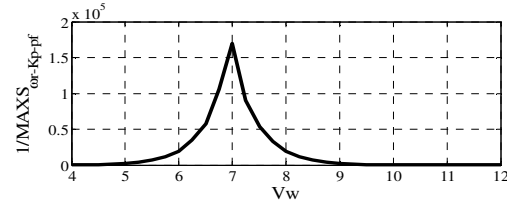
Fig. (12): The values of η in terms of K_{p-wr}



(الف) (ا)



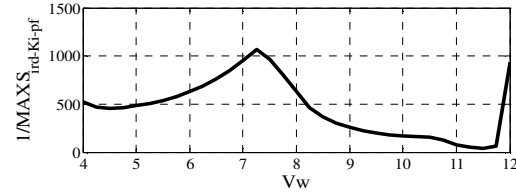
(ب) (ب)



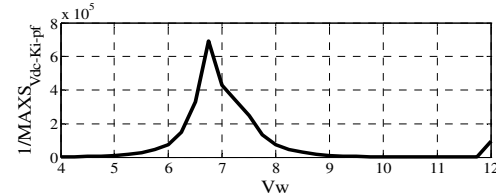
(د) (د)

شکل (۱۰): مقادیر η بر حسب K_{p-pf}

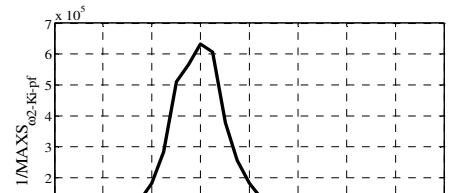
Fig. (10): The values of η in terms of K_{p-pf}



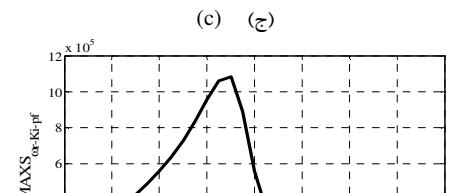
(الف) (ا)



(ب) (ب)



(ج) (ج)



(د) (د)

شکل (۱۱): مقادیر η بر حسب K_{i-pf}

Fig. (11): The values of η in terms of K_{i-pf}

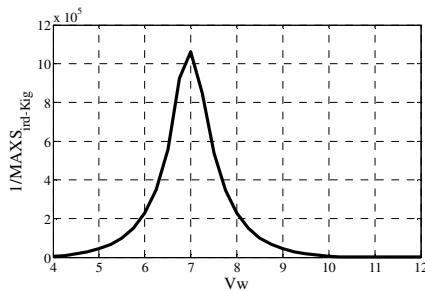
در بررسی مقدار حساسیت ولتاژ لینک DC نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-vdc} از سرعت ۸ متر بر ثانیه تا ۱۱/۵ متر بر ثانیه افزایش مقدار حساسیت مشاهده می‌شود و از سرعت باد ۱۱/۵ متر بر ثانیه تا ۱۲ متر بر ثانیه مقدار حساسیت دوباره کاهش می‌یابد و تقریباً این مقدار حساسیت برابر مقدار حساسیت در سرعت ۸ متر بر ثانیه می‌گردد. 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 نشان‌دهنده وابستگی ولتاژ لینک DC نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-vdc} می‌باشد. با مقایسه نتایج شکل‌های (۱۶) و (۱۷) نتیجه‌گیری می‌شود که حساسیت متغیرها نسبت به پارامتر کنترلی K_{p-vdc} بیشتر از حساسیت آن‌ها نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-vdc} است.

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. پارامترهای کنترلی را از نظر اهمیت تأثیرگذاری بر روی رفتار DFIG می‌توان مطابق جدول (۱) تقسیم‌بندی کرد.

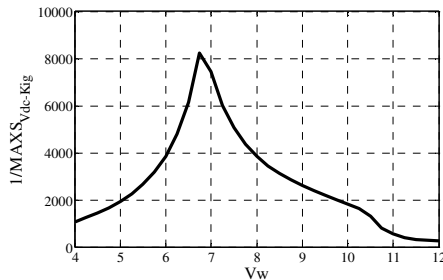
Table (1): Classify the sensitivity of control parameters with respect to changes of wind speed

جدول (۱): دسته‌بندی مقدار حساسیت پارامترهای کنترلی در برابر تغییرات سرعت باد

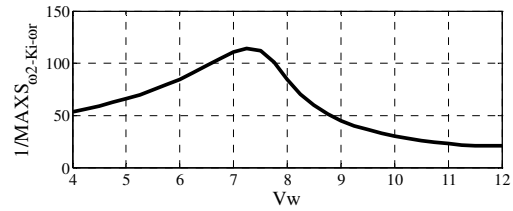
K_{p-idq} K_{p-wr} K_{p-vdc}	پارامترهای بسیار مهم
K_{p-g} K_{p-pf} K_{i-wr}	پارامترهای مهم
K_{i-idq} K_{i-pf} K_{i-vdc} K_{i-g}	پارامترهای با اهمیت کمتر



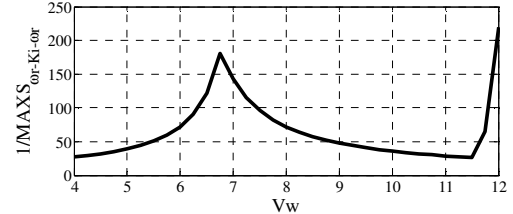
(a) (الف)



(b) (ب)



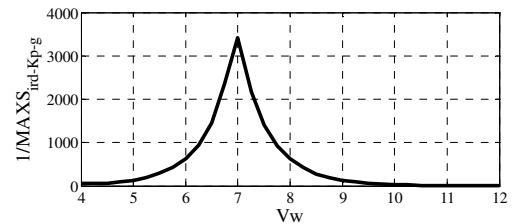
(c) (ج)



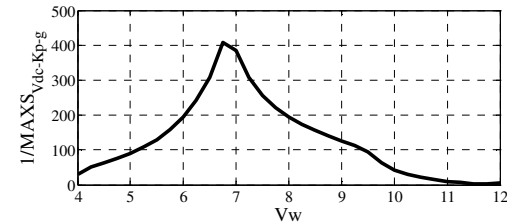
(d) (د)

شکل (۱۳): مقادیر η بر حسب K_{i-wr}

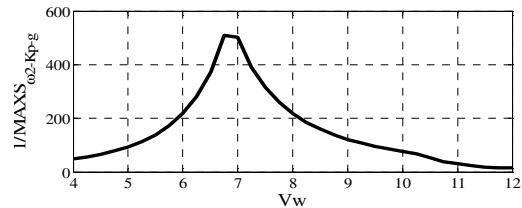
Fig. (13): The values of η in terms of K_{i-wr}



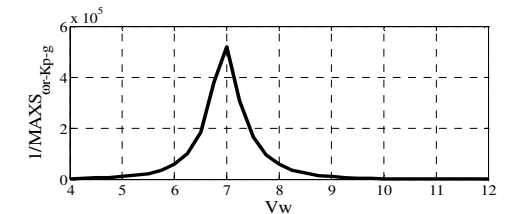
(e) (الف)



(b) (ب)



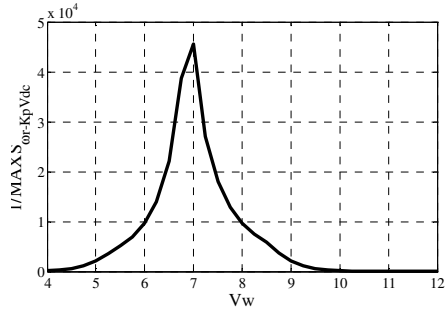
(c) (ج)



(d) (د)

شکل (۱۴): مقادیر η بر حسب K_{p-g}

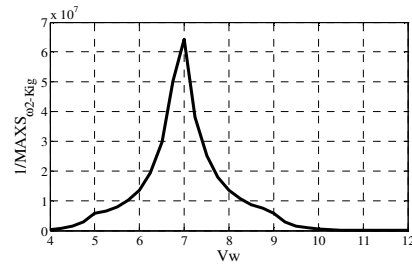
Fig. (14): The values of η in terms of K_{p-g}



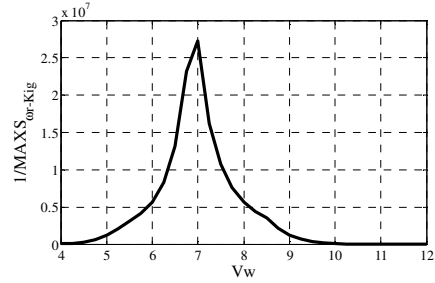
(د) (د)

شکل (۱۶): مقادیر η بر حسب K_{p-vdc}

Fig. (16): The values of η in terms of K_{p-vdc}



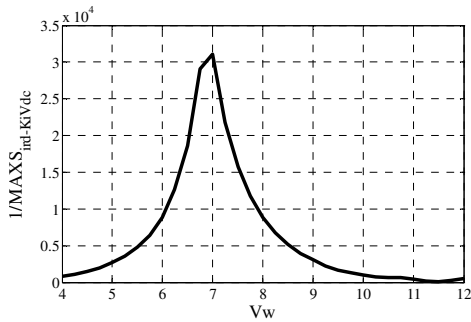
(ج) (ج)



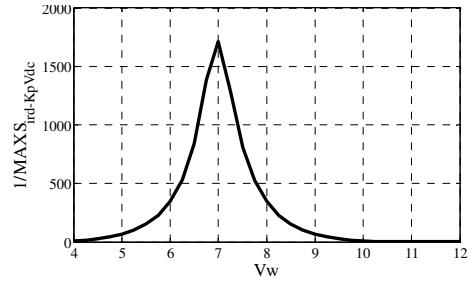
(د) (د)

شکل (۱۵): مقادیر η بر حسب K_{i-g}

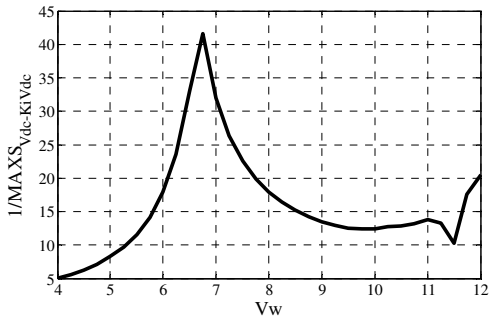
Fig. (15): The values of η in terms of K_{i-g}



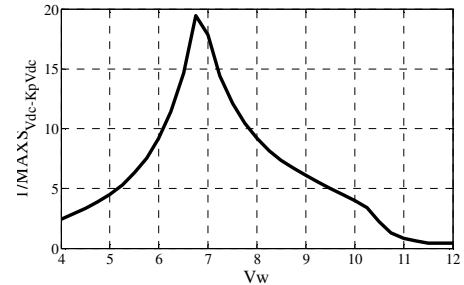
(الف) (الف)



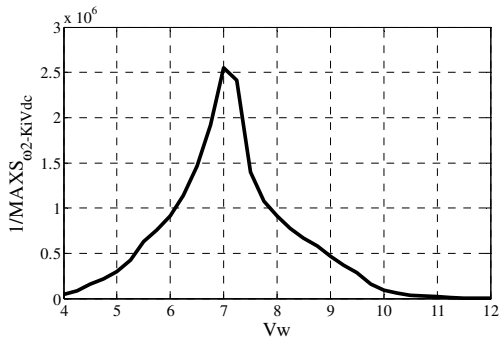
(الف) (الف)



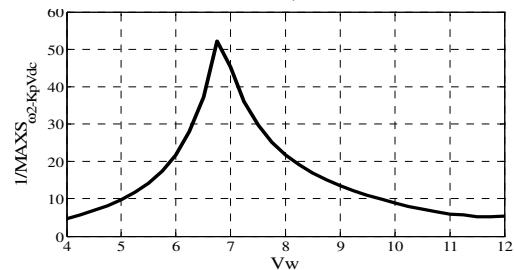
(ب) (ب)



(ب) (ب)



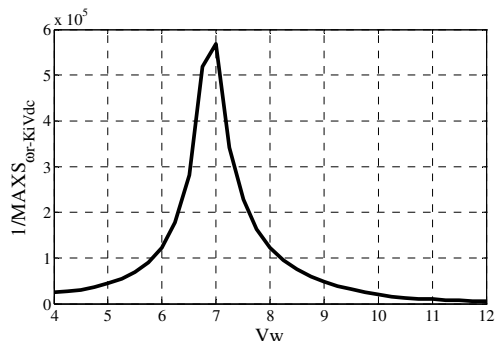
(ج) (ج)



(ج) (ج)

امپدانس خط افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار حساسیت مربوط به ولتاژ لینک DC و پس از آن مربوط به سرعت روتور، لغزش ژنراتور و جریان محور d روتور می‌باشد. با مقایسه شکل‌های (۱۸) و (۱۹)، نشان داده می‌شود که مقدار حساسیت متغیرهای حالت و لغزش ژنراتور نسبت به پارامتر کنترلی تناسبی K_{p-idq} به مراتب بیشتر از مقدار حساسیت این متغیرها نسبت به پارامتر کنترلی انتگرالی K_{i-idq} در برابر افزایش امپدانس خط است.

در مرحله سوم، شبیه‌سازی مقادیر η نسبت به پارامتر کنترلی K_{p-pf} انجام می‌شود که نتایج آن در شکل (۲۰) نشان داده شده است. در شکل (۲۰) با افزایش امپدانس خط انتقال، مقادیر حساسیت‌ها افزایش پیدا می‌کند و 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 می‌باشد.



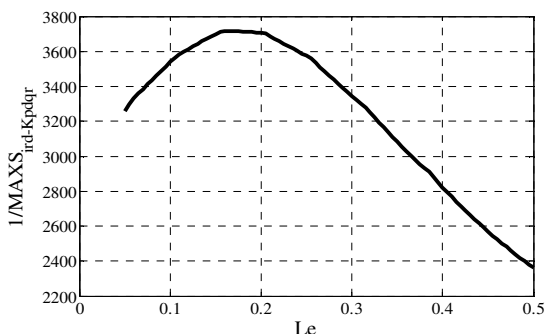
شکل (۱۷): مقادیر η بر حسب K_{i-vdc}
Fig. (17): The values of η in terms of K_{i-vdc}

۴-۱- بررسی مقادیر حساسیت مسیر نسبت به پارامترهای کنترلی در برابر تغییر امپدانس خط اتصال DFIG به شبکه

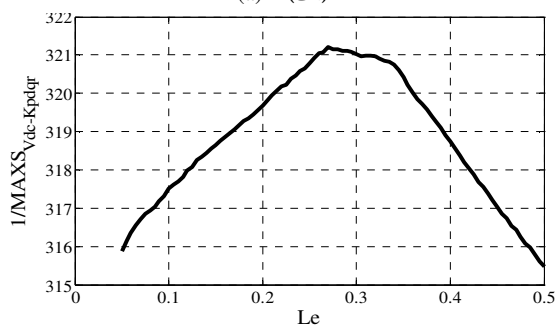
برای شبیه‌سازی و بررسی مقادیر حساسیت متغیرهای حالت DFIG نسبت به ۱۰ پارامتر کنترلی در برابر تغییر امپدانس خط انتقال، سه متغیر حالت مهم بر رفتار DFIG و همچنین لغزش DFIG را که در رابطه (۳۱) تعریف شده‌اند در نظر گرفته و به بررسی مقادیر حساسیت این متغیرها در مقابل تغییر امپدانس خط پرداخته می‌شود. برای تغییر امپدانس خط، مقدار اندوکتانس خط انتقال از ۰/۵ تا ۰/۵ هانری با فرض ثابت بودن R_e افزایش داده می‌شود. جهت بررسی مقادیر حساسیت نسبت به افزایش امپدانس، متغیر η مطابق رابطه (۳۲) تعریف می‌شود و سپس مطابق این رابطه، نمودارهای η بسته به بیشینه‌ی حساسیت نسبت به هر یک از پارامترهای کنترلی در برابر تغییر امپدانس خط انتقال به دست آورده می‌شود.

در مرحله اول، شبیه‌سازی مقادیر η بر اساس متغیرهای حالت و لغزش ژنراتور بیان شده در رابطه (۳۱) نسبت به پارامتر کنترلی K_{p-idq} به دست آورده می‌شود که این نتایج در شکل (۱۸) به نمایش در آمده است. همان‌طور که در شکل (۱۸) مشخص گردیده، در مورد لغزش ژنراتور، جریان محور d روتور و ولتاژ لینک DC با افزایش امپدانس مقدار حساسیت افزایش می‌یابد ولی در مورد سرعت روتور با افزایش امپدانس مقدار حساسیت کاهش می‌یابد. با بررسی شکل (۱۸) می‌توان مشاهده نمود که بیشترین مقدار حساسیت مربوط به لغزش ژنراتور و پس از آن به ترتیب مربوط به ولتاژ لینک DC، سرعت روتور و جریان محور d روتور می‌باشد.

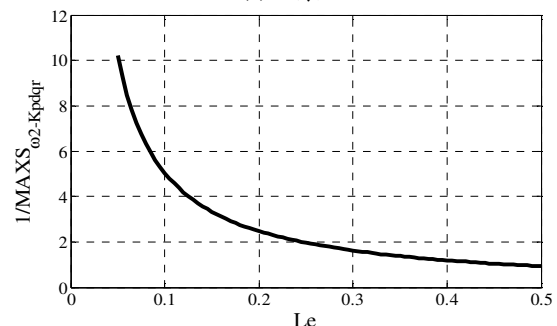
در مرحله دوم، شبیه‌سازی مقادیر η نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-idq} انجام می‌شود که نتایج مربوطه در شکل (۱۹) به نمایش در آمده است. در این شکل با افزایش امپدانس خط انتقال مقدار حساسیت جریان محور d روتور، لغزش ژنراتور و سرعت روتور کاهش می‌یابد. ولی در مورد ولتاژ لینک DC مقدار حساسیت با افزایش



(الف) (a)



(ب) (b)



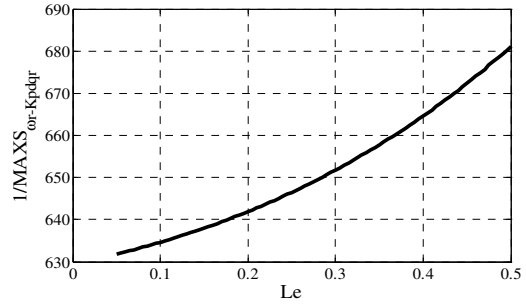
(ج) (c)



(d) (د)

شکل (۱۹): مقادیر η بر حسب K_{i-idqr}

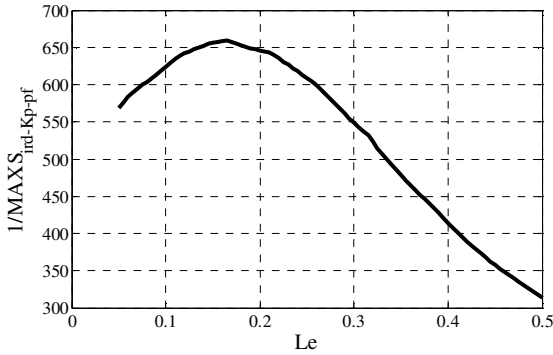
Fig. (19): The values of η in terms of K_{i-idqr}



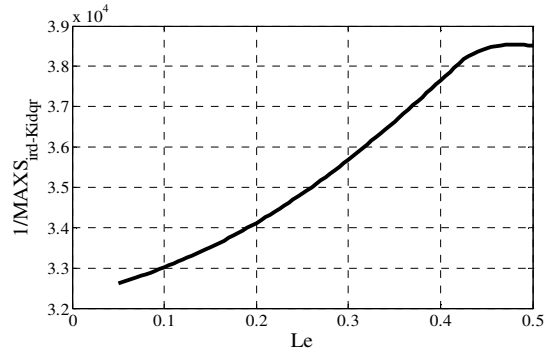
(d) (د)

شکل (۱۸): مقادیر η بر حسب K_{p-idqr}

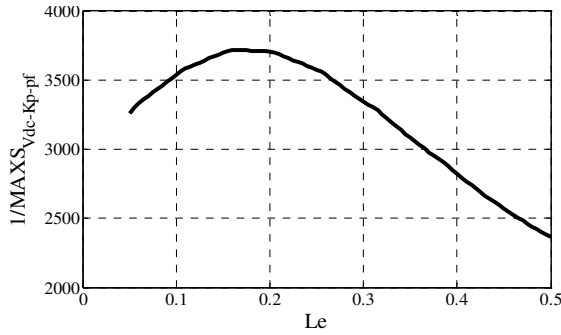
Fig. (18): The values of η in terms of K_{p-idqr}



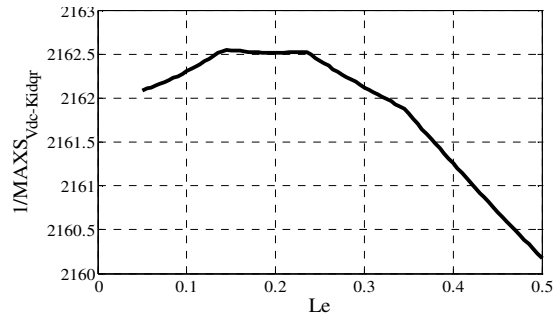
(a) (الف)



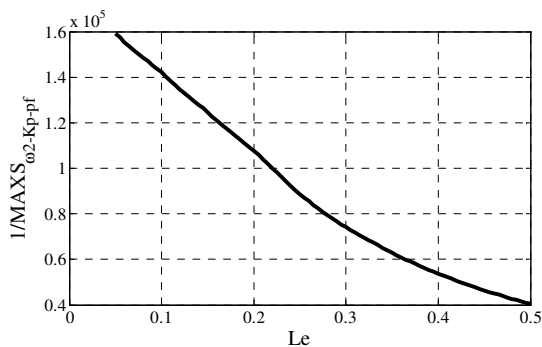
(a) (الف)



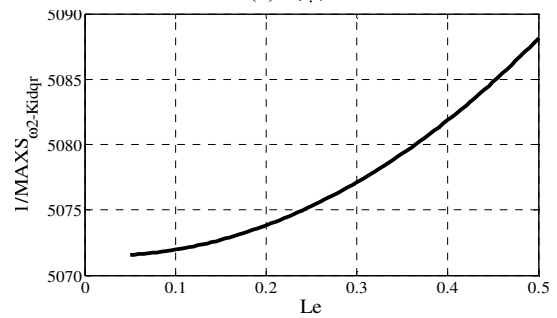
(b) (ب)



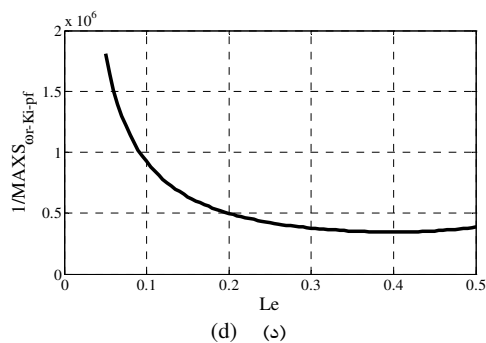
(b) (ب)



(c) (ج)



(c) (ج)



شکل (۲۱): مقادیر η بر حسب K_{i-pf}

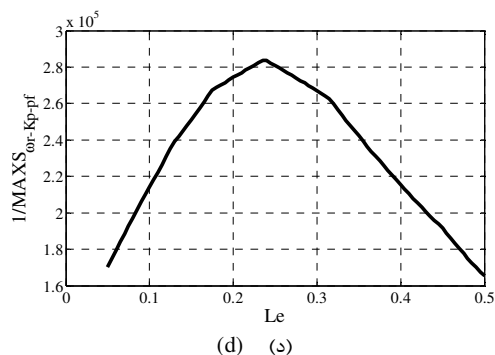
Fig. (21): The values of η in terms of K_{i-pf}

با بررسی شکل (۲۰) مشخص می‌گردد که حساسیت جریان محور d روتور نسبت به پارامتر کنترلی K_{p-pf} به طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به دیگر متغیرهای حالت و لغزش ژنراتور بیشتر می‌باشد که می‌تواند نشان دهنده‌ی وابستگی جریان محور d روتور نسبت به پارامتر کنترلی K_{p-pf} باشد و رابطه‌ی بین جریان محور d روتور و میزان توان راکتیو تولید شده توسط DFIG را نشان می‌دهد.

در مرحله‌ی چهارم، شبیه‌سازی مقادیر η نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-pf} انجام می‌شود که نتایج این شبیه‌سازی در شکل (۲۱) به نمایش در آمده است. در این نمودارها مقادیر حساسیت ولتاژ لینک DC، لغزش ژنراتور و سرعت روتور با افزایش امپدانس خط انتقال افزایش می‌یابد ولی در مورد جریان محور d روتور این حساسیت با افزایش امپدانس خط انتقال کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل (۲۱) 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 می‌باشد.

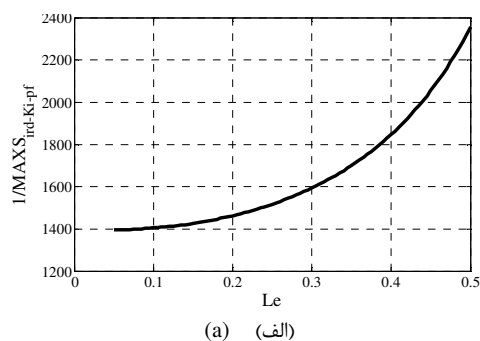
با بررسی شکل (۲۱) مشخص می‌شود که حساسیت جریان محور d روتور نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-pf} به طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به حساسیت دیگر متغیرها بیشتر می‌باشد که این موضوع رابطه‌ی بین جریان محور d روتور و توان راکتیو تولید شده توسط DFIG را نشان می‌دهد. با مقایسه‌ی نتایج شکل‌های (۲۰) و (۲۱) مشخص می‌شود که مقدار حساسیت متغیرهای حالت و لغزش ژنراتور نسبت به پارامتر کنترلی K_{p-pf} بیشتر از مقدار حساسیت آن‌ها نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-pf} در برابر افزایش امپدانس خط انتقال است.

در مرحله‌ی پنجم، شبیه‌سازی مقادیر η نسبت به پارامتر کنترلی K_{p-wr} انجام می‌شود که این شبیه‌سازی در شکل (۲۲) نشان داده شده است. در این شکل با افزایش امپدانس خط انتقال مقادیر حساسیت متغیرهای جریان محور d روتور، ولتاژ لینک DC و سرعت روتور کاهش می‌یابد ولی مقدار حساسیت لغزش ژنراتور با افزایش امپدانس خط افزایش می‌یابد.

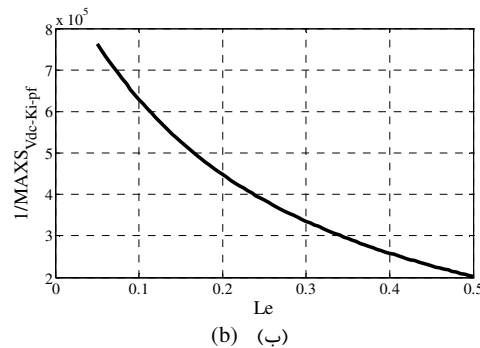


شکل (۲۰): مقادیر η بر حسب K_{p-pf}

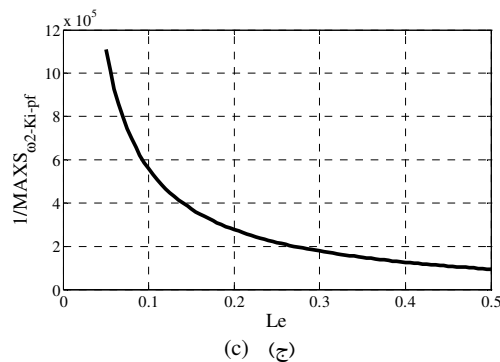
Fig. (20): The values of η in terms of K_{p-pf}



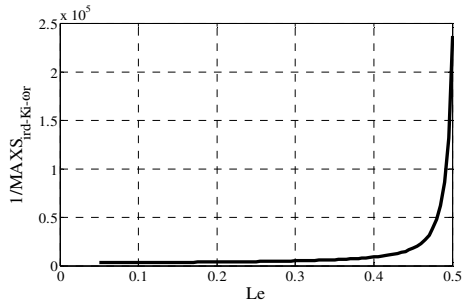
(الف) (a)



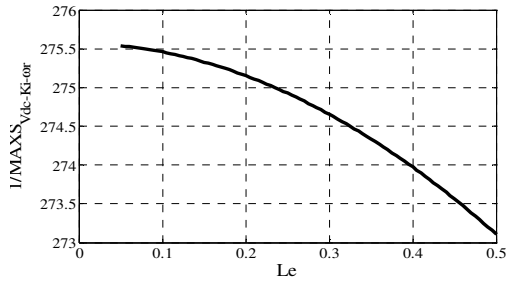
(ب) (b)



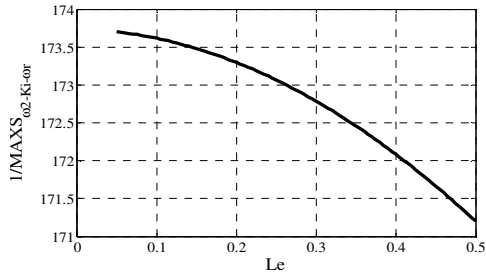
(ج) (c)



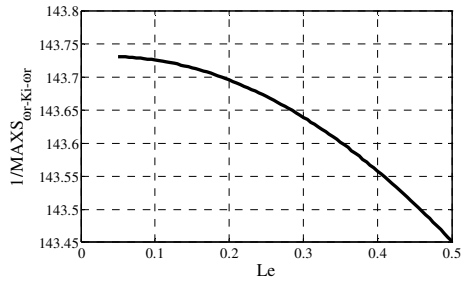
(الف) (a)



(ب) (b)



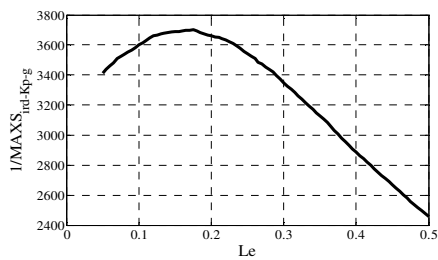
(ج) (c)



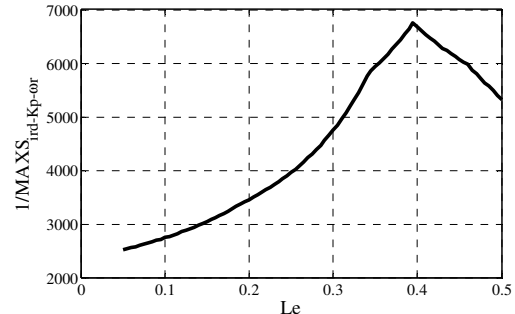
(د) (d)

شکل (۲۳): مقادیر η بر حسب K_{i-wr}

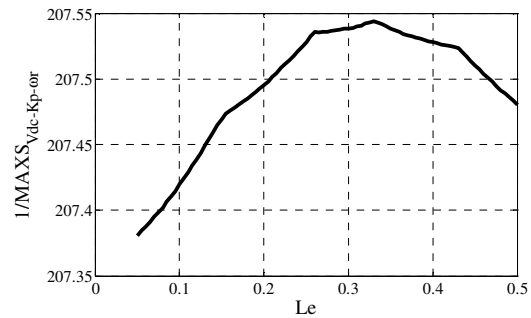
Fig. (23): The values of η in terms of K_{i-wr}



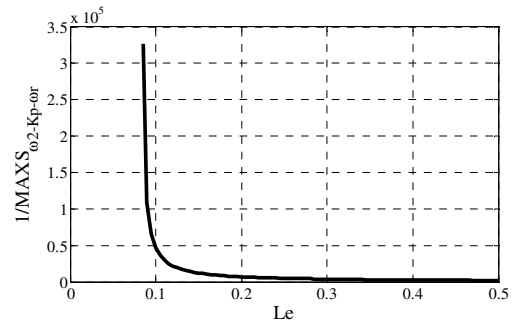
(الف) (a)



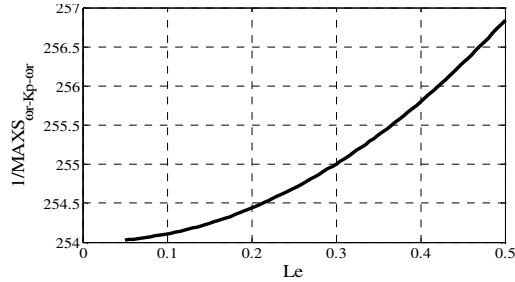
(الف) (a)



(ب) (b)



(ج) (c)

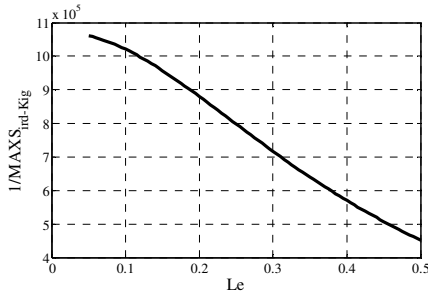


(د) (d)

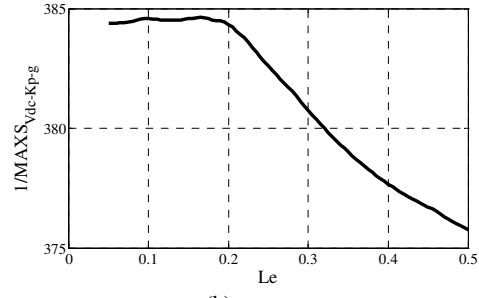
شکل (۲۲): مقادیر η بر حسب K_{p-wr}

Fig. (22): The values of η in terms of K_{p-wr}

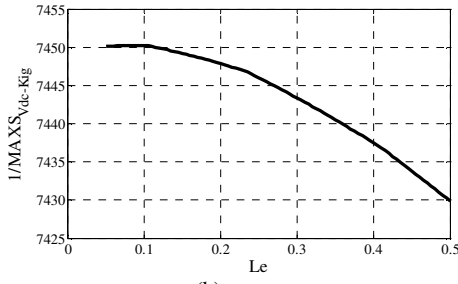
در شکل (۲۲) بیشترین مقدار حساسیت مربوط به لغزش ژنراتور و پس از آن این مقدار حساسیت به ترتیب مربوط به سرعت روتور، ولتاژ لینک DC و جریان محور d روتور می‌باشد. در این جا نیز وابستگی مقدار لغزش ژنراتور و سرعت روتور نسبت به پارامتر کنترلی K_{p-wr} کاملاً مشهود است.



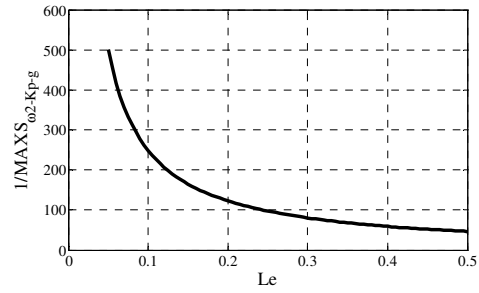
(الف) (a)



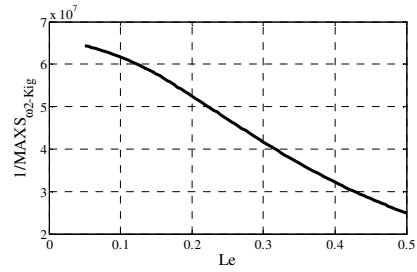
(ب) (b)



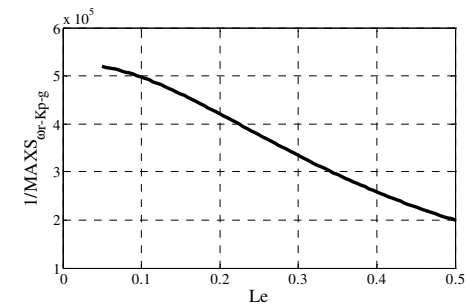
(ب) (c)



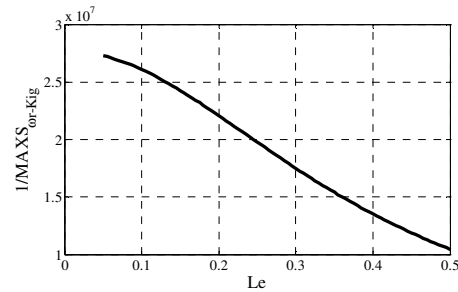
(ج) (d)



(ج) (e)



(د) (f)



(د) (g)

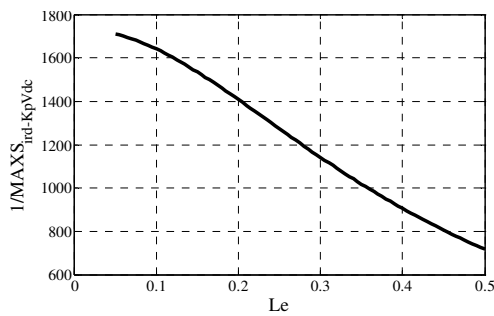
شکل (۲۴): مقادیر η بر حسب K_{p-g}

Fig. (24): The values of η in terms of K_{p-g}

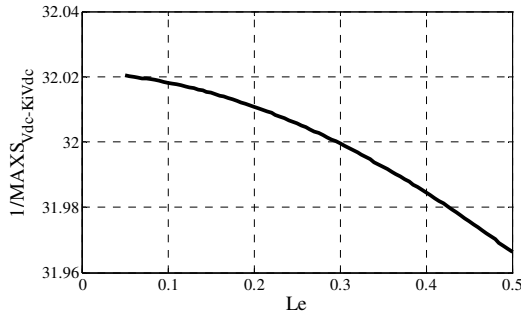
در مرحله‌ی ششم، شبیه‌سازی مقادیر η نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-wr} انجام می‌شود که نتایج مربوطه در شکل (۲۳) به نمایش درآمده‌اند. با توجه به شکل با افزایش امپدانس خط انتقال مقادیر حساسیت متغیرهای ولتاژ لینک DC، سرعت روتور و لغزش ژنراتور افزایش می‌یابند، ولی مقدار حساسیت جریان محور d روتور با افزایش امپدانس کاهش پیدا می‌کند. در شکل (۲۳) بیشترین مقدار حساسیت مربوط به سرعت روتور و پس از آن به ترتیب مربوط به لغزش ژنراتور، ولتاژ لینک DC و جریان محور d روتور می‌باشد. در این شکل وابستگی لغزش ژنراتور و سرعت روتور نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-wr} قابل مشاهده است.

شکل (۲۵): مقادیر η بر حسب K_{i-g}

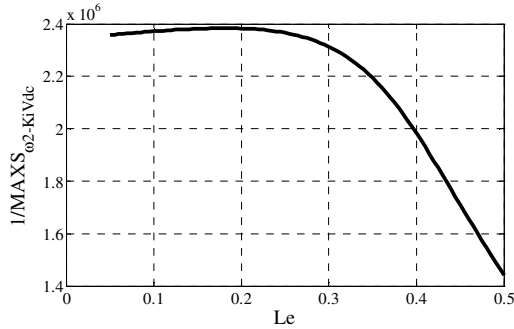
Fig. (25): The values of η in terms of K_{i-g}



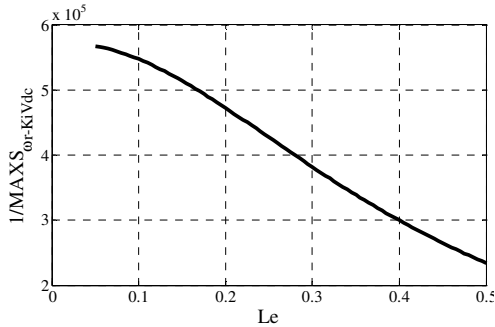
(الف) (h)



(ب) (ب)



(ج) (ج)



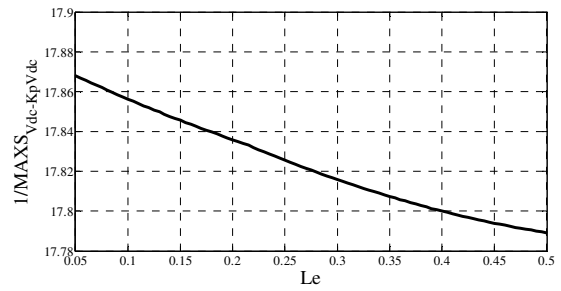
(د) (د)

شکل (۲۷): مقادیر η بر حسب K_{i-vdc}

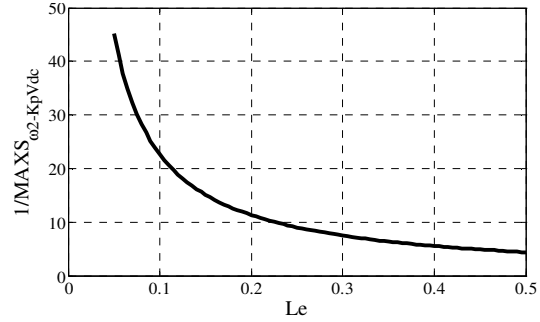
Fig. (27): The values of η in terms of K_{i-vdc}

بررسی شکل (۲۴) نشان‌دهنده‌ی 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 می‌باشد.

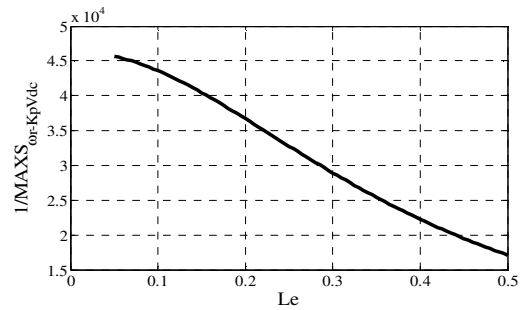
در مرحله‌ی هشتم، شبیه‌سازی مقادیر η نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-g} انجام می‌شود. نتایج در شکل (۲۵) نشان داده شده‌اند. در این شکل نیز با افزایش امپدانس خط انتقال مقادیر حساسیت متغیرها افزایش پیدا می‌کند. بیشترین مقدار حساسیت نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-g} مربوط به ولتاژ لینک DC و پس از آن به ترتیب مربوط به جریان محور d روتور، لغزش ژنراتور و سرعت روتور می‌باشد. با مقایسه‌ی نتایج شکل‌های (۲۴) و (۲۵) باز به این نتیجه رسیده می‌شود که مقدار حساسیت متغیرها نسبت به پارامتر کنترلی K_{p-g}



(ب) (ب)



(ج) (ج)

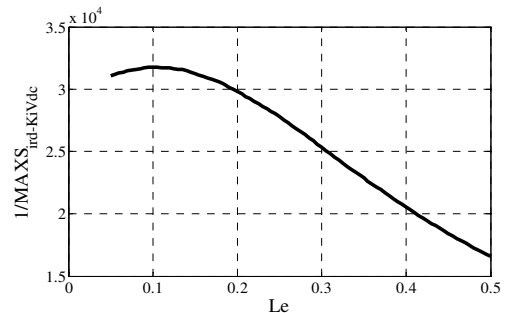


(د) (د)

شکل (۲۶): مقادیر η بر حسب K_{p-vdc}

Fig. (26): The values of η in terms of K_{p-vdc}

در مرحله‌ی هفتم، شبیه‌سازی مقادیر η نسبت به پارامتر کنترلی K_{p-g} انجام می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در شکل (۲۴) به نمایش در آمده‌اند. در این شکل با افزایش امپدانس خط انتقال مقادیر حساسیت متغیرها افزایش پیدا می‌کند.



(الف) (الف)

۵- نتیجه گیری

این مقاله تحلیل‌های حساسیت مسیر یک سیستم قدرت شامل منبع تولید پراکنده را معرفی می‌کند. DG استفاده شده در این تحقیق ژنراتور القایی تغذیه دابل متصل به توربین بادی می‌باشد. عکس مقدار ماکزیمم شاخص حساسیت‌های (η) متغیرهای حالت مانند جریان روتور ژنراتور (i_{rd})، تغییر سرعت پروینیت روتور ($\Delta\omega_r$)، ولتاژ لینک DC (v_{dc}) و همچنین لغزش ژنراتور (ω_2) به عنوان معیاری در مطالعه‌ی رفتار DG در برابر تغییر سرعت باد و تغییر امپدانس خط انتقال استفاده می‌شود. وابستگی رفتار سیستم نسبت به پارامترهای کنترلی در برابر تغییر سرعت باد و همچنین تغییر امپدانس خط انتقال با استفاده از TS و η نشان داده شد. اثرات پارامترهای مختلف روی پایداری سیستم در یک سیستم SMIB ارزیابی شدند. از شبیه‌سازی و مطالعاتی که انجام گرفت، مشخص می‌شود که پارامترهای کنترلی تناسبی نسبت به پارامترهای کنترلی انتگرال‌گیر دارای اهمیت بیشتری از نظر تأثیرگذاری در رفتار DFIG می‌باشند. در پایان پارامترهای کنترلی بر اساس میزان اهمیت آنها در رفتار سیستم با توجه به تغییر سرعت باد و همچنین تغییر امپدانس خط انتقال دسته‌بندی شدند. نتایج حاصل نشان‌دهنده‌ی مقدار اهمیت پارامترهای کنترلی توربین بادی در برابر دو عامل محیطی تغییر سرعت باد و تغییر امپدانس خط انتقال می‌باشد و به طور کلی این نتایج حاکی از فصل مشترک مقدار اهمیت پارامترها در رفتار DFIG متصل به توربین بادی در رویارویی با تغییرات عوامل محیطی است.

ضمائم

Table (3): Parameters of the wind turbine with DFIG connected to the infinite bus

جدول (۳) پارامترهای توربین بادی با DFIG متصل به شین بی‌نهایت

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

پی‌نوشت:

- 1- Transient Energi Function
- 2- Single Machine Infinite Bus
- 3- Doubly Fed Induction Machine

بیشتر از مقدار حساسیت آنها نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-g} در برابر افزایش امپدانس خط است.

در مرحله‌ی نهم، شبیه‌سازی مقادیر η نسبت به پارامتر کنترلی انجام می‌شود. این نتایج در شکل (۲۶) به نمایش در آمده‌اند. در این شکل هم با افزایش امپدانس خط انتقال مقادیر حساسیت متغیرها افزایش پیدا می‌کند. 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. حساسیت ولتاژ لینک DC نسبت به حساسیت دیگر متغیرها بیشتر می‌باشد که این نشان‌دهنده‌ی وابستگی تغییرات ولتاژ لینک DC نسبت به پارامتر کنترلی K_{p-vdc} می‌باشد و رابطه‌ی بین نوسانات ولتاژ لینک DC را نسبت به تغییرات پارامتر کنترلی K_{p-vdc} نشان می‌دهد. در مرحله‌ی دهم، شبیه‌سازی مقادیر η نسبت به پارامتر کنترلی انجام می‌شود. نتایج در شکل (۲۷) نشان داده شده است. در این شکل نیز با افزایش امپدانس خط انتقال مقادیر حساسیت متغیرها افزایش پیدا می‌کند. بیشترین مقدار حساسیت مربوط به ولتاژ لینک DC و پس از آن به ترتیب مربوط به جریان محور d روتور، سرعت روتور و لغزش ژنراتور می‌باشد. مقدار حساسیت ولتاژ لینک DC نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-vdc} به طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به حساسیت دیگر متغیرها بیشتر است که نشان‌دهنده‌ی وابستگی ولتاژ لینک DC نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-vdc} می‌باشد. با مقایسه‌ی نتایج شکل‌های (۲۶) و (۲۷) باز به این نتیجه رسیده می‌شود که حساسیت متغیرها نسبت به پارامتر کنترلی K_{p-vdc} بیشتر از حساسیت آنها نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-vdc} است.

با بررسی جداگانه‌ی نتایج حساسیت هر یک از متغیرهای حالت i_{rd} ، ω_r ، v_{dc} و لغزش ژنراتور نسبت به پارامترهای کنترلی در برابر افزایش امپدانس خط انتقال به این نتیجه رسیده می‌شود که با افزایش امپدانس خط انتقال، مقادیر حساسیت متغیرهای حالت DFIG نسبت به هر یک از پارامترهای کنترلی به طور چشمگیری افزایش پیدا می‌کند. پارامترهای کنترلی را از نظر اهمیت تأثیرگذاری بر روی رفتار DFIG می‌توان مطابق جدول (۲) تقسیم‌بندی کرد.

Table (2): Classify the sensitivity of control parameters with respect to changes of line impedance

جدول (۲): دسته‌بندی مقدار حساسیت پارامترهای کنترلی در برابر تغییرات

امپدانس خط

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

References

- [1] A.M. Azmy, I. Erlich, "Impact of distributed generation on the stability of electrical power system", Proceeding of the IEEE/PES, Vol. 2, pp 1056-1063, June 2005.
- [2] A. Nagizadeh Ghooghareh, A. Doroudi, M.P. Azim, "Investigation of reactive power control effects on flicker and harmonics emission of a DFIG wind turbine", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, Vol. 3, No. 12, pp. 47-54, Winter 2013 (in Persian).
- [3] Gh. Shahgholian, E. Haghjoo, A. Seifi, I. Hassanzadeh, "The Improvement DSTATCOM to enhance the quality of power using fuzzy- neural controller", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, Vol. 2, No. 6, pp. 3-16, Summer 2011 (in Persian).
- [4] J.G. Slootweg, W.L. Kling, "Impacts of distributed generation on power system transient stability", Proceeding of the IEEE/PES, Vol. 2, pp 2150-2155, June 2004.
- [5] S. Jenab, B. Fani, H. Ghasvari, "Transient performance improvement of wind turbines with doubly fed induction generators using fractional order control strategy", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, Vol. 4, No. 16, pp. 17-28, Winter 2014 (in Persian).
- [6] M.K. Donnelly, J.E. Dagle, D.J. Trudnowski, G.J. Rogers, "Impact of the distributed utility on transmission system stability", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, No. 2, pp 741-46, 1996.
- [7] 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).
- [8] M.J. Laufenberg, M.A. Pai, "A new approach to dynamic security assessment using trajectory sensitivities", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 13, No. 3, pp. 953-958, 1998.
- [9] I.A. Hiskens, M.A. Pai, "Trajectory sensitivity analysis of hybrid systems", IEEE Trans. on Circuits and Systems - Part 1: Fundamental Theory and Applications, Vol. 47, No. 2, pp. 204-220, 2000.
- [10] K.N. Shubhanga, A.M. Kulkarni, "Determination of effectiveness of transient stability controls using reduced number of trajectory sensitivity computations", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 19, No. 1, pp. 473-482, 2004.
- [11] D. Chatterjee, A Ghosh, "TCSC control design for transient stability improvement of a multi-machine power system using trajectory sensitivity", Electric Power Systems Research, Vol. 77, No. 5-6, pp. 470-483, April 2007.
- [12] A. Ghosh, D. Chatterjee, P. Bhandiwad, M.A. Pai, "Trajectory sensitivity analysis of TCSC compensated power system", Proceeding of the IEEE/PES, Vol. 2, pp.1515 -1520, 2004
- [13] T.B. Nguyen, "Dynamic security assessment of power systems using trajectory sensitivity approach", Ph.D. dissertation, University of Illinois, Urbana-Champaign, 2002.
- [14] M.J. Laufenberg, "Dynamic sensitivity functions and the stability of power systems with FACTS controllers", Ph.D. dissertation, University of Illinois, Urbana-Champaign, 1997.
- [15] M. Zamanifar, B. Fani, M.E.H. Golshan, H.R. Karshenas, "Dynamic modeling and optimal control of DFIG wind energy systems using DFT and NSGA-II", Electrical Power Systems Research, pp. 50-58, Vol. 108, 2014.
- [16] 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.
- [17] T. Ackerman, "Wind Power in Power Systems", New York: Wiley, 2005.
- [18] M. rahimi, M. Parniani, "Transient performance improvement of wind turbines with doubly fed induction generators using nonlinear control strategy", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 25, No. 2, pp. 514-525, Jun. 2010.
- [19] D. Chatterjee, A. Ghosh, M.A. Pai, "Trajectory sensitivity analysis in Distributed generation systems", Proceeding of the IEEE/PEDES, pp. 1-6, New Delhi , Dec. 2006.