

آنالیز حساسیت مسیر نسبت به پارامترهای کنترلی

DFIG در برابر تغییر امپدانس خط انتقال

مهدی فولادگر^۱، بهادر فانی^۱، غضنفر شاهقلیان^۲

^۱دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، دانشکده مهندسی برق، Bahman1475@yahoo.com

^۲دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، دانشکده مهندسی برق، shahgholian@iaun.ac.ir

چکیده - تحلیل حساسیت مسیر می تواند در تعیین اثر پارامترهای کنترلی توربین بادی متصل به ژنراتور القایی تغذیه دابل (DFIG) در برابر تغییر امپدانس خط 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 امپدانس خط، متغیرهای حالت سیستم و لغزش DFIG مورد بررسی قرار می گیرند. با توجه به بررسی ها و شبیه سازی های انجام گرفته می توان 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 در مقابل تغییر امپدانس خط انتقال تقسیم بندی می شوند.

کلید واژه - ژنراتور القایی تغذیه دابل (DFIG)، توربین بادی (WT)، سیستم های تولید پراکنده (DG)، حساسیت مسیر (TS).

با هر دو معادلات پیوسته و گسسته (سیستم های هیبریدی) توصیف شده در [۳] را گسترش و بیان می کند. یک روش برای کاهش تعداد محاسبات حساسیت مسیر برای به دست آوردن بیشترین کنترل مؤثر در [۴] توصیف شده است. استفاده از تحلیل حساسیت مسیر در عملکرد مؤثر ادوات FACTS در یک سیستم توان چند ماشینه در [۵] توصیف شده است.

در این مقاله، ژنراتور القایی تغذیه دابل متصل به توربین بادی به عنوان DG استفاده می شود. تحلیل حساسیت مسیر در یک سیستم SMIB انجام می شود که اثرات آن را در افزایش ناحیه ی پایداری گذرا نشان می دهد. مقادیر پارامترهای کنترلی بحرانی در برابر تغییر امپدانس خط به کمک حساسیت مسیر تعیین می شوند. سطح توان توربین بادیدر محدوده ۱/۷۶ مگاوات آمیر می باشد. بنابراین در این مقاله تولید DG در این محدوده نگه داشته می شود.

۱- مقدمه

شرایط اقتصادی و محیطی اغلب روی ساخت ایستگاه های تولیدی وسیع و خطوط انتقال، محدودیت هایی را قرار می دهند. اتصال واحدهای تولیدی با سایز کوچک و متوسط برای سیستم های موجود به عنوان راهکاری در حال پیشرفت می باشد. این واحدها معمولاً نزدیک به مراکز بار قرار داده می شوند و به تولیدکننده های پراکنده (DG) مشهور می باشند. DG ها می توانند در نوع های گوناگون باشند، مانند ژنراتورهای القایی قفسه سنجایی متصل شده به توربین بادی، ژنراتورهای القایی تغذیه دابل متصل شده به توربین بادی، سلول های سوختی متصل شده به سیستم توسط مبدل های الکترونیک قدرت یا ژنراتورهای سنکرون متصل شده به توربین احتراقی [۱]. روش استاندارد برای افزایش پایداری دینامیکی سیستم های توان، روش هایی مبتنی بر تابع انرژی گذرا (TEF) می باشد. با این وجود این روش ها به طور زیادی پیچیده می شود.

هنگامی که مدل ها به صورت دقیق تر بررسی می شوند. تئوری حساسیت برای حل این مسئله با استفاده از تحلیل های حساسیت مسیر می تواند معرفی شود [۲]. این تکنیک روشی برای سیستم ها

حساسیت مسیر برای هر پارامتر می تواند به صورت مستقل از معادلات تحلیل حساسیت مسیر پارامترهای دیگر حل شود. به عبارت دیگر ما باید برای اعمال تحلیل حساسیت مسیر با توجه به هر پارامتر بر روی سیستم، $2n$ معادله دیفرانسیل را در یک زمان حل کنیم که n تای آن متعلق به معادلات غیرخطی حاکم بر سیستم است (معادله (۱)) و n تای آن مربوط به معادلات حساسیت نسبت به پارامتر مورد نظر است (معادله (۶)) [۷-۸]. 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 λ یک متغیر اسکالر باشد و حساسیت ها نسبت به آن مطالعه می شوند. دو مقدار λ انتخاب می شود (λ_1 و λ_2). بردارهای حالت مربوطه x_1 و x_2 به ترتیب محاسبه می شوند. حال حساسیت به صورت زیر تعریف می شود:

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

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

۲-۲-۲ مدل توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی تغذیه

دو بل در راستای فلوئ استاتور

متداول ترین نوع توربین بادی که در این روزها به طور گسترده به کار برده می شود DFIM است. این نوع ماشین ها می توانند به عنوان ژنراتور یا موتور کار کنند. اگر چه تمایل در جهت کاربرد موتوری به دلیل فرسایش مکانیکی حلقه های لغزان کمتر است اما در حالت عملکرد ژنراتوری امتیازاتی نسبت به دیگر انواع توربین های بادی دارند که به دلیل توانایی سازگاری و طبیعت نرم آنها است. 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 فلوئ استاتور می باشد (شکل (۱)).

۲- تحلیل های حساسیت مسیر و مدل سازی سیستم های توان

۲-۱- تحلیل های حساسیت مسیر

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

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

در معادله (۱)، x یک بردار n بعدی از متغیرهای حالت است و p یک بردار m بعدی از پارامترهای سیستم است که می تواند 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 می کنیم و به صورت معادله زیر نشان می دهیم:

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

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 مشتق گیری 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 می شوند [۶]. در معادله (۶) ماتریس $n \times n$ ژاکوبین است که در طول شبیه سازی به طور مداوم در حال تغییر است [۷] و ماتریسی $n \times 1$ می باشد که با توجه به هر پارامتر به دست می آید. بنابراین معادلات تحلیل

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

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

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

ω_r در رابطه (۱۷) سرعت روتور و معادل رابطه (۱۴) 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 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.

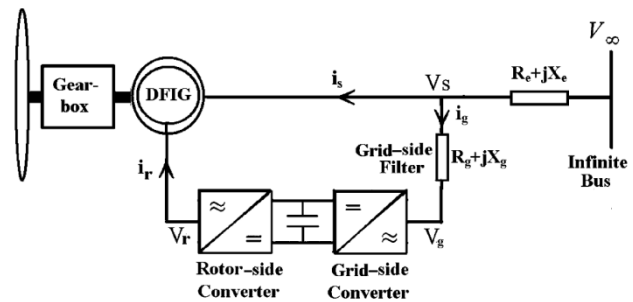
(ج) مدل استاتور:

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

$$\psi_{sd} = \psi_s \quad (19)$$

$$\psi_{sq} = 0 \quad (20)$$

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:



شکل ۱: دیاگرام ساختاری توربین بادی تغذیه دابل مدل سازی شده معادلات اساسی زیر برای مدل ژنراتور DFIG استفاده می شوند [۹]:

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

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

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

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

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

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

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

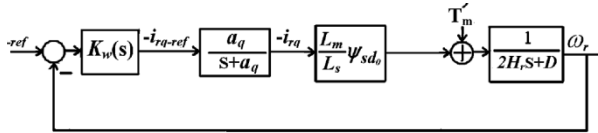
(الف) مدل روتور

از روابط (۹)–(۱۱)، حالت های دینامیکی روتور برحسب جریان روتور 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:

شده است.



شکل ۲: حلقه کنترل سرعت

در این شکل، a_q پهنای باند حلقه کنترل جریان محور q روتور می باشد و $T_m' = K_s \beta + D \omega_r$ 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 کننده سرعت به صورت زیر می شود:

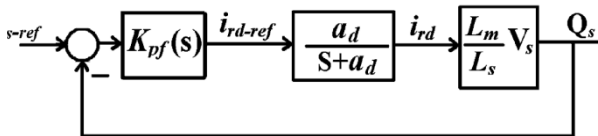
$$\frac{dx_7}{dt} = k_{i\omega} (\omega_{r-ref} - \omega_r) \quad (26)$$

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

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

رابطه ی (۲۷) ارتباط مستقیم بین جریان محور d روتور و توان راکتیو استاتور و ضریب توان ژنراتور را نشان می دهد. جریان مرجع محور d روتور را می توان به وسیله کنترل کننده توان راکتیو نشان داده شده در شکل (۳) تعیین نمود.



شکل ۳: حلقه کنترل توان راکتیو

در این شکل، a_d پهنای باند حلقه کنترل جریان محور d روتور می باشد. 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 می باشد:

$$\frac{dx_8}{dt} = k_{I-pq} (Q_{s-ref} - Q_s) \quad (28)$$

$$\frac{1}{\omega_b} \frac{L_s + L_e}{L_s} \frac{d\psi_{sd}}{dt} = -\frac{R_s + R_e}{L_s} \psi_{sd} + \frac{R_s + R_e}{L_s} L_m i_{rd} \quad (21)$$

$$-R_e i_{gd} - \frac{L_e L_m}{L_s} \omega_i i_{rq} + L_e \omega_i i_{gq} + \frac{1}{\omega_b} \frac{L_e L_m}{L_s} \frac{di_{rd}}{dt} \quad (22)$$

$$- \frac{L_e}{\omega_b} \frac{di_{gd}}{dt} + V_\infty \cos \gamma$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \omega_b (\omega_s - \omega) \quad (23)$$

در روابط فوق ω_s فرکانس سنکرون و معادل IP.U می باشد، ω 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 θ_s و θ به ترتیب زاویه ولتاژ باس بی نهایت و زاویه فلوی استاتور در قاب مرجع ثابت هستند و همچنین γ اختلاف بین θ_s و θ و ولتاژ باس بی نهایت می باشد.

(د) مدل مکانیکی توربین بادی و کنترل کننده سرعت:

مدل مکانیکی WT شامل توربین، جعبه دنده، محور ها و دیگر قطعات مکانیکی می باشد. مدل های مکانیکی دو جرمی DFIG در مرجع [۱۰] آورده شده اند:

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

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

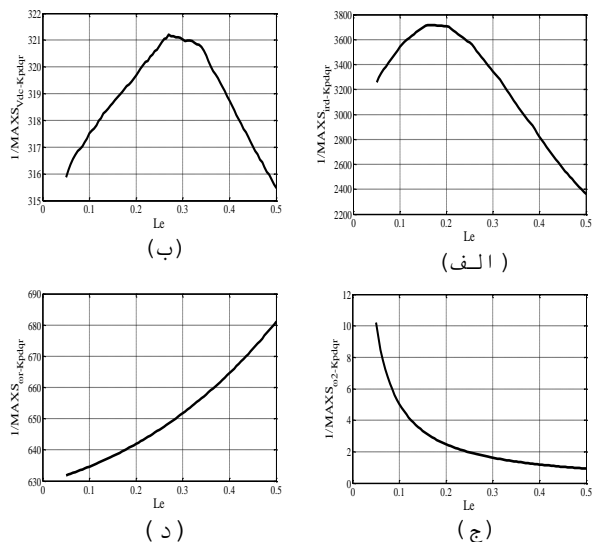
$$\frac{d\beta}{dt} = \omega_b (\omega_t - \omega_r) \quad (25)$$

که ω_r و ω_t به ترتیب سرعت های ژنراتور و توربین (پریونیت) هستند، β 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. طرح کنترلی استفاده شده برای کنترل سرعت در شکل (۲) نشان داده

۳- بررسی مقدار حساسیت مسیر نسبت به پارامترهای کنترلی DFIG در برابر تغییر امپدانس خط انتقال

برای 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 ی (۲۹) تعریف شده اند در نظر گرفته و به بررسی مقادیر حساسیت این متغیرها در مقابل تغییر امپدانس خط پرداخته می شود. برای تغییر امپدانس خط، مقدار اندوکتانس خط انتقال از ۰/۵ تا ۰/۵ هانری با فرض ثابت بودن R_e افزایش داده می شود. جهت بررسی مقادیر حساسیت نسبت به افزایش امپدانس، متغیر i_{rd} مطابق رابطه ی (۳۰) تعریف می شود و سپس مطابق این رابطه، نمودارهای η بسته به بیشینه ی حساسیت نسبت به هر یک از پارامترهای کنترلی در برابر تغییر امپدانس خط انتقال به دست آورده می شود.

شبه سازی مقادیر η بر اساس متغیرهای حالت و لغزش ژنراتور بیان شده در رابطه ی (۲۹) نسبت به پارامتر کنترلی K_{p-idq} به دست آورده می شود که این نتایج در شکل (۴) به نمایش در آمده است.



شکل ۴: مقادیر η بر حسب K_{p-idq}

۳-۲- تعریف حساسیت مسیر در سیستم توان موجود

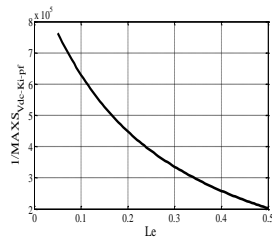
همان گونه که در [۱۲] بیان گردیده در ژنراتورهای توربین های بادی، طبیعت ناپایداری از ناپایداری زاویه ی روتور ژنراتورهای سنکرون معمول متفاوت است. در توربین های بادی مجهز به DFIG، محدوده ی سرعت ژنراتور به طور تقریبی $\pm 30\%$ حول سرعت سنکرون می باشد. محدوده ی بالای سرعت ژنراتور توسط مقدار ظرفیت مبدل پشت به پشت تعیین می شود. اگر سرعت ژنراتور بعد از حذف خطا بالاتر از محدوده ی 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 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 رابطه ی (۲۹) تعریف می شوند:

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

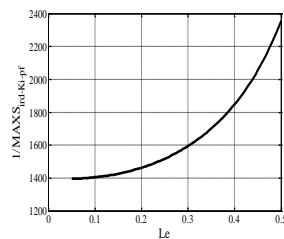
حساسیت متغیرهای حالت سیستم های توان برای مثال، جریان روتور ژنراتور (i_{rd}) و تغییر سرعت پرینیت روتور ($\Delta\omega_r$) می توانند با استفاده از رابطه ی (۷) نسبت به تعدادی پارامتر λ محاسبه شوند. این حساسیت ها اطلاعاتی درباره ی تأثیر تغییر پارامتر روی متغیرهای حالت و لغزش ژنراتور و وابستگی متغیرهای حالت به پارامترهای کنترلی را نشان می دهد. با این وجود، برای شناختن تمام شرایط سیستم، نیاز است که همه ی 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 η در [۱۳] معرفی شده که این شاخص مطابق رابطه ی (۳۰) معرفی می شود:

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

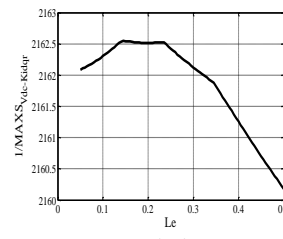
در رابطه ی (۳۰) S متغیر حساسیت و شاخص η عکس مقدار بیشینه ی حساسیت می باشد.



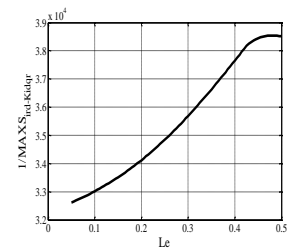
(ب)



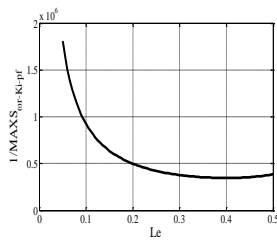
(الف)



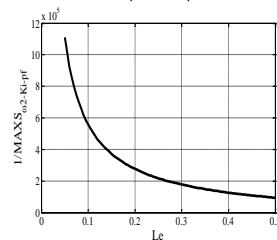
(ب)



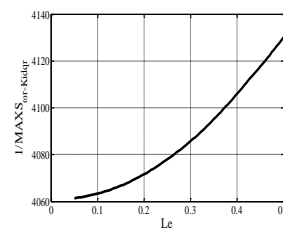
(الف)



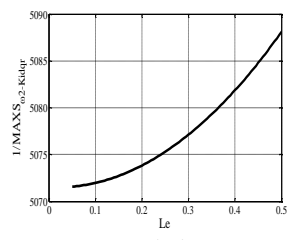
(د)



(ج)



(د)



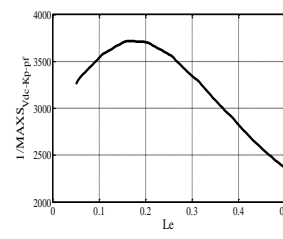
(ج)

شکل ۷: مقادیر η بر حسب K_{i-pf}

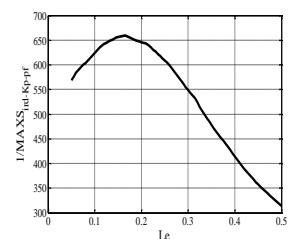
شکل ۵: مقادیر η بر حسب K_{i-idqr}

شبهه سازی مقادیر η نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-idq} انجام می شود که نتایج مربوطه در شکل (۵) 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 می یابد. ولی در مورد ولتاژ لینک DC مقدار حساسیت با افزایش امپدانس خط افزایش می یابد. بیشترین مقدار حساسیت مربوط به ولتاژ لینک DC و پس از آن مربوط به سرعت روتور، لغزش ژنراتور و جریان محور d روتور می باشد. با مقایسه شکل های (۴) و (۵)، نشان داده می شود 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.

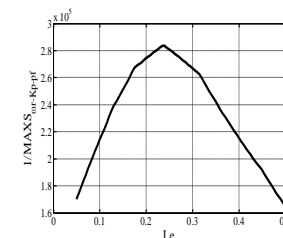
همان طور که در شکل (۴) مشخص گردیده، در مورد لغزش ژنراتور، جریان محور d روتور و ولتاژ لینک DC با افزایش امپدانس مقدار حساسیت افزایش می یابد ولی در مورد سرعت روتور با افزایش امپدانس مقدار حساسیت کاهش می یابد. با بررسی شکل (۴) می توان مشاهده نمود که بیشترین مقدار حساسیت مربوط به لغزش ژنراتور و پس از آن به ترتیب مربوط به ولتاژ لینک DC، سرعت روتور و جریان محور d روتور می باشد.



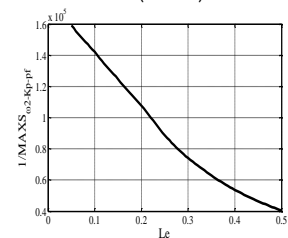
(ب)



(الف)



(د)

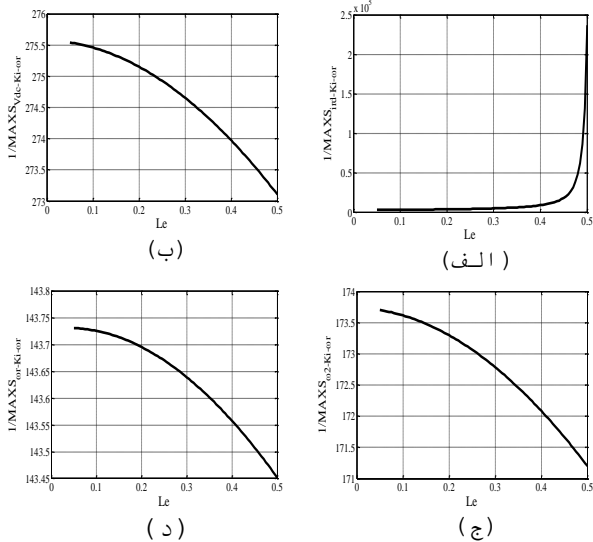


(ج)

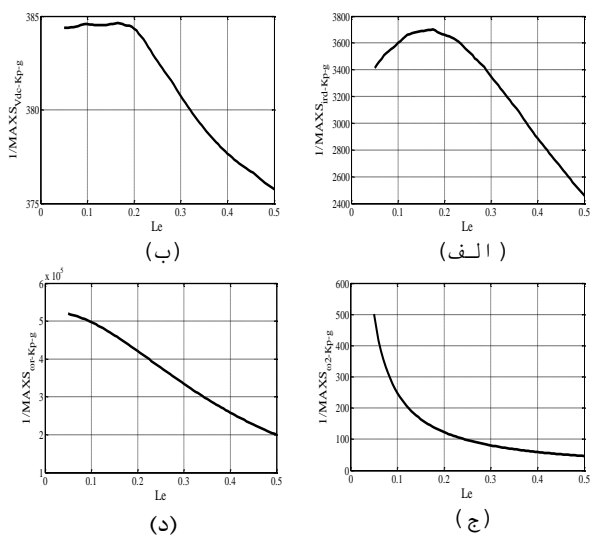
شکل ۶: مقادیر η بر حسب K_{p-pf}

شبهه سازی مقادیر η نسبت به پارامتر کنترلی K_{p-pf} انجام می شود که نتایج آن در شکل (۶) نشان داده شده است. در شکل (۶) با افزایش امپدانس خط انتقال، مقادیر حساسیت ها افزایش پیدا می کند 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 می باشد. با بررسی این شکل مشخص می گردد 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 و رابطه ی بین جریان محور d روتور و میزان

شکل ۸: مقادیر η بر حسب K_{p-wr}

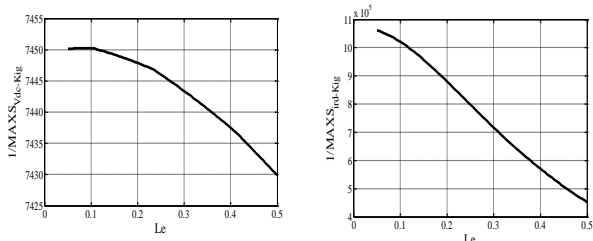


شکل ۹: مقادیر η بر حسب K_{i-wr}



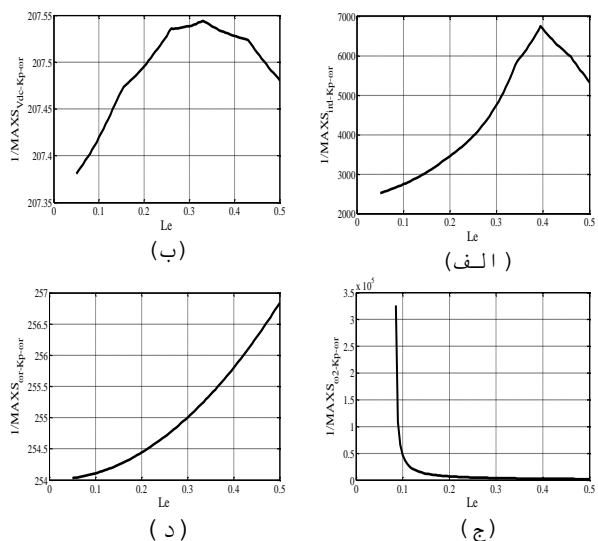
شکل ۱۰: مقادیر η بر حسب K_{p-g}

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 می باشد. در این جا نیز وابستگی مقدار لغزش ژنراتور و سرعت روتور نسبت به پارامتر کنترلی K_{p-wr} کاملاً مشهود است.



توان راکتیو تولید شده توسط DFIG را نشان می دهد.

شبیه سازی مقادیر η نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-pf} انجام می شود که نتایج این شبیه سازی در شکل (۷) به نمایش در آمده است. در این نمودارها مقادیر حساسیت ولتاژ لینک DC، لغزش ژنراتور و سرعت روتور با افزایش امپدانس خط انتقال افزایش می یابد ولی در مورد جریان محور d روتور این حساسیت با افزایش امپدانس خط انتقال کاهش می یابد. با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل (۷) 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 (۷) 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 که این موضوع رابطه ای بین جریان محور d روتور و توان راکتیو تولید شده توسط DFIG را نشان می دهد. با مقایسه ی نتایج شکل های (۶) و (۷) مشخص می شود که مقدار 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} در برابر افزایش امپدانس خط انتقال است. شبیه سازی مقادیر η نسبت به پارامتر کنترلی K_{p-wr} انجام می شود که این شبیه سازی در شکل (۸) 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 می یابد ولی مقدار حساسیت لغزش ژنراتور با افزایش امپدانس خط افزایش می یابد.



(ج) مقادیر η بر حسب K_{i-vdc} (د)

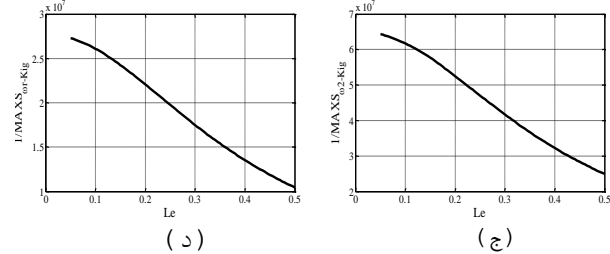
بیشترین مقدار حساسیت مربوط به سرعت روتور و پس از آن به ترتیب مربوط به لغزش ژنراتور، ولتاژ لینک DC و جریان محور d روتور می باشد. در این شکل وابستگی لغزش ژنراتور و سرعت روتور نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-wr} قابل مشاهده است. شبیه سازی مقادیر η نسبت به پارامتر کنترلی K_{p-g} انجام می شود. نتایج شبیه سازی در شکل (۱۰) به نمایش در آمده اند. در این شکل با افزایش امپدانس خط انتقال مقادیر حساسیت متغیرها افزایش پیدا می کند. بررسی شکل (۱۰) نشان دهنده 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 η نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-g} انجام می شود. نتایج در شکل (۱۱) نشان داده شده اند. در این شکل نیز با افزایش امپدانس خط انتقال مقادیر حساسیت متغیرها افزایش پیدا می کند. 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 می باشد. با مقایسه نتایج شکل های (۱۰) و (۱۱) باز به این نتیجه رسیده می شود که مقدار حساسیت متغیرها نسبت به پارامتر کنترلی K_{p-g} بیشتر از مقدار حساسیت آنها نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-g} در برابر افزایش امپدانس خط است.

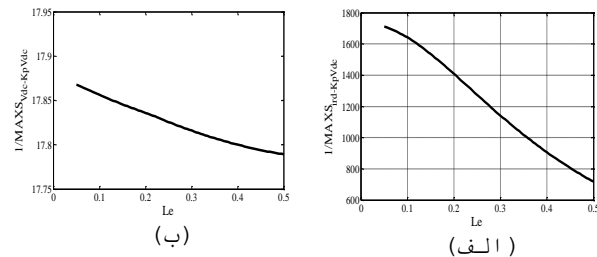
شبیه سازی مقادیر η نسبت به پارامتر کنترلی K_{p-vdc} انجام می شود. این نتایج در شکل (۱۲) به نمایش در آمده اند. در این شکل هم با افزایش امپدانس خط انتقال مقادیر حساسیت متغیرها افزایش پیدا می کند. همچنین با بررسی این شکل بیشترین مقدار حساسیت مربوط به ولتاژ لینک DC و پس از آن به ترتیب مربوط به لغزش ژنراتور، جریان محور d روتور و سرعت روتور می باشد. حساسیت ولتاژ لینک DC نسبت به حساسیت دیگر متغیرها بیشتر می باشد که این نشان دهنده وابستگی تغییرات ولتاژ لینک DC نسبت به پارامتر کنترلی K_{p-vdc} می باشد و رابطه ی بین نوسانات ولتاژ لینک DC را نسبت به تغییرات پارامتر کنترلی K_{p-vdc} نشان می دهد.

شبیه سازی مقادیر η نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-vdc} انجام

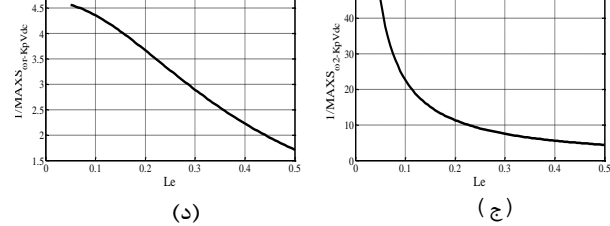
(الف) مقادیر η بر حسب K_{i-g} (ب)



شکل ۱۱: مقادیر η بر حسب K_{i-g}

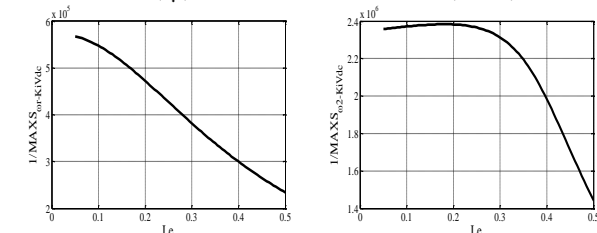
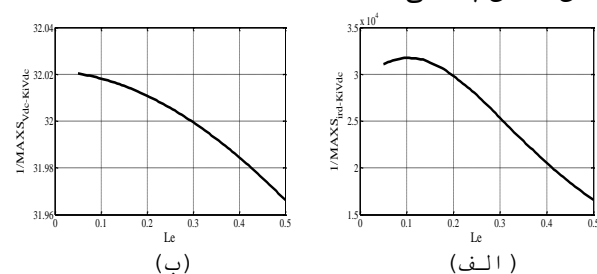


شکل ۱۲: مقادیر η بر حسب K_{p-vdc}



شکل ۱۳: مقادیر η بر حسب K_{i-vdc}

شبیه سازی مقادیر η نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-wr} انجام می شود که نتایج مربوطه در شکل (۹) به نمایش در آمده اند. با توجه به شکل با افزایش امپدانس خط انتقال مقادیر حساسیت متغیرهای ولتاژ لینک DC، سرعت روتور و لغزش ژنراتور افزایش می یابند، ولی مقدار حساسیت جریان محور d روتور با افزایش امپدانس کاهش پیدا می کند.



اثرات پارامترهای مختلف روی پایداری سیستم در یک سیستم SMIB ارزیابی شدند. در نهایت پارامترهای کنترلی بر اساس میزان اهمیت آنها در رفتار سیستم دسته بندی شدند.

ضمیمه

پارامترهای توربین بادی با DFIG متصل به شین بی نهایت

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

مراجع

- [1] A.M. Azmy and I. Erlich, "Impact of distributed generation on the stability of electrical power system," Proc. IEEE PES General Meeting 12-16 June 2005, Vol. 2, pp 1056-1063.
- [2] 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.
- [3] I. A. Hiskens and M. A. Pai, "Trajectory sensitivity analysis of hybrid systems," IEEE Trans. Circuits & Systems - Part 1: Fundamental Theory & Applications, Vol. 47, No. 2, pp. 204-220, 2000.
- [4] K. N. Shubhanga and A. M. Kulkarni, "Determination of effectiveness of transient stability controls using reduced number of trajectory sensitivity computations," IEEE Trans. Power Systems, Vol. 19, No. 1, pp. 473-482, 2004.
- [5] D. Chatterjee and A. Ghosh, "TCSC Control Design for Transient Stability Improvement of a Multi-Machine Power System using Trajectory Sensitivity", accepted for publication in Electric Power Systems Research.
- [6] 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
- [7] T. B. Nguyen, "Dynamic security assessment of power systems using trajectory sensitivity approach," Ph.D. dissertation, University of Illinois, Urbana-Champaign, 2002.
- [8] M. J. Laufenberg, "Dynamic sensitivity functions and the stability of power systems with FACTS controllers," Ph.D. dissertation, University of Illinois, Urbana-Champaign, 1997.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] T. Ackerman, Wind Power in Power Systems. New York: Wiley, 2005.
- [12] Mohsen Rahimi, Mostafa Parniani "Transient Performance improvement of wind turbines with doubly fed induction generators using nonlinear control strategy" IEEE Trans. Energy Convers., vol. 25, no. 2, pp. 514-525, Jun. 2010.

می شود. نتایج در شکل (۱۳) نشان داده شده است. در این شکل نیز با افزایش امپدانس خط انتقال مقادیر حساسیت متغیرها افزایش پیدا می کند. 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 می باشد. مقدار حساسیت ولتاژ لینک DC نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-vdc} به طور قابل ملاحظه ای نسبت به حساسیت دیگر متغیرها بیشتر است که نشان دهنده وابستگی ولتاژ لینک DC نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-vdc} می باشد. با مقایسه ی نتایج شکل های (۱۲) و (۱۳) باز به این نتیجه رسیده می شود که حساسیت متغیرها نسبت به پارامتر کنترلی K_{p-vdc} بیشتر از حساسیت آنها نسبت به پارامتر کنترلی K_{i-vdc} است.

با بررسی جداگانه ی نتایج حساسیت هر یک از متغیرهای حالت i_{rd} , v_{dc} , ω_r و لغزش ژنراتور نسبت به پارامترهای کنترلی در برابر افزایش امپدانس خط انتقال به این نتیجه رسیده می شود که با افزایش امپدانس خط انتقال، مقادیر حساسیت متغیرهای حالت DFIG نسبت به هر یک از پارامترهای کنترلی به طور چشمگیری افزایش پیدا می کند. پارامترهای کنترلی را از نظر اهمیت تأثیر گذاری بر روی رفتار DFIG می توان مطابق جدول (۱) تقسیم بندی کرد.

جدول (۱) دسته بندی پارامترهای کنترلی تأثیرگذار بر رفتار DFIG در برابر تغییر امپدانس خط انتقال

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

۴- نتیجه گیری

در این مقاله DG استفاده شده ژنراتور القایی تغذیه دابل متصل به توربین بادی می باشد. عکس مقدار ماکزیمم شاخص حساسیت های (η) متغیرهای حالت مانند جریان روتور ژنراتور (i_{rd})، تغییر سرعت پریونیت روتور ($\Delta\omega_r$)، ولتاژ لینک DC (V_{DC}) و همچنین لغزش ژنراتور (ω_2) به عنوان معیاری در مطالعه ی رفتار DG در برابر تغییر امپدانس خط انتقال استفاده می شود. وابستگی رفتار سیستم نسبت به پارامترهای کنترلی در برابر تغییر امپدانس خط با استفاده از TS و η نشان داده شد.



سومین کنفرانس ملی ایده های نو در مهندسی برق
۶ و ۷ دی ماه ۱۳۹۳ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)



- [13] 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.