

تحلیل پایداری ژنراتور القایی دوسو تغذیه با استفاده از تحلیل مدال

احمد جعفری، غضنفر شاهقلیان و مهران زمانی فر

مهم‌ترین عیب DFIG حساسیت آن به بروز خطا در شبکه و افت ولتاژ ترمینال آن است. در این حالت باید ملاحظات عملی لازم برای جلوگیری از مشکلات و صدمات احتمالی در نظر قرار گیرد [۷].

در کشورهایی که استفاده از توربین‌های بادی در آنها گستره وسیعی دارد، برای جلوگیری از اثرات مخرب قطع اتصال توربین‌های بادی، باید توربین‌های بادی دارای قابلیت گذر از خطا را داشته باشند. این بدان معنی است که توربین‌های بادی هنگام بروز خطا و افت ولتاژ در نقطه اتصال مشترک، باید به گونه‌ای طراحی شود که بتواند در محدوده مشخصی متصل به شبکه باقی بماند [۸] و [۹].

سیستم قدرت یک سیستم غیر خطی است که عملکرد دینامیکی آن تحت تأثیر مجموعه وسیعی از تجهیزات تشکیل دهنده آن قرار دارد. تقریباً مشخصه هر یک از اجزای سیستم قدرت بر پایداری آن تأثیر می‌گذارد. اطلاع کافی از این مشخصه‌ها و پارامترهای مربوط به هر یک برای مطالعه پایداری سیستم قدرت ضروری است. با توجه به این که استفاده از سیستم‌های انرژی باد به طور قابل ملاحظه‌ای در حال افزایش می‌باشد، این مهم است که تأثیر این نوع سیستم‌ها در پایداری سیستم قدرت و طراحی کنترل‌کننده‌ها ارزیابی شود. سیستم‌های کنترل توربین‌های بادی دو هدف کاهش تأثیرات نیروهای ناخواسته گوناگون بر روی اجزای توربین باد و کنترل تولید توان الکتریکی در محدوده وسیع از سرعت‌های باد را بر عهده دارد [۱۰] و [۱۱]. این طراحی با استفاده از نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی و شبیه‌سازی توربین باد طراحی می‌شود. برای تحلیل دینامیکی باید اجزای مختلف توربین به طور صحیح مدل شود. هر چه مدل سیستم جامع‌تر باشد طراحی سیستم کنترل دقیق‌تر و کارآمدتر خواهد بود. مدل‌سازی توربین‌های بادی در مقاله‌های مختلفی مورد بحث قرار گرفته است [۱۲] و [۱۳].

یکی از مهم‌ترین کنترل‌کننده‌هایی که در صنعت به علت سادگی و قیمت پایین، کاربرد فراوانی دارد، کنترل‌کننده PI است. این کنترل‌کننده‌ها در برخی از موارد دارای معایبی مانند افزایش درجه سیستم (افزایش تعداد قطب سیستم)، امکان ناپایداری سیستم در بهره‌های بالا و مقاومت‌نبردن آن در شرایط تغییرات جزئی در پارامترهای سیستم و نقطه کار است. مراجع [۱۴] و [۱۵] استفاده از کنترل‌کننده‌های PI را برای قسمت‌های مختلف توربین باد بررسی نموده‌اند.

روش کنترل برداری و کنترل مستقیم گشتاور محور رتور ایده‌های مدرن و پرکاربرد جهت کنترل پارامترهای مختلف سیستم از جمله توان‌های اکتیو و راکتیو سیستم توربین بادی است [۱۶] و [۱۷]. این روش‌ها از کنترل مستقیم شار و گشتاور در ماشین‌های القایی نتیجه شده است. سادگی روش از مزایا و وابستگی به پارامترهای ژنراتور القایی از معایب روش‌های کنترل برداری و کنترل مستقیم گشتاور بیان شده است. در مقابل روش کنترل مستقیم توان وابستگی کمتری نسبت به پارامترهای سیستم دارد [۱۸] و [۱۹]. مراجع مختلفی به دلیل اهمیت و کاربرد این روش‌ها در توربین‌های بادی به بررسی آن پرداخته‌اند [۲۰] و [۲۱]. در برخی مراجع، به روش کنترل برداری در راستای شار استاتور، توان‌های اکتیو و راکتیو خروجی به وسیله کنترل‌کننده PI کنترل می‌شود.

چکیده: در این مقاله، تجزیه و تحلیل مدال یک ژنراتور القایی دوسو تغذیه (DFIG) متصل به شبکه با استفاده از تحلیل پایداری سیگنال کوچک ارائه شده و اثر تغییر پارامترهای سیستم مانند اندوکتانس متقابل، مقاومت استاتور، راکتانس خط، سختی محور و سرعت باد بر روی مقادیر ویژه، پایداری و میرایی مدهای مختلف سیستم نشان داده شده است. این تحلیل نشان می‌دهد که تغییر کدام پارامترها می‌تواند سیستم را از شرایط کار نرمال خارج کند و همچنین تغییر کدام پارامترها می‌تواند باعث بهبود رفتار یک سیستم تا حد امکان شود. در پایان نتایج شبیه‌سازی اثر تغییر هر پارامتر برای ارزیابی پایداری و طراحی کنترل‌کننده‌های مختلف را نشان می‌دهد.

کلیدواژه: تحلیل پایداری سیگنال کوچک، ژنراتور القایی دوسو تغذیه، منابع تولید پراکنده، تحلیل مقادیر ویژه.

۱- مقدمه

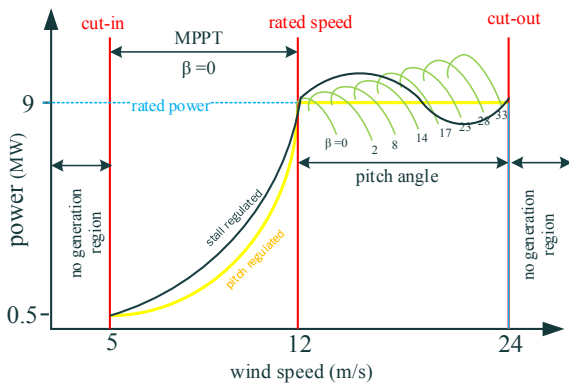
نیاز انرژی جهان در طی سال‌های اخیر افزایش چشم‌گیری داشته است و منابع انرژی‌های فسیلی پاسخگوی نیاز انرژی برای تکامل و توسعه در آینده نمی‌باشند. جهان امروز با مشکلات فراوانی در بخش تولید انرژی مواجه است. افزایش تقاضای انرژی، پیشرفت تکنولوژی و ملاحظات زیست‌محیطی، تمایل استفاده از تولیدات پراکنده در کشورهای مختلف را به امری بدیهی تبدیل کرده است. از مزایای استفاده از تولیدات پراکنده می‌توان بهبود قابلیت اطمینان سیستم، کاهش تلفات، کاهش هزینه‌های توسعه پیک‌زدایی بار شبکه و بهبود کیفیت توان را نام برد [۱] و [۲]. انرژی باد یکی از انواع اصلی انرژی‌های تجدیدپذیر است که طبیعتی نوسانی و متناوب داشته و وزش دائمی ندارد. تا پیش از انقلاب صنعتی، باد به عنوان یک منبع انرژی به طور گسترده مورد بهره‌برداری قرار می‌گرفت ولی در دوران انقلاب صنعتی، استفاده از سوخت‌های فسیلی به دلیل ارزان و قابلیت اطمینان بالا جایگزین انرژی باد شد [۳] و [۴]. ولی در اثر زیان‌های اقتصادی حاصل از نفت و گاز، هزینه انرژی تولیدشده به وسیله توربین‌های بادی در مقایسه با نرخ جهانی قیمت انرژی، بهبود یافت. در میان گزینه‌های مختلف برای به کارگیری توربین‌های بادی سرعت متغیر، سیستم ژنراتور القایی دوسو تغذیه (DFIG) دارای کاربرد بیشتری است. دلایل این امر را می‌توان ثابت‌بودن فرکانس شبکه و در نتیجه تنظیم فرکانس رتور و امکان کنترل سرعت مکانیکی، جذب حداکثر توان از توربین باد، کاهش استهلاک ادوات مکانیکی سیستم و کاهش حجم و توان مبدل‌های الکترونیک قدرت دانست [۵] و [۶]. همچنین

این مقاله در تاریخ ۷ اردیبهشت ماه ۱۳۹۷ دریافت و در تاریخ ۲۱ دی ماه ۱۳۹۷ بازنگری شد.

احمد جعفری، مرکز تحقیقات ریزشبکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، (email: mobin24814@yahoo.com).

غضنفر شاهقلیان (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، (email: shahgholian@iaun.ac.ir).

مهران زمانی فر، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، (email: mehran_zamanifar@yahoo.com).



شکل ۲: منحنی ضریب توان توربین بادی بر حسب نسبت سرعت نوک پره.

جدول ۱: ضرایب مشخصه ضریب توان توربین بادی.

مقدار	ضرایب
۰٫۶۱۷۶	c_1
۱۱۶	c_2
۰٫۱۴	c_3
۵	c_4
۲۱	c_5
۰٫۱۰۰۶۸	c_6
۰٫۱۰۸	c_7
۰٫۱۰۳۵	c_8

۲-۱ توان مکانیکی استخراج شده از باد توسط توربین

در سیستم تبدیل انرژی باد (WECS)، انرژی باد توسط توربین بادی دریافت می‌شود و از طریق ژنراتور به انرژی الکتریکی تبدیل می‌گردد. توان خروجی سیستم تبدیل انرژی باد با سرعت باد تغییر می‌کند. توان تولیدشده به وسیله توربین باد برابر است با

$$P_w = \frac{1}{2} \rho C_p(\lambda, \beta) R^3 V_w^3 \quad (1)$$

که در آن R شعاع توربین بر حسب m ، V_w سرعت باد بر حسب m/s ، ρ چگالی هوا بر حسب kg/m^3 ، C_p ضریب قدرت، λ نسبت سرعت نوک و β زاویه شفت است. نسبت سرعت نوک برابر است با [۲۷]

$$\lambda = \frac{R \omega_{mec}}{V_w} \quad (2)$$

که ω_{mec} سرعت زاویه‌ای توربین است. ضریب توان توربین $C_p(\lambda, \beta)$ تابعی غیر خطی از λ و β بوده و برابر است با [۲۸] و [۲۹]

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (3)$$

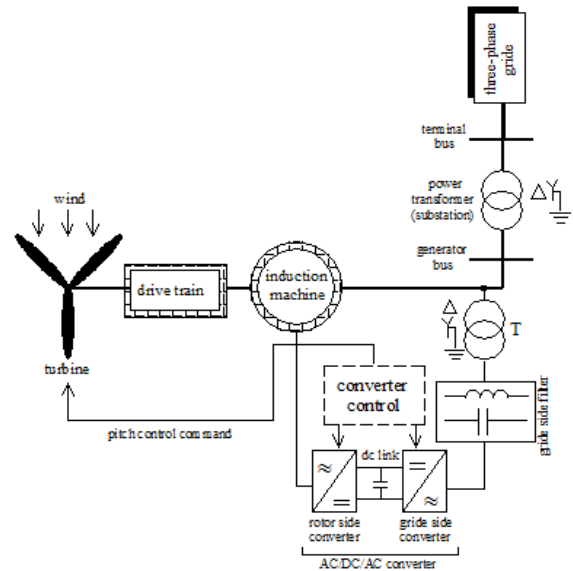
که در آن ضرایب c_i ثابت بوده و λ_i برابر است با

$$\lambda_i = \left[\frac{1}{\lambda + c_7 \beta} - \frac{c_8}{\beta^2 + 1} \right]^{-1} \quad (4)$$

شکل ۲ منحنی ضریب توان یک توربین بادی بر حسب نسبت سرعت نوک پره را به ازای زاویه گام پره مختلف برای ضرایب c_i در جدول ۱ نشان می‌دهد. مقدار ضریب توان C_p بین ۰ تا ۰٫۴۴۷ است [۳۰] و [۳۱].

۲-۲ مدل روتور

حالت‌های دینامیکی روتور بر حسب جریان روتور و شار استاتور با



شکل ۱: توربین باد به همراه DFIG متصل شده به باس بی‌نیهایت.

در این حالت اندازه ولتاژهای محور d و q استاتور به عنوان ولتاژهای مبنای ورودی سیستم در نظر گرفته می‌شود و با توجه به جدول بهره تنظیم شده برای استحصال بیشینه توان از باد در سرعت‌های مختلف، توان بیشینه در هر لحظه ردیابی می‌گردد [۲۲]. مرجع [۲۳] به پایداری دینامیکی یک سیستم توربین باد پرداخته و با استفاده از میرایی فعال بهبود این مشخصات را ارائه نموده است. جبران‌سازی ولتاژهای ضد محرکه روتور یکی از روش‌های مؤثر استفاده‌شده در محدودکردن جریان‌های هجومی روتور و بهبود حالت‌های دینامیکی در این مقاله است که مورد مطالعه قرار گرفته است. مقاله [۲۴] مدل‌سازی DFIG را بر روی پارامترهای استاتور آن انجام داده و سیستم DFIG را با هفت معادله حالت معرفی و بررسی کرده و اثر تغییر پارامترهای مختلف را بر روی آن بررسی نموده است. مدل‌سازی و تحلیل پایداری نوسان DFIG با حلقه‌های کنترل برداری در [۲۵] ارائه شده و با استفاده از سیزده متغیر حالت حساسیت سیستم نسبت به خصوصیات مربوط به پارامترهای ماشین و کنترل جهت ارزیابی تأثیرات آن بر پایداری سیستم انجام شده است. انتخاب سیزده متغیر حالت باعث شده تا از تمامی دینامیک‌های جریانی dq کنترل‌کننده‌های جریانی مبدل‌های سمت روتور و سمت شبکه صرف‌نظر شود.

در این مقاله سیستم توربین باد با ۱۷ معادله حالت معرفی می‌شود و سپس اثر تغییر برخی از پارامترهای سیستم مانند اندوکنانس متقابل، مقاومت استاتور، راکتانس خط، سختی محور و سرعت باد بر روی مقادیر ویژه نشان داده می‌شود. همچنین پایداری و میرایی مدهای مختلف سیستم بررسی و تحلیل می‌شود. این تحلیل می‌تواند نقش مؤثری در طراحی و ارزیابی کنترل‌کننده‌های سیستم توربین باد ایفا کند. با انتخاب هفده متغیر حالت از دینامیک‌های جریانی dq کنترل‌کننده جریانی مبدل‌ها صرف‌نظر نشده است.

۲-۲ مدل توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی دوسو تغذیه در راستای شار استاتور

شکل ۱ بلوک دیاگرام توربین بادی مجهز به DFIG را نشان می‌دهد. در تحلیل روابط جهت جریان‌های روتور و استاتور به سمت ژنراتور مثبت فرض می‌شوند و همه پارامترها و متغیرهای سیستم به صورت فریونیت و ارجاع شده به طرف استاتور DFIG در نظر گرفته می‌شوند [۲۶].

سیستم تک‌ماشینه متصل به شین بی‌نهایت در دستگاه مرجع d-q با در نظر گرفتن راستای میدان استاتور است که با روابط زیر توصیف می‌شود [۳۵]

$$\psi_{sd} = \psi_s \quad (۱۴)$$

$$\psi_{sq} = 0 \quad (۱۵)$$

$$\frac{L_e}{\omega_b} \frac{di_d}{dt} = -R_e i_d + \omega L_e i_q - V_{sd} + V_{od} \quad (۱۶)$$

$$V_{sdq} = R_s i_{sdq} - \omega \psi_{sdq} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{sdq}}{dt} \quad (۱۷)$$

$$\psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \quad (۱۸)$$

$$\frac{d\psi_{sd}}{dt} = \frac{\omega_b L_s}{L_s + L_e} \left[-\frac{R_s + R_e}{L_s} \psi_{sd} + \frac{R_s + R_e}{L_s} L_m i_{rd} - R_e i_{gd} - \frac{L_e L_m}{L_s} \omega i_{rq} + L_e \omega i_{gq} + \left(\frac{L_e L_m}{\omega_b L_s} \right) \left(-R_r i_{rd} + V_{rd} \right) - \left(\frac{L_e}{\omega_b} \right) \left(\frac{\omega_b}{L_g} \right) \left(-R_g i_{gd} + V_{gd} \right) + V_\infty \cos \gamma \right] \quad (۱۹)$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \omega_b (\omega_s - \omega) \quad (۲۰)$$

$$\omega = \left[\frac{R_s + R_e}{L_s} L_m i_{rq} - R_e i_{gq} - \frac{L_e}{\omega_b} \frac{di_{gq}}{dt} + \frac{1}{\omega_b} \frac{L_e L_m}{L_s} \frac{di_{rq}}{dt} + V_\infty \sin \gamma \right] / \left(\left(1 + \frac{L_e}{L_s} \right) \psi_{sd} - \frac{L_e L_m}{L_s} i_{rd} + L_e i_{gd} \right) \quad (۲۱)$$

۲-۵ مدل مکانیکی توربین بادی و کنترل کننده سرعت

گشتاور آیرودینامیکی باعث چرخش رتور و چرخنده متصل به آن می‌شود. در مدل‌سازی مجموعه رتور، شفت و گیربکس از مدل دوجرمی استفاده می‌گردد. شکل ۳ شمای ساده مدل مکانیکی یک سیستم دوجرمی را نشان می‌دهد. استفاده از این مدل دقیق به جای مدل تک‌جرمی باعث می‌شود تا بتوان نقش نوسانات مد مکانیکی ناشی از غیر صلب بودن شفت را در مطالعات وارد نمود [۳۶]. در این مدل مجموعه توربین و گیربکس به عنوان یک جرم و رتور ژنراتور و ملحقات آن به عنوان یک جرم مجزای دیگر در نظر گرفته می‌شوند. از آنجا که اینرسی لحظه‌ای گیربکس در مقایسه با رتور و ژنراتور کوچک است، لذا از ضرایب استهلاک و سختی آن صرف‌نظر می‌شود. چنانچه قانون دوم نیوتن برای این سیستم اعمال شود، معادلات اجزا به صورت زیر بیان می‌شوند [۳۷]

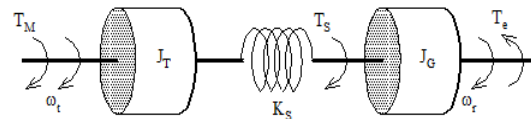
و [۳۸]

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{T_e + K_s \beta + D(\omega_t - \omega_r)}{2H_r} \quad (۲۲)$$

$$\frac{d\omega_t}{dt} = \frac{T_m - K_s \beta - D(\omega_t - \omega_r)}{2H_t} \quad (۲۳)$$

$$\frac{d\beta}{dt} = \omega_b (\omega_t - \omega_r) \quad (۲۴)$$

با به کار گرفتن یک کنترل کننده PI، کنترل کننده سرعت به صورت (۲۵) بیان می‌شود



شکل ۳: شمای ساده مدل مکانیکی یک سیستم دوجرمی.

رابطه‌های زیر توصیف می‌شود [۳۲] و [۳۳]

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

$$L_r' = L_r - \frac{L_m}{L_s} \quad (۶)$$

$$R_r' = R_r + \left(\frac{L_m}{L_s} \right)^2 R_s \quad (۷)$$

$$e_{dq} = \frac{L_m}{L_s} (V_{sdq} - j\omega_r \psi_{sdq} - \frac{R_s}{L_s} \psi_{sdq}) \quad (۸)$$

با جبران‌سازی ترم‌های تزویج متقابل $\omega_r L_r' i_{rd}$ و $\omega_r L_r' i_{rq}$ با استفاده از کنترل‌کننده‌های جریان d-q رتور، حلقه‌های کنترل جریان d و q رتور مجزا خواهند شد. با در نظر گرفتن کنترل‌کننده‌های رتور به صورت PI، کنترل‌کننده‌های جریان رتور به صورت (۹) و (۱۰) به دست می‌آید

$$\frac{dx_s}{dt} = K_{l-idq} (i_{rd-ref} - i_{rd}) \quad (۹)$$

$$\frac{dx_r}{dt} = K_{l-idq} (i_{rq-ref} - i_{rq}) \quad (۱۰)$$

در روابط فوق متغیرهای x_s و x_r ، متغیرهای کمکی کنترلی جهت مدل‌سازی کنترل‌کننده‌های PI هستند.

۲-۳ مدل فیلتر طرف شبکه

حالت‌های دینامیکی فیلتر نشان داده شده در شکل ۱ به صورت زیر توصیف می‌شود [۳۴]

$$\frac{L_g}{\omega_b} \frac{di_{gdq}}{dt} = -R_g i_{gdq} - j\omega L_g i_{gdq} - V_{gdq} + V_{sdq} \quad (۱۱)$$

با در نظر گرفتن کنترل‌کننده‌های جریان فیلتر شبکه به صورت PI و تحت جبران‌سازی عبارات تزویج متقابل، کنترل‌کننده‌های فیلتر طرف شبکه به صورت زیر به دست می‌آید

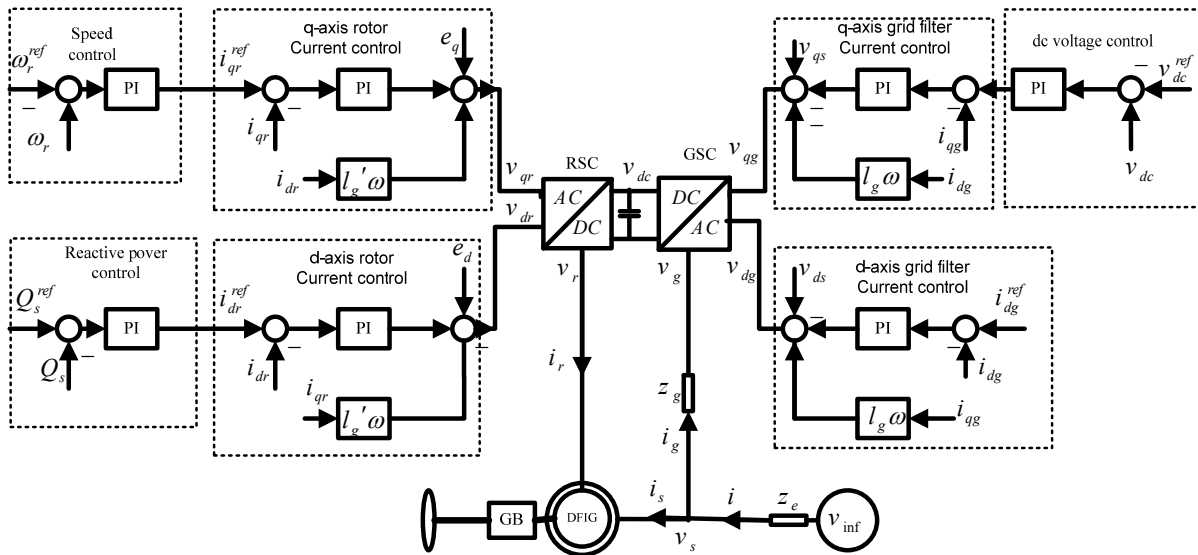
$$\frac{dx_{1r}}{dt} = K_{l-g} (i_{gd-ref} - i_{gd}) \quad (۱۲)$$

$$\frac{dx_{1s}}{dt} = K_{l-g} (i_{gq-ref} - i_{gq}) \quad (۱۳)$$

که در آن متغیرهای x_{1r} و x_{1s} ، متغیرهای کمکی کنترلی هستند. با توجه به این که در حالت عادی DFIG توان راکتیو تولید نمی‌کند تا اندازه مبدل‌های رتور کوچک شود لذا $i_{gd-ref} = 0$ خواهد بود.

۲-۴ مدل کردن استاتور

کنترل توان اکتیو و راکتیو با در نظر گرفتن کنترل برداری در راستای شار استاتور امکان‌پذیر است. در مدل مرجع گردان، متغیرهای d-q در حالت ماندگار ثابت هستند و برای مدل سیگنال کوچک در یک نقطه کار انتخابی مناسب می‌باشند. هدف از این قسمت معرفی مدل دینامیکی یک



شکل ۴: مجموعه کنترل کنندهای DFIG.

۳- آنالیز مدال و پایداری سیگنال کوچک بر اساس عامل مشارکت

با مشتق‌گیری از معادلات دینامیکی سیستم حول نقطه تعادل مدل فضای حالت سیستم (معادلات سیگنال کوچک) به دست می‌آید [۴۱]. شکل کلی مدل فضای حالت ماشین به صورت زیر بیان می‌شود

$$\begin{aligned} \dot{X} &= f(x, z, u) = Ax + Bu \\ z &= [V_s, T_m]^T \\ x &= [\psi_{sd}, \gamma, i_{rd}, i_{rq}, x_\delta, x_\epsilon, x_\nu, x_\lambda, \omega_r, \beta, \omega_f, i_{gd}, i_{gq}, \\ & \quad x_{1f}, x_{1s}, v_{dc}, x_{1v}] \\ u &= [\omega_{r-ref}, Q_{s-ref}, v_{dc-ref}, v_{inf}, i_{gd}] \end{aligned} \quad (30)$$

که در آن بردار ستونی x ، بردار حالت و عناصر آن x_i ، متغیر حالت نامیده می‌شوند. بردار ستونی u ، بردار متغیرهای مرجع سیستم و جزء سیگنال‌های خارجی هستند که بر عملکرد سیستم تأثیر می‌گذارند. بردار z نیز بردار ورودی‌های سیستم است.

ماتریس مشارکت اندازه‌ای از رابطه بین متغیرهای حالت و مدها است که بردار ویژه راست و چپ را به صورت (۳۱) و (۳۲) ترکیب می‌کند که در آن ϕ_{ki} ، k امین ورودی بردار ویژه راست ϕ_i است و ψ_{ik} ، k امین ورودی بردار ویژه چپ ψ_i است [۴۲]. عنصر $p_{ki} = \phi_{ki} \psi_{ik}$ ضریب مشارکت نام‌گذاری می‌شود که سنجشی از مشارکت نسبی k امین متغیر حالت در i امین مد و بالعکس است. به طور کلی ضریب مشارکت یک مد درصد مشارکت هر متغیر حالت در هر مد خاص را بیان می‌کند [۴۳] و [۴۴] و برابر است با

$$P_i = [P_{vi} P_{vi} \dots P_{vi}]^T = \begin{bmatrix} \phi_{i1} \dots \psi_{i1} \\ \phi_{i2} \dots \psi_{i2} \\ \vdots \\ \phi_{in} \dots \psi_{in} \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$p_{ki} = \frac{|\psi_{ik}| |\phi_{ki}|}{\sum_{k=1}^n |\psi_{ik}| |\phi_{ki}|} \quad (32)$$

$$\frac{dx_v}{dt} = K_{l-\omega} (\omega_{r-ref} - \omega_r) \quad (25)$$

در اینجا نیز متغیر x_v ، متغیر کمکی کنترلی جهت مدل‌سازی کنترل کننده PI سرعت است. سرعت مرجع برای کنترل کننده تابعی از سرعت باد است و برای دریافت ماکسیمم انرژی از باد انتخاب می‌شود.

۶-۲ کنترل توان راکتیو

با در نظر گرفتن کنترل برداری در راستای شار استاتور، ولتاژ ترمینال و توان راکتیو مبادله‌شده بین ژنراتور و شبکه به وسیله مؤلفه d جریان‌ها و ولتاژهای روتور کنترل می‌شوند. توان راکتیو تزریق‌شده توسط استاتور به شبکه به صورت رابطه زیر اثبات و بیان می‌شود [۳۹] و [۴۰]

$$Q_s = \frac{\omega_s}{L_s} \psi_{sd} (L_m i_{rd} - \psi_{sd}) \quad (26)$$

با استفاده از یک کنترل کننده PI، معادله حالت کنترل کننده توان راکتیو عبارت است از

$$\frac{dx_\lambda}{dt} = K_{l-pf} (Q_{s-ref} - Q_s) \quad (27)$$

مشابه قسمت‌های قبلی، متغیر x_λ ، متغیر کمکی کنترلی جهت مدل‌سازی کنترل کننده PI است. مقدار مرجع توان راکتیو بر اساس مینیمم کردن تلفات مسی و تنظیم ضریب توان در مبدل‌ها انتخاب می‌شود.

۷-۲ لینک DC

خازن واسط DC و کنترل کننده آن را می‌توان با روابط زیر مدل نمود

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \left(\frac{\omega_b}{CV_{dc}}\right)(P_{rr} - P_{gg}) \quad (28)$$

$$\frac{dx_{1v}}{dt} = K_{l-vdc} (V_{dc} - V_{dc-ref}) \quad (29)$$

متغیر حالت x_{1v} نیز متغیر کمکی کنترلی است. شکل ۴ مجموعه کنترل کننده‌های استفاده‌شده در این مقاله را نشان می‌دهد. استراتژی طراحی کنترل کننده‌های بیان‌شده در بخش ۲ به طور کامل در [۳۵] ذکر شده است.

جدول ۲: پارامترهای توربین بادی و سیستم قدرت.

سیستم	پارامترها
مقادیر نامی	$۱,۷۶ \text{ MVA}, ۵۷۵ \text{ V}, ۶۰ \text{ Hz}$
سیستم قدرت	$۵۷۵ \text{ V}, ۱,۷۶ \text{ MVA}, ۶۰ \text{ Hz}$ $\omega_b = ۳۷۷ \text{ rad/s}, f_b = ۱ \text{ pu}$
توربین باد	$H_t = ۴,۳ \text{ s}, H_r = ۷,۵, K_s = ۰,۶ \text{ pu/elec.rad}$ $\omega_r = ۱,۲ \text{ pu}, D = ۱,۲ \text{ pu}, R = ۳۴,۹۳ \text{ m}$
DFIG	$R_s = ۰,۰۷۰۶ \text{ pu}, K_s = ۳,۰۷ \text{ pu}, L_m = ۲,۹ \text{ pu}$ $R_r = ۰,۰۰۵ \text{ pu}, L_r = ۳,۰۵۶ \text{ pu}$
مبدل	$C = ۱۲,۷۲ \text{ pu}, V_{DC} = ۱۲۰۰ \text{ V}$
امپدانس فیلتر شبکه	$R_g = ۰,۰۰۳ \text{ pu}, L_g = ۰,۳ \text{ pu}$
امپدانس شبکه	$R_e = ۰,۰۰۵ \text{ pu}, L_e = ۰,۳ \text{ pu}$
پارامترهای کنترل کننده‌ها	$K_{p-idq} = ۰,۳۱۶۵, K_{I-idq} = ۴,۷۲۵۶$ $K_{pw} = ۶,۹۸, K_{Iw} = ۰,۴۶۵۶$ $K_{I-pf} = ۴,۶۵۶, K_{p-pf} = ۰,۱۲۳, K_{p-g} = ۱,۷$ $K_{I-g} = ۱,۷, K_{p-vdc} = ۳,۴, K_{I-vdc} = ۱,۷$

۴- تحلیل مدال پایه سیستم

در این مقاله توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی دوسو تغذیه توسط ۱۷ متغیر حالت مدل‌سازی و شبیه‌سازی شده است. مقادیر پارامترهای سیستم پایه در جدول ۲ آمده است. جدول ۳ مقادیر ویژه، فرکانس نوسان، نسبت میرایی و متغیر حالت با بیشترین درصد مشارکت در هر مد مربوط به سیستم مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همان طور که دیده می‌شود از ۱۷ مد حالت، ۱۳ عدد آن در قسمت سمت چپ محور و بر روی محور حقیقی است و به عنوان مدهای غیر نوسانی معرفی می‌شوند و ۴ عدد از این مدها به صورت مدهای نوسانی و به صورت اعداد مختلط می‌باشند. در این شرایط با توجه به این که همه مقادیر ویژه در سمت چپ محور موهومی قرار دارند لذا سیستم دارای ۱۷ مد پایدار است.

۵- بررسی اثر تغییر پارامترهای سیستم

در این قسمت با ثابت نگه داشتن پارامترهای سیستم، در هر مرحله فقط یکی از پارامترهای مورد نظر تغییر داده می‌شود و پارامترهای دیگر در مقدار سیستم پایه حفظ می‌شوند.

۵-۱ اثر تغییر اندوکتانس متقابل بر مدهای سیستم

تغییر در اندوکتانس متقابل در محدوده ۷-۲/۹ پریونیت سبب تغییر مکان مقادیر ویژه مدها به صورت شکل ۵ می‌شود (جهت اختصار فقط مدهای با تأثیرگذاری بیشتر ترسیم شده است). همان طور که دیده می‌شود افزایش اندوکتانس بر روی مدهای ۱ تا ۱۷ به صورت زیر در تغییر مکان آنها تأثیر می‌گذارد:

در مد اول با افزایش مقدار اندوکتانس متقابل، همان طور که با فلش نشان داده شده است مقدار حقیقی مد کاهش یافته و البته این مقدار کاهش، چشم‌گیر نمی‌باشد. محدوده تغییرات مقادیر حقیقی در این مد بین ۷۴۴- تا ۷۴۲/۱۵- است. واضح است که مقادیر ویژه به محور موهومی نزدیک شده‌اند. در مد دوم که یک مد الکتریکی است و مربوط به استاتور است، مقدار حقیقی مقادیر ویژه با افزایش اندوکتانس افزایش یافته است. در این مد مقادیر ویژه از محور موهومی دورتر شده‌اند. در مد پنجم افزایش اندوکتانس L_m باعث کاهش قسمت حقیقی مقادیر ویژه می‌شود و این به معنای نزدیک شدن مقادیر ویژه این مد به محور موهومی است.

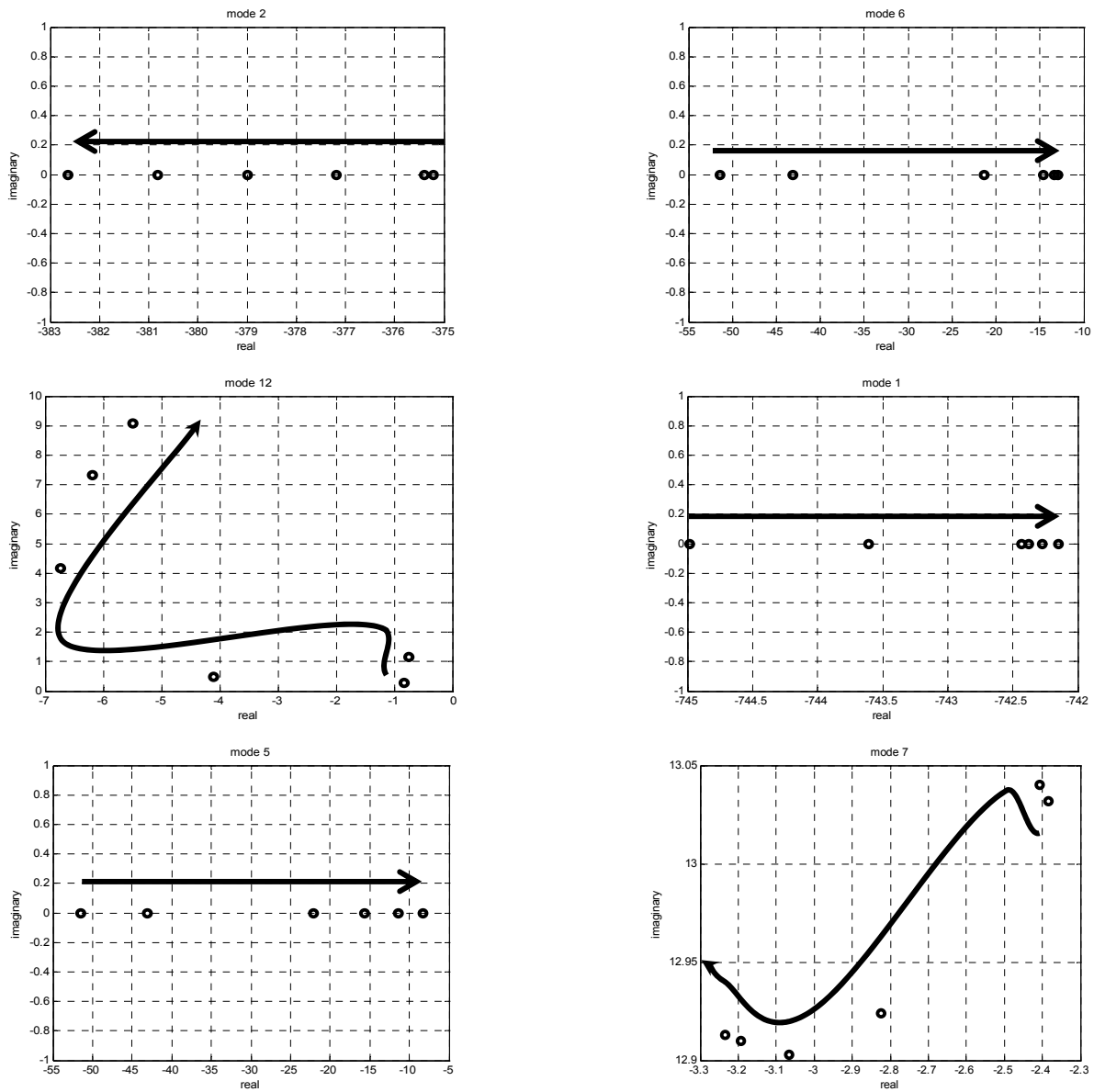
محدوده تغییرات در محور حقیقی برای این مد بین ۵۱/۴۴۶- تا ۸/۲۷۶- است. در مد ششم همانند مد پنجم مقدار حقیقی مقادیر ویژه کاهش می‌یابد و به سمت محور موهومی نزدیک می‌شود. این تغییرات در محدوده ۵۱/۴۳- تا ۱۲/۹۱- است. در مد هفتم و هشتم که یک مد نوسانی است قسمت موهومی مقادیر ویژه با افزایش L_m تغییر بسیار اندک و ناهماهنگ دارد و بین محدوده ۱۳/۰۳ تا ۱۲/۹۱۳ متغیر است. مقدار حقیقی آن دارای یک روند افزایشی منظم است که باعث دور شدن از محور موهومی و ایجاد شرایط پایداری بهتر برای این مد می‌شود. واضح است که تا مقدار L_m برابر ۵ پریونیت مقدار موهومی روند کاهشی و پس از آن روند افزایشی را پیموده است. مد دوازدهم و سیزدهم نیز مدهای نوسانی سیستم هستند. چنانچه ملاحظه می‌شود قسمت موهومی ابتدا روند کاهشی و سپس روند افزایشی به خود می‌گیرد. قسمت حقیقی مقادیر ویژه با افزایش L_m ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. فلش بر روی شکل این مد، این روند را به خوبی نمایش می‌دهد. نسبت میرایی ξ تعیین کننده نرخ کاهش دامنه نوسان است. با افزایش اندوکتانس متقابل میرایی مدهای نوسانی تحت الشعاع واقع می‌گردد. سیستم پایه دارای چهار مد نوسانی است. این نسبت در مدهای ۷ و ۸ در بازه تغییر از مقدار ۰/۱۸ به مقدار ۰/۲۴۳ رسیده است. همچنین در مدهای ۱۲ و ۱۳ افزایش اندوکتانس سبب تغییرات نامنظم و نسبتاً شدید در نسبت میرایی می‌شود. شکل ۶ این تغییرات را نشان می‌دهد.

۵-۲ اثر مقاومت استاتور بر مدهای سیستم

در سیستم پایه مورد بررسی مقاومت استاتور برابر ۰/۰۷۰۶ پریونیت در نظر گرفته شده است. اکنون جهت تأثیر تغییر مقاومت استاتور بر روی مدهای سیستم، مقاومت استاتور را نسبت به راکتانس القایی تغییر داده و آن را ضریبی از آن در نظر می‌گیریم. مقدار راکتانس در سیستم پایه برابر ۲/۹ پریونیت است و محدوده تغییرات به صورت $۱/۱۰۰ < r_s/x_m < ۱/۸۰۰$ فرض می‌شود. در شکل ۷ تغییرات مکانی مقادیر ویژه در اثر تغییر مقاومت استاتور نشان داده شده است.

همان طور که دیده می‌شود، در مد سوم کاهش مقاومت استاتور باعث نزدیک شدن مقادیر ویژه مد سوم به محور موهومی می‌شود. محدوده این تغییرات بین ۲۲۶/۴۵- تا ۱۹۰/۵۵- است. در مد چهارم کاهش مقاومت استاتور باعث نزدیک شدن مقادیر ویژه به محور موهومی و کاهش پایداری این مد می‌شود. محدوده تغییرات در این مد بین ۲۲۹/۲۸- تا ۱۹۳/۵۷- است. در مد ششم همان طور که در شکل ملاحظه می‌شود، کاهش مقاومت استاتور باعث دور شدن مقادیر ویژه این مد از محور موهومی می‌شود. البته هرچه کاهش مقاومت در پله‌های مساوی بیشتر می‌شود، مقدار دور شدن مقادیر ویژه از محور موهومی کمتر و کمتر می‌گردد. مد هفتم و هشتم که مدهای نوسانی سیستم هستند و از نوع الکترومکانیکی می‌باشند، با کاهش مقاومت استاتور تحت تأثیر واقع می‌شود و باعث کاهش ناچیز مقادیر حقیقی و نزدیک شدن آنها به محور موهومی می‌شود. همچنین قسمت موهومی مقادیر ویژه با کاهش مقاومت استاتور به مقدار ناچیز کم می‌شود.

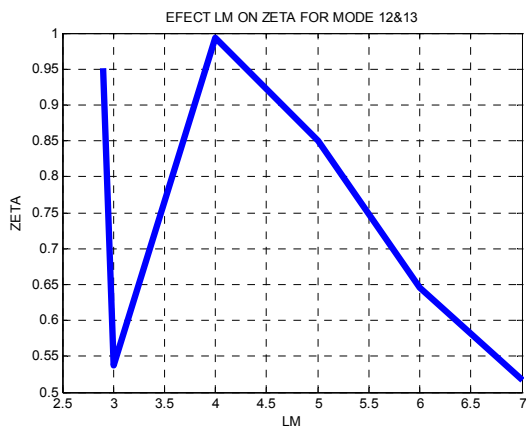
هرچه این کاهش مقاومت بیشتر شود فشردگی مقادیر ویژه افزایش می‌یابد. در مد دهم که یک مد با سرعت بسیار کم است با کاهش مقاومت استاتور، مقادیر ویژه تغییر بسیار ناچیز و قابل اغماضی دارند و به سمت محور موهومی نزدیک می‌شوند. محور افقی شکل این مد دارای مقیاس ۱۰۰۰ است. مد دوازدهم و سیزدهم مدهای نوسانی سیستم



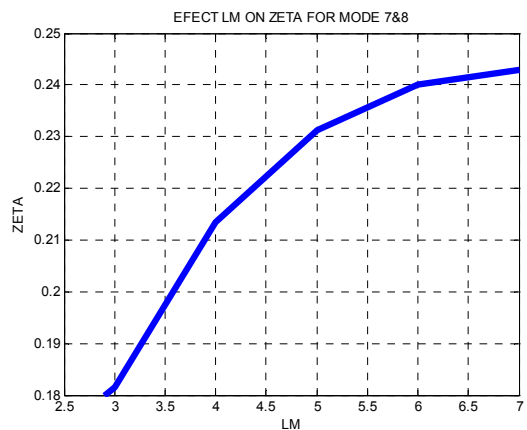
شکل ۵: اثر افزایش اندوکتانس بر روی مدهای سیستم.

جدول ۳: مقادیر ویژه، فرکانس نوسان و میرایی مربوط به مدهای سیستم.

مدهای سیستم	مقادیر ویژه سیستم	فرکانس نوسان	نسبت میرایی	متغیر حالت با بیشترین درصد مشارکت
λ_1	-۷۴۳٫۶۱	۰	۱	$i_{gq} = ۹۸\%$
λ_2	-۳۷۵٫۲۱	۰	۱	$\gamma = ۹۹\%$
λ_3	-۱۹۵٫۶۷	۰	۱	$i_{rq} = ۷۸\%, x_r = ۲۰\%$
λ_4	-۱۹۸٫۶۶	۰	۱	$i_{rd} = ۷۸\%, x_s = ۱۹\%$
λ_5	-۵۱٫۴۴۵	۰	۱	$i_{rq} = ۲۱\%, x_r = ۷۵\%$
λ_6	-۵۱٫۴۳۶	۰	۱	$i_{rd} = ۲۱\%, x_s = ۷۴\%$
$\lambda_{7,8}$	$-۲٫۳۸۴۱ \pm ۱۳٫۰۳i$	۲٫۰۷۴	۰٫۱۸۰۰	$\omega_r = ۴۲\%, \beta = ۴۹\%$
λ_9	-۱۰٫۵۰۹	۰	۱	$\Psi_{sd} = ۶۱\%, x_\lambda = ۳۵\%$
λ_{10}	-۰٫۰۶۷۱۳۲	۰	۱	$x_r = ۹۹\%$
λ_{11}	-۰٫۵۳۶۵۵	۰	۱	$x_{vv} = ۷۷\%$
$\lambda_{12,13}$	$-۰٫۸۲۸۵۴ \pm ۰٫۲۷۱۰۲i$	۰٫۰۴۳	۰٫۹۵۰۴	$\Psi_{sd} = ۱۴\%, x_{vv} = ۱۴\%, \omega_i = ۳۰\%$
λ_{14}	-۲٫۷۱۳۱	۰	۱	$V_{dc} = ۷۸\%, x_{vv} = ۱۷\%$
λ_{15}	-۷۵۴	۰	۱	$i_{gd} = ۹۹\%$
λ_{16}	-۳٫۷۶۶۶	۰	۱	$x_s = ۹۷\%$
λ_{17}	-۳٫۷۶۶۶	۰	۱	$x_r = ۹۹\%$

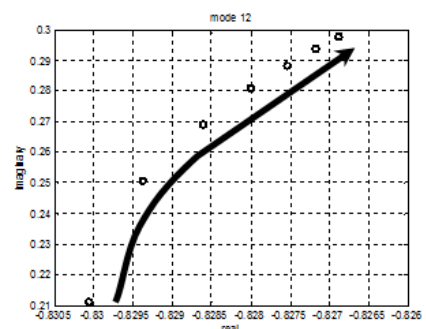
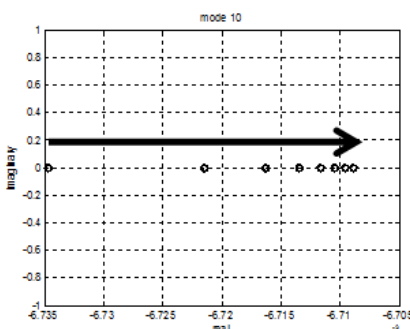
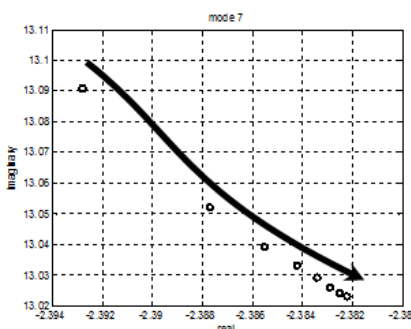
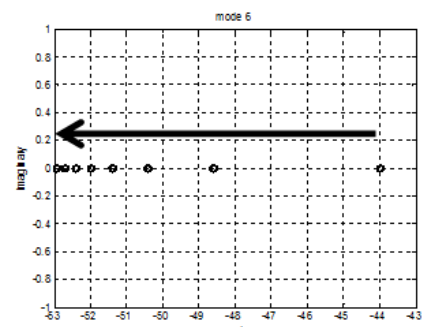
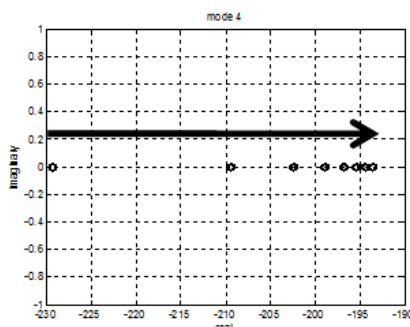
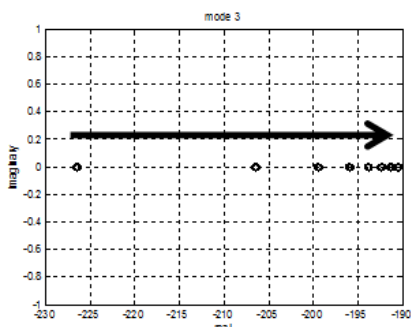


(ب)

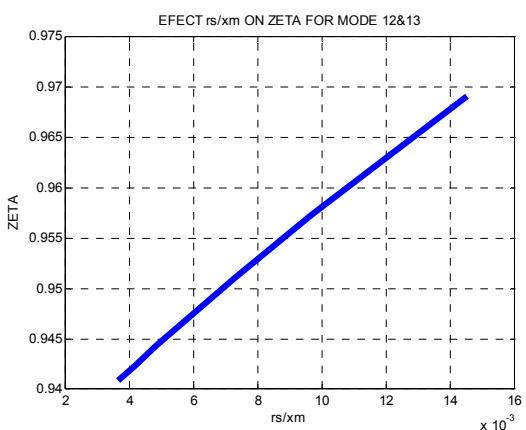


(الف)

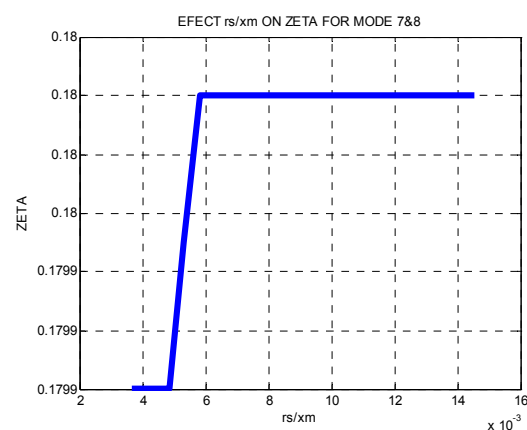
شکل ۶: اثر افزایش اندوکتانس در نسبت میرایی مدهای نوسانی، (الف) مدهای ۷ و ۸ و (ب) مدهای ۱۲ و ۱۳.



شکل ۷: اثر تغییرات (کاهش) مقاومت استاتور بر مدهای سیستم.



(ب)

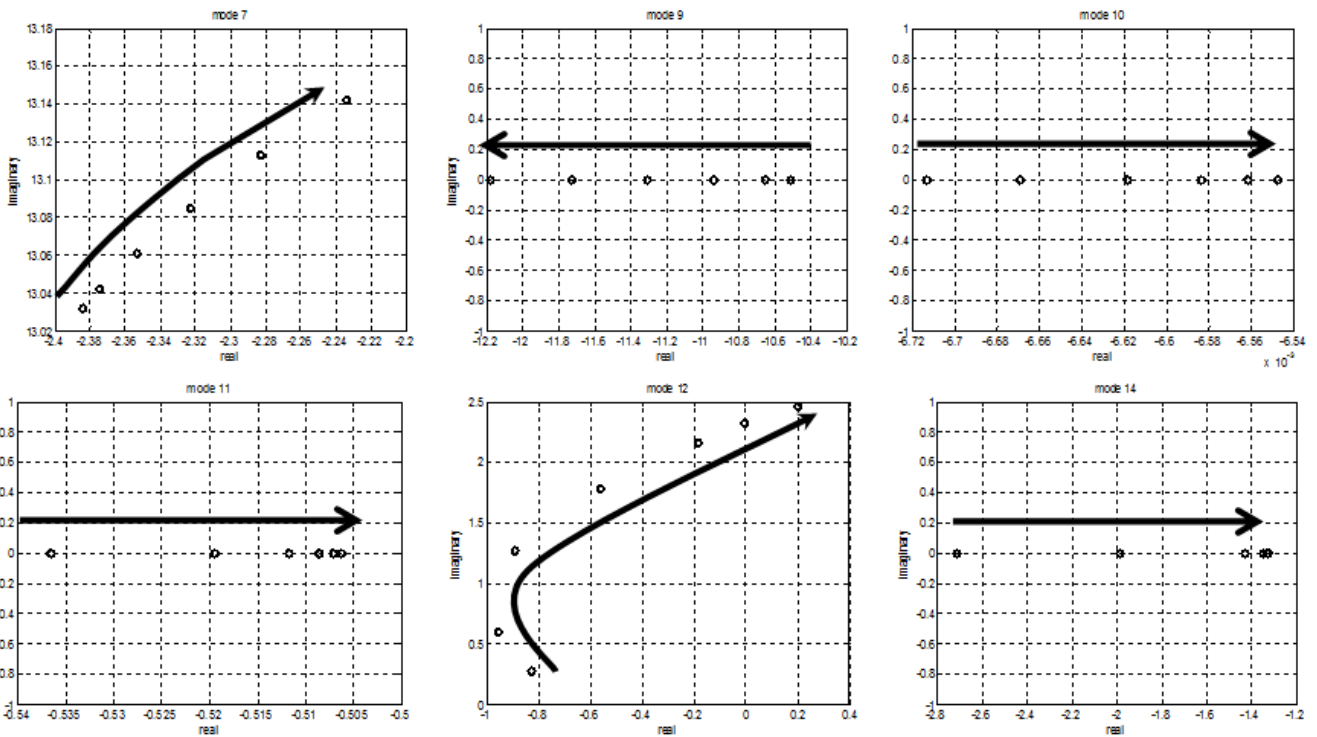
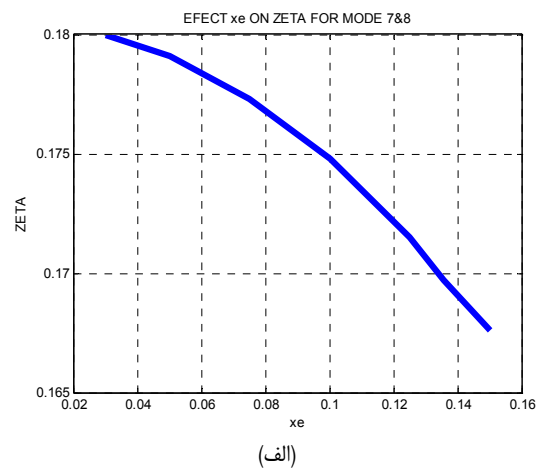
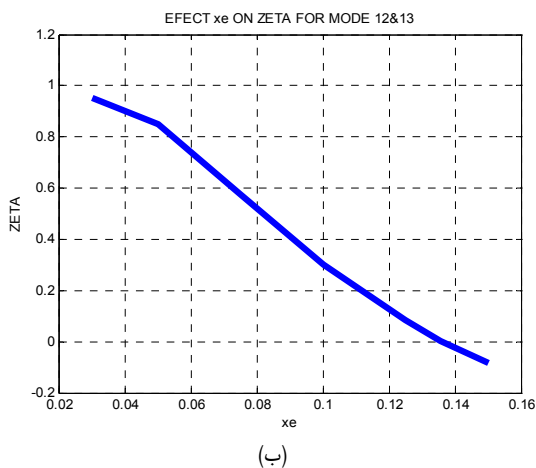


(الف)

شکل ۸: اثر کاهش مقاومت استاتور در میرایی مدهای نوسانی، (الف) مدهای ۷ و ۸ و (ب) مدهای ۱۲ و ۱۳.

میرایی مدهای نوسانی تحت الشعاع واقع می‌گردد. چنانچه در شکل ۸ دیده می‌شود با افزایش مقاومت استاتور نسبت میرایی در مدهای ۷ و ۸ به میزان بسیار ناچیز افزایش می‌یابد و سپس در مقدار ۰/۱۸ تثبیت می‌شود. همچنین با افزایش مقاومت استاتور نسبت میرایی در مدهای ۱۲ و ۱۳ به

هستند. کاهش مقاومت استاتور باعث کاهش ناچیز در مقادیر حقیقی مدها و افزایش مقادیر موهومی می‌شود. مقادیر ویژه در این مد به سمت محور موهومی نزدیک می‌شود و با توجه به مقادیر ویژه و حساسیت این مد بحث پایداری سیستم باید مورد توجه قرار گیرد. با کاهش مقاومت استاتور

شکل ۹: اثر افزایش x_e بر مدهای سیستم.شکل ۱۰: اثر افزایش راکتانس x_e بر نسبت میرایی مدهای نوسانی سیستم، (الف) مدهای ۷ و ۸ و (ب) مدهای ۱۲ و ۱۳.

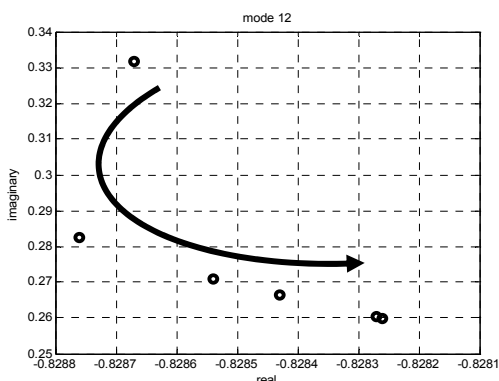
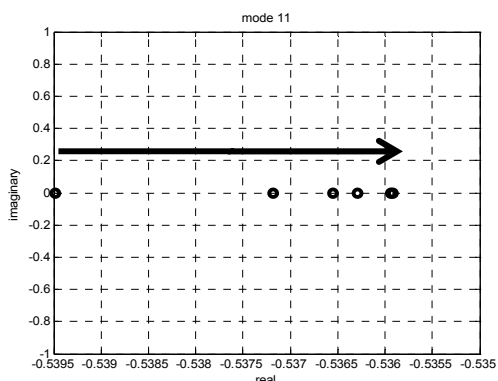
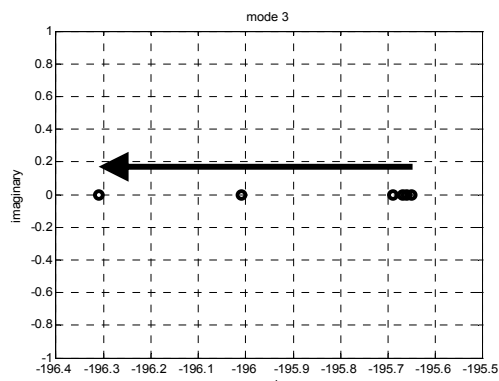
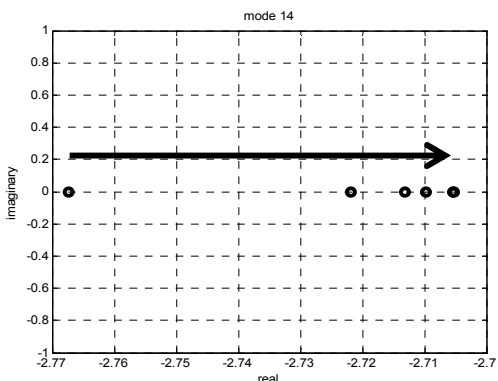
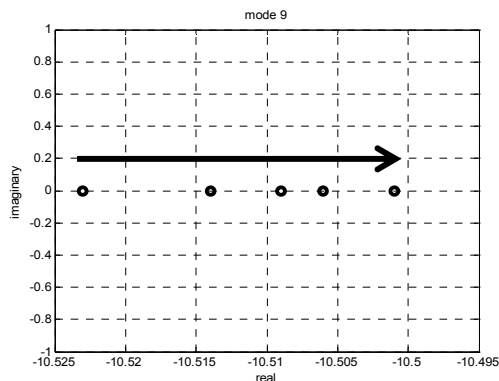
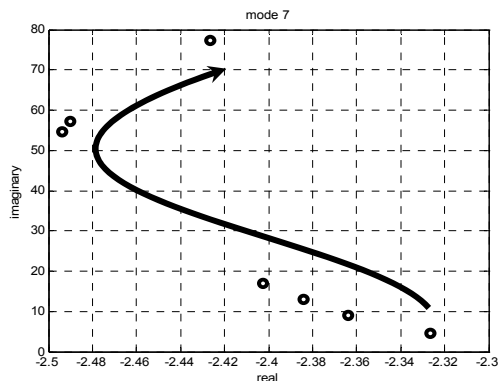
محور حقیقی می‌توان اثر تغییرات راکتانس را در این مد که یک مد کنترلی است قابل اغماض دانست. مد یازدهم که یک مد کنترلی است با افزایش راکتانس x_e به محور موهومی نزدیک می‌شود. اما این تغییرات ناچیز است و با توجه به حقیقی بودن این مد سرعت میرایی به مقدار ناچیزی تحت الشعاع واقع می‌گردد. مدهای دوازدهم و سیزدهم که جزء مدهای نوسانی سیستم هستند با افزایش راکتانس x_e مقادیر حقیقی آنها ابتدا افزایش می‌یابد و از محور موهومی دور می‌شود، سپس شروع به نزدیک شدن به محور موهومی می‌کند و نهایتاً به ازای x_e معادل $0/137$ بر روی محور موهومی واقع می‌شود و پس از این مقدار افزایش x_e سبب منتقل شدن مقادیر ویژه به سمت راست محور موهومی می‌شود و ناپایداری این مد نهایتاً ناپایداری کل سیستم را رقم می‌زند. همچنین مقادیر موهومی این مد با افزایش راکتانس x_e افزایش می‌یابد. مد چهاردهم با افزایش راکتانس x_e به سمت محور موهومی حرکت می‌کند و از آنجا که یک مد حقیقی است باعث کاهش سرعت میرایی می‌شود. شکل ۱۰ اثر افزایش راکتانس x_e بر نسبت میرایی مدهای نوسانی

میزان بسیار ناچیز افزایش می‌یابد و البته این افزایش تقریباً به صورت خطی ادامه پیدا می‌کند.

۳-۵ اثر افزایش راکتانس خط (x_e) بر مدهای سیستم

در این مقاله محدوده تغییرات x_e از $0/03$ پریونیت در سیستم مبنا تا $0/15$ پریونیت است. شکل ۹ اثر افزایش راکتانس بر مقادیر ویژه مدهای سیستم را نشان می‌دهد. در مدهای هفتم و هشتم که مدهای نوسانی سیستم هستند با افزایش راکتانس x_e مقادیر حقیقی مدهای نوسانی کاهش می‌یابد و به محور موهومی نزدیک می‌شود. ولی مقادیر موهومی این مدها افزایش می‌یابند. هر چند این تغییرات ناچیزند اما در مقدار میرایی و سایر پارامترهای دیگر مد تأثیرگذار است.

اثر افزایش راکتانس x_e بر مد نهم دور شدن مقادیر ویژه از محور موهومی است و از آنجا که این مد یک مد حقیقی است مسلماً سرعت میرایی و پایداری سیستم بهبود می‌یابد. در مد دهم اثر تغییرات بسیار ناچیز است و با توجه به شکل مربوط به مد دهم و در نظر گرفتن مقیاس



شکل ۱۱: اثر تغییرات k_s بر روی مدهای سیستم.

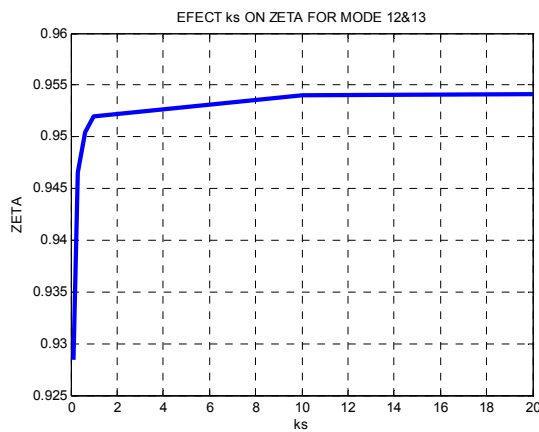
مقادیر موهومی نیز افزایش می‌یابد ولی افزایش مقادیر موهومی نسبت به مقادیر حقیقی بسیار زیاد است. به طور کلی مقادیر ویژه این مد ابتدا از محور موهومی دور می‌شود و پس از یک تغییر جهت شروع به نزدیک شدن به محور موهومی می‌کند. مد نهم با افزایش مقدار k_s به سمت محور موهومی نزدیک می‌شود و هرچه k_s بیشتر می‌گردد تغییرات در مقادیر ویژه کمتر دیده می‌شود و نهایتاً ثابت می‌گردد. مد یازدهم با افزایش k_s اندکی به سمت محور موهومی متمایل می‌شود. البته این تغییر مکان بسیار کند و کم است و هرچه مقادیر k_s بالاتر می‌رود فشردگی مکان مقادیر ویژه در نزدیک محور موهومی بیشتر می‌شود. مد دوازدهم و مد سیزدهم مدهای نوسانی سیستم هستند. مقادیر حقیقی این مدها ابتدا کمی افزایش یافته و از محور موهومی دور می‌شوند. سپس رو به کاهش گذاشته و به محور موهومی نزدیک می‌شوند. همچنین قسمت موهومی این مدها کاهش می‌یابند. چنانچه در شکل ملاحظه می‌شود مقادیر ابتدا از محور موهومی فاصله می‌گیرند و سپس به محور نزدیک می‌شوند. تغییر جهت تقریباً در مقدار k برابر 0.3 صورت می‌پذیرد. مد چهاردهم با افزایش مقدار k_s به محور موهومی نزدیک می‌شود. البته این مد دارای سرعت کمی است و با توجه به نزدیکی به محور

سیستم را نشان می‌دهد. در مدهای نوسانی ۷ و ۸ سیستم، با افزایش x_e میرایی کاهش می‌یابد، هر چند این کاهش چشم‌گیر نیست. تغییرات نسبت میرایی در مدهای ۱۲ و ۱۳ بسیار زیاد است و در x_e معادل 0.137 سیستم ناپایدار می‌شود و مقدار ضریب میرایی منفی می‌شود.

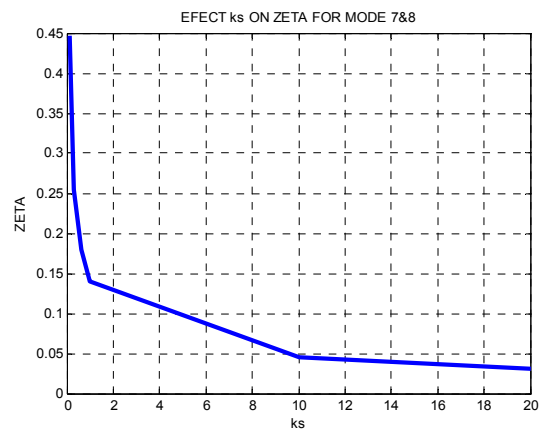
۵-۴ اثر تغییرات سختی محور بر مدهای سیستم

از آنجا که یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر روی سیستم سختی محور (k_s) است، لذا بررسی این پارامتر در محدوده بین 0.1 تا 20 در نظر گرفته می‌شود. شکل ۱۱ اثر تغییرات k_s بر روی مکان مقادیر ویژه را نشان می‌دهد. همان طور که دیده می‌شود در مد سوم تغییر مقدار k_s تأثیر زیادی بر روی مقادیر ویژه ندارد و فقط اندکی آنها را از محور موهومی دور می‌کند.

این مد با توجه به مقدار حقیقی آن نسبتاً سریع است. مد هفتم و هشتم مدهای نوسانی سیستم هستند. در این مدها با افزایش مقدار k_s مقادیر حقیقی مدها افزایش کمی دارند و از محور موهومی فاصله می‌گیرند و تا مقدار $k = 11$ این افزایش ادامه می‌یابد. از این مقدار به بعد با افزایش k_s مقادیر ویژه تغییر جهت داده و به سمت محور موهومی حرکت می‌کنند.



(ب)



(الف)

شکل ۱۲: بررسی نسبت میرایی مدهای نوسانی با تغییر مقادیر k_s ، (الف) مدهای ۷ و ۸ و (ب) مدهای ۱۲ و ۱۳.

از محور موهومی دور می‌شوند و این روند تا سرعت ۸/۷ متر بر ثانیه ادامه می‌یابد. از این سرعت به بعد مقادیر ویژه تغییر جهت داده و به سمت محور موهومی حرکت می‌کنند. همچنین مقادیر موهومی این مدها افزایش می‌یابند و هرچه سرعت باد بیشتر می‌شود این افزایش بیشتر می‌گردد و مکان ریشه‌ها به محور موهومی نزدیک‌تر می‌شود. مد چهاردهم با افزایش سرعت باد بر روی محور حقیقی نوسان کرده و مقادیر ویژه به محور موهومی نزدیک می‌شود. شکل ۱۴ اثر افزایش سرعت باد بر روی ضریب میرایی مدهای ۷، ۸، ۱۲ و ۱۳ را نشان می‌دهد.

در مد ۷ و ۸ چنانچه ملاحظه می‌شود محدوده تغییرات نسبت میرایی برای حدود تعیین شده سرعت باد بین ۰/۱۷۷۲ تا ۰/۱۸۱۰ است. با افزایش سرعت باد ضریب میرایی مدهای نوسانی ۷ و ۸ کاهش می‌یابد. در مدهای ۱۲ و ۱۳ نسبت میرایی تا سرعت معادل ۷/۵ متر بر ثانیه تغییرات چندانی ندارد اما از سرعت ۷/۵ متر بر ثانیه به شدت سقوط می‌کند و نهایتاً در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه به مقدار ۰/۴۱ می‌رسد. محدوده تغییرات نسبت میرایی در این مد برای محدوده سرعت باد بین ۰/۴۱۴۵ تا ۰/۹۹۲۳ است.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله تجزیه و تحلیل مدال یک سیستم تک‌ماشین متصل به شین بی‌نهایت با توربین باد با ژنراتور القایی دوسو تغذیه ارائه گردیده است. یک مدل مرتبه هفده شامل متغیرهای مربوط به استاتور، رتور، توربین و لینک dc و کنترل‌کننده‌های مربوط به آنها استفاده شده است. سپس اثرات تغییر در چندین پارامتر سیستم مانند اندوکتانس متقابل، مقاومت استاتور، راکتانس خط، سختی محور و سرعت باد بر روی جابه‌جایی مقادیر ویژه تعیین شده است. نتایج به دست آمده از این مطالعه اثر هر یک از پارامترها را بر روی پایداری و میرایی مدهای مختلف سیستم نشان می‌دهد. بر اساس این تحلیل می‌توان دریافت که تغییر هر پارامتر چه تأثیری بر عملکرد کنترل‌کننده‌ها و سایر اجزای سیستم دارد. این مقاله می‌تواند یک درک بهتر از دینامیک‌های ذاتی سیستم DFIG ارائه دهد که برای ارزیابی پایداری و طراحی کنترل‌کننده‌های مختلف سودمند است.

مراجع

- [1] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, and W. D'haeseleer, "Distributed generation: definition, benefits and issues," *Energy Policy*, vol. 33, no. 6, pp. 787-798, Apr. 2005.

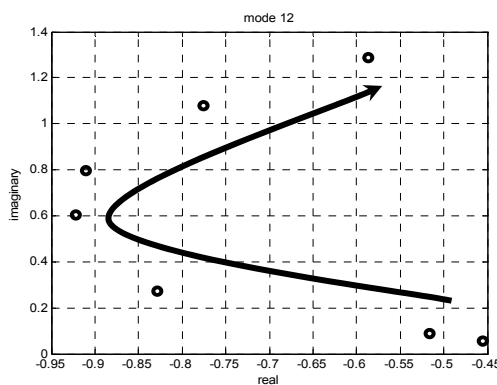
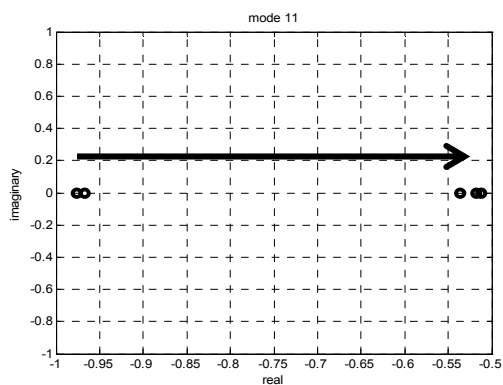
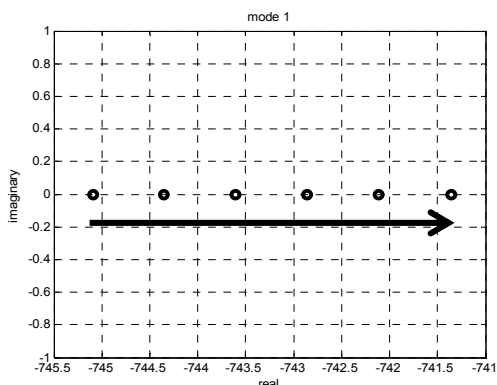
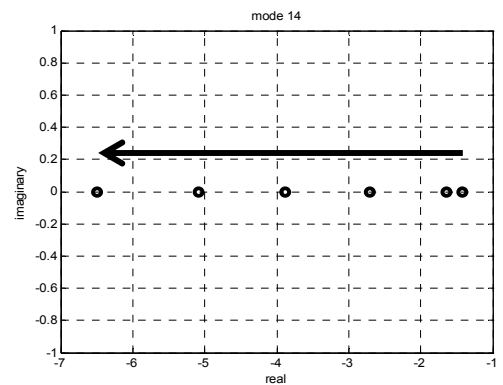
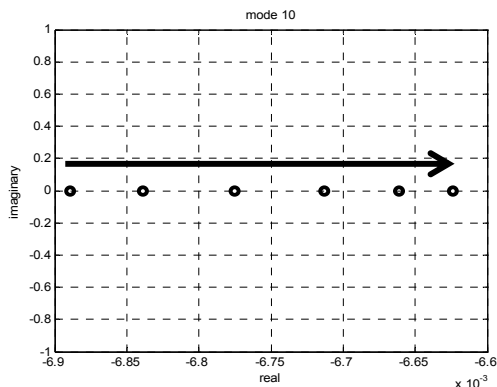
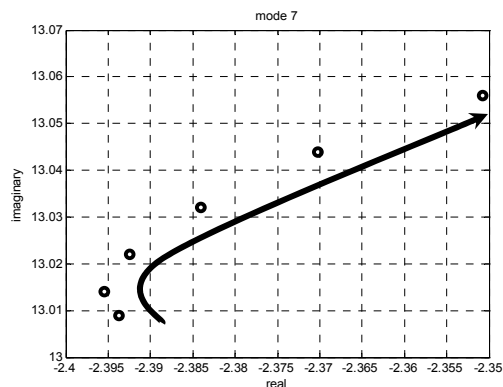
موهومی برای بحث پایداری باید مورد توجه قرار گیرد. شکل ۱۲ میرایی مدهای نوسانی با تغییر مقادیر k_s را نشان می‌دهد. در مدهای ۷ و ۸ ضریب میرایی تحت تأثیر شدید تغییرات k_s واقع می‌شود و هرچه مقدار k_s افزایش می‌یابد ضریب میرایی کاهش می‌یابد. محدوده تغییرات ضریب میرایی در محدوده تغییرات k_s بین ۰/۰۳۱ تا ۰/۴۴۶۵ است. در مد دوازدهم و سیزدهم نیز که مدهای نوسانی سیستم هستند، نسبت میرایی تحت تأثیر تغییرات k_s واقع می‌گردد اما این تغییرات نسبت به مدهای ۷ و ۸ بسیار متفاوت است زیرا اولاً نسبت میرایی در این مدها به ازای افزایش k_s افزایش می‌یابد و ثانیاً این افزایش نسبت میرایی ناچیز است. تغییرات نسبت میرایی در این مدها در محدوده تغییرات k_s بین ۰/۹۲۸۴ تا ۰/۹۵۴۱ است.

۵-۵ اثر تغییرات سرعت باد بر مدهای سیستم

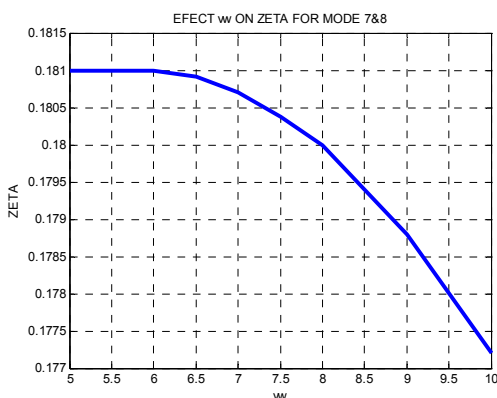
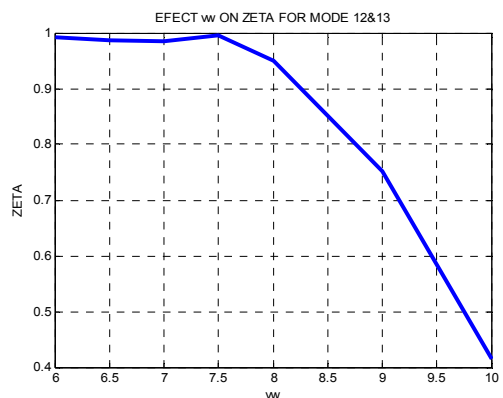
تغییرات سرعت باد بین ۵ متر بر ثانیه تا ۱۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. تغییرات سرعت باد امری بدیهی و معمول و قابل تصور برای توربین بادی است لذا تحلیل مدهای سیستم برای تغییرات مربوط به باد امری ضروری و لازم به نظر می‌رسد. در این مقاله برای تحلیل اثر تغییر سرعت باد از روش MPPT معروف به تعقیب حداکثر توان استفاده شده است. شکل ۱۳ اثر تغییرات سرعت باد بر روی مدهای سیستم را نشان می‌دهد.

همان طور که دیده می‌شود در مد اول با تغییر سرعت باد مکان مقادیر ویژه از محور موهومی دور می‌شود و همچنین این مد دارای سرعت میرایی بالایی است. در مد هفتم و هشتم که مدهای نوسانی سیستم هستند با تغییر سرعت باد مقادیر حقیقی این مدها به مقدار ناچیز از محور موهومی دور می‌شوند ولی در سرعت تقریباً ۶/۵ متر بر ثانیه تغییر جهت داده و به محور موهومی نزدیک می‌شوند. همچنین مقادیر موهومی این مدها به طور بسیار ناچیز افزایش می‌یابد. به علت تغییرات بسیار کم روی مدها، نسبت میرایی نیز به طور قابل توجه متأثر نخواهد شد. در مد دهم افزایش سرعت باد باعث نزدیک شدن مقادیر ویژه به سمت محور موهومی می‌شود.

نزدیک بودن این مد به محور موهومی و احتمال ناپایداری ملاحظات خاص خود برای تغییر پارامترها و پایداری این مد را می‌طلبد. مقیاس محور حقیقی در مد دهم قابل توجه است. مد یازدهم در اثر افزایش سرعت باد بر روی محور حقیقی نوسان می‌کند و مقادیر ویژه به سمت محور موهومی نزدیک می‌شوند. مدهای دوازدهم و سیزدهم مدهای نوسانی سیستم هستند. در اثر افزایش سرعت باد مقادیر حقیقی این مدها



شکل ۱۳: اثر تغییر سرعت باد بر روی مدهای سیستم.



(ب)

(الف)

شکل ۱۴: اثر تغییر سرعت باد بر نسبت میرایی مدهای نوسانی، (الف) مدهای ۷ و ۸ و (ب) مدهای ۱۲ و ۱۳.

[4] N. Ramesh-Babu and P. Arulmozhiarman, "Wind energy conversion systems: a technical review," *J. of Engineering Science and Technology*, vol. 8, no. 4, pp. 493-507, Oct. 2013.

[5] E. Hosseini and G. Shahgholian, "Different types of pitch angle control strategies used in wind turbine system applications," *J. of Renewable Energy and Environment*, vol. 4, no. 1, pp. 20-35, Winter 2017.

[2] W. El-Khattam and M. M. ASalama, "Distributed generation technologies, definitions and benefits," *Electric Power Systems Research*, vol. 71, no. 2, pp. 119-128, Oct. 2004.

[3] S. Agalar and Y. A. Kaplan, "Power quality improvement using STS and DVR in wind energy system," *Renewable Energy*, vol. 118, pp. 1031-1040, Apr. 2018.

- generator based wind turbine," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 11, no. 10, pp. 2677-2688, Jul. 2017.
- [27] R. M. Linus and P. Damodharan, "Maximum power point tracking method using a modified perturb and observe algorithm for grid connected wind energy conversion systems," *IET Renewable Power Generation*, vol. 9, no. 6, pp. 682-689, Aug. 2015.
- [28] A. B. Asghar and X. Liu, "Adaptive neuro-fuzzy algorithm to estimate effective wind speed and optimal rotor speed for variable-speed wind turbine," *Neurocomputing*, vol. 272, pp. 495-504, Jan. 2018.
- [29] H. M. Hasanien and S. M. Mueeen, "Affine projection algorithm based adaptive control scheme for operation of variable-speed wind generator," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 9, no. 16, pp. 2611-2616, Nov. 2015.
- [30] S. H. Mozafarpour-Khoshrodi and G. Shahgholian, "Improvement of perturb and observe method for maximum power point tracking in wind energy conversion system using fuzzy controller," *Energy Equipment and Systems*, vol. 4, no. 2, pp. 111-122, Autumn 2016.
- [31] Y. Sukim, I. Chung, and S. Moon, "An analysis of variable-speed wind turbine power-control methods with fluctuating wind speed," *Energies*, vol. 6, no. 1, pp. 3323-3338, Jul. 2013.
- [32] V. P. Suppioni, A. P. GriloJulio, and C. Teixeira, "Improving network voltage unbalance levels by controlling DFIG wind turbine using a dynamic voltage restorer," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 96, pp. 185-193, Mar. 2018.
- [33] H. Nian and Y. Song, "Direct power control of doubly fed induction generator under distorted grid voltage," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 29, no. 2, pp. 894-905, Feb. 2014.
- [34] M. Rahimi and 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.
- [35] M. Zamanifar, B. Fani, M. E. H. Golshan, and H. R. Karshenas, "Dynamic modeling and optimal control of DFIG wind energy systems using DFT and NSGA-II," *Electric Power Systems Research*, vol. 108, pp. 50-58, Mar. 2014.
- [36] G. Shahgholian, "Modeling and simulation of a two-mass resonant system with speed controller," *International J. of Information and Electronics Engineering*, vol. 3, no. 4, pp. 365-369, Jul. 2013.
- [37] M. S. Shaker and R. J. Patton, "Active sensor fault tolerant output feedback tracking control for wind turbine systems via T-S model," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 34, pp. 1-12, Sept. 2014.
- [38] C. Viveiros, R. Melicio, J. M. Igreja, and V. M. F. Mendes, "Supervisory control of a variable speed wind turbine with doubly fed induction generator," *Energy Reports*, vol. 1, pp. 89-95, Nov. 2015.
- [39] G. Shahgholian and N. Izadpanahi, "Improving the performance of wind turbine equipped with DFIG using STATCOM based on input-output feedback linearization controller," *Energy Equipment and Systems*, vol. 4, no. 1, pp. 65-79, Jun. 2016.
- [40] D. Zhou, F. Blaabjerg, T. Franke, M. Tonnes, and M. Lau, "Reduced cost of reactive power in doubly fed induction generator wind turbine system with optimized grid filter," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 30, no. 10, pp. 5581-5590, Oct. 2015.
- [41] L. Tang and W. Sun, "An automated transient stability constrained optimal power flow based on trajectory sensitivity analysis," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 32, no. 1, pp. 590-599, Jan. 2017.
- [42] H. F. Wang, F. J. Swift, and M. Li, "Indices for selecting the best location of PSSs or FACTS-based stabilizers in multimachine power systems: a comparative study," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 144, no. 2, pp. 155-159, Mar. 1997.
- [43] P. Zhang and A. H. Coonick, "Coordinated synthesis of PSS parameters in multi-machine power systems using the method of inequalities applied to genetic algorithms," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 15, no. 2, pp. 811-816, May 2000.
- [44] F. J. Swift and H. F. Wang, "The connection between modal analysis and electric torque analysis in studying the oscillation stability of multi-machine power systems," *International J. of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 19, no. 5, pp. 321-330, Jun. 1997.
- [6] E. Hosseini and G. Shahgholian, "Partial- or full-power production in WECS: a survey of control and structural strategies," *European Power Electronics and Drives*, vol. 27, no. 3, pp. 125-142, Dec. 2017.
- [7] H. Huang and C. Y. Chung, "Adaptive neuro-fuzzy controller for static VAR compensator to damp out wind energy conversion system oscillation," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 7, no. 2, pp. 200-207, Feb. 2013.
- [8] J. Morren and S. W. H. de Haan, "Short-circuit current of wind turbines with doubly fed induction generator," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 22, no. 1, pp. 174-180, Mar. 2007.
- [9] L. G. Meegahapola, T. Littler, and D. Flynn, "Decoupled-DFIG fault ride-through strategy for enhanced stability performance during grid faults," *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 1, no. 3, pp. 152-162, Oct. 2010.
- [10] J. Faiza, A. Hakimi-Tehrani, G. Shahgholian, and A. M. Takbash, "Speed control of wind turbine through pitch control using different control techniques," *J. of Renewable Energy and Environment*, vol. 3, no. 2, pp. 15-24, Spring 2016.
- [11] K. Khani, G. Shahgholian, B. Fani, M. Moazzami, M. Mahdavian, and M. Janghorbani, "A comparison of different structures in wind energy conversion systems," in *Proc. of the IEEE/ECTICON*, pp. 58-61, Phuket, Thailand, Jun. 2017.
- [12] S. Orlando, G. Henrique, M. Antonio, and C. Adriano, "Nonlinear control of the doubly-fed induction generator in wind power systems," *Renewable Energy*, vol. 35, no. 8, pp. 1662-1670, Aug. 2010.
- [13] T. K. Chau, S. S. Yu, T. L. Fernando, H. H. Iu, and M. Small, "A novel control strategy of DFIG wind turbines in complex power systems for enhancement of primary frequency response and LFOD," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 33, no. 2, pp. 1811-1823, Mar. 2018.
- [14] M. Jazaeri and A. A. Samadi, "Self-tuning fuzzy PI-based controller of DFIG wind turbine for transient conditions enhancement," *International Trans. on Electrical Energy Systems*, vol. 25, no. 11, pp. 2657-2673, Nov. 2015.
- [15] A. Tamaarat and A. Benakcha, "Performance of PI controller for control of active and reactive power in DFIG operating in a grid-connected variable speed wind energy conversion system," *Frontiers in Energy*, vol. 8, no. 3, pp. 371-378, Sep. 2014.
- [۱۶] ع. حسنی و ر. کیانی نژاد، "کنترل برداری بدون سنسور DFIG با روتورگر MRAS بر اساس جریان روتور در شرایط افت ولتاژ نامتعادل شبکه،" *نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران*، جلد ۱۵، شماره ۳، صص. ۲۰۹-۲۱۶، پاییز ۱۳۹۶.
- [17] A. Dida and D. B. Attous, "Doubly-fed induction generator drive based WECS using fuzzy logic controller," *Frontiers in Energy*, vol. 9, no. 3, pp. 272-281, Sep. 2015.
- [18] L. Shang and J. Hu, "Sliding-mode-based direct power control of grid-connected wind-turbine-driven doubly fed induction generators under unbalanced grid voltage conditions," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 27, no. 2, pp. 362-373, Jan. 2012.
- [19] J. Mohammadi, S. Vaez-Zadeh, S. Afsharnia, and E. Daryabeigi, "A combined vector and direct power control for DFIG-based wind turbines," *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 5, no. 3, pp. 767-775, Jun. 2014.
- [20] M. G. Mousa, S. M. Allam, and E. M. Rashad, "Maximum power extraction under different vector-control schemes and grid-synchronization strategy of a wind-driven brushless doubly-fed reluctance generator," *ISA Trans.*, vol. 72, pp. 287-297, Jan. 2018.
- [21] Z. Lin, Z. Chen, Q. Wu, S. Yang, and H. Meng, "Coordinated pitch & torque control of large-scale wind turbine based on Pareto efficiency analysis," *Energy*, vol. 147, pp. 812-825, Mar. 2018.
- [22] H. Zhao, Q. Wu, J. Wang, Z. Liu, M. Shahidehpour, and Y. Xue, "Combined active and reactive power control of wind farms based on model predictive control," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 32, no. 3, pp. 1177-1187, Sep. 2017.
- [23] M. Rahimi and M. Parniani, "Dynamic behavior analysis of doubly-fed induction generator wind turbines-the influence of rotor and speed controller parameters," *International J. of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 32, no. 5, pp. 464-477, Jun. 2010.
- [24] F. Mei and 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.
- [25] L. Yang, Z. Xu, I. Otergaard, and Z. Y. Dong, "Oscillatory stability and eigenvalue sensitivity analysis of a DFIG wind turbine system," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 26, no. 1, pp. 328-339, Jan. 2011.
- [26] A. Jafari and G. Shahgholian, "Analysis and simulation of a sliding mode controller for mechanical part of a doubly-fed induction

احمد جعفری تحصیلات خود را در مقطع کاردانی در سال ۱۳۸۳ در دانشکده شهید مہاجر اصفہان بہ پایان رساند. وی مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد در رشته مہندسی برق گرایش قدرت را بہ ترتیب در سال‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۹۴ در دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد بہ پایان رساندہ است. زمینہ‌های تحقیقاتی مورد علاقہ ایشان انرژی‌های نو و دینامیک سیستم‌های قدرت است.

مهران زمانی فر تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی و کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۵ در دانشگاه صنعتی اصفهان و دانشگاه تهران به پایان رسانده است. وی تحصیلات تکمیلی خود را در مقطع دکتری در دانشگاه صنعتی اصفهان ادامه داد و در سال ۱۳۹۳ موفق به اخذ مدرک دکتری در رشته مهندسی برق از این دانشگاه گردید. ایشان اکنون استادیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد است. زمینه‌های تحقیقاتی ایشان، مدل‌سازی دینامیکی سیستم‌های قدرت، کنترل و بهینه‌سازی در سیستم‌های قدرت و ماشین‌های الکتریکی و نیز انرژی‌های نو است.

غضنفر شاهقلیان دوره کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری را در رشته مهندسی برق گرایش قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۰، ۱۳۷۳ و ۱۳۸۵ در دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشگاه تبریز و دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات به پایان رسانده است. وی اکنون دانشیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از مدل‌سازی و شبیه‌سازی دینامیک سیستم‌های قدرت و الکترونیک قدرت.