

طراحی کنترل کننده توان و بهبود میرایی نوسانات پیچشی در توربین بادی

DFIG-710 kW نصب شده در سایت بینالود

محسن رحیمی^۱، استادیار، محمدرضا اسماعیلی^۲، دانشجوی کارشناسی ارشد

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه کاشان - کاشان - ایران - mrahimi@kashanu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه کاشان - کاشان - ایران - mresmaeili@grad.kashanu.ac.ir

چکیده: سیستم تحت مطالعه در این مقاله یک توربین-ژنراتور واقعی ۷۱۰ کیلو وات DFIG است که اخیراً در سایت بینالود نصب شده است. اندازه گیری ها و مشاهدات عینی از توربین مذکور نشان داده که در سرعت های بالای باد، نوسان های الکترومکانیکی با فرکانس ۲ هرتز در سیستم مکانیکی ظاهر می شود که باعث لرزش توربین می گردد. کنترل توربین مذکور بر مبنای کنترل توان و بر اساس یک منحنی توان-سرعت از پیش تعیین شده توسط کارخانه سازنده صورت می گیرد. در این مقاله هدف تحلیل منشأ و علت پیدایش این نوسان ها است. بنابراین در ابتدا به طراحی سیستم کنترل توان توربین-ژنراتور مذکور بر اساس منحنی توان-سرعت مختص توربین پرداخته می شود. در ادامه مدهای مکانیکی سیستم تحت شرایط بهره برداری و سرعت های مختلف باد استخراج گردیده و مشخص شده که در بعضی نقاط کار نوسانات فرکانس پایین (حدوداً ۲ هرتز) در پاسخ توان، سرعت و گشتاور پیچشی ژنراتور ظاهر می شود. در ادامه برای بهبود میرایی مدهای پیچشی، یک کنترل کننده کمکی پایدارساز بنام پایدارساز نوسانات پیچشی (TOS) پیشنهاد می شود. در پایان نتایج شبیه سازی برای سیستم تحت مطالعه آورده می شود.

واژه های کلیدی: توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دوسو تغذیه، نوسانات پیچشی، پایدارساز نوسانات پیچشی

Power controller design and damping improvement of torsional oscillations in the 710 kW DFIG based wind turbine installed at the Binalood site

M. Rahimi¹, Assistant professor, M. R. Esmaeili², MSc. Student

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran, Email: mrahimi@kashanu.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran, Email: mohamadsobhan@gmail.com

Abstract: The system under study in this paper is a real 710 kW DFIG based wind turbine installed in the binalood site. Based on the measurements and observations of the turbine, at high wind speeds, electromechanical oscillations with frequency of 2 Hz appear on the mechanical system leading to turbine vibration. Control of the wind turbine is carried out based on the power control through a predefined power-speed curve provided by the wind turbine manufacture. The purpose of this paper is to find out the nature and reason of the above mentioned electromechanical oscillations. Hence, the paper first deals with the power control design based on the corresponding power-speed curve. Then, mechanical modes of the system under different operating conditions and wind speeds are extracted. It is shown that at some operating points, low frequency oscillations with frequency of 2 Hz appear on the generator power, generator speed and shaft torsional torque. Next, for improving the damping of the torsional modes, an auxiliary stabilizer control, known as torsional oscillations stabilizer (TOS), is proposed. At the end, simulation results for the system under study are presented.

Keywords: DFIG based wind turbine, torsional oscillations, torsional oscillations stabilizer

تاریخ ارسال مقاله: ۹۴/۷/۸

تاریخ اصلاح مقاله: ۹۴/۱۲/۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۲/۲۵

نام نویسنده مسئول: محسن رحیمی

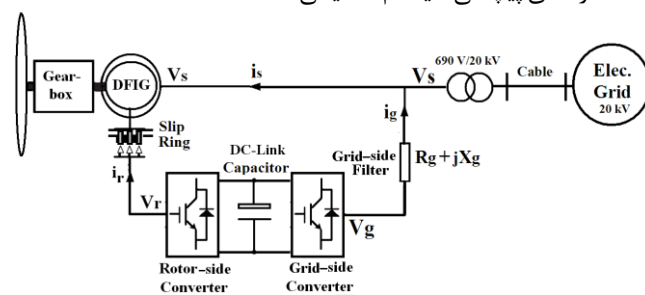
نشانی نویسنده مسئول: ایران - کاشان - ۶ کیلومتر بلوار قطب رواندی - دانشگاه کاشان - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

در سال های اخیر استفاده از انرژی باد به عنوان یکی از مهم ترین منابع انرژی تجدیدپذیر دارای توجیه اقتصادی، در بسیاری از کشورهای جهان از جمله ایران افزایش چشمگیری داشته است [۱]. از اواسط دهه ۱۹۹۰ به علت برخی از مزایای ماشین القایی نسبت به ماشین های سنکرون، استفاده از ماشین القایی در توربین-ژنراتورهای بادی افزایش یافت [۲-۳]. در بین ژنراتورهای القایی نیز، ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه (DFIG) دارای عملکرد بهتری نسبت به سایر ژنراتورهای القایی هستند [۴]. از جمله مزایای این نوع ژنراتور را می توان به انعطاف پذیری لازم برای کنترل توان اکتیو و راکتیو، قابلیت ردیابی نقطه توان ماکزیمم (MPPT)، عدم نیاز به بانک خازنی جهت تأمین توان راکتیو مورد نیاز، عملکرد مناسب در رنج وسیعی از تغییرات سرعت باد و استرس و تنش مکانیکی کم تر نام برد [۲، ۳ و ۵].

شمای کلی توربین-ژنراتور DFIG تحت مطالعه در شکل ۱ آمده است. ژنراتور آن یک ژنراتور القایی روتور سیم پیچی شده است که سیم پیچی روتور به وسیله یک مبدل الکترونیک قدرت تغذیه می شود. مبدل الکترونیک قدرت، خود از دو مبدل تشکیل شده است. یکی مبدل سمت روتور و دیگری مبدل سمت شبکه. این دو مبدل مستقل از هم کنترل می شوند. وظیفه مبدل سمت روتور، کنترل توان حقیقی و راکتیوی است که ژنراتور با شبکه مبادله می کند. در واقع به وسیله مبدل سمت روتور می توان سرعت ژنراتور را همگام با تغییرات سرعت باد به گونه ای تنظیم کرد که توان آئوردینامیکی منتقل شده به شفت توربین بیش ترین مقدار باشد. مبدل سمت شبکه ولتاژ لینک dc را کنترل می کند و همچنین می تواند برای تزریق توان راکتیو و کنترل ولتاژ نیز به کار رود. توان نامی هر یک از مبدل ها تقریباً ۳۰٪ توان نامی ژنراتور است و تغییرات سرعت روتور در بازه $\pm 20\%$ حول سرعت سنکرون است.

در توربین-ژنراتورهای بادی، شفت واسط توربین-ژنراتور نرم تر از ژنراتورهای سنتی است [۶]. از این رو سیستم مکانیکی باید به صورت حداقل دوجرمه مدل شود [۷-۸]. مدل مکانیکی تک جرمه نمی تواند نوسان های الکترومکانیکی و پیچشی شفت را پیش بینی کند. از نوسان های الکترومکانیکی مرتبط با سیستم مکانیکی چند جرمه به نوسان های پیچشی و الکترومکانیکی تعبیر می شود که وابسته به مودهای پیچشی سیستم مکانیکی است.



شکل ۱: توربین-ژنراتور DFIG تحت مطالعه

در یک سیستم قدرت دارای ژنراتورهای سنکرون سنتی، مسئله نوسان های الکترومکانیکی و میراسازی این نوسان ها مسئله اساسی در مطالعات دینامیک سیستم قدرت می باشد که مربوط به ماشین های سنکرون بوده و با استفاده از پایدارساز سیستم قدرت یا به کارگیری ادوات FACTS می توان میرایی این نوسان ها را افزایش داد [۹]. با اتصال توربین های بادی به شبکه قدرت، مسئله میرایی نوسان های پیچشی که مربوط به سیستم مکانیکی توربین های بادی است، نیز به مطالعات دینامیکی سیستم قدرت اضافه شده است. در شبکه های قدرت شامل تولیدات بادی، مطالعات دینامیکی انجام شده در مورد توربین های بادی DFIG شامل سه دسته زیر است: ۱- بهبود میرایی نوسان های بین ناحیه ای سیستم قدرت با استفاده از کنترل های کمکی DFIG [۱۰]، ۲- میرا کردن نوسانات مربوط به تشدید زیر سنکرون با استفاده از DFIG [۱۱]، ۳- بهبود میرایی نوسانات پیچشی مرتبط با توربین های بادی [۱۲، ۱۳].

در این مقاله هدف، تحلیل منشأ و علت پیدایش نوسان های پیچشی در سیستم تحت مطالعه شامل توربین بادی و بهبود میرایی این نوسان ها است. سیستم تحت مطالعه در واقع یک توربین-ژنراتور بادی ۷۱۰ کیلووات DFIG است، که در سایت بینالود نصب شده است. توضیح اینکه اندازه گیری ها و مشاهدات عینی از توربین بادی مذکور نشان داده که در سرعت های بالای باد، نوسان های پیچشی الکترومکانیکی با فرکانس ۲ هرتز در سیستم مکانیکی ظاهر می شود که باعث لرزش توربین می گردد.

در چندین مقاله و مرجع تاکنون به نوسان های الکترومکانیکی و پیچشی مرتبط با توربین های بادی پرداخته شده است. با توجه به این مقالات، نوسان های پیچشی در توربین های بادی به ۴ دلیل ظاهر می شود، که در زیر به آن اشاره می شود:

وقوع خطا در سیستم قدرت و تغییرات گذرای گشتاور الکتریکی ژنراتور از جمله دلایلی است که باعث تحریک مودهای پیچشی و الکترومکانیکی شده و در [۱۴-۱۶] به آن پرداخته شده است. وقوع پدیده تشدید زیر سنکرون در شبکه های جبران شده با خازن سری و ایجاد گشتاورهای الکتریکی نوسانی از دلایل دیگر ظهور نوسان های پیچشی فرکانس پایین مرتبط با توربین های بادی است که در [۱۷-۱۹] به آن پرداخته می شود. سیستم کنترل زاویه پره در توربین های بادی یک سیستم نسبتاً کند می شود، که پهنای باند فرکانسی آن نسبتاً کوچک است. تداخل بین پهنای باند سیستم کنترل زاویه پره و فرکانس نوسان های پیچشی نیز می تواند باعث تحریک نوسان های پیچشی در توربین های بادی شود که موضوع بحث [۲۰] است. تداخل بین دینامیک های پیچشی شفت و مدولاسیون توان همان طور که در [۲۱] اشاره شده است، یکی دیگر از عوامل وقوع نوسان های پیچشی شفت مرتبط با توربین های بادی است. روش هایی نیز برای بهبود میرایی نوسان های پیچشی در سیستم های دارای توربین های بادی در [۱۶، ۲۲-۲۴] پیشنهاد شده است.

$$T_e = \frac{L_m}{L_s} (\psi_{sq} i_{rd} - \psi_{sd} i_{rq}) \quad (5)$$

۲-۱- مدل سازی دینامیکی و کنترل جریان روتور

نمایش مطلوب برای بیان معادلات ماشین در مقاصد کنترلی، بیان معادلات حالت بر حسب متغیرهای شار استاتور و جریان روتور است. نویسندگان در مرجع [۲۷] معادلات دینامیکی روتور و نحوه طراحی کنترل کننده جریان روتور را به طور کامل استخراج کرده و به اختصار در زیر آورده می شود. معادلات دینامیکی روتور که مناسب برای مقاصد کنترلی می باشند، در دستگاه مرجع سنکرون به صورت زیر هستند.

$$v_{rd} = R'_r i_{rd} + \frac{L'_r}{\omega_b} \frac{di_{rd}}{dt} - \omega_2 L'_r i_{rq} + e_d \quad (6)$$

$$v_{rq} = R'_r i_{rq} + \frac{L'_r}{\omega_b} \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_2 L'_r i_{rd} + e_q \quad (7)$$

که R'_r و L'_r در (۶) و (۷) مقاومت اهمی و اندوکتانس گذرای روتور بوده و عبارت اند از: $R'_r = R_r + \left(\frac{L_m}{L_s}\right)^2 R_s$ و $L'_r = L_r - \frac{L_m^2}{L_s}$. همچنین e_d و e_q مؤلفه های d و q ولتاژهای ضدمحرکه روتور بوده و عبارت اند از:

$$e_{dq} = \frac{L_m}{L_s} \left(v_{sdq} - \frac{R_s}{L_s} \psi_{sdq} - j \omega_r \psi_{sdq} \right) \quad (8)$$

با توجه به رابطه (۸) ولتاژهای ضدمحرکه روتور تابعی از ولتاژ و شار استاتور بوده و درواقع اثر دینامیک استاتور را بر روی روتور منعکس می کنند.

روابط (۶) و (۷) دینامیک های dq کنترل جریان روتور را توصیف می کنند. v_{rd} و v_{rq} ولتاژهای کنترلی روتور بوده و مقدار آن ها توسط کنترل کننده های جریان روتور تعیین می شود. با جبران مؤلفه های تزویجی $-\omega_2 L'_r i_{rq}$ و $\omega_2 L'_r i_{rd}$ توسط ترم های پیش خور، حلقه های dq کنترل جریان از هم جدا و مستقل خواهد شد. شکل ۲ حلقه های d و q کنترل جریان روتور را نشان می دهد.

اگر ضرایب کنترل کننده PI طوری انتخاب شود که رابطه $\frac{k_{i-idq}}{k_{p-idq}} = \frac{R'_r}{L'_r} \omega_b$ برقرار باشد، قطب $s_0 = -\frac{R'_r}{L'_r} \omega_b$ به وسیله صفر کنترل کننده PI حذف خواهد شد و خواهیم داشت:

$$G_{cl_idq} = \frac{I_{rdq}(s)}{I_{rdq-ref}(s)} = \frac{\alpha_I}{(s + \alpha_I)} \quad (9)$$

که $\alpha_I = \frac{k_{p-idq} \omega_b}{L'_r}$ پهنای باند حلقه بسته کنترل جریان روتور می باشد.

در مقاله حاضر به تحلیل پایداری دینامیک های مکانیکی، استخراج مودهای پیچشی و بهبود میرایی نوسان های پیچشی در سیستم تحت مطالعه، در نقاط مختلف از منحنی توان-سرعت پرداخته می شود. به عنوان نوآوری اصلی، در این مقاله با نگاهی متفاوت از مقالات مرتبط در این زمینه، علت پیدایش نوسان های پیچشی در سیستم تحت مطالعه، مشخصه توان-سرعت مختص توربین در سرعت های بالای باد تشخیص داده می شود. به عبارت دیگر تحلیل های انجام شده نشان می دهد که در بعضی نواحی از منحنی توان-سرعت، که متناظر با سرعت های بالای باد است، سیستم کنترل نمی تواند میرایی مناسب را برای مودهای پیچشی و الکترومکانیکی فراهم کند و لذا باعث ظاهر شدن نوسانات با فرکانس پایین (حدوداً ۲ هرتز) در پاسخ توان، سرعت و گشتاور ژنراتور می شود. بنابراین برخلاف مراجع ذکر شده در این زمینه ظهور نوسان های پیچشی هیچکدام از دلیل های چهارگانه ذکر شده در مراجع (تحرک در اثر خطا، پدیده تشدید زیر سنکرون، سیستم زاویه پره یا مدولاسیون توان) نبوده بلکه به دلیل مشخصه توان-سرعت توربین مختص توربین است. برای اثبات این امر مودهای الکترومکانیکی سیستم تحت شرایط بهره برداری و سرعت های مختلف باد استخراج گردیده و نشان داده شده که در بعضی از سرعت های باد که متناظر با نواحی خاص از منحنی توان-سرعت است، نسبت میرایی مودهای پیچشی بسیار ضعیف می باشد که باعث ظاهر شدن نوسانات با فرکانس پایین (حدوداً ۲ هرتز) می گردد. در ادامه برای بهبود میرایی مودهای پیچشی، یک کنترل کننده کمکی پایدارساز به نام پایدارساز نوسانات پیچشی پیشنهاد شده است. در پایان نتایج شبیه سازی برای سیستم تحت مطالعه آورده می شود.

۲-۲ مدل سازی سیستم تحت مطالعه

در این قسمت هدف مدل سازی دینامیکی سیستم با فرض های زیر است:

۱- مدل سازی سیستم در دستگاه چرخان سنکرون dq و به صورت یکایی (پریونیت) می باشد.

۲- جهت های مثبت جریان های سیم پیچ های روتور و استاتور به طرف داخل ماشین فرض می شود.

روابط ولتاژ، شار استاتور و روتور و گشتاور در یک ماشین القایی دوسو تغذیه در دستگاه چرخان dq در مقالات متعدد از جمله در [۲۵-۲۶] آمده که به فرم زیر می باشد:

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

$$v_{rdq} = R_r i_{rdq} + j \omega_2 \psi_{rdq} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{rdq}}{dt} \quad (2)$$

$$\psi_{sdq} = L_s i_{sdq} + L_m i_{rdq} \quad (3)$$

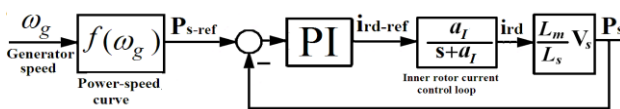
$$\psi_{rdq} = L_r i_{rdq} + L_m i_{sdq} \quad (4)$$

شود، در این صورت قطب α_I توسط صفر کنترل کننده حذف خواهد شد و لذا تابع تبدیل حلقه باز سیستم کنترل توان به صورت رابطه زیر در می آید:

$$F_O(s) = \frac{L_m}{L_s} \frac{k_p V_s \alpha_I}{s} \quad (12)$$

با تعریف $\alpha_p = k_p \frac{L_m}{L_s} V_s \alpha_I$ تابع تبدیل حلقه خارجی کنترل توان، یک سیستم مرتبه اول می باشد که دارای پهنای باند α_p است. در این صورت خواهیم داشت:

$$\frac{P_s}{P_s^*} = \frac{\alpha_p}{s + \alpha_p} \quad (13)$$



شکل ۳: حلقه کنترل توان حقیقی استاتور

به این ترتیب α_p پارامتر طراحی است و معمولاً کسری از α_I (پهنای باند حلقه داخلی) انتخاب می شود. به عبارت دیگر با تعیین α_I و انتخاب α_p می توان k_p و k_i را به صورت زیر به دست آورد:

$$k_p = \left(\frac{\alpha_p}{\alpha_I}\right) \cdot \left(\frac{L_s}{L_m}\right) \cdot \left(\frac{1}{V_s}\right) \quad (14)$$

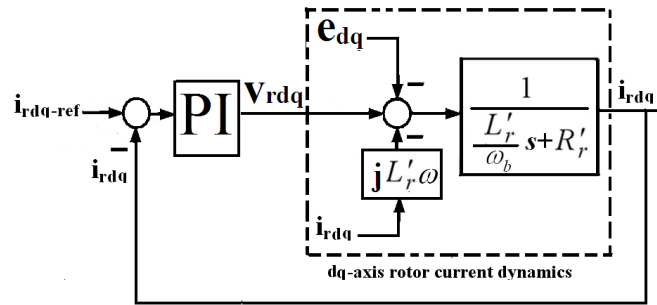
$$k_i = k_p \cdot \alpha_I$$

۳- سیستم تحت مطالعه

در شکل ۱ دیاگرام کلی سیستم تحت مطالعه ارائه شده است. شکل ۱ یک توربین-ژنراتور ۷۱۰ کیلووات DFIG را نشان می دهد که در سایت بینالود نصب شده است. ژنراتور این سیستم از نوع ژنراتور القایی روتور سیم پیچی شده است که دارای توان نامی ۶۶۰ کیلووات تحت ولتاژ ۶۹۰ ولت با فرکانس ۵۰ هرتز می باشد. سیستم به یک شبکه ۲۰ کیلو ولت از طریق کابل و ترانسفورماتور واسط متصل شده است. مبدا سمت شبکه توسط یک فیلتر و ترانسفورماتور به استاتور وصل شده و مبدل سمت روتور نیز به سیم پیچی روتور متصل می شود. شفت سرعت پایین توربین از طریق یک جعبه دنده با نسبت تبدیل ۵۲/۷ به شفت سرعت بالای ژنراتور متصل شده است.

۳-۱- منحنی توان-سرعت

در سیستم تحت مطالعه عمل کنترل توان بر اساس یک منحنی توان-سرعت از پیش تعیین شده صورت می گیرد. این منحنی توسط کارخانه های سازنده توربین بر اساس ویژگی های آئرو دینامیکی پره و توربین، ملاحظات کنترلی ژنراتور و تغییرات سرعت باد، چگالی هوا و غیره ارائه می شود و به صورت یک جدول جستجو در سیستم کنترل برنامه ریزی می شود. این منحنی نواحی عملکرد توربین در توان های



شکل ۲: حلقه های d و q کنترل جریان روتور

۲-۲- کنترل توان حقیقی

در صورتی که کنترل برداری مبدل سمت روتور در DFIG با جهت یابی ولتاژ استاتور انجام گیرد، می توان با کنترل جریان محور d روتور (i_{rd}) توان حقیقی و گشتاور الکترومکانیکی را کنترل کرد. توان حقیقی تزریق شده به شبکه توسط استاتور (در مقیاس پریونیت) از رابطه زیر به دست می آید:

$$P_s = -\text{Re}[(v_{sd} + jv_{sq})(i_{sd} - ji_{sq})] \quad (10)$$

در حالت کنترل برداری با جهت یابی ولتاژ استاتور داریم: $v_{sd} \approx V_s$ و $v_{sq} = 0$ و با جایگذاری این روابط در رابطه (۱۰) و مرتب کردن معادله بر حسب ولتاژ استاتور و جریان روتور خواهیم داشت:

$$P_s = \frac{L_m}{L_s} V_s \cdot i_{rd} \quad (11)$$

که V_s در رابطه فوق دامنه ولتاژ استاتور است. با توجه به رابطه (۱۱) i_{rd} مؤلفه توان حقیقی جریان روتور بوده که وظیفه آن کنترل توان حقیقی ژنراتور است. به وسیله حلقه خارجی، توان حقیقی اندازه گیری شده ژنراتور با توان حقیقی مرجع مقایسه شده و سیگنال خطای توان استخراج می شود. با عبور سیگنال خطای توان از کنترل کننده PI، جریان مرجع روتور (که مسئول کنترل توان حقیقی می باشد) تولید می شود. شکل (۳) حلقه خارجی کنترل توان حقیقی را نشان می دهد. همان طور که از شکل ۳ واضح است، توان حقیقی مرجع استاتور بر اساس منحنی توان-سرعت توربین استخراج می شود. کارخانه های سازنده توربین-ژنراتورهای سرعت متغیر یک منحنی توان-سرعت برای توربین ارائه می دهند. برای مقاصد کنترلی، منحنی توان-سرعت توربین را در یک جدول جستجو ذخیره می کنند. برای استخراج توان حقیقی مرجع، سرعت ژنراتور به عنوان ورودی وارد جدول جستجو می شود. خروجی جدول جستجو همان توان حقیقی مرجع استاتور یا ژنراتور است.

در شکل ۳، $\frac{\alpha_I}{s + \alpha_I}$ تابع تبدیل حلقه داخلی کنترل جریان روتور می باشد. فرض کنید که تابع تبدیل کنترل کننده PI توان به صورت $k(s) = k_p + \frac{k_i}{s}$ باشد. اگر $\frac{k_i}{k_p}$ را چنان انتخاب کنیم که

در رابطه (۱۷)، R شعاع پره‌های توربین، ω سرعت زاویه‌ای چرخش روتور توربین و V_w سرعت باد است.

۴- مدل مکانیکی توربین-ژنراتور و تحلیل پایداری

ثابت فنری شفت در توربین-ژنراتورهای بادی ۳۰ تا ۱۰۰ برابر کوچک‌تر از ثابت فنری شفت توربین-ژنراتورهای سنکرون سنتی است. به همین دلیل برای مدل‌سازی سیستم مکانیکی از مدل صلب یا تک جرمه استفاده نمی‌شود، بلکه از مدل چندجرمه استفاده می‌شود. به دلیل اینکه مدل دوجرمه با دقت مناسبی رفتار سیستم مکانیکی را تبیین می‌کند در این مقاله از مدل دوجرمه برای مدل‌سازی سیستم مکانیکی استفاده شده است. معادلات سیستم مکانیکی دوجرمه برای توربین‌های بادی در [۲۸] آمده است. معادلات خطی شده سیستم مکانیکی دوجرمه به صورت زیر است:

$$2H_g \frac{d\Delta\omega_g}{dt} = k\Delta\theta + D(\Delta\omega_t - \Delta\omega_g) - |\Delta T_e| \quad (18)$$

$$\frac{d\Delta\theta}{dt} = \omega_b(\Delta\omega_t - \Delta\omega_g) \quad (19)$$

$$2H_t \frac{d\Delta\omega_t}{dt} = \Delta T_m - k\Delta\theta - D(\Delta\omega_t - \Delta\omega_g) \quad (20)$$

که در این روابط H_g و H_t ثابت اینرسی ژنراتور و توربین، ω_g و ω_t سرعت زاویه‌ای چرخش ژنراتور و توربین، T_e و T_t گشتاور الکترومکانیکی ژنراتور و توربین، k ثابت فنری معادل شفت توربین-ژنراتور، D میرایی شفت و θ جابه‌جایی زاویه‌ای بین دو انتهای شفت است.

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_t} \quad (21)$$

برای تحلیل پایداری لازم است که روابط (۲۱-۱۹) را به فرم معادله حالت $\dot{x} = Ax + Bu$ در آورد. در این صورت:

$$\Delta\dot{\omega}_g = \frac{d\Delta\omega_g}{dt} = \frac{1}{2H_g}k\Delta\theta + \frac{1}{2H_g}D(\Delta\omega_t - \Delta\omega_g) - \frac{1}{2H_g}|\Delta T_e| \quad (22)$$

$$\Delta\dot{\theta} = \frac{d\Delta\theta}{dt} = \omega_b(\Delta\omega_t - \Delta\omega_g) \quad (23)$$

$$\Delta\dot{\omega}_t = \frac{d\Delta\omega_t}{dt} = \frac{1}{2H_t}\Delta T_m - \frac{1}{2H_t}k\Delta\theta - \frac{1}{2H_t}D(\Delta\omega_t - \Delta\omega_g) \quad (24)$$

در ادامه می‌بایست معادلات بالا بسط داده شود تا به نتایج موردنظر رسید. با صرف نظر از تلفات ماشین، اگر P_e توان الکتریکی خروجی ژنراتور باشد، گشتاور الکترومکانیکی ژنراتور از رابطه زیر به دست می‌آید:

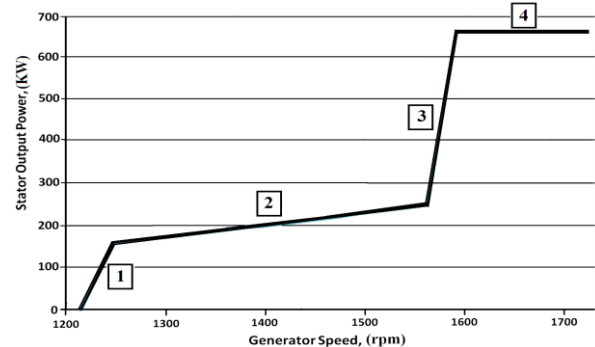
مختلف را نشان می‌دهد و شامل ۴ ناحیه است. این منحنی برای سیستم تحت مطالعه به صورت شکل ۴ بوده که به شرح زیر است:

الف- ناحیه ۱ یا ناحیه سرعت پایین: در این ناحیه سرعت باد پایین بوده و به علت محدودیت سرعت پایین ژنراتور، توربین در ضریب بازدهی بهینه کار نمی‌کند.

ب- ناحیه ۲ یا ناحیه ردیابی توان ماکزیمم: در سرعت‌های میانی و متوسط باد توربین در ضریب بازدهی بهینه کار می‌کند. یعنی به ازای هر سرعت مشخص باد توربین در سرعتی می‌چرخد، که ضریب بازدهی بهینه و در نتیجه توان ماکزیمم حاصل شود.

ج- ناحیه سوم یا ناحیه کار سرعت ثابت: در این ناحیه سرعت ژنراتور تقریباً ثابت بوده و به همین دلیل به آن ناحیه سرعت ثابت می‌گویند. البته در عمل برای جلوگیری از تغییرات شدید توان (به ازای تغییرات اندک سرعت) این ناحیه اندکی شیب‌دار است و سرعت در آن دقیقاً ثابت نیست. توربین در ضریب بازدهی بهینه کار نمی‌کند.

د- ناحیه چهارم یا ناحیه کار توان ثابت: در این ناحیه توان خروجی ژنراتور ثابت بوده و تلاش می‌شود تا با استفاده از کنترل زاویه پره سرعت ژنراتور را به سرعت نامی محدود کنیم.



شکل ۴: منحنی توان-سرعت برای سیستم تحت مطالعه

۳-۲- مشخصات آئرودینامیک پره‌های توربین

سیستم آئرودینامیکی روتور توربین، میزان توان که توسط باد به شفت توربین منتقل می‌شود را مشخص می‌کند. رابطه (۱۵) ارتباط بین توان باد و توان مکانیکی منتقل شده به شفت در توربین بادی را نشان می‌دهد [۶]:

$$P_m = C_p(\lambda, \beta) \cdot P_w \quad (15)$$

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v_w^3 \quad (16)$$

در P_w در (۱۶) توان در دسترس باد بوده و $C_p(\lambda, \beta)$ در (۱۵) ضریب بازدهی توربین نامیده می‌شود که مقدار آن در ضمیمه آورده شده است و بر حسب نرخ سرعت نوک (λ) و زاویه پره بیان می‌شود. نرخ سرعت نوک از رابطه (۱۷) به دست می‌آید [۶].

$$\lambda = \frac{R\omega_t}{V_w} \quad (17)$$

$$\Delta T_e = \Delta P_s = \frac{\partial P_s}{\partial \omega_g} \Delta \omega_g = M \Delta \omega_g \quad (29)$$

در ادامه با خطی سازی روابط (۱۵) و (۲۱) داریم:

$$\Delta P_m = \frac{\partial P_m}{\partial \omega_t} \Delta \omega_t = P_w \frac{dC_p}{d\omega_t} \Delta \omega_t = \left(\frac{P_{m0}}{C_{p0}} \cdot \frac{dC_p}{d\omega_t} \right) \Delta \omega_t \quad (30)$$

$$\Delta T_m = -\frac{P_{m0}}{\omega_{t0}^2} \Delta \omega_t + \frac{\Delta P_m}{\omega_{t0}} \quad (31)$$

با قرار دادن رابطه (۳۰) در (۳۱)، به رابطه (۳۲) می‌رسیم.

$$\Delta T_m = \left(-\frac{P_{m0}}{\omega_{t0}^2} + \frac{P_{m0}}{\omega_{t0} C_{p0}} \cdot \frac{dC_p}{d\omega_t} \right) \Delta \omega_t \quad (32)$$

در رابطه (۳۲)، مقدار $\frac{dC_p}{d\omega_t}$ از رابطه (۳۳) به دست می‌آید، یعنی:

$$\frac{dC_p}{d\omega_t} = \frac{dC_p}{d\lambda} \cdot \frac{d\lambda}{d\omega_t} = \frac{dC_p}{d\lambda} \cdot \frac{R}{V_w} \quad (33)$$

برای به دست آوردن مقدار $\frac{dC_p}{d\lambda}$ در رابطه (۳۳)، باید از رابطه

$C_p(\lambda, \beta)$ (در قسمت پیوست) مشتق گرفت. در نهایت روابط (۲۴)–(۲۲) به فرم معادلات حالت زیر در می‌آید:

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta \omega_g} \\ \dot{\Delta \theta} \\ \dot{\Delta \omega_t} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{-M-D}{2H_g} & \frac{k}{2H_g} & \frac{D}{2H_g} \\ -\omega_b & 0 & \omega_b \\ \frac{D}{2H_t} & -\frac{k}{2H_t} & \frac{1}{2H_t}(\Delta T_m - D) \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} \Delta \omega_g \\ \Delta \theta \\ \Delta \omega_t \end{bmatrix} \quad (34)$$

در ماتریس فوق مقدار M برابر با $\frac{\partial P_s}{\partial \omega_g}$ بوده، وابسته به منحنی

توان-سرعت بوده و از رابطه (۲۸) به دست می‌آید. مقدار D میرایی سیستم و k هم ثابت فنی است. همچنین مقدار ΔT_m از روابط (۳۲) و (۳۳) محاسبه می‌شود.

۴-۱- تحلیل سیگنال کوچک

در این بخش، مقادیر ویژه سیستم بر مبنای معادلات حالت (۳۴) استخراج می‌گردد. ماتریس معادلات حالت (۳۴) که به فرم $\dot{X} = AX$ است، مربوط به سیستم مکانیکی دوجرمه با متغیرهای حالت $X = [\Delta \omega_g \quad \Delta \theta \quad \Delta \omega_t]^T$ می‌باشد. بنابراین مقادیر ویژه استخراج شده نیز کاملاً مرتبط با متغیرهای حالت مکانیکی می‌باشد. با استفاده از رابطه (۳۴) مقادیر ویژه سیستم را به ازای نواحی مختلفی از کارکرد ژنراتور (نواحی ۱، ۲، ۳ و ۴ از منحنی توان-سرعت در شکل ۴ به دست آورده و به بررسی پایداری سیستم از روی مقادیر ویژه پرداخته می‌شود که نتایج در جدول ۱ آورده شده است. همان‌طور که در جدول ۱ آورده شده است، سرعت باد ۶ متربرثانیه متناظر با ناحیه ۱ از منحنی توان سرعت، سرعت باد ۸ متربرثانیه متناظر با ناحیه ۲،

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_g} \quad (25)$$

می‌توان نشان داد که در ماشین القایی دوسو تغذیه با صرف نظر از تلفات مس، ارتباط توان خروجی استاتور P_s و توان خروجی ژنراتور P_e به صورت $P_e = P_s(1-s)$ است، که s لغزش ژنراتور بوده و عبارت است از: $s = 1 - \omega_g$ که ω_g سرعت ژنراتور بر حسب پریونیت است. با توجه به توضیحات فوق و رابطه (۲۵) خواهیم داشت:

$$T_e \cong P_s \quad (26)$$

که T_e و P_s مقادیر گشتاور ژنراتور و توان استاتور بر حسب پریونیت می‌باشند.

رابطه (۲۶) نشان می‌دهد که در مقیاس پریونیت و در حالت ماندگار توان استاتور با گشتاور الکتریکی ژنراتور برابر است.

اگر فرض کنیم که دینامیک حلقه کنترل توان حقیقی (که یک دینامیک الکتریکی است)، نسبت به دینامیک‌های مکانیکی به اندازه کافی سریع تر باشد، در این صورت برای تحلیل و بررسی دینامیک‌های مکانیکی می‌توان از دینامیک کنترل کننده PI توان حقیقی صرف نظر کرد و توان حقیقی اندازه گیری شده را برابر با مقدار مرجع آن در نظر گرفت؛ یعنی: $P_s \approx P_{s-ref}$. با این وصف می‌توان از روی منحنی توان سرعت شکل ۴، مستقیماً توان حقیقی P_s به صورت تابعی از سرعت بیان کرد.

همان‌طور که اشاره شد، منحنی توان-سرعت (شکل ۴)، دارای ۴ ناحیه مختلف است. به عبارت دیگر ژنراتور دارای نواحی کارکرد متفاوتی است. هر کدام از این نواحی (که بر روی شکل شماره گذاری شده) را با یک معادله خط تقریب زده که روابط حاکم بر این ۴ ناحیه به صورت زیر است:

$$P_s = \begin{cases} 10.15\omega_g - 8.2 & 1215 \leq \omega_g \leq 1248 \\ 0.65\omega_g - 0.335 & 1248 \leq \omega_g \leq 1560 \\ 28.95\omega_g - 29.75 & 1560 \leq \omega_g \leq 1590 \\ 0.929 & \omega_g \geq 1590 \end{cases} \quad (27)$$

با استفاده از روابط (۲۶) و (۲۷) و با استفاده از خطی سازی، رابطه گشتاور خطی شده بر حسب سرعت در نواحی مختلف منحنی توان-سرعت به صورت رابطه (۲۸) است.

$$\Delta T_e = \Delta P_s = \frac{\partial P_s}{\partial \omega_g} \Delta \omega_g = \begin{cases} 10.15 \Delta \omega_g & 1215 \leq \omega_g \leq 1248 \\ 0.65 \Delta \omega_g & 1248 \leq \omega_g \leq 1560 \\ 28.95 \Delta \omega_g & 1560 \leq \omega_g \leq 1590 \\ 0 & \omega_g \geq 1590 \end{cases} \quad (28)$$

برای سهولت در ساده سازی روابط، مقدار $\frac{\partial P_s}{\partial \omega_g}$ برابر با M قرار داده می‌شود و داریم:

معنای این است که در نواحی ۱ و ۳ سیستم کنترل میرایی مناسب برای مدهای پیچشی فراهم می‌نماید. در ادامه جهت راستی‌آزمایی تحلیل سیگنال کوچک انجام شده، سیستم تحت مطالعه را شبیه‌سازی می‌کنیم.

۴-۲- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

شکل ۵ شبیه‌سازی سیستم تحت مطالعه را برای سرعت‌های باد ۶، ۸، ۱۰، ۱۳ و ۱۶ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. با توجه به نمودارهای شکل ۵ مشاهده می‌شود که به ازای سرعت‌های ۶ و ۱۰ متر بر ثانیه که متناظر با نواحی ۱ و ۳ از ناحیه توان سرعت است، در پاسخ‌ها نوسان‌های پیچشی مشاهده نمی‌شود ولی برای سرعت‌های باد ۱۳ و ۱۶ متر بر ثانیه که مربوط به ناحیه ۴ از منحنی توان-سرعت می‌باشد، نوسان‌هایی با دامنه محسوس در پاسخ سرعت و توان ژنراتور ظاهر می‌شود. فرکانس این نوسانات حدود ۲ هرتز بوده که با نتایج تحلیل سیگنال کوچک و تحلیل مودال همخوانی دارد. حتی در ناحیه ۴، با افزایش سرعت باد از ۱۳ متر بر ثانیه به ۱۶ متر بر ثانیه دامنه نوسانات توان بیش‌تر هم شده است. نتیجه اینکه به ازای عملکرد در ناحیه ۴ از منحنی توان-سرعت، نوساناتی از نوع نوسانات الکترومکانیکی و پیچشی در پاسخ‌ها ظاهر می‌شود که سیستم کنترل نمی‌تواند میرایی مناسب را برای این مدها فراهم کند. در تحلیل سیگنال کوچک هم بررسی شد که مدهای نوسانی سیستم در این ناحیه از میرایی بسیار کمی برخوردار است و لذا نوساناتی با فرکانس حدود ۲ هرتز در پاسخ سیستم ظاهر می‌شود. اکنون می‌بایست میرایی نوسانات پیچشی را بهبود داد. مناسب‌ترین راه مؤثر برای پایداری و بهبود میرایی نوسانات پیچشی سیستم استفاده از پایدارساز نوسانات پیچشی (TOS) است.

۵- پایدارساز نوسانات پیچشی

سیستم مکانیکی به‌صورت دوجرمه در حالت حلقه باز دارای مدهای نوسانی تحت عنوان مدهای پیچشی است. در قسمت قبل نشان داده شد که فرکانس مدهای نوسانی پیچشی مربوط به سیستم مکانیکی در بعضی از نقاط کار و شرایط بهره‌برداری می‌تواند در خروجی سیستم ظاهر شود و در این صورت اثر نامطلوب خود را روی پاسخ توان، سرعت و گشتاور نشان دهد. تحلیل‌های بخش قبل نشان داد که به ازای ناحیه عملکرد ۴ از منحنی توان-سرعت، مدهای نوسانی پیچشی اثر خود را در پاسخ سیستم حلقه بسته نشان می‌دهد و سیستم کنترل نمی‌تواند میرایی مناسب را برای این مدها فراهم کند. در این بخش یک پایدارساز کمکی بنام پایدارساز نوسانات پیچشی معرفی می‌شود که نقش اصلی آن، افزودن میرایی به نوسان‌های روتور ژنراتور با استفاده از سیگنال‌های کمکی است. برای فراهم آوردن میرایی، باید پایدارساز، یک مؤلفه گشتاور الکتریکی را هم‌فاز با تغییرات سرعت روتور ایجاد کند. یعنی:

$$\Delta T_{TOS} = k_D \cdot \Delta \omega_g \quad (35)$$

سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه متناظر با ناحیه ۳ و سرعت‌های باد ۱۳ متر بر ثانیه و ۱۶ متر بر ثانیه متناظر با ناحیه ۴ از منحنی توان-سرعت است که برای این سرعت‌های باد، مقادیر ویژه و نسبت میرایی سیستم را به دست آورده و از روی آن به تحلیل پایداری سیستم پرداخته می‌شود. به مقادیر ویژه نوسانی مرتبط با معادلات حالت سیستم مکانیکی، مدهای الکترومکانیکی پیچشی سیستم گفته می‌شود. در جدول ۱ مقادیر ویژه $\lambda_{1,2}$ مدهای نوسانی متناظر با سیستم مکانیکی است که از آن به‌عنوان مدهای پیچشی یاد می‌شود. با توجه به مقادیر جدول ۱ فرکانس مدهای مکانیکی نوسانی در نواحی ۲ و ۴ حدود ۲ هرتز می‌باشد. به‌علاوه نسبت میرایی این مدهای پیچشی نوسانی در ناحیه ۴ برابر 0.061 بوده که بسیار کوچک می‌باشد. ضعیف بودن میرایی مدهای پیچشی در ناحیه ۴ به این معنا است که سیستم کنترل نمی‌تواند میرایی مناسب را برای این مدها فراهم کند و این امر همان‌طور که در شبیه‌سازی‌ها نشان داده خواهد شد باعث ظاهر شدن نوسانات با فرکانس ۲ هرتز در سرعت و توان ژنراتور می‌شود، که می‌تواند نامطلوب باشد.

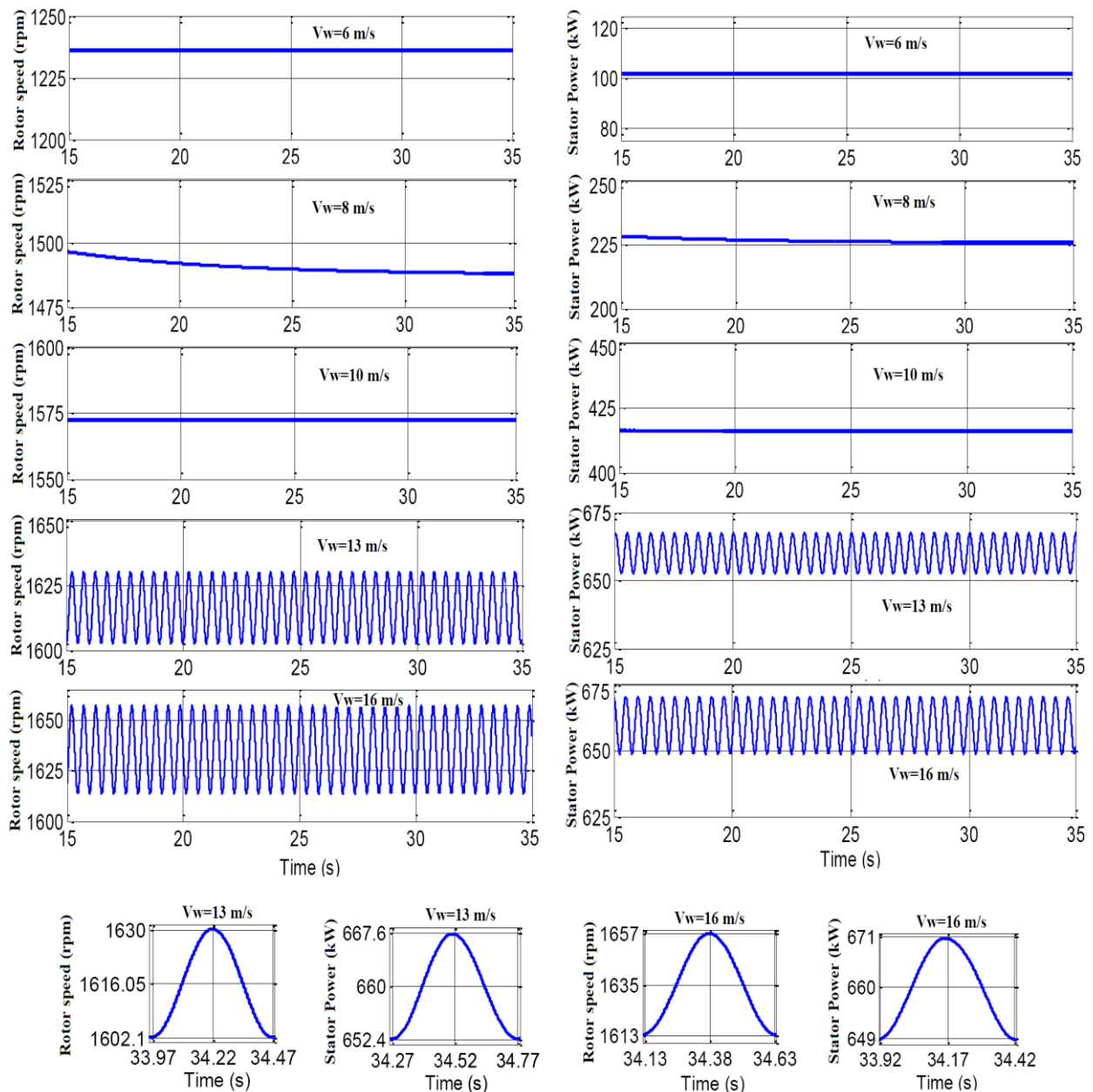
جدول ۱: مقادیر ویژه مربوط به مدهای مکانیکی سیستم

سرعت باد (متر بر ثانیه)	فرکانس (هرتز)	مقادیر ویژه مدهای نوسانی $\lambda_{1,2}$ مود نمایی λ_3 میراشونده	نسبت میرایی	نوع نوسان
۶	۱	$\lambda_{1,2} = -4.7 \pm j11.49$ $\lambda_3 = -1.37$	۱/۸۳	۰/۳۸۱
۸	۲	$\lambda_{1,2} = -1.048 \pm j12.8$ $\lambda_3 = -0.1276$	۲/۰۳۸	۰/۰۸۱۵
۱۰	۳	$\lambda_{1,2} = -3.42 \pm j4.1$ $\lambda_3 = -21.14$	۰/۶۵	۰/۶۴۱
۱۳	۴	$\lambda_{1,2} = -0.79 \pm j12.83$ $\lambda_3 = -0.0476$	۲/۰۴۱	۰/۰۶۲
۱۶	۴	$\lambda_{1,2} = -0.79 \pm j12.83$ $\lambda_3 = -0.0163$	۲/۰۴۶	۰/۰۶۱

توضیح اینکه فرکانس نوسان‌های پیچشی سیستم مکانیکی توربین-ژنراتور در حالت حلقه باز از رابطه

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k(H_g + H_t)}{2H_g H_t}} \omega_b$$

تحت مطالعه با پارامترهای پیوست این مقدار حدود ۲ هرتز است. لذا در نواحی ۲ و ۴ به دلیل اینکه سیستم کنترل نمی‌تواند میرایی مناسب را فراهم کند، نوسان‌های مدهای پیچشی با میرایی ضعیف در پاسخ سیستم ظاهر می‌شود. برعکس در نواحی ۱ و ۳ میرایی مدهای مکانیکی مناسب بوده و به‌خصوص در ناحیه سوم نسبت میرایی مدهای مکانیکی چشمگیر بوده و بنابراین همان‌طور که در شبیه‌سازی‌ها نشان داده خواهد شد، نوسان‌های پیچشی به ازای عملکرد در نواحی ۱ و ۳ در خروجی سیستم ظاهر نمی‌گردد. این به



شکل ۵: نمودار توان کل و سرعت ژنراتور به ازای سرعت های مختلف باد

را ۲۰ رادیان بر ثانیه در نظر گرفته ایم تا از عبور فرکانس های بالاتر از ۲۰ رادیان بر ثانیه اجتناب شود. به عبارت دیگر پایداری در قبال فرکانس های بالاتر از ۲۰ رادیان بر ثانیه واکنش نمی دهد.

در سرعت های بالای باد توربین در ناحیه چهارم از منحنی توان-سرعت کار می کند و همان طور که گفته شد، سیستم کنترل نمی تواند میرایی کافی را برای مودهای پیچشی در این ناحیه فراهم کند. بنابراین ضریب بهره تناسبی k_D نیز چنان انتخاب شده تا در سرعت های بالای باد (مثلاً ۱۳ متر بر ثانیه)، نسبت میرایی مودهای الکترومکانیکی بیش تر از ۰/۵ گردد و بر این اساس مقدار k_D برابر با ۱۵ انتخاب شده است.

شکل ۶ بلوک دیگرام کنترل توان ژنراتور را با لحاظ کردن پایداری نوسانات پیچشی (بلوک TOS در شکل ۶) نشان می دهد. همچنین اجزاء بلوک پایداری نوسانات پیچشی در شکل ۷ نشان داده شده است. کنترل کننده TOS دارای سه بلوک است: بلوک مربوط به فیلتر پایین گذر، بلوک مربوط به فیلتر بالا گذر و بهره تناسبی k_D . پایداری در شرایط کار عادی که سیستم فاقد نوسان های پیچشی است، نباید عمل کند. لذا از یک فیلتر بالا گذر با فرکانس قطع ۳/۳ رادیان بر ثانیه در ساختار پایداری استفاده شده تا چنانچه نوسان های فرکانس پایین با فرکانس حدود ۲ هرتز در سرعت ژنراتور ظاهر شد، این فرکانس ها از فیلتر عبور کند و به این وسیله پایداری میرایی نوسان های فرکانس پایین حدود ۲ هرتز را می افزاید. همچنین در ساختار پایداری یک فیلتر پایین گذر نیز وجود دارد و در اینجا فرکانس قطع فیلتر پایین گذر

جدول ۲: مقادیر ویژه سیستم با وجود میرا کننده نوسانات پیچشی

سرعت باد (متر بر ثانیه)	ناحیه عملکرد از منحنی توان - سرعت	مقادیر ویژه	فرکانس طبیعی نامیرایی مود نوسانی (هرتز)	نسبت میرایی با وجود TOS
۶	۱	$-4.39 \pm j3.7$ -15.7	۰/۹۱۴	۰/۷۶۵
۸	۲	$-6.73 \pm j9.56$ -2.38	۱/۸۶	۰/۵۷۵
۱۰	۳	-37.5 $-2.03 \pm j4.47$	۰/۷۸۱	۰/۴۱۳
۱۳	۴	$-6.5 \pm j9.86$ -2.24	۱/۸۸	۰/۵۵
۱۶	۴	$-6.5 \pm j9.85$ -2.21	۱/۸۷۹	۰/۵۵۱

در نواحی ۱، ۲ و ۴ نسبت میرایی به میزان چشم گیری افزایش یافته است و در ناحیه ۳ نسبت میرایی اندکی کاهش یافته ولی این میزان کاهش، تأثیری بر پاسخ سیستم نخواهد داشت.

۵-۲- شبیه سازی با وجود پایدار ساز نوسانات پیچشی

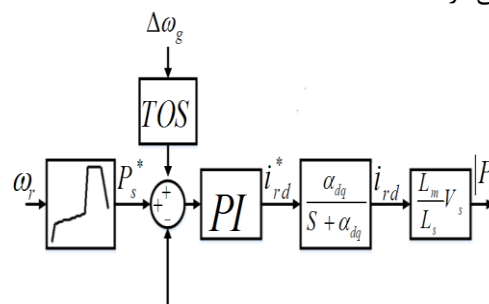
اکنون سیستم تحت مطالعه را با حضور TOS در سرعت های باد ۶، ۸، ۱۰، ۱۳ و ۱۶ متر بر ثانیه شبیه سازی می کنیم تا درستی نتایج تحلیل سیگنال کوچک به وسیله شبیه سازی آزموده شود. به ازای سرعت های باد ۶، ۸ و ۱۰ متر بر ثانیه حتی بدون TOS نیز پاسخ ها از میرایی مناسبی برخوردارند و اصولاً نوسان های پیچشی در این سرعت ها در پاسخ سیستم ظاهر نمی شود. از مقایسه شکل های ۵ و ۸، تأثیر پایدار ساز TOS در سرعت های باد ۱۳ و ۱۶ متر بر ثانیه بسیار مشهود است. همان طور که از شکل ۸ مشاهده می شود، با وجود TOS در مقایسه با شکل ۵ میرایی نوسان های پاسخ ها در سرعت های ۱۳ و ۱۶ متر بر ثانیه به نحوه چشم گیری بهبود یافته است، که این تأیید کننده تأثیر مثبت پایدار است.

نتیجه اینکه با توجه به شکل ۸ و جدول ۲، عملکرد پایدار ساز در سرعت های مختلف باد و در نقاط کار مختلف مؤثر بوده و عملاً نوسان های پیچشی در هیچ یک از سرعت های باد و در نتیجه در هیچ یک از نقاط کار در پاسخ سیستم ظاهر نمی شود.

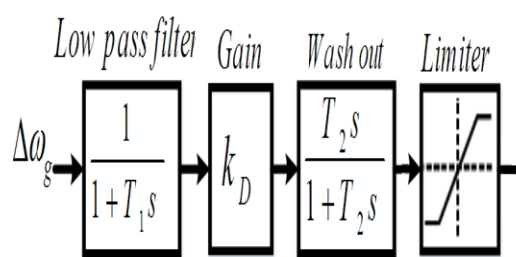
شکل ۹ شکل موج های سرعت ژنراتور و گشتاور پیچشی شفت را در پاسخ به تغییرات پله ای سرعت باد نشان می دهد. در ابتدا سرعت باد برابر با ۹ متر بر ثانیه است و در زمان $t = 3 \text{ sec}$ به ۱۳ متر بر ثانیه تغییر داده می شود. همان طور که مشاهده می شود در حالت بدون پایدار ساز، نوسانات پیچشی در پاسخ سرعت و گشتاور پیچشی ژنراتور ظاهر می شود در صورتی که با استفاده از پایدار ساز این نوسان ها به سرعت میرا می شوند.

۵-۱- تحلیل پایداری با در نظر گرفتن پایدار ساز نوسانات پیچشی

اگر اثر پایدار ساز نوسانات پیچشی را در دینامیک سیستم لحاظ کنیم، رابطه (۳۴) به رابطه (۳۶) تبدیل می شود. استفاده از رابطه (۳۶)، مقادیر ویژه سیستم را به ازای نواحی مختلف از کارکرد ژنراتور (نواحی ۱، ۲، ۳ و ۴ از منحنی توان - سرعت) به دست آورده و این بار به بررسی پایداری سیستم با حضور TOS پرداخته می شود و با حالت بدون TOS مقایسه می شود.



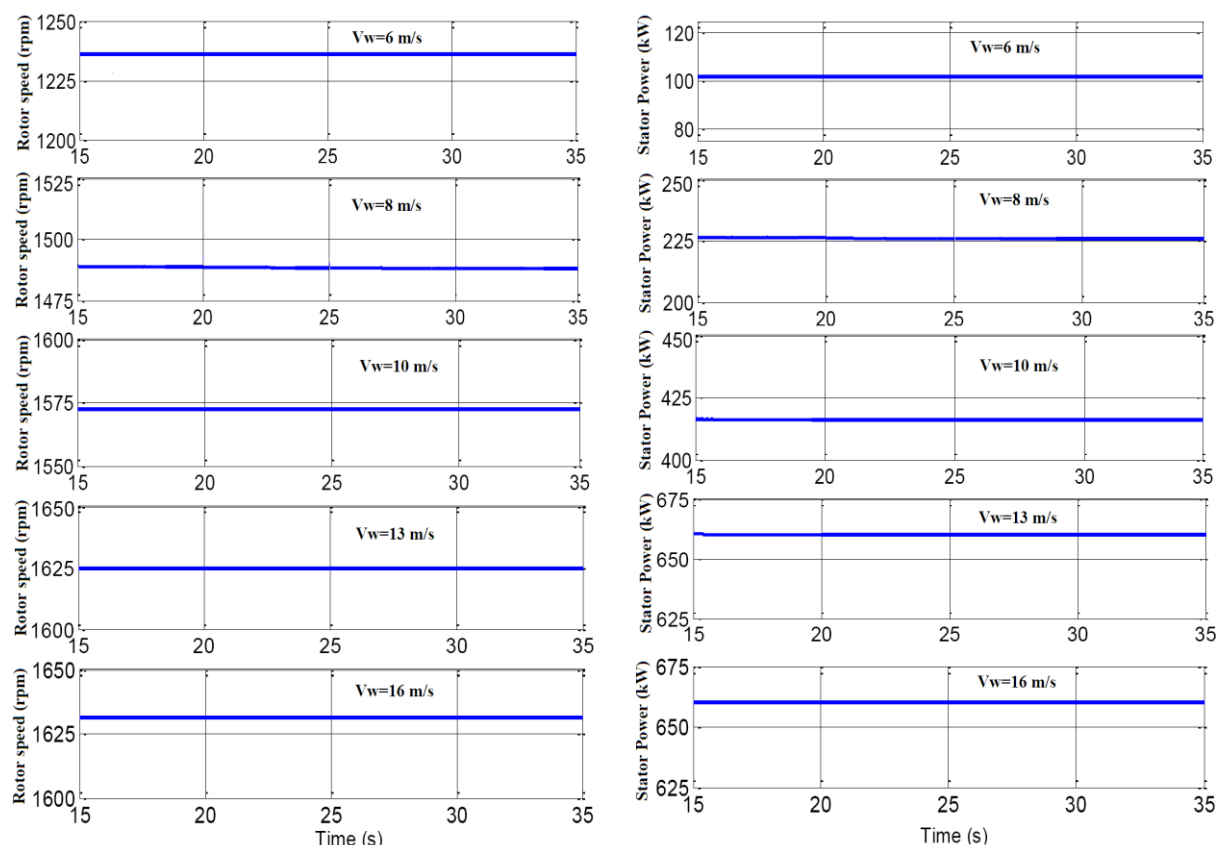
شکل ۶: دیاگرام کنترل توان با پایدار ساز سیستم قدرت



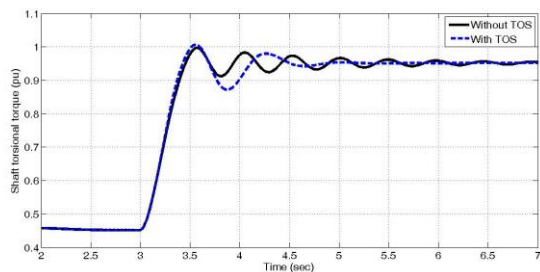
شکل ۷: دیاگرام پایدار ساز نوسانات پیچشی

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta\omega_g} \\ \dot{\Delta\theta} \\ \dot{\Delta\omega_t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-M-D-k_D}{2H_g} & \frac{k}{2H_g} & \frac{D}{2H_g} \\ -\omega_b & 0 & \omega_b \\ \frac{D}{2H_t} & -\frac{k}{2H_t} & \frac{1}{2H_t}(\Delta T_m - D) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\omega_g \\ \Delta\theta \\ \Delta\omega_t \end{bmatrix} \quad (36)$$

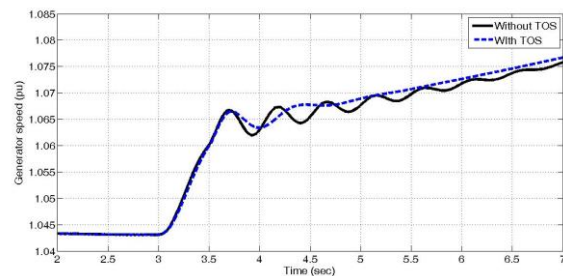
جدول ۲ مقادیر ویژه سیستم مکانیکی را در حضور TOS نشان می دهد. با توجه به جدول ۲ مشاهده می شود که با وجود TOS میزان میرایی سیستم در تمامی نواحی مطلوب است.



شکل ۸: نمودار توان کل و سرعت روتور با وجود پایدارساز نوسانات پیچشی

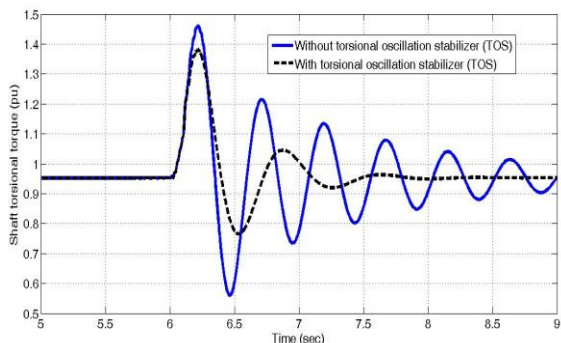


(ب): پاسخ گشتاور پیچشی شفت

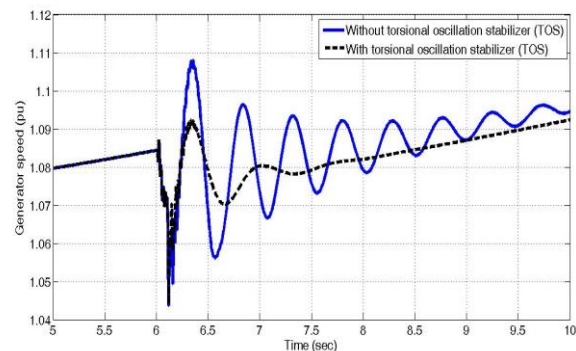


(الف): پاسخ سرعت ژنراتور

شکل ۹: پاسخ‌های سرعت ژنراتور و گشتاور پیچشی شفت در ازای تغییرات سرعت باد از ۹ به ۱۳ متر بر ثانیه با و بدون پایدارساز نوسانات پیچشی



(ب): پاسخ گشتاور پیچشی شفت



(الف): پاسخ سرعت ژنراتور

شکل ۱۰: شکل موج‌های سرعت و گشتاور پیچشی شفت ژنراتور در سرعت باد ۱۳ متر بر ثانیه و در ازای ۴۰ درصد افتادگی ولتاژ پایانه استاتور با و بدون پایدارساز

$$C_p(\lambda, \beta) = C_7 \left(C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\lambda_i}} + C_6 \lambda \right)$$

$$\lambda = \frac{R \omega_t}{V_w} \quad \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

$$C_1 = 0.5176 \quad C_2 = 116 \quad C_3 = 0.4 \quad C_4 = 5$$

$$C_5 = 21 \quad C_6 = 0.0068 \quad C_7 = 0.9$$

ه- مشخصات پایدارساز سیستم قدرت در شکل ۷

$$k_D = 15 \quad T_1 = 0.05 \text{ sec} \quad T_2 = 0.3 \text{ sec}$$

مراجع

- [1] C. Harini, N. K. Kumari, and G. S. Raju, "Analysis of wind turbine driven doubly fed induction generator," *Int. Conf. Electrical Energy Systems (ICEES)*, pp. 246-251, 2011.
- [2] E. Muljadi, C. P. Butterfield, B. Parsons, and A. Ellis, "Effect of variable speed wind turbine generator on stability of a weak grid," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 1, pp. 29-36, 2007.
- [3] F. M. Hughes, O. Anaya-Lara, N. Jenkins, and G. Strbac, "A power system stabilizer for DFIG-based wind generation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 2, pp. 763-772, 2006.
- [4] G. Tsourakis, B. M. Nomikos, and C. D. Vournas, "Contribution of doubly fed wind generators to oscillation damping," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 2, pp. 783-791, 2009.
- [5] S. Yuanzhang, W. Lixin, L. Guojie, and L. Jin, "A review on analysis and control of small signal stability of power systems with large scale integration of wind power," *Int. Conf. Power System Technology (POWERCON)*, pp. 1-6, 2010.
- [6] T. Ackerman, *Wind Power in Power Systems*, Wiley Publishing, 2005.
- [7] A. Tabesh, and R. Iravani, "Transient behavior of a fixed-speed grid-connected wind farm," *Proc. Int. Conf. Power Systems Transients*, Montreal, Canada, pp. 1-5, 2005.
- [8] G. Ramtharan, N. Jenkins, O. Anaya-Lara, and E. Bossanyi, "Influence of rotor structural dynamics representations on the electrical transient performance of FSI and DFIG wind turbines," *Wind Energy*, vol. 10, pp. 293-301, 2007.

[۹] سعید اباذری و امید مرادی، «بهبود میرایی نوسانات سیستم قدرت با به کارگیری UPFC و تنظیم پارامترهای کنترل کننده بر اساس یک الگوریتم جدید PSO»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۶، شماره ۱، ۱۳۹۵.

- [10] L. Hui, L. Shengquan, and J. Haiting, "Damping control strategies of inter-area low-frequency oscillation for DFIG-based wind farms integrated into a power system," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 61, pp. 279-287, 2014.
- [11] M. Mokhtari, J. Khazaei, and D. Nazarpour, "Sub-synchronous resonance damping via doubly fed induction generator," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 53, pp. 876-883, 2013.
- [12] J. Licari, C. E. Ugalde-Loo, J. B. Ekanayake, and N. Jenkins, "Comparison of the performance and stability of

شکل ۱۰ شکل موج های سرعت و گشتاور پیچشی شفت ژنراتور را در سرعت باد ۱۳ متر بر ثانیه و در ازای ۴۰ درصد افتادگی ولتاژ پایانه استاتور نشان می دهد. خطای افتادگی ولتاژ با عمق ۴۰ درصد و مدت زمان ۱۰۰ میلی ثانیه در زمان $t = 6 \text{ sec}$ به پایانه استاتور ژنراتور تحمیل شده است. همان طور که مشاهده می شود در حالت بدون پایدارساز، نوسانات پیچشی در پاسخ سرعت و گشتاور پیچشی ژنراتور ظاهر می شود در صورتی که با استفاده از پایدارساز این نوسان ها به سرعت میرا می شوند.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله ضمن طراحی کنترل کننده توان، به تبیین عملکرد سیستم مکانیکی و تحلیل نوسانات الکترومکانیکی و پیچشی در سیستم تحت مطالعه پرداخته می شود.

سیستم تحت مطالعه در واقع یک توربین ژنراتور DFIG-710kW است که در سایت بینالود نصب شده است. در عمل، کنترل توان توربین ژنراتور دوسو تغذیه معمولاً بر اساس یک منحنی از پیش برنامه ریزی شده بنام منحنی توان-سرعت صورت می گیرد که توسط آن توان مرجع برای سیستم کنترل فراهم می شود. تحلیل های انجام شده نشان می دهد که در بعضی نواحی از منحنی توان-سرعت، سیستم کنترل نمی تواند میرایی مناسب را برای مدهای پیچشی و الکترومکانیکی فراهم کند و لذا باعث ظاهر شدن نوسانات با فرکانس پایین (حدوداً ۲ هرتز) در پاسخ توان، سرعت و گشتاور ژنراتور می شود. بر این اساس در این مقاله به تحلیل عملکرد سیگنال کوچک سیستم تحت مطالعه پرداخته شده و مدهای مکانیکی سیستم تحت شرایط بهره برداری و سرعت های مختلف باد استخراج گردیده و مشخص شده که به ازای نقاط کار ژنراتور که در ناحیه ۴ از منحنی توان-سرعت قرار می گیرد، میرایی مدهای پیچشی ضعیف و نوساناتی از نوع پیچشی و الکترومکانیکی در پاسخ های خروجی ژنراتور ظاهر می شود. در ادامه برای بهبود میرایی نوسان های پیچشی، یک کنترل کننده کمکی پایدارساز به نام پایدارساز نوسان های پیچشی پیشنهاد شده است که نتایج شبیه سازی برای سیستم تحت مطالعه کارایی عملکرد آن را تأیید می کند.

پیوست ها

الف- مشخصات ژنراتور DFIG-710 kW تحت مطالعه

$$V_n = 690V \quad \text{poles} = 4 \quad f = 50Hz \quad R_s = 0.0054\Omega$$

$$R_r = 0.0042\Omega \quad X_s = 1.992\Omega \quad X_r = 2.0149\Omega \quad X_m = 1.96\Omega$$

ب- مشخصات مکانیکی توربین ژنراتور تحت مطالعه

$$H_g = 0.55\text{sec} \quad H_t = 3.5\text{sec} \quad k = 0.5 \text{ pu / elec.rad}$$

$$D = 1.5 \text{ pu} \quad n_{\text{gear}} = 52.7 \quad R = 23.5 \text{ m}$$

ج- مشخصات ترانسفورماتور مختص توربین

$$690V / 20kV, 800kVA, X_T = 0.08 \text{ pu}, R_T = 0.08 / 30$$

د- رابطه ضریب بازدهی توربین

- [27] M. Rahimi, and M. Parniani, "Dynamic behavior analysis of doubly-fed induction generator wind turbines –The influence of rotor and speed controller parameters," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 32, pp. 464-477, 2010.
- [28] M. Rahimi, "Drive train dynamics assessment and speed controller design in variable speed wind turbines," *Renewable Energy, Elsevier*, vol. 89, pp. 716-729, 2016.
- two torsional vibration dampers for variable-speed wind turbines," *Wind Energy*, vol. 18, pp. 1545-1559, 2015.
- [13] W. N. White, F. Fateh, and Z. Yu, "Torsional resonance active damping in grid tied wind turbines with gearbox, DFIG, and power converters," *American Control Conf.*, Chicago, IL, USA, 2015.
- [14] L. Chen, H. Xu, and J. Wenske, "Active damping of torsional vibrations in the drive train of a DFIG wind turbine," *Proc. Int. Conf. Renewable Energies and Power Quality*, Cordoba, Spain, April 2014.
- [15] B. Badrzadeh, S. K. Salman, and K. S. Smith, "Assessment and enhancement of grid fault induced torsional oscillations for Induction Generator-based wind turbines," *Power Systems Conf. and Exposition*, Seattle, WA, pp. 1-7, 2009.
- [16] S. M. Mueen, M. H. Ali, R. Takahashi, and T. Murata, "Blade-shaft torsional oscillation minimization of wind turbine generator system by using STATCOM/ESS," *Proc. Power Tech. Conf.*, Lausanne, pp. 184-189, 2007.
- [17] M. S. El-Moursi, B. Bak-Jensen, and M. H. Abdel-Rahman, "Novel STATCOM controller for mitigating SSR and damping power system oscillations in a series compensated wind park," *IEEE Trans. Power Elec.*, vol. 25, no. 2, pp. 429-441, 2010.
- [18] M. S. El-Moursi, and V. Khadkikar, "Novel control strategies for SSR mitigation and damping power system oscillations in a series compensated wind park," *Proc. 38th annual Conf. Industrial Elec. Society*, Montreal, QC, pp. 5335-5342, 2012.
- [19] A. F. Abdou, A. Abu-Siada, and H. R. Pota, "Damping of sub synchronous oscillations and improve transient stability for wind farms," *Innovative Smart Grid Technologies Asia (ISGT) Conf., IEEE PES*, pp. 1-6, 2011.
- [20] T. Lei, M. Bames, and M. Ozakturk, "Doubly-fed induction generator wind turbine modelling for detailed electromagnetic system studies," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 7, no. 2, pp. 180-189, 2013.
- [21] L. Fan, H. Yin, and Z. Miao, "On active/reactive power modulation of DFIG-based wind generation for inter area oscillation damping," *IEEE Trans. Energy Conv.*, vol. 26, no. 2, pp. 513-521, 2011.
- [22] W. N. White, Z. Yu, and C. Lucero, "Active damping of torsional resonance in wind turbine drivetrains," *Proc. Ind. Elec. Society Conf.*, Dallas, TX, pp. 1957-1963, 2014.
- [23] B. Badrzadeh, and S. K. Salman, "Enhancement of fault ride-through capability and damping of torsional oscillations for a distribution system comprising induction and synchronous generators," *Proc. Sustainable Alternative Energy Conf.*, Valencia, Spain, pp. 1-7, 2009.
- [24] A. E. Leon, J. M. Mauricio, and J. A. Solsona, "Sub synchronous resonance mitigation using variable speed wind energy conversion systems," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 7, no. 5, pp. 511-525, 2013.
- [25] M. Rahimi, and M. Parniani, "Efficient control scheme of wind turbines with doubly-fed induction generators for low voltage ride-through capability enhancement," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 4, no. 3, pp. 242-252, 2010.

[۲۶] میلاد دلای و علیرضا جلیلیان، «محاسبه آلودگی هارمونیک و

میان هارمونیک ژنراتورهای القائی دوس تغذیه بادی با استفاده

از یک روش ترکیبی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره

۴۲، شماره ۲، صفحه ۲۵-۳۷، ۱۳۹۱.