

شبیه‌سازی بلوک دیاگرامی توربین‌های باد محور افقی مقیاس بزرگ

عباس ابراهیمی*

دانشیار، گروه مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

میلاذ آذر دار

کارشناس ارشد، پژوهشکده سامانه‌های هوشمند صنعتی شهید رضایی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

چکیده

در پژوهش حاضر، روشی برای شبیه‌سازی بلوک دیاگرامی یک توربین باد محور افقی مرجع با مکانیزم کنترل توان زاویه پیچ ارائه شده‌است. از روش مهندسی تقریب تحلیلی برای مدل آیرودینامیک روتور و تخمین ضریب توان توربین و از کنترلگر PID برای کنترل زاویه پیچ پره روتور استفاده شده‌است. همچنین بستر نرم‌افزار امسیم برای پیاده‌سازی معادلات حاکم بر سیستم انتقال توان و ژنراتور و سپس ترکیب مدل آنها با بخش آیرودینامیک و کنترلگر به کار گرفته شده‌است. به کمک مدل بلوک دیاگرامی پیشنهادی، رفتار گذرای توربین و عملکرد کنترل زاویه پیچ در تنظیم توان خروجی برای حالتی که پروفیل سرعت باد ورودی به صفحه روتور طی ۱۳۰ ثانیه به صورت خطی از ۲۱ تا ۸ متر بر ثانیه تغییر می‌کند، بررسی شده‌است. نتایج نشان دهنده دقت قابل قبول مدل برای پیش‌بینی رفتار عملکرد توربین است. همچنین استفاده از مدل آیرودینامیک و کنترلگر دقیق‌تر موجب بهبود نتایج می‌شود. اعتبارسنجی شبیه‌سازی با مقایسه عملکرد توربین با نتایج توربین مرجع انجام شده‌است.

واژه‌های کلیدی: توربین باد محور افقی، شبیه‌سازی بلوک دیاگرامی، کنترل توان، نرم‌افزار AMESim.

Block Diagram Simulation of a Large Horizontal Axis Wind Turbine

A. Ebrahimi

Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

M. Azardar

Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

In the present study, block-diagram simulation of a reference horizontal axis wind turbine with pitch-regulated mechanism is presented. The aim of this simulation is modeling of wind turbine subsystems to investigate the transient behavior of the turbine under unsteady incoming wind. Analytical approximation model is used to estimate the output power coefficient. In addition, PID controller is imposed to regulate the output power via changing the blade pitch angle. Governing equations of the mechanical part (i.e. gearbox), electrical part (i.e. three-phase doubly fed induction generator), aerodynamic and controller models are implemented in LMS AMESim software package. The model uses a purely torsional multi-body simulation to show the dynamic behavior of gearbox. The proposed model is used to investigate the rotor transient behavior as well as the controller performance under the conditions that the wind speed changes linearly from 21 to 8 m/s during 130 seconds. The results show acceptable accuracy in comparison with the reference data.

Keywords: Horizontal axis wind turbine, Block diagram, Pitch control, AMESim.

۱- مقدمه

۶۰ ایستگاه در مناطق مختلف دریافت شده حدود ۶۰ هزارمگاوات است و با در نظر گرفتن یک راندمان کلی ۳۰٪، میزان انرژی قابل استحصال حدود ۱۸ هزارمگاوات می‌باشد.

در سال‌های اخیر، ابعاد روتور توربین‌های بادی و در نتیجه توان خروجی آنها افزایش داشته، به گونه‌ای که متوسط توان تولیدی توربین‌های فراساحلی در سال ۲۰۱۶ نسبت به سال ۲۰۱۵ با افزایش ۱۵ درصدی به ۴٫۸ مگاوات رسیده است. همچنین اولین توربین باد ۸ مگاواتی فراساحل در سال ۲۰۱۶ نصب شد [۱]. بنابراین صنعت آینده توربین‌های بادی نیازمند توسعه ابزارهای تحلیل، شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و طراحی توربین‌های مگاواتی است.

توربین‌های باد بزرگ از زیرسامانه‌های مختلفی شامل روتور، برج، ژنراتور، ناسل، سیستم راننده و کنترلگر تشکیل شده‌اند [۲]. شبیه‌سازی بلوک دیاگرامی زیرمجموعه‌های توربین باد به کمک مدل‌های مختلف آیرودینامیک، سازه، دینامیک و الکتریکی، امکان ارزیابی کاملی از سامانه توربین باد و همچنین بررسی اثر تغییر هر یک از پارامترهای زیرسامانه‌ها روی عملکرد کلی توربین را به دست می‌دهد.

بر اساس گزارش انجمن بین‌المللی صنعت انرژی باد^۱، در سال ۲۰۱۶ با نصب ۵۴ گیگاوات انرژی بادی و نرخ رشد ۱۲٫۶ درصدی نسبت به سال قبل، کل ظرفیت انرژی بادی جهان به ۴۸۶٫۸ گیگاوات رسید. این ظرفیت در بیش از ۹۰ کشور ایجاد شده‌است که در بین آنها، ۹ کشور بیش از ۱۰ گیگاوات و ۲۹ کشور بیش از یک گیگاوات نصب کرده‌اند. همچنین در قانون برنامه ششم توسعه کشور ایران (۱۳۹۶-۱۴۰۰)، نصب و احداث پنج هزارمگاوات نیروگاه تجدیدپذیر برنامه‌ریزی شده‌است که از این میزان، ۴۵۰۰ مگاوات سهم توسعه انرژی بادی است. مطالعات پتانسیل‌سنجی انرژی باد و اطلس باد ایران که توسط ساتبا (سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق) انجام شده نیز نشان می‌دهد که میزان ظرفیت اسمی انرژی باد که از

^۱ Global Wind Energy Council (GWEC)

سه‌پره، مکانیزم کنترل توان زاویه پیچ، توان نامی ۱/۸، ۲ مگاوات، سرعت باد نامی ۱۲ متربرثانیه و قطر روتور ۹۰ متر است. توان مکانیکی جذب شده از باد توسط روتور توربین بادی، به‌صورت رابطه (۱) قابل بیان است [۱۵، ۱۴].

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p \quad (1)$$

در این رابطه، P توان مکانیکی، ρ چگالی هوا، R شعاع روتور، V سرعت جریان باد ورودی به صفحه روتور و C_p ضریب توان توربین باد هستند. ضریب توان تابعی از نسبت سرعت نوک پره^۲ (λ) و زاویه پیچ (β) آن است. روش‌های عددی مختلفی مانند، نظریه مومنوم المان پره^۳، روش شبکه گردابه، روش‌های عملگر و دینامیک سیالات محاسباتی^۴ برای محاسبه نیروهای آیرودینامیک و ضریب توان خروجی روتور وجود دارد [۱۶]. با توجه به هزینه‌بر بودن روش‌های عددی آیرودینامیک برای شبیه‌سازی بلوک دیاگرامی توربین باد، در این‌جا از روش مهندسی تقریب تحلیلی^۵ استفاده شده‌است [۱۷، ۱۲]. در این روش با توجه به داده‌های تجربی و منحنی‌های عمومی ضریب توان برای یک توربین مشخص، رابطه‌ای جبری برای ضریب توان به‌صورت رابطه (۲) پیشنهاد می‌شود.

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1(c_2 - c_3\beta - c_4\beta^x - c_5)e^{-c_6} + c_7\lambda \quad (2)$$

در این رابطه نسبت سرعت نوک پره به‌صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود.

$$\lambda = \frac{R\omega}{V} \quad (3)$$

ω سرعت دورانی روتور است. همچنین ثابت‌های c_1 تا c_7 بستگی به نوع توربین باد دارند. اثر شکل پرها و ویژگی‌های آیرودینامیکی روتور در این ثابت‌ها لحاظ شده‌است. برای توربین باد مبنای این پژوهش، این ثابت‌ها مطابق رابطه (۴) پیشنهاد شده‌است [۱۸].

$$c_1 = 0.5, c_2 = \frac{116}{\lambda_i}, c_3 = 0.4, c_4 = 0, c_5 = 5, c_6 = \frac{21}{\lambda_i}, c_7 = 0.0068, x = 1.5, \lambda_i = \left\{ \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right\}^{-1} \quad (4)$$

۳- روش کنترل توان و کنترلگر

در شرایطی که سرعت باد از مقدار سرعت نامی توربین بیشتر است، برای جلوگیری از اثرات مخرب سازه‌ای و الکتریکی باید توان خروجی توربین کنترل شود. معمولاً در این شرایط به‌کمک سیستم‌های کنترلی مناسب، منحنی توان خروجی پس از طی کردن حالت گذرا به مقدار نامی خواهد رسید. هدف از به‌کارگیری سیستم‌های کنترلی، حفظ سرعت دورانی روتور در محدوده‌ای معین، چرخش یاو^۶ به‌منظور تنظیم جهت باد با صفحه روتور، حفظ توان تولیدی توربین باد در محدوده‌ای معین و تعیین شروع به‌کار و یا متوقف کردن توربین باد هستند. برای محدود کردن مقدار توان تولیدی در سرعت‌های بالای باد، از سه روش مختلف کنترل با واماندگی^۷، کنترل با تنظیم زاویه پیچ^۱ و

برخی از این پارامترها عبارتند از، آیرودینامیکی (مانند هندسه و شکل روتور و پره، خواص مکانیکی سازه پره و شرایط باد ورودی به صفحه روتور)، دینامیکی و سازه‌ای (مانند سایش و خستگی قطعات مکانیکی، تلفات مسیر انتقال گشتاور) و الکتریکی (مانند تلفات انتقال جریان، پارامترهای ژنراتور و کنترلگر) [۳].

نرم‌افزارهای متعددی برای شبیه‌سازی اندرکنش بین زیرمجموعه‌های مختلف توربین‌های بادی توسعه داده شده‌اند که از جمله آنها می‌توان به Matlab/Simulink [۴]، DigSILENT [۵]، PSCAD/EMTDC [۶] و LMS AMESim [۷] اشاره کرد. بطور معمول در این نرم‌افزارها، مدل دینامیک برخی از اجزا موجود نمی‌باشد و اغلب فقط به مدل‌سازی ژنراتور می‌پردازند و از مدل‌سازی آیرودینامیکی و مکانیکی چشم‌پوشی می‌کنند. در مرجع [۳] با ساده‌سازی زیادی، به‌منظور محاسبه سرعت دورانی و توان تولیدی روتور برای پیاده‌کردن مکانیزم کنترلی، به مدل‌سازی قسمت مکانیکی انتقال گشتاور-توان و آیرودینامیک پرداخته شده است. شی و همکاران [۸، ۹] معادلات دینامیکی سه‌بعدی حاکم بر سیستم انتقال توان توربین را با استفاده از روش دینامیک اجزای چندعضوی^۱ و معادله لاگرانژ استخراج کرده و به حل عددی آنها پرداختند. در این مدل، اثر فاصله بین چرخ دنده‌ها در نظر گرفته شده و پاسخ حالت گذرای سازه‌ی سیستم راننده بررسی شده‌است. ژو و همکاران [۱۰] مدلی دینامیکی برای سیستم انتقال توان یک توربین باد مگاواتی پیشنهاد دادند که در آن پره‌ها، هاب، محور اصلی و جعبه‌دنده انعطاف‌پذیر فرض شدند. آنها پاسخ دینامیکی سیستم تحت تحریک داخلی و خارجی را بررسی کردند و نتایج نشان داد که بیشترین انرژی ارتعاشی در جعبه‌دنده سرعت-بالا اتفاق می‌افتد. همچنین آنها در مرجع [۱۱] با انعطاف‌پذیر گرفتن اجزا، مدل دینامیکی قبلی را کامل کرده و فرکانس‌های طبیعی حاکم بر سیستم انتقال توان و احتمال رخداد تشدید را مطالعه کردند. رودین و همکاران [۱۲] با ارایه مدلی ساده برای آیرودینامیک و ژنراتور یک توربین باد پیچ کنترل ۵۰۰ کیلوواتی و صرف‌نظر از اثرات سیستم انتقال توان، روشی برای طراحی کنترلگر ارایه کردند.

مرور فعالیت‌های انجام‌شده نشان می‌دهد، مدل‌سازی مناسب زیرسیستم‌های توربین باد، اهمیت زیادی برای مطالعه عملکرد کلی توربین به‌ویژه در شرایط گذرا دارد. در این پژوهش، از روش مهندسی برای مدل آیرودینامیک روتور و از کنترلگر PID برای کنترل زاویه پیچ روتور و از نرم‌افزار AMESim برای مدل‌کردن سیستم انتقال توان و ژنراتور یک توربین مرجع استفاده شده‌است. با استفاده از مدل بلوک دیاگرامی پیشنهادی، عملکرد توربین در شرایط تغییر سرعت باد ورودی به صفحه روتور بررسی شده است.

۲- مدل آیرودینامیک

در این پژوهش توربین باد محور افقی Vestas V90-1.8/2.0 MW به‌عنوان توربین مرجع انتخاب شده‌است [۱۳]. این توربین دارای

² Tip speed ratio

³ Blade Element Momentum theory (BEM)

⁴ Computational Fluid Dynamics (CFD)

⁵ Analytical approximation

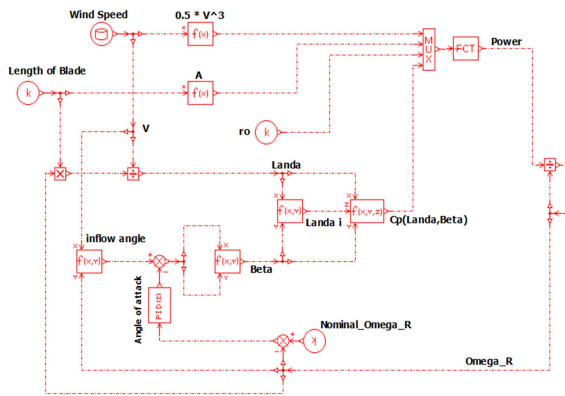
⁶ Yaw angle

⁷ Stall regulation

¹ Multi-body dynamics

جدول ۱- تنظیم ضرایب کنترلگر با روش زیگلر - نیکولز

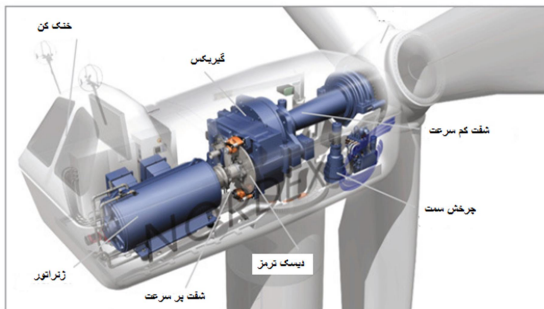
	P	PI	PID
ضریب بهره تناسبی (k_p)	$0.5 K_u$	$0.45 K_u$	$0.6 K_u$
ضریب بهره انتگرالی (k_i)		$0.83 P_u$	$0.5 P_u$
ضریب بهره مشتقی (k_d)			$0.125 P_u$



شکل ۲- مدل بلوک دیاگرامی بخش آیرودینامیک و کنترلگر

۴- مدل سازی سیستم انتقال توان

سیستم انتقال توان توربین باد، مطابق شکل ۳، شامل هاب^۷ روتور، جعبه دنده، ترمز و ژنراتور^۸ است. جعبه دنده در این مجموعه وظیفه انتقال مکانیکی قدرت از محرک^۹ ورودی به شفت خروجی و تغییر سرعت دورانی و گشتاور بین روتور و ژنراتور را برعهده دارد. نسبت تبدیل در جعبه دنده بستگی به سرعت دوران و گشتاور روتور و نیاز ژنراتور دارد. جعبه دنده توربین مرجع از دو چرخ دنده ای نوع سیاره ای و یک چرخ دنده ای ساده تشکیل شده است. روتور توربین باد به چرخ دنده سیاره ای مرحله ی نخست جعبه دنده متصل می شود و تا قبل از ژنراتور در دو مرحله ی دیگر، سرعت آن افزایش و گشتاور آن کاهش می یابد. نحوه اتصال سه مرحله ی جعبه دنده به یکدیگر از روتور تا ژنراتور در شکل ۴ نشان داده شده، همچنین نام بلبرینگ های متناظر در جدول ۲ آمده است.

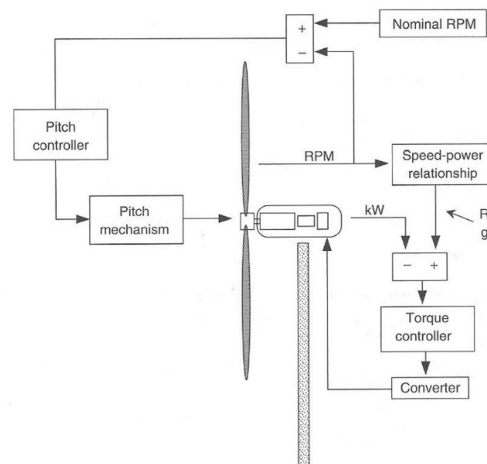


شکل ۳- سیستم انتقال توان توربین بادی

⁷ Hub
⁸ Generator
⁹ Driver

کنترل با حرکت یاو^۲ استفاده می شود. سیستم کنترلی توربین باد این پژوهش از نوع تنظیم زاویه پیچ به صورت فعال است که در شکل ۱ طرحواره ای از نحوه عملکرد آن نشان داده شده است. تعیین زاویه پیچ مورد نیاز برای کنترل توان خروجی روتور در هر لحظه از عملکرد توربین با استفاده از نظریه کنترل تناسبی- انتگرالی- مشتقی^۳ انجام شده است. ورودی به این کنترلگر، اختلاف بین سرعت دوران نامی^۴ و واقعی^۵ روتور می باشد که براساس آن، کنترلگر سیگنال مناسب خروجی را صادر می کند. برای تنظیم ضرایب کنترلگر PID از روش زیگلر- نیکولز^۶ استفاده شده است [۱۹]. در این روش برای تنظیم ضرایب کنترلگر ابتدا ضرایب مشتق گیر و انتگرال گیر را برابر صفر قرار داده و سپس بطور سعی و خطا مقدار بهره تناسبی را تغییر داده تا جواب نوسانی حاصل شود. این ضریب بهره، K_u نامیده می شود. همچنین دوره نوسان، یعنی مدتی که طول می کشد تا سیستم از یک سیکل نوسانی کامل عبور نماید، P_u نامیده می شود. در نهایت، ضرایب کنترلگر مطابق جدول ۱ محاسبه می شوند.

در شکل ۲ مدل بلوک دیاگرامی بخش آیرودینامیک و کنترلگر نشان داده شده است. ورودی های لازم برای این بخش عبارتند از، سرعت وزش باد به صورت تابعی از زمان، قطر روتور، سرعت دورانی نامی و چگالی هوا. خروجی این بخش، توان تولید شده توسط روتور است که به عنوان ورودی برای بلوک مدل دینامیکی شفت و سایر ادوات دوار استفاده می شود. همچنین، باتوجه به شکل ۲، سیگنالی از سمت ادوات دینامیکی و شفت به بخش آیرودینامیک بازخورد می شود که همان سرعت دوران واقعی شفت کم سرعت می باشد و به منظور سنجش با مقدار نامی سرعت دورانی روتور، به عنوان ورودی به کنترلگر استفاده می شود. سرعت دورانی شفت کم سرعت به دلیل تعیین توان خروجی و نسبت سرعت نوک پره، ورودی مهمی برای زیرسیستم کنترل پیچ محسوب می شود.

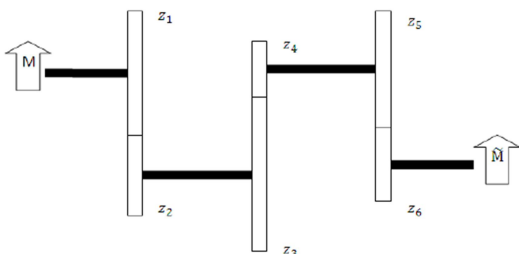


شکل ۱- نحوه کنترل توان با تنظیم زاویه پیچ [۱۴]

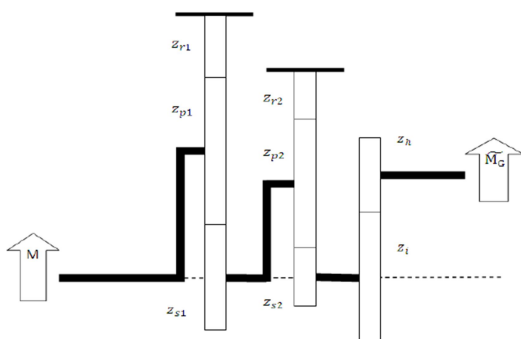
¹ Pitch regulation
² Yaw control
³ Proportional-Integral-Derivative (PID)
⁴ Nominal
⁵ Actual
⁶ Ziegler-Nichols Tuning

شفت در انتقال از روتور به ژنراتور به سبب کم بودن دنده های چرخ دنده مرکزی (خورشیدی) با نسبت ۹۲ افزایش می یابد. با روند محاسباتی همچون روابط (۵) تا (۱۰)، رابطه مربوط به انتقال توان توربین باد مرجع به صورت رابطه (۱۱) حاصل می شود.

$$\bar{M}_G = -M \times \frac{n_{c1}}{n_{s1}} \times \frac{n_{c2}}{n_{s2}} \times \frac{n_i}{n_h} \quad (11)$$



شکل ۵- نمایشی از یک سیستم انتقال قدرت ساده

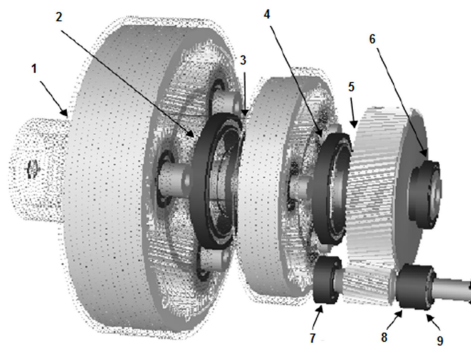


شکل ۶- طرحواره جعبه دنده توربین باد مرجع

جدول ۳- پارامترهای مربوط به چرخ دنده های جعبه دنده

نام	تعداد دندانه	سرعت دورانی
چرخ دنده رینگ مجموعه سیاره ای اول	z_{r1}	n_{r1}
چرخ دنده سیاره ای مجموعه سیاره ای اول	-	n_{c1}
چرخ دنده خورشیدی مجموعه سیاره ای اول	z_{s1}	n_{s1}
چرخ دنده رینگ مجموعه سیاره ای دوم	z_{r2}	n_{r2}
چرخ دنده سیاره ای مجموعه سیاره ای دوم	-	n_{c2}
چرخ دنده خورشیدی مجموعه سیاره ای دوم	z_{s2}	n_{s2}
چرخ دنده میانی	z_i	n_i
چرخ دنده سرعت بالا	z_h	n_h

مدل بلوک دیاگرامی بخش مکانیکال انتقال توان در شکل ۷ آمده است. پارامترهای مربوط به هرکدام از اجزای به کار گرفته شده در این بلوک نیز در جدول ۴ آورده شده اند. همچنین محل سیگنال های ورودی و خروجی بلوک های آیرودینامیک و ژنراتور به سیستم انتقال توان، مشخص شده است. در این مدل سازی دینامیکی، فقط ارتعاشات



شکل ۴- نحوه اتصال سه مرحله ای جعبه دنده به یکدیگر

جدول ۲- فهرست بلبرینگ های جعبه دنده توربین مرجع

۱	بلبرینگ بالادست چرخ دنده سیاره ای نخست
۲	بلبرینگ پایین دست چرخ دنده سیاره ای نخست
۳	بلبرینگ بالادست چرخ دنده سیاره ای دوم
۴	بلبرینگ پایین دست چرخ دنده سیاره ای دوم
۵	بلبرینگ بالادست شفت میانی
۶	بلبرینگ پایین دست شفت میانی
۷	بلبرینگ بالادست شفت پرسرعت
۸	بلبرینگ پایین دست ۱ شفت پرسرعت
۹	بلبرینگ پایین دست ۲ شفت پرسرعت

برای یک جعبه دنده عمومی مانند شکل ۵، اگر تعداد دنده هر چرخ دنده را با z_i و سرعت دورانی آن را با n_i نمایش دهیم، روابط (۵) تا (۱۰) برای تبدیل گشتاور و سرعت دورانی ورودی (روتور) به گشتاور و سرعت دورانی خروجی (لازم برای ژنراتور) قابل استخراج هستند [۲۰]. در استخراج این روابط، اجسام صلب فرض شده و از اصطکاک و انتقال گرما صرف نظر شده است. از بقای انرژی داریم:

$$P_1 \times t = P_2 \times t \Rightarrow P_1 = P_2 \Rightarrow M_1 \times n_1 = -M_2 \times n_2 \quad (5)$$

از برابری سرعت در نقطه ای تماس دو چرخ دنده داریم:

$$n_1 \times r_1 = n_2 \times r_2 \Rightarrow \frac{n_1}{n_2} = \frac{r_2}{r_1} \quad (6)$$

با تعریف نسبت دنده به عنوان نسبت سرعت ورودی به خروجی خواهیم داشت:

$$i_1 = -\frac{n_1}{n_2} = -\frac{r_2}{r_1} = -\frac{z_2}{z_1} \quad (7)$$

$$i_2 = -\frac{n_3}{n_4} = -\frac{r_4}{r_3} = -\frac{z_4}{z_3} \quad (8)$$

$$i_3 = -\frac{n_5}{n_6} = -\frac{r_6}{r_5} = -\frac{z_6}{z_5} \quad (9)$$

با استفاده از روابط (۵) تا (۹) و یکسری اعمال جبری خواهیم داشت:

$$\bar{M} = M \times i_1 \times i_2 \times i_3 = -M \times \frac{n_1}{n_2} \times \frac{n_3}{n_4} \times \frac{n_5}{n_6} = -M \times \frac{z_2}{z_1} \times \frac{z_4}{z_3} \times \frac{z_6}{z_5} \quad (10)$$

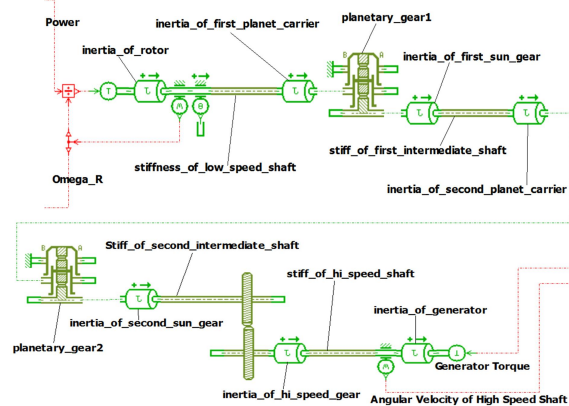
M و \bar{M} به ترتیب مقدار گشتاور ورودی و خروجی جعبه دنده هستند. نحوه اتصال چرخ دنده های مختلف در جعبه دنده توربین مورد نظر در شکل ۶ و پارامترهای مربوطه در جدول ۳ آورده شده اند. سرعت دورانی

اینرسی چرخ‌دنده خورشیدی دوم	j_9	۸	Kg.m^2
اینرسی شفت میانی دوم	j_{10}	۵۰	Kg.m^2
اینرسی چرخ‌دنده با سرعت متوسط	j_{11}	۱۸	Kg.m^2
اینرسی چرخ‌دنده با سرعت بالا	j_{12}	۱	Kg.m^2
اینرسی شفت سرعت بالا	j_{13}	۱۵	Kg.m^2
اینرسی ژنراتور	j_{14}	۲۰۰	Kg.m^2
سختی شفت کم سرعت	k_1	۱۷۹۴	Nm/deg.
سختی چرخ‌دنده سیاره‌ای اول	k_2	۱۲۷	N/m
سختی شفت میانی اول	k_3	۴۸۸۳	Nm/deg.
سختی چرخ‌دنده سیاره‌ای دوم	k_4	۱۵۸	N/m
سختی شفت میانی دوم	k_5	۳۶۴۴	Nm/deg.
سختی چرخ‌دنده موازی (انتهاپی)	k_6	۲۷	N/m
سختی شفت سرعت بالا	k_7	۴۲۴۳	Nm/deg.
میرایی شفت کم سرعت	c_1	۲۵۴۳	Nm/(rev/min)
میرایی شفت میانی اول	c_2	۲۴	Nm/(rev/min)
میرایی شفت میانی دوم	c_3	۱۵۴۳	Nm/(rev/min)
میرایی شفت پرسرعت	c_4	۱۲۴۳	Nm/(rev/min)
میرایی تماسی سیاره‌ای اول	c_5	۲۵۴۳	Nm/(m/s)
میرایی تماسی سیاره‌ای دوم	c_6	۲۴	Nm/(m/s)
میرایی تماسی چرخ‌دنده‌های موازی	c_7	۱۵۴۳	Nm/(m/s)
لقی کل مجموعه سیاره‌ای اول	tot_1	۳	mm
حد نفوذ مجموعه سیاره‌ای اول	lim_1	۳-۲	mm
لقی کل مجموعه سیاره‌ای دوم	tot_2	۲	mm
حد نفوذ مجموعه سیاره‌ای دوم	lim_2	۲-۲	mm
لقی کل چرخ‌دنده آخر	tot_3	۱۵-۱	mm
حد نفوذ چرخ‌دنده آخر	lim_3	۱۵-۳	mm
مدول الاستیسیته	e	۲۱۵۱۰	N/m^2
نسبت پواسون	ν	۲۹-۲	-

۵- مدل ژنراتور

ژنراتور استفاده شده در توربین مرجع، یک ژنراتور القایی (DFIG) است [۲۱]. ژنراتورها و موتورهای القایی در حالتی که روتور آن‌ها با سرعتی بیش از سرعت سنکرون چرخانده شود، انرژی الکتریکی تولید می‌کنند. برای نمونه، سرعت سنکرون برای موتور چهار قطبی مشابهی که در شبکه‌های برق ۶۰ و ۵۰ هرتز کار می‌کند به ترتیب ۱۸۰۰ و ۱۵۰۰ دوربردقیقه است [۲۲]. ژنراتورهای القایی به دلیل قابلیت تولید توان در سرعت‌های متغیر (روتور)، اغلب در توربین‌های بادی و نیروگاه‌های برقی کوچکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ساختار

پیچشی به صورت یک‌بعدی و با مدل چند جرمی در نظر گرفته شده‌است. همچنین اثرات پیچش شفت‌ها، کج شدن دندانه‌ها در راستای عمود بر محل تماس، برخورد^۱ و فاصله دندانه‌ها نیز لحاظ شده‌است. برای مدل‌سازی جرم شفت‌ها، اینرسی دورانی شفت‌ها به دو نیمه مساوی تقسیم و به دو طرف شفت اضافه می‌شوند. برای شفت‌ها اثرات سختی و میرایی (در محل اتصال دو نیمه‌ی شفت) نیز در نظر گرفته شده‌است. اینرسی سایر اجزای توربین نیز بایستی به مدل اضافه شوند. اینرسی‌های دورانی روتور و ژنراتور نیز به صورت توده‌ای به دو طرف مسیر انتقال توان اضافه می‌شود.



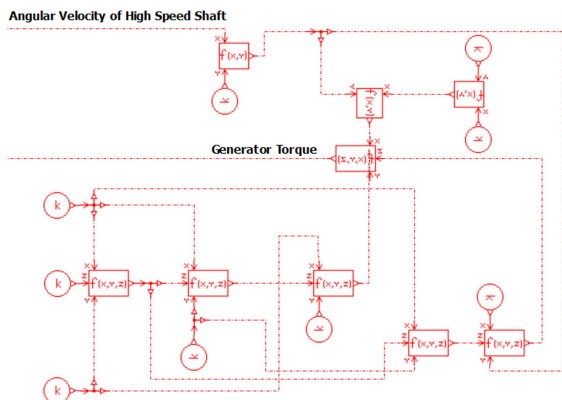
شکل ۷- مدل بخش انتقال توان

جدول ۴: داده‌های مربوط به سیستم انتقال توان

نام	نماد	اندازه	واحد
شعاع رینگ چرخ‌دنده اول	r_{1r}	۴۴۰	mm
شعاع چرخ‌دنده خورشیدی اول	r_{1s}	۱۱۰	mm
شعاع رینگ چرخ‌دنده دوم	r_{2r}	۳۲۰	mm
شعاع چرخ‌دنده خورشیدی دوم	r_{2s}	۸۰	mm
شعاع پیچ چرخ‌دنده موازی (انتهاپی) اول	r_1	۱۸۴	mm
شعاع پیچ چرخ‌دنده موازی (انتهاپی) دوم	r_2	۵۰	mm
نسبت دنده کلی	i	۱:۹۲	/
اینرسی روتور	j_1	۴۸۵۵	Kg.m^2
اینرسی شفت کم سرعت	j_2	۲۵۰۰	Kg.m^2
اینرسی حامل سیاره‌ای اول	j_3	۸۰	Kg.m^2
اینرسی چرخ‌دنده سیاره‌ای اول	j_4	۵	Kg.m^2
اینرسی چرخ‌دنده خورشیدی اول	j_5	۱۰	Kg.m^2
اینرسی شفت میانی اول	j_6	۱۰۰	Kg.m^2
اینرسی حامل سیاره‌ای دوم	j_7	۶۵	Kg.m^2
اینرسی چرخ‌دنده سیاره‌ای دوم	j_8	۳	Kg.m^2

^۱Backlash

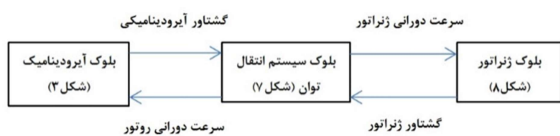
^۲Doubly Fed Induction Generator



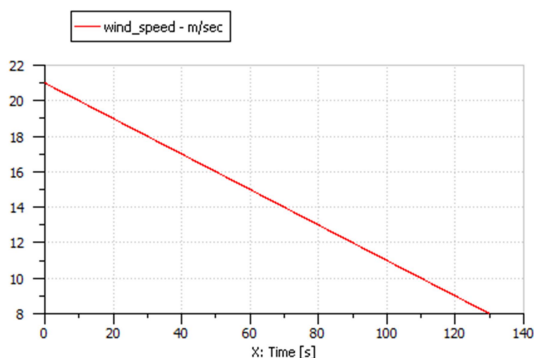
شکل ۸- مدل ژنراتور

۶- اعتبارسنجی و بررسی نتایج

مدل بلوک دیاگرامی توربین باد از اتصال بلوک آیرودینامیک، بلوک سیستم انتقال توان و بلوک ژنراتور مطابق شکل ۹ حاصل می شود که به کمک آن می توان عملکرد توربین را به صورت ناپایا بررسی کرد. برای بررسی قابلیت روش پیشنهادی در مدل سازی عملکرد توربین مرجع، پروفیل سرعت باد ورودی به صفحه روتور مطابق شکل ۱۰ در نظر گرفته شده است. در این پروفیل، سرعت باد طی ۱۳۰ ثانیه به صورت خطی از ۲۱ تا ۸ متر بر ثانیه تغییر می کند. به عبارتی، تا حدود ۹۰ ثانیه ۹۰، سرعت باد بیشتر از سرعت نامی توربین (۱۲ متر بر ثانیه) و سپس کمتر از سرعت نامی می شود.



شکل ۹- طرحواره کلی از مدل بلوک دیاگرامی توربین



شکل ۱۰- پروفیل سرعت باد

در شکل ۱۱ نمودار تغییرات سرعت دورانی روتور بر حسب زمان رسم شده است. این شکل نشان می دهد که کنترلر جای گذاری شده توانایی مناسبی در میرا کردن نوسانات ناشی از تغییرات باد را دارد، به طوری که دور روتور تا قبل از ثانیه ۹۰ در حدود مقدار نامی ۱۵ دور

مکانیکی و الکتریکی ژنراتورهای القایی، بسیار ساده تر از دیگر انواع ژنراتورهاست و همچنین به جاروبک و کموتاتور نیز نیازی ندارند. گشتاور لقی هوا^۱ برای ماشین های آسنکرون با رابطه (۱۲) تقریب زده می شود [۱۸].

$$M \approx \frac{2 * M_k}{\frac{s}{S_k} + \frac{S_k}{s}} \quad (12)$$

در این رابطه M_k گشتاور نهایی، s لغزش و S_k لغزش نهایی می باشد.

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (13)$$

در این رابطه n_1 سرعت آسنکرون (سرعت شبکه الکتریکی) و n سرعت دورانی روتور الکتریکی می باشد. اگر فرکانس شبکه را برابر f و تعداد جفت قطب های ژنراتور را برابر p بگیریم، آنگاه سرعت شبکه الکتریکی از رابطه (۱۴) قابل محاسبه خواهد بود [۱۸].

$$n_1 = \frac{60f}{p} \quad (14)$$

برای محاسبه لغزش و گشتاور نهایی از روابط (۱۵) و (۱۶) استفاده شده است.

$$S_k = \frac{R_2}{X_2} \sqrt{\frac{R_1^2 + X_1^2}{R_1^2 + \sigma^2 X_1^2}} \quad (15)$$

$$M_k = \frac{3U^2}{4\pi n_0} \frac{1 - \sigma}{R_1(1 - \sigma) + \sqrt{(R_1^2 + \sigma^2 X_1^2)(1 + \frac{R_2^2}{X_2^2})}} \quad (16)$$

در روابط (۱۵) و (۱۶) داریم:

$$X_1 = X_h + X_{1\sigma} \quad (17)$$

$$X_2 = X_h + X_{2\sigma} \quad (18)$$

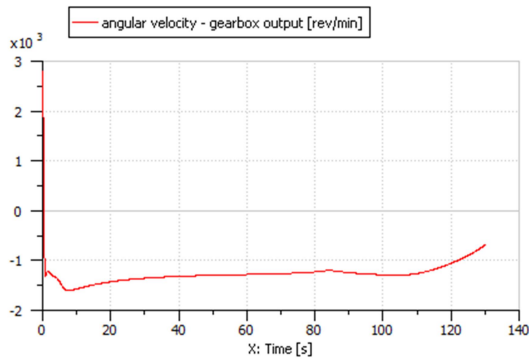
$$\sigma = 1 - \frac{X_h^2}{X_1 X_2} \quad (19)$$

نام گذاری و مقادیر متناظر با پارامترهای ژنراتور توربین مرجع در جدول ۵ آورده شده اند [۱۸، ۲۳، ۲۴]. مدل بلوک دیاگرامی ژنراتور در شکل ۸ نمایش داده شده است. ورودی و خروجی این بلوک به ترتیب سرعت دورانی شفت پرسرعت و گشتاور ژنراتور می باشد.

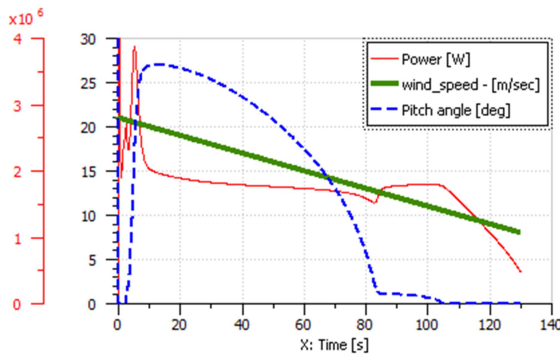
جدول ۵- داده های مربوط به ژنراتور

R_1	مقاومت استاتور	۰/۰۰۱۱۶۴
R_2	مقاومت روتور (اهم)	۰/۰۰۱۳۱
X_h	راکتانس مغناطیسی (اهم)	۰/۹۴۱
$X_{1\sigma}$	راکتانس نشتی استاتور (اهم)	۰/۰۲۲
$X_{2\sigma}$	راکتانس نشتی روتور (اهم)	۰/۰۲۳۷
p	تعداد جفت قطبها	۲
f	فرکانس شبکه (هرتز)	۵۰
σ	نشتی کلی	از رابطه (۱۹)
U	ولتاژ استاتور (ولت)	۶۸۰

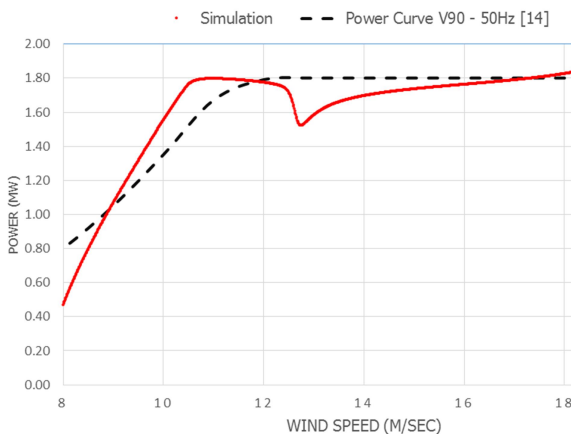
^۱Air gap moment



شکل ۱۲- سرعت دورانی ژنراتور



شکل ۱۳- تغییرات توان، زاویه پیچ و سرعت باد



شکل ۱۴- مقایسه منحنی توان با حالت مرجع

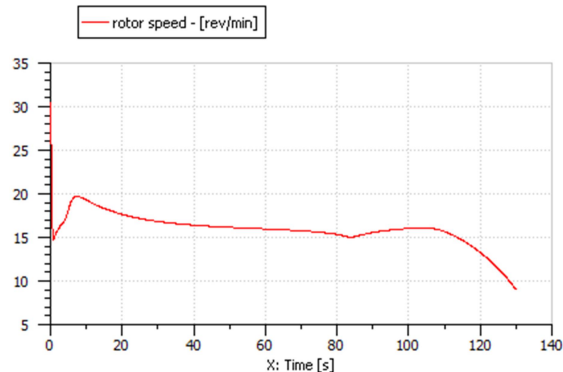
۷- نتیجه گیری

در این پژوهش، روشی برای مدل سازی بلوک دیاگرامی توربین های باد بزرگ محور افقی ارائه شد. از روابط تجربی موجود برای محاسبه ضریب توان یک توربین باد مرجع، به منظور محاسبه گشتاور آیرودینامیکی ورودی به سیستم انتقال توان استفاده شد. سپس با مدل سازی زیرمجموعه های سیستم انتقال توان سه مرحله ای توربین مرجع و معادلات حاکم در نرم افزار AMESim، عملکرد بخش جعبه دنده و متعلقات آن با در نظر گرفتن یک درجه آزادی پیچش انجام شده است. به طور مشابه، با در نظر گرفتن روابط حاکم بر ژنراتور، مدل سازی آن نیز انجام شد. با اتصال مدل بخش های مختلف آیرودینامیک، سیستم

بر دقیقه حفظ می شود و سپس با کاهش سرعت باد به کمتر از سرعت نامی، دور روتور نیز کاهش می یابد. در صورتی که تلافیات وجود نداشته باشد و تمامی اجزا در شرایط ایده آل کار کنند، انتظار می رود که مقدار سرعت دورانی ژنراتور برابر با حاصل ضرب سرعت دورانی روتور در نسبت تبدیل کلی جعبه دنده باشد. مقدار سرعت دورانی ژنراتور مطابق شکل ۱۲، حدود ۱۲۰۰ دور بر دقیقه (تا زمانی که سرعت باد بزرگتر از مقدار نامی آن باشد) است. باتوجه به مدل کردن تلفات در شبیه سازی حاضر، این مقدار اندکی کمتر از حاصل ضرب سرعت دورانی روتور در حالت پایا (۱۵ دور بر دقیقه برای زمانی که سرعت باد بزرگتر یا مساوی مقدار نامی آن باشد) در نسبت تبدیل جعبه دنده (که برابر ۹۲ است) خواهد بود.

در شکل ۱۳ مقدار توان آیرودینامیکی، زاویه پیچ پره و پروفیل سرعت باد بر حسب زمان نشان داده شده است. با توجه به شکل، مقدار توان تولید شده توسط توربین در فاصله های زمانی که مقدار سرعت باد بیش از مقدار نامی است، تطابق خوبی با مقدار توان نامی توربین مرجع (که برابر ۱.۸ است) دارد. همچنین عملکرد کنترلر تنظیم توان تولیدی نشان می دهد که، با کمتر شدن سرعت باد از مقدار نامی، زاویه پیچ نیز تا حدود صفر درجه کاهش می یابد تا بیشینه توان ممکن حاصل شود.

در شکل ۱۴ توان خروجی توربین مرجع با نتایج حاصل از شبیه سازی مقایسه شده است. مشاهده می شود که تطابق مناسبی بین نتیجه شبیه سازی و داده های مرجع [۱۳] وجود دارد. اختلاف ناچیز بین مقدار توان تولیدی حاصل از شبیه سازی با مقدار نامی توربین مرجع می تواند ناشی از روش تقریب تحلیلی در محاسبه آیرودینامیکی ضریب توان و همچنین نوع کنترلر به کار گرفته شده باشد. اگرچه با افزایش دقت مدل آیرودینامیکی، نتایج با دقت بیشتری حاصل می شود ولی روش تقریب مهندسی، به علت پیچیدگی کمتر و همچنین داده های ورودی مورد نیاز کمتر، روش کم هزینه ای محسوب می شود. علاوه بر این، کاهش توان شبیه سازی شده در نزدیکی سرعت نامی روتور ناشی از کنترلر PID جایگذاری شده است. این کنترلر ساده تر از کنترلرهای به کار گرفته شده برای تنظیم زاویه پیچ پره ها می باشد و برای حصول دقت بیشتر در مدل سازی، می بایست از کنترلرهای پیشرفته تری استفاده کرد.



شکل ۱۵- کنترل دور روتور

- [12] Rudion K., Orths A. and Styczynski Z., Modelling of variable speed wind turbines with pitch control. Proceedings of the 2th International Conference on Critical Infrastructures, Grenoble, France, October 25-27, 2004.
- [13] General Specification, V90-1.8/2.0 MW 50 Hz VCS, T05 0004-6207, 2010.
- [14] Manwell J. F., Mc Gowan J. G. and Rogers A. L., *Wind energy explained: theory, design and application*. 2nd edition, Wiley, England, 2009.
- [15] Burton T., Sharpe D., Jenkins N. and Bossanyi E., *Wind Energy Handbook*. John Wiley and Sons, Ltd., 2001.
- [16] Ebrahimi A. and Sekandari, M., Transient response of the flexible blade of horizontal-axis wind turbines in wind gusts and rapid yaw changes. *Energy*, Vol. 145, pp. 261-275, 2018.
- [17] Rolan A., Luna A., Vazquez G., Aguilar D. and Azevedo G., Modeling of a variable speed wind turbine with a permanent magnet synchronous generator. In *Industrial Electronics, 2009. ISIE 2009. IEEE International Symposium on* (pp. 734-739). IEEE.
- [18] Heier S., *Grid integration of wind energy: onshore and offshore conversion systems*. John Wiley & Sons, 2014.
- [19] Behera S., Subudhi B. and Pati B.B., Design of PI controller in pitch control of wind turbine: A comparison of PSO and PS algorithm. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 6(1), pp. 271-281, 2016.
- [20] Martin G. H., *Kinematics and dynamics of machines*. Waveland Press, 2002.
- [21] Muller S., Deicke M. and De Doncker R.W., Doubly fed induction generator systems for wind turbines. *IEEE Industry applications magazine*, 8(3), pp. 26-33, 2002.
- [22] Theodore W., *Electrical machines, drives and power systems*, 6th edition, Pearson Education India, 2007.
- [23] Todorov M., Dobrev I. and Massouh F., Analysis of torsional oscillation of the drive train in horizontal-axis wind turbine. In *Advanced Electromechanical Motion Systems & Electric Drives Joint Symposium, ELECTROMOTION 2009, 8th International Symposium on* (pp. 1-7). IEEE, 2009.
- [24] Kooijman H.J.T., Lindenburch C., Winkelaar D. and Van der Hooft E.L., DOWEC 6 MW Pre-Design: Aeroelastic modeling of the DOWEC 6 MW pre-design in PHATAS. *Energy Research Center of the Netherlands, Technical Report No. DOWEC 10046_009*, 2003.

انتقال توان، ژنراتور و کنترلگر به یکدیگر، مدل توربین باد مرجع تولید شده است. به کمک این مدل، رفتار ناپایای توربین و عملکرد کنترل زاویه پیچ در تنظیم توان خروجی برای حالتی که پروفیل سرعت باد ورودی به صفحه روتور طی ۱۳۰ ثانیه به صورت خطی از ۲۱ تا ۸ متربرثانیه تغییر می‌کند، بررسی شده است. نتایج نشان دهنده دقت قابل قبول مدل برای پیش‌بینی رفتار عملکرد توربین است. همچنین به کمک روش پیشنهادی، امکان مطالعه اثر تغییرات در هریک از زیرسیستم‌های توربین روی عملکرد کلی آن وجود دارد.

۸- تقدیر و تشکر

نویسندگان از حمایت‌های پژوهشگاه نیرو و دانشگاه صنعتی شریف برای انجام این تحقیق قدردانی می‌کنند.

۹- مراجع

- [1] The European offshore wind industry – key trends and statistics 2016. European Wind Energy Association (EWEA), 2017.
- [2] Spinato F., Tavner P.J., Van Bussel G.J.W. and Koutoulakos E., Reliability of wind turbine subassemblies. *IET Renewable Power Generation*, 3(4), pp.387-401, 2009.
- [3] Singh M. and Santoso S., Dynamic models for wind turbines and wind power plants. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Report No. NREL/SR-5500-52780, 2011.
- [4] Abobkr A.H. and El-Hawary M.E., Evaluation of wind turbine characteristics built-in model in Matlab Simulink. In *Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, IEEE, 2016.
- [5] Hansen A.D., Jauch C., Sørensen P.E., Iov F. and Blaabjerg F., Dynamic wind turbine models in power system simulation tool DigSILENT. Technical University of Denmark, Risø National Laboratory, Risø-R-1400(ed.2)(EN), 2007.
- [6] Lei T., Ozakturk M. and Barnes M., Modelling and analysis of DFIG wind turbine system in PSCAD/EMTDC. 6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012), 2012.
- [7] Li X., Shi H., Wang Y. and Miao F., Modeling and Simulation Based on Wind Turbine Based on AMESim. *IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)* 2012.
- [8] Shi W., Kim C.W., Chung C.W. and Park H.C., Dynamic modeling and analysis of a wind turbine drivetrain using the torsional dynamic model. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 14, No. 1, pp.153-159, 2013.
- [9] Shi W., Park H.-C., Na S., Song J., Ma S. and Kim C.-W., Dynamic analysis of three-dimensional drivetrain system of wind turbine. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 15, No. 7, pp. 1351-1357, 2014.
- [10] Zhu C., Chen S., Liu H., Huang H., Li G. and Ma F., Dynamic analysis of the drive train of a wind turbine based upon the measured load spectrum. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 28, No. 6, pp. 2033-2040, 2014.
- [11] Zhu C., Chen S., Song C., Liu H., Bai H. and Ma F., Dynamic analysis of a megawatt wind turbine drive train. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 29, No. 5, pp. 1913-1919, 2015.