ماهنامه علمى پژوهشى

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-26]

مدلسازی و طراحی کنترل کنندهی فیدبک حالت دینامیکی به همراه تخمین گر سرعت باد، در توربینهای بادی سرعت متغیر

 *2 وحيد فضل الهى 1 ، مصطفى تقى زاده

1 - دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران 2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران * تهران، صندوق يستى 167651719 mo_taghizadeh@sbu.ac.ir

چکیدہ	اطلاعات مقاله
در این مقاله، بهمنظور بهبود عملکرد کنترلکننده و افزایش بازدمی توربین بادی 660 کیلووات ساخت شرکت وستاس، تحقیقاتی مبتنی بر تئوری و تجربه با استفاده از دادههای واقعی صورت گرفته و یک کنترلکنندهی فیدبک حالت طراحی شده است. دادههای واقعی بهدستآمده از سایت بادی بینالود، نشان میدهد که این توربینها دارای بازدهی پایینی میباشند. این مسئله ناشی از عملکرد ضعیف کنترلکنندههای کلاسیک	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 14 دی 1394 پذیرش: 22 اسفند 1394 ارائه در سایت: 11 اردیبهشت 1395
– در ردیابی توان ماکزیمم (در ناحیهی بار جزئی) و همچنین خطای قابل ملاحظه در اندازه گیری سرعت باد می باشد. در این تحقیق، برای رفع این	کلید واژگان:
مشکل، یک کنترلکنندهی فیدبک حالت که باعث بهبود عملکرد توربین و حذف نیاز به اندازهگیری سرعت باد میشود، طراحی شده است. در	توربین بادی
این کنترل کننده، بهمنظور کنترل گشتاور ژنراتور، از سرعت ژنراتور و گشتاور اًیرودینامیکی فیدبک گرفتهشده است. همچنین با فیدبک گرفتن از	مدلسازى
گشتاور آیرودینامیکی، مقدار سرعت باد با دقت بسیار مطلوبتری در مقایسه با اندازهگیری سرعت باد با بادسنج، تخمین زدهشده است. با توجه به	کنترل کنندہی فیدبک حالت
اینکه طراحی کنترلکننده و همچنین شبیهسازی عملکرد سیستم کنترلی نیاز به مدل دقیق سیستم دارد، مدلسازی کامل توربین باد در	ژنراتور القایی
زیرسیستیمهای مختلف انجامشده و پارامترهای آن با استفاده از دادههای واقعی شناسایی شدهاند. شبیهسازیهای انجامشده در نرمافزار متلب	
نشاندهندهی بهبود عملکرد کنترلکنندهی فیدبک حالت طراحیشده در مقایسه با کنترلکنندهی کلاسیک استفادهشده در توربین واقعی می-	
باشد.	

Modeling and design of dynamic state feedback controller with wind speed estimator, in variable speed wind turbines

Vahid Fazlollahi, Mostafa Taghizadeh^{*}

Department of Mechanical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. * P.O.B. 167651719 Tehran, Iran, mo_taghizadeh@sbu.ac.ir

Original Research Paper Received 04 January 2016 Accepted 12 March 2016 Available Online 30 April 2016In this paper, in order to improve the control performance and increase the efficiency of Vestas 660 kW wind turbine, a research based on theory and practice, using actual data is done, and a state feedback controller is designed. The actual data obtained from Binalood wind power plant show that thes turbines have a low efficiency. This is due to the poor performance of the classical controller in trackin maximum power in the partial load area, and the significant error in measurement of wind speed. In thi research, to solve these problems, a state feedback controller is designed which improves the turbin performance and eliminates the need to measure wind speed. In this controller, in order to control the generator torque, feedback of generator speed and aerodynamic torque are taken. Also, using th feedback of aerodynamic torque, the wind speed is estimated much more accurately than it is measure by an anemometer. Since, an accurate model of the system is needed for controller design an simulation, wind turbine modeling is done in different subsystems, and its parameters are identifie using actual data. Simulations performed in MATLAB indicate the improvement of the system performance with the designed state feedback controller, compared to the classical controller in the actual wind turbine	ARTICLE INFORMATION	Abstract
Keywords: Wind Turbine Modelingmaximum power in the partial load area, and the significant error in measurement of wind speed. In thi research, to solve these problems, a state feedback controller is designed which improves the turbin performance and eliminates the need to measure wind speed. In this controller, in order to control th generator torque, feedback of generator speed and aerodynamic torque are taken. Also, using th feedback of aerodynamic torque, the wind speed is estimated much more accurately than it is measure by an anemometer. Since, an accurate model of the system is needed for controller design an simulation, wind turbine modeling is done in different subsystems, and its parameters are identifie using actual data. Simulations performed in MATLAB indicate the improvement of the system performance with the designed state feedback controller, compared to the classical controller in th actual wind turbine	Original Research Paper Received 04 January 2016 Accepted 12 March 2016 Available Online 30 April 2016	In this paper, in order to improve the control performance and increase the efficiency of Vestas 660 kW wind turbine, a research based on theory and practice, using actual data is done, and a state feedback controller is designed. The actual data obtained from Binalood wind power plant show that these turbines have a low efficiency. This is due to the poor performance of the classical controller in tracking
	<i>Keywords:</i> Wind Turbine Modeling State Feedback Controller Induction Generator	maximum power in the partial load area, and the significant error in measurement of wind speed. In this research, to solve these problems, a state feedback controller is designed which improves the turbine performance and eliminates the need to measure wind speed. In this controller, in order to control the generator torque, feedback of generator speed and aerodynamic torque are taken. Also, using the feedback of aerodynamic torque, the wind speed is estimated much more accurately than it is measured by an anemometer. Since, an accurate model of the system is needed for controller design and simulation, wind turbine modeling is done in different subsystems, and its parameters are identified using actual data. Simulations performed in MATLAB indicate the improvement of the system performance with the designed state feedback controller, compared to the classical controller in the actual wind turbine.

1-مقدمه

اقبال بیشتری روبرو شده است. توربینهای بادی با توجه به شرایط عملکردی ژنراتور به انواع توربینهای سرعت ثابت 1 و سرعت متغیر 2 تقسیم بندی می شوند. با توجه به مزایای بسیاری مانند افزایش استخراج انرژی از باد و کاهش بارهای وارده به

در طی سالیان اخیر، با توجه به پیشرفتهای چشمگیری که در صنعت حاصل شده است، استفاده از توربین های بادی جهت تولید انرژی برق، گسترش روزافزونی داشته است. به خاطر مزایای زیستمحیطی، اجتماعی و اقتصادی، استفاده از انرژی باد حتی در برابر دیگر انرژیهای تجدید پذیر با

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

V. Fazlollahi, M. Taghizadeh, Modeling and design of dynamic state feedback controller with wind speed estimator, in variable speed wind turbines, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 4, pp. 361-371, 2016 (in Persian)

¹ Fixed speed wind turbines ² Variable speed wind turbines

مجموعهی انتقال قدرت³ ، امروزه از توربینهای سرعت متغیر استفاده می-شود [1].

در توربینهای سرعت متغیر، با کنترل سرعت ژنراتور رسیدن به مقدار ضریب توان¹ ماکزیمم (در نسبت سرعت نوک پره بهینه) امکان پذیر می-شود [2]. با توجه به ساختار این توربینها، با تغییر سرعت باد (در سرعتهای ماندن نسبت سرعت نوک پره در مقدار بهینهی خود می شود. باید توجه داشت که کنترل سرعت در این توربینها متناسب با تغییر سرعت باد در زاویهی پیچ ثابت (صفر درجه) انجام می شود. البته تنها سرعت متغیر بودن توربین باد، تضمینی جهت رسیدن به مقدار بهینهی نسبت سرعت نوک پره نمی اشد، بلکه کیفیت و نحوهی عملکرد کنترل کننده تأثیر زیادی در افزایش استخراج انرژی از باد دارد. لذا با توجه به کیفیت عملکرد کنترل کنندهی استفاده شده در توربینهای باد، رسیدن به مقدار بهینهی نسبت سرعت نوک استخراج انرژی از باد دارد. لذا با توجه به کیفیت عملکرد کنترل کننده ی پره، جهت افزایش استخراج انرژی از باد، امکان پذیر می شود.

با توجه به دادههای واقعی بهدستآمده از سایت بادی بینالود و نتایج شبیهسازی، انرژی استخراجی از باد در سرعتهای کمتر از حد نامی، از مقدار بهینهی آن کمتر است. این مسئله ناشی از عملکرد ضعیف کنترلکنندهی کلاسیک این توربین باد میباشد. برای حل این مشکل در این مقاله، یک کنترلکنندهی غیرخطی فیدبک حالت دینامیکی که نیازی به اندازه گیری سرعت باد ندارد، طراحی شده است. در این کنترل کننده با فیدبک گرفتن از سرعت ژنراتور و استفاده از گشتاور آیرودینامیکی و سرعت روتور، گشتاور ژنراتور جهت استخراج حداکثر انرژی از باد، کنترل می شود. این کنترل کننده-ی طراحیشده به علت استفاده از معادلات دینامیکی، دارای پاسخی سریع به تغییرات به وجود آمده در سرعت باد می باشد. این ویژگی امکان دستیابی به توان ماکزیمم در سرعتهای باد کمتر از حد نامی (ناحیهی بار جزئی) را به وجود میآورد. همچنین با فیدبک گرفتن از سرعت ژنراتور و گشتاور آیرودینامیکی، اطلاعات دقیقی از حالت عملکردی توربین باد در هرلحظه، به كنترلكننده مىرسد. اين اطلاعات باعث كنترل بهتر توربين متناسب با شرایط واقعی موجود در هرلحظه می شود. اما در کنترل کننده های کلاسیک فقط از سرعت ژنراتور جهت کنترل توربین باد استفاده می شود، که این باعث کاهش اطلاعات دریافتی از شرایط عملکردی توربین در هرلحظه می شود. درنتيجه كنترلكننده نمىتواند بهصورت دقيق و مطلوب عمل كند، كه درنهایت باعث کاهش استخراج انرژی از باد می شود. از دیگر مزایای کنترل-كنندهى طراحى شده در اين مقاله، تخمين سرعت باد با دقت مطلوب توسط معادلهی غیرخطی گشتاور آیرودینامیکی میباشد. در اغلب توربینهای بادی از بادسنج³ برای اندازه گیری سرعت باد استفاده می شود. با توجه به چرخش پرههای توربین باد و حالت گردابهای به وجود آمده در اطراف پرههای آن، اندازه گیری سرعت باد با بادسنج همراه با خطای قابل ملاحظه ای میباشد، که این تأثیر منفی روی بازدهی توربین باد دارد [3]. اما در این کنترلکنندهی طراحی شده، این مشکل با تخمین سرعت باد به روش گفته شده برطرف شده است. درنتیجه، این عملکرد مطلوب کنترلکنندهی طراحی شده با توجه به نتایج شبیهسازی، باعث افزایش قابل توجه استخراج انرژی از باد نسبت به توربینهای باد با کنترل کنندهی کلاسیک، شده است.

در بخش دوم مقاله، به سابقهی علمی موضوع اشارهشده و در بخش سوم

¹ Drive Train ² C_P

3-عملكرد توريين بادى

عملکرد توربین باد شرح دادهشده است. در بخش چهارم ژنراتور مورداستفاده در توربین باد واقعی ذکرشده، شرح دادهشده و در بخش پنجم مدلسازی توربین انجامشده است. در بخش ششم طراحی کنترلکننده و تخمینگر سرعت باد انجامشده و در ادامه در بخش هفتم نتایج شبیهسازی در نمودارهای مختلف با دادههای واقعی بهدستآمده از سایت بادی بینالود جهت اعتبار سنجی مقایسه شده است.

2-سابقهی علمی موضوع در داخل و خارج از کشور

با توجه به روند روزافزون استفاده از انرژیهای نو و پیشرفت دستگاهها با توسعه فناوری، جهت ایجاد تنوع در منابع تأمین انرژی و کاهش مصرف سوختهای فسیلی، باید حرکتی در تولید این گونه انرژیها صورت گیرد. در ایران نیز در طی سالیان اخیر با توجه به اهمیت انرژیهای تجدیدپذیر و احساس خطر از کاهش منابع انرژیهای فسیلی توجه بیشتری به انرژیهای تجدیدپذیر صورت گرفته است، بهطوریکه اخیرا چندین نیروگاه بادی مورد بهرهبرداری قرار گرفته است. از کارهای انجامشده طی سالیان اخیر می توان به این موارد اشاره کرد.

کارلین و همکاران [4]، در یک توربین بادی سرعت متغیر، روش ردیابی نقطهای توان ماکزیمم⁴ را برای رسیدن به حداکثر توان شرح دادهاند، و از یک کنترلکنندهی فازی در ناحیهی بار جزئی، برای رسیدن به توان ماکزیمم استفاده کردهاند. سهیل گنج فر و قاسمی [5]، یک روش کنترلی جدید برای استخراج ماکزیمم انرژی از باد ارائه کردهاند. در این مقاله با استفاده از یک شبکهی بازتاب حالت⁵ بدون نیاز به تخمین سرعت باد، بیشترین توان از باد استخراجشده است. حیدری و همکاران [6]، مقایسهای بین روشهای مختلف استخراج انرژی حداکثر از توربینهای بادی انجام دادهاند و در ادامه این مقاله به نقاط ضعف و قوت هریک اشارهشده است. شیخان و همکاران [7]، از یک کنترل کنندهی تناسبی انتگرال گیر⁶ برای کنترل توربین باد استفاده کردهاند، درحالی که ضرایب بهره توسط تئوری فازی بهدست آمده است. قاسمی و همکاران [8]، از یک شبکهی عصبی کوانتوم بهعنوان کنترل کننده در یک ساختار كنترلى تطبيقى استفاده كردهاند، كه اين كنترلكننده باعث بهبود بازدهی توربین باد شده است. سالومو و همکاران [9]، مقایسهای را بین سه الگوریتم کنترلی فازی-تناسبی انتگرال گیر، فازی و تناسبی انتگرال گیر انجام دادهاند و مزایا و نحوهی عملکرد هریک از این روشها را به تفصیل شرح داده-اند. بوخضار و سیگور [10]، برای مدل سازی توربین باد از مدل دو جرمی استفاده کرده و سرعت باد را توسط روش نیوتن رافسون تخمین زدهاند. رودین و همکاران [11]، ابتدا توربین باد را مدل کرده، سپس با استفاده از کنترل زاویهی پیچ، توان را در ناحیهی بالاتر از حد نامی، در مقدار نامی خود ثابت نگهداشتهاند. لاکس و همکاران [12]، توربین باد را بهصورت یک سازهی ارتجاعی مدل کرده سپس رویکردهای کنترلی پایهی توربینهای باد را مورد بررسی قرار دادهاند. چن و همکاران [13]، از مدلسازی فازی در یک مزرعه-ی بادی استفاده کرده و در ادامه با مدلسازی شبکهی عصبی نتایج حاصل را با مدلسازی فازی مقایسه کردهاند. ترینگر و پترسون [14]، در این مقاله استراتژیهای مختلف کنترلی برای توربین باد سرعت متغیر- زاویهی پیچ ثابت، آورده شده است.

⁴ Maximum Power Point Tracking (MPPT)

³ Anemometer

⁵ Echo State Network

⁶ Proportional integrator (PI)

توربینهای بادی توان موردنیاز جهت تولید انرژی برق را از طریق تبدیل مقداری از انرژی جنبشی باد به گشتاور، تأمین میکنند. مقدار انرژی که پره-ها از باد میگیرند، بستگی به مساحت روتور، چگالی هوا، طراحی پرهها و سرعت باد دارد.

$$P_{\text{wind}} = \frac{1}{2} \rho A V_{\text{wind}}^3 \tag{1}$$
$$C_P (\lambda, \beta) = \frac{P_r}{P_{\text{wind}}} \tag{2}$$

با برخورد باد با سرعت مناسب به پرههای توربین، پرهها حرکت کرده و باعث چرخش شفت سرعت پایین میشوند. شفت سرعت پایین نیز به یک گیربکس متصل میباشد تا توسط آن سرعت دورانی افزایش یابد. با افزایش سرعت در گیربکس، شفت سرعت بالا شروع به چرخش میکند و زمانی که سرعت شفت سرعت بالا به سرعت نامی ژنراتور رسید باعث حرکت ژنراتور و درنهایت تولید انرژی الکتریکی می شود [15-17].

بهطورمعمول برای بیان عملکرد توربینهای بادی از منحنیهای مشخصه-ی بیبعدی استفاده میشود. این منحنیها عملکرد واقعی توربین باد، در شرایط عملکردی مختلف را نشان میدهند. در ادامه این منحنیها جهت بیان عملکرد توربینهای بادی شرح دادهشدهاند.

1-3- منحنی عملکرد ضریب توان- نسبت سرعت نوک پره

یک روش معمول برای نشان دادن عملکرد توربینهای بادی استفاده از منحنی بیبعد ضریب توان- نسبت سرعت نوک پره میباشد.

در توربینهای بادی سرعت متغیر مقدار ماکزیمم ضریب توان حدودا برابر 0.48 میباشد که در نسبت سرعت نوک پرهی 8.1 به این مقدار دست مییابد. مقدار اشارهشده، از ضریب توانی که توسط حد بتز¹ (حداکثر ممکن انرژی استخراجی توسط توربین بادی از باد میباشد) بهدست آمده (0.59) کمتر است [18]. یکی از دلایل این اختلاف در مقادیر واقعی ضریب توان و مقدار بتز، به علت افتهایی است که در پرهها اتفاق میافتد.

در شکل 1 این منحنی برای یک توربین سه پرهای مدرن نشان دادهشده ست.

ولی باید توجه داشت حتی اگر این افتها هم اتفاق نیفتد؛ رسیدن به مقدار حد بتز ضریب توان، بسیار سخت است، زیرا طراحی پرههای توربین کاملا دقیق و بدون عیب نیست [19].



Fig. 1 3D diagram of $C_P(\lambda, \beta)$ [18] شکل 1 نمودار سهبعدی ضریب توان تابعی از نسبت سرعت نوک پره و زاویهی پیچ [18]

1 Beltz

2-3- منحنی عملکرد ضریب گشتاور - نسبت سرعت نوک پره ضریب گشتاور² با تقسیم ضریب توان به نسبت سرعت نوک پره بهسادگی بهدستآمده میآید. در شکل 2 مشاهده میشود که با افزایش استحکام توربین، مقدار گشتاور افزایش میابد. بنابراین ضریب گشتاور اطلاعات اضافی در رابطه با عملکرد توربینهای بادی به ما نمی دهد. استفادهی اصلی از

زمانی است که روتور به گیربکس و ژنراتور متصل میشود. با توجه به شکل 2 مشاهده میشود که بیشترین مقدار ضریب گشتاور در نسبت سرعت نوک پرهی کمتری به نسبت ضریب توان به دست میآید. همچنین مقدار ضریب گشتاور در یک نسبت سرعت نوک پرهی یکسان، کمتر از ضریب توان است [20].

منحنی ضریب گشتاور- نسبت سرعت نوک پره، بهمنظور ارزیابی گشتاور،

3-3- منحنى عملكرد ضريب رانش - نسبت سرعت نوك پره

این منحنی رابطهی بین ضریب رانش و نسبت نوک پره میباشد. در توربین-های باد نیروی رانش مستقیما به برج وارد میشود و باعث تأثیر زیادی روی طراحی سازهی توربین میشود. همان طور که در شکل 3 مشاهده میشود با افزایش تعداد پرههای توربین باد، میزان نیروی رانش در روتور افزایش می-یابد [20].

3-4- ناحیههای عملکردی توربینهای بادی سرعت متغیر

ناحیههای عملکردی توربین بادی سرعت متغیر در شکل 4 نشان دادهشده است.

با توجه به شکل 4 توربینهای بادی از سه ناحیهی عملکردی مختلف تشکیل شدهاند.

ناحیهی 1- این ناحیه بین سرعت راهاندازی و سرعت نامی می اشد. در این ناحیه سرعت روتور توربین باد متناسب با تغییر سرعت باد، جهت استخراج انرژی ماکزیمم از باد، تغییر میکند.

ناحیهی 2- این ناحیه در محدودهی سرعت نامی و کمتر از توان نامی می-باشد.



Fig. 2 $C_Q - \lambda$ performance curve for wind turbine with different number of blades at $\beta = 0^{\circ}$ [20]

شکل 2 منحنی عملکرد ضریب گشتاور- نسبت نوک پره برای توربین باد با تعداد پرههای متفاوت در زاویهی پیچ صفر درجه [20]

² C_Q



Fig. 3 $C_T - \lambda$ curve [20] شکل 3 منحنی ضریب رانش- نسبت سرعت نوک پره [20]



Fig. 4 wind turbines performance area [21] شكل 4 نواحى عملكردى توربين هاى بادى [21]

ناحیهی 3- در این ناحیه با رسیدن سرعت و توان به مقدار نامی، کنترل زاویهی پیچ فعال شده و با افزایش زاویهی پیچ با ثابت نگهداشتن سرعت ژنراتور، از افزایش توان توربین از مقدار نامی جلوگیری میکند. درنتیجه مقدار توان توربین باد و سرعت ژنراتور در مقدار نامی خود ثابت باقی می-ماند [21].

در ادامه جهت آشنایی با ژنراتور موردبحث در این مقاله، این ژنراتور شرح دادهشده است.

4- ژنراتور القایی لغزش متغیر¹

این ژنراتور در توربین باد واقعی اشارهشده در این مقاله استفادهشده است، که زیرمجموعهی ژنراتورهای القایی با روتور سیمپیچی شده² میباشد. ویژگی-های این نوع ژنراتور این اجازه را میدهد که لغزش قابل تغییری داشته باشد. این ژنراتور در شرایط عملکردی مختلف توربین باد، با انتخاب مقدار لغزش بهینه، باعث کمتر شدن نوسانات در توان و گشتاور خروجی می شود. لغزش متغیر یک روش ساده، قابل اعتماد و اقتصادی برای کاهش بار است. این ژنراتورها دارای یک مقاومت روتور خارجی متغیر میباشند که توسط لغزش قابلكنترل مىباشد. همچنين استاتور اين ژنراتورها بەصورت مستقيم به

شبکهی برق متصل است.

در شکل 5 این ژنراتور نشان دادهشده است.

از مزیتهای این ژنراتور میتوان به، داشتن یک مدار ساده، نیاز نداشتن به حلقههای لغزشی و بهتر کردن محدودهی سرعت عملکرد در مقایسه با ژنراتورهای قفس سنجابی¹ اشاره کرد. همچنین این ژنراتورها میتوانند با دستگاهی ساده بارهای مکانیکی و نوسانات توان را کاهش دهند. اما این نوع ژنراتورها نیاز به سیستم جبران توان راکتیو دارند. همچنین محدودهی تغییر سرعت آنها نسبت به ژنراتور القایی دو سو تغذیه² کمتر میباشد، که این باعث كاهش استخراج انرژی از باد می شود. همچنین كنترل توان راكتیو نیز ضعيف است [23,22,1].

5-مدلسازي توريين باد

برای استخراج انرژی ماکزیمم از باد فقط شرایط باد و پارامترهای هندسی توربین مهم نیستند، بلکه استراتژی کنترلی به کاررفته نیز بسیار مهم میباشد. برای کنترل بهتر توربین باد باید یک مدل غیرخطی که بتواند بهخوبی رفتارهای غیرخطی توربین باد را نمایش دهد، ساخته شود. البته برای انجام فرآیند مدلسازی میتوان از بعضی فرضیات ساده کنندهی مدل نیز استفاده كرد، بهطورىكه تأثير آنچنانى روى تغيير رفتار مدل نسبت به توربين باد واقعى نداشته باشد.

1-5 - فرضيات استفادهشده در اين مدلسازي

- مدلسازی به صورت کاملا غیر خطی انجام شده و در زیر سیستم-های مختلف خطی سازی صورت نگرفته است.
 - پرههای توربین باد بهصورت عمود به جهت باد فرض شده است.
 - از پدیدهی برش باد صرفنظر شده است.

در این مقاله توربین باد سرعت متغیر به زیرسیستمهای آیرودینامیک، مجموعهی انتقال قدرت، ژنراتور و سیستم کنترل پیچ تقسیم شده است. در ادامه مدلسازی زیرسیستم آیرودینامیک انجامشده است.

معادلهی (3) توان موجود در باد را نشان میدهد. از معادلهی (4) مشخص است که ضریب توان تابعی از نسبت سرعت نوک پره و زاویهی پیچ میباشد.

در معادلهی (5) توان آیرودینامیکی جذب شده توسط روتور توربین باد نشان داده شده است. با توجه به این معادله مشخص است که توان

Utility Grid



Fig. 5 optislip induction generator [1] شكل 5 ژنراتور القايي لغزش متغير [1]

OptiSlip

Wound Rotor Induction Generator (WRIG)

 ³ Squirrel cage Generator
 ⁴ Doubly Fed Induction Generator (DFIG)

-

آيروديناميكي توربين باد با توان 3 سرعت باد، متناسب است.

$$P_{\rm wind} = \frac{1}{2} \rho A V_{\rm wind}^3 \tag{3}$$

$$C_P(\lambda,\beta) = \frac{P_a}{P_{\text{wind}}} \tag{4}$$

$$P_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_P(\lambda, \beta) V_{\text{wind}}^3$$
(5)

همچنین رابطهی بین توان و گشتاور آیرودینامیکی توسط معادلهی (6) بیان شده است.

$$P_a = T_a \omega_r \tag{6}$$

$$F_T = \frac{\rho \pi R^2}{2} C_T \left(\frac{\omega_r R}{V_{\text{wind}}}, \beta \right) V_{\text{wind}}^2 \tag{7}$$

$$T_a = \frac{\rho \pi R^3}{2} C_Q \left(\frac{\omega_r R}{V_{\text{wind}}}, \beta \right) V_{\text{wind}}^2 \tag{8}$$

در معادلهی (8)، ضریب گشتاور توسط معادلهی (9) بهدستآمده میآید. $C_{\varrho}(\boldsymbol{\Omega},\boldsymbol{\beta}) = \frac{C_{P}(\boldsymbol{\Omega},\boldsymbol{\beta})}{2}$ (9)

در این قسمت مدلسازی زیرسیستم مجموعهی انتقال قدرت انجامشده است. برای مدلسازی مجموعهی انتقال قدرت دینامیک شفت سرعتپایین توسط معادلهی (10) به دست میآید.

$$J_r \frac{d^2}{dt^2} \theta_r = T_a - T_1 - \frac{d}{dt} \theta_r \tag{10}$$

همچنین دینامیک شفت سرعتبالا نیز با معادلهی (11) بدینصورت محاسبه میشود .

$$J_{\text{gen}} \frac{d^2}{dt^2} \theta_{\text{gen}} = T_h - T_{\text{gen}} - \frac{d}{dt} \theta_{\text{gen}}$$
(11)

در ادامهی مدلسازی مجموعهی انتقال قدرت، قسمت جعبهدنده مدل شده است که بهصورت نسبت دنده در معادلهی (12) اعمال میشود.

$$T_h = \frac{T_1}{N_{\text{gear}}} \tag{12}$$

پیچش مجموعهی انتقال قدرت با استفاده از یک فنر پیچشی و ضریب اصطکاک مدل میشود.

$$F_1 = K_s \delta \theta + B \frac{\mathbf{d}}{\mathbf{d}t} \delta \theta \tag{13}$$

$$\delta\theta = \theta_r - \frac{\theta_{\text{gen}}}{N_{\text{gear}}} \tag{14}$$

$$\delta\omega = \omega_r - \frac{\omega_{\text{gen}}}{N_{\text{gear}}} \tag{15}$$

$$\frac{a}{dt}(\delta\theta) = \delta\omega = \omega_r - \frac{\omega_{\text{gen}}}{N_{\text{gear}}}$$
(16)

با جایکداری معادله ی (10) در (13)، معادله ی (/1) به دست امده می اید.

$$T_1 = K_s \delta \theta + B \omega_r - \frac{\omega_{\text{gen}}}{N_{\text{max}}}$$
(17)

با جایگذاری معادلهی (13) در معادلهی (10) معادلهی (18) به دست می-آید. به همین صورت با جایگذاری معادلهی (13) در معادلهی (12) و سپس (11)، معادلهی (20) به دست میآید. درنهایت دینامیک مجموعهی انتقال قدرت توسط معادلات (19، 18) بیان میشود.

$$J_r \frac{\mathbf{d}}{\mathbf{d}t} \omega_r = [T_r - (k_s \delta \theta + B \delta \omega)$$
(18)

$$\delta\omega = \omega_r - \frac{\omega_{\text{gen}}}{N_{\text{gear}}} \tag{19}$$

$$J_{\text{gen}} \frac{\mathbf{d}}{\mathbf{d}t} \omega_{\text{gen}} = \left[\frac{1}{N_{\text{gear}}} (\mathbf{k}_s \delta \theta + B \delta \omega) - T_{\text{gen}} \right]$$
(20)

زیرسیستم الکتریکی تبدیل انرژی مکانیکی در شفت ژنراتور به الکتریسیته را شرح میدهد. در این زیرسیستم یکی از اجزای اصلی ژنراتور میباشد، که

در این قسمت این زیرسیستم شرح دادهشده است.

در توربین های بادی برای یک ژنراتور ایدهال بدون لحاظ کردن افتها
نوان خروجی، با استفاده از معادلهی (21) به دست میآید.
$$P_e = \omega_{\text{gen}} T_{\text{gen}}$$
 (21)

در این مقاله توربین بادی بهصورت دو جرمی مدلسازی شده است، که در شکل 6 با جزئیات آن را مشاهده میکنید.

البته باید توجه داشت که بازدهی ژنراتور هرچند که بسیار بالاست ولی صد درصد نیست و دارای مقداری افت میباشد، که در معادلهی (22) این افتها لحاظ شدهاند.

$$P_e = \eta_{\rm gen} \omega_{\rm gen} T_{\rm gen} \tag{22}$$

از معادلات (21) و (22) مشخص است که مقدار توان خروجی با تغییر گشتاور ژنراتور تغییر می کند.

$$\dot{T}_{gen} = \frac{1}{\tau_{gen}} (T_{g,ref} - T_{gen})$$
(23)

در ادامه مدلسازی زیرسیستم عملگر زاویهی پیچ¹ ارائهشده است.

عملگر پیچ² یک سروو سیستم غیرخطی است که معمولا باعث چرخش کل پرهها یا بخشی از آنها بهصورت هماهنگ میشود. در یک سیستم حلقه بسته عملگر پیچ میتواند بهعنوان یک سیستم دینامیکی با دامنهی کامل مدل شود و سیگنال خروجی استخراج شود. این سیستم کنترلی در سرعت-های باد بالاتر از حد نامی برای جلوگیری از وارد شدن بار زیاد به توربین باد، به کار میافتد تا با ثابت نگهداشتن سرعت ژنراتور در حد نامی، توان را در حد نامی خود ثابت نگه دارد [26-24].

رفتار دینامیکی عملگر پیچ در یک محدوده خطی عمل میکند، که توسط معادلهی (24) شرح دادهشده است.

$$\dot{\beta} = -\frac{1}{\tau}\beta + \frac{1}{\tau}\beta_{\rm opt}$$

در ادامه در جدول 1 مقادیر پارامترهای مختلف مدل توربین باد آورده شده است.

5-2- اعتبار سنجي مدل با دادههاي واقعي

(24)

در این قسمت برای اعتبارسنجی مدلسازی انجامشده در این مقاله، از داده-های واقعی بهدستآمده از سایت بادی بینالود استفاده شده است. در شکل 7 منحنی باد مورداستفاده دقیقا از روی اطلاعات واقعی، از سایت بادی بینالود بهدستآمده است.



Fig. 6 Two mass model of the wind turbine

شکل 6 مدل دو جرمی توربین باد

¹ Pitch angle ² Pitch actuator

Table 1 wind turbine model parameters				
كميت	مقدار	واحد بينالمللي		
قطر روتور	47	(m)		
نسبت دنده	52.65	-		
چگالی هوا	1.205	(kgm ⁻³)		
ممان اينرسي شفت روتور	354000	(kgm ²)		
ممان اينرسي شفت ژنراتور	37.5	(kgm ²)		
ضريب سختى شفت	293563	(Nmrad ⁻¹)		
ضریب میرایی شفت	10363	(Nm.s.rad ⁻¹)		
توان نامی	660	(kW)		
ثابت زمانى ژنراتور	15	(ms)		
تأخير ارتباطى ژنراتور	10	(ms)		
مينيمم گشتاور بار ژنراتور	0	(Nm)		
ماكزيمم گشتاور بار ژنراتور	3500	(Nm)		
ارتفاع برج توربين	40	(m)		
ثابت زمانی عملگر پیچ	35	(ms)		
تأخير ارتباطي عملگر پيچ	10	(ms)		
مینیمم نرخ تغییر عملگر پیچ	-10	(° / <i>S</i>)		
ماكزيمم نرخ تغيير عملگر پيچ	10	(° / <i>S</i>)		
مينيمم زاويەي پيچ	-10	(°)		
ماکزیمم زاویهی پیچ	90	(°)		

جدول 1 مقادير پارامترهاي مختلف مدل توربين باد

برای اعتبارسنجی مدلسازی انجامشده ورودیهای به توربین باد واقعی (سرعت باد، زاویهی پیچ و گشتاور ژنراتور) به صورت حلقه باز به عنوان ورودی به مدل ساخته شده در این مقاله در نظر گرفته شده و با انجام شبیه سازی در نرمافزار متلب، توان خروجی حاصل با توان خروجی توربین باد واقعی مقایسه شده است. در شکل 8 مقادیر توان در حالت واقعی و شبیه سازی را مشاهده می کنید.

6-کنترل کنندهی کلاسیک در ناحیهی بار جزئی

این کنترلکننده در توربین باد 660 کیلووات وستاس مورداستفاده در سایت بادی بینالود در ناحیهی بار جزئی استفادهشده است. در این کنترلکننده با توجه به معادلهی (25) برای طراحی کنترلکننده از ضریبی استفاده شده



شکل 7 منحنی سرعت باد مورداستفاده در شبیهسازی



شكل 8 منحنى توان خروجى توربين باد

است که این ضریب با معادلهی (26) به دست میآید. همان طور که در معادلهی (26) مشاهده می کنید، این ضریب تابعی از پارامترهای ثابتی می-باشد، که این باعث ثابت شدن مقدار ضریب k در سرعتهای مختلف باد می-شود. در توربینهای باد برای استخراج حداکثر انرژی از باد در ناحیهی بار جزئی، باید متناسب با تغییر سرعت باد مقدار این ضریب نیز تغییر کند. با توجه به استفاده از مقدار ماکزیمم ضریب توان در معادلهی (26) ضریب kبرای حالت ماکزیمم به دستآمده است، که با این ضریب ماکزیمم و ثابت، تا زمانی که مقدار سرعت باد در محدودهی نامی باشد کنترل کننده عملکرد است، برای استخراج حداکثر انرژی از باد باید مقدار این ضریب متناسب با نوان موجود در باد تغییر کند. لذا در این مقاله با طراحی یک کنترل کننده فیدبک حالت دینامیکی این مشکل برطرف شده است.

$$T_g = k\omega^2 \tag{25}$$

$$k = \frac{1}{2} \rho A \frac{\eta_{\text{th}} R}{N_{\text{gear}}^3 \lambda_{\text{opt}}^3} C_{P,\text{max}}$$
(26)

7-طراحی کنترل کنندهی غیرخطی فیدبک حالت دینامیکی برای ناحیهی بار جزئی

در توربینهای بادی سرعت متغیر در سرعتهای باد کمتر از حد نامی (ناحیهی بار جزئی)، هدف کنترل کننده استخراج حداکثر انرژی از باد می باشد [28,27,6]. برای رسیدن به این مقصود، باید نسبت به تغییر سرعت باد، سرعت زاویه ای روتور نیز تغییر کند تا نسبت سرعت نوک پره در مقدار بهینهی خود ثابت باقی بماند. (27)

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{V_{\text{wind}}}$$

در این حالت زاویهی پیچ نیز در مقدار بهینهی خود یعنی صفر درجه ثابت نگه داشته میشود. به این علت که در این زاویه، مقدار ضریب توان در نسبت سرعت نوک پرهی بهینه ماکزیمم می باشد، زاویهی پیچ در این مقدار ثابت نگه داشته میشود. برای تحقق این هدف و رسیدن به محدودهی ماکزیمم ضریب توان جهت استخراج حداکثر انرژی از باد، در این مقاله یک کنترل کنندهی غیر خطی فیدبک حالت بدون نیاز به اندازه گیری سرعت باد طراحی شده است. در این کنترل کننده همان طور که در شکل 9 مشاهده می-کنید، از سرعت ژنراتور و گشتاور آیرودینامیکی جهت کنترل توربین باد

فیدبک گرفته است. بهعلت دینامیک جعبهدنده و شفت روتور، بهجای فیدبک گرفتن از سرعت روتور از سرعت ژنراتور فیدبک گرفته شده است. این باعث افزایش دقت کنترل کننده، بهعلت داشتن اطلاعات دقیق تری از شرایط عملکردی زیرسیستمهای مختلف توربین باد می شود. همچنین به منظور دریافت اطلاعات دقیق از شرایط اولیهی باد هنگام برخورد به پرهها و ارزیابی مقدار توان اولیهی موجود در باد، از گشتاور آیرودینامیکی نیز فیدبک گرفته شده است. بنابراین این کنترل کننده به علت استفادهی همزمان از به دیگر کنترل کنندههای فیدبک حالت دارا می باشد. درنتیجه عملکرد به می مندری بسیار به دیگر کنترلی بهعلت دریافت اطلاعات کامل از دونقطهی عملکردی بسیار مهم، مطلوب تر می شود. درنهایت این عملکرد با توجه به نتایج شبیه سازی، باعث افزایش استخراج انرژی از باد شده است.

جهت طراحی این کنترلکننده در ابتدا با انتخاب دینامیک مرتبهی 2، خطای ردیابی سرعت زاویهای روتور از معادله دیفرانسیل (28) محاسبه می-شود.

$$\ddot{\varepsilon} + a_1 \dot{\varepsilon} + a_0 \varepsilon = \mathbf{0} \tag{28}$$

همچنين داريم:

 $\varepsilon = \omega_{opt} - \omega_r$ (29) با استفاده از معادلات (18) و (20) معادلهی (30) به دست میآید. $J_r \dot{\omega}_r = T_a - N_{gear} J_{gen} \dot{\omega}_{gen} + N_{gear} T_{gen}$ (30)

سپس با استفاده از معادلات (28)، (29) و (30) معادلهی (31) به دست میآید. همانطور که در معادلهی (31) مشاهده میکنید، نرخ گشتاور ژنراتور تابعی از نرخ گشتاور آیرودینامیک، نرخ سرعت زاویهای ژنراتور و مشتق دوم سرعت زاویهای بهینهی روتور میباشد.

$$\dot{T}_{gen} = \frac{\dot{T}_a}{N_{gear}} - J_{gen}\ddot{\omega}_g - \frac{J_r}{N_{gear}} (\ddot{\omega}_{opt} + b\dot{e} + ce)$$
(31)

این کنترل کننده ی طراحی شده، از نوع فیدبک حالت دینامیکی میباشد. علت استفاده از نوع دینامیکی در این است که، کنترل کنندهی فیدبک حالت استاتیکی در برابر اغتشاشات موجود در باد مقاوم نیست، که درنتیجه باعث کاهش بازده توربین باد می شود. اما در حالت دینامیکی به علت استفاده از معادلات دینامیکی در طراحی کنترلکننده، دارای پاسخ سریعتری به تغییرات بهوجود آمده در سرعت باد میباشد. همچنین مقاومت خوبی در برابر اغتشاشات موجود در باد دارد، که درنهایت باعث افزایش بازده توربین باد می-شود. در این کنترل کننده، بهاین علت که، از مقادیر بهینهی نسبت سرعت نوک پره و ضریب توان ماکزیمم استفاده شده است، کنترل کننده در سرعت-های مختلف باد در هرلحظه، سعی دارد در محدودهی توان ماکزیمم قرار گیرد. این باعث ردیابی توان ماکزیمم در سرعتهای مختلف باد می شود، که درنهایت باعث افزایش استخراج انرژی از باد شده است. یکی دیگر از مزایای این کنترل کننده در این است که با استخراج ضرایب از معادلات دینامیکی بخش مدلسازی، نتایج این کنترل کننده دارای دقت مطلوبی میباشد. لذا این كنترل كنندهى طراحى شده مىتواند بهعنوان كنترل كنندهاى براى اعتبار سنجی نتایج سایر کنترل کننده ها مورداستفاده قرار گیرد. همچنین به علت صحه گذاری مدل با داده های واقعی، می تواند برای اطمینان از صحت مدل-سازی صورت گرفته در سایر مقالات نیز به کار رود. در این مقاله با طراحی این کنترل کننده با توجه به شبیه سازی صورت گرفته و نتایج حاصل، مقدار بازده توربين باد افزايش قابل ملاحظهاى يافته است.



Fig. 9 Nonlinear Dynamic State Feedback Controller without wind speed measurement scheme

شکل 9 طرح کنترل کنندهی غیرخطی فیدبک حالت بدون نیاز به اندازه گیری سرعت باد

1-7- طراحی تخمین گر سرعت باد

در توربینهای باد یکی از مشکلهای موجود اندازه گیری سرعت باد می باشد. زیرا با استفاده از بادسنج اندازه گیری سرعت باد با خطای قابل ملاحظهای همراه است. لذا در این مقاله با طراحی تخمین گر، امکان تخمین سرعت باد با دقت مطلوب، توسط سرعت زاویه ای روتور و گشتاور آیرودینامیکی فراهم شده است. در این روش درواقع به علت استفاده از سرعت روتور و گشتاور آیرودینامیکی، سرعت باد در هرلحظه ی برخورد به پرههای توربین تخمین زده شده است. مزیت این روش، حذف خطای اندازه گیری سرعت باد با بادسنج می باشد. زیرا از گشتاور ایجاد شده توسط باد در پرههای توربین جهت تخمین سرعت باد استفاده شده است.

توسط معادلهی (32) سرعت باد توسط معادلهی غیرخطی گشتاور آیرودینامیکی تخمین زدهشده است.

$$T_a = \frac{\rho \pi R^3}{2\lambda_{\text{opt}}} C_{P \max} \left(\frac{\omega_r R}{V_{\text{wind}}}, \beta \right) V_{\text{wind}}^2$$
(32)

با حل معادلهی (32) مقدار سرعت باد به دست میآید. سپس از مقدار سرعت باد بهدستآمده جهت محاسبه مقدار سرعت زاویهای بهینهی روتور استفاده میشود.

$$\omega_{\rm opt} = \frac{V_{\rm wind}\lambda_{\rm opt}}{R} \tag{33}$$

از سرعت زاویهای بهینهی روتور بهدست آمده از معادلهی (33)، در کنترل-کنندهی فیدبک حالت طراحیشده استفاده میشود.

8-نتايج شبيهسازي

شبیه سازی در این مقاله، بر روی یک توربین باد سرعت متغیر، محور افقی مدل سازی شده در بخش 5، انجام گرفته است. این شبیه سازی در نرمافزار متلب در محیط شبیه سازی¹ انجام شده است.

ابعاد مدل دقیقا با ابعاد توربین باد 660 کیلووات وستاس مورداستفاده در سایت بادی بینالود یکی است. این توربین باد از سه قسمت اصلی تشکیل شده است، که عبارتاند از، روتور² ، برج³ و ماشین خانه⁴ . روتور شامل سه پره و

¹ Simulink ² Rotor

³ Tower

⁴ Nacelle

متعلقات آن که هاب^۱ نامیده میشود، میباشد. برج نیز یک ستون استوانهای شکل است، که ماشینخانه را در این نوع توربین محور افقی، در قسمت بالای برج، نگهداشته است. ماشینخانه محفظهای است که مجموعهی انتقال قدرت² درون آن قرار می گیرد. مجموعهی انتقال قدرت شامل شفت سرعتپایین، گیربکس، شفت سرعتبالا و ژنراتور میباشد.

در این قسمت، نتایج شبیهسازی برای دو حالت استفاده از کنترل کنندهی غیرخطی فیدبک حالت دینامیکی طراحی شده با استفاده از تخمین گر سرعت باد و بدون استفاده از تخمین گر سرعت باد ارائه شده است. سپس نتایج حاصل، با کنترل کنندهی کلاسیک در دو حالت واقعی (دادههای واقعی بهدست آمده از سایت بادی بینالود) و شبیه سازی، در نمودارهای مختلف مقایسه شده است.

در ادامه اطلاعات مربوط به توربین باد واقعی و شبیهسازیشده، در جدول 2 آورده شده است.

در شکل 10 منحنی باد مورداستفاده، دقیقا از روی اطلاعات واقعی، از نیروگاه بادی بینالود بهدستآمده است.

جدول 2 اطلاعات توربین بادی واقعی و شبیهسازیشده

Table 2 Real wind turbine and simulation data				
واحد بينالمللي	مقدار	كميت		
(m)	47	قطر روتور		
-	52.65	نسبت دنده		
(kW)	660	توان نامی ³		
(rad.s ⁻¹)	165.88	سرعت زاویهای نامی ژنراتور		
(ms ⁻¹)	4	سرعت قطع پايين ⁴		
(ms ⁻¹)	15	سرعت نامی باد		
(ms ⁻¹)	25	سرعت قطع بالا ⁵		
(m)	40	ارتفاع برج توربين		
(deg)	0	مقدار بهینهی زاویهی پیچ		
-	وک پرہ 8.1	مقدار بهینهی نسبت سرعت نو		



Fig. 10 Wind speed curve using in simulation شکل 10 منحنی سرعت باد مورداستفاده در شبیهسازی

 $V_{cut in}$ $V_{cut out}$

1-8- كنترل كننده با استفاده از تخمين گر سرعت باد

در توربینهای باد برای رسیدن به بازده ماکزیمم، باید مقدار نسبت سرعت نوک پره در سرعتهای مختلف باد در مقدار بهینهی خود قرار داشته باشد. اما با توجه به شکل 11 مقدار نسبت سرعت نوک پره در توربین باد با استفاده از کنترلکنندهی کلاسیک، از حالت بهینه فاصله دارد، که این باعث کاهش بازدهی توربین میشود. اما با استفاده از کنترلکنندهی فیدبک حالت دینامیکی طراحی شده در این مقاله، مقدار نسبت سرعت نوک پره در محدودهی بهینه قرار گرفته است.

با توجه به شکلهای 12 و 13 به علت استفاده از معادلات دینامیکی در طراحی کنترل کننده یفیدبک حالت، با تغییر سرعت باد مقدار سرعت ژنراتور متناسب با آن در کمترین زمان تغییر می کند. این باعث قرار گرفتن نسبت سرعت نوک پره در محدوده ی بهینه می شود. اما همان طور که در شکلهای 12 و 13 مشخص است، تغییرات سرعت ژنراتور در توربین باد واقعی با کنترل کننده ی کلاسیک در زمان های مختلف تقریبا ثابت است. همچنین در کنترل کننده ی کلاسیک در حالت شبیه سازی نیز تغییرات سرعت ژنراتور نسبت به کنترل کننده ی فیدبک حالت طراحی شده در این مقاله، کمتر می-باشد. این عملکرد کنترل کننده ی کلاسیک باعث می شود، مقدار نسبت سرعت نوک پره با تغییر سرعت باد از حالت بهینه فاصله بگیرد، که درنهایت باعث کاهش بازده توربین باد می شود.



Fig. 11 Blade tip speed ratio curve in real and simulation state شکل 11 منحنی نسبت سرعت نوک پره در حالت واقعی و شبیه سازی شده





¹ Hub

² Drive Train ³ Rated Power

 $^{{}^{4}}V_{\rm cut\,in}$



Fig. 13 Generator angular speed curve in real and simulation state $% \left[{{{\mathbf{F}}_{{\mathbf{F}}}}_{{\mathbf{F}}}} \right]$

شکل 13 منحنی سرعت زاویهای ژنراتور در حالت واقعی و شبیهسازیشده

همان طور که در شکل 14 مشاهده می کنید، با طراحی کنترل کننده ی فیدبک حالت دینامیکی، مقدار ضریب توان ماکزیمم در زاویه ی پیچ صفر درجه، به تدریج به مقدار بهینه ی خود رسیده است. همان طور که گفته شد، ضریب توان تابعی از نسبت سرعت نوک پره و زاویه ی پیچ پره می باشد. لذا با توجه به شکل 11 با عملکرد مطلوب کنترل کننده ی طراحی شده، با قرار گرفتن مقدار نسبت سرعت نوک پره در مقدار بهینه ی خود، مقدار ضریب توان نیز به تدریج در محدوده ی بهینه ی خود قرار گرفته است.

درنهایت این عملکرد مطلوب کنترلکننده با توجه به شکل 15 باعث افزایش استخراج انرژی از باد بهاندازهی 6.91% نسبت به کنترلکنندهی کلاسیک و بهاندازهی 13.49% نسبت به دادههای واقعی بهدستآمده از سایت بادی بینالود شده است.

8-2- کنترل کننده بدون استفاده از تخمین گر سرعت باد

در این قسمت شبیهسازی توسط نرمافزار متلب با کنترلکنندهی غیرخطی فیدبک حالت دینامیکی طراحیشده در این مقاله، بدون استفاده از تخمین گر سرعت باد انجام شده است. با توجه به شکل 16 مقدار استخراج انرژی از باد در این حالت، بهطور میانگین در بازهی موردنظر به میزان 1.68% نسبت به



Fig. 14 Power coefficient curve in real and simulation state شکل 14 منحنی ضریب توان در حالت واقعی و شبیه سازی شده



Fig. 15 Output power curve with wind speed estimator شکل 15 منحنی توان خروجی توربین باد با تخمین گر سرعت باد

کنترلکنندهی کلاسیک و 8.26% نسبت به دادههای واقعی بهدست آمده از توربین بادی 660 کیلووات مورداستفاده در سایت بادی بینالود افزایش یافته است. اما در مقایسه باحالت استفاده از تخمین گر سرعت باد، مقدار استخراج انرژی از باد به میزان 5.23% کاهشیافته است.

9-نتیجه گیری و جمع بندی

در این تحقیق، با استفاده از دادههای واقعی استخراجشده از سایت بادی بینالود، عملکرد و بازدهی توربینهای بادی 660 کیلووات وستاس که از کنترلکنندهی کلاسیک استفاده میکنند، موردبررسی قرار گرفته است. با توجه به اهمیت استخراج انرژی از باد به علت مزایای اقتصادی و زیست-محیطی، افزایش بازدهی این توربینها امری ضروری است. بهمنظور بهبود عملکرد سیستم و افزایش میزان استخراج انرژی از باد، کنترلکنندهی جدیدی باقابلیت تخمین سرعت باد طراحیشده و عملکرد آن از طریق شبیه-سازی نشان دادهشده است. اقدامات انجامشده و نتایج حاصله را میتوان بهصورت زیر خلاصه کرد.



Fig. 16 Output power curve without wind speed estimator شکل 16 منحنی توان خروجی توربین باد بدون تخمین گر سرعت باد

anemometers faults in a wind farm, *Proceedings of The 9th International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Valencia, Spain, April 15-17, 2009.

- [4] P. Carlin, W. A. Laxson, E. B. Muljadi, *The history and state of the art of variable-speed wind turbine technology*, NREL, Colorado, pp. 1-68, 2001.
- [5] S. Ganjifar, A. Ghassemi, A novel-strategy controller design for maximum power extraction in stand-alone windmill systems, *Energy*, Vol. 76, No. 10, pp. 326-335, 2014.
- [6] M. Heidari, A. Y. Vorjani, M. Mohammadiyan, Comparison of extracting maximum power at average power and high-power in wind turbine systems, *Proceedings of The 28th Internatioal Power System Confrerence*, Tehran, Iran, November 2-4, 2013. (in Persian فارسی)
- [7] M. Sheikhan, R. Shahnazi, A. N. Yousefi, An optimal fuzzy PI controller to capture the maximum power for variable speed wind turbines, *Neural Computing and Applications*, Vol. 23, No. 5, pp. 1359-1368, 2013.
- [8] A. Ghassemi, M. Ahmadi, S. Ganjefar, Improving efficiency of two-type maximum power point tracking methods of tip-speed ratio and optimum torque in wind turbine system using a quantum neural network, *Energy*, Vol. 67, No. 10, pp. 444-453, 2014.
- [9] L. A. Salomao, H. G. Cuatzin, J. A. Marín, Isidro, Fuzzy-PI control, PI control and fuzzy logic control comparison applied to a fixed speed horizontal axis 1.5 MW wind turbine, *Proceedings of The World Congress on Engineering and Computer Science*, San Francisco, USA, October 24-26, 2012.
- [10]B. Boukhezzar, H. Siguerdidjane, Nonlinear control of a variablespeed wind turbine using a two-mass model, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 26, No. 1, pp. 149–162. 2011.
- [11]K. Rudion, A. Orths, Z. Styczynski, Modelling of variable speed wind turbines with pitch control, *Proceedings of The 2th International Conference on Critical Infrastructures*, Grenoble, France, October 25-27, 2004.
- [12] J. H. Laks, Y. L. Pao, D. A. Wright, Control of wind turbines: past, present, and future, *Proceedings of The 9th American Control Conference*, Colorado, USA, June 10-12, 2009.
- [13]B. Zhu, M. Chen, N. Wade, L. Ran, A prediction model for wind farm power generation based on fuzzy modeling, *Procedia Environmental Sciences*, Vol. 12, No. 10, pp. 122-129, 2012.
- [14]T. Thiringer, A. Petersson, Control of a variable-speed pitchregulated wind turbine, CHUT, Gothenburg, pp. 1-50, 2005.
- [15]Y. L. Pao, E. Johnson, A tutorial on the dynamics and control of wind turbines and wind farms, *Proceedings of The 9th American Control Conference*, Colorado, USA, June 10-12, 2009.
- [16] H. Jiang, Y. Li, Zh. Cheng, Performances of ideal wind turbine, *Renewable Energy*, Vol. 83, No. 5, pp. 658-662, 2015.
- [17]A. Pintea, N. Christov, P. Borne, D. Popescu, A. Badea, Optimal control of variable speed wind turbines, *Proceedings of the 19th Mediterranean Conference on Control and Automation*, Corfu, Greece, June 20-23, 2011.
- [18] F. D. Bianchi, H. D. Battista, R. J. Mantz, Wind Turbine Control Systems Principles, Modelling and Gain Scheduling Design, Second Edittion, pp. 20-22, La Plata: Springer, 2006.
- [19] V. Lesic, M. Vasak, N. Peri, T. Wolbank, G. Joksimovic, Fault tolerant control of a blade-pitch wind turbine with inverter-fed generator, *Proceedings of The IEEE* International Symposium on Industrial Electronics, Gdansk, Poland, June 27-30, 2011.
- [20] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi, Wind Energy Handbook, pp. 176-177, West Sussex: Wiley, 2001.
- [21] S. R. Rasel, M. D. Hasnat, *Modeling of a wind turbine generator* using wind speed as a controlled variable, PhD Thesis, Jean Monnet University, Saint-Étienne, 2011.
- [22] T. Sandhya, S. K. Chandan, Control and operation of Opti-slip induction generator in wind farms, *Proceedings of The International Conference on* Computer, Communication and Electrical Technology, Tamilnadu, India, March 18-19, 2011.
- [23] A. R. Tiwari, A. J. Shewale, A. R. Gagangras, N. M. Lokhande, Comparison of various wind turbine generators, *Multidiscplinary Journal of Research in Engineering and Technalogy*, Vol. 1, No. 2, pp. 129-135, 2014.
- [24] T. Esbensen, C. Sloth, Fault diagnosis and fault-tolerant control of wind turbines, Master's Thesis, University of Aalborg, Aalborg, 2009.
- [25] X. Yin, Y. g. Lin, W. Li, Y. jing Gu, X. j. Wang, P. f. Lei, Design,

- استخراج و استفاده از دادههای واقعی بهمنظور انجام تحقیقی مبتنی بر تئوری و تجربه
- طراحی یک کنترل کنندهی فیدبک حالت دینامیکی برای ناحیهی سرعتهای کمتر از حد نامی
- طراحی تخمین گر سرعت باد با استفاده از معادلهی غیرخطی
 گشتاور آیرودینامیکی جهت کاهش خطای اندازه گیری
- افزایش استخراج انرژی به میزان ۱.68% درنتیجهی استفاده از کنترل کنندهی فیدبک حالت طراحی شده با استفاده از سرعت باد اندازه گیری شده (عدم استفاده از تخمین گر سرعت)
- افزایش استخراج انرژی به میزان 6.91% درنتیجهی استفاده از کنترل کنندهی فیدبک حالت و تخمین گر سرعت

نتایج فوق نشاندهندهی بهبود قابل ملاحظه در راندمان توربینهای موردمطالعه، درنتیجهی استفاده از کنترل کننده و تخمین گر طراحی شده در مقایسه با کنترل کنندهی کلاسیک می باشد.

10-فهرست علائم

- **A** مساحت (m²)
- (Nm.s.rad⁻¹) ضریب میرایی شفت B
 - ر مريب توان توربين باد **C**P
 - (N) نیروی رانش **F**T
- (kgm^2) ممان اینرسی شفت ژنراتور J_{gen}
- (kgm²) ممان اینرسی شفت روتور J_r
- (Nmrad⁻¹) ضريب سختی شفت K_s
 - نسبت دندهی گیربکس Ngear
 - **P** توان (kW)
 - (kW) توان آيروديناميكى P_a
 - (Nm) گشتاور آيروديناميکي Ta
 - T_{gen} گشتاور ژنراتور (Nm)
- (Nm) گشتاور وارده به شفت سرعت پایین T_1
 - (Nm) گشتاور وارده به شفت سرعتبالا (
 - √ سرعت نامی باد (ms⁻l) سرعت نامی
 - (ms^{-1}) سرعت باد متناسب با توان نامی V_o
 - (ms^{-1}) $u_{rat} V_{wind}$

علائم يوناني

- β زاویهی پیچ پره (deg)
- (deg) مقدار بهینهی زاویهی پیچ $oldsymbol{eta}_{
 m opt}$
- (rads⁻¹) مقدار خطای سرعت زاویه ای روتور ε

- (rads⁻¹) سرعت زاویهای روتور ω_r
- (rads⁻¹) سرعت زاویهای ژنراتور (*w*gen

11- مراجع

- [1] *Modeling and control design of pitch-controlled variable speed wind turbines*, Accessed on 4 April 2011; http://www.intechopen.com/books/wind turbines.
- [2] Control strategies for variable-speed fixed-pitch wind turbine, Accessed on 1 June 2010; http://www.intechopen.com/books/wind power.
- [3] J. Beltran, A. Liombart, J. J. Guerrero, Detection of nacelle

permanent magnet synchronous generator using intelligent algorithms, *Journal of Iranian energy*, Vol. 17, No. 3, 2014. (in Persian فارسی).

[28]M. Monfared, G. Gharepetian, Design, modeling and cheking the performance of variable speed wind turbine using the printer with self super conducting, *Proceedings of The 22th Internatioal Power System Confrerence*, Tehran, Iran, May 20-22, 2014. (in Persian فارسی).

modeling and implementation of a novel pitch angle control system for wind turbine, *Renewable Energy*, Vol. 81, No. 11, pp. 599-608, 2015.

- [26] R. Guo, J. Du, J. Wu, Y. Liu, The pitch control algorithm of wind turbine based on fuzzy control and PID control, *Energy and Power Engineering*, Vol. 5, No. 3B, pp. 6-10, 2013.
- [27] H. Sefidgar, S. A. Gholamiyan, A. Sheikholeslami, Access to maximum power in wind turbine system that connected to a