



مدل سازی و طراحی کنترل کننده فیدبک حالت دینامیکی به همراه تخمین گر سرعت باد، در توربین های بادی سرعت متغیر

وحید فضل الهی¹، مصطفی تقی زاده^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

* تهران، صندوق پستی 167651719، mo_taghizadeh@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 14 دی 1394

پذیرش: 22 اسفند 1394

ارائه در سایت: 11 اردیبهشت 1395

کلید واژگان:

توربین بادی

مدل سازی

کنترل کننده فیدبک حالت

ژنراتور القایی

چکیده

در این مقاله، به منظور بهبود عملکرد کنترل کننده و افزایش بازدهی توربین بادی 660 کیلووات ساخت شرکت وستاس، تحقیقاتی مبتنی بر تئوری و تجربه با استفاده از داده های واقعی صورت گرفته و یک کنترل کننده فیدبک حالت طراحی شده است. داده های واقعی به دست آمده از سایت بادی بینالود، نشان می دهد که این توربین ها دارای بازدهی پایینی می باشند. این مسئله ناشی از عملکرد ضعیف کنترل کننده های کلاسیک در ردیابی توان ماکزیمم (در ناحیه ی بار جزئی) و همچنین خطای قابل ملاحظه در اندازه گیری سرعت باد می باشد. در این تحقیق، برای رفع این مشکل، یک کنترل کننده فیدبک حالت که باعث بهبود عملکرد توربین و حذف نیاز به اندازه گیری سرعت باد می شود، طراحی شده است. در این کنترل کننده، به منظور کنترل گشتاور ژنراتور، از سرعت ژنراتور و گشتاور آیرودینامیکی فیدبک گرفته شده است. همچنین با فیدبک گرفتن از گشتاور آیرودینامیکی، مقدار سرعت باد با دقت بسیار مطلوب تری در مقایسه با اندازه گیری سرعت باد با داسنج، تخمین زده شده است. با توجه به اینکه طراحی کنترل کننده و همچنین شبیه سازی عملکرد سیستم کنترلی نیاز به مدل دقیق سیستم دارد، مدل سازی کامل توربین باد در زیرسیستم های مختلف انجام شده و پارامترهای آن با استفاده از داده های واقعی شناسایی شده اند. شبیه سازی های انجام شده در نرم افزار متلب نشان دهنده ی بهبود عملکرد کنترل کننده فیدبک حالت طراحی شده در مقایسه با کنترل کننده کلاسیک استفاده شده 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

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 04 January 2016
Accepted 12 March 2016
Available Online 30 April 2016

Keywords:

Wind Turbine
Modeling
State Feedback Controller
Induction Generator

ABSTRACT

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 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.

توربین های بادی با توجه به شرایط عملکردی ژنراتور به انواع توربین های سرعت ثابت¹ و سرعت متغیر² تقسیم بندی می شوند. با توجه به مزایای بسیاری مانند افزایش استخراج انرژی از باد و کاهش بارهای وارده به

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

¹ Fixed speed wind turbines

² Variable speed wind turbines

Please cite this article using:

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مجموعه ی انتقال قدرت³، امروزه از توربین های سرعت متغیر استفاده می- شود [1].

در توربین های 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 توربین ها، با تغییر سرعت باد (در سرعت های باد کمتر از حد نامی)، کنترل کننده با کنترل سرعت ژنراتور، باعث ثابت ماندن نسبت سرعت نوک پره در مقدار بهینه ی خود می شود. باید توجه داشت که کنترل سرعت در این توربین ها متناسب با تغییر سرعت باد در زاویه ی پیچ ثابت (صفر درجه) انجام می شود. البته تنها سرعت متغیر بودن توربین باد، تضمینی جهت رسیدن به مقدار بهینه ی نسبت سرعت نوک پره نمی باشد، بلکه کیفیت و نحوه ی عملکرد کنترل کننده تأثیر زیادی در افزایش استخراج انرژی از باد دارد. لذا با توجه به کیفیت عملکرد کنترل کننده ی استفاده شده در توربین های باد، رسیدن به مقدار بهینه ی نسبت سرعت نوک پره، جهت افزایش استخراج انرژی از باد، امکان پذیر می شود.

با توجه به داده های واقعی به دست آمده از سایت بادی بینالود و نتایج شبیه سازی، انرژی استخراجی از باد در سرعت های کمتر از حد نامی، از مقدار بهینه ی آن کمتر است. این مسئله ناشی از عملکرد ضعیف کنترل کننده ی کلاسیک این توربین باد می باشد. برای حل این مشکل در این مقاله، یک کنترل کننده ی 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 طراحی شده 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 سرعت های باد کمتر از حد نامی (ناحیه ی بار جزئی) را به وجود می آورد. همچنین با فیدبک گرفتن از سرعت ژنراتور و گشتاور آیرودینامیکی، اطلاعات دقیقی از حالت عملکردی توربین باد در هر لحظه، به کنترل کننده می رسد. این اطلاعات باعث کنترل بهتر توربین متناسب با شرایط واقعی موجود در هر لحظه 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 هر لحظه می شود. در نتیجه کنترل کننده نمی تواند به صورت دقیق و مطلوب عمل کند، که در نهایت باعث کاهش استخراج انرژی از باد می شود. از دیگر مزایای کنترل- کننده ی طراحی شده در این مقاله، تخمین سرعت باد با دقت مطلوب توسط معادله ی غیرخطی گشتاور آیرودینامیکی می باشد. در اغلب توربین های بادی از بادنچ³ برای اندازه گیری سرعت باد استفاده می شود. با توجه به چرخش پره های توربین باد و حالت گردابه ای به وجود آمده در اطراف پره های آن، اندازه گیری سرعت باد با بادنچ همراه با خطای قابل ملاحظه ای می باشد، که این تأثیر منفی روی بازدهی توربین باد دارد [3]. اما در این کنترل کننده ی طراحی شده، این مشکل با تخمین سرعت باد به روش گفته شده برطرف شده است. در نتیجه، این عملکرد مطلوب کنترل کننده ی طراحی شده با توجه به نتایج شبیه سازی، باعث افزایش قابل توجه استخراج انرژی از باد نسبت به توربین های باد با کنترل کننده ی کلاسیک، شده است.

در بخش دوم مقاله، به سابقه ی علمی موضوع اشاره شده و در بخش سوم

عملکرد توربین باد شرح داده شده است. در بخش چهارم ژنراتور مورد استفاده در توربین باد واقعی ذکر شده، شرح داده شده و در بخش پنجم مدل سازی توربین انجام شده است. در بخش ششم طراحی کنترل کننده و تخمین گر سرعت باد انجام شده و در ادامه در بخش هفتم نتایج شبیه سازی در نمودارهای مختلف با داده های واقعی به دست آمده از سایت بادی بینالود جهت اعتبار سنجی مقایسه شده است.

2- سابقه ی علمی موضوع در داخل و خارج از کشور

با توجه به روند روزافزون استفاده از انرژی های نو و پیشرفت دستگاه ها با توسعه فناوری، جهت ایجاد تنوع در منابع تأمین انرژی و کاهش مصرف سوخت های فسیلی، باید حرکتی در تولید این گونه انرژی ها صورت گیرد. در ایران نیز در طی سالیان اخیر با توجه به اهمیت انرژی های تجدیدپذیر و احساس خطر از کاهش منابع انرژی های فسیلی توجه بیشتری به انرژی های تجدیدپذیر صورت گرفته است، به طوری که اخیراً چندین نیروگاه بادی مورد بهره برداری قرار گرفته است. از کارهای انجام شده طی سالیان اخیر می توان به این موارد اشاره کرد.

کارلین و همکاران [4]، در یک توربین بادی سرعت متغیر، روش ردیابی نقطه ای توان ماکزیمم⁴ را برای رسیدن به حداکثر توان شرح داده اند، و از یک کنترل کننده ی فازی در ناحیه ی بار جزئی، برای رسیدن به توان ماکزیمم استفاده کرده اند. سهیل گنج فر و قاسمی [5]، یک روش کنترلی جدید برای استخراج ماکزیمم انرژی از باد ارائه کرده اند. در این مقاله با استفاده از یک شبکه ی بازتاب حالت⁵ بدون نیاز به تخمین سرعت باد، بیشترین توان از باد استخراج شده است. حیدری و همکاران [6]، مقایسه ای بین روش های مختلف استخراج انرژی حداکثر از توربین های بادی انجام داده اند و در ادامه این مقاله به نقاط ضعف و قوت هریک اشاره شده است. شیخان و همکاران [7]، از یک کنترل کننده ی تناسبی-انتگرال گیر⁶ برای کنترل توربین باد استفاده کرده اند، در حالی که ضرایب بهره توسط تئوری فازی به دست آمده است. قاسمی و همکاران [8]، از یک شبکه ی عصبی کوانتوم به عنوان کنترل کننده در یک ساختار کنترلی تطبیقی استفاده کرده اند، که این کنترل کننده باعث بهبود بازدهی توربین باد شده است. سالومو و همکاران [9]، مقایسه ای را بین سه الگوریتم کنترلی فازی-تناسبی-انتگرال گیر، فازی و تناسبی-انتگرال گیر انجام داده اند و مزایا و نحوه ی عملکرد هریک از این روش ها 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 زده اند. رودین و همکاران [11]، ابتدا توربین باد را مدل کرده، سپس با استفاده از کنترل زاویه ی پیچ، توان را در ناحیه ی بالاتر از حد نامی، در مقدار نامی خود ثابت نگاه داشته اند. لاکس و همکاران [12]، توربین باد را به صورت یک سازه ی ارتجاعی مدل کرده سپس رویکردهای کنترلی پایه ی توربین های باد را مورد بررسی قرار داده اند. چن و همکاران [13]، از مدل سازی فازی در یک مزرعه- ی بادی استفاده کرده و در ادامه با مدل سازی شبکه ی عصبی نتایج حاصل را با مدل سازی فازی مقایسه کرده اند. ترینگر و پترسون [14]، در این مقاله استراتژی های مختلف کنترلی برای توربین باد سرعت متغیر- زاویه ی پیچ ثابت، آورده شده است.

3- عملکرد توربین بادی

⁴ Maximum Power Point Tracking (MPPT)

⁵ Echo State Network

⁶ Proportional integrator (PI)

¹ Drive Train

² C_p

³ Anemometer

2-3- منحنی عملکرد ضریب گشتاور - نسبت سرعت نوک پره

ضریب گشتاور² با تقسیم ضریب توان به نسبت سرعت نوک پره به سادگی به دست آمده می آید. در شکل 2 مشاهده می شود که با افزایش استحکام توربین، مقدار گشتاور افزایش می یابد. بنابراین ضریب گشتاور اطلاعات اضافی در رابطه با عملکرد توربین های بادی به ما نمی دهد. استفاده ی اصلی از منحنی ضریب گشتاور - نسبت سرعت نوک پره، به منظور ارزیابی گشتاور، زمانی است که روتور به گیربکس و ژنراتور متصل می شود.

با توجه به شکل 2 مشاهده می شود که بیشترین مقدار ضریب گشتاور در نسبت سرعت نوک پره ی کمتری به نسبت ضریب توان به دست می آید. همچنین مقدار ضریب گشتاور در یک نسبت سرعت نوک پره ی یکسان، کمتر از ضریب توان است [20].

3-3- منحنی عملکرد ضریب رانش - نسبت سرعت نوک پره

این منحنی رابطه ی بین ضریب رانش و نسبت نوک پره می باشد. در توربین های باد نیروی رانش مستقیماً به برج وارد می شود و باعث تأثیر زیادی روی طراحی سازه ی توربین می شود. همان طور که در شکل 3 مشاهده می شود با افزایش تعداد پره های توربین باد، میزان نیروی رانش در روتور افزایش می یابد [20].

4-3- ناحیه های عملکردی توربین های بادی سرعت متغیر

ناحیه های عملکردی توربین بادی سرعت متغیر در شکل 4 نشان داده شده است.

با توجه به شکل 4 توربین های بادی از سه ناحیه ی عملکردی مختلف تشکیل شده اند.

ناحیه ی 1- این ناحیه بین سرعت راه اندازی و سرعت نامی می باشد. در این ناحیه سرعت روتور توربین باد متناسب با تغییر سرعت باد، جهت استخراج انرژی ماکزیمم از باد، تغییر می کند.

ناحیه ی 2- این ناحیه در محدوده ی سرعت نامی و کمتر از توان نامی می باشد.

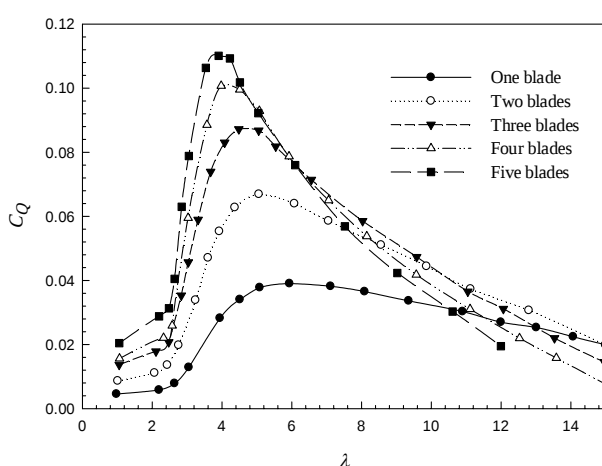


Fig. 2 $C_Q - \lambda$ performance curve for wind turbine with different number of blades at $\beta = 0^\circ$ [20]

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

توربین های بادی توان مورد نیاز جهت تولید انرژی برق را از طریق تبدیل مقداری از انرژی جنبشی باد به گشتاور، تأمین می کنند. مقدار انرژی که پره ها از باد می گیرند، بستگی به مساحت روتور، چگالی هوا، طراحی پره ها و سرعت باد دارد.

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A V_{wind}^3 \quad (1)$$

$$C_P(\lambda, \beta) = \frac{P_r}{P_{wind}} \quad (2)$$

با برخورد باد با سرعت مناسب به پره های توربین، پره ها حرکت کرده و باعث چرخش شفت سرعت پایین می شوند. شفت سرعت پایین نیز به یک گیربکس متصل می باشد تا توسط آن سرعت دورانی افزایش یابد. با افزایش سرعت در گیربکس، شفت سرعت بالا شروع به چرخش می کند و زمانی که سرعت شفت سرعت بالا به سرعت نامی ژنراتور رسید باعث حرکت ژنراتور و در نهایت تولید انرژی الکتریکی می شود [15-17].

به طور معمول برای بیان عملکرد توربین های بادی از منحنی های مشخصه ی بی بعدی استفاده می شود. این منحنی ها عملکرد واقعی توربین باد، در شرایط عملکردی مختلف را نشان می دهند. در ادامه این منحنی ها جهت بیان عملکرد توربین های بادی شرح داده شده اند.

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

یک روش معمول برای نشان دادن عملکرد توربین های بادی استفاده از منحنی بی بعد ضریب توان - نسبت سرعت نوک پره می باشد.

در توربین های بادی سرعت متغیر مقدار ماکزیمم ضریب توان حدوداً برابر 0.48 می باشد که در نسبت سرعت نوک پره ی 8.1 به این مقدار دست می یابد. مقدار اشاره شده، از ضریب توانی که توسط حد بتز¹ (حداکثر ممکن انرژی استخراجی توسط توربین بادی از باد می باشد) به دست آمده (0.59) کمتر است [18]. یکی از دلایل این اختلاف در مقادیر واقعی ضریب توان و مقدار بتز، به علت افت هایی است که در پره ها اتفاق می افتد.

در شکل 1 این منحنی برای یک توربین سه پره ای مدرن نشان داده شده است.

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

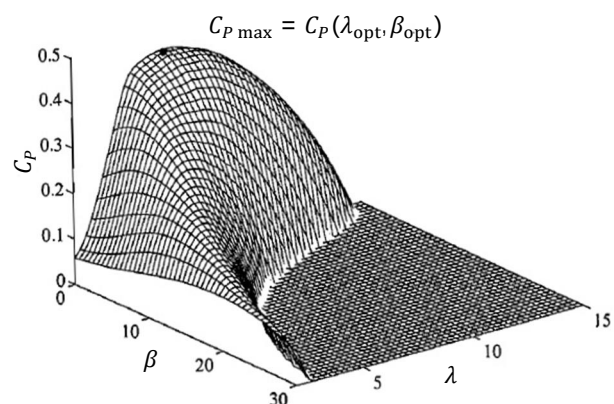


Fig. 1 3D diagram of $C_P(\lambda, \beta)$ [18]

شکل 1 نمودار سه بعدی ضریب توان تابعی از نسبت سرعت نوک پره و زاویه ی پیچ [18]

² C_Q

¹ Beltz

شبکه ی برق متصل است.

در شکل 5 این ژنراتور نشان داده شده است.

از مزیت های این ژنراتور می توان به، داشتن یک مدار ساده، نیاز نداشتن به حلقه های لغزشی و بهتر کردن محدوده ی سرعت عملکرد در مقایسه با ژنراتورهای قفس سنجایی¹ اشاره کرد. همچنین این ژنراتورها می توانند با دستگاهی ساده بارهای مکانیکی و نوسانات توان را کاهش دهند. اما این نوع ژنراتورها نیاز به سیستم جبران توان راکتیو دارند. همچنین محدوده ی تغییر سرعت آن ها نسبت به ژنراتور القایی دو سو تغذیه² کم تر می باشد، که این باعث کاهش استخراج انرژی از باد می شود. همچنین کنترل توان راکتیو نیز ضعیف است [23,22,1].

5- مدل سازی توربین باد

برای استخراج انرژی ماکزیمم از باد فقط شرایط باد و پارامترهای هندسی توربین مهم نیستند، بلکه استراتژی کنترلی به کاررفته نیز بسیار مهم می باشد. برای کنترل بهتر توربین باد باید یک مدل غیرخطی که بتواند به خوبی رفتارهای غیرخطی توربین باد را نمایش دهد، ساخته شود. البته برای انجام فرآیند مدل سازی می توان از بعضی فرضیات ساده کننده ی مدل نیز استفاده کرد، به طوری که تأثیر آن چنانی روی تغییر رفتار مدل نسبت به توربین باد واقعی نداشته باشد.

5-1- فرضیات استفاده شده در این مدل سازی

- مدل سازی به صورت کاملاً غیرخطی انجام شده و در زیرسیستم های مختلف خطی سازی صورت نگرفته است.
 - پره های توربین باد به صورت عمود به جهت باد فرض شده است.
 - از پدیده ی برش باد صرف نظر شده است.
- در این مقاله توربین باد سرعت متغیر به زیرسیستم های آیرودینامیک، مجموعه ی انتقال قدرت، ژنراتور و سیستم کنترل پیچ تقسیم شده است. در ادامه مدل سازی زیرسیستم آیرودینامیک انجام شده است.
- معادله ی (3) توان موجود در باد را نشان می دهد. از معادله ی (4) مشخص است که ضریب توان تابعی از نسبت سرعت نوک پره و زاویه ی پیچ می باشد. در معادله ی (5) توان آیرودینامیکی جذب شده توسط روتور توربین باد نشان داده شده است. با توجه به این معادله مشخص است که توان

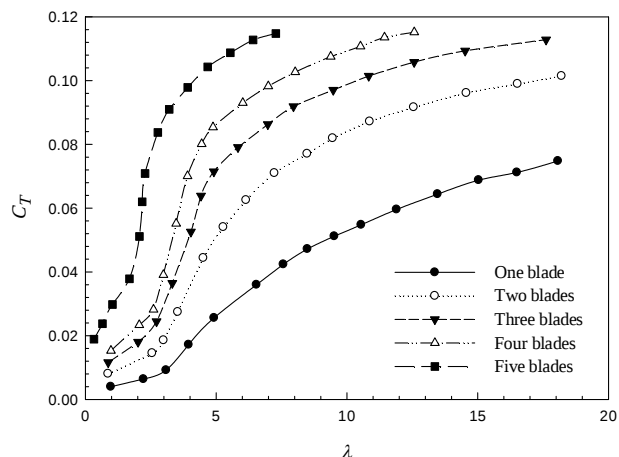


Fig. 3 $C_T - \lambda$ curve [20]

شکل 3 منحنی ضریب رانش - نسبت سرعت نوک پره [20]

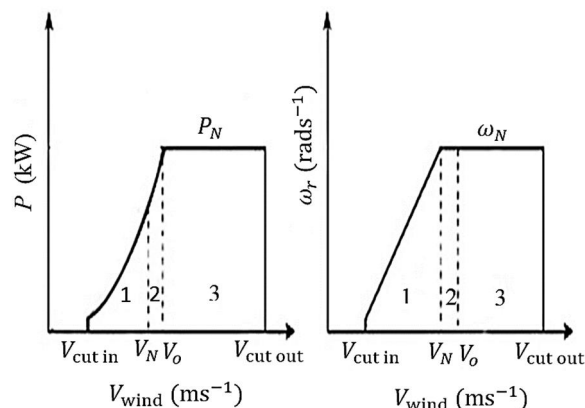


Fig. 4 wind turbines performance area [21]

شکل 4 نواحی عملکردی توربین های بادی [21]

ناحیه ی 3- در این ناحیه با رسیدن سرعت و توان به مقدار نامی، کنترل زاویه ی پیچ فعال شده و با افزایش زاویه ی پیچ با ثابت نگاه داشتن سرعت ژنراتور، از افزایش توان توربین از مقدار نامی جلوگیری می کند. در نتیجه مقدار توان توربین باد و سرعت ژنراتور در مقدار نامی خود ثابت باقی می ماند [21].

در ادامه جهت آشنایی با ژنراتور مورد بحث در این مقاله، این ژنراتور شرح داده شده است.

4- ژنراتور القایی لغزش متغیر¹

این ژنراتور در توربین باد واقعی اشاره شده در این مقاله استفاده شده است، که زیرمجموعه ی ژنراتورهای القایی با روتور سیم پیچی شده² می باشد. ویژگی های این نوع ژنراتور این اجازه را می دهد 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 می باشند که توسط لغزش قابل کنترل می باشد. همچنین استاتور این ژنراتورها به صورت مستقیم به

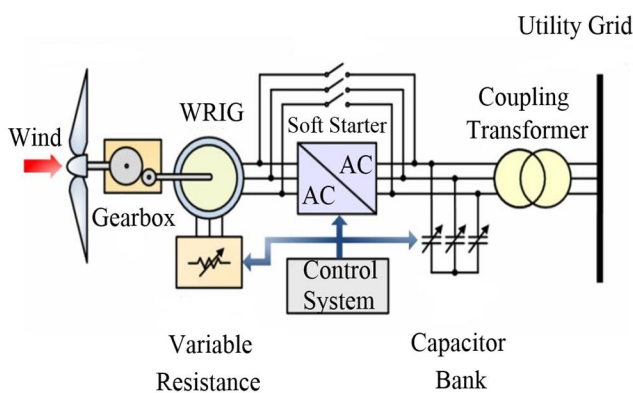


Fig. 5 optislip induction generator [1]

شکل 5 ژنراتور القایی لغزش متغیر [1]

³ Squirrel cage Generator

⁴ Doubly Fed Induction Generator (DFIG)

¹ OptiSlip

² Wound Rotor Induction Generator (WRIG)

آیرودینامیکی توربین باد با توان 3 سرعت باد، متناسب است.

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A V_{wind}^3 \quad (3)$$

$$C_p(\lambda, \beta) = \frac{P_a}{P_{wind}} \quad (4)$$

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

همچنین رابطه ی بین توان و گشتاور آیرودینامیکی توسط معادله ی (6) بیان شده است.

$$P_a = T_a \omega_r \quad (6)$$

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

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

در معادله ی (8)، ضریب گشتاور توسط معادله ی (9) به دست آمده می آید.

$$C_Q(\lambda, \beta) = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (9)$$

در این قسمت مدل سازی زیرسیستم مجموعه ی انتقال قدرت انجام شده است. برای مدل سازی مجموعه ی انتقال قدرت دینامیک شفت سرعت پایین توسط معادله ی (10) به دست می آید.

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

همچنین دینامیک شفت سرعت بالا نیز با معادله ی (11) بدین صورت محاسبه می شود.

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

در ادامه ی مدل سازی مجموعه ی انتقال قدرت، قسمت جعبه دنده مدل شده است که به صورت نسبت دنده در معادله ی (12) اعمال می شود.

$$T_h = \frac{T_1}{N_{gear}} \quad (12)$$

پیچش مجموعه ی انتقال قدرت با استفاده از یک فنر پیچشی و ضریب اصطکاک مدل می شود.

$$T_1 = K_s \delta \theta + B \frac{d}{dt} \delta \theta \quad (13)$$

$$\delta \theta = \theta_r - \frac{\theta_{gen}}{N_{gear}} \quad (14)$$

$$\delta \omega = \omega_r - \frac{\omega_{gen}}{N_{gear}} \quad (15)$$

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

با جایگذاری معادله ی (16) در (13)، معادله ی (17) به دست آمده می آید.

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

با جایگذاری معادله ی (13) در معادله ی (10) معادله ی (18) به دست می آید. به همین صورت با جایگذاری معادله ی (13) در معادله ی (12) و سپس (11)، معادله ی (20) به دست می آید. در نهایت دینامیک مجموعه ی انتقال قدرت توسط معادلات (18، 19، 20) بیان می شود.

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

$$\delta \omega = \omega_r - \frac{\omega_{gen}}{N_{gear}} \quad (19)$$

$$J_{gen} \frac{d}{dt} \omega_{gen} = \left[\frac{1}{N_{gear}} (k_s \delta \theta + B \delta \omega) - T_{gen} \right] \quad (20)$$

• توجه شود از اصطکاک ویسکوز شفت سرعت پایین و شفت سرعت بالا به دلیل ناچیز بودن مقادیر آن صرف نظر شده است.

در ادامه مدل سازی زیرسیستم الکتریکی انجام شده است.

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

در این قسمت این زیرسیستم شرح داده شده است.

در توربین های بادی برای یک ژنراتور ایده آل بدون لحاظ کردن افت ها توان خروجی، با استفاده از معادله ی (21) به دست می آید.

$$P_e = \omega_{gen} T_{gen} \quad (21)$$

در این مقاله توربین بادی به صورت دو جرمی مدل سازی شده است، که در شکل 6 با جزئیات آن را مشاهده می کنید.

البته باید توجه داشت که بازدهی ژنراتور هرچند که بسیار بالاست ولی صد درصد نیست و دارای مقداری افت می باشد، که در معادله ی (22) این افت ها لحاظ شده اند.

$$P_e = \eta_{gen} \omega_{gen} T_{gen} \quad (22)$$

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

در نهایت دینامیک زیرسیستم ژنراتور با معادله ی (23) به دست می آید.

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

در ادامه مدل سازی زیرسیستم عملگر زاویه ی پیچ¹ ارائه شده است.

عملگر پیچ² یک سروو سیستم غیرخطی است که معمولاً باعث چرخش کل پره ها یا بخشی از آن ها به صورت هماهنگ می شود. در یک سیستم حلقه بسته عملگر پیچ می تواند به عنوان یک سیستم دینامیکی با دامنه ی 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 می افتد تا با ثابت نگه داشتن سرعت ژنراتور در حد نامی، توان را در حد نامی خود ثابت نگه دارد [24-26].

رفتار دینامیکی عملگر پیچ در یک محدوده خطی عمل می کند، که توسط معادله ی (24) شرح داده شده است.

$$\dot{\beta} = -\frac{1}{\tau} \beta + \frac{1}{\tau} \beta_{opt} \quad (24)$$

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

2-5- اعتبار سنجی مدل با داده های واقعی

در این قسمت برای اعتبارسنجی مدل سازی انجام شده در این مقاله، از داده های واقعی به دست آمده از سایت بادی بینالود استفاده شده است. در شکل 7 منحنی باد مورد استفاده دقیقاً از روی اطلاعات واقعی، از سایت بادی بینالود به دست آمده است.

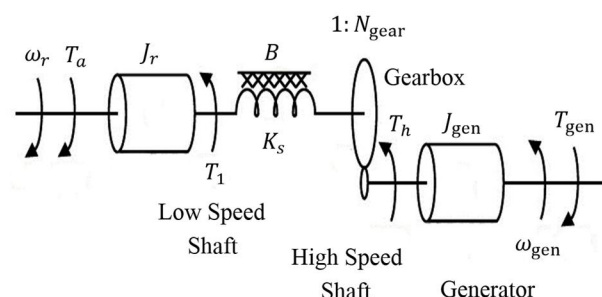


Fig. 6 Two mass model of the wind turbine

شکل 6 مدل دو جرمی توربین باد

¹ Pitch angle
² Pitch actuator

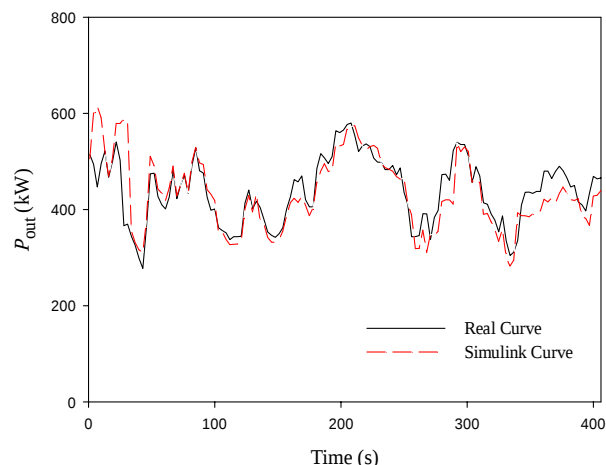


Fig. 8 Wind turbine output power curve

شکل 8 منحنی توان خروجی توربین باد

است که این ضریب با معادله ی (26) به دست می آید. همان طور که در معادله ی (26) مشاهده می کنید، این ضریب تابعی از پارامترهای ثابتی می باشد، که این باعث ثابت شدن مقدار ضریب k در سرعت های مختلف باد می شود. در توربین های باد برای استخراج حداکثر انرژی از باد در ناحیه ی بار جزئی، باید متناسب با تغییر سرعت باد مقدار این ضریب نیز تغییر کند. با توجه به استفاده از مقدار ماکزیمم ضریب توان در معادله ی (26) ضریب k برای حالت ماکزیمم به دست آمده است، که با این ضریب ماکزیمم و ثابت، تا زمانی که مقدار سرعت باد در محدوده ی نامی باشد کنترل کننده عملکرد مطلوبی دارد. اما با توجه به این که سرعت باد غالباً دارای نوسانات زیادی است، برای استخراج حداکثر انرژی از باد باید مقدار این ضریب متناسب با توان موجود در باد تغییر کند. لذا در این مقاله با طراحی یک کنترل کننده ی فیدبک حالت دینامیکی این مشکل برطرف شده است.

$$T_g = k\omega^2 \quad (25)$$

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

7- طراحی کنترل کننده ی غیرخطی فیدبک حالت دینامیکی برای ناحیه ی بار جزئی

در توربین های بادی سرعت متغیر در سرعت های باد کمتر از حد نامی (ناحیه ی 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 بهینه ی خود ثابت بماند.

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{V_{wind}} \quad (27)$$

در این حالت زاویه ی پیچ نیز در مقدار بهینه ی خود یعنی صفر درجه ثابت نگه داشته می شود. به این علت که در این زاویه، مقدار ضریب توان در نسبت سرعت نوک پره ی بهینه ماکزیمم می باشد، زاویه ی پیچ در این مقدار ثابت نگه داشته می شود. برای تحقق این هدف و رسیدن به محدوده ی ماکزیمم ضریب توان جهت استخراج حداکثر انرژی از باد، در این مقاله یک کنترل کننده ی غیرخطی 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

جدول 1 مقادیر پارامترهای مختلف مدل توربین باد

Table 1 wind turbine model parameters

کمیت	مقدار	واحد بین المللی
قطر روتور	47	(m)
نسبت دنده	52.65	-
چگالی هوا	1.205	(kgm ⁻³)
ممان اینرسی شفت روتور	354000	(kgm ²)
ممان اینرسی شفت ژنراتور	37.5	(kgm ²)
ضریب سختی شفت	293563	(Nmrad ⁻¹)
ضریب میرایی شفت	10363	(Nm.s.rad ⁻¹)
توان نامی	660	(kW)
ثابت زمانی ژنراتور	15	(ms)
تأخیر ارتباطی ژنراتور	10	(ms)
مینیمم گشتاور بار ژنراتور	0	(Nm)
ماکزیمم گشتاور بار ژنراتور	3500	(Nm)
ارتفاع برج توربین	40	(m)
ثابت زمانی عملگر پیچ	35	(ms)
تأخیر ارتباطی عملگر پیچ	10	(ms)
مینیمم نرخ تغییر عملگر پیچ	-10	(°/s)
ماکزیمم نرخ تغییر عملگر پیچ	10	(°/s)
مینیمم زاویه ی پیچ	-10	(°)
ماکزیمم زاویه ی پیچ	90	(°)

برای اعتبارسنجی مدل سازی انجام شده ورودی های به توربین باد واقعی (سرعت باد، زاویه ی 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 نرم افزار 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 کننده ی کلاسیک در ناحیه ی بار جزئی

این کنترل کننده در توربین باد 660 کیلووات و ستاس مورد استفاده در سایت بادی بینالود در ناحیه ی بار جزئی استفاده شده است. در این کنترل کننده با توجه به معادله ی (25) برای طراحی کنترل کننده از ضریبی استفاده شده

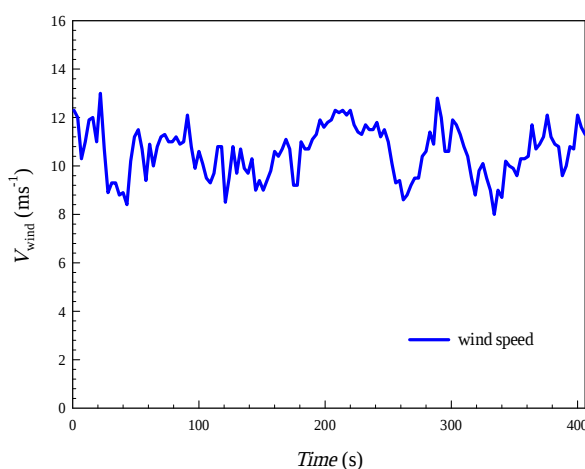


Fig. 7 Wind speed curve using in simulation

شکل 7 منحنی سرعت باد مورد استفاده در شبیه سازی

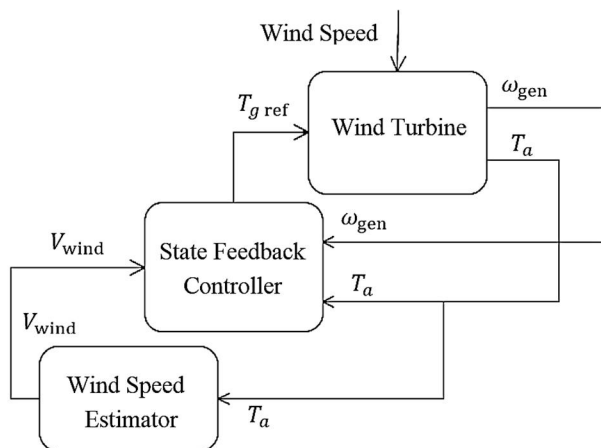


Fig. 9 Nonlinear Dynamic State Feedback Controller without wind speed measurement scheme

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

7-1- طراحی تخمین گر سرعت باد

در توربین های بادی یکی از مشکل های موجود اندازه گیری سرعت باد می باشد. زیرا با استفاده از بادسنج اندازه گیری سرعت باد با خطای قابل ملاحظه ای 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 هر لحظه ی برخورد به پره های 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 پره های توربین جهت تخمین سرعت باد استفاده شده است.

توسط معادله ی (32) سرعت باد توسط معادله ی غیرخطی گشتاور آیرودینامیکی تخمین زده شده است.

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

با حل معادله ی (32) مقدار سرعت باد به دست می آید. سپس از مقدار سرعت باد به دست آمده جهت محاسبه مقدار سرعت زاویه ای بهینه ی روتور استفاده می شود.

$$\omega_{opt} = \frac{V_{wind} \lambda_{opt}}{R} \quad (33)$$

از سرعت زاویه ای بهینه ی روتور به دست آمده از معادله ی (33)، در کنترل کننده ی فیدبک حالت طراحی شده استفاده می شود.

8- نتایج شبیه سازی

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 نرم افزار متلب در محیط شبیه سازی¹ انجام شده است.

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

فیدبک گرفته شده است. به علت دینامیک جعبه دنده و شفت روتور، به جای فیدبک گرفتن از سرعت روتور از سرعت ژنراتور فیدبک گرفته شده است. این باعث افزایش دقت کنترل کننده، به علت داشتن اطلاعات دقیق تری از شرایط عملکردی زیرسیستم های مختلف توربین باد می شود. همچنین به منظور دریافت اطلاعات دقیق از شرایط اولیه ی باد هنگام برخورد به پره ها و ارزیابی مقدار توان اولیه ی موجود در باد، از گشتاور آیرودینامیکی نیز فیدبک گرفته شده است. بنابراین این کنترل کننده به علت استفاده ی همزمان از سرعت ژنراتور، سرعت روتور و گشتاور آیرودینامیکی مزیت قابل توجهی نسبت به دیگر کنترل کننده های فیدبک حالت دارا می باشد. در نتیجه عملکرد سیستم کنترلی به علت دریافت اطلاعات کامل از دونقطه ی عملکردی بسیار مهم، مطلوب تر می شود. در نهایت این عملکرد با توجه به نتایج شبیه سازی، باعث افزایش استخراج انرژی از باد شده است.

جهت طراحی این کنترل کننده در ابتدا با انتخاب دینامیک مرتبه ی 2، خطای ردیابی سرعت زاویه ای روتور از معادله دیفرانسیل (28) محاسبه می شود.

$$\ddot{\varepsilon} + a_1 \dot{\varepsilon} + a_0 \varepsilon = 0 \quad (28)$$

همچنین داریم:

$$\varepsilon = \omega_{opt} - \omega_r \quad (29)$$

با استفاده از معادلات (18) و (20) معادله ی (30) به دست می آید.

$$J_r \dot{\omega}_r = T_a - N_{gear/gen} \dot{\omega}_{gen} + N_{gear} T_{gen} \quad (30)$$

سپس با استفاده از معادلات (28)، (29) و (30) معادله ی (31) به دست می آید. همان طور که در معادله ی (31) مشاهده می کنید، نرخ گشتاور ژنراتور تابعی از نرخ گشتاور آیرودینامیکی، نرخ سرعت زاویه ای ژنراتور و مشتق دوم سرعت زاویه ای بهینه ی روتور می باشد.

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

این کنترل کننده ی طراحی شده، از نوع فیدبک حالت دینامیکی می باشد. علت استفاده از نوع دینامیکی در این است که، کنترل کننده ی فیدبک حالت استاتیکی در برابر اغتشاشات موجود در باد مقاوم نیست، که در نتیجه باعث کاهش بازده توربین باد می شود. اما در حالت دینامیکی به علت استفاده از معادلات دینامیکی در طراحی کنترل کننده، دارای پاسخ سریع تری به تغییرات به وجود آمده در سرعت باد می باشد. همچنین مقاومت خوبی در برابر اغتشاشات موجود در باد دارد، که در نهایت باعث افزایش بازده توربین باد می شود. در این کنترل کننده، به این علت که، از مقادیر بهینه ی نسبت سرعت نوک پره و ضریب توان ماکزیم استفاده شده است، کنترل کننده در سرعت های مختلف باد در هر لحظه، سعی دارد در محدوده ی توان ماکزیم قرار گیرد. این باعث ردیابی توان ماکزیم در سرعت های مختلف باد می شود، که در نهایت 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 مدل سازی، نتایج این کنترل کننده دارای دقت مطلوبی می باشد. لذا این کنترل کننده ی طراحی شده می تواند به عنوان کنترل کننده ای برای اعتبار سنجی نتایج سایر کنترل کننده ها مورد استفاده قرار گیرد. همچنین به علت صحت 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 توربین باد افزایش قابل ملاحظه ای یافته است.

¹ Simulink

² Rotor

³ Tower

⁴ Nacelle

8-1- کنترل کننده با استفاده از تخمین گر سرعت باد

در توربین های باد برای رسیدن به بازده ماکزیمم، باید مقدار نسبت سرعت نوک پره در سرعت های مختلف باد در مقدار بهینه ی خود قرار داشته باشد. اما با توجه به شکل 11 مقدار نسبت سرعت نوک پره در توربین باد با استفاده از کنترل کننده ی کلاسیک، از حالت بهینه فاصله دارد، که این باعث کاهش بازدهی توربین می شود. اما با استفاده از کنترل کننده ی فیدبک حالت دینامیکی طراحی شده در این مقاله، مقدار نسبت سرعت نوک پره در محدوده ی بهینه قرار گرفته است.

با توجه به شکل های 12 و 13 به علت استفاده از معادلات دینامیکی در طراحی کنترل کننده ی فیدبک 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 شکل های 12 و 13 مشخص است، تغییرات سرعت ژنراتور در توربین باد واقعی با کنترل کننده ی کلاسیک در زمان های مختلف تقریباً 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 در نهایت باعث کاهش بازده توربین باد می شود.

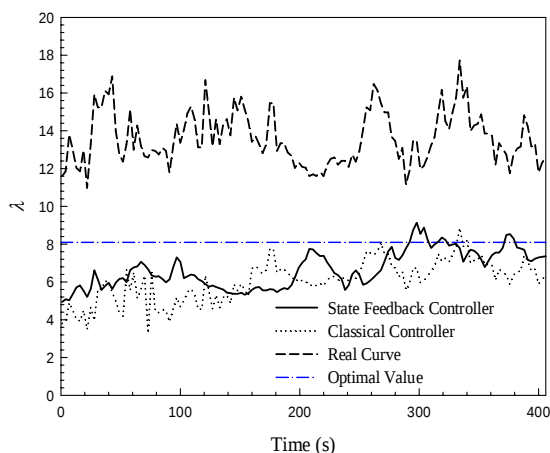


Fig. 11 Blade tip speed ratio curve in real and simulation state

شکل 11 منحنی نسبت سرعت نوک پره در حالت واقعی و شبیه سازی شده

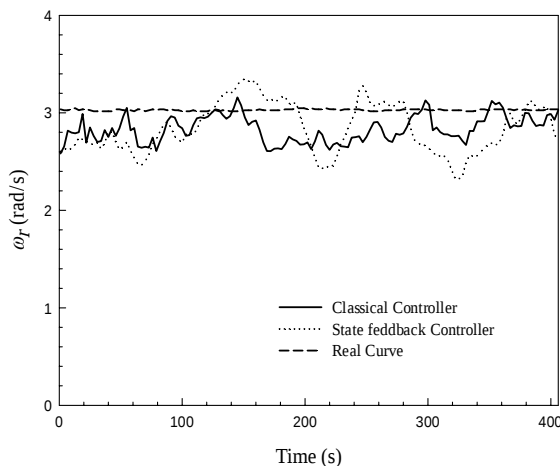


Fig. 12 Rotor angular speed curve in real and simulation state

شکل 12 منحنی سرعت زاویه ای روتور در حالت واقعی و شبیه سازی شده

متعلقات آن که هاب¹ نامیده می شود، می باشد. برج نیز یک ستون استوانه ای شکل است، که ماشین خانه را در این نوع توربین محور افقی، در قسمت بالای برج، نگه داشته است. ماشین خانه محفظه ای است که مجموعه ی انتقال قدرت² درون آن قرار می گیرد. مجموعه ی انتقال قدرت شامل شفت سرعت پایین، گیربکس، شفت سرعت بالا و ژنراتور می باشد.

در این قسمت، نتایج شبیه سازی برای دو حالت استفاده از کنترل کننده ی 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 کننده ی کلاسیک در دو حالت واقعی (داده های واقعی به دست آمده از سایت بادی بینالود) و شبیه سازی، در نمودارهای مختلف مقایسه شده است.

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

در شکل 10 منحنی باد مورد استفاده، دقیقاً از روی اطلاعات واقعی، از نیروگاه بادی بینالود به دست آمده است.

جدول 2 اطلاعات توربین بادی واقعی و شبیه سازی شده

Table 2 Real wind turbine and simulation data

کمیت	مقدار	واحد بین المللی
قطر روتور	47	(m)
نسبت دنده	52.65	-
توان نامی ³	660	(kW)
سرعت زاویه ای نامی ژنراتور	165.88	(rad.s ⁻¹)
سرعت قطع پایین ⁴	4	(ms ⁻¹)
سرعت نامی باد	15	(ms ⁻¹)
سرعت قطع بالا ⁵	25	(ms ⁻¹)
ارتفاع برج توربین	40	(m)
مقدار بهینه ی زاویه ی پیچ	0	(deg)
مقدار بهینه ی نسبت سرعت نوک پره	8.1	-

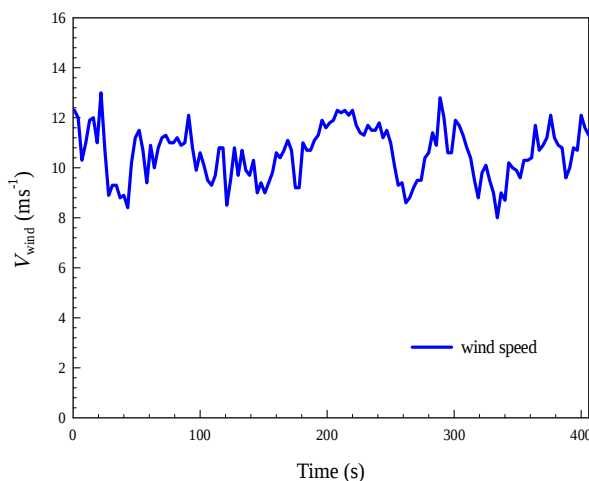


Fig. 10 Wind speed curve using in simulation

شکل 10 منحنی سرعت باد مورد استفاده در شبیه سازی

¹ Hub

² Drive Train

³ Rated Power

⁴ V_{cut in}

⁵ V_{cut out}

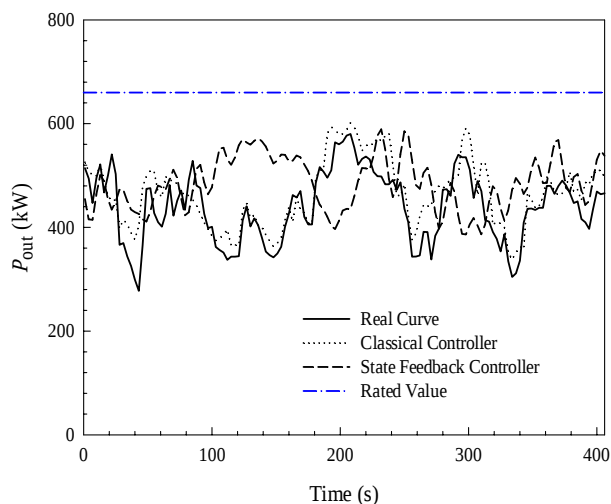


Fig. 15 Output power curve with wind speed estimator

شکل 15 منحنی توان خروجی توربین باد با تخمین گر سرعت باد

کنترل کننده ی کلاسیک و 8.26% نسبت به داده های واقعی به دست آمده از توربین بادی 660 کیلووات مورد استفاده در سایت بادی بینالود افزایش یافته است. اما در مقایسه با حالت استفاده از تخمین گر سرعت باد، مقدار استخراج انرژی از باد به میزان 5.23% کاهش یافته است.

9- نتیجه گیری و جمع بندی

در این تحقیق، با استفاده از داده های واقعی استخراج شده از سایت بادی بینالود، عملکرد و بازدهی توربین های بادی 660 کیلووات و ستاس که از کنترل کننده ی کلاسیک استفاده می کنند، مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اهمیت استخراج انرژی از باد به علت مزایای اقتصادی و زیست-محیطی، افزایش بازدهی این توربین ها امری ضروری است. به منظور بهبود عملکرد سیستم و افزایش میزان استخراج انرژی از باد، کنترل کننده ی جدیدی با قابلیت تخمین سرعت باد طراحی شده و عملکرد آن از طریق شبیه سازی نشان داده شده است. اقدامات انجام شده و نتایج حاصله را می توان به صورت زیر خلاصه کرد.

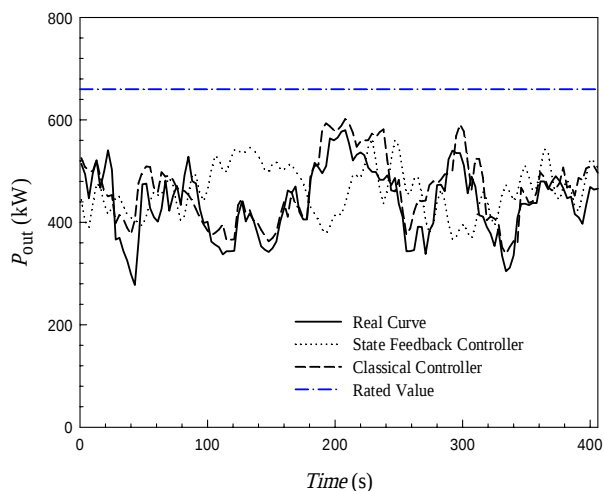


Fig. 16 Output power curve without wind speed estimator

شکل 16 منحنی توان خروجی توربین باد بدون تخمین گر سرعت باد

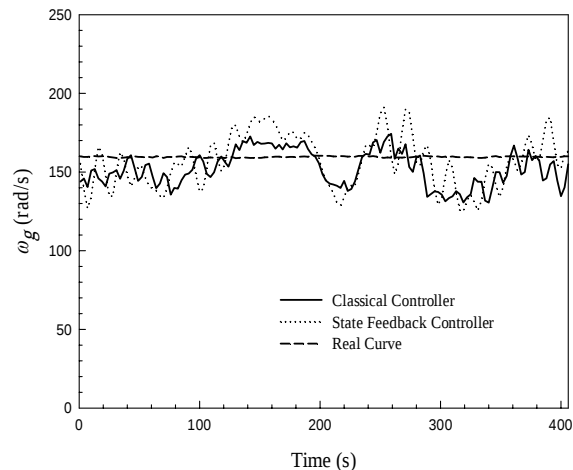


Fig. 13 Generator angular speed curve in real and simulation state

شکل 13 منحنی سرعت زاویه ای ژنراتور در حالت واقعی و شبیه سازی شده

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.

در نهایت این عملکرد مطلوب کنترل کننده با توجه به شکل 15 باعث افزایش استخراج انرژی از باد به اندازه ی 6.91% نسبت به کنترل کننده ی کلاسیک و به اندازه ی 13.49% نسبت به داده های واقعی به دست آمده از سایت بادی بینالود شده است.

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

در این قسمت شبیه سازی توسط نرم افزار متلب با کنترل کننده ی غیر خطی فیدبک حالت دینامیکی طراحی شده 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، به طور میانگین در بازه ی مورد نظر به میزان 1.68% نسبت به

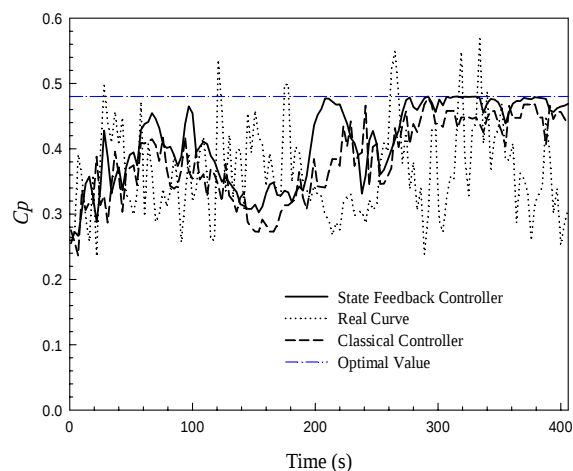


Fig. 14 Power coefficient curve in real and simulation state

شکل 14 منحنی ضریب توان در حالت واقعی و شبیه سازی شده

- 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 International Power System Conference*, 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. Marin, 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. Boukhezzer, H. Siguerdidjane, Nonlinear control of a variable-speed 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 pitch-regulated 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 Edition, 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, *Multidisciplinary Journal of Research in Engineering and Technology*, 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 داده های واقعی به منظور انجام تحقیقی مبتنی بر تئوری و تجربه
 - طراحی یک کنترل کننده فیدبک حالت دینامیکی برای ناحیهی سرعت های کمتر از حد نامی
 - طراحی تخمین گر سرعت باد با استفاده از معادله ی غیرخطی گشتاور آیرودینامیکی جهت کاهش خطای اندازه گیری
 - افزایش استخراج انرژی به میزان 1.68% در نتیجه ی استفاده از کنترل کننده ی 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% در نتیجه ی استفاده از کنترل کننده ی فیدبک حالت و تخمین گر سرعت
- نتایج فوق نشان دهنده ی بهبود قابل ملاحظه در راندمان توربین های مورد مطالعه، در نتیجه ی استفاده از کنترل کننده و تخمین گر طراحی شده در مقایسه با کنترل کننده ی کلاسیک می باشد.

10- فهرست علائم

A	مساحت (m^2)
B	ضریب میرایی شفت ($Nm.s.rad^{-1}$)
C_p	ضریب توان توربین باد
F_T	نیروی رانش (N)
J_{gen}	ممان اینرسی شفت ژنراتور (kgm^2)
J_r	ممان اینرسی شفت روتور (kgm^2)
K_s	ضریب سختی شفت ($Nmrad^{-1}$)
N_{gear}	نسبت دنده ی گیربکس
P	توان (kW)
P_a	توان آیرودینامیکی (kW)
T_a	گشتاور آیرودینامیکی (Nm)
T_{gen}	گشتاور ژنراتور (Nm)
T_1	گشتاور وارده به شفت سرعت پایین (Nm)
T_h	گشتاور وارده به شفت سرعت بالا (Nm)
V_N	سرعت نامی باد (ms^{-1})
V_o	سرعت باد متناسب با توان نامی (ms^{-1})
V_{wind}	سرعت باد (ms^{-1})
علائم یونانی	
β	زاویه ی پیچ پره (deg)
β_{opt}	مقدار بهینه ی زاویه ی پیچ (deg)
ε	مقدار خطای سرعت زاویه ای روتور ($rads^{-1}$)
λ	نسبت سرعت نوک پره
λ_{opt}	مقدار بهینه ی نسبت سرعت نوک پره
ω_r	سرعت زاویه ای روتور ($rads^{-1}$)
ω_{gen}	سرعت زاویه ای ژنراتور ($rads^{-1}$)

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 Conference*, 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