



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

* 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 بادسنج، 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

در طی سالیان 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

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

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:

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)

مجموعه‌ی انتقال قدرت³، امروزه از توربین‌های سرعت متغیر استفاده می‌شود [1].

در توربین‌های سرعت متغیر، با کنترل سرعت ژنراتور رسیدن به مقدار ضریب توان¹ ماکزیمم (در نسبت سرعت نوک پره بهینه) امکان‌پذیر می‌شود [2]. با توجه به ساختار این توربین‌ها، با تغییر سرعت باد (در سرعت‌های باد کمتر از حد نامی)، کنترل‌کننده با کنترل سرعت ژنراتور، باعث ثابت ماندن نسبت سرعت نوک پره در مقدار بهینه‌ی خود می‌شود. باید توجه داشت که کنترل سرعت در این توربین‌ها متناسب با تغییر سرعت باد در زاویه‌ی پیچ ثابت (صفر درجه) انجام می‌شود. البته تنها سرعت متغیر بودن توربین باد، تضمینی جهت رسیدن به مقدار بهینه‌ی نسبت سرعت نوک پره نمی‌باشد، بلکه کیفیت و نحوه‌ی عملکرد کنترل‌کننده تأثیر زیادی در افزایش استخراج انرژی از باد دارد. لذا با توجه به کیفیت عملکرد کنترل‌کننده‌ی استفاده‌شده در توربین‌های باد، رسیدن به مقدار بهینه‌ی نسبت سرعت نوک پره، جهت افزایش استخراج انرژی از باد، امکان‌پذیر می‌شود.

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 اندازه‌گیری سرعت باد ندارد، طراحی شده است. در این کنترل‌کننده با فیدبک گرفتن از سرعت ژنراتور و استفاده از گشتاور آیرودینامیکی و سرعت روتور، گشتاور ژنراتور جهت استخراج حداکثر انرژی از باد، کنترل می‌شود. این کنترل‌کننده-ی طراحی‌شده به علت استفاده از معادلات دینامیکی، دارای پاسخی سریع به تغییرات به وجود آمده در سرعت باد می‌باشد. 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 هر لحظه، به کنترل‌کننده می‌رسد. این اطلاعات باعث کنترل بهتر توربین متناسب با شرایط واقعی موجود در هر لحظه می‌شود. اما در کنترل‌کننده‌های کلاسیک فقط از سرعت ژنراتور جهت کنترل توربین باد استفاده می‌شود، که این باعث کاهش اطلاعات دریافتی از شرایط عملکردی توربین در هر لحظه می‌شود. در نتیجه کنترل‌کننده نمی‌تواند به‌صورت دقیق و مطلوب عمل کند، که در نهایت باعث کاهش استخراج انرژی از باد می‌شود. از دیگر مزایای کنترل‌کننده‌ی طراحی‌شده در این مقاله، تخمین سرعت باد با دقت مطلوب توسط معادله‌ی غیرخطی گشتاور آیرودینامیکی می‌باشد. در اغلب توربین‌های بادی از بادسنج³ برای اندازه‌گیری سرعت باد استفاده می‌شود. با توجه به چرخش پره‌های توربین باد و حالت گردابه‌ای به وجود آمده در اطراف پره‌های آن، اندازه‌گیری سرعت باد با بادسنج همراه با خطای قابل‌ملاحظه‌ای می‌باشد، که این تأثیر منفی روی بازدهی توربین باد دارد [3]. اما در این کنترل‌کننده‌ی طراحی‌شده، این مشکل با تخمین سرعت باد به روش گفته‌شده برطرف شده است. در نتیجه، این عملکرد مطلوب کنترل‌کننده‌ی طراحی‌شده با توجه به نتایج شبیه‌سازی، باعث افزایش قابل‌توجه استخراج انرژی از باد نسبت به توربین‌های باد با کنترل‌کننده‌ی کلاسیک، شده است.

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

عملکرد توربین باد شرح داده‌شده است. در بخش چهارم ژنراتور مورد استفاده در توربین باد واقعی ذکر شده، 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 این‌گونه 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 اخیراً چندین نیروگاه بادی مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. از کارهای انجام‌شده طی سالیان اخیر می‌توان 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 استخراج شده 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 هر یک اشاره‌شده است. شیخان و همکاران [7]، از یک کنترل‌کننده‌ی تناسبی-انتگرال‌گیر⁶ برای کنترل توربین باد استفاده کرده‌اند، درحالی‌که ضرایب بهره توسط تئوری فازی به‌دست‌آمده است. قاسمی و همکاران [8]، از یک شبکه‌ی عصبی کوانتوم به‌عنوان کنترل‌کننده در یک ساختار کنترلی تطبیقی استفاده کرده‌اند، که این کنترل‌کننده باعث بهبود بازدهی توربین باد شده است. سالومو و همکاران [9]، مقایسه‌ای را بین سه الگوریتم کنترلی فازی-تناسبی-انتگرال‌گیر، فازی و تناسبی-انتگرال‌گیر انجام داده‌اند و مزایا و نحوه‌ی عملکرد هر یک از این روش‌ها را به‌تفصیل شرح داده‌اند. بوخضار و سیگور [10]، برای مدل‌سازی 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 نگاه داشته‌اند. 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.

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.

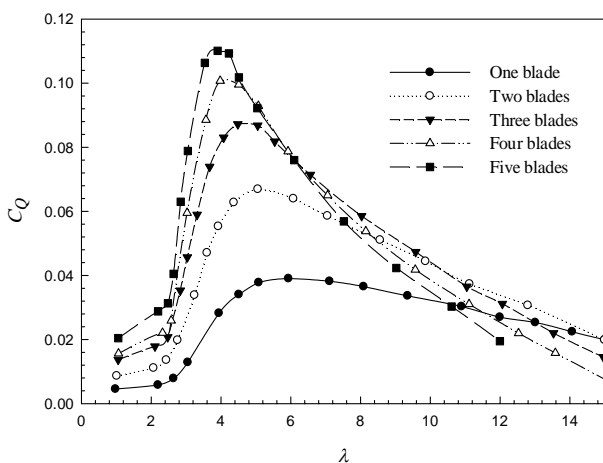


Fig. 2 $C_Q - \lambda$ performance curve for wind turbine with different number of blades at $\beta = 0^\circ$ [20]

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.

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

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

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].

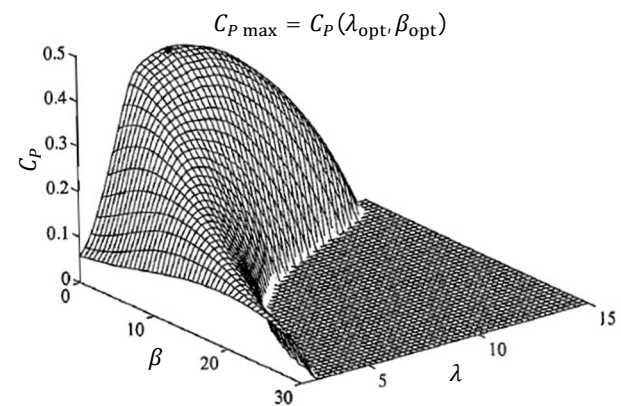


Fig. 1 3D diagram of $C_P(\lambda, \beta)$ [18]

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

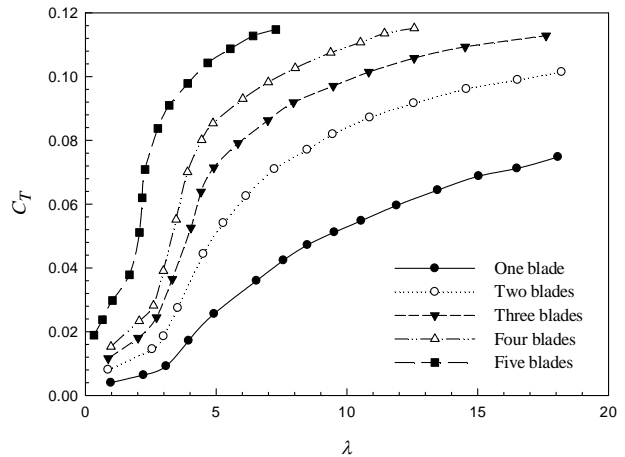


Fig. 3 $C_T - \lambda$ curve [20]

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

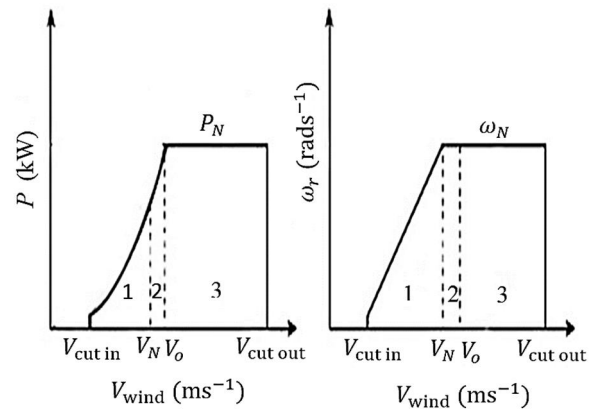


Fig. 4 wind turbines performance area [21]

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

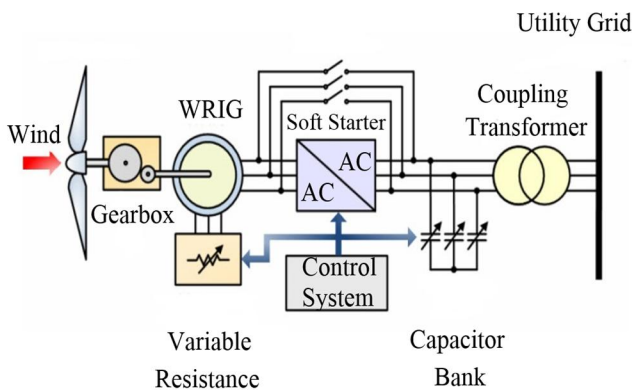


Fig. 5 optislip induction generator [1]

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)

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.

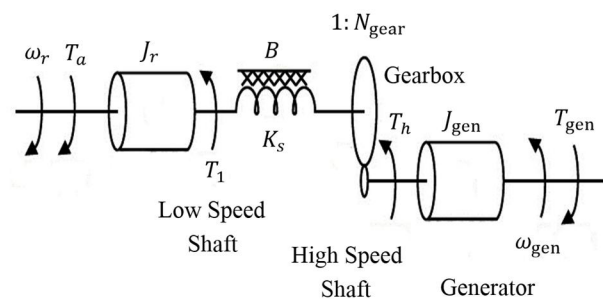


Fig. 6 Two mass model of the wind turbine

شکل 6 مدل دو جرمی توربین باد

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

¹ Pitch angle
² Pitch actuator

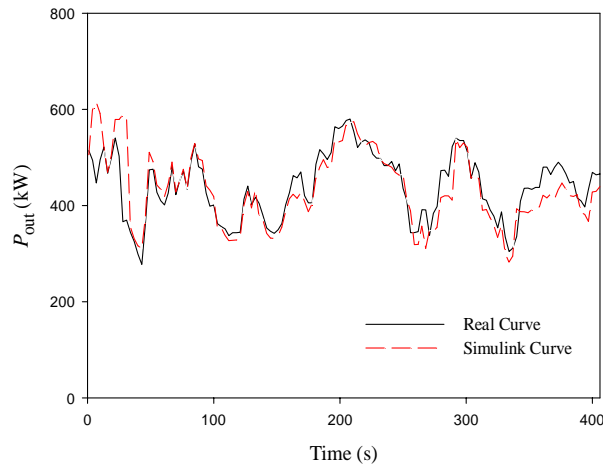


Fig. 8 Wind turbine output power curve

شکل 8 منحنی توان خروجی توربین باد

است که این ضریب با معادله‌ی (26) به‌دست می‌آید. همان‌طور که در معادله‌ی (26) مشاهده می‌کنید، این ضریب تابعی از پارامترهای ثابتی می‌باشد، که این باعث ثابت شدن مقدار ضریب k در سرعت‌های مختلف باد می‌شود. 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 k برای حالت ماکزیمم به‌دست‌آمده است، که با این ضریب ماکزیمم و ثابت، تا زمانی‌که مقدار سرعت باد در محدوده‌ی نامی باشد کنترل‌کننده عملکرد مطلوبی دارد. اما با توجه به این‌که 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 کنترل‌کننده‌ی فیدبک حالت دینامیکی این مشکل برطرف شده است.

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

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

7- طراحی کنترل‌کننده‌ی غیرخطی فیدبک حالت دینامیکی برای ناحیه‌ی بار جزئی

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

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

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 نسبت سرعت نوک پره‌ی بهینه ماکزیمم می‌باشد، زاویه‌ی پیچ در این مقدار ثابت نگه‌داشته می‌شود. برای تحقق این هدف و رسیدن به محدوده‌ی ماکزیمم ضریب توان جهت استخراج حداکثر انرژی از باد، در این مقاله یک کنترل‌کننده‌ی غیرخطی فیدبک حالت بدون نیاز به اندازه‌گیری سرعت باد طراحی شده است. در این کنترل‌کننده همان‌طور که در شکل 9 مشاهده می‌کنید، 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 بین‌المللی
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 زاویه‌ی پیچ	-10	(°)
ماکزیمم زاویه‌ی پیچ	90	(°)

برای اعتبارسنجی مدل‌سازی انجام‌شده ورودی‌های به توربین باد واقعی (سرعت باد، زاویه‌ی پیچ و گشتاور ژنراتور) به‌صورت حلقه باز به‌عنوان ورودی به مدل ساخته‌شده در این مقاله در نظر گرفته‌شده و با انجام شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب، توان خروجی حاصل با توان خروجی توربین باد واقعی مقایسه شده است. در شکل 8 مقادیر توان در حالت واقعی و شبیه‌سازی را مشاهده می‌کنید.

6- کنترل‌کننده‌ی 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

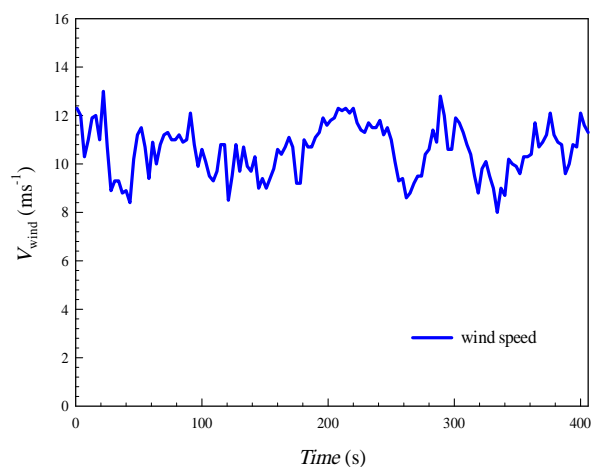


Fig. 7 Wind speed curve using in simulation

شکل 7 منحنی سرعت باد مورد‌استفاده در شبیه‌سازی

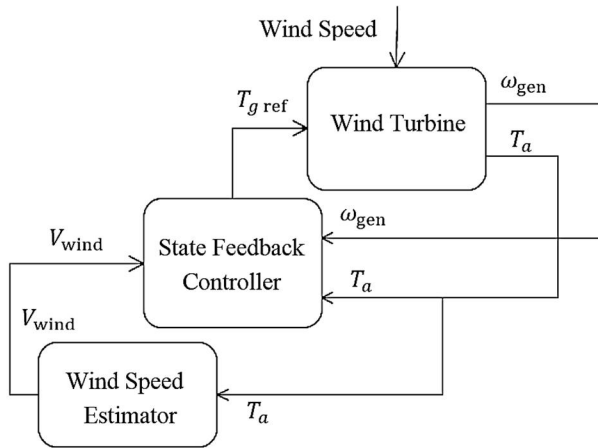


Fig. 9 Nonlinear Dynamic State Feedback Controller without wind speed measurement scheme

شکل 9 طرح کنترل‌کننده‌ی غیرخطی فیدبک حالت بدون نیاز به اندازه‌گیری سرعت باد

7-1- طراحی تخمین‌گر سرعت باد

در توربین‌های بادی یکی از مشکل‌های موجود اندازه‌گیری سرعت باد می‌باشد. زیرا با استفاده از بادسنج اندازه‌گیری سرعت باد با خطای قابل‌ملاحظه‌ای همراه است. لذا در این مقاله با طراحی تخمین‌گر، امکان تخمین سرعت باد با دقت مطلوب، توسط سرعت زاویه‌ای روتور و گشتاور آیرودینامیکی فراهم شده است. در این روش در واقع به علت استفاده از سرعت روتور و گشتاور آیرودینامیکی، سرعت باد در هر لحظه برخورد به پره‌های توربین تخمین زده شده است. مزیت این روش، حذف خطای اندازه‌گیری سرعت باد با بادسنج می‌باشد. 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 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 معادله‌ی (32) مقدار سرعت باد به دست می‌آید. سپس از مقدار سرعت باد به‌دست‌آمده جهت محاسبه مقدار سرعت زاویه‌ای بهینه‌ی روتور استفاده می‌شود.

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

از سرعت زاویه‌ای بهینه‌ی روتور به‌دست آمده از معادله‌ی (33)، در کنترل‌کننده‌ی فیدبک حالت طراحی شده استفاده می‌شود.

8- نتایج شبیه‌سازی

شبیه‌سازی در این مقاله، بر روی یک توربین بادی سرعت متغیر، محور افقی مدل‌سازی شده در بخش 5، انجام گرفته است. این شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب در محیط شبیه‌سازی¹ 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 عبارت‌اند از، روتور²، برج³ و ماشین‌خانه⁴. روتور شامل سه پره و

فیدبک گرفته شده است. به علت دینامیک جعبه‌دنده و شفت روتور، به‌جای فیدبک گرفتن از سرعت روتور از سرعت ژنراتور فیدبک گرفته شده است. این باعث افزایش دقت کنترل‌کننده، به‌علت داشتن اطلاعات دقیق‌تری از شرایط عملکردی زیرسیستم‌های مختلف توربین باد می‌شود. همچنین به‌منظور 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 کنترل‌کننده به‌علت استفاده‌ی همزمان از سرعت ژنراتور، سرعت روتور و گشتاور آیرودینامیکی مزیت قابل‌توجهی نسبت به دیگر کنترل‌کننده‌های فیدبک حالت دارا می‌باشد. در نتیجه عملکرد سیستم کنترلی به‌علت دریافت اطلاعات کامل از دونقطه‌ی عملکردی بسیار مهم، مطلوب‌تر می‌شود. در نهایت این عملکرد با توجه به نتایج شبیه‌سازی، 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 می‌شود.

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

همچنین داریم:

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

با استفاده از معادلات (18) و (20) معادله‌ی (30) به دست می‌آید.

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

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 آیرودینامیکی، نرخ سرعت زاویه‌ای ژنراتور و مشتق دوم سرعت زاویه‌ای بهینه‌ی روتور می‌باشد.

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

این کنترل‌کننده‌ی طراحی شده، از نوع فیدبک حالت دینامیکی می‌باشد. علت استفاده از نوع دینامیکی در این است که، کنترل‌کننده‌ی فیدبک حالت استاتیکی در برابر اغتشاشات موجود در باد مقاوم نیست، که در نتیجه باعث کاهش بازده توربین باد می‌شود. اما در حالت دینامیکی به‌علت 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 در نهایت باعث افزایش بازده توربین باد می‌شود. در این کنترل‌کننده، به‌این‌علت که، از مقادیر بهینه‌ی نسبت سرعت نوک پره و ضریب توان ماکزیم استفاده شده است، کنترل‌کننده در سرعت‌های مختلف باد در هر لحظه، سعی دارد در محدوده‌ی توان ماکزیم قرار گیرد. این باعث ردیابی توان ماکزیم در سرعت‌های مختلف باد می‌شود، که در نهایت باعث افزایش استخراج انرژی از باد شده است. یکی دیگر از مزایای این کنترل‌کننده در این است که با استخراج ضرایب از معادلات دینامیکی بخش مدل‌سازی، نتایج این کنترل‌کننده دارای دقت مطلوبی می‌باشد. لذا این کنترل‌کننده‌ی طراحی شده می‌تواند به‌عنوان کنترل‌کننده‌ی برای اعتبار سنجی نتایج سایر کنترل‌کننده‌ها مورد استفاده قرار گیرد. همچنین به‌علت صحت‌گذاری مدل با داده‌های واقعی، می‌تواند برای اطمینان از صحت مدل‌سازی صورت گرفته در سایر مقالات نیز به کار رود. در این مقاله با طراحی این کنترل‌کننده با توجه به شبیه‌سازی صورت گرفته و نتایج حاصل، مقدار بازده توربین باد افزایش قابل‌ملاحظه‌ای یافته است.

¹ Simulink
² Rotor
³ Tower
⁴ Nacelle

8-1- کنترل‌کننده با استفاده از تخمین‌گر 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 کنترل‌کننده کلاسیک، از حالت بهینه فاصله دارد، که این باعث کاهش بازدهی توربین می‌شود. اما با استفاده از کنترل‌کننده فیدبک حالت دینامیکی طراحی‌شده در این مقاله، مقدار نسبت سرعت نوک پره در محدوده بهینه قرار گرفته است.

با توجه به شکل‌های 12 و 13 به علت استفاده از معادلات دینامیکی در طراحی کنترل‌کننده فیدبک حالت، با تغییر سرعت باد مقدار سرعت ژنراتور متناسب با آن در کمترین زمان تغییر می‌کند. این باعث قرار گرفتن نسبت سرعت نوک پره در محدوده بهینه می‌شود. اما همان‌طور که در شکل‌های 12 و 13 مشخص است، تغییرات سرعت ژنراتور در توربین باد واقعی با کنترل‌کننده کلاسیک در زمان‌های مختلف تقریباً ثابت است. همچنین در کنترل‌کننده کلاسیک در حالت شبیه‌سازی نیز تغییرات سرعت ژنراتور نسبت به کنترل‌کننده فیدبک حالت طراحی‌شده در این مقاله، کمتر می‌باشد. این عملکرد کنترل‌کننده کلاسیک باعث می‌شود، مقدار نسبت سرعت نوک پره با تغییر سرعت باد از حالت بهینه فاصله بگیرد، که در نهایت باعث کاهش بازده توربین باد می‌شود.

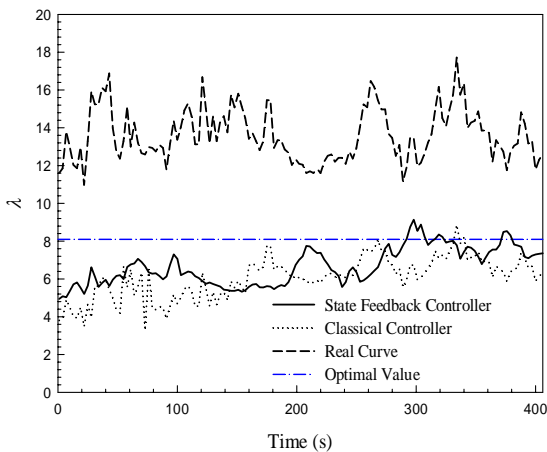


Fig. 11 Blade tip speed ratio curve in real and simulation state

شکل 11 منحنی نسبت سرعت نوک پره در حالت واقعی و شبیه‌سازی‌شده

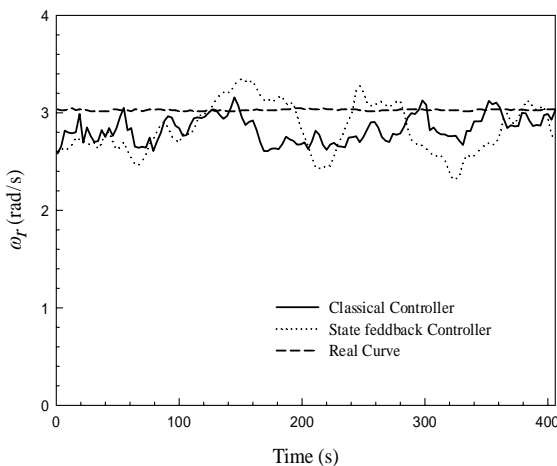


Fig. 12 Rotor angular speed curve in real and simulation state

شکل 12 منحنی سرعت زاویه‌ای روتور در حالت واقعی و شبیه‌سازی‌شده

متعلقات آن که هاب¹ نامیده می‌شود، می‌باشد. برج نیز یک ستون استوانه‌ای شکل است، که ماشین‌خانه را در این نوع توربین محور افقی، در قسمت بالای برج، نگاه داشته است. ماشین‌خانه محفظه‌ای است که مجموعه‌ی انتقال قدرت² درون آن قرار می‌گیرد. مجموعه‌ی انتقال قدرت شامل شفت سرعت پایین، گیربکس، شفت سرعت بالا و ژنراتور می‌باشد.

در این قسمت، نتایج شبیه‌سازی برای دو حالت استفاده از کنترل‌کننده غیرخطی فیدبک حالت دینامیکی طراحی‌شده با استفاده از تخمین‌گر سرعت باد و بدون استفاده از تخمین‌گر سرعت باد ارائه شده است. سپس نتایج حاصل، با کنترل‌کننده کلاسیک در دو حالت واقعی (داده‌های واقعی به‌دست‌آمده از سایت بادی بینالود) و شبیه‌سازی، 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 مورد استفاده، دقیقاً 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

کمیت	مقدار	واحد بین‌المللی
قطر روتور	47	(m)
نسبت دنده	52.65	-
توان نامی ³	660	(kW)
سرعت زاویه‌ای 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 بهینه‌ی زاویه‌ی پیچ	0	(deg)
مقدار بهینه‌ی نسبت سرعت نوک پره	8.1	-

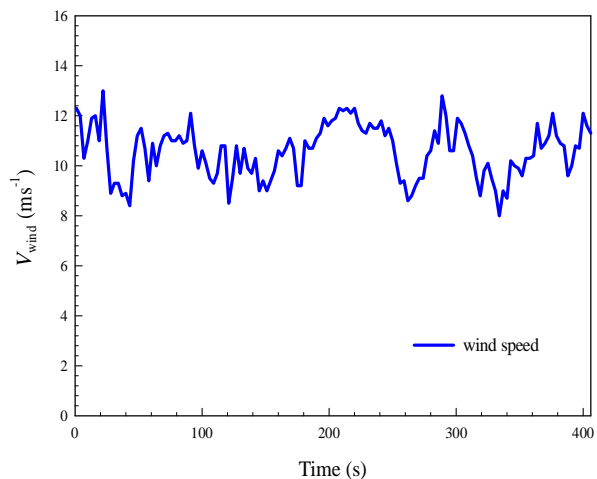


Fig. 10 Wind speed curve using in simulation

شکل 10 منحنی سرعت باد مورد استفاده در شبیه‌سازی

¹ Hub
² Drive Train
³ Rated Power
⁴ V_{cut in}
⁵ V_{cut out}

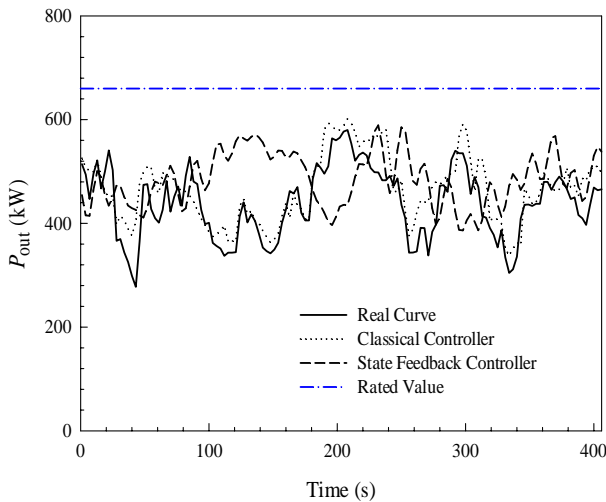


Fig. 15 Output power curve with wind speed estimator

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

کنترل کننده‌ی کلاسیک و 8.26% نسبت به داده‌های 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 داده‌های واقعی استخراج شده از سایت بادی بینالود، عملکرد و بازدهی توربین‌های بادی 660 کیلووات وستاس که از کنترل کننده‌ی کلاسیک استفاده می‌کنند، مورد بررسی 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. به منظور بهبود عملکرد سیستم و افزایش میزان استخراج انرژی از باد، کنترل کننده‌ی 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 می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد.

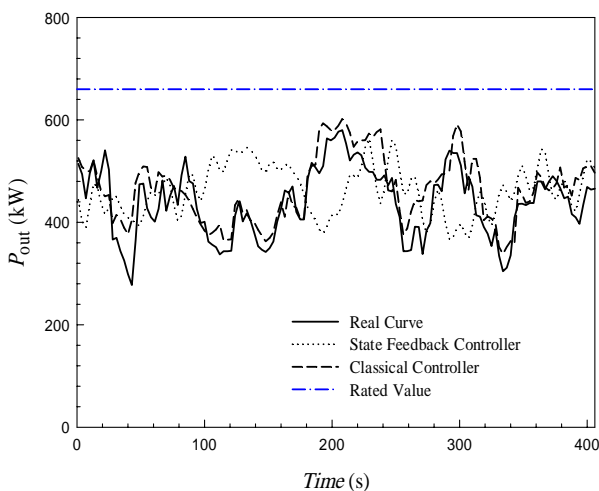


Fig. 16 Output power curve without wind speed estimator

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

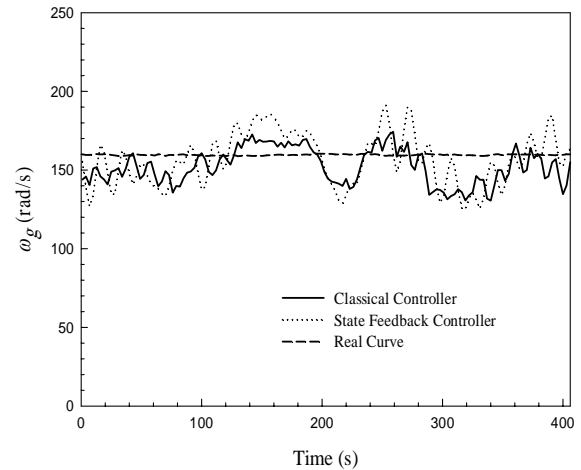


Fig. 13 Generator angular speed curve in real and simulation state

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

همان طور که در شکل 14 مشاهده می‌کنید، با طراحی کنترل کننده‌ی فیدبک حالت دینامیکی، مقدار ضریب توان ماکزیمم در زاویه‌ی پیچ صفر درجه، به تدریج به مقدار بهینه‌ی خود رسیده است. همان طور که گفته شد، ضریب توان تابعی از نسبت سرعت نوک پره و زاویه‌ی پیچ پره می‌باشد. لذا با توجه به شکل 11 با عملکرد مطلوب کنترل کننده‌ی طراحی شده، با قرار گرفتن مقدار نسبت سرعت نوک پره در مقدار بهینه‌ی خود، مقدار ضریب توان نیز به تدریج در محدوده‌ی بهینه‌ی خود قرار گرفته است.

در نهایت این عملکرد مطلوب کنترل کننده با توجه به شکل 15 باعث افزایش استخراج انرژی از باد به اندازه‌ی 6.91% نسبت به کنترل کننده‌ی کلاسیک و به اندازه‌ی 13.49% نسبت به داده‌های 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 کننده‌ی غیرخطی 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 بازه‌ی مورد نظر به میزان 1.68% نسبت به

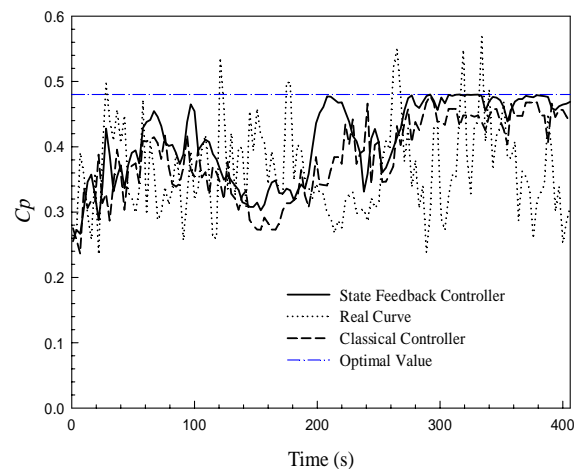


Fig. 14 Power coefficient curve in real and simulation state

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. Shahnaz, 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. 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. Pinte, N. Christov, P. Borne, D. Popescu, A. Badaea, 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 داده‌های واقعی به منظور 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 اندازه‌گیری
- افزایش استخراج انرژی به میزان 1.68% در نتیجه‌ی استفاده از کنترل کننده‌ی فیدبک حالت طراحی شده با استفاده از سرعت باد اندازه‌گیری شده (عدم استفاده از تخمین گر سرعت)
- افزایش استخراج انرژی به میزان 6.91% در نتیجه‌ی استفاده از کنترل کننده‌ی فیدبک حالت و تخمین گر سرعت

نتایج فوق نشان‌دهنده‌ی بهبود قابل‌ملاحظه در راندمان توربین‌های مورد مطالعه، در نتیجه‌ی استفاده از کنترل کننده و تخمین گر طراحی شده در مقایسه با کنترل کننده‌ی کلاسیک می‌باشد.

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 دنده‌ی 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	زاویه‌ی پیچ پره (deg)
β_{opt}	مقدار بهینه‌ی زاویه‌ی پیچ (deg)
ε	مقدار خطای سرعت زاویه‌ای روتور ($rads^{-1}$)
λ	نسبت سرعت نوک پره
λ_{opt}	مقدار بهینه‌ی نسبت سرعت نوک پره
ω_r	سرعت زاویه‌ای روتور ($rads^{-1}$)
ω_{gen}	سرعت زاویه‌ای 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 Confrence*, 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