



Individual Pitch Angle Robust Control of a Variable Speed Wind Turbine to Mitigate Mechanical Loads

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Mazare M.¹ MSc,
Taghizadeh M.*¹ PhD,
Aghaeinezhad S.M.¹ MSc

How to cite this article

Mazare M, Taghizadeh M, Aghaeinezhad S.M. Individual Pitch Angle Robust Control of a Variable Speed Wind Turbine to Mitigate Mechanical Loads. Modares Mechanical Engineering, 2019;19(4):937-945.

ABSTRACT

Conspicuously, pitch angle control strategy has been applied to mitigate the influence of mechanical load and also output power control at above-rated wind speeds. In this paper, a wind turbine is modeled based on simplified two-mass model and an adaptive sliding mode controller (ASMC) is designed based on individual pitch control (IPC) strategy. To do this, the single-blade approach is used and the wind turbine was divided into aerodynamics and mechanical subsystems and governing equations of each subsystem were derived. By designing and applying the ASMC to two-mass model, system behavior is observed and simulated in terms of step and turbulent wind speed inputs. In addition, to verify the validity of the ASMC, the proposed controller is implemented in the FAST environment and the wind speed profiles are generated using TurbSim. In order to analyze the environmental effects on the dynamic behavior of the system, the controller performance is explored in presence of parametric uncertainties. It should be noted that rotor speed tracking error is evaluated and demonstrated through different criteria.

Keywords Wind Turbine; Pitch Angle Control; Individual Pitch Control; Adaptive Sliding Mode FAST

¹Mechanical Engineering Faculty, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Faculty, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
Phone: -
Fax: -
mo_taghizadeh@sbu.ac.ir

Article History

Received: August 27, 2018
Accepted: November 20, 2018
ePublished: April 06, 2019

CITATION LINKS

[1] WWEA half-year report: Worldwind wind capacity reached 456 GW [2] The history and state of the art of variable-speed wind turbine technology [3] Modeling and design of dynamic state feedback controller with wind speed estimator, in variable speed wind turbines [4] Research on application of fuzzy PID in collective pitch control system [5] Individual blade pitch control for load reduction [6] Mitigation of fatigue loads using individual pitch control of wind turbines based on FAST [7] Individual pitch control for wind turbine load reduction including wake modeling [8] Individual pitch regulating af vindmølle [9] Repetitive model predictive approach to individual pitch control of wind turbines [10] Individual pitch control for load mitigation [11] A novel approach to structural load control using intelligent actuators [12] Alleviation of unbalanced rotor loads by single blade controllers [13] Combined wind turbine fatigue and ultimate load reduction by individual blade control [14] Alleviation of extreme blade loads by individual blade control during normal wind turbine operation [15] Adaptive passivity based individual pitch control for wind turbines in the full load region [16] Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development

کنترل مقاوم زاویه پیچ مستقل یک توربین بادی سرعت متغیر به منظور کاهش بارهای مکانیکی

محمود مزارع MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

مصطفی تقی‌زاده* PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

سیدمرتضی آقایی‌نژاد MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

اساساً برای کنترل توان خروجی و کاهش بارهای مکانیکی در سرعت‌های باد بالاتر از مقدار نامی از کنترل‌کننده زاویه پیچ استفاده می‌کنند. در این مقاله، توربین باد بر مبنای مدل دوجرمی ساده‌شده، مدل‌سازی شده است و کنترل‌کننده مد لغزشی تطبیقی برای کنترل زاویه پیچ بر مبنای استراتژی کنترل مستقل زاویه پیچ، طراحی شده است. به منظور استفاده از استراتژی کنترل مستقل زاویه پیچ، روش تک‌پره به کار گرفته شده است. با تقسیم مدل توربین باد به زیرسیستم‌های آیرودینامیک و مکانیک، معادلات حاکم بر هر کدام از زیرسیستم‌ها استخراج شد. با طراحی و اعمال کنترل‌کننده مد لغزشی تطبیقی بر مدل دوجرمی توربین باد، رفتار سیستم نسبت به ورودی‌های باد پله و توربولانسی مشاهده و شبیه‌سازی شده و همچنین به منظور اعتبارسنجی عملکرد کنترل‌کننده مد لغزشی تطبیقی بر رفتار سیستم، شبیه‌سازی فست استفاده شده است. پروفیل‌های باد مورد استفاده در شبیه‌سازی فست با استفاده از نرم‌افزار توربسیم تولید شده‌اند. به منظور مطالعه اثرات تغییرات محیطی روی رفتار دینامیکی سیستم، پاسخ کنترل‌کننده در حضور عدم قطعیت پارامتری سیستم بررسی شده است. لازم به ذکر بوده که در هر یک از این شبیه‌سازی‌ها، خطای ردیابی سرعت روتور در معیارهای مختلف محاسبه و ارزیابی شده است. **کلیدواژه‌ها:** توربین باد، کنترل زاویه پیچ، کنترل مستقل زاویه پیچ، مد لغزشی تطبیقی، فست

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۲۹

* نویسنده مسئول: mo_taghizadeh@sbu.ac.ir

۱- مقدمه

تحقیقات درباره انرژی باد به‌عنوان یک شاخه بین‌رشته‌ای که شاخه‌های مختلفی از علم را در بر می‌گیرد، روزبه‌روز در حال گسترش است. بنابر گزارش انجمن جهانی، انرژی باد ظرفیت نصب جهانی توربین باد با متوسط سرعت ۲۴/۰۳٪ در سال نسبت به سال‌های قبل رو به افزایش است [1]. با گذشت زمان برای افزایش پتانسیل تولید انرژی، اندازه توربین‌های بادی نسبت به دهه‌های گذشته اصلاح شده است. افزون بر آن مجموعه‌ای از روش‌های مختلف روی توربین‌ها پیاده شد. در حقیقت، بازار نصب توربین‌های بادی سرعت متغیر (VSWT) به دلیل شایستگی‌های بیشتر نسبت به توربین‌های سرعت ثابت افزایش پیدا کرده است. همچنین ثابت شده است که این توربین‌ها سالانه ۱۰٪ تولید انرژی بیشتری نسبت به توربین‌های بادی سرعت ثابت (CSWT) دارند. تحقیقات نشان داده که رفتار این دسته از توربین‌ها وابسته به انتخاب استراتژی کنترل است [2]. کنترل این توربین‌ها اساساً تنظیم گشتاور و توان خروجی بوده که وابسته به شرایط سرعت باد متغیر است. کنترل گشتاور بیشتر مربوط به ناحیه سرعت باد آرام است [3]. روش تنظیم توان خروجی توربین بادی نیز براساس کنترل زاویه پیچ بوده که غالباً در سال‌های گذشته افزایش یافته است. کنترل زاویه پیچ که از اهمیت زیادی برخوردار بوده، براساس کم و زیاد کردن زاویه پرها نسبت به تغییرات سرعت باد و تغییر در سیستم کنترل وابسته به ملزومات طراحی توربین بادی است.

کنترل‌کننده زاویه پیچ هم به‌صورت اختصاصی برای هر پره و هم تنها برای پره مرکزی در ارتباط با باقی پرها طراحی می‌شود. کنترل زاویه پیچ به‌ازای یک پره را کنترل جمعی زاویه پیچ (CPC) می‌نامند [4]. کنترل زاویه پیچ برای هر کدام از پرها به‌صورت جدا با نام کنترل مستقل زاویه پیچ (IPC) شناخته می‌شود [5]. گرایش به نزدیک کردن توان خروجی به توان مجاز و کاهش اثر نیروهای آیرودینامیک در ناحیه سرعت بالای باد، از فواید استفاده از کنترل‌کننده زاویه پیچ است.

در سال‌های اخیر، تحقیقات درباره بهترین راه برای طراحی سیستم‌های کنترل مستقل زاویه پیچ توربین باد رو به رشد بوده است. دلیل اصلی توجه به این نوع استراتژی کنترلی، توانایی آن در کنترل فعال زاویه پیچ هر پره به‌صورت اختصاصی است که موجب کاهش بارهای ناپایدار وارده از منابع مختلفی چون تنش باد، سایه برج، ناهماهنگی چرخش برج و اغتشاش موجود در آیرودینامیک و اتمسفر می‌شود. از بین استراتژی‌های کنترلی مستقل مختلفی که در این سال‌ها منتشر شده‌اند، اکثر آنها را می‌توان به دو کلاس کلی براساس تاثیر آنها در تضعیف بارهای خاص وارد بر توربین باد طبقه‌بندی کرد.

یکی از شاخه‌های استراتژی کنترلی مستقل زاویه پیچ، روش کنترلی بر پایه تبدیل کولمن است که هدف اصلی این روش، کاهش بار وارد بر بخش‌های غیرچرخشی بدنه توربین مانند ناسل خواهد بود. شاخه دیگر از استراتژی کنترل مستقل زاویه پیچ کنترل تک‌پره است که هدف اصلی آن کاهش بارهای مکانیکی وارد بر ساختارهای چرخشی بدنه توربین باد به‌خصوص پره خواهد بود.

روش تبدیل کولمن یکی از روش‌های استراتژی کنترل مستقل زاویه پیچ بوده که کارهای متفاوتی به‌منظور کاهش بارهای مکانیکی انجام شده است. ژانگ و همکاران [6] از کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی و یانگ و همکاران [7] از کنترل‌کننده بهینه خطی درجه دو در این زمینه بهره گرفته‌اند. لارسن و موگنسن [8] از کنترل‌کننده‌های تناسبی انتگرالی و بهینه خطی درجه دو با استفاده از استراتژی کنترل جمعی زاویه پیچ استفاده کردند که کنترل‌کننده بهینه خطی درجه دو، توان خروجی پایدارتری را موجب شد. آنها همچنین از کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی با استفاده از استراتژی کنترل مستقل زاویه پیچ بهره گرفتند که موجب بهبود در کاهش بار مکانیکی شد. بنابراین روش‌های کنترلی کلاسیک مانند تناسبی انتگرالی و روش‌های کنترلی مدرن مانند بهینه خطی درجه دو و بهینه خطی درجه دو گوسی مورد بررسی قرار گرفته‌اند [5]. خوبی استفاده از روش‌های کنترلی مدرن آن است که با استفاده از روابط فضای حالت می‌توان دینامیک داخلی سیستم را نیز کنترل کرد. فریزر و همکاران [9] از روش کنترلی مدل پیش‌بین استفاده کردند که این روش در قیاس با روش کنترلی تناسبی انتگرالی مشتق‌گیر با استراتژی کنترل جمعی زاویه پیچ توانست انحراف برج و پرها را تضعیف کند و بارهای مکانیکی وارد بر توربین باد را کاهش دهد. جسیپرسن و اولدنبرگر [10] با استفاده از کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی توانستند توان خروجی پایدار همراه با کاهش بار مکانیکی را موجب شوند.

روش دیگر استراتژی کنترل مستقل زاویه پیچ، روش تک‌پره بوده که این مفهوم توسط لیتد و همکاران [11, 12] برای اولین بار استفاده شده است. کنترل تک‌پره بعدها به‌صورت کنترل مستقل پره توسط هان و لیتد [13] به کار گرفته شد که در آن هر پره به‌صورت تکی و مستقل با کنترل‌کننده مشخص کنترل شده است که کنترل‌کننده، متناسب با اثرات وارد بر پره مربوطه عمل می‌کند. در مطالعاتی

$$P_r = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) v_{w,i}^3 \quad (3)$$

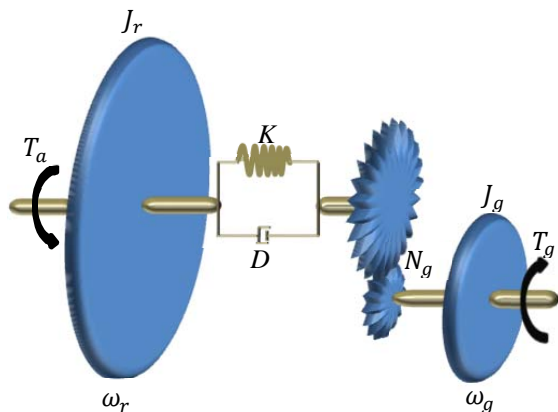
خواهد بود. $\lambda \triangleq r\omega/v_w$ که در آن ω سرعت دورانی روتور است. لازم به ذکر است رابطه C_p وابسته به هندسه توربین باد است. با اعمال قانون دوم نیوتون برای روتور توربین باد رابطه ۴ به دست می‌آید.

$$J_r \dot{\omega} = T_a(\lambda, \beta, v_w) - N_g T_g \quad (4)$$

J_r و N_g مقادیر ثابت مثبت به اینرسی روتور و نسبت جعبه‌دنده هستند. T_g به‌عنوان گشتاور ژنراتور، ثابت فرض می‌شود. گشتاور آیرودینامیک (T_a) با استفاده از رابطه ۳ و رابطه تعریف شده برای ضریب سرعت نوک محاسبه می‌شود.

$$T_a = \frac{P_r}{\omega} = \frac{1}{2} \rho A r C_p(\lambda, \beta) \frac{v_w^2}{\lambda} \quad (5)$$

در ادامه پارامترهای مدل توربین باد در جدول ۱ [16] نشان داده شده است.



شکل ۱) مدل دوجرمی توربین باد

جدول ۱) پارامترهای مدل توربین باد آزمایشی ۵ مگاوات [16]

| واحد | مقدار | پارامترهای توربین بادی |
|-------------------|----------|--|
| m | ۶۱/۵ | شعاع روتور (R) |
| kg/m ³ | ۱/۲۲۵ | چگالی هوا (ρ) |
| kgm ² | ۱۱۷۷۶۰۴۷ | اینرسی روتور (J_r) |
| - | ۹۷ | نسبت جعبه دنده (N_g) |
| MW | ۵ | توان نامی خروجی (P_e) |
| rad/s | ۱/۲۶۷۱ | سرعت نامی روتور ($\omega_{r-rated}$) |
| N m | ۴۳۰۹۳/۵۵ | گشتاور نامی ژنراتور ($T_{g-rated}$) |
| o | ۹۰ تا -۱ | محدوده زاویه پیچ ($\beta_{min} - \beta_{max}$) |
| - | ۰/۹۴۴ | بازده توربین بادی (η) |

۳- طراحی کنترل کننده

کنترل مد لغزشی یکی از روش‌های غیرخطی مقاوم در برابر عدم قطعیت‌ها و تغییرات پارامتری سیستم و کنترل تطبیقی، روش کنترلی برای کنترل سیستم با پارامترهای نامشخص یا متغیر است. به دلیل نبود یک فرمول‌بندی مشخص برای گشتاور آیرودینامیک (T_a) که تنها از طریق مقادیر ضریب توان C_p محاسبه می‌شود، با استفاده از قوانین کنترلی مد لغزشی و تطبیقی به محاسبه ضریب توان و ضرایب کنترلی پرداخته می‌شود. در شکل ۲، شمای کلی سیستم حلقه بسته نشان داده شده است.

توسط هان و لیتد [13, 14]، عملکرد کنترل کننده تک‌پره در مقابل خستگی و کاهش بار نهایی بررسی شده که به مطالعه کاهش بارهای وارد بر توربین باد و پرها پرداخته شده است. در بررسی دیگری توسط سورنسن و همکاران [15] کنترل کننده تطبیقی براساس استراتژی کنترل مستقل زاویه پیچ و روش کنترل تک‌پره طراحی شده و تاثیر آن بر تنظیم توان خروجی مورد مطالعه قرار گرفته است. این کنترل کننده قادر به کنترل توان خروجی بدون اعمال بار بیش از حد بر عملگر زاویه پیچ بوده است.

اخیراً به منظور کنترل هر چه بهتر سیستم‌های غیرخطی دارای نامعینی و عدم قطعیت مانند توربین باد، طراحی کنترل کننده‌های مقاوم و تطبیقی مورد توجه محققان قرار گرفته است. روش کنترلی مد لغزشی یکی از روش‌های غیرخطی مقاوم در برابر عدم قطعیت‌ها و تغییرات پارامتری سیستم و کنترل تطبیقی روشی برای کنترل سیستم با پارامترهای نامشخص یا متغیر است. بدین منظور، ترکیب این دو روش برای کنترل سیستم توربین باد قابل ارایه است. در این مقاله برای کنترل توان خروجی و بارهای مکانیکی وارد بر توربین باد از استراتژی کنترلی کنترل مستقل زاویه پیچ استفاده می‌شود. بدین منظور با استفاده از روش کنترل مد لغزشی و کنترل تطبیقی، کنترل کننده ترکیبی مد لغزشی تطبیقی بر مبنای روش کنترلی تک‌پره مورد بررسی و طراحی قرار می‌گیرد. در راستای مدل‌سازی، از یک توربین بادی ویندیکت ۵ مگاوات براساس یک مدل دوجرمی ساده‌شده، استفاده و معاللات حاکم بر آن استخراج می‌شود. عملکرد این کنترل کننده در ردیابی توان خروجی و سرعت روتور به‌ازای دو ورودی پله و توربولانسی، در دو حالت حضور و عدم حضور نایقینی در مدل، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به منظور اعتبارسنجی کنترل کننده پیشنهادی، این کنترل کننده در محیط شبیه‌ساز فست روی مدل کامل توربین باد پیاده‌سازی شده است. در هر یک از شبیه‌سازی‌های ذکرشده، خطای ردیابی سرعت روتور به‌ازای معیارهای مختلف بررسی می‌شود.

ساختار این مقاله بدین ترتیب بوده که در قسمت ۲ به مدل‌سازی دینامیکی توربین باد پرداخته شده، در قسمت ۳ روش کنترلی، ارایه و در قسمت ۴ شبیه‌سازی مدل دینامیکی و کنترل کننده و اعتبارسنجی آورده شده است. در پایان، نتایج حاصل از مقاله در قسمت ۵ ذکر شده است.

۲- مدل‌سازی توربین باد

به منظور مدل‌سازی توربین باد از یک مدل دوجرمی مطابق با شکل ۱ استفاده شده است. یکی از روش‌های معمول، توصیف کارایی آیرودینامیک یک توربین، ضریب توان $C_p(\lambda, \beta)$ بوده که تابعی از ضریب سرعت نوک (λ) و زاویه پیچ (β) است. این ضریب حاصل تقسیم توان روتور (P_r) و توان آیرودینامیک وارده از سوی باد بر پرها (P_a) است.

$$C_p(\lambda, \beta) = \frac{P_r}{P_a} \quad (1)$$

توان موجود به صورت

$$P_a = \frac{1}{2} \rho A v_{w,i}^3 \quad (2)$$

نشان داده می‌شود. ρ نشان‌دهنده چگالی هوا، v_w سرعت باد و $A = \pi r^2$ بوده که در آن r شعاع پره است. با استفاده از روابط ۱ و ۲، توان آیرودینامیک به صورت

برای دستیابی به قانون کنترلی مد لغزشی از رابطه ۱۱ نسبت به زمان مشتق گرفته می‌شود.

$$\dot{S} = \dot{e}_\omega + \lambda e_\omega = \dot{e}_\omega + \lambda(\omega_d - \omega) \quad (12)$$

حال با جاگذاری روابط ۷ و ۱۰ در ۱۲:

$$\begin{aligned} \dot{S} = & -\frac{\Phi}{J_r} \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{n\lambda_i} (\alpha_0(t) + \alpha_1(t)\lambda_i \right. \\ & \left. + \alpha_2(t)\beta_i)v_{w,i}^2 - \frac{N_g}{\Phi} T_g^* \right) \\ & + \gamma(\omega_d - \omega) = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

قانون کنترلی را از طریق رابطه ۱۳ می‌توان محاسبه کرد. به این ترتیب قانون کنترلی، تمامی مسیرهای حرکت را به سمت سطح لغزش S سوق می‌دهد و آنها را روی سطح نگه می‌دارد. از آنجایی که قانون کنترلی، رفتار چترینگ از خود نشان می‌دهد و همچنین برای دستیابی به دقت مطلوب در کنترل، از تابع اشباع استفاده می‌شود. قانون کنترلی در رابطه ۱۳ نشان داده شده است:

$$\begin{aligned} \beta_i = & \frac{n\lambda_i J_r}{\hat{\alpha}_{2,i} v_{w,i}^2 \Phi} \left[-\frac{\Phi}{J_r} \sum_{i=1}^n \frac{1}{n\lambda_i} (\hat{\alpha}_{0,i}(t) \right. \\ & \left. + \hat{\alpha}_{1,i}(t)\lambda_i)v_{w,i}^2 \right. \\ & \left. + \left(\frac{N_g}{J_r} T_g^* - u_{c,i} \right) \right. \\ & \left. + \gamma(\omega_d - \omega) \right] \end{aligned} \quad (14)$$

$$\beta_i = \hat{\beta}_i - \xi \text{sat}(S) \quad (15)$$

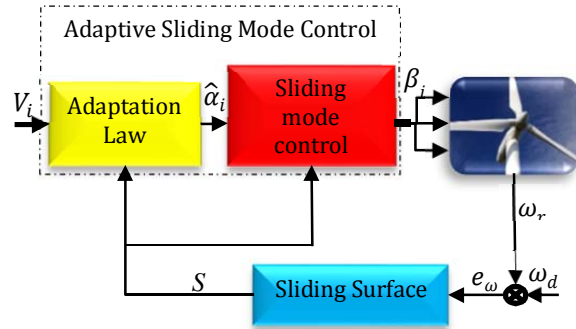
در رابطه ۱۵، ورودی کنترلی مربوط به بخش کنترل مد لغزشی است. حال برای اثبات پایداری و محاسبه قوانین تطبیق، تابع لیاپانوف مثبت معین در نظر گرفته می‌شود:

$$V(e_\omega, \tilde{\alpha}_{p,i}) = \frac{1}{2} \left(J_r S^2 + \sum_{i=1}^n \frac{1}{n\Gamma_i} \tilde{\alpha}_{p,i}^2 \right) \quad (16)$$

لازم به ذکر بوده که در روابط بالا، خطاهای تخمین به صورت $\tilde{\alpha}_{p,i} = \alpha_{p,i} - \hat{\alpha}_{p,i}$ در اینجا $p = 0, 1, 2$ و پارامتر مثبت $\Gamma_i \in R_+$ نرخ تطبیق در کنترل‌کننده مستقل زاویه پیچ است. با مشتق‌گیری از تابع لیاپانوف نسبت به زمان:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -S \left\{ \left[\sum_{i=1}^n \frac{v_{w,i}^2}{n\lambda_i} (\alpha_{0,i} + \alpha_{1,i}\lambda_i + \tilde{\alpha}_{2,i}\beta_i \right. \right. \\ & \left. \left. + \hat{\alpha}_{2,i}\beta_i) - \frac{N_g}{\Phi} T_g^* \right] \right. \\ & \left. + \gamma(\omega_d - \omega) \right\} \\ & - \sum_{i=1}^n \frac{1}{n\Gamma_i} (\tilde{\alpha}_{0,i}\dot{\hat{\alpha}}_{0,i} \\ & + \tilde{\alpha}_{1,i}\dot{\hat{\alpha}}_{1,i} + \tilde{\alpha}_{2,i}\dot{\hat{\alpha}}_{2,i}) \end{aligned} \quad (17)$$

که در رابطه ۱۷، خطای تخمین به صورت $\dot{\hat{\alpha}}_{p,i} = -\dot{\tilde{\alpha}}_{p,i}$ است (با $\dot{\tilde{\alpha}}_{p,i} \approx 0$) با قراردادن قانون کنترلی ۱۴ در رابطه ۱۷، رابطه ۱۸ محاسبه می‌شود.



شکل ۲) بلوک دیاگرام سیستم حلقه بسته

قانون کنترلی بر مبنای فرضیات زیر محاسبه می‌شود:

- ۱- سرعت دورانی روتور ω موجود است.
 - ۲- سه سرعت باد مستقل $v_{w,i}$ به‌ازای هر پره محاسبه شده‌اند.
 - ۳- سرعت باد یک انرژی و سیگنال محدود است، یعنی $v_w(t) > 0 \forall t \geq 0$ و $v_w(t) \in L_2 \cap L_\infty$.
 - ۴- گشتاور ژنراتور در مقدار نامی خود ثابت نگه داشته شده است، $T_g = T_g^*$.
- شرط چهارم هدف کنترل یعنی ثابت‌بودن نامی خروجی را دنبال می‌کند که از طریق سرعت روتور به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P = \omega N_g T_g \quad (6)$$

طراحی کنترل‌کننده مستقل زاویه پیچ براساس تخمین خطی متغیر با زمان ضریب توان است.

$$\begin{aligned} C_p(\lambda, \beta) = & \check{C}_p(\lambda, \beta) \\ = & \alpha_0(t) + \alpha_1(t)\lambda + \alpha_2(t)\beta \end{aligned} \quad (7)$$

که در اینجا $j = 0, 1, 2$ و پارامتر متغیر با زمانی بوده که مقدار تغییرات آن کوچک است، $\dot{\alpha}_j \approx 0$. با استفاده از روابط ۶ و ۷، توان آیرودینامیک با استفاده از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$T_a = \frac{1}{2} \rho A r \sum_{i=1}^n \frac{1}{n\lambda_i} \check{C}_{p,i}(\lambda_i, \beta_i) v_{w,i}^2 \quad (8)$$

متابقی رابطه ۴ و رابطه ۸، رابطه ۹ نتیجه می‌شود:

$$\dot{\omega} = \frac{\Phi}{J_r} \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{n\lambda_i} \check{C}_{p,i}(\lambda_i, \beta_i) v_{w,i}^2 - \frac{N_g}{\Phi} T_g^* \right) \quad (9)$$

در رابطه بالا، $\Phi = \frac{1}{2} \rho A r$ و بردار خروجی سیستم به‌صورت $y = [\omega, v_{\omega,1}, v_{\omega,2}, v_{\omega,3}]^T$ در صورتی که رابطه خطا به‌صورت $e_\omega = \omega_d - \omega(t)$ تعریف شود و مقدار مرجع ثابت سرعت دورانی روتور باشد، رابطه مشتق خطا به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{e}_\omega = -\frac{\Phi}{J_r} \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{n\lambda_i} \check{C}_{p,i}(\lambda_i, \beta_i) v_{w,i}^2 - \frac{N_g}{\Phi} T_g^* \right) \quad (10)$$

سطح لغزش متغیر با زمان $S(X, t)$ در فضای R^n با رابطه $S(X, t) = 0$ به‌صورت رابطه ۱۱ بیان می‌شود:

$$S(X, t) = e_\omega + \gamma \int e_\omega \quad (11)$$

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^n Su - S\gamma \left(1 + \frac{J_r}{\Phi}\right) (\omega_d - \omega) \quad (24)$$

با تعریف $u_{c,i} = -k_{d,i}S$ به ازای $k_{d,i} > 0$ و همچنین سایر پارامترها، مشتق تابع لیاپانوف منفی معین شده و سیستم پایدار مجانبی است.

۴- شبیه‌سازی

در این قسمت به شبیه‌سازی قانون کنترل استخراجی پرداخته شده است و این کنترل‌کننده در محیط نرم‌افزار فست پیاده‌سازی می‌شود.

۴-۱- تست در حالت سرعت باد پله و توربولانسی

نتایج حاصل از شبیه‌سازی کنترل‌کننده مد لغزشی تطبیقی تحت باد پله در نمودارهای ۴-۱ نشان داده شده و مورد بررسی قرار گرفته است. همان طور که مشاهده می‌شود، با افزایش باد، توان آیرودینامیک وارد بر توربین باد افزایش پیدا می‌کند و متناسب با آن سرعت و توان روتور افزایش می‌یابد که موجب بالارفتن سرعت ژنراتور و در نتیجه افزایش توان ژنراتور به مقدار بیشتر از ۵ مگاوات می‌شود. عبور توان خروجی از مقدار نامی، اثرات مخربی بر ژنراتور و توربین باد می‌گذارد که کنترل‌کننده مستقل زاویه پیچ موظف به مقابله با این اتفاق است. بنابراین با افزایش مقدار سرعت باد که در نمودار ۱ نشان داده شده است، زاویه پیچ توربین باد مطابق با نمودار ۴، توسط فرمانی که از کنترل‌کننده مد لغزشی تطبیقی صادر می‌شود، تغییر می‌کند. این تغییر در اندازه زاویه پیچ، در نهایت منجر به تنظیم سرعت دورانی روتور و همچنین توان خروجی توربین بادی می‌شود. همان طور که در نتایج شبیه‌سازی دیده می‌شود، کنترل‌کننده مد لغزشی تطبیقی توانسته تا تاثیر تغییر نقاط کاری توربین که ناشی از تغییر سرعت باد است را حذف نماید. نتایج شبیه‌سازی تحت باد توربولانسی نشان داده شده در نمودار ۵ با میانگین ۱۵m/s در ادامه آورده شده است. در نمودارهای ۸-۶، نتایج کنترل‌کننده مد لغزشی تطبیقی نشان داده شده است. نمودارهای ۸-۶، عملکرد مناسب کنترل‌کننده مد لغزشی تطبیقی در برابر باد توربولانسی را نشان می‌دهند. مطابق با نمودار ۷، توان خروجی به خوبی در محدوده توان نامی قرار گرفته است.

به منظور ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده طراحی شده، معیارهای خطای مربوط به خطای سرعت روتور برای بادهای پله و توربولانسی در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲) معیارهای خطا برای مدل دوجرمی

| پارامتر | معیار خطا | | |
|------------|-----------|------------------------|-------------------------|
| | ITAE | ITASE | IASE |
| پله | ۰/۰۰۱۱۴۸ | -۲/۵۲×۱۰ ^{-۹} | -۴/۶۱×۱۰ ^{-۱۱} |
| توربولانسی | ۰/۰۰۱۲۷۵ | -۲/۹۸×۱۰ ^{-۹} | -۳/۴۹×۱۰ ^{-۱۱} |

۴-۲- تست در حالت وجود عدم قطعیت در مدل

عدم قطعیت‌های زیادی در کاربردهای عملی توربین‌های بادی مانند اثرات گرد و غبار و تغییرات چگالی هوا ناشی از شرایط محیطی مختلف وجود دارند که این عوامل باعث اثرگذاری روی ضریب توان آیرودینامیک توربین بادی می‌شوند. در این پژوهش، برای مطالعه اثرات این تغییرات روی رفتار دینامیکی سیستم در حضور کنترل‌کننده طراحی شده، شبیه‌سازی‌هایی انجام شده است. معیارهای خطا در جدول ۳ در حضور عدم قطعیت پارامتری ۲۰٪ آورده شده است.

$$\dot{V} = -S \left\{ \left[\sum_{i=1}^n \frac{v_{w,i}^2}{n\lambda_i} \left(\alpha_{0,i} + \alpha_{1,i}\lambda_i + \tilde{\alpha}_{2,i}\beta_i + \left(-\hat{\alpha}_{0,i} - \hat{\alpha}_{1,i}\lambda_i + \frac{n\lambda_i}{v_{w,i}^2} \left(\frac{N_g}{\Phi} T_{g,rated} - u_{c,i} \right) + \frac{n\lambda_i J_r}{v_{w,i}^2 \Phi} \gamma (\omega_d - \omega) \right) \right) \right] + \gamma (\omega_d - \omega) \right\} - \frac{N_g}{\Phi} T_g^* - \sum_{i=1}^n \frac{1}{n\Gamma_i} (\tilde{\alpha}_{0,i} \hat{\alpha}_{0,i} + \tilde{\alpha}_{1,i} \hat{\alpha}_{1,i} + \tilde{\alpha}_{2,i} \hat{\alpha}_{2,i}) \quad (18)$$

$$\dot{V} = -S \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{v_{w,i}^2}{n\lambda_i} (\tilde{\alpha}_{0,i} + \tilde{\alpha}_{1,i}\lambda_i + \tilde{\alpha}_{2,i}\beta_i) - \sum_{i=1}^n u + \gamma \left(1 + \frac{J_r}{\Phi}\right) (\omega_d - \omega) \right\} - \sum_{i=1}^n \frac{1}{n\Gamma_i} (\tilde{\alpha}_{0,i} \hat{\alpha}_{0,i} + \tilde{\alpha}_{1,i} \hat{\alpha}_{1,i} + \tilde{\alpha}_{2,i} \hat{\alpha}_{2,i}) \quad (19)$$

با فاکتورگیری از خطاهای تخمین، قوانین تطبیق به صورت زیر به دست می‌آیند:

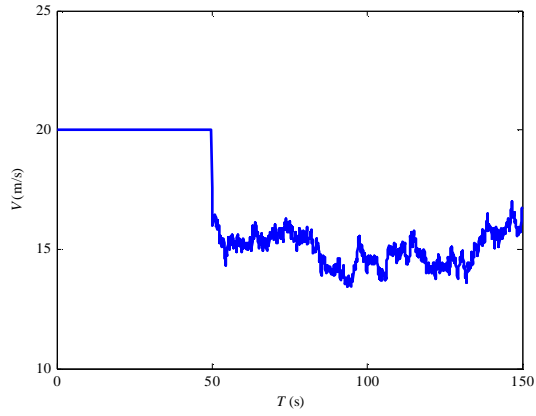
$$\dot{V} = -\frac{1}{n} \left\{ \sum_{i=1}^n \tilde{\alpha}_{0,i} \left(\frac{v_{w,i}^2}{\lambda_i} S + \frac{\hat{\alpha}_{0,i}}{\Gamma_i} \right) + \tilde{\alpha}_{1,i} \left(v_{w,i}^2 S + \frac{\hat{\alpha}_{1,i}}{\Gamma_i} \right) + \tilde{\alpha}_{2,i} \left(\frac{v_{w,i}^2 \beta_i}{\lambda_i} S + \frac{\hat{\alpha}_{2,i}}{\Gamma_i} \right) - nSu \right\} - S\gamma \left(1 + \frac{J_r}{\Phi}\right) (\omega_d - \omega) \quad (20)$$

$$\hat{\alpha}_{0,i} = -\frac{\Gamma_i v_{w,i}^2}{\lambda_i} S \quad (21)$$

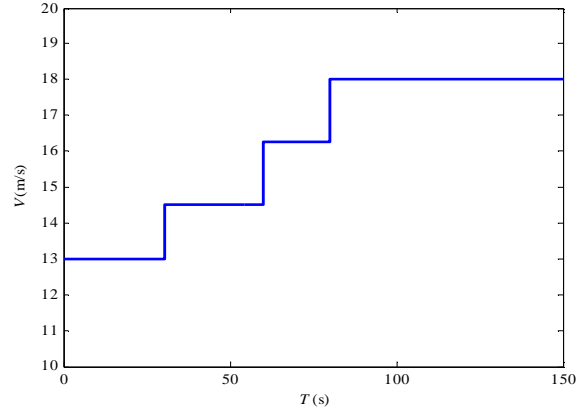
$$\hat{\alpha}_{1,i} = -\Gamma_i v_{w,i}^2 S \quad (22)$$

$$\hat{\alpha}_{2,i} = -\frac{\Gamma_i v_{w,i}^2 \beta_i}{\lambda_i} S \quad (23)$$

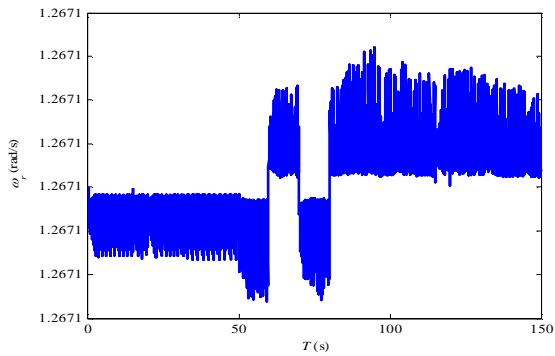
حال رابطه مشتق لیاپانوف به صورت رابطه ۲۴ خواهد بود:



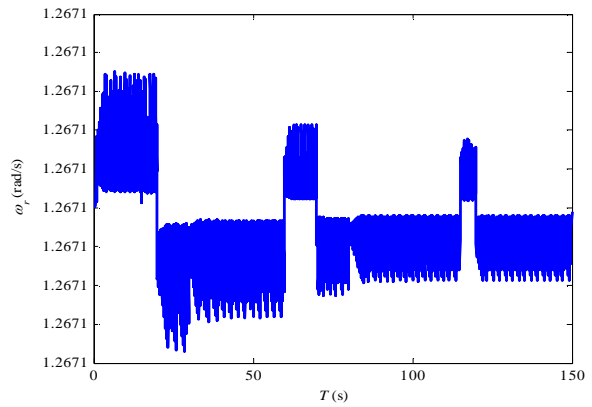
نمودار (۵) سرعت باد تصادفی



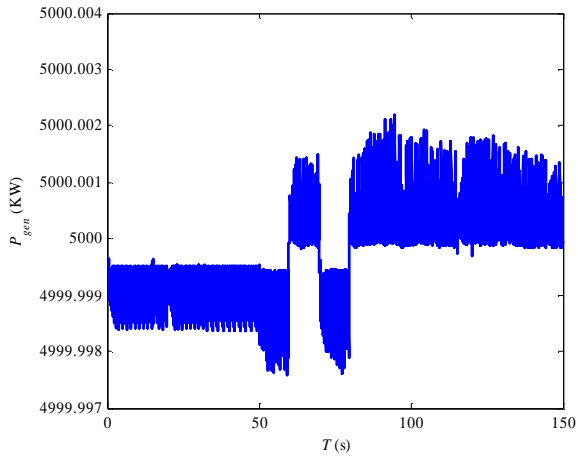
نمودار (۱) سرعت باد پله



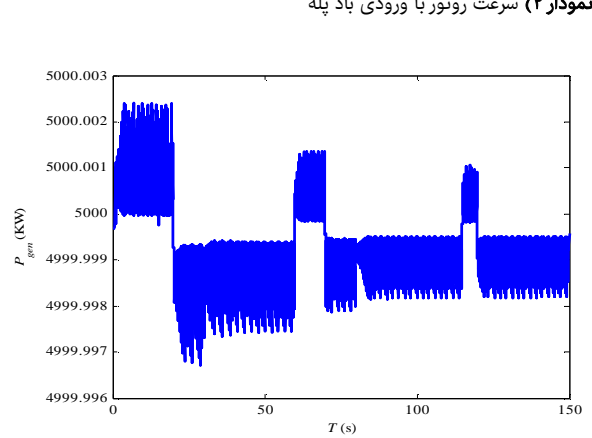
نمودار (۶) سرعت روتور با ورودی باد توربولانسی



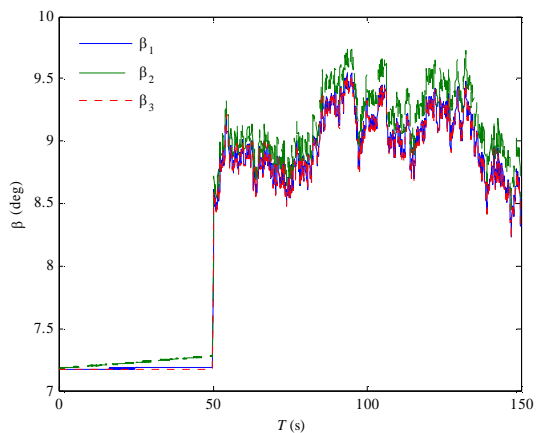
نمودار (۲) سرعت روتور با ورودی باد پله



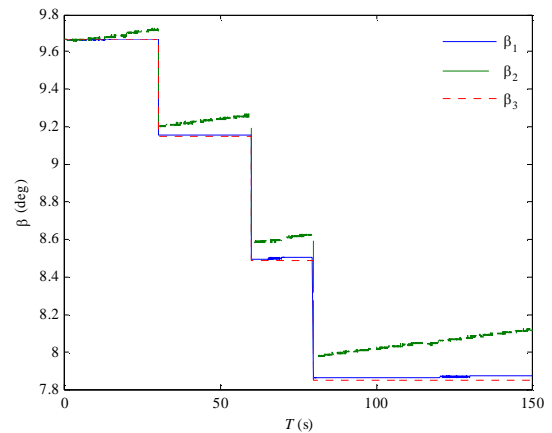
نمودار (۷) توان ژنراتور با ورودی باد توربولانسی



نمودار (۳) توان ژنراتور با ورودی باد پله

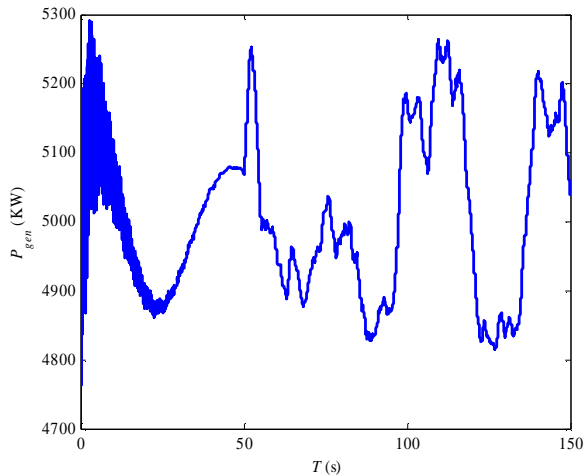


نمودار (۸) زاویه پیچ با ورودی باد توربولانسی

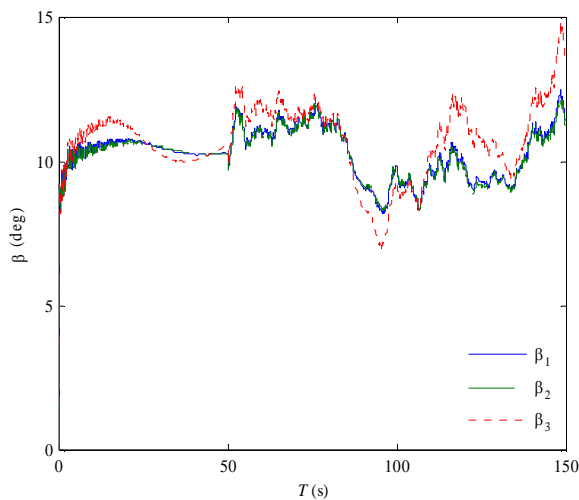


نمودار (۴) زاویه پیچ با ورودی باد پله

| باد | معیار خطا | | |
|------------|-----------|------------------------|-------------------------|
| | ITAE | ITASE | IASE |
| پله | ۰/۰۰۱۱۹۸ | $-۲/۶۹ \times 10^{-1}$ | $-۴/۱۱ \times 10^{-11}$ |
| توربولانسی | ۰/۰۰۱۲۹۵ | $-۳/۰۷ \times 10^{-1}$ | $-۳/۶۳ \times 10^{-11}$ |



نمودار ۱۰) توان ژنراتور تحت تست باد توربولانسی در فست



نمودار ۱۱) زاویه پیچ تحت تست باد توربولانسی در فست

طبق انتظار، در نمودارهای ۹ و ۱۰، با توجه به با توجه به تطابق زیاد مدل شبیه‌ساز فست به توربین باد واقعی، سرعت روتور و توان ژنراتور با خطای بیشتری به سمت مقادیر نامی حرکت می‌کنند. همان طور که در جدول ۴ نیز کاملاً قابل مشاهده بوده، خطای سیستم نسبت به شبیه‌سازی مدل دو جرمی افزایش یافته است. با این حال، با توجه به بررسی‌های انجام‌شده در مطالعات گذشته، این پاسخ، پاسخ مناسبی بوده و کنترل‌کننده به خوبی توانسته نقش خود را ایفا نماید.

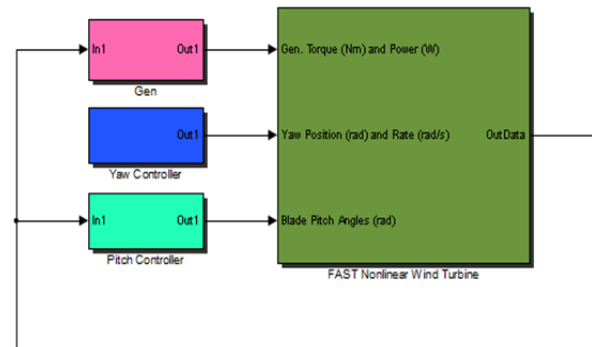
در ادامه به منظور بررسی دقیق‌تر عملکرد کنترل‌کننده طراحی‌شده مد لغزشی تطبیقی، میزان خطای کنترل‌کننده تطبیقی به‌ازای دو ورودی باد پله و توربولانسی و همچنین شبیه‌سازی در شبیه‌ساز فست در جدول ۵ آورده شده است. همچنین مقایسه عملکرد دو کنترل‌کننده تطبیقی و مد لغزشی تطبیقی در کاهش بارهای مکانیکی به‌ازای هر کدام از پرها در نمودار ۱۲ ب نشان داده شده است.

با توجه به جدول ۵ و مقایسه آن با جدول‌های ۲ و ۴، کنترل‌کننده مد لغزشی تطبیقی در قیاس با کنترل‌کننده تطبیقی با دقت بیشتری سرعت نامی روتور را دنبال می‌کند. علاوه بر آن، همان طور که در نمودار ۱۲ مشاهده می‌شود، اگر چه هر دو کنترل‌کننده

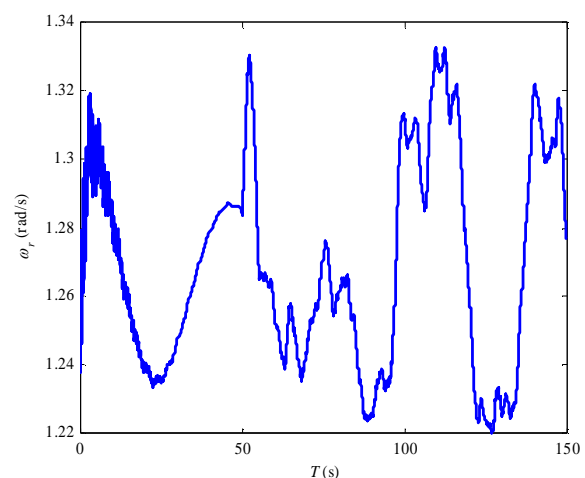
۴-۳- اعتبارسنجی در شبیه‌ساز فست

مدل‌های دینامیکی مورد استفاده در شبیه‌سازی توربین باد، مدل ساده‌شده توربین باد هستند که در مدل‌سازی آنها از رفتارهای دینامیکی بسیاری صرف نظر شده است و این رفتارهای دینامیکی از دسترس خارج می‌شوند. بنابراین در اکثر موارد برای اعتبارسنجی کنترل‌کننده طراحی‌شده، از یک مدل دینامیکی واقعی و بسیار نزدیک به توربین باد استفاده می‌شود. شبیه‌ساز فست، یک نمونه از مدل دینامیکی بسیار نزدیک به توربین باد است. این نرم‌افزار علاوه بر نمایش وضعیت سرعت‌ها و توان‌های توربین باد، محور افقی بارهای وارد بر اجزای مختلف توربین باد را نیز نشان می‌دهد. شکل ۳، شمای فست در محیط سیمولینک را به نمایش می‌گذارد.

مطابق راهنمای فست، مدل فست فاقد دینامیک عملگر زاویه پیچ است و پره بدون هیچ تاخیری می‌تواند دوران نماید. به همین دلیل، برای قسمت عملگر در این شبیه‌ساز از یک بلوک دینامیک عملگر با ثابت زمانی یک‌ثانیه استفاده شده است. سرعت‌های باد توربولانسی در شبیه‌ساز فست با استفاده از نرم‌افزار توربسیم تولید شده‌اند. پاسخ دینامیکی کنترل‌کننده تحت باد با میانگین ۱۵m/s در نمودارهای ۹-۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۳) بلوک شبیه‌ساز فست در محیط سیمولینک



نمودار ۹) سرعت روتور تحت تست باد توربولانسی در فست

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، کنترل کننده غیرخطی مد لغزشی تطبیقی برای کنترل مستقل زاویه پیچ توربین بادی سرعت متغیر بر مبنای استراتژی تک پره طراحی شد. توربین بادی براساس یک مدل دوجرمی ساده شده مدل سازی و معادلات حاکم بر آن استخراج شد. به منظور حذف غیرخطی های شدید و کنترل زاویه پیچ، استراتژی تک پره برای طراحی کنترل کننده مد لغزشی تطبیقی به کار گرفته شد. این کنترل کننده عملکرد مناسبی را در ردیابی توان و سرعت روتور نشان داد. همچنین در این مقاله به منظور مطالعه اثرات تغییرات محیطی روی رفتار دینامیکی سیستم، پاسخ کنترل کننده در حضور عدم قطعیت در پارامترهای سیستم، مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که کنترل کننده مد لغزشی تطبیقی، سرعت روتور و توان خروجی ژنراتور را به مقادیر نامی مربوطه با میزان خطای کم رساند.

به منظور اعتبارسنجی کنترل کننده طراحی شده از شبیه ساز فست استفاده و همچنین پروفیل باد مورد استفاده در این شبیه ساز با استفاده از نرم افزار توربسیم و با توربولانس و میانگین مشخص تولید شد. کنترل کننده مد لغزشی تطبیقی به کاررفته در این شبیه سازی مانند بخش قبل، عملکرد مناسبی داشت. علاوه بر این، پاسخ کنترل کننده پیشنهادی با پاسخ کنترل کننده تطبیقی مقایسه شدند و معیارهای خطا نشان دادند که در حالت های مختلف، کنترل کننده مد لغزشی تطبیقی توانایی بیشتری در کاهش بارهای مکانیکی وارده به توربین داشته است. به ازای هر یک از این شبیه سازی ها برای ورودی های مختلف، خطاهای ردیابی سرعت روتور در جدول های مشخصی گزارش شد که در حالت کلی، کنترل کننده طراحی شده، عملکرد قابل قبولی در ردیابی سرعت روتور و توان ژنراتور و محدودسازی بارهای مکانیکی نشان داده است.

تشکر و قدردانی: مودی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

تاییدیه اخلاقی: این مقاله تا کنون در نشریه دیگری (به طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. ضمناً محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده نویسندگان است.

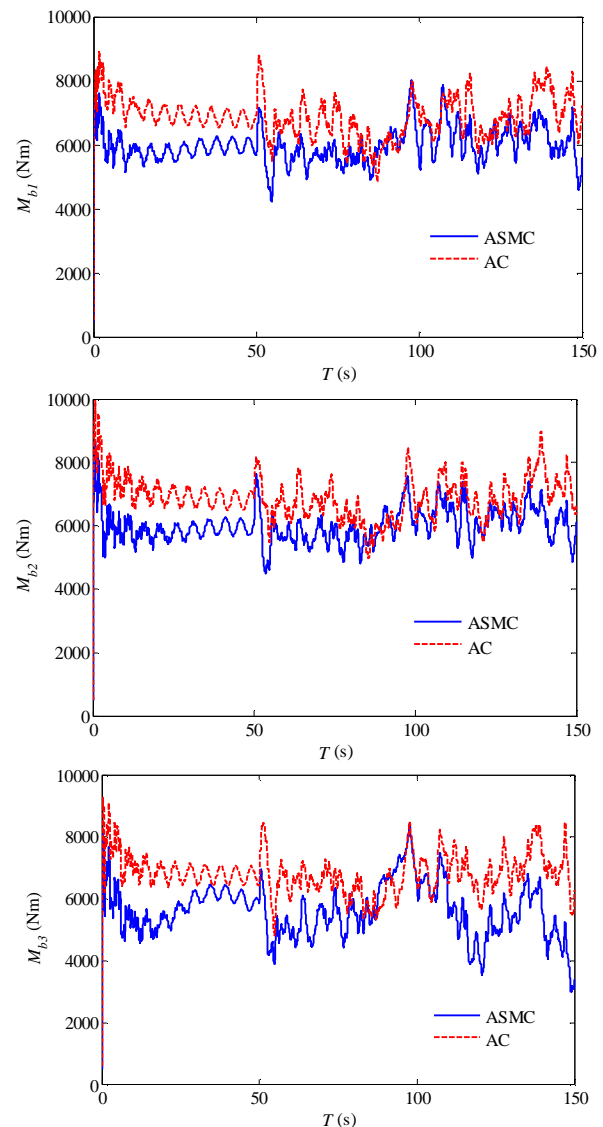
تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ گونه تعارض منافعی با سازمان ها و اشخاص دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: محمود مزارع (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)، مصطفی تقی زاده (نویسنده دوم)، روش شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۳۰٪)، سید مرتضی آقایی نژاد (نویسنده سوم)، روش شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۲۰٪)
منابع مالی: مودی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

منابع

1- The World Wind Energy Association. WWEA half-year report: Worldwind wind capacity reached 456 GW [Internet]. Bonn: The World Wind Energy Association; 2016. [cited 2018 Aug 01]. Available from: <https://wwindea.org/blog/2016/10/10/wwea-half-year-report-worldwind-wind-capacity-reached-456-gw/>
2- Carlin PW, Laxson AS, Muljadi EB. The history and state of the art of variable-speed wind turbine technology. Wind Energy. 2003;6(2):129-159.

تطبیقی و مد لغزشی تطبیقی توانسته اند گشتاورهای آیرودینامیک وارد بر پره های توربین باد را به ازای هر کدام از پره ها در محدوده مشخصی کنترل کنند، ولی کنترل کننده مد لغزشی تطبیقی توانسته از میزان شدت اثر این گشتاورها بکاهد و عملکرد بهتری نشان دهد. این کاهش بارهای مکانیکی به معنی کاهش بارهای خستگی واردشونده بر سایر قطعات اصلی توربین باد نیز بوده است که منجر به کاهش تنش های وارده، افزایش عمر و بهبود عملکرد توربین باد می شود.



نمودار ۱۲) گشتاورهای وارد بر پره ها تحت تست باد توربولانسی در فست

جدول ۴) معیارهای خطا برای باد توربولانسی در فست

| کنترل کننده | معیار خطا | | |
|-------------|-----------|-------|--------|
| | ITAE | ITASE | IASE |
| ASMC | ۳۳۶/۷ | ۱۳/۰۸ | ۰/۱۳۸۷ |

جدول ۵) معیارهای خطا برای کنترل کننده تطبیقی

| باد | معیار خطا | | |
|------------|-----------|------------------------|-------------------------|
| | ITAE | ITASE | IASE |
| پله | ۰/۰۰۱۱۹۸ | -۲/۶۹×۱۰ ^{-۶} | -۱/۱۹۲×۱۰ ^{-۶} |
| توربولانسی | ۰/۰۰۱۲۹۵ | -۳/۰۷×۱۰ ^{-۶} | -۳/۴۷×۱۰ ^{-۶} |
| فست | ۵۶۹/۳ | ۴۱/۵ | ۰/۴۸۷۴ |

- 11- Leithead WE, Neilson V, Dominguez S, Dutka A. A novel approach to structural load control using intelligent actuators. 17th Mediterranean Conference on Control and Automation, 24-26 June, 2009, Thessaloniki, Greece. Glasgow: University of Strathclyde Glasgow; 2011.
- 12- Leithead WE, Neilson V, Dominguez S. Alleviation of unbalanced rotor loads by single blade controllers. The European Wind Energy Conference & Exhibition, 16-19 March, 2009, Marseille, France. Brussels: WindEurope; 2009.
- 13- Han Y, Leithead WE. Combined wind turbine fatigue and ultimate load reduction by individual blade control. *Journal of Physics: Conference series*. 2014;524:012062.
- 14- Han Y, Leithead WE. Alleviation of extreme blade loads by individual blade control during normal wind turbine operation. *Proceedings of EWEA (European Wind Energy Conference & Exhibition)*, 16-19 April, 2012, Copenhagen, Denmark.; 2012.
- 15- Sorensen KL, Galeazzi R, Odgaard PF, Niemann H, Poulsen NK. Adaptive passivity based individual pitch control for wind turbines in the full load region. *American Control Conference*, 4-6 June, 2014, Portland, Oregon, USA. Piscataway: IEEE; 2014.
- 16- Jonkman J, Butterfield S, Musial W, Scott G. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development [Internet]. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory; 2009 [cited 2018 Aug 01]. Available from: <https://www.osti.gov/biblio/947422-definition-mw-reference-wind-turbine-offshore-system-development>
- 3- Fazlollahi V, Taghizadeh M. Modeling and design of dynamic state feedback controller with wind speed estimator, in variable speed wind turbines. *Modares Mechanical Engineering*. 2016;16(4):361-371. [Persian]
- 4- Gang X. Research on application of fuzzy PID in collective pitch control system. 2011 International Conference on Control, Automation and Systems Engineering (CASE), 30-31 July, 2011, Singapore, Singapore. Piscataway: IEEE; 2011.
- 5- Bossanyi EA. Individual blade pitch control for load reduction. *Wind Energy*. 2003;6(2):119-128.
- 6- Zhang Y, Chen Z, Cheng M, Zhang J. Mitigation of fatigue loads using individual pitch control of wind turbines based on FAST. 2011 46th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC), 5-8 September, 2011, Soest, Germany. Frankfurt: VDE; 2011.
- 7- Yang Z, Li Y, Seem JE. Individual pitch control for wind turbine load reduction including wake modeling. *Wind Engineering*. 2011;35(6):715-738.
- 8- Larsen AJ, Mogensen TS. Individuel pitchregulering af vindmølle [Dissertation]. Lyngby: Technical University of Denmark (DTU); 2006. [Danish]
- 9- Friis J, Nielsen E, Bonding J, Adegas FD, Stoustrup J, Odgaard PF. Repetitive model predictive approach to individual pitch control of wind turbines. 2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, 12-15 December, 2011, Orlando, Florida, USA. Piscataway: IEEE; 2011.
- 10- Jespersen S, Oldenbürger R. Individual pitch control for load mitigation [Dissertation]. Esbjerg: Aalborg University; 2017.