



## Active Fault Tolerant Control of Wind Turbine Systems using Disturbance Observer-based Sliding Mode and Time Delay Estimation

M. Mazare, M. Taghizadeh\*

Department of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

**ABSTRACT:** In this paper, an active fault tolerant control based on time delay control, sliding mode, and nonlinear disturbance observer is proposed to control the pitch subsystem in the presence of actuator faults and uncertainties. Time delay estimation is applied as a fault estimation algorithm for detection and compensation. Then, a robust control law is synthesized to nullify uncertainty and fault effects using a combination of sliding mode, disturbance observer, and time delay with novel adaptation laws. In order to mitigate chattering which comes from the discontinuous control term, a nonlinear disturbance observer is designed. Through the proposed structure, the discontinuous gain is reduced significantly which leads to chattering reduction. Stability analysis is conducted through Lyapunov Theory. Moreover, wind speed profiles are generated using TurbSim, and simulations are performed based on a nonlinear two-mass wind turbine model and implemented in the FAST environment to verify the validity of the designed controllers. Finally, results reveal the effectiveness of the proposed controller compared to feedback linearization and gain-schedule proportional-integral controllers in the presence of uncertainty and different actuator faults such as hydraulic leakage, pump wear, and high air content in the oil.

### Review History:

Received: Jun. 01, 2020

Revised: Dec. 27, 2020

Accepted: Feb. 25, 2021

Available Online: Mar. 11, 2021

### Keywords:

Wind turbine

Pitch angle control

Fault tolerant control

Nonlinear disturbance observer

Time delay estimation

## 1. INTRODUCTION

Wind turbines, as the main wind energy conversion system, have complex and nonlinear dynamics and work in uncertain environments under large turbulent winds and centrifugal, gravitational, and gyroscopic loads [1]. To prevent unpredicted failures, maintenance schedules are planned, which not only increase cost but also reduce the power generation due to required downtime [2]. Various approaches have been proposed to solve the fault detection and fault tolerant control problem of wind turbines. In [3] an Active Fault Tolerant Control (AFTC) was designed to control rotor speed and power of a wind turbine in the presence of actuator faults and uncertainties. The control scheme was a Sliding Mode Control (SMC) with an integral surface and an adaptive gain, termed as adaptive output feedback sliding mode controller. In [4], fault detection and Fault Tolerant Control (FTC) for pitch actuator fault using a disturbance compensator and a discrete control structure was proposed. To validate the effectiveness of the proposed FTC approach, this structure was implemented in the FAST environment.

To the best of the authors' knowledge, none of the published papers in the realm of wind turbine control have studied the effects of pitch actuator fault such as hydraulic leakage, pump wear, and high air content in the oil for collective pitch angle control based on nonlinear model. Then, this paper proposes a novel AFTC based on Time Delay Estimation (TDE) and

Nonlinear Disturbance Observer (NDO) for wind turbine systems to nullify the effects of actuator and sensor faults, uncertainties, and exogenous disturbances.

## 2. PROBLEM STATEMENT

This paper uses Controls Advanced Research Turbine (CART) located at National Renewable Energy Laboratory (NREL) USA. By choosing the state and input vectors as  $x(t) = [\omega_r \ \omega_g \ \delta \ \beta]^T$ , and  $u = \beta_r$ , then the affine system can be expressed as  $\dot{x}(t) = f(x) + g u$ . For hydraulic pitch control systems, each actuator is considered as a linear second-order system with the following transfer function.

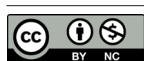
$$\frac{\beta}{\beta_r} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

where  $\beta_r$ ,  $\zeta$  and  $\omega_n$  introduce the reference pitch angle, damping ratio, and natural frequency, respectively.

### 2.1 Problem formulation

It can be proved that there exists a diffeomorphism transformation so that the wind turbine dynamics is equivalent to the system in its normal form with stable zero dynamics. Thus, the second-order derivative of rotor speed dynamics is written as,

\*Corresponding author's email: mo\_taghizadeh@sbu.ac.ir



$$\ddot{x}_1 = L_f + L_g u \tag{2}$$

Where  $L_f$  and  $L_g$  are nonlinear terms.

### 2.2 AFTC based on SMC-NDO and TDE

In this section, an AFTC is proposed using SMC-NDO and TDE. to compensate for the effects of faults, uncertainties, and exogenous disturbances. According to the SMC theory, the sliding surface is defined as:

$$S = \dot{e}(t) + k_p e(t) + k_i \int e(t) dt \tag{3}$$

Taking the time derivative of Eq. (8) and by some mathematical simplification, the SMC law can be derived. In order to estimate the external disturbance, a nonlinear disturbance observer is designed as

$$\begin{aligned} \dot{z} &= -\lambda z - \lambda [ \lambda \dot{\omega}_r + L_f + L_g u ] \\ \hat{d} &= z + \lambda \dot{\omega}_r \end{aligned} \tag{4}$$

where  $z$  and  $\kappa$  represent the internal state of the observer and the observer gain ( $\kappa > \bullet$ ). Now, the control law can be rewritten as:

$$u_{SM-NDO} = \frac{-1}{L_g} (k_p \dot{e} + k_i e + L_f + \hat{d} - K \operatorname{sgn}(S)) \tag{5}$$

**Assumption 1.** the estimation error of the exogenous disturbance is bounded.

It can be assumed that the uncertainty and actuator fault can be lumped in the following term:

$$\begin{aligned} \Delta_r(x, \dot{x}, u)_t &\cong \Delta_r(x, \dot{x}, u)_{t-\tau} \\ \Phi_r(x, \dot{x}, u)_t &\cong \Phi_r(x, \dot{x}, u)_{t-\tau} \end{aligned} \tag{6}$$

By adding these two approximate functions and replacing their equivalent values from Eq. (6), the following TDE is obtained.

$$\begin{aligned} \hat{\Delta}_r(x, \dot{x}, u)_t + \hat{\Phi}_r(x, \dot{x}, u)_t &\triangleq \\ \Delta_r(x, \dot{x}, u)_{t-\tau} + \Phi_r(x, \dot{x}, u)_{t-\tau} &= \\ \ddot{x}_{1-t-\tau} - L_{f-t-\tau} - L_{g-t-\tau} u_{t-\tau} &= \mathfrak{R}_{TDE} \end{aligned} \tag{7}$$

It is assumed that the uncertainties and faults can be expressed as  $\Delta_r(x, \dot{x}, u) + \Phi_r(x, \dot{x}, u) = \mathfrak{R}_{TDE} + v$ , where  $v$  is the TDE error. Then, the rotor speed dynamics in the presence of fault and uncertainty can be rewritten as,

$$\ddot{x}_1 = L_f + L_g u + d + \mathfrak{R}_{TDE} + v \tag{8}$$

**Assumption 2:** the TDE error has an upper bound and  $|v| \leq \bar{v}$ .

The control law for the AFTC is obtained as,

$$u_{AFTC} = \frac{-1}{L_g} \left( \begin{aligned} &(k_p \dot{e} + k_i e + L_f + \hat{d}) \\ &+ \mathfrak{R}_{TDE} + (K + \bar{v}) \operatorname{sgn}(S) \end{aligned} \right) \tag{9}$$

**Theorem 2:** Considering the sliding surface, Eq. (3), the nonlinear disturbance observer, Eq. (4), and the designed AFTC law, Eq. (9), for the wind turbine, asymptotical stability can be achieved, despite unknown external disturbances and parametric uncertainties if the discontinuous gain is chosen as  $K \geq \eta + E_d + \bar{v}$ .

**Proof:** A positive definite Lyapunov function is chosen as  $v = \frac{1}{2}(S^2 + \tilde{d}^2)$ . Taking time derivative:

$$\begin{aligned} \dot{v} &= S\dot{S} + \tilde{d}\dot{\tilde{d}} \\ &= \left[ S \left( -(K + \bar{v}) \operatorname{sgn}(S) + \tilde{d} + v \right) - \lambda \tilde{d}^2 \right] \\ &\leq \left[ |S| \left( (\bar{v} - K - \bar{v}) + \tilde{d} \right) - \lambda \tilde{d}^2 \right] \\ &\leq \left[ -K |S| - \lambda \tilde{d}^2 \right] \end{aligned} \tag{10}$$

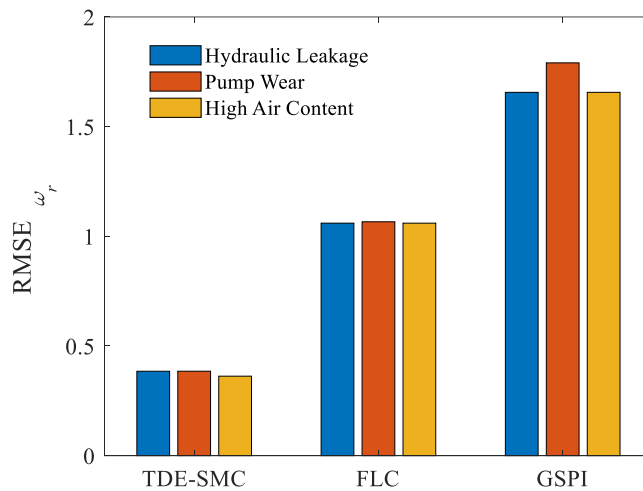
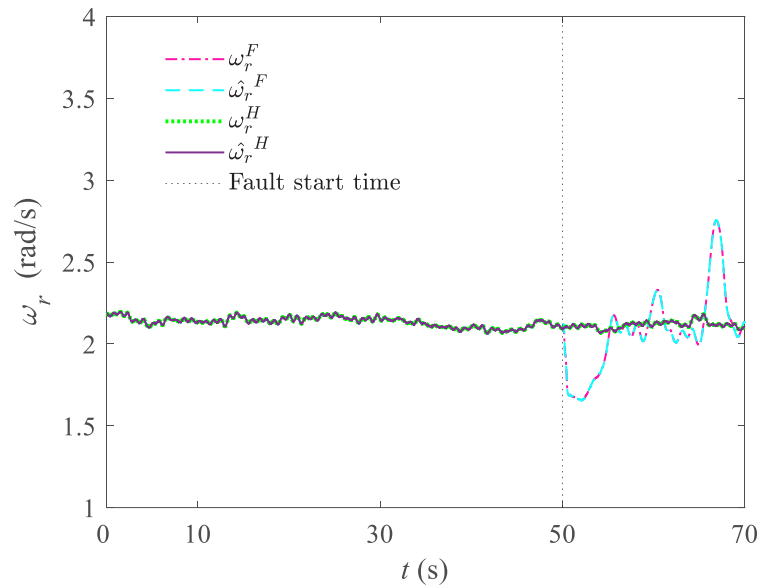


Fig. 1. RMSE of rotor speed in the presence of different faults



**Fig. 2. Rotor speed for both healthy and faulty conditions**

Then, the reachability condition is satisfied. Rotor speed is estimated using a super-twisting sliding mode observer.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

For simulation, hydraulic leakage on the pitch actuator is considered in the system. The proposed AFTC is applied on a two-mass model and to verify the validity of this control scheme, the control law is implemented in the FAST environment. To apply realistic turbulent wind fields, IEC Kaimal spectral model with different intensities is extracted from TurbSim. The Root Mean Square (RMS) Error of rotor speed for the wind turbine with the AFTC exposed to various wind profiles is shown in Fig.1. The results clearly prove the outperformance of the AFTC and this is more evident for higher wind speeds.

Fig. 2 shows the rotor speed response. It is obvious that the proposed AFTC is successfully capable of addressing the adverse effects of fault, uncertainty, and disturbance.

### 4. CONCLUSION

This paper aimed to present a novel AFTC based on TDE to control the pitch angle of a wind turbine in the presence of faults, uncertainties, and disturbances. The proposed AFTC comprises a TDE-based FD system and a combination of SMC and NDO. The stability of the closed-loop system was proved by Lyapunov theory. In order to verify the validity of the proposed controller, it was applied to the detailed

FAST simulator for two distinct cases, i.e. faulty and healthy conditions. Simulations revealed the effectiveness of the proposed AFTC. Overall, compared with the existing schemes, the proposed AFTC possesses some advantages and improvements including, easy implementation of the proposed TDE-based FD system, fast finite time convergence, and higher precision due to applying the super-twisting algorithm, compensating uncertainties and faults, and independence from the prior knowledge of the faults.

### REFERENCES

- [1] B. Boukhezzar, L. Lupu, H. Siguerdidjane, M. Hand, Multivariable control strategy for variable speed, variable pitch wind turbines, *Renewable Energy*, 32(8) (2007) 1273-1287.
- [2] A. Azizi, H. Nourisola, S. Shoja-Majidabad, Fault tolerant control of wind turbines with an adaptive output feedback sliding mode controller, *Renewable Energy* 135 (2019) 55-65.
- [3] H. Habibi, I. Howard, S. Simani, Reliability improvement of wind turbine power generation using model-based fault detection and fault tolerant control: A review, *Renewable Energy* 135 (2019) 877-896.
- [4] Y. Vidal, C. Tutivén, J. Rodellar, L. Acho, "Fault diagnosis and fault-tolerant control of wind turbines via a discrete time controller with a disturbance compensator", *Energies*, 8(5) (2015) 4300-4316.

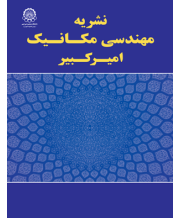
#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Mazare, M. Taghizadeh, *Active Fault Tolerant Control of Wind Turbine Systems using Disturbance Observer-based Sliding Mode and Time Delay Estimation*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(8) (2021) 1069-1070.

DOI: [10.22060/mej.2021.18529.6834](https://doi.org/10.22060/mej.2021.18529.6834)







## کنترل تحمل پذیر عیب فعال برای سیستم‌های توربین بادی با استفاده از مد لغزشی مبتنی بر رؤیتگر اغتشاش و تخمین تأخیر زمانی

محمود مزارع، مصطفی تقی‌زاده\*

دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۱۲  
بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۰۷  
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۷  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۲/۲۱

### کلمات کلیدی:

توربین باد  
کنترل زاویه پیچ  
کنترل تحمل پذیر عیب  
رؤیتگر اغتشاش غیرخطی  
تخمین تأخیر زمانی

**خلاصه:** در این مقاله، کنترل تحمل پذیر عیب فعال بر مبنای تخمین تأخیر زمانی، مد لغزشی و رؤیتگر اغتشاش غیرخطی برای کنترل زیرسیستم زاویه پیچ در حضور عیب عملگر و عدم قطعیت ارائه شده است. تخمین تأخیر زمانی به عنوان الگوریتم تخمین عیب برای تشخیص و جبران اثرات عیب عملگر به کار گرفته شده است. در ادامه، با ترکیب روش مد لغزشی، کنترل تأخیر زمانی و رؤیتگر غیرخطی اغتشاش یک قانون کنترل مقاوم برای خنثی کردن اثرات عیب و عدم قطعیت طراحی شده است. به منظور کاهش چترینگ در کنترل مد لغزشی معمولی که به علت جمله کنترلی ناپیوسته به وجود می‌آید، یک رؤیتگر اغتشاش غیرخطی طراحی و با قانون کنترل مد لغزشی و کنترل تأخیر زمانی ترکیب شده است. در ساختار پیشنهادی، بهره کنترلی جمله ناپیوسته به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته در نتیجه پدیده چترینگ به طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد. تحلیل پایداری بر مبنای تئوری لیاپانوف انجام شده است. پروفیل سرعت باد با استفاده از نرم‌افزار توربوسیم تولید شده، و قانون کنترل پیشنهادی بر مبنای مدل دوجرمی طراحی و به منظور اعتبارسنجی در محیط نرم‌افزار فست پیاده‌سازی شده است. نتایج، برتری کنترل کننده پیشنهادی در مقایسه با کنترل کننده‌های خطی‌سازی فیدبک و جدول بندی بهره در حضور عدم قطعیت و عیب‌های مختلف عملگر از قبیل نشتی هیدرولیکی، خرابی پمپ و محتوی هوا در روغن هیدرولیک را نشان می‌دهد.

### ۱- مقدمه

توربین بادی در محدوده نامی خود، از مزیت کنترل زاویه پیچ بهره برده می‌شود. کنترل زاویه پیچ به توربین بادی این اجازه را می‌دهد تا به گونه‌ای کار کند که انرژی استخراجی آن در حداکثر مقدار ممکن باشد و در عین حال بارهای وارد بر توربین کمترین مقدار را داشته باشند [۲].

نیازهای تحقیقاتی همسو با گسترش و توسعه سیستم‌های توربین بادی به سرعت در حال رشد هستند. در طول سال‌های گذشته روش‌های کنترلی مختلفی برای کنترل زاویه پیچ توربین‌های بادی پیشنهاد شده است. کنترل ال.کیو.آر [۳-۴] و کنترل تناسبی - انتگرالی یا تناسبی - انتگرالی-مشتقی [۵-۷] نمونه‌هایی از این

در سال‌های اخیر، انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان یکی از منابع اصلی انرژی شناخته شده است. توربین باد یکی از سیستم‌های معروف و متداول با انرژی‌های تجدیدپذیر بوده که دارای ناحیه‌های کاری مختلفی می‌باشد. توربین‌های بادی به دو دسته کلی سرعت ثابت و سرعت متغیر تقسیم بندی می‌شوند که در نوع سرعت متغیر، زاویه پیچ یکی از مهمترین پارامترهای توربین برای افزایش استخراج انرژی و کاهش بارهای خستگی است [۱]. در سرعت‌های باد کم تا متوسط، زاویه پیچ برای استخراج حداکثر انرژی از باد مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سرعت‌های باد زیاد، برای نگه داشتن توان آیرودینامیکی

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mo\_taghizadeh@sbu.ac.ir



کنترل‌کننده‌ها هستند. اگرچه روش‌های کلاسیک به طور مرسوم در کنترل این سیستم‌ها استفاده می‌شوند، این روش‌ها خیلی مؤثر نیستند به دلیل اینکه کنترل‌کننده‌های کلاسیک مقاومت کافی در برابر نویز، اغتشاشات و عدم قطعیت‌هایی مانند تغییر پارامترها و دینامیک مدل نشده سیستم را ندارند. بنابراین توسعه روش‌های کنترلی مؤثر و قابل اعتماد در آن‌ها برای رسیدن به عملکرد استخراج توان بهینه، بسیار حیاتی است. از این رو بسیاری از کارشناسان و محققان به دنبال مطالعه روش‌های کنترلی بهتر و موثرتر هستند. از جمله آن‌ها می‌توان روش‌هایی از جمله منطق فازی، فازی-عصبی، شبکه عصبی، الگوریتم‌های ژنتیک، الگوریتم‌های تکاملی، هوش مصنوعی، روش‌های غیرخطی، روش‌های تطبیقی، روش‌های پیش بین و غیره را نام برد که به چند نمونه از کارهای انجام شده در ادامه اشاره می‌شود.

به‌منظور ردیابی سرعت مطلوب روتور، سانگ و همکاران [۸] با استفاده از روش‌های تطبیقی و غیرخطی یک کنترل‌کننده برای توربین‌های بادی سرعت متغیر طراحی کردند. کنترل‌کننده پیچ پره تکی با روش گاوسین مرتبه دوم خطی توسط بوسانی [۹] ارائه شد. همچنین کنترل‌کننده پیچ پره جمعی و تکی با روش مذکور توسط سندکویست و همکاران [۱۰] مورد مطالعه قرار گرفته است. کاهش بارهای توربین هدف اصلی این دو مقاله می‌باشد. هموار کردن توان خروجی و نوسانات بار توربین بادی با استفاده از یک کنترل‌کننده پیچ جدید توسط بین و همکاران [۱۱] ارائه شده است. کاهش توان ژنراتور و نوسانات بار از اهداف این کنترل‌کننده بود. همچنین آن‌ها کنترل‌کننده زاویه پیچ مد لغزشی گام به عقب تطبیقی برای سیستم پیچ توربین بادی را در مرجع [۱۲] ارائه داده‌اند. به‌علاوه، روش جدول‌بندی بهره نیز در سال‌های اخیر استفاده شده است. لسچر و همکاران [۱۳] از این روش برای طراحی قانون کنترلی برای توربین‌های بادی استفاده کرده‌اند. بیانچی و همکاران [۱۴] نیز با این روش یک کنترل‌کننده برای توربین‌های بادی سرعت متغیر به منظور بهبود کارایی سیستم، عملکرد ایمن و کاهش نوسانات گشتاور طراحی کرده‌اند. بلتران و همکاران [۱۵]، یک کنترل‌کننده مد لغزشی برای کنترل توان توربین‌های بادی سرعت متغیر با هدف تضمین پایداری سیستم در هر دو ناحیه کاری پیشنهاد داده‌اند. این کنترل‌کننده برای مقابله با عدم قطعیت‌های سیستم دارای یک جمله ناپیوسته با زمان

در قانون کنترلی خود بوده که منجر به چترینگ در سیگنال کنترلی می‌شود و عملکرد سیستم کنترل را کاهش می‌دهد. مقاومت در برابر عدم قطعیت‌های پارامتری سیستم و اغتشاشات شبکه برق به دلیل وجود این جمله در قانون کنترل از مهم‌ترین ویژگی‌های کنترل‌کننده طراحی شده است. عصاره و بیگلری [۱۶]، یک روش هیبریدی برای کنترل گشتاور ژنراتور توربین‌های بادی ارائه داده‌اند. استخراج حداکثر توان از سیستم هدف اصلی این کنترل‌کننده است. کنترل سرعت توربین بادی به منظور مطالعه عملکرد و تحلیل پایداری دینامیک سیستم انتقال توربین بادی توسط رحیمی [۱۷] ارائه شده است. مرادی و وثوقی [۱۸] کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی-مشتقی و اچ-بینهایت<sup>۱</sup> را در حضور عدم قطعیت‌های مدل/ محیط برای کنترل زاویه پیچ توربین بادی مقایسه کردند. در این مقاله، کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی با روش آنالیز مکان هندسی ریشه و کنترل‌کننده اچ-بینهایت<sup>۲</sup> با روش سنتز میو طراحی شده است. در مرجع [۱۹] کنترل‌کننده فیدبک حالت دینامیکی برای یک توربین بادی سرعت متغیر پیشنهاد شده است. نویسندگان در این مقاله شبیه‌سازی خود را در حضور تخمین‌گر سرعت باد نیز ارائه داده‌اند و با مقایسه نتایج نشان دادند که کنترل‌کننده پیشنهادی در مقایسه با کنترل‌کننده کلاسیک عملکرد بهتری دارد.

عملکرد سالم و قابل اطمینان سیستم‌های توربین بادی بسیار حائز اهمیت بوده به‌گونه‌ای که با بروز عیب در یک زیرسیستم، این احتمال وجود دارد که عیب به مرور رشد و درنهایت منجر به خرابی و توقف عملکرد شود. در نتیجه، ساختار کنترلی باید بتواند به‌گونه‌ای عمل کند که تا حد امکان اثر این عیب را کمینه و یا با وجود عیب در زیرسیستم، عملکرد سیستم کلی دچار اختلال نشود. ازاین‌رو، به منظور نیل به این هدف، کنترل تحمل‌پذیر عیب ارائه شده است. سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب به دو دسته فعال و غیرفعال تقسیم‌بندی می‌شود. هر دو دسته روش‌های طراحی مختلفی را برای نیل به یک هدف یکسان به‌کار می‌گیرند. سیستم کنترل تحمل‌پذیر فعال عیب به اطلاعات عیب نیاز داشته و معمولاً در ساختار کنترلی خود دارای سیستم تشخیص عیب بوده در حالیکه سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب غیرفعال به دانش قبلی در رابطه با عیب نیازی ندارد و از یک ساختار کنترلی ثابت (مقاوم) برای مقابله با اثرات عیب

استفاده می‌کند.

اخیراً کاربرد سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب در توربین باد مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. مآتی و همکاران [۲۰] یک ساختار سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب برای مقابله با اثرات عیب جعبه دنده ارائه کردند که سیستم پیشنهادی آن‌ها قابلیت تولید توان مورد نظر در حضور این نوع عیب را دارا بود. یک سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب مبتنی بر رؤیتگر برای سیستم ژنراتور توربین باد در حضور عیب سنسور اندازه‌گیری جریان در مرجع [۲۱] ارائه شد. همچنین یک کنترل تحمل‌پذیر عیب فعال در حضور عیب عملگر و عدم قطعیت برای کنترل سرعت روتور و توان ژنراتور با استفاده از رهیافت مدلغزشی بازخوردی تطبیقی و یک جبران‌ساز مرتبه کامل برای سیستم توربین باد ۵ مگاواتی پیشنهاد شد [۲۲]. تشخیص عیب و کنترل تحمل‌پذیر عیب عملگر زاویه پیچ با استفاده از یک جبران‌ساز اغتشاش و کنترل‌کننده ساختار گسسته در مرجع [۲۳] گزارش و نتایج ساختار پیشنهادی از طریق پیاده‌سازی در محیط فست اعتبارسنجی شد. حبیبی و همکاران یک ساختار تحمل‌پذیر تطبیقی برای سیستم توربین بادی در حضور عیب‌های عملگر ارائه دادند که در آن از الگوریتم بهره خود تنظیم استفاده شده بود [۲۴]. یک سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب فعال و غیرفعال با استفاده از روش پارامتر متغیر برای بررسی عیب عملگر زاویه پیچ توسط اسلات و همکاران [۲۵] ارائه شد. آن‌ها از یک روش بهینه‌سازی برای حل مساله تحمل‌پذیر عیب فعال بر مبنای نابرابری ماتریسی استفاده کردند. سامی و پاتون [۲۶] یک استراتژی تحمل‌پذیر بر مبنای مد لغزشی و بهره تطبیقی برای یک نوع توربین باد ۵ مگاواتی به کار گرفتند که برای تخمین حالت و خروجی نامعلوم از یک رؤیتگر مقاوم استفاده کردند.

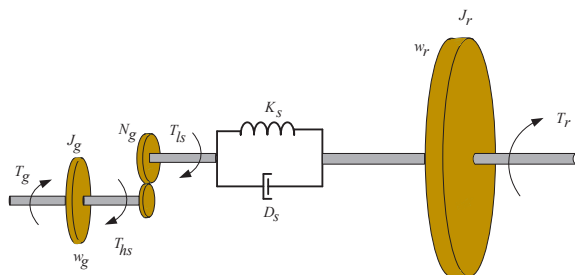
سیستم توربین باد دارای زیرسیستم‌های مختلفی از جمله زیرسیستم آیرودینامیکی، تنظیم زاویه پیچ و زیرسیستم مکانیکی می‌باشد. زیرسیستم زاویه پیچ نیز یکی از زیرسیستم‌های مهم توربین باد بوده که در صورت بروز هرگونه عیب یا خرابی، اثرات جبران‌ناپذیری

IFAST

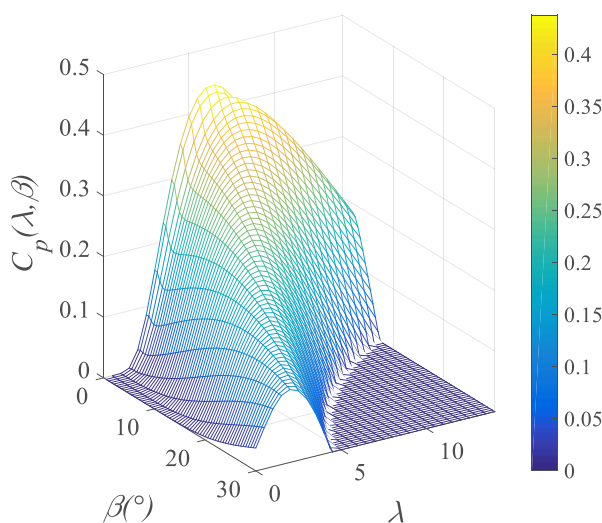
را به همراه خواهد داشت. بروز عیب در سیستم‌های وابسته به توربین بادی خیلی معمول بوده و در نتیجه نیازمند چاره‌اندیشی مناسب هستند. بنابراین، تحمل‌پذیری مساله بسیار مهمی برای سیستم کنترل می‌باشد به گونه‌ای که با اتفاق افتادن عیب در سیستم، قادر به خاموش کردن سیستم در مواقع ضرورت باشد. کنترل تحمل‌پذیر عیب فعال برای این منظور گزینه مناسبی می‌باشد چراکه می‌تواند به‌خوبی این شرایط را با بازسازی ساختار کنترلی مطابق با عیب اداره کند. مساله مهم دیگری که باید مورد توجه قرار بگیرد پدیده چترینگ در سیگنال کنترل بوده که عملکرد کنترل‌کننده را کاهش می‌دهد. این پدیده در کنترل مد لغزشی به علت جمله ناپیوسته با زمان ( $\text{sgn}(s)$ ) برای غلبه بر عدم قطعیت ایجاد می‌شود [۲۷]. از این رو، نوآوری این مقاله عبارتست از: (۱) بهبود ساختار کنترلی با استفاده از تخمین تأخیر زمانی برای دسترسی به اطلاعات عیب (۲) بهبود عملکرد کنترل‌کننده با ترکیب رؤیتگر اغتشاش غیرخطی به منظور کاهش بهره کنترلی جمله ناپیوسته و کاهش چترینگ. عیب عملگر یکی از شایع‌ترین عیب‌ها در سیستم توربین باد بوده که در این مقاله مورد توجه قرار گرفته است. از آنجاییکه تحریک عملگر زاویه پیچ از طریق سیستم هیدرولیکی می‌باشد، در این مقاله عیب تجهیزات هیدرولیکی از قبیل نشستی هیدرولیکی، خرابی پمپ و محتوی هوای درون سیال عامل (روغن) مدنظر قرار می‌گیرد. بنابراین، هدف اصلی این مقاله ارائه یک ساختار سریع، ساده و مقاوم برای سیستم توربین بادی در حضور عیب عملگر و عدم قطعیت سیستم می‌باشد. همچنین به منظور اعتبارسنجی، کنترل‌کننده در محیط شبیه‌ساز فست پیاده‌سازی می‌شود. در ادامه به منظور مقایسه و نشان دادن برتری ساختار تحمل‌پذیر پیشنهادی، نتایج با نتایج حاصل از کنترل‌کننده‌های جدول‌بندی بهره و خطی‌سازی فیدبک مقایسه خواهد شد.

ساختار این مقاله بدین ترتیب است: در قسمت ۲ مدل دوجرمی توربین باد و عیب زیرسیستم عملگر زاویه پیچ ارائه شده است. در قسمت ۳ ساختار کنترلی و سیستم تشخیص عیب ارائه و پایداری آن بررسی شده است. در قسمت ۴ نتایج شبیه‌سازی در محیط فست





شکل ۱. مدل دو جرمی توربین بادی  
Fig. 1. Wind turbine two-mass model



شکل ۲. ضریب توان غیر خطی توربین بادی  
Fig. 2. Wind turbine nonlinear power coefficient

و ضریب توان آن در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. معادلات دیفرانسیلی حاکم بر این مدل دو جرمی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_r &= \frac{1}{J_r} \left( \frac{P_r(\omega_r, \beta, v)}{\omega_r} - \omega_r D_s + \frac{\omega_g D_s}{N_g} - \delta K_s \right) \\ \dot{\omega}_g &= \frac{1}{J_g} \left( \frac{\omega_r D_s}{N_g} - \frac{\omega_g D_s}{N_g^2} + \frac{\delta K_s T_g}{N_g J_g} \right) \\ \dot{\delta} &= \omega_r - \frac{\omega_g}{N_g} \end{aligned} \quad (1)$$

$\omega_r$  سرعت روتور،  $\omega_g$  سرعت ژنراتور،  $\delta$  زاویه پیچش،  $T_g$  گشتاور ژنراتور،  $J_r$  و  $J_g$  به ترتیب اینرسی روتور و ژنراتور،  $N_g$

آورده شده است. در آخر نتایج حاصل از پژوهش در بخش ۵ بیان شده است.

## ۲- مدل سازی توربین بادی

مدل توربین بادی استفاده شده در این مقاله، توربین بادی مرجع واینند پکت<sup>۱</sup> ۱/۵ مگاوات است که در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲ میلادی توسط آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدید پذیر آمریکا<sup>۲</sup> طراحی شده است. این توربین از نوع توربین‌های بادی سه پره‌ای رو به باد محور افقی است که از کنترل سرعت-متغیر پیچ-متغیر بهره می‌برد. جزئیات بیشتر درباره این توربین بادی را می‌توان در مرجع [۲۸] مشاهده نمود. پیکربندی مدل دو جرمی ساده شده این توربین بادی

<sup>1</sup>WindPACT  
<sup>2</sup>NREL



$$C_p = 0.22(116\lambda_t - 0.4\beta - 5)e^{-12.5\lambda_t} \quad (5)$$

که در آن

$$\lambda_t = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{V}$$

$\lambda$  نسبت سرعت نوک و  $\lambda_t$  یک متغیر واسط است. هدف این مقاله طراحی کنترل کننده زاویه پیچ برای توربین بادی در ناحیه بار کامل در حضور عیب عملگر می باشد. این هدف کنترلی با محدود کردن توان جذب شده توسط توربین بادی به منظور تنظیم سرعت دورانی روتور در مقدار نامی خود و یا به بیان دیگر تنظیم توان خروجی در مقدار نامی آن است.

#### ۲-۱- عیب عملگر در سیستم توربین باد

عیب در سیستم توربین باد دارای درجه های مختلفی از شدت می باشد. در حضور برخی از عیبها خاموشی سریع و مطمئن برای توربین باد ضروری و لازم است در حالیکه در حضور انواع دیگر عیب، سیستم می تواند با تغییر ساختار به تأمین توان الکتریکی مورد نیاز ادامه دهد. اتفاق افتادن عیب در سیستم منجر به تغییر تدریجی رفتار سیستم شده در نتیجه از کنترل کننده های ساختار متغیر برای کنترل سیستم استفاده می شود. در این مقاله، عیبهای عملگر زاویه پیچ

نسبت دنده و  $D_s$  و  $K_s$  به ترتیب ثابت های میرایی و سفتی سیستم محرک هستند. عملگر زاویه پیچ یک عملگر هیدرولیکی بوده که دینامیک آن توسط یک تابع تبدیل مرتبه دوم به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$\frac{\beta}{\beta_r} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

که  $\beta$  زاویه پیچ و  $\beta_r$  ورودی کنترلی است. بردارهای حالت و ورودی به صورت زیر در نظر گرفته می شوند.

$$u = \beta_r x = [\omega_r \quad \omega_g \quad \delta \quad \beta]^T, \quad (3)$$

توان مکانیکی جذب شده توسط توربین بادی ( $P_r$ ) به صورت زیر است:

$$P_r = \frac{1}{2} \pi \rho R^2 V^3 C_p(\omega_r, \beta, V) \quad (4)$$

که  $R$  شعاع روتور،  $\rho$  چگالی هوا،  $V$  سرعت باد و  $C_p$  ضریب توان است که تابعی غیرخطی از  $\beta$  و  $\lambda$  می باشد. ضریب توان  $C_p$  برای توربین های بادی از طریق انجام محاسبات عددی بدست می آید و در جداول ارائه می شود. در این مقاله از ضریب توان آئرو دینامیکی به صورت رابطه زیر استفاده شده است

جدول ۱. پارامترهای سیستم پیچ هیدرولیکی در شرایط مختلف

Table 1. Hydraulic pitch system parameters in different conditions

$\zeta$	$\omega_n$	عیب
۰/۶	۱۱/۱۱	حالت بدون عیب
۰/۴۵	۵/۳۷	محتوی هوا در روغن هیدرولیک
۰/۷۵	۷/۲۷	خرابی پمپ
۰/۹	۳/۴۲	نشتی هیدرولیکی

از معادله (۷) می‌توان نوشت

$$\ddot{x}_1 = L_f + L_g u \quad (۸)$$

که در آن  $L_f$  و  $L_g$  جمله‌های غیرخطی می‌باشند [۳۲].

### ۳-۱- کنترل کننده مد لغزشی

کنترل مد لغزشی یکی از روش‌های مرسوم کنترل غیرخطی بوده که در برابر عدم قطعیت‌ها و تغییرات پارامتری سیستم مقاوم است. سطح لغزش متغیر با زمان به صورت زیر تعریف می‌شود

$$S = \dot{e}(t) + k_p e(t) + k_i \int e(t) dt \quad (۹)$$

در رابطه فوق  $e = \omega_r - \omega_r^*$  خطای پایدارسازی سرعت روتور و  $\omega_r^*$  بیانگر مقدار مرجع سرعت روتور می‌باشد. همچنین  $k_p$ ،  $k_d$  و  $k_i$  ضرایب مثبت هستند. برای دستیابی به قانون کنترلی مد لغزشی از معادله (۹) نسبت به زمان مشتق گرفته می‌شود.

$$\dot{S} = (\ddot{x}_1 - \ddot{x}_1^*) + k_p \dot{e}(t) + k_i e(t) \quad (۱۰)$$

با جایگذاری معادله (۸) در معادله (۱۰):

$$\dot{S} = (L_f + L_g u - \ddot{x}_1^*) + k_p \dot{e}(t) + k_i e(t) \quad (۱۱)$$

با مساوی صفر قرار دادن رابطه (۱۱) قانون کنترل پیوسته با زمان به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$u_{eq} = \frac{-1}{L_g} (k_p \dot{e} + k_i e + L_f - \ddot{\omega}_r^*) \quad (۱۲)$$

رابطه (۱۲)، قانون کنترل پیوسته با زمان بدون حضور اغتشاش خارجی است. در حضور اغتشاش خارجی ( $d$ ) با جایگذاری این قانون کنترل در دینامیک سیستم توربین باد، معادله دینامیک خطا

به‌عنوان نرخ بالای خرابی عملگر در سیستم توربین باد مورد مطالعه قرار می‌گیرد [۲۹]. در سیستم زاویه پیچ، عیب با تغییر ضریب میرایی و فرکانس طبیعی حالت نرمال نسبت به حالت وجود عیب به تغییر رفتار سیستم می‌شود. پارامترهای سیستم پیچ در شرایط مختلف در جدول ۱ داده شده است. عیب زیر سیستم زاویه پیچ معمولاً شامل محتوی هوا در روغن هیدرولیک، خرابی پمپ و نشتی هیدرولیکی است. محتوی هوا در روغن هیدرولیک برای حالت بدون عیب ۷ درصد بوده درحالی‌که همین مقدار در حضور این نوع عیب تقریباً ۱۵ درصد می‌باشد. خرابی پمپ بیانگر شرایطی است که در آن سیستم دارای ۷۵ درصد فشار بوده در حالی که در حضور نشتی هیدرولیکی این میزان معادل ۵۰ درصد است.

### ۳- طراحی کنترل کننده

در این بخش ساختار کنترل تحمل‌پذیر عیب فعال با استفاده از ترکیب استراتژی مد لغزشی، تخمین تأخیر زمانی و رؤیتگر اغتشاش غیرخطی طراحی و اثبات پایداری با استفاده از تئوری لیاپانوف نیز ارائه خواهد شد. همچنین کنترل کننده تطبیقی جدول بندی بهره و کنترل کننده مبتنی بر روش خطی‌سازی فیدبک برای کنترل زاویه پیچ سیستم توربین بادی طراحی می‌شود.

از آنجاییکه معادله مربوط به دینامیک روتور دارای جمله صریح ورودی کنترلی نیست، طبق اصول کنترل غیرخطی (خطی سازی ورودی-خروجی)، از خروجی سیستم یعنی سرعت روتور مشتق گرفته می‌شود تا زمانی که ورودی کنترلی ( $u = \beta_r$ ) ظاهر گردد. با در نظر گرفتن معادله دینامیک روتور بصورت رابطه (۷):

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{J_r} \left( \frac{P_r(x_1, x_4, V)}{x_1} - \frac{x_2 D_s}{N_g} - x_3 K_s \right) \quad (۷)$$

می‌توان نشان داد که تبدیل دیفومورفیزی می‌وجود دارد که سیستم توربین بادی در معادله (۷) با یک سیستم به فرم نرمال و با دینامیک صفر پایدار هم ارز است. به عبارت دیگر مشتق‌گیری از معادله (۷) تضمین می‌کند که سیستم در تمامی نقاط کاری خود پایدار و غیر تکین است [۳۰-۳۱]. بنابراین با علم به این موضوع و با مشتق‌گیری

به صورت زیر قابل بیان است:

**فرض ۱:** تغییرات اغتشاش در سیستم محدود بوده و  $\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{d} = 0$  با در نظر گرفتن فرض فوق و ترکیب روابط (۱۵) و (۱۶) و دینامیک توربین باد در حضور اغتشاش خارجی، دینامیک خطای تخمین اغتشاش به صورت زیر بدست می آید

$$\ddot{e} + k_p \dot{e} + k_i e - d = 0 \quad (13)$$

همانطور که در رابطه (۱۳) دیده می شود در حضور اغتشاش خارجی صرف نظر از مقادیر ضرایب ثابت، خطای ردیابی سیستم به سمت صفر همگرا نمی شود. بنابراین، به منظور غلبه بر این مشکل، یک جمله کنترلی ناپیوسته با زمان به قانون کنترل رابطه (۱۲) به صورت زیر اضافه می شود

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{d}} &= \dot{d} - \hat{d} \\ &= -\dot{z} - \lambda \dot{\omega}_r = \lambda (\hat{d} - \lambda \dot{\omega}_r) + \lambda \quad (17) \\ [\lambda \dot{\omega}_r + L_f + L_g u] - \lambda (L_f + L_g u + d) &= -\lambda \tilde{d} \end{aligned}$$

$$u_{re} = \frac{-1}{L_g} K \operatorname{sgn}(S) \quad (14)$$

**لم:** با برقراری فرض ۱ برای سیستم توربین باد، تخمین اغتشاش با استفاده از رُویتگر اغتشاش غیرخطی فوق توانایی ردیابی مجانبی اغتشاش واقعی را دارا بوده به شرطی که بهره اغتشاش مثبت باشد [۳۴].

که  $K$  بیانگر بهره کنترلی لغزشی بوده و معمولاً برای تضمین حرکت لغزشی در حضور اغتشاش خارجی و عدم قطعیت مقدار بزرگی در نظر گرفته می شود. جمله ناپیوسته با زمان در حضور اغتشاش خارجی نامعلوم، بزرگ خواهد شد که باعث چترینگ می شود. در واقع به این علت که بهره کنترلی  $K$  بسیار بزرگتر از حد بالای اغتشاش خارجی انتخاب می شود، پدیده چترینگ به وجود می آید. از این رو، به منظور کاهش مقدار این بهره، یک رُویتگر اغتشاش غیرخطی طراحی و با قانون کنترل مد لغزشی ترکیب خواهد شد.

بنابراین، اگر بهره رُویتگر اغتشاش مثبت انتخاب شود، رُویتگر اغتشاش غیرخطی طراحی شده توانایی تخمین اغتشاش نامعلوم را دارا بوده و دینامیک خطای تخمین اغتشاش نیز به صورت مجانبی پایدار خواهد بود. علاوه بر این، با انتخاب هرچه بزرگتر بهره رُویتگر، نرخ همگرایی خطای تخمین اغتشاش می تواند افزایش یابد.

**فرض ۲:** خطای تخمین اغتشاش محدود می باشد و  $E_d = \sup_{t > 0} |\tilde{d}|$  حال، قانون کنترل کلی برای سیستم توربین باد در حضور اغتشاش تخمین زده شده به صورت رابطه (۱۸) بازنویسی می شود:

$$u_{SM-NDO} = \frac{-1}{L_g} (-\dot{\omega}_r^* + k_p \dot{e} + k_i e + L_f + \hat{d}) + u_{re} \quad (18)$$

**تئوری:** فرض های ۱ و ۲ برای سیستم توربین باد در حضور اغتشاش کند و متغیر با زمان برقرار هستند. با در نظر گرفتن سطح لغزش انتخابی، اغتشاش تخمین زده شده و قانون کنترل طراحی شده، پایداری سیستم توربین باد با این قانون کنترل تضمین خواهد شد اگر  $K \geq \eta + E_d$

**اثبات:** تابع لیاپانوف  $V = \frac{1}{\lambda} (S^T + \tilde{d}^T)$  را در نظر بگیرید. مشتق زمانی این تابع به صورت زیر محاسبه و ساده می شود:

$$\begin{aligned} \dot{z} &= -\lambda z - \lambda [\lambda \dot{\omega}_r + L_f + L_g u] \\ \dot{\hat{d}} &= z + \lambda \dot{\omega}_r \end{aligned} \quad (15)$$

که  $Z$  متغیر داخلی رُویتگر غیرخطی و  $\lambda$  بهره رُویتگر اغتشاش است. خطای تخمین اغتشاش با توجه به اغتشاش تخمین زده شده به صورت رابطه (۱۶) قابل بیان است:

$$\tilde{d} = d - \hat{d} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \Phi_r(x, \dot{x}, u) + \Delta_r(x, \dot{x}, u) &= \ddot{x}_1 - L_f - L_g u \\ \hat{\Delta}_r(x, \dot{x}, u)_t + \hat{\Phi}_r(x, \dot{x}, u)_t &\triangleq \Delta_r(x, \dot{x}, u)_{t-\tau} \\ + \Phi_r(x, \dot{x}, u)_{t-\tau} &= \ddot{x}_{1-t-\tau} - L_{f-t-\tau} - L_{g-t-\tau} u_{t-\tau} = \mathfrak{R}_{TDE} \end{aligned} \quad (22)$$

تخمین تأخیر زمانی به‌عنوان سیستم تشخیص عیب مقاوم عمل می‌کند که عیب عملگر را در حضور عدم قطعیت به‌صورت دقیق تشخیص می‌دهد. لازم به ذکر است که این سیستم تشخیص عیب نه تنها در مقابل هر نوع عیبی حساس می‌باشد، بلکه در مقابل عدم قطعیت‌ها نیز مقاوم است. به منظور تضمین مقاوم بودن سیستم، یک آستانه<sup>۱</sup> باید به گونه‌ای انتخاب شود که وقتی عیب در سیستم نیست، داریم:

$$\mathfrak{R}_{TDE} = \Delta_r(x, \dot{x}, u) \leq \bar{\Delta} = \mathbb{Z}_{threshold} \quad (23)$$

رابطه (۲۳) دلالت بر شرایط عادی سیستم داشته و وقتی عیبی در سیستم نباشد سیگنال مانده همیشه کمتر از آستانه می‌باشد. انتخاب مناسب آستانه می‌تواند مقاوم بودن سیستم تشخیص عیب را تضمین کند. لازم به ذکر است که وقتی سیگنال مانده از مقدار آستانه عبور کند، عیب نیز تشخیص داده خواهد شد. عیب عملگر و عدم قطعیت با توجه به روابط (۲۰) تا (۲۲) با استفاده از تخمین تأخیر زمانی به‌صورت زیر قابل بیان هستند:

$$\Delta_r(x, \dot{x}, u) + \Phi_r(x, \dot{x}, u) = \mathfrak{R}_{TDE} + v \quad (24)$$

که  $v$  خطای تخمین تأخیر زمانی است. در نهایت مدل توربین در حضور اغتشاش خارجی، عدم قطعیت و عیب عملگر به‌صورت رابطه (۲۵) قابل بازنویسی است:

$$\ddot{x}_1 = L_f + L_g u + d + \mathfrak{R}_{TDE} + v \quad (25)$$

فرض ۳: خطای تخمین تأخیر زمانی دارای حد بالا می‌باشد.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= S\dot{S} + \dot{d}\ddot{d} \\ &= \left[ S \begin{pmatrix} -\ddot{w}_r^* + L_f - L_g.L_g^{-1} \\ -\ddot{w}_r^* + k_p\dot{e} + k_i e \\ L_f + \hat{d} + K \operatorname{sgn}(S) \end{pmatrix} + d + k_p\dot{e} + k_i e \right] - \lambda \tilde{d}^2 \\ &= \left[ S \begin{pmatrix} -K \operatorname{sgn} \\ (S) + \tilde{d} \end{pmatrix} - \lambda \tilde{d}^2 \right] \\ &\leq \left[ S \begin{pmatrix} -(\eta + E_d) \\ \operatorname{sgn}(S) + \tilde{d} \end{pmatrix} - \lambda \tilde{d}^2 \right] \leq \begin{bmatrix} -\eta |S| \\ -\lambda \tilde{d}^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (19)$$

بنابراین پایداری سیستم در حضور اغتشاش خارجی نامعلوم تحت قانون کنترل طراحی شده تضمین می‌شود. در مقایسه با قانون کنترل مد لغزشی معمولی که نیاز به انتخاب بهره کنترلی به‌صورت  $K \geq \eta + E_d$  دارد، مقدار بهره کنترلی جمله ناپیوسته در قانون کنترلی پیشنهادی و همچنین چترینگ به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا کرده است.

### ۳-۳- کنترل تحمل‌پذیر عیب فعال با استفاده از تخمین تأخیر زمانی و مد لغزشی برمبنای رویتگر اغتشاش غیرخطی

در این قسمت تشخیص عیب با استفاده از تخمین تأخیر زمانی انجام خواهد شد. با در نظر گرفتن مدل توربین باد در حضور عیب عملگر و عدم قطعیت به‌صورت  $\ddot{x}_1 = L_f + L_g u + \Phi_r(x, \dot{x}, u) + \Delta_r(x, \dot{x}, u)$ ، برای مقدار گام زمانی کوچک ( $\tau$ )، عدم قطعیت  $\Delta_r(x, \dot{x}, u)$  و عیب  $\Phi_r(x, \dot{x}, u)$  به‌صورت زیر قابل تخمین می‌باشند [۳۶]:

$$\begin{aligned} \Delta_r(x, \dot{x}, u)_t &\cong \Delta_r(x, \dot{x}, u)_{t-\tau} \\ \Phi_r(x, \dot{x}, u)_t &\cong \Phi_r(x, \dot{x}, u)_{t-\tau} \end{aligned} \quad (20)$$

بنابراین تخمین عدم قطعیت و عیب به‌صورت زیر انجام می‌شود:

$$\begin{aligned} \hat{\Delta}_r(x, \dot{x}, u)_t &\triangleq \Delta_r(x, \dot{x}, u)_{t-\tau} \\ \hat{\Phi}_r(x, \dot{x}, u)_t &\triangleq \Phi_r(x, \dot{x}, u)_{t-\tau} \end{aligned} \quad (21)$$

با جایگذاری رابطه (۲۰) و (۲۱) در رابطه (۸) رابطه (۲۲) به‌صورت

زیر قابل استخراج است:

<sup>1</sup>Threshold

لغزشی مبتنی بر رؤیتگر اغتشاش و تخمین تأخیر زمانی در حضور عیب عملگر و عدم قطعیت تضمین خواهد شد.

### ۳-۴- رؤیتگر حالت لغزشی فرایچشی

با در نظر گرفتن مدل توربین به صورت فضای حالت زیر:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= L_f + L_g u + d + \Phi_r + \Delta_r \\ y &= x_1 = \omega_r \end{aligned} \quad (30)$$

معادلات رؤیتگر حالت لغزشی فرایچشی به صورت رابطه (۳۱)

ارائه شده است [۳۷]

$$\begin{aligned} \hat{x}_1 &= \bar{x}_2 + \alpha_1 \|\hat{x}_1 - \hat{x}_2\|^{1/2} \operatorname{sgn}(x_1 - \hat{x}_1) \\ \hat{x}_2 &= L_f(x_1, \hat{x}_2) + L_g(x_1, \hat{x}_2) u + \alpha_2 \operatorname{sgn}(x_1 - \hat{x}_1) \end{aligned} \quad (31)$$

در رابطه (۳۱) ثابت‌های مد لغزشی هستند که باید در فرایند طراحی تعیین شوند. با تفاضل رابطه (۳۱) و (۳۰) خطای رؤیتگر مطابق با رابطه (۳۲) بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} \tilde{x}_1 &= \tilde{x}_2 + \alpha_1 \|\tilde{x}_1\|^{1/2} \operatorname{sgn}(\tilde{x}_1) \\ \tilde{x}_2 &= F(x_1, \hat{x}_2, x_2, u) - \alpha_2 \operatorname{sgn}(\tilde{x}_1) \\ \tilde{x}_i &= x_i - \hat{x}_i \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2, u) &= L_f + L_g u \\ D(x_1, \hat{x}_2, \tilde{x}_2) &= f(x_1, x_2, u) - f(x_1, \hat{x}_2, u) \\ F(x_1, \hat{x}_2, x_2, u) &= D(x_1, x_2, \hat{x}_2) + d + \Phi_r + \Delta_r \end{aligned}$$

از آنجایی که مشتق‌گیری از سنسورهای شتاب‌سنج و یا جی.پی.اس امکان بروز خطای قابل توجه در حضور نویزپذیری سنسورها وجود دارد، به منظور محاسبه مشتقات حالت‌های توربین باد، می‌توان از این رؤیتگر استفاده نمود و متغیرهای مطلوب را با سرعت و دقت

$$|v| \leq \bar{v}$$

مجدداً مشتق سطح لغزش به صورت رابطه (۲۶) بازنویسی می‌شود.

$$\begin{aligned} \dot{S} &= (L_f + L_g u + d + \mathfrak{R}_{TDE} \\ &+ v - \ddot{x}_1^*) + k_p \dot{e}(t) + k_i e(t) \end{aligned} \quad (26)$$

قانون کنترل بر مبنای الگوریتم کنترل تأخیر زمانی به صورت زیر قابل بیان است:

$$u = u_{eq} + u_{re} + u_{TDE} \quad (27)$$

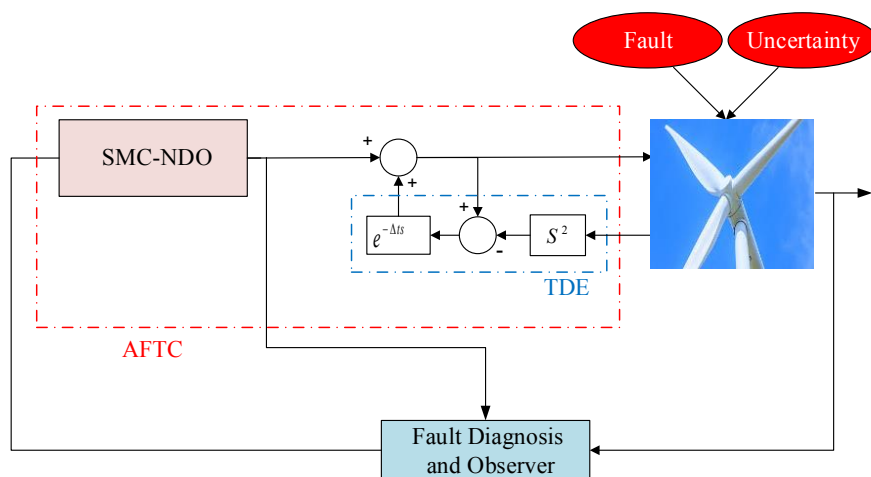
که

$$\begin{aligned} u_{TDE} &= \frac{-1}{L_g} \mathfrak{R}_{TDE} \\ u_{re} &= \frac{-1}{L_g} (K + \bar{v}) \operatorname{sgn}(S) \\ u_{eq} &= \frac{-1}{L_g} (-\ddot{\omega}_r^* + k_p \dot{e} + k_i e + L_f + \hat{d}) \end{aligned} \quad (28)$$

اثبات: یک تابع لیاپانوف به صورت  $V = \frac{1}{\gamma} (S^\gamma + \tilde{d}^\gamma)$  در نظر گرفته می‌شود. با توجه به قانون کنترل رابطه (۲۸) و فرض ۳، مشتق زمانی آن به صورت زیر قابل بیان و ساده‌سازی است:

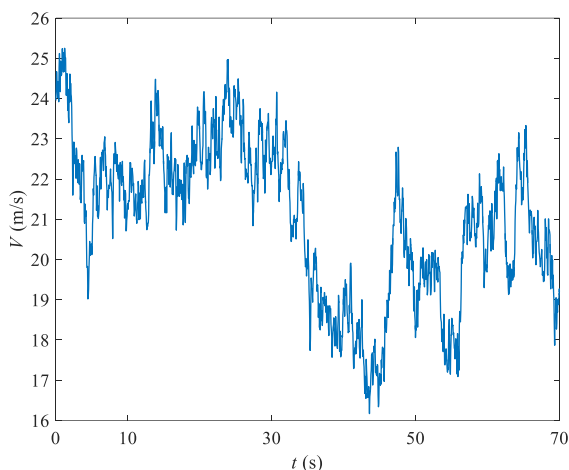
$$\begin{aligned} \dot{V} &= S\dot{S} + \tilde{d}\dot{\tilde{d}} \\ &= \left[ S \left( \begin{aligned} & -\ddot{\omega}_r^* + L_f - \left( -\ddot{\omega}_r^* + k_p \dot{e} + k_i e + L_f + \mathfrak{R}_{TDE} \right) \\ & + \hat{d} + (K + \bar{v}) \operatorname{sgn}(S) \end{aligned} \right) \right] - \lambda \tilde{d}^2 \quad (29) \\ &= \left[ S \left( \begin{aligned} & -(K + \bar{v}) \operatorname{sgn}(S) \\ & (S) + \tilde{d} + v \end{aligned} \right) - \lambda \tilde{d}^2 \right] \leq \\ &= \left[ |S| \left( (\bar{v} - K - \bar{v}) + \tilde{d} \right) - \lambda \tilde{d}^2 \right] \leq \left[ -K |S| - \lambda \tilde{d}^2 \right] \end{aligned}$$

بنابراین، پایداری سیستم توربین باد تحت قانون کنترل مد



شکل ۳. دیاگرام بلوکی ساختار کنترلی پیشنهادی

Fig. 3. Block diagram of the proposed control structure



شکل ۴. پروفایل باد توربولانسی

Fig. 4. Turbulent wind profile

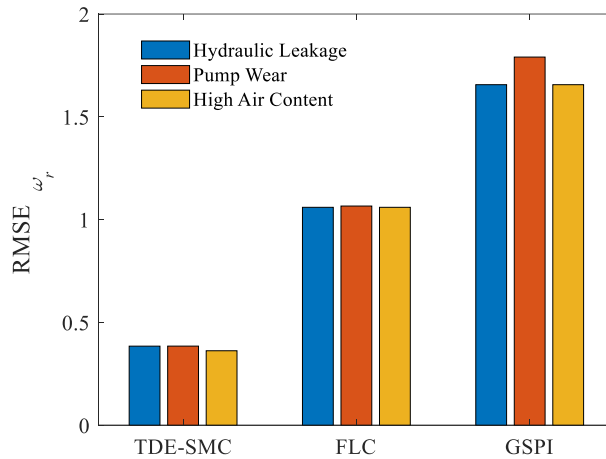
بعضی رفتارهای دینامیکی می‌باشد. بر همین اساس، پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌ها روی یک مدل دقیق‌تر و بسیار نزدیک به مدل واقعی توربین باد، مانند مدل فست<sup>۱</sup> لازم و ضروری است. از این رو، به منظور اعتبارسنجی، کنترل‌کننده‌های طراحی شده در محیط شبیه ساز فست<sup>۱</sup> تحت سرعت باد توربولانسی با مقدار میانگین ۲۱ متر بر ثانیه و شدت توربولانسی ۱۵ درصد پیاده‌سازی شده‌اند. برای تولید پروفیل‌های باد در شبیه ساز فست<sup>۱</sup> از نرم افزار توربسیم<sup>۲</sup> استفاده شده

بالایی تخمین زد. با توجه به این که دو خاصیت سرعت و دقت بالا از ویژگی‌های بارز رؤیتگرهای مد لغزشی مرتبه بالا می‌باشند، در این مقاله از این رؤیتگر به منظور تخمین سرعت روتور استفاده شده است. بلوک دیاگرام ساختار کنترلی پیشنهادی در شکل ۳ نشان داده شده است.

#### ۴- نتایج شبیه‌سازی

کنترل‌کننده‌های طراحی شده در این مقاله بر مبنای مدل دوجرمی طراحی شده است که شامل ساده‌سازی و صرف‌نظر از

1FAST  
2TurbSim



شکل ۵. مربع میانگین خطای سرعت روتور در حضور عیب‌های مختلف  
**Fig. 5. RMSE of rotor speed in the presence of different faults**

شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\int_{t_0}^{t_1} e_{\omega_r}^2 dt}{t_1 - t_0}} \quad (33)$$

مقدار مربع میانگین خطا برای هر کنترل‌کننده در حضور سه نوع عیب شامل نشتی هیدرولیکی، خرابی پمپ، و محتوی هوا در روغن محاسبه و در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۵ دیده می‌شود ساختار کنترل تحمل‌پذیر پیشنهادی دارای مقدار خطای کمتری نسبت به هر دو کنترل‌کننده خطی‌سازی فیدبک و جدول‌بندی بهره در حضور هر سه نوع عیب می‌باشد. همچنین کنترل‌کننده مبتنی بر خطی‌سازی فیدبک دارای مقدار خطای کمتری نسبت به روش تطبیقی جدول‌بندی بهره می‌باشد. لازم به ذکر است به منظور تعیین پارامترهای کنترلی بهینه، یک تابع هزینه به صورت مجموع مربع میانگین خطا و نرخ تغییرات ورودی کنترلی در نظر گرفته شده و سپس با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی نیز کمینه شده است.

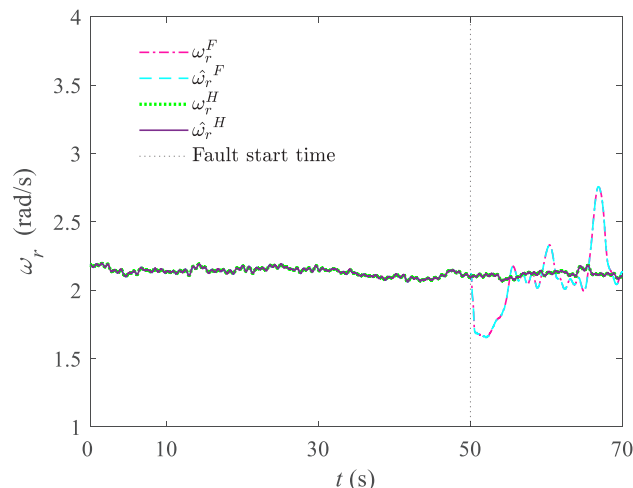
منحنی سرعت روتور با و بدون حضور عیب در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود سرعت روتور با حضور کنترل‌کننده ترکیبی مد لغزشی، رویتگر اغتشاش و تخمین تأخیر زمانی تقریباً در اطراف مقدار نامی سرعت روتور برای توربین مورد

است. پروفیل‌های باد از نوع مدل طیفی کایمل آی.ای.سی<sup>۱</sup> هستند و با توربولانس‌های ۵٪ و ۱۵٪ ایجاد شده‌اند. علاوه بر کنترل‌کننده طراحی شده، کنترل‌کننده‌های خطی‌سازی فیدبک و جدول‌بندی بهره نیز طراحی شده که در پیوست آورده شده‌اند.

در کاربردهای عملی توربین‌های بادی، اثرات گرد و غبار و تغییرات چگالی هوا که در اثر شرایط محیطی مختلف ایجاد می‌شوند، به عنوان عدم قطعیت می‌توانند در نظر گرفته شوند. این عوامل باعث اثرگذاری روی ضریب توان آئرودینامیکی توربین بادی می‌شوند. لذا، در این مقاله کلیه شبیه‌سازی‌ها در حضور ۲۰ درصد کاهش عملکرد ضریب توان آئرودینامیکی به عنوان عدم قطعیت و همچنین نویز سنسور انجام شده است. لازم به ذکر است به منظور اختصار، نتایج شبیه‌سازی روی مدل دو جرمی گزارش نشده و فقط اعتبارسنجی کنترل‌کننده در محیط فست<sup>۱</sup> ذکر شده است.

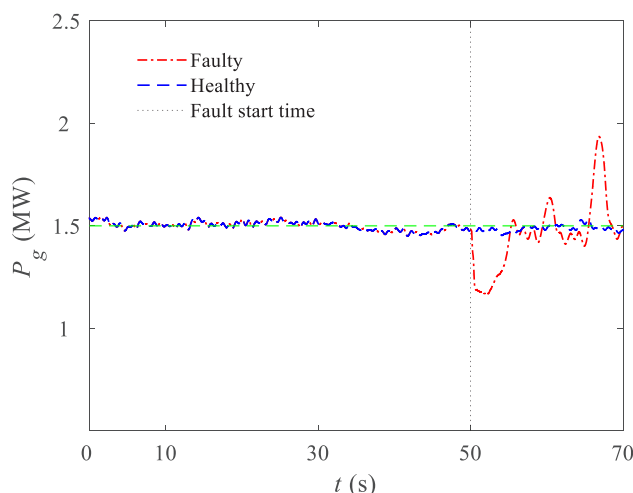
عملکرد کنترل‌کننده طراحی شده تحت باد توربولانسی (شکل ۴) در مقایسه با دیگر کنترل‌کننده‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته که نتایج آن در شکل ۵ آورده شده است. در شبیه‌سازی انجام شده که کنترل‌کننده‌ها زاویه پیچ را در ناحیه بار کامل کنترل می‌کنند، گشتاور ژنراتور در حضور عیب عملکرد در محدوده مقدار نامی خود ثابت نگه داشته شده است. همچنین به منظور مقایسه، مربع میانگین خطا به صورت زیر برای خطای سرعت روتور در نظر گرفته شده و مقدار آن در شبیه‌سازی‌های مختلف برای هر کنترل‌کننده محاسبه





شکل ۶. سرعت روتور برای هر دو حالت سالم و عیب‌دار

Fig. 6. Rotor speed for both healthy and faulty conditions



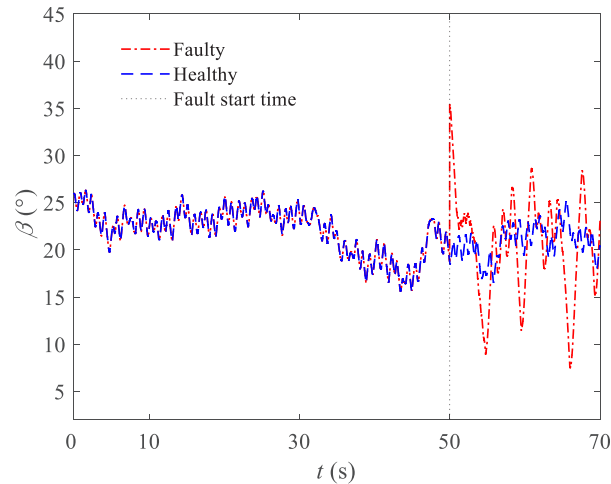
شکل ۷. توان ژنراتور برای هر دو حالت سالم و عیب‌دار

Fig. 7. Generator power for both healthy and faulty conditions

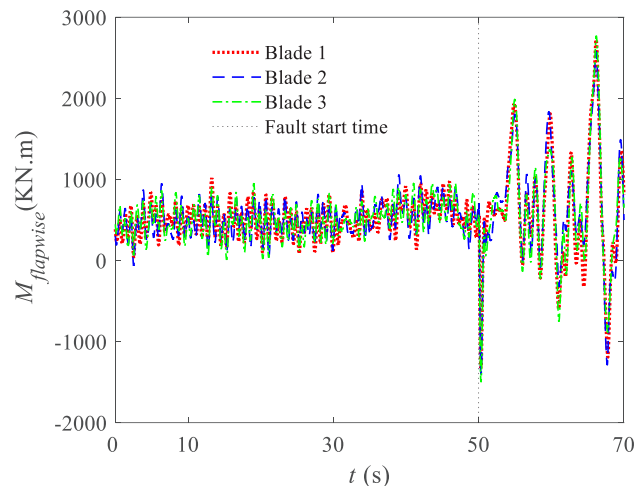
که در شکل ۶ قابل مشاهده است. در حضور عیب عملگر، توان نامی ۱/۵ مگاوات نیز تأمین می‌شود که این مهم ریشه در عملکرد مؤثر سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب پیشنهادی در بی اثر کردن و جبران اثرات عیب دارد.

زاویه پیچ توربین باد تحت ساختار کنترل تحمل‌پذیر عیب پیشنهادی برای دو حالت سالم و عیب‌دار در شکل ۸ نشان داده شده است. ساختار پیشنهادی توانسته زاویه پیچ را در محدوده ۲۰ تا ۳۰ درجه نگه دارد. با اتفاق افتادن عیب، زاویه پیچ در ابتدا حدود ۱۰ درجه تغییر ناگهانی را تجربه کرده سپس ساختار پیشنهادی توانسته

مطالعه نوسان‌های ریز دارد. با اتفاق افتادن عیب در زمان ۵۰ ثانیه، سرعت روتور ابتدا یک افت ناگهانی را تجربه می‌کند سپس کنترل‌کننده پیشنهادی خیلی سریع افت اتفاق افتاده را جبران و نوسانات سرعت روتور را در محدوده نامی نگه می‌دارد. از آنجایی که در کاربرد واقعی، سرعت روتور به‌طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد، در این مقاله از یک رؤیتگر مد لغزشی مرتبه بالا برای تخمین سرعت روتور استفاده شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود رؤیتگر مذکور توانسته به خوبی سرعت روتور را تخمین بزند. علاوه بر سرعت روتور، توان ژنراتور نیز روند مشابهی را طی کرده



شکل ۸. زاویه پیچ برای هر دو حالت سالم و عیب‌دار  
**Fig. 8. Pitch angle for both healthy and faulty conditions**



شکل ۹. گشتاورهای وارده به پره‌های توربین باد  
**Fig. 9. Moments on wind turbine blades**

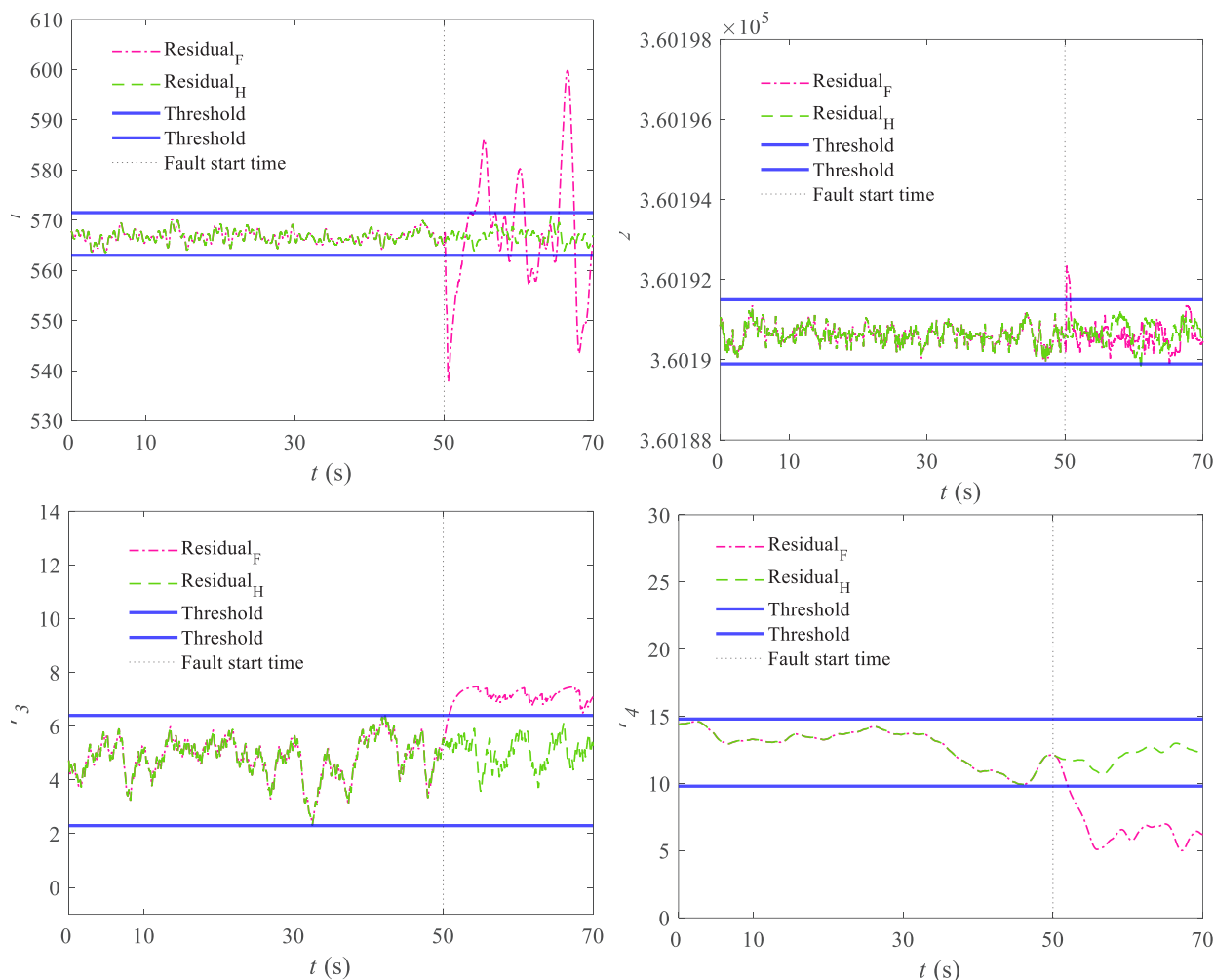
سیکل بارگذاری با فرکانس‌های مختلف می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود ساختار کنترل تحمل‌پذیر عیب پیشنهادی توانسته به خوبی اثر عیب عملگر را جبران و آن را در یک محدوده نگه دارد.

#### تشخیص عیب

در حالت عادی و بدون حضور عیب عملگر، تخمین تأخیر زمانی به‌عنوان یک تخمین‌گر عدم قطعیت عمل می‌کند. به منظور ایزوله‌سازی و تشخیص عیب، سیگنال مانده<sup>۱</sup> باید استخراج شود که برای سیستم توربین بادی مورد مطالعه در شکل ۱۰ نشان داده

اثرات شدید عیب عملگر را تحمل و در راستای جبران آنها تلاش کند. بارهای ناشی از خستگی که به هر مؤلفه توربین باد اعمال می‌شوند می‌توانند عمر آن مؤلفه را تحت تأثیر قرار دهند. ساختار کنترلی پیشنهادی توانسته به خوبی اثرات این بارها را کاهش دهد و از افزایش زیاد آنها بعد از اتفاق افتادن عیب جلوگیری کند. در ادامه بارهای حیاتی اعمالی به مولفه‌های اصلی توربین باد از قبیل نیروی محوری در ریشه پره و گشتاورهای پیچشی روی پره‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان مثال سری زمانی گشتاور پیچشی اعمالی به پره‌ها در شکل ۹ نشان داده شده است که حاوی تعداد بسیار زیادی

<sup>1</sup>Residual



شکل ۱۰. تشخیص عیب بر اساس مانده‌ها  
**Fig. 10. Fault detection based on residuals**

و معمولاً بصورت هیدرولیکی تحریک می‌شود. از اینرو، در این مقاله مساله عیب عملگر مورد توجه قرار گرفت و در این راستا دینامیک عیب در سیستم هیدرولیکی که شامل نشتی هیدرولیکی، خرابی پمپ و محتوی هوا در روغن به‌عنوان سیال عامل می‌باشد، در نظر گرفته شد. بدین منظور، ابتدا بر مبنای مدل دوجرمی توربین باد یک ساختار کنترل تحمل‌پذیر عیب به‌صورت ترکیب استراتژی مد لغزشی، رؤیتگر اغتشاش غیرخطی و تخمین تأخیر زمانی ارائه شد. به منظور کاهش پدیده چترینگ، رؤیتگر اغتشاش غیرخطی طراحی و با کنترل مد لغزشی ترکیب شد. از آنجایی که در واقعیت، سرعت روتور در دسترس نیست و نیاز به اندازه‌گیری دارد، تخمین سرعت روتور با استفاده از رؤیتگر مقاوم مد لغزشی فرایچشی انجام شد. با توجه به اهمیت و جایگاه تشخیص عیب در سیستم‌های توربین بادی،

شده‌اند. به منظور نشان دادن عملکرد مناسب سیستم تشخیص عیب پیشنهادی، نشتی هیدرولیکی که دارای دینامیک شدیدتری نسبت به خرابی پمپ و محتوی هوا در روغن سیستم هیدرولیک بوده، به‌عنوان عیب در نظر گرفته شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در لحظه اتفاق افتادن عیب، سیگنال مانده از محدوده آستانه‌های در نظر گرفته شده عبور کرده که نشان‌دهنده عملکرد موفق سیستم تشخیص عیب در تشخیص و محدودسازی عیب می‌باشد.

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله مسئله کنترل تحمل‌پذیر عیب برای سیستم توربین بادی در حضور عیب عملگر بررسی شد. توربین باد دارای زیرسیستم‌های مختلف می‌باشد که زیر سیستم زاویه پیچ یکی از مهم‌ترین آنها بوده

توربین بادی در معادله (پ-۱) با یک سیستم به فرم نرمال و با دینامیک صفر پایدار هم ارز است. به عبارت دیگر مشتق‌گیری از معادله (پ-۱) تضمین می‌کند که سیستم در تمامی نقاط کاری خود پایدار و غیر تکین است [۳۰-۳۱]. بنابراین با علم به این موضوع و با مشتق‌گیری از معادله (پ-۱) می‌توان نوشت

$$\ddot{x}_1 = L_f + L_g u + \Phi_r + \Delta_r \quad (\text{پ-۲})$$

که در آن  $L_f$  و  $L_g$  جمله‌های غیرخطی بوده [۳۲] و  $\Phi_r$  و  $\Delta_r$  بیانگر عیب و عدم قطعیت می‌باشند.

برای رسیدن به قانون کنترلی خطی‌سازی فیدبک، ورودی کنترلی مجازی

$$\ddot{x}_1 = v \quad (\text{پ-۳})$$

به گونه‌ای انتخاب می‌شود که دینامیک حلقه بسته خطا پایدار باشد. یعنی

$$v = \gamma_1 \dot{e} + \gamma_2 e \quad (\text{پ-۴})$$

در رابطه فوق  $\omega_r^* = \omega_r - e$  خطای پایدار سازی سرعت روتور و  $\omega_r^*$  بیانگر مقدار مرجع سرعت روتور می‌باشد.  $\gamma_1$  و  $\gamma_2$  پارامترهای کنترلی مثبت هستند. در نهایت قانون کنترلی به صورت زیر خواهد بود

$$u = \frac{1}{L_g} (\gamma_1 \dot{e} + \gamma_2 e - L_f) \quad (\text{پ-۵})$$

لازم به ذکر است که  $L_g$  به ازای تمامی نقاط کاری توربین بادی غیر صفر است [۳۲].

## ۲- کنترل کننده جدول‌بندی بهره

به علت غیر خطی‌های آئرو‌دینامیکی شدید توربین‌های بادی و سرعت باد متغیر با زمان در این سیستم‌ها، کنترل‌کننده تناسبی-

یک سیستم تشخیص عیب مناسب با استفاده از تئوری تخمین تأخیر زمانی طراحی شد. به منظور اعتبارسنجی، ساختار پیشنهادی در محیط شبیه‌ساز فست که حاوی یک مدل جامع و نزدیک به واقعیت از توربین باد می‌باشد، پیاده‌سازی شد. همچنین برای انجام مقایسه و نشان دادن برتری ساختار پیشنهادی، کنترل‌کننده‌های مبتنی بر خطی‌سازی فیدبک و روش تطبیقی جدول‌بندی بهره نیز طراحی شدند. مقایسه برای سه نوع عیب عملگر با دینامیک‌های مختلف انجام و در نمودار میله‌ای نتایج برای هر کنترل‌کننده نمایش داده شد که برتری ساختار پیشنهادی در خنثی کردن اثرات عیب، عدم قطعیت و نویز سنسور به وضوح دیده شد. علاوه بر این، دیده شد که ساختار پیشنهادی تغییرات ناگهانی بعد از اتفاق افتادن عیب در سیستم را به خوبی جبران کرده است. این مهم نه تنها در نمودار مربوط به سرعت روتور و توان ژنراتور، بلکه در نتایج مربوط به گشتاورهای وارده به هر پره و همچنین زاویه پیچ پره به وضوح دیده شد. از نقطه نظر ارزیابی تشخیص عیب، سیستم تشخیص عیب پیشنهادی به خوبی توانست وقوع عیب را در کمترین زمان ممکن تشخیص و اقدام به محدود کردن آن کند. بنابراین، می‌توان این‌چنین نتیجه گرفت که ساختار کنترل تحمل‌پذیر عیب فعال یک ساختار مناسب برای سیستم توربین باد در واقعیت می‌باشد چرا که در این ساختار از تئوری کنترل تأخیر زمانی که طبیعتی بدون نیاز به مدل دارد، بهره گرفته شده در نتیجه برای پیاده‌سازی واقعی آسان و مناسب می‌باشد.

## پیوست

### ۱- کنترل‌کننده خطی‌سازی فیدبک

در روش خطی‌سازی فیدبک، رابطه بین خروجی سیستم، یعنی سرعت روتور  $x_1 = v$  و ورودی سیستم، یعنی زاویه پیچ کنترلی  $u = \beta_r$  با مشتق‌گیری از خروجی تا زمانی که ورودی کنترلی ظاهر گردد، انجام می‌شود. با در نظر گرفتن معادله دینامیک روتور به صورت زیر:

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{J_r} \left( \frac{P_r(x_1, x_4, V)}{x_1} - x_1 D_s + \frac{x_2 D_s}{N_g} - x_3 K_s \right) \quad (\text{پ-۱})$$

می‌توان نشان داد که تبدیل دیفومورفیزمی وجود دارد که سیستم

### مراجع

- [1] B. Boukhezzer, L. Lupu, H. Siguerdidjane, M. Hand, Multivariable control strategy for variable speed, variable pitch wind turbines, *Renewable Energy*, 32(8) (2007) 1273-1287.
- [2] E. Muljadi, C. P. Butterfield, Pitch-controlled variable-speed wind turbine generation, *IEEE transactions on Industry Applications*, 37(1) (2001) 240-246.
- [3] S. Park, Y. Nam, Two LQRI based blade pitch controls for wind turbines, *Energies*, 5 (2012) 1998-2016.
- [4] A. Fakharzadeh, F. Jamshidi, L. Talebnezhad, New approach for optimizing energy by adjusting the trade-off coefficient in wind turbines, *Energy, sustain. Soc*, 13 (9) (2013) 1-8.
- [5] L. Pao, K. Johnson, A tutorial on the dynamics and control of wind turbines and wind farms, in: *Proc. American Contr. Conf., St. Louis, USA*, (2009) 2076-2089.
- [6] V. Makvana, R. Ahir, D. Patel, J. Jadhav, Study of PID controller based pitch actuator system for variable speed HAWT using matlab, *Int. J. Innova. Res. Sci. Eng. Tech.*, 2 (5) (2013) 1496-1504.
- [7] Y. Kim, H. Chung, S. Moon, Tuning of the PI controller parameters of a PMSG wind turbine to improve control performance under various wind speeds, *Energies*, 8 (2015) 1406-1425.
- [8] Song, Y. D., Dhinakaran, B., & Bao, X. Y. Variable speed control of wind turbines using nonlinear and adaptive algorithms. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 85(3) (2000) 293-308.
- [9] Bossanyi, E. A. Individual blade pitch control for load reduction. *Wind energy*, 6(2) (2003) 119-128.
- [10] Sandquist, F., Moe, G., & Anaya-Lara, O. Individual pitch control of horizontal axis wind turbines. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 134(3) (2012).
- [11] Yin, X. X., Lin, Y. G., Li, W., & Gu, Y. J.. Integrated pitch control for wind turbine based on a novel pitch control system. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 6(4) (2014).

انتگرالی-مشتقی که از یک سری ضرایب بهینه شده ثابت استفاده می‌کند، نمی‌تواند عملکرد بهینه قابل قبولی را هنگامی که نقطه کاری توربین تغییر کند، داشته باشد. به منظور مقابله با این مسئله در این مقاله یک کنترل‌کننده تطبیقی به روش جدول‌بندی بهره پیشنهاد شده است.

یک کنترل‌کننده تطبیقی به روش جدول‌بندی بهره نیاز به اندازه‌گیری سرعت باد برای تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده دارد. یکی از مواردی که به ذهن می‌رسد استفاده از داده‌های به دست آمده از یک باد سنج نصب شده روی ناسل است. اما این بادسنج تنها می‌تواند سرعت باد را در یک نقطه خاص اندازه‌گیری کند که در توربین‌های بادی بزرگ برای دستیابی به سرعت باد مؤثر دقیق نیست. برای دستیابی به یک پیش‌بینی دقیق‌تر سرعت باد مؤثر، خود سرعت باد می‌تواند به عنوان یک سنسور استفاده شده و پیش‌بینی دقیق‌تر سرعت باد می‌تواند با حل روش نیوتون-رافسون به دست آید.

از آنجایی که استفاده از روش پیش‌بینی ذکر شده در بالا نیازمند یک پیش‌بینی پیچیده به‌هنگام سرعت باد دارد و ممکن است به علت تغییرات سریع سرعت باد منجر به سوچینگ سریع بین پارامترها شود، یک کنترل‌کننده جدول‌بندی بهره بهبود یافته بر پایه سوچینگ زاویه پیچ پیشنهاد شده است. به منظور دستیابی به یک سوچینگ پیوسته بر پایه زاویه پیچ، پارامتر جدول‌بندی شده به‌صورت حاصل ضرب پارامترهای ثابت کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی با یک پارامتر جدول‌بندی با نام  $K(\beta)$  که تابعی از زاویه پیچ است، بدست آمده است. پارامتر جدول‌بندی شده  $K(\beta)$  برای جبران تغییرات حساسیت آئروپنایمیک،  $\frac{\partial P_r}{\partial \beta}$ ، پیشنهاد شده است [۳۵]

$$u = K(\beta) \left[ k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \right] (\omega_r - \omega_r^*) \quad (\text{پ-۶})$$

که در آن

$$K(\beta) = \begin{cases} 1.6 & -1 < \beta < 0 \\ 0.001\beta^2 + 0.01\beta + 1.6 & 0 < \beta < 30 \\ 1 & \beta > 30 \end{cases} \quad (\text{پ-۷})$$

- tolerant control of wind turbines with an adaptive output feedback sliding mode controller”, *Renewable energy*, 135 (2019) 55-65.
- [23] Y. Vidal, C. Tutivén, J. Rodellar, L. Acho, “Fault diagnosis and fault-tolerant control of wind turbines via a discrete time controller with a disturbance compensator”, *Energies*, 8(5) (2015) 4300-4316.
- [24] Habibi, Hamed, Hamed Rahimi Nohooji, and Ian Howard. “Adaptive PID control of wind turbines for power regulation with unknown control direction and actuator faults.” *IEEE Access* 6 (2018) 37464-37479.
- [25] C. Sloth, T. Esbensen, and J. Stoustrup, “Robust and fault-tolerant linear parameter-varying control of wind turbines,” *Mechatronics*, 21(4) (2011) 645–659.
- [26] M. Sami and R. J. Patton, “Fault tolerant adaptive sliding mode controller for wind turbine power maximisation,” in *Proceedings of the 7th IFAC Symposium on Robust Control Design*, Aalborg, Denmark, 2012.
- [27] Lee, Hoon, and Vadim I. Utkin. “Chattering suppression methods in sliding mode control systems.” *Annual reviews in control* 31(2) (2007) 179-188.
- [28] D. Malcolm, A. Hansen, *WindPACT Turbine Rotor Design Study*, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, 2003.
- [29] J. Carroll, A. McDonald, D. McMillan, Failure rate, repair time and unscheduled O&M cost analysis of offshore wind turbines, *Wind Energy* 19(6) (2016) 1107-1119.
- [30] A. Kumar, K. Stol, Simulating Feedback Linearization control of wind turbines using high-order models, *Wind Energy*, 13(5) (2010) 419-432.
- [31] S. C. Thomsen, Nonlinear control of a wind turbine, Thesis, Technical University of Denmark, DTU, DK-2800 Kgs. Lyngby, Denmark, (2006).
- [32] Y. Ren, L. Li, J. Brindley, L. Jiang, Nonlinear PI control for variable pitch wind turbine, *Control Engineering Practice*, 50 (2016) 84-94.
- [33] W.-H. Chen, J. Yang, L. Guo, S. Li, Disturbance-observer-based control and related methods—an overview, *IEEE Trans. Ind. Electron.* 63 (2) (2016) 1083–1095.
- [34] W.-H. Chen, Nonlinear disturbance observer-enhanced
- [12] Yin, X. X., Lin, Y. G., Li, W., Liu, H. W., & Gu, Y. J. Adaptive sliding mode back-stepping pitch angle control of a variable-displacement pump controlled pitch system for wind turbines. *ISA transactions*, 58 (2015) 629-634.
- [13] Lescher F, Zhao JY, Borne P, Robust gain scheduling controller for pitch regulated variable speed wind turbine. *Stud Inform Control* 14 (2005) 299–315.
- [14] Bianchi, F. D., Mantz, R. J., & Christiansen, C. F. (2005). Gain scheduling control of variable-speed wind energy conversion systems using quasi-LPV models. *Control Engineering Practice*, 13(2) 247-255.
- [15] Beltran, B., Ahmed-Ali, T., & Benbouzid, M. E. H. Sliding mode power control of variable-speed wind energy conversion systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23(2) (2008) 551-558.
- [16] Assareh, E., & Biglari, M. A novel approach to capture the maximum power from variable speed wind turbines using PI controller, RBF neural network and GSA evolutionary algorithm. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51 (2015) 1023-1037.
- [17] Rahimi, M. Drive train dynamics assessment and speed controller design in variable speed wind turbines. *Renewable Energy*, 89 (2016) 716-729.
- [18] H. Moradi, G. Vossoughi, Robust control of the variable speed wind turbines in the presence of uncertainties: A comparison between  $H_\infty$  and PID controllers, *Energy*, 90 (2015) 1508-1521.
- [19] Fazlollahi, V., & Taghizadeh, M. Modelling and design of dynamic feedback controller with wind speed estimator, in variable speed wind turbines. *Modares Mechanical Engineering*, 16(4) (2016) 361-371 (in persian).
- [20] Y. Ait El Maati, L. El Bahir, K. Fatah, “Fault Tolerant Control of Internal Faults in Wind Turbine: Case Study of Gearbox Efficiency Decrease”, *International Journal of Rotating Machinery*, 2018.
- [21] K. S. Xiahou, Y. Liu, M. S. Li, and Q. H. Wu, “Sensor fault-tolerant control of DFIG based wind energy conversion systems”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 117 (2020) 55-63.
- [22] A. Azizi, H. Nourisola, S. Shoja-Majidabad, “Fault

- Industrial electronics, 58(1) 57-65 (2011).
- [36] K. Youcef-Toumi and O. Ito, "A time delay controller for systems with unknown dynamics," J. Dyn. Syst. Meas. Control, 112(1) (1990) 133-142.
- [37] Y. Shtessel, C. Edward, L. Fridman, A. Levant, Sliding Mode Control and Observation, Springer, (2014).
- dynamic inversion control of missiles, J. Guid. Control Dyn. 26(1) (2003) 161-166.
- [35] E. B. Muhando, T. Senjyu, A. Uehara, T. Funabashi, Gain-Scheduled  $H^\infty$  Control for WECS via LMI Techniques and Parametrically Dependent Feedback Part II: Controller Design and Implementation, IEEE Transactions on

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Mazare, M. Taghizadeh, Active Fault Tolerant Control of Wind Turbine Systems using Disturbance Observer-based Sliding Mode and Time Delay Estimation, Amirkabir J. Mech Eng., 53(8) (2021) 4517-4534.

DOI: [10.22060/mej.2021.18529.6834](https://doi.org/10.22060/mej.2021.18529.6834)

