

## بازیابی مقاوم عیب سنسوری در توربین بادی در حضور نامعینی و اغتشاش: رویکرد مشاهده گر مد لغزشی تطبیقی

اشکان طاهرخانی<sup>۱</sup>، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ فرهاد بیات<sup>۲</sup>، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی - گروه برق - دانشگاه زنجان - زنجان - ایران - ashkantaherkhani7@gmail.com

۲- دانشکده مهندسی - گروه برق - دانشگاه زنجان - زنجان - ایران - bayat.farhad@znu.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله، روشی برای بازیابی مقاوم سیگنال عیب سنسوری در حضور اغتشاش و نامعینی برای سیستم توربین بادی ارائه شده است. برای این منظور، مشاهده گر مد لغزشی تطبیقی به گونه ای طراحی شده است که عیب رخ داده از طریق یک قانون تطبیق برخط بازیابی شود. اهمیت روش پیشنهادی در آن است که علاوه بر مقاوم بودن در برابر اغتشاش و نامعینی های موجود، نیازی به مشخص بودن کران سیگنال عیب و عدم قطعیت وجود ندارد و صرفاً کران دار بودن آن ها برای دستیابی به اهداف کافی است. یک الگوریتم مؤثر برای تعیین پارامترهای طراحی با تکیه بر مفهوم نامساوی های ماتریسی خطی (LMI) ارائه شده است. روش پیشنهادی برای یک سیستم توربین بادی ۵ مگاوات اعمال و نتایج شبیه سازی صحت و عملکرد مطلوب روش ارائه شده را نشان می دهند.

**واژه های کلیدی:** توربین بادی، مشاهده گر مد لغزشی تطبیقی، بازیابی عیب.

## Robust sensor Fault Reconstruction of Wind Turbine in the Presence of Uncertainty and Disturbance: Adaptive Sliding Mode Observer Approach

A. Taherkhani<sup>1</sup>, MSc student; F. Bayat<sup>2</sup>, Associate professor

1- Department of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran, Email: ashkantaherkhani7@gmail.com

2- Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran, Email: bayat.farhad@znu.ac.ir

**Abstract:** In this paper, an approach for robust sensor fault reconstruction of wind turbine systems in the presence of simultaneous uncertainty and disturbance is proposed. For this purpose, an adaptive sliding mode observer is designed such that the fault is reconstructed through an online adaptive law. The significance of the proposed approach in addition to its robustness against the bounded disturbances and uncertainties is that it does not require the fault and uncertainty bounds to be known a priori. An efficient algorithm is presented to adjust the design parameters based on the Linear Matrix Inequality (LMI) concept. The proposed approach is applied to a 5MWs wind turbine system and simulation results demonstrate the accuracy and desirable performance of the approach.

**Keywords:** Wind turbine, adaptive sliding mode observer, fault reconstruction.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۱۵

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۰۳

نام نویسنده مسئول: فرهاد بیات

نشانی نویسنده مسئول: ایران - زنجان - دانشگاه زنجان - دانشکده مهندسی - گروه برق.

## ۱- مقدمه

و توانایی آن در بازیابی عیب در حضور اغتشاش و عدم قطعیت، بیش از سایر روش‌ها مورد توجه مهندسين و محققين قرار گرفته است. رویکرد مد لغزشی از تئوری‌های بسیار محبوب و پرکاربرد در زمینه کنترل مقاوم است که در برابر نامعینی‌ها و اغتشاشات مختلف وارد شده به سیستم مقاومت دارد؛ لذا در سیستم توربین بادی که در معرض نامعینی‌های سیستمی و محیطی قرار دارد، انتخاب چنین مشاهده‌گری جهت بازیابی سیگنال عیب بسیار مناسب است.

از سوی دیگر، تشخیص و شناسایی عیب با رویکرد تطبیقی در ترانسفورماتورها با استفاده از روش خط انتقال TLM در [۹] عنوان شده است. در این مرجع از مدل هیستریزس استفاده شده است. برای این منظور جهت تشخیص عیب از مشاهده‌گر تطبیقی و جهت شناسایی، از تکنیک تطبیقی فازی بهره گرفته شده است. در [۱۰] برای تشخیص و شناسایی عیب هم در سیستم تک-ورودی تک-خروجی و هم در سیستم چند-ورودی چند-خروجی از دو مشاهده‌گر، یکی مشاهده‌گر تشخیص ثابت و دیگری مشاهده‌گر شناسایی تطبیقی و برای پیدا کردن یک الگوریتم تطبیقی، از فرم جدید معادله عیب مشاهده‌گر استفاده شده است. با استفاده از تکنیک تخمین تطبیقی برای کلاسی از سیستم‌های غیرخطی دارای نامعینی یک رویکرد مقاوم جهت تشخیص و شناسایی عیب در [۱۱] ارائه شده است. همچنین از روش ارائه‌شده برای پایداری و ایزوله‌سازی عیب در یک بازوی ربات تک‌محوره استفاده شده است. در مرجع [۱۲] سیستم غیرخطی، غیرآقین و دارای نامعینی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مرجع تشخیص و شناسایی عیب مبتنی بر استراتژی پایداری فیدبک خروجی و استفاده از مشاهده‌گر غیرخطی کلاس لیونبرگر بحث شده است. همچنین نشان داده شده است که با استفاده از رویکرد مطرح‌شده، عیب‌های مربوط به اجزا و عملگر سیستم را می‌توان مورد تشخیص و شناسایی قرارداد. در مرجع [۱۳] از ترکیب دو مشاهده‌گر مد لغزشی جهت تخمین ورودی‌های نامعلوم و عیب استفاده شده است. مهم‌ترین ویژگی روش ارائه‌شده در این مرجع آن است که مسیرهای حالت، سطح لغزش را در حضور اغتشاش و عیب ترک نمی‌کنند و بنابراین پاسخ مقاومی را فراهم می‌کند. در [۱۴] مشاهده‌گر عیب تطبیقی برای زیرسیستم انتقال در یک سیستم مبدل انرژی بادی با ورودی‌های مجهول و دارای اغتشاش ارائه شده است. از این رو، ابتدا مدل‌سازی سیستم با فرض سرعت متغیر و پره‌های ثابت ارائه شده و سپس مشاهده‌گر عیب تطبیقی در فضای حالت طراحی شده است. در انتها، کنترل‌کننده تحمل‌پذیر عیب مبتنی بر فیدبک حالت طراحی شده است. در این مرجع سیستم کلی توربین بادی در نظر گرفته نشده است و فقط سیستم انتقال در نظر گرفته شده و همچنین سیستم بدون پارامترهای عدم قطعیت مدل شده است.

در این مقاله، ابتدا به مدل‌سازی حالت نرمال یک توربین بادی ۵ مگاواتی پرداخته می‌شود. سپس با اضافه کردن عوامل نامعینی، اغتشاش و عیب‌های سنسوری به مدل به دست آمده به تبیین و ارائه

امروزه کاهش چشمگیر سوخت‌های فسیلی به موازات استفاده بی‌رویه از آن‌ها و همچنین مشکل تولید آلودگی‌های زیست‌محیطی توسط این سوخت‌ها، انسان را برای دستیابی به یک منبع تجدیدپذیر، تمام‌نشدنی و سازگار با محیط‌زیست ترغیب کرده است. این منابع که دسترسی به آن‌ها ساده و همچنین مقدار آن‌ها نامحدود است شامل انرژی بادی، آبی، خورشیدی، زمین‌گرمایی و غیره بوده که به سبب عدم ایجاد آلودگی برای محیط‌زیست به انرژی‌های پاک معروف شده‌اند. یکی از مهم‌ترین انواع انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی باد است که از دیرباز مورد توجه و استفاده بشر بوده است. در گذشته، از این نوع انرژی جهت به حرکت درآوردن قایق‌ها، کشتی‌های بادبانی و آسیاب‌های بادی استفاده می‌شد. در سال‌های اخیر و با توجه به توجه به پذیرایی اقتصادی این انرژی، پرداختن به آن در سطح وسیع صنعتی مورد توجه قرار گرفته است. توربین‌های بادی به دلیل خاصیت ذاتی نوسانی و تغییرپذیری در باد، سیستم‌هایی پیچیده و دارای دینامیک‌های غیرخطی هستند [۱].

[۲] با رشد روزافزون صنعت توربین بادی، مهندسان، جهت نظارت بیشتر بر وضعیت این سیستم‌ها و ارزیابی سلامت آن‌ها ترغیب شده‌اند. همانند هر سیستم فنی در دنیای واقعی، توربین‌های بادی نیز با گذشت زمان با عیب‌هایی در زیربخش‌های مختلف آن مواجه می‌شوند. به‌طور کلی هر توربین بادی به دلیل همین عیب‌ها در بازه مشخصی از سال در شرایط خاموشی قرار می‌گیرد. این خاموشی‌ها اغلب ناشی از آسیب‌های نصب و راه‌اندازی، نقص‌های هنگام ساخت یا اثرات کهنگی، آلودگی محیطی و بارگذاری شدید توسط دستگاه توربین بادی است [۳].

از جمله مهم‌ترین و شاید پرتکرارترین عیب‌هایی که در یک سیستم توربین بادی رخ می‌دهد، می‌توان به عیب سنسورهای نصب‌شده بر روی توربین اشاره کرد. عیب‌هایی که ممکن است عملکرد صحیح سیستم را تحت‌الشعاع قرار داده و حتی در بدترین حالت موجب خسارات شدید اقتصادی به کل سیستم توربین بادی شوند. بنابراین، استفاده از روش‌های کارآمد بازیابی سیگنال عیب سنسورها، می‌تواند موجب افزایش مقاومت و قابلیت اطمینان سیستم شده و در نتیجه از اضمحلال و فرسودگی آن در مرور زمان جلوگیری به عمل آورد. با توجه به پیچیدگی‌های موجود در دینامیک سیستم‌های غیرخطی و وجود منابع متعدد عیب سنسوری، اساساً فرایند تشخیص و بازیابی سیگنال عیب امری چالش‌برانگیز و دشوار است. این دشواری در شرایطی که سیستم مورد نظر شامل پارامترها و دینامیک‌های نامعین باشد، دشوارتر هم خواهد شد. تاکنون روش‌های مختلفی برای تشخیص و بازیابی سیگنال عیب در مراجع مختلف ارائه شده است. رویکرد پارامترهای متغیر خطی [۴]، طراحی فیلتر کالمن جهت بازیابی سیگنال عیب [۵، ۶]، رویکردهای تطبیقی در شناسایی عیب [۷، ۸]، روش مشاهده‌گر مد لغزشی و مشاهده‌گر مد لغزشی تطبیقی [۵] از جمله این روش‌ها است. در میان روش‌های موجود، استفاده از مشاهده‌گر مد لغزشی به سبب مقاوم بودن در برابر نامعینی‌های فرآیند

به انرژی جنبشی در پره‌های توربین بادی است. سپس این انرژی از طریق سیستم انتقال قدرت به ژنراتور منتقل و در آنجا به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. توان و گشتاور آیرودینامیکی توربین بادی به صورت معادلات (۱) و (۲) است [۱۸].

$$P_r(v, \beta, \Omega_r) = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

$$T_r(v, \beta, \Omega_r) = P_r(v, \beta, \Omega_r) / \Omega_r \quad (2)$$

که در معادلات فوق،  $P_r$  توان آیرودینامیکی،  $T_r$  گشتاور آیرودینامیکی،  $\rho$  چگالی هوا،  $R$  شعاع پره توربین،  $v$  سرعت باد و  $\beta$  زاویه پیچش پره است. همچنین  $C_p(\lambda, \beta)$  ضریب کارایی توان توربین بادی است که به صورت معادله زیر است:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.1576 \times \left( \frac{116}{\lambda_4} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_4}} \quad (3)$$

که در آن  $\lambda$  نسبت سرعت نوک پرها است و در معادله (۴) آورده شده است و  $\lambda_4$  که خود تابعی از  $\lambda$  است، در معادله (۵) مشخص شده است.

$$\lambda = \frac{\Omega_r R}{v} \quad (4)$$

$$\frac{1}{\lambda_4} = \frac{1}{\lambda^{-1} + 0.8\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (5)$$

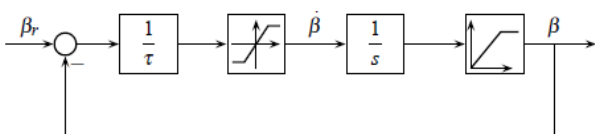
که در معادله (۴)، متغیر  $\Omega_r$  معرف سرعت زاویه‌ای روتور است.

## ۲-۲- مدل زیرسیستم کنترل زاویه پیچش

در این مقاله از روش الکترومکانیکی با توجه به گستردگی بیشتر آن در صنعت، برای مدل‌سازی زیرسیستم کنترل زاویه پیچش استفاده شده است. در شکل ۱ نمایش زیرسیستم کنترل زاویه پیچش توربین بادی آورده شده است. این مدل توسط رابطه (۶) قابل توصیف است.

$$\dot{\beta} = -\frac{1}{\tau} \beta + \frac{1}{\tau} \beta_d \quad (6)$$

که در آن  $\beta$  زاویه پیچش پرها است که زاویه بین تیغه پرها و صفحه چرخش روتور تعریف می‌شود،  $\beta_d$  زاویه پیچش تقاضاشده (مطلوب) بوده است و  $\tau$  ثابت زمانی مربوط به سرو سیستم مورد استفاده است.



شکل ۱: مدل زیرسیستم کنترل زاویه پیچش.

راهکاری جهت بازیابی مؤثر و مقاوم سیگنال عیب پرداخته می‌شود. از آنجایی که به علت‌های مختلف از جمله عیب‌های اندازه‌گیری، مدل‌سازی سیستم‌ها دقیق نیستند، در نظر گرفتن پارامترهای نامعینی در سیستم‌های مختلف می‌تواند مدل دقیق‌تر و واقعی‌تری از سیستم را نشان دهد. البته وجود این پارامترها در سیستم، نیاز به استفاده از روش‌های کنترل مقاوم را می‌طلبد که به خودی خود طراحی‌های کنترلی را پیچیده‌تر خواهد کرد.

عیب‌های سنسوری که در این مقاله بررسی می‌شوند، عیب‌های رخ داده در سیستم کامل توربین بادی هستند که تحت تأثیر عوامل تخریب یعنی اغتشاش و نامعینی‌ها قرار دارد. در مراجع اشاره شده، سیستم‌هایی که مورد ارزیابی واقع شده‌اند، چه سیستم‌های خطی و چه سیستم‌های غیرخطی همچون توربین بادی، اثر نامعینی و اغتشاش را به صورت توأمان در سیستم بررسی نکرده‌اند. در [۱۴] تنها یک قسمت از توربین بادی با در نظر گرفتن اغتشاش و عیب مدل شده و اثر نامعینی در نظر گرفته نشده است. در [۱۵] عیب در سیستم توربین بادی و در حضور اغتشاش تخمین زده شده است. در این مقاله از دو رویکرد تخمین حالت و رویکرد تطبیقی جهت تخمین عیب‌ها استفاده شده است. در اینجا عوامل نامعینی در سیستم وجود ندارند. در [۱۶] جهت بازیابی عیب در سنسور و عملگر سیستم توربین بادی از مشاهده‌گر انتگرالی تناسبی بهره گرفته شده است. در اینجا مشاهده‌گر با دو رویکرد متفاوت طراحی شده است. یکی از این رویکردها استفاده از روش لیاپانف و دیگری استفاده از تنظیم‌کننده خطی مرتبه دو اصلاح شده است. در [۱۷] جهت بازیابی عیب عملگر از مشاهده‌گر تطبیقی با پارامتر متغیر استفاده شده است. در اینجا از مدل یک سیستم توربین بادی ۴/۸ مگاواتی در حضور اغتشاش استفاده شده است که در آن از عوامل نامعینی در سیستم چشم‌پوشی شده است.

ساختار این مقاله به این صورت تنظیم شده است که در بخش دوم به بیان روابط حاکم بر یک توربین بادی پرداخته و مدل‌سازی زیرسیستم‌های آن بیان می‌شوند و سپس با در نظر گرفتن عوامل نامعینی و عیب یک مدل فضای حالت در حضور اغتشاش، نامعینی و عیب سنسوری به دست می‌آید. در بخش سوم به ارائه یک مشاهده‌گر مد لغزشی تطبیقی پرداخته و طراحی به‌گونه‌ای انجام می‌شود که سیگنال بازیابی‌شده بدون نیاز به دانستن مقدار حد بالای سیگنال عیب، با استفاده از یک قانون تطبیق برخط به دست می‌آید. در بخش چهارم، سیگنال عیب سنسوری بازیابی می‌شود. در بخش پنجم، نتایج شبیه‌سازی برای یک سیستم توربین بادی ۵ مگاواتی ارائه شده و صحت طراحی و روش پیشنهادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در نهایت در بخش ششم به نتیجه‌گیری پرداخته می‌شود.

## ۲- مدل‌سازی توربین بادی

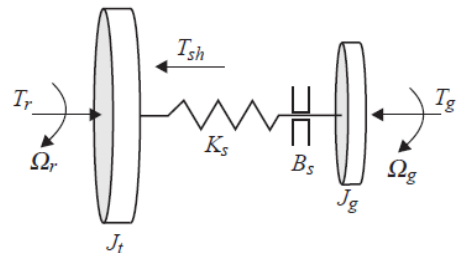
### ۱-۲- مدل آیرودینامیکی

مهم‌ترین عملکرد توربین بادی مربوط به رفتار آیرودینامیک آن است [۱۸، ۱۹]. رفتار آیرودینامیکی توصیف‌کننده چگونگی تبدیل انرژی باد

۳-۲- مدل نیروی محرکه<sup>۱</sup>

دیاگرام شماتیک مدل دو-جرمی مربوط به زیرسیستم نیروی محرکه به صورت شکل ۲ است و مدل دینامیکی و ساده این مدل نیز به صورت معادله (۷) است [۱۸].

$$\begin{aligned} \dot{\Theta} &= \Omega_r - \frac{\Omega_g}{N_g} \\ J_t \dot{\Omega}_r &= T_r - T_{sh} \\ J_g \dot{\Omega}_g &= \frac{T_{sh}}{N_g} - T_g \end{aligned} \quad (7)$$



شکل ۲: ساختار مدل نیروی محرکه توربین بادی

که در معادله (۷)،  $\Theta$  زاویه پیچش،  $\Omega_r$  (rpm) سرعت روتور و  $\Omega_g$  (rpm) سرعت ژنراتور، متغیرهای حالت هستند. متغیرهای مدل  $T_g$  و  $T_{sh} = K_s \Theta + B_s (\Omega_r - \Omega_g)$  هستند که به ترتیب گشتاور ژنراتور و گشتاور شفت برحسب  $Nm$  می‌باشند. پارامترهای مدل شامل اینرسی ترکیب هاب و تیغه‌ها  $J_t$  ( $kgm^2$ )، اینرسی ژنراتور  $J_g$  ( $kgm^2$ ) و نسبت جعبه‌دنده  $N_g$  هستند. همچنین ضریب سختی شفت  $K_s$  ( $KN/r$ ) و ضریب میرایی  $B_s$  ( $KNm/(r/s)$ ) هستند.

شایان‌ذکر است که معادلات دینامیک نیرومحرکه که در معادله (۷) آمده است به شدت غیرخطی هستند که این مسئله ناشی از گشتاور آیرودینامیکی در معادله (۲) و وجود ضریب کارایی توان در این معادله است.

رویکرد معمول در بسیاری از مراجع موجود برای سهولت طراحی و بحث در روش کنترل مورد استفاده، تعیین یک مدل خطی برای توصیف رفتار توربین بادی است. جهت رسیدن به مدل خطی‌سازی شده، ابتدا گشتاور آیرودینامیکی را می‌بایست حول نقطه تعادل آن خطی‌سازی کرد. در نتیجه:

$$\begin{aligned} \hat{T}_r(\bar{v}, \bar{\beta}, \bar{\Omega}_r) &= B_r(\bar{v}, \bar{\beta}, \bar{\Omega}_r) \hat{\Omega}_r \\ &+ k_v(\bar{v}, \bar{\beta}, \bar{\Omega}_r) \hat{v} + k_\beta(\bar{v}, \bar{\beta}, \bar{\Omega}_r) \hat{\beta} \end{aligned} \quad (8)$$

که در معادله بالا پارامترها به صورت زیر تعریف شده‌اند:

$$\begin{aligned} B_r(\bar{v}, \bar{\beta}, \bar{\Omega}_r) &= \frac{\partial T_r}{\partial \Omega_r} \bigg|_{(\bar{v}, \bar{\beta}, \bar{\Omega}_r)} \\ k_v(\bar{v}, \bar{\beta}, \bar{\Omega}_r) &= \frac{\partial T_r}{\partial v} \bigg|_{(\bar{v}, \bar{\beta}, \bar{\Omega}_r)} \\ k_\beta(\bar{v}, \bar{\beta}, \bar{\Omega}_r) &= \frac{\partial T_r}{\partial \beta} \bigg|_{(\bar{v}, \bar{\beta}, \bar{\Omega}_r)} \end{aligned} \quad (9)$$

با جایگزینی معادله (۹) در معادله (۸) و همچنین با افزودن مدل خطی زیرسیستم کنترل زاویه پیچش، مدل خطی‌سازی شده برای سیستم توربین بادی مطابق معادله زیر به دست می‌آید:

$$\dot{x} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & -\frac{1}{N_g} & 0 \\ -\frac{K_s}{J_r} (B_r(\bar{v}, \bar{\beta}, \bar{\Omega}_r) - B_s) & B_s & k_\beta(\bar{v}, \bar{\beta}, \bar{\Omega}_r) & \\ \frac{K_s}{J_g N_g} & \frac{B_s}{J_g N_g} & -\frac{B_s}{J_g N_g^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix}}_{A_w} x \quad (10)$$

$$+ \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ k_v(\bar{v}, \bar{\beta}, \bar{\Omega}_r) & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J_g} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\tau} \end{bmatrix}}_{B_w} \begin{bmatrix} \hat{v} \\ T_g \\ \hat{\beta}_d \end{bmatrix}$$

که در معادله بالا،  $x = [\hat{\Theta} \quad \hat{\Omega}_r \quad \hat{\Omega}_g \quad \hat{\beta}]^T$  بردار حالت و سیگنال  $\hat{v}$  که سرعت باد است به عنوان اغتشاش در نظر گرفته می‌شود. همچنین  $u = [\hat{\beta}_d \quad T_g]$  ورودی‌های کنترلی هستند. در اینجا، سرعت ژنراتور، سرعت روتور و موقعیت زاویه پیچش به عنوان خروجی در نظر گرفته شده‌اند و به این ترتیب معادله خروجی توربین بادی مطابق معادله زیر تعیین می‌شود:

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\Theta} \\ \hat{\Omega}_r \\ \hat{\Omega}_g \\ \hat{\beta} \end{bmatrix} \quad (11)$$

<sup>1</sup> Drive Train

## ۴-۲- مدل اغتشاش

همان‌طور که در بخش قبلی گفته شد، سیگنال  $\hat{v}$  که سرعت باد است به‌عنوان اغتشاش در نظر گرفته می‌شود. جهت بررسی ساده‌تر

مشاهده‌گر و طراحی‌های صورت‌گرفته، می‌توان  $B_w \begin{bmatrix} \hat{v} \\ T_g \\ \beta_d \end{bmatrix}$  را

به‌صورت معادله زیر نوشت که در آن اغتشاش از ورودی کنترلی جدا شده است:

$$B_w \begin{bmatrix} \hat{v} \\ T_g \\ \beta_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ k_v(\bar{v}, \bar{\beta}, \bar{\Omega}_r) & 0 & 0 \\ J_r & -\frac{1}{J_g} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\tau} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v} \\ T_g \\ \beta_d \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{1}{J_g} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_g \\ \beta_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ k_v(\bar{v}, \bar{\beta}, \bar{\Omega}_r) \\ J_r \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \hat{v}$$

به‌این‌ترتیب اغتشاش در معادله توربین بادی با ماتریس مجزا آورده خواهد شد.

## ۴-۵- مدل نامعینی‌ها

در معادله (۱۰) به‌دلیل دقیق‌نبودن فرایند اندازه‌گیری و یا انحرافات ناخواسته موجود، نامعینی در سیستم وجود دارد. این نامعینی ممکن است از اختلاف بین مقادیر قابل‌اندازه‌گیری پارامترهای موجود در سیستم با استفاده از وسایل اندازه‌گیری و مقادیر واقعی این پارامترها ایجاد شود. لذا در معادله کامل توربین بادی، برآیند تمام این نامعینی‌ها به‌همراه ماتریس توزیع آن مدل خواهد شد.

## ۴-۶- مدل‌سازی عیب سنسوری

در این مقاله، عیب‌های رخ‌داده در سنسورهای سرعت ژنراتور و سرعت روتور و همچنین عیب سنسور موقعیت زاویه پیچش در نظر گرفته شده‌اند. این عیب‌ها در خروجی سیستم مدل خواهند شد لذا مدل خروجی فضای حالت سیستم که در معادله (۱۱) آورده شده است به‌همراه عیب‌های سنسوری به‌صورت معادله زیر قابل‌بازنویسی می‌باشد:

$$y = \begin{bmatrix} \hat{\Omega}_{r,m} \\ \hat{\Omega}_{g,m} \\ \hat{\beta}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta} \\ \hat{\Omega}_r \\ \hat{\Omega}_g \\ \hat{\beta} \end{bmatrix} + F \begin{bmatrix} f_{\hat{\Omega}_r} \\ f_{\hat{\Omega}_g} \\ f_{\hat{\beta}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

که در آن،  $\hat{\Omega}_{r,m}$  سرعت اندازه‌گیری‌شده روتور،  $\hat{\Omega}_{g,m}$  سرعت اندازه‌گیری‌شده ژنراتور و  $\hat{\beta}_m$  زاویه اندازه‌گیری‌شده موقعیت زاویه پیچش است. همچنین،  $F$  ماتریس توزیع عیب سنسوری،  $f_{\hat{\Omega}_r}$  عیب سنسور سرعت روتور،  $f_{\hat{\Omega}_g}$  عیب سنسور سرعت ژنراتور و  $f_{\hat{\beta}}$  عیب سنسور موقعیت زاویه پیچش است.

## ۳- طراحی مشاهده‌گر بر پایه مد لغزشی تطبیقی

هدف از به‌کارگیری مشاهده‌گر، تخمین حالت‌های غیرقابل‌اندازه‌گیری سیستم، با استفاده از ورودی‌ها و خروجی‌های اندازه‌گیری‌شده همان سیستم است. توانایی در طراحی یک دینامیک لغزش مناسب بر روی سیگنال خطا (بین خروجی فرآیند اندازه‌گیری‌شده و خروجی مشاهده‌گر)، می‌تواند تضمین کند که مشاهده‌گر مد لغزشی مجموعه‌ای از حالت‌های تخمینی را تولید می‌کند که دقیقاً با خروجی واقعی فرآیند یکسان است. با بهره‌گیری از مدل‌سازی‌های بیان‌شده، معادله کامل توربین بادی را می‌توان به‌فرم معادله زیر در نظر گرفت:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + M\xi(t, y, u) + D\hat{v} \quad (14)$$

$$y(t) = Cx(t) + Ff_s(t)$$

که در آن  $x(t)$  حالت‌های سیستم،  $u(t)$  سیگنال ورودی کنترلی،  $\xi(t, y, u)$  برآیند تمام نامعینی‌ها،  $\hat{v}$  سرعت باد،  $y(t)$  خروجی سیستم و  $f_s(t)$  سیگنال عیب متغیر بازمان سنسور هستند. همچنین  $A \in R^{n \times n}$  ماتریس حالت،  $B \in R^{n \times m}$  ماتریس ورودی کنترلی،  $M \in R^{n \times k}$  ماتریس توزیع نامعینی،  $D \in R^{n \times k}$  ماتریس اغتشاش،  $C \in R^{p \times n}$  ماتریس خروجی و  $F \in R^{p \times s}$  ماتریس توزیع عیب سنسوری هستند. در اینجا فرض می‌شود که تمام ماتریس‌های بیان‌شده، نامتغیر بازمان هستند. همچنین فرض می‌شود که  $n > p$  و  $p \geq s$  است.

با توجه به اینکه عیب سنسوری صرفاً در معادله خروجی ظاهر شده و اثر آن بر دینامیک حالت غیرمستقیم است، لذا جهت ساده‌کردن فرآیند طراحی، ابتدا با کمک یک تبدیل حالت جدید  $z_f$  معادله (۱۴) به سیستمی تبدیل می‌شود که در آن عیب سنسوری مستقیماً در معادله حالت وارد شود.

دینامیک حالت جدید  $z_f$  به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۲۰]:

$$\dot{z}_f(t) = -A_f z_f(t) + A_f y(t) \quad (15)$$

در معادله (۱۴) در معادله (۱۵)، معادله زیر حاصل می‌شود:

$$\dot{z}_f(t) = -A_f z_f(t) + A_f Cx(t) + A_f Ff_s(t) \quad (16)$$

ترکیب قسمت اول از معادله (۱۴) و معادله (۱۶) سیستم فضای حالت توسعه‌یافته با مرتبه  $n + p$  به‌صورت زیر خواهد بود:

در معادله بالا،  $\hat{x}_a(t) \in R^n$  بردار حالت مشاهده‌گر،  $\hat{z}_a(t) \in R^p$  بردار خروجی مشاهده‌گر و  $\hat{f}_s(t) \in R^n$  تخمین عیب  $f_s(t)$  است و ماتریس  $L$  طوری طراحی می‌شود که  $(A_a - LC_a)$  ماتریسی پایدار باشد. همچنین در معادله بالا،  $v(t) = -\bar{m}(t) \frac{K_1 e_{z_f}(t)}{\|K_1 e_{z_f}(t)\| + \delta}$  است که در آن  $e_{z_f}(t) = \hat{z}_f(t) - z_f(t)$  اسکالر مثبت کوچک است و  $\bar{m}(t) = \text{diag}(m(t), p)$  معرف ماتریس قطری  $p \times p$  بوده و تابع بهره  $m(t)$  با قانون تطبیق زیر داده می‌شود:

$$\dot{m}(t) = \Lambda \|K_1 e_{z_f}(t)\| \quad (21)$$

در معادله بالا،  $\Lambda$  پارامتر طراحی بوده و توسط آن نرخ افزایش سیگنال  $m(t)$  تنظیم می‌شود. همچنین در معادله (۲۱) تابع  $K_1$  طوری طراحی می‌شود که رابطه  $Q_a^T P = K_1 C$  برقرار باشد که در آن  $P \in R^{n \times n}$  ماتریس مثبت معین است که در ادامه به دست آورده می‌شود.

نکته ۱: شایان ذکر است که در عموم مشاهده‌گرهای مد لغزشی همچون [۲۰]، با توجه به فرض معلوم بودن حد بالای سیگنال عیب، اغتشاش و نامعینی‌ها، طراحی به گونه‌ای است که  $m(t)$  یک ثابت معلوم است و تنها کافی است بزرگ‌تر از نرم مجموع جمله‌های عدم قطعیت، اغتشاش و عیب باشد. اما در این مقاله، فرض مهم آن است که حد بالای  $\psi(t, y, u)$  و  $f_s(t)$  هرچند کران دار ولی نامعلوم هستند و لذا  $m(t)$  یک ثابت معلوم نیست و با معادله (۲۱) طراحی خواهد شد. لازم به ذکر است طبق رابطه (۲۱) سیگنال  $m(t)$  یک سیگنال غیرکاهشی است و با افزایش زمان می‌تواند به صورت بی‌کران افزایش یابد. با این وجود در اثبات قضیه ۱ که در ادامه ارائه شده است با توجه به وجود عبارت  $m^T(t) \Lambda^{-1} m(t)$  تضمین می‌شود که  $m(t)$  کران دار است هرچند می‌تواند مقدار بزرگی داشته باشد (برای مثال سیگنال  $1 - e^{-t}$  را می‌توان تصور کرد که هم کران دار و هم غیرکاهشی است).

#### ۴- بازیابی عیب سنسور در حضور نامعینی

برای تحلیل پایداری مشاهده‌گر مد لغزشی تطبیقی معرفی شده در قسمت قبل، معادلاتی به فرم زیر تعریف می‌شود:

$$e_{x_a}(t) = \hat{x}_a(t) - x_a(t), \quad \bar{m}(t) = m(t) - N \quad (22)$$

$$e_{f_s}(t) = \hat{f}_s(t) - f_s(t),$$

که  $N$  حد بالای نامعلوم سیگنال است  $\|\psi(t, y, u)\| < N$ . در نتیجه، دینامیک‌های عیب به صورت معادله زیر تعریف خواهند شد:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{z}_f(t) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} A & 0 \\ A_f C & -A_f \end{bmatrix}}_{A_a} \begin{bmatrix} x(t) \\ z_f(t) \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}}_{B_a} u(t) + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ A_f F \end{bmatrix}}_{F_a} f_s(t) + \underbrace{\begin{bmatrix} M \\ 0 \end{bmatrix}}_{M_a} \xi(t, y, u) + \underbrace{\begin{bmatrix} D \\ 0 \end{bmatrix}}_{D_a} \hat{v} \quad (17)$$

$$z_f(t) = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & p \end{bmatrix}}_{C_a} \begin{bmatrix} x(t) \\ z_f(t) \end{bmatrix}$$

با تعریف  $x_a^T = [x^T(t), z_f^T(t)]$  معادله (۱۷) را می‌توان به صورت معادله زیر نوشت:

$$\begin{aligned} \dot{x}_a(t) &= A_a x_a(t) + B_a u(t) + F_a f_s(t) + M_a \xi(t, y, u) + D_a \hat{v} \\ z_f(t) &= C_a x_a(t) \end{aligned} \quad (18)$$

که ماتریس‌های  $A_a, B_a, F_a, M_a, D_a$  و  $C_a$  ماتریس‌های حقیقی ثابت و معلوم هستند که در معادله (۱۷) تعریف شده‌اند. بدون اینکه از کلیت مسئله کاسته شود، با فرض  $Q_a = [M_a \ D_a]$  و  $\psi(t, y, u) = \begin{bmatrix} \xi(t, y, u) \\ \hat{v} \end{bmatrix}$  معادله (۱۸) را می‌توان به فرم معادله زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{aligned} \dot{x}_a(t) &= A_a x_a(t) + B_a u(t) + F_a f_s(t) + Q_a \psi(t, y, u) \\ z_f(t) &= C_a x_a(t) \end{aligned} \quad (19)$$

در ادامه برای طراحی مشاهده‌گر مد لغزشی در شرایطی که کران سیگنال‌های عیب و سیگنال  $\psi(t, y, u)$  در دست نباشند، از ایده ترکیب مشاهده‌گر مد لغزشی با یک الگوریتم تطبیقی استفاده می‌شود [۲۱]. یعنی در این قسمت فرض می‌شود  $f_s(t)$  و  $\psi(t, y, u)$  در معادله (۱۹) توابعی کران دار اما با حد بالای نامعلوم‌اند.

برای معادله ذکر شده هدف، طراحی یک مشاهده‌گر مد لغزشی تطبیقی است؛ به طوری که عیب سنسوری با استفاده از قانون تطبیق برخط بازیابی شود. برای این منظور فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شوند:

فرض ۱:  $F_a$  و  $Q_a$  رتبه کامل هستند.

فرض ۲: جفت  $(A_a, C_a)$  مشاهده‌پذیر است.

فرض ۳: توابع مجهول  $f_s(t)$  و  $\psi(t, y, u)$  دارای مشتق مرتبه اول کران دار هستند؛ هرچند حد بالای آن‌ها معلوم نیست. ساختار مشاهده‌گر تطبیقی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_a &= A_a \hat{x}_a(t) + B_a u(t) + F_a \hat{f}_s(t) + Q_a \hat{v}(t) \\ &\quad - L (\hat{z}_f(t) - z_f(t)) \\ \hat{z}_f(t) &= C_a \hat{x}_a(t) \end{aligned} \quad (20)$$

**اثبات:** ابتدا تابع لیاپانف زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$V(t) = e_{x_a}^T(t) P e_{x_a}(t) + \frac{1}{\sigma} e_{f_s}^T(t) \Gamma^{-1} e_{f_s}(t) + \tilde{m}^T(t) \Lambda^{-1} \tilde{m}(t) \quad (29)$$

مشتق این تابع به صورت معادله زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= e_{x_a}^T(t) P \dot{e}_{x_a}(t) + e_{x_a}^T(t) P \dot{e}_{x_a}(t) \\ &+ 2 \frac{1}{\sigma} e_{f_s}^T(t) \Gamma^{-1} \dot{e}_{f_s}(t) + 2 \dot{m}^T(t) \Lambda^{-1} \dot{\tilde{m}}(t) \\ &= e_{x_a}^T(t) \left[ P(A_a - LC_a) + (A_a - LC_a)^T P \right] e_{x_a}(t) \\ &+ 2 e_{x_a}^T(t) P Q_a (v(t) - \psi(t, y, u)) \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} &+ 2 e_{x_a}^T(t) P F_a e_{f_s}(t) + 2 \frac{1}{\sigma} e_{f_s}^T(t) \Gamma^{-1} \dot{f}_s(t) \\ &- 2 \frac{1}{\sigma} e_{f_s}^T(t) \Gamma^{-1} \dot{f}_s(t) + 2 \left\| K_1 e_{z_f}(t) \right\| (m(t) - N) \end{aligned}$$

با توجه به رابطه معادله زیر:

$$-2 \frac{1}{\sigma} e_{f_s}^T(t) K_2 e_{z_f}(t) = -2 \frac{1}{\sigma} e_{f_s}^T(t) P F_a e_{x_a}(t) \quad (31)$$

و با استفاده از لم ۱ در بخش قبل نتیجه می‌شود:

$$\begin{aligned} -2 \frac{1}{\sigma} e_{f_s}^T(t) \Gamma^{-1} \dot{f}_s(t) &\leq \frac{1}{\sigma \mu} e_{f_s}^T(t) G e_{f_s}(t) \\ &+ \frac{\mu}{\sigma} f_s^T(t) \Gamma^{-1} G^{-1} \Gamma^{-1} \dot{f}_s(t) \end{aligned} \quad (32)$$

$$\leq \frac{1}{\sigma \mu} e_{f_s}^T(t) G e_{f_s}(t) + \frac{1}{\sigma \mu} \dot{f}_s^T(t) \lambda_{\max}(\Gamma^{-1} G^{-1} \Gamma^{-1})$$

با توجه به معادله (۳۲) معادلات زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned} 2 e_{x_a}^T(t) P F_a e_{f_s}(t) + \frac{1}{\sigma} e_{f_s}^T(t) \Gamma^{-1} \dot{f}_s(t) \\ = 2 e_{x_a}^T(t) P F_a e_{f_s}(t) - 2 e_{f_s}^T(t) \Gamma^{-1} \Gamma K_2 e_{z_f}(t) = 0 \end{aligned} \quad (33)$$

$$2 e_{x_a}^T(t) P Q_a (v(t) - \psi(t, y, u)) \quad (34)$$

$$= 2 \left( K_1 e_{z_f}(t) \right)^T \left( \frac{K_1 e_{z_f}(t)}{\left\| K_1 e_{z_f}(t) \right\| + \delta} - \psi(t, y, u) \right)$$

$$< -2 \left\| K_1 e_{z_f}(t) \right\| (m(t) - N)$$

با تعریف  $\eta = \frac{1}{\sigma \mu} \dot{f}_s^T(t) \lambda_{\max}(\Gamma^{-1} G^{-1} \Gamma^{-1})$  و با در

نظر گرفتن  $\zeta^T(t) = \begin{bmatrix} e_{x_a}^T & e_{f_s}^T \end{bmatrix}$  نتیجه می‌شود:

$$\dot{V}(t) \leq \zeta^T(t) \phi \zeta(t) + \eta \quad (35)$$

که در معادله بالا  $\phi$  برابر است با:

$$\begin{aligned} \dot{e}_{x_a}(t) &= (A_a - LC_a) e_{x_a}(t) + F_a e_{f_s}(t) \\ &+ Q_a (v(t) - \psi(t, y, u)) \end{aligned} \quad (23)$$

$$e_{z_f}(t) = C_a e_{x_a}(t)$$

اکنون فرضیات و لم زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$\text{فرض ۴: } \text{rank} \begin{pmatrix} C & F \\ a & a \end{pmatrix} = \text{rank} \begin{pmatrix} F \\ a \end{pmatrix} = 4$$

فرض ۵: صف‌های تغییرناپذیر  $(A_a, C_a, F_a)$  که معرف قطب‌های حرکت لغزش هستند در سمت چپ محور قرار دارند.

لم ۱: (نامساوی یوانگ) با در نظر گرفتن اسکالر  $\mu > 0$  و ماتریس مثبت معین  $P$ ، نامساوی زیر برقرار است:

$$2x^T y \leq \frac{1}{\mu} x^T P x + \mu y^T P^{-1} y \quad x, y \in R^n \quad (24)$$

همچنین این موضوع در نظر گرفته می‌شود که برای عیب‌های سنسوری متغیر با زمان، از آنجایی که  $f_s(t) \neq 0$  است لذا رابطه زیر برای تخمین عیب سنسوری برقرار می‌باشد:

$$\dot{e}_{f_s}(t) = \dot{f}_s(t) - \dot{f}_s(t) \quad (25)$$

پایداری دینامیک‌های خطا با قضیه زیر تضمین می‌شود:

**قضیه ۱:** برای سیستم (۱۹) با مشاهده گر (۲۰) و قانون تطبیق (۲۱)، طبق فرضیات (۴) و (۵) و با فرض اسکالره‌های مثبت  $\mu$  و  $\sigma$ ، اگر ماتریس‌های متقارن مثبت معین  $P \in R^{n \times n}$  و  $G \in R^{s \times s}$  و ماتریس‌های  $Y \in R^{n \times p}$  و  $K_2 \in R^{s \times p}$  وجود داشته باشند؛ به طوری که شرایط معادله LMI زیر برآورده شود:

$$\Psi = \begin{bmatrix} R_1 & R_2 \\ * & R_3 \end{bmatrix} < 0 \quad (26)$$

که در آن

$$R_1 = P A_a + A_a^T P - Y C_a - (Y C_a)^T \quad (27)$$

$$R_2 = -\frac{1}{\sigma} (A_a^T P F_a - (Y C_a)^T F_a)$$

$$R_3 = -2 \frac{1}{\sigma} F_a^T P F_a + \frac{1}{\mu \sigma} G, \quad Y = P L$$

و علامت \* معرف ترانهاده عنصر متقارن  $(R_2)$  است. آنگاه بازیابی سیگنال عیب طبق الگوریتم معرفی شده در معادله زیر به دست می‌آید:

$$\dot{f} = -\Gamma K_2 (\dot{e}_{z_f}(t) + \sigma e_{z_f}(t)) \quad (28)$$

که تضمین می‌کند  $e_{x_a}(t)$  و  $e_{f_s}(t)$  به صورت یکنواخت در زمان نامحدود، کران‌دار هستند. در معادله بالا،  $\Gamma \in R^{r \times r}$  یک ماتریس مثبت معین و متقارن اختیاری است و  $K_2$  به گونه‌ای طراحی می‌شود

که رابطه  $F_a^T P = K_2 C_a$  برقرار باشد.

لازم به ذکر است که مدل‌های خطی صرفاً به منظور طراحی استفاده شده‌اند و در انجام شبیه‌سازی‌ها از مدل‌های اصلی توربین که در بخش ۲ ارائه شدند استفاده شده است. در این طراحی برآیند نامعینی‌های سیستم به صورت معادله زیر داده شده است:

$$\xi(t, y, u) = [\Delta a_1 \quad \Delta a_2 \quad \Delta a_3] y \quad (38)$$

که در آن  $\Delta a_1 = 1$ ،  $\Delta a_2 = -1$ ،  $\Delta a_3 = 2$  فرض شده است. با در نظر گرفتن  $A_f = 5I_3$  ماتریس‌های توزیع در معادله (۳۷) به فرم ماتریس‌های معادله (۱۸) تبدیل می‌شوند. شکل ۳ تغییرات سرعت باد  $v$  در بازه  $v = [12-22]$  متر بر ثانیه را که در مدل کلی توربین بادی به عنوان اغتشاش در نظر گرفته شده است، نشان می‌دهد. در این قسمت، ماتریس‌های معادله فضای حالت سیستم که به فرم معادله (۱۹) درآمده است، به صورت معادله زیر خواهند بود:

$$A_a = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -0.0103 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -22.3800 & 0 & 0.0017 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1.7790 & 0.0120 & -0.0001 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -9.0909 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & 0 & -5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & -5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & -5 \end{bmatrix}, \quad B_a = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 10 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad Q_a = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.8 & e^{-5} \\ -0.0082 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad F_a = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 5 \end{bmatrix}$$

$$C_a = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

با توجه به ماتریس‌های بالا، ماتریس‌های  $F_a$  و  $Q_a$  به ترتیب رتبه‌های ۱ و ۲ دارند و به این ترتیب رتبه کامل هستند همچنین شرط مشاهده پذیری برقرار است و بنابراین جفت  $(A_a, C_a)$  مشاهده پذیر است. از آنجایی که رتبه  $(C_a F_a)$  برابر یک است لذا فرض ۴ نیز برقرار است. ماتریس  $L$  به صورت زیر انتخاب می‌شود به طوری که  $(A_a - LC_a)$  پایدار باشد:

$$L = \begin{bmatrix} -0.1 & -0.2 & 0.2 \\ 10 & 3 & 0 \\ 0.1 & 0.2 & -0.1 \\ 0.2 & -0.1 & 0 \\ 0.1 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0 \\ -1 & 0 & -0.2 \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$\phi = \begin{bmatrix} P(A_a - LC_a) + (A_a - LC_a)^T P & -\frac{1}{\sigma} (A_a - LC_a)^T P F_a \\ * & -2\frac{1}{\sigma} F_a^T P F_a + \frac{1}{\sigma \mu} G \end{bmatrix} \quad (36)$$

چنانچه  $\phi < 0$ ، می‌توان گفت  $\| \dot{V}(t) \| \leq -\varepsilon \| \zeta(t) \|^2 + \eta$  که در آن  $\varepsilon = \lambda_{\min}(-\phi)$ . در این صورت به ازای  $\| \zeta(t) \|^2 > \eta / \varepsilon$  نتیجه می‌شود  $\dot{V}(t) < 0$  و این به آن معناست که  $(e_{x_a}(t), e_{f_s}(t))$  به سمت یک مجموعه کوچک مطابق با نظریه پایداری لیاپانف همگرا می‌شوند [۲۱]. بنابراین خطای تخمین حالت سیستم و خطای عیب سنسوری، کران‌دار خواهند بود.

نکته ۲: اثر پارامترهای موجود در مقاله به این شرح می‌باشد: دو پارامتر نخست، مقادیر مثبت  $\mu$  و  $\sigma$  هستند که به طور دلخواه انتخاب شده‌اند اما ترجیحاً اعدادی کوچک هستند چراکه با انتخاب بزرگ آن‌ها شرایط LMI استفاده شده در قضیه ۱ برآورده نمی‌شود. پارامتر بعدی  $\delta$  است که در معرفی  $v(t)$  آمده است. این مقدار باید به حد کافی کوچک باشد. اگر مقدار آن بزرگ انتخاب شود مقدار خطای بین بازیابی عیب و سیگنال عیب افزایش خواهد یافت. پارامتر بعدی  $\Lambda$  است که نرخ افزایش  $m(t)$  را تنظیم می‌کند و به گونه‌ای انتخاب می‌شود که این پارامتر در مدت زمان طولانی بیش از حد بزرگ نشود.

## ۵- نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت، نتایج شبیه‌سازی برای یک سیستم توربین بادی ۵/۶ مگاوات که در معرض نامعینی‌های سیستم و عیب‌های سنسوری قرار دارد، بررسی می‌شود. پارامترهای توربین در جدول ۱ ارائه و ماتریس‌های توزیع مدل فضای حالت خطی سیستم عبارت‌اند از [۱۸]:

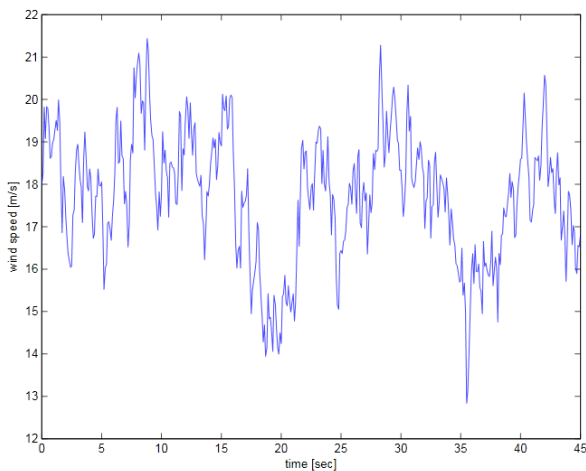
$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -0.0103 & 0 \\ -22.38 & -2e-5 & 1.65e-3 & 10 \\ 1.779 & 0.012 & -0.131e-3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -9.0909 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -2e-7 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.8 & 1e-5 \\ -0.00824 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (37)$$

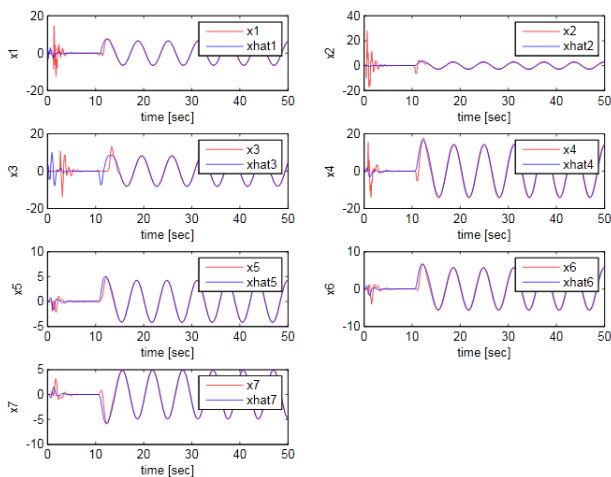
جدول ۱: پارامترهای توربین بادی ۵/۶ مگاواتی مورد مطالعه

$N_p = 3$	$R = 63$	$N_g = 97$
$B_s = 6210$	$K_s = 8.7e5$	$J_r = 3.8e7$
$T_N = 43.936$	$J_g = 534.2$	$\Omega_N = 1173.7$

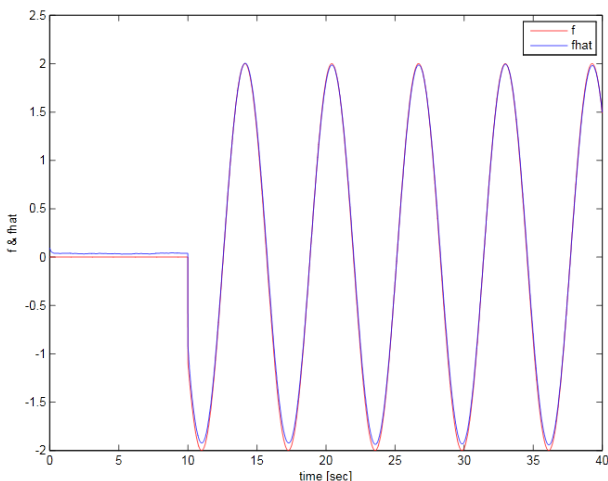




شکل ۳: تغییرات سرعت باد



شکل ۴: حالت‌ها و تخمین آن‌ها



شکل ۵: سیگنال واقعی و بازیابی شده عیب سنسور سرعت روتور در حضور نامعینی

از حل معادله  $LMI$  و با انتخاب  $\mu = 0.5$  و  $\sigma = 0.1$  ماتریس‌های  $P$  و  $G$  به صورت زیر به دست خواهند آمد:

$$P = \begin{bmatrix} 1.4525 & 0.6639 & 2.6615 & -4.3064 & -1.3790 & -2.9126 & -0.0345 \\ 0.6639 & 0.3629 & 1.2660 & -2.4751 & -0.7644 & -1.7094 & 0.0035 \\ 2.6615 & 1.2660 & 4.9745 & -8.2989 & -2.6306 & -5.7542 & -0.0427 \\ -4.3064 & -2.4751 & -8.2989 & 17.1908 & 5.2491 & 11.7119 & -0.0794 \\ -1.3790 & -0.76644 & -2.6306 & 5.2491 & 1.6155 & 3.5843 & -0.0148 \\ -2.9126 & -1.7094 & -5.7542 & 11.7119 & 3.5843 & 8.6050 & -0.0664 \\ -0.0345 & 0.0053 & -0.0427 & -0.0794 & -0.0148 & -0.0664 & 0.0098 \end{bmatrix} \quad (41)$$

$$G = 2.6843e - 04$$

با به دست آمدن ماتریس  $P$  ماتریس‌های  $K_1$  و  $K_2$  نیز به صورت زیر به دست خواهند آمد:

$$K_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -0.5899 & -1.3201 & 0.0046 \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$K_2 = [-0.0741 \quad -0.3322 \quad 0.0490]$$

شکل ۴ نتایج طراحی مشاهده گر مد لغزشی تطبیقی را نشان می‌دهد. در این شکل هفت حالت سیستم معادله (۱۸) به همراه تخمین آن‌ها نشان داده شده است. این شکل در حالی به دست آمده که فرض شده است در سیستم عیب متغیر بازمان سنسور سرعت روتور به صورت معادله زیر رخ داده است:

$$f_s(t) = \begin{cases} 0 & t < 10 \\ 2 \sin(t) & t > 10 \end{cases} \quad (43)$$

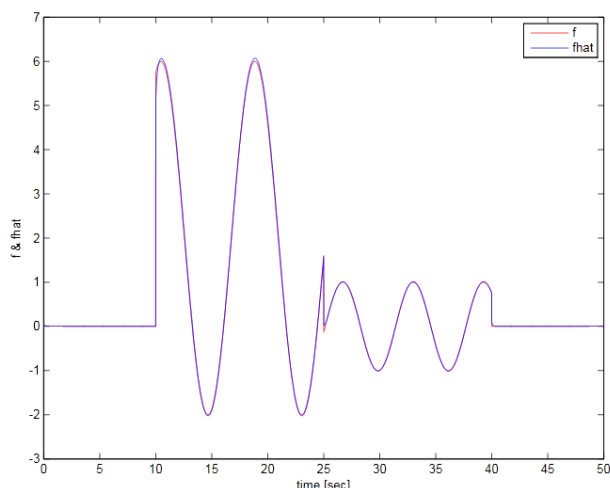
در شکل ۴ حالت‌ها به رنگ قرمز و تخمین آن‌ها با رنگ آبی مشخص شده‌اند.

همان‌طور که از حالت‌های هفت‌گانه مشخص است، نتایج شبیه‌سازی، صحت طراحی مشاهده گر را تأیید می‌کند. سیگنال عیب در نظر گرفته شده در معادله (۴۳) و سیگنال بازیابی آن در شکل ۵ مشخص شده‌اند.

همان‌طور که از شکل مشخص است، سیگنال بازیابی شده عیب به خوبی سیگنال متغیر بازمان عیب را دنبال می‌کند. مشاهده گر مد لغزشی تطبیقی در اینجا می‌تواند بدون اطلاع از باند عیب‌های مختلف در بازه‌های زمانی مختلف به درستی عمل کند. اگر چنانچه مطابق معادله زیر:

$$f_s(t) = \begin{cases} 0 & t < 10 \text{ \& } t > 30 \\ 3 \sin(0.5t) & 10 \leq t \leq 30 \end{cases} \quad (44)$$

سیگنال عیب سنسور سرعت روتور تغییر یابد و همچنین دامنه آن بزرگ‌تر شود بازهم سیگنال عیب بازیابی به خوبی می‌تواند عیب را بازیابی کند. در این حالت شکل موج عیب و بازیابی آن به صورت شکل ۶ خواهد بود.

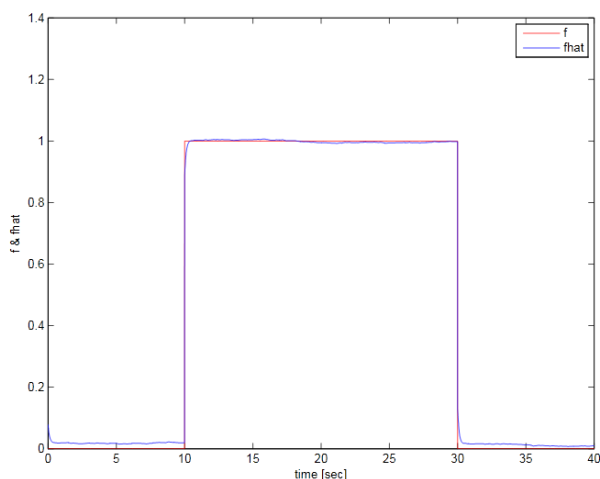


شکل ۸: سیگنال واقعی و بازیابی شده عیب سنسور سرعت ژنراتور در حضور نامعینی

در آخرین قسمت بازیابی، جهت نشان دادن توانایی بالای طراحی در بازیابی عیب‌های مختلف یک سیگنال عیب ثابت با زمان سنسور موقعیت زاویه پیچش مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور سیگنال عیب زیر در نظر می‌شود:

$$f_s(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < 10 \text{ \& } t \geq 30 \\ 1 & 10 \leq t < 30 \end{cases} \quad (47)$$

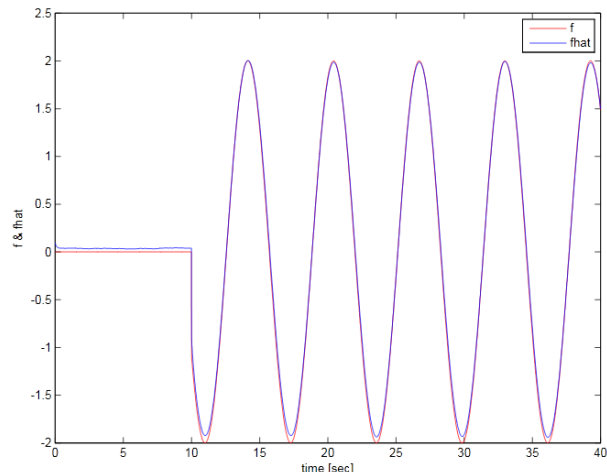
شکل ۹ نتایج شبیه‌سازی مربوط به سیگنال عیب سنسور موقعیت زاویه پیچش و سیگنال بازیابی شده آن را نشان می‌دهد. در این شکل سیگنال عیب به رنگ قرمز و سیگنال بازیابی شده آن به رنگ آبی به صورت نقطه چین است.



شکل ۹: سیگنال واقعی و بازیابی شده عیب سنسور موقعیت زاویه پیچش در حضور نامعینی

### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک سیستم توربین بادی در حضور اغتشاش، نامعینی و عیب‌های سنسوری در نظر گرفته شد. با استفاده از ویژگی‌های



شکل ۶: سیگنال واقعی و بازیابی شده عیب سنسور سرعت روتور در حضور نامعینی

همچنین به صورت مشابه می‌توان سیگنال عیب سنسور ژنراتور را به صورت معادله زیر در نظر گرفت:

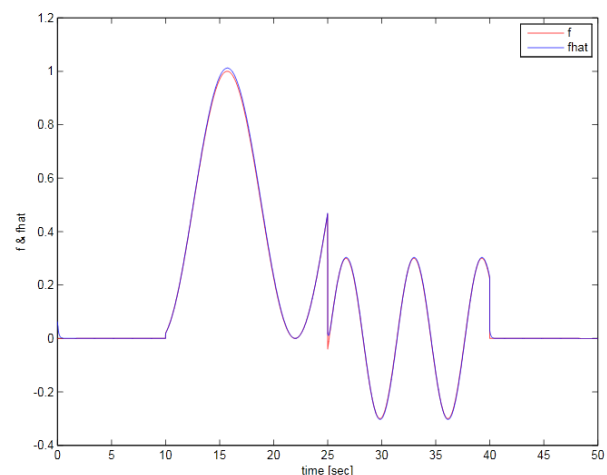
$$f_s(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < 10 \\ 0.5 + 0.5 \sin(0.5t) & 10 \leq t < 25 \\ 0.3 \sin(t) & 25 \leq t < 40 \end{cases} \quad (45)$$

صحت طراحی مشاهده‌گر در قسمت قبل تأیید شد. شکل موج عیب سنسور ژنراتور معادله بالا و بازیابی آن در شکل ۷ آمده است.

یک سیگنال عیب سنسور ژنراتور دیگر مطابق معادله زیر به سیستم اعمال می‌شود:

$$f_s(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < 10 \\ 2 + 4 \sin(0.75t) & 10 \leq t < 25 \\ \sin(t) & 25 \leq t < 40 \end{cases} \quad (46)$$

شکل موج این سیگنال و بازیابی آن در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۷: سیگنال واقعی و بازیابی شده عیب سنسور سرعت ژنراتور در حضور نامعینی

- [9] O. Ozgonenel, E. Kilic, M.A. Khan, and M.A. Rahman, "A new method for fault detection and identification of incipient faults in power transformers," *Electric Power Components and Systems*, vol. 36, no. 11, pp. 1226-1244, 2008.
- [10] H. Wang, Z.J. Huang, and S. Daley, "On the use of adaptive updating rules for actuator and sensor fault diagnosis," *Automatica*, vol. 33, no. 2, pp. 217-225, 1997.
- [11] X. Zhang, "Sensor bias fault detection and isolation in a class of nonlinear uncertain systems using adaptive estimation," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 56, no. 5, pp. 1220-1226, 2011.
- [12] H. Ríos, E. Punta, and L. Fridman, "Fault detection and isolation for nonlinear non-affine uncertain systems via sliding-mode techniques," *International Journal of Control*, vol. 90, no. 2, pp. 218-230, 2017.
- [13] R. Sharma, and M. Aldeen. "Fault detection in nonlinear systems with unknown inputs using sliding mode observer," *American Control Conference, ACC'07. IEEE*, 2007.
- [14] Z.Q. Wu, Y. Yang, and C.H. Xu, "Adaptive fault diagnosis and active tolerant control for wind energy conversion system," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 13, no. 1, pp. 120-125, 2015.
- [15] M. Witczak, D. Rotondo, V. Puig, F. Nejjari, and M. Pazera, "Fault estimation of wind turbines using combined adaptive and parameter estimation schemes," *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, vol. 32, no. 4, pp. 549-567, 2018.
- [16] P. Kühne, F. Pöschke, and H. Schulte, "Fault estimation and fault-tolerant control of the FAST NREL 5-MW reference wind turbine using a proportional multi-integral observer," *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, vol. 32, no. 4, pp. 568-585, 2018.
- [17] H. Shao, Z. Gao, X. Liu, and K. Busawon, "Parameter-varying modelling and fault reconstruction for wind turbine systems," *Renewable Energy*, vol. 116, no. 1, pp. 145-152, 2018.
- [18] F.A. Inthamoussou, F.D. Bianchi, H. De Battista, and R.J. Mantz, "Gain Scheduled  $H_\infty$  Control of Wind Turbines for the Entire Operating Range," *Wind Turbine Control and Monitoring*. Springer International Publishing, pp. 71-95, 2014.
- [19] F. Bayat M. Farkian, "Path planning and control of airborne systems for optimal wind energy extraction," *Journal of Nonlinear Systems in Electrical Engineering (JNSEE)*, vol. 4, no. 1, pp. 78-96, 2018.
- [20] C.P. Tan, and C. Edwards, "Sliding mode observers for robust detection and reconstruction of actuator and sensor faults," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 13, no. 5, pp. 443-463, 2003.
- [21] K. Zhang, B. Jiang, and V. Cocquempot, "Adaptive observer-based fast fault estimation," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 6, no. 3, pp. 320-326, 2008.
- منحصربه‌فرد رویکرد مد لغزشی، یک مشاهده‌گر مد لغزشی تطبیقی با فرض نامعلوم بودن حد بالای سیگنال‌های عیب، اغتشاش و نامعینی طراحی شد. رویکرد مورد استفاده جهت از بین بردن اثر نامعینی و اغتشاش در سیستم و سپس در بازیابی صحیح سیگنال‌های تغییرپذیر و تغییرناپذیر با زمان عیب به خوبی عمل کرد. سیگنال‌های عیب برای سه سنسور سرعت روتور، سرعت ژنراتور و موقعیت زاویه پیچش در نظر گرفته شد. نتایج شبیه‌سازی صحت طراحی‌های انجام‌گرفته را به خوبی نشان داد.
- ### مراجع
- [۱] محسن رحیمی، محمدرضا اسماعیلی، «طراحی کنترل‌کننده توان و بهبود میرایی نوسانات پیچشی در توربین بادی-DFIG 710 kW نصب شده در سایت بینالود»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، (۴) ۴۶، ۱۳۴-۱۳۳، ۱۳۹۵.
- [2] F. Bayat and H. Bahmani, "Power regulation and control of wind turbines: LMI-based output feedback approach," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 27, no. 12, 2017, in press.
- [3] J. He, J. Qiu, C. Zhang, and C. Luo, "Robust fault detection using sliding mode and adaptive observers for uncertain nonlinear systems," *Dyn. Continuous. Discrete and Impulsive Syst. Ser. B: App. & Algorithms*, vol. 15, no. 5, pp. 709-718, 2008.
- [4] S. Montes de Oca, S. Tornil-Sin, V. Puig, and D. Theilliol, "Fault-tolerant control design using the linear parameter varying approach," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 24, no. 14, pp. 1969-1988, 2014.
- [۵] یاشار شب بویی، امیر ریخته‌گرغیائی، سهراب خانمحمدی، «طراحی کنترل‌کننده تحمل‌پذیر خطای مد لغزشی ترمینال غیرتکین برای سیستم‌های غیرخطی بر مبنای فیلترکالمن توسعه‌یافته تطبیقی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، ۱۷۳-۱۷۲ (۴) ۴۶، ۱۳۹۵.
- [6] X. Wei, M. Verhaegen, and T. van Engelen, "Sensor fault detection and isolation for wind turbines based on subspace identification and Kalman filter techniques," *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, vol. 24, no. 8, pp. 687-707, 2010.
- [7] G. Wheeler, C.Y. Su, and Y. Stepanenko, "A sliding mode controller with improved adaptation laws for the upper bounds on the norm of uncertainties," *Automatica*, vol. 34, no. 12, pp. 1657-1661, 1998.
- [8] Y.J. Huang, T.C. Kuo, and S.H. Chang, "Adaptive sliding-mode control for nonlinear systems with uncertain parameters," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 38, no. 2, pp. 534-539, 2008.