

# تخمین مقاوم عیب بر مبنای طراحی رؤیتگر برای کلاسی از سیستم‌های غیر خطی

الهام توسلی پور<sup>۱</sup> و جواد پستان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران  
elham\_tavasolipour@elec.iust.ac.ir  
<sup>۲</sup>نویسنده مسئول، استاد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران jposhtan@iust.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۱۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۰۷)



دانشگاه صنعتی سهند

DOR:

[20.1001.1.23223146.1399.7.2.8.2](https://doi.org/10.1001.1.23223146.1399.7.2.8.2)

نشریه علمی غیرخطی در مهندسی برق

دوره ۷ - شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۳۹۹

صفحات ۴ الی ۱۸

ISSN: 2322-3146

<http://journals.sut.ac.ir/jnsee>

## چکیده

در این مقاله روش تخمین مقاوم عیب بر مبنای طراحی رؤیتگر برای کلاس خاصی از سیستم‌های غیر خطی لپشیتز که اغتشاش‌ها و عیوب موجود در آن به صورت کوپل شده با حالت‌های سیستم اصلی فرض می‌شوند، پیشنهاد شده است. در مدل سیستم مورد نظر، عیب در معادلات حالت و خروجی توسط تابع غیر خطی غیر قابل اندازه‌گیری و کوپل شده با متغیرهای حالت وارد شده است. همچنین عدم قطعیت‌های موجود در سیستم به صورت کوپل شده با حالت‌های سیستم و توسط تابع غیر خطی در نظر گرفته شده‌اند. در روش پیشنهادی، یک رؤیتگر لیونبرگر برای تخمین عیب در سیستم طراحی شده است. همچنین اثر عدم قطعیت‌های موجود در سیستم توسط نرم  $L_2$  تضعیف شده است، که این امر منجر به حل یک مسئله بهینه‌سازی محدب می‌شود. در نهایت، عملکرد روش پیشنهادی بر روی یک موتور القایی سه فاز شبیه‌سازی شده است و نتایج به خوبی کارایی الگوریتم پیشنهاد شده را نشان داده است.

## واژه‌های کلیدی

تخمین مقاوم عیب،

رؤیتگر لیونبرگر،

ناتساوی ماتریسی خطی،

سیستم‌های غیر خطی لپشیتز.



Sahand University  
of Technology

DOR:

[20.1001.1.23223146.1399.7.2.8.2](https://doi.org/10.1001.1.23223146.1399.7.2.8.2)

Journal of Nonlinear  
Systems in Electrical  
Engineering

Vol.7, No.2

Autumn and Winter 2020

ISSN: 2322 – 3146

<http://journals.sut.ac.ir/jnsee>

# An Observer-Based Robust Fault Estimation for a Class of Nonlinear Systems

Elham Tavasolipour<sup>1</sup> and Javad Poshtan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. student, Electrical Engineering Department, Iran University of Science and Technology, [elham\\_tavasolipour@elec.iust.ac.ir](mailto:elham_tavasolipour@elec.iust.ac.ir)

<sup>2</sup>**Corresponding Author**, Professor, Faculty of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology, [jposhtan@iust.ac.ir](mailto:jposhtan@iust.ac.ir)

## ABSTRACT

### Keywords

Robust Fault Estimation,  
Luenberger Observer,  
Linear Matrix Inequality,  
Lipschitz Nonlinear  
Systems.

In this paper an observer-based robust fault estimation scheme is proposed for a special class of Lipschitz nonlinear systems where the disturbances and faults are assumed to be coupled with the main system states. In the considered model of system, fault is assumed to enter both of the state and output equations as an unmeasured nonlinear function and coupled with the states. The disturbances and the uncertainties are considered as nonlinear functions coupled with the states. To the best of the authors' knowledge these conditions have not been previously considered in related papers. In the proposed approach, a Luenberger observer is designed for the estimation of faults and states of system simultaneously. The effect of system disturbances is attenuated with the  $L_2$  norm. The necessary conditions for the existence of such observer is expressed in the form of Linear Matrix Inequality. The Lipschitz constant of the nonlinear function is obtained by solving the proposed Linear Matrix Inequality. Finally, the performance of the proposed method is simulated on a three-phase induction motor. The results indicate good performance of the proposed method.

## ۱- مقدمه

در میان روش‌های موجود در آشکارسازی و شناسایی عیب، روش‌های مبتنی بر مدل جایگاه ویژه‌ای دارند [۱]. در میان روش‌های مبتنی بر مدل، طراحی رؤیتگرها از محبوبیت بسیار زیادی برخوردار هستند [۲ و ۳]. مفهوم اصلی طراحی آشکارساز و جداساز عیب (FDI)<sup>۱</sup> بر مبنای رؤیتگر، تولید مجموعه‌ای از باقی‌مانده‌ها است که بتواند به صورت منحصر به فرد عیب‌های مختلف را آشکار و شناسایی کند. همچنین، این باقی‌مانده‌ها باید نسبت به ورودی‌های ناشناخته، نویزهای اندازه‌گیری و عدم قطعیت‌های موجود در سیستم مقاوم باشند. یک سیستم عیب‌یابی مقاوم باید توانایی این را داشته باشد که نسبت به سیگنال‌های عیب حساس و در عین حال نسبت به سیگنال‌های ناشناخته غیر حساس باشد [۴]. از طرفی اکثر فرآیندهای صنعتی به صورت ذاتی غیرخطی هستند. به همین دلیل، عیب‌یابی سیستم‌های غیرخطی به امری چالش‌انگیز تبدیل شده است.

در سال‌های اخیر سیستم‌های غیرخطی لپیشیتز توجه خاصی را در میان کلاس‌های متفاوت سیستم‌های غیرخطی به خود جلب کرده است [۵ و ۶]. بسیاری از روش‌های FDI مبتنی بر مدل به این کلاس خاص از سیستم‌های غیرخطی اختصاص داده شده‌اند. یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها در طراحی یک رؤیتگر FDI موضوع مقاوم بودن است. در مسائل FDI مبتنی بر طراحی رؤیتگر، مقاوم نمودن طراحی به صورت کمینه کردن حساسیت اثر ورودی‌های ناشناخته بر روی سیگنال باقی‌مانده و بیشینه کردن حساسیت اثر عیب بر روی این سیگنال تعریف می‌شود. هدف اصلی این کار، توسعه روشی برای مقابله با مشکل آشکارسازی عیب برای سیستمی با ورودی‌های ناشناخته است که منجر به روش  $\frac{H_-}{H_\infty}$  می‌شود [۷ و ۸ و ۹].

در [۱۰]، به منظور آشکارسازی و تخمین عیب در سیستم‌های قدرت الکترونیکی مانند مبدل DC-DC، از رؤیتگر مود لغزشی استفاده شده است. در این سیستم، عیب و اغتشاش هر دو به صورت خطی و جمع شونده در نظر گرفته شده‌اند. در [۱۱] به منظور آشکارسازی عیب در سیستم‌هایی که دارای عدم قطعیت پارامتری هستند، از طراحی رؤیتگر استفاده شده است. در [۵] سیستمی غیرخطی با اغتشاش کوپل شده با حالت در نظر گرفته شده است. در این مقاله، نویسنده با طراحی کنترل‌کننده تطبیقی به تخمین اغتشاش در سیستم می‌پردازد. همچنین فرض می‌شود که اغتشاش در شرایط تطابق صدق نمی‌کند. در [۱۲] یک رؤیتگر مود لغزشی (SMO)<sup>۲</sup> برای سیستم‌های غیرخطی لپیشیتز با اغتشاش‌های حالتی و ساختار توزیع یافته، برای آشکارسازی و تخمین عیب طراحی شده است. محدودیت روش مذکور این است که در آن عیب به صورت تابعی از ورودی سیستم در نظر گرفته شده است. معمولاً نحوه توزیع عدم قطعیت‌ها بر روی حالت‌های سیستم شناخته شده نیست. در چنین مواردی، جدا کردن کامل عیب از عدم قطعیت‌ها به سادگی صورت نمی‌گیرد، اما می‌توان با استفاده از رؤیتگرهای  $H_\infty$  تأثیر آن‌ها را بر روی عیب کمینه کرد [۱۳ و ۱۴]. همچنین در [۴]، آشکارسازی و تخمین مقاوم عیب محرک و حسگر به صورت جمع شونده برای سیستم‌های غیرخطی لپیشیتز با استفاده از رؤیتگرهای مود لغزشی و تطبیقی، ابتدا برای عدم قطعیت‌های ساختاریافته و سپس برای عدم قطعیت‌های بدون ساختار مورد مطالعه قرار گرفته است. عیب موجود در این سیستم به صورت جمع شونده در نظر گرفته شده است. در [۱۵] به منظور تخمین عیب حسگر و محرک برای کلاس خاصی از سیستم‌های غیرخطی لپیشیتز، رؤیتگر مود لغزشی طراحی شده است. در این پژوهش عیوب به صورت

<sup>1</sup> Fault Detection and Isolation<sup>2</sup> Sliding Mode Observer

جمع شونده و خطی، اما اغتشاش‌ها به صورت حالتی در نظر گرفته شده‌اند و نیز اثر اغتشاش‌ها بر روی عیوب با عملکرد  $H_{\infty}$  تضعیف شده است.

معمولاً به منظور ساده‌سازی، عیوب موجود در سیستم به صورت جمع شونده در نظر گرفته می‌شوند. این در حالی است که بسیاری از عیوب، کوپل شده با حالت‌های سیستم هستند. اکثر روش‌های FDI تنها قابل اعمال به سیستم‌هایی هستند که در آن‌ها عیوب به صورت جمع شونده و با ماتریس‌های ثابت و شناخته شده نمایش داده می‌شوند. از جمله پژوهش‌هایی که در آن عیب توسط تابع غیرخطی غیرقابل اندازه‌گیری در معادلات فضای حالت نمایش داده شده است، می‌توان به [۱۶] اشاره کرد. عیب حالتی در این سیستم توسط تابع غیرخطی بیان شده است. تابع مذکور نه تنها به ورودی و خروجی‌های سیستم وابسته است، بلکه تابعی از حالت‌های غیرقابل اندازه‌گیری سیستم نیز می‌باشد که در حوزه تخمین عیب پیچیدگی‌هایی را وارد می‌نماید. در ادامه، به منظور آشکارسازی و تخمین عیب، یک رؤیتگر تطبیقی تحت برقراری شرط لیشیتز پیشنهاد شده است. لازم به ذکر است که در این مقاله هیچ‌گونه اغتشاشی در سیستم در نظر گرفته نشده است. در [۱۷] آشکارسازی و جداسازی عیب محرک و حسگر برای سیستم غیرخطی مورد مطالعه قرار گرفته است. در مقاله مذکور، عیب محرک توسط تابعی غیرخطی که فقط به خروجی و ورودی‌های سیستم وابسته است بیان شده و عیب حسگر توسط تابعی خطی و جمع شونده نمایش داده شده است. در [۱۸] آشکارسازی و جداسازی عیب برای سیستم غیرخطی فقط برای عیب محرک مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله نیز عیب محرک توسط تابعی غیرخطی که فقط به خروجی و ورودی‌های سیستم وابسته است، در نظر گرفته شده است. در [۱۹] یک روش تخمین عیب بر مبنای رؤیتگر برای یک کلاس خاص از سیستم‌های غیرخطی پیشنهاد شده است. در این مقاله سیستم غیرخطی به صورت لیشیتز و با عیوب وابسته به حالت (هم در معادله حالت و هم در معادلات خروجی) و با اغتشاش‌های جمع شونده در نظر گرفته شده است.

در این پژوهش سعی بر این است که با رویکرد عیب‌یابی مقاوم، برای کلاس خاصی از سیستم‌های غیرخطی، به همراه اغتشاش‌ها و عیوب کوپل شده با حالت‌های سیستم، رؤیتگر مقاوم برای تخمین عیب طراحی شود. فرض می‌شود که عیب غیرقابل اندازه‌گیری اما به صورت یک تابع غیرخطی معلوم، در معادلات حالت و خروجی وارد شده است. همچنین سیستم در معرض اغتشاش‌های حالتی نیز قرار دارد. ابتدا یک رؤیتگر لیونبرگر برای تخمین عیب طراحی شده است. سپس، اثر اغتشاش‌ها به وسیله نرم  $L_2$  تضعیف شده است. شرایط لازم برای وجود چنین رؤیتگری تحت مسئله ناتساوی ماتریسی خطی (LMI)<sup>۱</sup> بیان شده است. ساختار این مقاله به صورت زیر است: ابتدا ساختار سیستم اصلی مطرح شده است. سپس رؤیتگر لیونبرگر برای تخمین همزمان حالت‌ها و عیب پیشنهاد شده است. اثر اغتشاش‌های موجود در سیستم توسط نرم  $L_2$  تضعیف شده است. شرایط لازم برای وجود چنین رؤیتگری تحت مسئله LMI بیان شده است و نهایتاً به منظور بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی یک موتور القایی سه فاز شبیه‌سازی شده است و در بخش آخر جمع‌بندی ارائه شده است.

## ۲- ساختار سیستم و رؤیتگر تخمین‌زننده عیب

سیستم غیرخطی معیوب با معادلات حالت و خروجی زیر را در نظر بگیرید:

<sup>1</sup> Linear Matrix Inequality

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + M_x(x, a) + D\varphi(x, u, t) \\ y &= Cx + M_y(x, a) \end{aligned} \quad (1)$$

در معادلات بالا،  $x \in R^n$ ،  $y \in R^p$  و  $u \in R^m$  به ترتیب حالت‌ها، خروجی‌ها و ورودی کنترلی سیستم هستند.  $a \in R^q$  سیگنال عیب می‌باشد که مقداری ثابت فرض شده است. توابع  $M_x(x, a)$  و  $M_y(x, a)$  (که برای نشان دادن مشخصه‌های غیرخطی سیستم مدل شده‌اند) شناخته شده اما غیرقابل اندازه‌گیری هستند. سیگنال  $\varphi(x, u, t) \in R^h$  ورودی ناشناخته است که می‌تواند اغتشاش خارجی، دینامیک‌های مدل نشده و یا عدم قطعیت‌های پارامتری سیستم باشد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، هدف این مقاله تخمین سیگنال عیب  $a$  در حضور ورودی ناشناخته  $\varphi(x, u, t)$  با استفاده از رؤیتگر لیونیرگر است. این مساله تاکنون برای این کلاس خاص از سیستم‌های غیرخطی در مقالات حل نشده است. فرضیات مساله به صورت زیر می‌باشند:

فرض ۱: توابع غیرخطی  $M_x(x, a)$  و  $M_y(x, a)$  می‌توانند به صورت زیر بازنویسی شوند:

$$\begin{aligned} M_x(x, a) &= F_x a + M_{x,2}(x, a) \\ M_y(x, a) &= F_y a + M_{y,2}(x, a) \end{aligned} \quad (2)$$

در معادله بالا،  $F_x \in R^{n \times q}$  و  $F_y \in R^{p \times q}$  ماتریس‌های ثابت و شناخته شده‌ای هستند.

فرض ۲: توابع غیرخطی  $M_x(x, a)$  و  $M_y(x, a)$  لیشیتز هستند.

فرض ۳: عیب موجود در سیستم مستقل از زمان است.

حال، برای تخمین عیب در این سیستم، رؤیتگر زیر پیشنهاد می‌شود.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + Bu + F_x \hat{a} + M_{x,2}(\hat{x}, \hat{a}) + L_{1,1}e_y \\ \dot{\hat{a}} &= L_{1,2}e_y \\ \hat{y} &= C\hat{x} + F_y \hat{a} + M_{y,2}(\hat{x}, \hat{a}) + L_2e_y \end{aligned} \quad (3)$$

در معادلات بالا،  $\hat{x}$ ،  $\hat{a}$  و  $\hat{y}$  تخمین  $x$ ،  $a$  و  $y$  هستند، و لذا  $e_y = y - \hat{y}$  است. توجه شود که مرتبه رؤیتگر در این حالت  $n + q$  است که از مرتبه سیستم اصلی بزرگتر می‌باشد. نکته‌ای که در این مساله وجود دارد این است که تابع عیب غیرخطی هم در معادله ورودی و هم در معادله خروجی وجود دارد. به عبارتی دیگر در سیستم مذکور، عیب محرک و عیب اندازه‌گیری هر دو وجود دارند. ما بهره  $L_2$  را در خروجی اضافه کردیم تا بتوانیم با وارد کردن آن در خطای تخمین رؤیتگر اطلاعاتی از عیب اندازه‌گیری داشته باشیم و بتوانیم راحت‌تر آن را تخمین بزنیم. خطای تخمین عیب و حالت به صورت  $e_a = a - \hat{a}$  و  $e_x = x - \hat{x}$  دینامیک این خطاها به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{e}_x &= \dot{x} - \dot{\hat{x}} \\ \dot{e}_a &= \dot{a} - \dot{\hat{a}} \end{aligned}$$

با جاگذاری دینامیک حالت‌ها و عیوب در معادلات بالا، خطای تخمین سیستم به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} e_y &= y - \hat{y} = y - C\hat{x} - F_y \hat{a} - M_{y,2}(\hat{x}, \hat{a}) - L_2e_y \\ &= Cx + F_y a + M_{y,2}(x, a) - C\hat{x} - F_y \hat{a} - M_{y,2}(\hat{x}, \hat{a}) - L_2e_y \end{aligned}$$

$$e_y = (I_p + L_2)^{-1} ([C \quad F_y] \begin{bmatrix} x \\ a \end{bmatrix} + M_{y,2}(x, a) - M_{y,2}(\hat{x}, \hat{a}))$$

معادلات حالت سیستم افزوده شده عبارتند از:

$$\begin{aligned} A = \pi r^2 \dot{\hat{x}} &= \begin{bmatrix} A & F_x \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{x,2}(x, a) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} D \\ 0 \end{bmatrix} \varphi(x, u, t) \\ \dot{\hat{x}} &= \bar{A}_1 \bar{x} + \begin{bmatrix} M_{x,2}(x, a) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} D \\ 0 \end{bmatrix} \varphi(x, u, t) \\ +L_{1.1} e_y \hat{\hat{x}} &= \bar{A}_1 \hat{\hat{x}} + \begin{bmatrix} M_{x,2}(\hat{x}, \hat{a}) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} D \\ 0 \end{bmatrix} \varphi(x, u, t) \\ +L_{1.1} ((I_p + L_2)^{-1} ([C \quad F_y] \begin{bmatrix} x \\ a \end{bmatrix} + \hat{\hat{x}} &= \bar{A}_1 \hat{\hat{x}} + \begin{bmatrix} M_{x,2}(\hat{x}, \hat{a}) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} D \\ 0 \end{bmatrix} \varphi(x, u, t) \\ M_{y,2}(x, a) - M_{y,2}(\hat{x}, \hat{a})) \\ e &= \bar{x} - \hat{\hat{x}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{e} &= (\bar{A}_1 - L_1(I_p + L_2)^{-1} \bar{A}_3) e + L_o(\bar{M}(\bar{x}) - \bar{M}(\hat{\hat{x}})) + \bar{D} \varphi(x, u, t) \\ \dot{e} &= A_0 e + L_o(\bar{M}(\bar{x}) - \bar{M}(\hat{\hat{x}})) + \bar{D} \varphi(x, u, t) \end{aligned} \quad (4)$$

در روابط بالا، ماتریس‌ها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} e &= \begin{bmatrix} e_x \\ e_a \end{bmatrix} \quad \bar{x} = \begin{bmatrix} x \\ a \end{bmatrix} \quad \bar{M}(\bar{x}) = \begin{bmatrix} M_{x,2}(x, a) \\ 0 \\ M_{y,2}(x, a) \end{bmatrix} \\ L_1 &= \begin{bmatrix} L_{1.1} \\ L_{1.2} \end{bmatrix} \quad \bar{A}_1 = \begin{bmatrix} A & F_x \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \bar{A}_3 = [C \quad F_y] \\ \bar{D} &= \begin{bmatrix} D \\ 0 \end{bmatrix} \quad A_0 = (\bar{A}_1 - L_1 L_x \bar{A}_3) \quad L_x = (I_p + L_2)^{-1} \quad L_o = [I_{n+q} \quad -L_1 L_x] \end{aligned}$$

فرض شده است که جمله غیر خطی  $\bar{M}(\bar{x})$  لپشیتز است و شرایط زیر را برآورده می‌کند.

$$\|\bar{M}(x_1) - \bar{M}(x_2)\| \leq \gamma \|x_1 - x_2\| \quad (5)$$

مساله طراحی رؤیتگر به این صورت تعریف می‌شود که هدف تخمین سیگنال عیب است به طوری که نرم  $H_\infty$  تابع  $\varphi(x, u, t)$  مربوط به سیگنال اغتشاش یا دینامیک‌های مدل نشده به خطای تخمین عیب ( $e_a$ ) توسط پارامتری مانند  $\mu > 0$  محدود شود. فرض کنید که تابع  $g(t)$  به صورت زیر تعریف شود:

$$g(t) = H \begin{bmatrix} e_x \\ e_a \end{bmatrix}$$

$H$  ماتریس طراحی تمام-رتبه است که ساختار زیر را دارد:

$$H = \begin{bmatrix} H_1 & 0 \\ 0 & H_2 \end{bmatrix}$$

هدف طراحی بهره رؤیتگر به گونه ای است که دینامیک خطای تخمین با هدف تضعیف اثر اغتشاش به صورت مجانبی پایدار شود. به منظور تضعیف اثر اغتشاش، باید شرایط زیر برقرار باشد:

$$\|g\|_2^2 \leq \mu^2 \|\varphi\|_2^2$$

به منظور تضعیف اثر اغتشاش در کنار ماکزیمم سازی ثابت لیشیتز، مسئله بهینه سازی زیر باید حل شود.

**قضیه:** اگر اسکالرهای ثابتی مانند  $0 \leq \lambda \leq 1$ ,  $\varepsilon > 0$ ,  $\alpha > 0$  و  $\theta > 0$  و ماتریس‌های  $P > 0$  و  $Y$  وجود داشته باشند، خطای تخمین حالت‌های سیستم (۱-۱) همزمان با بیشینه کردن ثابت لیشیتز قابل قبول  $\gamma^*$  و کمینه کردن بهره  $\mu^*$  به صورت مجانبی پایدار می‌شود، اگر مسئله LMI بهینه سازی چند هدفه محذب زیر حل داشته باشد:

$$\min_{\lambda, \alpha, \theta} [\lambda(\alpha + \varepsilon) + (1 - \lambda)\theta]$$

subject to

$$\begin{bmatrix} \Phi & P\bar{D} & PI_{\bar{n}} & -YL_x & I_{n+q} \\ * & -\theta I_{n+q} & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -\varepsilon I_{n+q} & 0 & 0 \\ * & * & * & -\varepsilon I_p & 0 \\ * & * & * & * & -\alpha I_{n+q} \end{bmatrix} < 0 \quad (6)$$

در رابطه (۶)، پارامترها به صورت زیر تعریف شده‌اند.

$$\Phi = \bar{A}_1^T P + P\bar{A}_1 - YL_x \bar{A}_3 - \bar{A}_3^T L_x^T Y^T + H^T H \quad PL_1 = Y \quad L_x = (I_p + L_2)^{-1}$$

زمانی که مسئله بهینه‌سازی بالا حل شود، پارامترها به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned} \mu^* = \min(\mu) &= \sqrt{\theta} & \varepsilon^* &= \min(\varepsilon) & \alpha^* &= \min(\alpha) \\ \gamma^* = \max(\gamma) &= \frac{1}{\sqrt{\alpha^* \varepsilon^*}} & L_1 &= P^{-1}Y \end{aligned}$$

اثبات: مطابق رابطه (۴) خطای تخمین به صورت زیر به دست خواهد آمد:

$$\dot{e} = (\bar{A}_1 - L_1(I_p + L_2)^{-1} \bar{A}_3) e + L_o(\bar{M}(\bar{x}) - \bar{M}(\hat{x})) + \bar{D}\varphi(x, u, t)$$

به منظور دستیابی به هدف موجود در این قضیه، تابع لیاپانوف زیر را در نظر می‌گیریم:

$$V(e(t)) = e^T(t)Pe(t), \quad P = P^T > 0 \quad (7)$$

مشتق تابع لیاپانوف به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{V}(e(t)) = \left(\frac{\partial e}{\partial t}\right)^T Pe + e^T P \frac{\partial e}{\partial t} \quad (8)$$

$$\dot{V}(e(t)) = ((\bar{A}_1 - L_1(I_p + L_2)^{-1}\bar{A}_3)e + L_o(\bar{M}(\bar{x}) - \bar{M}(\hat{x})) + \bar{D}\varphi(x, u, t))^T Pe + e^T P((\bar{A}_1 - L_1(I_p + L_2)^{-1}\bar{A}_3)e + L_o(\bar{M}(\bar{x}) - \bar{M}(\hat{x})) + \bar{D}\varphi(x, u, t))$$

$A_0$  را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$A_0 = (\bar{A}_1 - L_1(I_p + L_2)^{-1}\bar{A}_3)$$

سپس خواهیم داشت:

$$\dot{V}(e(t)) = ((A_0)e + L_o(\bar{M}(\bar{x}) - \bar{M}(\hat{x})) + \bar{D}\varphi(x, u, t))^T Pe + e^T P((A_0)e + L_o(\bar{M}(\bar{x}) - \bar{M}(\hat{x})) + \bar{D}\varphi(x, u, t))$$

و نهایتاً به رابطه زیر می‌رسیم:

$$\dot{V} = e^T (A_0^T P + P A_0) e + (L_o(\bar{M}(\bar{x}) - \bar{M}(\hat{x})))^T P e + e^T P L_o(\bar{M}(\bar{x}) - \bar{M}(\hat{x})) + 2e^T P \bar{D} \varphi(x, u, t)$$

با توجه به برقراری رابطه لیشیتز (۵) داریم:

$$\|\bar{M}(\bar{x}) - \bar{M}(\hat{x})\| \leq \gamma \|\bar{x} - \hat{x}\| \Rightarrow \|\bar{M}(\bar{x}) - \bar{M}(\hat{x})\|^2 \leq \gamma^2 e^T e I_{n+q}$$

با توجه به ناساوی زیر خواهیم داشت:

$$X^T Y + Y^T X \leq \frac{1}{\varepsilon} X^T X + \varepsilon Y^T Y$$

$$Y \triangleq \bar{M}(\bar{x}) - \bar{M}(\hat{x})$$

$$X \triangleq L_o^T P e$$

$$e^T P L_o(\bar{M}(\bar{x}) - \bar{M}(\hat{x})) + (\bar{M}(\bar{x}) - \bar{M}(\hat{x}))^T L_o^T P e \leq$$

$$\frac{1}{\varepsilon} (L_o^T P e)^T (L_o^T P e) + \varepsilon (\bar{M}(\bar{x}) - \bar{M}(\hat{x}))^T (\bar{M}(\bar{x}) - \bar{M}(\hat{x})) =$$

$$\frac{1}{\varepsilon} (L_o^T P e)^T (L_o^T P e) + \varepsilon \|\bar{M}(\bar{x}) - \bar{M}(\hat{x})\|^2 \leq \frac{1}{\varepsilon} (L_o^T P e)^T (L_o^T P e) + \varepsilon \gamma^2 e^T e I_{n+q}$$

$$e^T P L_o(\bar{M}(\bar{x}) - \bar{M}(\hat{x})) + (\bar{M}(\bar{x}) - \bar{M}(\hat{x}))^T L_o^T P e \leq \frac{1}{\varepsilon} e^T P L_o L_o^T P e + \varepsilon \gamma^2 e^T e I_{n+q}$$

با جاگذاری این رابطه در معادله (۸) خواهیم داشت:

$$\dot{V} \leq e^T \left( A_0^T P + P A_0 + \frac{1}{\varepsilon} P L_o L_o^T P + \varepsilon \gamma^2 I_{n+q} \right) e + 2e^T P \bar{D} \varphi(x, u, t)$$

$$g(t) = H \begin{bmatrix} e_x \\ e_a \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} H_1 & 0 \\ 0 & H_2 \end{bmatrix}$$

حال با در نظر گرفتن روابط بالا، تابع  $J(t)$  را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$J(t) = \dot{V}(e(t)) + g^T(t)g(t) - \mu^2 \varphi(x, u, t)^T \varphi(x, u, t)$$

خواهیم داشت:



$$J(t) \leq e^T \left( A_0^T P + P A_0 + \frac{1}{\varepsilon} P L_o L_o^T P + \varepsilon \gamma^2 I_{n+q} + H^T H \right) e + 2e^T P \bar{D} \varphi(x, u, t) - \mu^2 \varphi(x, u, t)^T \varphi(x, u, t)$$

متغیرهای جدید را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$\alpha := \frac{1}{\varepsilon \gamma^2} \Rightarrow \gamma = \frac{1}{\sqrt{\alpha \varepsilon}} \quad \text{and} \quad \mu := \sqrt{\theta}$$

به منظور پیشینه سازی  $\gamma$  و کمینه سازی  $\theta$  می‌توان از مینیمم سازی ترکیب محدب  $\lambda(\alpha + \varepsilon) + (1 - \lambda)\theta$  استفاده نمود. بنابراین داریم

$$J(t) \leq e^T \left( A_0^T P + P A_0 + \frac{1}{\varepsilon} P L_o L_o^T P + \alpha^{-1} I_{n+q} + H^T H \right) e + 2e^T P \bar{D} \varphi(x, u, t) - \theta \varphi(x, u, t)^T \varphi(x, u, t)$$

$$J(t) \leq \begin{bmatrix} e \\ \varphi(x, u, t) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} A_0^T P + P A_0 + \frac{1}{\varepsilon} P L_o L_o^T P + \alpha^{-1} I_{n+q} + H^T H & P \bar{D} \\ \bar{D}^T P & -\theta I_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ \varphi(x, u, t) \end{bmatrix}$$

برای اینکه  $J(t) \leq 0$  باشد، کافی است رابطه زیر برقرار باشد:

$$\begin{bmatrix} A_0^T P + P A_0 + \frac{1}{\varepsilon} P L_o L_o^T P + \alpha^{-1} I_{n+q} + H^T H & P \bar{D} \\ \bar{D}^T P & -\theta I_q \end{bmatrix} \leq 0$$

رابطه بالا را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{bmatrix} A_0^T P + P A_0 + H^T H & P \bar{D} \\ \bar{D}^T P & -\theta I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon^{-1} P L_o L_o^T P + \alpha^{-1} I_{n+q} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \leq 0$$

$$\begin{bmatrix} A_0^T P + P A_0 + H^T H & P \bar{D} \\ \bar{D}^T P & -\theta I_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P L_o & I_{n+q} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\varepsilon & 0 \\ 0 & -\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P L_o & I_{n+q} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^T \leq 0$$

با توجه به لم شور رابطه بالا را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{bmatrix} A_0^T P + P A_0 + H^T H & P \bar{D} & P L_o & I_{n+q} \\ * & -\theta I_q & 0 & 0 \\ * & * & -\varepsilon I_p & 0 \\ * & * & * & -\alpha I_{n+q} \end{bmatrix} \leq 0 \quad (9)$$

$$P A_0 = P(\bar{A}_1 - L_1 L_x \bar{A}_3) = P \bar{A}_1 - P L_1 L_x \bar{A}_3 = P \bar{A}_1 - Y L_x \bar{A}_3$$

$$P L_o = P[I_{n+q} \quad -L_1 L_x] = [P I_{n+q} \quad -Y L_x]$$

با جاگذاری روابط در معادله (۹) به رابطه زیر می‌رسیم:

$$\begin{bmatrix} \Phi & P \bar{D} & P I_{\bar{n}} & -Y L_x & I_{n+q} \\ * & -\theta I_{n+q} & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -\varepsilon I_{n+q} & 0 & 0 \\ * & * & * & -\varepsilon I_p & 0 \\ * & * & * & * & -\alpha I_{n+q} \end{bmatrix} < 0 \quad (10)$$

$$\Phi = \bar{A}_1^T P + P \bar{A}_1 - Y L_x \bar{A}_3 - \bar{A}_3^T L_x^T Y^T + H^T H$$

باید دقت نمود که اگر رابطه (۸) برقرار باشد، آنگاه  $J(t) \leq 0$  می‌شود و خطای تخمین حالت‌ها با تضعیف اثر اغتشاش‌ها توسط  $\theta$  پایدار مجانبی می‌شود.

با انتگرال‌گیری از رابطه مشتق تابع لیپانوف، خواهیم داشت

$$V(e(\infty)) - V(e(0)) + \|g\|_2^2 - \theta\|\varphi\|_2^2 \leq 0$$

با در نظر گرفتن شرایط اولیه صفر برای خطای حالت‌ها و خطای عیب خواهیم داشت

$$e_x(0) = e_a(0) = 0 \quad \Rightarrow \quad V(e(0)) = 0$$

$$V(e(\infty)) = e^T(\infty)Pe(\infty) \geq 0$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$\|g\|_2^2 \leq \theta\|\varphi\|_2^2$$

نتیجه ۱: شرایط لازم برای قابل حل بودن LMI موجود در مسئله (همچنین توانایی رؤیتگر برای تخمین عیب حادث شده در سیستم) این است که  $(A, C)$  باید آشکارپذیر باشند و نیز  $(A, F_x, C, F_y)$  هیچ صفری در مبدا نداشته باشد [۲۰]

### ۳- شبیه‌سازی

در این قسمت کارایی روش پیشنهادی در تشخیص عیب کوبل شده با حالت را در یک موتور القایی در حضور اغتشاش مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به منظور کاهش پیچیدگی، معادلات موتور از قاب  $abc$  به قاب مرجع دلخواه  $dq0$  انتقال داده می‌شوند. در این قاب معادلات سه فاز موتور القایی به دو محور  $d$  و  $q$  انتقال داده می‌شوند. مدل‌سازی موتور القایی در قاب دلخواه  $dq0$  می‌تواند به صورت زیر خلاصه شود [۲۱]:

فرض می‌کنیم که ولتاژ ورودی سیستم در سه فاز  $a, b, c$  در سیم پیچ استاتور به صورت زیر باشد:

$$\begin{aligned} v_{as} &= V_m \cos(\omega t) \\ v_{bs} &= V_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{cs} &= V_m \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

حال به وسیله تبدیل زیر ولتاژها را در قاب دلخواه  $dq0$  بازنویسی می‌کنیم.

$$\begin{bmatrix} v_q \\ v_d \\ v_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}$$

$$\theta = \int_0^t \omega(\xi) d\xi + \theta(0) \quad (12)$$

همچنین روابط جریان و سرعت موتور القایی به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\begin{aligned} \frac{d\lambda_{ds}}{dt} &= v_{ds} - r_s(R_1\lambda_{ds} - R_2\lambda_{dr}) \\ \frac{d\lambda_{qs}}{dt} &= v_{qs} - r_s(R_1\lambda_{qs} - R_2\lambda_{qr}) \\ \frac{d\lambda_{qr}}{dt} &= -r_r(R_3\lambda_{qr} - R_2\lambda_{qs}) + \omega_r\lambda_{dr} \\ \frac{d\lambda_{dr}}{dt} &= -r_r(R_3\lambda_{dr} - R_2\lambda_{ds}) - \omega_r\lambda_{qr} \\ \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{1}{J}(T_e - \beta\omega_r - T_l) \end{aligned}$$

در روابط بالا مقاومت‌های  $R_1$ ،  $R_2$  و  $R_3$  و گشتاور الکتریکی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$R_1 = \frac{l_r}{l_s l_r - l_m^2} \quad R_2 = \frac{l_m}{l_s l_r - l_m^2} \quad R_3 = \frac{l_s}{l_s l_r - l_m^2} \quad T_e = \frac{3}{4} z_p (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds})$$

در معادله بالا،  $z_p$  برابر تعداد قطب‌های موجود در موتور،  $J$  ممان اینرسی روتور و پروانه‌ها،  $T_l$  گشتاور بار،  $r_s$  و  $r_r$  مقاومت استاتور و روتور،  $l_s$  و  $l_r$  و  $l_m$  به ترتیب اندوکتانس استاتور، روتور و اندوکتانس بین روتور و استاتور هستند.

پارامترهای سیستم به صورت زیر تعریف شده‌اند:

$$r_s = 1.7, \quad r_r = 10, \quad l_m = 0.15, \quad l_s = 0.3, \quad l_r = 0.1, \quad J = 0.5, \quad z_p = 2, \quad T_l = 0, \quad \beta = 0.001$$

با در نظر گرفتن معادلات بالا، می‌توان روابط موتور القایی را به فرم فضای حالت زیر نوشت:

$$\dot{x} = Ax + Bu + G(x)$$

متغیرهای حالت و ماتریس‌ها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} x &= [\lambda_{qs} \quad \lambda_{ds} \quad \lambda_{qr} \quad \lambda_{dr} \quad \omega_r \quad \theta]^T \\ A &= \begin{bmatrix} -R_1 R_s & 0 & R_2 R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R_1 R_s & 0 & R_2 R_s & 0 & 0 \\ R_2 R_r & 0 & -R_3 R_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 R_r & 0 & -R_3 R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\beta/J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} & B &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \\ G(x) &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ x_5 x_4 \\ -x_5 x_3 \\ \frac{1}{J}(T_e - T_l) \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

با در نظر گرفتن عیب به صورت تغییر در مقدار ممان اینرسی روتور و همچنین اغتشاش به صورت نامتعادلی در ولتاژ ورودی، معادلات را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\dot{x} = Ax + Bu + M(x, a) + D\varphi(x, u, t)$$

$$A = \begin{bmatrix} -R_1R_s & 0 & R_2R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R_1R_s & 0 & R_2R_s & 0 & 0 \\ R_2R_r & 0 & -R_3R_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2R_r & 0 & -R_3R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\beta/J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad M(x, a) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ x_5x_4 \\ -x_5x_3 \\ \frac{1}{J-a}(T_e - T_l) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\varphi(x, u, t) = k * v_{dq}$$

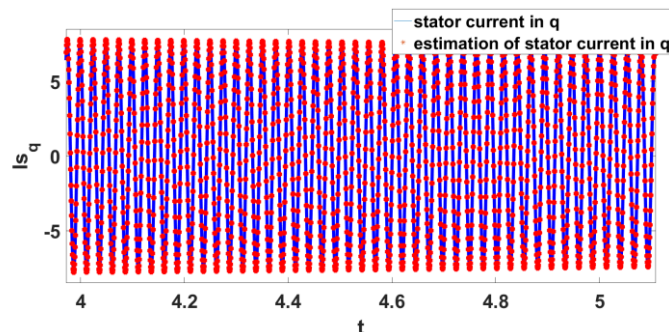
$k$  درصد نامتعادلی در ولتاژ ورودی را نشان می‌دهد. ماتریس‌های مورد نیاز طراحی به صورت زیر تعریف شده‌اند.

$$F_x = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \quad F_y = [0 \ 0 \ 0]^T$$

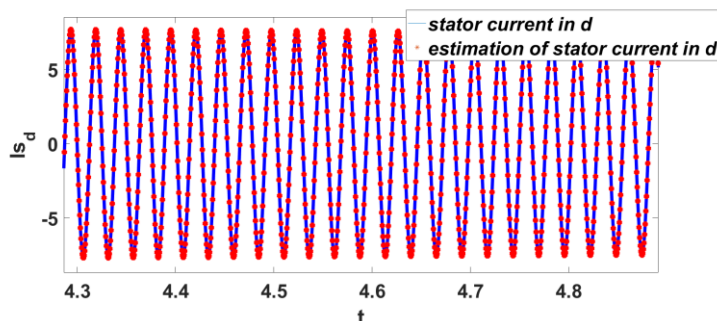
$$L_2 = 2 \times I_p \quad L_x = (I_p + L_2)^{-1} \quad \varphi(x, u, t) = 0.01 * v_{dq}$$

در این شبیه‌سازی فرض شده است که عیب در  $t = 6$  تا زمان  $t = 10$  اتفاق افتاده است و دامنه آن  $a = 0.1$  است. با حل LMI مربوطه پارامترهای مجهول به صورت زیر به دست می‌آیند و همچنین نتایج شبیه‌سازی را در شکل‌های زیر مشاهده می‌کنید.

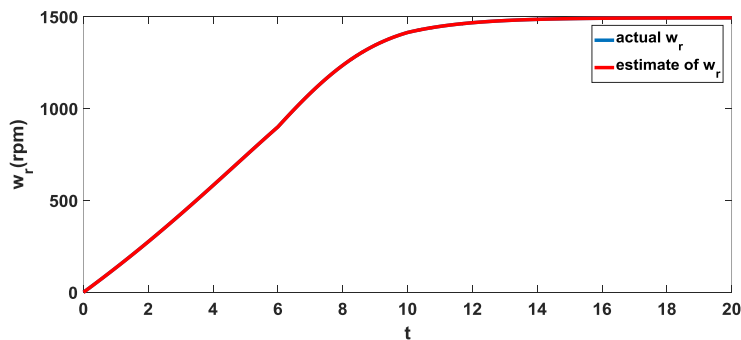
$$\mu = 0.0087 \quad \gamma = 0.6242$$



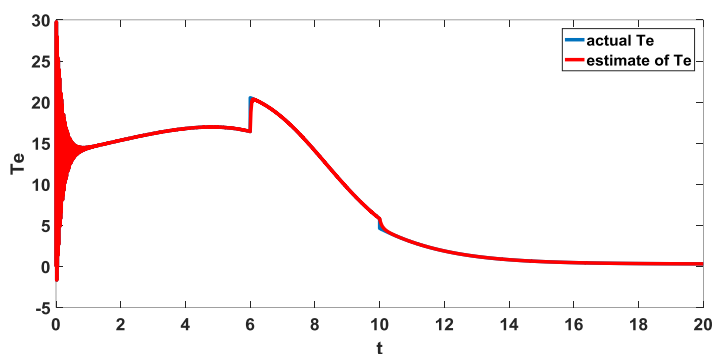
شکل ۱. جریان استاتور در فاز  $q$  و تخمین آن در موتور القایی بدون بار



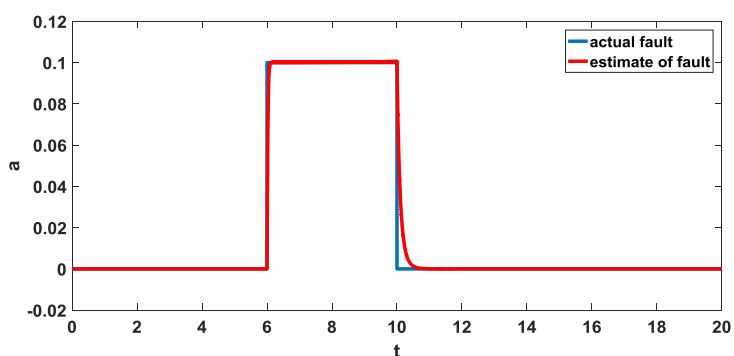
شکل ۲. جریان استاتور در فاز  $d$  و تخمین آن در موتور القایی بدون بار



شکل ۳. سرعت زاویه ای موتور القایی و تخمین آن



شکل ۴. گشتاور الکترومغناطیسی موتور القایی و تخمین آن



شکل ۵. عیب واقعی و تخمین آن در سیستم با حضور اغتشاش

همان طور که در شکل‌ها مشخص است، وقوع عیب در سیستم به خوبی تخمین زده شده و همچنین اثر اغتشاش به خوبی تضعیف شده است. حالت‌های سیستم با وجود اغتشاش و عیب در سیستم به خوبی تخمین زده شده‌اند و نهایتاً به مقدار واقعی خود همگرا شده‌اند. تنها مقدار گشتاور الکتریکی که تحت تاثیر مستقیم وقوع عیب بوده است، در مدت زمان رخداد عیب اندکی با مقدار واقعی خود تفاوت دارد. کارایی الگوریتم پیشنهادی در شبیه‌سازی مذکور کاملاً مشهود است و این امر نشان می‌دهد که رؤیتگر پیشنهادی به خوبی توانسته است عیب موجود در سیستم را در حضور اغتشاش‌های حالت به خوبی تخمین بزند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک رؤیتگر مقاوم به منظور تخمین عیب برای کلاس خاصی از سیستم‌های غیرخطی پیشنهاد شده است. همچنین عیب و اغتشاش‌های موجود در سیستم به صورت تابعی غیرخطی و کوپل شده با متغیرهای حالت در نظر گرفته شده است. سپس

رؤیتگر لیونبرگر به منظور تخمین عیب موجود در سیستم طراحی شده است. همچنین اثر اغتشاش‌های موجود در سیستم توسط نرم  $L_2$  تضعیف شده است. شرایط لازم برای وجود چنین رؤیتگری به صورت LMI مطرح شده است و نهایتاً عملکرد روش مذکور بر روی یک موتور القایی سه فاز شبیه‌سازی شده است و نتایج به خوبی کارایی الگوریتم پیشنهاد شده را نشان داده است.

## مراجع

- [1] Chen, J. Patton, R. J. "Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems," *Kluwer Academic Publishers*, 1999.
- [2] Sun, X. "Unknown input observer approaches to robust fault diagnosis," *Ph.D thesis*, University of hull, 2013.
- [3] Liu, Q. "Observer-based Fault Diagnosis: Applications to Exothermic Continuous Stirred Tank Reactors," *Master's thesis*, Texas A & M University, USA, 2016.
- [4] Zhang, J. "Robust observer based fault diagnosis for nonlinear systems," *Ph.D thesis*, University of Auckland, New Zealand, 2013.
- [5] Yan, X. G. Edwards, C. "Nonlinear robust fault reconstruction and estimation using a sliding mode observer," *Automatica*, 43, 1605-1614, 2007.
- [6] Chen, W. Chowdhury, F. N. "A synthesized design of sliding-mode and Luenberger observers for early detection of incipient faults," *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 24, 1021-1035, 2010.
- [7] Liu, J. Wang, J. L. Yang, G. H. "An LMI approach to minimum sensitivity analysis with application to fault detection," *Automatica*, 41(11), 1995 – 2004, 2005.
- [8] Wang, J. L. Yang, G. H. Liu, J. "An LMI approach to  $H_\infty$  index and mixed  $H_2/H_\infty$  fault detection observer design," *Automatica* 43(9), 1656 – 1665, 2007.
- [9] Jee, S. C. Lee, H. J. Joo, Y. H. " $H_\infty/H_2$  Sensor Fault Detection and Isolation in Linear Time-Invariant Systems," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 10(4), 841-848, 2012.
- [10] Li, J. Pan, K. Su, Q.: Sensor fault detection and estimation for switched power electronics systems based on sliding mode observer', *Applied Mathematics and Computation*, 353, pp 282-294, 2019.
- [11] Han, W. Wang, Z. Shen, Y:  $H_\infty/L_\infty$  fault detection observer design for uncertain linear systems', *International Journal of Systems Science*, 66, (11), pp 8681 – 8691, 2019.
- [12] Mart´inez-Garc´ıa, C. Astorga-Zaragoza, C. Puig, V. Reyes-Reyes, J. L´opez-Estrada, F.: A Simple Nonlinear Observer for State and Unknown Input Estimation: DC Motor Applications', *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 7747, 2019.
- [13] Pertew, A. M. Marquez, H. J. Zhao, Q. " $H_\infty$  observer design for lipschitz nonlinear systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, 51(7), 1211-1216, 2006.
- [14] Abbaszadeh, M. Marquez, H. J. "Dynamical robust  $H_\infty$  filtering for nonlinear uncertain systems: An LMI approach," *Journal of the Franklin Institute*, 347, 1227-1241, 2010.
- [15] Brahim, A. B. Dhahri, S. Hmida, F. B Sellami, A. "Simultaneous Actuator and Sensor Faults Reconstruction for Lipschitz Nonlinear Systems," *Proceedings of the 4th International Conference on Systems and Control (ICSC), Sousse, Tunisia*, 28-30, 2015.
- [16] Jiang, B. Chowdhury, F. N. "Parameter fault detection and estimation of a class of nonlinear systems using observers," *Journal of the Franklin Institute*, 342(7), 725-736, 2005.
- [17] Zhang, X. Polycarpou, M. M. Parisini, T. "Design and analysis of a fault isolation scheme for a class of uncertain nonlinear systems," *Annual Reviews in Control*, 32(1), 107-121, 2008.
- [18] Zhang, X. Polycarpou, M. M. Parisini, T. "Fault diagnosis of a class of nonlinear uncertain systems with Lipschitz nonlinearities using adaptive estimation," *Automatica*, 46, 290-299, 2010.
- [19] Chua, W. S. Tan, C. P. Aldeen, M. Saha, S. "A robust fault estimation scheme for a class of nonlinear systems," *Asian Journal of Control*, 19(2), 1-6, 2017.
- [20] T. A. Kawady, A. A. Afify, and A. M. Osheiba, A. I. Taalab, "Modeling and Experimental Investigation of Stator Winding Faults in Induction Motors," *Electric Power Components and Systems*, 37, 599-611, 2009.

- 
- [21] C. Kallesøe, “Fault detection and isolation in centrifugal pumps”, Videnbasen for Aalborg UniversitetVBN, *Aalborg UniversitetAalborg University*, Institut for Elektroniske Systemer Department