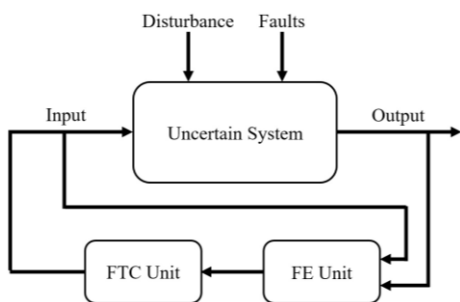


طراحی یکپارچه تخمین گر عیب و کنترل کننده تحمل پذیر عیب برای سیستم‌های خطی پارامتر متغیر با عیب عملگری و حسگری

هوشنگ جعفری، امین رضانی و مهدی فروزان فر



شکل ۱: دیاگرام کلی سیستم تخمین و کنترل تحمل پذیر عیب.

عیب می‌باشد که در تحقیقات بسیاری بررسی شده است. مقاله [۶]، یک مسئله طراحی برای به دست آوردن فیلتر تشخیص و تولید سیگنال مانده در سیستم‌های خطی تغییرناپذیر با زمان ارائه کرده است. برای تشخیص و جداسازی عیب برای سیستم غیرخطی از رویکردهای بهره بالا در [۷] استفاده شده است.

به جای استفاده از روش‌های سنتی تشخیص و جداسازی عیب، بازسازی سیگنال عیب از طریق یک تخمین گر مبتنی بر رویکرد، جایگزینی بسیار قدرتمند است. تخمین عیب، توسعه روش‌هایی است که برای تشخیص و شناسایی عیب با استفاده از سیگنال مانده تحت تأثیر نامعینی استفاده می‌گردد. تخمین گر عیب نقشی به اهمیت تشخیص و شناسایی عیب بازی می‌کند و به علاوه، یک روش مستقیم برای به دست آوردن برخی از اطلاعات مانند اندازه و شدت عیب است و سیگنال تولیدی به صورت مستقیم جهت جبران تأثیرات عیب و سیستم کنترلی استفاده می‌شود [۸]. مزایای تخمین عیب، توجه بسیاری از محققان را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده و چندین روش برای کنترل تحمل پذیر عیب از طریق سیگنال تخمین ارائه و توسعه یافته است. مفاهیم اولیه تشخیص و جداسازی عیب مبتنی بر رویکرد در [۹] و [۱۰] بیان شده است. به جای سیگنال مانده ایده آل برای تشخیص و جداسازی عیب، یک تخمین گر مقاوم جهت شناسایی عیب در یک سیستم نامعین به دست آمده است. محققان روش‌های تخمین عیب متعددی را بر اساس نوع سیستم، عیوب مختلف و سناریوهای گوناگون ارائه کرده‌اند که می‌توان به رویکرد مد لغزشی و رویکرد ورودی ناشناخته اشاره نمود [۱۱] تا [۱۵].

با وجود این، رویکرد مد لغزشی برای شرایطی مناسب است که تغییرات عیب به آهستگی صورت پذیرد. همچنین تخمین هم‌زمان عیب عملگری و حسگری توسط رویکرد مد لغزشی سخت‌تر می‌باشد و اطلاعات قبلی مربوط به حد بالای عیوب هم نیاز است. به علاوه، مابین تخمین گر عیب و کنترل کننده تحمل پذیر عیب، یک تعامل دوسویه مقاوم ناشی از خطای تخمین و عدم قطعیت وجود دارد [۱۶] که موجب به وجود آمدن چالش طراحی بسیار مهمی گردیده است. این مسئله برای سیستم‌های غیرخطی

چکیده: وقوع عیب در سیستم‌های واقعی عملاً غیر قابل اجتناب بوده و می‌تواند باعث کاهش عملکرد و حتی وارد شدن خسارت غیر قابل جبران مالی و جانی گردد. از این رو مداخله به موقع و سریع با اتخاذ تصمیم‌های مناسب به جهت جلوگیری از صدمات ناشی از عیب بسیار حیاتی است. همین امر استفاده از روش‌های کنترل تحمل پذیر عیب را برای جبران اثرات مخرب عیب در سیستم و افزایش قابلیت اطمینان و امنیت آن بسیار ضروری می‌نماید. در این مقاله روشی برای تخمین و کنترل وقوع عیب عملگری و حسگری به صورت هم‌زمان با استفاده از طراحی یک تخمین گر عیب و کنترل کننده تحمل پذیر عیب به صورت یکپارچه برای سیستم‌های خطی متغیر با زمان ارائه گردیده است. در این روش از یک تخمین گر مبتنی بر رویکرد ورودی ناشناخته با کنترل کننده حالت و مد لغزشی به جهت اطمینان از پایداری مقاوم سیستم از طریق حل نامساوی ماتریس خطی استفاده شده است. روش ارائه شده، روی یک سیستم خطی با پارامتر متغیر اعمال گردیده و نتایج شبیه‌سازی، مؤثر بودن این روش برای تخمین عیوب و پایداری سیستم را نشان می‌دهد.

کلیدواژه: تخمین گر عیب، سیستم خطی پارامتر متغیر، کنترل کننده تحمل پذیر عیب، نامساوی ماتریس خطی.

۱- مقدمه

وقوع عیب در سیستم، باعث تغییر مشخصات رفتاری اجزای سیستم کنترل به گونه‌ای می‌شود که مانع از حرکت در جهت رسیدن به هدف مطلوب می‌گردد. از این رو استفاده از یک سیستم کنترل تحمل پذیر عیب در حوالی کارکرد مطلوب بسیار ضروری است و در غیر این صورت، هنگام شکست؛ دیگر سیستم و اجزای آن قادر به تکمیل هدف فرایند نخواهند بود. به عبارت دیگر، کنترل کننده تحمل پذیر عیب باعث می‌شود که عیب واقع شده در سیستم منجر به وقوع یک شکست در فرایند نگردد. سیستم‌های تحمل پذیر عیب به صورت گسترده و در زمینه‌های مختلف از جمله در سیستم‌های قدرت، هوافضا، رباتیک و مکانیک استفاده شده است [۱] تا [۵].

تولید و تکامل سیگنال مانده یک روش برای تشخیص و جداسازی

این مقاله در تاریخ ۲۸ آذر ماه ۱۴۰۰ دریافت و در تاریخ ۹ شهریور ماه ۱۴۰۱ بازنگری شد.

هوشنگ جعفری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، (email: hooshang.jafari@modares.ac.ir).

امین رضانی (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، (email: ramezani@modares.ac.ir).

مهدی فروزان فر، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، اهواز، ایران، (email: m.forouzanfar@iauhvaz.ac.ir).

۲- مفاهیم اولیه

۲-۱ سیستم خطی پارامتر متغیر

یک سیستم خطی پارامتر متغیر به صورت کلی به شکل رابطه زیر تعریف می‌گردد

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(\rho)x(t) + B(\rho)u(t) \\ y(t) = C(\rho)x(t) + D(\rho)u(t) \end{cases} \quad (1)$$

که $x(t) \in R^n$ بردار حالت، $u(t) \in R^m$ بردار ورودی، $y(t) \in R^p$ بردار خروجی و $A(\rho)$ ، $B(\rho)$ ، $C(\rho)$ و $D(\rho)$ ماتریس‌های متناسب وابسته به متغیر ρ می‌باشند. همچنین متغیر $\rho = (\rho_1, \dots, \rho_N) \in \Omega$ برداری از تغییرات پارامترهای سیستم در فضای محدب Ω است. یکی از روش‌های بسیار پرکاربرد در بررسی و تحلیل این سیستم‌ها، روش چندگانه^۱ (چندوجهی) F_1 نام دارد. معادلات سیستم خطی پارامتر متغیر در این روش به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i(\rho) \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

که (A_i, B_i, C_i, D_i) ماتریس‌های سیستم خطی هستند که در گوشه‌های چندوجهی محدب تعریف شده‌اند و ضرایب $\alpha_i(\rho)$ برابر هستند با

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i(\rho) = 1, \quad \alpha_i(\rho) > 0 \quad (3)$$

و در این عبارت N تعداد گوشه‌هاست. با فرض این که پارامترها در محدوده $\rho_i \in [\underline{\rho}_i, \bar{\rho}_i]$ تغییر می‌کنند، بردار تغییرات پارامترها در درون یک چندبره با گوشه‌های ω_i به شکل زیر تغییر خواهد کرد

$$\rho \in Co\{\omega_1, \dots, \omega_N\} \quad (4)$$

پس بردار ρ در چندبره‌ای با گوشه‌های ω_i به فرم زیر تعریف می‌شود

$$\begin{aligned} \rho \in \Omega := Co\{\omega_1, \dots, \omega_N\} \\ = \left\{ \sum_{i=1}^N \alpha_i \omega_i : \alpha_i \geq 0, \sum_{i=1}^N \alpha_i(\rho) = 1 \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

۲-۲ تعریف مسئله

با توجه به تعاریف انجام‌شده، سیستم خطی پارامتر متغیر چندگانه نامعین در حضور عیوب عملگری و حسگری و اغتشاش به صورت زیر تعریف می‌گردد

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A(\rho) + \Delta A(\rho))x(t) + B(\rho)u(t) \\ \quad + D(\rho)d(t) + F_a f_a(t) \\ y(t) = C(\rho)x(t) + F_s f_s(t) \end{cases} \quad (6)$$

که $x(t) \in R^n$ ، $u(t) \in R^m$ و $y(t) \in R^p$ به ترتیب بردارهای حالت، ورودی کنترلی و خروجی هستند و همچنین $d(t) \in R^l$ اغتشاش، $f_a \in R^{q_a}$ عیب عملگری و $f_s \in R^{q_s}$ عیب حسگری می‌باشد. $A(\rho)$ متناسب و F_a و F_s ماتریس‌های ثابت معلوم هستند. مفروضات زیر برای سیستم (۶) در نظر گرفته می‌شود [۱۶] و [۳۳]:

فرض ۱: ماتریس $C(\rho)$ یک ماتریس پارامتر مستقل می‌باشد؛ یعنی $C(\rho) = C$ است.

بررسی و توسعه داده شده است [۱۷] تا [۲۰]. شکل ۱ ساختار کلی سیستم تخمین و کنترل تحمل‌پذیر عیب را نشان می‌دهد. از طرف دیگر به دلیل پیچیدگی بسیاری از سیستم‌های واقعی مانند غیرخطی بودن و تغییر در مدل و حالات به دلیل تغییر پارامترها، مدل سیستم‌های خطی با پارامتر متغیر، زمینه جذابی برای تحقیق و توسعه است. در واقع سیستم خطی با پارامتر متغیر، وابسته به پارامترهای در حال تغییر است و ساختار یک سیستم خطی متغیر با زمان با ماتریس‌های وابسته به پارامتر را دارد. در نتیجه، کنترل‌کننده خطی با پارامتر متغیر می‌تواند توسعه‌ای از روش‌های خطی باشد. اصلی‌ترین مزیت این سیستم، قابلیت استفاده از روش‌های قدرتمند کنترل خطی برای سیستم‌های غیرخطی پیچیده با تضمین پایداری کلی در کلیه نقاط کار می‌باشد.

انواع مدل‌ها و روش‌ها کنترلی سیستم‌های خطی با پارامتر متغیر در [۲۱] بررسی و دسته‌بندی شده‌اند که روش چندگانه یکی از آنها می‌باشد. این قابلیت موجب گردیده است تا بسیاری از محققان از این روش در مسائل مختلف کنترلی، به خصوص کنترل تحمل‌پذیر عیب استفاده نمایند [۲۲] تا [۳۰].

روشی برای طراحی یکپارچه تخمین عیب و کنترل تحمل‌پذیر عیب به صورت هم‌زمان وجود دارد که در [۳۱] و [۳۲] ارائه شده است؛ جایی که رُویتگر و کنترل‌کننده مد لغزشی برای کاهش تأثیرات عیوب و حفظ پایداری استفاده شده‌اند. با وجود این همان طور که در [۱۶] بیان شده، طراحی تخمین‌گر و کنترل‌گر عیب، زمانی کارایی مناسب حلقه بسته دارد که شرایط ایده‌آل بوده و هیچ نامعینی در سیستم نباشد. اما از آنجایی که خطای تخمین و نامعینی در سیستم‌های واقعی اجتناب‌ناپذیر هستند، یک تعامل دوسویه مقاوم بین تخمین‌گر و کنترل‌کننده عیب وجود دارد و بنابراین کارهایی را که این مورد در نظر گرفته نشده است نمی‌توان به‌عنوان طراحی یکپارچه توصیف کرد [۱۶].

با در نظر گرفتن پیش‌زمینه و مطالب ارائه‌شده، هدف این مقاله توسعه یک روش تخمین و کنترل تحمل‌پذیر عیب واقعی برای سیستم خطی پارامتر متغیر چندگانه می‌باشد که همراه با نامعینی و اغتشاش است و عیوب عملگری و حسگری، هم‌زمان در حال رخدادن هستند.

نوآوری و ایده اصلی این مقاله در استفاده از رابطه نامساوی ماتریس خطی با حل یک مرحله‌ای برای به‌دست‌آوردن مقادیر بهره تخمین‌گر و کنترل‌کننده تحمل‌پذیر عیب به صورت مقاوم در یک سیستم خطی پارامتر متغیر است که روش ارائه‌شده به دلیل در نظر گرفتن نامعینی مقاوم ناشی از تعامل دوسویه بین تخمین‌گر و کنترل‌کننده عیب و وجود نامعینی در سیستم و اغتشاش خروجی، یک طراحی یکپارچه واقعی محسوب می‌گردد. برای تخمین هم‌زمان عیوب عملگری و حسگری، یک رُویتگر ورودی ناشناخته بدون در نظر گرفتن شرایط مرتبه استفاده گردیده است. به‌علاوه از یک کنترل‌کننده مدل لغزشی در کنار کنترل‌کننده فیدبک حالت به جهت تضمین پایداری مقاوم و کارایی مناسب بهره گرفته شده است.

در ادامه و در بخش دوم، مفاهیم اولیه از سیستم‌های خطی پارامتر متغیر بحث و مسئله تعریف گردیده است. بخش سوم به طراحی تخمین‌گر عیب و کنترل‌کننده عیب و همچنین طراحی یکپارچه می‌پردازد. روش ارائه‌شده در مقاله در بخش چهارم به صورت شبیه‌سازی نشان داده شده و نهایتاً در بخش پنجم از مطالب و نتایج به‌دست‌آمده، نتیجه‌گیری به عمل آمده است.

در این مقاله، $\|\cdot\|$ نمایان‌گر نرم تابع، \dagger شبه معکوس ماتریس، * قسمت متقارن ماتریس و $He(X) = X + X^T$ می‌باشد.

در نتیجه تمامی زیرسیستم‌ها و به تبع آن سیستم (۸) رؤیت پذیر هستند. برای تخمین حالت افزونه x_i در مد i ام، رؤیتگر ورودی ناشناخته (UIO) F_2 زیر در نظر گرفته می‌شود

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_i &= M_i \xi_i + G_i u + R_i y \\ \hat{x}_{(i)} &= \xi_i + H_i y \end{aligned} \quad (10)$$

که $\xi_i \in R^{n+q_i+q_r}$ و متغیرهای حالت مد i ام و M_i, G_i, R_i و H_i ماتریس‌های طراحی هستند. بنابراین تخمین گر چندگانه به صورت زیر قابل نوشتن است

$$\dot{\xi} = \sum_{i=1}^N \alpha_i(\rho) \{M_i \xi_i + G_i u + R_i y\} \quad (11)$$

$$\hat{x} = \xi + \sum_{i=1}^N \alpha_i(\rho) H_i y$$

با فرض خطای تخمین به $e = \bar{x} - \hat{x}$ و تعریف ماتریس $R_i = L_v + L_{v_i}$ ، معادله دینامیکی خطا برابر خواهد شد با

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \sum_{i=1}^N \alpha_i(\rho) [(\Xi_i \bar{A}_i - L_{v_i} \bar{C})e + (\Xi_i \bar{A}_i - L_{v_i} \bar{C} - M_i) \xi_i \\ &+ (\Xi_i \bar{B}_i - G_i)u + [(\Xi_i \bar{A}_i - L_{v_i} \bar{C})H_i - L_{v_i}]y \\ &+ \Xi_i(\Delta \bar{A}_i + \bar{D}_i) \end{aligned} \quad (12)$$

که $\Xi_i = I_{n+q_i+q_r} - H_i \bar{C}$ است.

لم ۱: برای تمام $i = 1, \dots, N$ بدون حضور نامعینی و اغتشاش به صورت مجانبی پایدار است، اگر ماتریس M_i هورویتز F_3 بوده و شرایط زیر برقرار باشد

$$\begin{aligned} \Xi_i \bar{A}_i - L_{v_i} \bar{C} - M_i &= \cdot \\ \Xi_i \bar{B}_i - G_i &= \cdot \\ (\Xi_i \bar{A}_i - L_{v_i} \bar{C})H_i - L_{v_i} &= \cdot \end{aligned} \quad (13)$$

اثبات: در شرایط عدم حضور نامعینی و اغتشاش، معادله خطای (۱۲) تبدیل می‌گردد به

$$\dot{e} = \sum_{i=1}^N \alpha_i(\rho) M_i e \quad (14)$$

با توجه به هورویتز بودن ماتریس M_i برای تمام $i = 1, \dots, N$ حد خطا $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ است و بنابراین معادله دینامیکی خطا پایدار می‌باشد. ■

با در نظر گرفتن نامعینی، اغتشاش و شرایط لم ۱، دینامیک خطای (۱۲) تبدیل می‌گردد به

$$\dot{e} = \sum_{i=1}^N \alpha_i(\rho) \{(\Xi_i \bar{A}_i - L_{v_i} \bar{C})e + \Xi_i(\Delta \bar{A}_i + \bar{D}_i)\} \quad (15)$$

معادله (۱۵) بیانگر این است که اغتشاش و نامعینی منجر به وجود یک عدم تناسب بین رؤیتگر و سیستم کنترلی می‌شوند و همین موضوع بر کارایی تخمین گر عیب تأثیر می‌گذارد. برای تضمین پایداری مقاوم (۱۵)، تنها طراحی ماتریس‌های L_{v_i} و H_i نیاز است و سایر ماتریس‌ها با در نظر گرفتن شرایط لم ۱ قابل محاسبه هستند.

برای کنترل تحمل پذیر عیب فعال از طریق تخمین عیب، قانون کنترلی زیر در نظر گرفته می‌شود

فرض ۲: برای تمامی مقادیر پارامتر ρ ، جفت $(A(\rho), B(\rho))$ کنترل پذیر است و نیز جفت $(A(\rho), C(\rho))$ رؤیت پذیر بوده و $rank(B(\rho), F_a) = rank(B(\rho)) = m$ است.

فرض ۳: ماتریس نامعین $\Delta A(\rho) = M.F(\rho).N$ دارای نرم محدود است؛ جایی که M و N ماتریس‌های معلوم متناسب هستند و $F(\rho)$ یک ماتریس نامعلوم با برآورده کردن نامساوی $F^T(\rho)F(\rho) \leq I$ می‌باشد.

فرض ۴: سیستم (۶) تحت تأثیر $f_a(t)$ ، $f_s(t)$ و $d(t)$ پایدار بوده و این عیوب و اغتشاش به همراه مشتق اول آنها، انرژی محدود هستند.

سیستم خطی پارامتر متغیر چندگانه، مجموعه‌ای از سیستم‌های خطی تغییرناپذیر با زمان است که به صورت زیر آن را می‌توان نشان داد

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^N \alpha_i(\rho) \{ (A_i + \Delta A_i)x(t) + B_i u(t) + D_i d(t) \\ + F_a f_a(t) \\ y(t) = Cx(t) + F_s f_s(t) \end{cases} \quad (7)$$

برای هر گوشه و مدل خطی تغییرناپذیر با زمان متناظر، مدل سیستم افزونه مبتنی بر سیستم (۶) در نظر گرفته می‌شود

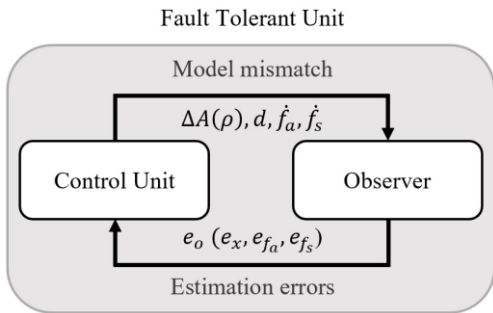
$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}_{(i)} = (\bar{A}_i + \Delta \bar{A}_i)\bar{x} + \bar{B}_i \bar{u} + \bar{D}_i \bar{d} \\ \bar{y} = \bar{C}\bar{x} \end{cases} \quad (8)$$

که مقادیر پارامترها در زیر آمده‌اند

$$\begin{aligned} \bar{x} &= [x^T \ f_a^T \ f_s^T]^T \\ \bar{d} &= [d^T \ f_a^T \ f_s^T]^T \\ \bar{A}_i &= \begin{bmatrix} A_i & F_a & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \\ \Delta \bar{A}_i &= \begin{bmatrix} \Delta A_i & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \\ \bar{B}_i &= \begin{bmatrix} B_i \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} \\ C_i &= [C \ \cdot \ F_s] \\ \bar{D}_i &= \begin{bmatrix} D_i & \cdot & \cdot \\ \cdot & I_{q_i} & \cdot \\ \cdot & \cdot & I_{q_r} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

نکته ۱: از آنجایی که (A_i, C) برای تمامی $i = 1, \dots, N$ رؤیت پذیر بوده و $rank \begin{bmatrix} sI_n - A_i \\ C \end{bmatrix} = n, \forall s \in \mathbb{C}$ است، برای مدل افزونه منجر خواهد شد به

$$\begin{aligned} rank \begin{bmatrix} sI_n - A_i & -F_a & \cdot \\ \cdot & sI_{q_i} & \cdot \\ \cdot & \cdot & sI_{q_r} \\ C & \cdot & F_s \end{bmatrix} &= rank \begin{bmatrix} sI_{n+q_i+q_r} - \bar{A}_i \\ \bar{C} \end{bmatrix} \\ &= n + q_i + q_r \end{aligned} \quad (9)$$



شکل ۲: تعامل دوسویه در تخمین گر عیب و کنترل کننده تحمل پذیر عیب.

$$\begin{bmatrix} \Lambda & D_i & Y_i C_i^T & M_i & Y_i N_i^T \\ * & -\gamma_i^2 I & \cdot & \cdot & \cdot \\ * & * & -I & \cdot & \cdot \\ * & * & * & -\varepsilon_i I & \cdot \\ * & * & * & * & -(\varepsilon_i \mu_i)^{-1} I \end{bmatrix} < \cdot \quad (21)$$

اثبات: این قضیه به طور مستقیم از لم محدوده حقیقی [۳۴] با در نظر گرفتن $X_v = Y_v H_i$ و $X_v = Y_v L_v$ اثبات می‌گردد. ■

۳- تخمین عیب و کنترل تحمل پذیر عیب یکپارچه

سیستم حلقه بسته افزونه شامل معادله خطای (۱۸) و معادله کنترلی (۲۰) برای سیستم خطی پارامتر متغیر چندگانه برابر است با

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^N \alpha_i(\rho) \{ (A_i + B_i K_{x_i}) x(t) - B_i K_i e(t) \\ &\quad + \Delta A_i x(t) + D_i d(t) \} \\ \dot{e} &= \sum_{i=1}^N \alpha_i(\rho) \{ (\Xi_i \bar{A}_i - L_v \bar{C}) e + \Xi_i (\Delta \bar{A}_i + \bar{D}_i) \} \\ y_c &= y - F_s \hat{f}_s \\ z &= C_x x + C_e e \end{aligned} \quad (22)$$

در این معادله $y_c, z \in R^r$ و \hat{f}_s به ترتیب خروجی سیستم کنترلی، خروجی اندازه‌گیری شده و تخمین عیب عملگری می‌باشد و C_x و C_e ماتریس‌های ثابت با ابعاد متناسب هستند. معادله (۲۲)، یک مسئله کنترل مقاوم مبتنی بر رویتگر می‌باشد که با روش بهینه‌سازی H_∞ از طریق نامساوی ماتریس خطی، قابل حل است. برای تخمین مقادیر عیوب f_a و f_s از یک رویتگر مرتبه کاهش یافته مطابق (۱۰) با در نظر گرفتن $z_i = L \bar{x}$ و $L = [0 \quad I_{q_1+q_s}] \in R^{(q_1+q_s) \times (n+q_1+q_s)}$ ، به صورت رابطه زیر استفاده می‌شود

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_i &= M_i \xi_i + G_i u + R_i y \\ \hat{z}_i &= \xi_i + H_i y \end{aligned} \quad (23)$$

که ξ_i بردار حالت رویتگر، $\hat{z}_i \in R^{q_1+q_s}$ تخمین z و M_i, G_i, R_i و H_i ماتریس‌های طراحی با ابعاد مناسب هستند. با فرض $\varepsilon = \xi_i - T \bar{x}$ می‌توان نوشت

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon} &= M_i \varepsilon + (M_i T + R_i \bar{C} - T \bar{A}_i) \bar{x} \\ &\quad + (G_i - T \bar{B}_i) u - T \Delta \bar{A}_i \bar{x} - T \bar{D}_i \bar{d} \\ e &= \varepsilon + (T + H_i \bar{C} - L) \bar{x} \end{aligned} \quad (24)$$

با توجه به لم ۱ برای سیستم (۶) در حالتی که نامعینی و اغتشاش وجود نداشته و ماتریس M_i هورویتز باشد و همچنین برقرار بودن شرایط زیر

$$u = \sum_{i=1}^N \alpha_i(\rho) K_i \hat{x} \quad (16)$$

که در آن $K_{x_i} \in R^{m \times n}$ ، $K_i = [K_{x_i} \quad K_{f_i}]$ بهره فیدبک کنترل حالت و $K_{f_i} \in R^{m \times q}$ بهره جبرانی عملگر است. با توجه به فرض ۲، بهره جبران عملگر را می‌توان $K_{f_i} = -B_i^\dagger F_a$ در نظر گرفت. برای یک رویتگر پایدار، معادله دینامیک خطا باید صفر شود ($e_i = 0$)؛ بنابراین سیستم حلقه بسته برای مد i با $u_i = K_i \hat{x}$ عبارت است از

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^N \alpha_i(\rho) \{ (A_i + B_i K_{x_i}) x(t) - B_i K_i e(t) \\ &\quad + \Delta \bar{A}_i x(t) + \bar{D}_i d(t) \} \end{aligned} \quad (17)$$

معادله (۱۷) نشانگر چگونگی تأثیر نامعینی و اغتشاش در کارکرد سیستم کنترل و تخمین عیب می‌باشد؛ بنابراین همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، مابین سیستم کنترل و تخمین، یک تعامل دوسویه مقاوم وجود دارد. به دلیل حضور اجتناب‌ناپذیر نامعین و خطای تخمین، ضروری است که در مسئله طراحی تخمین گر عیب و کنترل کننده تحمل پذیر عیب یکپارچه، این تعامل دوسویه در نظر گرفته شود که در روش طراحی جداگانه نادیده گرفته می‌شود. در نتیجه معادله دینامیک خطای زیر به دست می‌آید

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \sum_{i=1}^N \alpha_i(\rho) \{ (\Xi_i \bar{A}_i - L_v \bar{C}) e + \Xi_i (\Delta \bar{A}_i + \bar{D}_i) \} \\ z_e &= C_e e \end{aligned} \quad (18)$$

جایی که $z_e \in R^r$ خروجی اندازه‌گیری شده و C_e ماتریسی ثابت با ابعاد متناسب است.

قضیه ۱: به ازای مقدار مثبت اسکالر γ_i ، معادله خطای (۱۸) پایدار مقاوم H_∞ با $\|G_{z_e, d}\| < \gamma_i$ است، اگر ماتریس‌های مثبت معین X_v, Y_v و X_v برای تمام $i = 1, \dots, N$ وجود داشته باشند به طوری که

$$\begin{bmatrix} \Lambda_{v1} & \Lambda_{v2} & C_v^T \\ * & -\gamma_i^2 I & \cdot \\ * & * & -I \end{bmatrix} < \cdot \quad (19)$$

که در این رابطه، $\Lambda_{v1} = He(Y_v \bar{A}_i - X_v \bar{C} \bar{A}_i - X_v \bar{C})$ و $\Lambda_{v2} = Y_v (\Delta \bar{A}_i + \bar{D}_i) - X_v \bar{C}$ است.

اثبات: این قضیه به طور مستقیم از لم محدوده حقیقی [۳۴] با در نظر گرفتن $X_v = Y_v L_v$ و $X_v = Y_v H_i$ اثبات می‌گردد. ■ با وجود رویتگر پایدار، دینامیک خطا صفر شده و سیستم کنترلی تبدیل می‌شود به

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^N \alpha_i(\rho) \{ (A_i + B_i K_{x_i}) x(t) - B_i K_i e(t) \\ &\quad + \Delta A_i x(t) + D_i d(t) \} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} y_c &= y - F_s \hat{f}_s \\ z_x &= C_x x \end{aligned}$$

در (۲۰) خروجی کنترل شده با y_c و عیب عملگری تخمین شده با \hat{f}_s نشان داده شده‌اند. همچنین $z_x \in R^r$ خروجی اندازه‌گیری شده و C_x ماتریس ثابت با ابعاد متناسب است.

قضیه ۲: به ازای مقدار مثبت اسکالر γ_i ، سیستم کنترلی (۲۰) پایدار مقاوم H_∞ با $\|G_{z_x, d}\| < \gamma_i$ است، اگر ماتریس‌های مثبت معین Y_v و X_v برای تمام $i = 1, \dots, N$ وجود داشته باشند به طوری که

روش‌های کنترل مقاوم را بیشتر می‌کند و استفاده از روش کنترل مد لغزشی، یکی از راه‌حل‌ها می‌باشد. برای سیستم بررسی شده، ورودی کنترلی به صورت رابطه $u_i = u_{i1} + u_{i2}$ در نظر گرفته می‌شود که شامل فیدبک خطی $u_{i1} = -k_i x - B_i F_a \hat{f}_a$ با $k_i \in R^{m \times n}$ و فیدبک غیرخطی

$$u_{i2} = \begin{cases} -\delta(t) \frac{s_i}{\|s_i\|}, & s_i \neq 0 \\ 0, & s_i = 0 \end{cases}$$

برای $s_i = N_i x$ سطح لغزش می‌باشد. ماتریس دلخواه $Y_i \in R^{m \times n}$ و $N_i = B_i^+ - Y_i(I_n - B_i B_i^+)$ با $s_i \in R^m$ متغیر اسکالر $\delta(t)$ در نظر گرفته می‌شود. با باقی ماندن سیستم کنترلی در سطح لغزش طراحی شده، سیستم حلقه بسته عبارت خواهد شد از

$$\dot{x}(t) = (\Theta_i A_i - B_i K_i + \Delta A_i)x(t) + F_i e(t) + \Theta_i D_i d(t) \quad (31)$$

که در آن $F_i = [F_a \ 0]$ و $\Theta_i = I_n - B_i N_i$ است. بنابراین سیستم (۶) در مد لغزشی با معادل کنترلی طراحی شده باقی خواهد ماند اگر K_i به گونه‌ای طراحی شود که سیستم (۳۱) پایدار مقاوم باشد.

۳-۲ طراحی سیستم یکپارچه

با در نظر گرفتن معادله دینامیک خطای (۳۰) و سیستم کنترلی (۳۱)، سیستم حلقه بسته افزونه با فرض $D_i = [\Theta_i \ D_i \ 0]$ برابر می‌شود با

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^N \alpha_i(\rho) \{ (\Theta_i A_i - B_i K_i + \Delta A_i)x(t) \\ &\quad + F_i e(t) + \Theta_i D_i d(t) \} \\ \dot{e}(t) &= \sum_{i=1}^N \alpha_i(\rho) \{ (M_{v_i} - Z_i M_{v_i})e(t) \\ &\quad + (H_{v_i} + Z_i H_{v_i} \bar{C})(\Delta \bar{A}_i \bar{x} + \bar{D}_i \bar{d}) \} \\ y_c &= y - F_s \hat{f}_s \\ z &= C_x x(t) + C_e e(t) \end{aligned} \quad (32)$$

ساختار روش طراحی یکپارچه تخمین گر و کنترل تحمل پذیر عیب ارائه شده در شکل ۳ آمده است.

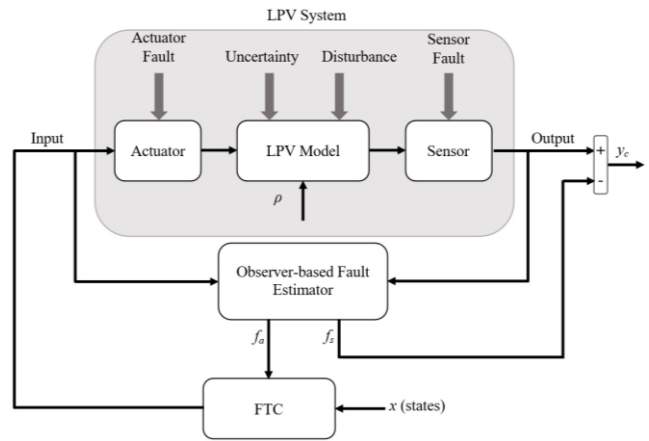
قضیه ۳: به ازای مقادیر مثبت اسکالر γ ، سیستم (۳۲) پایدار مقاوم H_∞ با $\|G_{zd}\| < \gamma$ می‌باشد، اگر ماتریس‌های مثبت معین متقارن P_i و Q_i و ماتریس‌های \hat{P}_i ، R_{v_i} و وجود داشته باشند به طوری که $P_i B_i = \hat{P}_i B_i$ و نامساوی زیر برقرار باشد

$$\begin{bmatrix} \chi_{11} & \chi_{12} & \chi_{13} & \chi_{14} & \cdot & C_x^T \\ * & \chi_{22} & \chi_{23} & \cdot & \chi_{25} & C_e^T \\ * & * & -\gamma^2 I & \cdot & \cdot & \cdot \\ * & * & * & -I & \cdot & \cdot \\ * & * & * & * & -I & \cdot \\ * & * & * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (33)$$

که در این نامساوی ماتریسی $\chi_{11} = He(P_i \Theta_i A_i - B_i R_{v_i}) + 2N^T N$ ، $\chi_{12} = He(Q_i M_{v_i} - R_{v_i} M_{v_i})$ ، $\chi_{13} = P_i M$ ، $\chi_{14} = P_i D_i$ ، $\chi_{15} = P_i F_i$ و $\chi_{25} = (Q_i \bar{H}_i + R_{v_i} H_{v_i} \bar{C}) \bar{M}$ ، $\chi_{23} = (Q_i \bar{H}_i + R_{v_i} H_{v_i} \bar{C}) \bar{D}_i$ می‌باشند. بنابراین مقادیر بهره‌های سیستم یکپارچه از طریق روابط $K_i = \hat{P}_i^{-1} R_{v_i}$ و $Z = \hat{P}_i^{-1} R_{v_i}$ به دست می‌آیند.

اثبات: با در نظر گرفتن تابع لیاپانوف $V_i = e^T Q_i e$ و ماتریس مثبت معین متقارن Q_i ، این قضیه اثبات می‌گردد. ■

محدودیت خطی (۳۳) مستقیماً با استفاده از جعبه ابزار نامساوی ماتریس



شکل ۳: ساختار یکپارچه تخمین گر عیب و کنترل تحمل پذیر عیب.

$$\begin{aligned} M_i T + R_i \bar{C} - T \bar{A}_i &= 0 \\ G_i - T \bar{B}_i &= 0 \\ T + H_i \bar{C} - L &= 0 \end{aligned} \quad (25)$$

رویتگر پایدار (۲۳) به دست خواهد آمد. با توجه به (۲۵) و $T = L - H_i \bar{C}$ می‌توان نوشت $M_i(L - H_i \bar{C}) + R_i \bar{C} - (L - H_i \bar{C}) \bar{A}_i = 0$. با تعریف $T_i = R_i - M H_i$ می‌توان نوشت

$$L \bar{A}_i - M L = [T_{v_i} \ H_{v_i}] \begin{bmatrix} \bar{C} \\ \bar{C} \bar{A}_i \end{bmatrix} \quad (26)$$

با ضرب از سمت راست $[S_{v_i} \ S_v]$ در هر دو سمت معادله فوق داریم

$$M_i = L \bar{A}_i S_{v_i} - [T_{v_i} \ H_{v_i}] \begin{bmatrix} \bar{C} S_{v_i} \\ \bar{C} \bar{A}_i S_{v_i} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$L \bar{A}_i S_v = [T_{v_i} \ H_{v_i}] \begin{bmatrix} \bar{C} S_v \\ \bar{C} \bar{A}_i S_v \end{bmatrix} \quad (28)$$

معادله (۲۸) را می‌توان به صورت $[T_{v_i} \ H_{v_i}] \Omega_i = \Psi_i$ بازنویسی کرد که با پاسخ عمومی برابر است با [۱۶]

$$[T_{v_i} \ H_{v_i}] = \Psi_i \Omega_i^\dagger + Z_i (I_{v_p} - \Omega_i \Omega_i^\dagger) \quad (29)$$

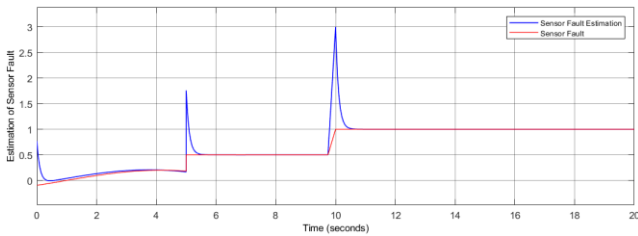
که در این معادله $Z_i \in R^{(q_i + q_r) \times p}$ ماتریس‌های دلخواه غیر صفر می‌باشند و بنابراین $M_i = M_{v_i} - Z_i M_{v_i}$ و $H_i = H_{v_i} + Z_i H_{v_i}$ است. همچنین $M_{v_i} = (I_{v_p} - \Omega_i \Omega_i^\dagger) \Gamma_i$ و $M_{v_i} = L \bar{A}_i S_{v_i} - \Psi_i \Omega_i^\dagger \Gamma_i$ با $H_{v_i} = (I_{v_p} - \Omega_i \Omega_i^\dagger) \Gamma_{v_i}$ و $H_{v_i} = \Psi_i \Omega_i^\dagger \Gamma_i$ و $\Gamma_i = \begin{bmatrix} \bar{C} S_{v_i} \\ \bar{C} \bar{A}_i S_{v_i} \end{bmatrix}$ مقادیر $\Gamma_{v_i} = [0 \ I_p]$ است. لذا ماتریس Z_i برای پایدار کردن M_i به تبع آن به دست آوردن مقادیر H_i ، R_i و G_i طراحی می‌شود. با جاگذاری T و M_i در دینامیک خطای (۱۸) خواهیم داشت

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \sum_{i=1}^N \alpha_i(\rho) \{ (M_{v_i} - Z_i M_{v_i})e \\ &\quad + (H_{v_i} + Z_i H_{v_i} \bar{C})(\Delta \bar{A}_i \bar{x} + \bar{D}_i \bar{d}) \} \end{aligned} \quad (30)$$

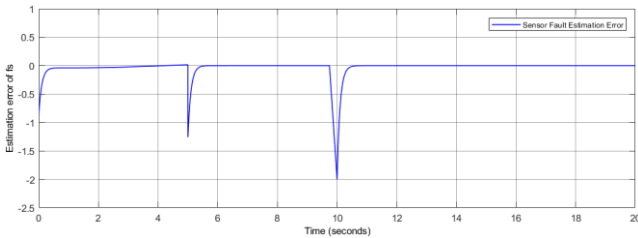
پس ماتریس Z_i باید طوری طراحی گردد که پایداری مقاوم (۳۰) جهت به دست آوردن رویتگر (۱۱) طراحی شده برای سیستم (۶) تضمین شود.

۳-۱ طراحی کنترل تحمل پذیر عیب

تأثیر نامعینی و اغتشاش در سیستم کنترلی، اهمیت استفاده از



شکل ۷: تخمین عیب حسگری و f_s .



شکل ۸: خطای تخمین عیب حسگری.

حسگری به صورت f_s و f_a با $F_a = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$ و $F_s = \begin{bmatrix} -1 \\ 2 \end{bmatrix}$ همراه با اغتشاش $d(t) = 0.1 \sin t$ و با مقادیر عیوب f_s و f_a زیر به سیستم اعمال می‌گردد

$$f_a = \begin{cases} 0.5 & 0 < t \leq 4 \\ 1.5 & 4 < t \leq 12 \\ 1 & t > 12 \end{cases}$$

(۳۷) رابطه پایین ۲ مساوی داشت

$$f_s = \begin{cases} 0.2 \sin(0.1\pi t) & 0 < t \leq 5 \\ 0.5 & 5 < t \leq 10 \\ 1 & t > 10 \end{cases}$$

تمامی فرض‌های ذکر شده برای سیستم (۳۵) صادق هستند. به علاوه $\beta = 0.001$, $C_x = C_e = I_r$, مقدار اولیه سیستم، $[x_1 \ x_2]^T = [0.5 \ 0.5]$ با $Y = [0.5, 0.5]$ و $\gamma = 0.65$ در نظر گرفته می‌شوند. پارامتر اسکالر γ با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی عددی برای رسیدن به بهترین پاسخ به دست آمده است. برای سیستم (۳۵) و فرضیات ذکر شده بر اساس روش ارائه شده با حل ماتریس نامساوی خطی (۳۳) به ازای مقادیر مجموعه Ω خواهیم داشت

$$\hat{P}_1 = 4.74852 \times 10^{-4}$$

$$R_1 = [0.70779 \ 0.15558] \quad (38)$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} -0.2057 & -0.1134 & 0.3936 & -0.1847 \\ 0.2030 & -0.1204 & -0.2143 & 0.6468 \end{bmatrix}$$

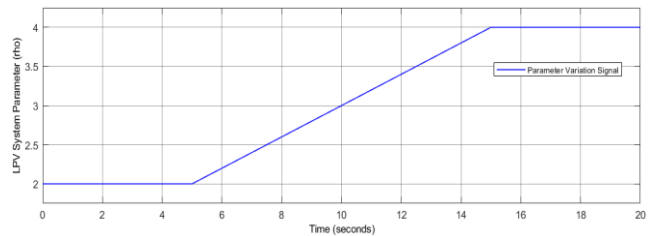
و

$$\hat{P}_2 = 7.1954 \times 10^{-3}$$

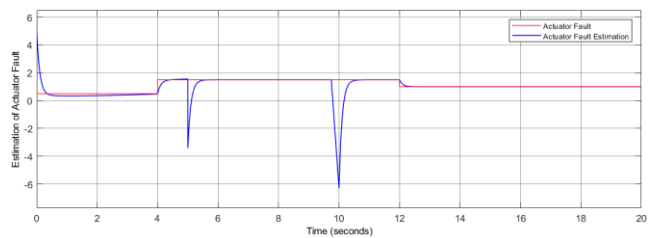
$$R_3 = [0.1680 \ 0.6721] \quad (39)$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} -0.1549 & -0.0705 & 0.1822 & -0.2393 \\ 0.3449 & -0.0603 & -0.2022 & 0.7500 \end{bmatrix}$$

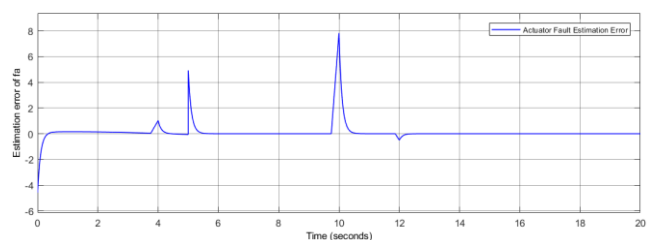
با استفاده از مقادیر به دست آمده فوق از حل ماتریس نامساوی خطی، بهره‌های کنترل کننده و رؤیتگر سیستم یکپارچه با جایگذاری در روابط $Z = \hat{P}_i^{-1} R_i$ و $K_i = \hat{P}_i^{-1} R_i$ به دست می‌آیند. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های ۴ تا ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به نتایج برای سیستم خطی پارامتر متغیر در نظر گرفته شده به همراه اعمال عیوب عملگری و



شکل ۴: سیگنال تغییرات پارامترهای سیستم.



شکل ۵: تخمین عیب عملگری و f_a .



شکل ۶: خطای تخمین عیب عملگری.

خطی (LMI) قابل حل است. همچنین تساوی $P_i B_i = B_i \hat{P}_i$ از طریق تبدیل آن به یک مسئله بهینه‌سازی ارائه شده در [۱۶] و [۳۵] قابل حل می‌باشد به طوری که با کمترین مقدار اسکالر مثبت β_i نسبت به (۳۳) به شرطی که

$$\begin{bmatrix} \beta_i I & P_i B_i - B_i \hat{P}_i \\ * & \beta_i I \end{bmatrix} > 0 \quad (34)$$

۴- شبیه‌سازی

با در نظر گرفتن مطالب ارائه شده در این مقاله، مثالی عددی از یک سیستم خطی پارامتر متغیر برگرفته از مدل پارامتر متغیر دوچرخ خودرو [۳۶] به صورت زیر برای سنجش و راستی‌آزمایی روش ارائه شده در نظر گرفته می‌شود

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3/a & -1 + \frac{-1}{a^2} \\ 2 & -4/a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/a \\ 1 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0.1/a \\ 0.1 \end{bmatrix} d(t) \quad (35)$$

در این سیستم a پارامتر متغیر می‌باشد که بین مقادیر ۲ تا ۴ در حال تغییر است. بردار تغییر سیستم خطی به صورت $\rho = 1/a$ در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین مدل خطی پارامتر متغیر (۳۵) با بردار تغییرات $\rho_1 = \rho$ و $\rho_2 = \rho^2$ به یک مدل چندگانه تبدیل می‌گردد که مجموعه Ω برابر است با

$$\Omega = [\underline{\rho}_1 \ \bar{\rho}_1] \times [\underline{\rho}_2 \ \bar{\rho}_2] = [2 \ 4] \times [4 \ 16] \quad (36)$$

با فرض این که در طول کارکرد سیستم، عیوب جمعی عملگری و

[3] A. Moradmand, M. Dorostian, and B. Shafai, "Energy scheduling for residential distributed energy resources with uncertainties using model-based predictive control," *International J. of Electrical Power & Energy Systems* vol. 132, Article ID: 107074, Nov. 2021.

[4] A. Oloomi and H. Khanmirza, "Fault tolerance of RTMP protocol for live video streaming applications in hybrid software-defined networks," *J. of Electrical and Computer Engineering Innovations*, vol. 7, no. 2, pp. 241-250, Jul. 2019.

[5] S. Khodakaramzadeh, M. Ayati, and M. R. Hairi-Yazdi, "Fault diagnosis of a permanent magnet synchronous generator wind turbine," *J. Electr. Comput. Eng. Innovations*, vol. 9, no. 2, pp. 143-152, Jul. 2021.

[6] M. A. Massoumnia, "A geometric approach to the synthesis of failure detection filters," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 31, no. 9, pp. 839-846, Sept. 1986.

[7] H. Hammouri, M. Kinnaert, and E. H. El Yaagoubi, "Observer-based approach to fault detection and isolation for nonlinear systems," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 44, no. 10, pp. 1879-1884, Oct. 1999.

[8] M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze, M. Staroswiecki, and J. Schröder, *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*, vol. 2, Berlin: Springer, 2006.

[9] R. J. Patton and J. Chen, "Observer-based fault detection and isolation: robustness and applications," *Control Engineering Practice*, vol. 5, no. 5, pp. 671-682, May 1997.

[10] J. Chen and Ron J. Patton, *Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*, Kluwer Academic Publishers, USA, 1999.

[11] C. Nie and R. J. Patton, "Fault estimation and MRC-based active FTC," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 44, no. 1, pp. 14808-14813, Jan. 2011.

[12] P. Shi, M. Liu, and L. Zhang, "Fault-tolerant sliding-mode-observer synthesis of Markovian jump systems using quantized measurements," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 9, pp. 5910-5918, Sept. 2015.

[13] L. Yao and L. Feng, "Fault diagnosis and fault tolerant tracking control for the non-Gaussian singular time-delayed stochastic distribution system with PDF approximation error," *Neurocomputing, pt. A*, vol. 175, pp. 538-543, Jan. 2016.

[14] X. Li and F. Zhu, "Fault-tolerant control for Markovian jump systems with general uncertain transition rates against simultaneous actuator and sensor faults," *International J. of Robust and Nonlinear Control*, vol. 27, no. 18, pp. 4245-4274, Dec. 2017.

[15] M. Zhong, S. X. Ding, J. Lam, and H. Wang, "An LMI approach to design robust fault detection filter for uncertain LTI systems," *Automatica*, vol. 39, no. 3, pp. 543-550, Mar. 2003.

[16] J. Lan and R. J. Patton, "A new strategy for integration of fault estimation within fault-tolerant control," *Automatica*, vol. 69, pp. 48-59, Jul. 2016.

[17] J. Lan and R. J. Patton, "Integrated fault estimation and fault-tolerant control for uncertain Lipschitz nonlinear systems," *International J. of Robust and Nonlinear Control*, vol. 27, no. 5, pp. 761-780, Mar. 2017.

[18] J. Lan and R. J. Patton, "Integrated design of fault-tolerant control for nonlinear systems based on fault estimation and T-S fuzzy modeling," *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, vol. 25, no. 5, pp. 1141-1154, Oct. 2016.

[19] X. Li, D. Lu, G. Zeng, J. Liu, and W. Zhang, "Integrated fault estimation and non-fragile fault-tolerant control design for uncertain Takagi-Sugeno fuzzy systems with actuator fault and sensor fault," *IET Control Theory & Applications*, vol. 11, no. 10, pp. 1542-1553, Jul. 2017.

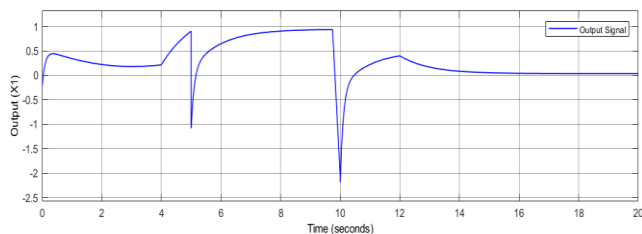
[20] Y. Liu and G. H. Yang, "Integrated design of fault estimation and fault-tolerant control for linear multi-agent systems using relative outputs," *Neurocomputing*, vol. 329, pp. 468-475, Feb. 2019.

[21] C. Hoffmann and H. Werner, "A survey of linear parameter-varying control applications validated by experiments or high-fidelity simulations," *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 23, no. 2, pp. 416-433, Mar. 2014.

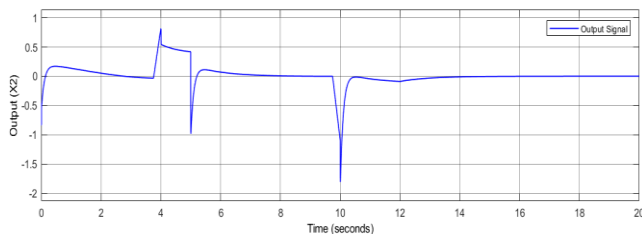
[22] A. Casavola, D. Famularo, and G. Franze, "A feedback min-max MPC algorithm for LPV systems subject to bounded rates of change of parameters," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 47, no. 7, pp. 1147-1153, Jul. 2002.

[23] G. Gagliardi, A. Casavola, and D. Famularo, "A fault detection and isolation filter design method for Markov jump linear parameter-varying systems," *International J. of Adaptive Control and Signal Processing*, vol. 26, no. 3, pp. 241-257, Mar. 2012.

[24] A. Casavola, D. Famularo, and G. Gagliardi, "A linear parameter varying fault detection and isolation method for internal combustion spark ignition engines," *International J. of Robust and Nonlinear Control*, vol. 24, no. 14, pp. 2018-2034, Sept. 2014.



شکل ۹: خروجی سیستم، متغیر حالت اول x_1 .



شکل ۱۰: خروجی سیستم، متغیر حالت دوم x_2 .

حسگری هم‌زمان و در کنار اغتشاش، سیستم تخمین و کنترل یکپارچه طراحی شده با قابلیت تخمین عیب و پایداری سازی سیستم به صورت مقاوم در حضور نامعینی، همراه است. تغییرات ناگهانی و شدید در زمان‌های $t = 5s$ و $t = 10s$ ناشی از تغییر ناگهانی و شدید در سیگنال‌های عیوب مفروض می‌باشد. همان طور که در نتایج شبیه‌سازی قابل مشاهده است، این تغییرات به سرعت توسط روش ارائه شده، تشخیص داده می‌شود و در زمان اندکی به مقدار واقعی عیب متمایل می‌گردد. بنابراین تخمین گر مبتنی بر رؤیتگر به خوبی و سریع قابلیت بازسازی سیگنال‌های عیب را دارد و سیستم کنترلی با استفاده از سیگنال عیوب تخمین زده شده، سیستم حلقه بسته را که هم‌زمان در معرض نامعینی و اغتشاش قرار دارد، کنترل می‌نماید.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله روشی برای تخمین و کنترل وقوع عیب عملگری و حسگری که به صورت هم‌زمان هستند برای یک سیستم نامعین و در حضور اغتشاش با استفاده از طراحی یک تخمین گر عیب و کنترل کننده تحمل پذیر عیب به صورت یکپارچه برای سیستم‌های خطی متغیر با زمان ارائه شده است. در این روش از تخمین گر مبتنی بر رؤیتگر ورودی ناشناخته همراه با کنترل کننده حالت و کنترل کننده مد لغزشی به جهت اطمینان از پایداری مقاوم سیستم از طریق حل نامساوی ماتریس خطی استفاده شده است. روش ارائه شده، روی یک سیستم خطی با پارامتر متغیر چندگانه اعمال گردیده و نتایج شبیه‌سازی، تأثیر این روش را برای تخمین عیوب و پایداری سیستم نشان می‌دهند. ارائه روشی برای کنترل ردیابی ورودی مرجع و کنترل تحمل پذیر عیب برای سیستم‌های خطی با پارامتر متغیر به همراه تأخیر را می‌توان به عنوان کارهای آینده پیشنهاد داد.

مراجع

[1] P. A. Moradmand and H. Khaloozadeh, "An experimental study of modeling and self-tuning regulator design for an electro-hydro servosystem," in *Proc. 5th IEEE Int. Conf. on Control, Instrumentation, and Automation, ICCIA'17*, pp. 126-131, Shiraz, Iran, 21-23 Nov. 2017.

[2] M. Dorostian and A. Moradmand, "Hierarchical robust model-based predictive control in supply chain management under demand uncertainty and time-delay," in *Proc. 7th IEEE Int. Conf. on Control, Instrumentation and Automation, ICCIA'21*, 6 pp., Tabriz, Iran, 23-24 Feb. 2021.

هوشنگ جعفری تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق با گرایش کنترل به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲ از دانشگاه تبریز و در مقطع دکتری مهندسی برق کنترل در سال ۱۴۰۱ از دانشگاه تربیت مدرس تهران به پایان رسانده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: کنترل مقاوم و غیرخطی، هدایت و ناوبری، کنترل تحمل‌پذیر عیب، یادگیری ماشین و عمیق.

امین رضائی در سال ۱۳۸۰ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را با گرایش کنترل از دانشگاه شهید بهشتی و در سال ۱۳۸۲ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق با گرایش کنترل خود را از دانشگاه صنعتی شریف دریافت نمود و در سال ۱۳۹۰ موفق به اخذ درجه دکتری در مهندسی برق کنترل از دانشگاه تهران گردید. ایشان در حال حاضر دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس تهران بوده و مدیر آزمایشگاه سیستم‌های کنترل پیشرفته و همچنین رئیس مرکز تحقیقاتی آزمایشگاه کنترل و امنیت شبکه صنعتی مبتنی بر اینترنت اشیا می‌باشد. دکتر رضائی محقق مدعو با گروه مهندسی برق دانشگاه صنعتی چالمرز در گوتنبرگ سوئد سال ۲۰۱۱ و محقق مدعو با دانشگاه CWRU کلیولند اوهایو ایالات متحده آمریکا در سال ۲۰۱۹ بوده است. ایشان ویراستار و داور در بیش از ۱۰ مجله و کنفرانس معتبر بین‌المللی و نویسنده بیش از ۲۰۰ مقاله ژورنال و کنفرانس می‌باشند.

مهدی فروزان‌فر در سال ۱۳۸۸ مدرک کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق با گرایش کنترل از دانشگاه صنعتی امیرکبیر اخذ کرده و در سال ۱۳۹۶ مدرک دکتری مهندسی برق کنترل خود را از دانشگاه صنعتی سهند تبریز دریافت نمود. دکتر فروزان‌فر عضو هیأت علمی گروه کنترل دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه آزاد اهواز می‌باشند. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان شامل موضوعاتی مانند کنترل تحمل‌پذیر عیب، کنترل بهینه، شناسایی سیستم‌ها، هوش مصنوعی و سیستم‌های فیزیکی-سایبری می‌باشد.

- [25] M. Rodrigues, D. Theilliol, S. Aberkane, and D. Sauter, "Fault tolerant control design for polytopic LPV system," *International J. of Applied Mathematics and Computer Science*, vol. 17, no. 1, pp. 27-37, 2007.
- [26] R. J. Patton, L. Chen, and S. Klinkhieo, "An LPV pole-placement approach to friction compensation as an FTC problem," *International J. of Applied Mathematics and Computer Science*, vol. 22, no. 1, pp. 149-160, Mar. 2012.
- [27] F. Shi and R. J. Patton, "Fault estimation and active fault tolerant control for linear parameter varying descriptor systems," *International J. of Robust and Nonlinear Control*, vol. 25, no. 5, pp. 689-706, Mar. 2015.
- [28] M. M. Seron and J. A. De Doná, "Robust fault estimation and compensation for LPV systems under actuator and sensor faults," *Automatica*, vol. 52, pp. 294-301, Feb. 2015.
- [29] K. P. B. Chandra, H. Alwi, and C. Edwards, "Fault detection in uncertain LPV systems with imperfect scheduling parameter using sliding mode observers," *European J. of Control*, vol. 34, pp. 1-15, Mar. 2017.
- [30] H. Rezaei and M. J. Khosrowjerdi, "A polytopic LPV approach to active fault tolerant control system design for three-phase induction motors," *International J. of Control*, vol. 90, no. 10, pp. 2297-2315, Jun. 2017.
- [31] S. Varrier, D. Koenig, and J. J. Martinez, "Integrated fault estimation and fault tolerant control design for lpv systems," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 46, no. 2, pp. 689-694, 2013.
- [32] R. Tayari, A. Ben Brahim, F. Ben Hmida, and A. Sallami, "Active fault tolerant control design for LPV systems with simultaneous actuator and sensor faults," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2019, Article ID 5820394, 14 pp., 2019.
- [33] P. Apkarian, P. Gahinet, and G. Becker, "Self-scheduled H_∞ control of linear parameter-varying systems: a design example," *Automatica*, vol. 31, no. 9, pp. 1251-1261, Sept. 1995.
- [34] B. D. Anderson and S. Vongpanitlerd, *Network Analysis and Synthesis: A Modern Systems Theory Approach*, Dover Publications, New York, USA, 2006.
- [35] M. Corless and J. A. Y. Tu, "State and input estimation for a class of uncertain systems," *Automatica*, vol. 34, no. 6, pp. 757-764, Jun. 1998.
- [36] S. Mammar and D. Koenig, "Vehicle handling improvement by active steering," *Vehicle System Dynamics*, vol. 38, no. 3, pp. 211-242, 2002.