

یک رویکرد فعال مبتنی بر تخمین خطا جهت طراحی کنترل کننده‌های تحمل پذیر خطا

مهدی پزeshkian^۱، محمد جواد خسروجردي^۲

^۱ کارشناسی ارشد کنترل دانشگاه صنعتی سهند تبریز، m_pezeshkian@sut.ac.ir

^۲ استادیار، گروه کنترل دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، khosrowjerdi@sut.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۸۸/۷/۲۵، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۸۸/۱۱/۲۵)

چکیده: در این مقاله یک رویکرد فعال جهت طراحی کنترل کننده تحمل پذیر خطا (FTC) مبتنی بر استفاده از رویکرد دینامیکی جهت تخمین همزمان خطای محرک (سیستم) و حالتها ارائه می گردد. مزیت عمده استفاده از رویکرد دینامیکی در تبدیل مساله تخمین همزمان خطا و حالتها به حل یک مساله کنترل مقاوم بدون نیاز به افزایش غیرضروری مرتبه سیستم می باشد. در رویکرد ارائه شده، ساختار کنترل کننده ثابت است و نیازی به پیکره بندی دوباره آن جهت جبران یا تحمل خطای رخ داده شده در محرکها و اجزای مختلف سیستم نمی باشد و لذا از سادگی قابل ملاحظه ای به منظور پیاده سازی عملی برخوردار است. همچنین قانون کنترل تابعی خطی از تخمین خطا و حالتها سیستم است و بگونه ای طراحی می شود که ضمن تضمین پایداری سیستم حلقه بسته مانع از افت عملکرد آن در حضور خطا و اغتشاش گردد. در نهایت یک الگوریتم ساختار یافته جهت طراحی FTC مبتنی بر نامساوی ماتریسی خطی (LMI) ارائه می گردد. همچنین در قالب یک مثال شبیه سازی، کارایی روش ارائه شده روی فرآیند چهار تانک نشان داده می شود.

واژه های کلیدی: کنترل کننده تحمل پذیر خطا، تخمین خطا، تشخیص خطا، نامساوی ماتریسی خطی (LMI)، رویکرد دینامیکی

A Fault Estimation-based Approach to Active Fault Tolerant Controller Design

Mahdi Pezeshkian, Mohammad Javad Khosrowjerdi

Abstract: In this paper, an active approach for designing Fault Tolerant Controller (FTC) is proposed. This approach utilizes the idea of dynamical observer for simultaneous estimation of system states and faults. The main advantage of the dynamical observer is looking at the simultaneous estimation of system states and faults purely as a robust control problem. In this proposed approach, the controller has a fixed structure and there is no need to reconfiguration of the controller to accommodate or compensate the effect of the faults occurred in the system which makes the proposed approach practical for real systems. The control law is a linear function of the system states and estimated faults and is designed to keep the closed loop system asymptotically stable and the performance of the closed loop system in an acceptable level in the presence of faults and disturbances. A constructive algorithm based on Linear Matrix Inequality (LMI) is presented for FTC design. The merit of the proposed control scheme has been verified by the simulation on the four-tank process subjected to the actuator faults.

Keywords: Fault Tolerant Controller (FTC), Fault Reconstruction, Fault Detection and Isolation (FDI), Linear Matrix Inequality (LMI), Dynamical Observer.

که مورد توجه ویژه صنعت و پژوهشگران قرار گرفته است. بروز خطا در اجزای مختلف چنین سیستم هایی می تواند باعث افت عملکرد و حتی باعث ناپایداری آن گردد. قطعی سنسور یا خرابی آن، خرابی محرک یا افت عملکرد آن و خرابی اجزای داخلی فرآیندها می تواند از جمله

۱- مقدمه

در سالهای اخیر با پیشرفت تکنولوژی و پیچیده تر شدن سیستم های کنترلی، قابلیت اطمینان اینگونه سیستم ها از مهمترین موضوعاتی است

خطای سنسور [۱۶-۱۷]، استفاده از ایده سیستم‌های توصیفی [۱۹-۱۸] اشاره نمود. در [۱۷] و [۲۰] از ایده سنسور مجازی جهت جبران خطای سنسور استفاده شده است. بدین صورت که با تخمین خطای سنسور و کم کردن آن از خروجی اندازه‌گیری شده، یک سنسور مجازی بدون خطا در اختیار خواهیم داشت که از آن می‌توان جهت تولید ورودی کنترل استفاده نمود. در [۲۱] از ایده تخصیص روی خط سیگنال کنترلی^۱ جهت جبران خطای محرک استفاده شده است.

در این مقاله در ادامه کارهای انجام گرفته در زمینه طراحی FTC مبتنی بر تخمین خطا و جبران سازی آن، رویکرد متفاوتی برای این منظور ارائه می‌گردد. شکل ۱ بلوک دیاگرام مورد نظر مقاله را جهت طراحی FTC نشان می‌دهد. ویژگی شاخص این روش استفاده از ایده رویکرد دینامیکی [۲۲] جهت تخمین همزمان حالتها و بازسازی خطا بدون نیاز به افزایش غیرضروری مرتبه سیستم می‌باشد. رویکرد دینامیکی، تعمیم یافته رویکرد معمولی لیونبرگر است با این تفاوت که بهره آن، یک بهره دینامیکی است. با استفاده از درجه آزادی موجود در رویکرد دینامیکی می‌توان در یک روال طبیعی مساله " تخمین همزمان حالتها و بازسازی خطا " را به حل یک "مساله کنترل" تبدیل نمود. همچنین در این روش نیازی به پیکره‌بندی مجدد کنترل کننده جهت جبران و یا تحمل خطای رخ داده شده در اجزای مختلف سیستم نمی‌باشد و قانون کنترل تابعی خطی از تخمین حالت‌های سیستم و خطای بازسازی شده است و بگونه‌ای طراحی می‌شود که پایداری و عملکرد سیستم حلقه بسته در حضور خطا و اغتشاش حفظ شود. چنانکه خواهیم دید فرآیند طراحی FTC در قالب یک الگوریتم ساختار یافته مبتنی بر نامسای ماتریسی خطی (LMI) که براحتی توسط نرم افزار MATLAB قابل پیاده سازی است صورت می‌پذیرد.

شایان ذکر است که در [۱۹] نیز ساختار مشابهی نظیر شکل ۱ جهت طراحی FTC برای کلاس خاصی از سیستم‌های توصیفی ارائه شده است که از تخمین خطای محرک در طراحی کنترل کننده استفاده می‌کند. اما رویکرد ارائه شده در این مقاله متفاوت از [۱۹] است. روش ارائه شده در [۱۹] در صورتی معتبر است که مشتق خطا تا یک مرتبه مشخص محدود باشد. با این فرض جهت بازسازی خطای محرک، خطا و مشتقات آن به عنوان حالت‌های جدید به حالت‌های سیستم اولیه افزوده می‌گردند و در نهایت برای سیستم افزوده شده جدید یک رویکرد طراحی می‌شود که بتواند حالت‌های سیستم و خطاها را همزمان تخمین

عوامل بروز خطا در سیستم‌های کنترل به حساب آیند. امروزه طراحی کنترل کننده‌هایی که بتوانند این خطاها را در سیستم تشخیص داده (تشخیص خطا)^۲ و در حضور این خطاها پایداری و عملکرد مطلوب سیستم را حفظ کنند (تحمل خطا)^۳ در کانون توجه پژوهشگران قرار گرفته است. این گونه کنترل کننده ها اصطلاحاً کنترل کننده های تحمل پذیر خطا^۳ و یا به اختصار FTC نامیده می‌شوند [۳].

با مراجعه به کارهای انجام گرفته طی سالهای اخیر دو نوع رویکرد متفاوت را جهت طراحی FTC می‌توان مشاهده نمود: فعال و غیرفعال.

برای مرور این رویکردها می‌توان به [۴-۳] مراجعه کرد. در روشهای غیرفعال نظیر آنچه که در [۹-۵] برای سیستم‌های خطی تغییرناپذیر با زمان گزارش شده اند، خطاها صرفاً بصورت نامعینی های ساختاریافته یا بدون ساختار در نظر گرفته می‌شوند و طراحی FTC مستقیماً در قالب حل یک مساله کنترل مقاوم استاندارد صورت می‌پذیرد که برای حل آن روش‌های شناخته شده‌ای وجود دارد [۱۰]. عمده ترین ضعف چنین کنترل کننده هایی در محافظه کار بودن آنها است ولی بهر حال با توجه به ساختار ثابت کنترل کننده پیاده‌سازی آنها از پیچیدگی چندانی برخوردار نیست. درمقابل روش‌های فعال مبتنی بر تشخیص خطا می‌باشند. بدین مفهوم که در این نوع کنترل کننده‌ها، خطاهای احتمالی در سیستم بطور روی-خط تشخیص داده شده و برای جبران این خطاها، پارامترهای کنترل کننده (یا قانون کنترل) به روز می‌شوند. در مقایسه با روش‌های غیرفعال، روش‌های فعال نیاز به توان محاسباتی بیشتری جهت پیاده‌سازی دارند ولی محافظه کاری آنها کمتر است.

یکی از رویکردهای فعال در طراحی FTC مبتنی بر تخمین خطا و استفاده از آن در طراحی کنترل کننده جهت جبران خطا می‌باشد. ویژگی شاخص این رویکرد را می‌توان در سادگی و عدم نیاز به پیکره بندی دوباره کنترل کننده دانست و بدین لحاظ در سالهای اخیر روش‌های نظری متعددی برای آن ارائه شده است و همچنان نیز در کانون توجه پژوهشگران قرار دارد. به عنوان مثال می‌توان به روش‌های طراحی مبتنی بر رویکرد با ورودی ناشناخته^۴ [۱۳-۱۱]، استفاده از رویکرد مد لغزشی^۵ [۱۵-۱۴]، استفاده از رویکرد خطی جهت بازسازی

¹ Fault Detection

² Fault Tolerant

³ Fault Tolerant Control (FTC)

⁴ Unknown Input Observer (UIO)

⁵ Sliding Mode Observer

⁶ On-line Control Allocation

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Ff + Ed \\ y = Cx + v \end{cases} \quad (1)$$

که در آن $x \in R^n$ حالت‌های سیستم، $u \in R^m$ ورودی و $y \in R^p$ خروجی اندازه‌گیری شده، $f \in R^q$ خطاهای احتمالی در محرک و یا اجزای سیستم، $d \in R^k$ بیانگر اغتشاش (ورودیهای ناشناخته) و $v \in R^p$ نویز اندازه‌گیری می‌باشد. ماتریس‌های ثابت A, B, C, E, F دارای ابعاد مناسب هستند. همچنین فرض کنید (A, B) کنترل پذیر، (A, C) رویت پذیر، F و B دارای مرتبه کامل ستونی باشند.

همانطوریکه در شکل ۱ نشان داده شده است، هدف اصلی در طراحی رویتگر همزمان خطا و حالت‌ها، طراحی یک سیستم دینامیکی می‌باشد که با پردازش u و y ، سیگنالهای \hat{x} و \hat{f} که بترتیب تخمینی از حالت x و خطای f می‌باشند را تولید نماید. در حالت کلی، تحقق فضای حالت سیستم دینامیکی فوق را می‌توان بصورت زیر در نظر گرفت.

$$V : \begin{cases} \dot{x}_v = Mx_v + N_1u + N_2y \\ \hat{x} = Q_1x_v + Q_2y \\ \hat{f} = R_1x_v + R_2y \end{cases} \quad (2)$$

که $x_v \in R^{n_v}$ می‌باشد. ماتریس‌های ثابت $N_2, N_1, M, Q_1, Q_2, R_1, R_2$ دارای ابعاد مناسب هستند و باید طراحی شوند. ساختار یک رویتگر دینامیکی برای سیستم (۱) به صورت زیر می‌باشد.

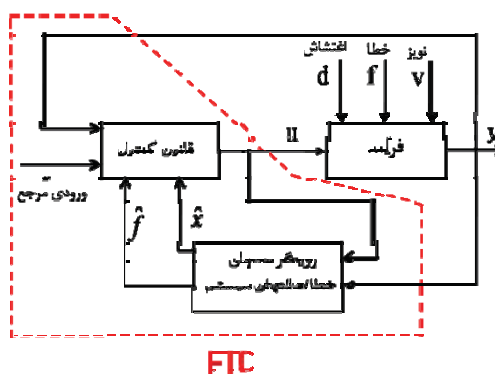
$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + \eta \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases} \quad (3)$$

که در آن $\hat{x} \in R^n$ تخمینی از x و η یک ورودی کنترل جدید محسوب می‌شود که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\eta = K_L(y - \hat{y}) \quad (4)$$

که در آن ماتریس تابع تبدیل K_L ، بهره دینامیکی رویتگر نامیده می‌شود. فرض کنید $K_L := (A_L, B_L, C_L, D_L)$ و $\hat{y} - y = \xi$ ، آنگاه تحقق فضای حالت رابطه‌ی (۴) بصورت زیر است:

بدین ترتیب از آنجایی که خطا بخشی از حالت‌های سیستم در نظر گرفته می‌شود می‌تواند مرتبه سیستم را با توجه به ماهیت خطا افزایش دهد. برخلاف روش ارائه شده در [۱۹]، در این مقاله، بدون نیاز به تحمیل شرط محدود کننده ای روی خطا مرتبه سیستم افزایش پیدا نمی‌کند و طراحی کنترل کننده در یک روال ساده و شفاف صورت می‌گیرد. البته یادآوری این نکته نیز مناسب است که اختصاص دادن مدلی برای خطا و در نظر گرفتن آن بعنوان بخشی از حالت‌های سیستم نیز قبلاً از [۱۹] در مقالات تشخیص خطا متداول بوده است و از این لحاظ ایده جدیدی محسوب نمی‌شود، بعنوان مثال می‌توان به فصل پنجم در [۲۳] مراجعه نمود.



شکل ۱: ساختار کلی ارائه شده برای کنترل کننده تحمل پذیر خطا (FTC)

ساختار مقاله به این صورت تنظیم شده است. در بخش ۲ روشی برای تخمین همزمان حالت‌های سیستم و خطا با استفاده از رویتگر دینامیکی ارائه می‌شود. در بخش ۳ با طرح یک مساله حذف اغتشاش رویکردی جهت طراحی یک قانون کنترل خطی مبتنی بر فیدبک حالت ارائه می‌گردد و در نهایت یک الگوریتم ساختاریافته روند طراحی کنترل کننده FTC را خلاصه می‌کند. در بخش ۴ رویکرد ارائه شده در مقاله بر روی فرآیند چهار تانک اعمال شده و نتایج شبیه‌سازیهای کامپیوتری آن گزارش می‌شود. در نهایت نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای ادامه پژوهش در بخش ۵ بیان می‌گردند.

۲- طراحی رویتگر همزمان خطا و حالت‌ها

همانطوریکه در مقدمه بیان گردید در اینجا جهت تخمین همزمان خطا و حالت‌های سیستم یک رویتگر دینامیکی مقاوم طراحی می‌گردد. برای این منظور سیستم خطی تغییر ناپذیر با زمان زیر را در نظر بگیریم:

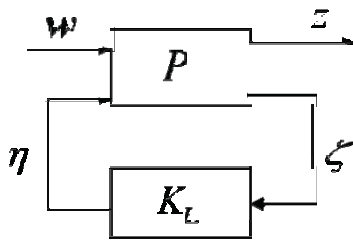
اینک با حل یک مساله استاندارد زیربهنی کنترل H_∞ می توان بهره‌ی رویتگر دینامیکی K_L بدست آورد.

مساله ۱: فرآیند تعمیم یافته P در (۹) را مطابق شکل ۲ در نظر بگیرید. فرض کنید $\gamma > 0$ داده شده است. کنترل کننده K_L را بگونه‌ای بیابید که $\|T_{z\omega}\|_\infty < \gamma$ گردد که در آن $T_{z\omega}$ ماتریس تابع تبدیل از ω به z می‌باشد.

مساله ۱ را می‌توان براحتی توسط جعبه ابزار کنترل مقاوم در MATLAB حل نمود [۲۴]. با حل مساله ۱ و بدست آوردن K_L ، تخمین خطا از رابطه $F\hat{f} = \eta$ بدست می‌آید. با توجه به اینکه F رتبه ستونی کامل دارد می‌توان نتیجه گرفت

$$\hat{f} = F^\dagger \eta \quad (10)$$

که $F^\dagger = (F^T F)^{-1} F^T$ بیانگر معکوس مجازی یا رابطه است.



شکل ۲: یک ساختار استاندارد جهت طراحی رویتگر دینامیکی

توجه ۱: مطابق رابطه (۱۰) با توجه به در دسترس بودن \hat{f} ، نه تنها می‌توان خطای رخ داده شده در سیستم (محرک) را تشخیص داد بلکه می‌توان محل آن را نیز تعیین نمود. در حقیقت حل مساله ۱، راهکاری مفید جهت تشخیص و محل یابی خطا (FDI) محسوب می‌شود [۱].

با ترکیب روابط (۳)، (۵) و (۱۰) می‌توان نشان داد که ماتریسهای ثابت رویتگر همزمان خطا و حالت‌های سیستم در رابطه (۲) بصورت زیر بدست می‌آیند:

$$x_v = \begin{pmatrix} \hat{x} \\ x_k \end{pmatrix} \text{ و } M = \begin{pmatrix} A - D_L C & C_L \\ -B_L C & A_L \end{pmatrix} \text{ و}$$

$$N_1 = \begin{pmatrix} B \\ 0 \end{pmatrix} \text{ و } N_2 = \begin{pmatrix} D_L \\ B_L \end{pmatrix} \text{ و } Q_1 = I, Q_2 = 0$$

$$\begin{cases} \dot{x}_k = A_L x_k + B_L \zeta \\ \eta = C_L x_k + D_L \zeta \end{cases} \quad (5)$$

که در آن $x_k \in R^{n_k}$. اگر در رابطه (۴)، K_L بهره ثابت در نظر گرفته شود ($K_L = L$)، در اینصورت رویتگر دینامیکی (۳) تبدیل به رویتگر لیونرگر معمولی با معادله

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y}) \quad (6)$$

خواهد شد. شایان ذکر است که اگر روش ارائه شده در این مقاله بر مبنای رابطه (۶) پیگیری شود در نهایت به یک مساله کنترل با فیدبک خروجی استاتیکی منجر خواهد شد که در حالت کلی مساله سختی است. در حقیقت درجه آزادی موجود در رویتگر دینامیکی مانع از بروز این مشکل خواهد شد. حال خطای تخمین حالتها را با e_x نشان داده و به صورت $e_x = x - \hat{x}$ تعریف می‌کنیم. برای \dot{e}_x به کمک روابط (۱) و (۳) داریم:

$$\dot{e}_x = Ae_x + Ff + Ed - \eta \quad (7)$$

در رابطه (۷)، نقش ورودی کنترل را بازی می‌کند. هدف، طراحی η به گونه‌ای است که دینامیک خطای (۷) را پایدار مجانبی نماید و η تخمینی از Ff شود. برای رسیدن به این هدف مقیاس تخمین خطا را بصورت $z = Ff - \eta$ تعریف می‌کنیم. حال با کنار هم گذاشتن روابط فوق معادلات زیر را خواهیم داشت.

$$\begin{aligned} \dot{e}_x &= Ae_x + Ff + Ed - \eta \\ z &= Ff - \eta \\ \zeta &= y - \hat{y} = Ce_x + v \end{aligned} \quad (8)$$

در حقیقت معادلات (۸)، یک فرآیند تعمیم یافته P با معادلات فضای حالت استاندارد زیر را توصیف می‌کنند.

$$P: \begin{cases} \dot{e}_x = Ae_x + B_1 w + B_2 \eta \\ z = C_1 e_x + D_{11} w + D_{12} \eta \\ \zeta = C_2 e_x + D_{21} w + D_{22} \eta \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{که در آن } w = \begin{bmatrix} f \\ d \\ v \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} C_1 &= 0, B_2 = -I, B_1 = [F \ E \ 0] \\ D_{22} &= 0, D_{12} = -I, D_{11} = [F \ 0 \ 0], C_2 = C \\ \text{و } D_{21} &= [0 \ 0 \ I] \end{aligned}$$

که در آن ماتریس های بهره ثابت $K = (K_1 \ K_2)$ و K_f بایستی جهت تحقق اهداف ۱ تا ۴ به نحو مناسبی طراحی شوند. با تعریف متغیرهای

$$e_f = f - \hat{f}, \quad e_\xi = \xi - \hat{\xi} \quad (16)$$

و با جایگذاری (۱۴) در (۱۳) می توان نوشت:

$$\dot{\xi} = (A - BK)\xi + (\mathcal{F} - BK_f)f + \mathcal{E}\phi + BK_e e_\xi - BK_f e_f \quad (17)$$

با توجه به رابطه (۱۷) در صورتی اثر خطا روی عملکرد سیستم جبران می شود که بهره K_f بصورت زیر انتخاب شود

$$K_f = \mathcal{B}^\dagger \mathcal{F} \quad (18)$$

که در آن همانند قبل \dagger بیانگر معکوس مجازی با رابطه $\mathcal{B}^\dagger = (\mathcal{B}^T \mathcal{B})^{-1} \mathcal{B}^T$ می باشد. در اینصورت بوضوح می توان دید که $\mathcal{F} - BK_f = 0$ و بدین ترتیب اثر خطای f بر روی سیستم افزوده شده (۱۷) از بین می رود.

حال با تعریف مقیاس عملکرد کنترل بصورت $Z_c = H\xi$

که در آن $H \in R^{p \times n}$ ماتریس وزنی معلومی می باشد می توان نوشت:

$$\begin{cases} \dot{\xi} = (A - BK)\xi + \mathcal{E}\phi + BK_e e_\xi - BK_f e_f \\ Z_c = H\xi \end{cases} \quad (19)$$

با توجه به اینکه با گذشت زمان، e_f و e_ξ (خطای تخمین خطا / حالت) به سمت صفر میل می کنند. لذا با صرف نظر کردن از اثر آنها در رابطه (۱۹) می توان جهت تعیین بهره فیدبک حالت K مساله تضعیف اغتشاش زیر را بیان نمود.

مساله ۲: فرض کنید $\beta > 0$ داده شده است. بهره‌ی فیدبک حالت K را بگونه‌ای بیابید که سیستم حلقه بسته (۱۹) را پایدار مجانبی نماید و $\|T_{Z_c, \phi}\|_\infty < \beta$ شود که در آن $T_{Z_c, \phi}$ ماتریس تابع تبدیل از ϕ به Z_c می باشد.

برای حل مساله ۲ می توان از قضیه Bounded Real Lemma استفاده نمود [۱۰]. مطابق این قضیه مهم در سیستم (۱۹) قید $\|T_{Z_c, \phi}\|_\infty < \beta$ برقرار است اگر $\beta > 0$ و $P = P^T > 0$ وجود داشته باشند بطوریکه در نامساوی ماتریسی زیر صدق کنند

$$R_2 = F^\dagger D_L \quad \text{و} \quad R_1 = \begin{pmatrix} -F^\dagger D_L C & F^\dagger C_L \end{pmatrix} \quad (11)$$

۳- طراحی FTC

در این بخش با استفاده از رویکرد دینامیکی مقاوم (۲) روشی جهت طراحی FTC ارائه می گردد. در اینجا، قانون کنترل تابعی خطای از تخمین حالتهای سیستم و خطای بازسازی شده است و بایستی بتواند اهداف زیر را برآورده نماید:

(۱) پایدار سازی سیستم حلقه بسته

(۲) ردیابی ورودی مرجع توسط خروجی

(۳) تضعیف اثر اغتشاش بر روی عملکرد سیستم حلقه بسته

(۴) جبران سازی اثر خطا

جهت تحقق اهداف ۱ و ۲ می توان از کنترل کننده انتگرال گیر فیدبک فضای حالت استفاده نمود. برای این منظور انتگرال خطای ردیابی $y - r = e_r$ بصورت زیر تعریف می شود

$$\dot{\sigma} = e_r \quad (12)$$

که در آن r ورودی مرجع می باشد که بایستی توسط خروجی y ردیابی شود. حال با افزودن متغیر حالت جدید در (۱۲) به معادله فضای حالت (۱) معادله سیستم افزوده شده زیر بدست می آید:

$$\dot{\xi} = A\xi + \mathcal{B}u + \mathcal{F}f + \mathcal{E}\phi \quad (13)$$

$$\text{که در آن } \phi = \begin{pmatrix} d \\ v \\ r \end{pmatrix} \text{ و}$$

$$\xi = \begin{pmatrix} x \\ \sigma \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathcal{B} = \begin{pmatrix} B \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$\mathcal{F} = \begin{pmatrix} F \\ 0 \end{pmatrix} \text{ و } \mathcal{E} = \begin{pmatrix} E & 0 & 0 \\ 0 & -I & I \end{pmatrix}.$$

اینک می توان قانون FTC را بصورت زیر توصیف نمود:

$$u = -K\hat{\xi} - K_f \hat{f} \quad (14)$$

که در آن

$$\hat{\xi} = \begin{pmatrix} \hat{x} \\ \hat{\sigma} \end{pmatrix} \quad (15)$$

گام ۲) به کمک رابطه (۱۱) ماتریس‌های موجود در رابطه (۲) را محاسبه نمایید و رویتنگر همزمان خطا / حالت را بدست آورید.

گام ۳) بهره‌ی K_f را با استفاده از رابطه (۱۸) محاسبه کنید.

گام ۴) مساله LMI در (۲۱) را حل نمایید تا P و Y بدست آید. گام ۵) بهره‌ی K را با استفاده از رابطه (۲۲) بدست آورید.

گام ۶) FTC را مطابق رابطه (۲۳) و شکل ۳ پیاده سازی نمایید. شایان ذکر است که الگوریتم فوق براحتی توسط جعبه ابزار کنترل مقاوم نرم افزار MATLAB قابل اجرا است [۲۴].

۴- یک مثال کاربردی: فرآیند چهارتانک

در این بخش برای نشان دادن کارایی روش پیشنهاد شده، الگوریتم طراحی FTC بر روی فرآیند چند متغیره چهارتانک اجرا گردیده و نتایج شبیه‌سازی آن ارایه می گردند. ساختار فرآیند چهارتانک در شکل ۴ نشان داده شده است [۲۶]. مدل خطی شده فرآیند فوق بصورت زیر است.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -0.0159 & 0 & 0.0419 & 0 \\ 0 & -0.0111 & 0 & 0.033 \\ 0 & 0 & -0.0419 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0333 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0.0833 & 0 \\ 0 & 0.0628 \\ 0 & 0.0479 \\ 0.0312 & 0 \end{bmatrix} (u+f) + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -0.0357 & 0 \\ 0 & -0.0313 \end{bmatrix} d$$

$$y = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 \end{bmatrix} x + v$$

که در آن $x \in R^4$ ارتفاع سطح آب در تانک‌ها،

$u = (u_1 \ u_2)^T$ ولتاژ اعمالی به پمپ‌های ۱ و ۲،

$f = (f_1 \ f_2)^T$ خطای مربوط به افت عملکرد محرک‌های ۱ و ۲،

$d = (d_1 \ d_2)^T$ بیانگر اغتشاش که متناسب با خروجی جریان از

تانک‌های ۳ و ۴ می‌باشد و $v = (v_1 \ v_2)^T$ بیانگر نویز اندازه‌گیری

بوده که به‌صورت نویز سفید با میانگین صفر و واریانس ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است.

$$\begin{bmatrix} \Gamma & PH^T \\ HP & -\beta I \end{bmatrix} < 0 \quad (20)$$

که

$$\Gamma = AP + PA^T - BKP - PK^T B^T + \beta \mathcal{E} \mathcal{E}^T$$

چون نامساوی ماتریسی (۲۰) بر حسب P و K غیر خطی می‌باشد با استفاده از روشهای استاندارد حل مسائل LMI، نمی‌توان آن را حل نمود. برای رفع این مشکل، مطابق راهکارهای موجود در مقالات LMI می‌توان از تغییر متغیر در نامعادله (۲۰) سود جست. با تعریف متغیر جدید $Y = KP$ جواب مساله ۲ با حل مساله استاندارد LMI زیر بدست می‌آید [۲۵].

قضیه ۱: فرض کنید $\beta > 0$ داده شده است. اگر ماتریس‌های $Y > 0$ و $P = P^T > 0$ وجود داشته باشند بگونه‌ای که در نامساوی ماتریسی زیر صدق کنند

$$\begin{bmatrix} \Gamma & PH^T \\ HP & -\beta I \end{bmatrix} < 0 \quad (21)$$

که در آن

$$\Gamma = AP + PA^T - BY - Y^T B^T + \beta \mathcal{E} \mathcal{E}^T$$

و بهره استاتیک K از رابطه

$$K = YP^{-1} \quad (22)$$

بدست می‌آید.

از ترکیب روابط (۲)، (۱۱) و (۱۴) دینامیک FTC با معادلات فضای حالت زیر توصیف می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{x}_v = Mx_v + N_1 u + N_2 y \\ \dot{\sigma} = r - y \\ u = -(K_1 Q_1 + K_f R_1) x_v - K_2 \sigma - K_f R_2 y \end{cases} \quad (23)$$

شکل (۳) بلوک دیاگرام کلی سیستم حلقه بسته را نشان می‌دهد.

اینک می‌توان مراحل طراحی FTC را توسط الگوریتم ساختاریافته زیر بصورت فهرست وار بیان نمود:

الگوریتم طراحی FTC

داده‌ها: A, B, C, E, F و H

گام ۱) مساله ۱ را حل کنید تا بهره‌ی دینامیکی رویتنگر K_L بدست آید.

تغییرناپذیر با زمان پیشنهاد گردید. این رویکرد مبتنی بر استفاده از رویکرد دینامیکی است که وظیفه تخمین همزمان حالتها و خطا را بر عهده دارد. مزیت اصلی این رویکرد فعال، در تبدیل مساله "تخمین همزمان حالتها و خطا" به حل یک "مساله کنترل" بدون افزایش مرتبه سیستم می‌باشد. در این رویکرد ساختار FTC پیشنهاد شده بگونه‌ای است که اگر خطایی در سیستم (محرک) رخ دهد، قانون کنترل علاوه بر استفاده از تخمین حالتها، از تخمین خطا نیز استفاده کرده و اثر خطا را بر روی پایداری و عملکرد سیستم جبران می‌کند. در رویکرد ارائه شده، مساله طراحی FTC به حل یک مساله نامساوی ماتریسی خطی (LMI) منجر می‌شود که می‌توان براحتی آن را توسط نرم افزار MATLAB حل نمود. مراحل طراحی بطور شفاف در قالب یک الگوریتم ساختار یافته ارائه گردید و کارایی آن با انجام شبیه سازی های کامپیوتری بر روی فرآیند چهارتانک نشان داده شد.

این پژوهش را می‌توان در کارهای آینده بصورت‌های مختلف ادامه داد. بعنوان مثال رویکرد ارائه شده در این مقاله را می‌توان به سیستمهای فضای حالت نامعین خطی و غیرخطی تعمیم داد. برای این منظور کافی است نامعینی های ساختاریافته و بدون ساختار را در ماتریسهای سیستم در نظر گرفت و از روشهای موجود در کنترل مقاوم استفاده نمود. همچنین اگرچه در این مقاله شبیه سازی بر روی فرآیند ۴ تانک کارایی روش ارائه شده را بخوبی نشان داد اما می‌توان با پیاده سازی آن روی فرآیند واقعی کارایی عملی این روش را نیز مورد بررسی و پژوهش قرار داد و نتایج آن را با شبیه سازی مقایسه نمود این مورد از این حیث حایز اهمیت است که روش ارائه شده در این مقاله از سهولت چشمگیری جهت پیاده سازی برخوردار است.

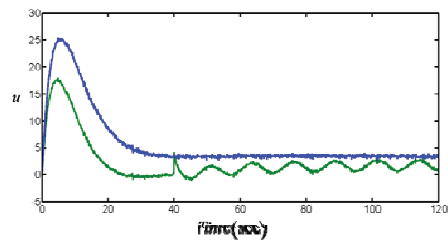
سیاسگزاری

در اینجا لازم است از نظرات مفید و سازنده داوران محترم مجله که باعث ارتقا کیفیت مقاله گردید نهایت تشکر و قدردانی بعمل آید. این کار تحت حمایت آزمایشگاه تحقیقاتی کنترل پیشرفته گروه کنترل دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی سهند تبریز انجام پذیرفته است.

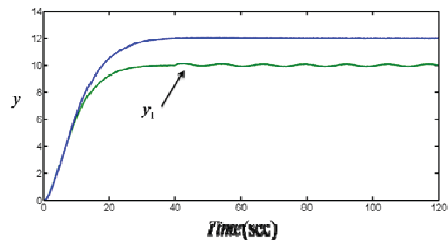
مراجع

- [1] J. Chen and R. J. Patton, *Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems*. Norwell, MA: Kluwer, 1999.
- [2] L. H. Chiang, E. L. Russell, and R. D. Braatz, *Fault detection and diagnosis in industrial systems*. London, U.K.: Springer-Verlag, 2001.
- [3] R. J. Patton, "Fault tolerant control: The 1997 situation," *In the Proceeding of the 3rd IFAC symposium on fault detection, supervision and safety for technical processes*, pp. 1033-1055, 1997.

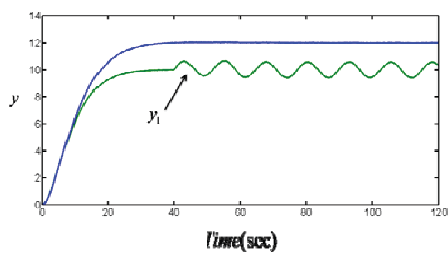
قابل قبولی ردیابی نماید. شکل ۱۰ خروجی سیستم با در نظر گرفتن FTC نشان داده شده است. با توجه به این شکل، با استفاده از FTC، هنگام بروز خطای محرک و در حضور اغتشاش، خروجی به خوبی توانسته است ورودی مرجع را ردیابی نماید و عملکرد سیستم بنحو قابل ملاحظه ای بهبود یافته است. البته با اعمال خطاهای ثابت (بایاس) و متغیر با زمان دیگری نیز می‌توان نتایج مشابهی را در مورد کارایی روش ارائه شده در این مقاله بدست آورد. بهر تقدیر، با توجه به نتایج شبیه سازی می‌توان مشاهده نمود که راهکار ارائه شده در این مقاله جهت طراحی FTC از قابلیت قابل ملاحظه ای جهت تضمین پایداری سیستم حلقه بسته و جلوگیری از افت عملکرد آن هنگام بروز خطای محرک و اغتشاشهای ناخواسته برخوردار است.



شکل ۸: ورودی های کنترل فرآیند



شکل ۹: خروجی سیستم بیا وجود FTC



شکل ۱۰: خروجی ها بدون در نظر گرفتن تخمین خطا در قانون FTC

۵- نتیجه گیری و کارهای آینده

در این مقاله یک رویکرد فعال جهت طراحی کنترل کننده تحمل پذیر خطا یا همان FTC به منظور داشتن پایداری و عملکرد مطلوب در سیستم حلقه بسته در حضور خطا و اغتشاش برای سیستمهای خطی

- [16] C. P. Tan, and M. K. Habib, "Implementation of a sensor fault reconstruction scheme on an inverted pendulum," *5th Asian Control Conference*, Vol. 3, pp. 1423-1428, 2004.
- [17] C. P. Tan, and M. K. Habib, "A robust sensor fault tolerant control scheme implemented on a flexible joint," *Proceedings of the 2004 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, Singapore, pp. 370-375, 2004.
- [18] Z. Gao, and S. X. Ding, "Actuator fault robust estimation and fault-tolerant control for a class of nonlinear descriptor systems," *Automatica*, Vol. 43, pp. 912-920, 2007.
- [19] Z. Gao, and S. X. Ding, "Sensor fault reconstruction and sensor compensation for a class of nonlinear state-space systems via a descriptor system approach," *IET Control Theory and Application*, Vol. 3, pp. 578-585, 2007.
- [20] C. Edwards, and C. P. Tan, "Sensor fault tolerant control using sliding mode observers," *Control Engineering Practice*, Vol. 14, pp. 897-908, 2006.
- [21] H. Alwi, and C. Edwards, "Fault tolerant control using sliding modes with on-line control allocation," *Automatica*, Vol. 44, pp. 1859-1866, 2008.
- [22] H. J. Marquez, and M. Riaz, "Robust state observer design with application to an industrial boiler system," *Control Engineering Practice*, Vol. 13, pp. 713-728, 2006.
- [23] R. S. Mangoubi, *Robust estimation and failure detection*, Springer, 1998.
- [24] G. Balas, R. Chiang, A. Packard, and M. Safonov, *Robust control toolbox: user guides*. The MathWorks, Inc, 2007.
- [25] S. Boyd, L. El-ghaoui, E. feron, and V. Balakrishnan, *Linear Matrix Inequality in Systems and Control Theory*, SIAM: Philadelphia, 1994.
- [26] K. H. Johansson, "The quadruple-tank process: a multivariable laboratory process with an Adjustable Zero," *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol. 8, NO. 3, pp. 456-465, 2000.
- [4] Y. Zhang and J. Jiang, "Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems," *Annual reviews in control*, Vol 32, pp. 229-252, 2008.
- [5] H. Niemen, and J. Stoustrup, "Passive fault tolerant control of double inverted pendulum – a case study," *Control Engineering Practice*, Vol. 13, pp. 1047-1059, 2005.
- [6] Sh. Suryanarayanan, M. Tomizuka, and T. Suzuki, "Design of simultaneously stabilizing controllers and its application to fault-tolerant lane-keeping controller design for automated vehicles," *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, Vol 12, NO 3, pp. 329-339, 2004.
- [7] J. Stoustrup and V. D. Blondel, "Fault tolerant control: a simultaneous stabilization result," *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol, 49, NO. 2, pp. 305-310, 2004.
- [8] D. U. Campos-Delgado, S. M. Martinez, and K. Zhou, "Integrated fault tolerant scheme with disturbance feedforward," *Proceeding of the 2004 American Control Conference*. Boston, Massachusetts, pp. 1799-1804, 2004
- [9] M. Marx, D. Koenig, and D. Georges, "Robust fault-tolerant control for descriptor systems," *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol. 49, NO. 10, pp. 1869-1875, 2004.
- [10] K. Zhou and J. C. Doyle, *Essential of robust control*, Upper Saddle River, NJ: Prentic-Hall, 1998.
- [11] M. Hou, and P. C. Muller, "Design of observer for linear systems with unknown inputs," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 37, pp. 871-875, 1992.
- [12] S. Hui, and S. H. Zak, "Observer design for systems with unknown inputs," *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, Vol. 15, pp. 431-446, 2005.
- [13] G. Yuying, J. Bin, Z. Youmin, and W. Jianfei, "Novel robust fault diagnosis method for flight control systems," *Journal of Systems Engineering and Electronics*, Vol. 19, pp. 1017-1023, 2008.
- [14] C. Edwards, S. K. Spurgeon, and J. Patton, "Sliding mode observer for fault detection and isolation," *Automatica*, Vol. 36, pp. 541-553, 2000.
- [15] C. P. Tan, and C. Edwards, "Sliding mode observer for detection and reconstruction of sensor faults," *Automatica*, Vol. 38, pp. 1815-1821, 2002.