مجله مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1396، دوره 17، شماره 1، ص‌ص 342-352

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

طراحی سیستم فازی نوع-2 جهت شناسایی و تشخیص عیب سیستم‌های غیرخطی برای سیستم سه تانک و سیستم الکتروهیدرولیکی

حمید قدیری[1*]، حسن محمدخانی[2]

1- استادیار، مهندسی برق کنترل، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین، قزوین

2- استادیار، مهندسی هوا و فضا، دانشگاه جامع امام حسین، تهران

* قزوین، 3416636452، h.ghadiri@qiau.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 05 آبان 1395

پذیرش: 05 دی 1395

ارائه در سایت: 28 دی 1395

کلید واژگان:

تشخیص عیب

سیستم فازی نوع-2

سیستم غیرخطی

سیستم سه تانک

سیستم الکتروهیدرولیکی

چکیده

سیستم‌های کنترل در شرایط عادی، می‌توانند عملکرد مطلوبی ایجاد نمایند. اما در مواقعی که در سیستم عیبی ایجاد شود، حفظ شرایط عملکردی مناسب، کاری دشوار و اغلب ضروری است. در حقیقت عدم تشخیص به موقع عیب در سیستم‌های حساس، منجر به صدمه دیدن مقادیر قابل توجهی از امکانات و اطلاعات می‌شود. در نتیجه انگیزه فراوانی در زمینه تشخیص خرابی در مجامع علمی و صنعتی ایجاد شده است. حال اگر سیستم تحت بررسی غیرخطی باشد، تشخیص عیب با روش‌های خطی امکان‌پذیر نیست. مشکل اصلی در این حالت دقت مدل‌سازی پروسه است، که بر دقت تشخیص و رفع عیب مؤثر است. نظریه‌ی سیستم‌های فازی، یک ابزار مؤثر برای برخورد با شرایط پیچیده و نامطمئن است. این مقاله مسأله تشخیص عیب را بر اساس مدل‌سازی برای سیستم‌های غیرخطی با استفاده از سیستم فازی نوع-2 مورد توجه قرار داده است. روش پیشنهادی برای تشخیص عیب در تحقیق حاضر ایجاد یک محدوده مورد اطمینان با تخمین کران بالا و کران پایین برای خروجی سیستم است که با استفاده از یک سیستم فازی نوع-2 صورت می‌گیرد. با این شرایط با استفاده از سیستم فازی نوع-2 سیگنال مانده‌ای تولید می‌شود که وجود یا عدم وجود عیب در سیستم را مشخص می‌نماید. در این روش در صورت خارج شدن نمودار خروجی سیستم تحت کنترل از کران‌های بالا و پایینی تخمین زده شده، می‌توان وقوع عیب را تشخیص داد. در انتها به منظور نشان دادن قابلیت و ویژگی روش پیشنهادی، روش مورد نظر روی سیستم‌های غیرخطی سه تانک و الکتروهیدرولیکی اعمال شده است و نتایج بسیار رضایت بخش می‌باشند.

Design type-2 fuzzy systems for identification and fault detection of nonlinear systems for three-tank system, electro-hydraulic system

Hamid Ghadiri[1*], Hasan Mohammadkhani[2]

1- Department of Electrical, Biomedical and Mechatronics Engineering, QazvinBranch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

2- Department of Aerospace Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

* P.O.B. 3416636452 Qazvin, Iran, h.ghadiri@qiau.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 26 October 2016
Accepted 25 December 2016
Available Online 17 January 2017

Keywords:
Fault Detection
Type-2 Fuzzy System
Nonlinear system
Three-tank System
Electro-hydraulic System

ABSTRACT

Control systems under normal conditions can provide a desirable performance. But when faults occur in the system, maintaining the appropriate operating condition is a difficult and often necessary matter. In fact, lack of timely fault detection in sensitive systems will lead to significant amounts of resources and information being damaged. As a result, a growing tendency in the field of fault detection in both scientific and industrial communities has been created. However, if the system under consideration is nonlinear, fault detection will not be possible with linear methods. In this case the main difficulty is in accurate modeling of process which affects on the accuracy of fault detection and troubleshooting. Fuzzy systems theory is an effective tool to deal with the complicated and uncertain situations. This paper has considered the problem of fault detection based on the modeling for nonlinear systems using interval type-2 fuzzy system. Our proposed method for fault detection is to create a confidence bound using the estimation of upper and lower bounds for the system output which can be done using a type-2 fuzzy system. Here, a residual signal is produced which determines the presence or absence of fault in the system. In this method in case of the output graph of the control system deviating from the estimated upper and lower bounds, the occurrence of fault can be detected. Finally, in order to show the capabilities of proposed method, the method is applied on three-tank and electro-hydraulic nonlinear systems and the results are very satisfying.

1- مقدمه

مسأله تشخیص عیب یکی از مهمترین نگرانی‌ها در بسیاری از سیستم‌های عملی و صنعتی محسوب می‌شود و یکی از زمینه‌های تحقیقاتی است که بسیار مورد توجه محققان است. رخ دادن عیب در واقع به معنای ایجاد

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

H. Ghadiri, H. Mohammadkhani, Design type-2 fuzzy systems for identification and fault detection of nonlinear systems for three-tank system, electro-hydraulic system, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 342-352, 2017 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.55.5]

تغییری ناخواسته در یکی از خصوصیات سیستم است. از جمله این عوامل و شرایط غیرعادی می‌توان به نواقص مختلفی چون عیب عمل‌گر یا حس‌گر، فرسودگی اجزای سیستم، تغییرات غیر قابل پیش‌بینی پارامترها و امثال آن اشاره نمود [1]. این عیوب مشکلات اقتصادی، امنیتی و تأثیرات محیطی فراوانی به جا گذاشته‌اند. با توجه به این نکات، اتوماتیک نمودن تشخیص عیب سیستم و تشخیص علت آن امروزه یک ضرورت در صنایع مختلف می‌باشند. بنابراین با توجه به اهمیت موضوع تمایل روز افزونی در زمینه تشخیص خرابی و عیب چه در مجامع علمی و چه در مجامع صنعتی ایجاد شده است. تشخیص عیب و رفع آن برای سیستم‌های خطی پیش از این، در دهه‌ی 1970 میلادی به‌طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته و روش‌های مؤثری هم ارائه شده است. در مرجع [2] انواع عیوب محتمل و کنترل کننده‌های تحمل پذیر در برابر عیب اشاره شده‌اند.

یکی از رویکردها جهت تشخیص عیب استفاده از سخت‌افزار است که در این حالت از تعدادی حس‌گر و عمل‌گر برای کنترل و اندازه‌گیری متغیرها استفاده می‌گردد. بزرگترین مشکل این روش بالا بودن هزینه به دلیل استفاده از تجهیزات اضافی است. رویکرد دیگر به منظور تشخیص عیب، استفاده از یک مدل ریاضی بر اساس سیگنال‌های ورودی و خروجی و قوانین فیزیکی حاکم بر سیستم تحت کنترل است. در این حالت در صورت وقوع عیب با تشکیل یک سیگنال مانده‌ی مناسب، متناسب با مقدار عیب، می‌توان وجود یا عدم وجود عیب را از روی این سیگنال مانده بدست آورد. این مانده‌ها همان تفاوت سیستم اصلی و مدل‌سازی شده هستند. یک سری از حالت‌ها و یا خصوصیات[1] را به عنوان شاخص در نظر می‌گیرند و تغییرات مانده آنها، بروز عیب را معلوم می‌کند. از جمله ویژگی‌های این رویکرد عدم نیاز به سخت افزار و تجهیزات اضافی است.

اما با توجه به اینکه اغلب سیستم‌های عملی ماهیت غیرخطی دارند، بدست آوردن یک مدل دقیق و تحلیلی برای آنها دشوار است. در واقع مشکل اصلی در دقت مدل‌سازی پروسه‌های غیرخطی است، که بر دقت تشخیص و رفع عیب مؤثر است. در سال‌های اخیر روش‌های متعددی برای شناسایی و تشخیص عیب در برابر عیب سیستم‌های غیرخطی ارائه شده است که از جمله آنها می‌توان به تخمین پارامترها و طراحی رویتگر حالت [3-5] و روش‌های هوشمند از جمله استفاده از شبکه‌های عصبی [6-9] و منطق فازی [9-12] اشاره نمود. اما منطق فازی یک ابزار قدرتمند و مناسب جهت تحلیل سیستم‌هایی که دارای اطلاعات کافی نیستند، بسیار مورد توجه محققان و پژوهشگران قرار گرفته است. سیستم‌های فازی به طور کلی بر دو نوع هستند: سیستم‌های فازی نوع-1[2] و سیستم‌های فازی نوع-2[3]. توانایی سیستم‌های فازی نوع-1 در مقابله با نامعینی‌ها محدود است. به عبارت دیگر تابع تعلق مجموعه فازی نوع-1، مقداری واحد بین صفر و یک می‌گیرد و تعلق عدم قطعیت را شامل نمی‌شود و در آن یک درجه تعلق واحد برای هر داده ورودی وجود دارد. به همین منظور در سیستم‌هایی که عدم قطعیت و تغییر پارامترها دارای محدوده وسیعی است، می‌توان از سیستم‌های فازی نوع-2 استفاده کرد. سیستم‌های فازی نوع-2 در مواجهه با نایقینی ها و عوامل غیرخطی بسیار قدرتمندتر از سیستم‌های فازی نوع-1 عمل می‌کند [13]. با توجه به اینکه در سیستم‌های صنعتی عدم قطعیت‌هایی مانند نویز در داده‌ها و شرایط محیطی وجود دارد به همین دلیل در مقاله حاضر به منظور تشخیص عیب در سیستم‌های غیرخطی از سیستم‌های فازی نوع-2 استفاده شده که در آن‌ها خروجی در یک فاصله مشخص، غیرقطعی و نامعین است.

در سال‌های اخیر منطق فازی نوع-2 در زمینه‌های مختلفی از جمله شناسایی سیستم [14]، تشخیص عیب [16،15]، پیش‌بینی سری زمانی [17] مورد توجه قرار گرفته است. در این قسمت، با توجه به موضوع و روش استفاده شده در مقاله حاضر، به بررسی برخـی مقالات پراهمیت در زمینه تشخیص عیب و فـازی نـوع-2 پرداخته خواهد شد.

در [18] برای تشخیص عیب رده‌ای از سیستم‌های غیرخطی از رویتگرهای تطبیقی استفاده شده است. مزیت روش استفاده شده در [18] عدم استفاده از تکنیک‌های خطی‌سازی است. همچنین به منظور تشخیص عیب در یک سیستم الکتروهیدرولیکی، از رویتگرهای غیرخطی در [19] و در کنترل‌کننده تطبیقی مقاوم [20] استفاده شده است. محققان در [21] عیوب ایجاد شده را برای یک سیستم غیرخطی دو تانک با طراحی یک کنترل‌کننده فازی به منظور تولید یک سیگنال مانده که مبتنی بر مدل است، مورد بررسی قرار داده‌اند. در مقاله [22] برای حسگرها و عملگرهای هلیکوپتر، یک سیستم تشخیص عیب ارائه شده است که در این سیستم، با استفاده از رویتگرها و با بررسی هر تغییر مهمی در رفتار هلیکوپتر (نسبت به حالت بدون خطا)، عملیات تشخیص خطای رخداده، انجام می‌شود. در [5] مساله تخمین همزمان سرعت و تشخیص خطای حسگر مبتنی بر رویتگر، برای یک وسیله نقلیه هوایی بدون سرنشین بحث شده است. ساختار اصلی آن، شامل بانکی از رویتگرهای کاهش مرتبه داده شده، برای کشف و جداسازی حسگرهای خطادار و همزمان با آن تخمین بدون بایاس سرعت وسیله نقلیه هوایی بدون سرنشین از روی اطلاعات شتاب سنج‌ها می‌باشد. در [23] به منظور دستیابی به پایداری و عملکرد مطلوب یک هواپیمای بال ثابت، در حضور نامعینی مدل و نویز اندازه‌گیری یک کنترل‌کننده مقاوم طراحی شده و برای داشتن یک تخمین مناسبی از ورودی‌های کنترلی، یک طرح جهت تشخیص عیب مبتنی بر شبکه عصبی توسعه داده شده است. سرانجام، برای جبران اثرات خطای رخداده، یک کنترل‌کننده با قابلیت پیکربندی مجدد پیشنهاد شده است. در [24] با استفاده از کنترل‌کننده فازی نوع-2، عیب‌های ایجاد شده در یک پروسه صنعتی تشخیص داده شده است. در [25] یک کنترل‌کننده فازی تطبیقی براساس منطق فازی نوع-2 برای یک مدل بیهوشی چند متغیره به منظور کنترل آرامش عضلانی، بیهوشی، و تسکین درد در اتاق عمل و بعد از عمل پیشنهاد شده است. در واقع با توجه به اینکه پارامترهای انسانی شامل عدم قطعیت می‌باشند در این مقاله از کنترل‌کننده براساس فازی نوع-2 استفاده شده و نشان داده شده که عملکردی به مراتب بهتر نسبت به فازی نوع-1 دارد. نویسندگان در [26] با استفاده از یک رویتگر تطبیقی جهت شناسایی و آشکارسازی عیب برای یک مدل غیرخطی هواپیما استفاده نموده‌اند. نویسندگان در [27] با استفاده از یک کنترل‌کننده فازی نوع-2 به کنترل جهت حرکت و ارتفاع ربات پرنده چهارملخه به عنوان یک شیء پرنده بدون سرنشین پرداخته‌اند. در این مقاله با توجه به شرایط محیطی و تاثیرات عدم قطعیت و نویز در عمل‌کرد سیستم کنترل‌کننده فازی نوع-2 پیشنهاد شده است و نشان داده شده که عملکرد مناسب‌تری نسبت به کنترل‌کننده فازی نوع-1 و کنترل‌کننده تناسبی، انتگرالی، مشتق‌گیر دارد. محققین در [28] از رویتگر غیرخطی مقاوم جهت تشخیص عیب‌های ایجاد شده در سنسور یک سیستم تعلیق با مدل غیرخطی استفاده کرده‌اند. در واقع در [28]، رویتگر مقادیر حالت‌هایی از سیستم‌ها را که در دسترس نیستند تخمین زده و سپس با استفاده از رویتگر و تشکیل یک سیگنال

[1] Features
[2] Type 1 fuzzy systems
[3] Type 2 fuzzy systems

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.55.5]

مانده‌ی مناسب، متناسب با مقدار عیب، وجود یا عدم وجود عیب از روی این سیگنال مانده بدست می‌آید. تشخیص عیب در یک توربین گازی توسط شبکه‌های عصبی در [29] مورد بررسی قرار گرفته است. مرجع [8] به مساله تشخیص عیب برای سیستم‌های فازی نوع-2 با سنسور غیرخطی پرداخته است و با استفاده از یک فیلتر براساس رویتگر، یک سیگنال مانده جهت تشخیص عیب تولید نموده است. نویسندگان در [30] یک کنترل‌کننده مد لغزشی فازی نوع-2 بازه‌ای جهت کنترل وضعیت هواپیما طراحی نموده‌اند. همچنین جهت اصلاح ضرایب کنترل‌کننده پیشنهادی از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده نموده‌اند و نشان داده شده که کنترل‌کننده ارایه شده پایداری مجانبی حلقه بسته با درنظر گرفتن عدم قطعیت و اغتشاش در مدل را تضمین می‌نماید. در [31] کنترل‌کننده فیدبک حالت براساس فازی نوع-2 همراه با عیب روی محرک برای یک سیستم پاندول معکوس طراحی شده است و نشان داده شده که کنترل‌کننده پیشنهادی در برابر نامعینی در مدل عملکرد مناسبی دارد. محققین در [32] یک روش مبتنی بر سیستم‌های فازی نوع-2 را به منظور تحمل عیب یک موتور القایی ارائه نموده‌اند. در این مقاله عیب در موتور القایی را بلبرینگ معیوب درنظر گرفته‌اند و نشان داده شده است که روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های قبلی مشابه عملکرد بهتری دارد. در [33] یک کنترل‌کننده مقاوم جهت کنترل هلیکوپتر با شش درجه آزادی در حضور عیب در سیستم ارائه شده است. استراتژی کنترل در این مقاله براساس ترکیب کنترل فازی نوع-2 و کنترل مد لغزشی است. در این مقاله نشان داده شده است که کنترل‌کننده ارائه شده موجب حذف پدیده وزوز و تضمین پایداری مقاوم سیستم می‌گردد. نویسندگان در [9] به بررسی مساله تشخیص عیب برای سیستم‌های تصادفی فازی نوع-2 با محدودیت پایداری پرداخته شده است.

در مقاله حاضر جهت تشخیص عیب برای سیستم‌های غیرخطی از سیستم‌های فازی نوع-2 استفاده شده است. این تحقیق از چند دیدگاه دارای نوآوری است. ابتدا مدل‌سازی یک سیستم غیرخطی با سیستم فازی نوع-2 ارائه شده است و نیازی به سخت افزار و تجهیزات اضافی نیست. همچنین طراحی سیستم‌های فازی به وسیله‌ی تکنیک خوشه‌بندی[1] انجام شده است. همچنین روش پیشنهادی در این مقاله برای تشخیص عیب در سیستم‌های غیرخطی تک ورودی-تک خروجی بسیار مناسب است. از طرفی دیگر ایده‌ی اصلی این مقاله برای تشخیص عیب در سیستم‌های غیرخطی، ایجاد محدوده‌ی اطمینانی برای خروجی سیستم تحت کنترل می‌باشد. این‌کار توسط تخمین یک کران بالا و یک کران پایین برای خروجی سیستم، توسط سیستم فازی نوع-2 بازه‌ای، انجام شده است. از روی این کران‌ها سیگنال باقی‌مانده بدست آمده و سپس عیوب رخ‌داده تشخیص داده شده‌اند. در انتها با توجه به اینکه در سیستم‌های صنعتی عدم قطعیت‌هایی مانند نویز در داده‌ها و شرایط محیطی وجود دارد، نشان داده خواهد شد که در عمل روش ارائه شده در برابر نویز پاسخ قابل قبولی خواهد داد.

ساختار مقاله بدین شرح است که، بعد از مقدمه گفته شده در این بخش، در بخش دوم مختصراً سیستم فازی نوع-2 معرفی خواهد شد. در بخش سوم طراحی سیستم‌های فازی نوع-2 به وسیله‌ی خوشه‌بندی ارائه خواهد شد. سپس در بخش چهارم، شیوه تشخیص عیب ارائه شده و سپس در بخش پنجم بر اساس آن، شبیه‌سازی‌ها انجام و نمودارها ارائه خواهد شد. در این بخش، روش پیشنهادی روی دو سیستم صنعتی (سه تانک و الکتروهیدرولیکی) اعمال و نتایج مورد تحلیل و بررسی قرار خواهد گرفت. در نهایت در بخش آخر نتیجه‌گیری ارائه می‌گردد.

[1] Clustering

2- معرفی سیستم فازی نوع-2

همان‌طور که اشاره شد نظریه‌ی سیستم‌های فازی، یک ابزار مناسب برای مواجهه با عدم قطعیت در سیستم است. با این وجود سیستم‌های فازی نوع-2، برای پشتیبانی شرایط غیرمطمئن، هم‌چون شرایط نویزی و تغییر محیط، می‌توانند از سیستم‌های منطق فازی نوع-1 بهتر عمل کنند. این انعطاف‌پذیری به خاطر آن است که در فازی نوع-2 درجه‌ی عضویت خود یک مجموعه‌ی فازی می‌باشد، هرچند که این مسئله باعث پیچیدگی استفاده از سیستم‌های فازی نوع-2 نسبت به فازی نوع-1 می‌باشد. در حالت پیوسته یک مجموعه‌ی فازی نوع-2 $\tilde{A}$ به صورت رابطه (1) تعریف می‌شود:

$$\tilde{A} = \int_{x\in X}\int_{u\in J_x} \frac{\mu_{\tilde{A}}(x,u)}{(x,u)} \qquad J_x \subseteq [0,1] \qquad (1)$$

که در آن J_x درجه‌ی عضویت اولیه‌ی x نامیده می‌شود و $\mu_{\tilde{A}}$ درجه‌ی عضویت ثانویه است. امروزه از آنجا که استفاده از مجموعه‌های فازی نوع-2 معمولی در سیستم منطق فازی نوع-2، محاسبات پیچیده‌ای دارد، بیشتر محققان برای کاهش پیچیدگی به سراغ سیستم‌های فازی نوع-2 بازه‌ای[2] می‌روند. وقتی همه‌ی درجه‌های عضویت ثانویه برابر یک باشد، یعنی $\mu_{\tilde{A}}(x,u) = 1$، آنگاه سیستم فازی نوع-2 به صورت بازه‌ای است. ساختار کلی یک کنترل‌کننده فازی نوع-2 در شکل 1 نشان داده شده است.

اساساً ساختار سیستم منطق فازی نوع-2 به ساختار سیستم منطق فازی نوع-1 شباهت زیادی دارد. بزرگ‌ترین تفاوت ساختاری این است که فرآیند غیرفازی‌سازی[3] در یک سیستم فازی نوع-1 با بلوک عملیات خروجی در سیستم فازی نوع-1 جایگزین شده است که شامل کاهش نوع[4] به همراه غیرفازی‌سازی می‌باشد.

در این تحقیق از یک سیستم فازی نوع-2 بازه‌ای برای شناسایی و مدل‌سازی سیستم غیرخطی استفاده شده است. در قسمت منطق فازی از مدل تاکاگی سوگنو[5] استفاده شده است. ایده‌ی کلیدی در تشخیص عیب ایجاد یک محدوده اطمینان توسط تخمین کران بالا و کران پایین برای خروجی سیستم است. این دو تخمین توسط سیستم فازی نوع-2 ساخته می‌شوند. اگر ورودی و خروجی سیستم واقعی را به صورت داده‌های ورودی- خروجی در دسترس باشند، سیستم فازی قابل طراحی است. ایده‌ی در طراحی سیستم فازی نوع-2، خوشه‌بندی داده‌های ورودی-خروجی و استفاده از یک قاعده مناسب فازی برای هر خوشه می‌باشد. ابتدا

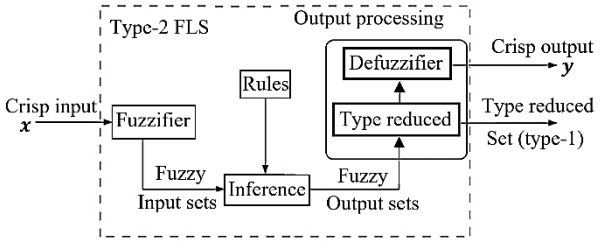


Fig. 1 The structure of type-2 fuzzy controller

شکل 1 ساختار کنترل کننده فازی نوع-2 [27]

[2] Interval Type-2 Fuzzy Systems
[3] Defuzzification
[4] Type-Reduction
[5] Takagi-Sugeno

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.55.5]

یک سیستم فازی از این نظر که می‌تواند تمامی زوج‌های ورودی-خروجی را با یک دقت مطلوب تطبیق دهد، ایجاد می‌شود. سپس خوشه‌های ورودی- خروجی با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی نزدیک‌ترین همسایگی، تعیین می‌گردند که به طور خلاصه در [34،16] آمده است. سپس خوشه‌ها را به دید زوج‌های ورودی- خروجی نگاه کرده و سیستم فازی برای تطابق آن‌ها طراحی می‌شود. سیستم فازی ارائه شده به صورت رابطه (2) ساخته می‌شود [34]:

$$f(x)=\frac{\sum_{i=1}^{p} y_0^i \mu_{A_j^i}(x_j)}{\sum_{i=1}^{p} \mu_{A_j^i}(x_j)} \tag{2}$$

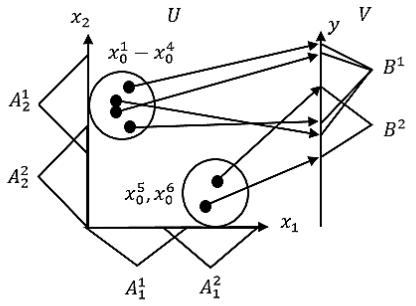
یک نمونه قانون (قانون i-ام) برای سیستم فازی نوع-2 با p ورودی و یک خروجی به صورت زیر خواهد بود:

"اگر x_1 برابر F_1^i و ... و x_p برابر F_p^i باشند، آنگاه y برابر G^i خواهد بود"

در سیستم فازی (2) از روی p قاعده‌ی فازی با تابع عضویت‌های ورودی $\mu_{A_j^i}(x_j)=\exp(-\left|x_j-x_0^i\right|^2/2\sigma^2)$ و مرکز تابع عضویت خروجی برابر با y_0^i و استفاده از ماشین استنتاج ضرب، فازی‌ساز منفرد و غیرفازی‌ساز میانگین مراکز ساخته شده است. با انتخاب مناسب پارامتر σ، سیستم فازی (2) می‌تواند N زوج ورودی- خروجی را با هر دقت خواسته شده تطبیق دهد.

3- طراحی سیستم‌های فازی به وسیله‌ی خوشه‌سازی

سیستم فازی غیر بهینه (2) برای هر زوج ورودی- خروجی از یک قاعده استفاده می‌کند. در نتیجه اگر تعداد زوج‌های ورودی- خروجی زیاد باشد یک سیستم عملی قابل استفاده را به دست نخواهد داد. برای مسائلی از این دست، تکنیک‌های خوشه‌بندی مختلفی را برای گروه‌بندی داده های ورودی- خروجی می‌توان مورد استفاده قرار داد، به نحوی که هر گروه را بتوان با یک قاعده نمایش داد. منظور از خوشه‌بندی، افراز مجموعه‌ای از داده‌ها به زیر مجموعه‌های جداگانه است به گونه‌ای که داده‌ی موجود در یک خوشه دارای ویژگی‌هایی می‌باشد که آن را از داده‌های موجود در سایر خوشه‌ها متمایز می‌سازد [34،16]. برای مسئله‌ی مطرح شده در این تحقیق، ابتدا زوج‌های ورودی–خروجی برحسب توزیع نقاط ورودی به خوشه‌هایی تقسیم شده و برای هر خوشه از یک قاعده استفاده می‌گردد. شکل 2 نمونه‌ای را نشان می‌دهد که در آن شش داده ورودی- خروجی به دو خوشه تقسیم و برای ساخت سیستم فازی از دو قاعده استفاده شده



اگر x_1 برابر A_1^1 و x_2 برابر A_2^1 باشند، آنگاه y برابر B^1 خواهد بود
اگر x_1 برابر A_1^2 و x_2 برابر A_2^2 باشند، آنگاه y برابر B^2 خواهد بود

Fig. 2 An example for the construction of fuzzy if-then rules using input-output data

شکل 2 مثالی برای ساخت قواعد اگر-آنگاه فازی توسط داده های ورودی- خروجی

است. شش داده‌ی ورودی- خروجی (x_0^1,y_0^1) و ... و(x_0^6,y_0^6) به دو خوشه تقسیم شده است و از روی آنها دو قاعده ایجاد می‌شود.

برای مسأله‌ی مطرح شده در این مقاله، ابتدا زوج‌های ورودی–خروجی را برحسب توزیع نقاط ورودی به خوشه‌هایی تقسیم کرده و برای هر خوشه از یک قاعده استفاده خواهد شد. یکی از الگوریتم‌های خوشه‌سازی، الگوریتم خوشه‌سازی نزدیک‌ترین همسایه[1] می‌باشد که به طور مفصل در [34،16] آورده شده است.

4- تشخیص عیب

همان‌گونه که ذکر شد، هدف کلی در این تحقیق، آشکارسازی عیب در یک سیستم غیرخطی به روش فازی نوع-2 می‌باشد. در این مقاله قصد بر این است که سیستم غیرخطی موجود به وسیله‌ی تکنیک فازی نوع-2 مدل‌سازی شده و درنهایت سیگنال مانده جهت آشکارسازی عیب، از روی مدل بدست آمده تولید گردد. در شکل 3 شمای کلی تکنیک تولید سیگنال مانده[2] و آشکارسازی عیب از روی سیگنال مانده نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل 3 مشخص است، سیگنال مانده از روی مدل سیستم تولید می‌شود.

ایده‌ی کلیدی شیوه‌ی تشخیص عیب که در اینجا پیشنهاد شده است، به خدمت گرفتن تخمین‌های کران بالایی و کران پایینی می‌باشد که توسط روش ارائه شده به عنوان محدوده‌ی اطمینان برای خروجی سیستم به دست آمده است. نحوه به دست آوردن تخمین کران بالایی و کران پایینی برای خروجی در قسمت قبلی توضیح داده شد. این طور فرض می‌شود که تشکیل‌دهنده‌ی تخمین کران بالایی و کران پایینی، محدوده‌ی اطمینان برای خروجی هستند. برای یافتن عیب، توابع تصمیم‌گیری که این که آیا هر مقدار اندازه‌گیری شده به این محدوده‌ی باریک تعلق دارد را بازبینی می‌کند. برای این منظور سیگنال مانده $\mathrm{re}(y_{\mathrm{out}})$ می‌تواند به صورت (3) تعریف شود:

$$\hat{y}=\frac{\bar{\hat{y}}-\underline{\hat{y}}}{2} \tag{3}$$

در این حالت فاصله پیشنهادی به صورت (4) تعریف می‌گردد. اگر خروجی اندازه‌گیری شده برابر $\hat{y}$ باشد (رابطه 3)، سیگنال مانده در (4) برابر صفر می‌شود و اگر که خروجی اندازه‌گیری شده به یکی از کران‌های بازه نزدیک شود، آن‌گاه سیگنال مانده به مقدار یک میل می‌کند. هر وقت سیگنال مانده از مقدار یک تجاوز کند، یک هشدار[3] صادر خواهد شد.

$$\mathrm{re}(y_{\mathrm{out}})=\frac{y_{\mathrm{out}}-\hat{y}}{\underline{\hat{y}}-\hat{y}} \quad \text{اگر } y_{\mathrm{out}}<\hat{y}:$$

$$\mathrm{re}(y_{\mathrm{out}})=\frac{y_{\mathrm{out}}-\hat{y}}{\bar{\hat{y}}-\hat{y}} \quad \text{اگر } y_{\mathrm{out}}>\hat{y}: \tag{4}$$

5- نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت به منظور نشان دادن قابلیت روش سیستم فازی نوع-2 برای تشخیص عیب، روش پیشنهادی روی دو سیستم صنعتی غیرخطی اعمال خواهد شد. در ادامه، ابتدا این دو مدل غیرخطی مشهور (سیستم سه تانک و سیستم الکتروهیدرولیکی) معرفی شده و سپس طی شبیه‌سازی آن‌ها در محیط سیمولینک نرم افزار متلب، چهار مدل فازی نوع-2 بازه‌ای برای محدوده اطمینان سیگنال خروجی آن‌ها محاسبه شده است. به خاطر غیرخطی بودن این سیستم‌ها و متفاوت بودن رفتار آن‌ها حین کاهش یا

[1] Nearest Neighborhood Clustering
[2] Residual signal Generation
[3] Alarm

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.55.5]

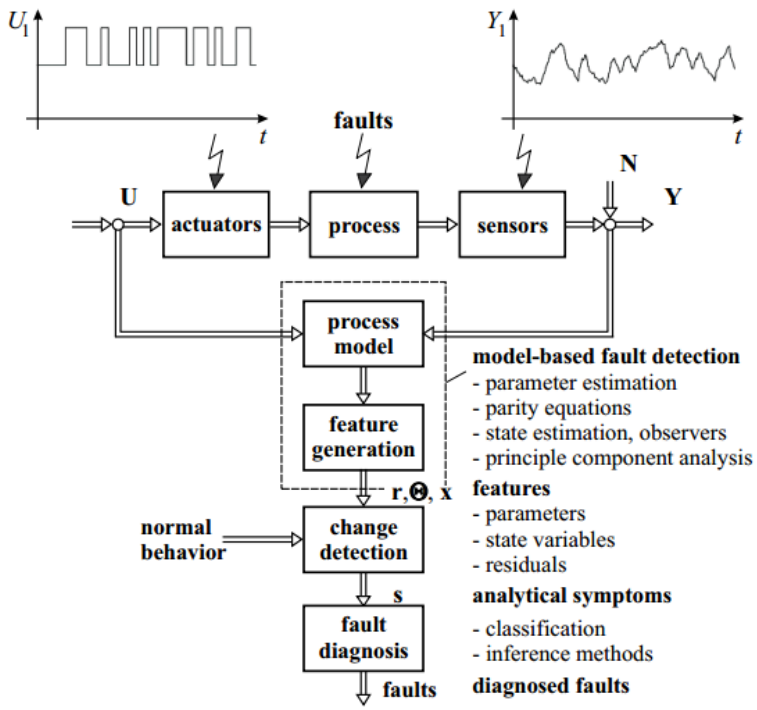


Fig. 3 The overall diagram of fault detection method based on the system model

شکل 3 نمودار کلی روش تشخیص عیب بر اساس مدل سیستم [35]

افزایش سیگنال مرجع، در این مقاله دو مدل فازی برای هنگام افزایش سیگنال مرجع و دو مدل فازی نیز برای حالت کاهشی بودن سیگنال مرجع محاسبه شده‌اند. در ادامه با فرض عیوبی در اجزای سیستم‌های حلقه بسته، نظیر خرابی عمل‌گر یا حس‌گر و یا رخداد نشتی در تانک یا سیلندرهای آن‌ها، روش پیشنهادی برای آشکار سازی رخداد عیب مطالعه شده است.

5-1- معرفی سیستم سه تانک

در این قسمت سیستم سه تانک که یک مسئله‌ی مشهور است [36]، برای نشان دادن مزایای روش پیشنهاد شده برای تشخیص عیب، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این سیستم یک دستگاه آزمایشگاهی است که شامل سه تانک با جریان مایع بین آن‌هاست. هر سه تانک به شکل استوانه‌ای و به شعاع 7 سانتی‌متر می‌باشند در نتیجه سطح مقطع آن‌ها $A_s = 0.0154\text{m}^2$ است. لوله‌ی اتصال‌دهنده‌ی بین هر دو تانک و همچنین لوله‌ی خروجی تانک سوم دارای شعاع 2 سانتی‌متر می‌باشند. بدین ترتیب سطح مقطع این لوله‌ها و خروجی‌ها برابر $s_p = 0.0013\text{m}^2$ است و سطح مایع در تانک‌ها با h_i نشان داده می‌شود. نمایی از این سیستم سه تانک در شکل 4 نمایش داده شده است. جریان ورودی که به وسیله‌ی یک پمپ الکتریکی به تانک اول وارد می‌شود با $q_1(t)$ و جریان خروجی از تانک سوم با $q_{\text{out}}(t)$ نمایش داده شده است. با استفاده از روابط تعادل جرم و قانون توریچلی[1]، برای این سیستم سه تانک، معادلات دیفرانسیلی به‌صورت روابط (5) به دست می‌آید:

$$\begin{aligned}
\dot{h}_1 &= \frac{1}{A_s}\left(-k_{p_1}\text{sign}(h_1-h_2)\sqrt{2g|h_1-h_2|}+q_1\right)\\
\dot{h}_2 &= \frac{1}{A_s}\left(+k_{p_1}\text{sign}(h_1-h_2)\sqrt{2g|h_1-h_2|}\right.\\
&\quad \left.-k_{p_2}\text{sign}(h_2-h_3)\sqrt{2g|h_2-h_3|}\right)\\
\dot{h}_3 &= \frac{1}{A_s}\left(+k_{p_2}\text{sign}(h_2-h_3)\sqrt{2g|h_2-h_3|}-k_{p_3}\sqrt{2gh_3}\right)
\end{aligned} \tag{5}$$

که در آن $k_{p_i} = a_i S_{p_i}$ ثابت‌های برون‌ریز و $g = 9.8$ هم شتاب گرانش زمین را نشان می‌دهند. برای سادگی $a_i = 1$ قرار داده شده است. ورودی سیستم همان ولتاژ پمپ الکتریکی $u_1(t)$ است که دبی ورودی را به وجود می‌آورد (رابطه (6)):

$$q_1(t) = k_u u_1(t) \tag{6}$$

که در آن $k_u = 8.8 \times 10^{-3}\ \text{m}^3/\text{sV}$ ثابت تبدیل ولتاژ به دبی مایع است. تبدیل کردن سطح مایع در تانک‌ها h_i به ولتاژ خروجی مطابق رابطه (7) ممکن است:

$$y_i(t) = k_{h_i} h_i(t) \tag{7}$$

که در آن $k_{h_i} = 1/0.06 \cong 16.667\,\text{V/m}$ ثابت‌های تبدیل سطح مایع به ولتاژ هستند.

شکل 5 دیاگرام بلوکی سیستم کنترل حلقه بسته بکار رفته برای سیستم سه تانک را نشان می‌دهد. در این سیستم حلقه بسته کنترل‌کننده پیشنهادی یک کنترل‌کننده تناسبی دو حالته است. زمانی که لازم است ارتفاع تانک شماره 1 افزایش یابد، به منظور پرشدن تانک شماره 1 کنترل کننده، فرمان باز شدن شیر ورودی را می‌دهد و هنگامی‌که ارتفاع تانک شماره 1 باید کاهش یابد، به منظور خالی شدن تانک شماره 1، کنترل کننده، فرمان باز شدن شیر خروجی تانک شماره 3 را صادر می‌کند.

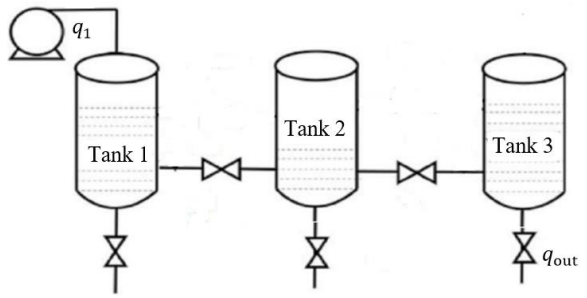


Fig. 4 Three-tank system

شکل 4 سیستم سه تانک [36]

[1] Toricelli's Rule

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.55.5]

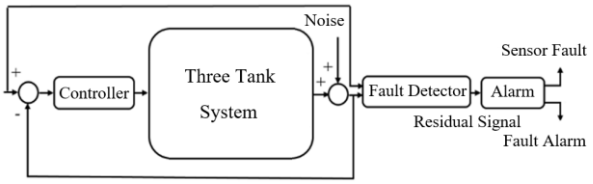


Fig. 5 Three-tank system in the control loop along with the fault detectors and alarm creators blocks

شکل 5 سیستم سه تانک در حلقه کنترل به همراه بلوک‌های تشخیص دهنده عیب و ایجاد کننده هشدار

5-1-1- شبیه سازی عددی سیستم سه تانک

5-1-1-1- بخش شناسایی

پس از معرفی سیستم سه تانک، در این قسمت به منظور شناسایی این سیستم غیرخطی، طی شبیه‌سازی انجام شده در محیط سیمولینک، چهار عدد مدل فازی نوع-2 بازه‌ای برای ایجاد محدوده اطمینان سیگنال خروجی محاسبه شده‌اند. سپس با فرض عیوب عمل‌گر و حس‌گر و رخداد نشتی در تانک شماره 1 به شناسایی این عیوب اقدام شده است. شکل 6 نمودار سیگنال‌های ورودی و خروجی استفاده شده برای شناسایی سیستم غیرخطی به صورت یک مدل فازی نوع-2 فاصله‌ای را نشان می‌دهد. جهت شناسایی سیستم، زمان نمونه برداری 5 میلی ثانیه در نظر گرفته شده است. بنابراین در 90 ثانیه 18000 داده ایجاد می‌شود. 9000 تای اول مربوط به زمانی است که ارتفاع کاهش می‌یابد و 9000 تای بعدی داده‌های ناشی از افزایش ارتفاع می‌باشند. از آن‌ها برای ایجاد فایل‌های داده استفاده می‌شود.

این فایل‌ها حاوی اطلاعات مربوط به سیستم‌های فازی نوع-2 می‌باشند. در آن‌ها و برای هر دو حالت کاهش و افزایش سیگنال مرجع باند 0.02 برای کران‌های بالا و پایین مجاز برای تغییرات ارتفاع در نظر گرفته شده است. این فایل‌ها توسط توابع متلب برای ایجاد سیگنال‌های $\hat{y}_{\text{up}}, \hat{y}_{\text{down}}$ استفاده شده‌اند. این توابع وظیفه طراحی سیستم فازی-2 را بر عهده دارند. در نهایت در محیط سیمولینک یک برنامه شبیه‌ساز که شامل قسمت‌هایی برای شبیه‌سازی سیستم سه تانک، کنترل‌کننده و آشکارساز عیب (با کمک سیستم فازی نوع-2 بازه‌ای) می‌باشد، نوشته شده است.

5-1-1-2- بخش تشخیص عیوب

در این تحقیق در سیستم سه تانک رخداد سه نوع عیب فرض می‌شود:

1- نشتی در تانک شماره‌ی 1

از ثانیه 0.5 الی 1، یک سوراخ ناگهان و به شکل دایره و با شعاع 5 سانتی‌متر در ته تانک شماره 1 فرض شده است. در نتیجه‌ی آن، جریان مایع خروجی از این سوراخ برابر است با:

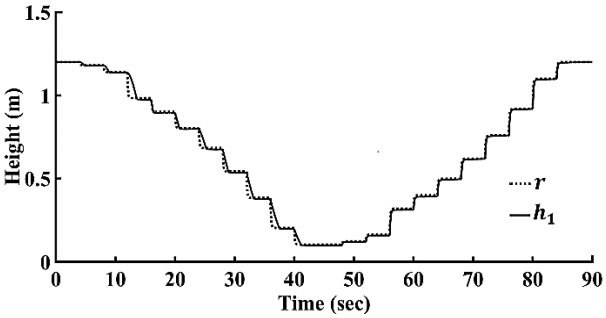


Fig. 6 The reference signal and the height of the liquid in the tank 1

شکل 6 سیگنال مرجع و ارتفاع مایع در تانک شماره 1

$$a_1\pi(r_1)^2\sqrt{2gh_1} \tag{8}$$

2- عیب در عمل‌گر

فرض می‌شود که عمل‌گر دچار حادثه شده و جریان اضافی و ثابتی را به تانک شماره 1 از ثانیه 2.5 الی 2.8 تزریق می‌کند.

3- عیب در حس‌گر

یک خطای ساده در سنسور اندازه‌گیری سطح فرض شده است، به طوری که ناگهان در ثانیه 4.5 مقدار ولتاژ معادل ارتفاع اندازه‌گیری شده به نصف کاهش می‌یابد و در نتیجه 50% خطا در تشخیص ارتفاع مایع در مخزن شماره 1 رخ می‌دهد.

برای تشخیص عیوب در نظر گرفته شده، آشکارساز عیبی مبتنی بر سیستم فازی نوع-2 استفاده می‌شود. در این روش، از روی سیگنال مانده کران‌های بالایی و پایینی ارتفاع مایع در مخزن شماره 1 تخمین زده می‌شوند که آنها محدوده‌ی اطمینانی برای خروجی سیستم خواهند بود.

شکل 7 زیر سیستم آشکارساز عیب را نشان می‌دهد. این زیرسیستم شامل بلوک‌هایی برای ایجاد سیگنال مانده می‌باشد. در این شکل سیگنال‌های بالا آمدن[1] و پایین آمدن[2] به ترتیب نشان دهنده افزایشی یا کاهشی بودن سیگنال مرجع ارتفاع تانک شماره 1 می‌باشند. بنابراین سیگنال‌های $\hat{y}_{\text{up}}, \hat{y}_{\text{down}}$ که تخمینی از کران‌های بالایی و پایینی ارتفاع مایع در تانک شماره 1 می‌باشند، متناظر با افزایشی یا کاهشی بودن سیگنال مرجع ایجاد می‌شوند. برای نزدیکتر شدن بررسی به واقعیت، خروجی در حین اندازه‌گیری به نویز آغشته شده است.

نمودار رسم شده در شکل 8 خروجی تانک شماره 1 را نشان می‌دهد. در شکل 8، r سیگنال مرجع (ارتفاع مطلوب برای سطح تانک شماره 1) و h_1 ارتفاع مایع، h_{up} کران بالایی و h_{down} کران پایینی ارتفاع مایع در تانک شماره 1 می‌باشند.

در شکل 8 کران‌های 0.02 برای آن به‌خوبی توسط سیستم‌های فازی نوع-2 بازه‌ای ایجاد شده است. به‌عنوان عیب در عمل‌گر، بین ثانیه 2.5 الی 2.8 جریان اضافی به علت رخداد عیب در شیر-برقی وارد مخزن شماره 1 شده است. در ثانیه 0.5 الی 1 نیز عیب ناشی از نشتی در تانک شماره 1 فرض شده که باز سیستم تشخیص عیب آن را آشکار کرده است. در ثانیه 4.5 به بعد هم حس‌گر دچار حادثه شده و بهره آن از 1 به 0.5 کاهش یافته است. تغییر ارتفاع به خوبی مشخص است.

با توجه به این که هنگام وقوع عیب در حس‌گر، مطابق شکل 9 سیگنال باقیمانده به صورت ناگهانی تغییر می‌کند بنابراین هرگاه مشتق سیگنال باقیمانده از حدّی بیشتر شود مکانیزم تشخیص عیب حس‌گر باید فعال شده و هشدار صادر گردد. این‌بار نیز آشکار ساز عیب به خوبی عمل کرده و توسط

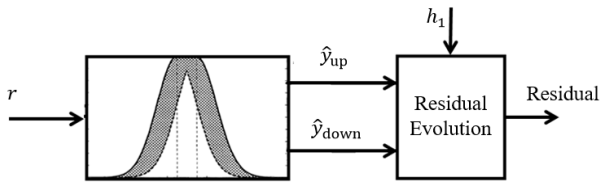


Fig. 7 Fault detector's subsystem

شکل 7 زیر سیستم آشکار ساز عیب

[1] Rise
[2] Fall

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.55.5]

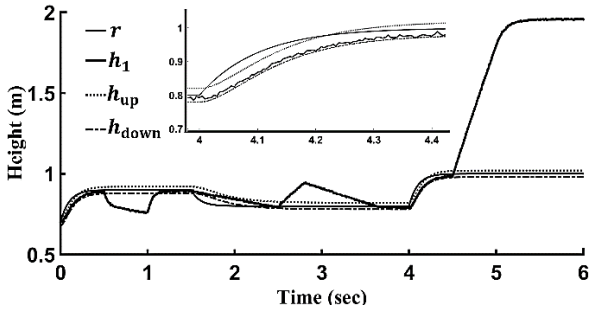


Fig. 8 The controlled height of liquid in tank 1, the upper and lower bounds of the liquid height in tank 1 in the presence of noise

شکل 8 ارتفاع کنترل شده مایع در مخزن شماره 1، کران‌های بالایی و پایینی ارتفاع مایع در مخزن شماره 1 در حضور نویز

مکانیزم خاص طراحی شده وقوع عیب در حس‌گر تشخیص داده شده است.

به‌طور کلی، در نمودار رسم شده در شکل 9- الف به‌خاطر وجود نویز در برخی مواقع سیگنال هشدار وقوع عیب به اشتباه صادر شده است. برای غلبه بر این مشکل از یک فیلتر مناسب در خروجی استفاده می‌شود تا اثر نویز از بین رفته و هشدار وقوع عیب به درستی صادر گردد. شکل 9 قسمت ب این موضوع را نشان می‌دهد.

شکل 10- الف نمودار سیگنال کنترل یا همان دبی لازم برای کنترل ارتفاع مایع در تانک شماره 1 را نشان می‌دهد. این سیگنال توسط بخشی از بلوک کنترل کننده به دو قسمت مثبت و منفی تقسیم می‌شود. مقادیر مثبت به عمل‌گر (شیر برقی) واقع در ورودی تانک شماره 1 و مقادیر منفی به شیر تخلیه تانک شماره 3 اعمال می‌شوند. از این رو شکل‌های 10- ب و ج به تربیت دبی ورودی به تانک شماره 1 (قسمت مثبت سیگنال کنترل) و دبی خروجی از تانک شماره 3 (قسمت منفی سیگنال کنترل) را نمایش می‌دهند.

با توجه به نتایج شبیه سازی مشخص است که در بین ثانیه 2.5 الی 2.8 عیب در عمل‌گر رخ می‌دهد که با کمی تاخیر این عیب تشخیص داده شده است و در اثر آن مقداری جریان بیشتر از مقدار نشان داده شده در این نمودار به تانک شماره 1 ریخته می‌شود. برای جبران نشتی در تانک شماره 1 بین ثانیه 0.5 الی 1 از طریق شیر برقی دبی حداکثر 0.03 مترمکعب بر ثانیه وارد تانک شماره 1 می‌شود.

همان‌طور که گفته شد در ثانیه 4.5 ناگهان حس‌گر ارتفاع مخزن شماره 1 دچار عیب شده و مقدار ارتفاع را 50% کمتر از مقدار واقعی نشان می‌دهد. بنابراین تغییر شدید ملاحظه شده در ثانیه 4.5 به‌علت رخداد عیب در حس‌گر می‌باشد که این عیب نیز بلافاصله تشخیص داده شده است.

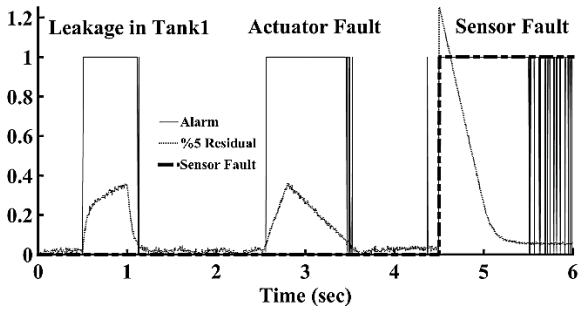


Fig. 9(a) The generated residual signal, the moment of occurrence of faults in the sensors and actuators, and the occurred leakage in tank 1 in the presence of noise

شکل 9 (الف) سیگنال مانده تولید شده، لحظه وقوع عیب‌ها در حس‌گر، عمل‌گر، و نشت رخ‌داده در تانک شماره 1 در حضور نویز

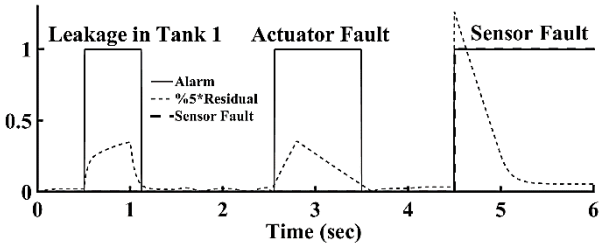


Fig. 9(b) The generated residual signal, the moment of occurrence of faults in the sensors and actuators, and the occurred leakage in tank 1 in the presence of noise and filter

شکل 9 (ب) سیگنال مانده تولید شده، لحظه وقوع عیب‌ها در حس‌گر، عمل‌گر، و نشت رخ‌داده در تانک شماره 1 در حضور نویز و فیلتر

برای تعقیب سیگنال مرجع و نیز جبران جریان مازاد ناشی از وقوع عیب در عمل‌گر شیر برقی موجود در خروجی تانک شماره 3 باز شده است. جهت تبین این موضوع در شکل 10 نمودار $q_{\text{out}}(t)$ (دبی خروجی از تانک شماره 3) رسم شده است. در مجموع شکل 9 نشان می‌دهد که برای هر سه عیب مطرح شده، نتیجه‌ی مورد انتظار برای مسئله برآورده شده است. از این گذشته، با استفاده از این روش پیشنهادی، تشخیص زمان تقریبی که عیب در آن لحظه رخ می‌دهد، ممکن شده است. بنابراین روش پیشنهادی می‌تواند برای تشخیص لحظه وقوع عیب به‌صورت برخط نیز مفید واقع شود.

همه‌ی عیوب فقط با اندازه‌گیری خروجی تانک شماره 1 تشخیص داده می‌شوند. بنابراین برای یافتن عیوب، به اندازه‌گیری سایر خروجی‌ها و شناسایی آن‌ها نیازی نیست.

5-2- معرفی سیستم الکتروهیدرولیکی

سیستم‌های الکتروهیدرولیکی کاربرد گسترده‌ای در کاربردهای صنعتی زیادی از جمله صنایع خودرو، لوکوموتیوها و سیستم‌های قدرت و نظیر آنها مورد استفاده قرار می‌گیرند. دلیل کاربرد وسیع این‌گونه سیستم‌ها را می‌توان قابلیت اطمینان و پاسخ سریع آن‌ها معرفی کرد [37]. از این‌رو در این قسمت، مدل غیرخطی یک سیستم الکتروهیدرولیکی ارائه شده در مرجع [38] بررسی شده است. شکل 11 شمای کلی سیستم الکتروهیدرولیکی را نشان می‌دهد. مدل دینامیکی سیستم الکتروهیدرولیکی مدّنظر به‌صورت (9) قابل بیان است:

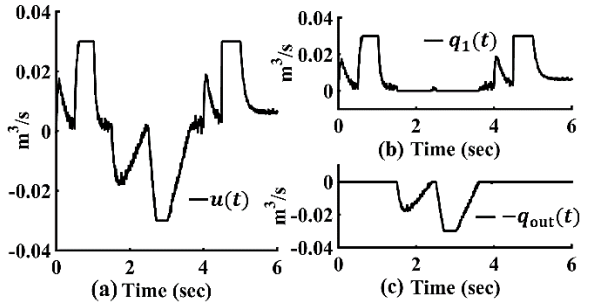


Fig. 10 (a) Control signal diagram in the presence of noise (the required flow to control the liquid height in tank 1)– (b) The input flow into the tank 1 (Positive part of the control signal)– (c) The output flow of tank 3 (negative part of the control signal)

شکل 10 (الف) نمودار سیگنال کنترل در حضور نویز (دبی لازم برای کنترل ارتفاع مایع در مخزن شماره 1 (ب) دبی ورودی به تانک شماره 1 در حضور نویز (قسمت مثبت سیگنال کنترل) (ج) دبی خروجی از تانک شماره 3 در حضور نویز (قسمت منفی سیگنال کنترل)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.55.5]

$$m\dot{x}_L = P_1A_1 - P_2A_2 - b\dot{x}_L - F_{fc}(\dot{x}_L) + \tilde{f}$$
$$\frac{V_1}{\beta_e}\dot{P}_1 = -A_1\dot{x}_L - C_{tm}(P_1 - P_2) - C_{em1}(P_1 - P_r) + Q_1$$
$$\frac{V_2}{\beta_e}\dot{P}_2 = A_2\dot{x}_L + C_{tm}(P_1 - P_2) - C_{em2}(P_2 - P_r) - Q_2 \qquad (9)$$

در رابطه (9)، b ضریب میرایی مدل و نیروهای اصطکاک چسبندگی، F_{fc} اصطکاک کولمب مدل شده، $\tilde{f}$ نامعینی‌های ناشی از تراکم‌پذیری، $V_i = V_{h_i} \pm A_i x_L, i = 1,2$ حجم قابل کنترل سیلندر اول و دوم است، وقتی‌که $x_L = 0$ است، V_{h_i} بیانگر حجم محفظه i-ام، A_i مساحت محفظه (پیستون i-ام)، β_e ضریب حجمی، C_{tm} ضریب نشت داخلی، C_{emi} ضریب نشت خارجی و Q_i نرخ دبی ورودی یا خروجی از سیلندرهای اول و دوم هستند. مقادیر کلیه پارامترها در مراجع [39] و [40] ارائه شده‌اند. Q_1 و Q_2 دبی ناشی از جابجایی دریچه شیر برقی x_v می‌باشند که با معادلات (10) و (11) مشخص می‌شوند:

$$Q_1 = k_{q_1}x_v\sqrt{\Delta P_1}, \quad \Delta P_1 = \begin{cases} P_s - P_1\,, & x_v \geq 0 \\ P_1 - P_r\,, & x_v < 0 \end{cases} \qquad (10)$$
$$Q_2 = k_{q_2}x_v\sqrt{\Delta P_2}, \quad \Delta P_2 = \begin{cases} P_2 - P_r\,, & x_v \geq 0 \\ P_s - P_2\,, & x_v < 0 \end{cases} \qquad (11)$$

در این مقاله x_v به‌عنوان ورودی کنترلی در نظر گرفته شده و سپس برای کنترل موقعیت یک ارابه به جرم $m = 100\,\text{kg}$ که به یک محرک هیدورلیکی تک محوره متصل است، کنترل کننده ساده تناسبی $u = 0.04x_v$ استفاده شده است. شکل 12 دیاگرام بلوکی سیستم کنترل حلقه بسته بکار رفته برای سیستم الکتروهیدرولیکی را نشان می‌دهد. در این سیستم حلقه بسته کنترل‌کننده پیشنهادی یک کنترل‌کننده تناسبی دو حالته است.

زمانی‌که لازم است ارابه به سمت راست حرکت کند سیلندر 1 پر و سیلندر 2 تخلیه می‌شود و برعکس زمانی‌که لازم است ارابه به سمت چپ حرکت کند سیلندر 2 پر و سیلندر 1 تخلیه می‌شود.

5-2-1- شبیه‌سازی عددی سیستم الکتروهیدرولیکی

5-2-1-1- بخش شناسایی

همان‌طور که پیشتر گفته شد، در این مقاله مدل یک سیستم

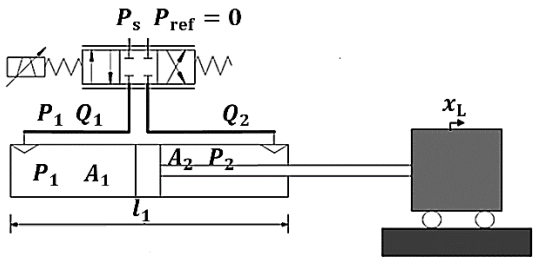


Fig. 11 Schematic of single-rod electro-hydraulic servo system [38]

شکل 11 شمای از یک سیستم سرو الکتروهیدرولیکی تک محور [38]

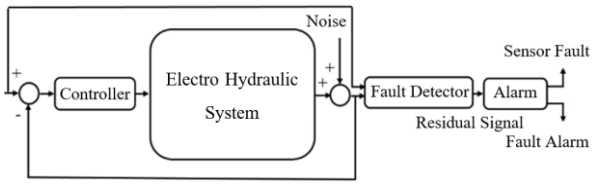


Fig. 12 Electro Hydraulic System in the control loop along with the fault detectors and alarm creators blocks

شکل 12 سیستم الکتروهیدرولیکی در حلقه کنترل به همراه بلوک‌های تشخیص دهنده عیب و ایجاد کننده هشدار

الکتروهیدرولیکی مشابه سیستم سه تانک در محیط سیمولینک شبیه سازی شده است. در این سیستم موقعیت ارابه متصل به محرک الکتروهیدرولیکی به‌عنوان خروجی در نظر گرفته شده است. یک سیگنال ورودی متشکل از چندین پله بالا رونده و پایین رونده مطابق شکل 13 به آن اعمال شده و موقعیت ارابه رسم گشته است. در شکل 13، r سیگنال مرجع و X_{L} موقعیت واقعی ارابه می‌باشند. این زوج‌های ورودی و خروجی برای شناسایی یک مدل فازی نوع-2 بازه‌ای برای این سیستم الکتروهیدرولیکی استفاده شده‌اند. حدود بالا و پایین خروجی سیستم فازی نوع-2 بازه‌ای در شکل نشان داده شده است. این خطوط تقریباً 0.2 میلی متری بالا یا پایین پاسخ سیستم رسم شده‌اند. جهت شناسایی سیستم، زمان نمونه برداری 0.1 میلی ثانیه در نظر گرفته شده است. بنابراین در 100 ثانیه یک میلیون داده ایجاد می‌شود. 500 هزار تای اول مربوط به زمانی است که ارابه به سمت راست حرکت می‌کند و سیگنال مرجع افزایش می‌یابد و 500 هزار تای بعدی داده‌های ناشی از کاهش سیگنال مرجع است یعنی ارابه به چپ سوق داده می‌شود. از آن‌ها برای ایجاد فایل‌های داده استفاده می‌شود. این فایل‌ها حاوی اطلاعات مربوط به سیستم‌های فازی نوع-2 می‌باشند. در آن‌ها و برای هر دو حالت کاهش و افزایش سیگنال مرجع باند 0.2 میلی متری برای کران‌های بالا و پایین مجاز برای تغییرات موقعیت در نظر گرفته شده است. در نهایت در محیط سیمولینک یک برنامه شبیه‌ساز که شامل قسمت‌هایی برای شبیه‌سازی سیستم الکتروهیدرولیکی، کنترل کننده و آشکارساز عیب (با کمک سیستم فازی نوع-2 بازه‌ای) می‌باشد، نوشته شده است.

5-2-1-2- بخش تشخیص عیوب

در این تحقیق در سیستم الکتروهیدرولیکی رخداد پنج نوع عیب فرض می‌شود:

1- نشتی در سیلندر شماره‌ی 1

بین ثانیه‌های 11 الی 13 و ثانیه‌های 41 الی 43 به میزان مساوی نشتی در سیلندر شماره 1 فرض شده است.

2- نشتی در سیلندر شماره‌ی 2

بین ثانیه‌های 16 الی 18 نشتی در سیلندر شماره 2 فرض شده است.

3- نشتی هم‌زمان در هر دو سیلندر

بین ثانیه‌های 21 الی 28 به‌طور هم‌زمان وقوع نشتی به میزان مساوی در سیلندرهای شماره 1 و 2 فرض شده است.

4- عیب در عمل‌گر

بین ثانیه‌های 50.25 و 50.5 فرض شده که 30% از فشار مخزن تغذیه کاسته شده است. بدین ترتیب در این بازه زمانی از کارآیی طبیعی عمل‌گر کاسته شده است.

5- عیب در حس‌گر

یک خطای ساده در سنسور اندازه‌گیری موقعیت فرض شده است، به طوری که ناگهان در ثانیه 77 مقدار ولتاژ معادل موقعیت اندازه‌گیری شده به نصف کاهش می‌یابد و در نتیجه 50% خطا در تشخیص موقعیت ارابه رخ می‌دهد.

برای نزدیکتر شدن بررسی به واقعیت، خروجی اندازه‌گیری شده، آغشته به نویز شده است. شکل 14 پاسخ سیستم را در حضور عیوب مذکور که در زمان‌های مختلف در سیستم رخداده است نشان می‌دهد. برای نزدیکتر شدن بررسی به واقعیت، خروجی اندازه‌گیری شده آغشته به نویز شده است. در شکل 14 X_{Lsensor} موقعیت اندازه‌گیری شده ارابه، و X_{up} و X_{down} نیز به ترتیب کران های بالا و پایین محاسبه شده توسط سیستم فازی نوع-2

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.55.5]

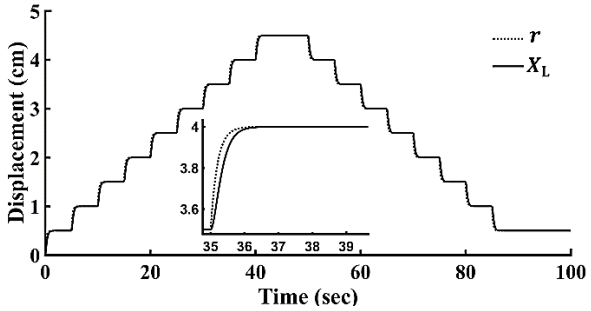


Fig. 13 Displacement diagram used in interval type-2 fuzzy identifier

شکل 13 نمودار جابجایی استفاده شده در شناساگر فازی نوع-2 بازه‌ای

می‌باشند. نمودارهای ناشی از بزرگ‌نمایی نمودار شکل 14 در شکل‌های 15 و 16 دوباره رسم شده‌اند. در شکل‌های 15 قسمت a و قسمت d بین ثانیه‌های 11 الی 13 و ثانیه‌های 41 الی 43 به میزان مساوی نشتی در سیلندر شماره 1 در نظر گرفته شده است. در شکل 15-الف خروجی سیستم تحت کنترل از بازه فرضی توسط مدل فازی نوع-2 بازه‌ای خارج شده و وقوع عیب تشخیص داده شده است، ولی به خاطر ماهیت غیرخطی بودن سیستم تحت کنترل، در شکل 15-د عیب روی پاسخ سیستم تحت کنترل اثر کمتری داشته، فلذا وقوع عیب تشخیص داده نشده است (شکل 17 را مشاهده نمایید).

در شکل 15- د، بین ثانیه‌های 16 الی 18 به همان میزان نشتی این‌بار در سیلندر شماره 2 در نظر گرفته شده است. این‌بار به خاطر ماهیت غیرخطی سیستم تحت کنترل، اثر وقوع عیب بهتر تشخیص داده شده است. در شکل 15 قسمت ج، به‌طور هم‌زمان وقوع نشتی به میزان مساوی در سیلندرهای شماره 1 و 2 فرض شده است.

بر خلاف تصور، وقوع هم‌زمان عیب نشتی در هر دو سیلندر اثر هم را

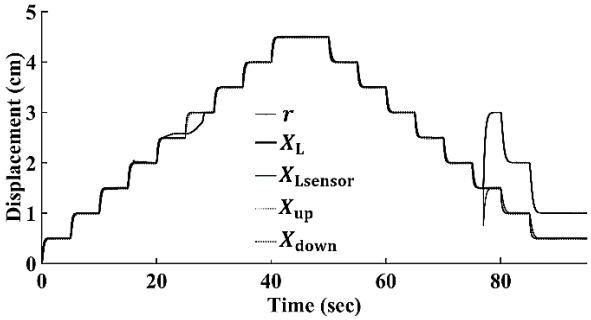


Fig. 14 System response to the reference signal in the presence of different faults and noise

شکل 14 پاسخ سیستم به سیگنال مرجع در حضور انواع عیوب و نویز

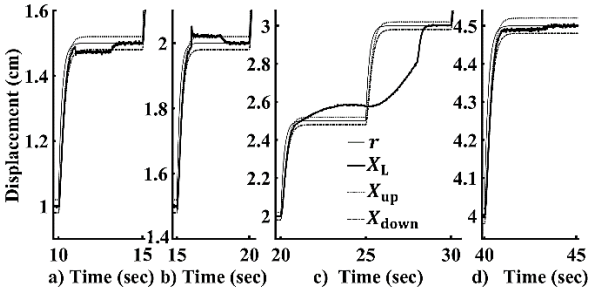


Fig. 15 Magnifying Fig. 14 (system response to the reference signal in the presence of different faults and noise)

شکل 15 بزرگ‌نمایی شکل 14 (پاسخ سیستم به سیگنال مرجع در حضور انواع عیوب و نویز)

خنثی نکرده و بلکه سیستم حلقه بسته به سختی کنترل شده و توانسته مسیر مطلوب را تعقیب نماید. با این حال با توجه به شکل 15 وقوع این عیب هم به خوبی تشخیص داده شده است. در ثانیه 50.25 فرض شده که 30% از فشار مخزن تغذیه کاسته شده و در ثانیه 50.5 مجدداً فشار مخزن به حالت اولیه بازگشته است. با توجه به نمودار رسم شده در شکل 18 وقوع این عیب در اجزای سیستم تحت کنترل هم تشخیص داده شده است. در ادامه فرض شده است که در ثانیه 77 حس‌گر موقعیت متصل به ارابه متحرک دچار حادثه شده و 50% مقدار اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. تغییر موقعیت به خوبی مشخص است. با توجه به این که هنگام وقوع عیب در حس‌گر، مطابق شکل 18 سیگنال باقیمانده به صورت ناگهانی تغییر می‌کند بنابراین هرگاه مشتق سیگنال باقیمانده از حدّی بیشتر شود مکانیزم تشخیص عیب حس‌گر باید فعال شده و هشدار صادر گردد. این‌بار نیز آشکار ساز عیب به خوبی عمل کرده و توسط مکانیزم خاص طراحی شده وقوع عیب در حس‌گر تشخیص داده شده است. به‌طور کلی، در نمودار رسم شده در شکل‌های 17- الف و 18- الف به‌خاطر وجود نویز، در برخی مواقع سیگنال هشدار وقوع عیب به اشتباه صادر شده است. برای غلبه بر این مشکل در شکل‌های 17- ب و 18- ب از سیگنال خروجی فیلتر شده استفاده شده است. با توجه به این شکل‌ها آشکار است که تعداد هشدارهای اشتباه بسیار کاهش یافته است.

در شکل 19 دبی ورودی (یا خروجی) از سیلندرهای شماره 1 و 2 رسم شده است. تغییرات ایجاد شده حین وقوع عیب‌های مفروضه به‌خوبی آشکار است. در شکل 20 نمودار فشار کنترل شده در سیلندرهای شماره 1 و 2 رسم شده است. تغییرات دیده شده در نمودار فشار، ناشی از تفاوت در دبی ورودی و خروجی سیلندرها می‌باشد.

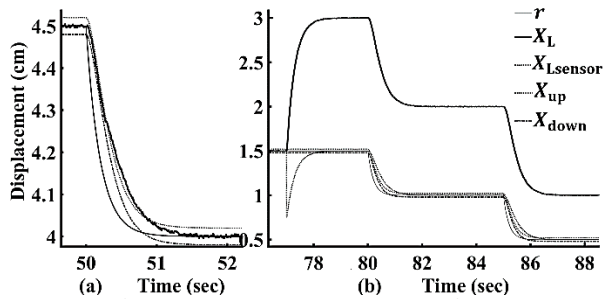


Fig. 16 Magnifying Fig.14 (system response to the reference signal in the presence of different faults and noise)

شکل 16 بزرگ‌نمایی شکل 14 (پاسخ سیستم به سیگنال مرجع در حضور انواع عیوب و نویز)

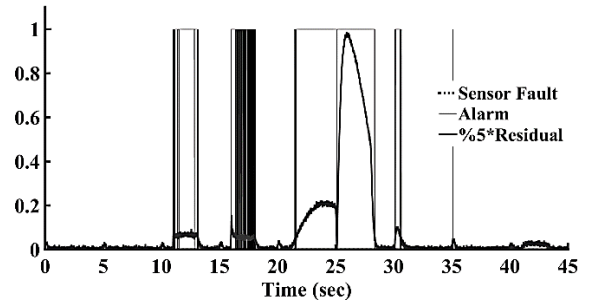


Fig. 17.(a) The first 45 seconds of the residual signal and the created alarms in the presence of noise

شکل 17 (الف) 45 ثانیه اول سیگنال باقی مانده و آلارم‌های ایجاد شده در حضور نویز

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.55.5]

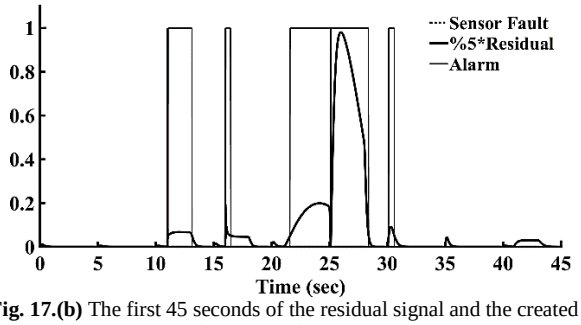


Fig. 17.(b) The first 45 seconds of the residual signal and the created alarms in the presence of noise and filter

شکل 17 (ب) 45 ثانیه اول سیگنال باقی مانده و آلارم‌های ایجاد شده در حضور نویز و فیلتر

اختلاف بین این دو فشار یعنی مقدار $P_1(t)-P_2(t)$ باعث جابجایی ارابه می‌گردد. حین وقوع عیب‌های مفروضه، به منظور کنترل موقعیت ارابه، تغییرات ایجاد شده در نمودار $P_1(t)-P_2(t)$ به‌خوبی مشخص است. نمودار $P_1(t)-P_2(t)$ در شکل 20 رسم شده است.

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش جدید جهت تشخیص عیب بر پایه‌ی مجموعه‌های فازی نوع-2 ارائه شد. در این روش کران بالا و پایین سیستم فازی نوع-2 توسط توابع فازی به عنوان محدوده‌ی اطمینانی برای خروجی سیستم تحت کنترل تخمین زده شدند. روش پیشنهادی بر روی سیستم‌های صنعتی سه تانک و الکتروهیدرولیکی اعمال شد. نتایج نشان داد که این شیوه همه

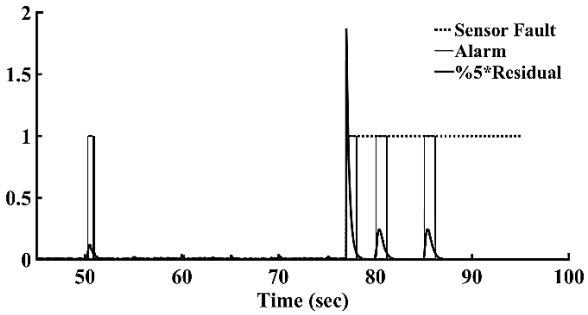


Fig. 18(a) (Continuation of Fig.17.(a)) residual signal and created alarms in the presence of noise

شکل 18 (الف) (ادامه شکل 17 (الف)) سیگنال باقی مانده و آلارم‌های ایجاد شده در حضور نویز

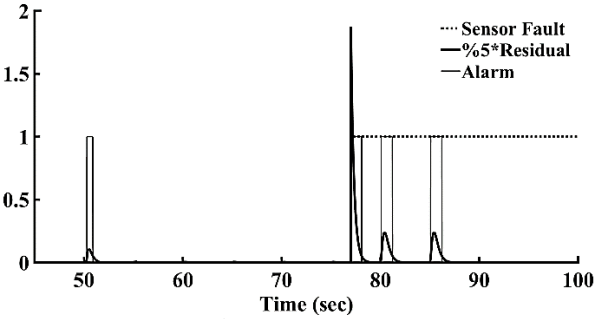


Fig. 18(b) (Continuation of Fig.17.(b)) residual signal and created alarms in the presence of noise and filter

شکل 18 (ب) (ادامه شکل 17 (ب)) سیگنال باقی مانده و آلارم‌های ایجاد شده در حضور نویز و فیلتر

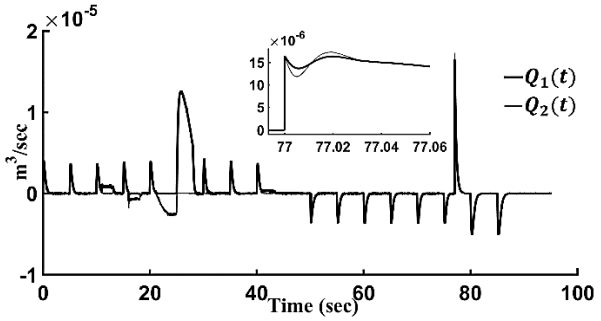


Fig. 19 The controller flow diagram (entered into the cylinders 1 and 2)

شکل 19 نمودار دبی کنترل شده (ورودی به سیلندرهای 1 و 2)

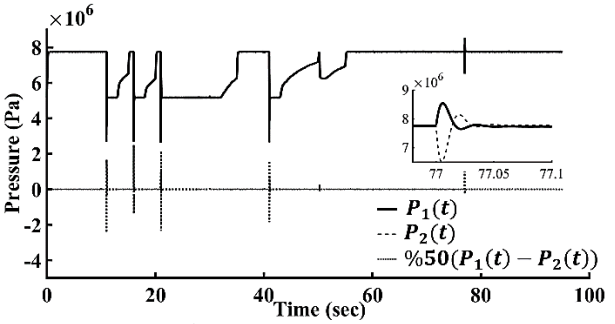


Fig. 20 The diagram of the controlled pressure in cylinders 1 and 2

شکل 20 نمودار فشار کنترل شده در سیلندرهای 1 و 2

عیب‌های درنظر گرفته شده را که در سیستم‌های مورد مطالعه اتفاق افتاده است، به خوبی تشخیص داده است. این شیوه‌ی جدید می‌تواند برای کاربردهای برخط دیگری نیز به خوبی مورد استفاده قرار گیرد. بطور کلی، به‌خاطر وجود نویز ممکن است که در برخی مواقع سیگنال هشداری مبنی بر رخداد عیب صادر گردد. از این‌رو می‌توان سیگنال خروجی از حس‌گر را ابتدا فیلتر نموده و سپس در تحلیل‌ها استفاده نمود. از طرفی، لازم به ذکر است که این روش برای تشخیص هم‌زمان عیوب رخداده مناسب نیست. یعنی این روش توانایی تفکیک عیوب رخداده را ندارد. در کارهای آتی می‌توان روی شناسایی و تفکیک عیوب تمرکز نمود.

7- مراجع

[1] M. Navabi, P. Roozgard, Nonlinear fault-tolerant flight control for a transport aircraft in presence of actuators fault and failure, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 209-220, 2016. (in Persian فارسی)

[2] S. Barghandan, M. A. Badamchizadeh and Mohammad Reza Jahed-Motlagh, Improved Adaptive Fuzzy Sliding Mode Controller for Robust Fault Tolerant of a Quadrotor, *International Journal of Control, Automation and Systems*, Vol. 15, pp. 1-15, 2017.

[3] D. Xu, B. Jiang, P. Shi, Nonlinear actuator fault estimation observer: An inverse system approach via a TS fuzzy model, *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, Vol. 22, No. 1, pp. 183-196, 2012.

[4] Y. Li, G. He, J. Li, Nonlinear Robust Observer-Based Fault Detection for Networked Suspension Control System of Maglev Train, *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2013, pp. 7, 2013.

[5] H. Rafaralahy, E. Richard, M. Boutayeb, M. Zasadzinski, Simultaneous observer based sensor diagnosis and speed estimation of Unmanned Aerial Vehicle, *IEEE Conference on Decision and* Control, Cancun, Mexico, pp. 2938-2943, 2008.

[6] T. Wang, H. Gao, J. Qiu, A combined adaptive neural network and nonlinear model predictive control for multirate networked industrial process control, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, Vol. 27, No. 2, pp. 416-425, 2016.

[7] P. Bangalore, L. B. Tjernberg, An artificial neural network approach for early fault detection of gearbox bearings, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 6, No. 2 ,pp. 980-987, 2015.

[8] H. Yuan, C. Lu, J. Ma, Z.-h. Chen, Neural network-based fault detection

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.55.5]

approach for instrument fault detection and diagnosis, *Proceedings of the World Congress on Engineering*, Vol. 2, pp. 1008-1012, 2011.

[25] M. El-Bardini, A. M. El-Nagar, Direct adaptive interval type-2 fuzzy logic controller for the multivariable anaesthesia system, *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 2, No. 3–4, pp. 149-160, 2011.

[26] Y. Han, S. Oh, B. Choi, D. Kwak, H. J. Kim, Y. Kim, Fault detection and identification of aircraft control surface using adaptive observer and input bias estimator, *IET Control Theory & Applications*, Vol. 6, No. 10, pp. 1367-1387, 2012.

[27] I. Ilhan, M. Karakose, Type-2 fuzzy based quadrotor control approach, *IEEE Conference on Asian Control Conference*, Istanbul, Turkey, pp. 1-6, 2013.

[28] Y. Li, G. He, J. Li, Nonlinear robust observer-based fault detection for networked suspension control system of maglev train, *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2013, pp. 1-7, 2013.

[29] A. Rasaienia, B. Moshiri, M. Moezzi, Feature-based fault detection of industrial gas turbines using neural networks, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, Vol. 21, No. 5, pp. 1340-1350, 2013**.**

[30] X.-j. Chen, D. Li, Z. Lu, Interval type II fuzzy sliding mode controller tuned with pso designed for attitude control of micro aircraft vehicle, *International Journal of Control and Automation*, Vol. 8, No. 10, pp. 335-348, 2015.

[31] H. Li, X. Sun, P. Shi, H.-K. Lam, Control design of interval type-2 fuzzy systems with actuator fault: Sampled-data control approach, *Information Sciences*, Vol. 302, pp. 1-13, 2015.

[32] J. Zarei, M. M. Arefi, H. Hassani, Bearing fault detection based on interval type-2 fuzzy logic systems for support vector machines, *IEEE conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization*, Istanbul, Turkey, pp. 1-6, 2015.

[33] S. Zeghlache, K. Kara, D. Saigaa, Fault tolerant control based on interval type-2 fuzzy sliding mode controller for coaxial trirotor aircraft, *ISA Transactions*, Vol. 59, pp. 215-231, 2015.

[34]L.-X. Wang, *A course in fuzzy systems and control*, International Edittion, pp. 192-203, United States: Prentice-Hall, Inc., 1997.

[35] R. Isermann, Model-based fault-detection and diagnosis–status and applications, *Annual Reviews in Control*, Vol. 29, pp. 71-85, 2005.

[36] H. Sahu, R. Ayyagari, Interval fuzzy type-II controller for the level control of a three tank system, *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 49, No. 1, pp. 561-566, 2016.

[37] A. Akbari, A.R. Zare Bidaki, A. R. Hosseini, M. Aliyari Shoredeli, Investigation of the stability of electro hydraulic servo system using fuzzy intelligent controller, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 36-42, 2014. (in Persian فارسی)

[38] S. Gayaka and B. Yao, Fault Detection, Identification and Accommodation for an Electro-hydraulic System: An Adaptive Robust Approach, *Proceedings of the 17th World Congress, The International Federation of Automatic Control*, Seoul, Korea, pp. 13815-13820, July 6-11, 2008.

[39] B. Yao, F. Bu, J. Reedy, and G.T.C. Chiu, Adaptive robust control of single-rod hydraulic actuators: theory and experiments, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 5, No. 1, pp. 79-91, 2000.

[40] B. Yao, F. Bu, and G. T. C. Chiu, Nonlinear adaptive robust control of electro-hydraulic systems driven by double-rod actuators, *International Journal of Control*, Vol. 74, No. 8, pp. 761-775, 2000.

method for aileron actuator, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 39, No. 19, pp. 5803-5815, 2015.

[9] Y. Pan, H. Li, Q. Zhou, Fault detection for interval type-2 fuzzy systems with sensor nonlinearities, *Neurocomputing*, Vol. 145, pp. 488-494, 2014.

[10] Y. Vaghei, A. Farshidianfar, Fault diagnosis and classification of deep groove ball bearings using wavelet transform and adaptive neuro-fuzzy system, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 11, pp. 233-241, 2016. (in Persian فارسی)

[11] Y. Pan, G.-H. Yang, Fault detection for interval type-2 fuzzy stochastic systems with D stability constraint, *International Journal of Systems Science*, Vol. 48 No. 1, pp 43-52, 2017.

[12] C. Wu, H. Li, H.-K. Lam, H. R. Karimi, Fault detection for nonlinear networked systems based on quantization and dropout compensation: An interval type-2 fuzzy-model method, *Neurocomputing*, Vol. 191, pp. 409-420, 2016.

[13] J. M. Mendel ,R. I. John, F. Liu, Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems Made Simple, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 14, No. 6, pp. 808-821, 2006.

[14] M. A. Khanesar, E. Kayacan, M. Teshnehlab, O. Kaynak, Extended Kalman filter based learning algorithm for type-2 fuzzy logic systems and its experimental evaluation, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, Vol. 59, No. 11, pp. 4443-4455, 2012.

[15] H. Monirvaghefi, M. Aliyari Shoorehdeli, Model-based fault detection of a nonlinear system using interval type-2 fuzzy systems with non-singleton type-2 fuzzification, *3rd International Conference on Control, Instrumentation, and Automation*, Tehran, Iran, 2013.

[16] B. Safarinejadian, P. Ghane, H. Monirvaghefi, Fault detection in non-linear systems based on type-2 fuzzy logic, *International Journal of Systems Science*, Vol. 46, No. 3, pp. 394-404, 2015.

[17] N. N. Karnik, J. M. Mendel, Applications of type-2 fuzzy logic systems to forecasting of time-series, *Information Sciences*, Vol. 120, No. 1–4, pp. 89-111, 1999.

[18] A. Xu, Q. Zhang, Nonlinear system fault diagnosis based on adaptive estimation, *Automatica*, Vol. 40, No. 7, pp. 1181-1193, 2004.

[19] H. Khan, S. C. Abou, and N. Sepehri, Nonlinear observer-based fault detection technique for electro-hydraulic servo-positioning systems, *Mechatronics*, Vol. 15, pp. 1037-1059, 2005.

[20] S. Gayaka, B. Yao, Fault Detection, Identification and accommodation for an electro-hydraulic system: An adaptive robust approach, *IFAC Proceedings Volumes*, Vol. 41, No. 2, pp. 13815-13820, 2008.

[21] S. Oblak, I. Škrjanc, S. Blažič, Fault detection for nonlinear systems with uncertain parameters based on the interval fuzzy model, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* ,Vol. 20, No. 4, pp. 503-510, 2007.

[22] G. Heredia, A. Ollero, Sensor fault detection in small autonomous helicopters using observer/Kalman filter identification, *IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)*, Malaga, Spain, pp. 1-6, 2009.

[23] F. Beainy, M. Anh, and S. Commuri, Unmanned Aerial Vehicles operational requirements and fault-tolerant robust control in level flight, *IEEE Conference on Control and Automation*, Thessaloniki, Greece, pp. 700-705, 2009.

[24] V. E. Andrade, C. H. Fontes, M. Embirucu, An interval type-2 fuzzy logic

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.55.5]