بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

آقای محمد حسن آسمانی رساله ۲۴ واحدی خود را با عنوان طراحی کنترلگر مقاوم H فازی T-S بر پایه تخمینگر حالت با شرایط تخفیف یافته در تاریخ ۱۳۹۱/۱۰/۳۰ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این رساله را از نظر فرم و محتوا تایید کرده، پذیرش آنرا برای اخذ درجه دکتری کنترل پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر وحید جوهری مجد	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر محمدتقی حمیدی بهشتی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر حمیدرضا مومنی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر محمد فرخی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر علیرضا فاتحی	استادیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر سجاد ازگلی	استادیار	

این نسخه به عنوان نسخه نهایی رساله مورد قبول است

امضاء اعضاء هیات داوران:

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

دانشگاه تربیت مدرس

آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین نامه های مصوب انجام شود.

ماده ٤- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ٥- این آیین‌نامه در ٥ ماده و یک تبصره در تاریخ ۸۷/٤/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/٤/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب محمدحسن آسیائی دانشجوی رشته مهندسی برق-کنترل ورودی سال تحصیلی ۱۳۸۷ مقطع دکتری دانشکده مهندسی برق متعهد می شوم کلیه نکات مندرج در آئین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته های علمی مستخرج از پایان نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

امضا: .....

تاریخ: ۹۱/۱/۲۵

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل رساله دکتری نگارنده در رشته مهندسی برق کنترل است که در سال ۱۳۹۱ در دانشکده‌مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر وحید جوهری مجد از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

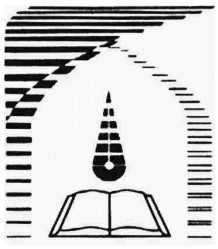
ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تخمین نماید.

ماده ۶: اینجانب محمدحسن آسمانی دانشجوی رشته مهندسی برق کنترل مقطع دکتری تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: محمدحسن آسمانی

تاریخ و امضا: ۹۱/۱۱/۲۵



دانشگاه تربیت مدرّس

رساله دوره دکتری مهندسی برق - کنترل

طراحی کنترلگر مقاوم H_∞ فازی T-S بر پایه تخمینگر حالت با شرایط تخفیف یافته

محمد حسن آسمانی

استاد راهنما

دکتر وحید جوهری مجد

زمستان 1391

تقدیم به

همسرم، پدرم ومادرم

تشکر و قدردانی

در اینجا جا دارد از زحمات جناب آقای دکتر وحید جوهری مجد استاد راهنمای دوره‌های کارشناسی ارشد و دکترای اینجانب بخاطر زحمات بسیار زیاد ایشان در طول این دوره‌ها کمال تشکّر و امتنان را بنمایم.

هم‌چنین از زحمات، تلاش‌ها و حمایت‌های بی‌دریغ پدر، مادر و همسرم در این دوره کمال تشکر و امتنان را دارم و برای ایشان آرزوی توفیق دارم.

محمدحسن آسمانی

چکیده

در سامانه‌های فازی T-S معمولاً متغیرهای مقدم قواعد فازی تابعی از متغیرهای حالت می‌باشند. از این‌رو، یک کنترلگر فازی T-S بر پایه تخمینگر حالت، زمانی قابل پیاده سازی است که متغیرهای مقدم قواعد کنترلگر و تخمینگر در حالت کلّی غیرقابل اندازه‌گیری و یا نامعلوم فرض شوند که در این‌صورت مسئله طراحی بسیار پیچیده‌تر می‌گردد. در این رساله، دو روش جدید برای طراحی کنترلگر فازی T-S بر پایه تخمینگر با شرایط تخفیف یافته ارائه می‌گردد. در روش اول، با بکارگیری شگرد فینسلر شرایط پایدارسازی کنترلگر در قالب یک دسته از نابرابری‌های ماتریسی خطی تنظیم می‌گردد. هم‌چنین روش مذکور به سامانه‌های فازی T-S دارای عدم قطعیت و اغتشاش خارجی گسترش داده می‌شود و شرایط کافی به صورت LMI برای وجودکنترلگر H_∞ مقاوم بر پایه تخمینگر فازی با متغیرهای مقدم غیر قابل اندازه گیری نیز ارائه می‌گردد. استفاده از شگرد فینسلر در این روش باعث جداسازی ماتریس لیاپانوف از ماتریس‌های بهره کنترلگر و تخمینگر و افزوده شدن ماتریس‌های کمکی اضافی می‌گردد که این امر باعث کاهش محافظه‌کاری در شرایط پایدارسازی می‌شود. در روش دوّم، با استفاده از تابع لیاپانوف فازی، قانون کنترلی غیر PDC و بکارگیری رویکرد افزونگی توصیف‌گر شرایط تخفیف یافته پایدارسازی جدیدی برای کنترلگر H_∞ مقاوم بر پایه تخمینگر فازی با متغیرهای مقدم غیر قابل اندازه گیری و بر اساس نابرابری‌های ماتریسی خطی اکید ارائه می‌گردد. در پژوهش‌های قبلی برای طراحی کنترلگر بر پایه تخمینگر فازی با متغیرهای مقدم غیر قابل اندازه گیری، از تابع لیاپانوف مربعی که یک حالت خاص از تابع لیاپانوف فازی می‌باشد، استفاده شده است. بنابراین در روش دوّم، استفاده از تابع لیاپانوف فازی محافظه‌کاری را در شرایط طراحی کاهش می‌دهد. به علاوه، از روش مذکور در طراحی ردگیر فازی، کنترلگر فازی با محدودیت روی دامنه کنترل و نیز کنترلگر فازی برای سامانه‌های فازی T-S آشفته تکین استفاده می‌شود و روش طراحی کنترلگر در هر سه حالت ارائه می‌گردد. در ادامه، نتایج شبیه‌سازی برای روش‌های مذکور ارائه می‌گردد و این نتایج با نتایج روش‌های موجود مقایسه خواهند شد.

کلید واژه: کنترل فازی، مدل فازی تاکاگی-سوگنو (T-S)، تخمینگر فازی، تابع لیاپانوف فازی، کاهش محافظه‌کاری، نابرابری‌های ماتریسی خطی (LMI).

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست علایم و نشانه‌ها ..... د
فهرست جدول‌ها ..... ه
فهرست شکل‌ها ..... و

فصل ۱- مقدمه ۱
۱-۱- پیشگفتار ۱
۱-۲- تاریخچه نگره فازی ۱
۱-۲-۱- تخمینگر فازی حالت ۲
۱-۳- نقد و بررسی شیوه‌های نوین ۳
۱-۴- هدف از انجام پژوهش و نوآوری های رساله ۶
۱-۵- ساختار رساله ۷

فصل ۲- پیش نیازهای پژوهش ۹
۲-۱- مقدمه ۹
۲-۲- بررسی روش‌های تحلیل و طراحی برای سامانه‌فازی T-S بر پایه تخمینگر حالت ۹
۲-۲-۱- روش‌های با فرض معلوم بودن متغیرهای مقدم قواعد فازی ۹
۲-۲-۲- روش‌های با فرض نامعلوم بودن متغیرهای مقدم قواعد فازی ۱۰
۲-۳- روش‌های طراحی کنترلگر ردگیر برای سامانه‌های فازی T-S ۱۱
۲-۴- روش‌های طراحی بر پایه تابع لیاپانوف فازی ۱۲
۲-۵- بررسی روش‌های موجود در طراحی کنترلگر برای سامانه های فازی T-S آشفته تکین ۱۳
۲-۶- پیش‌نیازهای ریاضی پژوهش ۱۴
۲-۷- نتیجه گیری ۱۵

فصل ۳- نوآوری‌های رساله ۱۶
۳-۱- مقدمه ۱۶
۳-۲- تعریف مسئله ۱۶
۳-۲-۱- مدل فازی T-S ۱۶
۳-۲-۲- تخمینگر فازی حالت ۱۷
۳-۲-۲-۱- تخمینگر فازی با متغیرهای قواعد معلوم ۱۷
۳-۲-۲-۲- تخمینگر فازی با متغیرهای مقدم غیر قابل اندازه گیری ۱۸
۳-۲-۳- جبرانسازی توزیع یافته موازی ۱۸
۳-۲-۴- کنترلگر PDC بر پایه تخمینگر حالت ۱۹
۳-۲-۴-۱- متغیرهای قواعد معلوم ۱۹

۳-۲-۴-۲- متغیرهای قواعد غیر قابل اندازه گیری ۱۹
۳-۳- روشی جدید در طراحی کنترلگر فازی H_∞ مقاوم بر پایه تخمینگر با استفاده از تابع لیاپانوف مربعی و شگرد فینسلر ۲۰
۳-۳-۱- معادلات پویای سامانه حلقه-بسته ۲۰
۳-۳-۱- شرایط پایدارسازی کنترلگر ۲۲
۳-۳-۲- طراحی کنترلگر مقاوم H_∞ ۲۷
۳-۴- طراحی کنترلگر ردگیر H_∞ مقاوم غیر-PDC بر پایه تخمینگر با استفاده از تابع لیاپانوف فازی ۳۵
۳-۴-۱- طراحی بر پایه تخمینگر با استفاده از تابع لیاپانوف فازی و رویکرد افزونگی توصیف‌گر ۳۵
۳-۴-۱-۱- معادلات پویای سامانه حلقه-بسته ۳۷
۳-۴-۱-۲- چرا از رویکرد افزونگی توصیفگر استفاده می‌کنیم؟ ۳۸
۳-۴-۱-۳- شرایط LMI برای طراحی کنترلگر مقاوم H_∞ بر پایه تخمینگر ۳۹
۳-۴-۱-۴- پایدارسازی کنترلگر H_∞ ۵۱
۳-۴-۲- طراحی کنترلگر H_∞ غیر-PDC با محدودیت روی دامنه کنترل ۵۳
۳-۵- طراحی کنترلگر H_∞ مقاوم غیر-PDC برای سامانه‌های فازی T-S آشفته تکین ۵۵
۳-۵-۱- مدل غیرخطی فازی T-S آشفته تکین ۵۵
۳-۵-۲- تخمینگر فازی و کنترلگر غیر-PDC ۵۶
۳-۵-۳- معادلات پویای سامانه حلقه-بسته ۵۷
۳-۵-۴- طراحی کنترلگر H_∞ مقاوم برای سامانه فازی T-S آشفته تکین ۵۸
۳-۶- نتیجه گیری ۷۳
فصل ۴- نتایج شبیه سازی ۷۴
۴-۱- مقدمه ۷۴
۴-۲- طراحی کنترلگر فازی H_∞ مقاوم بر پایه تخمینگر با استفاده از تابع لیاپانوف مربعی و شگرد فینسلر ۷۴
۴-۲-۱- طراحی برای ماتریس‌های خروجی مشترک ۷۴
۴-۲-۱-۱- مثال اول ۷۴
۴-۲-۱-۲- مثال دوم ۷۷
۴-۲-۲- طراحی برای ماتریس‌های خروجی غیر-مشترک ۸۱
۴-۲-۳- طراحی کنترلگر مقاوم H_∞ ۸۳
۴-۳- طراحی کنترلگر ردگیر H_∞ مقاوم غیر-PDC بر پایه تخمینگر با استفاده از تابع لیاپانوف فازی ۸۵
۴-۳-۱- شرایط پایدارسازی کنترلگر H_∞ ۸۵
۴-۳-۲- طراحی کنترلگر ردگیر مقاوم H_∞ ۸۸
۴-۳-۳- طراحی کنترلگر H_∞ با محدودیت روی دامنه کنترل ۹۴
۴-۴- طراحی کنترلگر بر پایه تخمینگر مقاوم H_∞ فازی برای سامانه‌های فازی T-S آشفته تکین ۹۸.
۴-۴-۱- طراحی تخمینگر H_∞ فازی ۹۸

۴-۴-۲- طراحی کنترلگر مقاوم H_∞ فازی ۹۹
۴-۵- نتیجه گیری ۱۰۳
فصل ۵- نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۰۴
۵-۱- نتیجه گیری ۱۰۴
۵-۲- پیشنهادات ۱۰۶
۵-۲-۱- طراحی کنترلگر H_∞ مقاوم بر پایه تخمینگر فازی با متغیرهای مقدم غیر قابل اندازه گیری برای سامانه‌های فازی چندجمله‌ای ۱۰۶
۵-۲-۲- یافتن راه حل فراگیر برای طراحی‌های بر پایه تابع لیاپانوف فازی ۱۰۶
۵-۲-۳- طراحی کنترلگر فازی بر پایه تخمینگر پویا برای سامانه‌های فازی T-S دارای عدم‌قطعیت و اغتشاش خارجی ۱۰۷
ضمیمه أ -نابرابری‌های ماتریسی خطی ۱۰۸
ضمیمه ب -مدلسازی سامانه های غیرخطی بوسیله مدل فازی تاکاگی-سوگنو ۱۱۷
فهرست مراجع ۱۲۵
واژه نامه فارسی به انگلیسی ۱۳۱
واژه نامه انگلیسی به فارسی ۱۳۳

فهرست علایم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
تابع تعلق فازی مربوط به قاعده فازی i-ام و متغیر مقدم قاعده فازی j-ام	M_{ij}
درجه تعلق فازی i-ام	$h_i(\mu(t))$
متغیر j-ام مقدم قاعده فازی	$\mu_j(t)$
تخمین متغیر j-ام مقدم قاعده فازی	$\hat{\mu}_j(t)$
پارامتر آشفته تکین	ε
حد بالایی پارامتر آشفته تکین	ε^*
$Herm(A)$	$A + A^T$
ماتریس قطری تشکیل شده از A_1 و A_2	$diag(A_1, A_2)$
بردار متغیرهای حالت	$x(t)$
بردار ورودی کنترلی	$u(t)$
بردار خروجی	$y(t)$
بردار تخمین حالت	$\hat{x}(t)$
بردار ردگیری	$x_r(t)$
بردار خطای ردگیری	$e_r(t)$
بردار خطای تخمین حالت	$\tilde{x}(t)$
بردار خطای تخمین خروجی	$\tilde{y}(t)$
بردار اختلاف خطای ردگیری و خطای تخمین حالت	$\hat{e}_r(t)$
تابع لیاپانوف	$V(x(t))$
ماتریس بهره تخمینگر	L_i
ماتریس بهره کنترلگر	F_i

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۳-۱: **تعداد ماتریس‌های تصمیم‌گیری در** نگره ۳-۱ ..... ۲۶
جدول ۴-۱- مقادیر مختلف γ با استفاده از روش‌های مختلف طراحی ۷۵
جدول ۴-۲: مقادیر مختلف γ با استفاده از روش‌های مختلف طراحی ۸۷
جدول ۴-۳: مقادیر حد بالایی پارامتر آشفته تکین ε^* برای مقادیر مختلف γ ۹۹
جدول ۴-۴: مقادیر حد بالایی پارامتر آشفته تکین ε^* برای مقادیر مختلف γ ۱۰۱

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱: دیاگرام بلوکی سامانه فازی T-S به همراه کنترلگر فازی بر پایه تخمینگر فازی با متغیرهای مقدم نامعلوم..... ۵
شکل ۴-۱: نرخ انرژی خروجی کنترل شده به انرژی اغتشاش‌ها در مثال ۴-۱..... ۷۶
شکل ۴-۲: سیگنال اغتشاش w_1 و w_2 در مثال ۴-۱..... ۷۶
شکل ۴-۳: منحنی γ نسبت به پارامتر طراحی α_1..... ۷۷
شکل ۴-۴: پاسخ حلقه-بسته در مثال ۲ با استفاده از روش ارائه شده در نگره فرعی ۳-۳..... ۷۹
شکل ۴-۵: پاسخ حلقه-بسته در مثال ۲ با استفاده از روش ارائه شده در [۴۵]..... ۷۹
شکل ۴-۶: سیگنال نویز سفید مورد استفاد در شبیه سازی..... ۸۰
شکل ۴-۷: پاسخ حلقه-بسته با نویز ورودی در مثال ۲ با استفاده از روش ارائه شده در [۴۵]..... ۸۰
شکل ۴-۸: پاسخ حلقه-بسته با نویز ورودی در مثال ۲ با استفاده از روش ارائه شده در نگره فرعی ۳-۳..... ۸۰
شکل ۴-۹: پاسخ حلقه-بسته با نویز ورودی در مثال ۲ با استفاده از روش ارائه شده در [۴۵]..... ۸۱
شکل ۴-۱۰: پاسخ حلقه-بسته با نویز خروجی در مثال ۲ با استفاده از روش نگره فرعی ۳-۳..... ۸۱
شکل ۴-۱۱: منحنی γ نسبت به پارامتر طراحی α_2 برای $\alpha_1 = 0.1$ (خطوط توپر)، $\alpha_1 = 0.01$ (خطوط نقطه‌ای) و $\alpha_1 = 0.001$ (خطوط خط‌چین)..... ۸۲
شکل ۴-۱۲: حالتهای $x_1(t)$ و $x_2(t)$ و مقادیر رویت شده $\hat{x}_1(t)$ و $\hat{x}_2(t)$ برای مثال ۴-۳..... ۸۴
شکل ۴-۱۳: سیگنال اغتشاش در مثال ۴-۳..... ۸۵
شکل ۴-۱۴: برقراری معیار کارآیی H_∞ در مثال ۴-۳..... ۸۵
شکل ۴-۱۵: برقرار معیار کارآیی H_∞ در بخش ۴-۳-۱..... ۸۸
شکل ۴-۱۶: سامانه مداری دیود تونلی [۷۳]..... ۸۸
شکل ۴-۱۷: پاسخ حلقه-بسته برای $x_2(t)$ (خطوط توپر)، $\hat{x}_1(t)$ (خطوط خط-چین) و $x_{r1}(t)$ (خطوط نقطه-خط) در حضور اغتشاش و عدم‌قطعیت..... ۹۱
شکل ۴-۱۸: پاسخ حلقه-بسته برای $x_1(t)$ (خطوط توپر)، $\hat{x}_2(t)$ (خطوط خط-چین) و $x_{r2}(t)$ (خطوط نقطه-خط) در حضور اغتشاش و عدم‌قطعیت..... ۹۱
شکل ۴-۱۹: خطای تخمین برای $x_1(t) - \hat{x}_1(t)$ (خطوط توپر) و $x_2(t) - \hat{x}_2(t)$ (خطوط خط-چین) و در حضور اغتشاش و عدم‌قطعیت..... ۹۲
شکل ۴-۲۰: خطای ردگیری برای $x_1(t) - x_{r1}(t)$ (خطوط توپر) و $x_2(t) - x_{r2}(t)$ (خطوط خط-چین) در حضور اغتشاش و عدم‌قطعیت..... ۹۲
شکل ۴-۲۱: سیگنال کنترلی $u(t)$ در حضور اغتشاش و عدم‌قطعیت..... ۹۳
شکل ۴-۲۲: برقراری معیار H_∞ در حضور اغتشاش بزرگ..... ۹۳

شکل ۴-۲۳: تحقق $\dot{h}_1(x(t)) \geq \phi_1$ و $\dot{h}_2(x(t)) \geq \phi_2$ در حضور اغتشاش بزرگ ۹۴
شکل ۴-۲۴: منحنی‌های $x_1(t)$ و $\hat{x}_1(t)$ برای سامانه حلقه-بسته بدون اغتشاش ۹۵
شکل ۴-۲۵: منحنی‌های $x_2(t)$ و $\hat{x}_2(t)$ برای سامانه حلقه-بسته بدون اغتشاش ۹۵
شکل ۴-۲۶: خطاهای تخمین $e_1(t) = x_1(t) - \hat{x}_1(t)$ و $e_2(t) = x_2(t) - \hat{x}_2(t)$ برای سامانه حلقه-بسته بدون اغتشاش ۹۶
شکل ۴-۲۷: سیگنال کنترلی $u(t)$ برای سامانه حلقه-بسته با محدودیت روی دامنه کنترل (خطوط توپر) و بدون محدودیت روی دامنه کنترل (خطوط نقطه‌ای) ۹۷
شکل ۴-۲۸: سیگنال کنترلی $y(t)$ برای سامانه حلقه-بسته با محدودیت روی دامنه کنترل (خطوط توپر) و بدون محدودیت روی دامنه کنترل (خطوط نقطه‌ای) ۹۷
شکل ۴-۲۹: برقراری کارآیی H_∞ برای اغتشاش بالای $\varphi(t) = 10\sin(\pi t)$ ۹۸
شکل ۴-۳۰: درجه‌های توابع تعلق $h_1(x(t))$ و $h_2(x(t))$ ۹۹
شکل ۴-۳۱: ناحیه پایدارسازی با استفاده از **نگره فرعی 3-8** ("o") و نگره فرعی ۳-۹ ("*") برای $\bar{a} \in [-0.5,4]$ و $\bar{g} \in [0,0.5]$ ۱۰۱
شکل ۴-۳۲: برقراری معیار H_∞ برای سامانه حلقه-بسته فازی T-S آشفته تکین با اغتشاشات بزرگ و در حضور عدم‌قطعیت با $\varepsilon = 0.001$ (خطوط توپر) و $\varepsilon = 0.04$ (خطوط خط-چین) ۱۰۲
شکل ۴-۳۳: پاسخ سامانه حلقه-بسته در حضور عدم‌قطعیت و در عدم حضور اغتشاش برای $\varepsilon = 0.05$، (a) متغیر حالت $x_1(t)$ و مقدار تخمین آن $\hat{x}_1(t)$، (b) متغیر حالت $x_2(t)$ و مقدار تخمین آن $\hat{x}_2(t)$ ۱۰۲
شکل ۴-۳۴: سیگنال کنترل $u(t)$ در حضور عدم قطعیت و بدون اغتشاش برای $\varepsilon = 0.05$ ۱۰۳

فصل ۱ - مقدمه

۱-۱- پیشگفتار

مجموعه‌ها و سامانه های فازی از زمان ارائه نظریه مجموعه فازی توسط پروفسور لطفی زاده در حدود پنج دهه پیش، گسترش قابل توجهی داشته است. نظریه فازی در گستره وسیعی از کاربردها، از جمله مهندسی کنترل، شناسایی الگو، پردازش سیگنال، پردازش داده‌ها، هوش ماشینی، تصمیم گیری، مدیریت، پزشکی، صنعت اتومبیل، روباتیک استفاده شده است. در سال‌های اخیر محبوبیت سامانه‌های کنترل فازی در کاربردهای مهندسی به سرعت افزایش یافته است. کاربردهای متعدد و موفقِ کنترل فازی، به فعالیت‌های بسیاری در آنالیز و طراحی سامانه های کنترل فازی منجر شده است.

ساختار اصلی سامانه کنترل فازی شامل چهار بخش عمده است: بخش بر پایه دانش، موتور استنتاج، واسط فازی گر، واسط فازی زدا. بخش بر پایه دانش حاوی تمامی اطلاعات ما از کنترلگر است و شامل یک پایگاه اطلاعاتی از کنترل فازی و یک پایگاه داده است. این بخش، بخش مرکزی یک سامانه کنترل فازی است. واسط فازی‌گر نگاشتی از فضای مجموعه‌های واضح به فضای مجموعه فازی تعریف می‌کند و واسط فازی زدا معرف نگاشتی از فضای مجموعه‌های فازی به فضای مجموعه واضح[1] می‌باشد. فازی‌گر مقداری واضح را به یک عدد فازی تبدیل می‌کند و برعکس فازی زدا سامانه فازی حاصل از استنتاج را به مقداری واضح تبدیل می‌کند.

اخیراً با استفاده از روش‌های جدید در مدلسازی فازی، می‌توان هر مدل غیرخطی یک سامانه پویا را با تقریب یا به صورت کاملاً دقیق بوسیله مدل فازی تاکاگی-سوگنو (T-S)[2] نمایش داد. اگر از روش‌های رفتار غیر خطی قطاعی[3] نیز در این مدلسازی استفاده گردد، می‌توان ثابت کرد که مدل فازی T-S بدست آمده دقیقاً مدل غیرخطی اولیه را بیان خواهد کرد. با استفاده از این نکته ارزشمند می‌توان تحلیل و طراحی کنترلگر را برای سامانه‌های غیرخطی با استفاده از تحلیل تابع لیاپانوف و مدلسازی فازی T-S به راحتی انجام داد. بنابراین، مدلسازی فازی T-S یک سامانه غیرخطی، جایگزین بسیار مناسبی را از لحاظ پیچیدگی در تحلیل و طراحی برای کنترل غیرخطی به ارمغان آورده است و در ۱۶ سال اخیر تلاشهای زیادی برای گسترش این نظریه انجام شده است.

۱-۲- تاریخچه نگره فازی

نگره فازی در سال ۱۹۶۵ بوسیله لطفی زاده در مقاله‌ای با نام "مجموعه‌های فازی" معرفی گردید [۱]. در سال ۱۹۷۵ چارچوب اولیه‌ای برای کنترلگرهای فازی مشخص شد و کنترلگر فازی در یک موتور بخار استفاده شد [۲]. در سال ۱۹۷۸، اولین کنترلگر فازی برای کنترل کامل کوره سیمان بکار گرفته شد [۳].

[1] Crisp set
[2] Takagi-Sugeno fuzzy model
[3] Sector nonlinearity

در سال ۱۹۸۰ در ژاپن اولین کاربرد فازی در کنترل سامانه تصفیه آب فوجی انجام شد و در سال ۱۹۸۳ ماشینی با منطق فازی طراحی شد که خودش به تنهایی عمل پارک را انجام می‌داد [۴]. در سال ۱۹۸۷ یکی از پیشرفته ترین سامانه های قطار زیرزمینی که برای کنترل آن از کنترلگر فازی استفاده می‌شد، در ژاپن ساخته شد [۵].

موفقیت سامانه های فازی در ژاپن باعث شد که مؤسسه IEEE اولین کنفرانس بین المللی خود را در زمینه سامانه های فازی در سان‌دیگو در سال ۱۹۹۱برگزار کند. در این دهه فعالیت نگره بر روی سامانه-های کنترل فازی تاکاگی-سوگنو[1] شدت گرفت و کاربرد نابرابری‌های ماتریسی خطی (LMIs)[2] در تحلیل و طراحی این سامانه‌ها روز به روز بیشتر شد و امروزه محققان زیادی در این زمینه فعالیت‌های گسترده‌ای انجام می‌دهند[۶]. در ضمیمه أ مطالبی آموزشی در مورد نابرابری‌های ماتریس خطی به اختصار آورده شده است.

بر اساس تفاوت‌های قواعد کنترل فازی و روش‌های تولید این قواعد، راهکارهای کنترل فازی را می‌توان به بخش‌های زیر تقسیم کرد:

۱- کنترل فازی سنتی
۲- کنترل فازی تناسبی-انتگرالی-مشتقی (کنترل فازی PID)
۳- کنترل عصبی- فازی
۴- کنترل فازی مود لغزشی
۵- کنترل تطبیقی فازی
۶- کنترل فازی بر پایه مدل فازی T-S

در این رساله مبحث اصلی، سامانه کنترل فازی T-S می‌باشد که جدیدترین سامانه کنترل فازی است و در مقالات فعلی بیشترین توجه را به خود اختصاص داده است. در یک مدل فازی T-S، تعدادی از مدل‌های خطی تغییرناپذیر بازمان که سامانه غیرخطی را در ناحیه‌های مختلفی از فضای حالت تقریب می‌زنند، بدست آورده شده و سپس این مدل‌های خطی توسط توابع تعلق غیرخطی فازی ترکیب می‌شوند [۷]. در پژوهش‌های پیشین پایدارسازی سامانه های کنترل فازی به وسیله بازخورد حالت به خوبی مورد بررسی قرار گرفته است ([۸]-[۱۲])، در این مقالات شرایط پایداری سامانه‌های کنترل فازی با استفاده از تابع لیاپانوف مربعی[3] و بر اساس نابرابری‌های ماتریسی خطی بدست آورده شده اند.

۱-۲-۱- تخمینگر فازی حالت

در بسیاری از سامانه‌های عملی حالتهای سامانه در دسترس نمی‌باشند و طراحی کنترلگر بر اساس بازخورد خروجی انجام می‌پذیرد. استفاده از بازخورد خروجی برای کنترلگر فازی T-S، در مقالات مختلفی از جمله در [۱۳-۲۱] صورت گرفته است. یکی از روش‌های کنترل بر اساس بازخورد خروجی در

[1] Takagi-Sugeno fuzzy control system
[2] Linear Matrix Inequalities
[3] Quadratic Lyapunov Function

سامانه‌های فازی T-S استفاده از تخمینگر حالت می‌باشد [۲۳،۲۲]. در [۲۴] روشی برای طراحی یک کنترلگر بر پایه تخمینگر در سامانه‌های فازی T-S با فرض اینکه متغیرهای‌مقدم‌قواعد[1] تخمین زده می‌شوند، معرفی شده است. با استفاده از اصل جداپذیری در سامانه‌های T-S پیوسته و گسسته طراحی کنترلگر بر اساس تخمینگر فازی در [۲۵] ارائه شده است. در [۲۶] مسئله طراحی یک تخمینگر مقاوم با فرض وجود عدم‌قطعیت[2] در سامانه غیرخطی مدل شده توسط T-S فازی بیان شده است. نویسندگان[۲۷]، به طراحی یک کنترلگر بر پایه تخمینگر برای یک سامانه غیرخطی همراه با عدم قطعیت که بوسیله سامانه‌های فازی T-S مدل شده‌است پرداخته‌اند و شرط کافی برای پایدارسازی یک سامانه فازی T-S همراه با عدم قطعیت و استفاده از تخمینگر را بیان کرده‌اند. در [۱۱] و [۲۹] روشی جدید در زمینه طراحی یک کنترلگر مقاوم بر پایه تخمینگر براساس معیار H_∞ در سامانه‌های T-S فازی ارائه شده است. یک کنترلگر مقاوم براساس تخمینگر با معیار جایگذاری قطب در [۳۰] طراحی شده است. در [۳۱] ردگیری یک سیگنال مرجع با توجه به وجود عدم قطعیت و اغتشاش در سامانه مورد بررسی قرار گرفته است. در [۲۷].

۱-۳- نقد و بررسی شیوه‌های نوین

هنگامی که حالتهای سامانه فازی در دسترس نباشند، ناچار به استفاده از خروجی سامانه فازی برای طراحی کنترلگر هستیم. بنابراین چگونگی طراحی کنترلگر بازخورد خروجی در بسیاری از موارد عملی مورد نیاز است.

به طور کلی بازخورد خروجی را می‌توان به سه دسته زیر تقسیم‌بندی نمود:

۱. بازخورد خروجی غیرپویا[3]
۲. بازخورد خروجی پویا[4]
۳. کنترلگر بر پایه تخمینگر[5] یا همان مشاهده‌گر[6] حالت

در هر سه مورد فوق از اطلاعات خروجی سامانه برای طراحی کنترلگر استفاده می‌شود.

بنابراین بسته به نوع بازخورد، از خروجی سامانه، یک سیگنال کمکی و یا حالت تخمین زده شده سامانه در سیگنال کنترل استفاده می‌شود. بنابراین بسته به نوع سیگنال مورد استفاده در ساختار سیگنال کنترل به ترتیب از کنترلگر بازخورد خروجی غیرپویا [۳۲]-[۳۵]، بازخورد خروجی پویا [۳۶]-[۳۸] و یا کنترلگر بر پایه تخمینگر [۲۰]، [۲۷]-[۳۱]، [۳۹]-[۵۱] استفاده می‌کنیم.

[1] Premise Variable
[2] Unertainty
[3] Static output feedback
[4] Dynamic output feedback
[5] Estimator
[6] Observer

در طراحی کنترلگر برای سامانه‌های فازی T-S به متغیرهای مقدم قواعد فازی برای تعیین درجه‌های توابع تعلق فازی (ضرایب غیرخطی که در هر زیرسامانه فازی ضرب می‌شوند) در هنگام بازسازی سیگنال کنترلی نیازمندیم. در اکثر موارد متغیرهای مقدم قواعد فازی به صورت مستقیم تابعی از حالتهای سامانه می‌باشند. بنابراین هنگامی که از بازخورد خروجی برای طراحی کنترلگر استفاده می‌کنیم باید به این نکته توجه داشته باشیم که برای بازسازی سیگنال کنترلی هم‌چنان نیازمند برخی از متغیرهای حالت سامانه می‌باشیم.

با این وجود، بسیاری از روشهای مذکور با فرض در دسترس بودن متغیرهای مقدم قواعد فازی انجام شده‌اند [۲۷]--[۳۱] و [۳۹]--[۴۴]. این فرض به طراح اجازه می‌دهد که متغیرهای مقدم قواعد تخمینگر فازی را برابر با متغیرهای مقدم قواعد سامانه اصلی در نظر بگیرد. بنابراین در این حالت، می‌توان از اصل جداسازی[1] برای طراحی مستقل تخمینگر فازی و بهره‌های کنترلگر استفاده نمود.

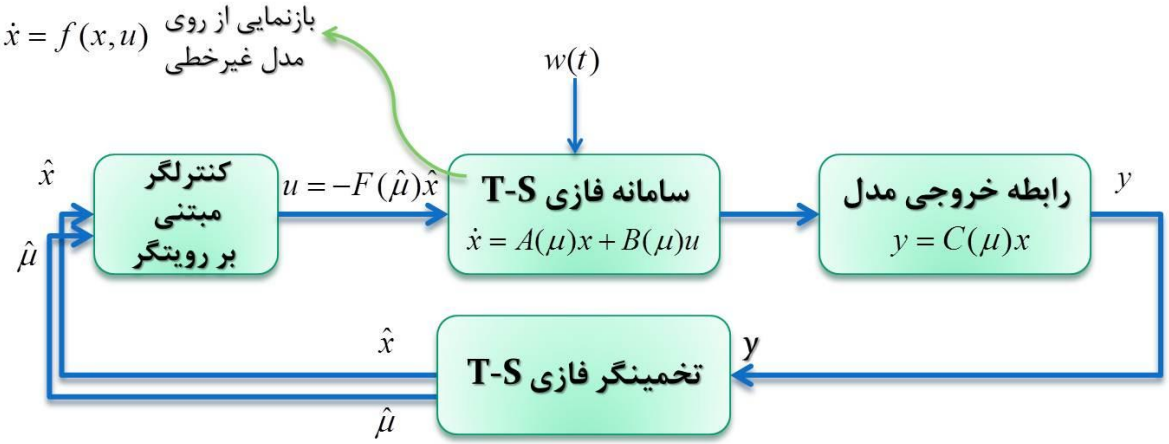
اولین روش برای حل مسئله طراحی کنترلگر برپایه تخمینگر فازی برای سامانه های فازی T-S با فرض معلوم بودن متغیرهای مقدم قواعد در[۸] ارائه شد. در [۱۱] و [۲۹] روشهایی برای طراحی کنترلگر برپایه تخمینگر ارائه شد که شرایط پایداری در آن محافظه‌کاری کمتری نسبت به شرایط ارائه شده در [۸] دارند. در [۴۰] طراحی کنترلگر فازی بر پایه تخمینگر برای سامانه‌های فازی دارای تاخیر ارائه شده است. لازم به ذکر است که در [۱۱]، [۲۹] و [۴۰] از سیگنال اغتشاش ورودی در ساختار تخمینگر استفاده شده است که در اکثر موارد معلوم دانستن سیگنال اغتشاش خارجی یک فرض بسیار محدود کننده و غیرعملی است.

در [۴۲] و [۴۳] روشهایی بر اساس نابرابری‌های ماتریسی دوخطی (BMIs)[2] برای طراحی کنترلگر فازی بر پایه تخمینگر فازی در سامانه‌های فازی دارای عدم‌قطعیت ارائه شده است. مسائل BMI مسائلی غیرخطی هستند و حل آنها نسبت به مسائل LMI بسیار مشکل‌تر و پیچیده‌تر می‌باشد. هم‌چنین در [۴۴] طراحی کنترلگر فازی بر پایه تخمینگر فازی برای سامانه‌های دارای سیگنال اغتشاش دارای کران محدود و بر اساس کارآیی L_∞ ارائه شده است. در [۳۱] شرایط طراحی ردگیر فازی برای سامانه های فازی T-S دارای عدم‌قطعیت و اغتشاش بر اساس LMIها آورده شده است که ضعف عمده آن اینست که برای استفاده از این روش باید چهار پارامتر اسکالر به صورت ذهنی قبل از حل LMIها توسط طراح تعیین شوند.

با توجه به مباحث بالا، عملاً در اکثر موارد استفاده از طراحی بازخورد خروجی پویا و غیرپویا در سامانه‌های فازی T-S بدون ارزش است. برای داشتن یک کنترلگر خروجی فازی T-S عملی، یک روش معقول آن است که از متغیرهای حالت تخمین زده شده توسط تخمینگر فازی برای تخمین مقدار متغیرهای مقدم قواعد تخمینگر و کنترلگر استفاده کنیم که مسئله طراحی را بسیار پیچیده‌تر می‌کند. در این حالت نمی‌توان از اصل جداسازی استفاده نمود. بنابراین عملی‌ترین و فراگیرترین کنترلگر بازخورد

[1] Seperation principle
[2] Bilinear Matrix Inequalities

خروجی در سامانه‌های فازی T-S، کنترلگر فازی بر پایه تخمینگر فازی با فرض غیرقابل اندازه‌گیری بودن[1] متغیرهای مقدم قواعد می‌باشد. دیاگرام بلوکی چنین سامانه‌ای در شکل زیر آمده است:



شکل ۱-۱: دیاگرام بلوکی سامانه فازی T-S به همراه کنترلگر فازی بر پایه تخمینگر فازی با متغیرهای مقدم نامعلوم.

طراحی کنترلگر فازی بر پایه تخمینگر فازی با متغیرهای مقدم نامعلوم از سال ۱۹۹۸ تا کنون و در پژوهش‌های [۸]،[۲۰]،[۲۱]،[۲۴]،[۴۵]-[۵۱] انجام گرفته است. این طراحی از پیچیدگی زیادی برخوردار است و تاکنون اکثر مقالات در این زمینه شرایط پایداری سامانه حلقه-بسته را بر اساس شرایط BMI ارائه کرده‌اند ([۲۰]،[۴۵]،[۴۸]). البته در مقالات دیگری نیز شرایط پایداری بر اساس نابرابری‌های ماتریسی خطی بیان شده‌اند که ارزشمندتر از شرایط BMI می‌باشد [۴۶]-[۵۱].

اولین بار در سال در [۸] مسئله طراحی کنترلگر برپایه تخمینگر فازی برای سامانه های فازی T-S با متغیرهای مقدم نامعلوم (علاوه بر سامانه های فازی T-S با متغیرهای مقدم معلوم) مطرح گردید اما روش حل خاصی برای آن ارائه نگردید. در [۲۰] طراحی کنترلگر فازی بر پایه تخمینگر فازی با متغیرهای قواعد نامعلوم در سامانه‌های فازی T-S که تحت تاثیر اغتشاش خارجی قرار گرفته اند بر اساس BMIها ارائه گردید.

در [۲۴] با استفاده از دو شگرد محافظه‌کارانه شرایط پایدارسازی توسط کنترلگر برپایه تخمینگر فازی با متغیرهای مقدم نامعلوم بر اساس شرایط LMI بدست‌آمده است. به دلیل استفاده از شگردهای خاص محافظه‌کارانه در [۲۴] طراح باید چهار پارامتر ثابت را قبل از حل LMIها به صورت دستی تعیین کند. در [۲۱] روشی برای طراحی کنترلگر ردگیر فازی بر پایه تخمینگر با متغیرهای قواعد نامعلوم و با استفاده از دو فرض محدودکننده ارائه شد. شرایط ردگیری در این روش بر اساس LMIها تنظیم شده است. در [۴۵] روشی برای طراحی کنترلگر H_∞ بر پایه تخمینگر فازی با استفاده از LMIهای دو-مرحله‌ای، که حالت خاصی از BMIها می‌باشند، ارائه شد.

[1] Immeasurable