بسم الله الرحمن الرحیم

۶۴۷۲

ج ۱۰ ـ ۶۵ سپتامبر ۲۵ دارد
۶۵ نوامبر
۶۵ سپتامبر مجلد شده
۶۵ دسامبر پایان نامه شده

مقدم ۱۱/۲۰

۲۹۳۸۶

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران

دانشگاه تربیت مدرس

دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده فنی و مهندسی

۱۳۸۰ /۱۱/ ۲۴

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق - کنترل

کنترل مقاوم سیستمهای چند متغیره آشفته گر

نگارش:

مهدی قاسم مقدم

016221

استاد راهنما:

دکتر محمد تقی حمیدی بهشتی

استاد مشاور:

دکتر حمید رضا مومنی

۳۹۳۸۶

تابستان ۱۳۸۰

دانشگاه تربیت مدرس

تاییدیه هیات داوران

آقای مهدی قاسم مقدم پایان‌نامه ۶ واحدی خود را با عنوان کنترل مقاوم سیستمهای چند متغیره آشفته تکین در تاریخ ۸۰/۶/۲۶ ارائه کردند. اعضای هیات داوران نسخه نهائی این پایان‌نامه را از نظر فرم و محتوی تایید و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق با گرایش کنترل پیشنهاد می‌کنند.

اعضای هیات داوران	نام و نام خانوادگی	امضاء
۱ـ استاد راهنما :	آقای دکتر بهشتی	
۲ـ استاد مشاور :	آقای دکتر مؤمنی	
۳ـ استادان ممتحن :	آقای دکتر مجد	
	آقای دکتر صدیق	
۴ـ مدیر گروه :	آقای دکتر مجد	

(یا نمایندهٔ گروه تخصصی)

این نسخه به عنوان نسخه نهایی پایان‌نامه/رساله مورد تایید است.

امضای استاد راهنما:

بسمه‌تعالی

آیین‌نامهٔ چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرّس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان‌نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرّس، مبیّن بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش‌آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

مادّهٔ ۱ در صورت اقدام به چاپ پایان‌نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

مادّهٔ ۲ در صفحهٔ سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه)، عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد/رسالهٔ دکتری نگارنده در رشتهٔ ..... است که در سال ..... در دانشکدهٔ ..... دانشگاه تربیت مدرّس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر ..... ، مشاورهٔ سرکار خانم/جناب آقای دکتر ..... و مشاورهٔ سرکار خانم/جناب آقای دکتر ..... از آن دفاع شده است.»

مادّهٔ ۳ به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

مادّهٔ ۴ در صورت عدم رعایت مادّهٔ ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ‌شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرّس، تأدیه کند.

مادّهٔ ۵ دانشجو تعهد و قبول می‌کند 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 مادّهٔ ۴ را از محلّ توقیف کتابهای عرضه‌شدهٔ نگارنده برای فروش، تأمین نماید.

مادّهٔ ۶ اینجانب ..... دانشجوی رشته ..... مقطع ..... تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می‌شوم.

نام و نام‌خانوادگی:

تاریخ و امضا:

تقدیم به

پدر بزرگوارم

اوست پایدار

بر خود لازم می‌دانم از کسانی که در انجام این پروژه مرا یاری کرده‌اند، تشکر و قدردانی کنم.

از استاد گرانقدر، جناب آقای **دکتر بهشتی** که با صبر و بردباری فراوان مرا راهنمایی نمودند، کمال سپاسگزاری را دارم. از کلیه **دوستان** که بر من منت بیدریغ گذاردند، بخصوص آقای **مهندس سهیل گنجه‌فر** تشکر فراوان نموده و توفیق الهی برای ایشان مسئلت دارم.

در قدردانی از **پدر و مادر** گرامی که همواره پشت و پناه من بوده‌اند و همچنین **خواهر** عزیزم، که بی دلگرمی‌های ایشان انجام این کار میسر نبود، این کمترین به آن بزرگواران تقدیم می‌شود؛ گرچه هرگز نمی‌تواند پاسخگوی گوشه‌ای از زحمات و مرارتهای ایشان باشد.

چکیده:

در این پایان‌نامه در نظر داریم تا مسأله کنترل مقاوم سیستمهای چندمتغیره خطی پیوسته تغییرناپذیر با زمان آشفته تکین را مورد بررسی قرار دهیم.

بدین‌منظور ابتدا به بررسی خصوصیات سیستمهای آشفته تکین و مبانی نظریه کنترل مقاوم H_∞ می‌پردازیم.

سپس دو حالت خطای مدلسازی ضربی و جمعی را در نظر می‌گیریم و در هر حالت براساس کران بالای خطای مدلسازی و معیار نایکوئیست و کاهش حساسیت و انتشار نویز رابطه‌ای جهت تعیین کنترل‌کننده پایدارساز مقاوم بدست می‌آوریم.

برای سیستمهای آشفته تکین، سیستم را به دو زیرسیستم تند و کند تجزیه کرده و کنترل‌کننده پایدارساز مقاوم را براساس سیستم تجزیه شده به دو زیر سیستم تند و کند و بعد براساس سیستم کاهش مرتبه‌یافته طراحی می‌کنیم. نحوه بدست آوردن کرانهای جدید نیز در این پایان‌نامه ارائه شده است.

کلمات کلیدی: کنترل مقاوم، پایداری مقاوم، خطای مدلسازی، سیستمهای آشفته تکین

فهرست مطالب

عنوان | صفحه

● فصل اول: مقدمه

۱-۱- نگاهی بر سیستمهای ابعاد وسیع ۲

۱-۲- کنترل مقاوم و علل طرح آن در ادبیات کنترلی ۳

۱-۳- تاریخچه کنترل مقاوم ۴

۱-۴- چرا H_∞؟ ۹

۱-۵- روند گزارش ۱۰

● فصل دوم: آشنایی با سیستمهای آشفته تکین

۲-۱- مقدمه ۱۲

۲-۲- مدل استاندارد آشفتگی تکین ۱۴

۲-۳- خواص چندزمانه بودن مدل استاندارد آشفتگی تکین ۲۰

● فصل سوم: سیستمهای آشفته تکین خطی تغییرناپذیر با زمان

۳-۱- مقدمه ۲۶

۳-۲- شکلهای بلوکی مثلثی و قطری سیستمهای آشفته تکین ۲۸

۳-۳- خواص مقادیر ویژه و بردارهای ویژه ۳۷

۳-۴- مدلهای حوزه فرکانس ۴۲

● فصل چهارم: عملکرد و مقاومت سیستمهای فیدبک چندمتغیره

۴-۱- مقدمه ۴۸

۴-۲- تجزیه مقادیر استثنایی ۴۸

۴-۳- نامعادلات مقادیر استثنایی ۵۲

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

۴-۴- پایداری مقاوم سیستمهای غالب قطری چندمتغیره ۵۵

۴-۵- روابط بین بهره‌های اصلی حلقه باز و حلقه بسته ۶۲

۴-۶- نرمهای اپراتوری مفید برای تعریف عملکرد سیستم ۶۶

● فصل پنجم: کنترل مقاوم سیستمهای چندمتغیره آشفته تکین

۵-۱- مقدمه ۶۹

۵-۲- طراحی کنترل مقاوم در حالت خطای مدلسازی جمعی ۶۹

۵-۳- طراحی کنترل مقاوم در حالت خطای مدلسازی ضربی ۷۶

۵-۴- جمع‌بندی ۸۳

● فصل ششم: شبیه‌سازی

۶-۱- مقدمه ۸۷

۶-۲- شبیه‌سازی کنترل مقاوم در حالت خطای مدلسازی جمعی ۸۷

۶-۳- شبیه‌سازی کنترل مقاوم در حالت خطای مدلسازی ضربی ۱۰۳

● فصل هفتم: نتایج و پیشنهادات

۷-۱- نتایج و پیشنهادات ۱۱۷

فهرست مراجع ۱۱۹

واژه‌نامه انگلیسی به فارسی ۱۲۴

واژه‌نامه فارسی به انگلیسی ۱۲۶

فصل اوّل:

مقدمه

۱-۱- نگاهی بر سیستمهای ابعاد وسیع

در تکنولوژی پیشرفته امروز، اغلب سیستمها از ترکیب و ارتباط ماشین‌ها، واکنش‌ها و فرایندهای متعدد تشکیل یافته است. این ارتباط از طریق منابع مشترک، جریان مواد، شبکه اطلاعات، انتقال نیرو و انرژی، اتصالات مکانیکی و غیره ایجاد می‌شود. تحلیل، طراحی و اعمال سیستم کنترل بصورت یکپارچه برای چنین سیستمهایی که سیستمهای ابعاد وسیع[1] خوانده می‌شوند کاری پیچیده وگاهی غیرعملی و غیرممکن به نظر می‌رسد. استفاده از کامپیوترهای سریع‌تر یا با حافظه بیشتر به تنهایی رهگشای این مسائل نمی‌باشد، بلکه توسعه روشهایی جهت تبدیل مسئله به زیرمسئله‌های مرتبط با هم و حل مرحله به مرحله، معقولانه‌تر بنظر می‌رسد. تعریف واحدی برای سیستم‌های ابعاد وسیع وجود ندارد. ویژگی پیچیده بودن کلی سیستم و قابلیت تجزیه به زیرمسئله‌های مرتبط، در تعاریف مشترک است. عبارت ابعاد وسیع به معنی بزرگ بودن ابعاد فیزیکی سیستم نیست، برای مثال یک تراشه الکترونیکی به ابعاد ۴×۱ سانتی‌متر، از آنجاکه از تعداد زیادی عنصر مرتبط تشکیل می‌شود، سیستم ابعاد وسیع خوانده می‌شود. این سوء تعبیر ممکن است از عبارت ابعاد وسیع که معادل *Large-Scale* است، ناشی شده باشد و به این دلیل بعضی از نویسندگان عبارت مقیاسی بزرگ را برای این مفهوم انتخاب کرده‌اند. مسائل عمده‌ای که تئوری سیستمهای ابعاد وسیع با آنها درگیر است، عبارتند از:

تعدد زیر سیستمها که به بزرگی ابعاد دینامیکی کل سیستم می‌انجامد - نامعینی در مدل و محدودیت در ساختار کنترل‌کننده‌ها.

1- Larg-Scale Systems

ساختارهای خاص سیستم ابعاد وسیع اغلب اجازه جمع‌آوری کلیه اطلاعات سیستم در یک نقطه و محاسبه فرامین کنترل بصورت متمرکز و ارسال آنها را نمی‌دهد. برای مثال در یک شبکه قدرت که زیرسیستمها فاصله جغرافیایی زیادی دارند، امکان ارسال بلادرنگ[1] اطلاعات به یک کنترل‌کننده مرکزی و محاسبه فرمان کنترل وجود ندارد. در این گونه سیستمها اغلب از کنترل غیرمتمرکز[2] که هر زیرسیستم سیگینال‌های کنترل را از خروجی‌های همان زیرسیستم بدست می‌آورد، استفاده می‌شود. در سیستمهایی مانند سیستم ترافیک که اثرات زیرسیستمهای مجاور بسیار بیشتر از زیرسیستم‌های دور از هم است و بخاطر تعدد زیرسیستمها اعمال کنترل متمرکز عملی نمی‌باشد، تبادل اطلاعات بین کنترل‌کننده‌های مجاور باعث بهبود نسبی عملکرد سیستم خواهد شد. در فرایندهای شیمیایی که جریان مواد اغلب بصورت زنجیره‌ای است، اگر جریان اطلاعات بین کنترل‌کننده‌های محلی نیز به همان صورت باشد، پاسخ بهتری از سیستم انتظار می‌رود. از دیگر مسائل سیستم‌های ابعاد وسیع نامعینی در مدل و ساختار می‌باشد. در سالهای اخیر طرح کنترل‌کننده‌هایی که در برابر نامعینی مدل مقاوم باشند و در شرایط مختلف کاری عملکرد مناسبی داشته باشند، مورد توجه فراوان مهندسین کنترل قرار گرفته است، که منجر به بحث کنترل مقاوم شده است که در قسمت بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۲- کنترل مقاوم و علل طرح آن در ادبیات کنترلی

در سیستم‌های عملی مسأله عدم قطعیت در مدل سیستم، به دلایلی که در ادامه خواهیم آورد، اجتناب‌ناپذیر است. به علاوه سیگنالهای اغتشاشی نامعین نیز در اغلب محیط‌ها اظهار وجود می‌کنند یک روش طراحی عملی و واقع‌بینانه سیستم‌های کنترل، ناگزیر باید این عدم قطعیت‌ها را در نظر بگیرد. طراحی‌های مبتنی بر مدل دقیق سیستم ممکن است تنها بر روی کاغذ عملکرد خوبی داشته باشند و نتوانند در دنیای عملی وارد گردند چراکه به عنوان مثال اغلب کافی است تنها یکی از پارامترهای سیستم تغییر کند تا نتایج استنتاج شده اعتبار خود را از دست بدهند.

1- On-Line *2- Decentralized Control*

توجه به این عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات اجتناب‌ناپذیر در عمل، انگیزه ظهور روشهای متعدد کنترل مقاوم است، به عنوان یک تعریف جامع از کنترل مقاوم می‌توان گفت:

کنترل مقاوم عبارت است از کنترل سیستمهای غیرقطعی (یعنی سیستمهای با دینامیک غیرقطعی و یا در معرض سیگنالهای اغتشاشی نامعین) بطوریکه در وهلهٔ اول سیستم حلقه بسته پایدار مانده و در مرتبهٔ بعدی عملکرد آن را در محدودهٔ مناسبی تضمین نماید.

طبیعی است که وجود یک معیار برای فرموله کردن این تعریف کیفی برای بررسی دقیق‌تر میزان مقاومت سیستم حلقه بسته الزامی است و این معیار در روشهای مختلفی که عملاً وارد مبحث کنترل مقاوم می‌شوند بسته به نوع برخورد با مسأله معرفی و فرموله می‌شود.

لفظ کنترل مقاوم به طور صریح از اوایل دههٔ هشتاد وارد ادبیات کنترلی گردید و با توجه به نیازهای عملی به وجود یک کنترلر مقاوم برای سیستمهای صنعتی آن چنان به سرعت پیشرفت کرد که هم‌اکنون طراحی یک کنترل برای یک سیستم نامی، هر چند که دارای بازده بالایی برای سیستم نامی باشد، اگر متضمن مقاومت خوب در برابر نامعینی‌های سیستم و اغتشاشات خارجی و دیگر شرایط فیزیکی که به مرور زمان بر سیستم وارد می‌شوند نباشد، وارد حوزهٔ صنعت نشده و از لحاظ تئوری نیز دارای یک ضعف غیرقابل دفاع می‌باشد.

باید توجه داشت که با وجود اینکه گرایش کنترل مقاوم صریحاً از دهه هشتاد فعال شد اما بسیاری از روشهای کنترلی که پیش از آن ابداع شده بود، بطور طبیعی یا با توجه به دانش و تفکر مبدعین روش، کمابیش در برابر برخی شرایط غیرنامی سیستم مقاوم می‌باشد. از این رو می‌توان طیف بسیار فراوان و گسترده‌ای از فلسفه‌های کنترل را به عنوان روشهای مقاوم مورد بررسی قرار داد.

۱-۳- تاریخچه کنترل مقاوم

براساس تعریف کنترل مقاوم باید گفت که اولین کار انجام شده در زمینه کنترل مقاوم، کاری است که در سال ۱۹۲۷ و به اسم آقای «بلک»[1] ثبت گردیده است [۱]. بلک اولین کسی بود که برای کاهش

1- Black

حساسیت و افزایش دقت در مورد تقویت‌کننده‌های لامپی که دارای عدم قطعیت چشمگیری است استفاده از پس خور بهرهٔ بالا را پیشنهاد کرد.

اما آن زمان هنوز تئوری نایکوئیست[1] ارائه نشده بود تا بتوان به طریق تحلیلی به مصالحه‌ای بین پایداری دینامیکی و حلقه بهرهٔ بالا دست یافت و سیستمهای بسیار دقیق طراحی شده بدین روش اغلب ناپایدار از آب درمی‌آمدند.

به دنبال ارائهٔ تئوری نایکوئیست در سال ۱۹۳۲، بود[2] در سال ۱۹۴۵ از تلفیق معیار نایکوئیست و ایدهٔ حلقهٔ بهرهٔ بالای بلک برای طراحی‌های مقاوم استفاده نمود *[۱]*.

در فاصلهٔ سالهای ۱۹۲۷ تا ۱۹۶۰ کارهای ارزشمندی در زمینهٔ کنترل صورت گرفت. در طول این دوره که می‌توان آن را دوران کنترل کلاسیک نامید پیشرفت‌های اساسی در زمینه طراحی سیستم‌های *SISO* به منظور پایداری، کاهش حساسیت و حذف نویز صورت گرفت. اکثر خواص و مزایای پس‌خور توسط محققین و بخصوص بود و هورویتز[3] بررسی و تشریح گردید. مفاهیم حوزه فرکانس این دوران هنوز هم بیشترین کاربرد را چه در دنیای صنعت و چه در دنیای آکادمیک به خود اختصاص داده‌اند. جبران‌ساز پیش‌افت - پس‌افت فازی[4] از روشهای طراحی این دوران می‌باشند.

در اوایل دههٔ ۱۹۶۰ با ظهور کنترل مدرن اکثر مراکز آکادمیک به توسعهٔ تئوری و تکنیک‌های فضای حالت روی آوردند. تکنیک‌های فضای حالت که حل مسایل چندمتغیره را به صورتی کاملاً آسان امکان‌پذیر ساخت در ابتدا به نظر می‌رسید که کاربردهای زیای در عمل پیدا کند ولی بعد از دو دهه مشخص شد که اثر این روشها در دنیای صنعت و عمل ناچیز بوده است. شاید مهمترین درخشش این دوره - که می‌توان آن را دورهٔ متغیر حالت نامید - را بتوان حل مسأله *LQG* قلمداد کرد.

مع‌الوصف مسئله *LQG* در برآوردن اهداف اصلی طراحان سیستم کنترل با شکست مواجه گردید، بدین‌معنی که در عمل نتوانست پاسخگوی نیازهای طراحی باشد که مهمترین مشکل آن

1- Nyquist
2- Bode
3- Horowitz
4- Phase Lead-Lag

فقدان مقاومت بود. در تعدادی از مقالات محققین نشان دادند که طراحی‌های مبتنی بر LQG در عمل یعنی آنگاه که واقع‌بینی بیشتری (عدم قطعیت‌های اجتناب‌ناپذیر در عمل) در سیستم لحاظ گردد، ممکن است ناپایدار در آیند [۳ و ۲].

قابل ذکر است که در طول این دوره که در اکثر مراکز آکادمیک به حوزه فرکانس به دید یک حوزهٔ ذاتاً نامناسب برای حل مسایل چندمتغیره می‌نگریستند محققان در بریتانیا به توسعهٔ روشهای کنترل کلاسیک به حالت چندمتغیره مشغول بودند که به موفقیتهایی نیز دست یافتند. ایده‌ها و ابزارهایی مانند مکان ریشه‌ها (که به مکانهای مشخصه تغییرنام داد) و تکنیک‌های نایکوئیست (که به آرایه‌های نایکوئیست تغییر نام داد) و نمودارهای بود (که به نمودارهای مقدار تکین تغییر نام داد) به حالت چندمتغیره توسعه یافتند [۴].

بعد از سالها انتقاد مقاوم در اواخر دههٔ ۱۹۷۰ توجه به مسألهٔ عدم‌قطعیت و طراحی کنترل مقاوم افزایش یافت و تکنیکهای مختلفی برای طراحی سیستمهای کنترل مقاوم چندمتغیره معرفی گردید. کنترل $H\infty$ خطی توسط اکثر محققین، کنترل μ توسط دویل[1] [۵] (که همزمان نیز توسط سافانوف[2] با عنوان کنترل K_m ارائه گردید).

QFT توسط هوروتیز [۶]، روشهای مبتنی بر قضیهٔ خاریتانف[3] توسط بارمیش[4] [۷] و L_1 توسط داهله[5] و همکارانش [۸].

مسأله کنترل $H\infty$ خطی اولین بار توسط زیس[6] [۹] فرموله گردید که یک روش طراحی حوزهٔ فرکانس برای سیستمهای کنترل مقاوم بود. در سال ۱۹۸۱، زیس این نظریه را مطرح کرد که سنجش کارآیی برحسب نرم بینهایت به نیازهای کاربردی بسیار نزدیکتر است. او در این مقاله علت عدم توفیق عملی کنترل‌کننده‌های بهینهٔ LQG را که براساس کمینه‌سازی نرم دو طراحی می‌شوند از طرفی مربوط به محدودیتها و عدم قابلیت چهارچوب کاری فضای حالت ذکرکرده است و از طرف

1- *Doyle*
2- *Safanov*
3- *Kharitanov*
4- *Barmish*
5- *Dohleh*
6- *Zames*

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران