۱۳۰۷
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق - کنترل

کنترل فازی - عصبی تطبیقی نوع دوم جهت سیستم‌های غیرخطی

توسط:

اردشیرمحمدزاده

استاد راهنما:

دکتر تشنه‌لب

استاد مشاور:

دکتر علیاری

شهریور 1392

بسم الله الرحمن الرحیم

تأییدیّه هیات داوران

(برای پایان نامه)

اعضای هیئت داوران، نسخه نهائی پایان نامه خانم / آقای: *اردشیر محمدزاده*

را با عنوان: *کنترل فازی-عصبی تطبیقی نوع دوم جهت سیستم‌های غیرخطی*

از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه کارشناسی/ کارشناسی ارشد تأیید می‌کند.

اعضای هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
1- استاد راهنما	دکتر محمد تشنه لب	استاد	
2- استاد مشاور	دکتر مهدی علیاری	استادیار	
3- استاد مشاور			
4- استاد ممتحن	دکتر مجتبی احمدیه	استادیار	
5- استاد ممتحن	دکتر خالوزاده	استاد	
6- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر خالوزاده	استاد	

چکیده

در این پایان نامه کنترل تطبیقی فازی-عصبی نوع دوم جهت سیستم‌های غیرخطی بررسی شده است. ابتدا مطالبی درمورد پیشینه تاریخی، مزیت‌ها و اشکالات حل نشده در زمینه کنترل فازی تطبیقی بیان شده، سپس به صورت کلی کارهای انجام شده در این زمینه بر اساس روش به کار رفته و نوع سیستم غیرخطی طبقه بندی شده است. در ادامه حالت پیشرفته‌ای از کنترل فازی تطبیقی غیرمستقیم، ارائه شده است که از سیستم‌های فازی-عصبی نوع دوم به فرم سلسله مراتبی برای تخمین نامعینی‌ها، استفاده شده است، و همه پارامترهای بخش تالی و توابع تعلق آن، بر اساس قوانین تطبیقی استنتاج شده بر اساس تجزیه و تحلیل پایداری لیاپانوف آموزش می‌بینند. در این روش جبرانگر جدیدی برای حذف اثر خطای تخمین، اغتشاش خارجی و نویز ارائه شده است. این کنترل‌کننده تطبیقی غیرمستقیم دارای دو مد کاری است: مد یادگیری و مد عملیاتی، در مد یادگیری همه پارامترهای تطبیقی آموزش می‌بینند اما در مد عملیاتی، پارامترهای سیستم فازی ثابت بوده و فقط پارامتر جبرانگر به روز رسانی می‌شود. این کار باعث کاهش حجم محاسبات می‌شود. روش مطرح شده، برای همزمان سازی دسته‌های مختلفی از سیستم‌های آشوب به کار برده شده است. سپس کنترل فازی لغزشی جهت همزمان‌سازی سیستم‌های آشوب با مرتبه کسری مورد بررسی قرار گرفته است. در روش ارائه شده، بخش سویچینگ در کنترل لغزشی کلاسیک با یک سیستم فازی نوع دوم پیشنهادی به همراه تابع تانژانت هیپربولیک جایگزین شده است، ضمن اینکه یک سیستم فازی نوع دوم پیشنهادی دیگر در فرم سلسله مراتبی برای تخمین نامعینی‌ها به کار رفته است. همه پارامترهای هر دو سیستم فازی بر اساس پایداری لیاپانوف تنظیم می-شوند. کنترل‌کننده ارائه شده علاوه بر اینکه در برابر خطای تخمین، اغتشاش خارجی و نویز مقاوم می-باشد، مسئله لرزش سیگنال کنترل در حالت کلاسیک، را نیز به خوبی حل می‌کند. در قسمت بعدی، کنترل فازی تطبیقی نوع دوم مستقیم با محدودیت‌های کمتر روی بهره کنترلی ارائه شده است. این کنترل‌کننده برخی مشکلات حالت غیر مستقیم را نداشته و به دلیل استفاده از تنها یک سیستم فازی، پیچیدگی کمتری نسبت به حالت غیر مستقیم دارد. در نهایت سیستم فازی نوع دوم حافظه دار سلسله مراتبی مطرح شده و همه پارامترهای آن را بر اساس یک الگوریتم جدید آموزش داده شده است. تخمین‌گر عمومی بودن سیستم فازی مذکور، اثبات شده و کاربردهای آن در شناسایی و کنترل سیستم-های غیرخطی بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی انجام شده با جدیدترین کارها مقایسه شده است.

کلید واژه: کنترل‌فازی تطبیقی مستقیم، کنترل‌فازی تطبیقی غیرمستقیم، قانون تطبیق، خطای تخمین و تابع لیاپانوف.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست شکل‌ها ..... د

فهرست جدول‌ها ..... ز

مقدمه **8**

1-1- پیشینه تاریخی 8

1-2- کنترل فازی تطبیقی چیست؟ 8

1-3- چرا کنترل فازی تطبیقی؟ 9

1-4- مشکلات موجود در کنترل کننده فازی تطبیقی 10

فصل 2- مرور کلی کار های انجام شده درزمینه کنترل تطبیقی فازی 12

2-1- کنترل فازی تطبیقی مستقیم 12

2-2- کنترل کننده فازی تطبیقی غیرمستقیم 12

2-3- ترکیب کنترل کننده فازی تطبیقی با دیگرکنترل کننده ها 12

2-3-1- ترکیب کنترل تطبیقی مستقیم با غیرمستقیم 13

2-3-2- ترکیب کنترل فازی ترکیبی با دیگر کنترل کننده ها به منظور جبران خطای تخیمن 13

2-3-3- ترکیب کنترل فازی ترکیبی با کنترل فیدبک خروجی 13

2-3-4- ترکیب کنترل فازی تطبیقی با کنترل H_∞ 13

2-3-5- ترکیب کنترل فازی تطبیقی با کنترل نظارتی 14

2-3-6- ترکیب کنترل فازی تطبیقی با دیگر روشهای کنترلی 14

2-4- کلاس های مختلف سیستم های غیرخطی 14

2-4-1- سیستم های غیرخطی افاین 15

2-4-2- سیستم های غیرخطی غیرافاین 16

2-4-3- سیستم های غیرخطی به فرم پسخور 17

2-4-4- سیستم های غیرخطی پسخور- محض 18

2-4-5- سیستم های غیرخطی تک ورودی- تک خروجی وچند ورودی- چند خروجی 19

2-4-6- سیستم های غیرخطی پسخور خروجی و حالت 19

2-4-7- سیستم های گسسته و پیوسته 19

2-5- مکانیزم تطبیق درسیستم های فازی 20

2-5-1- تنظیم پارامترها 20
2-5-2- تنظیم ساختار وپارامتر 21

فصل 3- کنترل فازی -عصبی سلسله مراتبی تطبیقی غیرمستقیم نوع دوم با تقریب خطای تخمین برای همزمان سازی سیستم های آشوب 22

3-1- چکیده 22
3-2- مرور کلی کارهای انجام شده 22
3-3- کنترل فازی تطبیقی با دو مد کاری و تقریب خطای تخمین 24
3-3-1- مشخصات مسأله و پارامترسازی غیرخطی 24
3-3-2- طراحی کنترل کننده 32
3-3-3- آنالیز پایداری و استنتاج قوانین تطبیقی 33
3-3-4- مکانیزم سویچ 36
3-3-5- نکات ویژه 39
3-4- کاربردها 40
3-4-1- همزمانسازی سیستمهای آشوب چوآ 40
3-4-2- همزمانسازی سیستم آشوب لو و مدار آشوب اصلاح شده چوآ 46
3-5- نتیجه گیری 49

فصل 4- کنترل فازی لغزشی نوع دوم بهبود یافته جهت همزمانسازی سیستمهای آشوب با مرتبه کسری 51

4-1- چکیده 51
4-2- بررسی کارهای انجام شده 51
4-3- تعاریف اولیه 52
4-4- توصیف سیستم و فرموله سازی مسئله 53
4-5- آنالیز پایداری و استنتاج قوانین تطبیقی 55
4-6- شبیه سازی 59
4-6-1- همزمانسازی سیستمهای آشوب کولت و جنیسوتسی 59
4-6-2- شبیه سازی روی سیستم آشوب دوفینگ-هولمز، با تاخیر زمانی 63
4-7- نتیجه گیری 65

فصل 5- کنترل فازی تطبیقی مستقیم نوع دوم با محدودیتهای کمتر روی بهره کنترلی 66

5-1- چکیده 66

5-2- مرور کارهای گذشته 66
5-3- مشخصات مسئله 68
5-4- پارامتر سازی غیرخطی 69
5-5- طراحی قانون تطبیق 73
5-6- شبیه سازی 78
5-6-1- پاندول معکوس 78
5-6-2- سیستم تعلیق مغناطیسی 83
5-7- نتیجه گیری 86

فصل 6- سیستم فازی-عصبی حافظه دار و آموزش همه پارامترهای آن بر اساس CKF 88

6-1- چکیده 88
6-2- مرور کلی کارهای انجام شده 88
6-3- ساختار سیستم فازی نوع دوم حافظه دار در فرم سلسله مراتبی 89
6-4- آموزش بر اساس الگوریتم CKF 92
6-5- شبیه سازی 94
6-5-1- کنترل سیستم آشوب چوآ 94
6-5-2- پیش بینی سری زمانی مکی گلاس 96
6-5-3- سری زمانی کاربردی 98
6-6- نتیجه گیری 100
6-7- پیوست 100

فصل 7- نتیجه گیری کلی و پیشنهادات 106

7-1- نتیجه گیری 106
7-2- پیشنهادات 107

فهرست مراجع 109

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل (3- 1): فرم کلی سیستمهای فازی سلسله مراتبی 25
شکل (3- 2): نمودار تابع عضویت نوع دوم با میانگین ثابت و عرض متغیر 25
شکل (3- 3): شماتیک دیاگرام سیستم فازی نوع دوم کلاسیک با دو، ورودی 26
شکل (3- 4): بلوک دیاگرام کنترلی 33
شکل (3- 5): فلوچارت مکانیزم سویچ [62] 38
شکل (3- 10): نمودار فاز سیستم پایه و پیرو در حالت بدون کنترل، مثال اول 42
شکل (3- 11): نتایج همزمان سازی در مثال اول، حالت بدون نویز 42
شکل (3- 12): سیگنال کنترل در مثال اول، حالت بدون نویز 43
شکل (3- 13): نمودار فاز بعد از همزمان سازی، مثال اول 43
شکل (3- 14): نتایج همزمان سازی در مثال اول، در حضور نویز با واریانس 0.1 44
شکل (3- 15): نمودار سیگنال کنترل، در مثال اول حالت نویزی 44
شکل (3- 16): نمودار فاز بعد از همزمان سازی در مثال اول، حالت نویزی 45
شکل (3- 17): نمودار فازی سیستم پایه و پیرو در حالت بدون کنترل، مثال دوم 47
شکل (3- 18): نتایج همزمان سازی در مثال دوم 48
شکل (3- 19): نمودار های سیگنال کنترل در مثال دوم 48
شکل (3- 20): نمودار فاز بعد از همزمان سازی در مثال دوم 49

شکل (4- 1): بلوک دیاگرام کنترلی 56
شکل (4- 2): سیستم‌های پایه و پیرو بدون کنترل 60
شکل (4- 3): نتایج همزمان سازی بین سیستم‌های کولت و جنیسوتسی 61
شکل (4- 4): سیگنال کنترل در حالت نویزی 61
شکل (4- 5): سیگنال کنترل در حالت بدون نویز 61
شکل (4- 6): نمودار فاز سیستم‌های پایه و پیرو بعد ازهمزمان سازی 62
شکل (4- 7): توابع عضویت نهایی و اولیه برای ورودی‌های سیستم فازی نوع دوم ساده شده‌ی اول در فرم سلسله مراتبی 62

شکل (4- 8): توابع عضویت نهایی و اولیه برای ورودی های سیستم فازی نوع دوم ساده شده ی دوم در فرم سلسله مراتبی 62
شکل (4- 9): نتایج مرجع [81] 64
شکل (4- 10): نتایج همزمان سازی 64
شکل (4- 11): سیگنال کنترل 64
شکل (4- 12): توابع عضویت اولیه و نهایی سیستم فازی نوع دوم ساده شده $\hat{f}(x|\theta_f)$ 65
شکل (4- 13): نمودار فاز بعد و قبل از همزمانسازی 65

شکل (5- 1): بلوک دیاگرام کنترلی 74
شکل (5- 2): نمایش الگوریتم تصویرسازی [1] 76
شکل (5- 3): سیستم پاندول معکوس [84] 78
شکل (5- 4): توابع تعلق نوع دوم در نظر گرفته شده برای هریک از ورودی‌های سیستم پاندول معکوس، لازم به ذکر است که مراکز و عرض این توابع در طول فرایند مطابق قانون تطبیق بدست آمده در این فصل تنظیم می شوند 80
شکل (5- 5): نمودار خروجی، سیگنال کنترل و خطای ردیابی، نتایج کنترل کننده طراحی شده در این فصل برای سیستم پاندول معکوس (حالت بدون نویز) 81
شکل (5- 6): نتایج شبیه سازی کنترل کننده طراحی شده روی سیستم پاندول معکوس،در حالی که از سیستم فازی ممدانی با توابع تعلق نوع استفاده شده و برای هر ورودی 5 تا، تابع تعلق در نظر گرفته شده است 81
شکل (5- 7): نتایج کنترل کننده طراحی شده در این فصل در حضور نویز با واریانس 0.1 و میانگین صفر روی سیستم پاندول معکوس، در حالی که از سیستم فازی سوگنو با توابع تعلق نوع دوم استفاده شده و پارامترهای توابع تعلق نیز تنظیم می‌شوند 82
شکل (5- 8): نتایج کنترل کننده، در حضور نویز با واریانس 0.1 و میانگین صفر روی سیستم پاندول معکوس، در حالی که از سیستم فازی ممدانی با توابع تعلق نوع اول استفاده شده و فقط پارامترهای بخش تالی تنظیم می‌شوند 82
شکل (5- 9): سیستم تعلیق مغناطیسی [84] 84
شکل (5- 10): نمودار خروجی، سیگنال کنترل و خطای ردیابی در حالت بدون نویز، در حالی که کنترل کننده طراحی شده روی سیستم تعلیق مغناطیسی اعمال شده است 85

شکل (5- 11): نمودار خروجی، سیگنال کنترل و خطای ردیابی، در حضور نویز با ورایانس 1 و میانگین صفر، در حالی که کنترل کننده طراحی شده در این فصل روی سیستم تعلیق مغناطیسی ، اعمال شده است 85

شکل (6- 1): ساختار سلسله مراتبی 89
شکل (6- 2): توابع عضویت نوع دوم 90
شکل (6- 3): ساختار هریک از سیستمهای فازی – عصبی در فرم سلسله مراتبی 90
شکل (6- 4): نتایج کنترل سیستم آشوب چوآ با استفاده از HRT2FNN جهت تخمین نامعینیها در کنترل مدلغزشی 96
شکل (6- 5): توابع عضویت نهایی بدست آمده در مثال دوم، کنترل مدلغزشی سیستم آشوب 96
شکل (6- 6): نمودار خروجی HRT2FNN و خروجی واقعی برای دادههای تست، در حالت بدون نویز ... 97
شکل (6- 7): توابع عضویت نهایی بدست آمده در مثال3 در حالت بدون نویز 97
شکل (6- 8): نمودار نحوهی تغییر ضرایب پسخور در مثال3، حالت بدون نویز 98
شکل (6- 9): نمودار مقایسه خروجی واقعی و خروجی HRT2FNN در مثال4 99
شکل (6- 10): توابع عضویت نهایی بدست آمده در پیش بینی سری زمانی عملی، مثال4 99

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول(3- 1): توابع عضویت اولیه برای مثال اول 41
جدول(3- 2): مقایسه نتایج سیستم فازی نوع اول و دوم 45
جدول(3- 3): نتایج بدست آمده از همزمانسازی سیستم‌های مثال اول با استفاده کنترل مدلغزشی نوع2 در مرجع [63] 46
جدول(3- 4): مقایسه نتایج با روش‌های دیگر 49

جدول (4- 1): پارامترهای شبیه سازی 60

جدول (6- 1): مقایسه نتایج HRT2FNN با سایر مدلها در پیش بینی سری زمانی مکی گلاس 97
جدول (6- 2): مقایسه نتایج HRT2FNN با سایر روشها در پیش بینی سری زمانی مثال4 99

مقدمه

1 - 1 - پیشینه تاریخی

در اوایل 1990 شاهد رشد کاربردهای موفقیت آمیز منطق فازی درکنترل خودکار بودیم، مثال‌هایی از این کاربردها عبارتند از: ماشین‌های لباسشویی، دوربین‌های پیشرفته ، انتقال خودکار و قطارهای زیرزمینی و غیره [1] . در واقع کنترل‌کننده‌های منطق فازی[1] روشی برای کنترل سیستم‌های غیر خطی پیچیده است که به آسانی نمی‌توان آنها را باروشهای معمولی کنترل کرد که نیاز به مدل سیستم ندارد و می تواند از اطلاعات شخص ماهر در مورد سیستم استفاده کند. با این حال آنالیز پایداری و مقاومت این کنترل‌کننده مشکل بوده و روش طراحی سیستماتیک ندارند و این نقص، محدوده‌ی کاربرد این کنترل-کننده‌ها را کوچکتر می‌کند.

از طرف دیگر کنترل تطبیقی یک پیشینه تاریخی قوی درمورد اثبات پایداری، طراحی مقاوم و آنالیز عملکرد دارد [2]. در دهه 1960 موفقیت خوبی در تئوری پایداری و کنترل در کنترل‌کننده‌های تطبیقی حاصل شد. دراواسط دهه 1980 تحقیقات درزمینه کنترل تطبیقی به طور اساسی به مسئله مقاومت دربرابر دینامیک‌های مدل نشده و اغتشاش‌های کراندار متمرکز شده بود، با موفقیت اولیه در زمینه کنترل تطبیقی سیستم‌های خطی، گسترش آن به سیستم‌های غیر خطی از اواخر دهه 1980تا 1990 مورد توجه قرارگرفت، بنابراین کنترل تطبیقی روش‌های ریاضی قویی برای آنالیز پایداری و مقاومت سیستم‌های کنترلی غیرخطی ارائه داد.

بنابراین منطقی به نظر می‌رسید که دو روش کنترل فازی و کنترل تطبیقی ترکیب شوند تا روش کنترلی بهتری بدست آید. نتیجه کنترل فازی تطبیقی[2] بود که هم قابلیت به کارگیری دانش بشری را داشت و هم قابلیت آنالیز پایداری و مقاومت .

1 - 2 - کنترل فازی تطبیقی چیست؟

ونگ، یک سیستم فازی تطبیقی را سیستمی با الگوریتم آموزش تعریف می‌کند که پارامترهای آن (و همچنین ساختار) براساس اطلاعات ورودی - خروجی تنظیم می‌شوند براساس این تعریف، سیستم‌های

[1] Fuzzy Logic Controllers (FLCs)
[2] Adaptive Fuzzy Control (AFC)

فازی -عصبی که درآن سیستم‌های فازی با شبکه‌های عصبی ادغام می‌شوند، نیز سیستم‌های فازی تطبیقی هستند.

کنترل‌کننده‌ی تطبیقی کلاسیک دارای اثبات پایداری است که معمولاً از آنالیز پایداری لیاپانوف استنتاج می‌شود به خاطر همین کنترل‌کننده فازی تطبیقی می‌تواند به عنوان کنترل‌کننده‌ای تعریف شود، که از سیستم‌های فازی تطبیقی بهره برده و از تئوری کنترل تطبیقی برای بدست آوردن الگوریتم-های آموزشی همراه با پایداری و تضمین عملکرد سیستم حلقه بسته، استفاده می‌کند.

روش‌های پایداری لیاپانوف، نقش اساسی در طراحی و آنالیز پایداری سیستم‌های تطبیقی دارند. با بررسی رفتار تابع لیاپانوف کاندید، می‌توانیم پایداری در سیستم‌های فازی تطبیقی را بررسی کنیم.

به طور خلاصه یک کنترل‌کننده، فازی تطبیقی خوانده می‌شود اگر :

- سیستم فازی، قابلیت تطبیقی را دارا باشد.
- از روش پایداری لیاپانوف برای بدست آوردن الگوریتم‌های آموزش و تضمین پایداری سیستم حلقه بسته استفاده شده باشد.

1 - 3 - چرا کنترل فازی تطبیقی؟

مزیت‌های کنترل فازی تطبیقی نسبت به سایر کنترل کننده های کلاسیک و غیر تطبیقی که شامل مزیت‌های کنترل فازی و کنترل تطبیقی است که عبارتند از:

- کنترل فازی از اطلاعات اپراتور خبره استفاده می‌کند، درواقع اپراتور خبره می‌تواند رفتار سیستم را توصیف کرده و یا دانش کنترلی در مورد نحوه کنترل سیستم ارائه دهد، که این اطلاعات به راحتی می‌تواند به صورت قواعد اگر– آنگاه فازی تبدیل شود.
- سیستم‌های فازی تقریب‌گرهای عمومی غیر خطی خوبی هستند. در کنترل تطبیقی مقاوم خطی کلاسیک، تقریب‌گرهای خطی برای تخمین بعضی توابع ناشناخته، که فرض می‌شود خطی هستند به کار می رود، با استفاده از سیستم‌های فازی در کنترل تطبیقی، فرض خطی بودن توابع منتفی است. بنابراین کنترل فازی تطبیقی، یک طرح کنترلی مقاوم غیرخطی را ارائه می نماید که لازم نیست فرض کنیم سیستم نسبت به پارامترهای ناشناخته خطی باشد [3].
- کنترل فازی به راحتی قابل تفسیراست. زیرا کنترل فازی استراتژی کنترلی را با استفاده از دانش بشری دنبال می‌کند که قواعد آن برای افراد غیر مختصص هم قابل فهم است. تئوری کنترل

کلاسیک از روشهای ریاضی پیچیده استفاده می‌کند که قابل تفسیر نمی باشد، بنابراین مهندسان درکاربردهای عملی ترجیح می دهند از روشهای ساده وآسانی که قابل فهم باشد استفاده کنند.

- پیاده‌سازی کنترل فازی راحت است. توسعه IC های VLSI باعث شده است که پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌های فازی ساده و سریع باشد.
- قیمت نرم افزارها و سخت افزارهای لازم برای پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌های فازی ارزان است [1].
- کنترل تطبیقی فازی، وابسته به مدل سیستم نیست، الگوریتم‌های تطبیقی برای تنظیم بهنگام پارامترهایی به کار می رود که در بخش کنترل‌کننده ظاهر می‌شوند. بنابراین به مدل ریاضی سیستم نیازی نیست .
- کنترل تطبیقی پایداری و مقاومت را تضمین می‌کند، که درتئوری کنترل بسیار مهم هستند. پایداری به این معنی که برای هر ورودی کراندار درهر زمانی، خروجی هم کراندار بماند. مقاومت کنترل کننده، به توانایی سیستم کنترل، برای پایدار نگه داشتن سیستم، هنگام مواجهه با دینامیک‌های مدل نشده و اغتشاشات بیرونی، دلالت دارد. کنترل فازی غیرتطبیقی نمی‌تواند پایداری و مقاومت سیستم کنترلی را تضمین کند. کنترل تطبیقی، بر اساس پایداری لیاپانوف یک چهارچوپ ریاضی برای بدست آوردن الگوریتم های تطبیقی فراهم می‌آورد که پایداری و مقاومت را تضمین می‌کند.
- کنترل تطبیقی یک روش طراحی سیستماتیک فراهم می‌آورد. در حالیکه، روش استاندارد طراحی سیستماتیک در کنترل فازی معمولی وجود ندارد و تنظیم پارامترها اغلب براساس سعی و خطا صورت می گیرد.

1 - 4 - مشکلات موجود در کنترل کننده فازی تطبیقی

با مزیت‌های توصیف شده در بخش قبل، کنترل‌کننده فازی تطبیقی یک کاندید مناسب برای کنترل سیستم های دینامیکی غیرخطی دارای عدم قطعیت است. با این حال هنوز مشکلاتی وجود دارد که کاربرد عملی این کنترل‌کننده را محدود می‌کند.

مهمترین مشکلات، ساختار ثابت و عمومی کنترل‌کننده‌های فازی است که درعمل عموماً با سعی و خطا تعیین می‌شود. تلاش‌های کمی برای توسعه کنترل‌کننده‌های فازی تطبیقی با ساختار خود تنظیم صورت گرفته است. موضوعات اصلی مانند پایداری، بازده محاسباتی و قابلیت پیاده‌سازی به طور کامل

بحث نشده است. به ویژه پایداری سیستم‌هایی که قابلیت ساختار متغیر دارند ثابت نشده است. بنابراین طراحی کنترل فازی تطبیقی با ساختار خود تنظیم می تواند خیلی مفید واقع شود.

اشکالات بعدی عبارتنداز: قابل اجرا[1] برای دسته‌های خاصی از سیستم‌های غیرخطی [20-1]، رشد نمایی قوانین با افزایش تعداد توابع تعلق، قیدهای لحاظ شده بر پارامترهای طراحی، که در عمل به سختی تعیین می‌شود، پیچیدگی کنترل‌کننده‌های سیستم‌های غیرخطی به فرم توابع تعلق مثلثی و غیره.

[1] Applicable

فصل 2 - مرور کلی کار های انجام شده درزمینه کنترل تطبیقی فازی

از اوایل دهه 1990 کنترل فازی تطبیقی زمینه تحقیقاتی فعالی بوده است، محققان بسیاری زمینه کار خود را دراین موضوع قرار داده‌اند. تعداد زیادی از خط مشی‌های کنترلی، روشها، طرحها وکاربردهای عملی در کتابها، مجلات و کنفراسها منتشر شده است. بنابراین فراهم آوردن توصیف کاملی از کنترل تطبیقی در یک پروژه غیرممکن است، پس به توصیف مختصری از محدوده‌ی وسیع کنترل فازی تطبیقی پرداخته می شود.

درساده ترین حالت، کنترل‌کننده‌های فازی تطبیقی، تنها با سیستم های فازی تطبیقی ایجاد می شود که به طور کلی به سه دسته‌ی کنترل فازی تطبیقی مستقیم، غیرمستقیم و ترکیب مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند.

2 - 1 - کنترل فازی تطبیقی مستقیم

کنترل‌کننده‌های فازی تطبیقی مستقیم، از سیستم های فازی تطبیقی به عنوان کنترل‌کننده استفاده می‌کنند [1]. مکانیزم تطبیقی برای تنظیم پارامترهای سیستم فازی تطبیقی به نحوی طراحی می‌شود که سیستم تحت کنترل پایدار شده و عملکرد حلقه بسته مطلوب حاصل شود، کنترل‌کننده‌های فازی تطبیقی مستقیم به عنوان مثال در [1,3,4]، بررسی شده است.

2 - 2 - کنترل کننده فازی تطبیقی غیرمستقیم

برخلاف کنترل‌کننده‌های فازی تطبیقی مستقیم، کنترل‌کننده‌های فازی تطبیقی غیر مستقیم، ازسیستم-های فازی تطبیقی برای مدلسازی سیستم استفاده می‌کنند و کنترل‌کننده با این فرض طراحی می شود که سیستم فازی به خوبی سیستم تحت کنترل را توصیف می‌کند که در [5,6,7] بررسی شده است.

2 - 3 - ترکیب کنترل کننده فازی تطبیقی با دیگرکنترل کننده ها

کنترل‌کننده‌های فازی تطبیقی مستقیم و غیرمستقیم تنها، ساده هستند اما آنها دارای اشکالاتی هستند. لذا در این راستا درسال‌های اخیر، کنترل‌کننده‌های فازی تطبیقی اغلب با دیگر روشهای کنترلی ترکیب می‌شود.

2 - 3 - 1 - ترکیب کنترل تطبیقی مستقیم با غیرمستقیم

در [7] و[8]، روش‌های کنترل فازی تطبیقی ترکیبی بررسی شده است که درآن خروجی کنترل کننده ترکیبی وزندار از کنترل‌کننده‌های فازی تطبیقی مستقیم و غیرمستقیم است. این ترکیب یک چهارچوبی برای آمیختن دانش سیستمی وکنترلی را فراهم می‌آورد.

2 - 3 - 2 - ترکیب کنترل فازی ترکیبی با دیگر کنترل کننده ها به منظور جبران خطای تخمین

در حالت کلی خطای تخمین، هنگامی که توابع غیرخطی با سیستم های فازی تخیمن زده می‌شوند وجود دارد، این خطای تخمین ممکن است، پایدرای و عملکرد سیستم های کنترل فازی تطبیقی تاثیر بگذارد. برای حل این مسئله کنترل‌کننده‌های موجود با دیگر کنترل‌کننده‌ها ترکیب می‌شوند. در [9]، یک روش کنترلی را بیان می‌کند که کنترل‌کننده فازی تطبیقی با کنترل‌کننده مدلغزشی ترکیب شده است، کنترل‌کننده مدلغزشی فازی برای جبرای خطای تخمین طراحی شده است. در[10,11]، کنترل-کننده‌ی فازی تطبیقی همراه با یک ترم کنترل جدید توصیف شده است، ترم کنترل جدید با استفاده از کران خطای تخمین طراحی شده است. این ترم به خروجی کنترل‌کننده اضافه می‌شود تا اثر خطای تخمین را جبران کند. با این حال کران خطای تخمین در عمل به سختی قابل تعیین است. بنابراین درگام بعدی بعضی مکانیزم های تطبیقی برای تخمین بهنگام این کران ها مطرح شد[12و13] .

2 - 3 - 3 - ترکیب کنترل فازی ترکیبی با کنترل فیدبک خروجی

دربسیاری ازکاربردها اندازه‌گیری تمام حالت‌های سیستم تحت کنترل بسیار مشکل بوده و یا غیرممکن است، کنترل پسخور خروجی روشی برای حل این مشکل است. تنها متغیری که لازم است اندازه‌گیری شود خروجی سیستم است و روش‌های کنترل فازی تطبیقی زیادی براساس پسخور خروجی مطرح شده اند [14].

2 - 3 - 4 - ترکیب کنترل فازی تطبیقی با کنترل H_∞

اغتشاشات خارجی نقش مهمی درکاربردهای عملی کنترل ایفا می‌کند که نه تنها عملکرد کنترل را تضعیف می‌کند بلکه ممکن است باعث ناپایداری شود. کنترل بهینه H_∞ روشی است که در تئوری کنترل کلاسیک برای مینیمم کردن تاثیر اغتشاشات بیرونی به کار می‌رود. در [15و16] کنترل‌کننده فازی تطبیقی با روش کنترل H_∞ برای تقلیل اثر اغتشاشات خارجی ترکیب شده است.

2 - 3 - 5 - ترکیب کنترل فازی تطبیقی با کنترل نظارتی

یک کنترل‌کننده فازی تطبیقی گاهی ممکن است به اندازه کافی سریع نباشد. در این حالت امکان دارد متغیرهای حالت سیستم از محدوده‌ی مطلوب خارج شود. این مسئله می‌تواند با اضافه کردن بهره تطبیقی حل شود. با این حل بهره تطبیقی نمی‌تواند خیلی بزرگ باشد. از طرف دیگر افزایش بهره تطبیقی حساسیت به نویز را هم زیاد کرده و باعث نوسان خروجی کنترل‌کننده می شود[1]. بنابراین برای اینکه حالت‌های سیستم تحت کنترل بدون نیاز به بهره تطبیقی بزرگ در محدوده‌ی مطلوب باقی بماند، بعضی محققان [1] و [17] کنترل فازی تطبیقی را یک کنترل نظارتی ترکیب کرده‌اند. این کنترل نظارتی همچنین ترم کنترل دیگری دارد که با فرض دانستن کران بالا و پایین توابع غیرخطی طراحی می شود. هنگامی که حالت‌ها به خارج از محدوده‌ی مطلوب حرکت می‌کنند، کنترل نظارتی وارد عمل شده و حالت ها را مجبور می‌کند که داخل محدوده‌ی مطلوب باقی بمانند.

2 - 3 - 6 - ترکیب کنترل فازی تطبیقی با دیگر روش‌های کنترلی

[18] یک روش کنترل فازی تطبیقی را بیان می‌کند که در آن خروجی کنترل‌کننده ترکیبی از کنترل فازی تطبیقی مستقیم، غیرمستقیم و یک ترم کنترل دیگر، برای جبران خطای تخمین است. کران‌های مورد استفاده در ترم کنترل ساختار متغیر، به صورت تطبیقی تعین می‌شوند. بنابراین دانش اولیه در مورد کران‌ها لازم نیست. [19] ترکیب کنترل فازی تطبیقی مستقیم، غیرمستقیم و کنترل نظارتی را توصیف می‌کند. [20] ترکیب کنترل فازی تطبیقی با ترم کنترل ساختار متغیر و کنترل H_∞ را بیان می کند به طوری که اثر خطای تخمین و اغتشاشات خارجی می‌تواند به اندازه لازم کاهش پیدا کند.

درحالت کلی، کنترل فازی تطبیقی با دیگر روش‌های کنترلی ترکیب می‌شود تا اشکالات موجود در کنترل فازی تطبیقی مستقیم و غیرمستقیم تنها برطرف شود. با این حال از نظر آنالیز پایداری و پیاده-سازی پیچیده‌تر هستند. بنابراین برای یک کابرد خاص، طراح باید تصمیم بگیرد که کنترل فازی تطبیقی را با کدام روش کنترلی ترکیب کند.

2 - 4 - کلاس های مختلف سیستم های غیرخطی

درتئوری کنترل غیرخطی، دسته‌های مختلفی از سیستم‌های غیرخطی در نظر گرفته شده است.کلاس-های مختلف سیستم‌های غیرخطی، مشخصات مختلفی دارند بنابراین به روشهای کنترلی متفاوتی هم

[1] Chattering

نیاز دارند. بعضی روش‌های خوب برای دسته‌ای از سیستم‌های غیرخطی موجود می‌باشد. به عنوان مثال سیستم‌های غیرخطی قابل خطی‌سازی می‌تواند با استفاده از روش‌های خطی‌سازی پسخور کنترل شود. سیستم‌های غیرخطی در فرم پسخور اکید[1] می‌تواند با طراحی پسگام[2] کنترل شود. سیستم‌های غیرخطی که همه متغیرهای حالت آن قابل اندازه‌گیری نیستند با کنترل پسخور می‌تواند کنترل شود و غیره. نتایج بدست آمده درکنترل غیرخطی، محققان را واداشته است تا روش‌های کنترل فازی تطبیقی برای این دسته از سیستم‌ها، بر پایه روش‌های موجود طراحی کنند.

در ادامه کلاس‌هایی از سیستم‌های غیرخطی را که روشهای کنترل فازی تطبیقی، می‌توان به آنها اعمال کرد را بررسی می شوند.

2 - 4 - 1 - سیستم های غیرخطی افاین[3]

تحت شرایطی می‌توانیم پاسخ ورودی- خروجی دسته ای از سیستم های غیرخطی تک ورودی-تک خروجی[4] به فرم زیر دربیاوریم:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = x_{i+1} \ , i = 1, \cdots, n-1 \\ \dot{x}_n = f(\overline{x}) + g(\overline{x})u + d(t) \end{cases} \qquad \textbf{(1 -2)}$$

که $x = [x_1, x_2, ..., x_n]^T \in R^n, u \in R, y \in R$ به ترتیب خروجی، ورودی و متغیرهای حالت هستند. $f(\overline{x}), g(\overline{x})$ توابع نامعلوم مسطح بوده و $d(t)$ اغتشاشات خارجی کراندار است به طوری که $|d(t)| \le d_0$ سیستم‌های غیرخطی که به این فرم می‌تواند بیان شود سیستم‌های غیرخطی افاین نامیده می‌شود که در آن ورودی به صورت خطی در معادلات ظاهر می‌شود.

اگر $f(\overline{x}), g(\overline{x})$ معلوم باشند روش خطی‌سازی پسخور می‌تواند برای طراحی کنترل‌کننده به کار گرفته شود که ساختار عمومی آن به صورت زیراست:

$$u = \frac{1}{g(x)}[-f(x) + v] \qquad \textbf{(2 -2)}$$

که درآن v یک متغیرکنترلی جدید است که در فصل‌های بعدی بیشتر توضیح داده می‌شود. درحالتی که $f(\overline{x}), g(\overline{x})$ نامعلوم باشند کنترل فازی تطبیقی می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد.

---

[1] Strict-feedback
[2] Back stepping
[3] Affine
[4] Siso

[1و7-4] روش‌های کنترل فازی تطبیقی غیرمستقیم برای سیستم‌های غیرخطی افاین را توصیف می-کنند که سیستم‌های فازی تطبیقی $\hat{f}(\overline{x}\,|\,\overline{\theta}_f), \hat{g}(\overline{x}\,|\,\overline{\theta}_g)$ برای تخمین توابع $f(\overline{x}), g(\overline{x})$ به کار می-روند. آنالیز پایداری لیاپانوف برای بدست آوردن قوانین تطبیقی به کار می‌رود. در این روش جوانب احتیاط باید رعایت شود تا کنترلر با صفرشدن $\hat{g}(\overline{x}\,|\,\overline{\theta}_g)$ بی نهایت نشود[1]. به عنوان مثال برای حل این مشکل، ونگ [1] یک الگوریتم برای تنظیم پارامتر $\overline{\theta}_g$ مطرح می‌کند.

[21] و [22]، روش‌های کنترل فازی تطبیقی مستقیم برای سیستم‌های غیرخطی افاین را مطرح کرده-اند. دراین روشها، فقط یک سیستم فازی تطبیقی $\hat{u}(\overline{x}, v\,|\,\overline{\theta})$ استفاده می‌شود تا قانون کنترل $u = \frac{1}{g(x)}[-f(x)+v]$ را تخمین بزند. روشهای کنترل فازی تطبیقی مستقیم مسئله تکین را که در حالت غیرمستقیم، ممکن است با صفر شدن مخرج در قانون کنترل، پیش بیاید، به طور کامل حل می-کنند. با این حال در مقایسه با روش‌های غیرمستقیم، محدودیت‌های بیشتری بر روی بهره کنترلی $g(\overline{x})$ لازم است اعمال شود.

2 - 4 - 2 - سیستم های غیرخطی غیرافاین[2]

سیستم‌های غیرخطی غیرافاین دسته‌ی وسیعی از سیستم‌های غیرخطی هستند که ورودی درآنها به فرم افاین ظاهر نمی‌شود. یک سیستم غیرخطی غیرافاین تک ورودی – تک خروجی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = x_{i+1}\ , i = 1, \cdots, n-1 \\ \dot{x}_n = f(\overline{x}, u) \\ y = x_1 \end{cases} \qquad \textbf{(3 -2)}$$

که درآن $x = [x_1, x_2, ..., x_n]^T \in R^n, u \in R, y \in R$ به ترتیب خروجی، ورودی و متغیرهای حالت هستند. $f(\overline{x}, u)$ یک تابع نامعلوم مسطح می‌باشد. پس می‌توان گفت که سیستم های غیرخطی افاین دسته خاصی از سیستم های غیرخطی غیرافاین می‌باشد.

در سال‌های اخیر، محققان روش‌های کنترل فازی تطبیقی مختلفی را برای کنترل سیستم‌های غیرخطی غیرافاین مطرح کرده‌اند [13] و [23]، به دلیل اینکه ورودی به صورت خطی ظاهر نمی‌شود، روش خطی‌سازی پسخور قابل اجرا نیست. کنترل فازی تطبیقی سیستم‌های غیرخطی غیرافاین، بسیار مشکل و چالش‌برانگیز است. درحالت کلی روش‌های ریاضی پیشرفته‌ای مورد نیاز است.

[1] Singularity
[2] Non-affine