دانشگاه تربیت مدرّس
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق – گرایش کنترل

کنترل چندسطحی سیستم‌های بزرگ‌مقیاس غیرخطی با پارامترهای نامعین

نگارنده:
فرزانه مطلّب‌زاده

استاد راهنما:
دکتر حمید رضا مؤمنی

اسفندماه ۱۳۸۸

اعضای هیأت داوران نسخه نهایی پایان‌نامه آقای/ خانم تحت عنوان:

را از نظر شکل (فرم) و محتوی بررسی نموده و پـذیرش آن را بـرای دریافـت درجـه کارشناسـی‌ارشـد پیشنهاد می‌کنند.

ردیف	اعضای هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
۱	استاد راهنما	دکتر حمیدرضا مؤمنی	دانشیار	
۲	استاد مشاور	دکتر سجاد ازگلی	استادیار	
۳	نماینده تحصیلات تکمیلی			
۴	استاد ناظر	دکتر علی خاکی‌صدیق	استاد	
۵	استاد ناظر	دکتر محمد تقی حمیدی بهشتی	دانشیار	

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

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی 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 هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشند.

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

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین نامه های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری خواهد بود.

نام و نام خانوادگی
تاریخ و امضا

دانشگاه تربیت مدرّس
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق – گرایش کنترل

کنترل چندسطحی سیستم‌های بزرگ‌مقیاس غیرخطی با پارامترهای نامعین

نگارنده:
فرزانه مطلّب‌زاده

استاد راهنما:
دکتر حمید رضا مؤمنی

استاد مشاور:
دکتر سجاد ازگلی

اسفندماه ۱۳۸۸

تقدیم

به پدر و مادر مهربان و گرانقدرم

و به خواهرم، همراه و همیار همیشگی‌ام از نخستین لحظه حیات

تشکر و قدردانی

در به انجام رسیدن این پژوهش، خود را مرهون زحمات تمامی اساتید و معلمان گرامی‌ام در طول سالیان تحصیلم می‌دانم، و همواره عمیقاً سپاسگزار تمامی آن بزرگواران هستم.

به ویژه از اساتید محترم، جناب آقای دکتر مؤمنی و جناب آقای دکتر ازگلی که راهنمایی اینجانب را در این پژوهش بر عهده داشتند، سپاسگزارم.

همچنین از پدر و مادر و خواهر عزیزم به خاطر رهنمون‌ها، همیاری‌ها و دلگرمی‌های همیشگی آنان کمال تشکر را دارم.

چکیده

در این پژوهش، روشی برای کنترل سیستم‌های غیرخطی بزرگ- مقیاس که دارای پارامترهای نامعین می‌باشند، ارائه می‌شود. در این روش، کنترل در دو سطح به سیستم اعمال می‌گردد، که سطح نخست، یک ورودی کنترلی برای خنثی نمودن اثر اندرکنش بین زیرسیستم‌ها، و سطح دوم، یک ورودی کنترلی به منظور پایدارسازی هر یک از زیرسیستم‌ها و حصول کارایی مناسب تولید می‌کند.

سطح دوم کنترل، بر مبنای الگوریتم گام به عقب تطبیقی طراحی می‌گردد. قانون تطبیق به طور همزمان با قانون کنترل بدست می‌آید، بطوریکه پایداری مجانبی به صورت فراگیر، و ردیابی سیگنال‌های مرجع دلخواه توسط خروجی، و نیز همگرایی پارامترهای تخمینی به مقدار حقیقی آنها حاصل می‌شود. برای تعیین مقدار بهینه پارامترهای آزاد کنترلگرها و تخمینگرهای سیستم به طور خودکار، از الگوریتم ژنتیک که یک روش بهینه‌سازی قدرتمند است، استفاده می‌شود.

نهایتاً نشان داده خواهد شد ورودی کنترلی که از مجموع ورودی‌های دو لایه بدست می‌آید، پایداری سیستم کلّی را تضمین می‌نماید. در این روش، تنظیم کنترل در هر یک از زیرسیستم‌ها می‌تواند به طور مستقل صورت گیرد؛ و نیز از آنجایی که اثر اندرکنش در این روش کمینه می‌گردد، کارایی نسبت به روش غیرمتمرکز بهتر می‌باشد.

برای بررسی روش ارائه شده، سیستم‌های آونگ معکوس دوگانه و آونگ معکوس سه‌گانه، که در آنها آونگ‌ها با فنر به یکدیگر متصل شده‌اند، مدلسازی شده، و روش فوق بر آنها اعمال می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی، کارا بودن روش را تأیید می‌نمایند.

واژگان کلیدی: سیستم‌های بزرگ‌مقیاس غیرخطی، رویکرد غیرمتمرکز، کنترل چندسطحی، کنترل گام به عقب تطبیقی، بهینه‌سازی تکاملی.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست نمادها و نشانه‌های اختصاری ..... ج
فهرست نمودارها ..... د
فهرست شکل‌ها ..... ز

فصل ۱- مقدمه ۱
۱-۱- پیشگفتار ۱
۱-۲- مروری بر تاریخچه ۴
۱-۳- هدف و نوآوری‌های این پژوهش ۸
۱-۴- ساختار پایان‌نامه ۹

فصل ۲- سیستم‌های بزرگ- مقیاس و رویکردهای کنترلی مناسب: مفاهیم اولیه ۱۰
۲-۱- آغازیه فصل ۱۰
۲-۲- سیستم‌های بزرگ- مقیاس ۱۱
۲-۳- کنترل غیرمتمرکز ۱۳
۲-۴- کنترل گام به عقب ۱۶
۲-۴-۱- گام به عقب تطبیقی ۱۸
۲-۴-۱-۱- گام به عقب تطبیقی ماژولار بر پایه روش گرادیان ۱۹
۲-۴-۱-۲- گام به عقب تطبیقی مبتنی بر روش لیاپانوف ۲۱
۲-۴-۲- گام به عقب تکاملی ۲۲
۲-۵- جمع‌بندی فصل ۲۴

فصل ۳- کنترل چندسطحی سیستم‌های بزرگ- مقیاس غیرخطی ۲۵
۳-۱- آغازیه فصل ۲۵
۳-۲- بیان مسئله ۲۶
۳-۳- طراحی سیستم کنترل ۲۷
۳-۳-۱- طراحی کنترل سطح اول ۲۷
۳-۳-۲- طراحی کنترل سطح دوم ۲۸
۳-۳-۳- کنترل نهایی ۴۰
۳-۳-۴- بهینه‌سازی کنترل ۴۱
۳-۳-۵- تحلیل پایداری سیستم ۴۳
۳-۴- جمع‌بندی فصل ۴۵

فصل ۴- اعمال روش کنترلی مطرح شده بر دو مسئله نمونه ۴۶
۴-۱- آونگ معکوس دوگانه ۴۶
۴-۱-۱- مدل‌سازی سیستم ۴۶
۴-۱-۲- طراحی کنترل ۴۹
۴-۱-۳- نتایج شبیه‌سازی ۵۳
۴-۲- آونگ معکوس سه‌گانه ۶۴
۴-۲-۱- مدل‌سازی سیستم ۶۴
۴-۲-۲- طراحی کنترل ۶۶
۴-۲-۳- نتایج شبیه‌سازی ۷۰
فصل ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۸۷
۵-۱- نتیجه‌گیری ۸۷
۵-۲- پیشنهادات ۸۹
فهرست مراجع ۹۱

فهرست نمادها و نشانه‌های اختصاری

مشتق تابع y نسبت به زمان	$\dot{y}(t)$
مشتق مرتبه n ام تابع y نسبت به زمان	$y^{(n)}(t)$
مشتق جزئی تابع f نسبت به x	$\frac{\partial f}{\partial x}$
قدر مطلق	$\lvert . \rvert$
نُرم	$\lVert . \rVert$
ترانهاده ماتریس A	A^T
مجموعه اعداد حقیقی	R

فهرست نمودارها

عنوان **صفحه**

نمودار۴-۱: پاسخ‌های زیرسیستم اول با کنترل غیرمتمرکز (ورودی مرجع صفر) ۵۳
نمودار ۴-۲: پاسخ‌های زیرسیستم دوم با کنترل غیرمتمرکز (ورودی مرجع صفر) ۵۴
نمودار ۴-۳: سیگنال ورودی کنترلی با کنترل غیرمتمرکز (ورودی مرجع صفر)..... ۵۴
نمودار۴-۴: پاسخ‌های زیرسیستم اول با کنترل چندسطحی (ورودی مرجع صفر)..... ۵۴
نمودار ۴-۵: پاسخ‌های زیرسیستم دوم با کنترل چندسطحی (ورودی مرجع صفر)..... ۵۵
نمودار ۴-۶: سیگنال ورودی کنترلی با کنترل چندسطحی (ورودی مرجع صفر) ۵۵
نمودار۴-۷: پاسخ‌های زیرسیستم اول با کنترل غیرمتمرکز (ورودی کانال‌ها متفاوت).....۵۶
نمودار ۴-۸: پاسخ‌های زیرسیستم دوم با کنترل غیرمتمرکز (ورودی کانال‌ها متفاوت).....۵۶
نمودار ۴-۹: سیگنال ورودی کنترلی با کنترل غیرمتمرکز (ورودی کانال‌ها متفاوت) ۵۶
نمودار۴-۱۰: پاسخ‌های زیرسیستم اول با کنترل چندسطحی (ورودی کانال‌ها متفاوت) ۵۷
نمودار ۴-۱۱: پاسخ‌های زیرسیستم دوم با کنترل چندسطحی (ورودی کانال‌ها متفاوت) ۵۷
نمودار ۴-۱۲: سیگنال ورودی کنترلی با کنترل چندسطحی (ورودی کانال‌ها متفاوت)..... ۵۷
نمودار۴-۱۳: پاسخ‌های زیرسیستم اول با کنترل غیرمتمرکز تطبیقی (ورودی مرجع صفر)..... ۵۸
نمودار ۴-۱۴: پاسخ‌های زیرسیستم دوم با کنترل غیرمتمرکز تطبیقی (ورودی مرجع صفر)..... ۵۹
نمودار ۴-۱۵: سیگنال ورودی کنترلی با کنترل غیرمتمرکز تطبیقی (ورودی مرجع صفر) ۵۹
نمودار ۴-۱۶: تخمین پارامترها با کنترل غیرمتمرکز تطبیقی (ورودی مرجع صفر)..... ۵۹
نمودار۴-۱۷: پاسخ‌های زیرسیستم اول با کنترل چندسطحی تطبیقی (ورودی مرجع صفر) ۶۰
نمودار ۴-۱۸: پاسخ‌های زیرسیستم دوم با کنترل چندسطحی تطبیقی (ورودی مرجع صفر) ۶۰
نمودار ۴-۱۹: سیگنال ورودی کنترلی با کنترل چندسطحی تطبیقی (ورودی مرجع صفر) ۶۰
نمودار ۴-۲۰: تطبیق پارامترها با کنترل چندسطحی تطبیقی (ورودی مرجع صفر)..... ۶۱
نمودار۴-۲۱: پاسخ‌های زیرسیستم اول با کنترل غیرمتمرکز تطبیقی (ورودی کانال‌ها متفاوت) ۶۲
نمودار ۴-۲۲: پاسخ‌های زیرسیستم دوم با کنترل غیرمتمرکز تطبیقی (ورودی کانال‌ها متفاوت) ۶۲
نمودار ۴-۲۳: سیگنال ورودی کنترلی با کنترل غیرمتمرکز تطبیقی (ورودی کانال‌ها متفاوت).....۶۲
نمودار ۴-۲۴: تطبیق پارامترها با کنترل غیرمتمرکز تطبیقی (ورودی کانال‌ها متفاوت).....۶۳
نمودار۴-۲۵: پاسخ‌های زیرسیستم اول با کنترل چندسطحی تطبیقی (ورودی کانال‌ها متفاوت).....۶۳
نمودار ۴-۲۶: پاسخ‌های زیرسیستم دوم با کنترل چندسطحی تطبیقی (ورودی کانال‌ها متفاوت).....۶۳
نمودار ۴-۲۷: سیگنال ورودی کنترلی با کنترل چندسطحی تطبیقی (ورودی کانال‌ها متفاوت).....۶۴
نمودار ۴-۲۸: تطبیق پارامترها با کنترل چندسطحی تطبیقی (ورودی کانال‌ها متفاوت) ۶۴

نمودار۴-۲۹: پاسخ‌های زیرسیستم اول با کنترل غیرمتمرکز (ورودی مرجع صفر) ۷۱
نمودار ۴-۳۰: پاسخ‌های زیرسیستم دوم با کنترل غیرمتمرکز (ورودی مرجع صفر) ۷۱
نمودار ۴-۳۱: پاسخ زیرسیستم سوم با کنترل غیرمتمرکز (ورودی مرجع صفر) ۷۲
نمودار۴-۳۲: سیگنال ورودی کنترل با کنترل غیرمتمرکز (ورودی مرجع صفر) ۷۲
نمودار۴-۳۳: پاسخ‌های زیرسیستم اول با کنترل چندسطحی (ورودی مرجع صفر) ۷۲
نمودار ۴-۳۴: پاسخ‌های زیرسیستم دوم با کنترل چندسطحی (ورودی مرجع صفر) ۷۳
نمودار ۴-۳۵: : پاسخ‌های زیرسیستم سوم با کنترل چندسطحی (ورودی مرجع صفر) ۷۳
نمودار۴-۳۶: سیگنال ورودی کنترلی با کنترل چندسطحی (ورودی مرجع صفر) ۷۳
نمودار۴-۳۷: پاسخ‌های زیرسیستم اول با کنترل غیرمتمرکز (ورودی کانال‌ها متفاوت) ۷۴
نمودار ۴-۳۸: پاسخ‌های زیرسیستم دوم با کنترل غیرمتمرکز (ورودی کانال‌ها متفاوت) ۷۵
نمودار ۴-۳۹: پاسخ‌های زیرسیستم سوم با کنترل غیرمتمرکز (ورودی کانال‌ها متفاوت) ۷۵
نمودار ۴-۴۰: سیگنال ورودی کنترلی با کنترل غیرمتمرکز (ورودی کانال‌ها متفاوت) ۷۵
نمودار۴-۴۱: پاسخ‌های زیرسیستم اول با کنترل چندسطحی (ورودی کانال‌ها متفاوت) ۷۶
نمودار ۴-۴۲: پاسخ‌های زیرسیستم دوم با کنترل چندسطحی (ورودی کانال‌ها متفاوت) ۷۶
نمودار ۴-۴۳ پاسخ‌های زیرسیستم سوم با کنترل چندسطحی (ورودی کانال‌ها متفاوت) ۷۶
نمودار ۴-۴۴: سیگنال ورودی کنترلی با کنترل چندسطحی (ورودی کانال‌ها متفاوت) ۷۷
نمودار۴-۴۵: پاسخ‌های زیرسیستم اول با کنترل غیرمتمرکز تطبیقی (ورودی مرجع صفر) ۷۷
نمودار ۴-۴۶: پاسخ‌های زیرسیستم دوم با کنترل غیرمتمرکز تطبیقی (ورودی مرجع صفر) ۷۸
نمودار ۴-۴۷: پاسخ‌های زیرسیستم سوم با کنترل غیرمتمرکز تطبیقی (ورودی مرجع صفر) ۷۸
نمودار ۴-۴۸: سیگنال ورودی کنترلی با کنترل غیرمتمرکز تطبیقی (ورودی مرجع صفر) ۷۸
نمودار ۴-۴۹: تخمین پارامترها با کنترل غیرمتمرکز تطبیقی (ورودی مرجع صفر) ۷۹
نمودار۴-۵۰: پاسخ‌های زیرسیستم اول با کنترل چندسطحی تطبیقی (ورودی مرجع صفر) ۷۹
نمودار ۴-۵۱: پاسخ‌های زیرسیستم دوم با کنترل چندسطحی تطبیقی (ورودی مرجع صفر) ۷۹
نمودار ۴-۵۲: پاسخ‌های زیرسیستم سوم با کنترل چندسطحی تطبیقی (ورودی مرجع صفر) ۸۰
نمودار ۴-۵۳: سیگنال ورودی کنترلی با کنترل چندسطحی تطبیقی (ورودی مرجع صفر) ۸۰
نمودار ۴-۵۴: تطبیق پارامترها با کنترل چندسطحی تطبیقی (ورودی مرجع صفر) ۸۰
نمودار۴-۵۵: پاسخ‌های زیرسیستم اول با کنترل غیرمتمرکز تطبیقی (ورودی کانال‌ها متفاوت) ۸۱
نمودار ۴-۵۶: پاسخ‌های زیرسیستم دوم با کنترل غیرمتمرکز تطبیقی (ورودی کانال‌ها متفاوت) ۸۱
نمودار ۴-۵۷: پاسخ‌های زیرسیستم سوم با کنترل غیرمتمرکز تطبیقی (ورودی کانال‌ها متفاوت) ۸۲
نمودار ۴-۵۸: سیگنال ورودی کنترلی با کنترل غیرمتمرکز تطبیقی (ورودی کانال‌ها متفاوت) ۸۲
نمودار ۴-۵۹: تطبیق پارامترها با کنترل غیرمتمرکز تطبیقی (ورودی کانال‌ها متفاوت) ۸۲
نمودار۴-۶۰: پاسخ‌های زیرسیستم اول با کنترل چندسطحی تطبیقی (ورودی کانال‌ها متفاوت) ۸۳
نمودار ۴-۶۱: پاسخ‌های زیرسیستم دوم با کنترل چندسطحی تطبیقی (ورودی کانال‌ها متفاوت) ۸۳

نمودار ۴-۶۲: پاسخ‌های زیرسیستم سوم با کنترل چندسطحی تطبیقی (ورودی کانال‌ها متفاوت)..... ۸۳
نمودار ۴-۶۳: سیگنال ورودی کنترلی با کنترل چندسطحی تطبیقی (ورودی کانال‌ها متفاوت) ۸۴
نمودار ۴-۶۴: تطبیق پارامترها با کنترل چندسطحی تطبیقی (ورودی کانال‌ها متفاوت) ۸۴
نمودار ۴-۶۵: پاسخ‌های زیرسیستم اول با کنترل چندسطحی تطبیقی (m و l نامعین) ۸۵
نمودار ۴-۶۶: پاسخ‌های زیرسیستم دوم با کنترل چندسطحی تطبیقی (m و l نامعین)..... ۸۵
نمودار ۴-۶۷: پاسخ‌های زیرسیستم سوم با کنترل چندسطحی تطبیقی (m و l نامعین).....۸۶

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱: سیستم بزرگ- مقیاس متشکل از چند زیرسیستم ۱۲
شکل ۲-۲: سیستم کنترل متمرکز ۱۳
شکل ۲-۳: سیستم کنترل غیرمتمرکز ۱۴
شکل ۲-۴: شمای کلی سیستم کنترل تطبیقی غیرمستقیم ۱۸
شکل ۴-۱: شمای آونگ معکوس دوگانه ۴۷
شکل ۴-۲: شمای آونگ معکوس سه‌گانه ۶۵

فصل ۱– مقدمه

۱–۱– پیشگفتار

دانش کنترل در دنیای امروز به قدری گسترش یافته که تقریباً می‌توان گفت در تمامی شاخه‌های علوم، اعم از فنّی، زیستی، اجتماعی و اقتصادی وارد شده است. در واقع در هرجایی که مفهوم سیستم وجود داشته باشد و تعریف گردد، نیاز به مدلسازی، و سپس کنترل آن و ارائه روش‌هایی سیستماتیک و به صرفه و متناسب با نیازهای موجود نیز دیر یا زود پدید خواهد آمد.

شواهد بدست آمده نشان می‌دهد که بشر از سه قرن قبل از میلاد مسیح نیز به کنترل سیستم‌ها می‌پرداخته، و از کنترل فیدبک در تنظیم شیرهای شناور استفاده می‌کرده است [۱]. با گذشت زمان و تغییر نیازها، سیستم‌های جدیدی مطرح می‌شدند که کنترل آنها به نحو مطلوب، ارائه روش‌های کنترلی جدیدی را نیز ایجاب می‌نمود. در همین راستا، بسیاری از سیستم‌هایی که در دنیای امروز مشاهده می‌شود، دارای چنان پیچیدگی در ساختار خود می‌باشند که امکان کنترل آنها توسط یک

کنترلگر کلاسیک تنها وجود ندارد. یک گروه از این سیستم‌ها، سیستم‌های بزرگ- مقیاس[1] است. منظور از سیستم‌های بزرگ- مقیاس، سیستم‌هایی است که متشکل از چندین زیرسیستم[2] هستند، بطوریکه رفتار هر زیرسیستم متأثر از رفتار سایر زیرسیستم‌ها باشد [۱]-[۳].

به دلیل وجود محدودیت‌هایی در به کارگیری کنترلگرهای متمرکز پیچیده، استفاده از کنترلگرهای ساده‌تر به منظور کنترل سیستم‌های بزرگ- مقیاس از دیرباز مورد توجه بوده است [۴]. البته از آنجایی که همواره سادگی ساختار و بالا بودن کارایی[3]، در مقابل یکدیگر قرار دارند، روشن است که استفاده از کنترلگرهای ساده‌تر به افت کارایی سیستم حلقه بسته منجر خواهد شد؛ اما در واقع چیزی که در عمل و در کاربردهای صنعتی اهمیت بیشتری دارد، ساده نمودن ساختار کنترل[4] است در شرایطی که یک حدّ معینی از کارایی برآورده شود [۵]. بدین منظور، یکی از رویکردهای مناسب و پراستفاده در کنترل این گونه سیستم‌ها، رویکرد غیرمتمرکز[5] است. در این رویکرد نیازی به تبادل اطلاعات، بین زیرسیستم‌ها نمی‌باشد [۶]. هنگامی که کنترل به صورت غیرمتمرکز به سیستم اعمال شود، خرابی‌های احتمالی در یک زیرقسمت، تأثیر کمتری در زیرقسمت‌های دیگر خواهد داشت.

علیرغم تمام مزایای کنترل غیرمتمرکز، این روش دارای کاستی‌هایی نیز می‌باشد، که مهمترین آنها همان‌طور که گفته شد، افت کارایی ناشی از عدم وجود ارتباط بین زیرسیستم‌ها است [۷]. یکی از روش‌هایی که با اندکی افزودن بر ساختار کنترل، پاسخ ناشی از کنترل غیرمتمرکز را بهبود می‌بخشد، کنترل چندسطحی[6] است. در این روش، یک لایه بالاتر کنترل برای از بین بردن و یا کاستن اندرکنش[7]های بین زیرسیستم‌ها طراحی می‌گردد. ورودی کنترلی در نهایت از مجموع خروجی‌های هر دو لایه بدست می‌آید [۸].

---

[1] Large-Scale Systems
[2] Subsystem
[3] Performance
[4] Control Structure
[5] Decentralized
[6] Multilevel
[7] Interaction

تقریباً همه سیستم‌ها دارای دینامیکی غیرخطی[1] می‌باشند که در بسیاری موارد برای ساده‌سازی ابتدا آنها را خطی می‌کنند و سپس با توجه به مدل خطی شده سیستم، کنترلگر خطی مناسب را طراحی می‌کنند. اما این روش در حالت کلی به دلیل حذف همه جمله‌های غیرخطی، خیلی مناسب نمی‌باشد، علاوه بر آنکه انرژی کنترلی زیادی برای حذف جمله‌های غیرخطی لازم است. در ضمن، اگر خطی‌سازی حول یک نقطه کار انجام گرفته باشد، روشن است که کنترل در سایر نقاط قابل استفاده نخواهد بود و ممکن است به ناپایداری سیستم منجر گردد.

یکی از روش‌های مناسب برای کنترل سیستم‌های غیرخطی، روش گام به عقب[2] است که نه تنها به حذف جمله‌های غیرخطی نمی‌انجامد، بلکه اغلب برای بهبود پاسخ گذرای سیستم حلقه بسته، تعدادی جملات غیرخطی اضافی نیز به سیستم می‌افزاید [۹]. این روش دارای چند بهره[3] می‌باشد که پارامترهای آزاد کنترل می‌باشند. تعیین مقدار مناسب آنها به روش سعی و خطا کار طاقت‌فرسایی است؛ بنابراین استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی در ترکیب با روش گام به عقب برای حلّ مشکل فوق، بسیار مفید و کارساز می‌باشد. بدین ترتیب می‌توان مقدار بهینه بهره‌ها را به صورت خودکار بدست آورد. یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی قدرتمند برای سیستم‌های غیرخطی، الگوریتم ژنتیک[4] می‌باشد [۱۰]. در صورتی که زیرسیستم‌های سیستم بزرگ- مقیاس دارای دینامیک غیرخطی باشند، به کمک این الگوریتم که از الگوریتم‌های تکاملی[5] است، به راحتی می‌توان مقدار مناسب بهره‌های کنترلگر گام به عقب را تعیین نمود.

در بسیاری از موارد، امکان تعیین دقیق پارامترهای سیستم وجود ندارد و یا این پارامترها متغیر با زمان هستند. در این موارد، پیش از مرحله کنترل، می‌باید یک مرحله شناسایی[6] سیستم نیز انجام

---

[1] Nonlinear
[2] Backstepping
[3] Gain
[4] Genetic Algorithm
[5] Evolutionary Algorithms
[6] Identification

شود؛ که این شناسایی می‌تواند به صورت برخط[1] و یا برون‌خط[2] صورت گیرد. هنگامی که عمل شناسایی و کنترل با هم انجام می‌شوند، کنترل را تطبیقی[3] می‌نامیم. می‌توان این روش را با الگوریتم گام به عقب نیز تلفیق نمود و الگوریتم گام به عقب تطبیقی بدست آورد. با کمک این الگوریتم می‌توان سیستم‌های بزرگ- مقیاس متشکل از زیرسیستم‌های غیرخطی با پارامترهای نامعین را به خوبی کنترل نمود (البته در صورتی‌که سیستم شرایط استفاده از الگوریتم گام به عقب را که در ادامه توضیح داده خواهد شد، داشته باشد).

در این پژوهش، روش کنترل چندلایه‌ای مبتنی بر گام به عقب برای سیستم‌های بزرگ- مقیاس غیرخطی که دارای پارامترهای نامعین می‌باشند معرفی می‌شود. الگوریتم تطبیقی که برای تخمین[4] پارامترها به کار می‌رود، یک الگوریتم مبتنی بر لیاپانوف[5] می‌باشد، که در آن از توابع تنظیمگر[6] استفاده شده است. برای اثبات کارایی روش فوق، آن را به مدل آونگ معکوس دوگانه[7] و سه‌گانه، که در آنها آونگ‌ها توسط فنر به یکدیگر متصل هستند، اعمال کرده و نتایج شبیه‌سازی را بررسی می‌نماییم.

۱-۲- مروری بر تاریخچه

به دلیل مشکلات عملی فراوان ناشی از به کارگیری کنترلگرهای متمرکز[8] در کنترل سیستم‌های بزرگ- مقیاس، استفاده از رویکرد غیرمتمرکز برای کنترل این گونه سیستم‌ها از سال‌ها قبل مورد توجه بوده است [۱۱]، [۱۲].

از جمله مسائلی در سیستم‌های بزرگ- مقیاس که در طول سالیان توجه زیادی به آن شده است، مسئله پایداری می‌باشد [۲]، [۱۳]-[۱۶]. در واقع، هدف آن است که با بررسی پایداری در سطح

---

[1] Online
[2] Offline
[3] Adaptive
[4] Estimation
[5] Lyapunov
[6] Tuning Functions
[7] Double Inverted Pendulums
[8] Centralized

زیرسیستم‌ها، در مورد پایداری سیستم اصلی نظر داد. نخستین بحث‌های جدی در این زمینه، با بررسی اینکه آیا می‌توان کنترلگر غیرمتمرکزی یافت که بتواند سیستم را پایدار سازد، سؤالی که به بحث مودهای ثابت غیرمتمرکز[1] انجامید، در [۱۷] مطرح شده است. پیچیدگی‌های محاسبه مودهای ثابت غیرمتمرکز (که برای سیستم‌های خطی نامتغیر با زمان[2] (LTI) تعریف می‌گردند)، در [۱۸] مورد بررسی قرار گرفته است.

استفاده از کنترل غیرمتمرکز غالباً منجر به افت نسبی در کارایی سیستم خواهد شد. روش‌های مختلفی برای مقابله با این موضوع معرفی شده‌اند، که وجه مشترک بین همه آنها این است که تا حدودی اجازه ارتباط بین کانال‌ها داده شود. تعدادی از این روش‌ها که در واقع، نوعی کنترل نیمه‌متمرکز هستند، مانند روش کنترل هم‌پوشان[3] در [۱۹] معرفی شده‌است، که البته اکثراً برای سیستم‌های خطی قابل استفاده می‌باشند. نمونه دیگری از این گونه روش‌ها برای سیستم‌های خطی در [۵] معرفی شده است، که در آن یک مسئله بهینه‌سازی مطرح می‌گردد، که علاوه بر کارایی سیستم حلقه بسته، کمینه شدن ساختار کنترلگر نیز در آن محسوب می‌گردد. در [۲۰] نیز روشی برای بهینه‌سازی سیستم‌های LTI، با در نظر گرفتن ساختار مشخصی برای کنترلگر که قیدهای مسئله بزرگ- مقیاس آن را پدید می‌آورند، ارائه شده و شرایط تبدیل شدن مسئله به یک مسئله بهینه‌سازی محدب[4] در آن بررسی شده است. در این مقاله، همچنین همه کنترلگرهای پایدارساز غیرمتمرکز، بر مبنای روش پارامتریزه کردن یولا در کنترل متمرکز، بررسی شده‌اند. این مسئله برای چندین ساختار نیمه‌متمرکز دیگر نیز که به بهینه‌سازی محدب می‌انجامند، در [۲۱] ارائه شده است.

از دیگر روش‌هایی که می‌توان به منظور بهبود عملکرد کنترل غیرمتمرکز از آن استفاده جست، روش کنترل چندسطحی است. در این روش فرض بر آن است که امکان ایجاد ارتباط بین

---

[1] Decentralized Fixed Modes
[2] Linear Time Invarient
[3] Overlapping Control
[4] Convex Optimization

زیرسیستم‌هایی که دارای اندرکنش بر یکدیگر هستند، وجود دارد، و سپس با طراحی یک لایه کنترل در سطح بالاتر، اثر اندرکنش، کمینه و یا حذف می‌شود [۸]، [۲۲]-[۲۴]. این روش از لحاظ کمتر بودن پیچیدگی کنترلگر، بر روش‌های متمرکز برتری دارد. اگر بنا به هر دلیلی کنترلگر یکی از زیرسیستم‌ها از کار بیفتد، و یا مشکلی در کنترلگر فراگیر[1] بوجود آید، سیستم حلقه بسته همچنان به کار خود به طور قابل قبول، ادامه خواهد داد، هرچند که مسلماً کارایی مقداری افت خواهد کرد. بنابراین، می‌توان گفت سیستم در برابر آشفتگی‌های ساختاری[2] مقاومت بالاتری دارد [۲۳]. از جمله مسائلی که در این رویکرد کنترلی مورد توجه بوده است، بهینه‌سازی سلسله مراتبی[3] است. در این روش‌ها ابتدا در لایه بالاتر یک حدس اولیه از مقدار اثر زیرسیستم‌ها بر روی یکدیگر انجام می‌گیرد و با توجه به آن، هر کدام از زیرسیستم‌ها جداگانه کنترل می‌شوند. سپس مقدار پارامتر اندرکنش در طی یک عملیات تکراری به سمت مقدار بهینه تنظیم می‌گردد [۲]. بهینه‌سازی چندسطحی در [۸] مورد بررسی دقیق قرار گرفت، اما روش ارائه شده در آنجا غالباً برای سیستم‌های خطی قابل اعمال است.

از آنجایی که بسیاری از سیستم‌ها، از جمله سیستم‌های بزرگ- مقیاس، در عمل رفتاری غیرخطی دارند، توسعه روش‌هایی به منظور مهار و کنترل این گونه سیستم‌ها اجتناب ناپذیر است. برای مثال در [۲۵] از روش کنترل ساختار متغیر[4] برای سیستم‌هایی که معادلات هر کدام از زیرسیستم‌ها در آنها به صورت خطی، اما دارای اندرکنش‌هایی غیرخطی هستند، استفاده شده است. در [۲۶] نیز روش مدلغزشی[5] برای کنترل غیرمتمرکز سیستم‌های بزرگ- مقیاس غیرخطی، که رابطه ورودی در آنها به صورت خطی است، به کار رفته است. در [۲۷] نیز روشی بر اساس توابع لیاپانوف، برای طراحی کنترلگرهای کاهش مرتبه یافته برای سیستم‌های بزرگ- مقیاس غیرخطی معرفی شده است.

---

[1] Global
[2] Structural Perturbation
[3] Hierarchical
[4] Variable Structure Control
[5] Sliding Mode