۱۳۰۷
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق–کنترل

طراحی مدل در کنترل‌گر چندگانه بر مبنای معیارهای غیرخطی‌گری و فاصله و پیاده‌سازی بر روی دستگاه pH

توسط:

سید علیرضا محمدی

استاد راهنما:

دکتر علیرضا فاتحی

اساتید مشاور:

دکتر علی خاکی صدیق

مهندس مهرداد حسینی

زمستان ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحیم

تأییدیّه هیات داوران

اعضای هیئت داوران، نسخه نهایی پایان نامه آقای: سید علیرضا محمدی

را با عنوان: طراحی مدل در کنترل‌گر چندگانه بر مبنای معیارهای غیرخطی‌گری و فاصله و پیاده‌سازی بر روی دستگاه pH

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

اعضای هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر علیرضا فاتحی	دانشیار	
۲- استاد مشاور	دکتر علی خاکی صدیق	استاد	
۳- استاد مشاور	مهندس مهرداد حسینی	مربی	
۴- استاد ممتحن (داخلی)	دکتر حمید خالوزاده	دانشیار	
۵- استاد ممتحن (خارجی)	دکتر محمد رضا جاهد مطلق	دانشیار	
۶- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر حمید خالوزاده	دانشیار	

تقدیم

تقدیم به کسانی که هر چه در زندگی‌ام دارم از برکت وجود آنهاست

همسر عزیزم، پدر بزرگوارم و مادر مهربانم

تشکر و قدردانی

خداوند متعال را شکرگزارم که به من این فرصت و توانایی را عطا نمود که در راه کسب علم و دانش قدم بگذارم. بر خود لازم می‌دانم که از زحمات دلسوزانه استاد بزرگوارم، جناب آقای دکتر فاتحی تقدیر و تشکر نمایم. ایشان نه تنها در راستای انجام پروژه به بنده راهنمایی‌های بسیاری کردند، بلکه همواره رفتار و منش محترمانه ایشان را تحسین نموده‌ام. از دید اینجانب محیط علمی فراهم گردیده در آزمایشگاه‌های ایشان علاوه بر اینکه از نظر فراهم بودن امکانات و تجهیزات لازم برای انجام تحقیق و پژوهش محیطی ایده‌آل است، محیطی دوستانه و صمیمانه نیز می‌باشد که روحیه همکاری و کار گروهی را در فضای آن می‌توان حس کرد. همچنین از استاد گرامی جناب آقای دکتر خاکی صدیق نیز به دلیل زحماتشان سپاس گزارم. گذشته از آنکه مرتبه بالای علمی ایشان بر هیچ کسی پوشیده نیست، رفتار بزرگوارانه ایشان نیز لفظ استاد را بیش از پیش برازنده‌شان می‌سازد. از جناب آقای مهندس مهرداد حسینی نیز به دلیل وقت زیادی که برای پاسخ دادن به برخی مشکلات و ابهامات پیش آمده در روال انجام پروژه صرف راهنمایی بنده نمودند کمال تشکر را دارم. در انتها جا دارد که از همه دوستان و عزیزانی که در آزمایشگاه اتوماسیون صنعتی و آزمایشگاه کنترل فرآیندها هریک به گونه‌ای به اینجانب در انجام هرچه بهتر این پروژه یاری رسانده‌اند تشکر نمایم.

چکیده

امروزه استفاده از مدل‌های خطی محلی (Local Linear Models) برای مدل‌سازی یک فرایند غیرخطی عملی بسیار رایج در علم مهندسی کنترل است. هدف از انجام این کار تعمیم دادن تئوری‌ها و ابزار گوناگون و قدرتمند در دسترس برای سیستم‌های خطی، بر روی سیستم‌های غیرخطی می‌باشد. لذا نیاز کاربر به استفاده از روش‌های پیچیده غیرخطی (چه در مدل‌سازی و چه در کنترل) به طرز قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. نحوه تولید و انتخاب مدل‌های خطی مناسب، همواره جزو چالش‌های ذاتی این دسته روش‌ها بوده که در این پروژه عمدتاً به آنها پرداخته شده است. ابتدا با به‌کارگیری چندین معیار غیرخطی‌گری (Nonlinearity Measures)، سعی گردیده که نقاط کاری (Operation Points) فرآیند را که در آنها رفتار غیرخطی‌تری دارد شناسایی کرد. بدیهی است که تخمین مناسب برای چنین نقاطی باید متشکل از تخمین‌های خطی بیشتری باشد. به عبارت دیگر به کمک این معیارها، نقاطی که نیاز به تراکم مدل بیشتر دارند را می‌یابیم. در فاز بعدی اقدام به حذف مدل‌های اضافی می‌نماییم. بدین ترتیب که با بهره‌گیری از معیار فاصله (Gap Metric)، مدل‌هایی را که بیش از اندازه به یکدیگر شبیه هستند را شناسایی و حذف می‌نماییم. این کار علاوه بر کاهش بار محاسباتی، گاه به بهبود عملکرد کنترل‌گر نیز می‌انجامد. در نهایت این دو دسته از معیارها، برای نشان دادن توانایی‌هایشان در تولید بانک مدل برای کنترل‌گر چندگانه، بر روی یک دستگاه کنترل pH آزمایشگاهی پیاده سازی گردیده‌اند.

کلید واژه: کنترل‌گر چندگانه، بانک مدل، معیار غیرخطی‌گری، معیار فاصله، کنترل pH.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست جدول‌ها ..... د

فهرست شکل‌ها ..... و

فصل ۱- مقدمه ۱

۱-۱- پیشگفتار ۱

۱-۲- تاریخچه ۲

۱-۳- ساختار پایان‌نامه ۵

فصل ۲- مدل‌سازی و کنترل چندگانه ۶

۲-۱- مقدمه ۶

۲-۲- انواع کنترل‌گرهای مبتنی بر مدل‌های چندگانه ۹

۲-۲-۱- دسته بندی بر اساس نحوه مشارکت مدل‌ها ۹

۲-۲-۲- دسته بندی بر اساس ویژگی‌های بانک مدل ۱۰

۲-۲-۳- دسته بندی بر اساس چگونگی انتخاب قانون کنترل ۱۰

۲-۲-۴- حالات مرسوم برای کنترل‌گرهای تطبیقی مبتنی بر کنترل چندگانه ۱۱

۲-۳- کلیدزنی در کنترل چندگانه ۱۲

فصل ۳- معیارهای غیرخطی‌گری و معیار فاصله ۱۴

۳-۱- معیارهای غیرخطی‌گری ۱۴

۳-۱-۱- معیارهای مبتنی بر آنالیز همبستگی ۱۴

۳-۱-۲- معیارهای مبتنی بر آنالیز هارمونیک‌ها ۱۶

۳-۱-۳- معیارهای مبتنی بر آنالیز طیف‌های بالاتر فرکانسی ۱۸

۳-۱-۳-۱- مُمان ۱۹

۳-۱-۳-۲- انباشته ۲۰

۳-۱-۳-۳- طیف دوگانه و تابع هم‌پیوستگی دوگانه ۲۰

۳-۱-۳-۴- معیار غیرخطی‌گری ۲۱

۳-۲- معیار فاصله ۲۱

فصل ۴- فرآیند تنظیم pH ۲۴

۴-۱- مقدمه ۲۴

۴-۲- مدل به کار رفته جهت شبیه‌سازی ۲۶
۴-۳- مدل به کار رفته جهت پیاده‌سازی ۲۷
فصل ۵- شبیه‌سازی ۳۱
۵-۱- مقدمه ۳۱
۵-۲- معیارهای غیرخطی‌گری ۳۱
۵-۲-۱- معیارهای مبتنی بر آنالیز همبستگی ۳۲
۵-۲-۲- معیارهای مبتنی بر آنالیز هارمونیک‌ها ۳۳
۵-۲-۳- معیارهای مبتنی بر آنالیز طیف‌های بالاتر فرکانسی ۳۴
۵-۲-۴- مقایسه نتایج ۳۶
۵-۲-۵- مدل‌سازی در نقاط پیشنهادی ۳۶
۵-۳- معیار فاصله ۳۸
۵-۴- طراحی کنترل‌گر برای مدل‌های موجود ۴۱
۵-۴-۱- روش زیگلر-نیکولز ۴۱
۵-۴-۲- روش چِین ۴۲
۵-۴-۳- روش کوهن-کون ۴۲
۵-۴-۴- بررسی نتایج هر یک از روش‌ها ۴۳
۵-۵- نتایج حاصل از اعمال کنترل‌گر چندگانه ۴۶
۵-۵-۱- بانک مدل ۴۶
۵-۵-۲- ناظر کنترلی ۴۷
۵-۵-۳- بلوک کنترل‌گر ۴۷
۵-۵-۴- نتایج شبیه‌سازی ۴۸
۵-۵-۴-۱- تغییرات کوچک در ورودی مرجع ۴۹
۵-۵-۴-۲- تغییرات بزرگ در ورودی مرجع ۶۳
۵-۵-۴-۳- دفع اغتشاش ۶۶
فصل ۶- پیاده‌سازی عملی ۷۱
۶-۱- مقدمه ۷۱
۶-۲- معیار غیرخطی‌گری ۷۳
۶-۲-۱- معیار مبتنی بر آنالیز همبستگی ۷۳
۶-۲-۲- معیار مبتنی بر آنالیز هارمونیک‌ها ۷۴
۶-۳- معیار فاصله ۷۶
۶-۴- طراحی کنترل‌گر برای مدل‌های موجود ۷۷

۶-۵- طراحی کنترل‌گر چندگانه ۷۹
۶-۶- نتایج حاصل از پیاده‌سازی ۸۰
فصل ۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۸۳
۷-۱- نتیجه‌گیری ۸۳
۷-۱-۱- نتایج حاصل از شبیه‌سازی ۸۴
۷-۱-۲- نتایج حاصل از پیاده‌سازی عملی ۸۵
۷-۲- پیشنهادات ۸۶
فهرست مراجع ۸۹
واژه نامه فارسی به انگلیسی ۹۴
واژه نامه انگلیسی به فارسی ۹۸

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۴-۱: مقادیر نامی برخی از پارامترهای مدل Seborg [۶۴] ۲۷
جدول ۵-۱: مقادیر مفروض برای معیارهای غیرخطی‌گری در یک مثال (قسمت اول) ۳۱
جدول ۵-۲: مقادیر مفروض برای معیارهای غیرخطی‌گری در یک مثال (قسمت دوم) ۳۲
جدول ۵-۳: مقادیر pHهایی که در یک سیستم مفروض نیاز به مدل‌سازی در حول آنها داریم ۳۲
جدول ۵-۴: مقادیر حاصل از اعمال NLI3 برای بار اول ۳۲
جدول ۵-۵: مقادیر حاصل از اعمال NLI3 برای بار دوم ۳۳
جدول ۵-۶: مقادیر حاصل از اعمال NLI3 برای بار سوم ۳۳
جدول ۵-۷: نقاط پیشنهادی توسط NLI3 برای مدل‌سازی ۳۳
جدول ۵-۸: مقادیر حاصل از اعمال NLI5 برای بار اول ۳۴
جدول ۵-۹: مقادیر حاصل از اعمال NLI5 برای بار دوم ۳۴
جدول ۵-۱۰: مقادیر حاصل از اعمال NLI5 برای بار سوم ۳۴
جدول ۵-۱۱: نقاط پیشنهادی توسط NLI5 برای مدل‌سازی ۳۴
جدول ۵-۱۲: نقاط پیشنهادی توسط NLI3 و NLI5 برای مدل‌سازی ۳۶
جدول ۵-۱۳: pHهای مورد مدل‌سازی و درصد فلوی ورودی باز متناظر هر یک ۳۷
جدول ۵-۱۴: مقادیر پارامترهای مدل‌های تولید شده مرتبه اول با تاخیر ۳۸
جدول ۵-۱۵: مقادیر معیار فاصله برای مدل‌ها ۳۹
جدول ۵-۱۶: مدل‌های باقیمانده پس از حذف مدل‌های مشابه (مربوط به نقاط پیشنهادی NLI3) ۴۰
جدول ۵-۱۷: مدل‌های باقیمانده پس از حذف مدل‌های مشابه (مربوط به نقاط پیشنهادی NLI5) ۴۰
جدول ۵-۱۸: ضرایب محاسبه شده PID به روش زیگلر-نیکولز ۴۱
جدول ۵-۱۹: ضرایب محاسبه شده PID به روش چِین ۴۲
جدول ۵-۲۰: ضرایب محاسبه شده PID به روش کوهن-کون ۴۳
جدول ۵-۲۱: مدل‌ها و کنترل‌گرهای متناظر بانک مدل برای ۱۰ مدل با فاصله برابر ۴۸
جدول ۵-۲۲: جدول ورودی‌های مرجع (کوچک) ۴۹
جدول ۵-۲۳: جدول ورودی‌های مرجع (بزرگ) ۶۳
جدول ۵-۲۴: مقایسه عملکرد کنترل‌گرها به ازای حالات مختلف ورودی مرجع (کوچک) ۶۵
جدول ۵-۲۵: مقایسه عملکرد کنترل‌گرها به ازای حالات مختلف ورودی مرجع (بزرگ) ۶۶

جدول ۶-۱: مقادیر برخی نامی پارامترهای دستگاه کنترل pH ۷۱
جدول ۶-۲: مقادیر فرمان‌های ارسالی به پمپ باز و pHهای متناظر با هریک در حالت مانا ۷۲
جدول ۶-۳: مقادیر حاصل از اعمال NLI3 ..... ۷۳
جدول ۶-۴: مقادیر حاصل از اعمال NLI5 برای بار اول ۷۵
جدول ۶-۵: مقادیر حاصل از اعمال NLI5 برای بار دوم ۷۵
جدول ۶-۶: مقادیر پارامترهای مدل‌های تولید شده مرتبه اول با تاخیر ۷۵
جدول ۶-۷: مقادیر معیار فاصله برای مدل‌ها ۷۶
جدول ۶-۸: ضرایب محاسبه شده PID ۷۸
جدول ۶-۹: مدل‌ها و کنترل‌گرهای متناظر بانک مدل برای ۸ مدل با فاصله برابر ۸۰
جدول ۶-۱۰: نقاط تشکیل دهنده ورودی مرجع ۸۱
جدول ۶-۱۱: مقایسه عملکرد کنترل‌گرها ۸۲

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱: مراحل طراحی یک سیستم کنترل چندگانه ۷
شکل ۲-۲: دیاگرام عمومی کنترل‌گرهای مبتنی بر مدل‌های چندگانه [۶۴] ۹
شکل ۴-۱: منحنی تتراسیون [۷۴] ۲۵
شکل ۴-۲: نمای کلی فرآیند کنترل پیوسته pH [۷۵] ۲۶
شکل ۴-۳: دستگاه آزمایشگاهی کنترل pH ۲۸
شکل ۵-۱: مقادیر حاصله از NLI8 برای ۵ اجرای متفاوت ۳۵
شکل ۵-۲: مقادیر معیار فاصله برای مدل‌ها ۴۰
شکل ۵-۳: نتیجه حاصل از اعمال PIDها در نقطه کار ۵ ..... ۴۳
شکل ۵-۴: نتیجه حاصل از اعمال PIDها در نقطه کار ۶ ..... ۴۴
شکل ۵-۵: نتیجه حاصل از اعمال PIDها در نقطه کار ۷ ..... ۴۴
شکل ۵-۶: نتیجه حاصل از اعمال PIDها در نقطه کار ۸ ..... ۴۵
شکل ۵-۷: نتیجه حاصل از اعمال PIDها در نقطه کار ۹ ..... ۴۵
شکل ۵-۸: نتیجه حاصل از اعمال PIDها در نقطه کار ۱۰ ..... ۴۶
شکل ۵-۹: پاسخ MC-NLI3 به ورودی مرجع (افزاینده-کوچک)-الف ۵۰
شکل ۵-۱۰: پاسخ MC-NLI3 به ورودی مرجع (افزاینده-کوچک)-ب ۵۰
شکل ۵-۱۱: پاسخ MC-NLI3 به ورودی مرجع (افزاینده-کوچک)-ج ۵۱
شکل ۵-۱۲: پاسخ MC-NLI3 به ورودی مرجع (افزاینده-کوچک)-د ۵۱
شکل ۵-۱۳: پاسخ MC-NLI3 به ورودی مرجع (افزاینده-کوچک)-ه ۵۲
شکل ۵-۱۴: پاسخ MC-NLI3 به ورودی مرجع (افزاینده-کوچک)-و ۵۲
شکل ۵-۱۵: پاسخ MC-NLI5 به ورودی مرجع (افزاینده-کوچک)-الف ۵۳
شکل ۵-۱۶: پاسخ MC-NLI5 به ورودی مرجع (افزاینده-کوچک)-ب ۵۳
شکل ۵-۱۷: پاسخ MC-NLI5 به ورودی مرجع (افزاینده-کوچک)-ج ۵۴
شکل ۵-۱۸: پاسخ MC-NLI5 به ورودی مرجع (افزاینده-کوچک)-د ۵۴
شکل ۵-۱۹: پاسخ MC-NLI5 به ورودی مرجع (افزاینده-کوچک)-ه ۵۵
شکل ۵-۲۰: پاسخ MC-NLI5 به ورودی مرجع (افزاینده-کوچک)-و ۵۵
شکل ۵-۲۱: پاسخ MC-NLI3 به ورودی مرجع (کاهنده-کوچک)-الف ۵۶

شکل ۵-۲۲: پاسخ MC-NLI3 به ورودی مرجع (کاهنده-کوچک)-ب ۵۷
شکل ۵-۲۳: پاسخ MC-NLI3 به ورودی مرجع (کاهنده-کوچک)-ج ۵۷
شکل ۵-۲۴: پاسخ MC-NLI3 به ورودی مرجع (کاهنده-کوچک)-د ۵۸
شکل ۵-۲۵: پاسخ MC-NLI3 به ورودی مرجع (کاهنده-کوچک)-ه ۵۸
شکل ۵-۲۶: پاسخ MC-NLI3 به ورودی مرجع (کاهنده-کوچک)-و ۵۹
شکل ۵-۲۷: پاسخ MC-NLI5 به ورودی مرجع (کاهنده-کوچک)-الف ۵۹
شکل ۵-۲۸: پاسخ MC-NLI5 به ورودی مرجع (کاهنده-کوچک)-ب ۶۰
شکل ۵-۲۹: پاسخ MC-NLI5 به ورودی مرجع (کاهنده-کوچک)-ج ۶۰
شکل ۵-۳۰: پاسخ MC-NLI5 به ورودی مرجع (کاهنده-کوچک)-د ۶۱
شکل ۵-۳۱: پاسخ MC-NLI5 به ورودی مرجع (کاهنده-کوچک)-ه ۶۱
شکل ۵-۳۲: پاسخ MC-NLI5 به ورودی مرجع (کاهنده-کوچک)-و ۶۲
شکل ۵-۳۳: پاسخ MC-NLI3 به ورودی مرجع (افزاینده-بزرگ) ۶۳
شکل ۵-۳۴: پاسخ MC-NLI3 به ورودی مرجع (کاهنده-بزرگ) ۶۴
شکل ۵-۳۵: پاسخ MC-NLI5 به ورودی مرجع (افزاینده-بزرگ) ۶۴
شکل ۵-۳۶: پاسخ MC-NLI5 به ورودی مرجع (کاهنده-بزرگ) ۶۵
شکل ۵-۳۷: اثر اغتشاش قطع فلوی ورودی بافر بر عملکرد MC-NLI3 ..... ۶۶
شکل ۵-۳۸: اثر اغتشاش قطع فلوی ورودی بافر بر عملکرد MC-NLI5 ..... ۶۷
شکل ۵-۳۹: اثر اغتشاش کم شدن فلوی ورودی باز بر عملکرد MC-NLI3 ..... ۶۷
شکل ۵-۴۰: اثر اغتشاش کم شدن فلوی ورودی باز بر عملکرد MC-NLI5 ..... ۶۸
شکل ۵-۴۱: اثر اغتشاش افزودن باز به مخزن باز بر عملکرد MC-NLI3 ..... ۶۸
شکل ۵-۴۲: اثر اغتشاش افزودن باز به مخزن باز بر عملکرد MC-NLI5 ..... ۶۹
شکل ۵-۴۳: اثر اغتشاش خنثی شدن تدریجی اسید بر عملکرد MC-NLI3 ..... ۶۹
شکل ۵-۴۴: اثر اغتشاش خنثی شدن تدریجی اسید بر عملکرد MC-NLI5 ..... ۷۰
شکل ۶-۱: مقادیر معیار فاصله برای مدل‌ها ۷۷
شکل ۶-۲: حلقه کنترل با اشباع در عمل‌گر ۷۹
شکل ۶-۳: نتایج اعمال کنترل‌گرهای MC-NLI و MC-EQ8 به سیستم pH ۸۲

فصل ۱– مقدمه

۱–۱– پیشگفتار

دانش مهندسی کنترل را می‌توان امروزه جزو لاینفک بسیاری از علوم و رشته‌های مهندسی دیگر به حساب آورد. از رشته‌های مهندسی برق، مکانیک، مهندسی پزشکی و هوافضا گرفته، تا رشته‌هایی چون مهندسی شیمی و متالورژی هر یک به گونه‌ای وام‌دار علم کنترل می‌باشند. مهندسان کنترل عهده‌دار نقش به‌سزایی در فرآیند تولید هر آنچه که در زندگی روزمره خود می‌بینیم هستند، خواه مراحل تولید بتن به کار رفته در یک سازه عظیم باشد و خواه پروسه ساخت تراشه موجود در یک گوشی تلفن همراه.

کنترل کلاسیک و یا به عبارت دیگر کنترل سیستم‌های خطی تغییر ناپذیر با زمان[1] (LTI) جزو بنیادی‌ترین روش‌های مطرح در زمینه کنترل می‌باشد که علیرغم سادگی توانایی‌های بسیاری دارد. نکته مهم در استفاده از این تئوری در نظر گرفتن این واقعیت است که تقریبا همه سیستم‌های حقیقی دارای ماهیتی غیرخطی و نیز تغییرپذیر با زمان‌اند (هرچند بسیار کند). به علاوه گاه خطاها یا اغتشاشاتی ناگهانی و بزرگ نظیر از کار افتادن قسمتی از سیستم چنان مدل را دستخوش تغییرات می‌کنند که یک کنترل‌گر کلاسیک از انجام وظیفه کنترلی خود باز می‌ماند. برای مقابله با چنین حالاتی، کنترل‌گرهای پیچیده‌تری نظیر کنترل‌گر مقاوم، کنترل‌گر تطبیقی، کنترل‌گر هوشمند و یا سایر انواع جدیدتر کنترل‌گرها ابداء و مورد استفاده قرار گرفتند.

حال فرض کنیم که سیستم یا فرآیند مورد نظر ما به گونه‌ای است که قرار است با تغییرات سریع و ناگهانی مواجه شود. تغییراتی نظیر تغییر سریع و بزرگی در ورودی مرجع، تغییر ناگهانی سیستم بین دو نقطه کار به دلیل ماهیت سیستم، یک خطا و یا اغتشاشی بزرگ که به سیستم وارد می‌شود. در چنین مواردی کنترل‌گر کلاسیک به وضوح گزینه مناسبی نمی‌باشد. کنترل‌گر تطبیقی نیز چون برای تطابق نیاز به زمان دارد، یا پس از رفتار گذرای نامطلوب به کندی کنترل سیستم را در دست می‌گیرد و یا محکوم به ناپایداری است. کنترل‌گر مقاوم نیز تنها با فرض اینکه این تغییرات رخ داده در محدوده مقاومت آن باشد می‌تواند از پس وظیفه خود برآید اما به قیمت کاهش عملکرد و هدر رفتن هزینه که از ملزومات همه کنترل‌کننده‌هایی می‌باشد که رویکردی محافظه‌کارانه دارند. در این حالت می‌توان به سراغ ایده کلی کنترل‌گر چندگانه[2] رفت. در این گونه از کنترل‌گرها، با تقسیم مدل سیستم به چندین مدل، نامعینی‌ها

[1] Linear Time-Invariant

[2] Multiple-Model Controller

نیز به قسمت‌های کوچک‌تری شکسته می‌شوند. حال اگر این مجموعه مدل تنها شامل مدل‌های خطی باشد، می‌توان از ابزار کنترل خطی نیز علیرغم ماهیت غیرخطی یا تغییرپذیر با زمان بودن سیستم بهره برد.

برخی سوالات پیرامون اینگونه روش‌ها مطرح است نظیر اینکه توزیع مدل‌های خطی باید چگونه باشد؟ در کدام نقاط به مدل‌های بیشتری نیاز داریم؟ آیا یک مجموعه مدل در دسترس بهینه بوده یا اینکه برخی از مدل‌های آن اضافه و تکراری‌اند و نقشی در فرآیند کنترل ایفا نمی‌کنند؟ در پروژه پیش رو، سعی گردیده که برخی راه‌کارها برای پاسخ به این سوالات در قالب شبیه سازی و نیز برروی یک سیستم واقعی پیاده‌سازی گردیده و نتایج حاصله مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد.

۱-۲- تاریخچه

به طور کلی می‌توان مراحل انجام شده در این پروژه را به سه زمینه مختلف در علم کنترل نسبت داد. لذا در این بخش نیز به بررسی اجمالی تاریخچه هر یک خواهیم پرداخت که شامل مدل‌های چندگانه، معیار غیرخطی‌گری و معیار فاصله می‌باشد. همچنین در انتها به طور مختصر برخی روش‌هایی را که تا کنون به منظور کنترل pH به کار گرفته شده‌اند مرور می‌نماییم.

استفاده از ایده مدل‌های چندگانه ابتدا در قالب فیلترهای کالمن چندگانه و به منظور تخمین تطبیقی مبتنی بر مدل‌های چندگانه[1] (MMAE) در [۱] و [۲] به کار برده شد. در [۳] شرایطی جهت عملکرد مناسب MMAE پیشنهاد گردیده است. در [۴] سعی گردیده که روشی مقاوم مبتنی بر مدل‌های چندگانه برای تخمین زدن ارائه گردد. همچنین ایده به‌کارگیری ساختار متغیر در [۵] به منظور بهبود قدرت تخمین مدل‌های چندگانه معرفی گردید و در سری مقالات [۶]، [۷]، [۸]، [۹] و [۱۰] از جهات گوناگونی مورد بررسی قرار گرفت. در [۱۱] از MMAE برای تشخیص و شناسایی خطای سنسور یا عملگر استفاده گردیده و [۱۲] آن را به عنوان ابزار شناسایی نویز فرآیند به کار می‌برد. لازم به ذکر است که ایده استفاده از مدل‌های چندگانه به دلیل توان بالا در ساده‌سازی سیستم‌های پیچیده، در کاربردهای عملی نیز توجه زیادی را به خود جلب نموده است که در اینجا جهت نشان دادن گستردگی کاربردهای آن، تنها به برخی از نمونه‌های عملی اشاره می‌کنیم. در [۱۳] از ترکیب آن با شبکه عصبی توابع مبتنی بر شعاع[2] (RBF) برای مدل‌سازی درهم ریختگی دریا[3]، در [۱۴] برای مدل‌سازی یک ژنراتور بخار صنعتی، در [۱۵] از آن برای مدل‌سازی و کنترل سیستم هواپیمای F-8C و در [۱۶] از ایده مشابهی تحت عنوان

[1] Multiple-Model Adaptive Estimation
[2] Radial-Basis Function
[3] Sea Clutter Modeling

کنترل‌گر پیش‌بین مبتنی بر مدل[1] (MPC) چندگانه جهت کنترل فشار شریانی به کمک تزریق دارو استفاده گردیده است. همچنین کاربردهایی در زمینه روباتیک [۱۷]، نیروگاه خورشیدی [۱۸]، راکتور شیمیایی [۱۹]، توربین بویلر [۲۰]، تفکیک کننده صنعتی [۲۱]، ستون تقطیر [۲۲] و کنترل pH [۲۳] را می‌توان به دیگر موارد این کاربردها افزود.

به دلیل ماهیت غیرخطی تقریبا همه سیستم‌های واقعی، تست‌های گوناگونی برای تشخیص غیرخطی‌گری یا میزان آن ابداء و امتحان گردیده است. برای مثال یکی از انواع تست‌های غیرخطی‌گری ابتدایی در [۲۴] پیشنهاد گردیده که در آن با اعمال یک موج سینوسی تک فرکانسی با دامنه افزاینده، خروجی را برای یافتن اعوجاج[2] بررسی می‌نمایند که نشانگر رفتار غیرخطی می‌باشد. اصولا تست‌های غیرخطی‌گری متفاوت را می‌توان به دو دسته کلی روش‌های پارامتری[3] و روش‌های غیر پارامتری[4] تقسیم نمود. در یک رویکرد پارامتری، اعوجاج غیرخطی بر حسب بردار پارامتر θ تعریف می‌شود که مقادیر آن برای ما ناشناخته است. مقدار این اعوجاج‌ها با صفر شدن بردار θ، صفر می‌شود [۲۵]. برای مواردی از روش‌های غیرپارامتری در حوزه زمان می‌توان به [۲۶] و [۲۷] اشاره کرد. البته لازم به ذکر است که در واقع این دسته از روش‌ها بیشتر در حوزه فرکانس به کار گرفته می‌شوند. برای اولین بار ایده استفاده از طیف‌های بالاتر فرکانسی[5] (HOS) در [۲۸] برای اندازه‌گیری میزان انحراف از رفتار خطی به کار گرفته شد. سپس در [۲۹] و [۳۰] این روش با معرفی نوعی شاخص آماری بهبود داده شد. هرچند غالب مقالات در این زمینه از تحلیل طیفی مرتبه دو[6] برای تشخیص غیرخطی‌گری استفاده کرده‌اند، می‌توان روش‌های دیگری را نیز در این میان یافت. روش‌هایی نظیر روش چگالی طیفی خطی[7] [۳۱]، روش همبستگی خطی[8] [۳۲]، روش همبستگی غیرخطی[9] [۳۳] و روش همبستگی درجات بالاتر[10] [۳۴] نمونه‌هایی از روش‌های ذکر شده هستند. و در نهایت در [۳۵] نیز مرور جامعی بر تعداد قابل توجهی از این روش‌ها انجام گرفته است. مرجع [۳۶] مقایسه کاملی بین بسیاری از روش‌های اندازه‌گیری میزان غیرخطی‌گری انجام داده است. این مرجع مبنای روش‌های اندازه‌گیری میزان غیرخطی‌گری به کار رفته در این پروژه می‌باشد.

---

[1] Model Predictive Control
[2] Distortion
[3] Parametric Methods
[4] Non-Parametric Methods
[5] Higher Order Spectra
[6] Bispectrum Analysis
[7] Linear Spectral Density
[8] Linear Correlation
[9] Non-linear Correlation
[10] Higher Order Correlation

معیار فاصله برای سنجش میزان نزدیکی دو عملگر به یکدیگر نخستین بار در [۳۷] عنوان گردیده و در [۳۸] تکمیل شد. این معیار برای اولین بار توسط [۳۹] وارد علم کنترل گردید و از آن برای سنجش تحمل سیستم حلقه بسته در برابر عدم قطعیت‌ها استفاده شد. در [۴۰] نشان داده شده است که این معیار بسیار توانمندتر از معیارهای مبتنی بر نرم می‌تواند فاصله دو سیستم خطی را بسنجد. سپس در [۴۱] روشی برای محاسبه مقداردقیق این معیار ارائه گردید. [۴۲] به بررسی ویژگی‌های معیار فاصله برای سیستم‌های خطی می‌پردازد. تعمیم این معیار برای استفاده در سیستم‌های خطی متغیر با زمان نیز در [۴۳] مطرح گردیده است. همچنین معیاری تحت عنوان ν–Gap در [۴۴] مطرح گردیده که برتری‌هایی نسبت به معیار رایج فاصله دارد. معیار فاصله برای نخستین بار در [۴۵] برای استفاده همراه با ایده مدل‌های چندگانه پیشنهاد گردید. نمونه‌های دیگری از چنین کاربردی را در سالهای اخیر در [۴۶] و [۴۷] نیز می‌توان مشاهده کرد. همچنین در [۴۸]، علاوه بر ارائه معیار جدیدی که از ارتقاء دادن معیار ν–Gap برای سنجش فاصله بدست می‌آید، الگوریتم آنلاین جدیدی برای تولید بانک مدل با بهره‌گیری از معیارهای غیرخطی‌گری و فاصله پیشنهاد گردیده است.

فرآیند کنترل pH به عنوان یک فرآیند شیمیایی پرکاربرد، توجه زیادی را در مهندسی کنترل به خود جلب نموده و تا کنون روش‌های حلقه بسته بسیاری برای کنترل آن پیشنهاد گردیده‌اند. در [۴۹] مرور کاملی بر روی بسیاری از این روش‌های گوناگون صورت پذیرفته است. در همان مرجع ذکر گردیده که از آنجایی که اکثر فرآیندهای کنترل pH به شدت بافر می‌شوند، تقریبا خطی هستند لذا کنترل‌گر کلاسیک PID با پارامترهای ثابت جزو رایج‌ترین کنترل‌گرهای به کار رفته برای این فرآیند می‌باشد. دسته‌ای از روش‌های کنترل pH مبتنی بر ویژگی‌های شیمیایی فرآیند pH می‌باشند. از جمله این روش‌ها می‌توان به آنهایی که بر پایه تئوری مدل‌سازی "هم‌ارزی اسید قوی" ارائه گردیده‌اند اشاره نمود نظیر [۵۰]، [۵۱] و [۵۲]. در این روش‌ها از معکوس منحنی تتراسیون تطبیقی شناسایی شده برای خطی‌سازی فرآیند استفاده کرده و در نهایت به کمک یک کنترل‌گر PI با پارامترهای ثابت pH را کنترل می‌کنند. برخی از روش‌ها نیز بر ایده "نامتغیرهای واکنش" استوارند. از این ایده در [۵۳] برای خطی‌سازی خروجی و اعمال کنترل‌گر مدل مرجع استفاده گردیده است. در [۵۴] و [۵۵] از کنترل‌گرهای غیرخطی Backstepping برای کنترل فرآیند pH استفاده گردیده است. همچنین در [۵۶] فیدبک رله‌ای را برای تنظیم پارامترهای کنترل‌گر PI به کار برده است. همچنین کنترل‌گرهای متنوع دیگری نظیر کنترل‌گر تطبیقی بهینه PI [۵۷]، کنترل‌گر خود تنظیم حداقل واریانس [۵۸]، کنترل‌گر تطبیقی مدل مرجع [۵۹]، کنترل‌گر پیش بین مبتنی بر مدل [۶۰]، کنترل‌گر ماتریس دینامیکی [۶۱]، شبکه عصبی پیش‌بین [۶۲]، کنترل‌گر تطبیقی PID مبتنی بر شبکه عصبی [۶۳] و بسیاری از روش‌های کنترلی دیگر هریک بر روی فرآیند کنترل pH پیاده‌سازی گردیده‌اند.

همانگونه که ذکر گردید، در این پروژه سعی گردیده که با استفاده توام از معیارهای غیرخطی‌گری و معیارفاصله، الگوریتمی به منظور طراحی هرچه بهتر بانک مدل در کنترل‌گرهای چندگانه ارائه گردد. تا جایی که نگارنده این پایان‌نامه اطلاع دارد، این روش تا کنون جز در [۴۸] در هیچ مرجع دیگری استفاده نگردیده است. بدیهی است که در این صورت پیاده‌سازی عملی آن نیز برای اولین بار در این پروژه انجام گرفته است. همچنین به طور کلی در جستجوهای صورت گرفته، هیچ مرجعی یافت نگردید که از معیارهای سنجش غیرخطی‌گری برای پیاده‌سازی عملی بر روی دستگاه واقعی کنترل pH استفاده گردیده باشد.

۱-۳- ساختار پایان نامه

پس از فصل اول که به مقدمه اختصاص داده شده است، در فصل دوم مروری اجمالی خواهیم داشت بر ایده مدل‌سازی چندگانه و کنترل‌گرهای چندگانه که در این پروژه از آنها در طراحی کنترل‌گر استفاده گردیده است. فصل سوم به بررسی معیارهای غیرخطی‌گری می‌پردازد و نکات لازم از جمله نقاط ضعف و قوت هر یک و نیز پایه‌های ریاضی آنها را ذکر می‌کند. در همین فصل به توضیحاتی در مورد معیار فاصله و نحوه محاسبه آن نیز خواهیم پرداخت. فصل چهارم به بررسی فرآیند تنظیم pH و همچنین دستگاه آزمایشگاهی کنترل pH به کار رفته در این پروژه اختصاص داده شده است. فصول پنجم و ششم به ترتیب مربوط به نتایج حاصل از شبیه سازی‌های انجام شده و نتایج عملی حاصل از پیاده‌سازی بر روی دستگاه آزمایشگاهی موجود در آزمایشگاه کنترل فرآیند دانشکده مهندسی برق می‌باشد. در نهایت فصل هفتم به عنوان فصل پایانی، جمع بندی و نتیجه‌گیری و همچنین پیشنهاداتی برای هرچه بهتر شدن پروژه‌های آتی مرتبط را در بر می‌گیرد.

فصل ۲– مدل‌سازی و کنترل چندگانه

۲–۱– مقدمه

در مورد اکثر سیستم‌های واقعی، معمولا مدل‌سازی دقیق سیستم در تمام نقاط کاری، سخت و یا حتی غیر ممکن است. دلایل آن را می‌توان این گونه بیان کرد:

۱- اکثر فرایندهای واقعی ذاتا غیرخطی هستند و تعیین مدل غیرخطی نیز برای آنها (اگر ناممکن نباشد) بسیار دشوار است.

۲- نمی‌توان سیستمی را یافت که واقعا تغییر ناپذیر با زمان باشد و عوامل محیطی یا فرسودگی‌های تدریجی تمامی سیستم‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهند.

۳- برخی از اغتشاشات ناگهانی و بزرگ بیرونی که تغییرات بزرگی در سیستم ایجاد می‌کنند نظیر خرابی قسمتی از سیستم و یا تغییرات دما در اثر فرایندهای شیمیایی باعث دگرگونی مدل سیستم می‌شوند.

به طور کلی کنترل فرایندهایی که دارای تغییرات ناگهانی و بزرگ در پارامترها می‌باشند، عملی دشوار می‌باشد. اگر در چنین مواردی از کنترل‌گرهای کلاسیک با ساختار ثابت استفاده نماییم، همواره امکان ناپایداری سیستم بر اثر چنین تغییرات شدیدی وجود دارد. کنترل‌گرهای تطبیقی متداول نیز معایبی دارند نظیر:

۱- محدود بودن سرعت الگوریتم شناسایی و در نتیجه الگوریتم تطابق که ممکن است به کند شدن سیستم بیانجامد.

۲- وجود محدودیت‌هایی در شناساگر موجود در کنترل‌گر که تاثیر شدیدی بر عملکرد سیستم دارد (نظیر حساسیت آن به اغتشاش خارجی و نویز اندازه‌گیری).

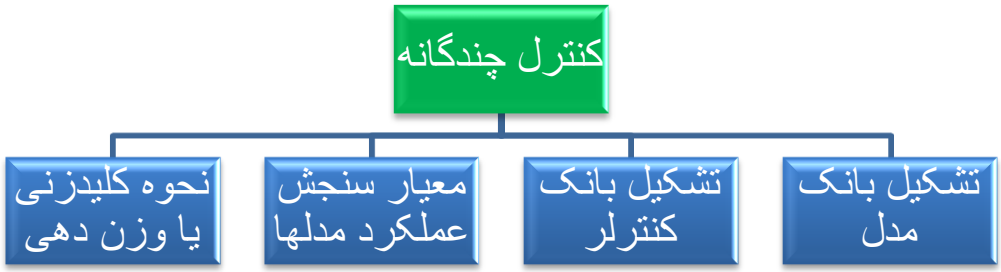
۳- عدم وجود حافظه در سیستم‌های کنترلی و در نتیجه تکرار رفتارهای گذرای نامناسب پیشین.

۴- اثبات پایداری دشوار و نیازمند ارضای شرایطی سخت‌گیرانه و محدود کننده.

اگر بخواهیم به سراغ کنترل‌گرهای مقاوم با پارامترهای ثابت برویم، نیز به دلیل محافظه کاری بیش از حد این نوع کنترل‌گرها، نمی‌توان انتظار عملکرد مطلوبی از سیستم داشت. در چنین مواردی استفاده از ایده کنترل چندگانه می‌تواند گره‌گشا باشد. این روش را می‌توان راه‌حلی برای غلبه بر ضعف کنترل‌گرهای تطبیقی کلاسیک دانست. در این روش نامعینی پارامتری سیستم مورد نظر به مجموعه‌ای از نامعینی‌های کوچک‌تر شکسته می‌شود. به لطف این گروه از کنترل‌گرها، می‌توان یک سیستم غیرخطی را با استفاده از مجموعه‌ای از مدل‌های خطی، مدل‌سازی نمود که در نتیجه باعث اعتباربخشی به تئوری کنترل خطی در

حوزه سیستم‌های غیر خطی می‌گردد. استفاده از مدل‌های چندگانه، روشی مناسب برای تخمین، مدل‌سازی، شناسایی و کنترل سیستم‌های غیرخطی است به ویژه در مواردی که سیستم پیچیده بوده و آگاهی ما از آن کم باشد. در این روش به دلیل محاسبات محلی، بار محاسباتی کاهش می‌یابد. به علاوه اینکه قابلیت‌های آموزش، یادگیری، تطابق و نیز استفاده از تجربیات قبلی (آگاهی‌های فیزیکی، دانش فرد خبره، تجربه مدل‌سازی قبلی و ...) را می‌توان به این الگوریتم اضافه نمود.

ایده کلی این نوع کنترل‌گرها بدین صورت می‌باشد که یک بانک مدل و یک بانک کنترل کننده داریم. در هر زمان تابع کلیدزنی تصمیم می‌گیرد که در حال حاضر کدام یک از مدل‌های بانک مدل، شبیه‌ترین عملکرد را به سیستم واقعی دارد و سپس کنترل‌گر متناظر آن را از بانک کنترل‌گرها انتخاب نموده، به عنوان کنترل‌گر به سیستم اصلی اعمال می‌نماید. در رویکردی مشابه، می‌توان به جای تابع کلیدزنی از تابع وزن‌دهی برای تصمیم گیری استفاده نمود. تابع وزن‌دهی بر اساس میزان مشابهت مدل‌ها به سیستم اصلی، فرمان کنترلی مربوط به کنترل‌گر متناظر هر یک را در ضریب وزن‌دهی خاصی ضرب نموده و حاصل جمع همه فرمان‌های کنترلی وزن داده شده به عنوان فرمان کنترلی به سیستم اعمال می‌شود. مراحل طراحی یک سیستم کنترل‌گر چندگانه را می‌توان در شکل ۲-۱ مشاهده نمود.



شکل ۲-۱: مراحل طراحی یک سیستم کنترل چندگانه

برای روشن‌تر شدن مفهوم کنترل‌گرهای چندگانه، می‌توان مثال زیر را به کار برد که در آن فرض گردیده است کنترل‌گر در نقش یک فرد بوده و سیستمی که می‌خواهیم کنترل نماییم یک فعالیت است. در نتیجه داریم:

- **کنترل‌گر غیرچندگانه:** بهترین فرد از گروه را بر اساس معیار خاصی انتخاب کرده و به انجام فعالیت مورد نظر می‌گماریم، فارغ از اینکه فعالیت مورد نظر را چگونه انجام می‌دهد.