۱۳۰۷
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق–کنترل

اشتراک‌گذاری حالت در سیستم‌های چندمتغیره و کاربرد آن در کنترل کلیدزنی

استاد راهنما:

دکتر علی خاکی صدیق

نگارش:

هادی صادقی شرامین

بهار ۱۳۸۹

بسم الله الرحمن الرحیم

تقدیم به

پدر عزیز و مادر مهربانم

آنان که وجودم برایشان همه رنج است و وجودشان برایم همه مهر

زمان بی‌کرانه را

تو با شمار گام عمر ما مسنج

به پای او دمی است این درنگِ درد و رنج

به سان رود

که در نشیب دره سر به سنگ می‌زند

رونده باش

امید هیچ معجزی ز مرده نیست

زنده باش.

تائیدیه هیات داوران

هیات داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان: **اشتراک‌گذاری حالت در سیستم‌های چندمتغیره و کاربرد آن در کنترل کلیدزنی**

توسط آقای **هادی صادقی شرامین** صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته: **مهندسی برق** گرایش: **کنترل** با رتبه: **الف** مورد تائید قرار می‌دهند.

۱. استاد راهنما	آقای دکتر علی خاکی صدیق	امضاء .....
۲. استاد ارزیاب	آقای دکتر حمیدرضا تقی‌راد	امضاء .....
۳. استاد ارزیاب	آقای دکتر فرزاد رجایی	امضاء .....

اظهارنامه دانشجو

اینجانب هادی صادقی شرامین دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق گرایش کنترل دانشکده برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می نمایم که تحقیقات ارائه شده در پایان‌نامه با عنوان "اشتراک‌گذاری حالت در سیستم‌های چندمتغیره و کاربرد آن در کنترل کلیدزنی" با راهنمایی استاد محترم جناب آقای دکتر علی خاکی صدیق، توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده در این پایان‌نامه مورد تائید می‌باشد و در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. بعلاوه گواهی مینمایم که مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده و در تدوین متن پایان‌نامه چارچوب مصوب دانشگاه را به طور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو

تاریخ

حق چاپ و تکثیر و مالکیت بر نتایج

۱. حق چاپ و تکثیر این پایان‌نامه متعلق به نویسنده آن می‌باشد. هرگونه کپی‌برداری به صورت کل پایان‌نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می‌باشد.

ضمناً متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

۲. کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد و بدون اجازه کتیب دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مراجع مجاز نمی‌باشد.

تقدیر و تشکر

خداوند متعال را شاکرم که در تمامی مراحل زندگی به من صبر و استقامت عطا نمود تا بتوانم مشکلات را پشت سر گذاشته، وظایفم را انجام دهم و در انجام این وظایف قصور و کوتاهی به عمد مرتکب نشوم.

از پدر و مادر و خانواده‌ی مهربان و دلسوزم که در تمام مراحل زندگی و بویژه در انجام این پروژه مشوق و یاری‌رسان من بوده‌اند سپاسگزارم. برای آنها سلامتی و سربلندی آرزومندم و آرزو دارم بتوانم ذره‌ای از محبت‌های بی‌دریغ‌شان را جبران کنم.

بی‌شک انجام این پروژه بدون راهنمایی‌ها و حمایت‌های استاد عزیزم آقای دکتر علی خاکی صدیق برای من ناممکن بود. از ایشان کمال تشکر و قدردانی را دارم. همچنین از استاد گرامی آقای دکتر علی‌رضا فاتحی که در مراحل مختلف پروژه از راهنمایی‌های ارزنده ایشان بهرمند شدم، سپاسگزارم.

از یکایک دوستانم در گروه پژوهشی APAC که هر کدام به نحوی مرا در طول تحصیل و همچنین در انجام این پروژه یاری رساندند تشکر می‌کنم. از آقایان محمد قاضی مغربی، امیررضا نشاسته ریز، جعفر شالچیان، پیمان باقری، جلیل شرفی، محسن معبودی، علی شمس الدین‌لو، وحید مردانلو، محمد عبدالله‌پوری و خانم‌ها انسیه نوبختی و صالحه چوبکار در آزمایشگاه کنترل پیشرفته، همچنین آقای حامد طلوعی در آزمایشگاه اتوماسیون پیشرفته که به طرق مختلف مرا در انجام پروژه کمک نمودند تشکر و قدردانی می‌کنم. همچنین از خانم بهاره وطن‌خواه و سیاوش فخیمی در آزمایشگاه کنترل فرآیند که مرا در مورد کار با دستگاه چهارمخزن راهنمایی نمودند سپاسگزارم. برای تمامی این دوستان موفقیت‌های روزافزون آرزومندم.

چکیده

کنترل بر اساس مدل‌های چندگانه یکی از روش‌های کنترلی است که درسال‌های اخیر برای کنترل سیستم‌های غیرخطی و سیستم‌هایی که تغییر ناگهانی دارند مورد توجه قرار گرفته است. این روش با وجود تمام مزایایی که دارد در پیاده‌سازی با مشکلاتی مواجه است. یکی از مشکلات مهم روش مدل‌های چندگانه یا روش‌های مبتنی بر کلیدزنی، پرش‌های خروجی در هنگام کلیدزنی است. حل این موضوع به مسأله انتقال بدون پرش معروف است، که محققان بسیاری بر روی آن کار کرده‌اند.

روش چندتحققی به عنوان یک روش اشتراک‌گذاری حالت یکی از روش‌هایی است که برای حل مسأله انتقال بدون پرش ارائه شده است. مسأله چندتحققی را می‌توان مشابه مسأله تحقق دانست. همان‌طور که مسأله تحقق برای یک سیستم به صورت یافتن یک نمایش فضای حالت برای آن سیستم مطرح است، مسأله چندتحققی را می‌توان به صورت یافتن یک نمایش فضای حالت با پارامترهای قابل تنظیم برای یک مجموعه از توابع تبدیل مطرح نمود. در پژوهش‌های گذشته، این مسأله با استفاده از صورت پوپوف برای ماتریس‌های چندجمله‌ای حل شده است ولی راه حل ارائه شده بسیار پیچیده است. در این پروژه راه حل جدیدی با استفاده از ماتریس چندجمله‌ای به صورت هرمیت برای مسأله چندتحققی ارائه شده است که بسیار آسان‌تر از روش قبلی است و از مزایای دیگری همچون سادگی پیاده‌سازی نسبت به روش قبلی برخوردار است.

همچنین در این پروژه روش ارائه شده پس از انجام مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌ها به صورت پیاده‌سازی بر روی سیستم چهارمخزن آزمایش شده است و نتایج آن که نشانگر انتقال بدون پرش می‌باشند آورده شده‌اند.

کلمات کلیدی: چندتحققی، اشتراک‌گذاری حالت، مدل چندگانه، کنترل کلیدزنی، انتقال بدون پرش.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل ۱ مقدمه ۱

۱-۱ راهکار کنترل بر اساس مدل‌های چندگانه ۳
۱-۲ بخش‌های مختلف کنترل بر اساس مدل‌های چندگانه ۴
۱-۳ سیستم‌های کلیدزنی ۵
۱-۴ اشتراک‌گذاری حالت و چندتحققی ۶
۱-۵ آنچه در این پایان‌نامه به آن می پردازیم ۸
۱-۶ ساختار پایان‌نامه ۸

فصل ۲ کنترل بر اساس مدل‌های چندگانه و اشتراک‌گذاری حالت ۱۰

۲-۱ کنترل بر اساس مدل‌های چندگانه ۱۰
۲-۲ انتقال بدون پرش در کنترل بر اساس مدل‌های چندگانه کلیدزنی ۱۴
۲-۳ اشتراک‌گذاری حالت در مدل‌های چندگانه کلیدزنی ۱۴
۲-۴ چند روش اشتراک‌گذاری حالت ۱۵
۲-۴-۱ اشتراک‌گذاری حالت برای دسته خاصی از سیستم‌های غیرخطی ۱۶
۲-۴-۲ یک روش اشتراک‌گذاری حالت برای سیستم‌های LTI تک ورودی تک خروجی ۱۹
۲-۴-۳ یک روش اشتراک‌گذاری حالت برای سیستم‌های LTI چند ورودی چند خروجی ۲۰

فصل ۳ تحقق سیستم‌های چندمتغیره خطی و MFDهای کانونیکال ۲۶

۳-۱ مقدمه ۲۶
۳-۲ تعاریف و مفاهیم پیش‌نیاز ۲۶
۳-۳ چند تحقق برای سیستم‌های چندمتغیره با استفاده از MFD ۳۱
۳-۳-۱ تحقق کنترل‌کننده با استفاده از MFD راست ۳۱
۳-۳-۲ تحقق رؤیت‌کننده با استفاده از MFD چپ ۳۴

۳-۳-۳ تحقق کنترل‌پذیری با استفاده از MFD راست ۳۸
۳-۳-۴ تحقق رؤیت‌پذیری با استفاده از MFD چپ ۴۰
۳-۳-۵ نمایش MFD کاهش ناپذیر و تحقق مینیمال ۴۰
۳-۴ تبدیل تحقق‌های فضای حالت ۴۰
۳-۴-۱ تبدیل به نمایش کانونیکال صورت ۱ کنترل‌پذیری ۴۲
۳-۴-۲ تبدیل به نمایش کانونیکال صورت ۲ کنترل‌پذیری ۴۵
۳-۵ تحقق فضای حالت کانونیکال و MFD کانونیکال ۴۸
۳-۵-۱ نمایش MFD به صورت هرمیت و تحقق فضای حالت از آن ۴۹
۳-۵-۲ نمایش MFD به صورت پوپوف و تحقق فضای حالت از آن ۵۲

فصل ۴ چندتحققی سیستم‌های چندمتغیره و کاربرد آن در انتقال بدون پرش ۵۶

۴-۱ مقدمه ۵۶
۴-۲ چندتحققی برای سیستم‌های تک ورودی تک خروجی ۵۸
۴-۳ چندتحققی برای سیستم‌های چند ورودی چند خروجی ۶۱
۴-۳-۱ چندتحققی با استفاده از صورت پوپوف ۶۲
۴-۳-۲ چندتحققی با استفاده از صورت هرمیت ۷۶
۴-۴ انتقال بدون پرش در کنترل‌کننده‌های سره ۸۶
۴-۵ ساختار پیشنهادی برای کنترل بر اساس مدل چندگانه ۸۷

فصل ۵ نتایج شبیه‌سازی و پیاده‌سازی عملی ۸۹

۵-۱ مقدمه ۸۹
۵-۲ شبیه‌سازی بر روی سیستم چهارمخزن ۹۰
۵-۲-۱ معرفی سیستم چهارمخزن ۹۰
۵-۲-۲ نتایج شبیه‌سازی ۹۲
۵-۳ پیاده‌سازی بر روی سیستم آزمایشگاهی چهارمخزن ۹۶
۵-۳-۱ معرفی سیستم آزمایشگاهی چهارمخزن ۹۶
۵-۳-۲ نتایج پیاده‌سازی ۹۸

فصل ۶ نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۰۱

۶-۱ نتیجه گیری ۱۰۱
۶-۲ پیشنهاداتی برای ادامه کار..... ۱۰۲

فهرست مراجع ۱۰۴

فهرست شکل ها

شکل ۱-۱ بخش‌های مختلف کنترل بر اساس مدل‌های چندگانه ۴
شکل ۲-۱ شمای کلی کنترل بر اساس مدل‌های چندگانه ۱۲
شکل ۲-۲ بخش‌های مختلف در کنترل بر اساس مدل‌های چندگانه کلیدزنی ۱۳
شکل ۲-۳ یک نمایش برای سیستم‌های چندمتغیره به منظور اشتراک‌گذاری حالت ۲۱
شکل ۲-۴ استفاده از اشتراک‌گذاری حالت به عنوان تخمین‌زن ۲۴
شکل ۲-۵ استفاده از اشتراک‌گذاری حالت در بخش تخمین چندگانه ۲۴
شکل ۳-۱ نمایش نحوه به دست آوردن تحقق کنترل‌کننده ۳۲
شکل ۳-۲ نمایش نحوه به دست آوردن تحقق رؤیت‌کننده ۳۶
شکل ۳-۳ نمونه‌ای از جدول کریت برای $\boldsymbol{m = 4}$ و $\boldsymbol{n = 6}$ ۴۲
شکل ۳-۴ جستجوی ستونی جدول کریت ۴۳
شکل ۳-۵ جستجوی سطری جدول کریت ۴۵
شکل ۴-۱ نمایش چندتحققی به دست آمده از قضیه ۴-۱ ..... ۵۹
شکل ۴-۲ نمایش چندتحققی به دست آمده از قضیه ۴-۲ ..... ۶۰
شکل ۴-۳ ساختار پیشنهادی برای کنترل بر اساس مدل چندگانه ۸۸
شکل ۵-۱ شمای سیستم چهارمخزن ۹۱
شکل ۵-۲ نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم چهارمخزن با استفاده از کلیدزنی به روش معمول ۹۵
شکل ۵-۳ نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم چهارمخزن با استفاده از چندتحققی ۹۶
شکل ۵-۴ نمایی از سیستم چهارمخزن ۹۷
شکل ۵-۵ شمای سیستم چهارمخزن ۹۷
شکل ۵-۶ نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش کلیدزنی معمول بر روی سیستم چهارمخزن ۹۹
شکل ۵-۷ نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش چندتحققی بر روی سیستم چهارمخزن ۱۰۰

فصل ۱

مقدمه

در طراحی واقعی، هر سیستم کنترلی چندین هدف را دنبال می‌کند. هدف اول که شرط لازم برای رسیدن به سایر هدف‌هاست، تضمین پایداری سیستم حلقه بسته است. اهداف پس از آن عبارتند از ردیابی ورودی مرجع یا تنظیم، رفع اغتشاش و تضعیف اثر نویز و ... .

بخش عمده‌ای از روش‌های کنترلی بر یک مدل از سیستم مبتنی هستند. قانون کنترل در این روش‌ها بر مدل فرآیند استوار است. بنابراین چنانچه این مدل نقص داشته باشد عملکرد سیستم کنترلی تضعیف می‌شود. پس برای در اختیار داشتن یک سیستم کنترلی قوی باید مدل‌سازی فرآیند در تمام شرایط کاری دقیق باشد. مدل‌سازی دقیق در تمام نقاط کاری عملا کاری سخت و غیر ممکن است. چرا که اکثر فرآیندها ذاتاً غیرخطی هستند. بنابراین مدل خطی همیشه برای توصیف آن فرآیند کافی نیست و تعیین مدل غیرخطی فراگیر برای تمام نقاط کاری سیستم اگر هم در مواردی ممکن باشد، بسیار دشوار است. علاوه بر این سیستم‌های واقعی تغییرناپذیر با زمان نمی‌باشند. فرسودگی و عوامل محیطی مانند دما و فشار سبب بروز تغییرات در سیستم‌ها می‌شوند که این تغییرات معمولاً به آهستگی ایجاد می‌شوند. از طرف دیگر برخی از اغتشاش‌های خارجی سبب تغییر ناگهانی، سریع و بزرگ در شرایط کاری سیستم می‌شوند. خطای حسگرها و عملگرها[1] و تغییر مواد اولیه در فرآیندهای شیمیایی همگی از مشکلاتی هستند که مهندس کنترل در مسأله

[1] Actuator

کنترل با آنها مواجه است. این عوامل باعث می‌شود که محدوده‌ی اعتبار برای یک مدل خطی بسیار کوچک باشد و کنترل‌کننده طراحی شده برای آن ناحیه کاری در دیگر شرایط کاری قابل اطمینان نباشد.

بنابراین نظریه کنترل خطی علی‌رغم جذابیت در سادگی و پیشرفت نظری آن، در عمل محدود و ناکارآمد می‌شود. به همین علت پیشنهاد می‌شود که در پاره‌ای از موارد عملی از سایر روش‌های کنترل پیشرفته مانند کنترل غیرخطی، کنترل مقاوم، کنترل تطبیقی و یا کنترل هوشمند استفاده شود.

علم کنترل بخش بزرگی از پیشرفت خود را با الهام گرفتن از رفتارهای انسان در مواجهه با مسایل مختلف به دست آورده است. این که انسان در طول زمان خود را با شرایط مختلف تطبیق می‌دهد مهندسان را بر آن داشت که به این موضوع که یک مدل خود را با شرایط جدید وفق دهد فکر کنند. به این ترتیب کنترل تطبیقی پایه‌گذاری شد که در آن یک مدل خطی پارامتری شده، در طول زمان و بر اساس داده‌های دریافتی از سیستم به‌روز می‌شود تا میزان تفاوت مدل با سیستم کاهش یابد. پس در هر لحظه از زمان مدلی از سیستم در دست است که طبق اصل هم‌ارزی قطعیت[1] از این مدل برای طراحی کنترل‌کننده در هر لحظه از زمان استفاده می‌شود.

تنظیم یک مدل در کنترل تطبیقی کلاسیک در مواردی سبب بهبود در پاسخ سیستم می‌شود که سرعت تغییر فرآیند کمتر از سرعت تطابق باشد و مدل اولیه به عنوان نقطه اولیه در بهینه سازی عددی به شرایط فرآیند نزدیک باشد. در غیر این صورت پاسخ حالت گذرا بسیار نامناسب خواهد بود. به طور کلی کنترل تطبیقی کلاسیک دارای ضعف‌هایی است که از آن جمله می‌توان به این موارد اشاره کرد:

- محدودیت در سرعت الگوریتم شناسایی
- حساس بودن سیستم شناسایی به اغتشاش‌های خارجی و نویز اندازه‌گیری
- نداشتن حافظه برای ذخیره اطلاعات گذشته و تکرار رفتارهای گذرای نامطلوب

مجموعه این مشکلات کاربردهای کنترل تطبیقی را در عمل با محدودیت مواجه کرده است.

برای رفع این نقص‌ها تلاش‌هایی انجام شده است. یکی از روش‌های پیشنهادی کنترل بر اساس مدل‌های چندگانه[2] است. در این روش سیستم پیچیده غیرخطی به چندین زیرسیستم کوچک‌تر و ساده‌تر تقسیم می‌شود به طوری که مسأله کنترلی برای هر زیرسیستم بتواند مستقل از سایر زیرسیستم‌ها حل شود. بنابراین

[1] Certainty Equivalence Principle
[2] Multiple Model Control

برای هر زیرسیستم یک جفت مدل- کنترل‌کننده طراحی می‌شود. سپس ناظری[1] در سیستم قرار داده می‌شود تا تعیین کند که در چه زمانی و کدام جفت باید مسئولیت مدل‌سازی و کنترل سیستم را بر عهده داشته باشد.

بنابراین در این شیوه کنترلی شناسایی سیستم به مجموعه‌ای از حالت‌های از پیش تعیین شده تبدیل می‌شود. از آنجایی که سیستم غیرخطی کلی به سیستم‌های کوچک‌تری تجزیه می‌شود می‌توان از مدل‌سازی خطی و به دنبال آن از نظریه کنترل خطی استفاده کرد. کنترل بر اساس مدل‌های چندگانه، اصولاً برای سیستم‌هایی مناسب است که دارای تغییرات سریع و ناگهانی هستند. بدین ترتیب برتری‌هایی را برای این روش کنترلی از جمله بهبود پاسخ گذرای سیستم نسبت به کنترل تطبیقی و تقویت پاسخ در مقابل تغییرات ناگهانی و بزرگ در مدل فرآیند می‌توان ذکر کرد.

۱-۱ راهکار کنترل بر اساس مدل‌های چندگانه

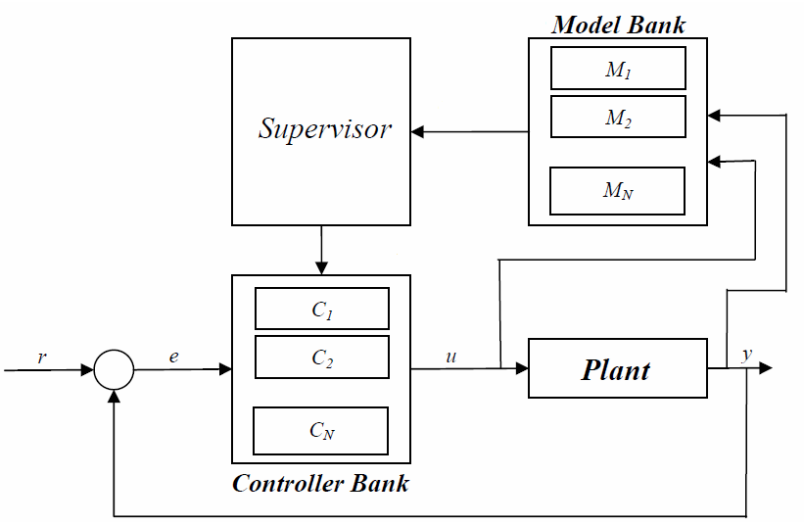
همان‌طور که بیان شد در مواردی که فرآیند یک سیستم خطی با پارامترهای نامعلوم و ثابت است و یا فرآیند تغییرپذیر با زمان است و به آهستگی در طول زمان تغییر می‌کند، کنترل تطبیقی کلاسیک می‌تواند عملکرد مناسبی داشته باشد. برای حل برخی از مشکلات کنترل تطبیقی کلاسیک راهکار کنترل مبتنی بر مدل‌های چندگانه ارائه شده است. پایه این روش تجزیه کل ناحیه کاری سیستم به تعدادی از نواحی کاری کوچک‌تر است. در هر ناحیه کاری یک مدل محلی یا کنترل‌کننده محلی[2] طراحی می‌شود. این مدل‌های محلی یا کنترل‌کننده‌های محلی سپس به طریقی با هم ترکیب می‌شوند تا مدل یا کنترل‌کننده فراگیر به دست آید.

منطق استفاده از چنین روشی آن است که طراحی و ساخت کنترل‌کننده‌ها یا مدل‌های محلی ساده‌تر است چرا که تداخلات بین پدیده‌های مرتبط و مختلف در هر ناحیه کاری وقتی به طور محلی بررسی می‌شوند، ساده‌تر از زمانی است که به طور فراگیر مورد بررسی قرار می‌گیرند. روش مدل‌های چندگانه روشی قوی برای تخمین، شناسایی، مدل‌سازی و کنترل سیستم غیرخطی است به ویژه در مواردی که سیستم پیچیده و بزرگ است. در [1] روش‌های مختلفی که برای کنترل بر اساس مدل‌های چندگانه ارائه شده، توضیح داده شده است.

[1] Supervisor
[2] Local Model-Controller

۱–۲ بخش‌های مختلف کنترل بر اساس مدل‌های چندگانه

به طور کلی ساختار کنترل مدل‌های چندگانه مانند سایر روش‌های کنترل تطبیقی دارای دو حلقه است. در حلقه داخلی کنترل‌کننده و فرآیند قرار دارد و حلقه بیرونی برای شناسایی و تعیین پارامترهای کنترل‌کننده استفاده می‌شود. بدیهی است که افزایش توانایی‌های روش کنترل مبتنی بر مدل چندگانه نسبت به روش کنترل مبتنی بر یک مدل، در تقویت حلقه شناسایی است. حلقه شناسایی در این روش به جای یک شناساگر ساده و تنها، پیچیده‌تر شده است و دارای یک بانک مدل[1] یا یک بخش تخمین چندگانه[2] است. همچنین یک ناظر یا سرپرست هم در این ساختار قرار دارد. شکل ۱-۱ ساختار عمومی این روش کنترلی را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱ بخش‌های مختلف کنترل بر اساس مدل‌های چندگانه

در ساختار مورد نظر یک بانک مدل وجود دارد که می‌تواند شامل مجموعه‌ای از تخمین‌زن‌های با پارامترهای ثابت باشد که تخمینی از خروجی سیستم را تولید می‌کنند. خطای تخمین برای هر یک از مدل‌ها در اختیار ناظر قرار داده می‌شود و ناظر بر اساس این خطاها میزان احتمال صحت هر مدل را محاسبه می‌کند. در نهایت ناظر تعیین می‌کند که کدام مدل برای شرایط کاری کنونی سیستم بهتر است و کنترل‌کننده متناظر با آن مدل در حلقه کنترل قرار داده می‌شود.

[1] Model Bank
[2] Multi Estimation

الگوریتم‌های متعددی برای راهکار کنترلی مدل‌های چندگانه ارائه شده است که برخی از آنها را می‌توان در [1] مطالعه کرد.

روش جدول‌بندی بهره[1] روشی است که معمولاً به اشتباه با روش کنترل بر اساس مدل‌های چندگانه یکسان در نظر گرفته می‌شود. جدول‌بندی بهره در کنترل سیستم‌های غیرخطی مانند هواپیما و موتورهای جت مورد استفاده قرار می‌گیرد و در آن یک یا چند متغیر کمکی تعیین می‌کند که از کدام مدل خطی در مجموعه از پیش تعیین شده باید استفاده کرد. این متغیرها می‌توانند نسبت به سیستم تحت کنترل متغیر بیرونی یا درونی باشند. در این روش نیز یک کنترل‌کننده متناظر با هر مدل تعیین شده است.

یک تفاوت عمده بین روش جدول‌بندی بهره و آنچه با نام روش کنترل بر اساس مدل‌های چندگانه معرفی شد وجود دارد. در روش کنترل بر اساس مدل‌های چندگانه هیچ متغیر کمکی یا ورودی خارجی بر خلاف روش جدول‌بندی بهره وجود ندارد. بلکه برای تعیین مدل توصیف کننده فرآیند از داده‌های ورودی و خروجی اندازه‌گیری شده از فرآیند استفاده می‌شود.

۱–۳ سیستم‌های کلیدزنی

بخشی از الگوریتم‌های کنترل مبتنی بر مدل‌های چندگانه با کلیدزنی[2] همراه است. ذکر این نکته ضروری است که سیستم‌های دینامیکی بسیاری وجود دارند که ترکیبی از دینامیک‌های گسسته و پیوسته هستند. چنین سیستم‌هایی معمولاً سیستم‌های هایبرید[3] نامیده می‌شوند. دیده شده است که عملکرد چنین سیستم‌هایی با کلیدزنی بین کنترل‌کننده‌های خطی تغییرناپذیر با زمان نسبتاً ساده بهبود می‌یابد. اما در کلیدزنی نکات مهمی وجود دارد که باید مورد توجه قرار گیرد. برای مثال به راحتی می‌توان نشان داد که کلیدزنی بین سیستم‌های پایدار ممکن است به ناپایداری منجر شود و یا حتی ممکن است کلیدزنی بین سیستم‌های ناپایدار به سیستم پایدار منجر شود.

کلیدزنی بین یک مجموعه از کنترل‌کننده‌ها از راهکارهای ارزشمند در طراحی سیستم‌های کنترل است. کلیدزنی مابین یک مجموعه از کنترل‌کننده‌ها به دلایل متعددی از جمله آنچه در ادامه می‌آید مفید است. بسیاری از سیستم‌های واقعی می‌توانند با کلیدزنی بین مدل‌های محلی توصیف شوند. کنترل‌کننده‌هایی که

[1] Gain Scheduling
[2] Switching
[3] Hybrid

شامل کلیدزنی هستند یک راه حل خوب برای مواجهه با چنین سیستم‌هایی است. همچنین کلیدزنی بین تعدادی از ساختارهای کنترلی، منتج به سیستم‌های کنترلی می‌شود که به محدودیت‌های طراحی خطی محدود نیستند. می‌توان ادعا نمود که روش کنترلی که با کلیدزنی بین تعدادی از کنترل‌کننده‌ها همراه است، از عملکرد مقاومی برخوردار است.

این مسأله به خوبی دانسته شده است که سیستم‌های کلیدزنی با انتخاب نامناسب سیگنال کلیدزنی[۱] می‌توانند ناپایدار شوند، حتی اگر کلیدزنی بین تعدادی از سیستم‌های پایدار انجام شود. حتی می‌توان نشان داد که در مواردی که کلیدزنی بین سیستم‌هایی با تابع تبدیل یکسان انجام می‌پذیرد، سیستم حلقه بسته به واسطه کلیدزنی نامناسب ممکن است ناپایدار شود.

در بحث کنترل بر اساس مدل‌های چندگانه کلیدزنی[۲] روش‌های متعددی برای جلوگیری از ناپایداری در اثر تغییر کنترل‌کننده‌ها پیشنهاد شده است. روش‌هایی برای پایدارسازی ارائه شده است که سرعت تغییر کنترل‌کننده‌های انتخاب شده را کاهش می‌دهد. یکی از این روش‌ها حداقل زمانی را به نام زمان سکون[۳] بین کلیدزنی‌های متوالی قرار می‌دهد، به طوری که پایداری سیستم حلقه بسته تضمین شود [2]. به این ترتیب کنترل‌کننده حداقل برای مدت زمانی به اندازه زمان سکون در حلقه کنترلی قرار خواهد گرفت. همچنین در برخی مراجع سیستم‌های کلیدزنی با هیسترزیس معرفی شده است. در این نوع کلیدزنی چنانچه شاخص عملکرد[۴] مدل یا کنترل‌کننده‌ای به اندازه ضریب مثبتی کوچک‌تر از شاخص عملکرد مدل فعلی باشد، کلیدزنی انجام می‌گیرد. برای این روش بر عکس روش زمان سکون می‌توان تعبیر فیزیکی در نظر گرفت. روش‌های دیگری نیز برای کلیدزنی بین کنترل‌کننده‌ها ارائه شده است که برای مطالعه در این مورد می‌توان به [1] مراجعه کرد.

۱-۴ اشتراک‌گذاری حالت و چندتحققی

پیاده‌سازی روش کنترل بر اساس مدل‌های چندگانه کلیدزنی در عمل با مشکلاتی مواجه است که حل این مشکلات در سال‌های اخیر مورد توجه بوده است. یک مشکل این است که در کنترل مدل‌های چندگانه کلیدزنی چندین کنترل‌کننده همزمان اجرا می‌شوند و این در حالی است که در هر لحظه از زمان تنها از یکی

[1] Switching Signal
[2] Switching Multiple Model Control
[3] Dwell Time
[4] Performance Index

از کنترل‌کننده‌ها استفاده می‌شود. بنابراین لزومی ندارد که تمام کنترل‌کننده‌ها اجرا شوند. مشکل دیگر این که سیگنال کنترلی که توسط کنترل‌کننده‌هایی که در حلقه کنترلی قرار ندارند تولید می‌شود، به دلیل این که کنترل‌کننده در یک حلقه باز قرار دارد ممکن است ناپایدار شود.

با استفاده از روش اشتراک‌گذاری حالت[1] می‌توان این دو مشکل را در کنترل بر اساس مدل‌های چندگانه کلیدزنی حل نمود. روش اشتراک‌گذاری حالت روشی است که می‌توان با استفاده از آن یک مجموعه از سیستم‌ها را به صورت یک سیستم واحد با پارامتر متغیر پیاده‌سازی کرد. بدین طریق که مجموعه‌ای از حالت‌ها اجرا می‌شوند و این حالت‌ها بین تمام سیستم‌ها به اشتراک گذاشته می‌شوند. بدین ترتیب به جای پیاده‌سازی یک مجموعه کنترل‌کننده، تنها یک سیستم پیاده‌سازی می‌شود و با تغییر دادن پارامتر مورد نظر در تک سیستم حاصل، کنترل‌کننده‌ای که در حلقه کنترلی قرار می‌گیرد عوض می‌شود. بنابراین نگرانی از بابت ناپایداری سیگنال کنترلی مربوط به کنترل‌کننده‌هایی که در حلقه کنترلی قرار ندارند وجود ندارد.

مشکل بسیار مهم دیگری که در کنترل بر اساس مدل چندگانه کلیدزنی مطرح است این است که در لحظه کلیدزنی که کنترل‌کننده عوض می‌شود، مقدار سیگنال کنترلی به صورت ناگهانی عوض می‌شود و در سیگنال کنترلی پرش ایجاد می‌شود. این پرش ناگهانی در سیگنال کنترلی نه تنها از بابت عملگرهای سیستم مشکل ساز است، بلکه باعث می‌شود پاسخ گذرای نامطلوبی در لحظات کلیدزنی حاصل شود. یک راه حل که برای این موضوع ارائه شده است این است که شاید بتوان اشتراک‌گذاری حالت را به گونه‌ای انجام داد که در لحظات کلیدزنی که پارامتر مورد نظر در تک سیستم عوض می‌شود، سیگنال خروجی، که در واقع سیگنال کنترلی اعمال شده به سیستم می‌باشد، پیوسته باشد و پرش ناگهانی نداشته باشد که به آن انتقال بدون پرش[2] گفته می‌شود. روش چندتحققی[3] یکی از روش‌های اشتراک‌گذاری حالت است که برای حل این مشکل در کنترل بر اساس مدل‌های چندگانه کلیدزنی ارائه شده است. در این روش یک تحقق با پارامتر متغیر برای مجموعه‌ای از کنترل‌کننده‌ها محاسبه می‌شود، به گونه‌ای که با تغییر پارامتر مورد نظر کنترل‌کننده تغییر می‌یابد و ویژگی خاص آن این است که در لحظه کلیدزنی خروجی سیستم حاصل از چندتحققی پرش ناگهانی ندارد و انتقال بدون پرش با استفاده از روش چندتحققی حاصل می‌شود.

[1] State Sharing
[2] Bumpless Transfer
[3] Multirealization