بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی

بخش مهندسی برق

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق

گرایش کنترل

طراحی رویتگر هایبرید برای دسته‌ای از سیستم‌های غیرخطی

مؤلف :

مهسا رفیعی

استاد راهنما :

دکتر مجتبی برخورداری یزدی

دی ماه ۱۳۹۳

این پایان‌نامه به‌عنوان یکی از شرایط درجه کارشناسی ارشد به

بخش مهندسی برق

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچ‌گونه مدرکی به‌عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی‌شود.

دانشجو : مهسا رفیعی

استاد راهنما : دکتر مجتبی برخورداری یزدی

داور ۱ : دکتر ملیحه مغفوری فرسنگی

داور۲ : دکتر محمود سموات

نماینده‌ی تحصیلات تکمیلی در جلسه دفاع: دکتر علی اکبر قره ویسی

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده : دکتر مرتضی زند رحیمی

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر کرمان است.

تقدیم به :

پدر و مادر عزیز و همسر مهربانم

تشکر و قدردانی :

سپاس خدای را که دریای بی‌کران علم است، آفریدگار بی‌نیازی که توان آموختن ارزانیم داشت و وجودم را در جاده‌های دانش بشری سوق داد تا با ذره‌ای از بیکران علم آشنا شوم.آنکه بدون اراده و قدرت او قادر به انجام هیچ کاری نیستم.

بدین‌وسیله از مقام والای استادان بزرگوار جناب آقای دکتر مجتبی برخورداری یزدی که لطف فرمودند و زحمت راهبرد این پایان‌نامه را تقبل فرمودند و سرکار خانم دکتر ملیحه مغفوری و جناب آقای دکتر محمود سموات که در راه به ثمر رسیدن این پایان‌نامه، مرا از یاری خویش بی‌نصیب نگذاشتند قدردانی و تشکر می‌نمایم.

حال که مراحل انجام پایان‌نامه به اتمام رسیده است، بر خود لازم می‌دانم از پدر و مادر عزیزم که در طول زندگی مرا یاری کردند و همسرم که در انجام این تحقیق مرا همراهی کرد صمیمانه تشکر و قدردانی کنم.

چکیده :

طراحی کنترل‌کننده، تشخیص خطا و تخمین پارامترهای سیستم از جمله مسائلی هستند که معمولا فرض معلوم بودن حالت‌های سیستم در آنها مطرح است. با این حال، در اغلب موارد به دلیل در دسترس نبودن همه حالت‌های سیستم طراحی رویتگر اجتناب ناپذیر است. بسیاری از سیستم‌های واقعی غیرخطی‌اند و خطی‌سازی مبنایی برای بسیاری از رویتگرهای طراحی شده می‌باشد. فیلتر کالمن توسعه‌یافته (EKF) و فیلتر کالمن نمونه‌بردار (UKF) دو رویتگر متداول برای سیستم‌های غیرخطی هستند که در حضور غیرخطی‌های سخت (hard nonlinearity) مثل اشباع عملکردی ضعیف دارند. برای این دسته از سیستم‌ها در این پایان‌نامه طراحی رویتگر هایبرید پیشنهاد و اثبات همگرایی آن ضمیمه شده است. رویتگر هایبرید شامل رویتگر گسسته و پیوسته است که رویتگر گسسته وظیفه تخمین زیرسیستم فعال و رویتگر پیوسته تخمین حالت‌های پیوسته را برعهده دارد. یکی از مناسب‌ترین روش‌های تشخیص خطا استفاده از رویتگر حالت است. در این پایان‌نامه از رویتگر هایبرید در یک الگوریتم تشخیص خطا برای سیستم‌هایی با غیرخطی سخت استفاده شده است. عملکرد رویتگر هایبرید طراحی شده و الگوریتم تشخیص خطا برای دو مثال کاربردی، موتور DC با اشباع ورودی و راکتور مخزنی پیوسته مخلوط شونده (CSTR) با اشباع ورودی کنترلی بررسی و با روش‌های متداول پیشین مقایسه شده است.

کلمات کلیدی:

اشباع ورودی، تشخیص خطا، رویتگر هایبرید، رویتگرهای غیرخطی، سیستم غیرخطی، سیستم هایبرید، غیرخطی سخت، ، فیلتر کالمن

فهرست مطالب:

عنوان	صفحه
فصل اول- مقدمه	۱
۱-۱ مقدمه‌ای بر سیستم‌های غیرخطی	۲
۱-۲ دلایل استفاده از رویتگر در سیستم‌ها	۲
۱-۳ تشخیص خطا	۳
۱-۴ انگیزه تحقیق	۳
فصل دوم- مروری بر رویتگرهای غیرخطی	۵
۲-۱ طراحی رویتگرهای سیستم‌های غیرخطی	۶
۲-۱-۱ فیلتر کالمن	۷
۲-۱-۱-۱ فیلتر کالمن خطی شده	۷
۲-۱-۱-۲ خلاصه مراحل طراحی فیلتر کالمن خطی شده	۱۰
۲-۱-۱-۳ کاهش مرتبه فیلتر کالمن	۱۱
۲-۱-۱-۴ معایب فیلتر کالمن	۱۲
۲-۱-۲ EKF	۱۳
۲-۱-۳ UKF	۱۵
۲-۱-۴ روش‌های مرتبه بالاتر	۱۶
۲-۲ طراحی رویتگر هایبرید	۱۷

۲-۲-۱ سیستم‌های هایبرید ۱۷
۲-۲-۲ رویتگر هایبرید ۱۹
۲-۳ جمع‌بندی ۲۰

فصل سوم- تشخیص خطا ۲۱
۳-۱ اهمیت تشخیص خطا ۲۶
۳-۲ انواع خطا ۲۶
۳-۳ مدل‌های خطا ۲۸
۳-۳-۱ مدل‌های خطای پایه ۲۸
۳-۳-۲ مدل‌های فرآیند ۳۱
۳-۳-۲-۱ مدل‌های فرآیند استاتیکی ۳۱
۳-۳-۲-۲ مدل سیستم‌های دینامیکی خطی ۳۲
۳-۳-۲-۳ مدل فرآیندهای غیرخطی ۳۵
۳-۴ روش‌های تشخیص خطا ۳۵
۳-۴-۱ تشخیص خطا با بررسی کران ۳۵
۳-۴-۱-۱ بررسی کران مقادیر ۳۶
۳-۴-۱-۲ بررسی روند ۳۶
۳-۴-۱-۳ کران‌های قابل تطبیق ۳۶

۳-۴-۲ تشخیص خطا با مدل‌های سیگنال ۳۹
۳-۴-۲-۱ آنالیز سیگنال‌های متناوب ۳۹
۳-۴-۲-۲ آنالیز سیگنال‌های متناوب غیر ثابت ۴۲
۳-۴-۲-۳ آنالیز سیگنال‌های تصادفی ۴۴
۳-۴-۳ تشخیص خطا با روش‌های شناسایی سیستم ۴۵
۳-۴-۴ تشخیص خطا با تشابه روابط ۴۸
۳-۴-۴-۱ تشابه روابط با تابع انتقال ۴۸
۳-۴-۴-۲ تشابه روابط با مدل‌های فضای حالت ۵۱
۳-۴-۴-۳ تشابه روابط برای سیستم‌های غیرخطی ۵۱
۳-۴-۵ تشخیص خطا با رویتگرهای حالت و تخمین حالت ۵۳
۳-۴-۵-۱ رویتگرهای حالت ۵۳
۳-۴-۵-۲ تخمین حالت (فیلتر کالمن) ۵۵
۳-۴-۵-۳ رویتگرهای خروجی ۵۷
۳-۵ مقایسه روش‌های مختلف تشخیص خطا ۵۹
۳-۵-۱ مقایسه روش‌های مبتنی بر مدل ۶۰
۳-۵-۲ ترکیب روش‌های مختلف تشخیص خطا ۶۱

فصل چهارم- طراحی رویتگر و تشخیص خطا برای سیستم‌هایی با غیرخطی سخت۶۳

۴-۱ طراحی رویتگر کالمن ۶۴
۴-۱-۱ رویتگر EKF و تشخیص خطا با استفاده از آن ۶۴
۴-۱-۲ رویتگر UKF و تشخیص خطا با استفاده از آن ۶۶
۴-۲ طراحی رویتگر هایبرید ۶۹
۴-۲-۱ تبدیل سیستم غیرخطی به سیستم هایبرید معادل ۶۹
۴-۲-۲ طراحی رویتگر هایبرید ۷۰
۴-۲-۳ پایداری رویتگر هایبرید ۷۲
۴-۲-۴ تشخیص خطا با استفاده از رویتگر هایبرید ۷۳
۴-۳ جمع‌بندی ۷۳

فصل پنجم- شبیه‌سازی‌ها و نتایج ۷٤

۵-۱ مثال ۱: مثال عددی ۷۵
۵-۲ مثال ۲: موتور DC با اشباع ورودی کنترلی ۷۹
۵-۳ مثال ۳: مثال عددی ۸۷
۵-۴ مثال ۴: CSTR با فیدبک حالت و اشباع ورودی کنترلی ۹۲
۵-۵ مثال ۵: مثال عددی سه متغیره ۹۸
۵-۶ جمع‌بندی ۱۰۱

فصل ششم- نتیجه‌گیری و پیشنهادها **۱۰۲**

۶-۱ نتیجه‌گیری ۱۰۳

۶-۲ پیشنهادها ۱۰۳

مراجع **۱۰۵**

پیوست **۱۱۳**

فهرست شکل‌ها

شکل ۲-۱ رابطه ولتاژ– جریان یک مقاومت ۶

شکل۲-۲ سیستم هایبرید کنترل دما ۱۸

شکل ۳-۱ شکل سیستم همراه با خطا (۱) سیستم حلقه باز (۲) سیستم حلقه بسته ۲۳

شکل ۳-۲ رفتار پارامترها بعد از وقوع خطا (۱) حلقه باز (۲) حلقه بسته ۲۳

شکل ۳-۳ روش‌های مختلف مدیریت خطا ۲۴

شکل ۳-۴ یک سیستم هایبرید سوییچ شونده ۲۷

شکل ۳-۵ یک سیستم هایبرید ۲۸

شکل ۳-۶ انواع خطای متغیر بازمان: (الف) خطای ناگهانی (ب) خطای شیب (ج) خطای متغیر ۲۹

شکل ۳-۷ مدال‌های خطای پایه: برای یک سیگنال خروجی (a) خطای جمع‌شونده (b) خطای ضرب‌شونده ۳۰

شکل۳-۸ مدل سیستم استاتیکی غیرخطی با خطای پارامتری و جمع‌شونده ۳۲

شکل ۳-۹ مدل سیستم دینامیکی خطی شده با خطای پارامتری و جمع‌شونده ۳۳

شکل ۳-۱۰ پاسخ سیستم مرتبه اول با ورودی ثابت (الف) به خطای ورودی جمع‌شونده (ب) به خطای خروجی جمع‌شونده ۳۴

شکل ۳-۱۱ مدل سیستم دینامیکی خطی شده یک ورودی- یک خروجی باخطای جمع شونده حالت f_l، خطای خروجی f_m و خطای پارامتری ۳۴

شکل ۳-۱۲ بررسی کران برای تشخیص خطا (الف) مقدار خروجی (ب) روند خروجی ۳۷

شکل ۳-۱۳ تولید کران تطبیقی وابسته به ورودی سیستم وC_1 کران ثابت است ۳۸

شکل ۳-۱۴ مثالی برای مانده r با کران تطبیقی ۳۸

شکل ۲-۱۵ تشخیص خطا با مدل‌های سیگنال ۴۰

شکل ۳-۱۶ معیار دسته‌بندی آنالیز سیگنال برای تشخیص خطا ۴۰

شکل ۳-۱۷ فیلتر میان‌گذر با چندین فیلتر ۴۱

شکل ۳-۱۸ نمونه‌هایی از wavelet مادر ۴۴

شکل ۳-۱۹ معیار روش‌های مختلف شناسایی سیستم ۴۵

شکل ۳-۲۰ تولید مانده با تشابه روابط برای سیستم‌های چندورودی- چند خروجی (الف) بیان مانده با خطای خروجی (ب) بیان مانده با خطای چندجمله‌ای ۴۹

شکل ۳-۲۱ تشابه روابط براساس مدل فضای حالت برای سیستم پیوسته ۵۲

شکل ۳-۲۲ تولید مانده برای یک سیستم چندورودی-چندخروجی با تشابه روابط ۵۲

شکل ۳-۲۳ سیستم و رویتگر حالت ۵۴

شکل ۳-۲۴ رویتگر خروجی برای تشخیص خطا ۵۸

شکل ۳-۲۵ ترکیب تخمین پارامتر با تشابه روابط ۶۲

شکل ۴-۱ نحوه ایجاد زیرسیستم‌ها برای یک سیستم با دو متغیر حالت ۷۰

شکل ۴-۲ شکل یک رویتگر هایبرید ۷۱

شکل۵-۱ تخمین با رویتگر EKF ۷۶

شکل ۵-۲ تخمین با رویتگر UKF ۷۶

شکل ۵-۳ تخمین با رویتگر هایبرید ۷۷

شکل ۵-۴ خطای تخمین با EKF ۷۸

شکل ۵-۵ خطای تخمین با UKF ۷۸

شکل ۵-۶ خطای تخمین با رویتگر هایبرید ۷۹

شکل ۵-۷ سیستم موتور DC با اشباع در ورودی ۷۹

شکل ۵-۸ تخمین با استفاده از رویتگر EKF ۸۱

شکل ۵-۹ تخمین‌با استفاده از رویتگر UKF ۸۱

شکل ۵-۱۰ تخمین با استفاده از رویتگر هایبرید ۸۲

شکل ۵-۱۱ خطای تخمین EKF ۸۳

شکل ۵-۱۲ خطای تخمین UKF ۸۳

شکل ۵-۱۳ خطای تخمین رویتگر هایبرید ۸۴

شکل ۵-۱۴ اغتشاش لحاظ شده در سیستم ۸۴

شکل ۵-۱۵ خطای لحاظ شده در سیستم ۸۵

شکل ۵-۱۶ تشخیص خطا با رویتگرEKF ۸۵

شکل ۵-۱۷ تشخیص خطا با رویتگرUKF ۸۶

شکل ۵-۱۸ تشخیص خطا با رویتگر هایبرید ۸۶

شکل ۵-۱۹ زیرسیستم فعال سیستم هایبرید معادل و رویتگر هایبرید طراحی شده ۸۷

شکل ۵-۲۰ ورودی کنترلی ۸۸

شکل ۵-۲۱ نتیجه تخمین با رویتگر EKF ۸۹

شکل ۵-۲۲ نتیجه تخمین با رویتگر UKF ۹۰
شکل ۵-۲۳ نتیجه تخمین با رویتگر هایبرید ۹۰
شکل ۵-۲۴ خطای اعمال شده به سیستم ۹۱
شکل ۵-۲۵ تشخیص خطا توسط EKF ۹۱
شکل ۵-۲۶ تشخیص خطا توسط UKF ۹۲
شکل ۵-۲۷ تشخیص خطا توسط رویتگر هایبرید ۹۲
شکل ۵-۲۸ دیاگرام سیستم CSTR ۹۳
شکل۵-۲۹ ورودی کنترلی ۹۵
شکل ۵-۳۰ نتایج تخمین رویتگر هایبرید با یک زیر سیستم ۹۵
شکل ۵-۳۱ خطا و تشخیص خطا با رویتگر هایبرید با یک زیر سیستم ۹۶
شکل ۵-۳۲ نتایج تخمین رویتگر هایبرید با ۵۰ زیرسیستم ۹۷
شکل ۵-۳۳ خطا و تشخیص خطا با رویتگر هایبرید با ۵۰ زیر سیستم ۹۷
شکل ۵-۳۴ تخمین رویتگر هایبرید با یک زیر سیستم ۹۹
شکل ۵-۳۵ تخمین رویتگر هایبرید با دو زیر سیستم ۹۹
شکل ۵-۳۶ تخمین رویتگر هایبرید با سه زیر سیستم ۱۰۰
شکل ۵-۳۷ تخمین رویتگر هایبرید با ۲۵ زیر سیستم ۱۰۱

فهرست جدول‌ها

جدول ۳-۱ مثال‌های مدیریت خطا ۲۵

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه‌ای بر سیستم‌های غیرخطی

بیشتر سیستم‌های واقعی غیرخطی هستند. بعضی سیستم‌ها ذاتاً غیرخطی هستند و گاهی غیرخطی به‌صورت مصنوعی و توسط طراح به سیستم وارد می‌شود. در دسته‌بندی دیگری، بعضی از غیرخطی‌ها پیوسته و برخی دیگر گسسته هستند. اگر سیستم دارای غیرخطی گسسته باشد و نقطه‌کار در نزدیکی ناپیوستگی قرار داشته باشد، نمی‌توان آن را خطی کرد [۱].

از خواص سیستم‌های غیرخطی به موارد زیر می‌توان اشاره کرد [۲]:

- بیش از یک نقطه‌تعادل دارند (نقطه‌تعادل، نقطه‌ای است که تغییرات سیستم با زمان در آنجا صفر است).
- پایداریشان به شرایط‌اولیه و ورودی وابسته است.
- گاهی سیکل حدی دارند. سیستم غیرخطی که دارای سیکل حدی باشد در بررسی پایداری، سیستم بین دو حالت پایداری و ناپایداری می‌ماند و به یک نوسان‌ساز تبدیل می‌شود.
- تغییرات کمی به تغییرات کیفی می‌انجامد. برای مثال با تغییر یک پارامتر حتی تعداد نقاط‌کار هم ممکن است عوض شود.
- برخی سیستم‌های غیرخطی آشوبناک هستند و خروجی سیستم به شدت به شرایط‌اولیه حساس است.

۱-۲ دلایل استفاده از رویتگر در سیستم‌ها

بسیاری از مسائل در سیستم‌ها نیاز به دانستن مقدار حالت‌ها دارند. از جمله این موارد کنترل سیستم [۳و۴]، تشخیص خطا [۵]، تخمین پارامترهای سیستم [۶] و آنالیز سیگنال [۷] است. این در حالی است که در سیستم‌های واقعی فقط تعدادی از حالت‌ها قابل اندازه‌گیری هستند. پس باید از رویتگر برای تخمین حالت‌ها استفاده کرد. حتی در سیستم‌های صنعتی که هدف اصلی تولید با کمترین هزینه و کیفیت خوب است، تخمین حالت‌ها نقش مهمی بازی می‌کند [۸].

۱-۳ تشخیص خطا

تشخیص خطا در سیستم‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است چون اگر در سیستم خطایی رخ دهد می-تواند باعث به‌وجود آمدن خسارت‌های جبران‌ناپذیری به سیستم، محیط و کارکنان شود و روی عملکرد سیستم اثر بگذارد.

تشخیص خطا در سیستم‌ها با روش‌های مختلفی از جمله:

- چک کردن کران‌ها
- مدل سیگنال‌ها
- استفاده از روش‌های شناسایی سیستم
- تشابه روابط
- طراحی رویتگرهای حالت و تخمین حالت‌ها

انجام می‌شود. هرکدام از این روش‌ها شامل انواع مختلفی هستند که در فصل سوم توضیح داده شده است.

۱-٤ انگیزه تحقیق

غالب سیستم های موجود در صنعت غیرخطی هستند. از طرف دیگر گاهی اندازه‌گیری بعضی مقادیر متغیرهای حالت دشوار و یا حتی گاهی غیرممکن است [۹] و باید آن مقادیر را تخمین بزنیم. روش-های مختلفی برای رویت سیستم‌های غیرخطی و استفاده از آن برای تشخیص خطا وجود دارد. بین این روش‌ها فیلترهای کالمن[1] و خصوصا فیلتر کالمن توسعه یافته[2] بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۰]. این روش‌ها هر کدام به نوعی از خطی‌سازی استفاده می‌کنند که معایبی مثل موارد زیر را به دنبال دارد.

- در خطی‌سازی فرض می‌شود محدوده[3] عملکرد کوچک است. وقتی محدوده عملکرد سیستم بزرگ انتخاب شود، غیرخطی‌هایی سیستم نمی‌توانند با طراحی قبلی (مثل کنترلر، رویتگر و

[1] Kalman filter
[2] Extended Kalman filter (EKF)
[3] Range

...) به صورت مناسبی جبران شوند. لذا آن طراحی‌ها ضعیف عمل می‌کنند و حتی گاهی سیستم ناپایدار می‌شود [۱].

- در خطی‌سازی سیستم را حول نقطه تعادلش (نقطه کار) خطی می‌کنیم. سیستم‌هایی که غیرخطی سخت[۴] داشته باشند و نقطه‌کار در نزدیکی ناحیه مشتق‌ناپذیر باشد، خطی‌سازی سخت است و گاهی دچار مشکل می‌شود [۱].
- یکی از فرض‌های استفاده از خطی‌سازی، مشخص بودن دقیق پارامترها است؛ در حالی که بسیاری از سیستم‌ها در پارامترهایشان عدم قطعیت دارند و ممکن است فقط محدوده تغییرات پارامترها معلوم باشد [۱].
- خطی سازی خود یک نوع عدم قطعیت به سیستم اضافه می کند [۱۱].

لذا در این پایان‌نامه سیستم غیر خطی به یک سیستم هایبرید خطی معادل تبدیل می‌شود. برای تشکیل سیستم هایبرید معادل، سیستم غیرخطی به چند زیرسیستم خطی کوچکتر شکسته می‌شود. با این روش از ابزارهای موجود برای سیستم‌های خطی در هر زیرسیستم استفاده می‌شود و چون خطی‌سازی به صورت تکه‌ای انجام شده است، از معایب خطی‌سازی تا حدودی دوری می‌شود.

با تبدیل سیستم غیرخطی اصلی به یک سیستم هایبرید معادل، برای تخمین مقادیر حالت‌ها و تشخیص خطا از رویتگر هایبرید استفاده می‌شود و مهم ترین مزیت رویتگر هایبرید تخمین دقیق حالت‌های غیر قابل اندازه گیری، در یک مدت زمان محدود است [۱۲] . از جمله سیستم‌هایی که سرعت و دقت اندازه‌گیری حالت سیستم در کنار یکدیگر اهمیت دارد، اندازه‌گیری دما در راکتور است [۱۲].

[4] hard nonlinearitiy