۱۳۰۷
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه دوره دکتری مهندسی برق-کنترل

عنوان:

توسعه روشهای چند مدلی غیرخطی به منظور طراحی سیستم تشخیص خطا و کاربرد آن در سیستم توربین گازی

توسط:

سید مهرداد حسینی

استاد راهنما:

دکتر علیرضا فاتحی

استاد مشاور:

پروفسور علی خاکی صدیق

شهریور ۱۳۹۱

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به

پدر و مادر مهربانم

و

همسر فداکارم

تأییدیّه هیات داوران

اعضای هیئت داوران، نسخه نهائی پایان نامه آقای: **سید مهرداد حسینی**
را با عنوان: **توسعه روشهای چند مدلی غیرخطی به منظور طراحی سیستم تشخیص خطا و کاربرد آن در سیستم توربین گازی**
از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه دکتری تأیید می‌کند.

اعضای هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	علیرضا فاتحی	دانشیار	
۲- استاد مشاور	علی خاکی صدیق	استاد	
۳- استاد ممتحن خارجی	محمد فرشچی	استاد	
۴- استاد ممتحن خارجی	بابک نجار اعرابی	دانشیار	
۵- استاد ممتحن داخلی	محمد علی نکوئی	استادیار	
۶- استاد ممتحن داخلی	مهدی علیاری شوره دلی	استادیار	
۷- نماینده تحصیلات تکمیلی	احمد رادان	دانشیار	

اظهار نامه دانشجو

اینجانب **سید مهرداد حسینی** دانشجوی **دکتری رشته مهندسی برق** گرایش **کنترل دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی** گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در پایان‌نامه با عنوان:

توسعه روشهای چند مدلی غیرخطی به منظور طراحی سیستم تشخیص خطا و کاربرد آن در سیستم توربین گازی.

با راهنمایی استاد محترم جناب آقای **دکتر علیرضا فاتحی**، توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده در این پایان نامه مورد تایید می‌باشد، و در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. به علاوه 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 است و در تدوین متن پایان نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را به طور کامل رعایت کرده‌ام.

امضا دانشجو:

تاریخ:

حق طبع و نشر و مالکیت مدارک

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان‌نامه متعلق به نویسنده آن می‌باشد. هرگونه کپی برداری به صورت پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می‌باشد.

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

۳- هم چنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مراجع مجاز نمی‌باشد.

تقدیر و تشکر

بی شک دستاوردهای این پژوهش مبتنی بر اندوخته‌های من از آموزش‌های اساتیدم در دوران تحصیل بوده است. جا دارد در اینجا از استاد بزرگوار جناب آقای دکتر علیرضا فاتحی به خاطر زحمات بی دریغشان در طول دوره دکتری اینجانب، تشکر و قدردانی نمایم. هم چنین از استاد گرامی جناب آقای پروفسور علی خاکی صدیق برای راهنمایی‌های ارزشمندشان در به انجام رسیدن این پژوهش ممنون و سپاس‌گزارم.

از اعضای محترم داوران جناب آقای پروفسور محمد فرشچی، آقای دکتر بابک نجار اعرابی، آقای دکتر محمد علی نکوئی و آقای دکتر مهدی علیاری شوره دلی که زحمت داوری این رساله را بعهده گرفتند، نهایت سپاسگزاری را دارم.

بخـش‌هایی از این پژوهش در مدت فرصت مطالعاتی اینجانب در دانشگاه NTNU انجام شده است. از پروفسور Tor Arne Johansen که زمینه استفاده از این فرصت را فراهم آورده و راهنمایی من را بر عهده داشتند، تشکر می کنم.

در پایان از خانواده عزیزم و بویژه همسر مهربانم که همراهی و صبوری آنها همواره موجبات آرامش و دلگرمی من بوده است، تشکر و سپاس‌گذاری می کنم.

چکیده

در این رساله بطور کلی هدف توسعه تکنیک چند مدلی، از حالت خطی به حالت ترکیبی (ترکیب خطی و غیر خطی) برای شناسایی و مدل سازی سیستم های ایستا و غیرخطی بمنظور استفاده از آن در طراحی یک سیستم تشخیص و جداسازی خطا با دقت بالا می باشد. تشخیص خطا در سیستمهایی که دارای دینامیکهای غیرخطی پیچیده بوده و همچنین قابلیت رخ دادن خطاهای متعدد با دینامیکهای متفاوت را دارا می باشد، به سادگی صورت نمی گیرد و کاربرد مدلهای ترکیبی می‌تواند به افزایش کارایی در تشخیص و جداسازی خطا منجر شود.

برای این منظور استفاده از تکنیک چند مدلی ترکیبی معرفی می گردد که در آن از مدلهای محلی خطی و غیرخطی برای طراحی بانک مدل استفاده می شود. در ابتدا به مسئله طراحی بانک مدل خطی از دیدگاه تئوری پرداخته شده و در این راستا از دو مفهوم غیر خطی گری و H-Gap متریک بهره گرفته می شود. پس از تحلیل و بررسی هر کدام از این مفاهیم، اندیس های جدیدی جهت بهبود مسئله برای سیستم های تک ورودی-تک خروجی و همچنین سیستم های چند ورودی-چند خروجی بطور جداگانه معرفی می گردند و با استفاده از آنها الگوریتم هایی برای طراحی بانک مدل خطی در دو حالت خارج خط و روی خط پیشنهاد می شود. پس از آن، مسئله تعمیم بانک مدل خطی به بانک مدل ترکیبی (ترکیب خطی و غیر خطی) مطرح می گردد. ویژگی بارز این نوع طراحی در مقایسه با یک بانک مدل خطی و یا یک مدل تکی غیر خطی، این است که از دقت و راندمان بالاتری برخوردار خواهد بود. در این راستا اندیس توسعه یافته اطلاعات آکایکه (EAIC) در جهت انتخاب بانک مدل بهینه معرفی می‌گردد.

در نهایت از نتایج بدست آمده فوق جهت طراحی یک سیستم تشخیص خطا با راندمان مطلوب برای سیستم توربین گازی استفاده می شود. سیستم توربین گازی از جمله سیستم های حساس و پرکاربردی است که به گفته بسیاری از محققین پیچیده ترین موتور موجود در دنیا می باشد. لذا تمایل روزافزونی در زمینه طراحی سیستم های تشخیص خطای دقیق برای اینگونه سیستمها چه در محیط‌های علمی و چه در محیط‌های صنعتی ایجاد شده است.

بهبود یافتن راندمان در سیستمهای چند مدلی، افزایش دقت و بهبود سیستم تشخیص خطا از جمله هدفهایی است که در این رساله نیل به آنها با ارائه اندیسها و الگوریتم‌های جدید محقق گردیده و با انجام شبیه سازی های مختلف کارآیی آن نشان داده شده است.

کلید واژه: سیستمهای چند مدلی- انتخاب بانک مدل-غیر خطی گری- H-Gap متریک-تشخیص و جداسازی خطا- سیستم توربین گازی

فهرست مطالب

فصل ۱-مقدمه ۱
۱-۱-تاریخچه کوتاه ۲
۱-۲-بیان مسأله ۵
۱-۳-اهمیت مسأله ۶
۱-۳-۱-انگیزه‌های تئوری ۶
۱-۳-۲-انگیزه‌های کاربردی ۶
۱-۴-اهداف و نوآوری‌های تحقیق ۷
۱-۵-ساختار رساله ۸
فصل ۲-اندازه گیری غیرخطی گری براساس تحلیل سری‌های زمانی ۱۰
۲-۱-اندازه گیری غیرخطی در سیستم‌های تک ورودی-تک خروجی ۱۱
۲-۱-۱-تابع چسبندگی خطی در حوزه فرکانس ۱۲
۲-۱-۲-تابع چسبندگی خطی درحوزه زمان ۱۳
۲-۱-۳-تابع همبستگی متقابل غیرخطی درحوزه زمان ۱۳
۲-۱-۴-تابع خود همبستگی مرتبه بالا ۱۴
۲-۱-۵-تحلیل هارمونیکی ۱۴
۲-۱-۶-ماتریس هارمونیک ۱۵
۲-۱-۷-اعوجاج هارمونیکی ۱۶
۲-۱-۸-غیرخطی گری بر اساس ممان مرتبه بالا ۱۸
۲-۱-۹-نتایج شبیه سازی ۲۳
۲-۲-اندازه گیری غیرخطی در سیستم‌های چند ورودی-چند خروجی ۳۰
۲-۲-۱-تحلیل براساس تابع چسبندگی ۳۰
۲-۲-۲-تحلیل طیفی مرتبه بالا ۳۱
۲-۳-جمع بندی ۳۳
فصل ۳-معیار H-Gap متریک ۳۶
۳-۱-فاکتورهای نسبت به هم اول ۳۸
۳-۲-تعداد دوران ۳۹
۳-۳-معیار Gap متریک ۳۹
۳-۴-معیار v-Gap متریک ۴۰

۳-۵-معیار H-Gap متریک ۴۱
۳-۵-۱-معیار H-Gap متریک در حالت تک ورودی-تک خروجی ۴۲
۳-۵-۲-معیار H-Gap متریک در حالت چند ورودی-چند خروجی..... ۴۶
۳-۶-جمع بندی ۴۷
فصل ۴-طراحی بانک مدل در سیستم‌های چند مدلی ۴۸
۴-۱-سیستمهای چند مدلی..... ۵۰
۴-۲-الگوریتم طراحی بانک مدل (حالت تک ورودی-تک خروجی)..... ۵۳
۴-۲-۱-الگوریتم۱: انتخاب بانک مدل خطی در حالت خارج خط.....۵۴
۴-۲-۲-الگوریتم۲: انتخاب بانک مدل خطی در حالت روی خط.....۵۶
۴-۲-۳-شبیه سازی الگوریتم‌های تولید بانک مدل خطی ۶۲
۴-۳-الگوریتم ۳: طراحی بانک مدل (حالت چند ورودی-چند خروجی)..... ۷۲
۴-۳-۱-شبیه سازی ۲: توربین گازی..... ۷۲
۴-۴-الگوریتم ۴: طراحی بانک مدل ترکیبی (خطی و غیرخطی)..... ۸۲
۴-۴-۱-معیار اطلاعات ۸۳
۴-۴-۲-الگوریتم بانک مدل ترکیبی..... ۸۹
۴-۵-جمع بندی ۹۲
فصل ۵-تشخیص خطا با استفاده از تکنیک چند مدلی در توربین گازی..... ۹۳
۵-۱-تعریف خطا..... ۹۳
۵-۱-۱-انواع خطا.....۹۴
۵-۱-۲-ویژگی‌های یک سیستم تشخیص خطا ۹۵
۵-۱-۳-روش‌های کلی تشخیص خطا..... ۹۶
۵-۲-تشخیص خطا در توربین‌های گازی..... ۹۸
۵-۲-۱-توربین گازی و اجزاء آن ۹۸
۵-۲-۲-انواع خطا در سیستمهای توربین گازی ۱۰۰
۵-۲-۳-مرور مقالات ۱۰۰
۵-۳-تشخیص خطا با استفاده از ایده چند مدلی و سیستم ناظر عملکرد.....۱۰۸
۵-۳-۱-تولید سیگنال مانده در تکنیک چند مدلی..... ۱۰۸
۵-۴-شبیه سازی: توربین گازی..... ۱۱۱
۵-۴-۱-جرم گرفتگی کمپرسور ۱۱۲

۵-۴-۲-خوردگی پره‌های توربین ۱۲۴
۵-۵-جمع‌بندی ۱۳۲
فصل ۶-جمع بندی و پیشنهادها ۱۳۳
۶-۱-دستاوردهای رساله ۱۳۳
۶-۲-مزایای روش‌های ارائه شده ۱۳۴
۶-۳-معایب روش‌های ارائه شده ۱۳۵
۶-۴-پیشنهادها ۱۳۵
پیوست۱ ..... ۱۳۸
پیوست ۲ ..... ۱۴۴
فهرست مراجع ۱۴۷

فهرست شکل‌ها

شکل ۲- ۱ فرایند غیرخطی حلقه باز با افزودن نویز اندازه گیری ۱۱

شکل ۲- ۲ ساختار کلی یک سیستم حلقه بسته ۲۳

شکل ۲- ۳ تغییرات تابع چسبندگی برای حالت‌های مختلف خطی و غیرخطی بر اساس ورودی متناوب ۲۵

شکل ۲- ۴ اندازه غیرخطی بر اساس تابع چسبندگی با ورودی غیرمتناوب ۲۵

شکل ۲- ۵ اندازه غیرخطی بر اساس تابع چسبندگی با ورودی غیرمتناوب و نویز جمع شونده ۲۶

شکل ۲- ۶ هارمونیک‌های جدید تولید شده در حالت‌های خطی و غیرخطی به ازای سیگنال تحریک چند هارمونیکی (الف) با نویز کم (ب) با نویز زیاد ۲۷

شکل ۲- ۷ آشکارسازی غیرخطی با استفاده از اندیس‌های مبتنی بر توابع دوطیفی با نویز کم (الف) مد خطی (ب) مد غیرخطی ۲۸

شکل ۲- ۸ آشکارسازی غیرخطی با استفاده از اندیس‌های مبتنی بر توابع دوطیفی در شرایط نویز زیاد و مد غیرخطی ۲۸

شکل ۲- ۹ بازسازی توابع ممان مرتبه بالا در حضور نویز جمع شونده در خروجی (الف) تابع همبستگی متقابل (ب) تابع خود همبستگی ۲۹

شکل ۳- ۱ منحنی‌های پاسخ زمانی پله و Gap v- متریک ۴۱

شکل ۳- ۲ منحنی‌های پاسخ زمانی پله و Gap v- متریک ۴۲

شکل ۴- ۱ ساختار کلی سیستم چند مدلی ۵۰

شکل ۴- ۲ فلوچارت الگوریتم۱(بانک مدل خطی در حالت تک ورودی- تک خروجی بصورت خارج خط) ۵۸

شکل ۴- ۳ فلوچارت زیر الگوریتم ۱ در حالت تک ورودی- تک خروجی ۵۹

شکل ۴- ۴ فلوچارت زیر الگوریتم ۲ ۶۰

شکل ۴- ۵ فلوچارت الگوریتم۲(بانک مدل خطی در حالت تک ورودی- تک خروجی بصورت روی خط) ۶۱

شکل ۴- ۶ ساختار کلی سیستم خنثی سازی pH ۶۲

شکل ۴- ۷ اندازه غیرخطی بر اساس تابع دو چسبندگی برای خروجی سطح ۶۳

شکل ۴- ۸ میزان تغییرات SSE با افزایش تعداد مدل‌های محلی ۶۴

شکل ۴- ۹ اندازه غیرخطی بر اساس تابع دو چسبندگی برای خروجی pH ۶۵

شکل ۴- ۱۰ میزان تغییرات SSE با افزایش تعداد مدل‌های محلی ۶۶

شکل ۴- ۱۱ میزان تغییرات SSE با افزایش تعداد مدل‌های محلی ۶۷

شکل ۴- ۱۲ مقایسه خروجی واقعی با خروجی بانک مدل نهایی ۶۸

شکل ۴- ۱۳ تشکیل بانک مدل روی خط ۶۹

شکل ۴- ۱۴ تشکیل بانک مدل روی خط با مدل جایگزین ۷۰
شکل ۴- ۱۵ تشکیل بانک مدل خطی برای سیستم CSTR ۷۱
شکل ۴- ۱۶ فلوچارت الگوریتم۳ (بانک مدل خطی در حالت چند ورودی- چند خروجی)..... ۷۳
شکل ۴- ۱۷ فلوچارت زیر الگوریتم ۱ در حالت چند ورودی- چند خروجی..... ۷۴
شکل ۴- ۱۸ فلوچارت زیر الگوریتم ۲ در حالت چند ورودی- چند خروجی..... ۷۵
شکل ۴- ۱۹ شماتیک یک سیستم توربین گازی نمونه ۷۶
شکل ۴- ۲۰ بلوک دیاگرام ورودی-خروجی‌های مورد نظر ۷۷
شکل ۴- ۲۱ مقایسه خروجی واقعی T_5 و خروجی شناسایی شده ۷۸
شکل ۴- ۲۲ مقایسه خروجی واقعی W_t و خروجی شناسایی شده ۷۹
شکل ۴- ۲۳ تشکیل بانک مدل خطی برای خروجی Q_c ۸۰
شکل ۴- ۲۴ مقایسه بین خروجی سیستم واقعی با خروجی‌های سیستم چند مدلی و مدل NARX..... ۸۲
شکل ۴- ۲۵ فلوچارت الگوریتم۴ (بانک مدل ترکیبی) ۹۰
شکل ۴- ۲۶ فلوچارت زیر الگوریتم ۱ ..... ۹۱
شکل ۵- ۱ تقسیم بندی خطا از لحاظ اجزاء مختلف ۹۴
شکل ۵- ۲ تقسیم بندی خطا از لحاظ نوع خطا..... ۹۴
شکل ۵- ۳ طرحی کلی از یک سیستم تشخیص خطا..... ۹۵
شکل ۵- ۴ دسته بندی کلی روش‌های مختلف تشخیص خطا ۹۷
شکل ۵- ۵ طرحی کلی از یک سیستم توربین گازی ۹۸
شکل ۵- ۶ روند توسعه توربین گاز در گذشته، حال و آینده نسبت به دیگر روشهای تولید توان ۹۹
شکل ۵- ۷ بررسی جایگاه روش‌های مختلف تشخیص خطا با افزایش پیچیدگی مدل و سرعت ۱۰۲
شکل ۵- ۸ ساختار کلی تشخیص خطا به کمک تکنیک چند مدلی ۱۰۳
شکل ۵- ۹ ساختار کلی پیشنهادی تشخیص خطا به کمک تکنیک چند مدلی با استفاده از شبکه‌های عصبی و نروفازی..... ۱۰۵
شکل ۵- ۱۰ ساختار کلی تشخیص خطا به کمک تکنیک چند مدلی با استفاده از رویتگرهای UKF.....۱۰۶
شکل ۵- ۱۱ مدل سیمولاتوری توربین گازی ۱۰۷
شکل ۵- ۱۲ ساختار کلی پیشنهادی تشخیص خطا به کمک تکنیک چند مدلی..... ۱۰۸
شکل ۵- ۱۳ تولید بانک مدل‌های کاندید برای خروجی Q_c در حالت سالم..... ۱۱۳
شکل ۵- ۱۴ تغییرات بهترین بانک مدل انتخاب شده بر اساس وزن‌های W_1 و W_2 ..... ۱۱۵

شکل ۵- ۱۵ خروجی Q_c در حالت سالم (الف)- خروجی واقعی و خروجی تخمین زده شده با استفاده از مدل ترکیبی (ب) خطای مدلسازی ترکیبی (ج)- خروجی واقعی و خروجی تخمین زده شده با استفاده از بانک مدل خطی (د) خطای مدلسازی بانک مدل خطی (و) خروجی واقعی و خروجی تخمین زده شده با استفاده از بانک مدل NARX (ی) خطای مدلسازی بانک مدل NARX ۱۱۶

شکل ۵- ۱۶ تولید بانک مدل‌های کاندید برای خروجی Q_c در حالت جرم گرفتگی ۱۱۷

شکل ۵- ۱۷ خروجی Q_c در حالت معیوب (الف)- خروجی واقعی و خروجی تخمین زده شده با استفاده از مدل ترکیبی (ب) خطای مدلسازی ترکیبی (ج)- خروجی واقعی و خروجی تخمین زده شده با استفاده از بانک مدل خطی (د) خطای مدلسازی بانک مدل خطی (و) خروجی واقعی و خروجی تخمین زده شده با استفاده از بانک مدل NARX (ی) خطای مدلسازی بانک مدل NARX ۱۱۷

شکل ۵- ۱۸ خروجی Q_c در حالت (الف)- خروجی واقعی و خروجی تخمین زده شده با استفاده از مدل ترکیبی معیوب (ب) خطای مدلسازی مدل ترکیبی معیوب (ج)- خروجی واقعی و خروجی تخمین زده شده با استفاده از مدل ترکیبی سالم (د) خطای مدلسازی مدل ترکیبی سالم ۱۱۸

شکل ۵- ۱۹ درصد تشخیص خطای صحیح برای چهار حالت HMNN، NNNN، NNHM و HMHM به ازای مقادیر مختلف شدت خطا ۱۲۰

شکل ۵- ۲۰ درصد تشخیص خطای صحیح برای چهار حالت HMNN، NNNN، NNHM و HMHM به ازای مقادیر مختلف شدت خطا ۱۲۰

شکل ۵- ۲۱ درصد تشخیص خطای صحیح برای چهار حالت HMNN، NNNN، NNHM و HMHM به ازای مقادیر مختلف شدت خطا ۱۲۱

شکل ۵- ۲۲ درصد نادرست تشخیص خطا برای دو حالت HMNN و NNNN ۱۲۲

شکل ۵- ۲۳ درصد تشخیص خطای صحیح برای سه حالت NNNN، NNMM و NNHM به ازای مقادیر مختلف شدت خطا ۱۲۳

شکل ۵- ۲۴ درصد تشخیص خطای صحیح برای سه حالت NNNN، MMMM و HMHM به ازای مقادیر مختلف شدت خطا ۱۲۳

شکل ۵- ۲۵ تولید بانک مدل‌های کاندید برای خروجی P_5 در حالت سالم ۱۲۴

شکل ۵- ۲۶ خروجی P_5 در حالت سالم (الف)- خروجی واقعی و خروجی تخمین زده شده با استفاده از مدل ترکیبی (ب) خطای مدلسازی ترکیبی (ج)- خروجی واقعی و خروجی تخمین زده شده با استفاده از بانک مدل خطی (د) خطای مدلسازی بانک مدل خطی (و) خروجی واقعی و خروجی تخمین زده شده با استفاده از بانک مدل NARX (ی) خطای مدلسازی بانک مدل NARX ۱۲۵

شکل ۵- ۲۷ تولید بانک مدل‌های کاندید برای خروجی P_5 در حالت معیوب ۱۲۶

شکل ۵- ۲۸ خروجی در حالت معیوب (الف)- خروجی واقعی و خروجی تخمین زده شده با استفاده از مدل ترکیبی (ب) خطای مدلسازی ترکیبی (ج)- خروجی واقعی و خروجی تخمین زده شده با استفاده از بانک مدل

خطی (د) خطای مدلسازی بانک مدل خطی (و) خروجی واقعی و خروجی تخمین زده شده با استفاده از بانک مدل NARX (ی) خطای مدلسازی بانک مدل NARX..... ۱۲۶

شکل ۵- ۲۹ درصد تشخیص خطای صحیح برای چهار حالت HMNN، NNNN، NNHM و HMHM به ازای مقادیر مختلف شدت خطا..... ۱۲۷

شکل ۵- ۳۰ درصد تشخیص خطای صحیح برای چهار حالت HMNN، NNNN، NNHM و HMHM به ازای مقادیر مختلف شدت خطا..... ۱۲۸

شکل ۵- ۳۱ درصد تشخیص خطای صحیح برای چهار حالت HMNN، NNNN، NNHM و HMHM به ازای مقادیر مختلف شدت خطا..... ۱۲۸

شکل ۵- ۳۲ درصد تشخیص خطای صحیح برای سه حالت HMHM، NNHM و NNNN به ازای مقادیر مختلف شدت خطا در نقطه کار ۱ ..... ۱۳۰

شکل ۵- ۳۳ درصد تشخیص خطای صحیح برای سه حالت HMHM، NNHM و NNNN به ازای مقادیر مختلف شدت خطا در نقطه کار۲ ..... ۱۳۰

شکل ۵- ۳۴ سیستم تشخیص و آشکار سازی خطا با ساختار دو لایه ۱۳۱

فهرست جدول‌ها

جدول ۲- ۱ مقایسه اندیس‌های مختلف حوزه فرکانسی ارائه شده از لحاظ مزایا، معایب و نیازمندیها ۳۴

جدول ۳- ۱ مقایسه فاصله بین سیستم‌های مثالهای ۳ با استفاده از سه معیار مورد نظر ۴۵

جدول ۴- ۱ فاصله بین هر زوج از مدل‌های محلی به ازای خروجی سطح ۶۴

جدول ۴- ۲ مدل‌های تولید شده خروجی pH بر اساس داده‌های جمع آوری شده ۶۵

جدول ۴- ۳ تابع تبدیل مدل‌های محلی تولید شده نهایی برای خروجی pH ۶۷

جدول ۴- ۴ مقایسه عملکردی بین روش ارائه شده در رساله با روش موجود در مقاله مرجع ۷۱

جدول ۴- ۵ مقادیر نامی متغیرهای ورودی ۷۶

جدول ۴- ۶ درجه غیرخطی بودن خروجی‌های مورد نظر ۷۸

جدول ۴- ۷ مقایسه بین روش چند مدلی پیشنهادی و مدل NARX ۸۰

جدول ۴- ۸ نرخ کاهش خطا با افزایش تعداد مدل‌های محلی ۸۱

جدول ۴- ۹ نرخ کاهش خطا با افزایش تعداد نورون‌ها ۸۱

جدول ۴- ۱۰ مقایسه بین روش چند مدلی پیشنهادی و مدل NARX ۸۱

جدول ۴- ۱۱ محاسبه اندیس $EAIC1$ برای روش‌های MM و NARX در مدلسازی گشتاور کمپرسور ... ۸۸

جدول ۴- ۱۲ محاسبه اندیس $EAIC1$ برای روش‌های MM و NARX در مدلسازی سرعت شفت ۸۸

جدول ۵- ۱ اثر خطا بر روی پارامترهای قابل اندازه گیری ۱۰۳

جدول ۵- ۲ حداقل درصد درست تشخیص خطا ۱۰۴

جدول ۵- ۳ حداقل درصد درست تشخیص خطا برای فیلتر کالمن ورودی ناشناخته و شبکه‌های عصبی ۱۰۴

جدول ۵- ۴ درصد نادرست تشخیص و جداسازی خطا به ازای انتخاب سطح آستانه ثابت و تطبیقی ۱۰۵

جدول ۵- ۵ درصد اندیس کارایی برای جداسازی خطا ۱۰۶

جدول ۵- ۶ میانگین زمان تشخیص خطا به ازای شدت‌های مختلف برای رویتگر EKF و UKF ۱۰۷

جدول ۵- ۷ میانگین زمان تشخیص خطا به ازای واریانس‌های مختلف نویز برای رویتگر EKF و UKF ۱۰۷

جدول ۵- ۸ میانگین زمان تشخیص خطا به ازای افزایش سنسورها برای رویتگر EKF و UKF ۱۰۸

جدول ۵- ۹ تعداد و مشخصات بانک مدل‌های تولید شده برای خروجی Q_c ۱۱۴

جدول ۵- ۱۰ درصد نادرست تشخیص خطا به ازای تغییرات T_0 ..... ۱۲۱

جدول ۵- ۱۱ درصد نادرست تشخیص خطا به ازای تغییرات T_0 ..... ۱۲۹

جدول پ۱ : تعداد جایگشت‌های هارمونیک ۱۴۰

جدول پ۲ : تعداد جایگشت‌های هارمونیک ۱۴۰

جدول پ۳ : تعداد جایگشت‌های هارمونیک صفر ۱۴۱

جدول پ۴ : تعداد جایگشت‌های هارمونیک‌های نوع یک ۱۴۱

فهرست واژه

$Y(j\omega)$	Fourier transform of $y(t)$
$\lvert\cdot\rvert$	Magnitude
*	Complex conjugate
E	Expected value
σ	Standard deviation
FT	Fourier transform
DDFT	Double discrete FT
$\lVert\cdot\rVert_F$	Frobenius norm
†	Transpose conjugate
$\bar{\sigma}$	Upper singular value
$\otimes$	Kronecker product
$\odot$	Hadamard product
$cum(\tau_1,..,\tau_{n-1})$	n^{th} order cumulant
$\phi_{uy}(j\omega)$	Cross correlation function
$\phi_{yy}(j\omega)$	Auto correlation function
$\gamma_{uy}(j\omega)$	Coherence function
$\phi_{yyy}(j\omega)$	Higher order auto correlation
$Bis_y(\omega_1,\omega_2)$	Bispectrum of $y(t)$
$bic_y(\omega_1,\omega_2)$	Bicoherence of $y(t)$
$P_y(\omega)$	Power spectrum of $y(t)$
wno	Winding number
ζ	Number of open RHP zeros
η	Number of open RHP poles
$\bar{\eta}$	Number of closed RHP poles
$G_i^T=[N_i \quad M_i]$	Normalized right coprime factorization
$\tilde{G}_i=[-\tilde{M}_i \quad \tilde{N}_i]$	Normalized left coprime
$P_i(s)$	Linear transfer function
C(s)	Linear controller
G(s)	Closed loop transfer function
H	Nonlinear system
H_1	First order volterra kernel
$H_{ij}, i \neq j$	Coupling transfer function
θ_0	True parameters
θ	Orthogonal projection of θ_0
$\hat{\theta}$	Maximum likelihood estimation of θ
S	Expected log-likelihood

فصل ۱– مقدمه

از ابتدای سالهای ۱۹۷۰ با افزایش پیچیدگی و پیشرفت سیستمهای کنترلی و استفاده از آنها در محیط‌ها و کاربردهای حساس مانند موتورهای جت، کنترل پرواز، نیروگاهها، مراکز شیمیایی و هسته‌ای تمایل روزافزونی در زمینه طراحی سیستم‌های تشخیص خطا برای اینگونه سیستمها چه در محیط‌های علمی و چه در محیط‌های صنعتی ایجاد شده است.

عیوب در فرآیندهای صنعتی پیچیده، اغلب باعث عکس العملهای نامطلوب و یا از کار افتادن سیستم تحت کنترل می شوند و از نتایج آن می توان ضررهای اقتصادی ناشی از عملکرد غیر بهینه و گاهی صدمات جبران ناپذیر جانی را بر شمرد. آنچه که بعنوان فرآیند تشخیص عیب شناخته می شود، توسعه ابزاری برای شناسایی و مدل سازی عیوب از روی خطاهای موجود در سیستم و ارایه راهکارهایی برای تشخیص دقیق تر عیوب بوجود آمده است.

با توجه به اینکه در بین روش‌های مختلف تشخیص خطا، روش مبتنی بر مدل (مدل سازی) از اهمیت و جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. در این گونه روش‌ها، با استفاده از مدل موجود برای حالت‌های سالم و معیوب یک سیستم و مقایسه بین خروجی‌های بدست آمده، عمل تشخیص خطا صورت می‌گیرد. لذا داشتن مدل‌های دینامیکی دقیقی از رفتار سالم و همچنین رفتار معیوب سیستم مورد نظر، از نیازهای اساسی و ضروری بشمار می‌آید.

از آنجائیکه بسیاری از فرایندهای صنعتی غیرخطی می‌باشند و اطلاعات کاملی از فیزیک سیستم در دسترس نمی‌باشد، لذا مسئله شناسایی و مدلسازی، کنترل، تشخیص خطا و تحلیلهای پایداری آن بسیار مشکل است.

در شناسایی و مدلسازی سیستم‌های غیرخطی، تاکنون روش‌ها و راهکارهای گوناگونی ارائه شده است. مدل‌های کلاسیک شامل سری ولترا و همراشتاین - وینر [۱] از جمله مدل‌هایی هستند که می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. تکنیک شبکه‌های عصبی، خانواده دیگری از روش‌ها است که به دلیل قابلیت انعطاف پذیری آنها در توصیف دینامیک‌های غیرخطی کاربردهای بسیار زیادی دارند [۱]. مدل‌سازی فازی، از جمله مدل فازی تاکاگی- سوگنو [۲]، از دیگر ساختارهایی است که از قابلیتها و اهمیت ویژه‌ای برخودار است. از آنجائیکه اصل صرفه جویی[1] از اصول اساسی در شناسایی و مدل سازی بشمار می‌آید و مبین استفاده از مدل‌های ساده تر در شناسایی و مدل سازی می‌باشد، یکی از پرکاربردترین روشهای مدل سازی، استفاده از تکنیک چند مدلی است.

تکنیک چند مدلی[2] یک ابزار بسیار مناسب برای مدل سازی و شناسایی سیستم‌های غیرخطی می‌باشد و هم چنین یک محدوده وسیع کاربردی را شامل می‌شود. این روش در سال‌های اخیر مورد توجه بسیار قرار

[1] Parsimony
[2] Multiple Model

گرفته است که دلیل آن، قابلیت کاربرد در سیستم‌های دارای نامعینی‌های ساختاری و پارامتری و تبدیل کردن یک سیستم پیچیده به تعدادی زیر سیستم‌های ساده تر می‌باشد.

در این روش سیستم اصلی به چند زیر سیستم محلی ساده تر و کوچکتر شکسته شده که هر کدام توصیف کننده قسمتی از رفتار سیستم نهایی می‌باشند. در انتها با ترکیب این زیر سیستمهای محلی، سیستم اصلی مدل سازی می‌شود [۳]. در حقیقت، در این روش هرکدام از مدلهای محلی توصیف کننده قسمتی از دینامیک سیستم می‌باشد.

به دلیل ساختار ساده و در عین حال موثر تکنیک چند مدلی، این روش در طراحی سیستم‌های تشخیص خطا نیز کاربردهای بسیار زیادی پیدا کرده است. با این حال، مسئله مدل سازی و تشخیص خطا زمانی پیچیده تر می‌گردد که علاوه بر اینکه سیستم اصلی یک سیستم غیرخطی شدید است، خطاهای مربوطه نیز باعث ایجاد مدهای غیرخطی با دینامیکی متفاوت با دینامیک سیستم اصلی گردند. بنابراین استفاده از تکنیک چند مدلی غیرخطی، که به نوعی توسعه یافته تکنیک چند مدلی کلاسیک می‌باشد، منطقی تر و مناسبتر از سایر روش‌ها به نظر می‌رسد و رویکرد اصلی رساله نیز بر همین اساس شکل گرفته است.

۱–۱– تاریخچه کوتاه

روش چند مدلی دارای یک تاریخچه بسیار غنی و پرکاربرد در مسائل مدلسازی و شناسایی، کنترل و طراحی سیستم تشخیص و جداسازی خطا می‌باشد. مراجع [۳] و [۴] مرور نسبتا جامعی بر روشها و کاربردهای سیستمهای چندمدلی دارند.

روش چند مدلی اولین بار در دهه ۱۹۶۰ مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت [۵]. سپس این روش به همراه مسئله سوئیچینگ، مطرح شده و به عنوان نوعی از کنترل هوشمند در سیستم‌های کنترل تطبیقی مورد استفاده قرار گرفت [۶]. از اولین کاربردهای آن می‌توان به مسئله مدل سازی و شناسایی برای ردیابی مسیر اشاره کرد [۷].

یکی از مسائل بسیار مهم درتکنیک چند مدلی، طراحی مجموعه مدل می‌باشد که متاسفانه روش‌های نظام‌مند و در دسترس موجود در این موضوع محدود هستند. با این حال رویکردهای مختلفی برای تولید مدل ارائه شده است که مورد توجه ما می‌باشند. بنابراین، در ابتدا به مرور مقالات در زمینه طراحی بانک مدل در سیستم‌های چند مدلی و سپس کاربردهای آن بویژه در تشخیص خطا می‌پردازیم.

از عمده روش‌ها در مسئله طراحی بانک مدل، استفاده از دانش قبلی نسبت به سیستم مورد نظر می‌باشد. بعنوان اولین نمونه از این روش، می‌توان به [۸] اشاره کرد که در آن با در دسترس بودن معادلات دینامیکی سیستم در نقاط کاری مختلف و طراحی تخمینگر فیلتر کالمن در هر نقطه کاری، طراحی بانک مدل صورت گرفته و به دنبال آن یک ایده ساختار متغیر معرفی گردید که در آن تاثیر مجموعه مدلهای مختلف اما ساختار ثابت در تخمین خروجی بررسی شده و نشان داده شده است که استفاده از مجموعه مدلها با ساختار متغیر، تخمین را بهبود می‌بخشد [۹]. در [۱۰] با توجه به آگاهی کافی و دانش قبلی از سیستم غیرخطی مورد نظر، ۵ ناحیه کاری مجزا در نظر گرفته شده و برای هر کدام با توجه به داده‌های ورودی–خروجی یک مدل خطی مرتبه اول تولید شده است.

از دیگر روشها در این زمینه، روش تجزیه ناحیه کاری برای مدلسازی خطی چند مدلی می‌باشد [۱۱] که در این ساختار، فضای نقاط کاری و یا پارامترهای پلنت به زیر فضاهای کوچکتر تقسیم بندی می‌شود. بعنوان نمونه در [۱۲] بر اساس منحنی‌های پاسخ پله دورترین نقاط کار، دو مدل خطی دینامیکی مرتبه اول بدست آورده شده و سپس بر اساس فاصله بین این دو مدل، تعداد معینی مدل فرض می‌شود و پارامترهای آنها بطور مساوی بین حداقل و حداکثر میزان تقسیم بندی شده و یک بانک مدل تشکیل می‌شود. همچنین می‌توان به روش تولید مدل با تقسیم بندی فضای پارامترها [۱۳] اشاره کرد. بر همین اساس روش تجزیه محدوده متغیرها بر روی ورودی- خروجی بصورت مشبک و تولید مدل به ازای هر یک از اجزای شبکه ایجاد شده نیز از جمله روش‌های پیشنهاد شده می‌باشد [۱۰].

رویکرد دیگری که در این زمینه مورد استفاده قرار گرفته است، استفاده از داده‌های موجود برای تقسیم بندی فضای کاری می‌باشد. از نمونه این روش‌ها، می‌توان به الگوریتم LOLIMOT[1] [۱] اشاره کرد که در آن داده‌های شامل فضای ورودی به قسمت‌های کوچکتری بطور مساوی شکسته شده و در هر گام، شناسایی بر روی داده‌های جدید صورت می‌گیرد. در [۱۴] با فرض داشتن تعداد معینی مدل از قبل، با ورود داده‌های جدید در هر بازه زمانی، یک مدل شناسایی و در صورت لزوم به بانک مدل اضافه می‌گردد. از دیگر روش‌های معرفی شده در این زمینه، استفاده از روش خوشه بندی[2] داده می‌باشد. در این حالت، ابتدا با استفاده از روش‌های مختلف خوشه‌بندی، تعداد مدلهای محلی تعیین می‌شود و سپس مدلسازی محلی براساس داده‌های خوشه بندی شده صورت می‌گیرد [۱۵]. در [۱۶] از شبکه‌های خود سازمانده[3] مبتنی بر سیستمهای چندمدلی جهت شناسایی یک سیستم غیر خطی استفاده شده است که در آن دینامیک کل سیستم غیرخطی با دسته بندی کردن فضای ورودی- خروجی و ترکیب مدلهای محلی در نواحی کاری مختلف بدست می‌آید. ایده اصلی در این روش این است که برای شناسایی مدلهای محلی خطی از داده‌های موجود در هر نقطه کار و در همسایگی آن استفاده شده است. در [۱۷, ۱۸] یک شناساگر مدل چند مدلی ارائه شده است که براساس شبکه‌های عصبی خودسازمانده طراحی شده که در آن تعداد و پارامترهای مدل‌های محلی به صورت روی خط شناسایی می‌شوند.

یکی دیگر از مسائل بسیار مهم درتکنیک چند مدلی، چگونگی نظارت و اصلاح بانک مدل در صورت لزوم و بعبارتی یافتن تعداد مدل مناسب می‌باشد. اولین بار این موضوع به صورت تئوری توسط Li [۱۹] نشان داده شد که استفاده از تعداد زیادی از مدل‌های محلی به همان بدی به کارگیری تعداد بسیارکم می‌باشد و به دنبال آن معیار دایره برای تعیین تعداد مدل پیشنهاد گردید.

در بسیاری از مراجع، مسئله طراحی بانک مدل، بر این پرسش استوار است که چه زمانی یک مدل محلی غیرضروری باید از بانک مدل حذف شود یا اینکه یک مدل محلی جدید باید افزوده شود. برای حل این مسئله استفاده از متریک‌های مختلف پیشنهاد شده است.

[1] Local Linear Model Tree
[2] Clustering
[3] Self Organizing Map