دانشکده: برق و رباتیک

گروه: کنترل

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

کنترل سرعت لغزشی- فازی موتورهای سنکرون مغناطیس دائم

مصطفی نجفی

استاد راهنما:

دکتر محمد حداد ظریف

استاد مشاور:

دکتر محمد مهدی فاتح

ماه و سال انتشار:

بهمن‌ماه ۱۳۹۲

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده: برق و رباتیک

گروه: کنترل

کنترل سرعت لغزشی-فازی
موتورهای سنکرون مغناطیس دائم

دانشجو: مصطفی نجفی

استاد راهنما:

دکتر محمد حداد ظریف

استاد مشاور:

دکتر محمد مهدی فاتح

پایان‌نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

ماه و سال انتشار:

بهمن‌ماه ۱۳۹۲

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده:

گروه:

پایان‌نامه کارشناسی ارشد آقای/ خانم .....

تحت عنوان:

در تاریخ ..... توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه ..... مورد پذیرش قرار گرفت.

اساتید راهنما	امضاء	اساتید مشاور	امضاء
نام و نام خانوادگی :		**نام و نام خانوادگی :**	
نام و نام خانوادگی :		**نام و نام خانوادگی :**	

اساتید داور	امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء
نام و نام خانوادگی :		**نام و نام خانوادگی :**	
نام و نام خانوادگی :			
نام و نام خانوادگی :			
نام و نام خانوادگی :			

تقدیم به **پدر** و **مادر** عزیزم

به پاس قطره‌ای از دریای زحمات این عزیزان

سپاس فراوان از تلاش‌ها و راهنمایی‌های اساتید محترم

دکتر محمد حداد ظریف

و

دکتر محمد مهدی فاتح

که من را در تمامی مراحل پایان‌نامه یاری کردند. همچنین از تمامی اساتید محترم دانشکده برق و رباتیک صمیمانه تشکر می‌کنم.

تعهد نامه

اینجانب **مصطفی نجفی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی برق-کنترل** دانشکده **برق و روباتیک** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه **کنترل سرعت لغزشی فازی موتورهای سنکرون مغناطیس دائم** تحت راهنمایی **دکتر محمد حداد ظریف** متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

در این پایان‌نامه، روش کنترلی نوینی مبتنی بر کنترل حالت لغزشی برای موتورهای سنکرون مغناطیس دائم ارائه می‌گردد که با روش کنترل حالت لغزشی مرسوم متفاوت است. کنترل حالت لغزشی پیشنهادی با میانگین وزنی متغیر از سیگنال کنترل حالت لغزشی، دینامیک‌های سیستم را روی سطح لغزش قرار می‌دهد، بدون آنکه از تابع علامت در قانون کنترل استفاده گردد. این موضوع باعث می‌شود لرزش در سیگنال کنترل رخ ندهد. روش کنترل سرعت پیشنهادی مبتنی بر رویکرد ولتاژ است و در گروه کنترل برداری میدان قرار می‌گیرد. کنترل پیشنهادی بر عدم قطعیت‌ها و اغتشاش بار خارجی و اغتشاشات وارده بر مدار الکتریکی مقاوم است. پایداری کنترل حالت لغزشی پیشنهادی به روش مستقیم لیاپانوف اثبات می‌گردد. در ابتدا وزن‌های (ضرایب) میانگین‌گیری به روش تناسبی-انتگرالی تعیین می‌شوند. این روش طرح ساده‌ای برای پیاده‌سازی کنترل حالت لغزشی پیشنهادی به همراه دارد. کنترل حالت لغزشی مرسوم و پیشنهادی برای کنترل سرعت موتورهای سنکرون مغناطیس دائم شبیه‌سازی و در خصوص پدیده لرزش و دقت پاسخ‌ها با یکدیگر مقایسه می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی‌ها برتری روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. برای بهبود عملکرد سیستم کنترل لغزشی پیشنهادی در شرایط کاری مختلف از سیستم فازی جهت تعیین وزن‌های میانگین‌گیری استفاده می‌شود. این روش (کنترل لغزشی-فازی پیشنهادی) نیز برای کنترل سرعت موتور سنکرون مغناطیس دائم شبیه‌سازی و با روش لغزشی پیشنهادی قبل در خصوص پدیده لرزش مقایسه می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که در شرایط مختلف کاری موتور سنکرون مغناطیس دائم، کنترل لغزشی-فازی پیشنهادی از عملکرد بهتری برخوردار است.

کلمات کلیدی: کنترل سرعت موتورهای سنکرون مغناطیس دائم، کنترل حالت لغزشی، حذف پدیده لرزش، کنترل حالت لغزشی-فازی، کنترل برداری میدان

مقالات مستخرج از پایان‌نامه

[۱] مصطفی نجفی، محمد حداد ظریف، محمد مهدی فاتح، " کنترل حالت لغزشی موتورهای سنکرون مغناطیس دائم بدون مسئله لغزش"، ارسال‌شده به مجله کنترل

فهرست

فصل ۱: مقدمه ۱

۱.۱. مروری بر کارهای گذشته ۳

۲.۱. مروری بر این پژوهش ۶

فصل ۲: معرفی و مدل‌سازی موتورهای سنکرون مغناطیس دائم ۷

۱.۲. مبدل الکترونیک قدرت ۸

۱.۱.۲. مدولاسیون عرض پالس سینوسی ۹

۲.۲. موتورهای سنکرون مغناطیس دائم ۱۰

۱.۲.۲. مدل‌سازی موتورهای سنکرون مغناطیس دائم در دستگاه مختصات $\boldsymbol{abc}$ ۱۰

۲.۲.۲. دستگاه مختصات چرخان روتور- $\boldsymbol{qd0}$ ۱۱

۳.۲.۲. مدل موتور سنکرون مغناطیس دائم در دستگاه مختصات $\boldsymbol{qd0}$ ۱۳

۴.۲.۲. معادلات موتور در فضای حالت ۱۴

فصل ۳: راهبردهای کنترل موتور سنکرون مغناطیس دائم ۱۶

۱.۳. کنترل اسکالر ۱۷

۲.۳. کنترل برداری میدان ۱۷

۳.۳. کنترل مستقیم گشتاور ۱۹

۴.۳. مقایسه روش‌های کنترل ۲۳

فصل ۴: کنترل حالت لغزشی ۲۵

۱.۴. معرفی کنترل حالت لغزشی ۲۶

۲.۴. لرزش ۲۷

۱.۲.۴. روش لایه مرزی ۲۸

۲.۲.۴. روش لایه مرزی تطبیقی ۲۹
۳.۲.۴. روش مبتنی بر رؤیتگر ۲۹
۴.۲.۴. کنترل حالت لغزشی مرتبه بالا ۲۹
۵.۲.۴. روش‌های هوشمند ۳۰
۳.۴. کنترل حالت لغزشی پیشنهادی ۳۰
۴.۴. تحلیل پایداری کنترل حالت لغزشی پیشنهادی ۳۳
فصل ۵: کنترل حالت لغزشی سرعت موتورهای سنکرون مغناطیس دائم ۳۵
۱.۵. کنترل‌کننده سرعت ۳۶
۲.۵. کنترل‌کننده جریان iq ۳۹
۳.۵. کنترل‌کننده جریان id ۴۰
۴.۵. شبیه‌سازی ۴۱
۱.۴.۵. کنترل حالت لغزشی مرسوم ۴۲
۲.۴.۵. کنترل حالت لغزشی پیشنهادی ۴۶
فصل ۶: کنترل لغزشی-فازی سرعت موتورهای سنکرون مغناطیس دائم ۵۳
۱.۶. ضریب میانگین‌گیری فازی ۵۴
۲.۶. شبیه‌سازی ۵۶
۱.۲.۶ شبیه‌سازی ۱ ..... ۵۶
۲.۲.۶ شبیه‌سازی ۲ ..... ۶۱
فصل ۷: نتایج و پیشنهادها ۶۶
۱.۷. نتیجه‌گیری ۶۷
۲.۷. پیشنهادها ۶۷
مراجع ۶۸

فهرست شکل‌ها

شکل (۲- ۱): اینورتر سه فاز [۲۲] ۹
شکل (۲- ۲): مدولاسیون عرض پالس [۲۲] ۹
شکل (۲- ۳): دستگاه مختصات $qd0$ [۲۶] ۱۲
شکل (۳- ۱): کنترل برداری میدان [۳] ۱۸
شکل (۳- ۲): نمودار بردار فضای حالت موتور سنکرون با $i_d \leq 0$ [۲۵] ۱۹
شکل (۳- ۳): بلوک دیاگرام کنترل مستقیم گشتاور [۷] ۲۰
شکل (۳- ۴): تغذیه موتور سنکرون مغناطیس دائم توسط اینورتر [۷] ۲۱
شکل (۳- ۵): بردارهای ولتاژ در کنترل مستقیم گشتاور [۷] ۲۱
شکل (۳- ۶): تغییرات شار پیوندی و گشتاور توسط ولتاژ استاتور در کنترل مستقیم گشتاور ۲۲
شکل (۵- ۱): بلوک دیاگرام کنترل سرعت موتور سنکرون در کنترل حالت لغزشی مرسوم ۴۲
شکل (۵- ۲): سرعت زاویه‌ای موتور سنکرون در کنترل حالت لغزشی مرسوم ۴۳
شکل (۵- ۳): ولتاژ V_d در کنترل حالت لغزشی مرسوم ۴۳
شکل (۵- ۴): ولتاژ V_q در کنترل حالت لغزشی مرسوم ۴۴
شکل (۵- ۵): جریان i_d در کنترل حالت لغزشی مرسوم ۴۴
شکل (۵- ۶): جریان i_q در کنترل حالت لغزشی مرسوم ۴۵
شکل (۵- ۷): جریان i_q^* در کنترل حالت لغزشی مرسوم ۴۵
شکل (۵- ۸): خطای سرعت در کنترل حالت لغزشی مرسوم ۴۶
شکل (۵- ۹): بلوک دیاگرام کنترل سرعت موتور سنکرون در کنترل حالت لغزشی پیشنهادی ۴۷
شکل (۵- ۱۰): سرعت زاویه‌ای موتور سنکرون در کنترل حالت لغزشی پیشنهادی ۴۸
شکل (۵- ۱۱): جریان i_d در کنترل حالت لغزشی پیشنهادی ۴۸
شکل (۵- ۱۲): جریان i_q در کنترل حالت لغزشی پیشنهادی ۴۹
شکل (۵- ۱۳): ولتاژ V_d در کنترل حالت لغزشی پیشنهادی ۴۹
شکل (۵- ۱۴): ولتاژ V_q در کنترل حالت لغزشی پیشنهادی ۵۰
شکل (۵- ۱۵): جریان i_q^* در کنترل حالت لغزشی پیشنهادی ۵۰
شکل (۵- ۱۶): خطاها در کنترل حالت لغزشی پیشنهادی ۵۱
شکل (۵- ۱۷): متغیرهای لغزش در کنترل حالت لغزشی پیشنهادی ۵۱

شکل (۵- ۱۸): ضرایب میانگین‌گیری (α_i) ۵۲
شکل (۶- ۱): توابع تعلق ورودی برای سیستم فازی در کنترل لغزشی-فازی..... ۵۵
شکل (۶- ۲): توابع تعلق خروجی برای سیستم فازی در کنترل لغزشی-فازی ۵۵
شکل (۶- ۳): بلوک دیاگرام کنترل موتور سنکرون در روش لغزشی-فازی پیشنهادی ۵۷
شکل (۶- ۴): سرعت زاویه‌ای موتور در کنترل حالت لغزشی-فازی پیشنهادی ۵۸
شکل (۶- ۵): مؤلفه‌های ولتاژ استاتور در کنترل لغزشی-فازی پیشنهادی ۵۸
شکل (۶- ۶): مؤلفه‌های جریان استاتور در کنترل لغزشی-فازی پیشنهادی ۵۹
شکل (۶- ۷): خطاها در کنترل لغزشی-فازی پیشنهادی ۵۹
شکل (۶- ۸): متغیرهای لغزش در کنترل لغزشی-فازی پیشنهادی ۶۰
شکل (۶- ۹): ضرایب میانگین‌گیری در کنترل لغزشی-فازی پیشنهادی ۶۰
شکل (۶- ۱۰): سرعت زاویه‌ای موتور سنکرون و سرعت مطلوب ω_m^* در کنترل حالت لغزشی پیشنهادی ۶۱
شکل (۶- ۱۱): مؤلفه d ولتاژ استاتور در کنترل حالت لغزشی پیشنهادی ۶۲
شکل (۶- ۱۲): مؤلفه q ولتاژ استاتور در کنترل حالت لغزشی پیشنهادی..... ۶۲
شکل (۶- ۱۳): سرعت زاویه‌ای موتور سنکرون و سرعت مطلوب ω_m^* در کنترل لغزشی-فازی پیشنهادی ۶۳
شکل (۶- ۱۴): مؤلفه‌های ولتاژ استاتور در کنترل لغزشی-فازی پیشنهادی ۶۴
شکل (۶- ۱۵): مؤلفه‌های جریان استاتور در کنترل لغزشی-فازی پیشنهادی ۶۴
شکل (۶- ۱۶): خطای کنترل‌کننده‌ها در کنترل لغزشی-فازی پیشنهادی ۶۵
شکل (۶- ۱۷): ضرایب میانگین‌گیری در کنترل لغزشی-فازی پیشنهادی ۶۵

فهرست جدول‌ها

جدول (۳ -۱): نحوه انتخاب بردارهای ولتاژ در کنترل مستقیم گشتاور [۷] ۲۲
جدول (۵- ۱): مشخصات نامی موتور سنکرون مغناطیس دائم ۴۲
جدول (۶- ۱): قوانین فازی جهت تعیین ضریب میانگین‌گیری.....۵۶

فصل ۱

مقدمه

امروزه محرکه‌های الکتریکی[1] نقش مهمی در صنعت ایفا می‌کنند. موتورهای الکتریکی، مبدل‌های الکترونیک قدرت[2] و سیستم کنترل اجزاء محرکه‌های الکتریکی را تشکیل می‌دهند. محرکه‌ها عموماً برای اهداف کنترل حرکت (کنترل سرعت یا کنترل موقعیت) به کار گرفته می‌شوند. محرکه‌ها در بسیاری از صنایع همچون صنایع نظامی، هوایی، وسایل نقلیه و اتوماسیون کاربرد دارند.

موتورهای الکتریکی قلب تپنده محرکه‌های الکتریکی هستند و از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. در سال‌های اخیر موتورهای سنکرون مغناطیس دائم[3] به دلیل پاره‌ای از ویژگی‌ها و مشخصه‌ها مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته‌اند. از مهم‌ترین این ویژگی‌ها می‌توان به قابلیت ساخت در ابعاد کوچک، چگالی شار فاصله هوایی بالا، چگالی گشتاور بالا و نسبت گشتاور به اینرسی بالا اشاره کرد [۱, ۲]. همچنین بازده آن‌ها به دلیل عدم وجود تلفات الکتریکی در روتور نسبت به موتورهای القایی مشابه بیشتر است و در مقایسه با موتورهای جریان مستقیم به دلیل عدم حضور جاروبک از هزینه تعمیرات و نگهداری پایین‌تری برخوردار می‌باشند. با پیشرفت‌های اخیر در مواد مغناطیسی، نیمه‌رساناها، ادوات الکترونیک قدرت و نظریه‌های کنترل غیرخطی[4]، به‌کارگیری این دسته از موتورها در صنعت روز به روز در حال افزایش است. موتورهای سنکرون مغناطیس دائم بیشتر در گستره توانی کم تا متوسط به کار گرفته می‌شوند [۳]. این موتورها در کاربردهای حرکتی اعم از رباتیک و ابزار دقیق، نقش مهمی ایفا می‌کنند. در ادامه‌ی مباحث و در برخی موارد این دسته از موتورها را به اختصار موتورهای سنکرون ذکر خواهیم کرد که در حقیقت منظور همان موتورهای سنکرون مغناطیس دائم است.

در کنترل موتورهای سنکرون مغناطیس دائم باید به ساختار غیرخطی و تزویج بین کمیت‌ها توجه داشت. سیستم کنترل باید پاسخ سریع، دقیق و مقاوم در برابر عدم قطعیت‌ها[5] و اغتشاشات خارجی[6] برای سیستم به همراه داشته باشد. با توجه به غیرخطی بودن سیستم موتور سنکرون، کنترل‌کننده‌های خطی در گستره کاری وسیع، عملکرد مطلوبی برای سیستم نخواهند داشت [۴]. در نتیجه برای کارایی محرکه الکتریکی در گستره کاری وسیع ناگزیر به استفاده از کنترل‌های غیرخطی خواهیم بود.

کنترل موتورهای سنکرون مغناطیس دائم به دو راهبرد کلی، کنترل اسکالر و کنترل برداری تقسیم می‌شود. کنترل اسکالر به عنوان روشی ساده و ارزان شناخته می‌شود، اما این روش کنترلی بر حالت گذرای

[1] electrical drives
[2] industrial electronic converter
[3] permanent magnet synchronous motor (PMSM)
[4] nonlinear control
[5] uncertainties
[6] external disterbances

سیستم تأثیر چندانی ندارد. این موضوع باعث شده است که در کاربردهای دقیق و حساس از این روش استفاده نگردد. کنترل برداری خود به دو روش کنترل مستقیم گشتاور[1] و کنترل برداری میدان[2] تفکیک می‌شود. راهبرد کنترل برداری میدان از مزایایی چون پاسخ سریع، راه‌اندازی نرم و شتاب اولیه مناسب برخوردار است [۵, ۶]. لیکن کنترل برداری میدان نسبت به تغییرات پارامترهای موتور و اغتشاشات خارجی حساس است [۳]. از این رو عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات خارجی بر عملکرد موتور اثرات نامطلوبی خواهد داشت. به‌کارگیری کنترل مقاوم در راهبرد کنترل برداری میدان می‌تواند اثر عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات را جبران سازد و عملکرد سیستم را بهبود بخشد. تنظیم مستقیم شار و گشتاور در روش کنترل مستقیم گشتاور صورت می‌گیرد. این روش نسبت به روش کنترل برداری میدان از پاسخ دینامیکی سریع‌تری برخوردار است. راهبرد کنترل مستقیم گشتاور وابستگی کمتری به پارامترهای موتور دارد، همچنین حذف تبدیلات دستگاه مختصات ساکن استاتور به دستگاه مختصات چرخان روتور و بالعکس از دیگر مزایای این راهبرد است [۷]. با این وجود، راهبرد مذکور به دلیل عملکرد ضعیف در سرعت‌های پایین [۱] و حضور تپش[3] در پاسخ سیستم در کاربردهای دقیق و حساس به کار گرفته نمی‌شود.

۱.۱. مروری بر کارهای گذشته

کنترل پسگام[4] به عنوان یکی از روش‌های کنترل مقاوم در کنترل موتورهای سنکرون به کار گرفته شده است [۸, ۹]. قانون کنترل پسگام از توابع غیرخطی و پیچیده‌ای تشکیل می‌شود که به راحتی به دست نمی‌آیند و این خود یکی از مشکلات این روش کنترلی است [۱۰].

از دیگر روش‌های مقاوم که در کنترل موتورهای سنکرون به کار گرفته شده است، می‌توان به کنترل حالت لغزشی[5] اشاره کرد [۱۱-۱۳]. در [۱۱] از خطی‌سازی فیدبک برای سادگی در طراحی کنترل‌کننده استفاده شده اما معضل اصلی در این مقاله حضور شتاب به عنوان متغیر در قانون کنترل است. متغیر شتاب به راحتی به دست نمی‌آید. اصلی‌ترین مشکل در کنترل حالت لغزشی، نوسانات شدید فرکانس بالا در سیگنال کنترل است. این نوسانات، لرزش[6] نامیده می‌شوند. این پدیده می‌تواند برخی از دینامیک‌های

[1] direct torque control (DTC)
[2] field oriented control (FOC)
[3] ripple
[4] back stepping control
[5] sliding mode control (SMC)
[6] chattering

سیستم را تحریک و در عملکرد سیستم اختلال ایجاد کند. لرزش سیستم‌های مکانیکی را با فرسایش و از بین رفتن تدریجی قطعات مواجه می‌سازد. دو عامل باعث بروز پدیده لرزش می‌شود:

۱) وجود فرکانس‌های بالا در سیگنال کنترل

۲) بهره بالا در حلقه کنترل

در نتیجه برای کاهش لرزش باید دو عامل بالا را در نظر داشت و در جهت رفع آن‌ها برآمد.

یکی از روش‌های کاهش لرزش، رهایی از تابع علامت[۱] در قانون کنترل است. در [۱۲] تابع اشباع[۲] جایگزین تابع علامت در قانون کنترل شده و این موضوع لرزش را کاهش داده است. اندازه لرزش به بهره کلیدزنی (k_{sw} در معادله (۴-۸)) در قانون کنترل نیز وابسته است، هرچه این بهره کوچک‌تر باشد لرزش نیز کمتر خواهد بود و بالعکس. بر همین اساس برای کاهش بهره کلیدزنی تا حد ممکن، روش‌های مختلفی برای تخمین بهینه‌ی این بهره به کار گرفته شده است. بهره کلیدزنی خود به حد بالای عدم قطعیت‌ها وابسته است. در [۱۳] با استفاده از نظریه کنترل تطبیقی[۳]، بهره کلیدزنی به صورت برخط[۴]، تقریب زده می‌شود. این موضوع باعث شده تا لرزش و تلاش کنترلی[۵] هر دو نسبت به روش کنترل حالت لغزشی مرسوم، کاهش یابند. هرچند هنوز هم پدیده لرزش در سیگنال کنترلی دیده می‌شود. یکی از روش‌های کاهش پدیده لرزش، استفاده از کنترل‌های هوشمند در کنترل حالت لغزشی است. سیستم‌های فازی بیش‌ترین نقش را در این مطالعات به خود اختصاص داده‌اند.

کنترل فازی[۶] به عنوان یک روش هوشمند در کنترل سیستم‌های پیچیده شناخته می‌شود. این روش کنترلی، مستقل از مدل[۷] می‌باشد. کنترل فازی برای موتورهای سنکرون مغناطیس دائم نیز مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۴, ۱۵]. قوانین فازی در کنترل فازی توسط فرد خبره تعیین می‌شود، هرچند در برخی موارد، قوانین و متغیرهای فازی با روش سعی و خطا به دست می‌آیند. البته برای بهبود این نقیصه تحقیقاتی انجام شده است. به طور مثال در [۱۴] قسمت‌های مختلف کنترل‌کننده، پارامترسازی شده و از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی کنترل‌کننده استفاده شده است. در این روش، دیگر نیازی به اطلاعات دقیق از عملکرد سیستم و دانش فرد خبره نیازی نبوده و کنترل‌کننده خود به شرایط مطلوب دست

[1] sign function
[2] saturation function
[3] adaptive control
[4] on line
[5] control effort
[6] fuzzy control
[7] model free

می‌یابد. نتایج حاصل از [۱۴] نشان می‌دهد که حساسیت به اغتشاشات و نوسانات در این روش نسبت به کنترل فازی مرسوم، افزایش یافته است. از سویی دیگر بهینه‌سازی در این تحقیق خارج خط[1] است. روش دیگری نیز برای تنظیم متغیرهای کنترل‌کننده فازی ارائه شده است. در این روش از شبکه‌های عصبی[2] برای تنظیمات کنترل‌کننده فازی استفاده می‌شود. این دست از کنترل فازی، کنترل فازی-عصبی[3] نامیده می‌شود [۱۶]. کنترل فازی-عصبی [۱۷] برای کنترل سرعت موتور سنکرون به این شکل طراحی شده است که شبکه عصبی، توابع تعلق در کنترل‌کننده فازی را تنظیم می‌کند. هرچند در اینجا نیز تنظیمات خارج خط است. تقریب‌زنندگی عمومی، یکی از ویژگی‌های مهم در سیستم‌های فازی بشمار می‌رود. این ویژگی منحصربه‌فرد، بسیاری از محققان را بر این واداشته که با ترکیب این منطق با دیگر روش‌های کنترلی، عملکرد کنترل‌کننده‌ها را ارتقا دهند. از ویژگی تقریب‌زنندگی عمومی سیستم فازی می‌توان در بسیاری از مسائل کنترلی بهره برد. به عنوان مثال از این ویژگی در تخمین عدم قطعیت‌ها جهت جبران اثرات آن بر پاسخ سیستم [۱۸] و یا تخمین تابع غیرخطی پیچیده در کنترل پسگام [۱۰] استفاده شده است. کنترل فازی در برابر عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات خارجی مقاوم است ولی این روش کنترل به اندازه کنترل حالت لغزشی در غلبه بر عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات قدرتمند نیست.

سیستم فازی می‌تواند شرایط و عملکرد کنترل حالت لغزشی را بهبود بخشد. از سیستم‌های فازی می‌توان در کاهش لرزش و یا تخمین اطلاعات مورد نیاز در قانون کنترل حالت لغزشی استفاده کرد. به طور مثال در [۱۹] کنترل‌کننده هیبریدی[4] طراحی شده است که در محدوده خطاهای بزرگ، یک کنترل‌کننده حالت لغزشی است و در محدوده خطاهای کوچک، به کنترل‌کننده فازی-عصبی تبدیل می‌شود. این راهکار لرزش را به شدت کاهش داده و نسبت به کنترل فازی نیز مقاوم‌تر است، هرچند حساسیت سیستم به عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات، نسبت به کنترل حالت لغزشی مرسوم، افزایش یافته است. از خاصیت تقریب زنندگی عمومی سیستم‌های فازی نیز می‌توان در تخمین بهره کلیدزنی در کنترل حالت لغزشی استفاده کرد [۲۰, ۲۱]. در [۲۱] مکانیزم فازی-تطبیقی برای تخمین بهینه بهره کلیدزنی، طراحی شده است. این امر باعث کاهش لرزش و تلاش کنترلی نسبت به کنترل حالت لغزشی مرسوم و کنترل فازی-لغزشی [۲۰] می‌شود.

[1] off line
[2] neural network
[3] neuro-fuzzy control
[4] hybrid controller

در اکثر تحقیقات صورت گرفته برای کنترل موتورهای سنکرون در تحلیل و طراحی کنترل‌کننده به دینامیک‌های الکتریکی موتور توجهی نشده است. در کاربردهای دقیق و حساس توجه به این بخش از موتور الزامی به نظر می‌رسد.

۲.۱. مروری بر این پژوهش

این پایان‌نامه به کنترل سرعت موتور سنکرون مغناطیس دائم اختصاص دارد. کنترل‌کننده باید در برابر عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات خارجی مقاوم باشد. همچنین در طراحی آن باید تمامی بخش‌های موتور سنکرون، اعم از دینامیک‌های الکتریکی و مکانیکی مورد توجه قرار گیرد. در این راه از کنترل حالت لغزشی بهره خواهیم برد. برای کاهش پدیده لرزش روش نوینی در کنترل حالت لغزشی ارائه خواهیم کرد. این روش پیشنهادی مبتنی بر میانگین وزنی متغیر از سیگنال کنترل لغزشی است. در این روش وزن (ضریب) میانگین‌گیری به گونه‌ای تعیین می‌شود که دینامیک‌های سیستم بدون لرزش بر روی سطح لغزش قرار گیرند. در ابتدا وزن‌های (ضرایب) میانگین‌گیری توسط کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی تعیین می‌شوند. برای بهبود عملکرد سیستم کنترل لغزشی پیشنهادی از سیستم فازی جهت تعیین وزن‌های میانگین‌گیری استفاده می‌شود.

این پایان‌نامه در ۷ فصل گنجانده شده است. فصل دوم به معرفی مدل موتور سنکرون مغناطیس دائم می‌پردازد. فصل سوم راهبردهای اصلی در کنترل موتورهای سنکرون مغناطیس دائم را به تفصیل برمی‌شمارد. در این فصل معایب و مزایای هر یک از راهبردها بیان می‌شود. کنترل حالت لغزشی و معضلات پیش رو در طراحی آن در فصل چهارم مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این فصل نظریه کنترل حالت لغزشی پیشنهادی نیز ارائه می‌گردد. سپس پایداری کنترل حالت لغزشی پیشنهادی به روش مستقیم لیاپانوف اثبات می‌گردد. در فصل پنجم روش پیشنهادی برای کنترل سرعت موتور سنکرون مغناطیس دائم تعمیم داده خواهد شد. همچنین کنترل حالت لغزشی مرسوم و پیشنهادی شبیه‌سازی و با یکدیگر در خصوص پدیده لرزش و دقت پاسخ‌ها مقایسه می‌شوند. در فصل ششم سیستم‌های فازی برای تعیین وزن‌های میانگین‌گیری در کنترل حالت لغزشی پیشنهادی به کار گرفته می‌شوند. نتایج حاصل از این تحقیق در فصل هفتم بیان می‌شود. همچنین چند نکته و پیشنهاد برای مطالعات آتی در راستای بهبود کارایی کنترل پیشنهادی ذکر خواهد شد.