بسم الله الرحمن الرحيم
الحمد لله رب العالمين الرحمن الرحيم مالك يوم الدين
اهدنا الصراط المستقيم صراط الذين
انعمت عليهم غير المغضوب عليهم
ولا الضالين

دانشگاه اصفهان

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق گرایش قدرت

طراحی کنترل کننده مد لغزشی بهبود یافته برای موتور سنکرون خطی مغناطیس دائم

استاد راهنما:

دکتر محمد عطایی

استادان مشاور:

دکتر بهزاد میرزائیان دهکردی

دکتر آرش کیومرثی

پژوهشگر:

پیام غائبی پناه

اردیبهشت ماه ۱۳۸۹

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتـایج مطالعـات، ابتکـارات و نـوآوری هـای ناشـی از تحقیـق موضوع این پایان نامـه متعلـق بـه دانشـگاه اصفهان است.

دانشگاه اصفهان

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق گرایش قدرت آقای پیام غائبی پناه

تحت عنوان

طراحی کنترل کننده مد لغزشی بهبود یافته برای موتور سنکرون خطی مغناطیس دائم

در تاریخ ۸۹/۲/۲۵ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه ..عالی.... به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنمای پایان نامه	دکتر محمد عطایی با مرتبه علمی استادیار	امضا
۲- استاد راهنمای پایان نامه	دکتر بهزاد میرزائیان دهکردی با مرتبه علمی استادیار	امضا
۳- استاد مشـــاور پایان نامه	دکتر آرش کیومرثی با مرتبه علمی استادیار	امضا
۴- استاد داور داخـــل گروه	دکتر امین خدابخشیان با مرتبه علمی دانشیار	امضا
۴- استاد داور خـارج از گروه	دکتر سید محمد مدنی با مرتبه علمی استادیار	امضا

امضای مدیر گروه

تقدیر و تشکر

سپاس فراوان از زحمات مهربان ترین استاد دوران تحصیل، جناب دکتر محمد عطایی؛

قدردانی از زحمات بی دریغ اساتید گرامی، جناب دکتر بهزاد میرزاییان و جناب دکتر آرش کیومرثی؛

نهایت تشکر از حمایت بی نظیر احمدرضا شفیعی؛

تقدیر از تلاش و کمک عزیزانی همچون مجید معظمی، مجتبی صادقی، حسین محکمی، مصطفی عزت آبادی پور و سایر دوستانی که در این راه مرا یاری نمودند.

تقدیم به مادرم

که در این راه، صد چندان من رنج و سختی متحمل شد و همچون شمع سوخت تا پیش پای ما روشن بماند؛

تقدیم به مادرم

که در کنارش بیشتر از آنی آموختم که در مدرسه یاد گرفتم؛

تقدیم به مادرم

که مالک واقعی این اثر است.

چکیده

در ابتدای این پژوهش به معرفی موتور سنکرون خطی مغناطیس دائم و لزوم نیاز به حرکت های خطی سریع و پر شتاب و در عین حال دقیق پرداخته می‌شود. پس از آشنایی با ساختمان و نحوه‌ی عملکرد موتور، مدل دقیق و ساده شده‌ی آن ارائه می‌گردد. در مدل دقیق موتور، نا ایده‌آلی‌ها نیز در نظر گرفته خواهند شد. نیروی دندانه‌ای بعنوان مهمترین عامل بوجود آورنده ریپل در شبیه‌سازی‌ها گنجانده می‌شود. از آنجایی که محدوده‌ی سرعت کاری موتور خطی مذکور در حوالی صفر بوده و احتمال توقف و تغییر جهت نیز وجود دارد؛ نمی‌توان از مدل اصطکاک ساده شده و خطی استفاده کرد. رفتار نیروی اصطکاک در اطراف سرعت صفر بسیار پیچیده و غیرخطی می باشد؛ از این رو با بررسی دقیق‌تر اصطکاک، مدل واقعی‌تری که نماینده‌ی رفتار طبیعی آن باشد، استخراج می‌گردد. در ادامه با طراحی کنترل کننده مد لغزشی مدل مرجع برای مدل ساده شده و خطی موتور، سرعت آن کنترل می‌گردد. با اعمال تغییرات ناگهانی در مشخصات سیستم، میزان مقاوم بودن کنترل کننده مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای غلبه بر مشکل چترینگ از روش های متفاوتی استفاده خواهد شد. استفاده از توابع جایگزین دیگر همچون تابع اشباع، تابع سیگموید و تابع نمایی باعث کاهش و حذف چترینگ می‌گردد. پیچیده‌ترین روش، ترکیب مد لغزشی با استنتاج فازی و بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک می‌باشد که در آن علیرغم حجم محاسبات، بهبود چندانی در مقایسه با روش‌های پیشین حاصل نگردیده است. در بخش بعد ملاحظات عملی نیز دخیل می‌گردند و از مدل غیرخطی موتور و اینورتر استفاده می‌شود. ابتدا کنترل کننده تناسبی–انتگرالی و سپس کنترل کننده مد لغزشی طراحی و پیاده‌سازی خواهند گردید. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که زمان استقرار و رفتار حالت گذرا در کنترل کننده مد لغزشی بسیار برتر از کنترل کننده تناسبی–انتگرالی است. علاوه بر این عملکرد کنترل کننده مد لغزشی در مواجهه با اغتشاشات شدید و ناگهانی خارجی، بسیار موفق تر است. از سوی دیگر در طراحی کنترل کننده مد لغزشی، عدم قطعیت‌های پارامتری نیز دخیل گردیده‌اند تا هرچه بیشتر به حالت واقعی نزدیک شود. در فصل آخر سرعت مرجع در محدوده‌ای وسیع تغییر داده شده و توانایی کنترل کننده‌ها در تعقیب آن بررسی و مقایسه می‌شود. نتایج حاکی از آن است که کنترل کننده تناسبی–انتگرالی در سرعت‌های بالاتر از مقدار نامی بهتر از سرعت‌های پایین عمل می‌کند. از سوی دیگر کنترل کننده‌ی مد لغزشی در سرعت‌های پایین عملکرد خوبی داشته ولی در سرعت های بالا دچار نوسان و خطای حالت مانگار می‌شود. در ادامه با طراحی کنترل کننده مد لغزشی تطبیقی مشکل برطرف شده و عملکرد کنترل کننده برای محدوده‌ی وسیعی از سرعت‌های مرجع تعمیم می‌یابد.

واژگان کلیدی: موتور سنکرون خطی مغناطیس دائم، کنترل مد لغزشی تطبیقی

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه

۱-۱- عملگرهای خطی ۳

۱-۲- کنترل موتور ۴

۱-۳-تاریخچه پژوهش‌های انجام شده در کنترل موتور سنکرون خطی مغناطیس دائم به وسیله روش مد لغزشی ۵

۱-۴- هدف پژوهش و روند ارائه مطالب ۷

فصل دوم: تحلیل و مدل‌سازی جامع موتور سنکرون خطی مغناطیس دائم

مقدمه ۹

۲-۱- انواع موتورهای خطی سنکرون ۹

۲-۲- قطار پرسرعت الکترومغناطیسی ۱۲

۲-۳- موتور سنکرون خطی مغناطیس دائم ۱۴

۲-۳-۱-ساختمان و نحوه‌ی عملکرد موتور سنکرون خطی مغناطیس دائم ۱۵

۲-۴- مدل‌سازی ۲۱

۲-۴-۱-میدان مغناطیسی سیم‌پیچ‌های آرمیچر ۲۲

۲-۴-۲- ضرایب فرم و عکس‌العمل ۲۴

۲-۴-۳-راکتانس سنکرون ۲۵

۲-۴-۴-ولتاژ القا شده ۲۷

۲-۴-۵- نیرو و توان الکترومغناطیسی ۲۸

۲-۴-۶- محاسبه‌ی مستقیم نیرو ۳۱

۲-۵-ناایده‌آلی‌های موتور و نیروی ریپل ۳۵

۲-۵-۱-نیروی دندانه‌ای ۳۶

۲-۵-۲-اثر شیارها ۳۹

۲-۶-مدل کردن اصطکاک ۴۱

۲-۷- اثر هارمونیک‌های زمانی ۴۳
۲-۸-مدل ریاضی ساده شده موتور سنکرون خطی مغناطیس دائم ۴۴
فصل سوم: طراحی کنترل مقاوم موتور سنکرون خطی مغناطیس دائم با استفاده از روش مد لغزشی
مقدمه ۴۸
۳-۱-کنترل سیستم‌های متحرک ۴۸
۳-۱-۱- کنترل برداری ۵۰
۳-۲- آشنایی با روش کنترل مد لغزشی ۵۱
۳-۳- طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی برای سیستم‌های غیرخطی ۵۳
۳-۳-۱- شرط لغزش ۵۵
۳-۳-۲- زمان رسیدن حالت‌های سیستم به سطح لغزشی ۵۶
۳-۳-۳- تحقق سیگنال کنترل ۵۷
۳-۳-۴- بدست آوردن K و بررسی شرط لغزش ۵۸
۳-۴- مشکلات و محدودیت‌های روش مد لغزشی ۵۸
۳-۴-۱- روش‌های کاهش چترینگ و بهبود کنترل‌کننده‌های مد لغزشی ۶۰
۳-۵-طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی مدل مرجع برای مدل ساده شده موتور ۶۰
۳-۶-حذف چترینگ در کنترل‌کننده‌ی مذکور و بهبود عملکرد ۶۸
۳-۶-۱-استفاده از توابع جایگزین بجای تابع علامت در قانون کنترل ۶۸
۳-۶-۱-۱-استفاده از تابع اشباع ۶۸
۳-۶-۱-۲- استفاده از تابع نمایی ۷۱
۳-۶-۱-۳-استفاده از تابع سیگموید ۷۲
۳-۶-۲-ترکیب روش کنترل مد لغزشی و فازی-ژنتیک ۷۳
۳-۶-۳- مقایسه نتایج شبیه‌سازی و نتیجه‌گیری ۷۷
فصل چهارم: طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی تعمیم یافته برای مدل جامع موتور سنکرون خطی مغناطیس دائم
مقدمه ۷۹
۴-۱-خطی‌سازی حول نقطه‌ی کار و محاسبه نقاط تعادل سیستم ۷۹

۴-۲-طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی برای مدل غیرخطی ۸۳
۴-۲-۱-طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی ۸۴
۴-۲-۱-۱-طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی برای جریان محور d ۸۶
۴-۲-۱-۲-طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی برای جریان محور q ۸۷
۴-۲-۱-۳-طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی برای سرعت مرجع ۸۸
۴-۳- طراحی کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی برای مدل غیرخطی ۹۳
۴-۴-تنظیم ضرایب کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی ۹۴
۴-۴-۱- تنظیم ضرایب با استفاده از روش جداسازی ۹۵
۴-۴-۲-تنظیم ضرایب کنترل‌کننده با استفاده از الگوریتم PSO ۹۶
۴-۵- بررسی میزان مقاوم بودن و مقایسه عملکرد کنترل‌کننده های تناسبی-انتگرالی و مد لغزشی ۱۰۰
۴-۵-۱-مقایسه و نتیجه‌گیری ۱۰۵

فصل پنجم: طراحی کنترل‌کننده‌ی مد لغزشی تطبیقی برای گستره وسیع سرعت

مقدمه ۱۰۶
۵-۲- طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی تطبیقی و بررسی عملکرد آن در محدوده‌ی وسیع سرعت ۱۱۰

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ادامه کار

۶-۱- نتیجه‌گیری ۱۱۷
۶-۲- پیشنهادات ادامه کار ۱۱۸

پیوست الف: روش‌های حذف چترینگ و بهبود کنترل کننده مد لغزشی

۱- جایگزین کردن تابع علامت با تابع اشباع ۱۱۹
۲- استفاده از تابع سیگموید بجای تابع علامت ۱۲۱
۳- استفاده از تابع نمایی بجای تابع علامت ۱۲۱
۴- استفاده از سطح لغزش انتگرالی ۱۲۴
۵- استفاده از لایه مرزی متغیر ۱۲۵
۶-کنترل‌کننده لغزشی- فازی ۱۲۶
۶-۱- استفاده از روش فازی برای تعیین ضخامت لایه‌ی مرزی ۱۲۶
۶-۲- استفاده از روش فازی برای تعیین ضریب تابع کلیدزنی ۱۲۷

۶-۳- استفاده از روش فازی برای تولید کل سیگنال کنترلی ۱۳۰
۶-۴-استفاده از روش فازی برای بهبود مد رسش ۱۳۰
۷- استفاده از کنترل مد لغزشی مرتبه بالا ۱۳۱
۸-ترکیب مد لغزشی با شبکه‌ی عصبی ۱۳۲
۸-۱- استفاده از شبکه‌ی عصبی برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده‌ی مد لغزشی ۱۳۲
۸-۲- استفاده از شبکه عصبی برای کمینه کردن تلاش کنترلی ۱۳۳
۹- ترکیب کنترل مد لغزشی و QFT ۱۳۳
پیوست ب: الگوریتم ژنتیک
مقدمه ۱۳۴
۱- معرفی الگوریتم ژنتیک ۱۳۵
۲- فلوچارت الگوریتم ژنتیک ۱۳۷
۳- مروری بر ویژگی‌های الگوریتم ژنتیک ۱۳۸
پیوست ج: مروری بر الگوریتم PSO
مقدمه ۱۴۱
۱-مروری بر زندگی مصنوعی ۱۴۱
۲- مطالعه رفتار پرندگان و ایده اولیه PSO ۱۴۲
۳- الگوریتم PSO ۱۴۳
منابع ومآخذ ۱۴۷

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل (۱-۱): موتور القایی دوار و معادل خطی آن ۲

شکل (۱-۲): موتور سنکرون خطی ۳

شکل (۲-۱): موتور خطی مغناطیس دائم ۱۱

شکل (۲-۲): موتور خطی رلوکتانس متغیر (موتور اره‌ای) ۱۱

شکل (۲-۳): موتور خطی هیبریدی ۱۱

شکل (۲-۴): موتور خطی مغناطیس دائم بدون هسته با سیم پیچ متمرکز ۱۲

شکل (۲-۵): قطار سریع السیر کشور ژاپن ۱۳

شکل (۲-۶): نمونه‌ی آزمایشی موتور خطی برای کاربرد در حمل و نقل ۱۴

شکل (۲-۷): نمای موتور خطی ۱۵

شکل (۲-۸): بخش‌های اصلی موتور خطی-۱) اولیه ۲) ثانویه ۳) انکودر خطی ۴) ریل ۵) کابل تغذیه ۱۶

شکل (۲-۹): سیم‌پیچ‌های نصب شده در استاتور و میدان مغناطیسی سیار با سرعت سنکرون ۱۷

شکل (۲-۱۰): ساختمان آسانسور با موتور خطی سنکرون مغناطیس دائم ۱۷

شکل (۲-۱۱): موتور خطی مغناطیس دائم لوله‌ای ۱۸

شکل (۲-۱۲): موتور خطی دو طرفه ۱۹

شکل (۲-۱۳): موتور خطی یک طرفه ۱۹

شکل (۲-۱۴): آرمیچر متشکل از ورقه‌های فرومغناطیس ۲۰

شکل (۲-۱۵): مسیر خطوط شار در درون موتور ۲۱

شکل (۲-۱۶): چگالی میدان مغناطیسی در سطح استاتور ۲۳

شکل (۲-۱۷): استاتور با مغناطیس دائم‌های برجسته ۲۷

شکل (۲-۱۸): دیاگرام فازوری ۳۰

شکل (۲-۱۹): نمودار گشتاور-زاویه مربوط به موتور قطب برجسته ۱) گشتاور سنکرون ۲) گشتاور رلوکتانسی ۳) مجموع گشتاور ۳۱

شکل (۲-۲۰): ساختمان موتور سنکرون خطی مغناطیس دائم ۳۳

شکل (۲-۲۱): موتور خطی مغناطیس دائم بدون شیار ۳۷
شکل (۲-۲۲): موتور خطی مغناطیس دائم بدون هسته آهنی ۳۸
شکل (۲-۲۳): موتور خطی با مغناطیس های دائم اریب شده ۳۹
شکل (۲-۲۴): انواع شیارها- الف) شیار نیمه بسته ب) شیار باز ۳۹
شکل (۲-۲۵): مدل‌سازی اثر دندانه‌ها به کمک توابع ریاضی ۴۰
شکل (۲-۲۶): نیروی الکترومکانیکی شبیه‌سازی شده با روش المان محدود ۴۰
شکل (۲-۲۷): نمای نزدیک از تماس دو سطح به یکدیگر ۴۱
شکل (۲-۲۸): نمودار اصطکاک واقعی و چهار ناحیه اصلی ۴۳
شکل (۲-۲۹): الف) مدل اصطکاک کولمب ب) مدل اصطکاک کولمب و ضریب اصطکاک سیال ج) مدل اصطکاک کولمب و ضریب اصطکاک سیال و اثر چسبندگی د) مدل کامل اصطکاک با در نظر گرفتن اثر استرایبک ۴۴
شکل (۲-۳۰): مدار معادل محورهای الف) مستقیم ب) متعامد ۴۶
شکل (۳-۱): کموتاسیون با الگوی کلیدزنی شش مرحله‌ای ۴۹
شکل (۳-۲): قرار گرفتن مسیر حالات روی سطح لغزشی در کنترل‌کننده لغزشی ۵۵
شکل (۳-۳): سطح لغزشی و پدیده چترینگ ۵۹
شکل (۳-۴): بلوک دیاگرام سیستم کنترلی پیشنهادی ۶۱
شکل (۳-۵): سیستم پیاده‌سازی شده در محیط نرم‌افزار Matlab Simulink ۶۴
شکل (۳-۶): سرعت ۶۵
شکل (۳-۷): سیگنال کنترلی ۶۵
شکل (۳-۸): سرعت ۶۶
شکل (۳-۹): سیگنال کنترلی ۶۶
شکل (۳-۱۰): سرعت ۶۷
شکل (۳-۱۱): سیگنال کنترلی ۶۷
شکل (۳-۱۲): سرعت (با لایه مرزی ضخیم) ۶۹
شکل (۳-۱۳): سیگنال کنترلی (با لایه مرزی ضخیم) ۶۹
شکل (۳-۱۴): سرعت (با لایه مرزی نازک) ۷۰
شکل (۳-۱۵): سیگنال کنترلی (با لایه مرزی نازک) ۷۰

شکل (۳-۱۶): سرعت ۷۱
شکل (۳-۱۷): سیگنال کنترلی ۷۱
شکل (۳-۱۸): سرعت ۷۲
شکل (۳-۱۹): سیگنال کنترلی ۷۳
شکل (۳-۲۰): تابع عضویت ورودی‌ها و خروجی سیستم فازی ۷۴
شکل (۳-۲۱): نمودار تابع شایستگی در نسل ها ۷۵
شکل (۳-۲۲): سرعت ۷۶
شکل (۳-۲۳): سیگنال کنترلی ۷۶
شکل (۴-۱): نیروی اصطکاک ۸۰
شکل (۴-۲): نیروی دندانه‌ای ۸۱
شکل (۴-۳): سرعت موتور در حالت حلقه باز ۸۳
شکل (۴-۴): نیروی الکترومکانیکی تولیدی موتور ۸۳
شکل (۴-۵): شمای کلی سیستم کنترل‌کننده سرعت مد لغزشی ۸۶
شکل (۴-۶): سرعت (کنترل‌کننده مد لغزشی) ۹۰
شکل (۴-۷): سیگنال ولتاژ فرمان در محور d ۹۰
شکل (۴-۸): سیگنال ولتاژ فرمان در محور q ۹۱
شکل (۴-۹): سیگنال جریان مرجع در محور q ۹۱
شکل (۴-۱۰): سرعت (کنترل‌کننده مد لغزشی) ۹۲
شکل (۴-۱۱): سیگنال ولتاژ فرمان در محور d ۹۲
شکل (۴-۱۲): سیگنال ولتاژ فرمان در محور q ۹۲
شکل (۴-۱۳): سیگنال جریان مرجع در محور q ۹۳
شکل (۴-۱۴): شمای کلی کنترل کننده سرعت تناسبی-انتگرالی ۹۴
شکل (۴-۱۵): ساختار کنترل‌کننده‌های جریان محورهایd و q به همراه سیستم جداساز ۹۵
شکل (۴-۱۶): بلوک دیاگرام حلقه بسته از دید کنترل کننده جریان محور d ۹۶
شکل (۴-۱۷): بلوک دیاگرام حلقه بسته در حوزه لاپلاس ۹۶
شکل (۴-۱۸): نمودار روند بهبود تابع شایستگی ۹۷

شکل (۴-۱۹): سرعت (کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی با تابع شایستگی اول) ۹۸
شکل (۴-۲۰): سرعت (کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی با تابع شایستگی دوم) ۹۸
شکل (۴-۲۱): سرعت (کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی) ۹۹
شکل (۴-۲۲): سیگنال فرمان جریان در محور q (کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی) ۹۹
شکل (۴-۲۳): سرعت (کنترل کننده مد لغزشی با اعمال اغتشاش ۱۰۰٪) ۱۰۰
شکل (۴-۲۴): سیگنال فرمان جریان در محور q (کنترل‌کننده مد لغزشی با اعمال اغتشاش ۱۰۰٪) ۱۰۱
شکل (۴-۲۵): سرعت (کنترل کننده تناسبی-انتگرالی با اعمال اغتشاش ۱۰۰٪) ۱۰۱
شکل (۴-۲۶): سیگنال فرمان جریان در محور q (کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی) ۱۰۲
شکل (۴-۲۷): سرعت (کنترل کننده مد لغزشی با اعمال اغتشاش ۲۰۰٪) ۱۰۳
شکل (۴-۲۸): سیگنال فرمان جریان در محور q (کنترل‌کننده مد لغزشی با اعمال اغتشاش ۲۰۰٪) ۱۰۳
شکل (۴-۲۹): سرعت (کنترل کننده تناسبی-انتگرالی با اعمال اغتشاش ۲۰۰٪) ۱۰۴
شکل (۴-۳۰): سیگنال فرمان جریان در محور q (کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی با اعمال اغتشاش ۲۰۰٪) ۱۰۴

شکل (۵-۱): سرعت‌های مرجع بالاتر از مقدار نامی (کنترل کننده مد لغزشی) ۱۰۷
شکل (۵-۲): سرعت‌های مرجع بالاتر از مقدار نامی (کنترل کننده تناسبی-انتگرالی) ۱۰۷
شکل (۵-۳): سرعت‌های مرجع پایین‌تر از مقدار نامی (کنترل کننده مد لغزشی) ۱۰۸

شکل (۵-۴): سرعت‌های مرجع پایین‌تر از مقدار نامی (کنترل کننده تناسبی-انتگرالی) ۱۰۹
شکل (۵-۵): سرعت (کنترل کننده مد لغزشی با سرعت مرجع ۱ سانتی‌متر بر ثانیه) ۱۰۹
شکل (۵-۶): سرعت (کنترل کننده تناسبی-انتگرالی با سرعت مرجع ۱ سانتی‌متر بر ثانیه) ۱۱۰
شکل (۵-۷): سرعت (کنترل کننده مد لغزشی تطبیقی) ۱۱۲
شکل (۵-۸): سیگنال فرمان جریان در محور q (کنترل‌کننده مد لغزشی تطبیقی) ۱۱۳
شکل (۵-۹): سرعت (کنترل کننده تناسبی-انتگرالی) ۱۱۳
شکل (۵-۱۰): سرعت (کنترل کننده تناسبی-انتگرالی) ۱۱۴
شکل (۵-۱۱): سیگنال فرمان جریان در محور q (کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی) ۱۱۴
شکل (۵-۱۲): سرعت (کنترل کننده مد لغزشی تطبیقی) ۱۱۵

شکل (۵-۱۳): سیگنال فرمان جریان در محور q (کنترل‌کننده مد لغزشی تطبیقی) ۱۱۶
شکل (الف-۱): چگونگی تغییر شیب تابع اشباع در درون لایه‌ی مرزی متناسب با معکوس پارامتر θ ۱۲۰
شکل (الف-۲): نمودار تابع u_s ۱۲۲
شکل (الف-۳): بلوک دیاگرام سیستم کنترل لغزشی-فازی ۱۲۷
شکل (الف-۴): بلوک دیاگرام سیستم کنترلی لغزشی- فازی ۱۲۸
شکل (الف-۵) نمودار تابع کلیدزنی بر حسب زمان ۱۲۹
شکل (الف-۶): بلوک دیاگرام کنترل لغزشی-فازی ۱۳۰
شکل (الف-۷): مسیر حالات سیستم در کنترل‌کننده‌ی مد لغزشی مرتبه دو ۱۳۲
شکل (الف-۸) : بلوک دیاگرام سیستم کنترلی لغزشی-عصبی ۱۳۳
شکل (ب-۱): کروموزم ۱۳۵
شکل (ب-۲): نمایش عملکرد عملگر جابجایی بر روی دو کروموزم فقط از یک نقطه ۱۳۶
شکل (ب-۳): نمایش عملکرد عملگر جهش بر روی کرموزم والد در سه بیت از کرموزم ۱۳۷
شکل (ب-۴): مکانیزم انتخاب بوسیله چرخ‌گردان ۱۳۸
شکل (ب-۵): فلوچارت کلی الگوریتم ژنتیک ۱۴۰
شکل (ج-۱) : به روز شدن سرعت و موقعیت یک ذره ۱۴۵
شکل (ج-۲): فلوچارتPSO ۱۴۶

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول (۲-۱): ضرایب k_f، k_{fd}، k_{fq}، k_{ad} و k_{aq} برای ماشین‌های سنکرون قطب برجسته..... ۱۸
جدول (۳-۱): مقادیر عددی پارامترهای سیستم ۵۶
جدول (۳-۲): مجموعه قوانین کنترل‌کننده فازی..... ۶۶
جدول (۳-۳): مشخصات الگوریتم ژنتیک پیاده سازی شده..... ۶۷
جدول (۳-۴): مقایسه تکنیک های پیاده سازی شده در رفع چترینگ و بهبود کنترل کننده مد لغزشی ۶۹
جدول (۴-۱): مقادیر عددی پارامترهای شبیه‌سازی ۸۱
جدول (۴-۲): پارامترهای دارای عدم قطعیت و حدود تغییرات..... ۸۲
جدول (۴-۳): پارامترهای الگوریتم PSO پیاده‌سازی شده..... ۸۹
جدول (الف-۱): پایگاه قوانین فازی جهت تعیین ضخامت لایه‌ی مرزی..... ۱۱۹
جدول (الف-۲): پایگاه قوانین فازی در کنترل‌کننده لغزشی- فازی..... ۱۲۱

فهرست اختصارات

جریان فاز آرمیچر	I_a
تعداد فازها	m_1
تعداد زوج قطب	p
تعداد دورهای سری به ازای هر فاز	N_1
ضریب سیم بندی	k_{w1v}
بسامد زاویه‌ای	$\omega = 2\pi f$
گام قطبی	τ
تصویر جریان فاز آرمیچر بر محور d	I_{ad}
تصویر جریان فاز آرمیچر بر محور q	I_{aq}
شار نشتی آرمیچر	$X_1 = 2\pi f L_1$
راکتانس عکس العمل آرمیچر یا راکتانس متقابل در محور d	X_{ad}
راکتانس متقابل در محور q	X_{aq}
ضریب گذردهی خلاء	μ_0
طول موثر هسته ی استاتور	L_i
ضریب کارتر برای فاصله ی هوایی	K_c
ضریب اشباع مدار مغناطیسی	K_{sat}
مقدار هارمونیک اول از کل شار تحریک مغناطیسی	ϕ_{f1}
کل شار تحریک مغناطیسی	ϕ_f
شار مغناطیسی فاصله ی هوایی تحت بار (با در نظر گرفتن عکس العمل آرمیچر)	ϕ_g
ضریب فرم مربوط به نیرو محرکه ی الکتریکی	σ_f
زاویه ی بار بین ولتاژ ترمینال (V_1) و E_f (محور q)	δ
مقاوت اهمی سیم پیچ آرمیچر	R_1
چگالی شار مغناطیس دائم	B_r
نفوذپذیری مغناطیسی نسبی معادل سیم پیچی مغناطیس دائم	μ_{rrec}
بردار پتانسیل مغناطیسی	$\vec{A}$

نیروی اصطکاک کولمب	F_c
نیروی اصطکاک استاتیک	F_s
پارامتر سرعت استرایبک	v_s
ضریب اصطکاک گرانروی	D
سرعت میدان الکتریکی دوار	$\dot{\theta}_r = \omega_r = \frac{\pi . v_r}{\tau}$
سرعت الکتریکی	$v_r = 2.\pi . f_s$
فرکانس منبع	f_s
مولفه ی d ولتاژ ورودی	V_d
مولفه ی q ولتاژ ورودی	V_q
مقدار ماکزیمم شار مغناطیس دائم به ازای هر فاز	λ_{PM}
مولفه ی خودی اندوکتانس d	L_{ad}
مولفه ی خودی اندوکتانس q	L_{aq}
سرعت خطی سنکرون	v_s
مولفه d جریان های میراگرها	i_D
مولفه q جریان های میراگرها	i_Q
بار وارد وارد شده به موتور	F_L
نیروی اغتشاش وارد شده به موتور	F_d
جرم متحرک	M
جریان مرجع محور d	i_d^*
جریان مرجع محور q	i_q^*
سرعت مرجع	v^*
نیروی اصطکاک واقعی (غیرخطی)	$f(v)$

فصل اول

مقدمه

یکی از مهمترین اهداف کارخانجات تولیدی افزایش کیفیت و دقت ساخت قطعات بدون کاهش میزان تولید می‌باشد. از میان راهکارهای موجود، اتوماسیون ماشین‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته است. خطوط تولید اکثر کارخانجات نیازمند حرکت خطی سریع و با دقت می‌باشند. بطور معمول از موتورهای دوار و واسطهای مکانیکی نظیر چرخ دنده و تسمه برای تبدیل حرکت دورانی به حرکت خطی استفاده می‌شود. بدیهی است که وجود این قطعات واسطه از دقت و سرعت عملیات کاسته و بر استهلاک و تعمیرات می‌افزاید. امروزه با پیشرفت تکنولوژی و حضور قدرتمندتر موتورهای خطی و سیستم‌های کنترلی، سهم وسیع‌تری از اتوماسیون به آنها اختصاص یافته است. در سال ۲۰۰۰ از میان ۲۵۰۰۰ مراکز ماشین آلات تولید شده، در حدود ۱۱۰۰ مرکز از آنها از تکنولوژی موتورهای خطی بهره گرفته‌اند. در سال ۲۰۰۱ این تعداد به دو برابر افزایش یافته است [۱]. این موتورها روز به روز در صنعت جایگاه مهمتری یافته و بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرند. از نظر نوع کارکرد، می‌توان آنها را در دو دسته ی کلی طبقه‌بندی کرد:

- موتورهای با توان و سرعت پایین و دقت بالا برای مصارف کارخانه‌ها، دستگاه‌های برش و CNC، صنایع پارچه بافی، میکروسکوپ‌های بسیار دقیق و ماشین آلات تصویر برداری لیزری و غیره.
- موتورهای با توان و سرعت بالا و دقت کمتر برای کاربرد در حمل و نقل، آسیاب‌های بزرگ، اره‌های پرقدرت و غیره.

در فصل دوم بطور مختصر به پروژه قطار سریع‌السیر مغناطیسی ژاپن بعنوان یک مثال کاربردی اشاره خواهد شد.

موتور خطی تقریبا همان موتور دوار است که از مقطع جانب برش خورده و بر روی سطح گسترده شده باشد. از این رو می‌توان برای تمام انواع موتورهای دوار معادل خطی آن را نیز درنظر گرفت. شکل ۱-۱ نشان دهنده