بسم الله الرحمن الرحيم

٢٧٨٣٠

۱۳۷۸ /۷/ ۱۲

مرکز اطلاعات و مدارک علمی
تهیه مدارک

دانشگاه علم و صنعت ایران
دانشکده برق

طراحی و بررسی عملکرد دینامیکی موتورهای پله ای

علی محمد میرشمس

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته برق

استاد راهنما : دکتر محسن کلانتر

استاد مشاور : مهندس محمد تقی پورفتح

۳۸۶۳

زمستان ۱۳۷۶

۲۷۸۳۰

تقدیم به :

پدرومادر عزیزم

تقدیم به :

همسرم که مرا در این راه یاری نمود.

چکیده

در این رساله ابتدا موضوعاتی از قبیل : سیستم های مغناطیسی و قوانین حاکم بر آنها ، موتورهای رلوکتانسی ومکانیزم تولید گشتاور در آنها ، اصول کار موتورهای پله ای و معرفی مدارهای فرمان آنها مورد بحث وبررسی قرار گرفته‌است .

سپس روش طراحی موتورهای پله ای رلوکتانس متغیر بر اساس روش معادلات خروجی ارائه گردیده است که با استفاده از این روش طراحی ابتدا طول وقطر روتور محاسبه شده وسپس ابعاد قسمتهای مختلف موتور بدست می آید. همچنین روش محاسبه اندوکتانس ماکزیمم و مینیمم وراندمان موتور نیز آمده است .در این زمینه یک نرم افزار برای طراحی موتورهای پله ای رلوکتانس متغیرنیز ارائه گردیده است .

در انتها عملکرد دینامیکی موتورهای پله ای با استخراج مدل دینامیکی‌برای موتور بررسی گردیده‌و روشهای کاهش نوسانات موتور برای رسیدن به حالت تعادل واثر پارامترهای مختلف از قبیل اینرسی، بارخارجی ، میراکننده ها ومقاومت سیم پیچی موردبحث و بررسی قرار گرفته است.

از اساتید ارجمندی که در راه تعلیم اینجانب متحمل زحمت شده اند بویژه
جناب آقای دکتر کلانتر و جناب آقای مهندس پورفتح که در تکمیل این
پروژه راهنمای من بوده اند تشکر می کنم

علی محمدمیرشمس

صفحه

فصل اول

اصول و مبانی الکترومغناطیسی و تبدیل انرژی الکترومکانیکی

۱-۱ مقدمه ۱

۱-۲ میدان مغناطیسی ۱

۱-۳ مدارهای مغناطیسی ۴

۱-۴ رفتار مغناطیسی مواد ۵

۱-۵ افت انرژی در هسته‌فرومغناطیس ۶

تلفات هیسترزیس ۶

تلفات فوکو ۷

۱-۶ تعادل انرژی ۹

۱-۷ انرژی در سیستم های مغناطیسی یک تحریکه ۱۰

۱-۸ نیرو و انرژی مکانیکی ۱۳

۱-۹ کوانرژی و توابع حالت و متغیرها ۱۵

۱-۱۰ کوپل رلوکتانس در ماشین‌های گردان ۱۹

فصل دوم

انواع موتور پله‌ای و بررسی عملکرد آنها

صفحه

۲-۱ مقدمه ۲۵

۲-۲ انواع موتور پله‌ای ۲۶

۲-۳ موتورهای پله‌ای رلوکتانس متغیر ۲۶

۲-۳-۱ موتورهای پله‌ای رلوکتانس متغیر یک تکه ۲۶

۲-۳-۲ موتورهای پله‌ای رلوکتانس متغیر چند تکه ۳۱

۲-۴ موتورهای پله‌ای آهنربایی دائم ۳۳

۲-۵ موتورهای پله‌ای از نوع هیبرید ۳۶

۲-۶ مدارهای تحریک موتورهای پله‌ای ۳۹

۲-۷ مدارهای فرمان دو قطبی ۴۳

۲-۸ مدارهای فرمان برای سیم پیچهای‌دوجهته (Bifilar winding) ۴۴

۲-۹ تحریک دو فاز و تحریک نیم پله‌ای ۵۰

۲-۱۰ تحریک پله‌ای کوچک mini-stepping ۵۱

۲-۱۱ مکانیزم تولید گشتاور در موتورهای پله‌ای رلوکتانس متغیر ۵۲

۲-۱۲ مکانیزم تولید گشتاور در موتورهای پله‌ای هیبرید ۵۴

۲-۱۳ مکانیزم تولید گشتاور در موتورهای پله‌ای مغناطیسی دائم ۵۶

۲-۱۴ مشخصه گشتاور وضعیت روتور در موتورهای پله‌ای ۵۶

۲-۱۴-۱ مشخصه‌گشتاورو‌وضعیت‌درموتورهای‌پله‌ای‌رلوکتانس متغیر ۵۹

۲-۱۴-۲ مشخصه گشتاور وضعیت در موتورهای پله‌ای هیبرید ۶۳

۲-۱۵ کاربرد موتورهای پله‌ای ۶۵

فصل سوم

طراحی موتورهای پله‌ای رلوکتانس متغیر

۳-۱ مقدمه ۷۱
۳-۲ انتخاب جنس آهن روتور و استاتور ۷۲
۳-۳ انتخاب تعداد فاز در موتورهای پله‌ای ۷۶
۳-۴ محاسبه تعداد دندانه‌های روتور و استاتور ۸۰
۳-۵ محاسبه زاویه کمان هر قطب روتور و استاتور ۸۰
۳-۶ مدار معادل مغناطیسی موتور پله‌ای رلوکتانس متغیر ۸۳
۳-۷ انتخاب ابعاد اصلی روتور (قطر و طول) ۹۰
۳-۷-۱ معادلات خروجی ۹۱
۳-۷-۲ انتخاب ابعاد موتور ۹۵
۳-۸ محاسبه ابعاد قسمت‌های مختلف ۹۶
۳-۸-۱ محاسبه طول فاصله هوائی ۹۶
۳-۸-۲ محاسبه عمق دندانه روتور ۹۷
۳-۸-۳ محاسبه ابعاد قطب و طوقه ۹۷
۳-۹ طراحی سیم پیچ استاتور
۳-۱۰ راندمان موتور پله‌ای رلوکتانس متغیر ۱۰۵
۳-۱۱ تغییرات اندوکتانس سیم پیچی هر فاز استاتور ۱۰۷

۳-۱۲ ارائه مثالهای طراحی و نتایج نرم افزار step ۱۱۱

فصل چهارم

بررسی عملکرد دینامیکی موتورهای پله‌ای

۴-۱ مقدمه ۱۱۴

۴-۲ پاسخ موتور پله‌ای به قطار پالس و مشخصه گشتاور سرعت موتورهای پله‌ای ۱۱۴

۴-۳ نوسانات مکانیکی روتور ۱۱۷

۴-۳-۱ اثر اینرس برروی عملکرد دینامیکی موتور ۱۲۰

۴-۳-۲ اثر بار خارجی برروی حالت دینامیکی موتور پله‌ای ۱۲۱

۴-۳-۳ اثر میراکننده اینرسی ویسکوزی برروی حالت دینامیکی موتورپله‌ای ۱۲۲

۴-۳-۴ میراکننده‌های الکترومغناطیسی ۱۲۲

۴-۳-۵ اثر مقاومت برروی حالت دینامیکی موتور پله‌ای ۱۲۹

۴-۴ مدل موتور پله‌ای رلوکتانس متغیر برای بررسی عملکرد دینامیکی ۱۲۹

۴-۵ نتایج شبیه سازی و اثر پارامترهای مختلف برروی عملکرد دینامیکی موتور پله‌ای ۱۳۳

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۴۲

ضمیمه ۱۴۵

منابع ۱۵۱

فهرست شکلها

شماره شکل	عنوان شکل	صفحه
فصل ۱		
۱-۱	هسته مغناطیسی ساده	۳
۱-۲	مدار مغناطیسی	۴
۱-۳	مشخصه B-H	۵
۱-۴	تغییرات پرمابیلیته نسبی نسبت به شدت میدان مغناطیسی	۶
۱-۵	حلقه هیسترزیس	۶
۱-۶	منحنی تلفات آهن	۹
۱-۸	رله مغناطیسی	۱۱
۱-۹	رله با نیروی مکانیکی بازدارنده	۱۴
۱-۱۰	نمودار انرژی وکوانرژی در سیتم تک تحریکه	۱۷
۱-۱۱	سیستم مغناطیسی	۱۸
۱-۱۲	موتوررلوکتانسی اولیه وتغییرات شار ورلوکتانس	۲۰
۱-۱۳	مشخصه کوپل - زاویه یک موتور رلوکتانسی	۲۳
فصل ۲		
۲-۱	سطح مقطع یک موتور پله ای یک تکه سه فاز	۲۷
۲-۲	روند تحریک سه فاز به ترتیب C,B,A	۲۸
۲-۳	مقطع عرضی یک موتور پله ای با پله های کوچک	۲۹
۲-۴	مقطع طولی یک موتور پله ای رلوکتانس متغیر سه تکه	۳۱
۲-۵	مقطع عرضی یک موتور پله ای رلوکتانس متغیر سه تکه	۳۱
۲-۶	روتور موتور پله ای آهنربای دائم	۳۳
۲-۷	موتور پله ای مغناطیس دائم	۳۴
۲-۸	موتور پله ای مغناطیس دائم	۳۵
۲-۹	شمای یک موتور پله ای PM	۳۵
۲-۱۰	نمای محوری یک موتور پله ای هیبرید	۳۶
۲-۱۱	نمای عرضی از موتور پله ای هیبرید	۳۷
۲-۱۲	مدار فرمان سه فاز تک قطبه	۴۰
۲-۱۳	مدار فرمان دو قطبی برای یک فاز موتور پله ای	۴۳
۲-۱۴	نمای سیم پیچی Bifilarو سیم پیچ معمولی	۴۴

۲-۱۵	مدار فرمان برای سیم پیچهای Bifilar	۴۵
۲-۱۶	جریان سیم پیچهای Bifilar بعد از وصل سوئیچ	۴۸
۲-۱۷	جریان سیم پیچهای Bifilar بعد از وصل سوئیچ (جریان نامی در سیم پیچ معکوس)	۴۹
۲-۱۸	منحنی های گشتاور استاتیک برای تحریک دو فاز	۵۱
۲-۱۹	موتور رلوکتانسی	۵۳
۲-۲۰	موتور پله ای از نوع هیبرید	۵۵
۲-۲۱	مشخصه گشتاور وضعیت در یک موتور پله ای	۵۷
۲-۲۲	خطای موقعیت تعادل در اثر بار برای یک موتور پله ای نمونه	۵۹
۲-۲۳	مشخصه گشتاور وضعیت موتور پله ای سه پارچه رلوکتانس متغیر باتحریک یک فاز	۶۰
۲-۲۴	مشخصه گشتاور وضعیت موتور پله ای رلوکتانس متغیر ۵ پارچه	۶۲
۲-۲۵	مشخصه گشتاور وضعیت برای موتور پله ای هیبرید	۶۴
۲-۲۶	شمای کلی یک فلاپی دیسک	۶۷
۲-۲۷	مکانیزم چرخش فلاپی دیسک	۶۷
۲-۲۸	مجموعه راه انداز فلاپی دیسک	۶۸
۲-۲۹	شمای کلی یک چاپگر	۶۸
۲-۳۰	شمای کلی یک پلاتر	۶۹
۲-۳۱	شمار کلی یک ساعت باموتور پله ای از نوع آهنرای دائم	۷۰

فصل ۳

۳-۱	منحنی B-Hمواد مغناطیسی مختلف	۷۴
۳-۲	منحنی B-H برای فولاد الکتریکی (غیر جهت دار)دینامو	۷۵
۳-۳	منحنی تلفات آهن برای فولاد الکتریکی به ضخامت 0.35 mm	۷۵
۳-۵	منحنی B-H ورقه های silicon steel به ضخامت 0.5mm	۷۶
۳-۶	شمای دندانه های روتور واستاتور یک موتور پله ای رلوکتانس متغیر	۷۸
۳-۷	تغییرات ضریب overlap اندوکتانس kl نسبت به زاویه کمان استاتور	۷۹
۳-۸	مقادیر ممکن برای βr , βs	۸۲
۳-۹	پروفیل اندوکتانس نقاط X,Y,z	۸۳
۳-۱۰	مقطع عرضی یک موتور پله ای رلوکتانس متغیر ۴ فاز	۸۵
۳-۱۱	مقطع عرضی یک موتور پله ای رلوکتانس متغیر با اسم گذاری اجزاء	۸۶
۳-۱۲	مدار معادل مغناطیسی موتور پله ای	۸۷
۳-۱۳	مدار معادل ساده شده	۸۸
۳-۱۴	شمای موتور پله ای SR	۹۱
۳-۱۵	مشخصه $\iota-\phi$ موتور پله ای SR	۹۲

۳-۱۸ تغییرات اندوکتانس نسبت به تغییر موقعیت روتور ۱۰۹
۳-۱۹ مدار مغناطیسی موتور پله ای رلوکتانس متغیر ۱۱۱

فصل ۴

۴-۱ پاسخ موتور به یک قطار پالس با فرکانس کم ۱۱۵
۴-۲ مشخصه گشتاور سرعت موتور پله ای ۱۱۶
۴-۳ پاسخ موتور به تحریک یک فاز ۱۱۷
۴-۴ پاسخ به فرکانس پالس نزدیک فرکانس طبیعی ۱۱۹
۴-۵ شمای یک موتور پله ای ساده با طول پله ۶۰ درجه ۱۲۰
۴-۶ نحوه حرکت روتور از قطب ۱ به قطب ۲ ۱۲۱
۴-۷ اثر بار خارجی بر روی نحوه حرکت روتور از قطب ۱ به قطب ۲ ۱۲۱
۴-۸ اثر اضافه نمودن میراکننده برروی نحوه حرکت روتور از قطب ۱ به قطب ۲ ۱۲۲
۴-۹ مقطع یک میراکننده (VICD) ۱۲۳
۴-۱۰ پاسخ تک پله موتور پله ای ۱۲۶
۴-۱۱ اثراضافه نمودن (VICD) بر روی پاسخ تک پله ۱۲۶
۴-۱۲ مشخصه فلوی لینک شده در مقابل موقعیت روتور ۱۲۸
۴-۱۳ پاسخ موتور به تحریک فازها با ترتیب A,C,B ۱۳۴
۴-۱۴ پاسخ موتور به تحریک فازها با ترتیب A,B,C ۱۳۵
۴-۱۵ پاسخ موتور به تحریک فازها با ترتیب CA,C,BC,B ۱۳۵
۴-۱۶ مشخصه گشتاور موقعیت موتور ۱۳۷
۴-۱۶ اثر اینرسی برروی موقعیت ،سرعت و گشتاور روتور ۱۳۸
۴-۱۷ اثر میراکننده بر روی موقعیت ،سرعت وگشتاور روتور ۱۳۹
۴-۱۸ اثر مقاومت سیم پیچی برروی موقعیت ،سرعت وگشتاور روتور ۱۴۰
۴-۱۹ اثر بار خارجی برروی موقعیت ،سرعت وگشتاور موتور ۱۴۱

فهرست جداول

شماره جدول	عنوان جدول	صفحه
فصل ۲		
۲-۱	وضعیت فلو در قطبهای مختلف با توجه به پلاریته وفاز تحریک شده	۳۷
فصل ۳		
۳-۱	انواع ورق فولاد الکتریکی	۷۳
۳-۲	درجه ورق ودرصد سیلیسیم	۷۴
۳-۳	عمق سیم پیچی قطب استاتور بر اساس قطر روتور	۱۰۰
۳-۴	قطر سیمهای استاندارد با مقطع دایره ای	۱۰۳
۳-۵	تلفات اصطحکاک یاتاقانها واصطحکاک هوا	۱۰۵
۳-۶	پرمیانس مینیمم نرمالیزه شده	۱۱۰

مـقـدمـه

باتوجـه به پیشرفـت روزافزون الکترونیک و سیستم‌های کنترل میکروپروسسوری و نیاز به کوپل شدن این سیستمها با درایوهای مناسب جهت کنترل موقعیت اجسام، موتورهای پله‌ای جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده‌اند که این امر باعث کاربرد روزافزون اینگونه موتورها در صنعت شده است. هـمچنین باتوجه به مشکـلات زیادی که درامر کاربرد سیتمهای Servo درکنترل سرعـت و موقعیت از جمله ناپایداری و نوسانات زیاد این سیستم‌ها وجود دارد، می‌توان موتورهای پله‌ای را جایگزین خوبی برای این نوع سیستمها دانست و کاربرد زیـاد و مـتنوع اینگونه مـوتورها در صنعت خود گواهی براین مدعیٰ است که دراین رابطه می‌توان به کاربرد این موتورها درکـنترل صحیح و دقیق موقعیت و سرعـت اجزاء سیستمهای حـساس و دقیـق مانند روباتها، ماشیـن های CNC ، NC ، چاپگـرها، درایو دیسک کامپیوترها، ساعتهاو ... اشاره کرد. لذا باتوجه به موارد فوق برآن شدیم تا در زمینه طراحی و بررسی عملکرد موتورهای پله‌ای تحقیقات و بررسی هائی انجام دهیم. بدین منظور در اینجاروشی جهت طراحی این موتورها و نحوهٔ عملکرد آنها و هـمچنین بررسی بر روی حالتهای گذرای اینگونه موتورها **ارائه** داده‌ایم که این بررسی‌ها و فعالیتهای انجام شده در چهار فصل زیر ارائه شده است :

فصل ۱ : اصول و مبانی الکترومغناطیس و تبدیل انرژی الکترومکانیکی .

فصل ۲ : بررسی عملکرد انواع موتورهای پله‌ای .

فصل ۳ : روش طراحی موتورهای پله‌ای رلوکتانس متغیر .

فصل ۴ : بررسی عملکرد دینامیک و گذرای موتورهای پله‌ای .

در فصل اول به بررسی سیستمهای مغناطیسی و قوانین و روابط حاکم‌بر آنها، رفتار مواد