دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

گروه مهندسی قدرت

پایان‌نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق- قدرت

عنوان

طراحی بهینه و بهبود عملکرد موتورهای سوئیچ رلوکتانس با استفاده از روش المان محدود

استاد راهنما

دکتر محمدرضا فیضی

استاد مشاور

دکتر محمدباقر بناء شریفیان

نگارنده

سیدرضا موسوی اقدم

شهریورماه ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به

یک نگاه مهربان پدرم

و

یک لبخند پرشوق مادرم

اکنون که به یاری خداوند متعال نگارش این پایان نامه را به اتمام رساندم، بر خود لازم می دانم مراتب سپاس خود را از تمام کسانی که در انجام این پایان نامه مرا یاری داده اند، اعلام نمایم؛

پدر و مادر عزیزم که لحظه های زندگیم را مدیون فداکاری هایشان هستم. روزهای زندگیم خالی از عطر وجودشان مباد؛

استاد ارجمندم جناب آقای دکتر محمدرضا فیضی به پاس راهنمایی های راه گشای ایشان که همواره برای اینجانب استاد علم و اخلاق بوده اند و پایان نامه حاضر حاصل زحمات بی دریغ ایشان است؛

استاد محترم جناب آقای دکتر محمدباقر بناء شریفیان که از مشاوره و مساعدت های ارزنده ایشان برخوردار بوده ام؛

اساتید گرامی و کارکنان محترم دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تبریز که در طول تحصیل مشفقانه کمک کرده اند؛

خواهران و برادر گرامیم که همواره حامی من بوده اند؛

و تمامی دوستان عزیزم که خاطرات بودن کنارشان فراموش نشدنی است.

سید رضا موسوی اقدم

شهریور ماه سال یک هزار و سیصد و نود

تبریز- ایران

نام خانوادگی: موسوی اقدم **نام:** سیدرضا

عنوان پایان‌نامه: طراحی بهینه و بهبود عملکرد موتورهای سوئیچ رلوکتانس با استفاده از روش المان محدود

استاد راهنما: دکتر محمدرضا فیضی

استاد مشاور: دکتر محمدباقر بناء شریفیان

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** مهندسی برق- قدرت **گرایش:** ماشین‌های الکتریکی و درایو

دانشگاه: تبریز

دانشکده: مهندسی برق و کامپیوتر **تاریخ فارغ‌التحصیلی:** شهریور ۹۰

تعداد صفحه: ۱۰۵

کلید واژه‌ها: طراحی بهینه، موتور سوئیچ رلوکتانس، افزایش کارائی،کاهش ریپل گشتاور، مشخصه‌ی الکترومغناطیسی، روش المان محدود (FEM)

چکیده

در پایان‌نامه حاضر، موتورهای سوئیچ رلوکتانس از نظر طراحی و بهبود عملکرد آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. عواملی چون ریپل گشتاور استفاده از این نوع موتورها را محدود می‌کنند. لذا، طراحی مناسب این موتورها با روش‌های دقیق مثل آنالیز المان محدود در کنار سیستم درایو و کنترل مطلوب، می‌تواند در بهینه کردن استفاده از این موتورها مؤثر باشد. در این راستا، تحقیقات مختلفی در زمینه طراحی بهینه این موتورها در جهت افزایش کارایی و از بین بردن مشکلات آن انجام شده است که شامل انتخاب هندسه و شکل مناسب، استفاده از روش‌های هوشمند در طرح بهینه و ارائه روش‌های مختلف در آنالیز الکترومغناطیسی می‌شود. این روش‌ها در مراجع مختلف به طور مفصل بحث شده و محاسن و معایب هر کدام از آن‌ها توضیح داده شده است.

در ادامه، مبانی آنالیز الکترومغناطیس که در استفاده از نرم‌افزار ANSYS مورد توجه قرار گرفته و نیز استراتژی‌های گوناگون بهینه‌سازی در طراحی با ذکر کاربرد هر کدام از آن‌ها بیان شده است. در طرح موتور سوئیچ رلوکتانس، مواردی چون تعداد المان‌ها، شکل قطب‌ها و فاصله هوایی با استفاده از آنالیز المان محدود بررسی شده است.

یکی از مشکلات مهم موتورهای سوئیچ رلوکتانس، ریپل گشتاور بالای آن است. تقریباً اکثر کارهایی که در جهت کاهش ریپل گشتاور انجام گرفته، منجر به کاهش مقدار متوسط گشتاور شده است. لذا در این پایان‌نامه یک طرح جدید برای موتورهای سوئیچ رلوکتانس پیشنهاد شده که در آن با استفاده از منطق فازی، بهینه‌سازی چندهدفی انجام شده و لذا ضمن کاهش ریپل گشتاور موتور، مقدار متوسط آن نیز تثبیت شده است

فصل اول- مقدمه..... ۱

فصل دوم- بررسی منابع..... ۵

۲-۱ مقدمه..... ٦

۲-۲ روند طراحی موتور سوئیچ رلوکتانس..... ٦

۲-۲-۱ روش‌های خطی در طراحی..... ٦

۲-۲-۲ روش‌های غیرخطی در طراحی..... ۸

۲-۲-۳ روش‌های المان محدود در طراحی..... ۸

۲-۲-٤ روش‌های مختلف طراحی در یک نگاه..... ۹

۲-۳ آنالیز میدان مغناطیسی در موتورهای سوئیچ رلوکتانس..... ۹

۲-۳-۱ روش‌های تحلیلی در آنالیز میدان مغناطیسی..... ۹

۲-۳-۲ روش‌های عددی در آنالیز میدان مغناطیسی..... ۱۲

۲-٤ بهینه‌سازی در طراحی موتور سوئیچ رلوکتانس..... ۱۳

۲-٤-۱ بهینه‌سازی با تغییر شکل هندسی موتور..... ۱٤

۲-٤-۲ روش‌های جبری در بهینه‌سازی..... ۱٦

۲-٤-۳ محاسبات نرم‌افزاری و الگوریتم‌ها در بهینه‌سازی..... ۱۹

۲-٤-٤ بهینه‌سازی عملکرد درایو با راه‌کارهای کنترلی..... ۲۱

۲-٤-۵ مقایسه روش‌های مختلف بهینه سازی..... ۲۳

۲-۵ آنالیز نویز و لرزش در موتورهای سوئیچ رلوکتانس..... ۲۳

۲-۵-۱ منابع مغناطیسی نویز..... ۲٤

۲-۵-۲ منابع مکانیکی نویز..... ۲٤

۲-۵-۳ منابع آیرودینامیکی نویز..... ۲۵

۲-۵-٤ منابع الکترونیکی نویز..... ۲۵

۲-٦ ریپل گشتاور در موتورهای سوئیچ رلوکتانس و چالش‌های انجام گرفته در کاهش آن..... ۲۷

۲-۷ ساختارهای جدید موتورهای سوئیچ رلوکتانس..... ۳۳

۲-۷-۱ موتور سوئیچ رلوکتانس چندلایه..... ۳٤

۲-۷-۲ موتور سوئیچ رلوکتانس با استاتور C شکل..... ۳٤

۲-۷-۳ موتور سوئیچ رلوکتانس با استاتور E شکل..... ۳٦

۲-۷-٤ موتور سوئیچ رلوکتانس دو فاز جدید (TPSRM)..... ۳۷

۲-۷-۵ موتور سوئیچ رلوکتانس با تعداد قطب‌های زیاد در روتور..... ۳۸
۲-۸ نتیجه‌گیری..... ۳۹
فصل سوم- مواد و روش‌ها..... ٤١
۳-۱ مقدمه ٤۲
۳-۲ مبانی میدان‌های الکترومغناطیسی..... ٤۲
۳-۲-۱ پتانسیل اسکالر مغناطیسی..... ٤٦
۳-۲-۲ روش‌های حل میدان..... ٤٦
۳-۲-۲-۱ روش RSP..... ٤۸
۳-۲-۲-۲ روش DSP..... ٤۸
۳-۲-۲-۳ روش GSP..... ٤۹
۳-۲-۳ پتانسیل برداری مغناطیسی..... ۵۱
۳-۳ بهینه‌سازی..... ۵۲
۳-۳-۱ مقدمه‌ای بر بهینه‌سازی طرح..... ۵۳
۳-۳-۲ طرح‌های قابل قبول و غیرقابل قبول..... ۵٤
۳-۳-۳ انتخاب بهترین طرح..... ۵۵
۳-۳-٤ روش‌های بهینه‌سازی و ابزارهای طراحی..... ۵۵
۳-۳-٤-۱ روش تک حلقه..... ۵۵
۳-۳-٤-۲ روش تصادفی..... ۵٦
۳-۳-٤-۳ روش جاروب..... ۵٦
۳-۳-٤-٤ روش فاکتوریل..... ۵۷
۳-۳-٤-۵ روش گرادیان..... ۵۷
۳-٤ مدل ریاضی موتور سوئیچ رلوکتانس..... ۵۸
۳-۵ آنالیز المان محدود موتور سوئیچ رلوکتانس..... ٦۱
۳-۵-۱ بررسی تعداد المان‌ها..... ٦۱
۳-۵-۲ بررسی تعداد قطب‌ها..... ٦٦
۳-۵-۳ بررسی شکل قطب‌ها و فاصله هوایی..... ٦۷
۳-٦ طرح پیشنهادی موتور سوئیچ رلوکتانس..... ۷۱
۳-۷ نتیجه‌گیری..... ۷۳

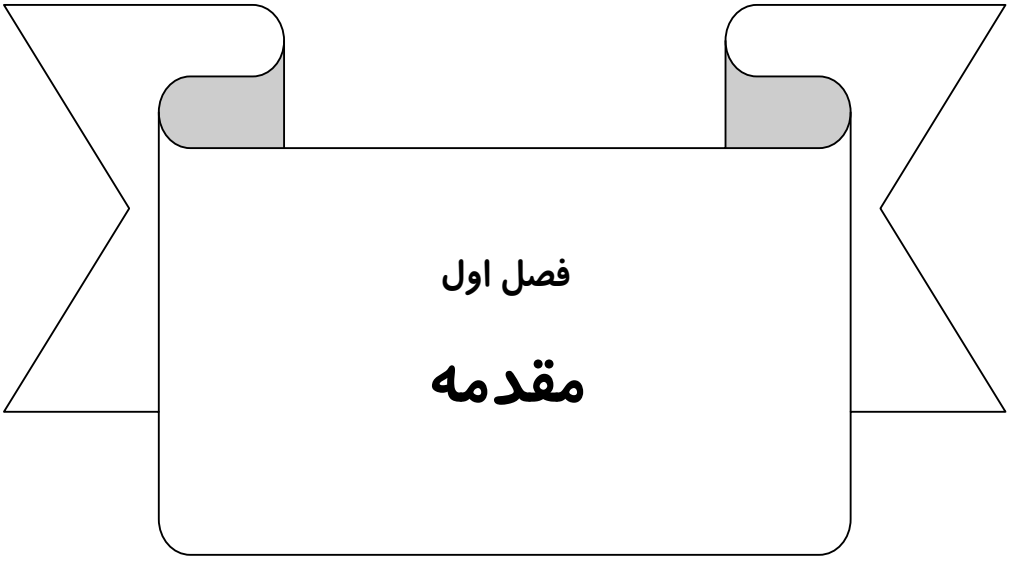
فصل چهارم- نتایج و بحث..... ۷۵
٤-۱ مقدمه..... ۷٦
٤-۲ تحلیل الکترومغناطیسی طرح پیشنهادی..... ۷٦
٤-۲-۱ مشخصات موتور مورد مطالعه..... ۷٦
٤-۲-۲ بررسی تأثیر ضرایب افزایش قوس قطب‌ها، α و β..... ۷۷
٤-۲-۳ بررسی تأثیر فاصله هوایی..... ۸٤
٤-۳ تحلیل حساسیت..... ۸۹
٤-٤ بهینه‌سازی طرح با استفاده از منطق فازی..... ۹۱
٤-۵ نتیجه‌گیری..... ۹٦
فصل پنجم- نتیجه‌گیری و پیشنهادات..... ۹۸
۵-۱ نتیجه‌گیری..... ۹۹
۵-۲ پیشنهادات..... ۱۰۰
فصل ششم- مراجع..... ۱۰۱

شکل ۱-۱ ساختار ساده یک موتور سوئیچ رلوکتانس مرسوم.....۲
شکل ۲-۱ مقایسه مشخصات شار پیوندی محاسبه شده با روش‌های تحلیلی و المان محدود.....۱۰
شکل ۲-۲ مدل ساده شده جهت محاسبه‌ی شار موتور با تجزیه آن به شار اصلی و شار ناشی از پراکندگی.....۱۱
شکل ۲-۳ روند کلی بهینه‌سازی طرح موتور سوئیچ رلوکتانس.....۱۳
شکل ۲-٤ مقایسه شکل موج گشتاور با قطب‌های اصلی و بهینه شده.....۱۵
شکل ۲-۵ پارامترهای هندسی فاصله هوایی در [+۱۱٦].....۱۹
شکل ۲-٦ پارامترهای طراحی در [+٦۸].....۲۰
شکل ۲-۷ عملکرد موتور و درایو آن در سرعت ۹۹۵۰ دور بر دقیقه و نمایش (الف) گشتاور متوسط، (ب) بازده درایو و (ج) ضریب ریپل گشتاور در زوایای مختلف روشن و خاموش شدن کلیدها.....۲۲
شکل ۲-۸ تغییرات اندوکتانس، جریان، ولتاژ و شار در زوایای مختلف روتور در حالت تک پالسه.۲٦
شکل ۲-۹ روش‌های مختلف برش ولتاژ در حالت جریان محدود شده.....۲۷
شکل ۲-۱۰ مشخصات هندسی موتور سوئیچ رلوکتانس ٤/۲ و جزئیات روتور آن.....۲۹
شکل ۲-۱۱ اندازه گیری گشتاور استاتیکی در حالت اولیه و بهینه.....۳۰
شکل ۲-۱۲ روتور با قطب چاک‌دار برای کاهش شار حاشیه‌ای.....۳۱
شکل ۲-۱۳ تغییرات اندوکتانس در حالت‌های مختلف.....۳۱
شکل ۲-۱٤ نمایش شار حاشیه‌ای با (الف) قطب چاک‌دار و (ب) بدون چاک در قطب.....۳۲
شکل ۲-۱۵ قوس‌های داخلی و بیرونی قطب روتور استاتور.....۳۲
شکل ۲-۱٦ گشتاور استاتیکی در زوایای مختلف قوس قطب (الف) روتور و (ب) استاتور.....۳۳
شکل ۲-۱۷ موتور سوئیچ رلوکتانس چندلایه.....۳٤
شکل ۲-۱۸ (الف) ساختار موتور با استاتور C شکل و (ب) نمایش جانبی آن.....۳۵
شکل ۲-۱۹ موتور سوئیچ رلوکتانس دو فاز با استاتور E شکل در حالت تحریک فاز (الف) اول و (ب) دوم.....۳٦
شکل ۲-۲۰ موتور سوئیچ رلوکتانس دو فاز E شکل با یوغ‌های (الف) I و (ب) L شکل.....۳۷
شکل ۲-۲۱ (الف) موتور سوئیچ رلوکتانس دو فاز جدید و (ب) نمایش سیم‌پیچی آن.....۳۸
شکل ۲-۲۲ موتور سوئیچ رلوکتانس از نوع ۸/۱٤.....۳۹
شکل ۲-۲۳ مقایسه گشتاورهای موتور سوئیچ رلوکتانس از نوع (الف) ٦/٤ و (ب) ٦/۱۰.....۳۹
شکل ۳-۱ نواحی مختلف در آنالیز الکترومغناطیسی.....٤۵

شکل ۳-۲ منحنی شار مغناطیسی (Wb) به ازای جریان فاز و موقعیت روتور از وضعیت هم‌خط تا غیر هم‌خط.....۵۹
شکل ۳-۳ منحنی جریان برحسب شار و موقعیت روتور.....٦۰
شکل ۳-٤ منحنی گشتاور بر حسب جریان و موقعیت روتور.....٦۰
شکل ۳-۵ نمودار چگالی شار مغناطیسی موتور با انتخاب المان‌های درشت (مرحله اول).....٦۲
شکل ۳-٦ نمودار چگالی شار مغناطیسی موتور با انتخاب المان‌های مناسب (مرحله اول).....٦۳
شکل ۳-۷ نمودار چگالی شار مغناطیسی موتور با انتخاب المان‌های زیاد (مرحله اول).....٦۳
شکل ۳-۸ نمودار چگالی شار مغناطیسی موتور با انتخاب المان‌های درشت (مرحله دوم).....٦٤
شکل ۳-۹ نمودار چگالی شار مغناطیسی موتور با انتخاب المان‌های مناسب (مرحله دوم).....٦۵
شکل ۳-۱۰ نمودار چگالی شار مغناطیسی موتور با انتخاب المان‌های زیاد (مرحله دوم).....٦۵
شکل ۳-۱۱ نیروی شعاعی اعمال شده به موتور در نوع ٦/٤ و ۸/٦.....٦۷
شکل ۳-۱۲ گشتاور استاتیکی به دست آمده از آنالیز المان محدود برای فاصله هوایی ۰/۳ میلی‌متر.٦۷
شکل ۳-۱۳ گشتاور استاتیکی به دست آمده از آنالیز المان محدود برای فاصله هوایی ۰/۵ میلی‌متر.٦۸
شکل ۳-۱٤ پروفایل گشتاور در طرح اول و مقایسه آن با طرح مرجع.....٦۹
شکل ۳-۱۵ پروفایل گشتاور در طرح دوم و مقایسه آن با طرح مرجع.....۷۰
شکل ۳-۱٦ چگالی شار مغناطیسی در آنالیز المان محدود برای طرح اول.....۷۰
شکل ۳-۱۷ چگالی شار مغناطیسی در آنالیز المان محدود برای طرح دوم.....۷۱
شکل ۳-۱۸ ساختار و پارامترهای هندسی طرح جدید موتور سوئیچ رلوکتانس.....۷۲
شکل ٤-۱ منحنی اشباع مغناطیسی آلیاژ استفاده شده در مدل‌سازی.....۷۷
شکل ٤-۲ مسیر شار مغناطیسی موتور با زاویه معمولی قوس قطب، در موقعیت ۱۰° روتور.....۷۸
شکل ٤-۳ گشتاور استاتیکی مربوط به یک فاز موتور در حالت اول.....۷۸
شکل ٤-٤ مسیر شار مغناطیسی در حالت دوم به ازای موقعیت ۱۰° روتور.....۷۹
شکل ٤-۵ گشتاور استاتیکی مربوط به یک فاز موتور در حالت دوم.....۷۹
شکل ٤-٦ مسیر شار مغناطیسی در حالت سوم به ازای موقعیت ۱۰° روتور.....۸۰
شکل ٤-۷ گشتاور استاتیکی مربوط به یک فاز موتور در حالت سوم.....۸۰
شکل ٤-۸ مسیر شار مغناطیسی در حالت چهارم به ازای موقعیت ۱۰° روتور.....۸۱
شکل ٤-۹ گشتاور استاتیکی مربوط به یک فاز موتور در حالت چهارم.....۸۲
شکل ٤-۱۰ (الف) المان‌بندی موتور و (ب) بزرگ‌نمایی آن در نزدیکی فاصله هوایی.....۸۳

شکل ٤-١١ اندوکتانس فاز به ازای تغییرات موقعیت روتور با فاصله هوایی غیریکنواخت در سمت استاتور.....٨٤
شکل ٤-١٢ گشتاور استاتیکی فاز موتور با افزایش فاصله هوایی در سمت استاتور.....٨٤
شکل ٤-١٣ اندوکتانس فاز به ازای تغییرات موقعیت روتور با فاصله هوایی غیریکنواخت در سمت روتور.....٨٥
شکل ٤-١٤ گشتاور استاتیکی فاز موتور با افزایش فاصله هوایی در سمت روتور.....٨٦
شکل ٤-١٥ اندوکتانس فاز به ازای تغییرات موقعیت روتور با فاصله هوایی غیریکنواخت در روتور و استاتور.....٨٧
شکل ٤-١٦ گشتاور استاتیکی فاز موتور با افزایش فاصله هوایی در دو سمت روتور و استاتور.....٨٧
شکل ٤-١٧ چگالی شار مغناطیسی (الف) در حالتی که فاصله هوایی از سمت روتور و استاتور افزایش یافته و (ب) حالتی که فاصله هوایی ثابت و بدون تغییر است.....٨٨
شکل ٤-١٨ حساسیت متوسط گشتاور برای سطوح مختلف پارامترها.....٩٠
شکل ٤-١٩ حساسیت ریپل گشتاور برای سطوح مختلف پارامترها.....٩٠
شکل ٤-٢٠ ضرایب عضویت فازی برای ریپل گشتاور و متوسط آن.....٩١
شکل ٤-٢١ (الف) گشتاور متوسط موتور برحسب α و β و (ب) سطح پاسخ آن.....٩٢
شکل ٤-٢٢ (الف) ریپل گشتاور موتور برحسب α و β و (ب) سطح پاسخ آن.....٩٣
شکل ٤-٢٣ پروفایل ریپل و متوسط گشتاور و مقایسه آن‌ها با تابع هدف براساس زاویه θ.....٩٤
شکل ٤-٢٤ خطوط شار مغناطیسی در موتور سوئیچ رلوکتانس با طرح پیشنهادی (الف) و مرسوم (ب).....٩٤
شکل ٤-٢٥ پروفایل اندوکتانس در طرح بهینه پیشنهادی و طرح اولیه.....٩٥
شکل ٤-٢٦ گشتاور فاز طرح بهینه شده در مقایسه با گشتاور طرح اولیه.....٩٦
شکل ٤-٢٧ مقایسه گشتاور موتور با طرح بهینه‌شده پیشنهادی و طرح اولیه.....٩٦

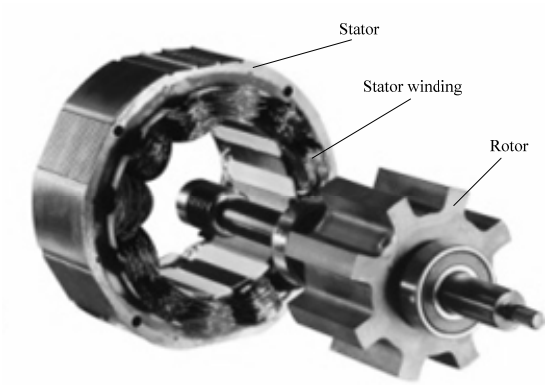
جدول ۲-۱ گشتاور متوسط بر حسب عرض دندانه روتور و استاتور..... ۱۵
جدول ۲-۲ ریپل گشتاور بر حسب عرض دندانه روتور و استاتور..... ۱۵
جدول ۲-۳ نتایج بهینه‌سازی برروی موتور سوئیچ رلوکتانس ۱۲/۸..... ۱۷
جدول ٤-۲ مقایسه عملکرد حالت بهینه شده و نتایج آزمایشگاهی..... ۱۷
جدول ۲-۵ مقایسه روش‌های مختلف بهینه‌سازی در [١٤]..... ۱۸
جدول ٦-۲ مقایسه پارامترهای هندسی و توابع هدف با بهینه‌سازی مختلف..... ۲۰
جدول ۲-۷ حوزه تغییرات پارامترهای طراحی..... ۲۹
جدول ۲-۸ مقادیر مختلف مشخصه‌های گشتاور به عنوان توابع هدف..... ۳۰
جدول ۳-۱ مشخصات پارامترهای مختلف در طرح جدید..... ۷۳
جدول ٤-۱ مشخصات اولیه موتور مورد مطالعه..... ۷٦
جدول ٤-۲ پارامترهای هندسی مختلف در آنالیز حساسیت..... ۸۹


فصل اول
مقدمه

روتور قطب برجسته در یک مدار مغناطیسی تحریک شده، در جهت کاهش رلوکتانس و یا افزایش اندوکتانس حرکت می‌کند. این پدیده که از زمان اولین آزمایش‌ها روی تجهیزات الکترومغناطیس یک امر شناخته شده است، اساس عملکرد موتورهای سوئیچ رلوکتانس را تشکیل می‌دهد.

ابداع اولیه در زمینه موتورهای سوئیچ رلوکتانس به سال ۱۸۳۸ میلادی در ایالات متحده بر می‌گردد. این موتور الکترومغناطیسی اولیه به زودی با ماشین‌های DC و القایی جایگزین شد و پس از ۱٤۰ سال با پیشرفت ادوات الکترونیک قدرت موتور سوئیچ رلوکتانس دوباره مورد توجه قرار گرفت و اولین کتاب کامل درباره موتورهای سوئیچ رلوکتانس در سال ۱۹۹۳ میلادی توسط میلر[1] به نگارش در آمد.

امروزه موتورهای سوئیچ رلوکتانس به دلیل ویژگی‌های منحصربفرد مورد توجه بسیاری از محققان و پژوهشگران است و روز به روز بر انواع مختلف آن افزوده می‌شود. شکل ۱-۱ صورت بازشده ساختار یک موتور سوئیچ رلوکتانس از نوع ۱۲/۸ را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱ ساختار ساده یک موتور سوئیچ رلوکتانس مرسوم

مشکل فهم ریشه‌ای موتور سوئیچ رلوکتانس به مواردی چون ساختار برجسته قطب روتور و استاتور و نبود سطح صاف استوانه ای در فاصله‌ی هوایی بر می‌گردد. روتور بدون سیم پیچی است و استاتور شامل سیم پیچ‌های متمرکز روی قطب‌های متقابل است. با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد

[1] -Miller

این موتور، مزایا و معایب مشخصی برای موتورهای سوئیچ رلوکتانس متصور است که نگاه علمی به آن‌ها در تحلیل این موتورها امری ضروری و اجتناب ناپذیر است.

نبود سیم‌پیچی در روتور موتورهای سوئیچ رلوکتانس هزینه ساخت آن را کاهش می‌دهد. به علاوه این موتور بدون مشکل مکانیکی می‌تواند در سرعت‌های خیلی بالا کار کند و به دلیل پایین بودن ممان اینرسی روتور، شتاب‌گیری بالایی دارد. به دلیل ساختار برجسته قطب‌ها، مشکل گرمای حاصله از تلفات مس در سیم‌پیچ‌های قرار گرفته بر روی استاتور برطرف شده و لذا خنک‌سازی آن بهتر انجام می‌شود. از طرفی، چون ماده مغناطیس دائم روی روتور قرار ندارد لذا افزایش دمای زیاد آن مجاز است. در رنج‌های گسترده سرعت و توان، بازده و گشتاور موتور سوئیچ رلوکتانس همچنان بالا است و نیز دارای قابلیت برگشت توان است. ساختار بدون جاروبک موتور سوئیچ رلوکتانس استفاده از آن را در محیط‌های حساس و پرخطر امکان‌پذیر می‌سازد.

یکی از ویژگی‌های مهم موتورهای سوئیچ رلوکتانس، عدم وابستگی گشتاور به جهت جریان است که این امر، باعث کاهش تعداد سوئیچ‌ها می‌شود و درایو موتور نیز در تمامی چهار ربع با کنترل زوایای روشن و خاموش می‌تواند هدایت گردد. گفتنی است تحمل عیب در موتورهای سوئیچ رلوکتانس نسبت به سایر موتورها بیشتر است.

موتورهای سوئیچ رلوکتانس به دلیل ویژگی‌هایی چون عملکرد در سرعت وتوان‌های مختلف، کاربردهای گسترده‌ای را در مواردی نظیر سیستم‌های پیشران در خودروهای برقی، سیستم‌های فضایی و دریایی و وسایل خانگی و . . . می توانند داشته باشند و با دارا بودن مشخصاتی نظیر بازده بالا، ساختار ساده و کم هزینه، مقاوم بودن، قابلیت اطمینان بالا و نداشتن هزینه تعمیر ونگه‌داری می‌توانند انتخاب مناسبی برای کاربردهای صنعتی و خانگی در سطح وسیع باشند.

در کنار این مزایا، تغییرات نیروهای الکترومغناطیسی شعاعی قوی بین روتور و استاتور در موتور سوئیچ رلوکتانس، لرزش زیادی تولید می‌کند و نویز صوتی در موقع قطع سوئیچ قابل احساس است. برخلاف سایر موتورهای مرسوم، موتورهای سوئیچ رلوکتانس بدون مبدل الکترونیک قدرت قابل راه‌اندازی نیستند. مهم‌ترین چالش در سال‌های اخیر مربوط به ریپل گشتاور در این موتورها است که از ساختار برجسته موتور سوئیچ رلوکتانس و نیز تحریک جریان پالسی با کموتاسیون اجباری ناشی

می‌شود. از موارد مهم دیگر می‌توان به لزوم استفاده از سنسور موقعیت در سیستم درایو و نیاز به خازن برای اتصال DC پایدار اشاره کرد.

با وجود مزایای زیاد این نوع از موتورها، عواملی چون ریپل گشتاور استفاده از آن را محدود می‌کند لذا طراحی مناسب موتور با روش‌های دقیق مثل آنالیز المان محدود در جهت بالا بردن عملکرد آن در کنار سیستم درایو و کنترل مطلوب می‌تواند در بهینه کردن این موتورها بسیار مؤثر باشد.

در پایان نامه حاضر، تحقیقات مختلف در راستای طراحی بهینه موتورهای سوئیچ رلوکتانس در جهت افزایش کارائی و از بین بردن مشکلات آن نظیر ریپل گشتاور انجام گردیده و روش‌هایی برای بهبود عملکرد این موتورها با انتخاب هندسه و شکل مناسب، استفاده از روش‌های هوشمند در طرح بهینه و نیز استفاده از آنالیز دقیق و غیرخطی المان محدود ارائه شده است.

فصل دوم

بررسی منابع

۲-۱ مقدمه

امروزه موتورهای سوئیچ رلوکتانس به طور گسترده مورد توجه بسیاری از محققان است. ساختار ساده و ویژگی‌ها و مزایای زیاد این موتور، دلایل تحقیق در این راستا را بیش از پیش روشن می‌کند. روتور و استاتور با قطب‌های برجسته، اشباع مغناطیسی و کموتاسیون از مهم‌ترین ویژگی‌های موتورهای سوئیچ رلوکتانس محسوب می‌شوند که در بررسی موتور باید مورد توجه قرار گیرند. روش‌های مختلف در سیستم‌های درایو و کنترل این موتورها برای بهبود عملکرد موتور، معرفی و مطالعه شده است اما برای دستیابی به مشخصات مطلوب در موتور سوئیچ رلوکتانس، طراحی مناسب و بهینه آن هم باید مورد مطالعه قرار گیرد.

در این فصل، روش‌های طراحی موتورهای سوئیچ رلوکتانس، آنالیز میدان‌های مغناطیسی، روش‌های مختلف بهینه سازی و کاهش ریپل گشتاور از گذشته تا به امروز مورد بررسی قرار گرفته است. در پایان فصل ساختارهای متنوع و جدید موتورهای سوئیچ رلوکتانس بیان شده است.

۲-۲ روند طراحی موتور سوئیچ رلوکتانس

موتور سوئیچ رلوکتانس اختراع جدیدی نیست و از ۱۵۰ سال پیش یک موتور شناخته شده محسوب می‌شود. کاربردهای اولیه این موتور به استفاده در درایو یک لوکوموتیو در سال ۱۸٤۲ میلادی بر می‌گردد. در سال ۱۹٦۹ میلادی وقتی که یک موتور رلوکتانسی برای کاربردهای سرعت متغیر مطرح شد، نگاه ها دوباره به سمت این موتورها برگشت. روش‌های مختلف طراحی بخصوص تحلیل الکترومغناطیسی را که تابحال مطرح بوده‌اند، می‌توان در سه گروه روش‌های خطی، روش‌های غیرخطی و روش‌های المان محدود تقسیم‌بندی نمود [۱].

۲-۲-۱ روش‌های خطی در طراحی

روش خطی براساس آنالیز مداری با پارامترهای مستقل از جریان است. در این روش از اشباع و پدیده‌های غیرخطی صرف‌نظر می‌شود. در موتورهای مرسوم مثل موتورهای القایی و DC، گام اول در طراحی به دست آوردن معادله خروجی براساس بارگذاری الکتریکی و مغناطیسی است. لذا در

موتورهای سوئیچ رلوکتانس نیز برای طراحی اولیه و با فرض خطی بودن می‌توان معادله مشابهی به دست آورد که طراح بتواند تا حدودی این معادله را در طراحی موتورهای سوئیچ رلوکتانس به کار گیرد.

معادله خروجی موتور سوئیچ رلوکتانس با آنالیز مشابه موتورهای مرسوم، به صورت زیر خواهد بود [۲]:

$$P_d = k_c k_d k_1 k_2 B A_{sp} D^2 L N_r \qquad (۱-۲)$$

که در آن

$$k_1 = \frac{\pi^2}{120} \quad , \quad k_2 = 1 - \frac{1}{\sigma \lambda_u} \qquad (۲-۲)$$

معادله گشتاور موتور هم به صورت زیر است:

$$T = k_d \cdot k_e \cdot k_3 \cdot k_2 \cdot (B \cdot A_{sp}) \cdot D^2 \cdot L \qquad (۳-۲)$$

که در آن

$$k_3 = \frac{\pi}{4} \qquad (۴-۲)$$

سایر پارامترها نیز به صورت زیر تعریف می‌شوند:

k_e : ضریب بازده موتور

k_d : دوره کار[1]

B : چگالی شار مغناطیسی در وضعیت هم‌خط قطب‌های روتور و استاتور

D : قطر موتور

A_{sp} : بارگذاری الکتریکی ویژه

L : طول محوری موتور

[1] -Duty cycle

λ_u : نسبت اندوکتانس در وضعیت هم‌خط و اشباع نشده به اندوکتانس حالت غیرهم‌خط قطب‌ها

k_c : ضریب انباشتگی هسته

σ : نسبت اندوکتانس در وضعیت هم‌خط و اشباع شده به اندوکتانس حالت هم‌خط و اشباع نشده قطب‌ها

N_r : سرعت روتور برحسب دور بر دقیقه

معادله خروجی اخیر در طراحی اولیه و ابتدایی موتور براساس بارگذاری الکتریکی و مغناطیسی و حجم و ابعاد موتور می‌تواند به کار گرفته شود.

۲-۲-۲ روش‌های غیرخطی در طراحی

روش غیرخطی براساس مدارهای مغناطیسی مستقل از تأثیرات جریان است که در آن اشباع مغناطیسی در نظر گرفته می‌شود. کارهای مختلف با این روش بر اساس آنالیز حساسیت صورت گرفته که می‌توان به مواردی چون تعداد دندانه در هر قطب استاتور و نسبت عرض دندانه به گام آن اشاره کرد. در روش غیرخطی اغلب یک مدل تحلیلی که شامل اثرات اشباع است و فقط هندسه و پارامترهای مواد مورد استفاده به عنوان ورودی آن هستند، در نظر گرفته می‌شود که شبیه‌سازی عملکرد ماشین را سهولت می‌بخشد [۳].

۲-۲-۳ روش‌های المان محدود در طراحی

با پیدایش امکانات و تجهیزات کامپیوتری، توجه به سمت کاربرد آنالیز المان محدود در موتورهای سوئیچ رلوکتانس برگشت. روش‌های المان محدود اولیه با مشکلاتی همانند مش‌بندی، تحلیل میدان در زوایای روتوری که نامتقارنی در هندسه به وجود می‌آورد و هم‌چنین پیچیدگی زیاد و محاسبات طولانی برای حل سه بعدی میدان روبرو بودند و لذا بعدها نرم‌افزارها و الگوریتم‌های گوناگون مطرح شدند که مشکلات اصلی مربوط به طراحی المان محدود موتورهای سوئیچ رلوکتانس را برطرف نمودند [٤].