



پردیس بین المللی ارس

گروه برق - قدرت

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته برق گرایش قدرت

عنوان فارسی

ارائه یک ساختار جدید برای موتور سوئیچ رلوکتانس

استاد راهنما

آقای دکتر محمدرضا فیضی

استاد مشاور

آقای مهندس یوسف ابراهیمی

پژوهشگر

یوسف علی پور

شهریور ۱۳۹۲

الحمد لله
البرحمين

نام خانوادگی: علی پور	نام: یوسف
عنوان پایان نامه: ارائه یک ساختار جدید برای موتور سوئیچ رلوکتانس	
استاد راهنما: دکتر محمد رضا فیضی	
استاد مشاور: دکتر یوسف ابراهیمی	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته: مهندسی برق
دانشگاه: دانشگاه تبریز	دانشکده: پردیس بین المللی ارس
تاریخ فارغ التحصیلی: ۹۳/۶/۳۰	تعداد صفحات: ۵۰
کلید واژه ها: موتور سوئیچ رلوکتانس، گشتاور، تلفات، حجم موتور	
چکیده:	
<p>در سال های اخیر صنعت درایو با دگرگونی های بنیادین روبرو شده است. از جمله دلایل این صنعت مهم می توان به پیشرفت اکترونیک قدرت، نیاز به صرفه جویی در انرژی و افزایش بهره وری اشاره کرد. با توجه به این امر، برای موتورهای که بدون درایو نمی توانستند راه اندازی و یا کار کنند یک جایگاه جدید باز شده است. یکی از این دسته موتورها، موتور سوئیچ رلوکتانس است. موتور سوئیچ رلوکتانس با توجه به ساختار ساده، هزینه کم ساخت، قدرت تحمل خطای بالا، امکان کار در درجه حرارت های زیاد، نگهداری آسان به دلیل عدم وجود هر گونه سیم پیچی بر روی روتور و در نتیجه سبک تر شدن وزن آن و قابلیت دستیابی به سرعت های بالا از ویژگی های منحصر به فرد این موتور است.</p> <p>در این پایان نامه یک مدل جدید پیشنهاد می شود که دارای چگالی گشتاور به حجم بالا و در نتیجه توان به حجم بالا (همانطور که گشتاور متناسب است با مجذور قطر، با افزایش قطر روتور، بدون افزایش طول مسیر شار توانایی افزایش گشتاور به طور قابل توجهی میسر شده است). تمامی هسته های استاتور و روتور سگمنت شده است و از نظر الکتریکی و مغناطیسی از یکدیگر ایزوله هستند و به همین دلیل در ساختار پیشنهادی شار معکوس استاتور و روتور حذف شده و نتیجه افزایش بازده به دلیل کاهش تلفات جریان گردابی و هیستریزس است. ساختار پیشنهادی به صورت سه بعدی در نرم افزار Maxwell شبیه سازی خواهد شد.</p>	

تقدیم و تشکر:

در آغاز لازم می‌دانم از زحمات پدر و مادر گرامی‌ام و کلیه کسانیکه در دوران تحصیل همواره مشوق و پشتیبان اینجانب بوده‌اند کمال تشکر را بنمایم و این مجموعه را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می‌کنم، همچنین از زحمات اساتید محترم و دانشجویان صمیمی و مهربان دانشگاه تبریز و به خصوص استاد ارجمند جناب دکتر محمدرضا فیضی که با راهنمایی‌های خود راهگشای اینجانب بوده‌اند کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم.

۱.....	مقدمه	فصل ۱-۱
۲.....	مقدمه	۱-۱
۴.....	دید کلی در مورد موتور سوئیچ رلوکتانسی	۲-۱
۵.....	ویژگی‌های موتور سوئیچ رلوکتانسی	۳-۱
۷.....	طبقه بندی موتور سوئیچ رلوکتانسی	۴-۱
۸.....	تئوری عملکرد موتور سوئیچ رلوکتانسی	۵-۱
۸.....	منحنی‌های مغناطیسی	۱-۵-۱
۹.....	محاسبه گشتاور	۲-۵-۱
۱۱.....	بررسی منابع	فصل ۲-۲
۱۲.....	مقدمه	۱-۲
۱۲.....	روند طراحی موتور سوئیچ رلوکتانسی	۲-۲
۱۳.....	ساختارهای جدید موتور سوئیچ رلوکتانسی	۳-۲
۱۳.....	موتور سوئیچ رلوکتانسی با استاتور C شکل	۱-۳-۲
۱۴.....	موتور سوئیچ رلوکتانسی با استاتور E شکل	۲-۳-۲
۱۶.....	موتور سوئیچ رلوکتانسی دو فاز جدید (TPSRM)	۳-۳-۲
۱۷.....	موتور سوئیچ رلوکتانسی با تعداد قطب‌های زیاد در روتور	۴-۳-۲
۱۸.....	موتور سوئیچ رلوکتانسی با دو استاتور و یک روتور (DSSRM)	۵-۳-۲
۱۹.....	موتور سوئیچ رلوکتانسی شار محور (AFSSRM)	۶-۳-۲
۲۰.....	ساختار جدید موتور سوئیچ رلوکتانسی پنج فاز شار محور	۷-۳-۲
۲۱.....	موتور سوئیچ رلوکتانسی با استاتور E شکل بهبود یافته	۸-۳-۲
۲۲.....	ارائه یک ساختار جدید برای موتور سوئیچ رلوکتانسی	فصل ۳-۳
۲۳.....	مقدمه	۱-۳

۲۳.....	ساختار جدید موتور سوئیچ رلوکتانسی.....	۲-۳
۲۵.....	انتخاب تعداد فاز و قطب‌های استاتور و روتور.....	۱-۲-۳
۲۸.....	انتخاب قطر و طول محور روتور.....	۲-۲-۳
۳۰.....	انتخاب قطر استاتور و طول کلی ماشین.....	۳-۲-۳
۳۰.....	انتخاب طول شکاف هوایی (فاصله هوایی).....	۴-۲-۳
۳۰.....	انتخاب تعداد دور سیم‌پیچ‌های قطب استاتور.....	۵-۲-۳
۳۱.....	انتخاب سطح مقطع و چگالی جریان سیم‌پیچ‌های قطب استاتور.....	۶-۲-۳
۳۱.....	ابعاد ساختار پیشنهادی.....	۳-۳
۳۶.....	شبیه سازی و تحلیل ساختار پیشنهادی.....	فصل ۴-
۳۷.....	مقدمه.....	۱-۴
۳۸.....	مدل سازی ساختار پیشنهادی توسط نرم افزار المان محدود.....	۲-۴
۴۰.....	نیروی محرکه تولیدی.....	۱-۲-۴
۴۱.....	تلفات هیستریزیس.....	۲-۲-۴
۴۳.....	گشتاور مغناطیسی.....	۳-۲-۴
۴۴.....	مقایسه ساختار پیشنهادی با ساختار [6].....	۳-۴
۴۷.....	نتیجه گیری و پیشنهادات.....	فصل ۵-
۴۸.....	مقدمه.....	۱-۵
۴۸.....	نتیجه گیری.....	۲-۵
۵۰.....	پیشنهادات.....	۳-۵
۵۱.....	منابع و مراجع.....	

- شکل ۱-۱ موتورهای الکتریکی برای سیستم پیشران خودروهای الکتریکی ۳
- شکل ۲-۱: ساختار ساده یک موتور سوئیچ رلوکتانس مرسوم ۵
- شکل ۳-۱ طبقه بندی موتور سوئیچ رلوکتانسی ۷
- شکل ۴-۱ قطب‌های استاتور و روتور در هم راستا و ناهم راستایی ۸
- شکل ۵-۱ منحنی‌های مغناطیسی ۹
- شکل ۶-۱ تبدیل انرژی ۹
- شکل ۱-۲: (الف) ساختار موتور با استاتور C شکل و (ب) نمایش جانبی و تفکیک شده ۱۳
- شکل ۲-۲: موتور سوئیچ رلوکتانسی دوفاز با استاتور E شکل (الف) در حالت تحریک فاز اول (ب) در حالت تحریک فاز دوم ۱۵
- شکل ۳-۲: طرح‌های جدید از موتور سوئیچ رلوکتانسی با استاتور E شکل (a) ساختار استاتور با یوغ I (b) افزایش عرف قطب در یوغ I (c) ساختار استاتور با یوغ L (d) پیکر بندی کلی یک موتور با یوغ L ۱۶
- شکل ۴-۲ (الف) موتور سوئیچ رلوکتانسی دو فاز جدید (ب) نمایش سیم‌پیچی آن ۱۷
- شکل ۵-۲ موتور سوئیچ رلوکتانسی از نوع ۶/۱۰ ۱۸
- شکل ۶-۲ مقایسه گشتاورهای موتور سوئیچ رلوکتانسی از نوع (الف) ۶/۴ و (ب) ۶/۱۰ ۱۸
- شکل ۷-۲ (الف) پیش نمونه آزمایشی موتور DSSRM (ب) اندازه‌گیری و نتایج FEA برای اندوکتانس یک فاز ۱۹
- شکل ۸-۲ (الف) تصویر سه بعدی AFSSRM (ب) مسیر شار در روتور و استاتور در موتور AFSSRM ۲۰

- شکل ۲-۹ (الف) تصویر سه بعدی (ب) نمای از موتور پنج فازه شار محور سوئیچ رلوکتانسی ۲۱
- شکل ۲-۱۰ نتایج تحلیل المان محدود برای شار یک فاز (a) در حالت جفت شدن (b) در حالت جفت شده ۲۱
- شکل ۳-۱ (الف) ساختار [6] (ب) یک سگمنت از ساختار [6] ۲۴
- شکل ۳-۲ موتور سوئیچ رلوکتانس سه فاز ۶/۸ ۲۵
- شکل ۳-۳ موتور سوئیچ رلوکتانس سه فاز ۱۲/۸ ۲۶
- شکل ۳-۴ موتور سوئیچ رلوکتانس چهار فاز ۸/۶ ۲۷
- شکل ۳-۵ تصاویر استاتور (الف) دید از بالا (ب) دید از جانب (ج) دید از کناری (د) تصویر یک سگمنت استاتور از جانب ۳۲
- شکل ۳-۶ (الف) نمای از استاتور و سیم‌پیچ‌ها (ب) نمای از یک سگمنت از استاتور و سیم‌پیچ ۳۳
- شکل ۳-۷ تصاویر روتور (الف) دید از بالا (ب) دید از جانب (ج) دید از کناری (د) تصویر خطوط روتور از جانب ۳۳
- شکل ۳-۸ نمای کلی ساختار ارائه شده ۳۵
- شکل ۴-۱ مدل سازی و مش‌بندی ساختار پیشنهادی ۳۹
- شکل ۴-۲ (الف) مسیر شار (ب) نمای ۳ بعدی از یک سگمنت ۳۹
- شکل ۴-۳ مشخصه گشتاور با تحریک‌های مختلف برای یک فاز ۳۹
- شکل ۴-۴ منحنی آمپر دور به شار در برگیرنده در موقعیت‌های مختلف روتور ۴۰
- شکل ۴-۵ شار در برگیرنده نسبت به موقعیت روتور و جریان تحریک ۴۱
- شکل ۴-۶ منحنی B-H با معکوس کردن جریان ۴۲

- شکل ۴-۷ (الف) نمای سه بعدی از یک سگمنت ساختار پیشنهادی که المان با رنگ سبز استاتور، المان با رنگ آبی روتور و المان بار رنگ زرد سیم‌پیچ است (ب) نمای سه بعدی از مسیر شار (ج) مسیر ورود و خروج شار در روتور (د) مسیر شار در استاتور ۴۳
- شکل ۴-۸ گشتاور تولیدی هر فاز و گشتاور کل موتور ۴۴
- شکل ۴-۹ (الف) گشتاور تولیدی (ب) شار در برگیرنده ۴۵

فصل ۱ - مقدمه

۱-۱ مقدمه

تقریباً یک جزء اساسی شناخته شده در تمامی صنایع موتورهای الکتریکی است که حدود ۶۰٪ از انرژی الکتریکی تولید شده در صنعت را موتورهای الکتریکی مصرف می‌کنند [1]. با وجود سابقه‌ای طولانی در تحقیق بر روی موتورهای الکتریکی، هنوز هم فضایی به منظور ارتقاء عملکرد موتورهای الکتریکی باقی‌مانده است که می‌توان با دو روش زیر عملکرد موتورهای الکتریکی را بهبود داد:

– با تغییر هندسه

– تغییر کنترل خود موتور (درایو)

با توجه به گسترده‌گی کاربرد موتورهای الکتریکی در صنعت و لوازم خانگی، به تازگی نیز در صنعت خودروسازی، موتورهای الکتریکی برای تولید انبوه خودروهای الکتریکی توجه بیشتری را به خود جلب کرده است، تنوع در خود موتورهای الکتریکی از نظر ساختار و عملکرد، رقباتی ما بین موتورهای الکتریکی در زمینه‌های هزینه ساخت موتور، توان موتور نسبت به حجم موتور، راندمان، بهره‌برداری آسان و غیره نسبت به نیاز سیستم است، که به طور مثال برای سیستم‌های نیروی محرکه وسیله‌های نقلیه الکتریکی، سه نوع موتور الکتریکی به عنوان نامزدهای بالقوه [2] در نظر گرفته شده است، که این موتورها عبارتند از:

– موتور BLDC^۱

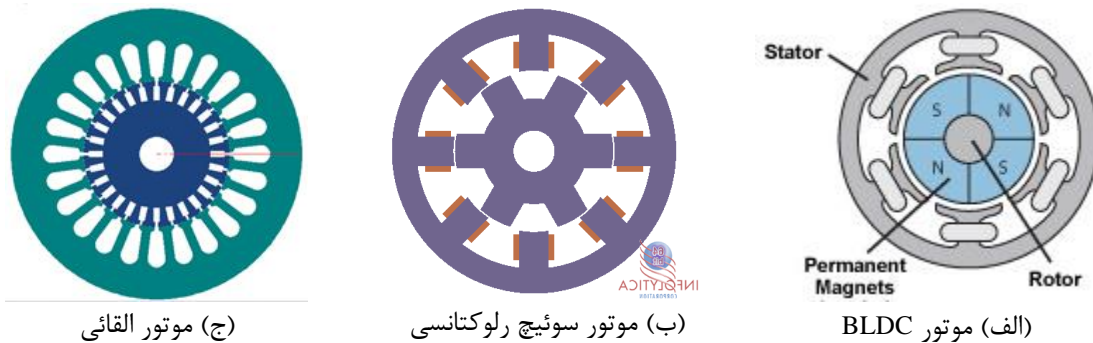
– موتور القائی

– موتور سوئیچ رلوکتانسی

که شکل ۱-۱ نمای دو بعدی هر سه موتور را نشان می‌دهد. حال با داشتن سه نامزد در صنعت خودروهای الکتریکی، موتور سوئیچ رلوکتانسی توجه بیشتری را به خود جلب کرده است [2] و این امر به

^۱ Brush Less Direct Current

دلیل این است که موتور^۱ DC بدون جاروبک (BLDC) به علت قیمت بالای آهنرباهای دائمی نسبت به موتورهای دیگر در اولویت پائین تر قرار دارد. موتورهای القایی به دلیل هندسه غیر قابل انعطاف در مقابل طراحی ساختار بهینه که خیلی کم می توان در ساختار هندسه آن تغییر داد و تحقیقات خود را در کنترل بهینه متمرکز کرده است. در مقابل، هندسه موتور سوئیچ رلوکتانسی بسیار انعطاف پذیر در مقابل طراحی و هزینه کم ساخت به دلیل ساختار ساده، قدرت تحمل خطای بالا، امکان کار در درجه حرارت های زیاد، نگهداری آسان به دلیل عدم وجود هر گونه سیم پیچی بر روی روتور است، در نتیجه سبکتر شدن وزن روتور موتور سوئیچ رلوکتانسی، قابلیت دستیابی به سرعت های بالا را دارد. بنابراین با تحقیقات و پژوهش بر روی بهبود عملکرد موتور سوئیچ رلوکتانسی می توان انتظار قابل توجهی از این موتور داشت.



شکل ۱-۱ موتورهای الکتریکی برای سیستم پیشران خودروهایی الکتریکی

موتور سوئیچ رلوکتانسی به علت ساختار و نحوه عملکرد نیاز به یک راه انداز (درایو) دارد، با کنترل درایو می توان سرعت موتور سوئیچ رلوکتانسی را کنترل کرد، این امر خود باعث می شود موتور سوئیچ رلوکتانسی ذاتاً به یک موتور سرعت متغیر تبدیل شود. با به دست آوردن قابلیت های ذکر شده، موتور سوئیچ رلوکتانسی یک گزینه عالی از برنامه های کاربردی که نیاز به کارایی بالا با هزینه کم برای سیستم های درایو سرعت متغیر است. با توجه به پایین ترین هزینه های ساختار موتور سوئیچ رلوکتانسی، متشکل از یک استاتور با قطب برجسته و سیم پیچ متحدالمرکز، و یک روتور بدون سیم پیچ در مقایسه با ماشین های القایی و یا مغناطیس دائم ارزان تر است [3].

^۱ Direct Current

ماشین های AC از جمله القائی و مغناطیس دائم نیز در مبدل های قدرت محدود هستند و استفاده از اینورتر تمام پل در درایو و تحمل کم در خطا ناشی از اتصال کوتاه در سیم پیچی فاز است، ولی در موتور سوئیچ رلوکتانسی به طور کلی با استفاده از جریان های تک قطبی هدایت می شود، و این باعث می شود که از انواع مبدل قدرت مناسب برای برنامه های کاربردی با کارایی بالا و هزینه کم استفاده کرد [4]. در واقع، کمترین هزینه مبدل قدرت را برای یک فاز با یک سوئیچ کنترل و قادر به کنترل چهار ربع است [5]. یکی دیگر از عوامل کلیدی برای بهبود سیستم درایو موتور سوئیچ رلوکتانسی، و ارائه جذاب تر به صنعت، در دسترس بودن ساختارهای مختلف موتور است که می تواند برای کاربردهای خاص استفاده شود.

۲-۱ دید کلی در مورد موتور سوئیچ رلوکتانس

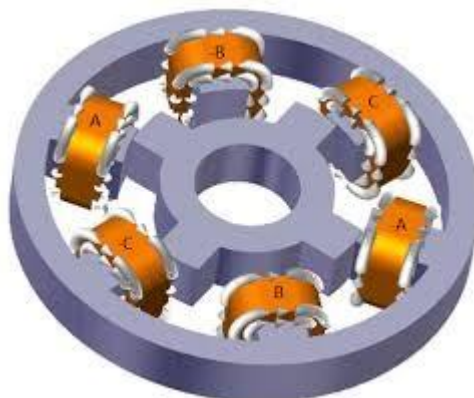
ابداع موتور سوئیچ رلوکتانس به سال ۱۸۳۸ میلادی در ایالات متحده بر می گردد. این موتور الکترومغناطیسی اولیه به زودی با ماشین های DC و القائی جایگزین شد و پس از ۱۴۰ سال با پیشرفت ادوات الکترونیک قدرت که باعث دگرگونی های بنیادین صنعت درایو شود و نیاز به موتورهای دور متغیر با راندمان بالا در صنعت جهت صرفه جویی در انرژی و افزایش بهره وری موتور سوئیچ رلوکتانس دوباره مورد توجه قرار گرفت و یکی از اولین کتاب های کامل درباره موتورهای سوئیچ رلوکتانسی در سال ۱۹۹۳ میلادی توسط میلر^۱ به نگارش درآمد.

شکل ۲-۱ ساختار یک موتور سوئیچ رلوکتانس از نوع ۶/۴ که یک موتور سه فاز است را نشان می دهد، که در آن استاتور و روتور هر دو قطب برجسته هستند و سیم پیچ های استاتور به صورت متمرکز است و برای هر فاز دو سیم پیچ وجود دارد.

اساس کارکرد این موتور ساده است، در صورتیکه سیم پیچ قطب های 'C-C' تغذیه شود، روتور در جهت ساعتگرد به گردش در می آید تا با محور میدان مغناطیسی این قطب ها همراستا شود. حال اگر

^۱ Miller

سیم پیچ قطب‌های A-A' تغذیه شود، روتور در جهت عکس ساعتگرد به گردش در می‌آید تا با محور میدان مغناطیسی این قطب‌ها همراستا شود.



شکل ۱-۲: ساختار ساده یک موتور سوئیچ رلوکتانس مرسوم

۳-۱ ویژگی‌های موتور سوئیچ رلوکتانسی

موتور SRM^۱ دارای ویژگی‌های منحصر به فرد است که باعث استفاده فزاینده آن شده است،

برخی از ویژگی‌های آن عبارتند از [3]:

- تمام سیم‌پیچ‌های ماشین، بطور متمرکز بر روی قطب‌های استاتور قرار دارند. از این رو سیم‌پیچی استاتور آسان است و سیم‌پیچ‌ها را می‌توان بصورت مجزا ساخت و سپس نصب کرد.
- فازهای موتور سوئیچ رلوکتانس از نظر الکتریکی و مغناطیسی مستقلند و مانند سایر انواع ماشین‌های الکتریکی سیم‌پیچ‌ها به طور فیزیکی هم پوشانی ندارند. استقلال مشخصه‌های فاز موتور سوئیچ رلوکتانس، در موارد بحرانی باعث تحمل خطا می‌شود.
- به علت نداشتن سیم‌پیچی بر روی رتور در نتیجه محکم بودن ساختمان رتور و ممان

^۱ Switched Reluctance Motor

اینرسی پائین شتاب گیری بالایی دارد و می‌توانند به‌طور رضایت بخش در سرعت‌های بالا کار کنند.

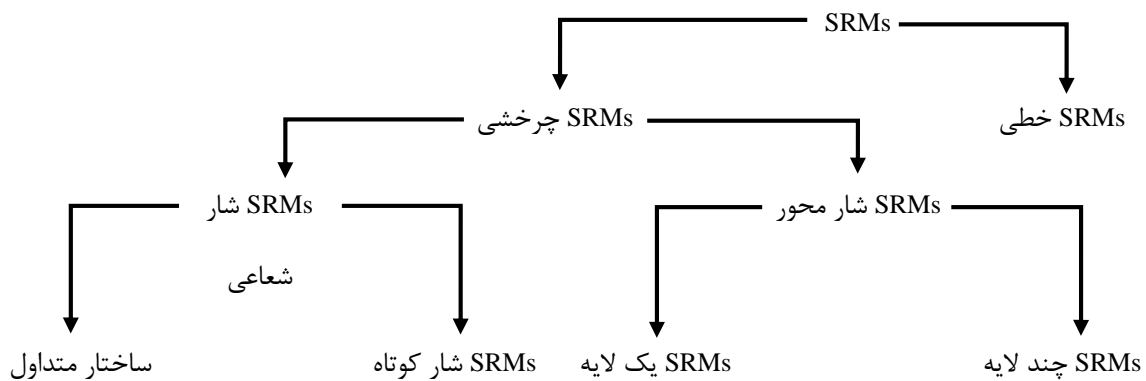
- رتور آن ساده و فرایند ساخت آن کوتاه است.
- به دلیل ساختار برجسته قطب‌ها، مشکل گرمائی سیم‌پیچی‌های استاتور می‌توانند براحتی و به میزان کافی خنک شوند. از طرفی، چون ماده مغناطیس دائم روی رتور قرار ندارد لذا افزایش دمای زیاد مجاز است. در نتیجه، ابعاد موتور در مقایسه با موتورهای دیگر، برای قدرت‌های یکسان کاهش می‌یابد.
- جهت چرخش را می‌توان با تغییر توالی تحریک استاتور معکوس کرد، که یک عمل ساده است.
- از آنجا که گشتاور متناسب با مربع جریان است، موتور سوئیچ رلوکتانس شبیه به یک موتور سری DC است، از این رو دارای گشتاور راه‌اندازی خوبی است.
- گشتاور موتور مستقل از جهت جریان است که این امر باعث کاهش سوئیچ‌ها می‌شود و درایو موتور نیز در تمامی چهار ربع با کنترل زوایای روشن و خاموش می‌توان هدایت گردد.
- تحمل عیب در موتورهای سوئیچ رلوکتانسی نسبت به سایر موتورها بیشتر است.
- القای متقابل بسیار کمی بین سیم پیچ فازها در SRM وجود دارد، و برای تمام اهداف کاربردی آن را ناچیز در نظر می‌گیرند. از آنجا که القای متقابل تقریباً وجود ندارد، هر فاز از دیگر فازها مستقل الکتریکی است. این یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد در موتورهای سوئیچ رلوکتانسی است. با توجه به این ویژگی، یک خطای اتصال کوتاه سیم پیچ در یک فاز در فازهای دیگر، دیگر اثر ندارد.
- از آنجا که از وابستگی موتورهای سوئیچ رلوکتانسی به یک مبدل قدرت (سیستم درایو) برای عملکرد، می‌توان گفت این موتور ذاتاً سرعت متغیر است.

- روی رتور این ماشین‌ها هیچ سیم‌پیچ یا آهنربای دائمی وجود ندارد و تنها سیم‌پیچ‌های مستقر بر روی قطب‌های استاتور با آهنک خاصی به منبع تحریک متصل می‌شوند و این یک مزیت بزرگی است زیرا تنها روی سیم‌پیچ استاتور تلفات مقاومتی رخ می‌دهد و استاتور ساده‌تر از رتور خنک می‌شود.
- در یک توان مشخص و ابعاد هندسی یکسان این موتورها کوچکتر از انواع دیگر موتورهاست.

با وجود مزایای زیاد موتور SRM معایبی هم این موتور دارد از جمله این معایب ریپل گشتاور و نویز صوتی است که با یک طراحی دقیق می‌توان آنها را محدود و بهینه در جهت عملکرد آن انجام داد.

۴-۱ طبقه بندی موتور سوئیچ رلوکتانسی

طبقه بندی موتور سوئیچ رلوکتانسی مطابق شکل ۳-۱ نشان داده شده است، طبقه بندی اولیه بر اساس ماهیت حرکت (به عنوان مثال، چرخش و یا خطی) است.



شکل ۳-۱ طبقه بندی موتور سوئیچ رلوکتانسی [3]

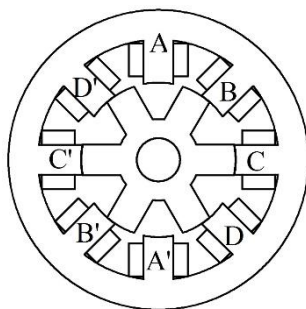
طبقه بندی ساختار چرخشی موتور سوئیچ رلوکتانس، با توجه به جهت مسیر حرکت میدان مغناطیسی از استاتور به رتور تعیین می‌شود، چنانچه حرکت شار در امتداد شعاع استوانه استاتور و رتور باشد، نوع شار شعاعی است و در صورتی که حرکت شار در راستای محور شفت باشد، نوع شار محور نامیده می‌شود.

۵-۱ تئوری عملکرد موتور سوئیچ رلوکتانس

۱-۵-۱ منحنی‌های مغناطیسی

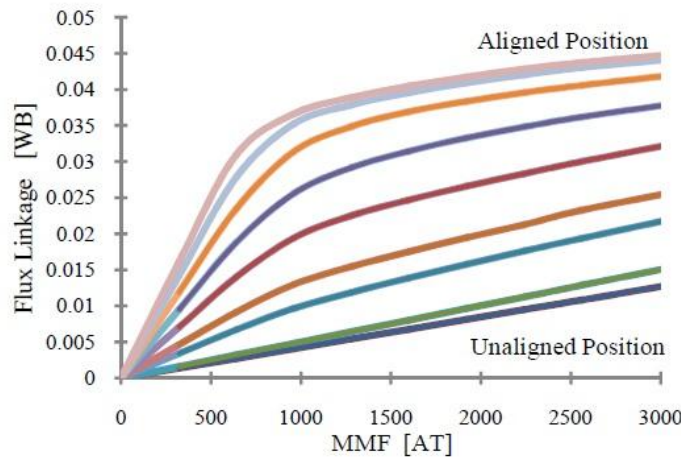
وقتی که یک جفت از قطب‌های روتور بطور کامل در مقابل یک جفت از قطب‌های استاتور قرار گیرند، آنها در موقعیت هم خطی هستند. در شکل ۴-۱ فاز C-C' بطور کامل با یک جفت از قطب‌های روتور همراستا است. در صورتیکه روتور به طرف استاتور جابجا شود، گشتاوری به وجود می‌آید که تمایل دارد روتور را به موقعیت هم خطی برگرداند.

در موقعیت هم خطی اندوکتانس در حداکثر مقدار خود قرار دارد و رلوکتانس مغناطیسی مسیر شار به ازای جریان عادی، به خصوص در قطب‌های روتور و استاتور مستعد اشباع است. دلیل این امر رلوکتانس کم شکاف هوایی در این موقعیت می‌باشد. در صورتیکه محور بین دو قطب رتور با یک قطب استاتور همراستا شود، موقعیت ناهم خطی نام دارد. این حالت در فاز A-A' شکل ۴-۱ نشان داده شده است. در صورتیکه جریان در سیم‌پیچ‌های این فاز برقرار شود، گشتاوری تولید نخواهد شد. اگر رتور به هر طرف از موقعیت ناهم خطی جابجا شود، گشتاوری تولید می‌شود که تمایل دارد روتور را به موقعیت هم خطی جدیدی سوق دهد. در موقعیت ناهم خطی اندوکتانس حداقل مقدار را دارد، زیرا به دلیل شکاف هوایی بسیار بزرگ، رلوکتانس مغناطیسی مسیر شار در بیشترین مقدار خود است. از اینرو در موقعیت ناهم خطی، حداقل برای سطوح جریانی که موتور برای کار در آن طراحی شده، مسیر شار به اشباع نمی‌رود.



شکل ۴-۱ قطب‌های استاتور و روتور در هم راستا و ناهم راستایی

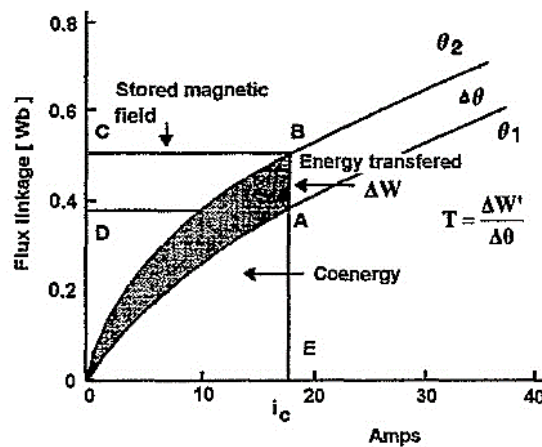
در موقعیت‌های میانی مانند آنچه برای فازهای B-B' و D-D' وجود دارد، منحنی‌های مغناطیسی، مقادیر واسطی بین منحنی‌های هم خطی و ناهم خطی را خواهند داشت. شکل ۱-۵ منحنی‌های شار را از موقعیت ناهم راستایی تا هم راستایی نشان می‌دهد. علاوه بر این می‌توان دید در موقعیت هم خطی برای بیشتر محدوده جریان اشباع مغناطیسی وجود دارد.



شکل ۱-۵ منحنی‌های مغناطیسی [6]

۱-۵-۲ محاسبه گشتاور

برای تعیین گشتاور لحظه‌ای در جریان و زاویه روتور مشخص، به روابط بین گشتاور، جریان و شار نیاز است، که معمولاً با مفهوم کو انرژی مربوط می‌شوند.



شکل ۱-۶ تبدیل انرژی

کو انرژی (W') برای یک فاز با جریان i_0 و موقعیت روتور θ_1 سطح زیر منحنی مغناطیسی است

که در شکل ۶-۱ نشان داده شده است. در صورتیکه روتور به اندازه زاویه $\Delta\theta$ از θ_1 به θ_2 جابجا شود، انرژی مبادله شده از منبع ΔW_e با افزایش انرژی مغناطیسی ذخیره شده بعلاوه انرژی مکانیکی خروجی برابر است.

$$\Delta W_e = ABCD \quad (1-1)$$

افزایش انرژی میدان ذخیره شده برابر است با:

$$\Delta W_f = OBC - OAD \quad (2-1)$$

از اینرو کار مکانیکی ΔW_m برابر است با:

$$\Delta W_m = T\Delta\theta = ABCD - (OBC - OAD) \Rightarrow \Delta W_m = OAB \quad (3-1)$$

کار مکانیکی انجام شده با تغییرات کو انرژی $\Delta W' = (OBE - OAE)$ برابر است که در شکل

۶-۱ دیده می‌شود. گشتاور مکانیکی بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$T(i, \theta) = \left. \frac{\Delta W'}{\Delta\theta} \right|_{i=i_0} \quad (4-1)$$

در حالت کلی گشتاور لحظه‌ای تولید شده توسط جریان i_0 را بصورت زیر می‌توان نوشت:

$$T(i, \theta) = \left[\frac{\Delta W'}{\Delta\theta} \right]_{i=i_0} \quad (5-1)$$

گشتاور کل موتور از جمع گشتاورهای تولیدی توسط هر یک از جریان‌های منفرد در هر لحظه

بدست می‌آید. در یک پریود کامل فاز توان مکانیکی تولیدی توسط یک جریان به صورت زیر است:

$$W = \int_{\theta_{on}}^{\theta_{off}} T(i, \theta) d\theta \quad (6-1)$$

فصل ۲- بررسی منابع