

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

A decorative floral illustration in the top left corner, featuring a central flower with multiple petals and several leaves extending from a stem.



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده برق و رباتیک

طراحی ، مدل سازی و ساخت یک نمونه موتور هیستریزیس- رلوکتانس تخت دو روتوره

نگارش:

حمیدرضا میزانی

استاد راهنما:

دکتر احمد دارابی

ارائه پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۹۷



دانشکده : برق

گروه : برق – قدرت

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای حمیدرضا میزانی

تحت عنوان: طراحی ، مدل سازی و ساخت یک نمونه موتور هیستریزیس_ رلوکتانس تخت دو روتوره

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

امضاء	استاد مشاور	امضاء	استاد راهنما
-	-		دکتر احمد دارابی

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور

پدر بزرگوار و مادرم مهربانم

آن دو فرشته‌ای که از خواسته‌هایشان گذشتند

سخنی را را به جان خریدند

و خود را سپر بلای مشکلات و ناملایمات کردند

تا من به جایگاهی که اکنون در آن ایستاده‌ام برسم

آنان که سال هارنج و سخنی را به جان خریدند و

سعادت و کمال مرا آرزو کردند.

آنان که جبران فداکاری‌شان هرگز ممکن نیست

تشکر و قدردانی

بر خود لازم می‌دانم از تلاش‌های بی‌دریغ، ارزشمند و دلسوزانه استاد گرامی‌ام جناب آقای دکتر احمد دارابی تشکر و قدردانی کنم. بی‌شک اتمام این پایان‌نامه بدون زحمات دلسوزانه ایشان امکان پذیر نبود. همچنین از تمامی اساتید گروه برق دانشگاه صنعتی شاهرود که در این چند سال از راهنمایی‌های آنان بهره‌مند بودم تشکر می‌کنم. همچنین از کلیه دوستان خود در دانشگاه صنعتی شاهرود مخصوصاً آقایان دکتر حامد طحانیان، مهندس سیامک عمرانی و دکتر علی بهنیافر که با یاری و راهنمایی‌هایشان سختی‌ها را برایم آسان نمودند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

تعهد نامه

اینجانب حمیدرضا میزانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق - طراحی ماشین‌های الکتریکی و الکترونیک قدرت دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تحت عنوان: طراحی ، مدل سازی و ساخت یک نمونه موتور هیستریزیس_ رلوکتانس تخت دو روتوره، تحت راهنمایی‌های جناب آقای دکتر دارابی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه 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 پایان نامه 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 می باشد 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 پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، 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 پایان نامه یک موتور سنکرون هیستریزیس-رلوکتانس تخت دوروتوره (DDHRM) معرفی شده است. هر یک از موتورهای هیستریزیس و سنکرون رلوکتانسی دارای ویژگی‌های منحصر بفردی هستند، بنابراین انتظار می‌رود با ترکیب این دو موتور بتوان یک موتور تلفیقی با مشخصه عملکردی بهتر را ارائه نمود. ساختار موتور بصورت تخت بدون شیار در نظر گرفته شده است که همین موضوع باعث می‌شود تا بیشتر ویژگی‌های مربوط به موتورهای هیستریزیس تخت و سنکرون رلوکتانسی در موتور حاصل باقی بماند. همچنین در این پایان نامه مدل سازی مربوط به این موتور به شیوه تحلیلی و کاملاً متفاوت از شیوه‌های قبلی ارائه شده است. در این روش با استفاده از قانون القای فارادی، پیوستگی شار و قانون مداری آمپر و روابط ریاضی مربوط این موتور برای محاسبه ولتاژ فاصله هوایی و همچنین جریان تحریک موتور ارائه شده است. برای پیاده سازی روش تحلیلی، یک الگوریتم تکراری جدید و متفاوت ارائه شده است. در این الگوریتم از جریان فاز بعنوان ورودی برای یافتن دامنه چگالی شار استفاده می‌شود و با وارد شدن به یک حلقه تکرار، مقدار دامنه چگالی شار حلقه هیستریزیس متناسب با جریان اعمال شده به موتور محاسبه می‌شود. در ادامه، ساختار موتور تلفیقی معرفی و روند طراحی مربوط به این موتور ارائه شده است. در قسمت پایانی به منظور ارزیابی عملکرد موتور و همچنین صحت پارامترهای بدست آمده از روش تحلیلی، یک نمونه موتور در مقیاس آزمایشگاهی با توجه به پارامترهای بدست آمده از طراحی، ساخته شده است و با انجام آزمایش‌های عملی بر روی موتور مذکور نتایج حاصل از روش عملی و تحلیلی در حالت دائمی با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

کلمات کلیدی: موتور هیستریزیس- مولفه گشتاور هیستریزیس و رلوکتانس- مدل سازی موتور.

مقالات و طرح‌های پژوهشی استخراج شده و مرتبط با این پایان‌نامه

1- Hamidreza Mizani, Ahmad Darabi, Siamak omrani, "A New Hybrid Hystersis Reluctance Disc Type Motor; design, Prototyping, and Analysis". 2018 International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive.

2- Siamak omrani, Ahmad Darabi, Hamidreza Mizani, "New Two Separate Rotor Axial Flux Permanent Magnet Motor; Design, Analysis and Performance Comparison". 2018 International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive.

۳- ثبت اختراع با عنوان " موتور سنکرون هیستریزیس-رلوکتانس نوع تخت " به شماره ثبت ۹۵۲۱۶ دارای تائیدیه علمی از سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران.

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه	۲
۱-۱ - مقدمه	۲
۲-۱ - سابقه پژوهشی موضوع پایان نامه	۷
فصل ۲: معرفی موتور هیستریزیس، موتور رلوکتانسی و موتور ترکیبی هیستریزیس-رلوکتانسی	۱۱
۱-۲ - مقدمه	۱۲
۱-۲-۱ - ساختارهای موتور هیستریزیس	۱۴
۳-۲ - مروری بر مراجع مهم مربوط به تحلیل ماشین هیستریزیس	۳۰
۴-۲ - معرفی موتورهای رلوکتانسی	۳۵
۱-۴-۲ - موتور سنکرون رلوکتانسی	۳۶
۲-۴-۲ - موتورهای پله‌ای رلوکتانسی متغیر	۳۷
۳-۴-۲ - موتورهای سوئیچ رلوکتانسی	۳۸
۵-۲ - معرفی موتور سنکرون هیستریزیس-رلوکتانسی تخت دو روتوره	۳۹
فصل ۳: تئوری عملکرد موتور هیستریزیس و موتور رلوکتانسی	۴۱
۱-۳ - مقدمه	۴۲
۲-۳ - پدیده هیستریزیس	۴۲
۴-۳-۳: موتور پسماند آهنربای دائم	۴۶
۵-۳-۳: موتور پسماند تخت دوروتوره بدون شیار	۴۷
۴-۳: تئوری عملکرد موتور هیستریزیس	۴۸
۱-۴-۳: تلفات در ماشین هیستریزیس	۵۶
۲-۴-۳: تحریک اضافی کوتاه مدت	۵۸
۳-۴-۳: مواد مغناطیسی دائم استفاده شده در موتورهای هیستریزیس	۵۹
۴-۴-۳: مدل تحلیلی موتور هیستریزیس تخت	۶۰
۵-۴-۳: روش تحلیلی برای استخراج مدل موتور هیستریزیس نوع تخت	۶۱

۶۲	۳-۴-۶ مدار معادل و محاسبه ولتاژ القایی
۷۹	۳-۴-۴ تئوری عملکرد موتور رلوکتانس
۸۱	۳-۴-۱ فرآیند راه‌اندازی موتور رلوکتانسی سه‌فاز
۸۲	۳-۱-۲ مدل‌سازی موتور رلوکتانسی
۸۵	فصل ۴: ارائه ساختار و مدل‌سازی تحلیلی موتور سنکرون هیستریزس-رلوکتانس تخت
۸۶	۴-۱ مقدمه
۸۶	۴-۲ ارائه ساختار پیشنهادی
۸۷	۴-۲-۱ ساختار موتور H-R نوع تخت پیشنهادی
۸۸	۴-۳- چند نکته درباره موتورهای سنکرون ترکیبی
۸۹	۴-۴ مدل‌سازی تحلیلی موتور هیستریزس-رلوکتانس نوع تخت
۹۳	فصل ۵: طراحی موتور هیستریزس-رلوکتانس نوع تخت
۹۴	۵-۱ مقدمه
۹۴	۵-۲ طراحی موتور HRM
۱۰۳	فصل ۶: نتایج آزمایشات عملی
۱۰۴	۶-۱ مقدمه
۱۰۴	۶-۲ مشخصات موتور ساخته شده
۱۰۶	۶-۳- نتایج حاصل از مدل‌سازی و آزمایش‌های عملی
۱۰۶	۶-۳-۱- مقایسه عملکرد موتور هیستریزس-رلوکتانس با موتورهای هیستریزس تک روتوره و دو روتوره تخت
۱۱۲	۷-۳-۲- مقایسه عملکرد موتورهای هیستریزس-رلوکتانس با دیسک‌های رلوکتانسی مختلف
۱۱۷	فصل ۷: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۱۸	۷-۱- نتیجه‌گیری
۱۱۸	۷-۲- پیشنهادات

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: نمایی از یک موتور استوانه‌ای شار محیطی ۱۶
- شکل ۲-۲: موتور هیستریز استوانه‌ای شار شعاعی ۱۶
- شکل ۳-۲: موتور هیستریز استوانه‌ای شار معکوس ۱۷
- شکل ۴-۲: طرح پیشنهادی برای ایجاد یک موتور هیستریز-رلوکتانس ۱۸
- شکل ۵-۲: مدار معادل الکتریکی موتور هیستریز-رلوکتانس ۲۰
- شکل ۶-۲: دیاگرام برداری موتور هیستریز-رلوکتانس ۲۱
- شکل ۷-۲: استاتور و روتور یک موتور هیستریز تخت ۲۲
- شکل ۸-۲: موتور هیستریز نوع تخت به همراه نحوه تشکیل قطب‌های آن ۲۳
- شکل ۹-۲: نمایی از ساختار موتور هیستریز تخت دوروتوره بدون هسته ۲۴
- شکل ۱۰-۲: مسیر عبور شار در موتور هیستریز تخت دوروتوره بدون هسته ۲۴
- شکل ۱۱-۲: ساختار موتور هیستریز تخت چند لایه بدون شیار ۲۷
- شکل ۱۲-۲: مسیر شار در موتور هیستریز تخت دوروتوره ۲۸
- شکل ۱۳-۲: روتور موتور سنکرون رلوکتانسی ۳۶
- شکل ۱۴-۲: موتور پله‌ای رلوکتانس متغیر ۳۸
- شکل ۱۵-۲: موتور سوئیچ رلوکتانس $۸/۶$ ۳۸
- شکل ۱-۳: تغییرات چگالی شار بر حسب شدت میدان مغناطیسی ۴۳
- شکل ۲-۳: هسته مغناطیسی و سیم‌پیچ حامل جریان ۴۴
- شکل ۲-۳: موتور ترکیبی پسماند و آهنربای دائم ۴۷
- شکل شماره ۳-۳: مسیر بسته شدن شار در موتور تخت شیاردار بصورت محیطی ۴۷
- شکل ۴-۳: حلقه هیستریز اصلی برای چند نقطه مختلف از روتور ماشین هیستریز تخت ۴۹
- شکل ۵-۳: خطوط شار در استاتور و روتور یک ماشین هیستریز استوانه‌ای ۵۱

- شکل ۳-۶: نمودار تغییرات گشتاور و توان هیستریزیس از لحظه راه‌اندازی تا رسیدن به سنکرونیزم ۵۴
- شکل ۳-۷: مشخصه گشتاور-سرعت ماشین هیستریزیس و بار ۵۴
- شکل ۳-۸: حلقه هیستریزیس اصلی به همراه حلقه‌های جزئی ۵۷
- شکل ۳-۹: منحنی مغناطیس‌شوندگی ماده هیستریزیس با حلقه‌های جزئی ۶۰
- شکل ۳-۱۰: نمای دو بعدی از موتور هیستریزیس تخت شار محیطی ۶۲
- شکل ۳-۱۱: مسیر اعمال قانون مداری آمپر ۶۴
- شکل ۳-۱۲: برش دیفرانسیلی از دیسک هیستریزیس ۶۶
- شکل ۳-۱۳: مدار معادل بر فاز ماشین هیستریزیس استوانه‌ای شار محیطی ۶۹
- شکل ۳-۱۴: نمایی از یک شیار مستطیلی ۷۵
- شکل ۳-۱۵: نمایی از سیم‌پیچ انتهایی موتور تخت دوطرفه ۷۵
- شکل ۳-۱۶: مدار معادل موتور هیستریزیس تخت شار محیطی در حالت دائمی ۷۸
- شکل ۳-۱۷: مدار معادل کامل موتور هیستریزیس تخت شار محیطی در حالت دائمی ۷۸
- شکل ۳-۱۸: ساختمان موتور رلوکتانسی با سیم‌پیچی سه فاز ۸۰
- شکل ۳-۱۹: مشخصه گشتاور سرعت موتور رلوکتانسی ۸۱
- شکل ۳-۲۰: نمودار فازوری موتور رلوکتانسی ۸۳
- شکل ۴-۱: ساختار موتور HR نوع تخت پیشنهادی ۸۷
- شکل ۵-۱: مدار معادل موتور هیستریزیس و نمودار فازوری موتور رلوکتانسی ۸۹
- شکل ۵-۲: مدار معادل بر فاز موتور هیستریزیس-رلوکتانس تخت دوروتوره ۹۰
- شکل ۵-۳: فلوجارت الگوریتم پیشنهادی برای مدلسازی موتور هیستریزیس-رلوکتانس در حالت دائمی به روش تحلیلی ۹۲
- شکل ۵-۱: منحنی‌های مشخصه تقریب بیضوی ماده هیستریزیس مورد استفاده در موتور پیشنهادی بر حسب شدت میدان مغناطیسی. الف) دامنه چگالی شار مغناطیسی. ب) سطح حلقه. ج) نفوذپذیری مغناطیسی. د) زاویه تاخیر هیستریزیس. ۹۷
- شکل ۵-۲: شکل موج جریان استاتور ماشین قطب برجسته در حالت تحریک صفر ($E_f = 0$) ۹۹
- شکل ۵-۳: شبیه‌سازی قسمت رلوکتانسی در محیط المان محدود در شرایط حداکثر بار ۹۹
- شکل ۶-۱: منحنی‌های مشخصه تقریب بیضوی ماده هیستریزیس مورد استفاده در موتور پیشنهادی بر حسب شدت میدان مغناطیسی. الف) دامنه چگالی شار مغناطیسی. ب) سطح حلقه. ج) نفوذپذیری مغناطیسی. د) زاویه تاخیر هیستریزیس. ۱۰۵

- شکل ۲-۶: اجزاء موتور ساخته شده به همراه مونتاژ نهایی موتور ۱۰۵
- شکل ۲-۶: گشتاور خروجی موتور نسبت به تغییرات جریان ورودی در سرعت سنکرون (آزمایش عملی) ۱۰۷
- شکل ۳-۶: گشتاور خروجی موتور نسبت به تغییرات جریان ورودی در سرعت سنکرون (مدلسازی) ۱۰۷
- شکل ۴-۶: بازده ناخالص خروجی موتور نسبت به تغییرات جریان ورودی در سرعت سنکرون (آزمایش عملی) ۱۰۸
- شکل ۵-۶: بازده ناخالص خروجی موتور نسبت به تغییرات جریان ورودی در سرعت سنکرون (مدلسازی) ۱۰۸
- شکل ۷-۶: ضریب قدرت موتور نسبت به تغییرات جریان ورودی در سرعت سنکرون (آزمایش عملی) ۱۰۹
- شکل ۸-۶: ضریب قدرت موتور نسبت به تغییرات جریان ورودی در سرعت سنکرون (مدلسازی) ۱۰۹
- شکل ۹-۶: جریان ورودی موتور نسبت به تغییرات ولتاژ خط در سرعت سنکرون ۱۱۰
- شکل ۱۰-۶: زمان رسیدن به سرعت سنکرون موتور نسبت به تغییرات ولتاژ خط ۱۱۰
- شکل ۱۱-۶: مولفه‌ی گشتاور ناشی از مولفه‌ی هیستریزیس و رلوکتانسی تولید شده در موتور (مدل سازی) ۱۱۲
- شکل ۱۲-۶: گشتاور موتور نسبت به تغییرات جریان فاز ورودی موتور در سرعت سنکرون ۱۱۲
- شکل ۱۳-۶: بازده موتور نسبت به تغییرات جریان فاز ورودی در سرعت سنکرون ۱۱۳
- شکل ۱۴-۶: ضریب قدرت موتور نسبت به تغییرات جریان فاز ورودی در سرعت سنکرون ۱۱۳
- شکل ۱۵-۷: جریان ورودی موتور نسبت به تغییرات ولتاژ خط ورودی در سرعت سنکرون ۱۱۴
- شکل ۱۶-۷: زمان رسیدن به سرعت سنکرون موتور نسبت به تغییرات ولتاژ خط ۱۱۴

فصل ۱: مقدمه

۱-۱ - مقدمه

امروزه موتورهای سنکرون رلوکتانسی یکی از انواع موتورهای الکتریکی پربازده با کاربرد صنعتی هستند. به دلیل عدم وجود تلفات روتور، بازده این دسته از موتورها نسبت به موتورهای القایی بیشتر است. اگرچه چنین ماشین‌هایی نسبت به ماشین‌هایی با آهنربای دائم دارای راندمان کمتری هستند، ولی به دلیل داشتن ساختمان ساده و محکم روتور و همچنین قیمت پایین‌تر نسبت به موتورهای با آهنربای دائم، کاربردهای گسترده‌ای بویژه در محرکه‌هایی با سرعت بالا یافته‌اند. روتور موتورهای سنکرون رلوکتانسی از جنس ماده فرومغناطیس با قطب‌های برجسته می‌باشد که فاقد سیم‌پیچی تحریک است و تنها تحریک

این دسته از موتورها، تغذیه اعمال شده به سیم‌پیچی سه فاز استاتور آنها می‌باشد. با توجه به معادله گشتاوری که برای موتور سنکرون می‌توان نوشت قسمت گشتاور الکترومغناطیسی در معادله وجود ندارد و تنها گشتاور قسمت معادله ناشی از ایجاد گشتاور برای همراستایی در مسیری است که کمترین رلوکتانس را با میدان دوار استاتور ایجاد نماید که به گشتاور رلوکتانسی معروف است. این نوع از موتورهای دارای ساختمان ساده در روتور می‌باشند و زمانی که بواسطه درایو راه اندازی می‌شوند نیازی به وجود قفس راه انداز ندارند. با توجه به اینکه این نوع موتور فاقد هرگونه مغناطیس دائم بروی روتور می‌باشد لذا در مقایسه با موتور PMSM دارای استحکام مکانیکی بالاتری بوده و در نتیجه برای سرعت‌های بالا کارایی بهتری را داراست. همچنین این دسته از موتورها در مقایسه با موتورهای سوئیچ رلوکتانسی دارای ریبیل گشتاور پایین‌تر و نویز کمتری هستند. ویژگی عدم نیاز به سیم‌پیچی میدان و جاروبک سبب شده است تا موتورهای سنکرون رلوکتانسی چگالی توان بالایی داشته باشند.

از جمله دیگر موتورهای سنکرون می‌توان به موتورهای هیستریزیس اشاره نمود. این دسته از موتورها در توان‌های بسیار پایین ساخته می‌شوند و معمولاً در سرعت‌های بالا کاربرد دارند. چنین موتورهایی دارای ساختمان ساده در استاتور هستند و روتور آنها از جنس ماده با خاصیت هیستریزیس می‌باشد. گشتاور تقریباً ثابت از لحظه راه‌اندازی تا رسیدن به سرعت سنکرون، جریان راه‌اندازی پایین و عملکرد با نویز کم از جمله مزیت‌های این موتورها بشمار می‌رود ولی راندمان پایین و جریان مغناطیس‌کنندگی بالا از جمله معایب این موتور می‌باشد. با توجه به اینکه موتورهای هیستریزیس نقطه سنکرون مشخصی ندارند، لذا در این دسته از موتورها شاهد نوسان‌هایی با فرکانس پایین (یک الی دو هرتز) حول سرعت سنکرون هستیم و به پدیده هانتینگ یا نوسانی شدن سرعت حول نقطه سنکرون معروف است.

تا کنون در بعضی از منابع در مورد ساختار و نحوه عملکرد موتورهای سنکرون ترکیبی مطالبی عنوان شده است ولی آنچه که مسلم به نظر می‌رسد این است که هیچ کدام از موتورهای سنکرون ترکیبی معرفی

شده نتوانسته‌اند جایگاه مناسبی را در صنعت برای خود پیدا کنند و عملکرد مطلوب و چشم‌گیری را ارائه نمایند. به عنوان مثال از ساختارهای ترکیبی موتور هیستریز با عنوان موتور هیستریز-مغناطیس دائم، هیستریز القایی و هیستریز-رلوکتانس نام برده شده است. در ساختار موتور ترکیبی هیستریز-رلوکتانس با ایجاد برجستگی بر روی روتور، خاصیت رلوکتانسی را به موتور اضافه می‌نمایند. ساختار موتور ترکیبی هیستریز-رلوکتانس در چند مقاله بصورت اجمالی مورد بررسی قرار گرفته است اما در تمام موارد ساختار ترکیبی در قالب استوانه‌ای معرفی شده است و ساختار تخت این نوع موتور تا کنون مورد بررسی قرار نگرفته است. باید توجه داشت که وجود قسمت رلوکتانسی در رژیم کاری آسنکرون باعث ایجاد گشتاور ضربانی در موتور می‌شود و در تولید گشتاور هیچ نقشی ایفا نمی‌کند ولی در سرعت سنکرون باعث بهبود مولفه گشتاور می‌شود. از این رو وجود قسمت رلوکتانسی در روتور مربوط به شرایط عملکرد ماشین در سرعت سنکرون می‌باشد. از مهم‌ترین مزیت‌های وجود برجستگی در روتور ماشین هیستریز شاید بتوان به دو مورد تولید مولفه گشتاور اضافی در سرعت سنکرون که از آن تحت عنوان گشتاور رلوکتانسی نیز یاد می‌شود و همچنین کاهش اثر نوسانی شدن سرعت حول نقطه سنکرون یا پدیده هانتینگ اشاره کرد. در مورد ماشین‌های هیستریز-رلوکتانس این نکته را باید در نظر داشت که اگر برجستگی روی رینگ هیستریز به درستی انجام نگیرد (یا به عبارت دیگر با ایجاد برجستگی خاصیت رینگ هیستریز کم شود) عملکرد مطلوب ماشین که همان نویز صوتی کم و بدون لرزش می‌باشد برآورده نمی‌شود.

ترکیب ساختار ماشین هیستریز معمولی با ماشین رلوکتانسی می‌تواند یک ایده جالب به منظور بهبود شرایط عملکرد ماشین، در حالت دائم باشد. چنین ماشینی را ماشین هیستریز-رلوکتانس می‌نامیم. تا کنون تنی چند از محققین تلاش نموده‌اند، تا با ترکیب موتور هیستریز و ماشین رلوکتانسی بتوانند به ویژگی‌های منحصر بفردی را به ماشین هیستریز اضافه نمایند. این دسته از موتورها با ساختارهای

مختلف قابل طراحی و ساخت هستند اما نوع استوانه‌ای آن‌ها بصورت اندک و بسیار پراکنده مورد بررسی و توجه قرار گرفته‌اند. بویژه اینکه در رابطه با موتورهای ترکیبی هیستریزس-رلوکتانس شارمحوری هیچ گونه گزارش مکتوب ارائه و یا کار آزمایشگاهی تا کنون انجام نشده است. از نظر نویسنده این پروژه، تمرکز اصلی مطالعات و بررسی‌های انجام شده بر روی موتورهای هیستریزس ترکیبی استوانه‌ای بیشتر معطوف به حفظ ساختار و ویژگی‌های موتور هیستریزس و بهبود شرایط عملکرد موتور هیستریزس بوده است و به هیچ عنوان این بررسی‌ها و مطالعات اندک منجر به ارائه یک ساختار ترکیبی مناسب برای موتور هیستریزس نشده است و صرفاً تنها در حد یک پیشنهاد ساختاری مطرح شده‌اند.

در اینجا این سوال مطرح می‌شود که هدف از ترکیب دو ماشین هیستریزس و رلوکتانسی با یکدیگر چیست و اینکه با این کار می‌خواهیم به کدامیک از دو هدف ۱- بهبود مشخصه‌های عملکردی ماشین هیستریزس و یا ۲- بهبود مشخصه‌های عملکردی ماشین رلوکتانسی دست یابیم؟ بطور مثال آیا می‌خواهیم یک موتور هیستریزس سرعت بالا و با گشتاور حالت دائم بیشتری داشته باشیم و یا اینکه یک موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه‌انداز با گشتاور حالت دائم بالاتر داشته باشیم؟ با توجه به دلایل زیر می‌توان بیان کرد که هدف این پروژه از ترکیب موتور هیستریزس و رلوکتانسی، دستیابی به مشخصه‌های عملکردی بهتر برای ماشین هیستریزس می‌باشد.

۱- نیاز صنعت به موتورهای هیستریزس توان بالا: موتورهای هیستریزس، برای کاربردهایی با سرعت بالا و نویز بسیار کم مناسب هستند. وجود پدیده هانتینگ و همچنین راندمان بسیار پایین این دسته از موتورها باعث محدودیت در بکارگیری آن‌ها در برخی از صنایع شده است. با انتخاب ساختار مناسب و همچنین طراحی صحیح ضمن حفظ نمودن مزیت‌های ماشین هیستریزس (که آن را مناسب برای کاربرد در سرعت‌های بالا کرده است)، می‌توان محدودیت‌های موتور هیستریزس را تا حد امکان بر طرف نمود.

۲- ناتوانی دیسک هیستریزیس در سنکرون سازی موتور رلوکتانسی در راه اندازی تحت بار: موتورهای سنکرون رلوکتانسی عموماً بصورت القایی راه اندازی می شوند و در سرعت های بالا با سرعت سنکرون به گردش خود ادامه می دهند. این دسته از موتورها تحت بار راه اندازی می شوند لذا نیاز به گشتاور راه اندازی بالایی دارند. از این رو ابعاد دیسک هیستریزیس و حجم ماده مورد استفاده برای راه اندازی موتور تحت بار، بسیار بزرگ خواهد شد.

با توجه به مطالب گفته شده در رابطه با موتورهای ترکیبی، بویژه موتور ترکیبی هیستریزیس-رلوکتانس کار عمده و چشمگیری انجام نشده است. شاید بتوان دلایل اصلی این عدم توجه کافی به این مقوله را بصورت زیر بیان نمود:

۱- ترکیب موتور هیستریزیس و موتور رلوکتانسی استوانه‌ای نتایج موفق و قابل توجهی را از خود ارائه نداده است.

۲- با توجه به جدید بودن ساختار ماشین های دیگر از جمله ماشین های شار محوری، هنوز محققین فرصت بررسی و توجه به ساختارهای تلفیقی را پیدا نکرده اند.

۳- ماشین های هیستریزیس عمدتاً برای توان های بسیار پایین و سرعت های بسیار بالا ساخته می شوند و در صنایع خاصی همچون هسته ای، هوا و فضا و ... بکار گرفته می شوند؛ درحالی که ماشین های رلوکتانسی به دلیل وجود برجستگی در روتور، دارای ریپل در گشتاور هستند که این موضوع، عملکرد نرم و بدون نویز را برآورده نمی کند. از همین رو با توجه به ویژگی های و کاربردهای متفاوت آن ها، تلفیق دو موتور دور از ذهن به نظر می رسد.

ماشین هیستریزیس شار محوری را می توان به صورت یک طرفه، دوطرفه، یک طبقه، چندلایه، چندفاز، بدون شیار، با شیار، با هسته آهنی و بدون هسته آهنی ساخت. از نظر نویسنده این پروژه، با انتخاب ساختاری

مناسب و اجرای طراحی صحیح و قابل انعطاف می‌توان به موتور ترکیبی هیستریزیس-رلوکتانس با عملکردی مناسب دست یافت که اکثر ویژگی‌های موتورهای هیستریزیس و رلوکتانسی در آن حفظ شود. با توجه به مزیت‌های موتور رلوکتانسی و اضافه شدن قسمت رلوکتانسی به موتور هیستریزیس، انتظار می‌رود که مشخصه عملکردی موتور بهبود یابد ولی در کنار این تغییر ساختار معایبی از قبیل گشتاور پارازیتیک تا رسیدن به سرعت سنکرون و همچنین عدم تقارن مغناطیسی را می‌توان برای موتور ترکیبی مورد نظر متصور شد. انتخاب نوع ساختار، نحوه طراحی و نسبت ترکیب دو موتور با یکدیگر، لرزش ماشین و نویزهای صوتی از جمله عواملی هستند که در بهره و عملکرد ماشین بطور مستقیم تاثیرگذار هستند. با توجه به پژوهش‌های قبلی انجام گرفته در دانشگاه صنعتی شاهرود بر روی موتورهای شار محوری نوع تخت، ساختار مورد نظر در این پروژه، موتور سنکرون شار محوری دو دیسک ترکیبی هیستریزیس و رلوکتانس بدون شیار می‌باشد. ترکیب روابط تحلیلی موتور هیستریزیس و موتور رلوکتانسی با یکدیگر و همچنین مدل‌سازی تحلیلی این موتور ترکیبی و بدست آوردن مدار معادل آن از جمله کارهای انجام شده در این پروژه می‌باشد.

۱-۲ - سابقه پژوهشی موضوع پایان‌نامه

برای نخستین بار در سال ۱۹۰۸ آقای Steinmetz پدیده هیستریزیس را معرفی کرد و ادعا نمود که این پدیده می‌تواند در یک موتور گشتاور الکترومغناطیسی تولید کند. در دهه‌های ۳۰ و ۴۰ میلادی موتور هیستریزیس مورد بررسی مهندسان شرکت جنرال‌الکتریک قرار گرفت و یک سری نتایج عملی درباره استفاده از مواد مغناطیس دائم برای موتور هیستریزیس ارائه شد. در سال ۱۹۳۴ آقای Teare در دانشگاه ییل^۱ تحلیل و بررسی درباره موتور هیستریزیس را موضوع رساله دکتری خود قرار داد [1].

1- Yale University

اولین موتور از نوع هیستریزس مربوط به سال ۱۹۱۷ می باشد که توسط آقای Steinmetz ارائه شد. برای این موتور مدل های مداری بسیاری ارائه شده که یکی از صحیح ترین آن ها در سال ۱۹۶۵ توسط آقایان Miayiri و Kataoka ارائه شده است. در این موتور پدیده ای بنام "Hunting" در بعضی از مواقع مشاهده می شود که همین موضوع باعث پیچیده تر شدن مدل ارائه شده برای موتور می شود [2].

در سال ۱۹۸۴ رحمان و همکارانش اثر اضافه کردن آهنربای دائم ساماریوم-کبالت را به موتور هیستریزس استوانه ای بررسی کردند [3]. در طی این بررسی مشخص شد که اضافه کردن آهنربای دائم ساماریوم-کبالت بجای آلنیکو۵، موجب افزایش ولتاژ تحریک فاصله هوایی می شود و در نتیجه مشخصه عملکردی ماشین بهبود می یابد. با توجه به اینکه رینگ هیستریزس معمولا بصورت فویل ساخته می شود، لذا پیاده سازی این ساختار با مشکلات فراوانی همراه می شود. همچنین چگالی توان (نسبت توان به وزن) در این ماشین پایین می باشد. مشکل اصلی در ساختار ارائه شده، انتخاب نادرست مسیر بسته شدن شار آهنربا با توجه به موقعیت آهنربا و همچنین انتخاب نگهدارنده های آهنربا می باشد که از جنس ماده غیر مغناطیسی با نفوذپذیری پایین مغناطیسی است که موجب تضعیف شار آهنربا می شوند.

در سال ۱۹۸۵ رحمان و اوشیبا^۱ عملکرد حالت دائمی موتور هیستریزس-رلوکتانس استوانه ای را مورد بررسی و مطالعه قرار دادند [2]. در این ساختار با ایجاد شیار در سطح داخلی رینگ مغناطیسی موتور، خاصیت رلوکتانسی را به روتور موتور هیستریزس اضافه کردند. آنها با استفاده از تئوری دو محوری روابط حاکم بر موتور هیستریزس-رلوکتانس را در دستگاه مرجع قاب گردان بدست آورده و پس از مقایسه نتایج با آزمایشات عملی نشان دادند که موتور ترکیبی آنها نسبت به موتور هیستریزس معمولی در ضریب توان، بازده و گشتاور ماکزیمم در حالت سنکرون دارای عملکرد بهتری می باشد. به نظر نویسندگان این پایان نامه

2- Osheiba

مشکل اصلی در ساختار این ماشین، از بین بردن خاصیت ماده هیستریزیس با کم کردن از حجم ماده هیستریزیس به منظور ایجاد برجستگی بر روی روتور ماشین هیستریزیس معمولی می‌باشد که نتیجه این عمل نزدیک شدن ماشین به ساختار رلوکتانسی می‌باشد.

همچنین رحمان و اوشیبا در سال ۱۹۹۰ رفتار حالت گذرا و دائمی موتور معرفی شده در [2] را به همراه منبع تغذیه تکفاز و متعادل کننده‌های فاز مورد بررسی و مطالعه قرار دادند [3]. هدف آنها از انجام این کار انتخاب مناسب خازن‌های متعادل کننده جهت کاهش زمان رسیدن به سنکرونیزم و همچنین نشان دادن این موضوع که مشخصه عملکردی موتور هیستریزیس-رلوکتانس تغذیه شده با منبع تکفاز و متعادل کننده‌های فاز نسبت به حالتی که با منبع سه فاز متعادل تغذیه می‌شود بهتر است. لازم به ذکر است که اکثر مراجع موتور هیستریزیس نوع استوانه‌ای را مورد تحقیق و بررسی‌های خود قرار داده‌اند. برای اصلاح ساختار ماشین هیستریزیس استوانه‌ای و تبدیل آن به یک ماشین هیستریزیس-رلوکتانس انتخاب‌های زیادی وجود ندارد. به همین دلیل به نظر تعریف کننده این موضوع پایان‌نامه ارشد موتورهای تلفیقی هیستریزیس رلوکتانسی استوانه‌ای هر چند ممکن است مزایای محدود عملکردی را در پی داشته باشند ولی معایبی نیز به ماشین می‌افزایند. به عبارت دیگر اصلاح ساختار موتور اولیه و مونتاژ موتور تلفیقی حاصل در ساختار استوانه‌ای دشوار و پرهزینه می‌باشد و در کل موتورهایی با ساختار استوانه‌ای موتورهای ترکیبی مناسبی بشمار نمی‌آیند.

**فصل ۲: معرفی موتور هیستریزیس، موتور رلوکتانسی و
موتور ترکیبی هیستریزیس-رلوکتانس**

۲-۱- مقدمه

موتورهای هیستریزیس^۱ دارای ساختاری ساده شامل یک استاتور و روتوری از جنس ماده با خاصیت هیستریزیس هستند. این دسته از موتورها از دیر باز در کاربردهای توان پایین مورد توجه قرار گرفته‌اند. جریان راه‌اندازی پایین، عملکرد نرم و بدون نویز صوتی، گشتاور تقریباً ثابت از لحظه راه‌اندازی تا رسیدن به سرعت سنکرون از جمله مزیت‌های منحصر بفرد این دسته از موتورها به حساب می‌آیند. از طرف دیگر جریان مغناطیس‌کنندگی بالا، بازده پایین و نوسانات سرعت حالت دائم با فرکانس پایین از جمله معایب این موتورها محسوب می‌شوند. بر خلاف سایر موتورهای سنکرون، نداشتن نقطه سنکرونیزم مشخص عامل اصلی بروز نوسانات سرعت حالت دائم در موتورهای هیستریزیس است.

1- Hysteresis Motors

چنانچه در ساختار روتور این دسته از موتورها برجستگی ایجاد شود (با توجه به ملاحظات ساخت موتور)، علاوه بر مولفه گشتاور ناشی از رینگ هیستریزیس یک مولفه گشتاور (گشتاور رلوکتانسی) در سرعت سنکرون به موتور اضافه می‌شود که نتیجه آن افزایش گشتاور خروجی است. در سرعت‌های زیر سنکرون برجستگی روتور گشتاور ضربانی تولید می‌کند. زمانی که موتور به سرعت سنکرون می‌رسد روتور در یک موقیت مشخص نسبت به میدان دوار استاتور قرار می‌گیرد که این موقیت با برجستگی روتور (محورهای طولی و عرضی در روتور) و گشتاور بار ارتباط دارد. مولفه گشتاور تولید شده توسط موتور در سرعت سنکرون از دو قسمت تشکیل شده است. یک مولفه ناشی از وجود ماده هیستریزیس در روتور است که به گشتاور هیستریزیس موسوم است و دیگری که به گشتاور رلوکتانسی مشهور است، به دلیل وجود برجستگی در روتور و اختلاف رلوکتانس بین محورهای طولی و عرضی روتور بوجود می‌آید و در سرعت سنکرون به گشتاور اصلی اضافه می‌شود. نتیجتاً گشتاور تولید شده در سرعت سنکرون ترکیب گشتاور هیستریزیس و گشتاور رلوکتانسی خواهد شد که از گشتاور موتور هیستریزیس بدون برجستگی بیشتر خواهد بود. همین مساله باعث شد تا ایده موتور ترکیبی هیستریزیس- رلوکتانس مطرح شود. تا کنون در هیچ منبعی به موتور ترکیبی هیستریزیس- رلوکتانس تخت اشاره نشده است. از اینرو ایده طراحی و ساخت موتور هیستریزیس- رلوکتانس تخت با حفظ ویژگی‌های ساختاری هر دو موتور مطرح شد.

۲-۲- معرفی موتور هیستریزیس

موتور هیستریزیس (پسماند) یک موتور سنکرون که بر اساس پدیده هیستریزیس عمل می‌کند. معمولاً در موتورهای دیگر از پدیده هیستریزیس بعنوان تلفات یاد می‌شود اما در موتورهای هیستریزیس این پدیده باعث ایجاد گشتاور الکرومغناطیسی می‌گردد. پدیده هیستریزیس از تاخیر فاز بین تاثیر میدان مغناطیسی دوار بر ماده هیستریزیس و چگالی شار ناشی از آن می‌باشد. در حقیقت وجود همین تاخیر فاز بین میدان اعمال شده و چگالی شار ناشی از این تاثیر میدان، گشتاور هیستریزیس را که با سطح حلقه هیستریزیس

و حجم ماده روتور متناسب است بوجود می‌آورد. پدیده هیستریزیس اولین بار در سال ۱۹۰۷ توسط آقای اشتیمنتز مطرح و در سال ۱۹۱۷ اولین نمونه موتور هیستریزیس توسط وی مطرح و ارائه شد. روتور این موتورها از یک ماده هیستریزیس با خاصیت مغناطیسی بالا (آلیاژهای کبالت-استیل) تشکیل شده بود.

این دسته از موتورها دارای ویژگی‌های منحصراً بفردی همچون مشخصه گشتاور سرعت ثابت، ساختار ساده و محکم، عملکرد نرم و بدون نویز و جریان راه‌اندازی پایین هستند و در توان‌های کمتر از یک اسب بخار کاربرد پیدا کرده‌اند. این مشخصه‌های عملکردی باعث توسعه کاربردی موتوره‌های هیستریزیس در بسیاری از سیستم‌های نیازمند سرعت بالا همچون سانتریفیوژها و ژيروسکوپها شده است. راندمان و ضریب توان نسبتاً پایین از معایب ذاتی این دسته از موتورها است که برای بعضی از کاربردهای خاص بعنوان یک مشکل پیش‌رو مطرح است. یکی دیگر از مشکلات عمده این موتورها نوسانات سرعت حول نقطه سنکرون است که مدت زمان زیادی لازم است تا این نوسانات فرکانس پایین میرا شوند.

۲-۲-۱- ساختارهای موتور هیستریزیس

ساختار یک موتور با توجه به نوع نیاز و مورد کاربرد آن تعیین می‌شود و موتور هیستریزیس نیز از این قاعده مستثنی نمی‌باشد. هر موتور با هر ساختاری نیازمند ملاحظات خاص و منحصر بفرد خود در زمینه طراحی و ساخت می‌باشد که آن را برای کاربرد خاص مناسب می‌کند. موتوره‌های هیستریزیس از نظر ساختار به دو دسته‌ی موتوره‌های استوانه‌ای و موتوره‌های تخت تقسیم می‌شوند.

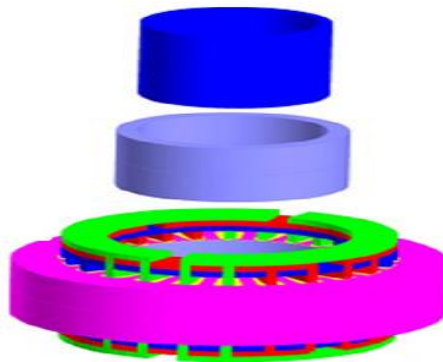
۲-۲-۱-۱ موتوره‌های هیستریزیس استوانه‌ای

الف- موتوره‌های هیستریزیس استوانه‌ای [5]: این موتورها دارای یک روتور استوانه‌ای می‌باشند که روتور آن‌ها می‌تواند بصورت کامل از جنس ماده پسماند و یا هسته آن از ماده غیر پسماند تشکیل شود. این نوع موتورها دارای یک استاتور استوانه‌ای سه فاز یا تک‌فاز به سبک موتوره‌های سنکرون یا القایی می‌باشند.

باشند و تنها اختلاف آنها، روتوری است که بروی آن یک رینگ مغناطیسی از مواد هیستریزیس همچون آلیاژ ۳۶ درصد کبالت و فولاد یا آلیاژ آلومینیوم-نیکل-کبالت قرار دارد. بر عمین اساس این نوع ساختار به سه دسته موتور هیستریزیس استوانه‌ای شار محیطی، موتور هیستریزیس استوانه‌ای شار محوری و موتور هیستریزیس استوانه‌ای معکوس تقسیم می شوند.

الف) موتور استوانه‌ای شار محیطی^۱

این نوع موتور دارای استاتور با ساختاری همچون موتور القایی بوده که دارای یک سیم پیچی تکفاز یا سه فاز با توزیع سینوسی می باشد. روتور از یک رینگ استوانه‌ای با ماده پسماند و هسته آن از یک ماده غیر مغناطیس مثل آلومینیوم ساخته می شود. بنابراین مسیر عبور شار در این ماشین از داخل رینگ می باشد و بصورت محیطی می باشد. در این ماشین اگر روتور بطور کامل از یک ماده پسماند ساخته شده باشد در این صورت گشتاور در زیر سرعت سنکرون بیشتر از سرعت سنکرون خواهد بود. اگر روتور از ماده پسماند و بصورت مورق ساخته شده باشد گشتاور القایی در سرعت زیر سنکرون کمتر از سرعت سنکرون خواهد بود. در شکل زیر نمایی از یک موتور شار محیطی بصورت سه بعدی نشان داده شده است [5].

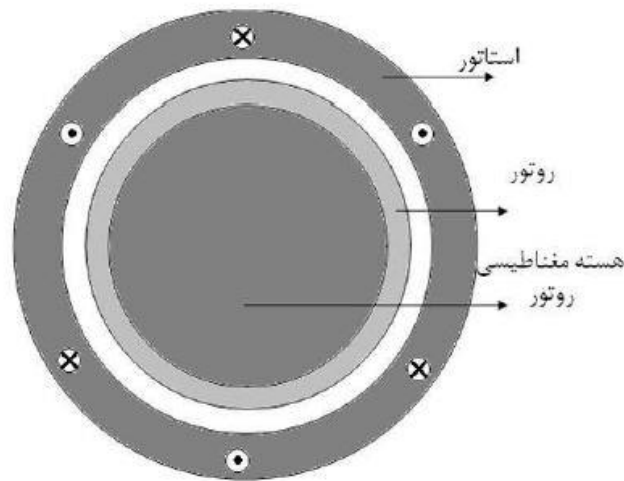


1- Circumferential Flux Cylindrical Hysteresis Motor

شکل ۱-۲: نمایی از یک موتور استوانه‌ای شار محیطی [5]

ب) موتور پسماند استوانه‌ای شار شعاعی^۱

ساختار این موتور مشابه ساختار موتور پسماند شار محیطی می باشد با این تفاوت که جنس ماده پسماند بکار رفته در آن از نوع فرومغناطیس با نفوذپذی مغناطیسی بالا می باشد (فرومغناطیس نرم). به دلیل نازک بودن دیسک هیستریزیس، خطوط میدان مغناطیسی در روتور به ناچار باید بصورت شعاعی از درون ماده پسماند عبور نماید که همین امر باعث نام گذاری این نوع موتور می شود.



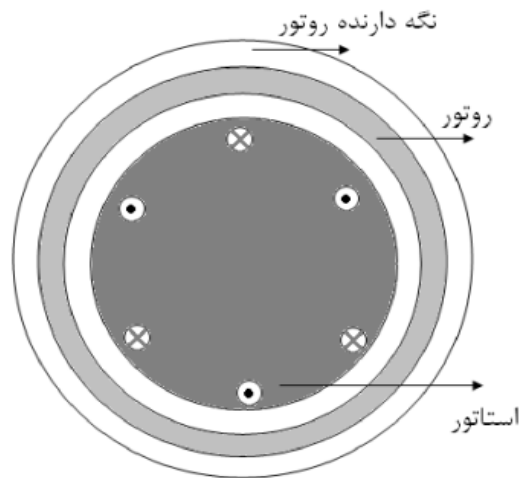
شکل ۲-۲: موتور هیستریزیس استوانه‌ای شار شعاعی [۲۵]

ج) موتور پسماند استوانه‌ای معکوس^۲

در این نوع موتور، روتور بروی قسمت بیرونی موتور قرار دارد. از مزایای این نوع از موتورها این است که می توان موتورهایی با ابعاد کوچک و ممان اینرسی بالا با دو ساختار شار محیطی و شار شعاعی تولید نمود که بطور وسیعی در ژيروسکوپ ها مورد استفاده قرار می گیرند.

1- radial Flux Cylindrical Hysteresis Motor

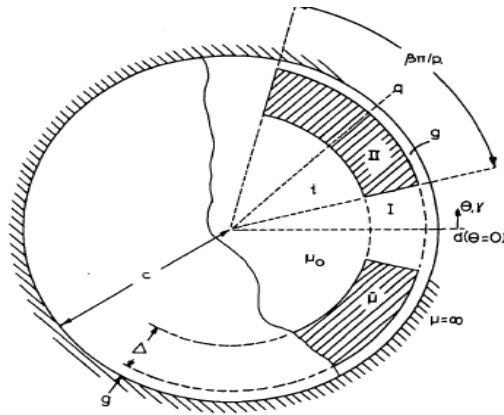
2- Inverse Hysteresis Motor



شکل ۲-۳: موتور هیستریزیس استوانه‌ای شار معکوس [۳۵]

موتور هیستریزیس-رلوکتانس استوانه‌ای

با ایجاد برجستگی‌هایی بروی روتور یک موتور هیستریزیس، می‌توان خاصیت رلوکتانسی را به ماشین مورد نظر اضافه نمود که نتیجه این کار اضافه شدن یک مولفه گشتاور رلوکتانسی به موتور می‌باشد. در نتیجه گشتاور تولید شده توسط موتور در این حالت، به نسبت حالت قبلی که موتور فاقد خاصیت رلوکتانسی بوده است، بیشتر می‌شود. راه‌های مختلفی برای ایجاد برجستگی بروی روتور موتور هیستریزیس وجود دارد [۸]. در شکل زیر یک حلقه مغناطیسی از جنس ماده پسماند به ضخامت Δ ، به $2p$ قسمت مساوی با طول کمان $\beta\pi/p$ برای ایجاد یک روتور با p جفت قطب، تقسیم شده است.



شکل ۲-۴: طرح پیشنهادی برای ایجاد یک موتور هیستریزیس-رلوکتانس [6]

راستای محور مستقیم مینیمم رلوکتانس $\theta = 0$ و راستای محور عرضی در $\pi/2p$ ماکزیمم تاثیر برجستگی را بروی خطوط شار عبوری دارند.

در تحلیل این موتور از اثر انتهایی صرف نظر شده است و پرمابیلیته هسته استاتور بی نهایت در نظر گرفته شده است. سیم پیچی درون استاتور بصورت سینوسی توزیع شده است پرمابیلیته ماده روتور را $\bar{\mu}$ با نشان داده شده است که برابر با $\mu \exp j\delta$ که مقدار δ از روی منحنی B-H ماده مورد نظر تعیین می شود. تنها مولفه اصلی میدان مغناطیسی موجود در فاصله هوایی باعث تولید توان الکترومغناطیسی می شود که با استفاده از قضیه پونتینگ و اعمال آن بر روی سطح داخلی استاتور می توان توان انتقالی مختلط از استاتور به روتور را محاسبه نمود. در نتیجه با استفاده از P و Q بدست آمده می توان پارامترهای مدار معادل را برای این موتور در راستایی محورهای طولی و عرضی بدست آورد. X_{ad} ، r_{ad} ، X_{aq} و r_{aq} پارامترهای مدار معادل هستند که به فرکانس زاویه ورودی (ω) استاتور وابسته هستند. باید توجه شود که در موتور هیستریزیس-رلوکتانس، دو پارامتر جدید r_{aq} و r_{ad} در مقایسه با موتور رلوکتانسی، به مدار معادل آن اضافه شده است. امیدانس معادل دیده شده از دو سر مدار معادل موتور هیستریزیس-رلوکتانس در هر زاویه بار γ برابر است با:

$$\bar{Z}_h = \left\{ (r_{ad} \cos^2 p\gamma + r_{aq} \sin^2 p\gamma) + (X_{ad} - X_{aq}) \sin p\gamma \cos p\gamma \right\} + j \left\{ (X_{ad} \cos^2 p\gamma + X_{aq} \sin^2 p\gamma) + (r_{aq} - r_{ad}) \sin p\gamma \cos p\gamma \right\} \quad (1-2)$$

که در رابطه بالا مولفه‌های r_{ad} و r_{aq} منجر به ایجاد پدیده هیستریزیس در موتور و مولفه‌های X_{ad} و X_{aq} منجر به داشتن اثر رلوکتانسی در موتور می‌شوند. همچنین مقاومت استاتور و راکتانس پراکندگی کلی استاتور را نیز می‌توان اینگونه نوشت:

$$r_d = r_{ad} + r_s \quad (2-2)$$

$$r_q = r_{aq} + r_s \quad (3-2)$$

$$X_d = X_{ad} + X_\sigma \quad (4-2)$$

$$X_q = X_{aq} + X_\sigma \quad (5-2)$$

که در رابطه بالا r_s مقاومت برفاز استاتور و X_σ راکتانس پراکندگی ماشین هیستریزیس می‌باشند. در نتیجه امپدانس

$$\bar{Z} = R_s + jX_\sigma + \bar{Z}_h = \left\{ (r_d \cos^2 p\gamma + r_q \sin^2 p\gamma) + (X_d - X_q) \sin p\gamma \cos p\gamma \right\} \quad \text{کلی برای این}$$

$$+ j \left\{ (X_d \cos^2 p\gamma + X_q \sin^2 p\gamma) + (r_q - r_d) \sin p\gamma \cos p\gamma \right\} \quad \text{ماشین بابر است}$$

با:

$$(6-2)$$

با توجه به مرجع [6] می‌توان پارامترهای مدار معادل موتور هیستریزیس-رلوکتانس استوانه‌ای را استخراج کرد و خواهیم داشت:

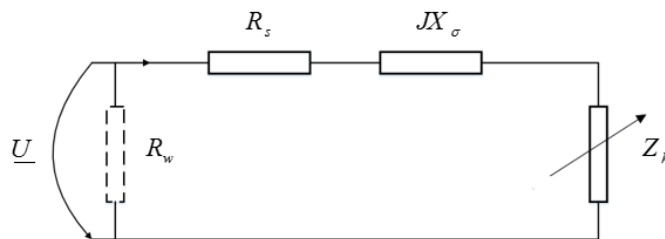
$$r_{ad} = \frac{p(\gamma=0)}{m'I^2} = 2\pi cl \frac{\mu_0 c}{pm'} \left(\frac{J}{I}\right)^2 \omega r' \quad (7-2)$$

$$X_{ad} = \frac{Q(\gamma = 0)}{m'I^2} = 2\pi cl \frac{\mu_0 c}{pm'} \left(\frac{J}{I}\right)^2 \omega l \quad (8-2)$$

$$r_{aq} = \frac{P(\gamma = \pi / 2p)}{m'I^2} = 2\pi cl \frac{\mu_0 c}{pm'} \left(\frac{J}{I}\right)^2 \omega \quad (9-2)$$

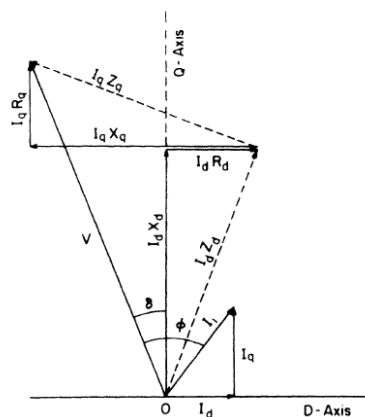
$$X_{aq} = \frac{Q(\gamma = \pi / 2p)}{m'I^2} = 2\pi cl \frac{\mu_0 c}{pm'} \left(\frac{J}{I}\right)^2 \omega l \quad (10-2)$$

با توجه به روابط بالا، مدار معادل یک ماشین هیستریزیس-رلوکتانس بصورت زیر خواهد بود:



شکل ۲-۵: مدار معادل الکتریکی موتور هیستریزیس-رلوکتانس

و دیاگرام برداری این ماشین برابر است با:



شکل ۲-۶: دیاگرام برداری موتور هیستریزیس-رلکتانس [4]

همچنین ضریب توان برای این ماشین برابر است با:

$$\cos \varphi = \left\{ (r_d \cos^2 p\gamma + r_q \sin^2 p\gamma) + (X_d - X_q) \sin p\gamma \cos p\gamma \right\} / Z \quad (۱۱-۲)$$

در معادله گشتاور الکترومغناطیسی که با M و نشان داده شده است، n تعداد فازهای موتور می باشد که بطور مستقیم از رابطه P بدست می آید و داریم [۸]:

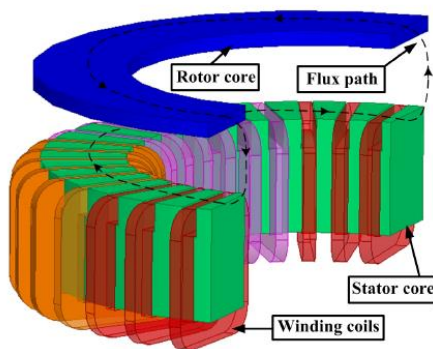
$$M = \frac{np}{\omega} I^2 \left\{ (r_{ad} \cos^2 p\gamma + r_{aq} \sin^2 p\gamma) + (X_{ad} - X_{aq}) \sin p\gamma \cos p\gamma \right\} \quad (۱۲-۲)$$

۲-۱-۲-۲ موتورهای هیستریزیس تخت

اولین ماشین نوع تخت توسط فارادی ساخته و ارائه شد. به علت اینکه از حجم کمتری از مواد در ساخت این نوع از ماشین ها استفاده می شود، در نتیجه این ساختار از ماشین ها، چگالی توان بالاتری نسبت به ماشین های استوانه ای دارند. از دیگر مزایای این ماشین ها قابلیت تنظیم فاصله هوایی می باشد. یکی از معایب این ماشین ها وجود نیروهای متقابل محوری بین استاتور و روتور دیسکی شکل آن می باشد. اگر روی روتور نگهدارنده ای از جنس ماده مغناطیسی وجود داشته باشد موتور از نوع شار محوری خواهد بود و اگر این نگهدارنده نباشد یا از جنس ماده غیر مغناطیسی باشد موتور از نوع شار محیطی خواهد بود. موتورهای تخت، روتوری به شکل یک دیسک دارند و فاصله هوایی بین استاتور و یک سمت روتور قرار می گیرد. معمولا دیسک موتور هیستریزیس که به موتور پسماند نیز معروف می باشد نوعی موتور سنکرون است که بر اساس پدیده پسماند مغناطیسی عمل می نماید. این نوع موتور در بین موتورهای مهم و شناخته شده که خودراه انداز هستند، و به دلیل دارا بودن یک گشتاور راه اندازی زیاد و ثابت و جریان راه

اندازی پایین و همچنین داشتن ویژگی هایی مثل تخت بودن مشخصه گشتاور _ سرعت، عملکرد نرم و آرام، داشتن حداقل سطح پراکندگی نویز و ساختمان ساده، قرار دارد.

روتور این دسته از موتورها یک رینگ از جنس ماده پسماند می باشد. فاصله هوایی در این موتورها بین یک طرف دیسک روتور و استاتور می باشد. این حلقه توسط بلبرینگ های نگه دارنده به محور عمودی هم مرکز با استاتور متصل شده است. با در نظر گرفتن مسیر عبور شار در موتورهای تخت می توان این موتورها را به دو دسته ی، موتورهای شار محیطی و شارمحوری تقسیم نمود. در شکل زیر یک نمونه از موتور تخت یک روتور نشان داده شده است.



شکل ۲-۷: استاتور و روتور یک موتور هیستریزس تخت [5]

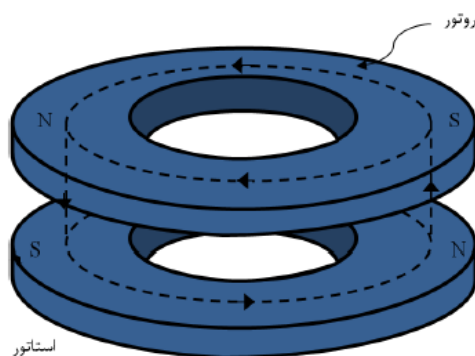
موتور هیستریزس تخت شار محوری می تواند بصورت یک روتور^۱، دورروتور^۲ و یا چند روتور^۳ ساخته شوند. در موتور هیستریزس به دلیل وجود یک رینگ مغناطیسی، موتور دارای گشتاور راه اندازی می باشد و این موتور تا لحظه سنکرون شدن با میدان مغناطیسی گشتاور تقریباً ثابتی را ایجاد می نماید. نحوه شکل گیری قطب ها بروی روتور این موتور بگونه ای است که در سرعت سنکرون مشخصه گشتاور بسیار یکنواخت است و موتور بدون سروصدا و نویز کار می کند. گرچه که موتورهای پسماند دارای راندمان و

1- Single-Sided Axial Flux Hysteresis Motor
2- Doubly-Sided Axial Flux Hysteresis Motor
3- Multi Rotor Axial Flux Hysteresis Motor

ضریب توان پایینی هستند ولی به دلیل داشتن جریان راه اندازی پایین و خودراه انداز بودن در صنایع مختلف از جمله نظامی و کاربردهای خاص همانند ژيروسکوپ ها و سانتریفیوژها مورد استفاده و توجه قرار گرفته اند.

از جمله ماشین‌های نوع تخت پرکاربرد، موتور نوع تخت آهنربای دائم می‌باشد. با توجه به امکان تغییر مسیر شار در موتورهای نوع تخت، این نوع از موتورها در ساختارهای متنوع عرضه می‌شوند [7].

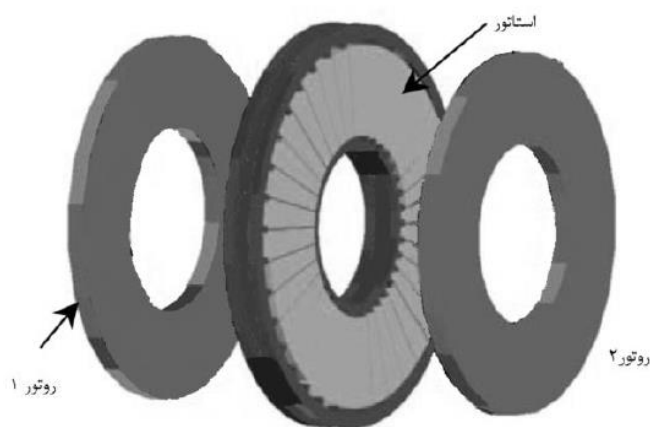
ساختار موتور هیستریز نوع تخت بسیار کم مورد بررسی و توجه قرار گرفته است. از این رو مطالعه و بررسی در حوزه موتورهای هیستریز نوع تخت یکی از اهداف این پایان‌نامه است. موتورهای هیستریز نوع تخت دارای استاتور بصورت تخت (شیاردار یا بدون شیار) و روتور آن دیسک یکپارچه تشکیل شده از ماده پسماند می‌باشد. اگر نگهدارنده روتور از جنس فرومغناطیس نرم یا فولاد سیلیکون‌دار باشد عبوری از روتور بصورت کاملا محوری است و اگر نگهدارنده آن از ماده غیر مغناطیسی ساخته شده باشد در این صورت شار عبوری از روتور بصورت کاملا محیطی است. شکل ۲-۷ یک موتور پسماند نوع تخت شار محیطی را به همراه نحوه شکل قطب‌ها آن نشان می‌دهد.



شکل ۲-۸ موتور هیستریز نوع تخت به همراه نحوه تشکیل قطب‌های آن [۳۵]

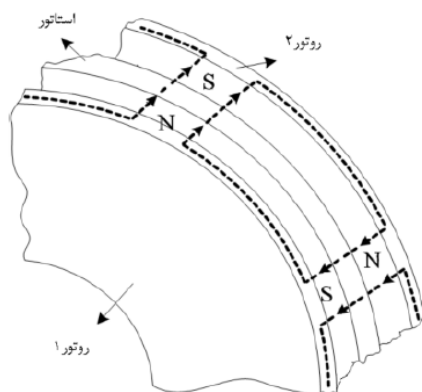
۲-۲-۱-۲ دو ساختار نوع تخت موتور هیستریز

الف) موتور هیستریزیس تخت دوروتوره بدون هسته^۱: این موتور از یک استاتور سیم پیچی شده با هسته غیر مغناطیسی و دو روتور دیسکی شکل در دو طرف استاتور تشکیل شده است. با این ساختار مزایا و برتری‌های این موتور افزایش می‌یابد و امکان استفاده از آن در کاربردهای خاص و با راندمان بالاتر فراهم می‌شود. مهمترین ویژگی این موتور داشتن هسته غیر مغناطیسی است که مزیت زیادی را برای این موتور فراهم می‌سازد. شکل ۸-۲ نمایی از موتور هیستریزیس تخت دوروتوره بدون هسته را نشان می‌دهد.



شکل ۹-۲ نمایی از ساختار موتور هیستریزیس تخت دوروتوره بدون هسته [۲۴]

مسیر شار در این موتور از سمت استاتور و بصورت محوری است. در شکل ۹-۲ مسیر عبور شار در این ماشین نشان داده شده است.



شکل ۱۰-۲: مسیر عبور شار در موتور هیستریزیس تخت دوروتوره بدون هسته [۲۴]

شار بصورت محوری استاتور و فاصله هوایی را طی و روتورها را بصورت محیطی دور می‌زند. همانطور که در شکل ۲-۹ نیز دیده می‌شود مسیر شار در استاتور موتور هیستریزیس بدون هسته بگونه‌ای است که نیازی به وجود یوغ استاتور نیست. این بدان معنا است که چون شار مسیر خود را در استاتور بصورت محوری می‌بندد، می‌توان هسته آهنی استاتور را نیز حذف کرد. با توجه به حذف هسته مغناطیسی در این نوع موتور، فاصله هوایی بزرگتر شده و در نتیجه جریان مغناطیس‌کنندگی موتور نیز افزایش می‌یابد. از مزایای عدم وجود هسته مغناطیسی حذف تلفات آهن استاتور است که می‌تواند در برخی از کاربردهای خاص مورد توجه قرار گیرد. با توجه به عدم وجود یوغ استاتور و اینکه مسیری برای بسته شدن شار در استاتور وجود ندارد، نوع سیم‌پیچی این دسته از موتورها از نوع روی هم می‌باشد. بطور کلی موتورهایی هیستریزیس تخت دوروتوره بدون هسته دارای مزیت‌های زیر هستند.

۱) با توجه به وجود دو روتور در دو طرف استاتور، گشتاور الکترومغناطیسی تولید شده توسط هر روتور بطور مجزا به محور موتور اعمال شده که باعث توزیع متوازن نیروی محرکه در طول شفت شده و پایداری مکانیکی بیشتری را به دنبال دارد.

۲) به دلیل حذف هسته مغناطیسی، تلفات مربوط به جریان‌های گردابی و تلفات هیستریزیس مرتبط با هسته در این دسته از موتورها وجود نخواهد داشت در نتیجه بازده و چگالی توان بالاتری را می‌توان برای آن‌ها متصور شد.

۳) عدم نیاز به هسته فولادی مغناطیسی برای ساخت استاتور، این امکان را فراهم می‌آورد که از مواد غیر مغناطیسی ارزانتر و سبک‌تر در ساخت این موتورها استفاده شود.

۴) با توجه به دور بالا بودن موتورهای هیستریزیس استفاده از درایوهای افزایش فرکانس امری اجتناب‌ناپذیر است ولی به علت بدون هسته بودن موتور نیازی به استفاده از مواد مغناطیسی با فرکانس بالا نیست.

۵) با توجه به حذف تلفات مربوط به هسته، گرما تولید شده توسط موتور منحصراً مربوط به بخش مکانیکی و تلفات مسی موتور می‌شود. در نتیجه موتور کمتر گرم می‌شود.

۶) در دماهای بالا خواص مواد مغناطیسی هسته تغییر می‌کند که این موضوع باعث تغییر خواص مغناطیسی و الکتریکی موتور می‌شود و چون موتور از نوع بدون هسته می‌باشد لذا درصد این تغییرات به حداقل می‌رسد.

۷) به دلیل شباهت بسیار زیاد ساختار موتور تخت دوروتوره بدون شیار به موتور هیستریزیس-رلکتانس تخت دو روتوره بررسی ساختار و مدار معادل این موتور از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. از این‌رو در ادامه مبحث ابتدا موتور پسماند تخت دو روتوره را بررسی نموده و در ادامه ساختار موتور هیستریزیس-رلکتانس استوانه‌ای را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

ب) موتور هیستریزیس تخت دوروتوره بدون شیار SDDHM^۱: ساختار این دسته از موتورهای تخت نسبت به ساختارهای معرفی شده ساده‌تر و کم هزینه‌تر است. استاتور این دسته از موتورهای تخت دوروتوره، بدون شیار می‌باشد، در نتیجه از حداکثر فضای موجود استاتور می‌توان برای سیم‌پیچی آن‌ها استفاده نمود که راندمان بالاتری را برای این دسته از موتورها در پی خواهد داشت. نحوه سیم‌پیچی و ساختار منحصربفرد آن‌ها باعث کاهش قابل توجه طول سیم‌پیچی نسبت به انواع دیگر سیم‌پیچی‌ها می‌شود که منجر به کاهش مقاومت اهمی استاتور و در نتیجه تلفات مربوط به آن می‌شود. همچنین شار پراکندگی در کله سیم‌های این دسته از موتورها در مقایسه با ساختارهای دیگر کمتر می‌باشد. بنابراین

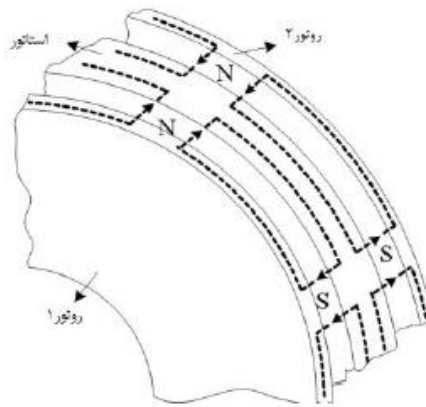
1- Slotless Dual Disc Hysteresis Motor

می‌توان با استفاده از این ساختار موتورهایی با راندمان و چگالی توان بالاتری را ساخت. استاتور این موتور از یک ورق سیلیکون یکپارچه که بصورت روی هم رول می‌شود تشکیل شده است. فرآیند ساخت استاتور این موتور به ماشین آلات پیشرفته و خاص نیاز ندارد و می‌توان با استفاده از یک قالب و دستگاه تراش، استاتور این موتور را بصورت رول در آورد که این موضوع باعث سهولت در ساخت و کاهش هزینه آن می‌شود. با توجه به اینکه هسته استاتور این موتور بدون شیار است، فرآیند سیم‌پیچی آن نیز بسیار ساده‌تر از ساختارهای دیگر است. همچنین عدم وجود شیارها در هسته استاتور تبادل گرمایی بهتری را برای سیم‌پیچ‌ها فراهم می‌کند. از مهم‌ترین ویژگی‌های منحصربفرد این دسته از ماشین‌ها چند لایه‌ای بودن آن‌ها می‌باشد. به عبارت دیگر بر خلاف ماشین‌های استوانه‌ای، این دسته از ماشین‌ها را می‌توان با تعداد روتور و استاتور متعدد ساخت. شکل ۲-۱۰ نمایی سه بعدی از یک ماشین هیستریزس تخت چند لایه با دو استاتور و سه روتور را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۱: ساختار موتور هیستریزس تخت چند لایه بدون شیار [8]

سیم پیچی استاتور موتور هیستریزیس تخت دوروتوره بدون شیار از نوع تروئیدال [8] است. در این دسته از موتورها مسیر شار در فاصله هوایی بصورت محوری و در روتورها و استاتور بصورت محیطی می باشد. شکل ۲-۱۱ این موضوع به وضوح دیده می شود.



شکل ۲-۱۲: مسیر شار در موتور هیستریزیس تخت دوروتوره [۲۴]

همانطور که در شکل ۲-۱۲ مشاهده می شود شار مسیر خود را از داخل استاتور و روتورها می بندد و در استاتور شار دو روتور با یکدیگر جمع می شوند. در نتیجه وجود استاتور با هسته مغناطیسی الزامی است. عدم وجود شیار در این دسته از موتورها باعث کوتاه شدن کله سیمها و در نتیجه کاهش مس مصرفی در موتور می شود که کاهش تلفات اهمی موتور را در پی دارد. با کاهش تلفات اهمی موتور، راندمان موتور افزایش و چگالی توان آن افزایش می یابد و گرما تولید شده ناشی از تلفات اهمی نیز کاهش می یابد. با کاهش گرمای تولید شده توسط موتور، می توان چگالی جریان بیشتری را برای موتور در نظر گرفت که به معنای افزایش چگالی توان موتور بدون شیار نسبت به نوع شیاردار آن می باشد. همچنین حذف راکتانس پراکندگی شیار از جمله مزیت های بدون شیار بودن در این نوع از موتورها می باشد. فاصله هوایی نسبتا بزرگ، راکتانس مغناطیسی کنندگی کوچک و راندمان پایین از جمله معایب موتورهای تخت هیستریزیس بدون شیار می باشد. با در نظر گرفتن ساختارهای مکانیکی مناسب و دقت در ساخت می توان فاصله ی

هوایی نسبتاً زیاد این موتور را تا حدود زیادی اصلاح نمود. وجود شیار موجب ایجاد هارمونیک در میدان مغناطیسی فاصله هوایی می‌شود. گشتاور ضربانی، تلفات مربوط به هارمونیک‌های فرکانس بالا در روتور و نویز صوتی از معایب عمده شار در موتورهای شیاردار است. بطور کلی می‌توان برای موتور هیستریزس تخت دوروتوره بدون شیار مزایای زیر را در نظر گرفت.

(۱) وجود دو روتور در طرفین استاتور تعادل مکانیکی روتورها و استفاده بهینه از فضا و نیروی محرکه مغناطیسی استاتور را فراهم می‌کند. همچنین ساخت ماشین‌هایی با تعداد لایه‌های بیشتر نیز امکان‌پذیر است.

(۲) کوتاهی کله سیم‌های موتور با توجه به نوع سیم‌پیچی این دسته از موتورها، که مزیت‌های زیر را به دنبال دارد.

- افزایش راندمان با توجه به کاهش تلفات مسی
- کاهش تلفات حرارتی در موتور و نیاز کمتر به تهویه
- کاهش راکتانس پراکندگی در کله سیم‌ها

(۳) عدم وجود شیار در این موتور مزایای زیر را به دنبال دارد:

- ساخت ساده و کم هزینه استاتور بدون نیاز به عملیات مخصوص (پانچ) برای ایجاد شیار بر روی استاتور.
- تبادل حرارتی مناسب و انتخاب چگالی جریان بزرگتر برای موتور با توجه به قرار گرفتن سیم‌پیچ‌های بر روی سطح استاتور.
- عدم وجود هارمونیک‌های مربوط به شیار و به طبع آن حذف تلفات فرکانس بالا در روتور، گشتاور ضربانی و نویز صوتی.

۲-۳- مروری بر مراجع مهم مربوط به تحلیل ماشین هیستریزیس

پدیده هیستریزیس برای اولین بار توسط اشتینمتز^۱ در سال ۱۹۰۸ مطرح شد. وی در سال ۱۹۱۷ فصلی از کتاب خود را به این موضوع اختصاص داد. او بیان کرد که استاتور موتور هیستریزیس همانند یک موتور القایی از یک سیم‌پیچی سه فاز و روتور آن از جنس ماده هیستریزیس تشکیل شده است. بر اساس تئوری مطرح شده در این کتاب، عبور میدان دوار ناشی از سیم‌پیچ سه فاز استاتور از درون ماده هیستریزیس روتور یک میدان دوار در روتور با اختلاف فاز مشخص و عقب‌تر از آن بوجود می‌آورد که باعث تولید گشتاور الکترومغناطیسی در موتور می‌شود [1].

در سال ۱۹۴۰ تیر^۲ مطالعاتی را بر روی موتور هیستریزیس استوانه‌ای انجام داد. او نشان داد که گشتاور تولید شده در این موتور، با حجم ماده بکار رفته در روتور و مساحت حلقه هیستریزیس متناسب است و این مقدار از لحظه راه‌اندازی تا رسیدن به سرعت سنکرون تقریباً ثابت است [9]. او همچنین تاثیر هارمونیک‌ها بر رفتار موتور را مورد بررسی قرار داد و نشان داد که وجود هارمونیک‌ها در میدان فاصله هوایی بر سطح حلقه هیستریزیس تاثیر می‌گذارد که در نتیجه منجر به کاهش گشتاور خروجی موتور می‌شود.

تنها موارد کاربردی موتورهای هیستریزیس تا اواخر دهه ۵۰ میلادی در ساعت‌هایی با رنج توانی ۲ الی ۳ وات بود که در بهترین حالت بازده آنها به ۰/۵ درصد می‌رسید که مقدار بسیار پایین و ناچیزی به شمار می‌آمد. با ایجاد تغییر در ساختار استاتور موتور هیستریزیس توسط روترز^۳ بازده این موتور به بیش از ۷۳ درصد رسید [10]. مدتی بعد او توانست با بهینه سازی روش خود در ساخت استاتور، موتور با بازده حدود ۸۰ درصد بسازد. او دریافت که وجود شیار با دهانه باز در استاتور موتور، موجب ایجاد نوسان‌هایی

1- Steinmetz

1- Tear

2- Roters

در چگالی شار فاصله هوایی می‌شود که تلفات پارازیتیک شار در فاصله هوایی را در پی خواهد داشت و بخش بزرگی از توان ورودی موتور صرف همین تلفات می‌شود و در نهایت بازده موتور را بطور چشمگیری کاهش می‌دهد. روترز با ساخت موتوری با استاتور شیار بسته توانست بازده موتور را تا مقدار قابل توجهی بهبود ببخشد. او همچنین با بررسی موتورهای هیستریزیس با مواد مغناطیسی مختلف دریافت که چنانچه موتور هیستریزیس بصورت بی‌بار راه‌اندازی شود و در سرعت سنکرون بارگذاری شود نسبت به حالتی که موتور از لحظه راه‌اندازی تا رسیدن به سرعت سنکرون بارگذاری شود، گشتاور ماکزیمم بیشتری را در سرعت سنکرون تولید می‌کند. همچنین تاثیر افزایش ولتاژ یا جریان در موتورهای هیستریزیس را در سرعت سنکرون مورد بررسی و آزمایش قرار داد. در مرجع [11] یک موتور هیستریزیس استوانه‌ای شار شعاعی با استاتور شیاردار از نوع بسته مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. در این مرجع مدار معادل موتور هیستریزیس با استفاده از تقریب متوازی‌الاضلاع حلقه هیستریزیس و صرف نظر از جریان‌های گردابی ارائه شده است. در ادامه این مرجع ذکر شده است که اگر موتور در حالت دائمی باشد و ولتاژ ورودی استاتور کاهش یابد آنگاه بازده و ضریب توان موتور بهبود می‌یابد ولی گشتاور تولیدی توسط آن کاهش می‌یابد.

در مرجع [12] یک موتور هیستریزیس استوانه‌ای شار محیطی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. در این مرجع نیز همانند مرجع [11] مدار معادل موتور هیستریزیس استوانه‌ای شار محیطی با استفاده از تقریب متوازی‌الاضلاع حلقه هیستریزیس و صرف نظر از جریان‌های گردابی ارائه شده است.

در مرجع [13] رحمان^۱ با همکاری کولپند^۲ و سلمون^۳ تلفات پارازیتیک شار در موتورهای هیستریزیس را مورد بررسی قرار دادند. آنها در این مرجع روابطی را برای تلفات پارازیتیک شار و نیروی محرکه مغناطیسی ارائه کردند.

1- Rahman
2- Copeland
3- Slemmon

در سال ۱۹۸۲ دو موتور هیستریز استوانه‌ای شار محیطی و شار شعاعی توسط کانیسترا^۳ و سایلوس^۴ مورد بررسی و مطالعه قرار گرفتند. آنها با استفاده از تقریب متوازی‌الاضلاع، منحنی مشخصه مغناطیسی ماده روتور از مدل‌سازی کردند و توانستند مدار معادل حالت دائم موتورهای هیستریز مذکور را ارائه کنند. مدار معادل ارائه شده توسط آنها تلفات پارازیتیک ناشی از هارمونیک‌های نیروی محرکه فاصله هوایی را نیز در بر می‌گیرد. همچنین پارامترهای مدار معادل و رابطه گشتاور موتور نیز توسط آنها ارائه شده است. همچنین آنها تاثیر مواد مغناطیس دائم در ساخت رینگ مغناطیسی روتور را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که اگر در ساخت رینگ روتور از آلیاژ نیکل یا کبالت-استیل استفاده شود بازده موتور کاهش می‌یابد در حالیکه اگر در ساخت آن از آلنیکو-۵ استفاده شود بازده موتور را می‌توان با یک موتور القایی مقایسه نمود. آنها نشان دادند که گشتاور و بازده موتور با افزایش ضخامت رینگ هیستریز افزایش می‌یابد.

در مرجع [12] توزیع میدان الکترومغناطیسی موتور هیستریز استوانه‌ای شار محیطی با استفاده از معادلات ماکسول در سرعت سنکرون ارائه شده است.

در مرجع [13] یک مدل ساده از موتور هیستریز توسط استیجر^۵ ارائه شده و مورد بررسی قرار گرفته است. در این مرجع منحنی هیستریز ماده روتور با بیضی تقریب زده شده است و تحلیل میدان به کمک تنسور تنش ماکسول انجام شده است.

4- Connistra

5- Sylos

1- Schieber

در سال ۱۹۸۰ میلادی رحمان، یک موتور هیستریزیس استوانه‌ای شار محیطی را مورد بررسی قرار داد [14]. او توانست با استفاده از دو تقریب متوازی‌الاضلاع و بیضوی معادلات میدان فاصله هوایی و رینگ مغناطیسی روتور را در سرعت‌های پایین‌تر از سرعت سنکرون بدست آورد.

در سال ۱۹۸۱ میلادی موتور هیستریزیس نوع تخت توسط ایشیکاوا^۱ و کاتائوکا^۲ مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت [15]. تحلیل انجام شده در شرایط گشتاور حداکثر بار و در سرعت سنکرون انجام شده است. توزیع چگالی شار در موتور هیستریزیس تخت توسط آنها ارائه شد. همچنین آنها نشان دادند که توزیع چگالی شار موتور هیستریزیس تخت شار محوری با توزیع چگالی شار موتور هیستریزیس استوانه‌ای شار شعاعی یکسان است. از طرف دیگر با توجه به اینکه توزیع چگالی شار در راستای شعاع و درون روتورها یکنواخت نیست، آنها دریافتند که اگر شعاع متوسط روتور برابر با شعاعی باشد که چگالی شار در آن ماکزیمم می‌شود آنگاه چگالی حجمی تون خروجی موتور نیز ماکزیمم خواهد شد.

مشکل اصلی موتورهای هیستریزیس چگالی توان و بازده پایین می‌باشد. در مرجع شماره [16] یک موتور هیستریزیس-آهنربای دائم معرفی شده است. بر همین مبنا گشتاور کل موتور در سرعت سنکرون از مجموع گشتاور ناشی از وجود ماده هیستریزیس و آهنربای دائم به دست می‌آید. در مرجع [17] رینگ هیستریزیس بکار رفته در روتور موتور هیستریزیس استوانه‌ای بجای یکپارچه بودن از کنار هم قرار دادن چند قطعه از ماده هیستریزیس تشکیل شده است.

برای بررسی یک موتور هیستریزیس سرعت متغیر کنترل شونده توسط یک اینورتر موج مربعی، اطلاع داشتن از مشخصات حلقه هیستریزیس معادل بر حسب سطح حلقه هیستریزیس، نفوذپذیری مغناطیسی و

2- Ishikawa
3- Kataoka

زاویه هیستریزیس ضروری است. در مرجع [18] که توسط واکوئی^۱ در سال ۱۹۷۸ ارائه شده است، به کمک آزمایش حلقه هیستریزیس معادل ایجاد شده توسط مولفه اصلی و مولفه‌های هارمونیک میدان مغناطیسی ارائه و مورد بررسی قرار گرفت.

وجود هارمونیک سوم به دلیل توزیع غیر سینوسی سیم‌پیچی استاتور در نیروی محرکه مغناطیسی، باعث کوچکتر شدن سطح حلقه هیستریزیس و افزایش نفوذپذیری مغناطیسی می‌شود. مرجع [19] اثر هارمونیک سوم نیروی محرکه مغناطیسی و ریپل دندانه‌های استاتور را بر رفتار موتور هیستریزیس در حالت دائم مورد بررسی و مطالعه قرار داده است. هارمونیک سوم نیروی محرکه مغناطیسی موجب ایجاد گشتاوری در خلاف جهت گشتاور تولید شده توسط هارمونیک اصلی نیرومحرکه مغناطیسی می‌شود و همین موضوع باعث کاهش چشمگیر توان خروجی موتور می‌شود. از طرف دیگر ضریب توان موتور و به تبع آن جریان مغناطیسی کنندگی آن کاهش می‌یابد. از اینرو نمی‌توان از اثر هارمونیک سوم نیروی محرکه مغناطیسی صرف نظر کرد.

مرجع [20] اثر تحریک اضافی کوتاه مدت اضافی را بر رفتار موتور هیستریزیس مورد بررسی قرار داده است. بر اساس این مرجع، اگر ولتاژ استاتور موتور هیستریزیس در سرعت سنکرون بطور پیوسته افزایش و کاهش یابد، ضریب توان موتور افزایش چشمگیری خواهد داشت و جریان مغناطیسی کنندگی موتور نیز بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

در مرجع [21] که توسط واکایی و همکارانش ارائه شده است، تحریک کوتاه مدت اضافی موتور هیستریزیس مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله یک روش برای اندازه‌گیری منحنی چگالی شار بر حسب شدت میدان مغناطیسی روتور با تحریک اضافی با استفاده از حلقه هیستریزیس dc ارائه شده است.

1- Wakui

با استفاده از مشخصه‌ی به‌دست آمده، پارامترهای مغناطیسی ماده روتور از جمله ضریب نفوذپذیری مغناطیسی و زاویه هیستریزیس مشخص شده است.

در مرجع [22] پدیده هانتینگ در موتورهای هیستریزیس و روش‌های میرا کردن آن را مورد بررسی قرار داده است. با توجه به این مرجع؛ جریان ادی^۱ و اثر غیر خطی هیستریزیس دو عامل اصلی در بوجود آمدن پدیده هانتینگ می‌باشد. در این مقاله روش‌های جدیدی برای میرا کردن پدیده‌ی هانتینگ با استفاده از مولفه‌های الکتریکی که هم شامل مدارات اکتیو و هم مدارات پسیو می‌باشد ارائه شده است.

مراجع [۲۳]، [۲۴]، [۲۵]، [۲۶]، [۲۷]، [۲۸]، [۲۹]، [۳۰]، [۳۱]، [۳۲]، [۳۳] از جمله مهم‌ترین مقالات و پایان‌نامه‌هایی است که در زمینه ماشین‌های هیستریزیس توسط دانشجویان و محققین دانشگاه صنعتی شاهرود ارائه شده است.

۲-۴- معرفی موتورهای رلوکتانسی

در این دسته از موتورها، گشتاور از طریق میل به همراستایی روتور با میدان استاتور بوجود می‌آید، بطوری که کمترین رلوکتانس در مسیر میدان مغناطیسی حاصل شود. این موتورها ساختارهای متنوعی دارند. روتور این موتورها معمولا فاقد سیم‌پیچی و مواد مغناطیس دائم است. ساختار ساده، استحکام مکانیکی بالا و هزینه پایین تولید از مهم‌ترین ویژگی‌های این دسته از موتورها می‌باشد. بطور کلی این موتورها را می‌توان به سه دسته زیر تقسیم نمود:

- موتورهای سنکرون رلوکتانسی^۲
- موتورهای پله‌ای رلوکتانس متغیر^۳
- موتورهای سوئیچ رلوکتانس^۱

1- Eddy current

1- Synchronous reluctance motor

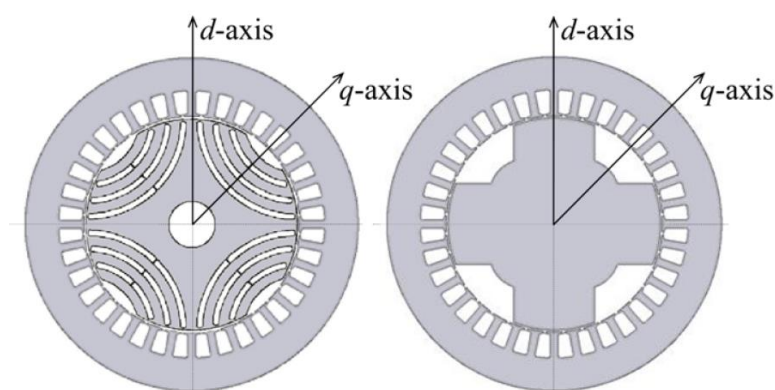
2- Variable-reluctance stepper motor

3- Switched reluctance motor

موتورهای سوئیچ رلوکتانس و موتورهای پله‌ای به لحاظ ساختاری یکسان می‌باشند و تفاوت آنها در نوع روش کنترل و کاربرد آنها است. موتورهای سنکرون رلوکتانسی به لحاظ ساختمان مشابه موتورهای القایی هستند و تنها روتور آنها دارای ساختار خاص و منحصربفرد است. ناهمگونی در رلوکتانس محور طولی و عرضی روتور این دسته از موتورها موجب ایجاد گشتاور در موتور می‌شود.

۱-۴-۲ موتور سنکرون رلوکتانسی

استاتور این موتورها هیچ تفاوتی با موتورهای القایی یا سنکرون به لحاظ سیم‌پیچی ندارد. اما روتور آنها طوری ساخته شده است که رلوکتانس در راستای محور d کم و در راستای محور عرضی یا q زیاد است. در شکل ۱۲-۲ روتور یک موتور سنکرون رلوکتانسی را مشاهده می‌شود:



شکل ۱۲-۲: روتور موتور سنکرون رلوکتانسی [41]

موتور سنکرون رلوکتانسی نوعی موتور سنکرون قطب برجسته می‌باشد با این تفاوت که در این موتور، تحریک DC بروی روتور وجود ندارد و لذا با توجه به معادله گشتاوری که برای موتور سنکرون می‌توان نوشت قسمت گشتاور الکترومغناطیسی در معادله وجود ندارد و تنها گشتاور قسمت معادله ناشی از ایجاد گشتاور برای همراستایی در مسیری است که کمترین رلوکتانس را با میدان دوار استاتور ایجاد نماید که به گشتاور رلوکتانسی معروف است. این نوع از موتورهای دارای ساختمان ساده در روتور می‌باشند و زمانی که بواسطه درایو راه اندازی می‌شوند نیازی به وجود قفس راه انداز ندارند. با توجه به اینکه این نوع

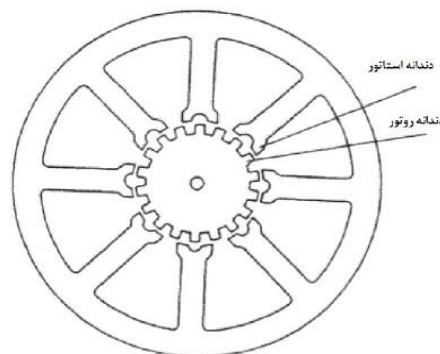
موتور فاقد هرگونه مغناطیس دائم بروی روتور می باشد لذا در مقایسته با موتور PMSM دارای استحکام مکانیکی بالاتری بوده و در نتیجه برای سرعت های بالا کارایی بهتری را داراست.

۲-۴-۲- موتورهای پله‌ای رلوکتانس متغیر

یکی از مهم‌ترین مشخصات این دسته از موتورها قابلیت استفاده در کنترل حلقه باز است. در این موتورها با اعمال هر پالس با توالی معین به فازهای استاتور، مقدار زاویه جابجایی معینی در روتور ایجاد می‌شود که هرچه این جابجایی یا به اصطلاح پله‌های موتور بیشتر باشد موتور دارای دقت بیشتری می‌باشد. یک رابطه ثابت بین تعداد پالس‌های اعمالی به موتور و تغییر موقعیت روتور وجود دارد و معمولاً خطایی بین تعداد پالس‌ها و تغییر موقعیت روتور در صورتی که موتور گشتاور کافی برای غلبه بر اصطحکاک، لختی روتور و بار را تولید کند، وجود ندارد. بعضی از خطاها مثل خرابی بلبرینگ، اختلال در قسمت بارو یا عملکرد بد سیستم شمارش نیز می‌تواند سبب از دست رفتن رابطه بین پالس‌ها و موقعیت روتور شود. همچنین شتابگیری سریع نیز می‌تواند سبب اختلال در این رابطه شود. به همین دلیل در بیشتر سیستم‌های پله‌ای، برای نشان دادن حداکثر پله‌هایی را که سیستم می‌تواند در فاصله زمانی معین طی نماید، پارامتری تعریف می‌شود. این موتورها به چهار دسته زیر تقسیم می‌شوند:

- رلوکتانس متغیر
- مغناطیس دائم
- هیبریدی
- پیزوالکتریک

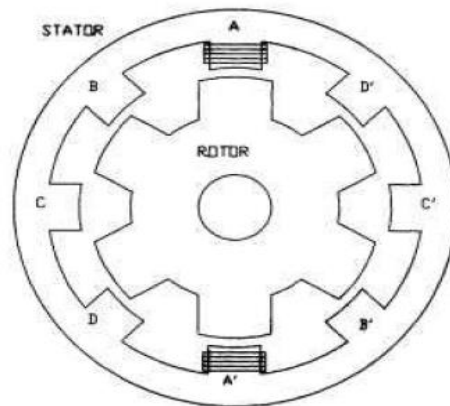
در شکل ۲-۱۳ زیر، ساختار یک موتور پله‌ای رلوکتانس متغیر نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۴: موتور پله‌ای رلوکتانس متغیر

۲-۴-۳ - موتورهای سوئیچ رلوکتانس

تاریخچه پیدایش این دسته از موتورها به سال ۱۸۳۵ بازمی‌گردد. موتورهای سوئیچ رلوکتانسی اولین بار توسط تیلور و دیویدسون اختراع شدند و برای اولین بار در سال ۱۸۳۸ در لوکوموتیو برقی مورد استفاده قرار گرفت. با پیشرفت الکترونیک قدرت در سال ۱۹۶۹ موتورهای سوئیچ رلوکتانس توسط Nasar در این راستا بکار برده شد [34]. این دسته از موتورها از لحاظ ساختمان و مسائل الکترومغناطیسی شبیه موتورهای پله‌ای و رلوکتانس متغیر هستند اما از لحاظ کنترل و کاربردها با سایر موتورهای رلوکتانسی دارند. در شکل زیر ساختمان یک موتور سوئیچ رلوکتانس را مشاهده می‌شود:



شکل ۲-۱۵: موتور سوئیچ رلوکتانس ۸/۶

این موتورها برای کموتاسیون جریان بین فازها نیاز به فیدبک دقیقی از موقعیت روتور دارند در حالی که استپ موتورها بصورت حلقه باز و بدون نیاز به فیدبک می‌چرخند. اساس طراحی این موتورها، داشتن بهترین بازده تبدیل انرژی می‌باشد. موتورهای سوئیچ رلوکتانس دارای تعداد قطب‌های کم با فواصل زیاد و همچنین فاصله هوایی بزرگتری نسبت به موتورهای پله‌ای می‌باشند. همچنین برای این موتورها می‌توان از نام‌هایی چون موتور رلوکتانسی بدون جاروبک یا کموتاسیون الکترونیکی یا موتور تک تحریکه با

برجستگی دوگانه^۱ نیز استفاده نمود. منظور از عبارت تک تحریکه، عدم وجود سیم‌پیچی بر روی روتور می‌باشد.

۲-۳-۱- موتور سوئیچ رلوکتانس با برجستگی دوگانه

شکل ۲۱ موتور سوئیچ رلوکتانس با برجستگی دو گانه را نشان می‌دهد. در هر لحظه دو سیم‌پیچ روبروی هم که بصورت سری به یکدیگر متصل هستند، تحریک می‌شوند و دو قطب از روتور که نزدیک سیم‌پیچ‌های تحریک شده هستند در راستای این دو سیم‌پیچ قرار می‌گیرند.

۲-۳-۲- موتور سوئیچ رلوکتانس روتور تکه‌ای^۲

شکل زیر یک موتور سوئیچ رلوکتانس تکه‌ای را نشان می‌دهد. تکه‌های روتور روی ماده غیر مغناطیسی سوار شده‌اند و هریک از تکه‌های روتور مسیر کوتاه مستقلی را برای عبور شار فراهم می‌کنند. به دلیل کوتاهی مسیر عبور شار و کم بودن رلوکتانس مسیر، تلفات آهنی در این موتور کمتر است ولی این موضوع باعث افزایش شار پیوندی بین فازها می‌باشد.

۲-۵- معرفی موتور سنکرون هیستریزیس-رلوکتانس تخت دو روتوره

همان‌طور که گفته شد موتورهای هیستریزیس، موتورهای سنکرون خود راه‌اندازی هستند که بر اساس خصوصیات پسماند مواد مغناطیسی عمل می‌کنند. در واقع روتور این ماشین‌ها از یک ماده با خاصیت هیستریزیس مغناطیسی قابل توجه (مثل فولادهای آلیاژ کبالت) ساخته می‌شود. مقدار گشتاور تولید شده توسط این موتور با سطح حلقه هیستریزیس و حجم ماده پسماند متناسب است. این موتورها که در توان‌های کمتر از یک اسب بخار کاربردهای زیادی پیدا کرده‌اند، از ویژگی‌های منحصربه‌فردی برخوردارند که از آن جمله می‌توان به ساختار ساده و مستحکم، مشخصه گشتاور سرعت ثابت، عملکرد بسیار نرم و بدون نویز و همچنین، جریان راه‌اندازی پایین اشاره کرد. این مشخصه‌های عملکردی، باعث توسعه کاربرد موتورهای هیستریزیس به‌ویژه در بسیاری از سیستم‌های سرعت بالا مانند سانتریفیوژها، ژيروسکوپ‌ها و . . . شده است. به هر حال راندمان و ضریب توان نسبتاً کم از معایب ذاتی موتورهای پسماند بشمار می‌آیند که در بعضی از کاربردهای ویژه اینگونه موتورها بعنوان یک موضوع منفی و محدود کننده مطرح می‌شوند.

1- Doubly Salient Singl Excited Electronically or Commutated Brushless Reluctance

1- Segmental rotor switched reluctance motor

از دیگر معایب موتورهای هیستریزیس، نوسان سرعت حول سرعت سنکرون است که در پاره‌ای از مواقع اتفاق می‌افتد و مدت زمان نسبتاً طولانی برای میرا شدن آن نیاز است. این پدیده که به پدیده هانتینگ معروف است، با طراحی خوب موتور تا حد زیادی قابل مرتفع شدن است.

موتور رلوکتانسی یک نوع موتور سنکرون است که گشتاور ایجاد شده در آن ناشی از اختلاف رلوکتانس‌های طولی و عرضی فاصله هوایی می‌باشد. این موتورها از ویژگی‌های منحصربه‌فردی برخوردارند که از آن جمله می‌توان به سادگی در ساخت، استحکام مکانیکی بالا و پایین بودن هزینه تعمیر و نگهداری اشاره کرد. از جمله معایب این موتورها می‌توان به ضریب توان پایین، چگالی توان کم، ریپل گشتاور بالا و گشتاور خروجی کم اشاره نمود. همچنین اگر موتور رلوکتانسی بصورت مستقیم توسط شبکه تغذیه شود دارای گشتاور راه‌اندازی نمی‌باشد. این موضوع یکی از معایب اصلی این موتورها محسوب می‌شود.

چنانچه در هر ساختاری از موتور هیستریزیس بتوان روتور آن را به صورت قطب برجسته ساخت، موتور گشتاور رلوکتانسی همانند موتور رلوکتانسی تولید خواهد کرد که با گشتاور هیستریزیس در سرعت سنکرون جمع خواهد شد. در هر سرعت زیر سرعت سنکرون، برجستگی روتور تولید گشتاور ضربانی می‌کند. در سرعت سنکرون، روتور در یک موقعیت مشخص نسبت به میدان استاتور ثابت می‌شود. این موقعیت توسط محورهای برجستگی و گشتاور بار تعیین می‌گردد. در این موتورها گشتاور ماکزیمم در سرعت سنکرون برابر با مجموع گشتاورهای رلوکتانسی و هیستریزیس خواهد شد که انتظار می‌رود خیلی بیشتر از گشتاور موتور هیستریزیس ساده باشد. همین موضوع انگیزه ما برای طراحی و ساخت موتوری با تلفیق هیستریزیس و رلوکتانس شده است. ترکیب دو موتور هیستریزیس و رلوکتانس با دو دیدگاه صورت می‌پذیرد. دیدگاه اول، اضافه نمودن ماده هیستریزیس به موتور رلوکتانسی به جهت رفع نواقص موتور رلوکتانسی خواهد بود که آن را موتور رلوکتانس-هیستریزیس می‌نامیم و دیدگاه دوم، اضافه نمودن یک بخش رلوکتانسی به موتور هیستریزیس جهت رفع نواقص موتور هیستریزیس است که از این به بعد به آن موتور هیستریزیس-رلوکتانس خواهیم گفت. موتور هیستریزیس-رلوکتانس یک موتور ترکیبی است که امیدواریم در آن بسیاری از معایب موتور هیستریزیس از جمله گشتاور پایین، هانتینگ و بازده کم مرتفع شود. طراحی و انتخاب ساختار مناسب نقش موثری در عملکرد موتور تلفیقی دارد، بطوریکه بتوان تا حد ممکن مزایای هر دو موتور را در موتور جدید حفظ نمود.

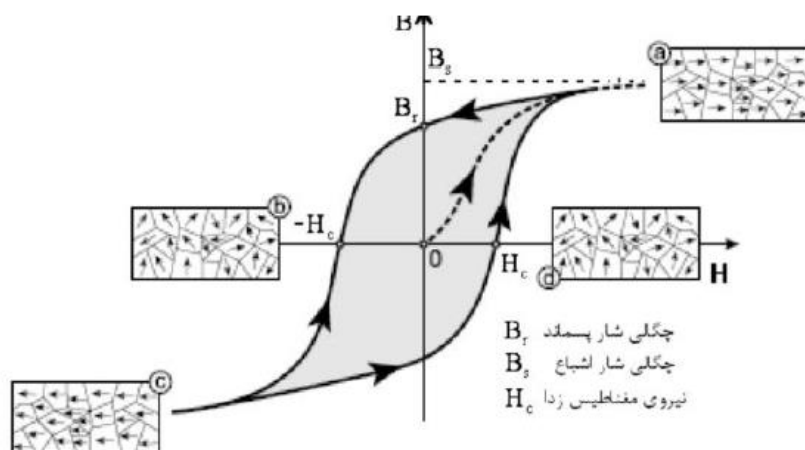
فصل ۳: تئوری عملکرد موتور هیستریزیس و موتور
رلوکتانسی

۳-۱ مقدمه

در این فصل تئوری عملکرد موتورهای هیستریزیس، رلوکتانسی و HRM^۱ مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین روند مدل‌سازی تحلیلی این موتورها نیز ارائه می‌شود. هدف نویسنده این پایان‌نامه از ارائه مدل‌سازی تحلیلی برای دو موتور هیستریزیس و رلوکتانسی، ارائه مدل‌سازی تحلیلی برای موتور ترکیبی HRM است که از تلفیق دو مدل بدست می‌آید. در ابتدا این فصل به بررسی پدیده هیستریزیس پرداخته شده است.

۳-۲ پدیده هیستریزیس [۲۴]

هنگامی که یک ماده مغناطیسی تحت تاثیر یک میدان قرار متناوب قرار می‌گیرد پدیده پسماند بوجود می‌آید. این پدیده به خاطر ثابت زمانی است که حوزه‌های مغناطیسی ماده به خاطر جهت یافتن یا جهت دادن به خود در اثر شدت میدان مغناطیسی بروز می‌دهند. به عبارت دیگر می‌توان گفت بین میدان اعمالی به ماده و پدید آمدن چگالی شار تاخیر فاز وجود دارد [۵]. شکل ۳-۱ تغییرات چگالی شار را بر حسب شدت میدان مغناطیسی و رفتار حوزه‌های مغناطیسی را در نقاط مختلف ماده نشان می‌دهد.



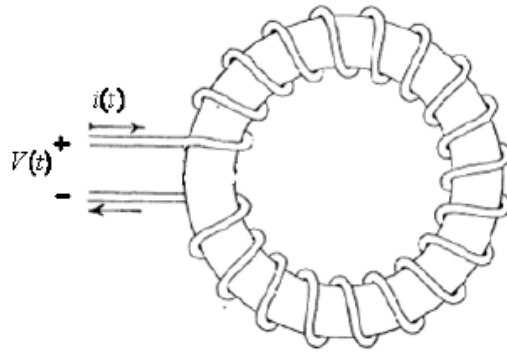
شکل ۳-۱: تغییرات چگالی شار بر حسب شدت میدان مغناطیسی [۲۴]

در شکل بالا نقطه تلاقی منحنی با محور شدت میدان مغناطیسی، نیروی مغناطیس‌زدا^۱ نامیده می‌شود. محل تلاقی با محور چگالی شار، به چگالی شار پسماند معروف است. اگر فرض کنیم که در مدار شکل ۳-۲ جریان $i(t)$ سینوسی با فرکانس f باشد آنگاه شدت میدان ایجاد شده در هسته سلونوئید برابر است با:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t) \quad (۱-۳)$$

$$\oint H(t).dl = ni(t) \quad (۲-۳)$$

$$H(t) = H_{\max} \sin(\omega t) = \frac{nI_m}{l} \sin(\omega t) \quad (۳-۳)$$



شکل ۳-۲: هسته مغناطیسی و سیم‌پیچ حامل جریان [۵]

که در رابطه بالا n تعداد دور سیم‌پیچی و l طول مسیر مغناطیسی هسته می‌باشد.

بنابراین $H(t)$ سینوسی و با شدت میدان همفاز است. می‌توان چگالی شار $B(t)$ را با فرض سینوسی بودن $H(t)$ و با در نظر گرفتن منحنی غیر خطی هیستریزس بدست آورد. چگالی شار برحسب زمان غیر خطی و غیر متناوب است. با نوشتن سری فوریه $B(t)$ مشاهده می‌شود که هارمونیک‌های زوج در این سری فوریه وجود ندارد و مولفه اصلی چگالی شار و شدت میدان مغناطیسی به اندازه α با یکدیگر اختلاف فاز دارند. پس داریم:

$$B(t) = B_{\max} \sin(\omega t - \alpha) \quad (۴-۳)$$

$$\varphi(t) = SB_{\max} \sin(\omega t - \alpha) \quad (۵-۳)$$

$\varphi(t)$ شار درون هسته و S سطح مقطع هسته می‌باشد. ولتاژ القایی دو سر سیم‌پیچی برابر است با:

$$v(t) = n \frac{d\varphi}{dt} = 2n\pi SB_{\max} \cos(\omega t - \alpha) \quad (۶-۳)$$

اکنون با داشتن مولفه اصلی ولتاژ و جریان می‌توان توان ورودی را محاسبه نمود. پس داریم:

$$\bar{V} = \sqrt{2}n\pi fSB_{\max} \angle 0 \quad (7-3)$$

$$\bar{I} = \frac{H_{\max}l}{n\sqrt{2}} \angle \left(\alpha - \frac{\pi}{2} \right) \quad (8-3)$$

$$P = \overline{VI \cos \angle} \left(\alpha - \frac{\pi}{2} \right) = \pi fS B_{\max} H_{\max} l \cos \left(\alpha - \frac{\pi}{2} \right) \quad (9-3)$$

پس داریم:

$$P = \left(\sqrt{2}\pi f B_{\max} \right) \left(\frac{H_{\max} \sin \alpha}{\sqrt{2}} \right) V_{Hysteresis} \quad (10-3)$$

که در رابطه بالا $V_{Hysteresis}$ حجم ماده هیستریزیس می‌باشد.

توان اتلافی در ماده هیستریزیس از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P = V_{Hysteresis} f \oint H \cdot dB = V_{Hysteresis} E_h f \quad (11-3)$$

که در رابطه بالا E_h سطح حلقه هیستریزیس می‌باشد.

با توجه به در نظر گرفتن مولفه اصلی شدت میدان و صرف نظر از هارمونیک‌های مرتبه بالاتر می‌توان

منحنی‌های هیستریزیس را با بیضی‌های متحدالمركز تقریب زد. در مرجع [۷] روش‌های متفاوت تقریب

منحنی‌های پسماند به تفضیل مطرح شده است. هریک از این بیضی‌ها دارای زاویه تاخیر هیستریزیس α

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{E_h}{\pi H_{\max} B_{\max}} \right)$$

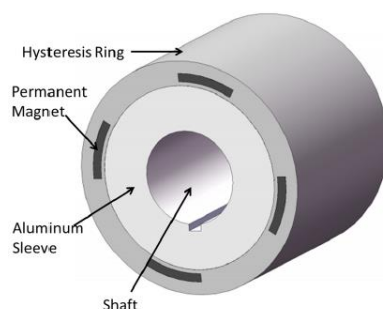
و نفوذپذیری مغناطیسی $\mu = B_{\max} / H_{\max}$ منحصر بفرد می‌باشند. مقدار زاویه تاخیر هیستریزس از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$(12-3)$$

یکی دیگر از روش‌های تقریب منحنی هیستریزس، تقریب متوازی‌الاضلاع می‌باشد. در مرجع [8] از تقریب متوازی‌الاضلاع برای مدل‌سازی موتور هیستریزس استفاده شده است.

۴-۳-۳: موتور پسماند آهنربای دائم^۱

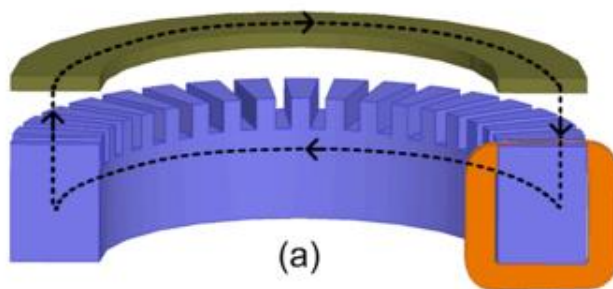
موتور با آهنربای دائم به دلیل داشتن راندمان و گشتاور بالا به نسبت موتور القایی، بیشتر مورد توجه می‌باشد، ولی نداشتن گشتاور راه اندازی ز معایب این موتور است. از طرف دیگر موتور پسماند بعنوان موتوری، با گشتاور راه اندازی و راندمان پایین در مقایسته با موتور هم سایز خود با آهنربای دائم، مطرح می‌باشد. در مقاله ارائه شده در سال ۱۹۹۳ دکتر رحمان برای اولین بار یک موتور ترکیبی با ساختار آهنربای دائم و ماده پسماند را ارائه نمود [۲۰]. در این موتور گشتاور در زیر سرعت سنکرون دارای دو مولفه ناشی از گشتاور القایی و هیستریزس می‌باشد. در شکل زیر نمایی از یک موتور هیستریزس با آهنربای دائم نشان داده شده است.



شکل ۳-۲: موتور ترکیبی پسماند و آهنربای دائم [40]

۳-۳-۵: موتور پسماند تخت دوروتوره بدون شیار^۱

همان طور که می‌دانیم، در یک موتور استوانه‌ای با صرف نظر کردن از اثر لبه‌ی طول مسیر مغناطیسی ثابت و به موقعیت روتور بستگی ندارد. بنابراین چگالی شار فاصله هوایی در موتور استوانه‌ای در امتداد شفت یا محور آن یکنواخت است. اما در موتورهای تخت طول مسیر مغناطیسی در امتداد شعاع تغییر می‌کند و بنابراین چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی در امتداد شعاع یکنواخت نیست. در شکل زیر این موضوع نشان داده شده است.



شکل شماره ۳-۳: مسیر بسته شدن شار در موتور تخت شیاردار بصورت محیطی [۳۵]

از جمله مزایای موتور هیستریسیس می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- ۱- عملکرد نرم و بدون لرزش
- ۲- قابلیت کنترل مستقیم سرعت حالت دائم با استفاده از ورودی فرکانسی
- ۳- نویز کم
- ۴- گشتاور تقریباً ثابت از لحظه راه‌اندازی تا رسیدن به سرعت سنکرون

۵- پایین بودن جریان راه‌اندازی

معایب موتور هیستریزیس:

۱- پایین بودن ضریب توان و بازده ماشین

۲- وجو پدیده هانتینگ^۱

پدیده "Hunting" [۳۵]

در موتور عموماً درباره حالت مانا صحبت می‌شود اما آنچه که در واقعیت برای موتور اتفاق می‌افتد، شرایط نوسانی می‌باشد که باعث از بین رفتن آهسته حالت دائمی در موتور می‌شود. پدیده نوسانی شدن در سرعت سنکرون یک پدیده غیر معمول نمی‌باشد که به این حالت Hunting یا Flutter گفته می‌شود. مدت زمان این پدیده در حدود ۱ ثانیه می‌باشد ولی تا ۴ ثانیه نیز در برخی از گزارش‌ها ذکر شده است. علت این پدیده نوسانی شدن زاویه حول نقطه تعادل‌اش می‌باشد که در اینجا δ زاویه پس‌فاز بین دو میدان مغناطیسی دوار در محیط استاتور می‌باشد. حاصل این نوسانی شدن سیستم، بوجود آمدن اختلال و آشفستگی در منبع تغذیه الکتریکی و تغییرات ناگهانی و یا دوره‌ای در بار مکانیکی می‌باشد.

۳-۴: تئوری عملکرد موتور هیستریزیس

در این بخش نحوه عملکرد موتور هیستریزیس تخت از لحظه راه‌اندازی تا رسیدن به شرایط کار پایدار در سرعت سنکرون بررسی می‌شود [۳۵].

با اتصال سیم‌پیچ آرمیچر به یک منبع ولتاژ سه فاز متعادل، یک میدان دوار با سرعت n_s دور در ثانیه درون آرمیچر ماشین ایجاد می‌شود که تعداد p قطب (در موتورهای هیستریزیس این تعداد برابر با ۲

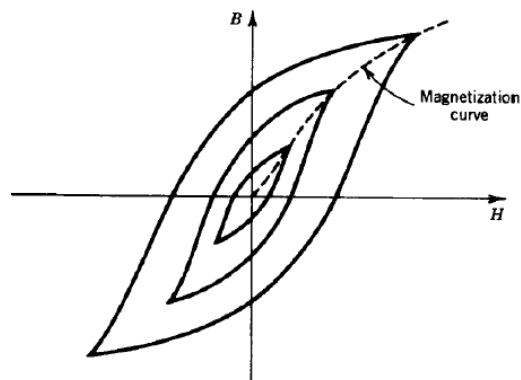
1- Hunting Phenomenon.

$$n_s = \frac{120f_s}{p}$$

می‌باشد) را درون آن بوجود می‌آورد. رابطه زیر ارتباط بین سرعت سنکرون n_s ، فرکانس تغذیه استاتور f_s و همچنین تعداد قطب‌های p ایجاد شده درون آن را بیان می‌کند.

$$(۳-۱۳)$$

زمانی که روتور در حالت سکون قرار دارد، میدان دوار هر نقطه از روتور را با سرعت سنکرون قطع می‌نماید. در این حالت به دلیل وجود خاصیت هیستریزیس در ماده روتور (رینک هیستریزیس) هر نقطه از روتور با توجه به دامنه‌ی شدت میدان مغناطیسی در آن نقطه حلقه هیستریزیس مختص به خود را مطابق شکل ۳-۴ به تعداد $pn_s/2$ یا همان فرکانس f_s منبع تغذیه طی می‌کند.



شکل ۳-۴: حلقه هیستریزیس اصلی برای چند نقطه مختلف از روتور ماشین هیستریزیس تخت [۳۵]

برای درک بهتر از عملکرد ماشین هیستریزیس تخت، ابتدا از کلیه تلفات ماشین که شامل تلفات استاتور، تلفات جریان‌های گردابی در روتور و همچنین تلفات مکانیکی ماشین صرف نظر می‌شود. در فصل‌های بعدی به این موارد پرداخته خواهد شد.

در اثر طی شدن حلقه‌های هیستریزیس در هر نقطه از روتور، تلفات هیستریزیس در این نقاط بوجود می‌آید. در حالت سکون، کل توان ورودی به سیم‌پیچ آرمیچر صرف تلفات مربوط به ماده هیستریزیس در

روتور می‌شود. به عبارت دیگر با هر بار طی شدن حلقه هیستریزیس در جز دیفرانسیلی i ام از روتور با حجم اتلاف انرژی ΔV_i در اثر پدیده هیستریزیس برابر است با:

$$\Delta W_{lh_i} = \Delta V_i E_{h_i} \quad (13-3)$$

در رابطه بالا E_{h_i} سطح حلقه هیستریزیس مربوط به جز دیفرانسیلی i ام روتور است. در لحظه راه‌اندازی که سرعت روتور برابر با صفر است، هر نقطه از روتور به تعداد f_s بار توسط میدان دوار استاتور قطع می‌شود. در نتیجه تلف هیستریزیس مربوط به جز دیفرانسیلی i ام برابر است با:

$$\Delta W_{lh_i} = f_s \Delta V_i E_{h_i} \quad (14-3)$$

همچنین مساحت حلقه هیستریزیس مربوط به جز دیفرانسیلی i ام را می‌توان با چگالی شار ماکزیمم مربوط به همان جز اینگونه بدست آورد:

$$E_{h_i} = K'_h (B_{\max_i})^n \quad (15-3)$$

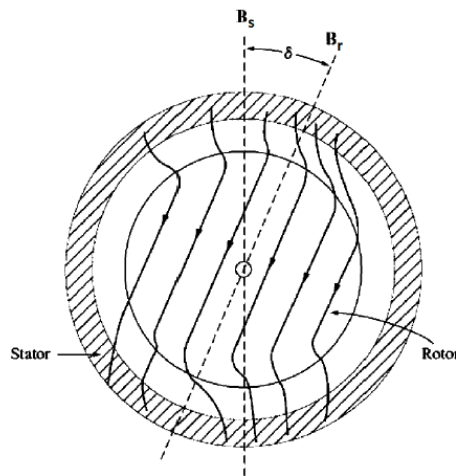
که در رابطه بالا K'_h و n ضرایب ثابت وابسته به جنس ماده هیستریزیس روتور می‌باشند. با جایگذاری روابط (13-3) و (15-3) در رابطه (14-3) بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$\Delta P_{lh_i} = K'_h \Delta V_i f_s (B_{\max_i})^n \quad (16-3)$$

پس مقدار کل تلفات هیستریزیس مربوط به روتور در شرایط سکون P_{lh_i} برابر است با:

$$P_{lh} = \sum_i \Delta P_{lh_i} = f_s K'_h \sum_i \Delta V_i (B_{\max_i})^n \quad (17-3)$$

علاوه بر تلفات هیستریزیس، وجود حلقه‌های هیستریزیس باعث ایجاد یک اختلاف فاز ΔP_{ih} بین دو میدان دوار استاتور و روتور می‌شوند که برای روشن شدن این موضوع خطوط شار درون یک ماشین هیستریزیس در شکل ۳-۵ نشان داده شده است. همانطور که بیان شد، توزیع جریان‌های درون استاتور، یک میدان مغناطیسی دوار را درون استاتور و روتور ایجاد می‌کند. با صرف نظر از وجود پدیده هیستریزیس، شدت میدان مغناطیسی دوار استاتور، یک توزیع چگالی شار دوار B_s همفاز با خود را بوجود می‌آورد. اما شدت میدان مغناطیسی در روتور، چگالی شار دوار B_r را درون آن ایجاد می‌کند اما به دلیل وجود حلقه‌های هیستریزیس نشان داده شده در شکل ۳-۵، نسبت به میدان بوجود آورنده آن تاخیر فاز دارد. بنابراین چگالی شار دوار روتور و استاتور و در نتیجه قطب‌های متوجه از این دو میدان نسبت به یکدیگر به اندازه δ اختلاف فاز دارند. وجود همین اختلاف فاز منجر به ایجاد یک گشتاور الکترومغناطیسی می‌شود که باعث به چرخش درآمدن روتور ماشین می‌شود.



شکل ۳-۵: خطوط شار در استاتور و روتور یک ماشین هیستریزیس استوانه‌ای [۳۵]

البته ذکر این نکته نیز ضروری است که با سرعت گرفتن روتور، هر نقطه از آن همچنان حلقه‌های هیستریزیس قبلی خود را حفظ می‌کنند اما با افزایش سرعت روتور تعداد دفعات طی شدن این حلقه‌ها در هر نقطه از روتور کاهش می‌یابد. بنابراین انتظار می‌رود که سرعت نسبی بین میدان‌های دوار استاتور و

روتور همواره صفر باشد و اختلاف فاز δ بین آن‌ها تا لحظه رسیدن به سرعت سنکرون ثابت باقی بماند. به عبارت دیگر از لحظه راه‌اندازی تا رسیدن به سرعت سنکرون گشتاور الکترومغناطیسی ماشین همواره ثابت باقی می‌ماند.

با ثابت بودن گشتاور ماشین، توان ورودی به آن نیز ثابت باقی می‌ماند. با توجه به اینکه وضعیت میدان‌های استاتور و روتور از لحظه راه‌اندازی تا رسیدن به سرعت سنکرون ثابت می‌ماند، لذا شار پیوندی در سیم‌پیچ استاتور و در نتیجه ولتاژ القاء شده در آن‌ها نیز تغییر نخواهد کرد. از اینرو با فرض عدم تغییر در ولتاژ ترمینال، جریان ورودی به ماشین و همچنین توان ورودی به آن نیز ثابت باقی می‌مانند.

همانطور که قبلاً نیز گفته شد، هرچه سرعت روتور افزایش یابد، تعداد سیکل‌های حلقه‌های هیستریزس عبوری در هر نقطه از روتور نیز کاهش می‌یابد. اگر سرعت چرخش روتور n_r در ثانیه باشد، هر نقطه از روتور $p = (n_s - n_r)/2$ بار سیکل هیستریزس مربوط به خود را طی می‌کند. اگر لغزش را بصورت زیر تعریف کنیم:

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (۱۸-۳)$$

تعداد دفعات طی شدن هر نقطه از حلقه هیستریزس $spn_s/2$ یا sf_s بار در ثانیه خواهد بود. بنابراین در سرعت n_r تلفات هیستریزس روتور بصورت زیر خواهد بود.

$$P_{lh} = sf_s K_h' \sum_i \Delta V_i f_s (B_{\max_i})^n \quad (۱۹-۳)$$

از آنجایی که در شرایط زیر سنکرون لغزش کوچکتر از یک است، از رابطه (۱۷-۳) می‌توان دریافت که هرچه سرعت روتور بیشتر باشد تلفات هیستریزس روتور کاهش می‌یابد.

با توجه به اینکه در شرایط زیر سنکرون توان ورودی به ماشین مستقل از سرعت است و با توجه به کاهش تلفات هیستریزس روتور با افزایش سرعت ماشین، باید بخشی از این توان ورودی به توان مکانیکی تبدیل

شده است. به عبارت دیگر، توان مکانیکی تولیدی در اثر وجود پدیده هیستریزیس (توان مکانیکی ناشی از هیستریزیس) P_{mh} برابر است با:

$$P_{mh} = (1-s)f_s K'_h \sum_i \Delta V_i f_s (B_{\max_i})^n \quad (20-3)$$

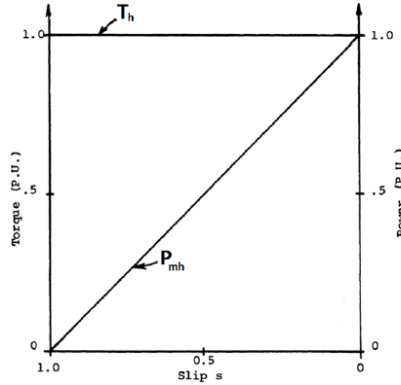
این توان مکانیکی با افزایش سرعت، بیشتر می‌شود. در نتیجه گشتاور الکترومغناطیسی ناشی از وجود پدیده هیستریزیس که به گشتاور الکترومغناطیسی هیستریزیس معروف است نیز بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$T_h = \frac{P_{mh}}{\omega_r} = \frac{P_{mh}}{(1-s)\omega_s} = \frac{f_s K'_h \sum_i \Delta V_i f_s (B_{\max_i})^n}{\omega_s} \quad (21-3)$$

با توجه به اینکه $\omega_s = 2\pi n_s = 4\pi f_s / p$ است لذا معادله گشتاور هیستریزیس را بصورت زیر نیز می‌توان نوشت:

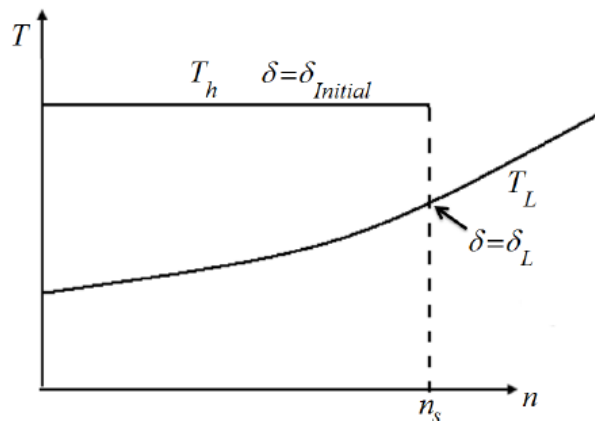
$$T_h = \frac{pK'_h}{4\pi} \sum_i \Delta V_i f_s (B_{\max_i})^n = K_h'' \sum_i \Delta V_i f_s (B_{\max_i})^n \quad (22-3)$$

از رابطه (20-3) و (22-3) نیز مشخص است که از زمان راه‌اندازی تا رسیدن به سرعت سنکرون، توان مکانیکی هیستریزیس با افزایش سرعت (کاهش لغزش) افزایش می‌یابد و گشتاور الکترومغناطیسی ثابت باقی می‌ماند و مستقل از سرعت ماشین است. در شکل ۳-۵ مستقل بودن گشتاور از سرعت روتور قابل مشاهده است.



شکل ۳-۶: نمودار تغییرات گشتاور و توان هیستریزیس از لحظه راه‌اندازی تا رسیدن به سنکرونیزم [۳۵]

هنگامی که ماشین هیستریزیس برای اولین بار به سرعت سنکرون می‌رسد، در همان لحظه تبدیل به یک ماشین آهنربای دائم می‌شود. به عبارت دیگر قطب‌های روتور نسبت به خود روتور ساکن می‌شوند. با توجه به اینکه گشتاور هیستریزیس در لحظه ورود به سرعت سنکرون از گشتاور بار بیشتر است (مطابق شکل ۳-۷) لذا روتور شتاب گرفته و سرعت آن از سرعت سنکرون بیشتر می‌شود. در شکل ۳-۷ $\delta = \delta_{initial}$ زاویه بین میدان دوار استاتور و روتور از لحظه راه‌اندازی تا لحظه ورود به سرعت سنکرون می‌باشد و δ_L زاویه مورد نیاز بین میدان‌های استاتور و روتور برای تامین گشتاور بار در سرعت سنکرون می‌باشد.



شکل ۳-۷: مشخصه گشتاور-سرعت ماشین هیستریزیس و بار [۳۵]

زمانی که روتور شتاب می‌گیرد و سرعت از سرعت سنکرون بیشتر می‌شود، میدان دوار استاتور در جهت عکس روتور را دور می‌زند. با فرض اینکه جهت گردش میدان دوار استاتور و جهت چرخش خود روتور ساعتگرد باشد، در سرعت‌های زیر سنکرون میدان دوار استاتور هر نقطه از روتور را در جهت ساعتگرد قطع می‌کند. وقتی که روتور به سرعت سنکرون می‌رسد، سرعت نسبی بین میدان دوار استاتور و هر نقطه از روتور ثابت شده و به عبارت دیگر قطب‌ها به یکدیگر قفل می‌شوند و به ماشین مغناطیس دائم تبدیل می‌شود. با رسیدن سرعت روتور به بالای سرعت سنکرون، میدان دوار استاتور هر نقطه روی روتور را در جهت پادساعتگرد قطع می‌کند (جهت طی شدن حلقه‌های هیستریزیس برعکس می‌شود) و در نتیجه قطب‌های استاتور از قطب‌های روتور عقب‌تر افتاده و به تعبیر دیگر ماشین هیستریزیس در مد ژنراتوری قرار می‌گیرد.

همان‌طور که گفته شد، در بالای سرعت سنکرون جهت طی شدن حلقه‌های هیستریزیس در کلیه نقاط روتور عوض می‌شود. به دلیل وجود حلقه‌های هیستریزیس فرعی در مشخصه‌های هیستریزیس روتور، مسیر برگشت حلقه هیستریزیس بر روی مسیر رفت منطبق نمی‌باشد. در نتیجه ضمن عوض شدن جهت طی شدن حلقه، خود حلقه نیز تغییر می‌کند (مساحت حلقه کوچکتر می‌شود). از اینرو زاویه بین میدان‌های دوار استاتور و روتور دیگر $\delta = \delta_{initial}$ نخواهد بود و در نتیجه گشتاور الکترومغناطیسی هیستریزیس نیز کاهش می‌یابد. با کاهش گشتاور هیستریزیس و کمتر شدن از گشتاور بار، ماشین شتاب منفی گرفته و سرعت آن کاهش می‌یابد تا مجدداً به سرعت سنکرون برسد. زمانی که سرعت به سرعت زیر سنکرون کاهش می‌یابد، مجدداً جهت طی شدن حلقه‌ها و همچنین مسیر حرکت آن‌ها تغییر می‌کند (مساحت آن‌ها بیشتر می‌شود) و در نتیجه زاویه بین میدان‌های دوار استاتور و روتور افزایش یافته که منجر به افزایش گشتاور هیستریزیس می‌شود. بنابراین سرعت ماشین مجدداً افزایش می‌یابد تا به سرعت سنکرون رسیده و از این سرعت عبور می‌کند. فرآیند نوسان سرعت و تغییر حلقه‌های هیستریزیس (نوسان زاویه گشتاور

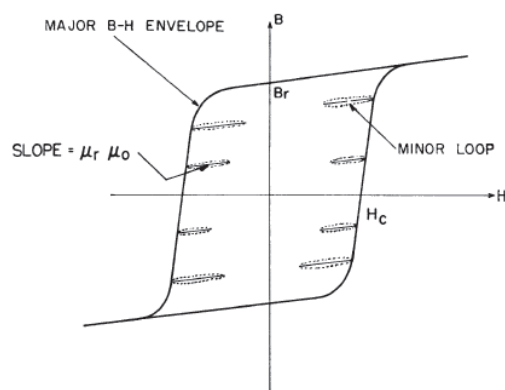
δ) آنقدر ادامه می‌یابد تا یک حلقه بروی هر نقطه از روتور ثابت شده و منجر به تولید گشتاور هیستریزیسی شود که با گشتاور بار در این سرعت برابر شود. در این حالت ماشین به شرایط عملکرد حالت دائم خود رسیده و با سرعت سنکرون به کار خود ادامه می‌دهد.

در بعضی از موارد گشتاور هیستریزیس تولید شده در اولین ورود به سرعت سنکرون کمتر از گشتاور بار در سرعت سنکرون می‌باشد. در این حالت سرعت موتور هیچگاه در حالت دائمی به سنکرون نمی‌رسد و موتور بصورت آسنکرون به کار خود ادامه می‌دهد.

۳-۴-۱: تلفات در ماشین هیستریزیسی

ماشین هیستریزیسی در حالت عملکرد دائمی خود دارای تلفات: (۱) تلفات هیستریزیسی و جریان‌های گردابی مربوط به بخش هسته استاتور، (۲) تلفات اهمی در سیم‌پیچ‌های استاتور، (۳) تلفات مکانیکی شامل اصطحکاک یاتاقان‌ها و تلفات بادخوری، (۴) تلفات سرگردان، (۵) تلفات پارازیتیکی^[۹]، می‌باشد.

اگر شار فاصله هوایی توزیع کاملاً یکنواخت سینوسی نداشته باشد، بر روی حلقه اصلی هیستریزیسی یک سری مسیرهای برگشتی جزئی پدید می‌آید که همان حلقه‌های فرعی می‌باشند. این موضوع در شکل ۳-۸ قابل مشاهده است. تلفات ناشی از این حلقه‌های جزئی متناسب با مساحت آنها است که باعث کاهش توان خروجی، گشتاور و همچنین بازده موتور می‌شود. این تلفات که به تلفات پارازیتیکی موسوم‌اند به دو دلیل زیر ایجاد می‌شوند.



شکل ۳-۸: حلقه هیستریزیس اصلی به همراه حلقه‌های جزئی [۳۵]

۱- تلفات پارازیتیک نیروی محرکه [10]

با توجه به محدودیت‌های موجود در توزیع سینوسی سیم‌پیچی‌های استاتور و توجه به این موضوع که یک توزیع کاملاً یکنواخت سینوسی را نمی‌توان در محیط استاتور ایجاد نمود، در نتیجه توزیع نیروی محرکه (MMF) در فاصله هوایی سینوسی نخواهد بود. به تلفات ناشی از عدم توزیع سینوسی نیروی محرکه در فاصله هوایی تلفات پارازیتیک نیروی محرکه اطلاق می‌شود.

۲- تلفات پارازیتیک شار [10]

به دلیل وجود دندان‌ها شاهد ریپل شار در فاصله هوایی هستیم. با توجه به اینکه فاصله هوایی در زیر دندان‌ها کم و در زیر شیارها این فاصله زیاد است، لذا شاهد غیر یکنواخت بودن شار در فاصله هوایی هستیم. فرکانس تلفات پارازیتیک شار را می‌توان با رابطه ۳-۲۲ بیان نمود. مشاهده می‌شود که فرکانس

-
- 1- Magnetomotive Force Parasitic Loss
 - 2- Magnetomotive Force
 - 3- Flux-Parasitic Losses

$$f_t = 2Sf_1$$

نوسانات شار با تعداد شیارهای بر قطب ماشین (S) رابطه مستقیم دارد. حلقه‌های جزئی بوجود آمده از توزیع غیر سینوسی سیم‌پیچی و یا وجود دندانه‌ها، تلفات هیستریزیس و جریان‌های گردابی (فوکو یا ادی) را در پی دارند

(۲۳-۳)

در رابطه بالا f_1 فرکانس منبع تغذیه و f_i فرکانس تلفات پارازیتیک شار می‌باشد.

تلفات پارازیتیک شار و نیروی محرکه موجب ایجاد تلفات هیستریزیس و جریان‌های گردابی می‌شوند اما بر اساس مطالعات انجام شده قبلی، بخش بزرگی از تلفات پارازیتیک ناشی از وجود حلقه‌های فرعی است که تلفات جریان‌های گردابی را ایجاد می‌کنند.

۳-۴-۲- تحریک اضافی کوتاه مدت [۳۵]

همانطور که گفته شد موتورهای هیستریزیس دارای بهره و ضریب توان پایینی می‌باشند که برای رسیدن به توان بیشتر نیاز به یک موتور با ابعاد بزرگتر است که همین موضوع یک عیب اساسی در این موتورها می‌باشد. سه روش برای کم کردن این عیوب عبارتند از:

۱- اضافه کردن یک مولفه گشتاور به گشتاور اصلی موتور (گشتاور هیستریزیس)

۲- استفاده از رینگ هیستریزیس بزرگتر

۳- تحریک اضافی کوتاه مدت

در روش سوم (روش تحریک اضافی) ولتاژ ورودی به موتور در سرعت سنکرون به‌طور پیوسته تا مقدار nV_i افزایش یافته و سپس بطور پیوسته به مقدار V_i کاهش می‌یابد. در این روش n ضریب تحریک نامیده می‌شود. مزیت این روش نسبت به دو روش دیگر عدم تغییر در ساختار موتور است.

۳-۴-۳ مواد مغناطیس دائم استفاده شده در موتورهای هیستریزیس

نوع ماده بکار رفته در روتور موتورهای هیستریزیس تاثیر بسیار زیادی در مشخصه عملکردی موتور دارد. از جمله مواد مغناطیس دائم مورد استفاده در روتور این دسته از موتورها می‌توان به آلیاژهایی همچون آهن کبالت وانادیوم یا به اختصار P6 با ترکیب Fe-Co-V، آلیاژ آهن-۵٪ کبالت Fe-Co، آلنیکوها Fe-Co-Ni-Al، آلیاژ آهن- کروم- نیکل- مولیبدن-کربن Fe-Cr-Ni-Mo-C و آلیاژ آهن-کروم- کبالت Fe-Cr-Co اشاره نمود. مشخصات مغناطیسی و نمودارهای مربوط به چگالی شار این دسته از مواد بسیار نایاب و در مواردی غیر قابل دسترسی است و برای مشخص کردن مختصات مغناطیسی این مواد نیاز به دستگاه‌های آنالیز مواد پیشرفته می‌باشد. برای انتخاب نوع ماده مورد استفاده در روتور موتورهای هیستریزیس باید موارد زیر را در نظر داشت:

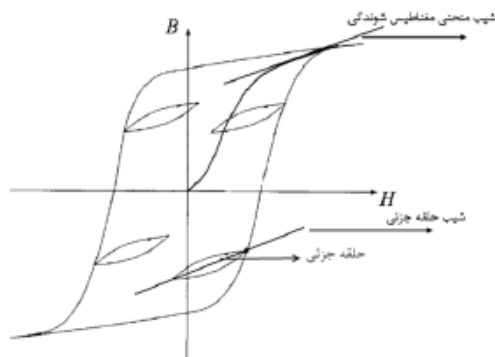
۱- ماکزیمم راندمان موتور در حلقه‌ی نرمال اتفاق می‌افتد. هرچه چگالی شار پسماند و نفوذپذیری مغناطیسی مربوط به ماده مورد استفاده در روتور بیشتر باشد، جریان ورودی به موتور کمتر و در نتیجه تلفات اهمی موتور کمتر است.

۲- توان خروجی موتور هیستریزیس متناسب با سطح حلقه آن و حجم ماده روتور است. هرچه سطح حلقه کاری ماده هیستریزیس و حجم آن بیشتر باشد، توان و متناسب با آن گشتاور خروجی موتور بیشتر است.

۳- با توجه به خودراه‌انداز بودن موتور هیستریزیس، گشتاور ناشی از جریان‌های گردابی از لحظه راه‌اندازی تا رسیدن به سرعت سنکرون، به مولفه اصلی گشتاور اضافه می‌شود. این مقدار گشتاور که ناشی از جریان‌های گردابی است به مقاومت ویژه ماده بستگی دارد. از اینرو می‌توان با انتخاب مناسب ماده هیستریزیس گشتاور راه‌اندازی موتور را بهبود بخشید.

۴- شیب منحنی مغناطیس‌شوندگی ماده در نقاط ماکزیمم حلقه‌های کاری آن ماده کمترین مقدار را داشته باشد. مطابق شکل ۳-۹ هارمونیک‌های نیروی محرکه القایی موجب ایجاد حلقه‌های جزئی در حلقه

اصلی ماده می‌شوند که منبع اصلی تولید تلفات پارازیتیک در موتورهای هیستریزیس محسوب می‌شوند. شیب این حلقه‌های جزئی با شیب منحنی مغناطیس شونده‌گی ماده روتور در نقطه ماکزیمم تقریباً یکسان است.



شکل ۳-۹: منحنی مغناطیس‌شونده‌گی ماده هیستریزیس با حلقه‌های جزئی [۳۵]

۵- مواد هیستریزیس عموماً سختی مکانیکی بالایی دارند. از اینرو مشکلات مربوط به ساخت روتور این دسته از موتورها اهمیت بالای برخوردار است و هنگام طراحی موتور انتخاب نوع ماده از اهمیت بالایی برخوردار است.

۳-۴-۴ مدل تحلیلی موتور هیستریزیس تخت

برای استخراج مدل تحلیلی ماشین‌های الکتریکی از دو روش کلی استفاده می‌شود:

۱- استفاده از قانون مدار آمپر

۲- استفاده از معادلات ماکسول

استفاده از روش‌های عددی منجر به ارائه یک مدل تحلیلی با جزئیات بیشتر می‌شود اما پیچیدگی‌های بیشتری را نسبت به روش تحلیلی دارد. در مدل‌سازی به روش تحلیلی، یک سری پیش‌فرض‌ها برای

ساده‌تر شدن مدل در نظر گرفته می‌شود. ساده‌تر بودن و همچنین قابلیت درک در مدل‌سازی تحلیلی باعث شده است که همچنان این روش نسبت به روش عددی همچنان بیشتر مورد استفاده قرار بگیرد.

۳-۴-۵ روش تحلیلی برای استخراج مدل موتور هیستریزیس نوع تخت

برای بدست آوردن مدل تحلیلی موتور هیستریزیس از قانون مداری آمپر استفاده شده است. این مدل تحلیلی برای هرفاز از موتور هیستریزیس یک مدار معادل ارائه می‌دهد که پارامترهای آن با توجه به ابعاد ماشین، نوع ماده هیستریزیس بکار رفته در آن و ولتاژ اعمال شده به آن قابل محاسبه هستند. همانطو که پیش‌تر نیز به آن اشاره شد در مدل‌سازی تحلیلی برای ساده‌سازی مساله، از یک سری پیش‌فرض بعنوان اطلاعات مساله استفاده می‌شود که به شرح زیر است:

- ۱- موتور در سرعت سنکرون و در حداکثر گشتاور بار خود قرار دارد.
- ۲- توزیع میدان مغناطیسی در روی دیسک‌ها بصورت یکنواخت می‌باشد و به موقعیت محوری نقاط مختلف روی دیسک‌های روتور وابسته نیست.
- ۳- یک مجموعه جریان سه فاز متعادل در سیم‌پیچ‌های استاتور با توزیع یکنواخت سینوسی جاری است.
- ۴- نفوذپذیری مغناطیسی هسته استاتور بی‌نهایت در نظر گرفته می‌شود و مقدار افت mmf هسته استاتور در راکتانس پراکندگی منظور می‌شود.
- ۵- استفاده از ضریب کارتر به منظور تصحیح طول فاصله هوایی (با اعمال این ضریب اثر دندانها و شیار استاتور در نظر گرفته می‌شود)
- ۶- چگالی شار و شدت میدان مغناطیسی در فاصله هوایی فقط دارای مولفه شعاعی و در روتورهای دیسکی فقط دارای مولفه محیطی هستند.
- ۷- وجود هارمونیک‌های مرتبه بالاتر در توزیع شدت میدان مغناطیسی در دیسک‌ها باعث ایجاد حلقه‌های جزئی در آن می‌شود. با صرف نظر از این حلقه‌های جزئی تنها حلقه اصلی متناسب با هارمونیک اول

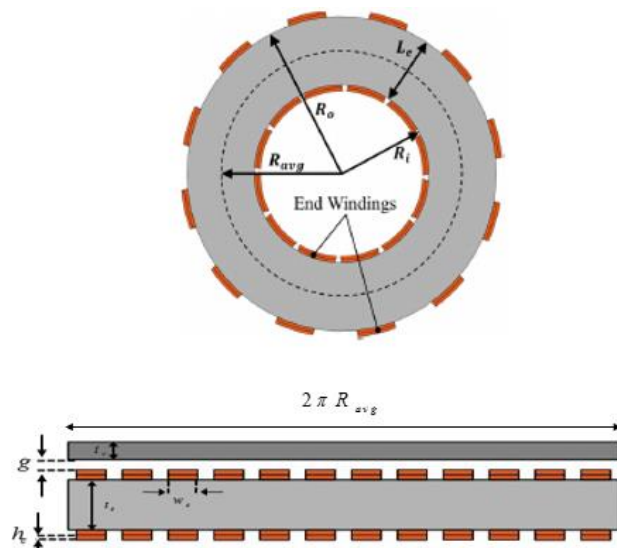
در نظر گرفته می‌شود. در تقریب منحنی هیستریزیس ماده از دو روش تقریب بیضوی و متوازی الاضلاع استفاده می‌شود که در این پایان‌نامه از روش تقریب بیضوی استفاده شده است.

۸- چشم‌پوشی از تلفات آهن در محاسبات و جایگزینی آن با یک مقاومت در مدار معادل الکتریکی موتور.

۹- در ماشین هیستریزیس تخت شار محیطی طول مسیر عبور شار در دیسک هیستریزیس در راستای شعاعی یکنواخت نیست، اما با توجه به اینکه معمولاً در ماشین‌های هیستریزیس نوع تخت شعاع متوسط دیسک هیستریزیس نسبت به ضخامت شعاعی آن بزرگتر است، می‌توان از شعاع متوسط برای کلیه محاسبات مربوط به موتور استفاده کرد.

۳-۴-۶ مدار معادل و محاسبه ولتاژ القایی

شکل ۳-۱۰ نمای دوبعدی از یک ماشین هیستریزیس تخت شار محیطی را نشان می‌دهد که پارامترهای اساسی مربوط به موتور بر روی آن مشخص شده‌اند.



شکل ۳-۱۰: نمای دوبعدی از موتور هیستریزیس تخت شار محیطی [8]

با انتخاب محور فاز a بعنوان مبدا زاویه الکتریکی، زاویه ϕ_{se} حول محور استاتور در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه چگالی هادی‌های توزیع شده در محیط استاتور برای هر فاز بصورت زیر بیان می‌شوند.

$$N_{as} = -N_p \sin(\phi_{se}) \quad (23-3)$$

$$N_{bs} = -N_p \sin\left(\phi_{se} - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (24-3)$$

$$N_{cs} = -N_p \sin\left(\phi_{se} + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (25-3)$$

در سه رابطه بالا N_p حداکثر چگالی هادی هر فاز در محیط استاتور می‌باشد. به منظور رعایت جهت جریان علامت منفی در روابط بالا قرار داده شده است. اگر تعداد قطب‌های ماشین برابر با p ، تعداد دور سیم پیچ استاتور در هر فاز با فرض توزیع سینوسی سیم‌پیچی برابر

است با:

$$N_s = \frac{p}{2} \int_0^\pi N_p \sin \phi_{se} d\phi_{se} = pN_p \quad (26-3)$$

با فرض متعادل بودن جریان سه فاز داریم:

$$i_{ea} = \sqrt{2} I_s \cos(\omega_e t) \quad (27-3)$$

$$i_{eb} = \sqrt{2} I_s \cos\left(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (28-3)$$

$$i_{ec} = \sqrt{2} I_s \cos\left(\omega_e t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (29-3)$$

که در روابط بالا I_s و ω_e به ترتیب جریان موثر هر فاز و فرکانس زاویه‌ای منبع تغذیه موتور می‌باشند.

تابع چگالی جریان بر حسب موقعیت زاویه‌ای حول محیط استاتور که خود تابعی از زمان است را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$j_s(\varphi_{se}, t) = N_{as} i_{ea} + N_{bs} i_{eb} + N_{cs} i_{ec} \quad (30-3)$$

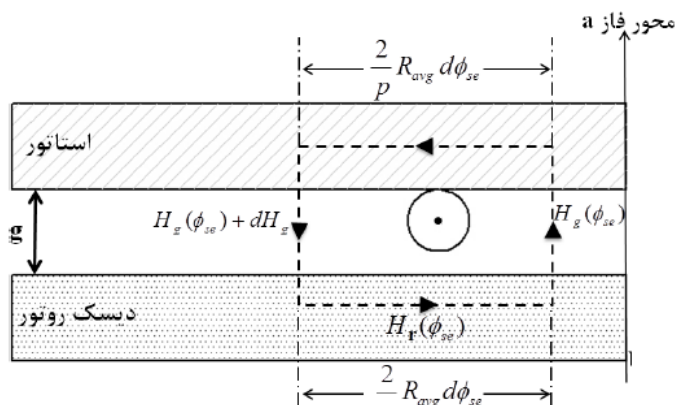
با استفاده از روابط (۲۴-۳) تا (۳۰-۳) معادله (۳-۴) را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$j_s(\varphi_{se}, t) = \left(\frac{m}{2}\right) \left(\frac{N_s}{p}\right) \left(\frac{\sqrt{2}I_s}{a}\right) \sin(\omega_e t - \varphi_{se}) \quad (31-3)$$

در رابطه (۳۲-۳) m و a به ترتیب تعداد فازها و همچنین مسیرهای موازی جریان سیم‌پیچی هر فاز هستند. جریان در جزء دیفرانسیلی $d\varphi_{se}$ حول استاتور برابر است با:

$$j_s(\varphi_{se}, t) = \left(\frac{m}{2}\right) \left(\frac{N_s}{p}\right) \left(\frac{\sqrt{2}I_s}{a}\right) \sin(\omega_e t - \varphi_{se}) d\varphi_{se} \quad (32-3)$$

برای اعمال قانون مداری آمپر مطابق شکل ۳-۱۱ یک مسیر بسته بصورت دیفرانسیلی در نظر گرفته گرفته شده است.



شکل ۳-۱۱: مسیر اعمال قانون مداری آمپر [۳۵]

نتیجه اعمال قانون آمپر در جزء دیفرانسیلی بالا معادله زیر است.

$$-j_s d\varphi_{se} = H_g(\varphi_{se})g - [H_g(\varphi_{se}) + dH_g]g - H_r(\varphi_{se})\frac{2}{p}R_{avg}d\varphi_{se} \quad (33-3)$$

که در رابطه بالا g مقدار فاصله هوایی موثر است. اگر مقدار فاصله هوایی واقعی برابر با g_{act} باشد، رابطه بین فاصله هوایی موثر و واقعی مطابق رابطه زیر است.

$$g = K_c g_{act} \quad (34-3)$$

در رابطه بالا K_c ضریب کارتر نامیده می‌شود که به ابعاد و شکل شیار وابسته است. معادله (33-3) را می‌توان بصورت زیر بازنویسی نمود.

$$j_s(\varphi_{se}, t) = \frac{2}{p}R_{avg}H_r(\varphi_{se}) + g \frac{dH_g(\varphi_{se})}{d\varphi_{se}} \quad (35-3)$$

جهت مثبت میدان در فاصله هوایی از سمت روتور به استاتور است.

شکل ۳-۱۲ یک برش دیفرانسیلی از دیسک هیستریزیس را نشان می‌دهد. با توجه به اصل پیوستگی شار می‌توان ارتباط بین چگالی شار دیسک هیستریزیس B_r و چگالی شار در فاصله هوایی B_g را اینگونه بیان نمود.

$$B_r(t, \varphi_{se})L_e t_r - [B_r(t, \varphi_{se}) + dB_r(t, \varphi_{se})]L_e t_r = B_g(t, \varphi_{se})R_{avg} \frac{2}{p}d\varphi_{se}L_e \quad (36-3)$$

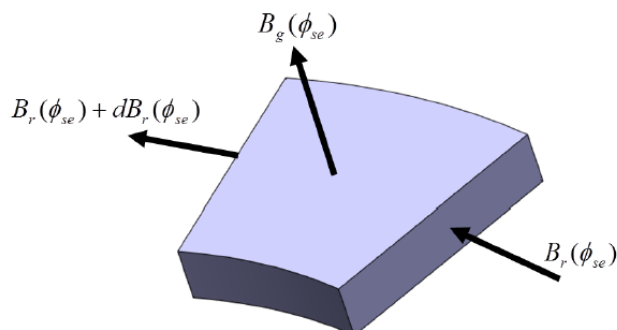
$$-dB_r(t, \varphi_{se})]L_e t_r = B_g(t, \varphi_{se})R_{avg} \frac{2}{p}d\varphi_{se}L_e$$

با ساده‌سازی رابطه بالا معادله زیر بدست می‌آید.

$$(37-3)$$

در رابطه (37-3) $L_e = R_o - R_i$ است. همچنین معادله (38-3) را می‌توان بصورت زیر مرتب‌سازی نمود.

$$B_g(t, \varphi_{se}) = -\frac{pt_r}{2R_g} \frac{dB_r(t, \varphi_{se})}{d\varphi_{se}} \quad (38-3)$$



شکل ۳-۱۲: برش دیفرانسیلی از دیسک هیستریزس [۳۵]

با توجه به تقریب بیضوی در نظر گرفته شده برای منحنی‌های هیستریزس، می‌توان توزیع مولفه‌های محیطی چگالی شار مغناطیسی و شدت میدان دیسک هیستریزس را بصورت زیر بیان نمود.

$$B_r(t, \phi_s) = B_m \cos(\omega_e t - \phi_{se} - \phi_0) \quad (39-3)$$

$$H_r(t, \phi_s) = H_m \cos(\omega_e t - \phi_{se} - \phi_0 + \alpha) = \frac{B_m}{\mu} \cos(\omega_e t - \phi_{se} - \phi_0 + \alpha) \quad (40-3)$$

با تلفیق دو معادله (۳۹-۳) و (۴۰-۳) چگالی شار فاصله هوایی بصورت زیر قابل محاسبه است.

$$B_g(t, \phi_s) = -\frac{pt_r B_m}{2R_{avg}} \sin(\omega_e t - \phi_{se} - \phi_0) \quad (41-3)$$

همچنین مقدار شدت میدان مغناطیسی فاصله هوایی H_g بصورت زیر قابل محاسبه است.

$$H_g(t, \phi_s) = \frac{B_g(t, \phi_s)}{\mu_0} = -\frac{pt_r B_m}{2\mu_0 R_{avg}} \sin(\omega_e t - \phi_{se} - \phi_0) \quad (42-3)$$

با جایگذاری روابط (۳۱-۳)، (۴۰-۳) و (۴۲-۳) در معادله (۳۶-۳) خواهیم داشت.

$$\left(\frac{m}{2}\right)\left(\frac{N_s}{p}\right)\left(\frac{\sqrt{2}I_s}{a}\right)\sin(\omega_e t - \varphi_{se}) = \left(\frac{2}{p}\right)R_{avg}\left(\frac{B_m}{\mu}\right)\cos(\omega_e t - \varphi_{se} - \phi_0 + \alpha) + \quad (43-3)$$

$$\frac{gpt_r B_m}{2\mu_0 R_{avg}} \cos(\omega_e t - \varphi_{se} - \phi_0 + \alpha)$$

با مساوی صفر قرار دادن رابطه بالا می توان مقدار ϕ_0 را از رابطه (43-3) بدست آورد.

$$\phi_0 = \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \left(\frac{\frac{2R_{avg}}{p\mu} \sin \alpha}{\frac{2R_{avg}}{p\mu} \cos \alpha + \frac{gpt_r}{2\mu_0 R_{avg}}} \right) \quad (44-3)$$

همچنین اگر در رابطه (44-3) مقدار $(\omega_e t - \varphi_{se})$ را برابر با $\frac{\pi}{2}$ قرار دهیم ماکزیمم چگالی شار رینگ

هیستریزیس بدست می آید.

$$B_m = \frac{\left(\frac{m}{2}\right)\left(\frac{N_s}{p}\right)\left(\frac{\sqrt{2}I_s}{a}\right)}{\frac{2R_{avg}}{p\mu} \sin(\phi_0 - \alpha) + \frac{gpt_r}{2\mu_0} R_{avg} \sin \phi_0} \quad (45-3)$$

با ترکیب دو رابطه (43-3) و (44-3)، رابطه (45-3) را می توان بصورت زیر نوشت.

$$B_m = \frac{\left(\frac{m}{2}\right)\left(\frac{N_s}{p}\right)\left(\frac{\sqrt{2}I_s}{a}\right)}{\sqrt{\left(\frac{gpt_r}{2\mu_0 R_{avg}}\right)^2 + \left(\frac{2R_{avg}}{p\mu}\right)^2} + 2\frac{gt_r}{\mu\mu_0} \cos \alpha} \quad (46-3)$$

برای محاسبه ولتاژ القایی هر فاز، ابتدا شار عبوری از یک حلقه سیم پیچ فاز "a" که در زاویه (φ_{se}) و

قرار گرفته است (دو سر کلاف فاز a)، بصورت زیر محاسبه می شود

$$\phi_{Loop} = \int_{\varphi_{se}}^{\varphi_{se} + \pi} B(\varphi_{se}) R_{avg} \frac{2}{p} L_e d\phi_{se} = 2L_e t_r B_m \cos(\omega_e t - \phi_{se} - \phi_0) \quad (47-3)$$

شار پیوندی سیم‌پیچ فاز "a" اینگونه محاسبه می‌شود.

$$\lambda_a = \frac{p}{2} \int_{\pi}^{2\pi} N_{as} \varphi_{Loop} d\varphi_{se} \quad (48-3)$$

با قرار دادن دو معادله (3-24) و (3-47) در معادله (3-48) داریم.

$$\lambda_a = -\frac{N_s L_e t_r B_m \pi}{2} \sin(\omega_e t - \phi_0) \quad (49-3)$$

با گرفتن مشتق از شار پیوندی سیم‌پیچ می‌توان ولتاژ القایی را در آن را اینگونه بدست آورد.

$$e_f = \frac{1}{a} \frac{d\lambda_a}{dt} = -\frac{N_s L_e t_r B_m \pi \omega_e}{2a} \cos(\omega_e t - \phi_0) \quad (50-3)$$

با تقسیم طرفین معادله (3-36) بر $(m/2)(N_2/2)(1/a)$ و مساوی قرار دادن $\varphi_{se} = -\pi/2$ خواهیم داشت.

$$\sqrt{2} I_s \sin\left(\omega_e t + \frac{\pi}{2}\right) = \sqrt{2} I_s \cos(\omega_e t) = \frac{4R_{avg} B_m a}{mN_s \mu} \cos\left(\omega_e t - \phi_0 + \alpha + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{gt_r B_m p^2 a}{mN_s R_{avg} \mu_0} \cos\left(\omega_e t - \phi_0 + \frac{\pi}{2}\right) \quad (51-3)$$

طرف چپ معادله (3-51) بیانگر جریان ورودی فاز a است. طرف راست معادله از دو مولفه جریان تشکیل شده است. این دو مولفه را می‌توان با i_g و i_h نشان داد پس داریم.

$$i_a = i_g + i_h \quad (52-3)$$

$$i_h = \frac{4R_{avg} B_m a}{mN_s \mu} \cos\left(\omega_e t - \phi_0 + \alpha + \frac{\pi}{2}\right) \quad (53-3)$$

$$i_g = \frac{gt_r B_m p^2 a}{mN_s R_{avg} \mu_0} \cos\left(\omega_e t - \phi_0 + \frac{\pi}{2}\right) \quad (54-3)$$

با توجه به روابط (۲۸-۳)، (۵۰-۳)، (۵۳-۳) و (۵۴-۳) فازورهای زیر را می‌توان تعریف نمود.

$$I_a = I_s \angle 0 \quad (۵۵-۳)$$

$$E_f = \frac{N_s L_e t_r B_m \omega_e \pi}{2\sqrt{2}a} \angle \pi - \phi_0 \quad (۵۶-۳)$$

$$i_g = \frac{gt_r B_m p^2 a}{\sqrt{2mN_s R_{avg} \mu_0}} \angle \frac{\pi}{2} - \phi_0 \quad (۵۷-۳)$$

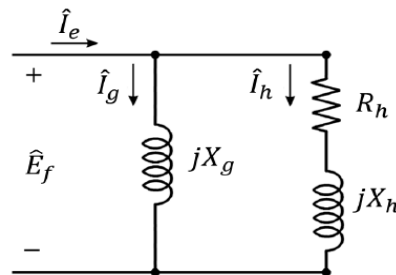
$$i_h = \frac{4R_{avg} B_m a}{\sqrt{2mN_s \mu}} \angle \frac{\pi}{2} - \phi_0 + \alpha \quad (۵۸-۳)$$

با توجه به روابط بالا می‌توان راکتانس فاصله هوایی X_g و امپدانس هیستریزیس Z_h را مطابق زیر تعریف نمود.

$$Z_h = \frac{E}{I} = \frac{m \mu N_s^2 L_e t_r \omega_e \pi}{8a^2 R_{avg}} \angle \frac{\pi}{2} - \alpha = R_h + jX_h \quad (۵۹-۳)$$

$$X_g = \frac{|E_f|}{|I_g|} = \frac{m \mu_0 N_s^2 L_e \omega_e \pi}{2ga^2 p^2} \quad (۶۰-۳)$$

در نتیجه مدار معادل ابتدایی بر فاز ماشین هیستریزیس استوانه‌ای مطابق شکل ۱۳-۳ می‌باشد.



شکل ۱۳-۳: مدار معادل بر فاز ماشین هیستریزیس استوانه‌ای شار محیطی [۳۵]

مطابق مرجع [۲] رابطه بین تعداد دورهای سیم‌پیچی واقعی موتور N_{ph} و تعداد دورهای معادل سینوسی آن N_s برابر است با:

$$N_s = \frac{4K_w}{\pi} N_{ph} \quad (۶۱-۳)$$

در رابطه (۶۱-۳) K_w ضریب سیم‌پیچی است.

۳-۶-۳ محاسبه تلفات آهن و مقاومت متناظر با آن

مطابق مرجع [37] و با داشتن منحنی تلفات آهن به ازای هر کیلوگرم از ماده هسته استاتور می‌توان تلفات آهن ماشین هیستریزیس را مطابق زیر محاسبه نمود.

$$P_{Fe} = P_{1/50} \left(\frac{f}{50} \right)^{4/3} [k_{adt} B_{mt}^2 m_t + k_{ady} B_{my}^2 m_y] \quad (۶۲-۳)$$

در رابطه بالا $P_{1/50}$ تلفات یک کیلوگرم از ماده هسته استاتور در چگالی شار یک تسلا و فرکانس ۵۰ هرتز می‌باشد. f ، B_{mt} ، m_t ، m_{my} و m_y به ترتیب فرکانس کار ماشین، چگالی شار ماکزیمم در دندانه‌ها، وزن دندانه‌ها چگالی شار حداکثر در یوغ استاتور و وزن یوغ استاتور می‌باشند. همچنین k_{ady} و k_{adt} دو ضریب ثابت با مقادیر $1.7 \leq k_{adt} \leq 2$ و $2.4 \leq k_{ady} \leq 4$ هستند.

برای محاسبه تلفات ماشین هیستریزیس محاسبه شار زیر یک قطب لازم است. با داشتن توزیع چگالی شار فاصله هوایی مطابق رابطه (۶۲-۳)، می‌توان شار زیر یک قطب را محاسبه نمود.

$$B_g(t=0, \phi_{se}) = \frac{pt_r B_m}{2R_{avg}} \sin(\phi_{se} - \phi_0) \quad (۶۳-۳)$$

$$\Phi_p = \int_{-\phi_0}^{-\phi_0 + \frac{\pi}{2}} \frac{2}{p} B_g(t=0, \phi_{se}) R_{avg} L_e d\phi_{se} = 2t_r L_e B_m \quad (۶۴-۳)$$

همچنین ماکزیمم چگالی شار عبوری از یوغ استاتور برابر با نصف چگالی شار زیر یک قطب است.

$$\Phi_{my} = \frac{1}{2} \Phi_p = t_r L_e B_m \quad (65-3)$$

سطح مقطع عبور شار از یوغ استاتور برابر است با:

$$S_y = L_e d_y \quad (66-3)$$

در رابطه (66-3) d_y ضخامت محوری یوغ استاتور است. با توجه به رابطه (65-3) و (66-3) حداکثر چگالی شار یوغ استاتور برابر است با:

$$B_{my} = \frac{\Phi_{my}}{S_y} = \frac{t_r B_m}{d_y} \quad (67-3)$$

ماکزیمم چگالی شار در دندانه استاتور B_{mt} مربوط به دندانه‌ای است که چگالی شار فاصله هوایی در مجاورت آن حداکثر باشد. با توجه به رابطه (64-3) در زمان $t=0$ ماکزیمم چگالی شار فاصله هوایی در زاویه $\phi_{se} = \pi/2 - \phi_0$ اتفاق می‌افتد. در نتیجه شار عبوری از یک گام شیار در زاویه مذکور برابر است با:

$$\Phi_{ms} = \int_{\frac{\pi}{2} - \phi_0 - \tau_s/2}^{\frac{\pi}{2} - \phi_0 + \tau_s/2} \frac{2}{p} B_g(t=0, \phi_{se}) R_{avg} L_e d\phi_{se} = 2t_r L_e B_m \sin \frac{\tau_s}{2} \quad (68-3)$$

که در رابطه بالا B_{mt} گام الکتریکی شیار است. سطح مقطع هر شیار برابر است با:

$$S_t = L_e d_t \quad (69-3)$$

d_t در رابطه بالا عرض متوسط دندانه است. با فرض عبور تمام شار بدست آمده از رابطه (68-3)، چگالی شار دندانه برابر است با:

$$B_{mt} = \frac{\Phi_{mt}}{S_t} = \frac{\Phi_{ms}}{S_t} = \frac{2t_r}{d_t} B_m \sin \frac{\tau_s}{2} \quad (70-3)$$

برای محاسبه جرم یوغ و دندانه ابتدا باید حجم آنها را محاسبه نمود و با ضرب نمودن در چگالی جرمی ماده استاتور ρ_{core} می‌توان جرم هرکدام از آنها را محاسبه نمود. مطابق رابطه‌های زیر حجم یوغ استاتور V_y و حجم کل دندانه‌های V_t آن برابر است با:

$$V_t = Sh_t d_t L_e \quad (71-3)$$

$$V_y = 2\pi R_{avg} L_e d_y \quad (72-3)$$

$$m_t = V_t \rho_{core} \quad (73-3)$$

$$m_y = V_y \rho_{core} \quad (74-3)$$

با قرار دادن روابط (۶۸-۳)، (۷۰-۳)، (۷۳-۳) و (۷۴-۳) در رابطه (۶۳-۳) مقدار تلفات آهن ماشین را می‌توان محاسبه نمود. از طرف دیگر این مقدار تلفات را می‌توان با یک مقاومت که موازی با شاخه X_g شکل ۱۳-۳ است مدل نمود و به مدار معادل بر فاز ماشین هیستریزیس اضافه نمود. مقدار این مقاومت موازی که با R_c نشان داده شده است برابر است با:

$$R_c = \frac{E_f^2}{(P_{Fe} / m)} \quad (75-3)$$

طرف راست تساوی بالا معرف تلفات بر فاز هسته استاتور است.

۳-۶-۳ محاسبه افت mmf در هسته استاتور و اصلاح راکتانس مغناطیس‌کنندگی

افت mmf در هسته استاتور نیازمند یک جریان مغناطیس‌کنندگی پس‌فاز اضافی است که در تحلیل مدار معادل بر فاز ماشین هیستریزیس از آن چشم‌پوشی شده است. متعاقبا وجود این جریان پس‌فاز اضافی موجب افزایش راکتانس X_g می‌شود که از مقدار واقعی آن بیشتر است. از طرف دیگر نفوذپذیری مغناطیسی هسته استاتور بی‌نهایت در نظر گرفته شده است در حالی که مقدار آن بی‌نهایت نیست و همین موضوع باعث افت mmf در هسته استاتور می‌شود. در نتیجه راکتانس مغناطیس‌کنندگی X_g باید اصلاح شود که در ادامه به این موضوع پرداخته شده است.

حداکثر چگالی شار ماکزیمم در یوغ و دندانه‌های استاتور از روابط (۶۸-۳) و (۷۰-۳) بدست می‌آیند. مقدار متوسط چگالی شار در یوغ استاتور B_{avg} نیز بصورت زیر است:

$$B_{avg} = \frac{2}{\pi} B_{my} = \frac{2t_r}{\pi d_y} B_m \quad (76-3)$$

با توجه به روابط (۷۰-۳) و (۷۶-۳) می‌توان نفوذپذیری مغناطیسی نسبی یوغ استاتور μ_{ry} و همچنین نفوذپذیری نسبی دندانه μ_r آن را با استفاده از منحنی مغناطیس‌شوندگی هسته استاتور محاسبه نمود.

$$H_{avg} = \frac{B_{avg}}{\mu_0 \mu_r} = \frac{2t_r}{\pi \mu_r \mu_0 d_y} B_m \quad (77-3)$$

مقدار شدت میدان مغناطیسی در یوغ استاتور و همچنین ماکزیمم شدت آن در دندانه‌های استاتور برابر است با:

$$K_r g H_{mg} = g H_{mg} + h_t H_{mt} + \frac{\pi R_{avg}}{p} H_{avg} \quad (78-3)$$

$$H_{mt} = \frac{B_{mt}}{\mu_0 \mu_r} = \frac{2t_r}{\mu_0 \mu_r d_t} B_m \sin \frac{\tau_s}{2} \quad (79-3)$$

مقدار ماکزیمم شدت میدان فاصله هوایی از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$H_{mg} = \frac{B_m p t_r}{2 \mu_0 R_{avg}} \quad (80-3)$$

با تعریف ثابت K_r بعنوان یک ضریب ثابت می‌توان افت mmf در هسته استاتور را لحاظ نمود. با در نظر گرفتن این ضریب طول فاصله هوایی موثر بیشتر از قبل شده در نتیجه مقدار جریان و راکتانس مغناطیس‌کنندگی نیز تغییر می‌کنند. K_r مطابق زیر تعریف می‌شود.

با جایگذاری روابط (77-3) تا (79-3) مقدار ضریب K_r اینگونه محاسبه می‌شود.

$$K_r = 1 + \frac{4h_t R_{avg} \sin(\frac{\tau_s}{2})}{p g \mu_r d_t} + \frac{8R_{avg}^2}{p^2 g \mu_r d_y} \quad (81-3)$$

با تغییر طول فاصله هوایی موثر، مقدار جریان و راکتانس مغناطیس‌کنندگی نیز مطابق روابط زیر اصلاح می‌شوند.

$$X_g = \frac{|E_f|}{|I_g|} = \frac{m \mu_0 N_s^2 L_e \omega_e \pi}{2K_r g a^2 p^2} \quad (82-3)$$

$$i_g = \frac{K_r g t_r B_m p^2 a}{m N_s R_{avg} \mu_0} \cos(\omega_e t + \frac{\pi}{2} - \phi_0) \quad (۸۳-۳)$$

۳-۳-۴ محاسبه راکتانس پراکندگی

مطابق مرجع [37] برای محاسبه راکتانس پراکندگی در ماشین، ابتدا شار پراکندگی ماشین را که از سه مولفه (۱) شار پراکندگی شیار λ_{ls} ، (۲) شار پراکندگی کله سیم‌ها (سیم‌پیچ‌های انتهایی) λ_{le} و شار تفاضلی یا هارمونیک‌ها λ_{ld} تشکیل شده است را محاسبه نموده و در نهایت داریم:

$$X_l = 8\pi\mu_0 f \frac{N_{ph}^2 L_e}{pq} (\lambda_{ld} + \lambda_{le} + \frac{L_{end}}{L_e} + \lambda_{ls}) \quad (۸۴-۳)$$

در رابطه بالا μ_0 ، N_{ph} ، L_e ، q و L_{end} به ترتیب ضریب نفوذپذیری مغناطیسی در خلا، تعداد دور سیم‌پیچ بر فاز، طول محوری ماشین، تعداد شیارهای استاتور بر قطب بر فاز و طول کله سیم‌های انتهایی هر کلاف استاتور می‌باشند.

۳-۳-۴-۱ محاسبه شار پراکندگی شیار

با توجه به نوع شیار شار پراکندگی برای آن نیز متفاوت است. بطور کلی شار پراکندگی شیار از سه قسمت (۱) نشت در بخش داخلی شیار، (۲) نشت در دهانه شیار و (۳) نشت در دندانه‌های مجاور در فاصله هوایی تشکیل شده است. مطابق مرجع [37] شار نشتی برای یک شیار مستطیلی شکل با یک سیم‌پیچی یک طبقه گام کامل برابر است با:

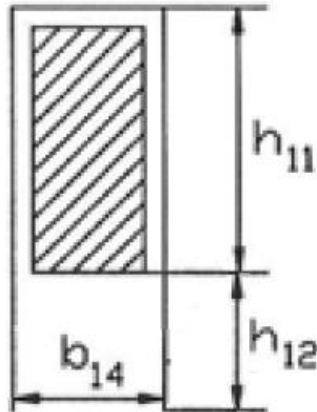
$$\lambda_{ls} = \lambda_{ls1} + \lambda_{ls2} \quad (۸۵-۳)$$

که در رابطه (۸۵-۳) λ_{ls1} و λ_{ls2} مطابق زیر تعریف می‌شوند.

$$\lambda_{ls2} \approx \frac{\frac{5g_{act}}{b_{14}}}{5 + \frac{4g_{act}}{b_{14}}} \quad (۸۶-۳)$$

$$\lambda_{s1} = \frac{h_{11}}{3b_{14}} + \frac{h_{12}}{b_{14}} \quad (87-3)$$

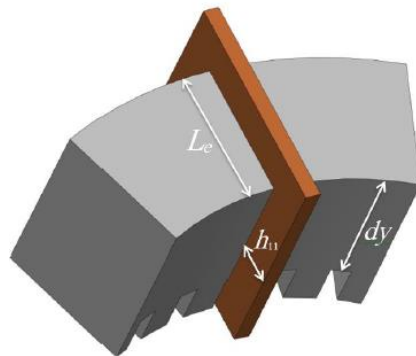
شده‌اند. h_{11} ، h_{12} و b_{14} ابعاد مربوط به شیار هستند که در شکل ۱۴-۳ برای یک شیار مستطیل شکل نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۴-۳: نمایی از یک شیار مستطیلی [۳۵]

۳-۳-۶-۲ پراکندگی سیم‌پیچ انتهایی

سیم‌پیچی استاتور موتور مورد مطالعه در این پایان‌نامه از نوع تروئیدال دو طبقه با گام ناقص است که در فصل‌های آینده در مورد آن بیشتر توضیح داده خواهد شد. در این موتور تنها بخشی از سیم‌پیچ که روبروی دیسک‌ها قرار می‌گیرند مفید هستند و بقیه جزء سیم‌پیچ انتهایی به حساب می‌آیند. با توجه به دو طرفه بودن موتور و با در نظر گرفتن شکل ۱۵-۳ طول سیم‌پیچ انتهایی برابر است با:



شکل ۱۵-۳: نمایی از سیم‌پیچ انتهایی موتور تخت دوطرفه [۳۵]

مقادیر h_{11} و d_y در شکل ۳-۱۵ نشان داده شده است.

مطابق مرجع [37] ضریب نشت انتهایی λ_{le} برای بیشتر سیم‌پیچ‌ها از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\lambda_{le} = 0.3q \quad (۸۸-۳)$$

۳-۴-۶-۳ محاسبه پراکندگی تفاضلی

ضریب پراکندگی تفاضلی یا هارمونیک‌های شار λ_{ld} از رابطه زیر حساب می‌شود:

$$L_{end} = 2dy + 4h_{11} \quad (۸۹-۳)$$

$$\lambda_{ld} = \frac{mq\tau_p k_w^2}{\pi^2 g K_c} \tau_d \quad (۹۰-۳)$$

در رابطه (۹۰-۳) τ_p گام قطب و τ_d بصورت زیر تعریف می‌شود.

$$\tau_d = \frac{\pi^2(10q^2 + 2)}{27} \sin^2\left(\frac{\pi}{6q}\right) - 1 \quad (۹۱-۳)$$

در رابطه (۹۰-۳) K_c ضریب کارتر است که برای شیار شکل ۳-۱۴ بصورت زیر بیان می‌شود.

$$K_c = \frac{\tau_s}{\tau_s - g\gamma} \quad (۹۲-۳)$$

که مقدار γ از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\gamma = \frac{4}{\pi} \left[\frac{b_{14}}{2g} \tan^{-1}\left(\frac{b_{14}}{2g}\right) \ln \sqrt{1 + \left(\frac{b_{14}}{2g}\right)^2} \right] \quad (۹۳-۳)$$

۳-۴-۵ محاسبه مقاومت اهمی سیم‌پیچ‌ها

بر طبق رابطه زیر مقاومت dc هر فاز لز رابطه زیر حساب می‌شود.

$$R_{dc} = \frac{N_{ph} L_{avg}}{a \sigma S_a} \quad (94-3)$$

در رابطه بالا L_{avg} ، σ و S_a به ترتیب طول متوسط یک دور سیم‌پیچ، ضریب رسانایی الکتریکی ویژه هادی و سطح مقطع هادی می‌باشند. طول متوسط یک دور سیم‌پیچی L_{avg} برابر است با:

$$L_{avg} = 2(L_e + L_{end}) \quad (95-3)$$

از رابطه زیر می‌توان مقاومت ac هر فاز استاتور را بدست آورد.

$$R_s = K_R R_{dc} \quad (96-3)$$

در رابطه بالا به منظور در نظر گرفتن اثر پوستی برای مقاومت اهمی سیم‌پیچ در جریان متناوب، ضریب K_R در مقاومت dc ضرب شده است. K_R را می‌توان از رابطه زیر حساب نمود.

$$K_R = \varphi(\xi) + \left[\frac{m_{sl}^2 - 1}{3} - \left(\frac{m_{sl}}{4} \right)^2 \right] \psi(\xi) \quad (97-3)$$

که K_R تعداد هادی‌های قرار گرفته روی یکدیگر در سیم‌پیچی درون یک شیار است. توابع K_R و $\psi(\xi)$ مطابق مرجع [37] بصورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\psi(\xi) = 2\xi \frac{\sinh \xi - \sin \xi}{\cosh \xi + \cos \xi} \quad (98-3)$$

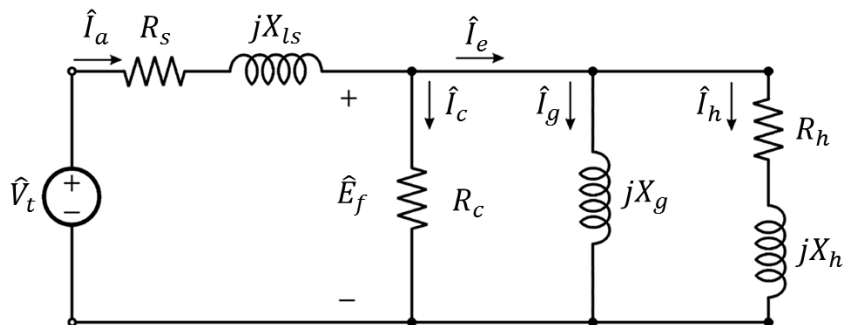
$$\varphi(\xi) = \xi \frac{\sinh 2\xi + \sin 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi} \quad (99-3)$$

همچنین مقدار ثابت از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\xi = h_c \sqrt{\pi \mu_0 f \sigma} \quad (100-3)$$

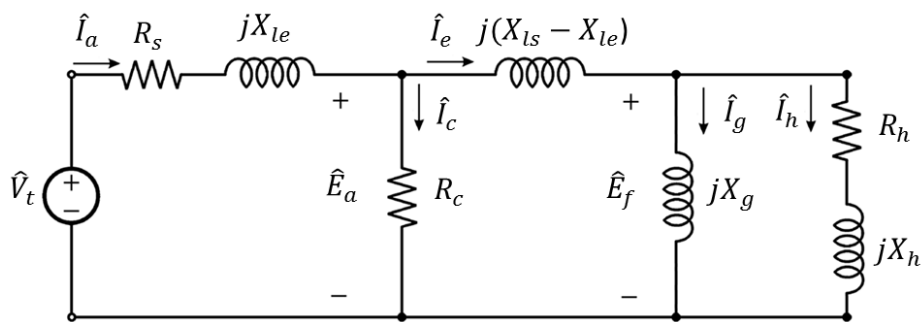
h_c ارتفاع یک هادی در هر شیار است.

پس از محاسبه راکتانس پراکندگی و مقاومت هر فاز استاتور و همچنین با توجه به مدار معادل اولیه بدست آمده برای ماشین هیستریزیس، می توان مدار معادل بر فاز کامل این ماشین را در حالت دائمی و برای ماشین هیستریزیس تخت شار محیطی، بصورت شکل ۳-۱۶ ترسیم نمود.



شکل ۳-۱۶: مدار معادل موتور هیستریزیس تخت شار محیطی در حالت دائمی [۳۵]

با توجه به نتایج مرجع [38] می توان یک مدل مداری دیگر برای ماشین هیستریزیس تخت ارائه نمود. از طرف دیگر در مدل سازی ماشین هیستریزیس استوانه ای با استفاده از روش اجزاء محدود مولفه های پراکندگی شار بجز مولفه پراکندگی سیم پیچ انتهایی بطور مستقیم در محاسبه ولتاژ القایی هر فاز ماشین دخیل هستند. بنابراین برای مدل سازی تحلیلی ماشین هیستریزیس تخت از مدار معادل نشان داده شده در شکل ۳-۱۶ نیز می توان استفاده نمود.



شکل ۳-۱۷: مدار معادل کامل موتور هیستریزیس تخت شار محیطی در حالت دائمی [38]

۳-۴ تئوری عملکرد موتور رلوکتانس

موتورهای رلوکتانسی همانند سایر موتورهای الکتریکی دیگر از یک استاتور و روتور تشکیل شده‌اند. تنها تفاوت آن‌ها با موتورهای سنکرون دیگر، عدم وجود مواد مغناطیس دائم و سیم‌پیچی در روتور است. گشتاور تولید شده در این دسته از موتورها ناشی از تمایل روتور به کاهش رلوکتانس می‌باشد. به دلیل عدم وجود سیم‌پیچی در روتور و همچنین مواد مغناطیس دائم در آن، ساختار این دسته از ماشین‌ها بسیار ساده، ارزان و با استحکام مکانیکی بالا می‌باشند. بطور کلی می‌توان این دسته از موتورها را در سه دسته به شرح زیر تقسیم‌بندی نمود.

- موتورهای سنکرون رلوکتانسی^۱
- موتورهای پله‌ای رلوکتانس متغیر^۲
- موتورهای سوئیچ رلوکتانس

گشتاور تولید شده در یک ماشین سنکرون قطب برجسته که از دو مولفه گشتاور الکترومغناطیسی و گشتاور رلوکتانسی تشکیل شده است بر طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$T = \left(\frac{3V_t E_f}{X_d} \sin \delta + 3 \frac{X_d - X_q}{2X_d X_q} V_t^2 \sin 2\delta \right) / \omega_{syn} \quad (۱۰۱-۳)$$

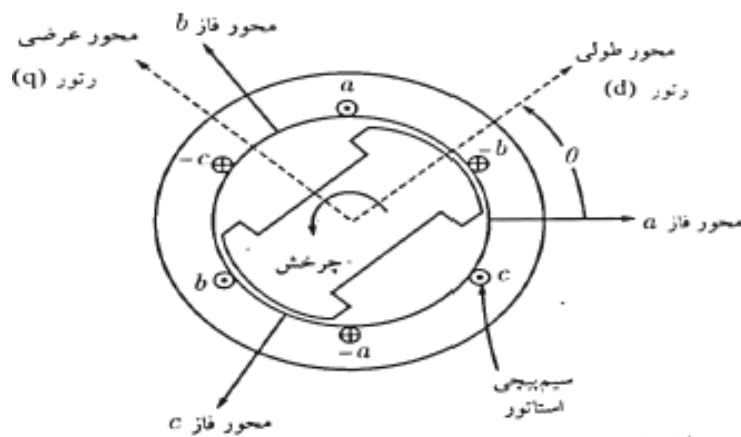
با توجه به اینکه در موتور رلوکتانسی سیم‌پیچ میدان بر روی روتور قرار ندارد ($E_f = 0$)، لذا مولفه گشتاور الکترومغناطیسی رابطه (۱۰۱-۳) حذف شده و معادله گشتاور برای موتور رلوکتانسی بصورت زیر است.

$$T = \frac{3}{\omega_{syn}} \left(\frac{X_d - X_q}{2X_d X_q} \right) V_t^2 \sin 2\delta \quad (۱۰۲-۳)$$

1- Synchronous reluctance motors
2- Variable-reluctance stepper motors

در رابطه بالا V_t ولتاژ موثر فاز، X_d و X_q راکتانس‌های محور طولی و عرضی ماشین و δ زاویه بین محور مغناطیسی روتور و میدان دوار استاتور است. همانطور که در رابطه (۳-۱۰۲) مشاهده می‌شود تنها مولفه گشتاور، گشتاور تداخلی ناشی از عکس‌العمل دو میدان روتور و استاتور می‌باشد. در طراحی موتور رلوکتانسی هرچه نسبت اندوکتانس محور طولی به اندوکتانس محور عرضی بیشتر باشد گشتاور تولید شده توسط موتور بیشتر است. البته ذکر این نکته نیز ضروری است که محدودیت در ساخت برجستگی‌های روتور تا اندازه‌ای اجازه این افزایش نسبت را فراهم می‌کند. از آنجایی که اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی با مجذور تعداد جفت قطب‌ها رابطه معکوس دارد، لذا گشتاور رلوکتانسی تولید شده برای تعداد جفت قطب‌های ۱ الی سه قابل توجیه است.

شکل ۳-۱۸ ساختمان یک موتور سنکرون رلوکتانسی را نشان می‌دهد. استاتور آن بصورت سه‌فاز سینوسی سیم‌پیچی شده است. برای سادگی در نمایش، کلاف‌های aa' ، bb' و cc' نماینده این نوع سیم‌پیچی هستند. میدان دوار استاتور در فاصله هوایی با سرعت سنکرون می‌چرخد. زمانی که روتور با سرعت سنکرون با میدان فاصله هوایی به چرخش درآید، گشتاور تولید شده تلاش می‌کند تا مسیر رلوکتانس مینیمم را با میدان دوار فاصله هوایی همراه کند. با بارگذاری بر روی موتور زاویه بین میدان دوار موتور و روتور بیشتر شده و یا روتور از میدان فاصله هوایی عقب می‌افتد و موجب عدم همراستایی میدان دوار استاتور و مسیر رلوکتانس مینیمم می‌شود. در این حالت گشتاور الکترومغناطیسی سعی می‌کند تا مسیر رلوکتانس مینیمم را با میدان دوار فاصله هوایی همراه کند که همین گشتاور معادل و مخالف گشتاور بار باعث می‌شود که روتور سرعت سنکرون خود را باز یابد.



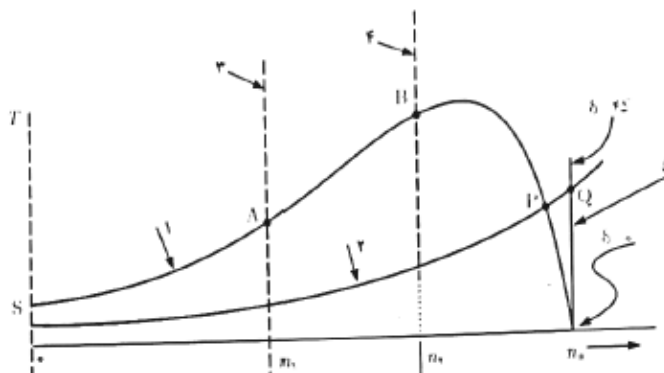
شکل ۳-۱۸: ساختمان موتور رلوکتانسی با سیم‌پیچی سه فاز

۳-۴-۱ فرآیند راه‌اندازی موتور رلوکتانسی سه‌فاز

موتورهای سه‌فاز سنکرون رلوکتانسی سه‌فاز فاقد گشتاور راه‌اندازی هستند و برای تولید گشتاور باید به سرعت سنکرون رسانده شوند. از همین رو برای راه‌اندازی و رسیدن به سرعت سنکرون معمولاً از خاصیت موتور القایی و تعبیه نمودن قفس راه‌انداز بر روی روتور آنها استفاده می‌شود. با فرض سینوسی بودن تغییرات رلوکتانس بر حسب زاویه اندازه گشتاور رلوکتانسی موتور زمانی که روتور با سرعت bb' می‌چرخد برابر است با:

$$T = -K \sin(2(\omega_s \pm \omega_m)t + 2\delta) \quad (۳-۱۰۳)$$

مطابق رابطه بالا در سرعت‌های زیر سنکرون یا به عبارت دیگر تا قبل از رسیدن موتور به سرعت سنکرون، موتور رلوکتانسی گشتاور نوسانی با فرکانس $2(\omega_m \pm \omega_s)$ تولید می‌کند و در لحظه راه‌اندازی دارای حداکثر گشتاور ضربانی است، بنابراین تا قبل از رسیدن به سرعت سنکرون گشتاور رلوکتانسی تولید شده در این محدوده دارای یک مولفه نوسانی با مقدار متوسط صفر است. شکل ۳-۱۹ مشخصه گشتاور سرعت یک موتور سنکرون رلوکتانسی سه‌فاز با راه‌انداز القایی را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۹: مشخصه گشتاور سرعت موتور رلوکتانسی

با توجه به شکل ۳-۱۹ نوسانات گشتاور در سرعت‌های صفر، n_1 و n_2 با خط چین مشخص شده‌اند. اگر گشتاور رلوکتانسی وجود نداشت نقطه کار موتور در P تثبیت می‌شد و موتور تخت بار با سرعت n به

حالت مانا می‌رسید. با توجه به اینکه فرکانس نوسانات رلوکتانسی در این سرعت بسیار کم است چنین حالتی بوجود نمی‌آید. در این حالت گشتاور بار و گشتاور القایی یکدیگر را خنثی نموده و گشتاور رلوکتانسی بعنوان گشتاور شتاب‌دهنده به محور موتور اعمال می‌شود. بطوریکه این گشتاور در نیم سیکل مثبت خود باعث افزایش سرعت موتور و در نیم سیکل منفی باعث کاهش سرعت موتور می‌شود. در نتیجه نوسانات سرعت در محدوده n اتفاق می‌افتد. معادله دینامیکی حرکت قسمت گردان بصورت زیر تعریف می‌شود.

$$T_a = j d\omega / dt \quad (۱۰۴-۳)$$

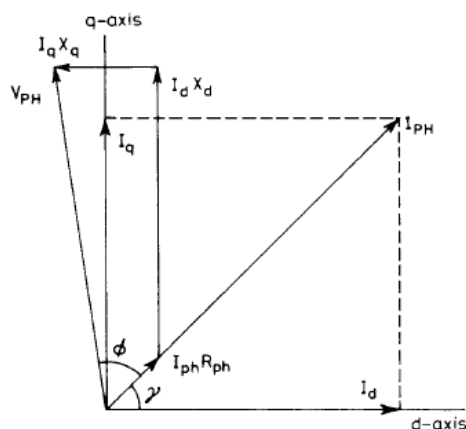
با استفاده از معادله (۱۰۴-۳) می‌توان تغییرات سرعت را در هر نیم سیکل گشتاور رلوکتانسی بدست آورد.

$$\Delta\omega = \int_{t_1}^{t_1 + \frac{T}{2}} T_a dt / j \quad (۱۰۵-۳)$$

در رابطه بالا j ممان اینرسی روتور و T_a گشتاور شتاب‌دهنده است. اگر در سرعت روتور در یکی از نوسانات خود در جهت مثبت به n_s برسد، مولفه گشتاور القایی صفر شده و با رسیدن لغزش به مقدار صفر، نوسانات گشتاور رلوکتانسی نیز متوقف می‌شود. بدین ترتیب موتور به سرعت سنکرون رسیده و با گشتاور رلوکتانسی در نقطه کار Q به چرخش خود ادامه می‌دهد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که اگر شرایط لازم برای به سنکرون رسیدن موتور فراهم نشود این موتور هیچگاه به سرعت سنکرون نخواهد رسید.

۳-۱-۲ مدل سازی موتور رلوکتانسی

برای مدل سازی تحلیلی موتورهای رلوکتانسی در حالت دائم برخلاف موتورهای سنکرون و القایی، از نمودار فازوری آنها استفاده می‌شود. شکل ۳-۲۰ نمودار فازوری مربوط به یک موتور رلوکتانسی را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۲۰: نمودار فازوری موتور رلوکتانسی

معادله گشتاور الکترومغناطیسی تولید شده توسط موتور رلوکتانسی در حالت کلی برابر است با:

$$T = mpI_d I_q (L_d - L_q) = \frac{m}{2} p I^2 \sin 2\gamma (L_d - L_q) \quad (۱۰۶-۳)$$

در رابطه بالا m تعداد فازهای ماشین، p تعداد جفت قطبها، I_q و I_d مولفه‌های جریان موثر فاز در راستای محورهای طولی و عرضی، L_d و L_q اندوکتانس‌های ماشین در راستای محورهای طولی و عرضی ماشین هستند. با توجه به محدودیت‌های موجود در ساخت، هرچه اختلاف بین اندوکتانس محور طولی و عرضی روتور ماشین رلوکتانسی بیشتر باشد گشتاور تولید شده نیز بیشتر خواهد بود. همچنین زاویه جریان نیز باید برابر با $\delta = 45^\circ$ باشد.

فصل ۴: ارائه ساختار و مدل سازی تحلیلی موتور سنکرون هیستریزیس-رلوکتانس تخت

۴-۱ مقدمه

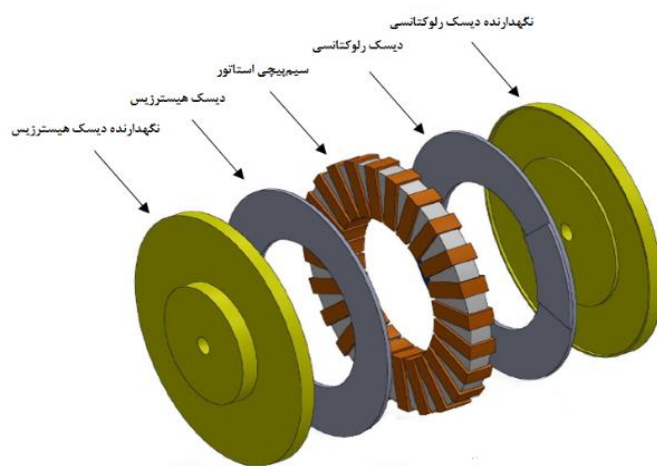
همانطور که در قسمت‌های قبلی نیز بیان شد، موتور رلوکتانسی یک موتور سنکرون فاقد سیم‌پیچ تحریک بر روی روتور است که در سرعت سنکرون یک مولفه گشتاور ایجاد می‌کند. خودراه‌انداز نبودن این موتور موجب شده است تا این موتور برای استفاده در اکثر کاربردهای صنعتی شرایط لازم را نداشته باشد و در بعضی از موارد خاص بکار گرفته شود. از طرف دیگر موتور هیستریزیس دارای گشتاور راه‌اندازی است. بنابراین با ترکیب دیسک هیستریزیس و رلوکتانسی می‌توان به یک موتور با ساختار جدید دست یافت بگونه‌ای که خواص قبلی هر یک از دو موتور در آن حفظ شده و برای اکثر کاربردهای صنعتی مناسب باشد. همچنین علاوه بر حفظ ساختار هر یک از دو موتور قبلی، پیش‌بینی می‌شود که در ساختار جدید معایب موجود در هر یک از آن‌ها توسط دیگری پوشانده شود. بطور مثال پدیده هانتینگ یکی از معایب ذکر شده برای موتور هیستریزیس است که پیش‌بینی می‌شود در ساختار موتور تلفیقی جدید تا حد زیادی توسط موتور رلوکتانسی رفع شود. این ساختار برای اولین بار توسط نویسنده این پایان‌نامه ارائه شده است و پیش‌بینی می‌شود که ساختار جدید مزایای هر دو موتور را توأم با یکدیگر داشته باشد که نتیجه آن بهبود مشخصه عملکردی ماشین می‌باشد.

۴-۲ ارائه ساختار پیشنهادی

با توجه به آنچه که در بخش سابقه موضوع گفته شد، تمامی مطالعات بر روی موتور هیستریزیس-رلوکتانس با ساختار استوانه‌ای انجام شده است و با اطمینان می‌توان گفت که در هیچ منبعی ساختار دیگری برای این موتور ارائه نشده است. موتورهایی با ساختار تخت، نسبت به نوع استوانه‌ای خود دارای برتری‌هایی همچون استحکام مکانیکی بالاتر، چگالی توان بیشتر، سادگی در ساخت، قیمت تمام شده پایین‌تر و ... هستند. همچنین با توجه به بخش ۲-۴-۵ می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب ساختار تخت برای موتور هیستریزیس-رلوکتانس می‌تواند نتایج بهتری را در پی داشته باشد.

۴-۲-۱ ساختار موتور H-R نوع تخت پیشنهادی

ساختار این موتور کاملاً شبیه به موتور هیستریزیس تخت دو روتوره بدون شیار (SDDHM)^۱ می‌باشد. این موتور دارای یک استاتور دوطرفه و دو روتور خارجی است. روتورها از جنس ماده مغناطیسی VCN150 به همراه برجستگی با نسبت قوس قطب به گام قطب برابر با ۰,۶۵ تشکیل شده است. ساختار موتور پیشنهادی را می‌توان در شکل ۴-۱ مشاهده نمود.



شکل ۴-۱: ساختار موتور HR نوع تخت پیشنهادی

ساختار استاتور از نوع بدون شیار انتخاب شده است. وجود شیار باعث ایجاد نوساناتی در شار فاصله هوایی می‌شود که همین موضوع تلفات پارازیتیکی شار را افزایش داده و در نتیجه بازده ماشین را به شدت کاهش می‌دهد. از طرف دیگر وجود برجستگی بر روی دیسک رلوکتانسی در سرعت‌های زیر سنکرون یک عامل ایجاد ریپل در گشتاور و نویز موتور است. به همین دلیل این نوع موتور در کاربردهای با سرعت‌های بالا همچون سانتریفیوژهای می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. جنس نگه‌دارنده دیسک‌های رلوکتانسی و هیستریزیس از تفلون انتخاب شده است و علت آن ۱- استحکام مکانیکی بالا و ۲- جلوگیری از بسته شدن مسیر شار در نگه‌دارنده دیسک‌ها می‌باشد.

1- Slotless Dual Disc Hysteresis Motor

مسیر بسته شدن شار در فاصله هوایی و هسته استاتور در راستای محور و در دو دیسک هیستریزیس و رلوکتانسی بصورت محیطی می‌باشد. همچنین سیم‌پیچی استاتور بصورت تروئیدال دو طبقه با گام کسری انجام شده است. در واقع موتور ترکیبی HR ترکیبی از دو موتور هیستریزیس و رلوکتانسی است که با یکدیگر سری شده‌اند.

۴-۳- چند نکته درباره موتورهای سنکرون ترکیبی

موتور سنکرون هیستریزیس تخت دارای مزیت‌هایی از قبیل چگالی توان بالا (نسبت به نوع استوانه‌ای آن‌ها)، راه‌اندازی نرم و بدون سروصدا، گشتاور تقریباً ثابت از لحظه راه‌اندازی تا رسیدن به سرعت سنکرون و ... می‌باشد. اما عیب اصلی این موتور همانطور که قبلاً نیز بیان شد پایین بودن توان، گشتاور خروجی و بازده آن در حالت دائمی است. یک راه حل برای رفع این مشکل، ترکیب این موتور با موتوری است که بتواند در حالت دائمی یک مولفه گشتاور به آن اضافه کند.

ترکیب موتور رلوکتانسی با موتور هیستریزیس را می‌توان از دو جهت مورد بررسی قرار داد. ۱- ترکیب رینگ هیستریزیس در موتور رلوکتانسی برای رفع معایب آن موتور خواهد بود که موتور سنکرون رلوکتانس-هیستریزیس^۱ (RHM) را نتیجه می‌دهد. ۲- ترکیب موتور رلوکتانسی به موتور هیستریزیس برای رفع معایب موتور هیستریزیس که موتور هیستریزیس-رلوکتانس^۲ (HRM) را نتیجه می‌دهد.

برای افزایش بازده، ضریب توان و همچنین کاهش اثر هانینگ به روتور موتور هیستریزیس برجستگی اضافه شده است. ویژگی اصلی موتورهای هیستریزیس که استفاده از آن‌ها را توجیه می‌کند، عملکرد نرم و با نویز بسیار پایین آن‌ها می‌باشد. اضافه کردن برجستگی به روتور موتور هیستریزیس عملکرد موتور را در حالت گذرا تخت تاثیر قرار می‌دهد. با توجه به اینکه تا کنون این نوع از موتور هیستریزیس (هیستریزیس-رلوکتانس تخت) ساخته و مورد بررسی قرار نگرفته است لذا در مورد طراحی بهینه این نوع موتور نمی‌توان بطور قاطع صحبت نمود. اما با توجه به منابع محدودی که در مورد نوع استوانه‌ای این موتور در دسترس است، می‌توان طوری موتور را طراحی نمود که مشکلات مربوط به ادغام دو موتور تا اندازه‌ای مرتفع گردد. در این رساله ساختاری ارائه و طراحی شده است که علاوه بر حفظ خاصیت موتور

1- Reluctance-Hysteresis Motor

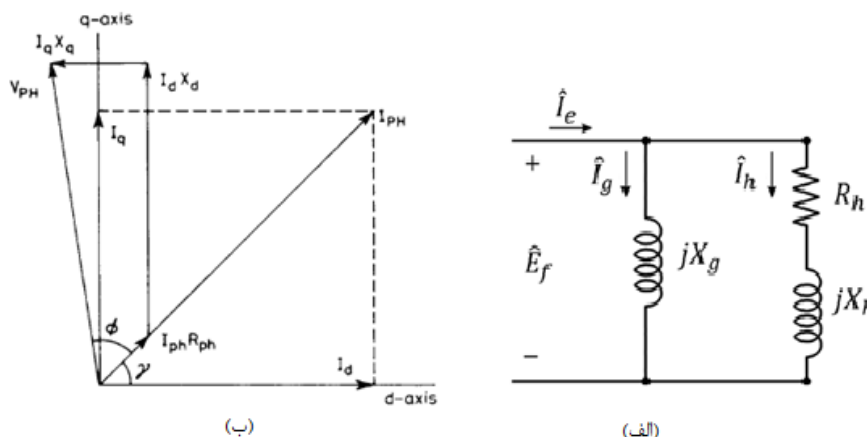
2- Hysteresis- Reluctance Motor

هیستریزیس، تا اندازه مطلوبی می‌توان بر معایب این موتور فائق آمد و مشخصه‌های عملکردی موتور را تا حد قابل قبولی بهبود بخشید.

با توجه به توضیحات بالا و بر اساس مطالبی که در فصل اول ارائه گردید، می‌توان ادعا نمود که ترکیب موتور هیستریزیس و رلوکتانس، برای بهبود مشخصه‌های موتور هیستریزیس منطقی می‌باشد.

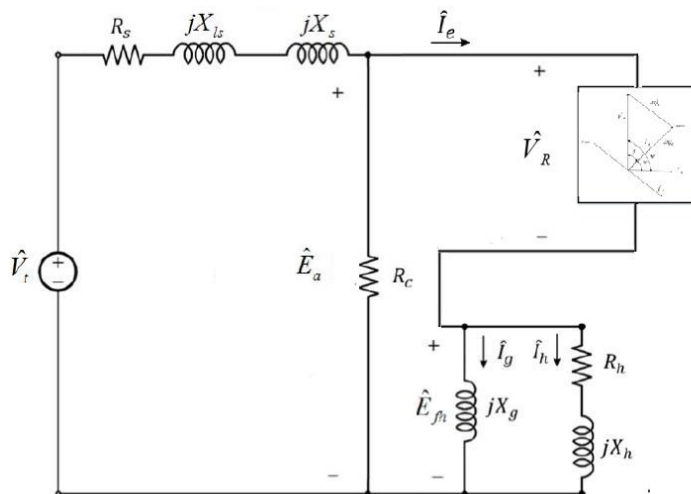
۴-۴ مدل‌سازی تحلیلی موتور هیستریزیس-رلوکتانس نوع تخت

با توجه به نوع سیم‌پیچی موتور (تروئیدال)، شار عبوری از هر فاز سیم‌پیچ استاتور، از جمع شار هر دو فاصله هوایی بدست می‌آید. به عبارت دیگر ولتاژ القایی هر فاز استاتور (Back EMF) با مجموع ولتاژ القایی دیسک هیستریزیس و رلوکتانس برابر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که موتور مورد مطالعه از ترکیب سری دو موتور هیستریزیس و رلوکتانس تشکیل شده است. در نتیجه مدار معادل آن را می‌توان مطابق شکل ۵-۲ از ترکیب سری دو موتور مذکور بدست آورد. در فصل ۳ نحوه استخراج مدار معادل بر فاز موتور هیستریزیس تخت شار محیطی یکطرفه بیان شد. نحوه بدست آوردن پارامترهای مدار معادل آن با استفاده از روابط تحلیلی و قانون‌های مداری آمپر و القای فارادی نیز در فصل ۳ به تفصیل بیان شد. از طرف دیگر برای مدل‌سازی تحلیلی قسمت رلوکتانس موتور مورد مطالعه، از دیگرام برداری موتور رلوکتانس استفاده شده است. در شکل ۵-۱ مدار معادل بر فاز موتور هیستریزیس به همراه دیگرام برداری موتور رلوکتانس و همچنین مدار معادل بر فاز موتور هیستریزیس-رلوکتانس تخت نشان داده شده است.



شکل ۴-۲: مدار معادل موتور هیستریزیس و نمودار فازوری موتور رلوکتانسی

با توجه به مطالب گفته شده در بالا می‌توان مدار معادل بر فاز موتور هیستریزیس-رلوکتانس تخت را در حالت دائم مطابق شکل ۲-۴ نشان داد.



شکل ۳-۴: مدار معادل بر فاز موتور هیستریزیس-رلوکتانس تخت دوروتوره

بیشتر المان‌های موجود در مدار معادل بالا وابسته به ولتاژ ترمینال هستند. با توجه به روابط بدست آمده در فصل ۳ برای المان‌های مدار معادل قسمت هیستریزیس و با استفاده از قوانین مداری، مشخص است که E_{fm} و I_a بطور کامل وابسته به پارامترهای مشخصه دیسک هیستریزیس روتور (μ و α) هستند. از آنجایی که μ و α وابسته به دامنه چگالی شار روتور و در نتیجه ولتاژ اعمالی به موتور هستند، می‌توان نتیجه گرفت که E_{fm} و I_a هر دو تابعی از ولتاژ ترمینال هستند. بنابراین برای تحلیل مدار معادل شکل ۲-۴ از یک الگوریتم تکرار برای بدست آوردن مشخصه‌های عملکردی موتور در حالت دائم و شرایط حداکثری بار استفاده می‌شود.

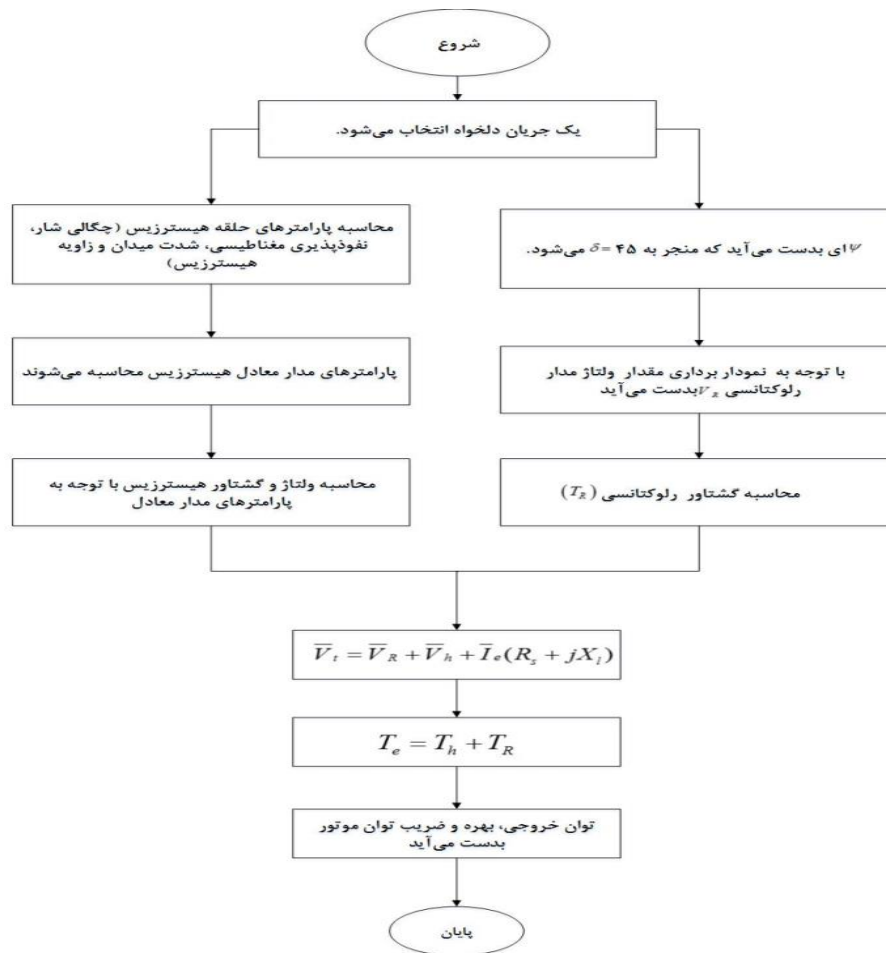
شکل ۳-۵ فلوجارت روش تحلیلی پیشنهاد شده برای پیش‌بینی عملکرد حالت دائمی موتور هیستریزیس-رلوکتانس را، بر مبنای جریان انتخاب شده نشان می‌دهد. در این الگوریتم پس از انتخاب یک جریان نامی برای موتور، دامنه‌ی چگالی شار حلقه هیستریزیس کاری موتور بر مبنای معادله ۳-۴۷ و با استفاده از یک روش تکرار و درون‌یابی‌های پی در پی در برنامه متلب متناسب با جریان انتخاب شده، بدست می‌آید. با داشتن چگالی شار می‌توان کلیه پارامترهای مربوط به مدار معادل هیستریزیس را بدست آورد. با توجه به رابطه ۳-۱۰۲ حداکثر گشتاور تولید شده توسط موتور رلوکتانسی در $\delta = 45^\circ$ اتفاق می‌افتد. برای بدست

آوردن راکتانس‌های محور طولی و عرضی ماشین و همچنین بدست آوردن ولتاژ القایی قسمت رلوکتانسی موتور از نرم افزار المان محدود JMAG استفاده شده است. با شبیه‌سازی قسمت رلوکتانسی موتور در محیط نرم افزار المان محدود، می‌توان قسمت رلوکتانسی موتور ترکیبی را که در مدار معادل شکل ۴-۲ نشان داده شده است را در حالت دائم و حداکثر بار مدل‌سازی نمود.

با توجه به پارامترهای بدست آمده برای مدار معادل قسمت هیستریزیس و رلوکتانسی موتور، می‌توان مشخصه‌های عملکردی موتور از جمله گشتاور خروجی، ولتاژ بر فاز ترمینال، توان خروجی و ضریب توان مربوط به آن را بر حسب جریان موتور محاسبه نمود.

در صورتی که موتور هیستریزیس با بار جزئی راه‌اندازی شود، موتور از لحظه راه‌اندازی با حلقه هیستریزیس نرمال خود که متناسب با ولتاژ اعمال شده به ترمینال آن است شروع به شتاب گرفتن می‌کند و تا ورود به اولین سرعت سنکرون خود بر روی همان حلقه کاری نرمال عمل خواهد کرد. با توجه به نمودار گشتاور-بار موتور هیستریزیس، در سرعت سنکرون به دلیل اختلاف بین گشتاور موتور و بار، سرعت موتور دچار نوسان شده و در نهایت در یک حلقه هیستریزیس باریک‌تر از زمان اولین ورود به سنکرونیزم، به کار خود ادامه می‌دهد. باید توجه داشت که در این حالت سطح حلقه هیستریزیس کاری موتور باریک‌تر شده و گشتاور تولید شده توسط موتور نیز کمتر شده است ولی دامنه چگالی شار و شدت میدان مغناطیسی آن تغییر نکرده است و موتور در این شرایط به حالت دائمی خود می‌رسد. تا کنون در هیچ منبعی به نحوه محاسبه پارامترهای حلقه کاری جدید اشاره نشده است. برای محاسبه پارامترهای حلقه کاری جدید، باید مدل دینامیکی موتور را با استفاده از روش‌های عددی بسیار پیچیده و زمان‌بری همچون روش پریساج بدست آورد.

در نتیجه اگر موتور هیستریزیس در شرایط حداکثر بار راه‌اندازی شود، نوسانات سرعت در لحظه رسیدن به سرعت سنکرون با توجه به برابری گشتاور بار و گشتاور تولیدی موتور وجود نخواهد داشت و در نتیجه موتور با حلقه کاری نرمال اولیه خود که مشخصات آن معلوم است به حالت پایدار خود می‌رسد. بنابراین برای مدل‌سازی قسمت رلوکتانسی موتور نیز به ناچار شرایط حداکثر بار لحاظ می‌شود.



شکل ۴-۴: فلوچارت الگوریتم پیشنهادی برای مدلسازی موتور هیستریزیس-رلوکتانس در حالت دائمی به روش تحلیلی

فصل ۵: طراحی موتور هیستریزیس-رلوکتانس نوع تخت

۵-۱ مقدمه

با توجه به ویژگی‌های منحصر بفرد هر یک از موتورهای هیستریزیس و رلوکتانسی که در فصل دوم به آن‌ها اشاره شد، می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب این دو موتور با یکدیگر منجر به ایجاد یک موتور ترکیبی با مشخصه عملکردی بهتر نسبت به هر یک از دو موتور می‌شود. باید توجه شود که روند طراحی صحیح و مناسب و همچنین انتخاب ساختار مکانیکی دقیق و قابل انعطاف باعث می‌شود تا اکثر مزایای هر دو موتور در موتور پیشنهادی حفظ شوند. در روند طراحی موتور ترکیبی سعی شده است تا علاوه بر حفظ ویژگی‌های موتور هیستریزیس، با انتخاب ساختار مناسب رلوکتانسی بتوان معایب آن را نیز تا حد زیادی بهبود بخشید.

۵-۲ طراحی موتور HRM^۱

در این بخش یک نمونه موتور هیستریزیس-رلوکتانس نوع تخت طراحی می‌شود. برای طراحی موتور ترکیبی جدید لازم است فرضیات زیر در نظر گرفته شوند.

(۱) جهت میدان مغناطیسی در فاصله هوایی کاملاً در راستای محور و در روتورهای دیسکی شکل کاملاً در جهت محیطی است.

(۲) توزیع شدت میدان مغناطیسی در روتورها، کاملاً یکنواخت در راستای محور است.

(۳) از بیضی‌های متحدالمرکز برای تقریب حلقه‌های هیستریزیس کاری ماده روتور استفاده شده است.

برای شروع طراحی، مجموعه اطلاعات اولیه به شرح زیر نیاز است.

1- Hysteresis Reluctance Motor

P_{out}	توان خروجی موتور
I_n	جریان نامی موتور
m	تعداد فازها
n_m	سرعت نامی موتور
f	فرکانس

مبنای طراحی موتور ترکیبی هیستریزیس-رلوکتانس نوع تخت، موتور هیستریزیس تخت دو روتوره است. بر همین اساس ابتدا یک الگوریتم طراحی برای موتور هیستریزیس تخت دو روتوره ارائه شده است و در نهایت با توجه به مرجع [39] یک ساختار رلوکتانسی به موتور هیستریزیس اضافه می‌شود. مزیت انجام این روش حفظ ساختار موتور هیستریزیس و در عین حال اضافه شدن یک ساختار جدید برای بهبود مشخصه‌های عملکردی موتور می‌باشد. با توجه اطلاعات حاصل از آنالیز ماده پسماند مورد استفاده در روتور موتور هیستریزیس که مشخصات حلقه کاری آن مطابق شکل ۶-۱ است، می‌توان طراحی موتور را آغاز نمود.

گشتاور مکانیکی ناخالص خروجی حاصل از دیسک هیستریزیس (با صرف نظر از تلفات مکانیکی) برابر است با:

$$T_{out,Hys} = \frac{P_{out,Hys}}{\omega_{syn}} = \frac{P_{out,Hys}}{2\pi f} \frac{2}{p} \quad (1-5)$$

با انتخاب یک دامنه چگالی شار مغناطیسی در دیسک روتورها، می‌توان تمام پارامترهای مربوط به حلقه هیستریزیس کاری ماده روتور متناسب با این دامنه چگالی شار بدست آورد. پارامترها حلقه کاری شامل نفوذپذیری دیسک مغناطیسی μ ، زاویه تاخیر دیسک هیستریزیس α ، سطح حلقه هیستریزیس E_h و شدت میدان مغناطیسی H_{Hys} متناظر با این دامنه چگالی شار هستند. ارتباط میان حجم ماده هیستریزیس V_{Hys} و گشتاور T_{Hys} هیستریزیس تولید شده توسط رابطه ۶-۲ بیان شده

$$T_{Hys} = \frac{4\pi T_{Hys}}{pV_{Hys}} \quad (2-5)$$

با داشتن حجم متناسب با گشتاور مورد نیاز موتور می توان ضخامت دیسک های روتور t_r را طبق رابطه زیر تعیین نمود:

$$t_{r1} = t_{r2} = \frac{2V_{Hys}}{\pi D_o^2 (1 - \lambda^2)} \quad (3-5)$$

در رابطه بالا λ نسبت قطر داخلی D_i به قطر خارجی D_o است. در واقع این نسبت بیانگر قطر داخلی و خارجی هسته استاتور نیز می باشد.

$$\lambda = \frac{D_i}{D_o} \quad (4-5)$$

مقدار λ بر اساس قواعد تجربی تعیین می شود. با انتخاب یک مقدار مناسب برای قطر خارجی روتور، می توان ضخامت دیسک های روتور را تعیین نمود. باید توجه شود که ضخامت روتور باید از نقطه نظر مکانیکی و مغناطیسی معقول باشد. هرچه ضخامت روتور کمتر باشد چگالی شار مغناطیسی در آن بیشتر است و متعاقباً گشتاور تولید شده توسط موتور نیز بیشتر است اما این ضخامت باید قابلیت ساخت را نیز داشته باشد. ولتاژ القایی هر فاز استاتور را می توان مطابق رابطه زیر بدست آورد.

$$e_f = \frac{d\lambda_a}{dt} = -\frac{N_s L_e t_r B_{m,Hys} \pi \omega_e}{2a} \cos(\omega_e t - \phi_0) \quad (5-5)$$

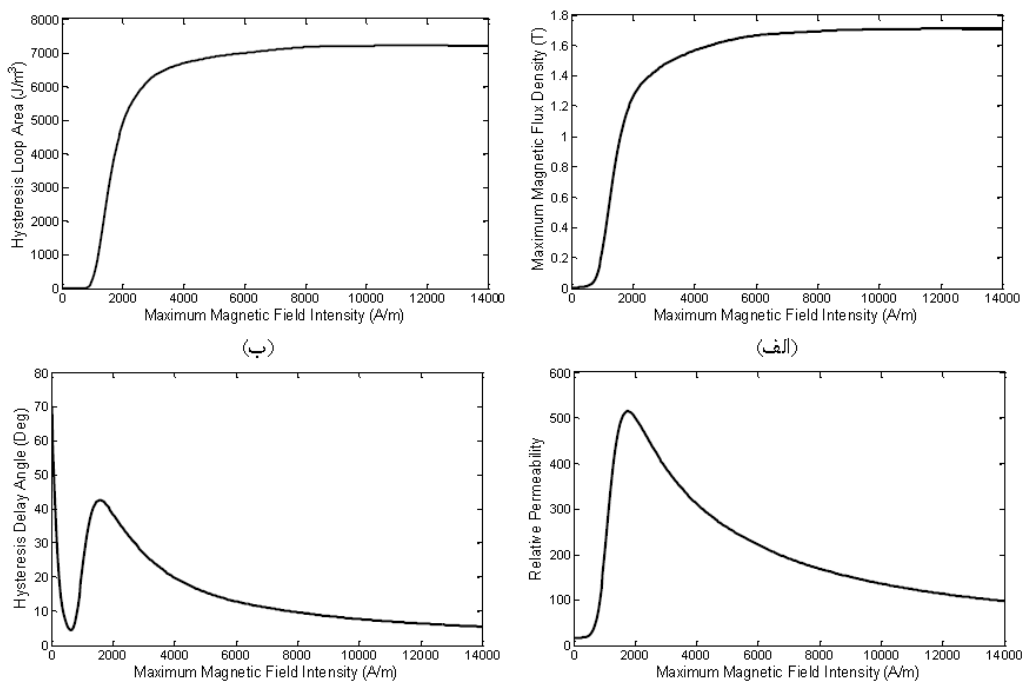
در رابطه بالا t ، N_s ، a ، L_e و ω_e به ترتیب زمان، تعداد دور سیم پیچی سینوسی هر فاز، تعداد مسیره های موازی، طول شعاعی استاتور و سرعت زاویه ای هر فاز است. برای محاسبه تاخیر فاز هیستریزس میدان روتور از رابطه زیر استفاده می شود.

$$\phi_0 = \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \left(\frac{\frac{2R_{avg} \sin \alpha}{p\mu}}{\frac{2R_{avg} \cos \alpha}{p\mu} + \frac{gpt_r}{2\mu_0 R_{avg}}} \right) \quad (6-5)$$

با استفاده از رابطه (5-5) و (6-5) انتخاب یک دامنه ولتاژ القایی در لحظه $t=0$ ، تعداد دور سیم پیچی معادل هر فاز را می توان محاسبه نمود. با محاسبه پارامترهای طراحی موتور، می توان المان های مدار معادل بر فاز موتور را نیز محاسبه نمود و از آنجا می توان مقدار ولتاژ القایی بدست آمده از مدار معادل را با مقدار اولیه در نظر گرفته شده مقایسه نمود و در صورت مغایرت باید ولتاژ القایی انتخابی را اصلاح نمود. با

توجه به رابطه ۳-۴۷ می‌توان برای مدل‌سازی تحلیلی مدار معادل موتور، نمودار چگالی شار بر حسب جریان را بدست آورد.

$$B_m = \frac{\left(\frac{m}{2}\right)\left(\frac{N_s}{p}\right)\left(\frac{\sqrt{2}I_s}{a}\right)}{\sqrt{\left(\frac{gpt_r}{2\mu_0 R_{avg}}\right)^2 + \left(\frac{2R_{avg}}{p\mu}\right)^2 + 2\frac{gt_r}{\mu\mu_0}\cos\alpha}} \quad (7-5)$$



شکل ۵-۱: منحنی‌های مشخصه تقریب بیضوی ماده هیستریزس مورد استفاده در موتور پیشنهادی بر حسب شدت میدان مغناطیسی. الف) دامنه چگالی شار مغناطیسی. ب) سطح حلقه. ج) نفوذپذیری مغناطیسی. د) زاویه تاخیر هیستریزس.

با توجه به انتخاب یک چگالی جریان منطقی برای موتور می‌توان سطح مقطع هادی را مطابق رابطه زیر بدست آورد.

$$S_{cond} = \frac{I_s}{J_s} \quad (8-5)$$

با فرض گرد بودن سطح مقطع هادی قطر آن مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$d_{cond} = 2\sqrt{\frac{S_{cond}}{\pi}} \quad (9-5)$$

با در نظر گرفتن ضخامت عایق سیم بر اساس جدول استاندارد هادی‌ها خواهیم داشت:

$$d_{wire} = d_{cond} + d_{insulator} \quad (10-5)$$

$$N_{layer} = \frac{2mN_s d_{wire}}{\pi D_i} \quad (11-5)$$

$$L_w = N_{layer} d_{wire} \quad (12-5)$$

در روابط ۵-۱۰ تا ۵-۱۲، d_{wire} ، N_{layer} و L_w به ترتیب قطر هادی، تعداد لایه‌های سیم پیچی و ضخامت لایه‌ی سیم‌پیچی است.

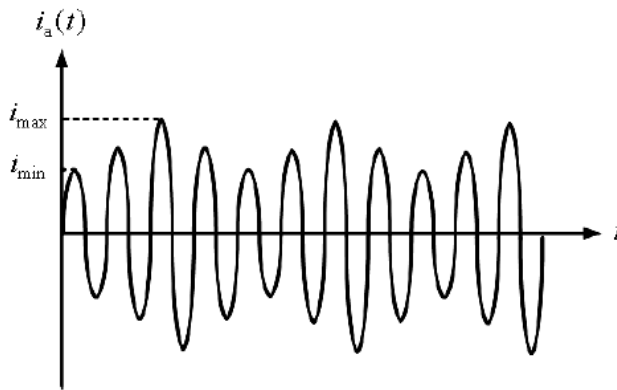
با توجه به توضیحات ارائه شده، مشخصات مربوط به سیم‌پیچی ماشین هیستریزس تخت و ابعاد روتورهای آن را می‌توان تعیین نمود. در طراحی قسمت رلوکتانسی موتور ترکیبی باید ساختار و ویژگی‌های موتور هیستریزس حفظ شود. بنابراین با اضافه کردن برجستگی به روتورهای موتو هیستریزس تخت دورتوره، علاوه بر حفظ ساختار قبلی، یک موتور ترکیبی با ساختار جدید ایجاد شده است.

برای مدل‌سازی و طراحی قسمت رلوکتانسی موتور در حالت دائم، محاسبه راکتانس محور طولی X_d و محور عرضی X_q موتور الزامی است. دو روش تعیین این دو پارامتر عبارتند از:

- آزمایش لغزش
- استفاده از نرم‌افزار المان محدود

۵-۳-۱-۱- آزمایش لغزش

یکی از روش‌های محاسبه راکتانس‌های محور طولی X_d و عرضی X_q در ماشین سنکرون، آزمایش لغزش است. با مدار باز نمودن مدار تحریک روتور ($I_f = 0$)، آنرا با سرعتی کمتر از سرعت سنکرون چرخیده و استاتور به منبع برق سه‌فاز AC متصل می‌شود (باید توجه شود که جهت چرخش روتور در جهت میدان دوار استاتور باشد). به دلیل عدم وجود تحریک و صفر بودن ولتاژ القایی ($E_f = 0$) ولتاژ اهمال شده به استاتور باید کوچک یباشد تا استاتور جریان زیادی نکشد. به دلیل وجود برجستگی قطب‌ها جریان استاتور مطابق شکل ۶-۲ خواهد بود. با توجه به دامنه حداقل و حداکثر جریان استاتور می‌توان مقادیر راکتانس محور طولی و عرضی موتور را مطابق زیر بدست آورد.



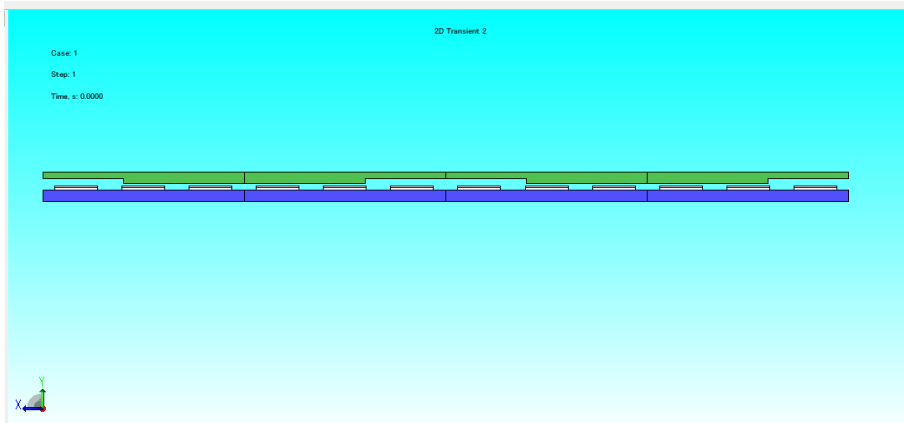
شکل ۵-۲: شکل موج جریان استاتور ماشین قطب برجسته در حالت تحریک صفر ($E_f = 0$)

$$X_d = \frac{\sqrt{2}|V_t|}{i_{\min}} \quad (۱۳-۵)$$

$$X_q = \frac{\sqrt{2}|V_t|}{i_{\max}} \quad (۱۴-۵)$$

۵-۳-۱-۲- استفاده از برنامه المان محدود

برای مدل‌سازی تحلیلی موتور مورد نظر از دو نرم‌افزار Matlab و JMAG استفاده شده است. با توجه به فلوجارت ارائه شده در شکل ۵-۳ برای مدل‌سازی قسمت رلوکتانسی موتور باید مقادیر راکتانس محور طولی و عرضی موتور مشخص باشد. از همین رو با استفاده از نرم‌افزار المان محدود قسمت رلوکتانسی موتور بصورت دو بعدی و در شرایط حداکثر بار مدل‌سازی شده است.



شکل ۵-۳: شبیه‌سازی قسمت رلوکتانسی در محیط المان محدود در شرایط حداکثر بار

با اعمال یک منبع جریان سه‌فاز با دامنه یک آمپر و فرکانس ۵۰ هرتز به سیم‌پیچ‌ها، زاویه ψ بگونه‌ای در برنامه تغییر داده می‌شود که $\delta = 45^\circ$ بدست آید. در این شرایط با توجه به نمودار برداری موتور رلوکتانسی ارائه شده در شکل ۳-۲۰ و همچنین محاسبه اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان می‌توان از طریق برنامه نوشته شده در متلب و حذف آفست نمودارها، مقادیر راکتانس محور طولی و عرضی موتور را تعیین نمود. با محاسبه راکتانس‌های محورهای طولی و عرضی موتور در محیط المان محدود و وارد کردن این مقادیر در برنامه نوشته شده در متلب مدلسازی موتور در حالت دائم و شرایط حداکثر بار انجام می‌شود.

هرچه نسب راکتانس محور طولی به راکتانس محور عرضی بیشتر باشد گشتاور رلوکتانسی موتور با توجه به رابطه توان رلوکتانسی با راکتانس‌های دو محور، بیشتر است. به دلیل بدون شیار بودن موتور مقدار این نسبت از ۱٫۱ تجاوز نمی‌کند. مطابق مرجع [39] برای ماکزیمم شدن نسبت راکتانس محور طولی به راکتانس محور عرضی باید نسبت قوس قطب به گام قطب در رابطه تجربی زیر صدق کند.

$$0.65 \leq \frac{\alpha_p}{\tau_p} \leq 0.85 \quad (15-5)$$

با توجه به ملاحظات نویزپذیری و ریپل گشتاور پارامتر ارتفاع قطب بعنوان یک ورودی اختیاری در نظر گرفته می‌شود. بر همین اساس مقدار قوس قطب در ماشین برابر با ۱۱۸ درجه الکتریکی در نظر گرفته می‌شود. مبنای این انتخاب استفاده از برنامه المان محدود و بررسی رابطه بالا بر اساس پارامتر ارتفاع قطب می‌باشد. جدول ۵-۱ پارامترهای موتور طراحی شده را نشان می‌دهد.

جدول ۵-۱: پارامترهای طراحی موتور ساخته شده

مقدار	یکا	نماد	پارامتر
0.04	<i>N.m</i>	T_e	گشتاور نامی
50	V	V_{L-L}	ولتاژ نامی خط به خط
0.8	A	I_n	جریان نامی
50	Hz	f	فرکانس نامی
3	-	m	تعداد فاز
1	-	P	تعداد جفت قطب
39	mm	R_i	شعاع داخلی
69	mm	R_o	شعاع خارجی
3	mm	t_{r-h}	ضخامت دیسک هیستریزیس
6	mm	t_{r-r}	ضخامت دیسک رلوکتانس
118	deg	α	نسبت قوس قطب به گام قطب
0.45	mm	$D_{conductor}$	قطر هادی
1	mm	g	فاصله هوایی
9.5	mm	t_s	ضخامت محوری هسته استاتور
6.1	Ω	R_s	مقاومت هر فاز استاتور در دمای 25°
1.8	mm	t_c	ضخامت سیم پیچی
2	mm	w_c	عرض هر کلاف سیم پیچی
0.9	mm	h_c	ارتفاع هر کلاف
13.25	Ω	X_d	راکتانس محور طولی
12.5	Ω	X_q	راکتانس محور عرضی

فصل ۶: نتایج آزمایشات عملی

۱-۶ مقدمه

در این فصل نتایج حاصل از الگوریتم مدل‌سازی تحلیلی موتور HRM نوع تخت ارائه شده است. همچنین به منظور ارزیابی نتایج حاصل مدل‌سازی تحلیلی و اعتبار سنجی آن، یک نمونه موتور هیستریزیس-رلوکتانس تخت دورتوره ساخته شده و نتایج عملی حاصل از آزمایشات مختلف با نتایج حاصل از مدل‌سازی مقایسه شده است.

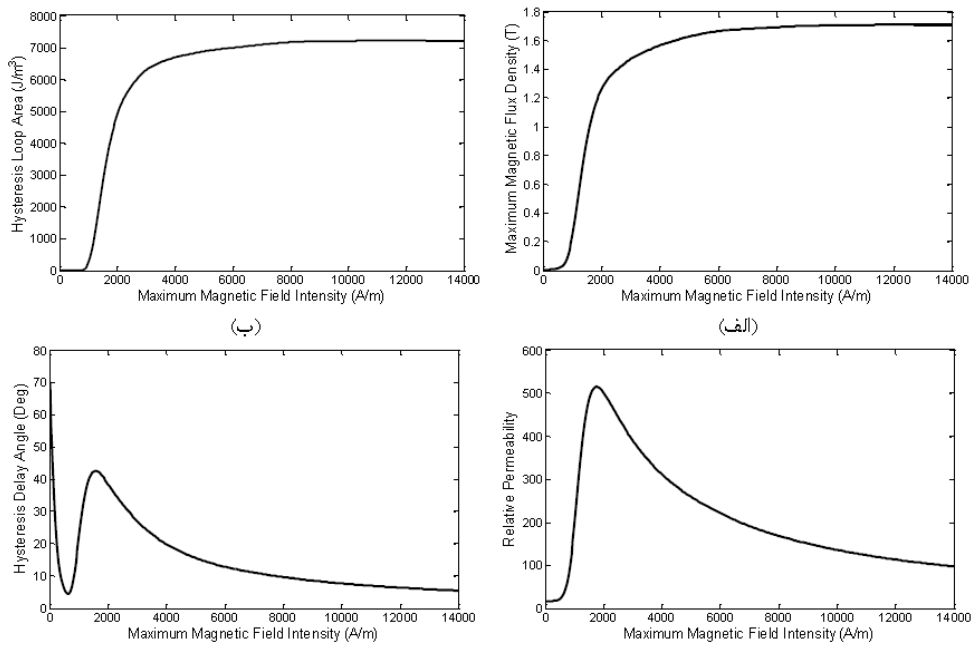
۲-۶ مشخصات موتور ساخته شده

موتور ساخته و ارائه شده در این پایان‌نامه از نوع تخت دورتوره می‌باشد. این موتور از یک استاتور بدون شیار با سیم‌پیچی تروئیدال دو طبقه یک گام کوتاه شده، دو دیسک هیستریزیس که یکی از آنها دارای برجستگی است، نگهدارنده‌های دیسک‌ها و بدنه موتور تشکیل شده است. اطلاعات مربوط به موتور در جدول ۱-۶ نشان داده شده است. در ساخت دیسک روتور از آلیاژ Fe-Cr-Ni-Mo-C یا همان VCN150 استفاده شده است که مشخصات تقریب بیضوی حلقه‌های هیستریزیس این ماده بعد از یک عملیات حرارتی خاص و سخت نمودن آن‌ها با میانگین سختی ۸۰ راکول-سی^۱ در شکل ۱-۶ نشان داده شده است.

در شکل ۱-۶ اجزاء موتور ساخته شده نشان داده شده است. همانطور که در شکل نیز مشاهده می‌شود به دلیل ملاحظات مکانیکی و مغناطیسی، نگهدارنده‌های دیسک‌های روتور از جنس ماده تفلون با جرم کم و نفوذپذیری مغناطیسی بسیار پایین ساخته شده است.

همانطور که در شکل ۲-۶ نیز دیده می‌شود، به دلیل رزوه شدن شفت موتور و همچنین فلاویز شدن نگهدارنده‌های روتورها امکان تغییر در فاصله هوایی، تعویض دیسک‌ها و تغییر ساختار موتور فراهم شده است. بر همین اساس با تغییر در ساختار ماشین، اضافه و کم کردن دیسک‌های موتور به سادگی می‌توان انواع تست‌های مختلف را بر روی این موتور انجام داد.

1- Rockwell-C hardness



شکل ۶-۱: منحنی‌های مشخصه تقریب بیضوی ماده هیستریزیس مورد استفاده در موتور پیشنهادی بر حسب شدت میدان مغناطیسی. الف) دامنه چگالی شار مغناطیسی. ب) سطح حلقه. ج) نفوذپذیری مغناطیسی. د) زاویه تاخیر هیستریزیس.



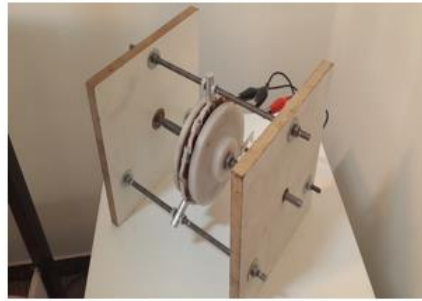
ب



الف



د



ج

شکل ۶-۲: اجزاء موتور ساخته شده به همراه مونتاژ نهایی موتور

۳-۶ - نتایج حاصل از مدل‌سازی و آزمایش‌های عملی

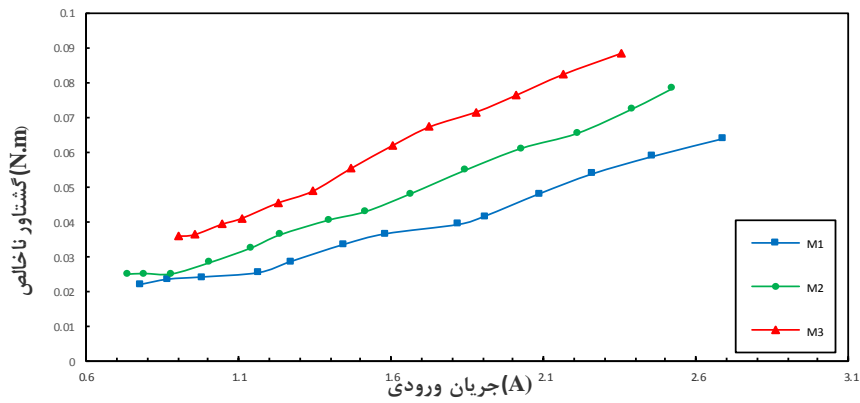
با استفاده از محیط برنامه‌نویسی متلب، یک برنامه نوشته شده است که الگوریتم مدل‌سازی تحلیلی موتور مورد مطالعه در حالت دائم نشان داده شده در شکل ۵-۲ را به ازای جریان‌های مختلف پیاده‌سازی می‌کند. بر همین اساس می‌توان رفتار موتور را در حالت دائم و به ازای جریان‌های مختلف مورد بررسی قرار داد و با نتایج حاصل از آزمایشات عملی مقایسه نمود.

برای مدل‌سازی پدیده هیستریزیس نمی‌توان از نرم‌افزارهای المان محدود به تنهایی استفاده نمود؛ زیرا مشخصه مغناطیسی هر ماده بصورت یک منحنی غیر خطی تک مقداره در نظر گرفته شده است در حالیکه مشخصه مغناطیسی ماده هیستریزیس وابسته به سابقه تغییرات میدان مغناطیسی است بطوریکه به ازای یک شدت میدان مغناطیسی مشخص در یک لحظه، با توجه به شرایط کار قبلی مقادیر متفاوتی برای چگالی شار مغناطیسی در همین لحظه بدست می‌آید یا به عبارت ساده‌تر حلقه هیستریزیس برای یک ولتاژ با دو شرایط کاری متفاوت یکسان نخواهد بود که همین موضوع تاثیر بسزایی بر روی مشخصه‌های عملکردی موتور خواهد داشت.

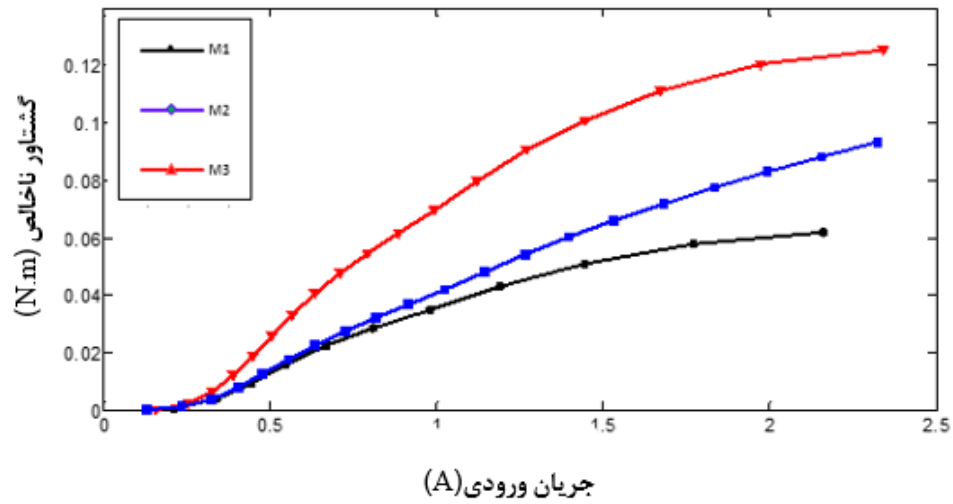
۳-۶-۱- مقایسه عملکرد موتور هیستریزیس - رلوکتانس با موتورهای هیستریزیس تک روتوره و دو

روتوره تخت

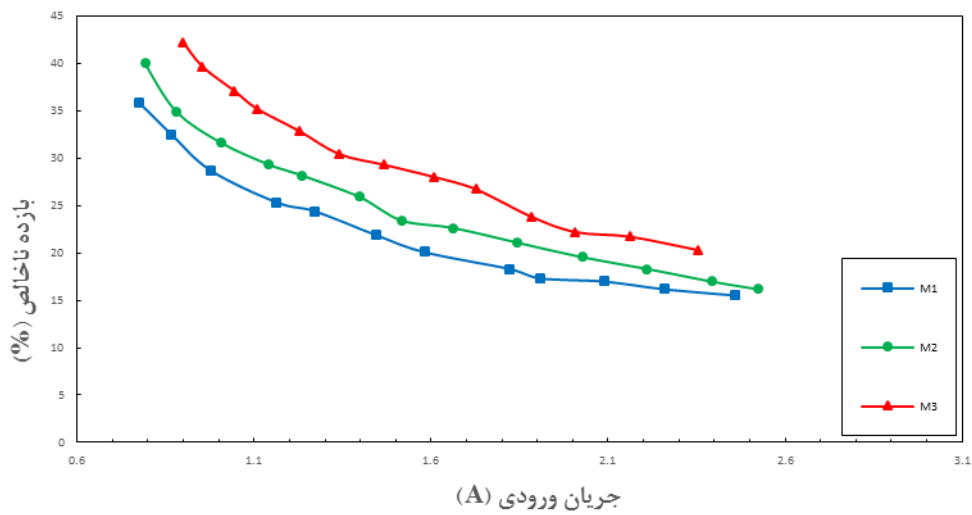
در این قسمت مشخصه‌های عملکردی موتور در شرایط عملکرد دائمی و تحت یک بار با گشتاور ثابت ارائه شده است. با توجه به پایین بودن توان خروجی ماشین مورد نظر و همچنین سرعت نسبتاً بالای آن، گشتاور اصطکاکی ناشی از وجود بلبرینگ‌ها بعنوان بار با گشتاور ثابت تلقی می‌شود. توجه شود برای تست‌های این پایان‌نامه از بلبرینگ‌های مختلف با ضریب اصطکاک بالا استفاده شده است. در این نمودارها موتور هیستریزیس تخت تک روتوره با M_1 ، موتور هیستریزیس تخت دوروتوره با M_2 و موتور هیستریزیس رلوکتانس با M_3 نشان داده شده است.



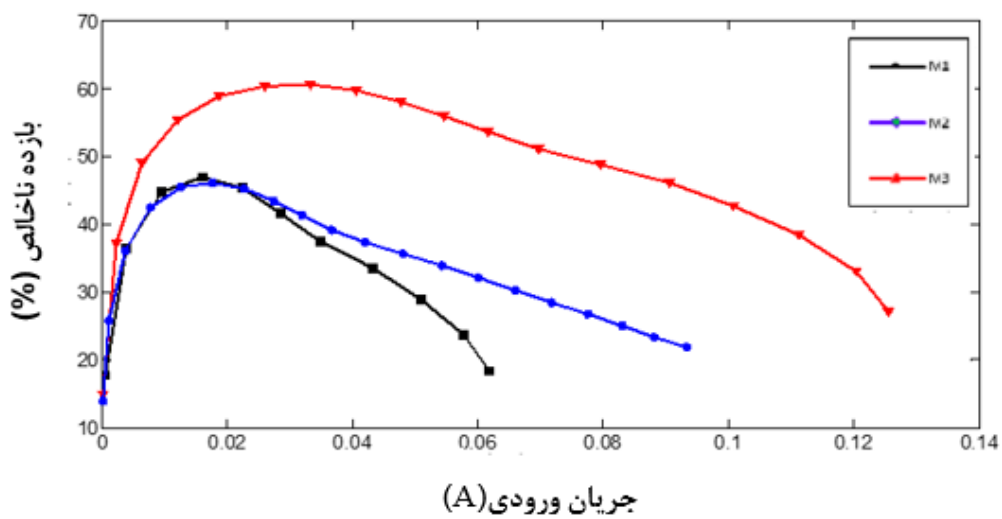
شکل ۳-۶: نمودار گشتاور خروجی موتور نسبت به تغییرات جریان ورودی در سرعت سنکرون (آزمایش عملی)



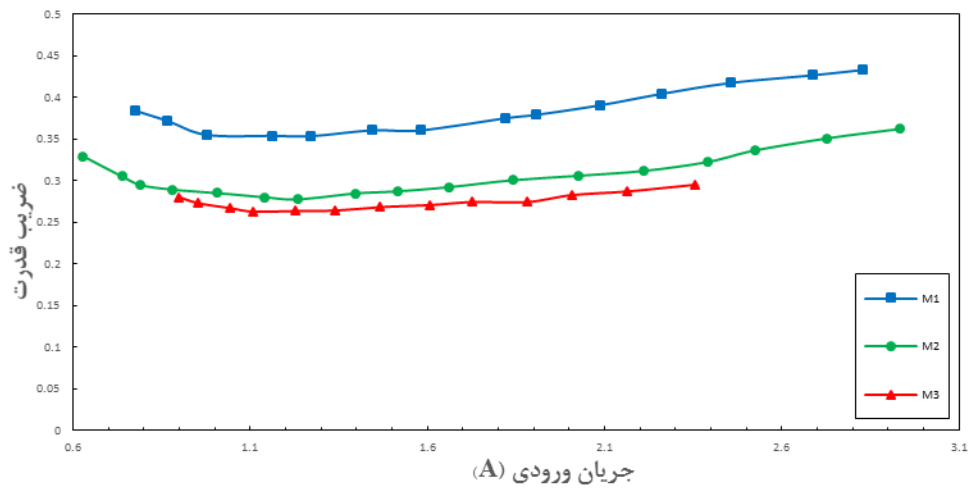
شکل ۴-۶: نمودار گشتاور خروجی موتور نسبت به تغییرات جریان ورودی در سرعت سنکرون (مدل سازی)



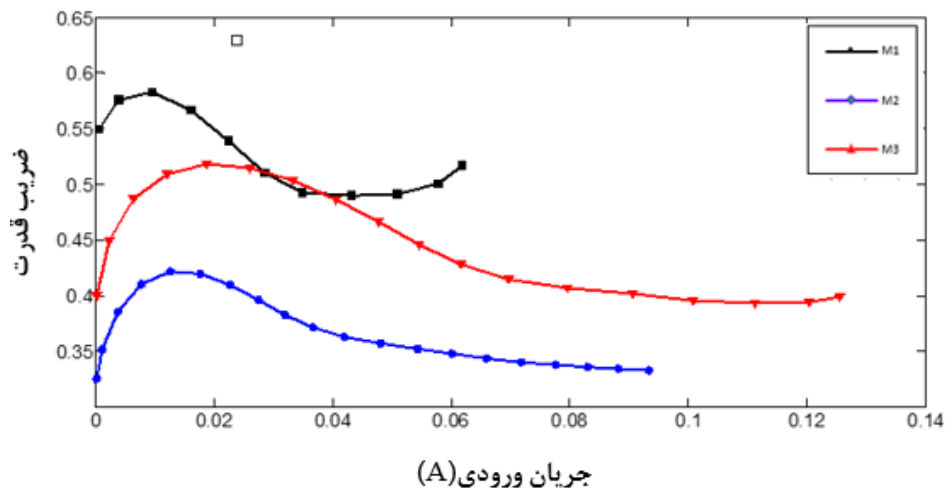
شکل ۵-۶: بازده ناخالص خروجی موتور نسبت به تغییرات جریان ورودی در سرعت سنکرون (آزمایش عملی)



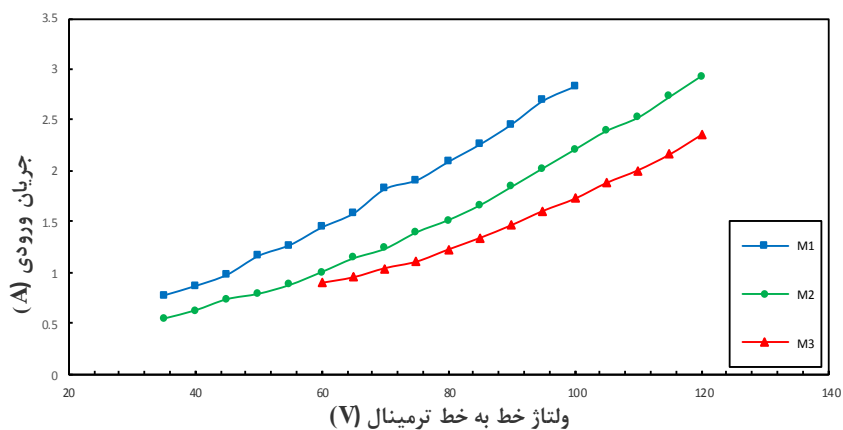
شکل ۶-۶: بازده ناخالص خروجی موتور نسبت به تغییرات جریان ورودی در سرعت سنکرون (مدل سازی)



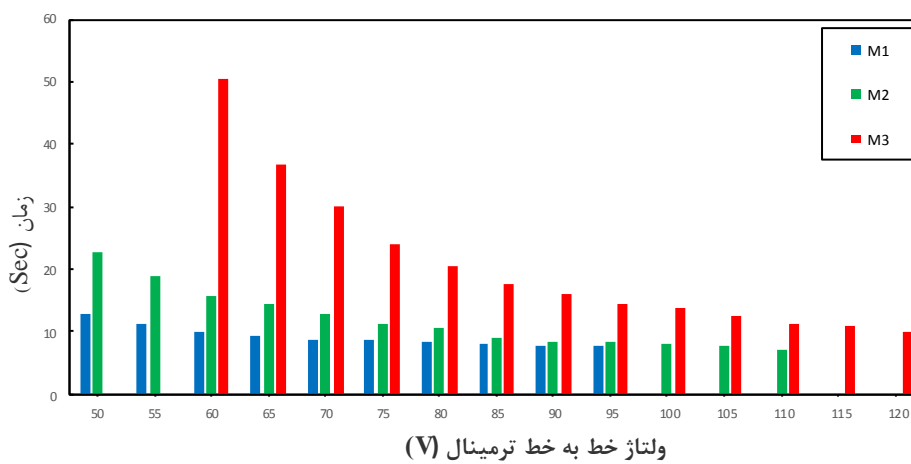
شکل ۶-۷: ضریب قدرت موتور نسبت به تغییرات جریان ورودی در سرعت سنکرون



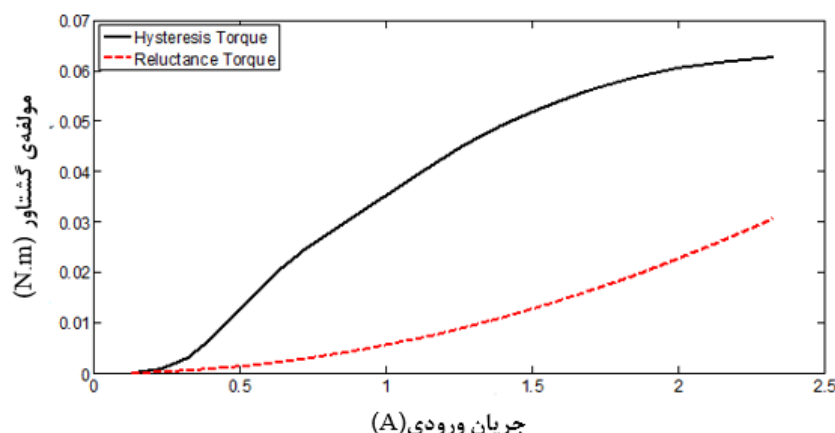
شکل ۶-۸: ضریب قدرت موتور نسبت به تغییرات جریان ورودی در سرعت سنکرون (مدل سازی)



شکل ۶-۹: جریان ورودی موتور نسبت به تغییرات ولتاژ خط در سرعت سنکرون



شکل ۶-۱۰: زمان رسیدن به سرعت سنکرون موتور نسبت به تغییرات ولتاژ خط



شکل ۶-۱۱: مولفه گشتاور ناشی از مولفه هیستریزیس و رلوکتانسی تولید شده در موتور (مدل سازی)

شکل های ۲-۷ تا ۶-۷ مشخصه های عملکردی موتورهای M_1 تا M_3 را نشان می دهند. همانطور که در شکل ۲-۷ مشاهده می شود، در سرعت سنکرون و به ازای جریان های ورودی مختلف، همواره گشتاور ناخالص خروجی موتور هیستریزیس - رلوکتانس نسبت به دو موتور دیگر بیشتر می باشد و دلیل آن اضافه شدن مولفه گشتاور رلوکتانسی است. شکل ۳-۷ کاهش بازده موتورهای M_1 تا M_3 را با افزایش جریان نشان می دهد. با توجه به ثابت بودن توان خروجی و افزایش تلفات اهمی با افزایش جریان ورودی موتور، روند کاهش بازده برای تمام موتورها قابل توجیه می باشد.

ضریب توان از تقسیم توان اکتیو بر توان ظاهری ورودی بدست آمده است. با افزایش جریان ورودی، نرخ تغییرات توان اکتیو ورودی نسبت به توان ظاهری بیشتر است و لذا ضریب توان افزایش می یابد. از طرف دیگر مطابق شکل ۴-۱۷ جریان کشیده شده توسط موتور هیستریزیس- رلوکتانس M_3 در سرعت سنکرون نسبت به دو موتور هیستریزیس تک و دوروتوره کمتر است و همین موضوع دلیل بر کمتر بودن ضریب توان این موتور نسبت به دو موتور دیگر است.

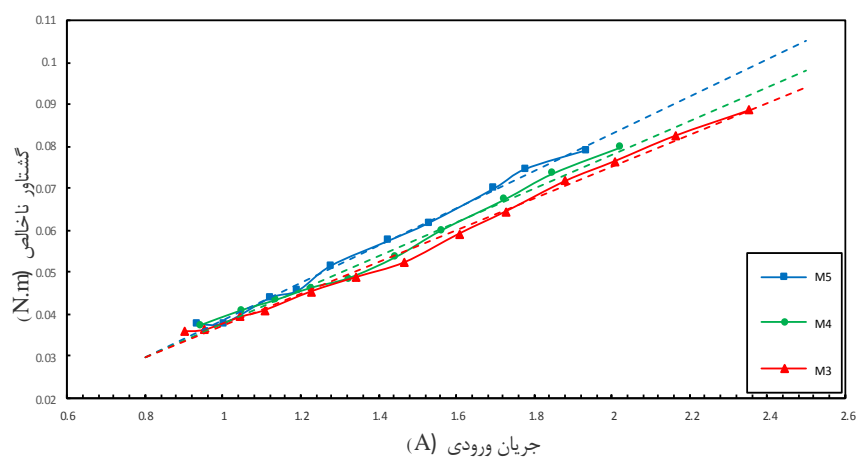
شکل ۶-۷ زمان رسیدن به سرعت سنکرون موتورهای M_1 تا M_3 را نشان می دهد. با توجه به این نمودار، موتور M_3 مدت زمان بیشتری را نسبت به دو موتور دیگر نیاز دارد تا به سرعت سنکرون برسد و دلیل اصلی این موضوع وجود برجستگی در موتور هیستریزیس- رلوکتانس است. در جدول شماره ۱-۷ خلاصه ای از نتایج مقایسه ای بین مشخصه های عملکردی سه موتور ارائه شده است.

جدول شماره ۷-۱: مقایسه مشخصه‌های عملکردی موتورهای M1 تا M3

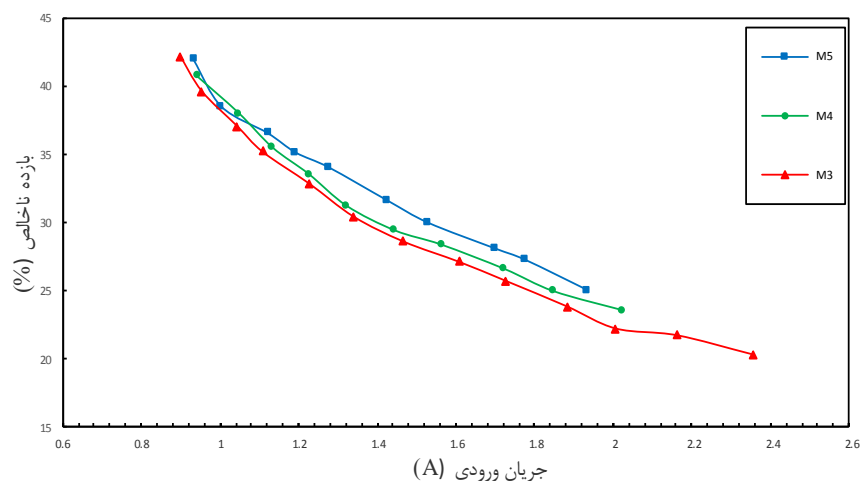
موتور با بیشترین مقدار	موتور با کمترین مقدار	کمیت
M3	M1	گشتاور ناخالص
M3	M1	بازده ناخالص
M1	M3	ضریب قدرت
M1	M3	جریان ورودی
M3	M1	زمان سنکرونیزم

۷-۳-۲- مقایسه عملکرد موتورهای هیستریزیس- رلوکتانس با دیسک‌های رلوکتانسی مختلف

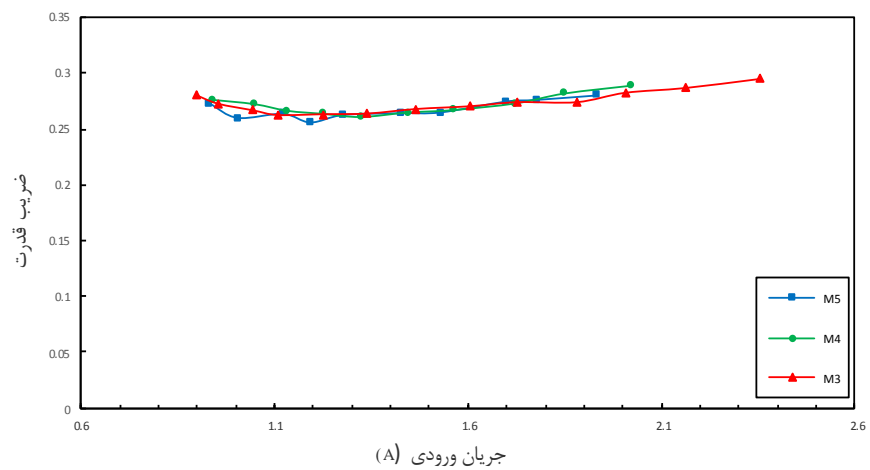
در این قسمت مشخصه‌های عملکردی موتور هیستریزیس-رلوکتانس به همراه دیسک‌های رلوکتانسی با ضخامت‌های ۴ میلی‌متر (M5)، ۴٫۵ میلی‌متر (M4) و ۶ میلی‌متر (M3) ارائه می‌شود. شکل‌های ۷-۷ الی ۷-۱۱ مشخصه‌های عملکردی موتور هیستریزیس-رلوکتانس با دیسک‌های رلوکتانسی متفاوت را بر حسب جریان ورودی نشان می‌دهند.



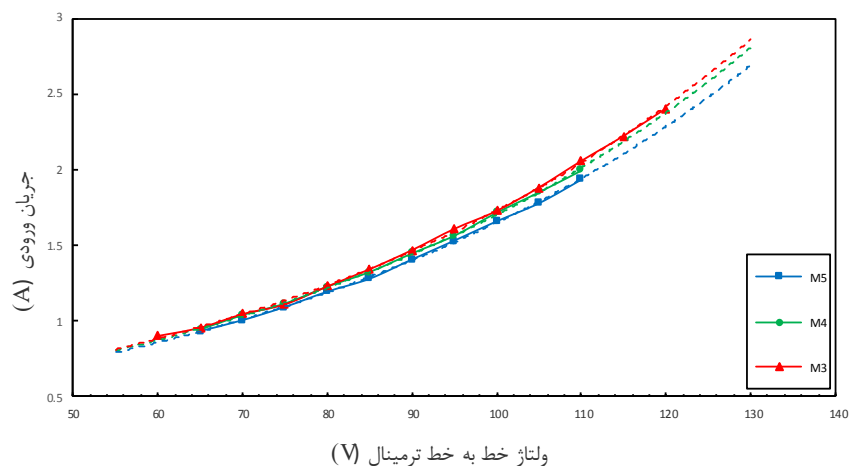
شکل ۶-۱۲: گشتاور موتور نسبت به تغییرات جریان فاز ورودی موتور در سرعت سنکرون



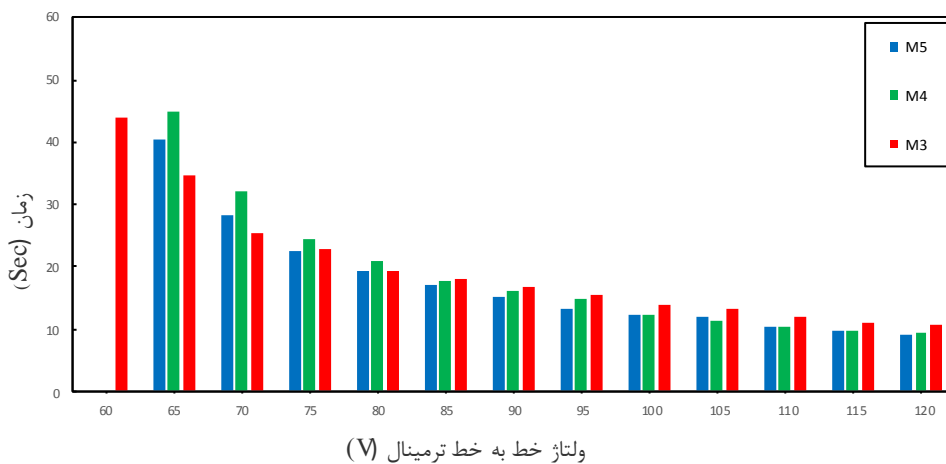
شکل ۶-۱۳: بازده موتور نسبت به تغییرات جریان فاز ورودی در سرعت سنکرون



شکل ۶-۱۴: ضریب قدرت موتور نسبت به تغییرات جریان فاز ورودی در سرعت سنکرون



شکل ۶-۱۵: جریان ورودی موتور نسبت به تغییرات ولتاژ خط ورودی در سرعت سنکرون



شکل ۶-۱۶: زمان رسیدن به سرعت سنکرون موتور نسبت به تغییرات ولتاژ خط

همانطور که در شکل ۷-۷ مشاهده می‌شود، موتور M5 در سرعت سنکرون و به ازای جریان‌های ورودی مختلف نسبت به دو موتور M3 و M4 همواره دارای گشتاور بیشتری است و دلیل این موضوع به ضخامت برجستگی در قسمت رلوکتانسی مربوط می‌شود. با توجه به ثابت بودن همه پارامترها بجز ضخامت روتور، می‌توان بیان کرد که هرچه عمق برجستگی بیشتر باشد گشتاور ناخالص خروجی کمتر است. در شکل ۷-۸ بازده موتورهای M3 تا M5 با افزایش جریان ورودی به موتور کاهش می‌یابد. با

توجه به ثابت بودن توان خروجی و افزایش تلفات اهمی، روند کاهش بازده برای همه موتورهای قابل توجهیه می‌باشد. از طرف دیگر هرچه ضخامت دیسک رلوکتانسی کمتر باشد، بازده ناخالص خروجی موتور بیشتر است.

با افزایش عمق شیار (ضخامت دیسک رلوکتانسی) جریان ورودی به موتور برای رسیدن به سرعت سنکرون بیشتر شده است که این موضوع در شکل ۷-۱۰ قابل مشاهده می‌باشد. تفاوت در مقادیر ضریب توان و زمان شتابگیری ناچیز است که این موضوع در شکل‌های ۷-۹ و ۷-۱۱ قابل مشاهده است. در جدول شماره ۷-۲ خلاصه‌ای از نتایج مقایسه‌های بین مشخصه‌های عملکردی سه موتور ارائه شده است.

جدول ۷-۲: مقایسه مشخصه‌های عملکردی موتور هیستریزس - رلوکتانس با ضخامت‌های متفاوت دیسک رلوکتانسی

کمیت	موتور با کمترین مقدار	موتور با بیشترین مقدار
گشتاور ناخالص	M3	M5
بازده ناخالص	M3	M5
جریان ورودی	M5	M3

فصل ۷: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۷-۱- نتیجه گیری

مطابق آنچه که در فصل‌های قبلی گفته شد، هر کدام از موتور هیستریزیس و رلوکتانسی دارای ویژگی‌های منحصر بفردی است. با ترکیب این دو موتور می‌توان به موتوری با مشخصه‌های عملکردی بهتری دست یافت. در این پایان‌نامه یک موتور تلفیقی هیستریزیس- رلوکتانسی معرفی شد و مورد آزمایشات متعدد قرار گرفت. با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌های عملی می‌توان نتایج بدست آمده را از دو دیدگاه مورد بررسی و مطالعه قرار داد. اولاً همانطور که انتظار می‌رفت تلفیق موتورهای هیستریزیس و رلوکتانسی منجر به بهتر شدن پارامترهای عملکردی موتور از جمله گشتاور خروجی و بازده می‌شود. تفاوت اصلی میان موتور تلفیقی پیشنهادی و ساختارهای تخت قبلی، برجسته بودن یکی از دیسک‌های روتور است. بر همین اساس موتور هیستریزیس- رلوکتانسی (M3) در مقایسه با دو موتور هیستریزیس تخت تک و دو روتوره (M1) و (M2)، گشتاور و بازده بیشتری دارد. از دست دادن یکی از مولفه‌های گشتاور هیستریزیس در موتور هیستریزیس- رلوکتانسی M3 در هنگام راه‌اندازی و همچنین ایجاد گشتاورهای دندان‌های در سرعت‌های زیر سنکرون باعث افزایش زمان راه‌اندازی این موتور نسبت به دو موتور M1 و M2 می‌شود. به هر حال با تلفیق موتور هیستریزیس و رلوکتانسی، بازده موتور به مقدار قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته است. همچنین با داشتن گشتاور رلوکتانسی در سرعت سنکرون، قابلیت تولید گشتاور موتور M3 نسبت به هر دو موتور هیستریزیس تک و دو روتور بیشتر است. به این ترتیب ضریب قدرت نسبتاً کم موتور تلفیقی و زمان راه‌اندازی بالای آن در بسیاری از کاربردها به دلیل افزایش نسبتاً بزرگ بازده آن به راحتی قابل تحمل و پذیرش می‌باشد. نکته آخر اینکه، تغییر ضخامت دیسک رلوکتانسی (کاهش یا افزایش عمق شیار رلوکتانسی) و تعیین یک مقدار بهینه برای آن نیز می‌تواند عملکرد موتور را تا حدودی بهبود بخشد. نتایج آزمایشات انجام گرفته روی موتور مورد مطالعه این پایان‌نامه نشان می‌دهد که گشتاور ناخالص و بازده ناخالص موتور M5 نسبت به دو موتور M4 و M3 بیشتر و جریان فاز ورودی آن کمتر است. تفاوت در مقادیر ضریب توان و زمان شتابگیری این سه موتور ناچیز است.

۷-۲- پیشنهادات

به منظور توسعه و بهره‌برداری از مزایای موتور تلفیقی پیشنهادی با ساختار جدید و در نظر گرفتن این نکته که این موتور برای اولین بار با این ساختار معرفی شده است، پیشنهادات زیر جهت انجام کارهای بیشتر در آینده بر روی این موتور ارائه شده است.

- ۱- استفاده از الگوریتم ارائه شده برای مدل‌سازی موتور در حالت گذرا.
- ۲- انجام بهینه‌سازی در الگوریتم طراحی ارائه شده برای موتور هیستریزیس-رلوکتانس تخت.
- ۳- تغییر در ساختار سیم‌پیچی و بررسی ساختارهای مختلف سیم‌پیچی بر روی مشخصه‌های عملکردی موتور.
- ۴- تغییر در ساختار استاتور و بررسی موتور با استاتور شیاردار و مقایسه آن با نوع بدون شیار.

- [1] C.P.Steinmetz, Theory and Calculation of Electrical Apparatus (a book), 1917.
- [2] T.Ishikawa, T.Kataoka, "Basic Analysis of Disc-Type Hysteresis Motor," Electrical Engineering in Japan, vol. 101, pp. 55-62, 1981.
- [3] M. A. Rahman, A. M. Osheiba, T. A. Little, "Effects of Samarium Cobalt Permanent Magnet on the Performance of Polyphase Hysteresis-Reluctance Motors," IEEE Transaction on Magnetics, Vols. MAG-20, no. 5, pp. 1765-1767, September 1984.
- [4] M. A. Rahman, A. M. Osheiba, "Steady-State Performance Analysis of Polyphase Hysteresis-Reluctance Motors," IEEE Transactions on Industry Applications, Vols. IA-21, no. 4, pp. 659-663, May/June 1985.
- [5] R. Nasiri-Zarandi; M. Mirsalim; R. Ashrafi. "Investigation of the effect of winding distribution and slot opening on performance of an axial flux hysteresis motor." Power Electronics, Drives Systems & Technologies. 27 April 2015.
- [6] B. J. Chalmers, B.Sc., Ph.D., C.Eng., M J.E.E., and I. R. Ciric, Dr.-Ing., "Performance analysis of hysteresis-reluctance motors with segmental rotors" PROC. IEE, Vol. 121, No. 9, SEPTEMBER 1974.
- [7] M. Sanati Moghadam, T. Ghanbari, and A. Darabi, "Comparison between coreless and slotless kinds of dual rotor discs hysteresis motors," IET Electr. Power Appl., vol. 10, no. 2, pp. 133–140, 2016.
- [8] A. Darabi, H. Tahanian, S. Amani, and M. Sedghi, "An Experimental Comparison of DiscType Hysteresis Motors With Slotless Magnetic Stator Core," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 64, no. 6, pp. 4642–4652, 2017.
- [9] B.R.Teare, "Theory of Hysteresis Motor Torque," AIEE, vol. 59, pp. 907-912, March 1940.
- [10] H.C.Roters, "The Hysteresis Motor-Advances Which Permit Economical Fractional Horse Power Rating," AIEE, vol. 66, pp. 1419-1430, August 1947.
- [11] M.A.Copeland, G.R.Slemon, "An Analysis of Hysteresis Motor: I-Analysis of the Idealized Machine," AIEE, pp. 34-42, April 1963.

- [12] M.A.Copeland, G.R.Slemon, "An Analysis of Hysteresis Motor: II-The Circumferential Flux Machine," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 83, pp. 619-625, June 1964.
- [13] M.A.Rahman, M.A.Copeland, G.R.Slemon, "An Analysis of the Hysteresis Motor Part III: Parasitic Losses," IEEE Transaction Power Apparatus and Systems, vol. 88, pp. 954-961, 1969.
- [14] M.A.Rahman, "Field Analysis of Polyphase Hysteresis Motor," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 99, pp. 1164-1171, May/June 1980.
- [15] T.Ishikawa, T.Kataoka, "Basic Analysis of Disc-Type Hysteresis Motor," Electrical Engineering in Japan, vol. 101, pp. 55-62, 1981.
- [16] V.I.Perov, "Synchronuos Motor with Excitation by Permanent Magnet with Hysteresis Loop," Vestnik, Elektropomyshlennosti, vol. 3, p. 32, 1959.
- [17] H. Papst. Patent 8615, 1959.
- [18] G.Wakui, "Effect of Higher Harmonic Fields on the Operating Characteristics of Hysteresis Motor.Part II: Case Where Two or More Higher Harmonics Exist," Electrical Engineering in Japan, vol. 93, pp. 66-74, Apdl 1973.
- [19] S. kajita, "Analysis of the Characteristics of Hysteresis Motor Taking Into Account Higher Harmonics of Magnetomotive Force," Electrical Engineering in Japan, vol. 96, pp. 40-48, September 1976.
- [20] T. Kataoka, T. Ishikawa, and T. Takahashi, "Analysis of a Hysteresis Motor with Overexcitation," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 18, pp. 1731-1733, November 1982.
- [21] G.Wakui, S.Nishino, "Performance of Hysteresis Motor after Short-Duration Overexcitation (Underexcitation) and Its Analysis," Electrical Engineering i n Japan, vol. 101, pp. 100-109, June 1981.
- [22] S.T.Clurman, "On Hunting In Hysteresis Motors And New Damping Techniques New Damping Techniques," IEEE Transactions on Magnetics, pp. 512-517, September 1971.
- [۲۳] م. ح. صادقی، "بهینه‌سازی ماشین‌های پسماند تخت چند طبقه طراحی و شبیه‌سازی،" دانشگاه شاهرود، ۱۳۸۹.
- [۲۴] م. صحتی، "طراحی . مدل‌سازی موتور سنکرون پسماند تخت نوع دو روتوره،" دانشگاه شاهرود، ۱۳۸۷.
- [۲۵] م. خسروی " تحلیل عملکرد یک ترانسفورماتور با استفاده از مدل غیر خطی و چند مقداره پریساچ،" دانشگاه شاهرود، ۱۳۸۸.
- [۲۶] ز، نصیری، "بررسی موتورهای هیستریزیس سنکرون،" دانشگاه شاهرود، ۱۳۸۵.

- [27] A. Darabi, M. Sanati, and T. Ghanbari, "Coreless Dual-rotor Disc Hysteresis Motor, Modeling, and Performance Prediction," *Electric Power Components and Systems*, vol. 38, pp. 575-591, 2010.
- [28] A. Darabi, M.H. Sadeghi, A. Hassannia, "Design Optimization of Multistack Coreless Disk-Type Hysteresis Motor," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 26, no. 4, pp. 1081-1087, December 2011.
- [29] M. H. Sadeghi and A. Darabi, "Optimization of a New Type of Hysteresis Motor Using Genetic Algorithm," in 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering, IEEEIC, Prague , 2010.
- [30] A. Darabi, T. Ghanbari, and M. Sanati-Moghadam, "Slotless axial flux hysteresis motor, modelling and performance calculation," *IET Electrical Power Application*, vol. 3, no. 5, pp. 491-501, 2009.
- [31] A. Darabi, T. Ghanbari, M. Rafiei, H. Lesani and M. Sanati-Moghadam, "Dynamic Performance Analysis of Hysteresis Motors by a Linear Time-Varying Model," *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*, vol. 4, no. 4, pp. 202-215, 2008.
- [32] Ahmad Darabi, Mohamadreza Rafiei, and Teimoor Ghanbari, "Hunting in Hysteresis Motors, Impact of Supply," in *Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems*, Seoul, Korea, 2007.
- [۳۳] زهرا نصیری قیداری، حمید لسانی، احمد دارابی و فریدون توتونچیان، " تحلیل دینامیکی موتور هیستریزس سنکرون آهنربای دائم با در نظر گرفتن اثر فوکو، " *مجله فنآوری و آموزش*، جلد ۲، شماره ۱، ۱۳۸۶.
- [34] K. C. Kim, D. H. Koo, J. P. Hong, and J. Lee, "A study on the characteristics due to pole-arc to pole-pitch ratio and saliency to improve torque performance of IPMSM," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, no. 6, pp. 2516–2518, 2007.
- [۳۵] ع. بهنیافر، "طراحی و تحلیل عملکرد موتور سنکرون هیستریزس آهنربای دائم نوع تخت،" *دانشگاه شاهرود*، ۱۳۹۶.
- [36] Z. Nasiri-Gheidari, H. Lesani and F. Tootoonchian, "A New Hunting Control Method for Permanent Magnet Hysteresis Motors," *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering, IJEEE*, vol. 2, no. 3, pp. 121-130, July 2006.
- [37] J. Gieras, *Permanent magnet motor technology: design and applications*, 3rd ed., CRC Press, 2010.

[38] A. Rahman, "Analytical Models for Polyphase Hysteresis Motor," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol. 92, no. 1, pp. 237-242, 1973.

[39] K. C. Kim, D. H. Koo, J. P. Hong, and J. Lee, "A study on the characteristics due to pole-arc to pole-pitch ratio and saliency to improve torque performance of IPMSM," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, no. 6, pp. 2516–2518, 2007.

Abstract

In this thesis, a new structure for hysteresis-reluctance synchronous (HRS) motor is introduced. Hysteresis and reluctance motors have specially features so, it seems that these tow motors are complement of each other. Thus, their combination yields a motor with an excellent performance. The main purposes to present this structure is preserve the major advantage of the both motors in the new moto, a disc type slotless structure is chosen. In this report present a new analytical method for modelling of HR motor. In the analytical modelling method, a new iterative algorithm is proposed. This algorithm consists of one iteration loop for each input current to find the maximum flux density of the operational hysteresis loop of the motor. Furthermore, this study presents a new design algorithm that allows user to determine the present of combination of the hysteresis and Reluctance motors in the new hybrid motor. Finally the experimental results are presented.

Keywords: *Equivalent circuit; Hystersis and reluctance component of torque; Hystersis motor; Modeling of motors; Reluctance motor.*



Department of Electrical and Robotics Engineering
M.Sc Thesis in power Engineering

Design, Modelling of The Steady State and construction of a
prototype Dual Rotor Disk Type Hysteresis_Reluctance motor

Hamidreza Mizani

Supervisor:

Dr. Ahmad Darabi

September 2018

