



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه دکتری مهندسی الکترونیک قدرت و ماشین های الکتریکی

رساله دکتری

طراحی و تحلیل عملکرد موتور سنکرون هیستریزیس آهنربای دائم نوع تخت

نگارنده: علی بهنیافر

استاد راهنما:

دکتر احمد دارابی

شهریور ۱۳۹۶

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌شان از کلمه ایثار

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین
دلگرمی و پشتیبان است

به پاس قلب‌های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهِشان به شجاعت
می‌گراید

و به پاس محبت بی‌دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند...

سپاسگزاری

برخود لازم می‌دانم تا از استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر احمد دارابی که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را برعهده گرفتند؛ کمال قدردانی و تشکر را داشته باشم.

همچنین بسیار سپاسگزارم از دوست صمیمی و همدلم؛ جناب آقای مهندس حامد طحانیان که همراهی‌های دلسوزانه و بی‌چشمداشت ایشان بسیاری از سختی‌ها را برایم آسان نمود.

چکیده

در این رساله یک موتور سنکرون هیستریزس آهنربای دائم (PMHS) با ساختار جدید معرفی می‌شود. هر یک از موتورهای هیستریزس و آهنربای دائم دارای ویژگی‌های منحصربه‌فردی هستند که با ترکیب این دو موتور می‌توان به موتوری با مشخصه عملکردی بسیار درخشان دست یافت. انتخاب ساختار تخت با استاتور بدون شیار منجر می‌شود تا اکثر مزایای هر دو موتور، در موتور ترکیبی حاصل باقی بماند. همچنین رساله پیش‌رو نحوه مدل‌سازی موتور PMHS نوع تخت را به دو روش تحلیلی و عددی ارائه می‌دهد. در روش تحلیلی با استفاده از قانون مداری آمپر، قانون پیوستگی شار و قانون القای فارادی روابطی ریاضی برای محاسبه ولتاژ فاصله هوایی و جریان تحریک موتور استخراج می‌شود. برای پیاده‌سازی این روش تحلیلی، الگوریتم تکراری جدیدی پیشنهاد شده است. در این الگوریتم از یک فرآیند تکرار برای یافتن دامنه چگالی شار حلقه هیستریزس کاری موتور استفاده می‌شود. پیاده‌سازی روش مدل‌سازی عددی با برقراری تزویج میان محیط برنامه‌نویسی نرم‌افزار Matlab با نرم‌افزار اجزاءمحدود COMSOL، تحقق یافته است. علت تزویج این نرم‌افزارها، ناتوانی نرم‌افزارهای اجزاءمحدود در پیاده‌سازی رفتار ماده هیستریزس می‌باشد. همچنین یک الگوریتم طراحی کارآمد و انعطاف‌پذیر برای طراحی موتور PMHS ارائه شده است. این الگوریتم امکان تعیین میزان درصد ترکیب دو موتور هیستریزس و آهنربای دائم را در موتور PMHS، در اختیار کاربر قرار می‌دهد. به منظور اعتبارسنجی نتایج، یک نمونه موتور PMHS ساخته شده و تحت آزمایشات لازم قرار گرفته است. نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش‌های تحلیلی و عددی با آزمایشات عملی انجام شده روی موتور نمونه، تقارب بسیار مطلوبی داشته و مؤید کارایی این روش‌ها در پیش‌بینی عملکرد موتور در شرایط حالت دائمی با حداکثر بار بوده و همچنین عملکرد درخشان موتور PMHS را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: موتور هیستریزس، موتور آهنربای دائم، مدل‌سازی تحلیلی، مدل‌سازی

اجزاءمحدود، موتور ترکیبی

کارهای پژوهشی مستخرج از این رساله:

مقالات:

1- Ali Behniafar, Ahmad darabi, "Analytical Modeling of Disc-type Permanent Magnet Hysteresis Motor in Steady-state Operational Conditions", COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, vol. 36, no. 4, 2017.

۲- احمد دارابی، علی بهنیافر، حامد طحانیان و هاشم یوسفی، "مدلسازی عملکرد حالت دائمی موتور هیستریزیس استوانه‌ای معکوس شارمحیطی با استفاده از روش اجزاء محدود"، مجله (علمی-پژوهشی) مهندسی برق دانشگاه تبریز، ۱۳۹۵.

۳- علی بهنیافر، احمد دارابی، "مدلسازی تحلیلی یک موتور هیستریزیس آهنربای دائم نوع تخت شارمحیطی در شرایط عملکرد حالت دائمی" مجموعه مقالات سی و یکمین کنفرانس بین‌المللی برق PSC، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران، ۳-۵ آبان ۱۳۹۵.

۴- علی بهنیافر، احمد دارابی، "طراحی یک موتور هیستریزیس آهنربای دائم نوع تخت شارمحیطی" چهارمین کنفرانس ملی برق در مهندسی برق و کامپیوتر CEE، دانشگاه تربیت مدرس، ایران، دی ۱۳۹۵.

۵- علی بهنیافر، احمد دارابی، "بررسی اثر هر یک از موتورهای هیستریزیس و آهنربای دائم در موتور PMHS" سومین کنفرانس ملی دستاوردهای نوین در برق و کامپیوتر و صنایع، دانشگاه اسفراین، ایران، مهر ۱۳۹۶.

ثبت اختراع:

علی بهنیافر، احمد دارابی، "موتور سنکرون نوع تخت ترکیبی متشکل از دو روتور هیستریزیس و آهنربای دائم"، تیر ۱۳۹۶.

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه	۱
۱-۱- مقدمه	۱
۱-۲- سابقه پژوهشی موضوع رساله	۶
فصل ۲: معرفی موتور هیستریزیس، موتور آهنربای دائم و موتور ترکیبی هیستریزیس آهنربای دائم	۱۱
۱-۲- مقدمه	۱۱
۲-۲- معرفی موتور هیستریزیس	۱۳
۱-۲-۲- انواع ساختارهای موتور هیستریزیس	۱۴
۳-۲- مروری بر مهم‌ترین مراجع پیرامون تحلیل ماشین‌های هیستریزیس	۲۴
۴-۲- معرفی موتور سنکرون آهنربای دائم	۳۲
۱-۴-۲- نحوه عملکرد موتور سنکرون با آهنربای دائم	۳۳
۲-۴-۲- انواع ساختارهای موتور سنکرون با آهنربای دائم	۳۴
۳-۴-۲- انواع توپولوژیهای ماشین شارمحوری آهنربای دائم [60]	۳۵
۴-۴-۲- برخی از ویژگیهای مشترک ماشینهای AFPM [62]	۳۶
۵-۴-۲- مقایسه کلی ماشینهای شارمحوری با ماشین شارشعاعی آهنربای دائم [60]	۳۷
۵-۲- معرفی موتور سنکرون هیستریزیس آهنربای دائم	۳۹
فصل ۳: تئوری عملکرد موتور هیستریزیس و موتور آهنربای دائم	۴۱

۴۱	۱-۳- مقدمه
۴۲	۲-۳- پدیده هیستریزیس
۴۵	۳-۳- تئوری عملکرد موتور هیستریزیس
۵۲	۱-۳-۳- تلفات ماشین هیستریزیس
۵۴	۲-۳-۳- نوسانات سرعت (هانتینگ)
۵۴	۳-۳-۳- تحریک اضافی کوتاه مدت
۵۵	۴-۳-۳- مواد مغناطیس دائم مورد استفاده در موتورهای هیستریزیس
۵۷	۵-۳-۳- مدل تحلیلی موتور هیستریزیس تخت
۵۷	۶-۳-۳- استخراج مدل موتور هیستریزیس تخت با استفاده از روش تحلیلی
۷۷	۷-۳-۳- معرفی مدل‌های مطرح هیستریزیس
۸۰	۴-۳- تئوری عملکرد موتور سنکرون آهنربای دائم
۸۴	۱-۴-۳- مدل‌سازی موتور آهنربای دائم
۸۶	فصل ۴: ارائه ساختار جدید برای موتور سنکرون هیستریزیس آهنربای دائم
۸۶	۱-۴- مقدمه
۸۷	۲-۴- ارائه ساختار پیشنهادی
۸۷	۱-۲-۴- ساختار موتور PMHS نوع تخت پیشنهادی
۸۸	۳-۴- بررسی برخی مسائل پیرامون موتورهای سنکرون هیبرید
۹۱	فصل ۵: مدل‌سازی تحلیلی و عددی موتور سنکرون هیستریزیس آهنربای دائم نوع تخت
۹۱	۱-۵- مقدمه

۹۲.....	۲-۵- مدل سازی تحلیلی موتور هیستریزیس آهنربای دائم با ساختار پیشنهادی
۹۷.....	۳-۵- مدل سازی عددی موتور هیستریزیس آهنربای دائم با ساختار پیشنهادی
۹۹.....	۱-۳-۵- الگوریتم مدل سازی موتور PMHS به کمک روش اجزاءمحدود
۱۰۸	فصل ۶: طراحی موتور PMHS نوع تخت
۱۰۸.....	۱-۶- مقدمه
۱۰۹.....	۲-۶- طراحی موتور PMHS نوع تخت
۱۱۷.....	۳-۶- نتایج حاصل از پیاده سازی الگوریتم طراحی
۱۲۱.....	فصل ۷: نتایج شبیه سازی و آزمایشات عملی
۱۲۱.....	۱-۷- مقدمه
۱۲۲.....	۲-۷- مشخصات موتور PMHS ساخته شده
۱۲۴.....	۳-۷- مقایسه و تحلیل نتایج
۱۳۱.....	فصل ۸: نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۳۱.....	۱-۸- نتیجه گیری
۱۳۲.....	۲-۸- پیشنهادات

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: موتور هیستریزیس شارشعاعی ۱۵
- شکل ۲-۲: موتور هیستریزیس شارمحیطی ۱۵
- شکل ۳-۲: موتور هیستریزیس استوانه‌ای معکوس ۱۵
- شکل ۴-۲: موتور هیستریزیس نوع تخت شارمحیطی و نحوه تشکیل قطب‌ها در آن ۱۷
- شکل ۵-۲: ساختار موتور هیستریزیس نوع تخت دو روتوره بدون هسته ۱۸
- شکل ۶-۲: مسیر شار در موتور هیستریزیس نوع تخت دو روتوره بدون هسته ۱۸
- شکل ۷-۲: ساختار موتور هیستریزیس نوع تخت دو روتوره بدون شیار ۲۱
- شکل ۸-۲: مسیر شار در موتور هیستریزیس نوع تخت دو روتوره بدون شیار ۲۱
- شکل ۹-۲: ساختمان یک نمونه روتور موتور سنکرون آهنربای دائم ۳۴
- شکل ۱۰-۲: ژنراتور سنکرون آهنربای دائم ۳ مگاوات بدون جعبه دنده برای توربین بادی (زیمنس ۲۰۰۴) ۳۵
- شکل ۱۱-۲: نمودار طبقه‌بندی انواع توپولوژیهای ماشین AFPM ۳۶
- شکل ۱۲-۲: توپولوژی های (a) ماشین RFPM (b) ماشین AFPM [60] ۳۸
- شکل ۱-۳: تغییرات چگالی شار بر حسب شدت میدان مغناطیسی ۴۲
- شکل ۲-۳: هسته مغناطیسی و سیم‌پیچ حامل جریان ۴۳
- شکل ۳-۳: حلقه‌های هیستریزیس اصلی برای چند نقطه مختلف از روتور ماشین هیستریزیس تخت ۴۶
- شکل ۴-۳: خطوط شار در استاتور و روتور یک ماشین هیستریزیس ۴۸
- شکل ۵-۳: تغییرات گشتاور و توان هیستریزیس بر حسب سرعت از لحظه راه‌اندازی تا لحظه ورود به سنکرونیزم ۵۰
- شکل ۶-۳: مشخصه گشتاور سرعت ماشین هیستریزیس و بار ۵۱

- شکل ۳-۷: منحنی هیستریزیس با حلقه‌های جزئی ۵۶
- شکل ۳-۸: دو نمای دوبعدی از ماشین هیستریزیس تخت شارمحیطی ۵۹
- شکل ۳-۹: مسیر اعمال قانون مداری آمپر ۶۱
- شکل ۳-۱۰: یک برش دیفرانسیلی از دیسک هیستریزیس ۶۲
- شکل ۳-۱۱: مدار معادل ابتدایی هر فاز از ماشین هیستریزیس استوانه‌ای شارمحیطی ۶۶
- شکل ۳-۱۲: شار پراکندگی شیار. الف) نشت در بخش داخلی شیار و نشت در بخش دهانه شیار [70] و ب) نشت بین دندانه‌های مجاور در فاصله هوایی [70] ۷۲
- شکل ۳-۱۳: ابعاد و پارامترهای شیار مستطیلی کاملاً باز [69] ۷۳
- شکل ۳-۱۴: سیم‌پیچ‌های انتهایی برای موتور هیستریزیس تخت یک‌طرفه با سیم‌پیچ تروئیدال ۷۴
- شکل ۳-۱۵: مدار معادل هر فاز موتور هیستریزیس تخت شارمحیطی برای شرایط عملکرد حالت دائمی ... ۷۶
- شکل ۳-۱۶: مدار معادل کامل هر فاز موتور هیستریزیس تخت شارمحیطی برای شرایط عملکرد حالت دائمی ۷۷
- شکل ۳-۱۷: تغییرات گشتاور برآیند موتور سنکرون برحسب زاویه بار ۸۳
- شکل ۳-۱۸: مشخصه راه‌اندازی یک نمونه موتور سنکرون آهنربای دائم با راه‌انداز القایی ۸۴
- شکل ۳-۱۹: مدار معادل هر فاز موتور سنکرون آهنربای دائم قطب صاف برای مدل سازی شرایط عملکرد حالت دائمی به روش تحلیلی ۸۵
- شکل ۴-۱: ساختار موتور PMHS نوع تخت پیشنهادی ۸۸
- شکل ۵-۱: مدار معادل موتورهای هیستریزیس و آهنربای دائم بدون در نظر گرفتن تلفات اهمی و آهنی و شار پراکندگی، الف) مدار معادل موتور هیستریزیس، ب) مدار معادل موتور آهنربای دائم ۹۲
- شکل ۵-۲: مدار معادل هر فاز از موتور PMHS در شرایط عملکرد حالت دائمی ۹۳
- شکل ۵-۳: فلوجارت الگوریتم پیشنهادی برای مدل سازی موتور PMHS در شرایط عملکرد حالت دائمی به روش تحلیلی ۹۵

- شکل ۴-۵: فلوجارت الگوریتم مدل سازی موتور PMHS به کمک روش اجزاءمحدود ۱۰۰
- شکل ۵-۵: مدار معادل هر فاز در حالت دائمی برای محاسبه ولتاژ ترمینال که در آن \hat{E}_a فازور ولتاژ القایی به دست آمده با مدل اجزاءمحدود است. ۱۰۷
- شکل ۱-۶: برشی از دیسک هیستریزیس ۱۱۴
- شکل ۲-۶: فلوجارت الگوریتم طراحی موتور PMHS نوع تخت ۱۱۶
- شکل ۳-۶: تغییرات ابعاد موتور به ازای تغییرات n_p الف) ضخامت محوری هسته استاتور، ب) ضخامت محوری دیسک هیستریزیس، ج) ضخامت محوری مگنت ها، د) ضخامت محوری نگه دارنده مگنت ها، ه) قطر خارجی موتور ۱۱۹
- شکل ۴-۶: تغییرات پارامترهای عملکردی موتور به ازای تغییرات n_p الف) جریان ورودی موتور، ب) ضریب توان، ج) تلفات آهنی، د) تلفات مسی، ه) توان ورودی، و) بازده ۱۲۰
- شکل ۱-۷: مشخصات تقریب بیضوی حلقه های هیستریزیس ماده سازنده دیسک هیستریزیس موتور تحت مطالعه برحسب دامنه شدت میدان مغناطیسی حلقه. الف) دامنه چگالی شار مغناطیسی حلقه، ب) مساحت حلقه، ج) نفوذپذیری مغناطیسی نسبی و د) زاویه تأخیر هیستریزیس ۱۲۳
- شکل ۲-۷: اجزاء مختلف و مونتاژ نهایی موتور PMHS ساخته شده ۱۲۴
- شکل ۳-۷: حلقه های هیستریزیس کاری بیضوی شکل حاصل از مدل سازی تحلیلی موتور به ازای ولتاژهای ترمینال مختلف ۱۲۶
- شکل ۴-۷: تغییرات جریان ورودی برحسب تغییرات ولتاژ ترمینال ۱۲۷
- شکل ۵-۷: تغییرات ضریب توان برحسب تغییرات ولتاژ ترمینال ۱۲۷
- شکل ۶-۷: تغییرات توان ورودی برحسب تغییرات ولتاژ ترمینال ۱۲۷
- شکل ۷-۷: تغییرات تلفات مسی برحسب تغییرات ولتاژ ترمینال ۱۲۸
- شکل ۸-۷: مش بندی نصف شار فرضی موتور ۱۲۹
- شکل ۹-۷: توزیع چگالی شار مغناطیسی و خطوط شار مغناطیسی ۱۲۹

شکل ۷-۱۰: شکل موج شدت میدان مغناطیسی و هارمونیک اول آن ۱۳۰

فصل ۱: مقدمه

۱-۱- مقدمه

موتورهای سنکرون آهنربای دائم چندفاز را شاید بتوان به این صورت تعریف کرد که این ماشین‌ها همان ماشین‌های سنکرون معمولی می‌باشند که در آنها آهنرباهای دائم جایگزین سیم‌پیچی میدان روتور ماشین سنکرون شده است. ماشین‌های آهنربای دائم در توان‌های کوچک و متوسط ساخته می‌شوند و از یک تنوع ساختاری نیز برخوردارند. متداول‌ترین نوع این موتورها دارای ساختاری با استاتور معمولی و روتوری از آهنرباهای دائم می‌باشند که در آن معمولاً آهنرباهای دائم بر روی یک هسته آهنی نصب می‌شوند. در این موتورها به منظور تأمین شار لازم، نیازی به منبع انرژی الکتریکی جداگانه برای تغذیه سیم‌پیچی‌های میدان وجود ندارد و بنابراین ضمن فراهم شدن مزیت‌های ساختاری و عملکردی زیاد، تلفات اهمی سیم‌پیچی

میدان نیز در آنها با به‌کارگیری آهنرباهای دائم کاملاً حذف می‌شود. به همین دلایل، این موتورها عموماً دارای راندمان و ضریب توان بالا می‌باشند و از پایداری مناسبی نیز برخوردارند. موتورهای سنکرون آهنربای دائم با ساختار بدون جاروبک و ساده روتور، به ویژه در کاربردهای با سرعت پایین اهمیت فوق‌العاده‌ای پیدا کرده‌اند. ویژگی عدم نیاز به سیم‌پیچی میدان و جاروبک سبب شده است که موتورهای آهنربای دائم در مقایسه با سایر موتورهای الکتریکی دارای چگالی توان بالاتری باشند. موتورهای آهنربای دائم هنگام اتصال مستقیم به شبکه دارای گشتاور راه‌اندازی نمی‌باشند. قیمت این موتورها نیز به دلیل قیمت زیاد آهنرباهای دائم و هزینه زیاد ماشین‌کاری مگنت‌ها معمولاً بسیار گران‌تر از ماشین‌های معمول می‌باشند. این موضوعات از معایب عمده موتورهای آهنربای دائم می‌باشد و همین معایب موجب شده است تا این موتورها شرایط بهره‌برداری ساده و ارزان بعضی از کاربردهای صنعتی عام را برآورده نسازند. به این ترتیب کاربردهای موتورهای آهنربای دائم در شرایط فعلی صنعت، مختص بعضی از کاربردهای ویژه می‌باشد.

از جمله موتورهای سنکرون دیگر می‌توان به موتورهای هیستریزیس اشاره کرد. موتورهای هیستریزیس چندفاز برعکس موتورهای آهنربای دائم در توان‌های کوچک و بسیار کوچک و معمولاً برای کاربردهای سرعت بالا ساخته می‌شوند. آن‌ها دارای ساختاری ساده شامل استاتور معمولی و روتوری از جنس ماده‌ای با خاصیت هیستریزیس بالا هستند. جریان راه‌اندازی پایین، عملکرد با نویز بسیار کم و گشتاور یکنواخت از لحظه راه‌اندازی تا سنکرونیسم از جمله مزیت‌های این نوع موتورها بشمار می‌آید. در کنار این مزایا، معایبی از قبیل جریان مغناطیس‌کنندگی بالا، بازده و ضریب توان پایین نیز وجود دارد. همچنین، برخلاف موتورهای سنکرون، موتور هیستریزیس نقطه سنکرونیسم مشخصی ندارد و این امر باعث بروز نوسانات فرکانس پایین حول سرعت سنکرون می‌شود. به این نوسانات که معمولاً با فرکانس پایین رخ می‌دهند، هانتینگ می‌گویند.

موتورهای سنکرون ترکیبی یا تلفیقی نیز کم و بیش معرفی شده‌اند. به عنوان مثال از ساختارهای ترکیبی موتور هیستریزیس مانند موتور هیستریزیس رلوکتانسی و موتور هیستریزیس آهنربای دائم در بعضی از منابع نام‌هایی برده شده است ولی شاید بتوان به طور قاطع بیان کرد که آنها نتوانسته‌اند جایگاه قابل توجهی در صنایع مرتبط با آن پیدا کنند. در ساختار ترکیبی موتور هیستریزیس رلوکتانسی باید روتور به صورت قطب

برجسته ساخته شود. چنین ساختاری در مرحله معرفی اجمالی در یک یا چند مقاله باقی مانده است. بدیهی است موتور تلفیقی هیستریزیس-رلوکتانس در شرایط عملکرد دائمی علاوه بر گشتاور هیستریزیس دارای مؤلفه گشتاور رلوکتانسی نیز خواهد بود ولی در رژیم عملکردی آسنکرون یا شرایط کار زیر سرعت سنکرون، برجستگی موجود در روتور جز مزاحمت‌های تولید گشتاور ضربانی هیچ مزیت عملکردی خاصی را دارا نمی‌باشد. فواید اصلی وجود برجستگی در روتور مربوط به شرایط عملکرد ماشین در سرعت سنکرون می‌باشد. از مزیت‌های عمده وجود برجستگی در روتور ماشین هیستریزیس می‌توان به دو مورد تولید مؤلفه گشتاور اضافی تحت عنوان گشتاور رلوکتانسی و موضوع مهم جلوگیری از پدیده هانتینگ و یا نوسانات روتور اشاره کرد. به‌هرحال اگر طراحی برجستگی‌های روی رینگ هیستریزیس به‌درستی انجام نگیرد ماشین هیبرید طراحی شده شاید نتواند (و معمولاً هم چنین است) عملکرد نرم و بدون نویز مورد انتظار از ماشین‌های هیستریزیس سرعت بالای معمول را برآورده نماید.

از جمله ایده‌های دیگر ماشین‌های تلفیقی هیستریزیس، ترکیب ماشین هیستریزیس معمول با ماشین آهنربای دائم می‌باشد. چنین ماشینی را ما ماشین سنکرون هیستریزیس آهنربای دائم (PMHS)¹ می‌نامیم. محققینی چند به این فکر افتاده‌اند که با ترکیب موتور هیستریزیس و آهنربای دائم، معایب موتورهای هیستریزیس را در حد امکان برطرف نمایند و بر مزایای برجسته موتورهای هیستریزیس بیفزایند. هر چند این موتورها با ساختارهای متنوع قابل طراحی و ساخت هستند ولی در این بین فقط موتورهای ترکیبی نوع استوانه‌ای و آن هم به‌صورت بسیار اندک مورد توجه و بررسی قرار گرفته شده است. به‌ویژه اینکه هیچ گزارش مکتوبی در رابطه با موتورهای ترکیبی هیستریزیس آهنربای دائم شارمحوری، به‌جز گزارشات محدود منتشر شده از دانشگاه صنعتی شاهرود، در دسترس نمی‌باشد. اندک توجهی نیز که در مقالات بسیار محدود به موتور ترکیبی استوانه‌ای شده است معطوف به حفظ ساختار و ویژگی‌های موتور هیستریزیس و بهبود عملکرد آن با به‌کارگیری مواد مغناطیس دائم در کنار مواد هیستریزیس می‌باشد. ساختار مورد استفاده در آن گزارش‌های اندک نیز از نظر نویسنده پروژه حاضر، به‌هیچ‌وجه مناسب نبوده است و به همین دلیل در همان

¹ Permanent Magnet Hysteresis Synchronous Machine

مراحل ابتدایی معرفی مسکوت باقی مانده و جایگاه ویژه‌ای در صنایع وابسته پیدا نکرده است. شاید لازم باشد به این نکته توجه اساسی شود که میزان نسبت تلفیق طبیعتاً نقش بسیار عمده‌ای در ماشین‌های هیبرید بازی می‌کند. سؤال اساسی در این مقوله این است که با تلفیق ماشین هیستریز با ماشین PM آیا ما می‌خواهیم به کدامیک از دو هدف ۱- بهبود مشخصه‌های عملکردی ماشین هیستریز و یا ۲- بهبود مشخصه‌های عملکردی ماشین PM دست یابیم؟ مثلاً آیا ما می‌خواهیم از پدیده هانتینگ موتورهای هیستریز توان پایین سرعت بالا جلوگیری کنیم یا اینکه می‌خواهیم مشخصه‌های راه‌اندازی موتورهای PM توان بالا و سرعت پایین را ارتقاء دهیم؟ به طور مختصر می‌توان توضیح داد که در این پروژه ترکیب این دو موتور به منظور بهبود مشخصه‌های عملکردی ماشین هیستریز انجام می‌گیرد. علت این امر را می‌توان در موارد زیر ارائه نمود:

۱- نیاز و تقاضای صنایع وابسته به موتورهای هیستریز توان بالا: موتورهای هیستریز بسیار مناسب برای کاربردهای سرعت بالا و با نویز کم می‌باشند. پدیده هانتینگ و همچنین گشتاور خروجی بسیار کم این موتورها، دو مورد از محدودیت‌ها و مشکلات اساسی این صنایع در به‌کارگیری موتورهای هیستریز می‌باشند که هر دوی آنها به‌راحتی با افزودن ماده مغناطیس دائم قابل مرتفع شدن هستند. لازم به ذکر است که می‌توان با انتخاب ساختار مناسب و طراحی صحیح، مزیت‌های موتور هیستریز (که آن را مناسب برای کاربرد در سرعت بالا کرده است) را در موتور تلفیقی حاصل حفظ نمود.

۲- عدم توانایی دیسک هیستریز در سنکرون نمودن موتورهای آهنربای دائم در راه‌اندازی تحت‌بار: موتورهای آهنربای دائم معمولاً در شرایط تحت‌بار راه‌اندازی می‌شوند (مانند کاربردهای کشندگی وسایل حمل و نقل و بالابرها) و نیاز به گشتاور بسیار بالایی در راه‌اندازی خواهند داشت. ابعاد دیسک هیستریز برای ایجاد همچنین گشتاوری بسیار بزرگ و غیرمنطقی خواهد شد. بنابراین ترکیب دو موتور با این هدف محدود به کاربردهای خاصی خواهد شد.

همان‌طور که قبلاً هم متذکر شدیم در رابطه با موتورهای تلفیق از دو نوع به‌طور عام و در مورد موتورهای PMHS به‌طور خاص، کار عمده‌ای صورت نگرفته است. شاید بتوان دلایل عمده عدم توجه کافی به این مقوله را به‌صورت زیر بیان کرد:

۱- ماشین‌های هیستریزیس عمدتاً در توان‌های بسیار پایین و سرعت‌های بسیار بالا ساخته می‌شوند و در صنایع ویژه از قبیل صنعت آکوستیک، صنعت هوا فضا و ... بکار گرفته می‌شوند حال آنکه ماشین‌های PM در توان‌های نسبتاً بالا و سرعت‌های پایین ساخته می‌شوند و مثلاً به‌عنوان کشنده وسایل نقلیه و سیستم‌های متحرک، در ربات‌ها و ... بکار گرفته می‌شوند. تلفیق دو نوع موتور با قابلیت‌ها و کاربردهای کاملاً متفاوت دور از ذهن به نظر می‌رسد.

۲- تلفیق موتورهای هیستریزیس و PM استوانه‌ای نتایج موفق قابل توجهی ارائه نداده است.

۳- دیگر ساختارهای ماشین‌ها مثلاً ماشین‌های شارمحوری به‌دلیل جدیدتر بودن، خود با مسائل و مشکلاتی مواجه هستند و محققین هنوز فرصت بررسی و توجه به ساختارهای تلفیقی آنها را پیدا نکرده‌اند.

۴- گزارشات مربوط به ساختارهای تلفیقی PMHS به‌دلیل کاربردهای حساس منتشر نشده است. در این رابطه شاید محققین دانشگاهی نیز رغبت چندانی به تحقیق در مقوله‌ای که مجوز انتشار پیدا نخواهد کرد نداشته باشند.

نویسنده پروژه حاضر معتقد است که تلفیق موتورهای شارمحوری PM و HS به‌دلیل فراهم بودن تنوع ساختاری یک ترکیب میمون خواهد بود. هر یک از ماشین‌های هیستریزیس و یا آهنربای دائم شارمحوری را می‌توان به‌صورت یک‌طرفه، دوطرفه، یک‌طبقه، چندلایه، چندفاز، بدون شیار، با شیار، بدون هسته آهنی، با هسته آهنی، با آهنرباهای دائم سطحی و با آهنرباهای دائم داخلی ساخت. این تنوع ساختاری ماشین‌های شارمحوری تنوع انتخاب‌های مشابهی را نیز برای موتورهای تلفیقی PMHS فراهم می‌کند. بنابراین با انتخاب

ساختاری مناسب و اجرای طراحی صحیح و قابل انعطاف می‌توان به موتور تلفیقی PMHS با عملکرد درخشان دست یافت که اکثر مزایای موتورهای هیستریزیس و آهنربای دائم در آن محفوظ باقی بماند.

به‌رحال در کنار تمام مزایایی که افزودن آهنربا به موتور هیستریزیس به‌دنبال دارد، قطعاً معایبی نیز از قبیل کاهش بالانس مکانیکی و تقارن الکترومغناطیسی موتورهای هیستریزیس متصور است. این موضوعات بخصوص ساختار انتخابی، نحوه طراحی و نسبت ترکیب، در میزان لرزش، نویزهای صوتی و مخابراتی، نوسانات سرعت و گشتاور و بهره مؤثر هستند. مزایا و جذابیت‌های بیشمار این موتورها، انگیزه کافی برای تحقیق پیش‌رو را فراهم کرده است. با اینکه ورود به این موضوع تحقیقات وسیعی بر روی انواع ساختارها و توپولوژی‌ها را طلب می‌کند اما با توجه به بررسی‌ها و تجربیات انجام گرفته در دانشگاه صنعتی شاهرود، ساختار مورد نظر این پروژه، موتور سنکرون شارمحوری دو دیسکی ترکیبی آهنربای دائم و هیستریزیس در ساختار بدون شیار می‌باشد. تلفیق روابط تحلیلی و مدارمعادل حالت دائمی ماشین هیستریزیس و ماشین آهنربای دائم از جذابیت‌های فوق‌العاده‌ای برخوردار است بطوریکه درک درست این موضوعات محققین زیادی را قطعاً مجذوب خود خواهد کرد. ماشین آهنربای دائم در دو ساختار مختلف با مغناطیس درونی و سطحی که باعث می‌شود چنین ماشینی با دو ساختار قطب صاف و برجسته و با دو تئوری، مدار معادل و دیگرام‌های برداری عملکرد دائمی کاملاً متفاوت، مورد بررسی قرار گیرد، از مسائل جذاب تلفیق آن با مدل‌های تحلیلی و عددی ماشین‌های هیستریزیس می‌باشد.

۱-۲- سابقه پژوهشی موضوع رساله

پیرف^۱ در سال ۱۹۵۹ اولین موتور هیستریزیس آهنربای دائم (PMHS) را ساخت [1]. وی با ترکیب آهنربای دائم با ماده هیستریزیس، روتوری با ساختار استوانه‌ای طراحی نمود. در این ماشین نسبت توان خروجی به تلفات در واحد وزن در حدود ۲/۵ تا ۶ بوده که بسیار بزرگتر از نسبت مربوط به موتور هیستریزیس معمولی

¹ Perov

(حدود ۱/۵ تا ۱/۸) است. این نسبت برای موتورهای القایی در حدود ۲/۳ تا ۳ می‌باشد. وی نشان داد که استفاده از آهنربای دائم در روتور موتور هیستریزیس بسیاری از کاستی‌های این موتور را از جمله ضریب توان پایین، بازده کم و نوسان حول سرعت سنکرون را مرتفع می‌سازد. اما از آنجایی که این ترکیب بر روی موتور هیستریزیس استوانه‌ای پیاده شده است، لذا همچنان نسبت توان به وزن ماشین پایین خواهد بود.

رحمان و همکارانش در سال ۱۹۸۴ اثر اضافه کردن آهنربای دائم ساماریوم-کبالت را به موتور هیستریزیس استوانه‌ای بررسی کردند [2]. آن‌ها نشان دادند که استفاده از این آهنربا نسبت به آهنرباهای دیگری مانند آلنیکو ۵، به دلیل افزایش ولتاژ تحریک فاصله هوایی عملکرد ماشین را بهبود می‌بخشد. از آنجایی که معمولاً رینگ هیستریزیس به صورت فویل ساخته می‌شود، لذا پیاده‌سازی این ساختار با مشکلات بسیاری همراه می‌شود. همچنین نسبت توان به وزن این ماشین نیز پایین خواهد بود. اما مشکل اصلی که در این ساختار وجود دارد این است که مسیر صحیحی برای بسته شدن شار آهنربا انتخاب نشده است چرا که آهنرباها در راستای شعاعی مغناطش شده و نصب شده‌اند و از طرفی نگهدارنده آهنربا از جنس مواد غیرمغناطیسی انتخاب شده است و این امر باعث تضعیف شار آهنربا خواهد شد.

همچنین رحمان و اوشیبا^۱ در سال ۱۹۸۵ عملکرد حالت دائمی موتور هیستریزیس استوانه‌ای رلوکتانسی با ساختار جدید را مورد بررسی قرار دادند [3]. در این ساختار با ایجاد شیارهایی در سطح داخلی رینگ هیستریزیس، برجستگی‌های مغناطیسی به وجود آمده است. آن‌ها با استفاده از تئوری دومحوری روابط حاکم بر موتور هیستریزیس رلوکتانسی را به دست آورده و پس از مقایسه نتایج با آزمایشات عملی نشان دادند که موتور هیستریزیس رلوکتانسی نسبت به موتور هیستریزیس معمولی در بازده، ضریب توان و گشتاور ماکزیمم حالت سنکرون دارای مشخصه بهتری می‌باشد.

رحمان و اوشیبا در سال ۱۹۹۰ رفتار دینامیکی و حالت دائم موتور هیستریزیس رلوکتانسی با ساختار معرفی شده در [3] را در حالت تغذیه با منبع تک‌فاز به همراه متعادل‌کننده‌های فاز مورد بررسی قرار دادند

¹ Osheiba

[4]. آن‌ها نحوه انتخاب خازن‌های متعادل‌کننده مناسب به جهت کاهش زمان رسیدن به سنکرونیزم را تشریح کرده و نشان دادند که موتور مذکور در حالت تغذیه تک‌فاز به‌همراه متعادل‌کننده فاز مناسب، عملکرد مطلوبی در شرایط حالت دائم و راه‌اندازی نسبت به حالت تغذیه سه‌فاز دارد.

در مرجع [5] مشابه کاری که در [2] به انجام رسیده است، پیاده شده است.

رحمان در سال ۱۹۹۱، با اضافه کردن آهنربای دائم به رینگ هیستریزیس، موتور هیستریزیس آهنربای دائم استوانه‌ای را ساخت و ثبت اختراع کرد [6]. این ساختار همان نقاط ضعف و قوت ساختار مرجع [2] را داراست.

رحمان و کین^۱ در سال ۱۹۹۶ موتور PMHS با ساختار ارائه شده در [6] را مورد بررسی قرار داده و رفتار آن را با استفاده از متغیرهای حالت موتور در حوزه زمان پیش‌بینی کردند [7]. علت استفاده از این روش تحلیل را این طور بیان کردند که روش‌های تحلیلی سابق (استفاده از مرجع گردان روتور و مدل‌سازی آهنربای دائم و ماده هیستریزیس با یک نیروی محرکه الکتریکی) در صورت وجود حالات نامتقارنی و غیرخطی در پارامترها به راحتی قادر به توصیف رفتار ماشین نخواهند بود و برای غلبه بر مشخصه غیرخطی هیستریزیس مواد باید از روش متغیر حالت استفاده نمود.

کین و رحمان در سال ۲۰۰۳ مدار معادل مغناطیسی محورهای d-q ساختار ارائه شده در [6] را به‌دست آوردند [8] و براساس همین مدار معادل استراتژی کنترل موتور PMHS را طراحی کردند.

کوریه‌هارا^۲ و رحمان در سال ۲۰۰۴ با استفاده از روش اجزاء محدود به تحلیل موتور PMHS با ساختار ارائه شده در [6] پرداختند [9]. آن‌ها برای در نظر گرفتن منحنی هیستریزیس روتور از مدل پاتر^۳ و شیمولین^۴

¹ Qin

² Kurihara

³ Potter

⁴ Schmulian

استفاده کردند. در این مدل تنها اطلاعات ورودی، H_C (نیروی مغناطیس زدا)، B_r (چگالی شار پسماند) و M_s (مغناطیس شدگی اشباع) می باشند.

تحقیقات دیگری در زمینه های جانبی و درایو موتور PMHS انجام شده است که به دلیل عدم ارتباط مستقیم با موضوع رساله پیشرو به صورت مختصر بیان می شوند: رحمان و کین کاربرد موتور PMHS را با سایر موتورهای مورد استفاده در وسیله های نقلیه مورد بررسی قرار دادند [10]. همچنین آنها به همراه کائن¹ پژوهش هایی در زمینه کنترل موتور PMHS انجام داده اند [11]، [12]. نصیری و همکاران به منظور کنترل هانتینگ [13] و لسانی و همکاران پژوهش هایی در زمینه کنترل سریع موتور PMHS [14] به چاپ رسانیده اند. در [15] و [16] مدار معادل مغناطیسی و همچنین مدار معادل الکتریکی در دستگاه d-q برای یک موتور هیستریزیس آهنربای دائم نوع استوانه ای ارائه شده و استراتژی کنترل این موتور ارائه گردید.

لازم به ذکر است که تمامی پژوهش های انجام شده تاکنون، بر روی ساختار استوانه ای موتور PMHS بوده است. ساختارهای تخت دارای برتری هایی نسبت به ساختارهای استوانه ای هستند که در مرجع [17] به تفصیل به آن پرداخته شده است. از جمله ویژگی های بارز ساختارهای تخت، امکان ساده ساخت آنها به صورت دوطرفه و یا چندطبقه می باشد که بسیار مناسب برای موتورهای هیبریدی خواهند بود.

در این رساله قصد بر این است تا موتور PMHS نوع تخت (شارمحوری) به عنوان ساختار جدیدی برای این نوع موتور، معرفی گردد و سپس به روش تحلیلی و عددی در شرایط حالت دائمی طراحی و مدل سازی شده و یک نمونه آزمایشی از آن ساخته شود.

فرآیند مطالعاتی در این رساله با جمع آوری اطلاعات و داده های نرم افزاری آغاز گشته و با طراحی و مدل سازی بخش های آهنربای دائم و هیستریزیس موتور ترکیبی در ساختار بدون شیار پایان یافته است. در واقع با اجرای این فرآیند داده های مربوط به پارامترهای مداری موتور استخراج و شبیه سازی ساختار مذکور برای موتور هیستریزیس آهنربای دائم شارمحوری در فضای سیمولینک نرم افزار متلب انجام می گیرد. سپس

¹ Qian

با استفاده از نرم‌افزارهای اجزاء محدود و برقراری تزویج آن با محیط برنامه‌نویسی مانند Matlab، مدل عددی موتور ترکیبی به دست آمده و نتایج مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. در فصل بعدی معرفی اجمالی از موتورهای هیستریزیس، آهنربای دائم و PMHS ارائه می‌گردد. در فصل ۳، تئوری عملکرد موتورهای هیستریزیس و آهنربای دائم نوع تخت تشریح شده و به روش تحلیلی مدل‌سازی و مدار معادل‌های آنها استخراج می‌شوند. ساختار جدید ارائه شده در این رساله در فصل ۴: معرفی می‌گردد. در فصل ۵: به مدل‌سازی موتور PMHS به روش‌های تحلیلی و عددی و استخراج مدار معادل الکتریکی آن پرداخته می‌شود. روند طراحی موتور PMHS نوع تخت و ارائه الگوریتم طراحی آن در فصل ۶: آمده است. مشخصات موتور PMHS ساخته شده، در فصل ۷: ارائه شده و نتایج حاصل از آزمایشات آن با نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل‌های تحلیلی و عددی، مقایسه می‌شود.

فصل ۲: معرفی موتور هیستریزیس، موتور آهنربای دائم و موتور ترکیبی هیستریزیس آهنربای دائم

۲-۱- مقدمه

موتورهای سنکرون آهنربای دائم با جایگزینی آهنربای دائم به جای سیم پیچی تحریک در روتور، تعریف می‌شوند. این نوع موتورها دارای ساختاری با استاتور معمولی و روتوری از مغناطیس‌های دائم که بر روی یک نگهدارنده استوار است، می‌باشند. چگالی توان بالا، بازده بالا و نگهداری آسان از جمله مزایای این نوع موتورها بشمار می‌آیند. چنانچه این موتورها مستقیماً به شبکه متصل شوند، گشتاور راه‌اندازی نخواهند داشت که این موضوع از معایب این نوع موتورها به حساب می‌آید. برای برطرف کردن این مشکل از میله‌های قفسه سنجایی تعبیه شده در روتور استفاده می‌کنند. با این کار، موتور به صورت القایی راه‌اندازی می‌شود و

سپس در نزدیکی سرعت سنکرون چنانچه شرایط دینامیکی قسمت گردان اجازه دهد، سرعت موتور تحت تأثیر گشتاور تداخلی بین میدان‌های استاتور و روتور به مقدار سنکرون کشیده می‌شود. در سرعت سنکرون جریان القایی در میله‌ها صفر می‌شود.

موتورهای هیستریزیس در مدت زمان زیادی در کاربردهای توان-پایین استفاده می‌شدند. آن‌ها دارای ساختاری ساده شامل استاتور معمولی و روتوری از جنس ماده‌ای با خاصیت هیستریزیس بالا هستند. جریان راه‌اندازی پایین، عملکرد با نویز بسیار کم و گشتاور یکنواخت از لحظه راه‌اندازی تا سنکرونیزم از جمله مزیت‌های این نوع موتورها بشمار می‌آید. موتورهای هیستریزیس معمولی دارای معایبی از قرار جریان مغناطیس‌کنندگی بالا، بازده و ضریب توان پایین می‌باشند. همچنین، برخلاف موتورهای سنکرون، موتور هیستریزیس نقطه سنکرونیزم مشخصی ندارد و این امر باعث بروز نوسانات فرکانس پایینی حول سرعت سنکرون می‌شود.

چنانچه در هر ساختاری از موتور هیستریزیس بتوان روتور آن را به صورت قطب برجسته ساخت، بنابراین موتور گشتاور رلوکتانسی همانند موتور رلوکتانسی تولید خواهد کرد که با گشتاور هیستریزیس (ناشی از رینگ هیستریزیس) در سرعت سنکرون جمع خواهد شد. در هر سرعت زیر سرعت سنکرون، برجستگی روتور تولید گشتاور ضربانی می‌کند. وقتی سرعت روتور به سرعت سنکرون رسید، روتور در یک موقعیت مشخص نسبت به میدان استاتور ثابت می‌شود. این موقعیت توسط محورهای برجستگی و گشتاور بار تعیین می‌گردد. نتیجتاً گشتاور ماکزیمم در سرعت سنکرون ترکیب گشتاور رلوکتانسی و گشتاور هیستریزیس خواهد شد که بیشتر از گشتاور موتور هیستریزیس ساده است. همین موضوع ایده‌ای برای ساخت موتور هیستریزیس هیبریدی گشت. اما ایجاد برجستگی بر روی رینگ هیستریزیس دشواری‌های خاص خود را داشت و همچنین گشتاور رلوکتانسی حاصل قابل توجه نبود. لذا محققان بر آن شدند تا از آهنربای دائم در ترکیب با رینگ هیستریزیس صاف استفاده کنند که از آنجا موتور سنکرون هیستریزیس آهنربای دائم مطرح شد.

۲-۲- معرفی موتور هیستریزیس

موتور هیستریزیس (پسماند) یک موتور سنکرون است که براساس پدیده هیستریزیس کار می‌کند. معمولاً پدیده هیستریزیس در ماشین‌های الکتریکی باعث ایجاد تلفات می‌شود اما در موتور هیستریزیس این پدیده باعث ایجاد گشتاور الکترومغناطیسی می‌گردد. پدیده هیستریزیس، تأخیر فاز بین تأثیر میدان مغناطیسی بر ماده هیستریزیس و چگالی شار ناشی از آن می‌باشد. در حقیقت همین تأخیر فاز، گشتاور موتور هیستریزیس را که متناسب با سطح حلقه هیستریزیس و حجم روتور می‌باشد به وجود می‌آورد. موتورهای هیستریزیس برای اولین بار در سال ۱۹۱۷ توسط آقای اشتینمتر توصیف شدند (در قالب فصلی از یک کتاب). روتور این موتورها از یک ماده با خاصیت هیستریزیس مغناطیسی قابل توجه (مثل آلیاژهای کبالت استیل) تشکیل می‌شود.

این موتورها که در توان‌های کمتر از یک اسب بخار کاربردهای زیادی پیدا کرده‌اند، از ویژگی‌های منحصر به فردی 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 به ویژه در بسیاری از سیستم‌های سرعت بالا مانند سانتریفیوژ، ژيروسکوپ و... شده است. به هر حال راندمان و ضریب توان نسبتاً کم از معایب ذاتی موتورهای هیستریزیس بشمار می‌آیند که در بعضی از کاربردهای ویژه اینگونه موتورها به عنوان یک مشکل مطرح می‌شوند. از دیگر معایب موتورهای هیستریزیس، نوسان سرعت این موتورها حول سرعت سنکرون است که در پاره‌ای از مواقع اتفاق می‌افتد و مدت زمان نسبتاً طولانی برای میرا شدن آن نیاز است. این پدیده به پدیده هانتینگ^۱ معروف است.

¹ Hunting

۲-۲-۱- انواع ساختارهای موتور هیستریزیس

وجود کاربردهای متنوع و متفاوت برای موتورهای هیستریزیس باعث شده است که این موتورها در ساختارهای متنوعی عرضه شوند. هر کدام از این ساختارها به لحاظ عملکرد و ملاحظات طراحی ویژگی‌های خاص خود را دارند که آنها را برای استفاده در کاربردهای خاص مناسب می‌کند. موتورهای هیستریزیس از نقطه نظر ساختار کلی به دو دسته موتورهای استوانه‌ای و موتورهای تخت (دیسکی) تقسیم می‌شوند.

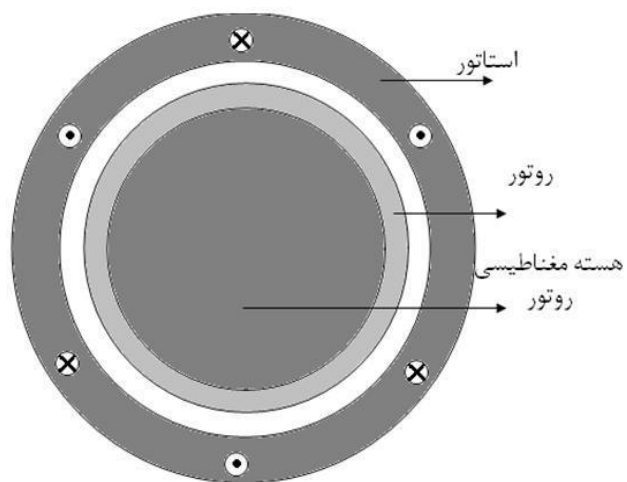
۲-۲-۱-۱- ساختار موتور هیستریزیس استوانه‌ای

استاتور موتورهای هیستریزیس استوانه‌ای مشابه استاتور موتورهای القایی معمولی است که عمدتاً یک سیم‌پیچ آرمیچر سه‌فاز بر روی آن پیچیده می‌شود. این موتورها یک روتور استوانه‌ای دارند که می‌تواند به طور کامل از مواد هیستریزیس ساخته شود و یا این که شامل یک رینگ هیستریزیس قرار گرفته روی یک نگهدارنده مغناطیسی و یا غیرمغناطیسی باشد. بر این اساس این موتورها به سه دسته تقسیم می‌شوند:

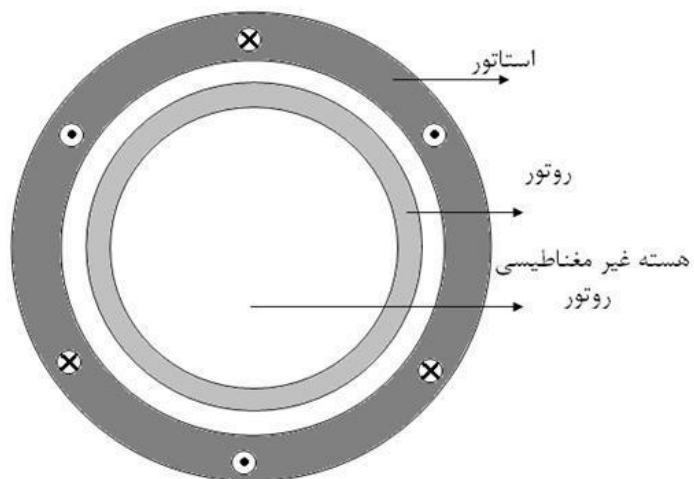
۱) موتورهای هیستریزیس استوانه‌ای شارشعاعی، که در آنها روتور به صورت یکپارچه از مواد هیستریزیس ساخته می‌شود و یا اینکه یک رینگ هیستریزیس بر روی نگهدارنده‌ای از جنس مواد مغناطیسی قرار می‌گیرد. در این نوع موتورها شار در روتور عمدتاً در راستای شعاعی می‌باشد (شکل ۱-۲).

۲) موتورهای هیستریزیس استوانه‌ای شارمحیطی، که در آنها یک رینگ هیستریزیس بر روی نگهدارنده‌ای از جنس مواد غیرمغناطیسی قرار دارد. این ساختار ساده‌ترین و معمول‌ترین ساختار برای موتورهای هیستریزیس استوانه‌ای می‌باشد. در این نوع موتورها شار در روتور عمدتاً به صورت محیطی می‌باشد (شکل ۲-۲).

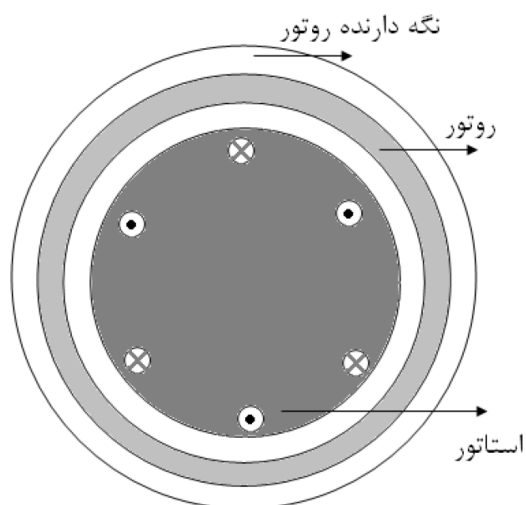
۳) موتورهای هیستریزیس استوانه‌ای معکوس، که در آنها روتور در قسمت بیرونی قرار گرفته و استاتور را در بر می‌گیرد. با طرح معکوس امکان ساخت موتورهای مینیاتوری با ممان اینرسی بالا وجود دارد که به‌طور گسترده‌ای در ژيروسکوپها مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۳-۲).



شکل ۱-۲: موتور هیستریزیس شارشعاعی



شکل ۲-۲: موتور هیستریزیس شارمحیطی

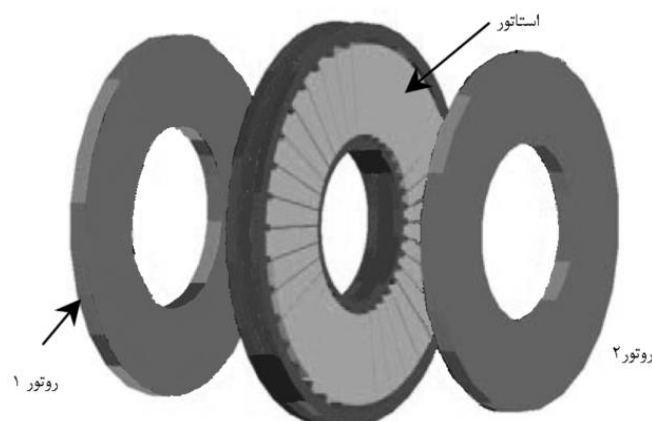


شکل ۳-۲: موتور هیستریزیس استوانه‌ای معکوس

۲-۱-۲-۲- ساختار موتور هیستریزیس تخت

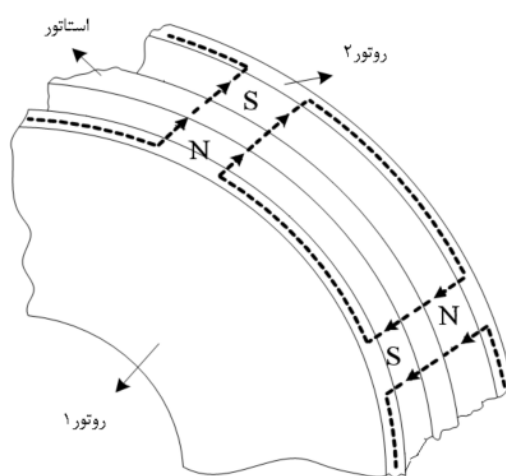
در حالیکه به نظر می‌رسد اولین ماشین الکتریکی ساخته شده ماشین نوع تخت فاراده باشد، ماشین‌های نوع تخت به خاطر ویژگی‌های خاص و منحصربه‌فرد در دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. به علت کمتر بودن مواد هسته در ماشین‌های تخت، این ماشین‌ها دارای نسبت توان به وزن بالاتری در مقایسه با ماشین‌های استوانه‌ای هستند. یکی دیگر از مزایای ماشین تخت قابلیت تنظیم راحت فاصله هوایی است. اگرچه وجود نیروهای محوری متقابل بین استاتور و روتور یکی از معایب این موتورها است، مزایای دیگر این موتورها، آن‌ها را برای استفاده در کاربردهای خاص بسیار مناسب کرده است.

امروزه ماشین‌های نوع تخت آهنربای دائم بسیار شناخته شده هستند. امکان تغییر دادن مسیر شار در نوع تخت باعث شده است که موتورهای آهنربای دائم نوع تخت در ساختارهای متنوع عرضه شود. اما موتور هیستریزیس نوع تخت که برای اولین بار در دانشگاه صنعتی شاهرود مطرح گردید، بسیار کم مورد بررسی قرار گرفته است. در ساده‌ترین حالت، موتور هیستریزیس نوع تخت دارای استاتوری به صورت تخت است و روتور آن یک دیسک یکپارچه ساخته شده از ماده هیستریزیس می‌باشد. در صورتیکه روی روتور یک نگهدارنده از جنس فولاد سیلیکون دار یا هر ماده فرومغناطیس نرم قرار داشته باشد، شار عبوری از روتور کاملاً محوری است و در این حالت این موتور، موتور هیستریزیس نوع تخت شارمحوری نامیده می‌شود و در صورتیکه نگهدارنده وجود نداشته باشد و یا از یک ماده غیرمغناطیسی ساخته شده باشد، شار عبوری از روتور محیطی است. در این صورت موتور هیستریزیس نوع تخت را شارمحیطی می‌نامند. شکل ۲-۴ موتور هیستریزیس نوع تخت شارمحیطی و نحوه شکل قطب‌ها را در آن نشان می‌دهد.



شکل ۲-۵: ساختار موتور هیستریزیس نوع تخت دو روتوره بدون هسته

مسیر شار در این موتور با ساختارهای معمول این تفاوت را دارد که شار به صورت محوری استاتور و فاصله هوایی را طی کرده و به صورت محیطی روتورها را دور می‌زند. مسیر شار در این موتور در شکل ۲-۶ نشان داده شده است.



شکل ۲-۶: مسیر شار در موتور هیستریزیس نوع تخت دو روتوره بدون هسته

همانگونه که در شکل ۲-۶ دیده می‌شود، مسیر شار در استاتور ماشین بدون هسته به گونه‌ای است که به لحاظ تئوری نیازی به یوغ استاتور نیست. به این معنی که چون شار مسیر خود را در استاتور به صورت محوری می‌بندد می‌توان حتی هسته آهنی در استاتور را کاملاً حذف کرد. بدیهی است این کار منجر به فاصله هوایی بزرگتر و بالا رفتن جریان مغناطیس‌کنندگی می‌شود ولی عدم وجود هسته مزایایی را برای

ساختار جدید نسبت به ساختارهای قبلی به وجود می‌آورد. عدم وجود هسته باعث قابلیت‌های بیشتری از جمله حذف تلفات آهن استاتور در ساختار می‌گردد که معایب آنرا برای کاربردهای خاص پوشش می‌دهد. باید توجه داشت که به علت عدم وجود یوغ استاتور نمی‌توان از نحوه سیم‌پیچی تروئیدال استفاده کرد بلکه در این طرح از سیم‌پیچی روی هم استفاده شده است. به‌طور کلی مزایای زیر را می‌توان برای موتور CDDHM متصور شد.

(۱) به علت وجود دو روتور، گشتاور الکترومغناطیسی از هر کدام از روتورها به طور مجزا به محور موتور اعمال می‌شود و این امر باعث توزیع نیروی محرک در طول محور موتور، و متعاقباً پایداری مکانیکی بهتر این نوع موتور می‌شود.

(۲) عدم وجود هسته مغناطیسی که خود مزیت‌های زیر را ایجاد می‌کند:

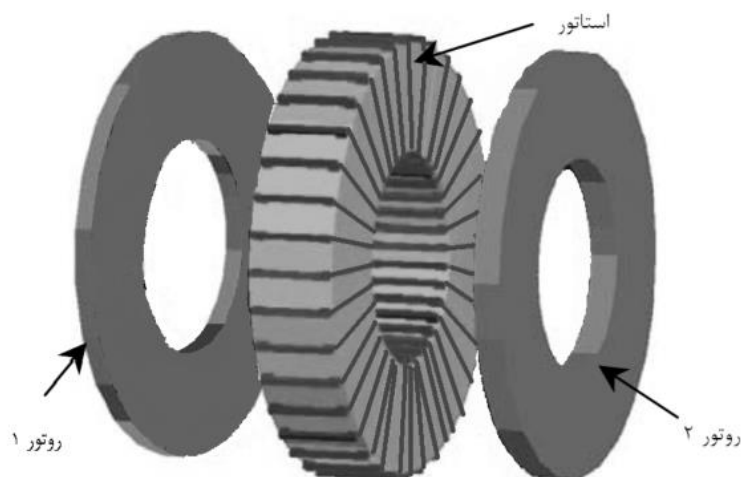
- عدم وجود تلفات هسته اعم از تلفات جریان گردابی و تلفات هیستریزیس هسته، باعث بالاتر رفتن بازده و چگالی توان به وزن در این موتورها می‌شود.
- عدم نیاز به هسته فولادی در استاتور امکان استفاده از انواع مواد غیرمغناطیسی ارزان‌تر به جای هسته آهنی معمول مورد استفاده در ماشین‌های متداول را به وجود می‌آورد.
- در کاربردهای سرعت بالا به منبع تغذیه فرکانس بالا نیاز است ولی به علت وجود هسته غیرآهنی در این موتور به مواد هسته فرکانس بالا نیاز نیست. توجه شود که ساخت مواد هسته با فرکانس کاری زیاد نیاز به فناوری بالایی دارد و این فناوری در صورت وجود در انحصار کشورهای محدودی است.
- سبک‌تر بودن ماشین برای کاربردهایی مثل صنایع هوا و فضا که در آنها وزن کم از اهمیت زیادی برخوردار است از خصوصیات منحصربه‌فرد دیگر این موتورها می‌تواند باشد.
- استاتور هدایت گرمایی بهتری نسبت به موتورهای هسته‌دار دارد.
- به علت نبودن تلفات هسته در این موتورها، ماشین کمتر گرم می‌شود و گرمای ایجاد شده در موتور فقط ناشی از تلفات مسی است.

- در دماهای بالا خواص مغناطیسی هسته تغییر می‌کند و باعث عوض شدن مشخصه مغناطیسی و الکتریکی موتورهای می‌شود. به علت عدم وجود هسته مغناطیسی در موتور جدید مشخصه‌های این ماشین در دماهای بالا به طور قطع کمتر تغییر می‌کند.

ب) موتور هیستریزیس نوع تخت دو روتوره بدون شیار SDDHM¹: این موتور یک ساختار جدید دیگر برای موتور هیستریزیس است با توجه به نحوه عملکرد ویژه می‌توان از آن در کاربردهای بسیاری استفاده کرد. ساخت ماشین با این ساختار جدید در مقایسه با دیگر ساختارهای معرفی شده بسیار ساده و کم هزینه می‌باشد. علاوه بر این به دلیل حداکثر استفاده از فضای سیم‌پیچی‌ها، این موتورهای می‌توانند دارای راندمان بسیار بالایی باشند. نحوه سیم‌پیچی و ساختار منحصر به فرد آن باعث کاهش قابل توجه طول سیم‌پیچی نسبت به انواع دیگر سیم‌پیچی‌ها می‌شود که این خود منجر به کم شدن مقاومت سیم‌پیچی استاتور و کاهش تلفات اهمی می‌گردد. همچنین پراکندگی شار کله سیم‌ها در این موتورهای بسیار کمتر از دیگر ساختارها می‌باشد. بدین ترتیب می‌توان با استفاده از این ساختار، موتورهای با راندمان و چگالی توان به وزن بالاتر را ساخت. در این ساختار جدید، استاتور از ورق یکپارچه فولاد سیلیکون روی هم پیچیده شده تشکیل شده است. این ورق رول شده را می‌توان به سهولت و با ابزارهای ساده بدون نیاز به برش‌های خاص که برای ساخت موتورهای الکتریکی معمولاً با هزینه‌های سنگین نیاز است به‌عنوان استاتور بکار گرفت. شاید مهمترین و قابل توجه‌ترین مشخصه این موتورهای امکان استفاده از سیم‌پیچی‌های تروئیدال قرار گرفته روی هسته‌های استاتور باشد. علاوه بر این که ساخت استاتور این ماشین‌ها ساده‌تر و کم هزینه‌تر می‌باشد پروسه سیم‌پیچی نیز به دلیل هسته استاتور بدون شیار بسیار ساده‌تر می‌شود. همچنین عدم وجود شیارها تبادل گرمایی بهتری را برای سیم‌پیچی‌ها فراهم می‌کند و این نیز از جمله مزیت‌های منحصر به فرد ساختار جدید است. از دیگر ویژگی‌های بسیار شاخص این چنین ماشین‌هایی می‌توان به این نکته اشاره کرد که این ماشین‌ها را می‌توان و حتی بسیار بهتر خواهد بود تا در چند لایه با تعداد روتورها و استاتورهای متعدد ساخت. ماشین ارائه شده در اینجا نیز دارای یک استاتور و دو روتور می‌باشد، حال آنکه ساختارهای چند

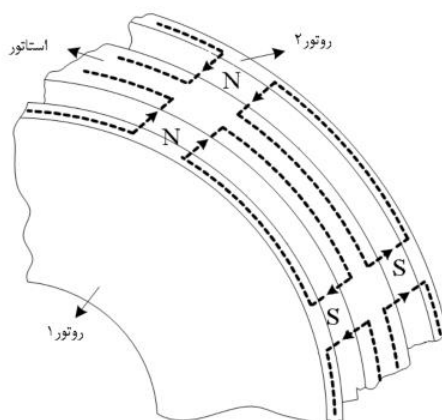
¹ Slotless Dual Disc Hysteresis Motor

لایه‌ای در ماشین‌های استوانه‌ای به علت عدم امکان ساخت آسان، معمول نیست. همچنین وجود دو دیسک در روتور باعث می‌شود که موتور جدید به لحاظ مکانیکی پایداری مناسب‌تری داشته باشد. شکل ۷-۲ نمای سه‌بعدی استاتور و روتور این موتور را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که دو دیسک روتور می‌توانند روی یاتاقان‌های مشترک و یا غیر مشترک سوار شوند و با هم و یا مستقل از هم گردش کنند.



شکل ۷-۲: ساختار موتور هیستریزیس نوع تخت دو روتوره بدون شیار

سیم‌پیچی‌های استاتور موتور هیستریزیس تخت دو روتوره بدون شیار به صورت حلقوی با اتصالات پشت‌به‌پشت هستند. این نوع سیم‌پیچی این امکان را فراهم می‌آورد که شارمحوری فاصله هوایی مسیر خود را از داخل استاتور و روتورها به صورت محیطی ببندد. شکل ۸-۲ به خوبی این موضوع را نمایش می‌دهد.



شکل ۸-۲: مسیر شار در موتور هیستریزیس نوع تخت دو روتوره بدون شیار

چون مسیر شار در این موتور به نحوی است که شار دو روتور در استاتور با هم جمع می‌شوند وجود یوغ در استاتور این توپولوژی الزامی است. به هر حال ساختار این موتور به گونه‌ای است که می‌توان استاتور را بدون شیار ساخت. سیم‌پیچی‌ها به صورت حلقوی پیچیده می‌شوند و تمام سطح استاتور را می‌پوشانند. اینگونه سیم‌پیچی باعث کوتاه شدن کله سیم‌ها و صرفه‌جویی در میزان سیم مصرفی و کاهش قابل توجه تلفات مس و بهبود راندمان می‌شود. کاهش میزان مس استفاده شده در این موتور و همچنین راندمان بالاتر به صورت چشمگیری نسبت توان به وزن موتور را افزایش می‌دهد. در واقع بدون شیار بودن استاتور یکی از ویژگی‌های ممتاز این موتور محسوب می‌شود. سیم‌پیچی‌ها در این ساختار درون شیار قرار ندارند و روی سطح استاتور قرار می‌گیرند. از این رو تبادل گرمایی سیم‌پیچی‌ها بهتر انجام می‌گیرد به طوریکه می‌توان چگالی جریان هادی‌ها را در این موتور نسبت به موتور شیاردار به میزان قابل توجهی بالاتر انتخاب کرد و متعاقباً می‌توان نسبت توان به وزن بالاتری در مقایسه با ساختار شیاردار به دست آورد. با توجه به عدم وجود شیار در این موتور، راکتانس پراکندگی فاقد مؤلفه پراکندگی شیار می‌باشد. اگر بخواهیم برای ماشین بدون شیار معیایی را مطرح کنیم شاید بتوان به فاصله هوایی نسبتاً بزرگ و بنابراین راکتانس مغناطیس کننده کوچک و ضریب توان پائین آن اشاره کرد. البته این عیب موتور را می‌توان با دقت در ساخت و در حد امکان کاهش فاصله هوایی و همچنین استفاده از جبران کننده خازنی تا حدودی اصلاح نمود. به هر حال با وجود این عیب که کم و بیش در ماشین‌های تخت وجود دارد، مزایای زیاد این موتور معایب آن را در کاربردهای خاص پوشش می‌دهد. از طرفی یکی از معایب عمده موتورهای شیاردار وجود هارمونیک‌های ناشی از شیار در میدان‌های مغناطیسی فاصله هوایی است که منجر به گشتاور ضربانی، تلفات فرکانس بالا در روتور و نویز صوتی می‌شود. بنابراین عدم وجود شیار در موتور معرفی شده معضلات فوق را به طور زیاد مرتفع می‌کند. به طور کلی مزایای زیر را برای موتور هیسترتزیس تخت دو روتوره بدون شیار می‌توان متصور شد.

(۱) کله سیم‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای در این موتور کوتاه شده‌اند که این خود مزایای زیر را به دنبال دارد:

- کاهش تلفات مسی و به طبع آن افزایش راندمان

- کاهش میزان مس مصرفی در موتور که منجر به کاهش هزینه ساخت موتور کاهش وزن تمام شده موتور می شود.

- کاهش راکتانس پراکندگی ناشی از کله سیم‌ها

(۲) استاتور در این موتور بدون شیار است که مزایای زیر را در بر دارد:

- ساخت استاتور موتورهای تخت به دلیل مشکلات ساخت مربوط به شیارها بسیار مشکل و هزینه بر است. توجه شود که امکان پانچ ورق‌های رول شده وجود ندارد. حال آنکه استاتور موتور جدید فاقد شیار و مشکلات ساخت آن می باشد. در حقیقت استاتور بسیار ساده، یک ورق رول شده می باشد و بدین ترتیب هزینه ساخت آن در مقایسه با ساخت نوع شیاردار بسیار ناچیز است.

- عدم وجود شیار باعث می شود که سیم پیچی‌ها بر روی سطح استاتور قرار گیرند که این موضوع تبادل حرارتی را برای سیم پیچی‌ها آسان می سازد. تبادل حرارتی مناسب امکان استفاده از سیم با چگالی بالاتر را به وجود می آورد که این موضوع امکان صرفه جویی بیشتر در مس را فراهم می کند.

- با ساختار استاتور و سیم پیچی بکار رفته در این ماشین موضوع هارمونیک‌های شیار تقریباً منتفی است. بنابراین تلفات فرکانس بالا در روتور، گشتاور ضربانی و نویز صوتی در این ماشین‌ها کاهش می یابد.

(۳) در این ماشین دو روتور در طرفین استاتور قرار می گیرند و بدین ترتیب ضمن استفاده ایده آل از فضا و نیروی محرکه مغناطیسی استاتور، تعادل مناسب سیستم گردان فراهم می گردد. ضمن اینکه این ماشین‌ها را با تعداد لایه‌های بیشتر نیز می توان ساخت.

۲-۳- مروری بر مهم‌ترین مراجع پیرامون تحلیل ماشین‌های هیستریزیس

در این بخش به مروری کوتاه بر مهم‌ترین تحقیقات انجام گرفته در مورد موتورهای هیستریزیس پرداخته می‌شود.

ایده اصلی استفاده از پدیده هیستریزیس برای تولید گشتاور در موتور، توسط اشتینمتز^۱ در سال ۱۹۰۸ میلادی مطرح شد و در سال ۱۹۱۷ در قالب یک فصل از کتاب منتشر شد [19]. اما به دلیل اینکه تئوری آن به شکل ضعیفی ارائه گردید، مورد استقبال قرار نگرفت. او بیان کرد که استاتور موتور هیستریزیس همانند ماشین القایی بوده اما روتور آن از جنس ماده‌ای با خاصیت هیستریزیس مناسب و به صورت یکپارچه است. چنانچه میدان دوار استاتور سطح روتور را جاروب کند، طبق خاصیت هیستریزیس، میدان به وجود آمده در روتور مقداری از میدان استاتور عقب می‌افتد که همین اختلاف زاویه باعث تولید گشتاور می‌شود. همچنین وی دریافت که این موتور دارای معایبی از جمله بازده و ضریب توان پایینی می‌باشد. چندین سال بعد، بررسی‌ها و آزمایشات چاپ نشده‌ای توسط شرکت جنرال الکتریک بر روی این موتور جدید انجام شد که مزایای منحصر به فردی از آن را معرفی کرد. از آن به بعد این تئوری مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفت.

تیسیر^۲ در سال ۱۹۴۰ مطالعاتی بر روی موتور هیستریزیس نوع استوانه‌ای انجام داد [20]. وی نشان داد که گشتاور این موتور از حالت سکون تا رسیدن به سرعت سنکرون، متناسب با حجم ماده هیستریزیس روتور و همچنین مساحت حلقه هیستریزیس آن است (با صرفه نظر کردن از جریان گردابی). هنگامی که سرعت موتور به سرعت سنکرون می‌رسد، همانند موتور سنکرون آهنربای دائم عمل خواهد کرد. اما به دلیل اینکه قطب‌های روتور مکان مشخصی ندارند، با به وجود آمدن هر اغتشاشی ممکن است سرعت موتور حول سرعت سنکرون نوسان کند که به این پدیده هانتینگ و یا فلاتر^۳ می‌گویند. او همچنین تأثیر هارمونیک‌ها را نیز بر

¹ Steinmetz

² Teare

³ Flutter

رفتار موتور بررسی کرد و نشان داد که وجود هارمونیک در میدان دوار استاتور باعث تغییر شکل حلقه هیستریزیس و در نتیجه کاهش گشتاور خواهد شد. چنانچه حذف هارمونیک‌ها مقدور نباشد، افزایش نفوذپذیری مغناطیسی ماده روتور می‌تواند تا حدودی تأثیرات منفی هارمونیک‌ها را جبران کند.

تا سال ۱۹۴۷ تنها کاربرد موتورهای هیستریزیس در ساعت‌هایی با رنج توان خروجی ۵ تا ۱۰ میلی‌وات بود. توان ورودی این ساعت‌ها در حدود ۲ تا ۳ وات بوده و این یعنی بازده موتور در بهترین حالت ۵/۰ درصد و در بدترین حالت ۱۶/۰ درصد بوده است. بنابراین ساخت موتور هیستریزیس در اندازه‌های بزرگتر به هیچ عنوان صرفه اقتصادی نداشت. روترز^۱ تغییری در ساختار استاتور موتور هیستریزیس داد که موجب شد تا بازده این موتور به بیش از ۷۳ درصد برسد [21]. او همچنین با توسعه روش خود توانست موتوری با بازده حدود ۸۰ درصد بسازد. روترز دریافت که وجود شیار با دهانه باز در استاتور موجب نوسان‌هایی در توزیع شار فاصله‌هوایی می‌شود. این نوسان‌ها باعث به‌وجود آمدن تلفات پارازیتیک می‌شود. توان تلفی ناشی از تلفات پارازیتیک در ساختارهای استاتور با دهانه^۱ شیار باز، بخش اعظمی از توان ورودی را تشکیل می‌دهد. همین امر موجب پایین آمدن بازده موتورهای هیستریزیس می‌شد. در ساختارهای قدیمی برای کاهش تلفات پارازیتیک ناشی از دهانه باز شیار، فاصله^۱ هوایی را افزایش می‌دادند. این کار باعث می‌شد تا جریان شاخه مغناطیس‌کنندگی و همچنین تلفات مسی افزایش یابد. روترز با ساخت استاتوری با دهانه^۱ شیار بسته، توانست تلفات پارازیتیک را کاهش داده و بازده این موتورها را تا حد زیادی بهبود بخشد تا ساخت آنها در اندازه بزرگتر صرفه اقتصادی داشته باشد. همچنین او مدعی شد که این ساختار باعث میرایی هرچه بیشتر نوسانات حول سرعت سنکرون می‌شود. بستن دهانه شیارهای استاتور موجب افزایش شار پراکندگی سیم‌پیچی‌های استاتور و از آنجا کاهش ضریب توان و تأثیرات نامطلوب دیگری در رفتار ماشین‌های سنکرون و آسنکرون رایج می‌شود. اما در مورد موتور هیستریزیس، مزایای بستن شیار به قدری ارزشمند است که می‌توان از معایب آن چشم‌پوشی کرد. روترز با بررسی موتورهای هیستریزیس ساخته شده از مواد مختلف دارای خاصیت هیستریزیس دریافت که چنانچه اجازه داده شود تا موتور در حالت بی‌بار به سرعت سنکرون

¹ Roters

برسد و سپس بارگذاری انجام شود، نسبت به حالتیکه تحت بار راهاندازی شود ماکزیمم گشتاور بیشتری را در سرعت سنکرون تولید خواهد کرد. وی همچنین با انجام آزمایشاتی نشان داد که افزایش ولتاژ و یا جریان موتور هیستریزیس موجب کاهش تلفات مسی و افزایش ماکزیمم گشتاور در سرعت سنکرون می‌شود.

کوپلند^۱ و سلمون^۲ مطالعات خود را در مورد موتور هیستریزیس در سه مقاله [22]، [23] و [24] در سال‌های ۱۹۶۳، ۱۹۶۴ و ۱۹۶۹ منتشر کردند. در [22]، یک موتور هیستریزیس استوانه‌ای نوع شارشعاعی با ساختار استاتور شیاربسته مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها با در نظر گرفتن فرضیات ساده‌کننده‌ای از جمله صرف نظر کردن از جریان‌های گردابی و همچنین تقریب حلقه^۳ هیستریزیس با یک متوازی‌الاضلاع، توانستند مدار معادلی برای موتور هیستریزیس ارائه کنند. سپس، رابطه گشتاور ماشین را به دست آورده و نشان دادند که نتایج آزمایشات عملی و نتایج حاصل از مدار معادل تطبیق بسیار مناسبی دارند. آن‌ها همچنین دریافته‌اند اگر پس از اینکه روتور مسیر حلقه هیستریزیس خود را طی کرد و موتور به حالت دائمی رسید ولتاژ ورودی استاتور کاهش یابد، بازده و ضریب توان ماشین بهبود می‌یابد، در حالیکه با این کار گشتاور موتور نیز کاهش خواهد یافت. بنابراین باید نقطه بهینه‌ای وجود داشته باشد که در آن مصالحه‌ای بین ضریب توان و بازده با گشتاور انجام شده باشد.

کوپلند و سلمون در [23]، یک موتور هیستریزیس استوانه‌ای نوع شارمحیطی با ساختار استاتور شیار بسته را مورد مطالعه قرار دادند. همانند [22]، آن‌ها با در نظر گرفتن فرضیات ساده‌کننده‌ای از جمله صرف نظر کردن از جریان‌های گردابی و همچنین تقریب حلقه هیستریزیس با یک متوازی‌الاضلاع، توانستند مدار معادلی برای موتور هیستریزیس استوانه‌ای نوع شارمحیطی به دست بیاورند و دریافته‌اند که تحلیل این دو نوع موتور بسیار مشابه یکدیگر است به جز در موارد جزئی، که باید در طراحی‌ها مورد توجه قرار گیرد. همچنین، رابطه گشتاور ماشین را به دست آورده و نشان دادند که نتایج آزمایشات عملی و نتایج حاصل از مدار معادل تطبیق بسیار مناسبی دارند.

¹ Copeland

² Slemon

در [24]، رحمان^۱ با همکاری کوپلند و سلمون به بررسی تلفات پارازیتیک در موتورهای هیستریزیس پرداختند. آن‌ها توانستند روابطی برای تلفات پارازیتیک نیروی محرکه مغناطیسی و تلفات پارازیتیک شار به دست آورند.

همچنین رحمان سال ۱۹۷۱ در کاری مشابه با [22] یک مدل تحلیلی جامع برای موتور هیستریزیس نوع استوانه‌ای در دو حالت سنکرون و آسنکرون ارائه داد [25].

کانیسترا^۲ و سالیوس^۳ در سال ۱۹۸۷ دو موتور هیستریزیس استوانه‌ای نوع شارمحیطی و شارشعاعی را مورد بررسی قرار دادند [26]. آن‌ها با مدل‌سازی منحنی مشخصه مغناطیسی روتور با استفاده از تقریب متوازی الاضلاع، مدار معادل موتورهای هیستریزیس مذکور در سرعت سنکرون را به دست آوردند. در این مدار معادل تلفات پارازیتیک ناشی از هارمونیک‌های نیروی محرکه مغناطیسی فاصله هوایی نیز در نظر گرفته شده است. سپس رابطه گشتاور موتور و همچنین پارامترهای مدار معادل موتور را به دست آوردند. آن‌ها با بررسی و تحلیل موتور نوع شارشعاعی دریافتند که مشخصه مغناطیس دائم ماده سازنده رینگ روتور تأثیر قابل توجهی بر روی بازده موتور دارد. استفاده از آلنیکو-۵ این امکان را فراهم می‌سازد تا بازده موتور هیستریزیس با بازده یک موتور القایی معمول قابل مقایسه گردد. بازده موتور هیستریزیس با استفاده از آلیاژ نیکل و همچنین استفاده از آلیاژ کبالت-استیل در ساخت رینگ روتور، بسیار پایین می‌آید. مؤثرترین پارامتر بر روی بازده، مقاومت الکتریکی رینگ روتور است. آن‌ها نشان دادند که با افزایش ضخامت رینگ هیستریزیس، گشتاور و بازده موتور افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت طول روتور به گام قطب گشتاور کاهش یافته اما بازده بهبود می‌یابد ولی در یک نسبت طول به گام ثابت، با افزایش طول، بازده کاهش پیدا می‌کند.

^۱ Rahman

^۲ Cannistra

^۳ Sylos

ظاهر^۱ در سال ۱۹۹۰ با استفاده از معادلات ماکسول به محاسبه توزیع میدان الکترومغناطیسی در موتور هیستریزیس استوانه‌ای نوع شارمحیطی در سرعت سنکرون پرداخت [27]. در این محاسبات از تقریب بیضی مایل برای مشخصه مغناطیسی رینگ روتور استفاده شده و همچنین خاصیت هیستریزیس رینگ روتور و هارمونیک‌های نیروی محرکه مغناطیسی فاصله هوایی نیز در نظر گرفته شده است. وی رابطه گشتاور موتور هیستریزیس را به دست آورده و سپس با استفاده از یک روش اصولی مورد ارزیابی قرار داده است. در این روش اثر هارمونیک‌ها و پارامترهای مغناطیسی نیز لحاظ شده است که دقت بسیار بالایی دارد.

اسچیبیر^۲ در سال ۱۹۷۵ یک مدل ساده از موتور هیستریزیس را معرفی و مورد بررسی قرار داد [28]. تحلیل میدان به کمک تنسور تنش ماکسول انجام شده است. رویکرد پیشنهادی در این مقاله دید عمیق‌تری نسبت به منشأ گشتاور آسنکرون در روتور و فرآیند تبادل توان بین استاتور و روتور فراهم می‌آورد. در این مقاله منحنی هیستریزیس ماده روتور با بیضی تقریب زده شده است که در حالت عملکرد دائمی قابل قبول می‌باشد.

رحمان در سال ۱۹۸۰ موتور هیستریزیس استوانه‌ای از نوع شارمحیطی چندفاز را مورد مطالعه قرار داد [29]. وی با انجام یک تحلیل میدان جامع برای این موتور در سرعت‌های پایین‌تر از سرعت سنکرون، توانست معادلات میدان را برای فاصله هوایی و رینگ هیستریزیس موتور به دست آورد. در این تحلیل از هر دو تقریب بیضی و متوازی‌الاضلاع استفاده شده است (این کار با استفاده از نفوذپذیری مختلط^۳ انجام شده است [30]). همچنین روابط مربوط به توان فاصله هوایی و توان تلف شده در سرعت‌های پایین‌تر از سرعت سنکرون نیز به دست آمده است.

ایشیکاوا^۴ و کاتانوگا^۱ در سال ۱۹۸۱ به تحلیل موتور هیستریزیس نوع تخت پرداختند [31]. این تحلیل در شرایط گشتاور ماکزیمم در سرعت سنکرون انجام گرفته است. آن‌ها توانستند توزیع چگالی شار را در

¹ Zaher

² Schieber

³ Complex Permeability

⁴ Ishikawa

موتور هیسترتزیس نوع تخت به دست آورند. همچنین نشان دادند که توزیع چگالی شار در موتور هیسترتزیس تخت از نوع شارمحوری، درست همانند توزیع چگالی شار موتور هیسترتزیس استوانه‌ای از نوع شارشعاعی است. با استفاده از قانون مداری آمپر، مدار معادل موتور هیسترتزیس تخت شارمحوری به دست آمد و با مدار معادل موتور هیسترتزیس استوانه‌ای شارشعاعی، از نظر امیدانس معادل، مقایسه گشت و نتیجه شد که با تغییری در ساختار این موتورها، مدار معادل آنها یکسان خواهد شد. همچنین، آن‌ها با توجه به اینکه توزیع چگالی شار در دیسک روتور در راستای شعاع یکنواخت نیست، دریافتند اگر شعاع متوسط روتور برابر با شعاعی باشد که در آن چگالی شار مغناطیسی بیشینه می‌شود، آنگاه چگالی حجمی توان خروجی موتور ماکزیمم خواهد شد.

عیب اصلی موتور هیسترتزیس این است که نسبت اندازه به توان خروجی آن بسیار بزرگ است. برای برطرف کردن این مشکل دو روش ارائه شده است. روش اول توسط پیرف در سال ۱۹۵۹ پیشنهاد شد [32]. وی با ترکیب آهنربای دائم با ماده هیسترتزیس ساختار جدیدی برای روتور ارائه کرد. در این ماشین گشتاور کل در سرعت سنکرون از مجموع گشتاورهای ناشی از وجود آهنربای دائم و ماده هیسترتزیس به دست می‌آید. روش دوم توسط پاپس^۲ در سال ۱۹۵۹ ارائه شد [33]. در این روش رینگ هیسترتزیس استفاده شده در موتور هیسترتزیس استوانه‌ای، به جای یکپارچه بودن از کنار هم قرار دادن چند قطعه^۳ خمیده جدا از هم^۳ ساخته می‌شود.

واکوئی^۴ در سال ۱۹۷۸ به بررسی دقیق ساختار ارائه شده توسط پاپس پرداخت [1]. وی دریافت که نفوذپذیری روتور معمولی (بدون شکاف) در راستای شعاعی و محیطی یکسان بوده و با همان رابطه نفوذپذیری مختلط قابل بیان است، اما در روتورهای دارای شکاف، نفوذپذیری در راستای شعاع تغییر نمی‌کند اما در راستای محیط با عبارت متفاوتی بیان خواهد شد. همچنین شدت میدان مغناطیسی در راستای محیطی در روتور دارای شکاف، بسیار بزرگتر از روتورهای بدون شکاف است. قانون مداری آمپر و

¹ Kataoka

² Papst

³ Split Bow-Shaped

⁴ Wakui

امپدانس معادل، دو روش عمده برای به دست آوردن مدار معادل می‌باشند. واکوئی با استفاده از روش قانون مداری آمپر، مدار معادل موتور هیستریزیس استوانه‌ای دارای شکاف را به دست آورد. وی با محاسبه گشتاور موتور به این نتیجه رسید که موتور هیستریزیس دارای شکاف، گشتاور واکنشی^۱ (ناشی از برجستگی قطب‌ها) تولید می‌کند که باعث افزایش ماکزیمم گشتاور در سرعت سنکرون می‌شود. همچنین این موتور نسبت به موتورهای هیستریزیس معمولی دارای ضریب توان، بازده و شرایط راه‌اندازی بهتری می‌باشد. افزایش عمق و عرض شکاف موجب افزایش گشتاور رلوکتانسی می‌شود.

واکوئی در سال ۱۹۷۳ در [34] هم به صورت تئوری و هم به کمک آزمایش حلقه هیستریزیس معادل تولید شده توسط مؤلفه اصلی و دو یا تعداد بیشتری از مؤلفه‌های هارمونیک میدان مغناطیسی مورد بررسی قرار داد. با هدف مشخص کردن مشخصات عملکردی موتور هیستریزیس، مشخصات حلقه هیستریزیس معادل بر حسب سطح حلقه هیستریزیس، نفوذپذیری نرمال شده و زاویه هیستریزیس بیان شده است. تحلیل ارائه شده در این مقاله برای بررسی مشخصات عملکردی یک موتور هیستریزیس سرعت متغیر که توسط یک اینورتر با شکل موج ولتاژ مربعی تغذیه می‌شود مفید است.

کاجیتا^۲ در سال ۱۹۷۶ [35]، اثر هارمونیک سوم نیروی محرکه مغناطیسی ناشی از عدم توزیع سینوسی سیم‌پیچ‌های استاتور و ریپل دندانه‌های استاتور را در رفتار موتور هیستریزیس مورد بررسی قرار داد. در صورت وجود هارمونیک سوم در نیروی محرکه مغناطیسی، حلقه هیستریزیس تبدیل به یک حلقه باریک با مساحت کمتر و با ضریب نفوذپذیری مغناطیسی بیشتر می‌شود. وی نشان داد که صرف نظر کردن از اثر هارمونیک سوم نیروی محرکه مغناطیسی، خطای محاسباتی بسیار زیادی را موجب می‌شود چراکه توان خروجی ناشی از مؤلفه اصلی نیروی محرکه مغناطیسی، به دلیل وجود گشتاور معکوس تولید شده توسط هارمونیک سوم نیروی محرکه مغناطیسی، کاهش چشمگیری می‌یابد. به علاوه، ضریب توان موتور نیز در صورت وجود هارمونیک سوم بدتر شده و از آنجا جریان مغناطیس‌کنندگی نیز کاهش می‌یابد.

^۱ Reaction Torque

^۲ Kajita

کاتاوکا^۱ و همکاران در سال ۱۹۸۲ [36]، به بررسی اثرات تحریک اضافی کوتاه مدت در رفتار موتور هیستریزیس پرداختند. حالت مغناطیسی ماده هیستریزیس روتور زمانی که ولتاژ استاتور افزایش یابد و سپس به مقدار نامی خود برگردد تغییر خواهد کرد. آن‌ها با ارائه روشی برای تحلیل این تغییرات در حالت مغناطیسی ماده هیستریزیس روتور بیان کردند که عملکرد روتور تحت انجام این تغییرات بسیار بهبود می‌یابد. لازم به ذکر است که در این روش از تقریب بیضی مایل برای حلقه هیستریزیس ماده روتور استفاده شده است. آن‌ها نشان دادند که با انجام تحریک بیش از حد موتور هیستریزیس، بازده و ضریب توان موتور افزایش چشمگیری خواهد یافت و همچنین جریان موتور نیز کاهش قابل توجهی پیدا می‌کند.

اوکلی در سال ۱۹۷۸ در [37] بیان کرد که تحریک اضافی کوتاه مدت موتور هیستریزیس منجر به کاهش جریان استاتور و افزایش گشتاور ماکزیمم در سرعت سنکرون می‌شود. درباره مفهوم فیزیکی این پدیده به اختصار بحث و مدار معادل تجربی همراه با ولتاژ شار پسماند ارائه شده است. آن‌ها نشان دادند که برای موتور هیستریزیس با تحریک اضافی کوتاه مدت، بهتر است از مواد مغناطیسی سخت‌تر برای روتور استفاده شود که این موضوع منجر به افزایش توان ماشین برای یک سایز یکسان می‌گردد.

واکوئی و همکاران در سال ۱۹۸۱ در [38] تحریک اضافی کوتاه مدت موتور هیستریزیس را مورد تحلیل قرار دادند. نتایج به دست آمده نه تنها مورد توجه بوده بلکه برای موارد کاربردی و عملی مفید هستند. این مقاله یک روش برای اندازه‌گیری مشخصه $B-H$ روتور با تحریک اضافی با استفاده از حلقه هیستریزیس dc پیشنهاد می‌دهد. مشخصه $B-H$ حاصل برای تعیین پارامترهای مغناطیسی مانند ضریب نفوذپذیری مغناطیسی و زاویه هیستریزیس استفاده می‌شود که این مقادیر برای محاسبه مشخصات موتور هیستریزیس همراه با مدار معادل بکار می‌روند. در نهایت نتایج با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه می‌شود.

کلورمن در سال ۱۹۷۶ درباره پدیده هانتینگ در موتورهای هیستریزیس و روش‌هایی جهت میرا کردن این پدیده بحث می‌کند [39]. پدیده هانتینگ در واقع نوسانات تصادفی کوچک در روتور می‌باشد. در

^۱ Kataoka

موتورهای هیستریزیس دو عامل مؤثر در پدیده هانتینگ عبارتند از: (۱) تأثیر جریان ادی و (۲) اثر غیر خطی هیستریزیس. اثر غیر خطی هیستریزیس باعث نوساناتی می‌شود که به طور معکوس با موقعیت زاویه‌ای روتور تغییر می‌کند. در این مقاله یک نظریه توصیفی برای توضیح اثر غیرخطی هیستریزیس بر روی پدیده هانتینگ ارائه شده و همچنین روش‌های جدیدی برای میرا کردن هانتینگ تنها با استفاده از مؤلفه‌های الکتریکی که شامل هم مدارات پسیو و هم مدارات اکتیو می‌باشند، پیشنهاد شده‌اند. در این مقاله نشان داده است که اعمال روش‌های میراکننده مناسب منجر به کاهش پدیده هانتینگ در موتورهای هیستریزیس خواهد شد.

بررسی‌های کلی دیگری نیز در رابطه با موتور هیستریزیس انجام گرفته است. از آن جمله، هوری^۱ و همکاران در سال ۱۹۹۴ با استفاده از معادلات بسل روشی برای تعیین نفوذپذیری مختلط ارائه کردند [40]. واکوئی و همکاران در سال ۱۹۸۳ در [41]، همچنین اوکلی در سال ۱۹۹۶ در [42]، به بررسی اثر توالی منفی در موتور هیستریزیس پرداختند. کابوتا^۲ و همکاران و همچنین گالان^۳ اثرات ناهمسانگردی^۴ در ماده سازنده رینگ هیستریزیس را مورد بررسی قرار دادند [43]، [44].

از جمله مهم‌ترین پایان‌نامه‌ها و مقالات منتشر شده توسط محققین دانشگاه صنعتی شاهرود در زمینه ماشین‌های هیستریزیس می‌توان به [45]، [18]، [46]، [47]، [48]، [49]، [50]، [51]، [52]، [53]، [54] و [55] اشاره نمود. از مطالب این پژوهش‌ها در ارائه نحوه عملکرد موتور هیستریزیس در بخش‌های قبلی و بعدی استفاده شده است.

۲-۴- معرفی موتور سنکرون آهنربای دائم

در گذشته تلاش‌های زیادی توسط محققان برای به‌کارگیری آهنربای دائم به جای سیم‌پیچی تحریک ماشین سنکرون صورت می‌گرفت که اغلب آنها به دو دلیل با شکست روبه‌رو می‌شد. دلیل اول در دسترس

¹ Horii

² Kubota

³ Galan

⁴ Anisotropic

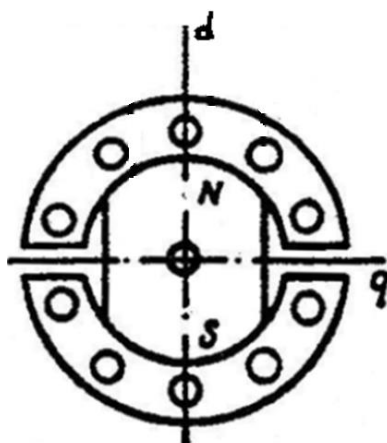
نبودن آهنرباهای دائم با نیروی مغناطیس‌زدای بالا بوده و دلیل دوم مربوط به هزینه بالای این امر می‌شد. چراکه به کفایت امروز، در تولید آهنرباهای مدرن با انرژی بالا از قبیل فریت^۱، منگنز-آلومینیوم-کربن، ساماریوم-کبالت، نئودیوم-برن-آهن و... تکنولوژی کاملی نداشتند.

با توجه به پیشرفت‌های چشمگیر در زمینه تکنولوژی ساخت موتورهای آهنربای دائم و کاربردهای وسیع و روز افزون این موتورها در سال‌ها اخیر، ضرورت آگاهی و شناخت کامل نسبت به ساختمان و نحوه طراحی این نوع ماشین‌ها امری اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد.

۲-۴-۱- نحوه عملکرد موتور سنکرون با آهنربای دائم

در این نوع موتورها جهت حذف منبع DC تحریک روتور، از یک آهنربای دائم (PM) استفاده می‌شود. قسمت اصلی گشتاور تولید شده در این موتور از نوع تداخلی و از تأثیر متقابل میدان گردان استاتور و میدان حاصل از PM ها در روتور، تولید می‌شود. مقدار متوسط این گشتاور در هر سرعتی به‌جز سرعت سنکرون صفر بوده و لذا چنین موتوری فاقد گشتاور راه‌اندازی است. به‌علاوه نیاز است تا پس از راه‌افتادن، سرعت آن توسط مکانیزم دیگری به مقدار سنکرون رسانده شود. این عمل معمولاً توسط یکسری میله‌های به فرم قفس سنجایی یا مشابه آن انجام می‌گیرد. بدین ترتیب موتور به‌صورت یک موتور القایی راه‌اندازی می‌شود و سرعت آن تا نزدیکی سرعت سنکرون صعود می‌کند و چنانچه شرایط دینامیکی قسمت گردان اجازه دهد، سرعت موتور تحت تأثیر گشتاور تداخلی موجود بین میدان‌های استاتور و روتور به مقدار سنکرون کشانده می‌شود. شکل ۲-۹ ساختمان روتور یک موتور سنکرون با آهنربای دائم را نشان می‌دهد.

¹ Ferrites



شکل ۲-۹: ساختمان یک نمونه روتور موتور سنکرون آهنربای دائم

۲-۴-۲- انواع ساختارهای موتور سنکرون با آهنربای دائم

موتورهای سنکرون آهنربای دائم دارای ساختارهای گوناگونی هستند. در یک دسته‌بندی کلی می‌توان این نوع موتورها را به دو نوع استوانه‌ای و تخت تقسیم بندی کرد که هر کدام از این دو نوع در توپولوژی و ساختارهای مختلفی ساخته می‌شوند. از آنجایی که محوریت این رساله بر نوع تخت نهادینه شده است، لذا تمرکز بیشتر بر روی انواع موتور سنکرون آهنربای دائم نوع تخت خواهد بود.

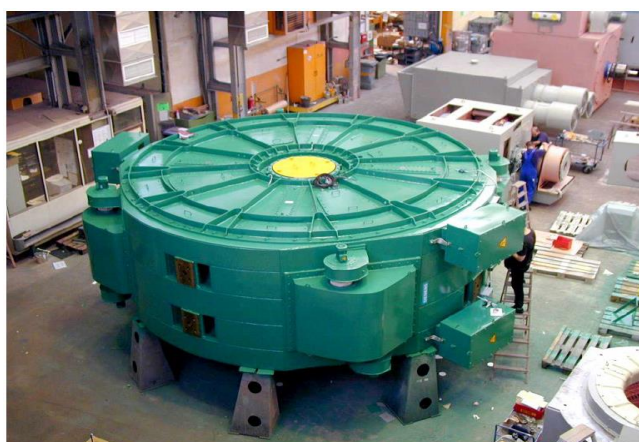
ماشین‌های شارمحوری آهنربای دائم (AFPM)^۱ که همچنین با نام ماشین‌های نوع تخت نیز شناخته می‌شوند، به واسطه ساختار فشرده و چگالی توان بالایی که دارند جایگزینی مناسب برای ماشین‌های شارشعاعی آهنربای دائم (RFPM)^۲ می‌باشند.

موتورهای AFPM به ویژه برای خودروهای الکتریکی، پمپ‌ها، فن‌ها، کنترل شیرها، سانتریفیوژها، ابزارهای ماشینی، ربات‌ها و تجهیزات صنعتی مناسب می‌باشند. روتور با قطر بزرگ با گشتاور اینرسی بالا می‌تواند به‌عنوان چرخ طیار به کار رود. ماشین‌های AFPM همچنین می‌توانند به‌عنوان ژنراتورهای کوچک تا متوسط استفاده شوند. از آن جایی که این ماشین‌ها قابلیت طراحی با تعداد قطب‌های زیاد را دارند، این ماشین‌ها بدون نیاز به گیربکس‌های گران‌قیمت برای کاربردهای سرعت پایین مانند: درایوهای کشنده

¹ Axial Flux Permanent Magnet

² Radial Flux Permanent Magnet

مکانیکی، بالابرها، ژنراتورهای بادی شکل ۲-۱۰ [56] و ... ایده آل هستند. همچنین از دیگر کاربردهای این ماشین‌ها می‌توان به کاربردهای حمل و نقل زمینی، زمینه‌های فضاوردی، صنایع هواپیمایی، صنایع کاغذسازی، نیروی رانشی کشتی‌ها و زیردریایی‌ها و دیگر محرک‌های صنعتی نام برد. شکل نوع دیسکی منحصر به فرد روتور و استاتور ماشین‌های AFPM امکان ایجاد طراحی‌های متنوع را فراهم می‌سازد. ماشین‌های AFPM می‌توانند به صورت ماشین‌های دارای یک یا چند فاصله هوایی، شیاردار یا بدون شیار و یا به طور کلی آرمیچر بدون هسته (بدون آهن) طراحی شوند [57]، [58]، [59]، [60].



شکل ۲-۱۰: ژنراتور سنکرون آهنربای دائم ۳ مگاوات بدون جعبه دنده برای توربین بادی (زیمنس ۲۰۰۴)

۲-۴-۳- انواع توپولوژی‌های ماشین شارمحوری آهنربای دائم [60]

از نظر ساختاری، ماشین‌های AFPM بدون جاروبک می‌توانند به صورت ماشین‌های یک‌وجهی^۱، دو‌وجهی^۲، یا چند لایه (چند دیسکی)^۳ با یا بدون شیار آرمیچر، با یا بدون هسته آرمیچر، با روتور PM داخلی یا خارجی، با اتصال سطحی^۴ یا درونی^۵ آهنرباهای دائم طراحی شوند. در پیکربندی‌های دو‌وجهی، هر دو آرایش استاتور خارجی یا روتور خارجی می‌توانند در نظر گرفته شوند. به طور کلی طبقه‌بندی انواع توپولوژی‌های ماشین AFPM بدون جاروبک به صورت نمودار شکل ۲-۱۱ می‌باشد.

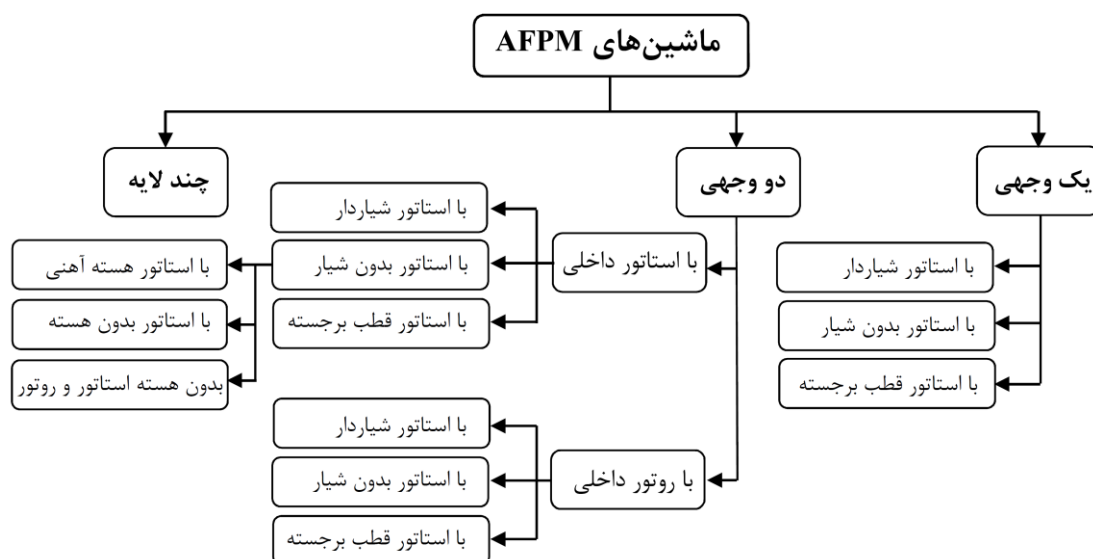
¹ Single-Sided

² Double-Sided

³ Multi-Stage (Multi-Disc)

⁴ Surface-Mounted

⁵ Buried



شکل ۱-۲: نمودار طبقه‌بندی انواع توپولوژی‌های ماشین AFPM

به دلیل ارتباط غیر مستقیم موضوع رساله با انواع ساختارهای ماشین‌های شارمغوری، تشریح جزئیات

این ساختارها به مراجع [61]، [62]، [63]، [64]، ارجاع داده می‌شود.

۲-۴-۴- برخی از ویژگی‌های مشترک ماشین‌های AFPM [62]

ماشین‌های شارمغوری از نظر جهت شار که به صورت موازی با محور مکانیکی ماشین جاری می‌شود با ماشین‌های الکتریکی متداول تفاوت دارند. جریان عبوری از طریق هر سیم‌پیچ استاتور با شار ایجاد شده توسط آهنرباهای روی روتور به طور متقابل اثر می‌کند، که باعث ایجاد یک نیروی مماسی با محیط روتور می‌شود. علی‌رغم تنوع زیاد در وجود ماشین‌های AFPM، می‌توان برخی از ویژگی‌های مشترک را با عنوان مزایا و معایب این ماشین‌ها نسبت به ماشین‌های الکتریکی متداول نام برد.

مزایا:

- ساختمان فشرده ماشین و طول بدنه کوتاه

- چگالی توان بالا

- راندمان بالا؛ بدون تلفات مس روتور به دلیل تحریک آهنربای دائم
- دارای روتور کوتاه در جهت محوری
- دارای ساختار مستحکم‌تر از نوع استوانه‌ای

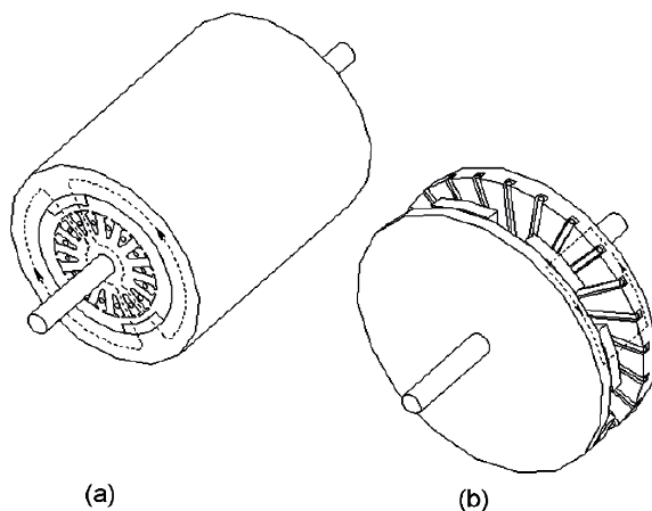
معایب:

- تلفات بادخوری بالا در کاربردهای سرعت بالا (که می‌تواند با قرار دادن ماشین در محفظه خلأ تا حدی کاهش یابد).
- توپولوژی پیچیده ماشین با دو یا چند فاصله هوایی

۲-۴-۵- مقایسه کلی ماشین‌های شارمحوری با ماشین شارشعاعی آهنربای دائم [60]

همگام با کاربرد مواد جدید، نوآوری در تکنولوژی ساخت و پیشرفت در روش‌های خنک‌سازی امکان افزایش بیشتر چگالی توان (نسبت توان خروجی به جرم یا حجم) ماشین‌های الکتریکی فراهم گردیده است. اما با این حال برخی محدودیت‌های ذاتی برای این افزایش چگالی توان برای ماشین‌های شارشعاعی آهنربای دائم وجود دارند که عبارتند از:

- (۱) خصوصیت تراکم شار عبوری در مسیر انتهای دندان استاتور در مورد ماشین‌های القایی و کموتاتوردار جریان مستقیم یا ماشین‌های بدون جاروبک با روتورهای خارجی (شکل ۲-۱۲).
- (۲) از هسته روتور اطراف محور (یوغ روتور) به سختی به‌عنوان یک مدار مغناطیسی استفاده می‌شود.
- (۳) گرمای سیم‌پیچی استاتور ابتدا به هسته استاتور و سپس به بدنه منتقل می‌شود. لذا انتقال گرمای ضعیفی از طریق استاتور، فاصله هوایی، روتور و محور بدون وجود سیستم خنک‌کننده صورت می‌گیرد.



شکل ۲-۱۲: توپولوژی‌های (a) ماشین RFPM (b) ماشین AFPM [60]

این محدودیت‌های ذاتی ساختار شارشعاعی را محدود می‌کنند و نمی‌توانند به آسانی رفع شوند مگر این که یک توپولوژی جدید اختیار شود.

به طور خلاصه ماشین‌های شارمحوری آهنربای دائم دارای برخی ویژگی‌های برجسته‌ای نسبت به ماشین‌های شارشعاعی هستند [65]، [66]، [67] که عبارتند از:

- (۱) ماشین‌های AFPM نسبت قطر به طول بزرگتری در مقایسه با ماشین‌های RFPM دارند.
- (۲) ماشین‌های AFPM می‌توانند به گونه‌ای طراحی شوند که نسبت توان به وزن بالاتری داشته باشند. در نتیجه در مواد هسته صرفه‌جویی شده و بازده بالاتری دارند.
- (۳) اندازه ماشین‌های AFPM در مقایسه با ماشین‌های RFPM متنظر کوچکتر است و ساختارهای روتور و استاتور دیسکی شکل، یک ویژگی مهم ماشین‌های شارمحوری است. به دلیل شکل و اندازه مناسب برای تطبیق با محدودیت فضا برای بعضی کاربردها مانند خودروهای الکتریکی بسیار مهم است.
- (۴) ماشین‌های AFPM دارای فاصله‌های هوایی دو وجهی و قابل تنظیم می‌باشند که در ماشین‌های شارشعاعی این امکان وجود ندارد.

۵) ماشین‌های AFPM دارای قطر بیرونی هسته بزرگتر می‌باشند که با تطبیق تعداد قطب‌های بیشتر می‌توانند انتخاب مناسبی برای عملکردهای سرعت پایین باشند.

۶) علاوه بر موارد فوق جهت شار فاصله هوایی ماشین‌های AFPM می‌تواند متنوع باشد و توپولوژی‌های متمایز زیادی به دست آیند که این ویژگی مزایای برجسته‌ای را نسبت به ماشین‌های شارشعاعی متداول در بعضی از کاربردها ایجاد می‌کند.

با توجه به توضیحات ارائه شده در این بخش می‌توان ماشین مناسب برای کاربرد مورد نظر را انتخاب نمود.

۲-۵- معرفی موتور سنکرون هیستریزیس آهنربای دائم

چنانچه در هر ساختاری از موتور هیستریزیس بتوان روتور آن را به صورت قطب برجسته ساخت، بنابراین موتور گشتاور رلوکتانسی همانند موتور رلوکتانسی تولید خواهد کرد که با گشتاور هیستریزیس (ناشی از رینگ هیستریزیس) در سرعت سنکرون جمع خواهد شد. در هر سرعت زیر سرعت سنکرون، برجستگی روتور تولید گشتاور ضربانی می‌کند. وقتی سرعت روتور به سرعت سنکرون رسید، روتور در یک موقعیت مشخص نسبت به میدان استاتور ثابت می‌شود. این موقعیت توسط محورهای برجستگی و گشتاور بار تعیین می‌گردد. نتیجتاً گشتاور ماکزیمم در سرعت سنکرون ترکیب گشتاور رلوکتانسی و گشتاور هیستریزیس خواهد شد که بیشتر از گشتاور موتور هیستریزیس ساده است. همین موضوع ایده‌ای برای ساخت موتور هیستریزیس هیبرید گشت. ایجاد برجستگی بر روی رینگ هیستریزیس با به وجود آوردن شیارهای متقارنی بر روی سطح خارجی رینگ هیستریزیس قابل اجراست. موتور هیستریزیس رلوکتانسی حاصل علی‌رغم اینکه مشکل هانتینگ آن تا حدودی برطرف شده است اما همچنان دارای معایبی از قبیل ضریب توان و بازده پایین (به دلیل افزایش تلفات پارازیتیک ناشی از نوسانات شار در شیارهای ایجاد شده در سطح خارجی رینگ هیستریزیس) و جریان مغناطیس‌کنندگی بالا خواهد بود. چنانچه شیارها بر روی سطح داخلی رینگ هیستریزیس ایجاد شود که دشواری‌های خاص خود را دارد، مشکلات مذکور تا حدودی مرتفع می‌گردند اما

باز هم به دلیل قابل توجه نبودن گشتاور رلوکتانسی حاصل، صرفه لازم را ندارد [52]. لذا محققان بر آن شدند تا از آهنربای دائم در ترکیب با رینگ هیستریزیس صاف استفاده کنند. بدین ترتیب موتور هیستریزیس آهنربای دائم مطرح گشت. معرفی و توضیح عملکرد این موتور مفصلاً در فصل‌های بعدی ارائه خواهد شد.

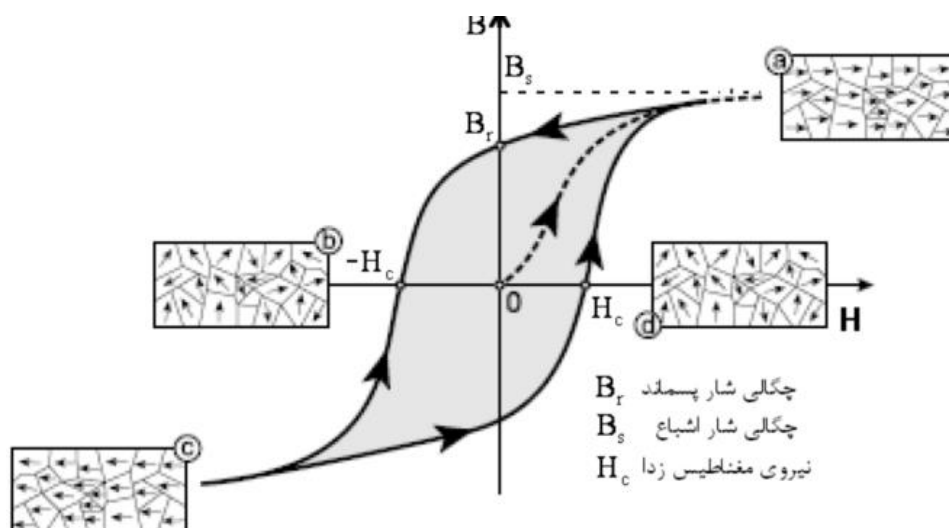
فصل ۳: تئوری عملکرد موتور هیستریزیس و موتور آهنربای دائم

۳-۱- مقدمه

در این فصل تئوری عملکرد موتورهای هیستریزیس و آهنربای دائم و PMHS مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین روند مدل‌سازی تحلیلی این موتورها نیز ارائه می‌شود. هدف از ارائه این فصل، بیان روش تحلیلی بکار گرفته شده در تحلیل ساختار پیشنهادی برای موتور PMHS می‌باشد. به دلیل اینکه تمامی مباحث این رساله به نوعی با پدیده هیستریزیس آمیخته شده، لذا نیاز است تا در ابتدا به بررسی پدیده هیستریزیس پرداخته شود.

۳-۲- پدیده هیستریزیس

هنگامی که یک ماده مغناطیسی تحت تأثیر یک میدان مغناطیسی متناوب قرار می‌گیرد پدیده هیستریزیس به وجود می‌آید. این پدیده ناشی از 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 اعمال میدان مغناطیسی بر ماده و ظهور چگالی شار، تأخیر فاز وجود دارد. شکل ۱-۳ تغییرات چگالی شار را بر حسب شدت میدان مغناطیسی و رفتار حوزه‌های مغناطیسی را در شرایط مختلف نشان می‌دهد.



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

در شکل ۱-۳ محل تلاقی منحنی با محور شدت میدان مغناطیسی، نیروی مغناطیس‌زدا^۱ نامیده شده و محل تقاطع آن با محور چگالی شار به نام چگالی شار پسماند معروف است.

اگر فرض کنیم که در مدار شکل ۲-۳ جریان $i(t)$ سینوسی با فرکانس f باشد، آنگاه شدت میدان مغناطیسی ایجاد شده در هسته سلونوئید H برابر خواهد بود با:

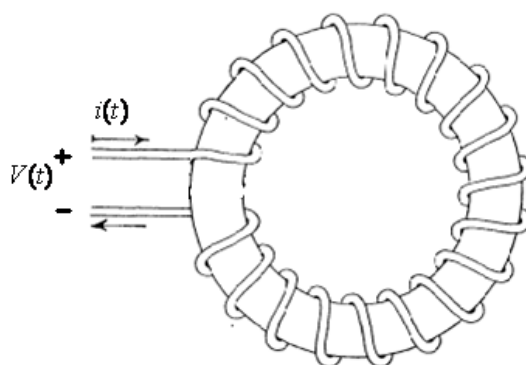
¹ Coercive Force

$$i(t) = I_m \sin(\omega t) \quad (1-3)$$

$$\oint H(t) dl = ni(t) \quad (2-3)$$

$$H(t) = H_{MAX} \sin(\omega t) = \frac{nI_m}{l} \sin(\omega t) \quad (3-3)$$

که در آن n تعداد دور سیم پیچی و l طول مسیر مغناطیسی هسته می باشد.



شکل ۲-۳: هسته مغناطیسی و سیم پیچ حامل جریان

بنابراین $H(t)$ سینوسی و با جریان همفاز است. با فرض سینوسی بودن $H(t)$ و با در نظر گرفتن منحنی غیرخطی هیستریزیس می توان چگالی شار $B(t)$ را به دست آورد. چگالی شار بر حسب زمان غیرخطی و پریودیک است و اگر سری فوریه $B(t)$ نوشته شود، فاقد هارمونیک های زوج خواهد بود و مؤلفه اصلی چگالی شار با شدت میدان مغناطیسی به اندازه زاویه α اختلاف فاز دارد. بنابراین خواهیم داشت:

$$B(t) = B_{MAX} \sin(\omega t - \alpha) \quad (4-3)$$

$$\varphi(t) = SB_{MAX} \sin(\omega t - \alpha) \quad (5-3)$$

$\varphi(t)$ شار هسته و S سطح مقطع هسته می باشد. ولتاژ القایی دو سر سیم پیچی برابر خواهد شد با:

$$v(t) = n \frac{d\varphi(t)}{dt} = 2n\pi f SB_{MAX} \cos(\omega t - \alpha) \quad (6-3)$$

اکنون می توان فقط با در نظر گرفتن مؤلفه اصلی، توان ورودی را به صورت زیر به دست آورد.

$$\bar{V} = \sqrt{2} n \pi f SB_{MAX} \angle 0 \quad (7-3)$$

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

$$P = \bar{V} \bar{I} \cos \left(\alpha - \frac{\pi}{2} \right) = \pi f SB_{MAX} H_{MAX} l \cos \left(\alpha - \frac{\pi}{2} \right) \quad (9-3)$$

پس می توان نوشت:

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

که در آن $V_{Hysteresis} = Sl$ حجم ماده مغناطیسی است.

به طور دقیق توان تلف شده در ماده هیستریزیس را از رابطه معروف زیر می توان به دست آورد.

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

که در آن E_h سطح حلقه هیستریزیس است.

تقریب منحنی های هیستریزیس با استفاده از روشی که بیان شد (یعنی استفاده از مؤلفه اصلی شدت میدان مغناطیسی و صرف نظر کردن از هارمونیک های دیگر آن) باعث می شود که منحنی های هیستریزیس با بیضی های متحدالمرکز تقریب زده شوند. این بیضی ها هر کدام دارای زاویه تأخیر هیستریزیس α و نفوذپذیری مغناطیسی $\mu = B_{MAX} / H_{MAX}$ منحصر به فرد می باشند. مقدار زاویه تأخیر هیستریزیس از رابطه زیر به دست می آید.

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{E_h}{\pi H_{MAX} B_{MAX}} \right) \quad (12-3)$$

یکی دیگر از روش‌های تقریب منحنی هیستریزیس، تقریب متوازی الاضلاع است. در مرجع [22] از تقریب متوازی الاضلاع برای مدل‌سازی موتور هیستریزیس استفاده شده است.

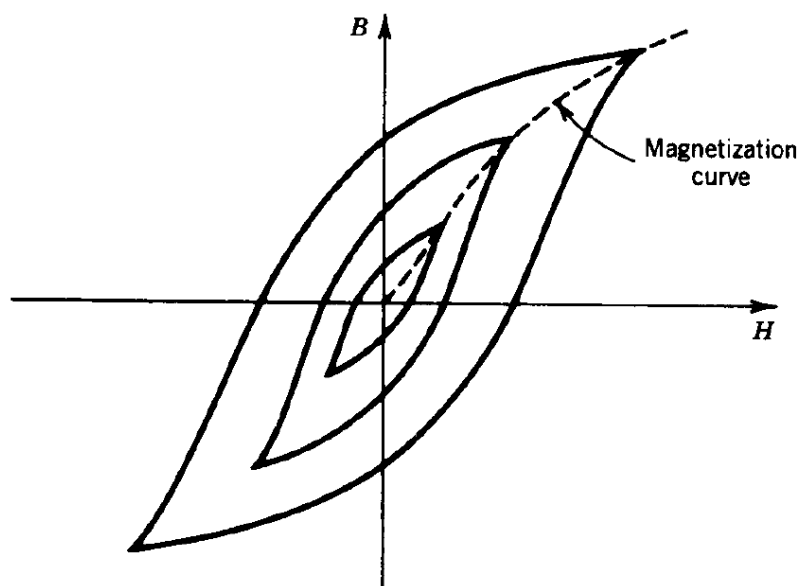
۳-۳- تئوری عملکرد موتور هیستریزیس

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

با اتصال سیم‌پیچ آرمیچر به یک مجموعه ولتاژ چندفاز متعادل، مشابه با ماشین‌های سنکرون معمولی، یک میدان دوار با سرعت سنکرون n_s دور در ثانیه در ماشین به وجود می‌آید که p قطب در استاتور ایجاد می‌کند (در موتورهای هیستریزیس معمولاً $p=2$ است). این سرعت به صورت زیر به فرکانس تغذیه استاتور f_s و تعداد قطب‌ها p مرتبط است:

$$n_s = \frac{2f_s}{p} \quad (13-3)$$

در حالتی که سرعت روتور صفر است، این میدان دوار استاتور هر نقطه از روتور را با سرعت سنکرون جاروب می‌کند. در این شرایط، به دلیل وجود خاصیت هیستریزیس در ماده سازنده روتور (رینگ هیستریزیس)، هر نقطه از روتور با توجه به دامنه شدت میدان مغناطیسی جاروب‌کننده آن نقطه، حلقه هیستریزیس خاص خود را مطابق شکل ۳-۳ به تعداد $pn_s/2$ یا همان f_s سیکل در ثانیه طی می‌کند.



شکل ۳-۳: حلقه‌های هیستریزیس اصلی برای چند نقطه مختلف از روتور ماشین هیستریزیس تخت

برای درک بهتر نحوه عملکرد ماشین‌های هیستریزیس تخت، بهتر است فعلاً از کلیه تلفات استاتور، تلفات جریان‌های گردابی در روتور و همچنین تلفات مکانیکی ماشین صرف نظر شود. بدیهی است که این موارد در بررسی‌های بعدی ماشین هیستریزیس منظور خواهند شد.

در اثر طی شدن حلقه‌های هیستریزیس در هر نقطه از روتور، تلفات هیستریزیس در این نقاط به وجود می‌آید. در شرایط سکون، کل توان ورودی به سیم‌پیچ آرمیچر صرف تلفات هیستریزیس روتور P_h می‌شود. به بیان دیگر، با هر بار طی شدن حلقه هیستریزیس در جزء دیفرانسیلی i ام از روتور با حجم ΔV_i انرژی تلف شده در اثر پدیده هیستریزیس برابر است با:

$$\Delta W_{lh_i} = \Delta V_i E_{h_i} \quad (۱۴-۳)$$

که در آن E_{h_i} مساحت حلقه هیستریزیس مربوط به المان i ام روتور می‌باشد. در شرایط سکون هر المان روتور به تعداد f_s بار در ثانیه توسط میدان استاتور جاروب می‌شود، و در نتیجه توان تلفاتی هیستریزیس در جزء دیفرانسیلی i ام از روتور به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta P_{lh_i} = f_s \Delta V_i E_{h_i} \quad (15-3)$$

از طرف دیگر، مساحت حلقه هیستریزیس را می‌توان به صورت زیر با چگالی شار ماکزیمم در هر المان B_{\max_i} محاسبه نمود:

$$E_{h_i} = K'_h (B_{\max_i})^n \quad (16-3)$$

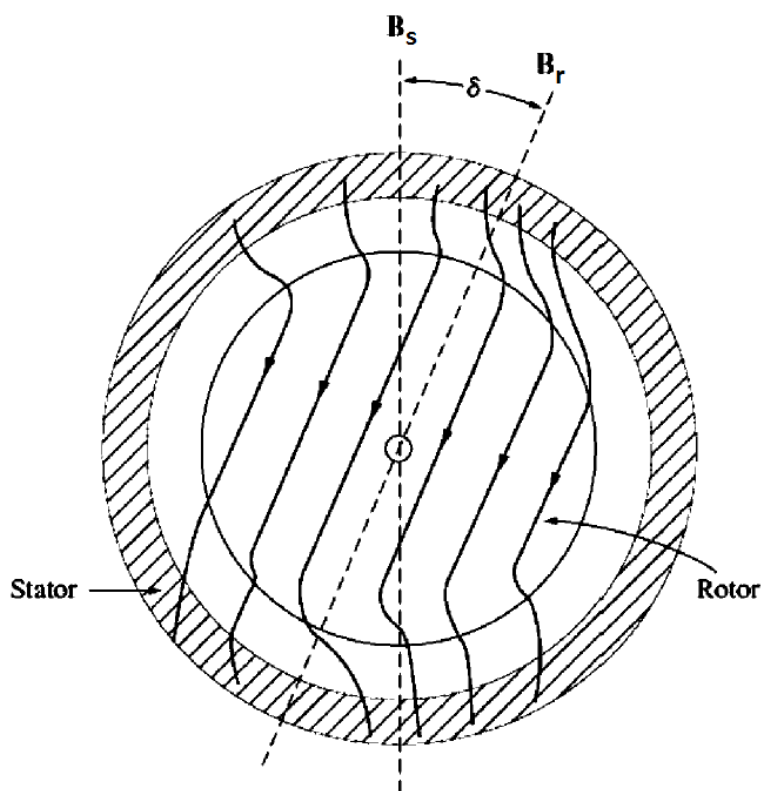
که K'_h و n ضرایب ثابت وابسته به جنس ماده روتور می‌باشند. با جایگذاری روابط (3-13) و (3-16) در (3-15)، ΔP_{lh_i} به صورت زیر در می‌آید:

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

در نتیجه، تلفات کل هیستریزیس در روتور و در شرایط سکون P_{lh} عبارت است از:

$$P_{lh} = \sum_i \Delta P_{lh_i} = f_s K'_h \sum_i \Delta V_i (B_{\max_i})^n \quad (18-3)$$

علاوه بر ایجاد تلفات، وجود حلقه‌های هیستریزیس باعث ایجاد یک اختلاف فاز δ بین میدان‌های دوار استاتور و روتور می‌شوند که برای درک بهتر این مطلب، خطوط شار برای یک ماشین هیستریزیس در شکل 3-4 نشان داده شده است (این شکل مربوط به یک ماشین استوانه‌ای است که به جهت امکان نمایش دوبعدی خطوط شار انتخاب شده است). همان‌طور که بیان شد، توزیع جریان‌های استاتور یک شدت میدان مغناطیسی دوار در داخل استاتور و روتور ایجاد می‌کند. با صرف نظر از وجود پدیده هیستریزیس برای هسته استاتور، شدت میدان مغناطیسی دوار استاتور، یک توزیع چگالی شار دوار \mathbf{B}_s هم‌فاز با خود در آن به وجود می‌آورد. اما شدت میدان مغناطیسی دوار موجود در روتور، چگالی شار دوار \mathbf{B}_r را در آن ایجاد می‌کند که به دلیل وجود حلقه‌های هیستریزیس نشان داده شده در شکل 3-3، نسبت به شدت میدان به وجود آورنده آن تأخیر فاز دارد. بنابراین چگالی شار دوار روتور نسبت به چگالی شار دوار استاتور، و در نتیجه قطب‌های مغناطیسی استاتور نسبت به قطب‌های مغناطیسی روتور، به اندازه زاویه δ عقب‌تر قرار می‌گیرد. از اینرو، یک گشتاور الکترومغناطیسی پدید می‌آید که باعث به چرخش درآمدن روتور می‌شود.



شکل ۳-۴: خطوط شار در استاتور و روتور یک ماشین هیستریزیس

نکته مهمی که باید به آن توجه کرد این است که با سرعت گرفتن روتور، هر نقطه از آن همچنان حلقه‌های هیستریزیس قبلی خود را طی می‌کنند، اما با افزایش سرعت روتور تعداد دفعات طی شدن این حلقه‌ها در هر ثانیه کاهش می‌یابد. بنابراین انتظار می‌رود که سرعت نسبی بین میدان‌های B_s و B_r همواره صفر باشد و اختلاف فاز δ بین آن‌ها تا لحظه اولین ورود به سنکرونیزم ثابت بماند. به عبارت دیگر، از راه‌اندازی تا لحظه ورود به سنکرونیزم گشتاور الکترومغناطیسی ناشی از وجود پدیده هیستریزیس ثابت باقی می‌ماند.

علاوه بر ثابت بودن گشتاور، توان ورودی به ماشین نیز در این شرایط ثابت باقی می‌ماند. برای درک موضوع به این نکته توجه می‌کنیم که به دلیل ثابت ماندن وضعیت میدان‌های روتور و استاتور از لحظه راه‌اندازی تا ورود به سنکرونیزم، شار پیوندی سیم‌پیچ‌های استاتور و بنابراین ولتاژ القا شده در آن‌ها تغییر نمی‌کند. در نتیجه، با فرض عدم تغییر ولتاژهای ترمینال، جریان ورودی به ماشین و همچنین توان ورودی آن بدون تغییر باقی می‌ماند.

همان‌طور که بیان شد، با افزایش سرعت روتور تعداد دفعات طی شدن حلقه‌های هیستریزیس در هر ثانیه کاهش می‌یابد. اگر سرعت چرخش روتور n_r دور در ثانیه باشد، هر نقطه از روتور در هر ثانیه $p(n_s - n_r)/2$ بار سیکل هیستریزیس مربوط به خود را طی می‌کند. اگر لغزش s را به صورت زیر تعریف کنیم:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (۱۹-۳)$$

تعداد دفعات طی شدن حلقه هیستریزیس برابر $spn_s/2$ یا sf_s بار در ثانیه خواهد شد. بنابراین، در سرعت n_r تلفات هیستریزیس روتور به صورت زیر خواهد آمد:

$$P_{lh} = sf_s K'_h \sum_i \Delta V_i (B_{\max_i})^n \quad (۲۰-۳)$$

از آنجایی که در شرایط زیرسنکرون لغزش کوچکتر از یک است، از رابطه (۲۰-۳) می‌توان مشاهده کرد که با افزایش سرعت روتور تلفات هیستریزیس روتور کاهش می‌یابد.

از آنجایی که توان ورودی به ماشین در شرایط زیرسنکرون مستقل از سرعت است و با توجه به کاهش تلفات هیستریزیس روتور با افزایش سرعت ماشین، بخشی از این توان ورودی باید به توان مکانیکی تبدیل شده باشد. به عبارت دیگر، توان مکانیکی تولیدی در اثر وجود پدیده هیستریزیس (توان مکانیکی هیستریزیس) P_{mh} برابر است با:

$$P_{mh} = (1-s) f_s K'_h \sum_i \Delta V_i (B_{\max_i})^n \quad (۲۱-۳)$$

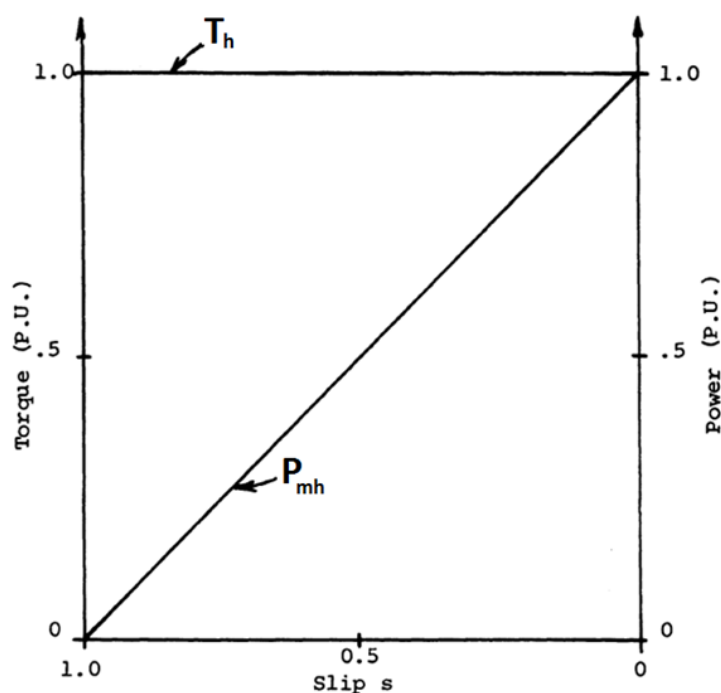
که این توان مکانیکی با افزایش سرعت افزایش می‌یابد. گشتاور الکترومغناطیسی ناشی از وجود پدیده هیستریزیس (گشتاور الکترومغناطیسی هیستریزیس) نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$T_h = \frac{P_{mh}}{\omega_r} = \frac{P_{mh}}{(1-s)\omega_s} = \frac{f_s K'_h}{\omega_s} \sum_i \Delta V_i (B_{\max_i})^n \quad (۲۲-۳)$$

و با توجه به اینکه $\omega_s = 2\pi m_s = 4\pi f_s / p$ است:

$$T_h = \frac{pK_h'}{4\pi} \sum_i \Delta V_i (B_{\max_i})^n = K_h'' \sum_i \Delta V_i (B_{\max_i})^n \quad (23-3)$$

همان‌طور که از روابط (۲۱-۳) و (۲۳-۳) مشخص است، از لحظه راه‌اندازی تا لحظه اولین ورود به سنکرونیزم، توان مکانیکی هیستریزیس با افزایش سرعت (کاهش لغزش) افزایش می‌یابد، در حالیکه گشتاور الکترومغناطیسی هیستریزیس ثابت بوده و به سرعت وابسته نیست. شکل ۳-۵ نیز مؤید همین موضوع است.

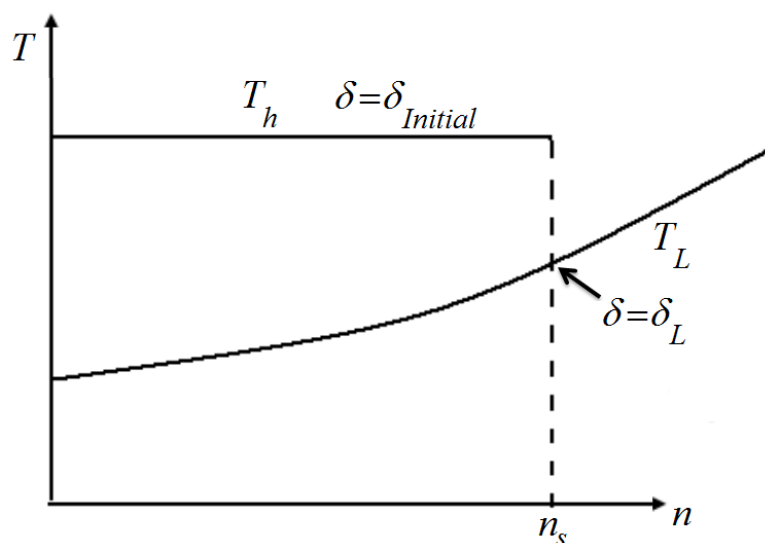


شکل ۳-۵: تغییرات گشتاور و توان هیستریزیس بر حسب سرعت از لحظه راه‌اندازی تا لحظه ورود به سنکرونیزم

تا اینجا در مورد نحوه عملکرد ماشین هیستریزیس در شرایط زیرسنکرون (از لحظه راه‌اندازی تا اولین ورود به سنکرونیزم) مطالبی ارائه شد. در ادامه به بحث در مورد لحظه ورود به سنکرونیزم و نوسانات سرعت تا رسیدن به حالت پایدار در سرعت سنکرون بحث خواهد شد.

وقتی ماشین سنکرون برای اولین بار به سرعت سنکرون می‌رسد، در یک لحظه به یک ماشین آهنربای دائم تبدیل می‌شود، و به عبارت دیگر قطب‌های روتور نسبت به خود روتور ساکن می‌شوند. به‌هرحال، از

آنجایی که گشتاور هیستریزیس در اولین ورود به سنکرونیزم معمولاً از گشتاور بار در سرعت سنکرون بزرگتر است (مطابق شکل ۳-۶)، روتور شتاب گرفته و سرعت آن از سرعت سنکرون بیشتر می‌شود. در شکل ۳-۶، زاویه بین میدان‌های دوار استاتور و روتور ماشین هیستریزیس از راه‌اندازی تا اولین ورود به سرعت سنکرون است و δ_L زاویه مورد نیاز بین میدان‌های دوار استاتور و روتور برای تأمین گشتاور بار در سرعت سنکرون می‌باشد.



شکل ۳-۶: مشخصه گشتاور سرعت ماشین هیستریزیس و بار

با سرعت گرفتن ماشین بالای سرعت سنکرون، میدان دوار استاتور در جهت عکس روتور را جاروب می‌کند. به عبارت دیگر، با فرض اینکه جهت گردش میدان دوار استاتور و جهت چرخش خود روتور پادساعتگرد باشد، در سرعت‌های کمتر از سرعت سنکرون میدان دوار استاتور هر نقطه از روتور را در جهت پادساعتگرد جاروب می‌کند. با رسیدن سرعت روتور به سرعت سنکرون، سرعت نسبی بین میدان دوار استاتور و هر نقطه از روتور ثابت شده و ماشین مغناطیس دائم می‌شود. با افزایش سرعت به بالای سرعت سنکرون، میدان دوار استاتور هر نقطه از روتور را در جهت ساعتگرد جاروب می‌کند (جهت طی شدن حلقه‌های هیستریزیس عوض می‌شود) و در نتیجه قطب‌های روتور جلوتر از قطب‌های استاتور قرار می‌گیرند و ماشین هیستریزیس عملکرد ژنراتوری پیدا می‌کند.

همان‌طور که بیان شد، در بالای سرعت سنکرون، جهت طی شدن حلقه‌های هیستریزیس در کلیه نقاط روتور عوض می‌شود. به دلیل وجود حلقه‌های فرعی در مشخصه‌های هیستریزیس روتور، مسیر برگشت بر روی حلقه هیستریزیس با مسیر رفت یکی نیست و در نتیجه ضمن عوض شدن جهت طی شدن حلقه، خود حلقه نیز تغییر می‌کند (بطوریکه مساحت آن کوچکتر می‌شود) و به عبارت دیگر زاویه بین میدان‌های دوار استاتور و روتور دیگر $\delta_{initial}$ نخواهد بود و لذا گشتاور هیستریزیس کاهش می‌یابد. با کاهش گشتاور هیستریزیس به زیر گشتاور بار، ماشین شتاب منفی گرفته و سرعت آن کاهش می‌یابد تا مجدداً به سرعت سنکرون برسد. با کاهش سرعت به زیر سرعت سنکرون، مجدداً جهت طی شدن حلقه‌ها و همچنین خود حلقه‌های هیستریزیس تغییر می‌کنند (مساحت آن‌ها بیشتر می‌شود) و در نتیجه زاویه بین میدان‌های دوار روتور و استاتور افزایش یافته که منجر به افزایش گشتاور هیستریزیس می‌شود. بنابراین ماشین مجدداً افزایش سرعت می‌یابد تا به سرعت سنکرون رسیده و از آن عبور کند. این فرآیند نوسان سرعت و تغییر حلقه‌های هیستریزیس، و به عبارت دیگر نوسان زاویه گشتاور δ ، آنقدر ادامه می‌یابد تا حلقه‌ای برای هر نقطه از روتور پیدا شود که گشتاور هیستریزیس تولید شده در سرعت سنکرون برابر با گشتاور بار در این سرعت باشد. در این حالت ماشین به شرایط عملکرد دائمی خود رسیده است و با سرعت سنکرون به کار خود ادامه می‌دهد.

در پاره‌ای از موارد، گشتاور الکترومغناطیسی موتور هیستریزیس در اولین ورود به سنکرونیزم کمتر از گشتاور بار در سرعت سنکرون است. در این صورت، سرعت موتور در حالت دائمی کمتر از سرعت سنکرون بوده و به عبارت دیگر موتور هیستریزیس مشابه موتور القایی عمل می‌کند (عملکرد آسنکرون).

۳-۳-۱- تلفات ماشین هیستریزیس

ماشین هیستریزیس در حالت عملکرد دائمی دارای یک سری از تلفات می‌باشد. این تلفات عبارتند از: (۱) تلفات هیستریزیس و جریان‌های گردابی در هسته استاتور، (۲) تلفات اهمی در سیم‌پیچ‌های استاتور، (۳) تلفات

مکانیکی شامل تلفات اصطکاک یاتاقان‌ها و تلفات بادخوری و تهویه، (۴) تلفات بار سرگردان و (۵) تلفات پارازیتیک^۱.

موارد ۱ تا ۴ واضح بوده اما مورد پنجم یعنی تلفات پارازیتیک نیاز به کمی توضیح دارد. چنانچه بنا به هر دلیلی توزیع شار فاصله هوایی کاملاً سینوسی نباشد، مسیرهای برگشتی بر روی حلقه هیستریزیس اصلی ایجاد شده که همان حلقه‌های فرعی را پدید می‌آورند. تلفات ناشی از وجود حلقه‌های فرعی متناسب با مساحت آنها است که باعث کاهش چشمگیر توان و گشتاور خروجی و همچنین بازده موتور می‌شود. این تلفات به تلفات پارازیتیک معروف است. دو علت برای به‌وجود آمدن این تلفات مطرح شده است. اولین دلیل آن است که با توجه به محدودیت‌های موجود در توزیع سیم‌پیچ‌های استاتور، توزیع نیرو محرکه مغناطیسی (MMF)^۲ در فاصله هوایی سینوسی نخواهد بود. به تلفات ناشی از این پدیده، تلفات پارازیتیک نیرو محرکه مغناطیسی^۳ می‌گویند. دومین دلیل ریپل شار ناشی از وجود دندان‌ها می‌باشد. دندان‌ها با غیریکنواخت کردن فاصله هوایی (در زیر دندان‌ها فاصله هوایی کم و در زیر شیارها فاصله هوایی زیاد است) باعث به‌وجود آمدن ریپل‌هایی در شار فاصله هوایی شده که فرکانس آن‌ها متناسب با تعداد دندان‌ها است. این ریپل‌ها نیز باعث ایجاد حلقه‌های فرعی شده که تلفات ناشی از آنها به تلفات پارازیتیک شار^۴ معروف است. حلقه‌های فرعی به‌وجود آمده از توزیع سیم‌پیچی و یا از وجود دندان‌ها، باعث ایجاد تلفات هیستریزیس و جریان گردابی (فوکو یا ادی) در روتور خواهند شد. نتایج آزمایشات نشان داده است که تلفات هیستریزیس روتور در حالت دائمی تنها چهار درصد از کل تلفات پارازیتیک را تشکیل می‌دهد و بنابراین قابل صرف‌نظر است. از این رو، عمده تلفات ناشی از وجود حلقه‌های فرعی از نوع جریان گردابی می‌باشد.

¹ Parasitic Loss

² Magnetomotive Force

³ MMF-Parasitic Losses

⁴ Flux-Parasitic Losses

۳-۳-۲- نوسانات سرعت (هانتینگ)

از دیگر معایب موتورهای هیستریزیس، نوسان سرعت این موتورها حول سرعت سنکرون است که در پاره‌ای از مواقع اتفاق می‌افتد و مدت زمان نسبتاً طولانی برای میرا شدن آن نیاز است. این پدیده به پدیده هانتینگ معروف است. دوره این نوسانات از مرتبه یک ثانیه بوده که در مراجع مقادیر بین ۱ تا ۴ ثانیه نیز گزارش شده است. در برخی از شرایط این نوسانات حتی ممکن است میرا نشوند. ریشه اصلی این نوسانات سرعت، نوسان زاویه گشتاور δ حول مقدار پایدار آن می‌باشد. اندوکتانس‌های مغناطیسی ظاهری روتور نیز در این نوسانات سرعت مشارکت دارند. از جمله دلایل اصلی نوسانات سرعت می‌توان به اغتشاشات ناشی از تغییر یا اعوجاج در منبع تغذیه موتور یا تغییرات ناگهانی یا دوره‌ای بار مکانیکی آن اشاره نمود.

۳-۳-۳- تحریک اضافی کوتاه مدت

همان‌طور که قبلاً بیان شد، بهره و ضریب توان پایین و همچنین اندازه مکانیکی بزرگ از عیوب اساسی موتورهای هیستریزیس هستند. دو راه کار معمول برای کاهش این عیوب عبارتند از: (۱) اضافه کردن یک گشتاور سنکرون دیگر به گشتاور هیستریزیس و (۲) استفاده از رینگ هیستریزیس بزرگ‌تر. راهکار دیگر تحریک اضافی کوتاه‌مدت^۱ می‌باشد. تحریک اضافی کوتاه‌مدت به این معنی است که ولتاژ ورودی V_i اعمالی به موتوری که در سرعت سنکرون مشغول کار است به طور پیوسته تا یک مقدار nV_i ($n > 1$) افزایش یافته و سپس به طور پیوسته تا V_i کاهش می‌یابد. ضریب n به‌عنوان ضریب تحریک اضافه نامیده می‌شود. مزیت استفاده از تحریک اضافه آن است که لازم نیست ساختار خود موتور تغییری کند.

اگرچه برای بهبود ضریب توان موتورهای سنکرون می‌توان از خازن‌های جبران‌ساز استفاده کرد، اما این کار باعث ایجاد رزونانس شده و برروی بازده نیز تأثیری ندارد. تحریک اضافه کوتاه‌مدت نه تنها باعث بهبود

¹ Short Duration Overexcitation

ضریب توان می‌شود، بلکه بهره را نیز بالا می‌برد. به هر حال، زمانی که بار تغییرات ناگهانی دارد تحریک اضافه کوتاه مدت می‌تواند باعث نوسان سرعت حول سرعت سنکرون شود.

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

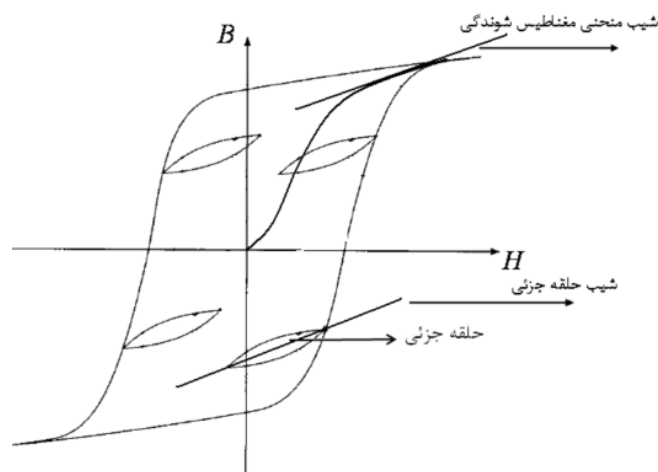
نوع ماده استفاده شده در روتور موتور هیستریزیس تأثیر بسیار زیادی در مشخصه عملکرد این موتور دارد. از مواد مغناطیس دائم استفاده شده در روتور موتور هیستریزیس می‌توان آلیاژ آهن-۳۶٪ کبالت Fe-Co، آلیاژ آهن کبالت وانادیم یا P6 با ترکیب Fe-Co-V، آلیاژ آهن-۵٪ کبالت Fe-Co، آلنیکوها Fe-Co-Ni-Al و آلیاژ آهن کروم-کبالت Fe-Cr-Co را نام برد. مشخصه‌های مغناطیسی و جزئیات چگونگی تولید برخی این آلیاژها تا حدودی غیر قابل دسترس است. اگر چه این مواد همگی از فرم مغناطیس‌های نوع سخت هستند ولی هر کدام از نظر مغناطیسی و مکانیکی ویژگی‌های خاص خود را دارد. از جمله مواردی که در انتخاب ماده روتور موتور هیستریزیس باید به آن توجه کرد می‌توان به گزینه‌های زیر اشاره نمود.

(۱) همان‌طور که قبلاً اشاره شد، توان خروجی موتور هیستریزیس متناسب با سطح حلقه هیستریزیس و حجم ماده استفاده شده در روتور است. پس هرچه سطح حلقه هیستریزیس ماده روتور موتور هیستریزیس بزرگ‌تر باشد با یک حجم مشخص از ماده موتور می‌توان توان خروجی بالاتری داشت.

(۲) راندمان ماکزیمم در موتور هیستریزیس به‌ازای یکی از حلقه‌های هیستریزیس اتفاق می‌افتد. حلقه‌ای که در آن راندمان موتور ماکزیمم است را حلقه نرمال می‌نامیم. هر چقدر چگالی شار پسماند و نفوذپذیری مغناطیسی مربوط به حلقه نرمال بالاتر باشد جریان استاتور کمتر خواهد شد و بنابراین تلفات مسی پایین‌تر خواهد بود.

(۳) هارمونیک‌های نیروی محرکه مغناطیسی در موتور هیستریزیس باعث ایجاد حلقه‌های جزئی می‌شوند و تلفات پارازیتیک تحت تأثیر این حلقه‌ها به‌وجود می‌آیند. در حقیقت شیب حلقه‌های جزئی حدوداً برابر با شیب منحنی مغناطیس‌شوندگی ماده روتور در نقطه ماکزیمم حلقه مورد نظر است. شکل

۷-۳ حلقه‌های جزئی را در حلقه هیستریزیس نشان می‌دهد. یکی از پارامترهای مهم انتخاب ماده روتور کمتر بودن شیب منحنی مغناطیس شونده در نقطه ماکزیمم حلقه‌های آن ماده می‌باشد.



شکل ۷-۳: منحنی هیستریزیس با حلقه‌های جزئی

۴) گشتاور مربوط به جریان گردابی در موتور هیستریزیس در هنگام راه‌اندازی موتور با گشتاور هیستریزیس جمع می‌شود. بنابراین هر چه گشتاور مربوط به جریان گردابی بزرگتر باشد گشتاور راه‌اندازی موتور بیشتر خواهد بود. گشتاور جریان گردابی در موتور هیستریزیس به مقاومت ویژه ماده هیستریزیس و پارامترهای دیگر طراحی بستگی دارد. از اینرو با انتخاب ماده هیستریزیس روتور می‌توان گشتاور راه‌اندازی را بهبود داد.

۵) مواد هیستریزیس عموماً سختی مکانیکی بالایی دارند و این موضوع باعث مسائل و مشکلات خاصی در هنگام ساخت روتور می‌شود. این نکته نیز می‌تواند در انتخاب ماده روتور به لحاظ ماشین‌کاری مهم باشد.

برخی از آلیاژهای بکار رفته در مواد هیستریزیس مانند کبالت از عناصر کمیاب و بسیار گران قیمت هستند. بنابراین با انتخاب ماده مناسب برای روتور موتور هیستریزیس شاید لازم باشد قیمت تمام شده موتور را نیز لحاظ کرد.

۳-۳-۵- مدل تحلیلی موتور هیستریزیس تخت

از زمان معرفی موتورهای هیستریزیس در اوایل قرن بیستم تاکنون همواره از روش تحلیلی به‌عنوان ابزار مهمی برای مدل‌سازی، طراحی و بهینه‌سازی موتورهای هیستریزیس بهره گرفته شده است. با استفاده از روش تحلیلی مدل‌های کم و بیش مختلفی برای موتورهای هیستریزیس مطرح شده‌اند که هر کدام دقت و کاربرد متفاوتی دارند. مدل‌های بر پایه روش تحلیلی معمولاً از دو شیوه کلی به‌دست می‌آیند: (۱) استفاده از قانون مداری آمپر و (۲) حل تحلیلی معادلات ماکسول. گرچه ممکن است شیوه دوم نسبت به شیوه اول جزئیات بیشتری را دربرداشته باشد، اما مدل‌های به‌دست آمده از اعمال قانون مداری آمپر دید بهتر و عمیق‌تری نسبت به عملکرد این موتورها فراهم می‌کنند. به هر حال باید به این نکته توجه کرد که برای استخراج مدل تحلیلی موتور هیستریزیس با هر یک از این دو شیوه نیاز به یک سری فرضیات ساده‌کننده است که دقت مدل را تا حدودی کاهش می‌دهد. با این وجود، ساده‌تر بودن مدل‌های تحلیلی نسبت به مدل‌های عددی باعث شده است که این مدل‌ها همچنان به‌صورت گسترده مورد استفاده قرار گیرند. به‌عنوان مثال، به دلیل زمان‌بر بودن محاسبات در مدل‌های عددی، در اکثر فرآیندهای طراحی بهینه موتورهای هیستریزیس همچنان از مدل‌های تحلیلی استفاده می‌شود.

در ادامه، جزئیات کامل مدل‌سازی و استخراج مدارمعادل موتور هیستریزیس تخت شارمحیطی در شرایط عملکرد حالت دائمی ارائه می‌شود.

۳-۳-۶- استخراج مدل موتور هیستریزیس تخت با استفاده از روش تحلیلی

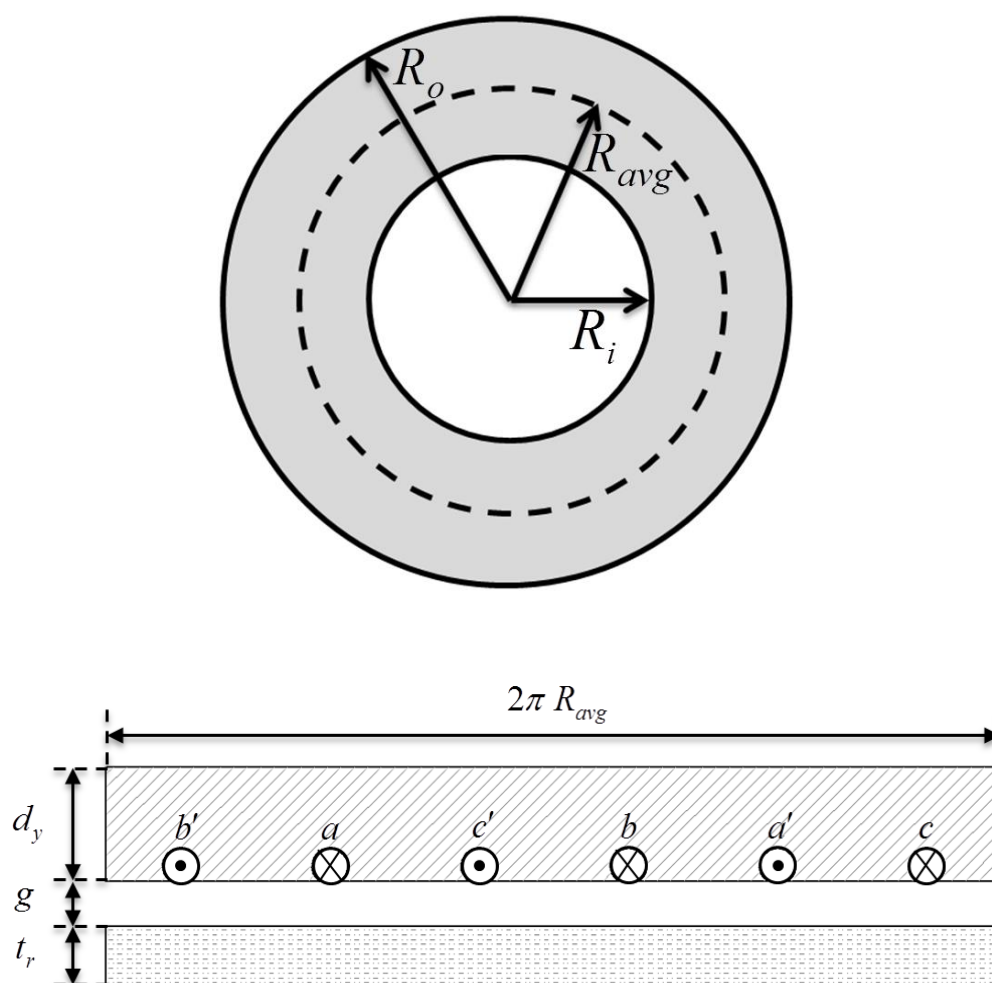
در این بخش مدل تحلیلی موتور هیستریزیس با استفاده از قانون مداری آمپر به‌دست می‌آید. این مدل برای هر فاز از موتور هیستریزیس یک مدار معادل ارائه می‌دهد که پارامترهای این مدار معادل با توجه به ابعاد ماشین، مشخصات مواد بکار رفته در آن و ولتاژ اعمالی قابل محاسبه هستند.

در ابتدا یک سری فرضیات به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

- ۱) یک مجموعه جریان‌های سه فاز متعادل در سیم‌پیچی‌های توزیع شده سینوسی سه فاز استاتور جاری است.
- ۲) موتور در سرعت سنکرون و در حداکثر گشتاور خود کار می‌کند.
- ۳) توزیع میدان مغناطیسی در سرتاسر دیسک هیستریزیس وابسته به موقعیت محوری نقاط مختلف دیسک نیست.
- ۴) شدت میدان و چگالی شار در فاصله هوایی فقط دارای مؤلفه شعاعی و در دیسک هیستریزیس فقط دارای مؤلفه محیطی است.
- ۵) هارمونیک‌های مرتبه بالا توزیع میدان در دیسک هیستریزی با فرض حلقه‌های هیستریزیس با مجموعه‌ای از بیضی‌های متحدالمرکز چشم‌پوشی می‌شوند.
- ۶) اثر دندانه‌ها و شیارهای استاتور با اعمال ضریب کارتر و محاسبه فاصله هوایی مؤثر منظور می‌شود.
- ۷) نفوذپذیری مغناطیسی هسته استاتور ابتدا بی‌نهایت فرض شده سپس افت mmf در آهن استاتور در محاسبه راکتانس مغناطیس کننده منظور می‌شود.
- ۸) در مرحله ابتدایی مدل‌سازی از تلفات آهن استاتور چشم‌پوشی می‌شود و سپس این تلفات وابسته به دامنه چگالی شار و فرکانس با محاسبه یک مقاومت الکتریکی در مدار معادل منظور می‌شود.
- ۹) در ماشین هیستریزیس استوانه‌ای شار محیطی می‌توان با تقریب خوبی توزیع میدان مغناطیسی رینگ هیستریزیس را در راستای محوری ثابت فرض کرد اما در ماشین هیستریزیس تخت شار محیطی طول مسیر عبور شار در دیسک هیستریزیس در امتداد شعاع تغییر می‌کند و بنابراین توزیع چگالی شار دیسک در راستای شعاعی یکنواخت نیست. به هر حال، با توجه به اینکه معمولاً در ماشین‌های هیستریزیس تخت نسبت شعاع متوسط دیسک هیستریزیس به ضخامت شعاعی آن بزرگ است، می‌توان با دقت قابل قبولی کلیه محاسبات را در شعاع متوسط دیسک هیستریزیس انجام داد.

۳-۳-۶-۱- محاسبه ولتاژ القایی و استخراج مدار معادل ابتدایی

شکل ۳-۸ دو نمای دوبعدی از ماشین هیستریزیس تخت شار محیطی را نشان می‌دهد که ابعاد اساسی ماشین بر روی این شکل مشخص شده‌اند.



شکل ۳-۸: دو نماى دوبعدى از ماشين هيستريزيس تخت شارمحيطى

اگر محور فاز 'a' به عنوان مبدأ زاويه الكتريكي ϕ_{se} حول محيط استاتور انتخاب شود، چگالى هادى هاى

سيم پيچ هاى سه فاز به صورت زير قابل بيان هستند:

$$N_{as} = -N_p \sin(\phi_{se}) \quad (24-3)$$

$$N_{bs} = -N_p \sin(\phi_{se} - \frac{2\pi}{3}) \quad (25-3)$$

$$N_{cs} = -N_p \sin(\phi_{se} + \frac{2\pi}{3}) \quad (26-3)$$

که در آنها N_p حداکثر چگالی هادی‌های هر فاز حول محیط استاتور است. توجه شود که علامت منفی بکار رفته در این روابط برای منظور کردن جهت جریان است. اگر تعداد قطب‌های ماشین برابر با p باشد و سیم‌پیچی سینوسی هر فاز متشکل از N_s دور باشد، خواهیم داشت:

$$N_s = \frac{p}{2} \int_0^\pi N_p \sin \phi_{se} d\phi_{se} = pN_p \quad (27-3)$$

فرض کنید جریان‌های سه‌فاز متعادل به صورت زیر باشند:

$$i_{ea}(t) = \sqrt{2}I_s \cos(\omega_e t) \quad (28-3)$$

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

$$i_{ec}(t) = \sqrt{2}I_s \cos(\omega_e t + \frac{2\pi}{3}) \quad (30-3)$$

که در آنها I_e و ω_e به ترتیب مقدار مؤثر جریان هر فاز و فرکانس زاویه‌ای تغذیه موتور می‌باشند.

اکنون می‌توان چگالی جریان در واحد زاویه حول محیط استاتور (که تابعی از زمان است) را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$J_s(\phi_{se}, t) = N_{as}i_{ea} + N_{bs}i_{eb} + N_{cs}i_{ec} \quad (31-3)$$

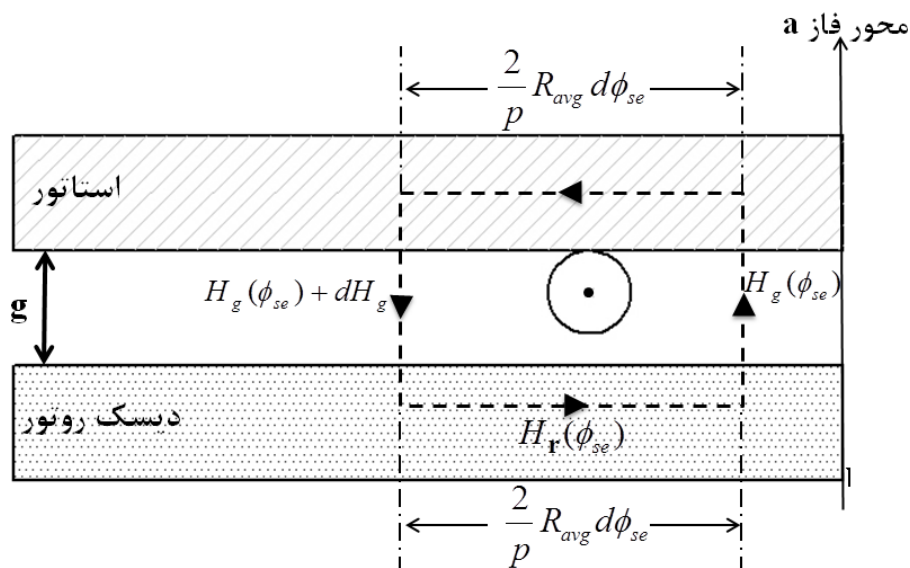
با استفاده از روابط (۲۴-۳) تا (۳۰-۳)، معادله (۳۱-۳) را می‌توان به شکل زیر بیان کرد:

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

که m و a به ترتیب تعداد فازهای استاتور و تعداد مسیرهای موازی جریان سیم‌پیچی‌های هر فاز هستند. بنابراین، جریان موجود در زاویه دیفرانسیلی $d\phi_{se}$ (الکتریکی) حول استاتور برابر می‌شود با:

$$J_s(\phi_{se}, t)d\phi_{se} = \left(\frac{m}{2}\right) \left(\frac{N_s}{p}\right) \left(\frac{\sqrt{2}I_s}{a}\right) \sin(\omega_e t - \phi_{se})d\phi_{se} \quad (33-3)$$

شکل ۹-۳ نمای گسترده ماشین را نشان می‌دهد که در آن یک مسیر دیفرانسیلی برای اعمال قانون مداری آمپر در نظر گرفته شده است.



شکل ۹-۳: مسیر اعمال قانون مداری آمپر

معادله زیر نتیجه اعمال قانون مداری آمپر به مسیر دیفرانسیلی نشان داده شده در شکل ۹-۳ می‌باشد:

$$-J_s d\phi_{se} = H_g(\phi_{se})g - [H_g(\phi_{se}) + dH_g]g - H_r(\phi_{se}) \frac{2}{p} R_{avg} d\phi_{se} \quad (34-3)$$

که در آن g مقدار مؤثر فاصله هوایی است. اگر طول واقعی فاصله هوایی برابر با g_{act} باشد، g و g_{act} از طریق رابطه زیر به یکدیگر مرتبط می‌شوند:

$$g = K_C g_{act} \quad (35-3)$$

که در آن K_C ضریب کارتر نامیده می‌شود. ضریب کارتر به شکل و ابعاد شیار وابسته است که در بخش‌های بعدی نحوه محاسبه آن برای شکل شیار موتور مورد نظر این پروژه تشریح خواهد شد.

معادله (۳۴-۳) می‌تواند به صورت زیر بازنویسی شود:

$$J_s(\phi_{se}, t) = \frac{2}{p} R_{avg} H_r(\phi_{se}) + g \frac{dH_g(\phi_{se})}{d\phi_{se}} \quad (36-3)$$

توجه شود که جهت مثبت میدان در فاصله هوایی از سمت روتور به استاتور در نظر گرفته شده است.

شکل ۱۰-۳ یک برش دیفرانسیلی از دیسک هیستریزیس را نشان می‌دهد. با استفاده از اصل پیوستگی شار در این شکل می‌توان بین چگالی شار در دیسک هیستریزیس B_r و چگالی شار در فاصله هوایی B_g یک ارتباط به صورت زیر برقرار کرد:

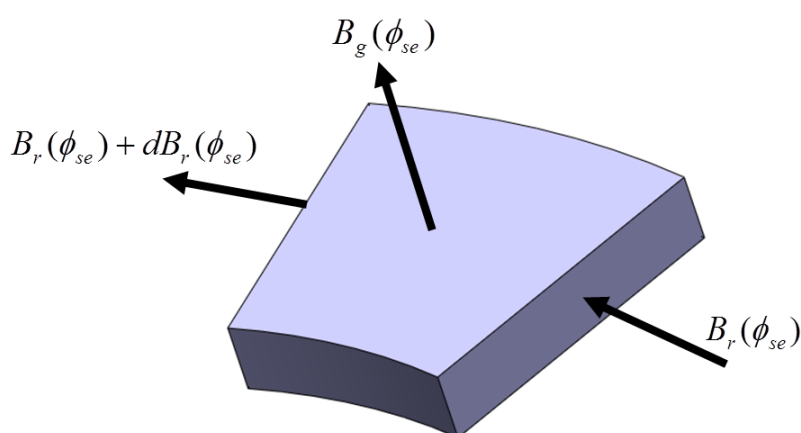
$$B_r(t, \phi_{se}) L_e t_r - [B_r(t, \phi_{se}) + dB_r(t, \phi_{se})] L_e t_r = B_g(t, \phi_{se}) R_{avg} \frac{2}{p} d\phi_{se} L_e \quad (37-3)$$

که در آن $L_e = R_o - R_i$ است. از رابطه (۳۷-۳) خواهیم داشت:

$$-dB_r(t, \phi_{se}) L_e t_r = B_g(t, \phi_{se}) R_{avg} \frac{2}{p} d\phi_{se} L_e \quad (38-3)$$

این معادله را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$B_g(t, \phi_{se}) = -\frac{p t_r}{2 R_{avg}} \frac{dB_r(t, \phi_{se})}{d\phi_{se}} \quad (39-3)$$



شکل ۱۰-۳: یک برش دیفرانسیلی از دیسک هیستریزیس

با توجه به تقریب بیضوی مشخصه‌های هیستریزیس می‌توان توزیع مؤلفه‌های محیطی چگالی شار مغناطیسی و شدت میدان مغناطیسی دیسک هیستریزیس را به صورت زیر در نظر گرفت:

$$B_r(t, \phi_s) = B_m \cos(\omega_e t - \phi_{se} - \phi_0) \quad (40-3)$$

$$H_r(t, \phi_s) = H_m \cos(\omega_e t - \phi_{se} - \phi_0 + \alpha) = \frac{B_m}{\mu} \cos(\omega_e t - \phi_{se} - \phi_0 + \alpha) \quad (41-3)$$

با جایگذاری رابطه (40-3) در (39-3) چگالی شار در فاصله هوایی به صورت زیر قابل محاسبه است:

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

با داشتن B_g مقدار H_g به صورت زیر محاسبه می شود:

$$H_g(t, \phi_{se}) = \frac{B_g(t, \phi_{se})}{\mu_0} = -\frac{p t_r B_m}{2\mu_0 R_{avg}} \sin(\omega_e t - \phi_{se} - \phi_0) \quad (43-3)$$

با قرار دادن روابط (32-3)، (41-3) و (43-3) در معادله (36-3) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{m}{2}\right) \left(\frac{N_s}{p}\right) \left(\frac{\sqrt{2}I_s}{a}\right) \sin(\omega_e t - \phi_{se}) \\ & = \frac{2}{p} R_{avg} \frac{B_m}{\mu} \cos(\omega_e t - \phi_{se} - \phi_0 + \alpha) + \frac{g p t_r B_m}{2\mu_0 R_{avg}} \cos(\omega_e t - \phi_{se} - \phi_0) \end{aligned} \quad (44-3)$$

این تساوی برای همیشه برقرار است لذا با قراردادن $\omega_e t - \phi_{se}$ برابر با صفر در رابطه (44-3) می توان ϕ_0 را محاسبه کرد. با انجام این کار خواهیم داشت:

$$\frac{2R_{avg}}{p\mu} B_m \cos(\phi_0 - \alpha) + \frac{g p t_r}{2\mu_0 R_{avg}} B_m \cos \phi_0 = 0 \quad (45-3)$$

که از این رابطه زاویه ϕ_0 به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\phi_0 = \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \left(\frac{\frac{2R_{avg}}{p\mu} \sin \alpha}{\frac{2R_{avg}}{p\mu} \cos \alpha + \frac{g p t_r}{2\mu_0 R_{avg}}} \right) \quad (46-3)$$

به همین ترتیب اگر $\omega_e t - \phi_{se}$ را در رابطه (44-3) برابر با $\pi/2$ قرار دهیم مقدار حداکثر چگالی شار رینگ

هیستریزیس B_m نیز به صورت زیر به دست می آید:

$$B_m = \frac{\left(\frac{m}{2}\right)\left(\frac{N_s}{p}\right)\left(\frac{\sqrt{2}I_s}{a}\right)}{\frac{2R_{avg}}{p\mu} \sin(\phi_0 - \alpha) + \frac{g p t_r}{2\mu_0 R_{avg}} \sin \phi_0} \quad (47-3)$$

با جایگزینی ϕ_0 از رابطه (3-46) در رابطه (3-47) و مقداری محاسبات، می توان رابطه (3-47) را به صورت زیر نوشت:

$$B_m = \frac{\left(\frac{m}{2}\right)\left(\frac{N_s}{p}\right)\left(\frac{\sqrt{2}I_s}{a}\right)}{\sqrt{\left(\frac{g p t_r}{2\mu_0 R_{avg}}\right)^2 + \left(\frac{2R_{avg}}{p\mu}\right)^2 + 2 \frac{g t_r}{\mu_0 \mu} \cos \alpha}} \quad (48-3)$$

اکنون باید ولتاژ القایی در هر فاز محاسبه شود. برای این منظور فاز 'a' انتخاب می شود. ابتدا شار عبوری از یک حلقه از سیم پیچ فاز 'a' که یک طرف آن در زاویه ϕ_{se} و طرف دیگر آن در زاویه $\phi_{se} + \pi$ قرار گرفته است به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\varphi_{Loop} = \int_{\phi_{se}}^{\phi_{se} + \pi} B_g(\phi_{se}) R_{avg} \frac{2}{p} L_e d\phi_{se} = 2L_e t_r B_m \cos(\omega_e t - \phi_{se} - \phi_0) \quad (49-3)$$

با داشتن شار عبوری از هر دور، می توان شار پیوندی سیم پیچ فاز 'a' را به دست آورد:

$$\lambda_a = \frac{p}{2} \int_{\pi}^{2\pi} N_{as} \varphi_{Loop} d\phi_{se} \quad (50-3)$$

با قرار دادن روابط (3-24) و (3-49) در معادله (3-50) خواهیم داشت:

$$\lambda_a = -\frac{N_s L_e t_r B_m \pi}{2} \sin(\omega_e t - \phi_0) \quad (51-3)$$

اکنون ولتاژ القایی در فاز 'a' به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$e_f = \frac{1}{a} \frac{d\lambda_a}{dt} = -\frac{N_s L_e t_r B_m \pi \omega_e}{2a} \cos(\omega_e t - \phi_0) \quad (52-3)$$

از طرف دیگر اگر طرفین معادله (۳-۳۶) را بر $(m/2)(N_s/2)(1/a)$ تقسیم کنیم و ϕ_{se} را در آن برابر با $(-\pi/2)$ قرار دهیم خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \sqrt{2}I_s \sin(\omega_e t + \frac{\pi}{2}) &= \sqrt{2}I_s \cos(\omega_e t) \\ &= \frac{4R_{avg} B_m a}{m \mu N_s} \cos(\omega_e t - \phi_0 + \alpha + \frac{\pi}{2}) + \frac{g t_r B_m p^2 a}{\mu_0 R_{avg} m N_s} \cos(\omega_e t - \phi_0 + \frac{\pi}{2}) \end{aligned} \quad (۵۳-۳)$$

طرف چپ معادله (۳-۵۳) به طور واضح جریان لحظه‌ای ورودی به فاز 'a' است حال آنکه طرف راست این معادله از جمع دو مؤلفه ساخته شده است. اجازه دهید این دو مؤلفه را i_g و i_h نشان دهیم. در این صورت خواهیم داشت:

$$i_a = i_g + i_r \quad (۵۴-۳)$$

$$i_g = \frac{g t_r B_m p^2 a}{\mu_0 R_{avg} m N_s} \cos(\omega_e t - \phi_0 + \frac{\pi}{2}) \quad (۵۵-۳)$$

$$i_h = \frac{4R_{avg} B_m a}{m \mu N_s} \cos(\omega_e t - \phi_0 + \alpha + \frac{\pi}{2}) \quad (۵۶-۳)$$

از روابط (۳-۲۸)، (۳-۵۲)، (۳-۵۵) و (۳-۵۶) می‌توان فازورهای زیر را تعریف کرد:

$$\hat{I}_a = I_s \angle 0 \quad (۵۷-۳)$$

$$\hat{E}_f = \frac{N_s L_e t_r B_m \pi \omega_e}{2\sqrt{2}a} \angle \pi - \phi_0 \quad (۵۸-۳)$$

$$\hat{I}_g = \frac{g t_r B_m p^2 a}{\sqrt{2}\mu_0 R_{avg} m N_s} \angle \frac{\pi}{2} - \phi_0 \quad (۵۹-۳)$$

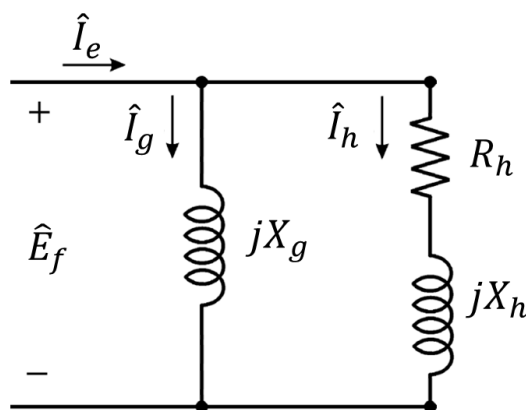
$$\hat{I}_h = \frac{4R_{avg} B_m a}{\sqrt{2}m \mu N_s} \angle \frac{\pi}{2} + \alpha - \phi_0 \quad (۶۰-۳)$$

با توجه به این فازورها می‌توان یک راکتانس X_g و یک امپدانس Z_h موازی را به صورت زیر تعریف کرد:

$$X_g = \frac{|\hat{E}_f|}{|\hat{I}_g|} = \frac{m \mu_0 N_s^2 L_e R_{avg} \pi \omega_e}{2g a^2 p^2} \quad (۶۱-۳)$$

$$Z_h = \frac{\hat{E}_f}{\hat{I}_h} = \frac{m \mu N_s^2 L_e t_r \pi \omega_e}{8 a^2 R_{avg}} \angle \frac{\pi}{2} - \alpha = R_h + jX_h \quad (62-3)$$

در نتیجه ارتباط بین ولتاژ القایی E_f و جریان I_e را می‌توان با مدار معادل شکل ۱۱-۳ نشان داد.



شکل ۱۱-۳: مدار معادل ابتدایی هر فاز از ماشین هیستریزیس استوانه‌ای شارمحیطی

لازم به ذکر است که ارتباط بین تعداد دورهای سیم‌پیچ واقعی هر فاز (یعنی N_{ph}) و تعداد دور سیم‌پیچی سینوسی معادل آن (یعنی N_s) با معادله زیر داده می‌شود [68]:

$$N_s = \frac{4K_w}{\pi} N_{ph} \quad (63-3)$$

که در آن K_w ضریب سیم‌پیچی است. بنابراین می‌توان با استفاده از رابطه (۶۳-۳) تمامی روابط قبل را بر حسب تعداد دور واقعی سیم‌پیچی هر فاز بیان کرد. همچنین متذکر می‌شود افت mmf در هسته استاتور مستلزم یک جریان مغناطیس کننده پس‌فاز اضافی است که در تحلیل بالا از آن چشم‌پوشی شد. این جریان مغناطیس کننده اضافی باعث می‌شود که راکتانس X_g محاسبه شده بزرگتر از مقدار واقعی باشد. بخش‌های بعدی نحوه اعمال افت mmf استاتور و روش اصلاح X_g توضیح داده خواهد شد.

۳-۳-۶-۲- محاسبه تلفات آهن استاتور و مقاومت متناظر با آن

با در اختیار داشتن منحنی تلفات آهن به ازای هر کیلوگرم از هسته استاتور، می‌توان تلفات آهن استاتور یک ماشین هیستریزیس را به کمک رابطه زیر محاسبه کرد [69]:

$$P_{Fe} = P_{1/50} \left(\frac{f}{50} \right)^{4/3} \left[k_{adt} B_{mt}^2 m_t + k_{adt} B_{my}^2 m_y \right] \quad (64-3)$$

که در آن $P_{1/50}$ تلفات هسته به‌ازای هر کیلوگرم از ماده در چگالی شار یک تسلا و فرکانس پنجاه هرتز می‌باشد و f ، B_{mt} ، m_t ، B_{my} و m_y به ترتیب فرکانس کار ماشین، چگالی شار حداکثر در دندان‌ها، وزن دندان‌ها، چگالی شار حداکثر در یوغ استاتور و وزن یوغ استاتور می‌باشند. همچنین $1.7 < k_{adt} < 2$ و $2.4 < k_{ady} < 4$ دو ضریب ثابت مربوط به ماده مورد استفاده به‌عنوان هسته می‌باشند.

برای محاسبه تلفات ماشین هیستریزیس ابتدا با داشتن توزیع چگالی شار در فاصله هوایی می‌توان شار زیر یک قطب را از رابطه (۳-۴۲) محاسبه کرد. با توجه به این‌که مقدار شار زیر هر قطب مستقل از زمان است، می‌توان این محاسبات را در هر لحظه دلخواه انجام داد. بنابراین با انتخاب $t = 0$ ، داریم:

$$B_g(t=0, \phi_{se}) = \frac{p t_r B_m}{2 R_{avg}} \sin(\phi_{se} + \phi_0) \quad (65-3)$$

در نتیجه شار بر قطب Φ_p به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\Phi_p = \int_{-\phi_0}^{-\phi_0 + \pi} \frac{2}{p} B_g(t=0, \phi_{se}) R_{avg} L_e d\phi_{se} = 2 t_r L_e B_m \quad (66-3)$$

ماکزیمم شار عبوری از یوغ استاتور Φ_{my} برابر با نصف شار بر قطب ماشین است. بنابراین:

$$\Phi_{my} = \frac{1}{2} \Phi_p = t_r L_e B_m \quad (67-3)$$

حال اگر ضخامت محوری یوغ استاتور با d_y نشان داده شود، سطح مقطع عبور شار در یوغ استاتور S_y برابر خواهد بود با:

$$S_y = L_e d_y \quad (68-3)$$

اکنون می‌توان چگالی شار حداکثر یوغ استاتور را به‌صورت زیر به‌دست آورد:

$$B_{my} = \frac{\Phi_{my}}{S_y} = \frac{t_r}{d_y} B_m \quad (69-3)$$

حداکثر چگالی شار در دندانه‌های استاتور B_{mt} مربوط به دندانه‌ای است که چگالی شار فاصله هوایی در مجاورت آن حداکثر باشد. با توجه به رابطه (۳-۶۵)، در لحظه $t=0$ چگالی شار فاصله هوایی در زاویه $\phi_{se} = \frac{\pi}{2} - \phi_0$ ماکزیمم می‌باشد. بنابراین شار عبوری از یک گام شیار Φ_{ms} در موقعیت مذکور برابر است از با:

$$\Phi_{ms} = \int_{\pi/2-\phi_0-\tau_s/2}^{\pi/2-\phi_0+\tau_s/2} \frac{2}{p} B_g(t=0, \phi_{se}) R_{avg} L_e d\phi_{se} = 2t_r L_e B_m \sin \frac{\tau_s}{2} \quad (70-3)$$

که در آن τ_s گام الکتریکی شیار است. از طرف دیگر سطح مقطع عبور شار از داخل هر دندانه استاتور S_t برابر است با:

$$S_t = L_e d_t \quad (71-3)$$

که d_t عرض متوسط دندانه است. با فرض اینکه تمام شار به دست آمده از رابطه (۳-۷۰) از دندانه مورد نظر عبور می‌کند، چگالی شار در این دندانه برابر می‌شود با:

$$B_{mt} = \frac{\Phi_{mt}}{S_t} = \frac{\Phi_{ms}}{S_t} = \frac{2t_r}{d_t} B_m \sin \frac{\tau_s}{2} \quad (72-3)$$

حجم یوغ استاتور V_y و حجم کل دندانه‌های استاتور V_t نیز به ترتیب زیر محاسبه می‌شوند:

$$V_y = 2\pi R_{avg} L_e d_y \quad (73-3)$$

$$V_t = S h_t d_t L_e \quad (74-3)$$

S و h_t در رابطه (۳-۷۴) به ترتیب تعداد شیارهای استاتور و عمق شیارهای استاتور می‌باشند.

اکنون اگر چگالی جرمی هسته استاتور با ρ_{core} نمایش داده شود، وزن یوغ و وزن کل دندانه‌های استاتور به ترتیب با روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$m_y = \rho_{core} V_y \quad (75-3)$$

$$m_t = \rho_{core} V_t \quad (76-3)$$

و سرانجام با قرار دادن روابط (۶۹-۳)، (۷۲-۳)، (۷۵-۳) و (۷۶-۳) در معادله (۶۴-۳) تلفات کل هسته استاتور به دست می‌آید. این تلفات را می‌توان با یک مقاومت R_c به صورت موازی با شاخه X_g مدار شکل ۳-۱۱ نمایش داد و مدار معادل را تکمیل تر کرد. برای این کار مقدار مقاومت R_c برای هر فاز را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$R_c = \frac{E_f^2}{(P_{Fe}/m)} \quad (۷۷-۳)$$

توجه شود که P_{Fe}/m در این رابطه تلفات هسته استاتور بر هر فاز است.

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

همان‌طور که مشاهده شد، در فرآیند استخراج مدار تحلیلی ماشین هیستریزیس استوانه‌ای، نفوذپذیری مغناطیسی هسته استاتور بی‌نهایت فرض شد. اکنون با محاسبه افت mmf در آهن استاتور به اصلاح راکتانس مغناطیس‌کننده با اعمال یک ضریب می‌پردازیم.

برای محاسبه افت mmf در هسته استاتور ابتدا مقادیر حداکثر چگالی شار در یوغ استاتور B_{my} و حداکثر چگالی شار دندان‌های استاتور B_{mt} از روابط (۶۹-۳) و (۷۲-۳) به دست می‌آیند. مقدار متوسط چگالی شار در یوغ استاتور B_{avg} نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$B_{avg} = \frac{2}{\pi} B_{my} = \frac{2t_r}{\pi d_y} B_m \quad (۷۸-۳)$$

با توجه B_{mt} و B_{avg} به دست آمده از روابط (۷۲-۳) و (۷۸-۳) می‌توان نفوذپذیری نسبی یوغ استاتور μ_{ry} و نفوذپذیری نسبی دندان استاتور μ_{rt} را با استفاده از منحنی مغناطیس‌شوندگی هسته استاتور محاسبه نمود. در نتیجه مقدار متوسط شدت میدان مغناطیسی در یوغ استاتور و مقدار حداکثر شدت میدان مغناطیسی در دندان‌های استاتور برابر خواهند بود با:

$$H_{avg} = \frac{B_{avg}}{\mu_0 \mu_{ry}} = \frac{2t_r}{\pi \mu_0 \mu_{ry} d_y} B_m \quad (79-3)$$

$$H_{mt} = \frac{B_{mt}}{\mu_0 \mu_{rt}} = \frac{2t_r}{\mu_0 \mu_{rt} d_t} B_m \sin \frac{\tau_s}{2} \quad (80-3)$$

بیک شدت میدان مغناطیسی فاصله هوایی نیز از رابطه (۳-۴۳) قابل محاسبه است:

$$H_{mg} = \frac{p t_r B_m}{2 \mu_0 R_{avg}} \quad (81-3)$$

با تعریف یک ضریب اصلاح کننده K_r این امکان وجود دارد که با بزرگتر فرض کردن طول فاصله هوایی مؤثر، افت mmf در هسته استاتور منظور شود. برای محاسبه ضریب K_r می توان از معادله زیر استفاده کرد:

$$K_r g H_{mg} = g H_{mg} + h_t H_{mt} + \frac{\pi R_{avg}}{p} H_{avg} \quad (82-3)$$

با قرار دادن روابط (۳-۷۹) تا (۳-۸۱) در معادله (۳-۸۲)، ضریب K_r به صورت زیر به دست می آید:

$$K_r = 1 + \frac{4 h_t R_{avg} \sin(\frac{\tau_s}{2})}{p g \mu_{rt} d_t} + \frac{8 R_{avg}^2}{p^2 g \mu_{ry} d_y} \quad (83-3)$$

مشاهده می شود که ضریب K_r همواره بزرگتر از یک است.

با تغییر طول مؤثر فاصله هوایی، روابط جریان i_g و راکتانس X_g به صورت زیر اصلاح می شوند:

$$i_g = \frac{K_r g t_r B_m p^2 a}{\mu_0 R_{avg} m N_s} \cos(\omega_e t - \phi_0 + \frac{\pi}{2}) \quad (84-3)$$

$$X_g = \frac{m \mu_0 N_s^2 L_e R_{avg} \pi \omega_e}{2 K_r g a^2 p^2} \quad (85-3)$$

۳-۳-۶-۴- محاسبه راکتانس پراکندگی

برای محاسبه راکتانس پراکندگی ماشین ابتدا باید شار پراکندگی را به سه مؤلفه تقسیم کنیم: (۱) پراکندگی

شیار، (۲) پراکندگی سیم پیچ های انتهایی و (۳) پراکندگی تفاضلی یا هارمونیک ها.

برای هر یک از مؤلفه‌های نشت فوق‌الذکر به ترتیب سه ضریب λ_{ls} ، λ_{le} و λ_{ld} تعریف و راکتانس پراکندگی هر فاز به صورت زیر محاسبه می‌شود [69]:

$$X_l = 8\pi\mu_0 f \frac{N_{ph}^2 L_e}{pq} \left(\lambda_{ls} + \frac{L_{end}}{L_e} \lambda_{le} + \lambda_{ld} \right) \quad (۸۶-۳)$$

که در آن μ_0 ، N_{ph} ، L_e و q و L_{end} به ترتیب نفوذپذیری مغناطیسی خلأ، تعداد دورهای سیم‌پیچی هر فاز، طول محوری ماشین، تعداد شیارهای استاتور بر قطب بر فاز و طول سیم‌پیچ‌های انتهایی هر کلاف استاتور (کله‌سیم) می‌باشند.

در بخش‌های بعدی به نحوه محاسبه λ_{ls} ، λ_{le} و λ_{ld} خواهیم پرداخت اما برای روشن نمودن دامنه مطالب این موضوع لازم است در اینجا به یک نکته اشاره شود و آن اینکه شکل شیارهای استاتور بسیار متنوع و فرمول‌های محاسبه مؤلفه یا ضرایب نشت هر یک از آنها نیز متفاوت می‌باشند. این مطالب و فرمول‌ها معمولاً در هر کتاب طراحی ماشین به‌طور مفصل آورده شده‌اند و در اینجا برای رعایت اختصار از بازگویی این مطالب اجتناب شده فقط به نتیجه و فرمول‌ها نهایی محاسبه ضرایب و مؤلفه‌های نشت مربوط به ماشین مورد نظر این پروژه اکتفا می‌شود.

۳-۳-۶-۴-۱- پراکندگی شیار

در این بخش از گزارش به محاسبه اولین مؤلفه راکتانس پراکندگی هر فاز یعنی نشت شیار می‌پردازیم. توجه نمایید که مؤلفه نشت شیار خود از سه جزء نشت در بخش داخلی شیار و نشت در بخش دهانه شیار و نشت شار بین دندانه‌های مجاور در فاصله هوایی تشکیل می‌شود. برای درک بهتر به شکل ۳-۱۲_الف که مسیر شار پراکندگی در بخش داخلی شیار و نشت در بخش دهانه شیار را برای یک شیار مستطیلی نوعی نشان می‌دهد و شکل ۳-۱۲_ب که نشت شار بین دندانه‌های مجاور در فاصله هوایی را نمایش می‌دهد توجه نمایید. به‌هرحال شیار ماشین مورد مطالعه در این پروژه شبیه به شیار مستطیلی کاملاً باز نمایش داده شده

در شکل ۳-۱۳ می‌باشد. برای این شیار، و با در نظر گرفتن سیم‌پیچی یک طبقه با گام کامل، ضریب نشت شیار λ_{ts} می‌تواند از رابطه زیر محاسبه شود [69]:

$$\lambda_{ts} = \lambda_{ts1} + \lambda_{ts2} \quad (۸۷-۳)$$

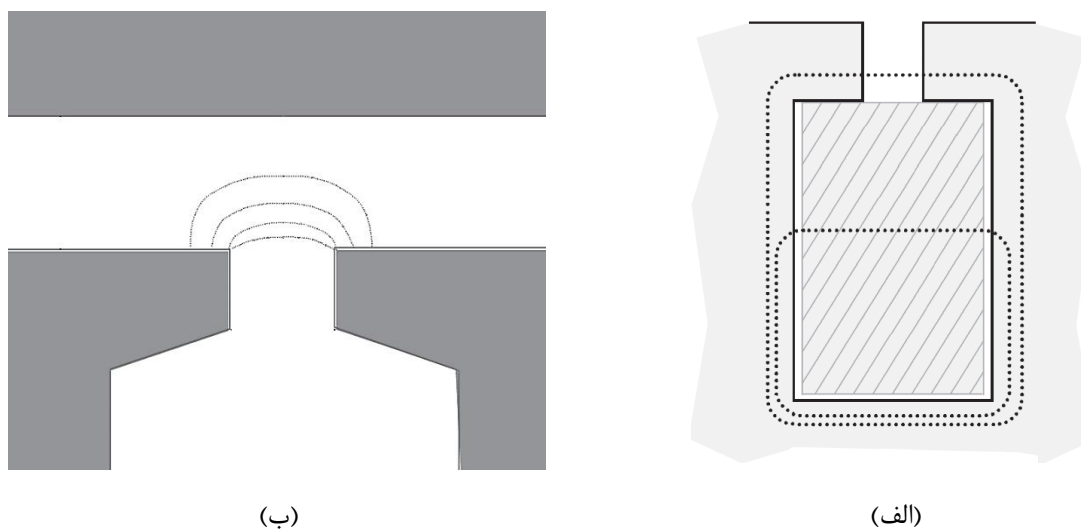
که در آن ضریب:

$$\lambda_{ts1} = \frac{h_{11}}{3b_{14}} + \frac{h_{12}}{b_{14}} \quad (۸۸-۳)$$

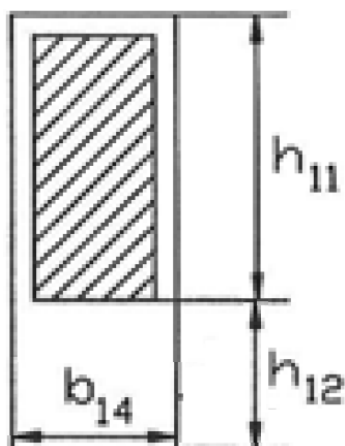
مربوط به مجموع نشت در بخش داخلی شیار و نشت در بخش دهانه شیار است و ضریب:

$$\lambda_{ts2} \approx \frac{\frac{5g_{act}}{b_{14}}}{5 + \frac{4g_{act}}{b_{14}}} \quad (۸۹-۳)$$

مربوط به نشت شار بین دندانه‌های مجاور در فاصله هوایی است. h_{11} ، h_{12} و b_{14} ابعاد بخش‌های مختلف شیار می‌باشند که در شکل ۳-۱۳ مشخص شده‌اند.



شکل ۳-۱۲: شار پراکندگی شیار. الف) نشت در بخش داخلی شیار و نشت در بخش دهانه شیار [70] و ب) نشت بین دندانه‌های مجاور در فاصله هوایی [70]



شکل ۳-۱۳: ابعاد و پارامترهای شیار مستطیلی کاملاً باز [69]

۳-۳-۶-۴-۲- پراکندگی سیم‌پیچ‌های انتهایی

سیم‌پیچی استاتور موتور تخت مورد مطالعه در این گزارش از نوع تروئیدال یک طبقه است که مشخصات دقیق آن در فصل‌های بعدی داده خواهد شد. برای این نوع سیم‌پیچی، تنها بخشی از کلاف‌ها که روبروی دیسک هیستریزیس قرار می‌گیرند مفید هستند و بقیه طول کلاف‌ها جزء سیم‌پیچ‌های انتهایی می‌باشند. سیم‌پیچ‌های انتهایی موتور تخت یک‌طرفه مورد مطالعه در این گزارش در شکل ۳-۱۴ نشان داده شده است. برای محاسبه راکتانس پراکندگی سیم‌پیچ‌های انتهایی باید ضریب نشت انتهایی λ_{le} و طول متوسط بخش انتهایی هر کلاف تروئیدال L_{end} محاسبه شوند. با رابطه زیر داده می‌شود:

$$L_{end} = L_e + 2d_y + 4h_{11} \quad (۹۰-۳)$$

که L_e ، d_y و h_{11} قبلاً معرفی شده‌اند و در شکل ۳-۱۴ نیز نشان داده شده‌اند.

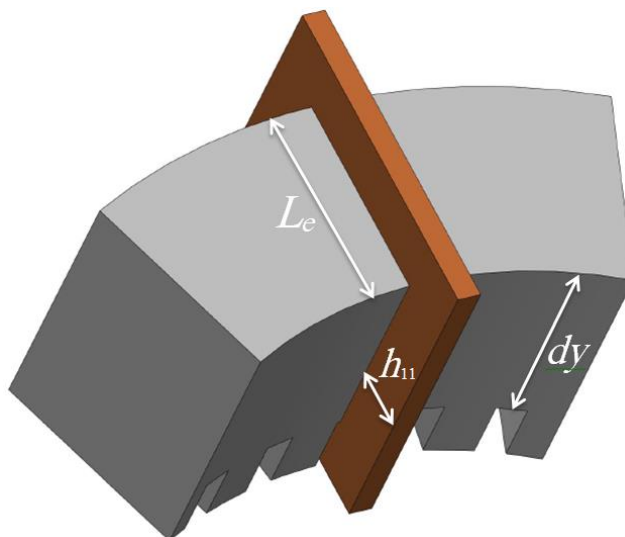
برای اکثر سیم‌پیچ‌های معمولی ضریب نشت انتهایی λ_{le} می‌تواند از طریق رابطه زیر محاسبه شود [69]:

$$\lambda_{le} \approx 0.3q \quad (۹۱-۳)$$

با توجه به این که در سیم‌پیچ‌های معمولی، سیم‌پیچ‌های انتهایی عمدتاً در مجاورت هوا قرار دارند اما در سیم‌پیچ تروئیدال موتور مورد مطالعه، سیم‌پیچ‌های انتهایی از یک طرف در مجاورت هسته استاتور قرار دارند. بنابراین پیشنهاد می‌شود برای این موتور λ_{le} با رابطه زیر داده شود:

$$\lambda_{le} \approx 0.6q \quad (92-3)$$

توجه به این نکته لازم است که به دلیل شکل هندسی ساده سیم پیچ‌های انتهایی، ضریب λ_{le} می‌تواند از طریق یک شبیه‌سازی اجزاء محدود ابتدایی نیز محاسبه شود. برای ماشین مورد مطالعه در این گزارش نتیجه این شبیه‌سازی با مقدار پیش‌بینی شده از رابطه (۹۲-۳) بسیار نزدیک به یکدیگر هستند.



شکل ۳-۱۴: سیم‌پیچ‌های انتهایی برای موتور هیستریزیس تخت یک‌طرفه با سیم‌پیچ تروئیدال

۳-۳-۶-۳-۳- پراکندگی تفاضلی

ضریب پراکندگی تفاضلی یا هارمونیک‌های شار یعنی λ_{ld} با رابطه زیر بیان می‌شود [69]:

$$\lambda_{ld} = \frac{mq\tau_p k_w^2}{\pi^2 g K_C} \tau_d \quad (93-3)$$

که در آن τ_d گام قطب می‌باشد و τ_d پارامتری است که به صورت زیر محاسبه می‌شود [69]:

$$\tau_d = \frac{\pi^2 (10q^2 + 2)}{27} \sin^2\left(\frac{\pi}{6q}\right) - 1 \quad (94-3)$$

و K_C ضریب کارتر است که برای شیار در شکل ۳-۱۳ به صورت زیر بیان می‌شود [69]:

$$K_C = \frac{\tau_s}{\tau_s - \gamma g} \quad (95-3)$$

در این رابطه ضریب γ برابر است با [69]:

$$\gamma = \frac{4}{\pi} \left[\frac{b_{14}}{2g} \tan^{-1} \left(\frac{b_{14}}{2g} \right) - \ln \sqrt{1 + \left(\frac{b_{14}}{2g} \right)^2} \right] \quad (96-3)$$

۳-۳-۶-۵- محاسبه مقاومت اهمی سیم پیچ‌ها

مقاومت dc هر فاز با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R_{dc} = \frac{N_{ph} L_{avg}}{a \sigma S_a} \quad (97-3)$$

که در آن L_{avg} ، σ و S_a به ترتیب طول متوسط یک دور از سیم پیچ هر فاز، رسانایی ویژه الکتربیکی هادی و سطح مقطع هر هادی می‌باشند. مقدار L_{avg} برابر است با:

$$L_{avg} = 2(L_e + L_{end}) \quad (98-3)$$

مقاومت ac هر فاز نیز به صورت زیر به R_{dc} مرتبط می‌شود:

$$R_s = K_{1R} R_{dc} \quad (99-3)$$

که در آن K_R ضریب اثر پوستی برای مقاومت اهمی سیم پیچ هر فاز استاتور نامیده می‌شود و به صورت زیر محاسبه می‌شود [69]:

$$K_{1R} = \varphi(\xi) + \left[\frac{m_{sl}^2 - 1}{3} - \left(\frac{m_{sl}}{4} \right)^2 \right] \psi(\xi) \quad (100-3)$$

که در آن m_{sl} تعداد هادی‌های قرار گرفته روی یکدیگر در سیم پیچی موجود در یک شیار است. توابع φ و ψ نیز به صورت زیر تعریف می‌شوند [69]:

$$\varphi(\xi) = \xi \frac{\sinh 2\xi + \sin 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi} \quad (101-3)$$

$$\psi(\xi) = 2\xi \frac{\sinh \xi - \sin \xi}{\cosh \xi + \cos \xi} \quad (102-3)$$

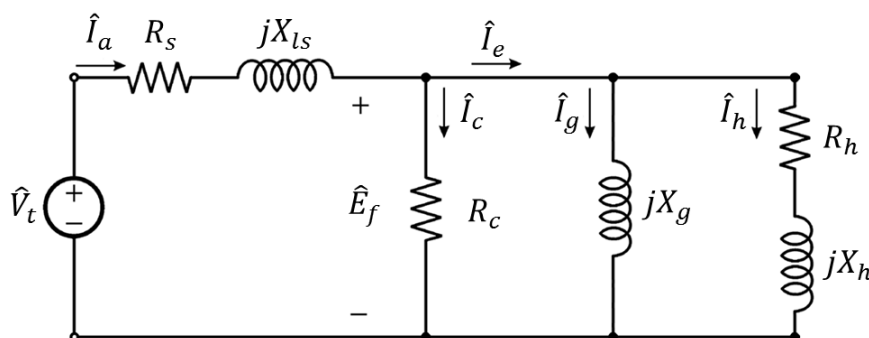
که در آنها مقدار ξ برابر است با [69]:

$$\xi = h_c \sqrt{\pi \mu_0 f \sigma} \quad (103-3)$$

بطوریکه h_c ارتفاع یک هادی در هر شیار است.

۳-۳-۶- مدار معادل کامل هر فاز موتور هیستریزیس

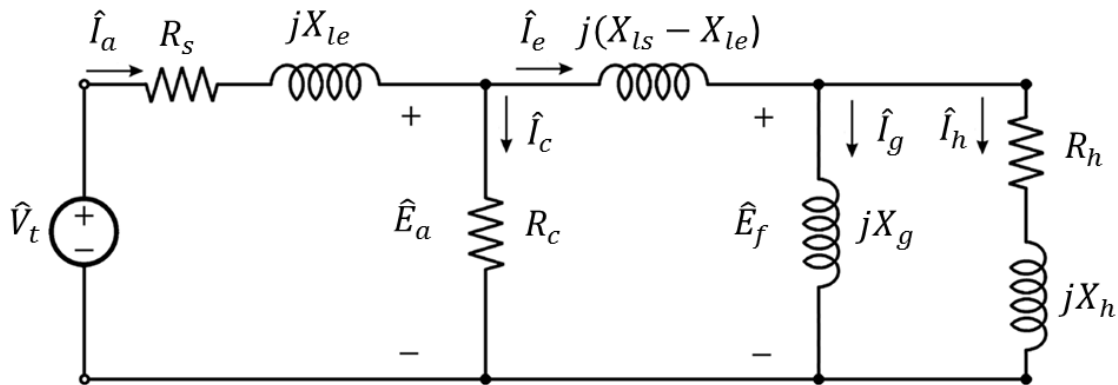
با افزودن مقاومت معادل تلفات آهن استاتور R_c ، مقاومت اهمی هر فاز سیم‌پیچ استاتور R_s و راکتانس پراکندگی هر فاز استاتور X_{ls} به مدار معادل شکل ۳-۱۱ می‌توان مدار معادل حالت دائمی هر فاز موتور هیستریزیس تحت شار محیطی را به صورت شکل ۳-۱۵ ترسیم کرد.



شکل ۳-۱۵: مدار معادل هر فاز موتور هیستریزیس تحت شار محیطی برای شرایط عملکرد حالت دائمی

در مرجع [71] اشاره شده است که منظور کردن مقاومت معادل تلفات آهن بین مقاومت سیم‌پیچ استاتور و راکتانس پراکندگی می‌تواند به نتایج دقیق‌تری منجر شود. این موضوع منطقی به نظر می‌رسد زیرا شارهای پراکندگی مسیر خود را از داخل هسته استاتور می‌بندد و لذا در ایجاد تلفات آهن نقش دارند. همچنین همان‌طور که در فصل‌های بعدی بحث خواهد شد، در مدل‌سازی ماشین هیستریزیس استوانه‌ای با استفاده از روش اجزاء محدود مؤلفه‌های پراکندگی شار به جز پراکندگی سیم‌پیچ‌های انتهایی بقیه در محاسبه ولتاژ القایی هر فاز به صورت مستقیم دخیل هستند. با توجه به این توضیحات، پیشنهاد می‌شود در روش

مدل سازی تحلیلی ماشین هیستریزیس تخت از مدار معادل نشان داده شده در شکل ۱۶-۳ استفاده شود. در این شکل X_{le} راکتانس پراکنده شار سیم پیچ های انتهایی است. در صورت استفاده از مدار معادل شکل ۱۶-۳ توجه شود که به منظور محاسبه مقاومت معادل تلفات اهمی R_c به کمک رابطه (۳-۷۷) لازم است به جای ولتاژ E_f از ولتاژ E_a استفاده شود.



شکل ۱۶-۳: مدار معادل کامل هر فاز موتور هیستریزیس تخت شارمحصی برای شرایط عملکرد دائمی

۳-۳-۷- معرفی مدل های مطرح هیستریزیس

پدیده هیستریزیس از دیرباز در بسیاری از حوزه های علم و مهندسی مشاهده شده است. در برخی از کاربردها، هیستریزیس می تواند به صورت مفید مورد استفاده قرار گیرد، مثلاً در ماشین های الکتریکی هیستریزیس و همچنین مواد مغناطیس دائم. در سایر ماشین های الکتریکی، پدیده هیستریزیس معمولاً ناخواسته است و باعث ایجاد تلفات شده و در نتیجه تا حد امکان باید از آن جلوگیری شود.

در حالت کلی، تکنیک های مدل سازی برای توصیف پدیده هیستریزیس به دو دسته تقسیم می شوند: مدل سازی فیزیکی و مدل سازی پدیدار شناختی. در مدل سازی فیزیکی، فرآیندهای درگیر اصلی شبیه سازی می شوند تا بتوان نحوه مغناطیس شدن را توصیف کرد. در مدل های پدیدار شناختی، به وسیله تولید یک سری از منحنی ها رفتار ماکروسکوپییک ماده به صورت ریاضی توصیف می شود. این مدل ها از نظر محاسباتی نسبت به مدل های فیزیکی بهتر هستند، اما هیچ دید فیزیکی از فرآیندهای در حال اتفاق ارائه نمی کنند.

به منظور طراحی تجهیزات الکترومغناطیسی، ارزیابی دقیق الگوهای میدان مغناطیسی در داخل تجهیز غالباً برای پیش‌بینی واقعی مشخصه‌های عملکردی تجهیز الزامی است. در نتیجه، در بسیاری از حالات، در محاسبات میدان مغناطیسی باید خصوصیات دقیق مواد مغناطیسی مورد استفاده، از جمله تأثیرات هیستریزیس، را در نظر گرفت. سپس، ویژگی‌های ماکروسکوپی، که توسط مدل‌های پدیدار شناختی توصیف می‌شوند با معادلات ماکسول تزویج می‌شوند تا جواب دقیقی برای مسائل میدان‌های الکترومغناطیسی به دست آید.

مدل‌سازی هیستریزیس در مواردی که هدف ما ارزیابی مشخصاتی باشد که مستقیماً به فرآیند هیستریزیس وابسته باشند، مثلاً محاسبات گشتاور در ماشین‌های هیستریزیس و یا محاسبات تلفات آهن در ماشین‌های الکتریکی، مهم‌تر نیز می‌شود.

۳-۳-۷-۱- مدل‌های هیستریزیس براساس معادلات دیفرانسیل

۳-۳-۷-۱-۱- مدل هدگدن^۱

مدل هدگدن با استفاده از معادله دیفرانسیل زیر، یک رابطه ساختاری بین H و B در نظر می‌گیرد:

$$\frac{dH}{dB} = \alpha \cdot \operatorname{sgn}\left(\frac{dH}{dB}\right) [f(B) - H] + g(B) \quad (3-104)$$

با انتخاب مناسب α و توابع وابسته به ماده f و g ، می‌توان حلقه‌های هیستریزیس مربوط به مواد مختلف را توصیف کرد. این مدل قابلیت مدل‌سازی حلقه‌های داخلی را نیز دارد.

¹ Hodgdon's Model

۳-۳-۷-۱-۲-مدل جیلز اثرتون^۱

یکی دیگر از مدل‌های معروف هیستریزیس بر پایه معادلات دیفرانسیل، مدل جیلز-اثرتون است. معادلات لازم با استفاده از به‌کارگیری این اصل به‌دست می‌آیند که انرژی کل داده شده به ماده می‌تواند به دو بخش تقسیم شود: (۱) انرژی تلف شده (تلفات هیستریزیس) و (۲) تغییرات انرژی به واسطه تغییر در مغناطیس‌شوندگی ماده که می‌تواند برگشت‌پذیر در نظر گرفته شود. بر همین اساس مغناطیس‌شوندگی کل M به‌صورت مجموع یک بخش بازگشت‌پذیر (M_{rev}) و یک بخش بازگشت‌ناپذیر (M_{irr}) در می‌آید.

۳-۳-۷-۱-۳-مدل پریساج

اهمیت به‌کارگیری مدل‌های هیستریزیس در بسیاری از حوزه‌های دانش و تکنولوژی همچون ضبط مغناطیسی، آهنرباهای دائم، موتورهای هیستریزیس و ... رو به افزایش است. به همین دلیل در سالیان گذشته حجم وسیعی از تحقیقات به مدل‌های ریاضی هیستریزیس اختصاص داده شده است. مدل پریساج یکی از پرکاربردترین این مدل‌ها است که در این بخش به معرفی مختصر آن پرداخته می‌شود. این مدل انواع مختلفی دارد، اما تمامی آنها یک ویژگی مشترک دارند: منحنی‌های مغناطیس‌شوندگی از جمع آثار حلقه‌های هیستریزیس مستطیلی ساده ساخته می‌شوند.

۳-۳-۷-۱-۳-۱-مدل پریساج اسکالر کلاسیک

در این نوع مدل فرض می‌شود که راستای میدان‌های $\mathbf{H}(t)$ و $\mathbf{B}(t)$ با گذشت زمان تغییر نکند و فقط اندازه آنها تغییر کند (یک‌جهته)، به همین دلیل این نوع اسکالر نامیده می‌شود. واژه کلاسیک به این دلیل استفاده شده است که این نوع مدل هیستریزیس مستقل از نرخ تغییرات (شبه استاتیک) را توصیف می‌کند. در حقیقت، وضعیت حافظه هیستریزیس در هر لحظه تنها به وسیله مقادیر اکستریم (ماکزیمم و مینیمم) شدت میدان مغناطیسی تعیین می‌شود.

¹ Jiles-Atherton Model

۳-۳-۱-۷-۳-۳-۲- مدل پریساج اسکالر دینامیک

تمامی مدل‌هایی که تاکنون معرفی شده‌اند، ذاتاً استاتیک هستند. به این مفهوم که در این مدل‌ها تنها مقادیر گذشته ورودی بر روی مقادیر خروجی اثر خواهند گذاشت، در حالی که سرعت تغییرات ورودی بر روی تغییر شاخه‌ها ندارد. طبق آزمایش‌های انجام شده، وابستگی منحنی هیستریزیس به سرعت تغییرات ورودی در فرکانس‌های نسبتاً پایین (مثل فرکانس‌های مورد استفاده در ماشین‌های الکتریکی) ناچیز است، و لذا می‌توان از مدل‌های استاتیک استفاده نمود.

۳-۳-۱-۷-۳-۳-۳- مدل پریساج برداری

در برخی از کاربردها، تغییرات میدان در یک جهت نخواهد بود و کاربرد مدل اسکالر پریساج با محدودیت مواجه خواهد شد. در این حالت باید از پریساج برداری استفاده نمود، که مدلی پیچیده است.

۳-۴- تئوری عملکرد موتور سنکرون آهنربای دائم

تئوری عملکرد موتور سنکرون آهنربای دائم با آهنرباهای سطحی در حالت کلی مشابه موتورهای سنکرون بزرگ قطب صاف با تحریک DC است. چنانچه مدار مغناطیسی متعادل (دارای مسیر با فاصله هوایی یکنواخت) فرض شود و نیز مقاومت اهمی سیم‌پیچی استاتور قابل صرف نظر باشد، گشتاور موتور سنکرون از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$T_s = \frac{qV_T E_a}{\omega_s X_s} \sin \delta \quad (3-105)$$

در رابطه فوق q تعداد فازها، V_T ولتاژ فاز استاتور، E_a نیروی محرکه القا شده در استاتور، ω_s سرعت سنکرون، X_s راکتانس سنکرون و δ اختلاف زاویه بین E_a و V_T است. این زاویه معادل الکتریکی زاویه مکانی بین محورهای مغناطیسی روتور و میدان دوار استاتور می‌باشد.

در واقع مدار مغناطیسی موتورهای سنکرون کوچک، متعادل نیست و در نتیجه راوکتانس آن نیز در دو امتداد محورهای مغناطیسی طولی و عرضی یکسان نمی‌شود. به علاوه، برخلاف موتورهای سنکرون بزرگ، از مقاومت سیم‌پیچی‌های استاتور در مقایسه با راوکتانس‌های طولی و عرضی نمی‌توان صرف نظر کرد. در نتیجه معادله گشتاور اصلی تداخلی چنین موتورهایی به صورت زیر در می‌آید.

$$T_e = \frac{qV_T E_a}{\omega_s} \left[\frac{X_q(2R_a X_d - R_a X_q + X_d X_q)}{(X_d X_q + R_a^2)^2} \sin \delta + \frac{R_a(2X_q^2 - X_d X_q + R_a^2)^2}{(X_d X_q + R_a^2)^2} \cos \delta \right] \quad (106-3)$$

در این رابطه X_d و X_q راوکتانس‌های استاتور به ترتیب در امتداد طولی و عرضی است. چنانچه مقاومت مغناطیسی ماشین در پیرامون فاصله هوایی یکنواخت باشد آنگاه $X_d = X_q = X_s$. اگر مقدار R_a نیز صفر باشد، رابطه (106-3) به فرم رابطه (105-3) در می‌آید.

عدم تساوی راوکتانس‌های طولی و عرضی باعث تولید گشتاور رلوکتانسی نیز می‌شود که مقدار آن علاوه بر پارامترهای فیزیکی مدار، تابع زاویه δ نیز است. مقدار این گشتاور از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$T_{r1} = \frac{qV_T^2}{2\omega_s} \cdot \frac{X_d - X_q}{(X_d X_q + R_a^2)^2} \left[(X_d X_q + R_a^2) \sin 2\delta + R_a (X_d + X_q) \cos 2\delta \right] \quad (107-3)$$

اندازه گشتاور فوق در محدوده تغییرات δ ممکن است مثبت، منفی و یا حتی صفر شود. قسمت عمده گشتاور موتور سنکرون از نوع تداخلی است و می‌توان انتظار داشت که همین رابطه، نقش اصلی را در تعیین مقدار δ در زیر بارهای مختلف ایفا کند.

علاوه بر دو مؤلفه گشتاور فوق، دو مؤلفه گشتاور ترمزی نیز در چنین موتورهایی تولید می‌شود. چرخش روتور در فاصله هوایی دو مؤلفه نیروی محرکه به شرح زیر در مدار آرمیچر القا می‌کند.

(۱) نیروی محرکه سرعتی ناشی از چرخش فلوی اصلی در فاصله هوایی

(۲) نیروی محرکه ناشی از عدم تساوی راوکتانس‌های طولی و عرضی

مؤلفه اول جریانی در مدار آرمیچر به وجود می‌آورد و موجب اتلاف مقداری انرژی در آن می‌شود. فرکانس این نیروی محرکه و جریان، تابعی از سرعت و از لحظه راه‌اندازی تا سرعت سنکرون و حتی در سرعت سنکرون نیز به وجود می‌آید. در واقع برای این مؤلفه از نیروی محرکه، ماشین سنکرون مانند یک ژنراتور عمل می‌کند و توان الکتریکی خروجی خود را در سیم‌پیچی استاتور تلف می‌کند. در نتیجه این تلفات به صورت یک گشتاور منفی بر محور موتور تحمیل می‌شود. این گشتاور در سرعت سنکرون به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$T_d = -\frac{qE_a^2 R_a (X_q^2 + R_a^2)}{\omega_s (X_d X_q + R_a^2)^2} \quad (108-3)$$

علامت منفی بیانگر ترمزی بودن این مؤلفه گشتاور می‌باشد.

عدم تساوی راوکتانس‌های طولی و عرضی روتور موجب می‌شود تا تزویج مغناطیسی سیم‌پیچ‌های فازهای مختلف استاتور تابعی از موقعیت روتور گردد. لذا چرخش روتور باعث تغییر شار پیوندی فازها و از آنجا نیروی محرکه‌ای در فازهای مختلف استاتور ایجاد می‌شود. جریان حاصله از این نیروی محرکه نیز موجب اتلاف توان در سیم‌پیچی استاتور می‌گردد. این توان در اثر چرخش روتور در استاتور تلف می‌شود و در نتیجه برای تأمین گشتاور مخالف بر محور روتور تحمیل می‌گردد. اندازه این گشتاور عبارت است از:

$$T_{r2} = -\frac{qV_T R_a (X_d + X_q)}{2\omega_s (X_d X_q + R_a^2)^2} \quad (109-3)$$

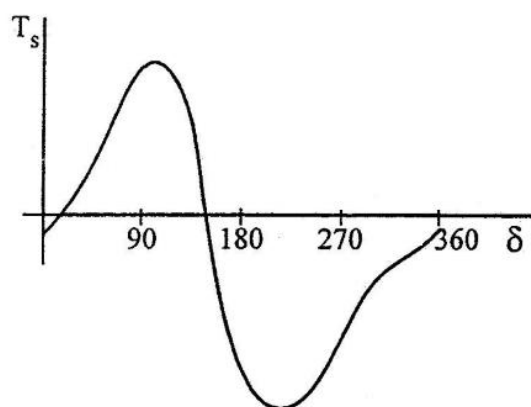
علامت منفی بیانگر ترمزی بودن این مؤلفه گشتاور می‌باشد.

از آنجایی که دو مؤلفه T_{r1} و T_{r2} از نوع رلوکتانسی هستند، انتظار می‌رود که هر دو مؤلفه در صورت برابر بودن X_d و X_q به صفر تنزل یابند که روابط T_{r1} و T_{r2} این واقعیت را نشان می‌دهند.

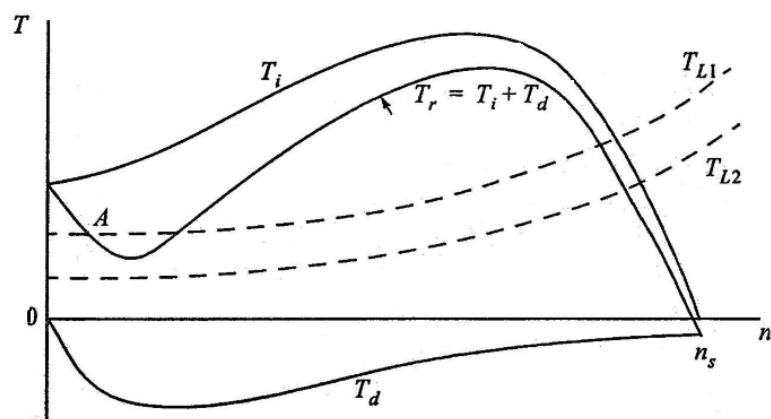
نهایتاً مقدار کل گشتاور تولید شده توسط یک موتور سنکرون با آهنربای دائم که مقاومت استاتور آن قابل صرف نظر کردن نیست و در آن $X_d \neq X_q$ است، در سرعت سنکرون به صورت مجموع گشتاورهای فوق به صورت زیر خلاصه می شود.

$$T_s = T_e + T_{r1} + T_d + T_{r2} \quad (۱۱۰-۳)$$

چگونگی تغییرات T_s منتهی گشتاور موتور بر حسب تغییرات δ وقتی که موتور با سرعت سنکرون کار می کند در شکل ۳-۱۷ نشان داده شده است. شکل ۳-۱۸ مشخصه راه اندازی یک نمونه موتور سنکرون با مغناطیس دائم و با راه انداز القایی را تا قبل از رسیدن به سرعت سنکرون نشان می دهد. در این شکل T_d نیز بر حسب سرعت نشان داده شده است. چنانچه قبلاً اشاره شد این مؤلفه در تمام سرعت های مخالف صفر موجود است و با گشتاور القایی T_i مخالفت می کند. چنانچه مشخصه گشتاور-سرعت با مشخصه بار مانند T_{11} در محدوده شیب منفی مثلاً نقطه A برخورد کند، سرعت موتور هرگز از این مقدار بیشتر نخواهد شد چراکه نقطه A یک نقطه کار پایدار در حالت القایی می باشد.



شکل ۳-۱۷: تغییرات گشتاور برآیند موتور سنکرون بر حسب زاویه بار

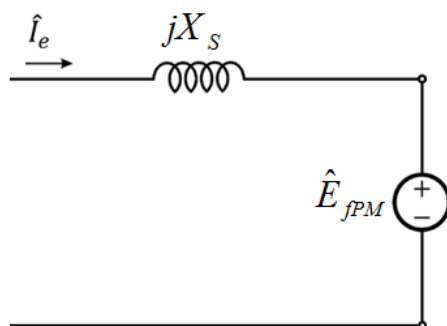


شکل ۳-۱۸: مشخصه راه‌اندازی یک نمونه موتور سنکرون آهنربای دائم با راه‌انداز القایی

۳-۴-۱- مدل‌سازی موتور آهنربای دائم

در این بخش برای بیان روند مدل‌سازی تحلیلی موتور آهنربای دائم، به‌عنوان نمونه، موتور سنکرون آهنربای دائم نوع TORUS که ساختاری مشابه ساختار مدنظر این رساله برای موتور PMHS دارد، مدل‌سازی می‌شود [72].

مدل‌سازی تحلیلی موتور سنکرون آهنربای دائم نیز با به‌کارگیری قانون مداری آمپر و قانون القای فارادی انجام پذیر است. در ساختار ارائه شده توسط این رساله، مگنت‌ها روی سطح دیسک نگهدارنده قرار گرفته‌اند. این موضوع باعث می‌شود تا فاصله هوایی در تمام نقاط تقریباً یکنواخت باشد. به عبارت دیگر، برجستگی قطب در ماشین وجود نخواهد داشت و موتور سنکرون آهنربای دائم از نوع قطب صاف محسوب خواهد شد. مدل تحلیلی موتور سنکرون آهنربای دائم قطب صاف، در بسیاری از مراجع آورده شده و مدار معادل آن نیز مستخرج گشته است. در این رساله از همان مدار معادل مرسوم موتور سنکرون آهنربای دائم قطب صاف که در شکل ۳-۱۹ نشان داده شده است، استفاده می‌شود. در این شکل، X_s و \hat{E}_{fPM} به ترتیب راکتانس سنکرون و فازور ولتاژ داخلی (Back-emf) ماشین می‌باشند که نحوه محاسبه آنها در مرجع [73] به تفصیل بیان شده است. لازم به ذکر است که در مدار معادل شکل ۳-۱۹، تلفات اهمی و آهنی و شار پراکندگی لحاظ نشده‌اند.

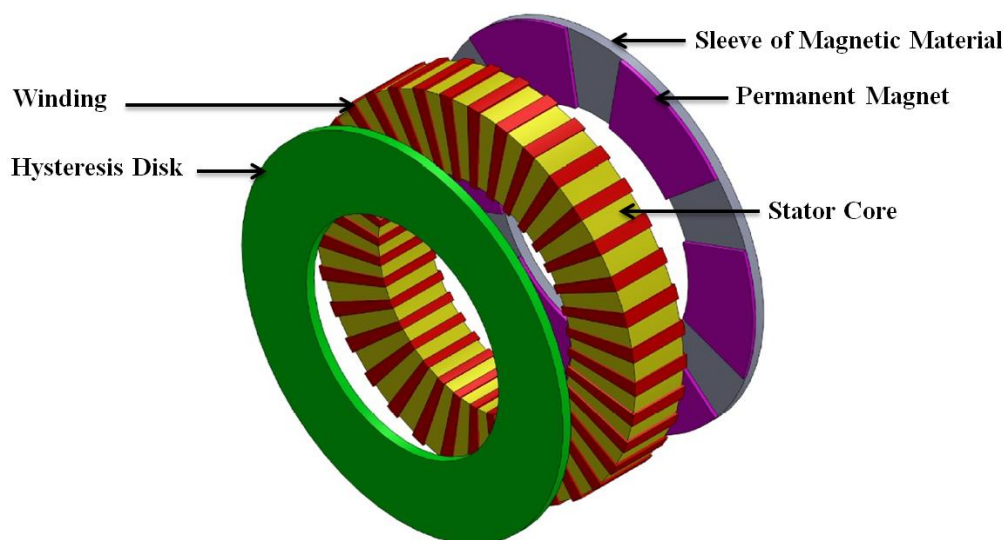


شکل ۳-۱۹: مدار معادل هر فاز موتور سنکرون آهنربای دائم قطب صاف برای مدل‌سازی شرایط عملکرد حالت دائمی به روش تحلیلی

فصل ۴: ارائه ساختار جدید برای موتور سنکرون هیستریزیس آهنربای دائم

۴-۱- مقدمه

همان‌طور که پیشتر بیان شد، موتور سنکرون آهنربای دائم دارای مزیت‌های ارزشمندی از قبیل چگالی توان و گشتاور بالا، بهره‌برداری آسان و... می‌باشد. عدم گشتاور راه‌اندازی در این موتور موجب شده است تا این موتور برای استفاده در اکثر کاربردهای صنعتی شرایط لازم را نداشته باشد و تنها در بعضی کاربردهای خاص، بکار گرفته شود. از طرف دیگر موتور هیستریزیس دارای گشتاور راه‌اندازی است. بنابراین با ترکیب دیسک هیستریزیس با روتور موتور سنکرون آهنربای دائم می‌توان به یک ساختار مناسب برای اکثر کاربردهای صنعتی دست یافت. در این فصل ساختار پیشنهادی این رساله برای موتور هیستریزیس آهنربای



شکل ۴-۱: ساختار موتور PMHS نوع تخت پیشنهادی

در این ساختار، استاتور از نوع بدون شیار انتخاب شده است. وجود شیار باعث به وجود آمدن نوساناتی در شار فاصله هوایی شده (ریپل دندانه) و در نتیجه تلفات پارازیتیک شار را افزایش می‌دهد و از آنجا بازده ماشین به شدت کاهش می‌یابد. همچنین مگنت‌ها به صورت سطحی بر روی نگهدارنده قرار گرفته‌اند. این امر باعث می‌شود تا برجستگی قطب وجود نداشته باشد و ماشین از نوع قطب صاف بشمار آید که خودبه‌خود منجر به کاهش ریپل گشتاور و نویز موتور می‌شود. بنابراین این موتور در کاربردهای با سرعت و توان بالا مانند سانتریفیوژهای توان بالا بسیار کارایی خواهد داشت. جنس ماده نگهدارنده مگنت‌ها از جنس مواد مغناطیسی انتخاب شده تا مسیر شار در آن با کمترین تضعیف بسته شود. مسیر شار در فاصله‌های هوایی و هسته استاتور در راستای محور و در دیسک هیستریزیس و دیسک نگهدارنده مگنت‌ها در راستای محیطی خواهد بود. سیم‌پیچی استاتور به صورت تروئیدال انجام می‌شود. بنابراین می‌توان موتور PMHS را ترکیب سری شده موتور هیستریزیس و موتور آهنربای دائم در نظر گرفت.

۴-۳- بررسی برخی مسائل پیرامون موتورهای سنکرون هیبرید

موتور سنکرون آهنربای دائم دارای مزیت‌هایی از قبیل چگالی توان بالا، ضریب توان و بازده بالا و... می‌باشد. اما عیب اساسی این موتور همان‌طور که قبلاً بیان شد، عدم گشتاور راه‌اندازی در فرکانس شبکه است. راه

حل عملی رفع این مشکل (بدون استفاده از درایو)، ترکیب این موتور با موتورهای دارای گشتاور راه‌اندازی مانند موتور آسنکرون و موتور هیستریزس خواهد بود.

ترکیب موتور سنکرون آهنربای دائم با موتور آسنکرون به‌عنوان یک ترکیب مناسب، از مدت‌ها پیش انجام می‌شده است. به این شیوه که، در روتور موتور سنکرون آهنربای دائم میله‌های قفسه سنجایی تعبیه می‌شده تا موتور در راه‌اندازی همانند موتور آسنکرون رفتار کند. در سرعت سنکرون نیز این میله‌ها نقش میراکنندگی نوسانات را بر عهده دارند. این ترکیب ملاحظات طراحی خاص خود را دارد. بسته به اینکه موتور تحت چه شرایطی بکارگرفته خواهد شد، طراحی ترکیب آن متفاوت خواهد بود. به‌عنوان مثال، چنانچه موتور تحت بار راه‌اندازی شود، گشتاور ناشی از قفسه مناسب با آن طراحی می‌گردد و بالعکس اگر در سرعت سنکرون بارگذاری می‌شود، طراحی قفسه متناسب با گشتاور راه‌اندازی بی‌باری انجام می‌گیرد. باید متذکر شد که قفسه‌ای که برای شرایط مثلاً راه‌اندازی بی‌بار طراحی شده است، نمی‌تواند برای وظایف دیگر خود از جمله میراکنندگی نوسانات مناسب باشد.

ترکیب موتور سنکرون آهنربای دائم با موتور هیستریزس با دو دیدگاه صورت می‌پذیرد. دیدگاه اول، ترکیب رینگ هیستریزس در موتور سنکرون آهنربای دائم به جهت رفع نواقص موتور سنکرون آهنربای دائم خواهد بود که موتور سنکرون آهنربای دائم هیستریزس (HPMS)¹ را نتیجه می‌دهد و دیدگاه دوم، ترکیب آهنربای دائم در موتور هیستریزس به جهت رفع نواقص موتور هیستریزس است که موتور سنکرون هیستریزس آهنربای دائم (PMHS)² را نتیجه می‌دهد.

در موتور HPMS، رینگ هیستریزس به‌دلیل ایجاد گشتاور راه‌اندازی در موتور سنکرون آهنربای دائم، به روتور آن اضافه شده است. موتور سنکرون آهنربای دائم معمولاً در کاربردهای توان و گشتاور بالا استفاده می‌شود. چنانچه این موتور تحت بار راه‌اندازی شود، رینگ هیستریزس مورد نیاز برای ایجاد گشتاور راه‌اندازی در چنین شرایطی بسیار بزرگ و از مواد گرانبه‌ای خواهد بود. همچنین از آنجایی که بهره‌موتور

¹ Hysteresis Permanent Magnet Synchronous Motor

² Permanent Magnet Hysteresis Synchronous Motor

هیستریزیس پایین است، بنابراین پیش‌بینی می‌شود که این ترکیب برای این شرایط از لحاظ اقتصادی به صرفه نخواهد بود. بر همین اساس می‌توان گفت که به‌کارگیری موتور HPMS در کاربردهای توان و گشتاور پایین منطقی‌تر خواهد بود. مرجع [10] از موتور HPMS برای کاربرد در وسایل نقلیه الکتریکی استفاده کرده است.

در موتور PMHS، آهنربای دائم به‌دلیل افزایش بازده و ضریب توان موتور هیستریزیس و کاهش هانتینگ، به روتور آن اضافه شده است. ویژگی اصلی موتور هیستریزیس که استفاده از آن را توجیه می‌کند، عملکرد نرم و با نویز بسیار پایین آن می‌باشد. اضافه کردن آهنربای دائم به روتور موتور هیستریزیس این ویژگی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در برخی مراجع با به‌کارگیری ترکیب مناسب، تا حدودی این مشکل را برطرف ساخته‌اند. لذا در طراحی موتور PMHS، این نکته حائز اهمیت بوده و چنانچه بتوان به نوعی بر آن فائق آمد، ترکیب حاصل بسیار مناسب و به صرفه خواهد بود. لازم به ذکر است که عمده مشکلات این ترکیب با انتخاب ساختاری مناسب و طراحی انعطاف‌پذیر قابل رفع است. در این رساله ساختاری ارائه و طراحی می‌شود که تا حد زیادی اثرات نامطلوب اضافه کردن آهنربای دائم به موتور هیستریزیس را کاهش می‌دهد.

با توجه به توضیحات بالا و براساس مطالبی که در فصل اول ارائه گردید، می‌توان ادعا نمود که ترکیب موتورهای هیستریزیس و آهنربای دائم، تنها به‌جهت بهبود مشخصه‌های موتور هیستریزیس منطقی می‌باشد.

فصل ۵: مدل سازی تحلیلی و عددی موتور سنکرون هیستریزیس آهنربای دائم نوع تخت

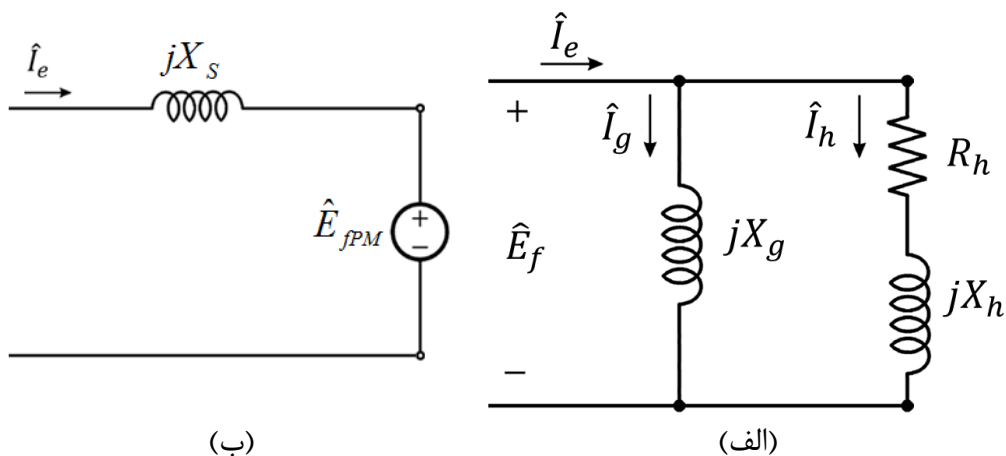
۵-۱- مقدمه

در این فصل مدل تحلیلی موتور PMHS با به کارگیری قانون مداری آمپر و قانون القای فارادی به دست می آید. این مدل برای هر فاز از موتور، یک مدار معادل ارائه می دهد که پارامترهای این مدار معادل با توجه به ابعاد ماشین، مشخصات مواد بکار رفته در آن و ولتاژ اعمالی قابل محاسبه هستند. این مدار معادل رفتار موتور را در شرایط حالت دائمی و حداکثر گشتاور بار به درستی پیش بینی می کند. در انتهای تشریح روش مدل سازی تحلیلی، با پذیرش میزان خطای اندکی، نحوه پیاده سازی شرایط حالت دائمی بار جزئی نیز با استفاده از همین مدار معادل ارائه می گردد. همچنین با به کارگیری روش اجزاء محدود، یک مدل عددی برای

پیش‌بینی عملکرد موتور PMHS نوع تخت در شرایط حداکثر بار ارائه می‌گردد. این مدل نسبت به مدل تحلیلی از دقت بالاتری برخوردار خواهد بود و از طرف دیگر صرف زمان بیشتری را می‌طلبد.

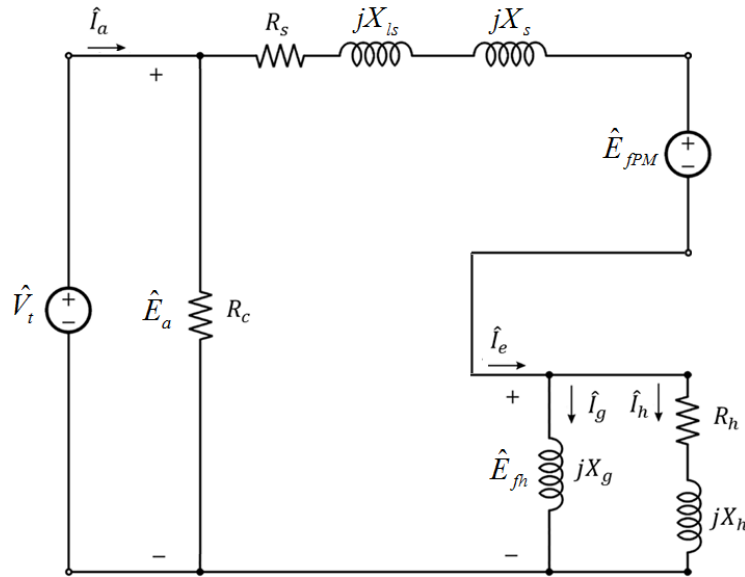
۵-۲- مدل‌سازی تحلیلی موتور هیستریزس آهنربای دائم با ساختار پیشنهادی

از آنجایی که سیم‌پیچی موتور مورد مطالعه از نوع تروئیدال است، شار عبوری از سیم‌پیچ‌های هر فاز استاتور از مجموع شار منته‌جه هر دو فاصله هوایی به‌دست خواهد آمد. به عبارت دیگر ولتاژ القایی استاتور برابر با جمع ولتاژ القایی مگنت و ولتاژ القایی دیسک هیستریزس خواهد شد. از این موضوع می‌توان نتیجه گرفت که موتور مورد مطالعه از ترکیب سری شده دو موتور هیستریزس و آهنربای دائم تشکیل شده است. بنابراین مدار معادل آن را می‌توان با ترکیب سری مدار معادل‌های به‌دست آمده برای موتورهای هیستریزس و آهنربای دائم به‌دست آورد. در فصل ۳: نحوه استخراج مدار معادل هر فاز از موتور هیستریزس تخت یک‌طرفه شارمحیطی و محاسبه پارامترهای آن به کمک روابط تحلیلی و همچنین نحوه دستیابی به مدار معادل موتور آهنربای دائم ارائه شد. به‌منظور پیوستگی مطلب، مدار معادل‌های دو موتور مجدداً در شکل ۱-۵ ارائه شده است.



شکل ۱-۵: مدار معادل موتورهای هیستریزس و آهنربای دائم بدون در نظر گرفتن تلفات اهمی و آهنی و شار پراکندگی، (الف) مدار معادل موتور هیستریزس، (ب) مدار معادل موتور آهنربای دائم

در نهایت با سری نمودن دو مدار معادل به‌دست آمده، می‌توان به مدار معادل موتور هیستریزس آهنربای دائم دست یافت. این مدار معادل در شکل ۲-۵ نشان داده شده است که در آن پارامترهای R_s ، R_c ، X_{ls} ، به ترتیب مقاومت معادل تلفات آهن استاتور، مقاومت اهمی سیم‌پیچ و راکتانس پراکنندگی کل سیم‌پیچ می‌باشند. روش محاسبه این پارامترها در فصل ۳: زیربخش ۳-۳-۶- ارائه شده است.

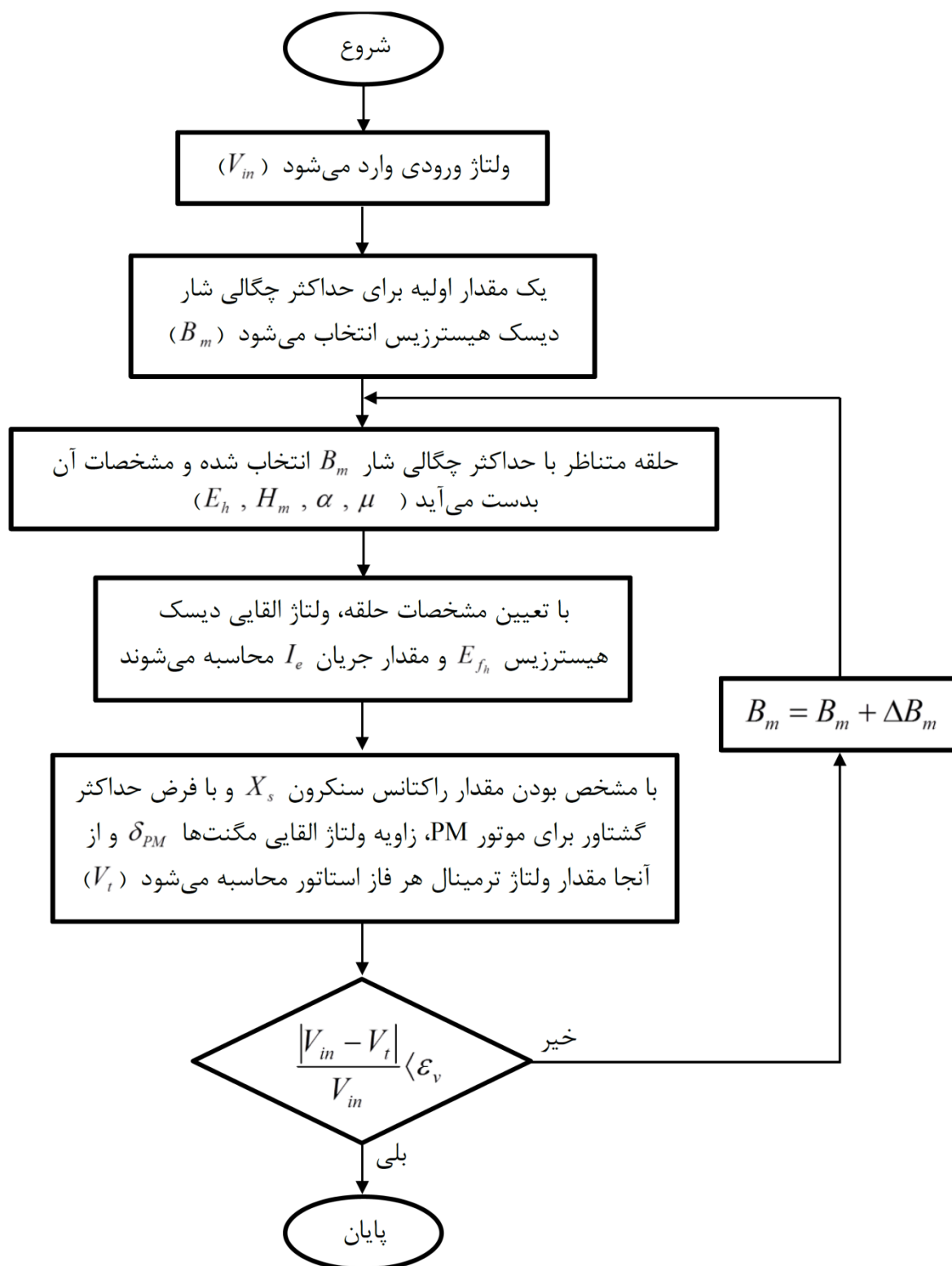


شکل ۲-۵: مدار معادل هر فاز از موتور PMHS در شرایط عملکرد دائمی

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، اکثر مراجع، المان‌های مدارهای معادل موتورهای هیستریزس را ثابت فرض کرده‌اند اما در واقع بعضی از این المان‌ها وابسته به ولتاژ ترمینال هستند. توضیح آنکه، طبق روابط به‌دست آمده و با به‌کارگیری قوانین مداری، مشخص است که \hat{I}_e و \hat{E}_{fn} در مدار شکل ۲-۵ وابسته به پارامترهای مشخصه هیستریزس دیسک روتور (μ و α) می‌باشند. با توجه به وابستگی μ و α به دامنه چگالی شار دیسک روتور و در نتیجه به ولتاژ ترمینال، می‌توان نتیجه گرفت که \hat{I}_e و \hat{E}_{fn} توابعی از ولتاژ ترمینال هستند. این وابستگی ایجاب می‌کند که برای تحلیل مدار معادل شکل ۲-۵ و به‌دست آوردن مشخصه‌های عملکردی مختلف موتور، از یک روش تکراری استفاده شود.

نکته حائز اهمیتی که در مدل‌سازی موتور PMHS مطرح می‌شود این است که، موتور در سرعت سنکرون و در شرایط حداکثر بار مدل‌سازی می‌شود.

شکل ۳-۵ فلوجارت روش تحلیلی پیشنهادی این رساله را برای پیش‌بینی عملکرد حالت دائمی موتور PMHS نشان می‌دهد. در این الگوریتم پس از ورود اندازه ولتاژ ترمینال مورد نظر، دامنه چگالی شار حلقه هیستریزس کاری موتور در این ولتاژ براساس یک حدس اولیه انتخاب می‌شود. با داشتن دامنه چگالی شار، کلیه پارامترهای این حلقه هیستریزس به‌دست می‌آیند. سپس به کمک روابط ارائه شده، المان‌های مدار معادل شکل ۲-۵ محاسبه می‌شوند و در نتیجه جریان تحریک و ولتاژ تحریک در بخش موتور هیستریزس به‌دست می‌آیند. با توجه به اینکه هر دو موتور در حداکثر گشتاور خود هستند، می‌توان مقدار زاویه توان موتور آهنربای دائم δ_{PM} را نیز به‌دست آورد. اکنون با تحلیل این مدار و با در نظر گرفتن فازور جریان تحریک به‌عنوان فازور مبنا، یک مقدار برای ولتاژ ترمینال به‌ازای حلقه هیستریزس انتخاب شده محاسبه می‌گردد. اگر اندازه ولتاژ ترمینال محاسبه شده برابر با ولتاژ ترمینال مورد نظر باشد (با در نظر گرفتن یک حداکثر خطای مجاز برای اختلاف نسبی آن‌ها)، حلقه هیستریزس اولیه به‌درستی انتخاب شده است. در غیر این صورت باید آنقدر دامنه چگالی شار حلقه هیستریزس را تغییر داد تا شرط تطابق اندازه ولتاژها برقرار گردد.



شکل ۵-۳: فلوچارت الگوریتم پیشنهادی برای مدل‌سازی موتور PMHS در شرایط عملکرد حالت دائمی به روش تحلیلی

روش مدل‌سازی ارائه شده در بالا برای شرایط بار حداکثر می‌باشد. به عبارت دیگر، این الگوریتم عملکرد موتور PMHS را در شرایطی که هر دو موتور هیستریزس و آهنربای دائم در حداکثر گشتاور حالت

سنکرونیزم خود عمل می‌کنند، پیش‌بینی می‌کند. همان‌طور که پیشتر نیز بیان شد، زمانی که موتور هیستریزس تحت بار جزئی راه‌اندازی می‌شود، موتور از همان ابتدا با حلقه هیستریزس نرمال متناسب با ولتاژ ترمینال شتاب خواهد گرفت و تا سرعت سنکرون بر روی همان حلقه هیستریزس عمل خواهد کرد. در سرعت سنکرون به دلیل اختلاف بین گشتاور بار و گشتاور القایی موتور، سرعت روتور دچار نوساناتی شده و سرانجام در یک حلقه هیستریزس باریک‌تر با گشتاور خروجی کمتر ولی با همان دامنه چگالی شار و دامنه شدت میدان مغناطیسی حلقه نرمال به حالت دائمی خواهد رسید. مشخصات این حلقه کاری جدید نامعلوم است و تاکنون هیچ مرجعی نحوه صحیح دستیابی به آن را ارائه نکرده است. تنها راه اطلاع از مشخصات این حلقه، مدل‌سازی موتور به صورت دینامیکی و استفاده از مدل‌های عددی پیچیده و زمان‌بری مانند پریساج می‌باشد. اما اگر موتور هیستریزس در شرایط حداکثر گشتاور بار راه‌اندازی شود، در زمان رسیدن به سرعت سنکرون، به دلیل برابری گشتاور بار با گشتاور القایی موتور، دیگر نوسانات سرعتی وجود نخواهد داشت و موتور با همان حلقه هیستریزس نرمال که مشخصات آن معلوم است، به حالت دائمی می‌رسد. همین موضوع مدل‌سازی موتور هیستریزس را محدود به تنها شرایط حداکثر بار می‌کند و به همین دلیل ناچار به مدل‌سازی موتور آهنربای دائم نیز در حداکثر گشتاور سنکرونیزم خواهیم شد. چراکه قواعد تقسیم توان در شرایطی که هر دو موتور در حداکثر توان خود باشند، صدق خواهد نمود.

چنانچه سهم دیسک هیستریزس در توان خروجی موتور PMHS کم باشد، با پذیرش مقداری اندکی خطا می‌توان مدل‌سازی تحلیلی را برای شرایط بار جزئی نیز تعمیم داد. همان‌طور که قبلاً بیان شد، گشتاور خروجی موتور هیستریزس بسیار کم است. به این صورت که کل بازه تغییرات گشتاور سنکرونیزم آن کوچک و تمامی مقادیر گشتاور در این بازه تقریباً برابر با همان گشتاور حداکثر می‌باشد. بنابراین می‌توان موتور هیستریزس را در حداکثر گشتاور خود فرض نمود و شرایط عملکردی موتور آهنربای دائم را در بار جزئی مدل کرد. به این ترتیب با مشخص بودن توان خروجی، ابتدا جریان تحریک موتور هیستریزس و همچنین توان حداکثر آن به دست آمده و سپس با محاسبه تفاضل توان خروجی با توان موتور هیستریزس، می‌توان سهم توان موتور آهنربای دائم را ارزیابی نمود. درنهایت با مشخص بودن توان خروجی موتور آهنربای دائم،

زاویه توان (زاویه ولتاژ القایی مگنت‌ها) موتور آهنربای دائم به دست آمده و بنابراین ولتاژ ترمینال محاسبه می‌شود. به این ترتیب موتور PMHS در شرایط بار جزئی مدل‌سازی خواهد شد.

۵-۳- مدل‌سازی عددی موتور هیستریزس آهنربای دائم با ساختار پیشنهادی

روش اجزاء محدود به عنوان یکی از قدرتمندترین و دقیق‌ترین ابزارها در تحلیل رفتار ماشین‌های الکتریکی شناخته می‌شود. بر خلاف روش‌های تحلیلی که نیازمند فرضیات ساده‌کننده بسیاری هستند، معمولاً مدل اجزاء محدود یک ماشین به مدل واقعی مورد مطالعه بسیار نزدیک است. به عنوان مثال در تحلیل اجزاء محدود به راحتی می‌توان اثرات غیرخطی مشخصه‌های B-H و اشباع آهن، اثر دندان‌ها، توزیع غیرسینوسی سیم‌پیچ‌ها و ... را در نظر گرفت در حالی که منظور کردن این موارد در مدل‌های تحلیلی بسیار دشوار و در برخی موارد غیرممکن است. به علاوه در مدل‌های تحلیلی مجموعه‌ای از قیود غیرواقعی بر روی توزیع میدان مغناطیسی قرار داده می‌شود که در مدل اجزاء محدود در نظر گرفتن این قیود الزامی نیست. به عنوان نمونه در مدل تحلیلی برای یک ماشین تخت معمولاً فرض می‌شود که میدان مغناطیسی در فاصله هوایی فقط دارای مؤلفه محوری است در حالی که در تحلیل اجزاء محدود توزیع میدان در فاصله هوایی از حل عددی معادلات ماکسول به دست می‌آید و می‌تواند شامل تمام مؤلفه‌ها باشد.

در دقیق‌ترین حالت می‌توان از مدل سه‌بعدی یک ماشین الکتریکی در تحلیل اجزاء محدود آن استفاده کرد که البته زمان محاسبات لازم در این صورت بسیار زیاد خواهد بود. با صرف نظر از اثرات لبه‌ای می‌توان با تقریب خوبی از مدل دوبعدی ماشین در تحلیل اجزاء محدود آن استفاده کرد. با استفاده از مدل دوبعدی برای یک ماشین تخت فرض می‌شود که شدت میدان مغناطیسی و چگالی شار مغناطیسی دارای مؤلفه شعاعی نیستند و فقط مؤلفه‌های محوری و محیطی دارند که یک فرض دور از واقعیت نیست. همچنین می‌توان اثرات کله سیم‌ها را با استفاده از روابط تجربی موجود در نظر گرفت. به هر حال استفاده از مدل دوبعدی ماشین زمان محاسباتی را به شدت کاهش می‌دهد و این موضوع زمانی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند که مجبور باشیم در فرآیند تحلیل یا طراحی یک ماشین چندین بار از مدل اجزاء محدود آن استفاده نماییم.

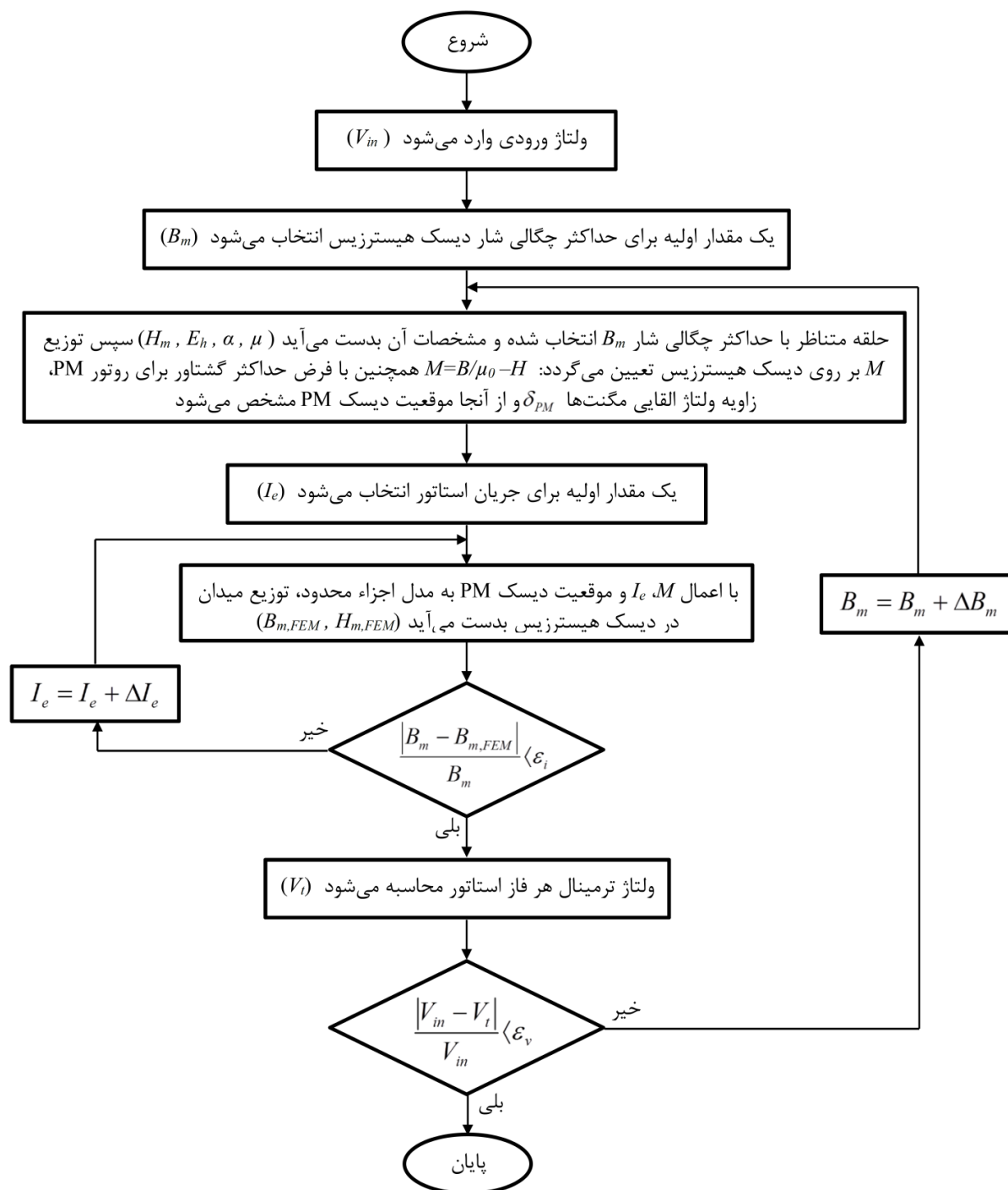
با استفاده از روش اجزاءمحدود می‌توان رفتار یک ماشین الکتریکی را در شرایط گذرای و یا حالت دائمی مورد مطالعه قرار داد. بر این اساس مدل‌های اجزاءمحدود به دو دسته کلی مدل‌های گذرا و مدل‌های ساکن قابل تقسیم هستند. با استفاده از مدل گذرای موتور الکتریکی امکان بررسی رفتار آن در زمان راه‌اندازی، اثرات هارمونیک‌های زمانی تغذیه، اثرات تغییرات ناگهانی در تغذیه یا بار مکانیکی، نوسانات سرعت و ... وجود خواهد داشت. همچنین با به‌کارگیری مدل گذرا رفتار ماشین در حالت دائمی نیز با اجرای برنامه گذرا برای یک زمان طولانی به دست می‌آید. به عبارت دیگر مدل گذرا نسبت به مدل ساکن جامع‌تر و دقیق‌تر است. به هر حال اطلاعات مورد نیاز برای مدل‌سازی، پیچیدگی و زمان محاسبات برای مدل گذرا نسبت به مدل ساکن بسیار بیشتر است. بخصوص پیچیدگی‌های مدل‌سازی گذرا برای ماشین هیستریزس به‌طور غیرقابل تصور، از ماشین‌های نوع دیگر، به دلیل مدل پیچیده پدیده هیستریزس موضعی، بیشتر است.

همان‌طور که در فصل‌های گذشته نیز بیان شد به‌طور عام منظور کردن پدیده هیستریزس مغناطیسی در بررسی رفتار ماشین‌های الکتریکی با استفاده از روش‌های تحلیلی و حتی روش‌های مبتنی بر مدل‌های اجزاءمحدود بسیار دشوار است و معمولاً در صورت امکان گریز، از این پدیده صرف‌نظر شده و یا به‌صورت غیرمستقیم منظور می‌شود. به هر حال اساس عملکرد ماشین‌های هیستریزس بر پایه پدیده هیستریزس استوار است و امکان فرار از مدل‌سازی این پدیده و لحاظ کردن آن در مدل‌سازی ماشین به هیچ‌وجه وجود ندارد. تنها کار ممکن در این مورد تلاش برای مدل‌سازی هرچه ساده‌تر این پدیده و اعمال آن به‌طور مستقیم برای تحلیل رفتار ماشین می‌باشد. در بخش قبلی نحوه مدل‌سازی پدیده هیستریزس و اعمال آن به مدل تحلیلی حالت دائمی موتور PMHS نوع تخت بیان شد. اکنون در این فصل به یک روش در حد امکان ساده، مدل‌سازی هیستریزس موضعی و نحوه منظور نمودن آن در مدل اجزاءمحدود موتور PMHS با قابلیت تحلیل عملکرد حالت دائمی موتور پرداخته می‌شود. لازم به تذکر و تاکید می‌باشد که منظور از واژه گمراه‌کننده "مدل‌سازی ساده" جمله قبل، در قیاس با مدل‌های بسیار پیچیده‌تر دیگر از قبیل مدل‌سازی پدیده هیستریزس به روش پریسچ بیان شده است هر چند مدل‌سازی ارائه شده در این فصل به‌خودی‌خود دارای پیچیدگی‌های بیشماری می‌باشد.

۵-۳-۱- الگوریتم مدل‌سازی موتور PMHS به کمک روش اجزاءمحدود

پیچیدگی ذاتی پدیده هیستریزس موجب شده است اکثر مراجع موجود از روش‌های تحلیلی برای مدل‌سازی ماشین‌های هیستریزس استفاده نمایند. به همین دلیل روش‌ها و الگوریتم‌های در دسترس برای مدل‌سازی این ماشین‌ها به کمک تحلیل اجزاءمحدود بسیار اندک بوده و برخی از آنها با مشکلاتی همراه است. اکثر این روش‌ها تنها قادرند به‌ازای یک جریان مشخص، گشتاور حداکثر ماشین را محاسبه کنند. از این‌رو در این رساله الگوریتم جدیدی برای مدل‌سازی موتور PMHS ارائه می‌شود. این الگوریتم ولتاژ ورودی را دریافت می‌کند و پس از اجرای الگوریتم مشخصه‌های عملکردی ماشین در این ولتاژ، یعنی گشتاور حداکثر، جریان فاز، ضریب توان و بازده به‌دست می‌آیند. شکل ۴-۵ فلوجارت الگوریتم به روش اجزاءمحدود موتور هیستریزس را نشان می‌دهد. برای پیاده‌سازی الگوریتم مدل‌سازی می‌توان از ترکیب محیط برنامه‌نویسی یک نرم‌افزار همانند Matlab و نرم‌افزار اجزاءمحدود مثلاً COMSOL استفاده کرد.

یادآور می‌شود که در ماشین‌های استوانه‌ای شارمحیطی می‌توان با تقریب خوبی توزیع میدان مغناطیسی رینگ هیستریزس را در راستای محوری ثابت فرض کرد اما در ماشین‌های تخت شارمحیطی طول مسیر عبور شار در دیسک هیستریزس در امتداد شعاع تغییر می‌کند و بنابراین توزیع چگالی شار دیسک در راستای شعاعی یکنواخت نیست. به‌هرحال، با توجه به اینکه معمولاً در ماشین‌های تخت نسبت شعاع متوسط دیسک هیستریزس به ضخامت شعاعی آن بزرگ است، می‌توان با دقت قابل قبولی کلیه محاسبات را در شعاع متوسط دیسک هیستریزس انجام داد.



شکل ۴-۵: فلوجارت الگوریتم مدل‌سازی موتور PMHS به کمک روش اجزاءمحدود

مراحل این الگوریتم را می‌توان به صورت زیر توضیح داد:

۱- در ابتدا ولتاژ ورودی توسط کاربر به برنامه وارد می‌شود.

۲- یک مقدار اولیه برای حداکثر چگالی شار دیسک هیستریزس انتخاب می‌شود.

۳- براساس این حداکثر چگالی شار دیسک هیستریزس، یک حلقه هیستریزس تک‌بعدی از بین حلقه‌های هیستریزس ماده روتور انتخاب می‌شود. با داشتن داده‌های مربوط به حلقه‌های هیستریزس بیضوی تودرتو (شامل حداکثر مؤلفه محیطی چگالی شار حلقه B_m ، حداکثر مؤلفه محیطی شدت میدان حلقه H_m)، مقادیر E_h و H_m حلقه مورد نظر به‌زای حداکثر مؤلفه محیطی چگالی شار حلقه B_m به‌کمک یک درونیابی به‌دست می‌آیند. گشتاور تولیدی ناشی از این حلقه انتخابی برابر می‌شود با (فصل ۲):

$$T_e = \frac{pVE_h}{4\pi} \quad (1-5)$$

که در آن E_h ، T_e ، p و V به ترتیب مساحت حلقه هیستریزس، گشتاور الکترومغناطیسی حداکثر، تعداد قطب‌ها و حجم دیسک هیستریزس هستند.

با داشتن E_h ، B_m و H_m حلقه عملکردی، پارامترهای حلقه شامل نفوذپذیری μ و زاویه تأخیر

هیستریزس α از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\mu = \frac{B_m}{H_m} \quad (2-5)$$

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{E_h}{\pi B_m H_m}\right) \quad (3-5)$$

جریان فازهای استاتور یک مجموعه سه‌فاز متعادل تشکیل می‌دهند که به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$i_{ea} = \sqrt{2}I_s \cos(\omega_e t) \quad (4-5)$$

$$i_{eb} = \sqrt{2}I_s \cos\left(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (5-5)$$

$$i_{ec} = \sqrt{2}I_s \cos\left(\omega_e t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (6-5)$$

که در این روابط I_s و ω_e به ترتیب مقدار مؤثر جریان استاتور و فرکانس زاویه‌ای تغذیه موتور هستند. در

نتیجه در یک لحظه دلخواه مثلاً $t = 0$ جریان‌های استاتور عبارتند از: $i_a = \sqrt{2}I_s$ ، $i_b = -\sqrt{2}I_s/2$ و

$i_c = -\sqrt{2}I_s/2$. در این لحظه جهت میدان منتجه استاتور منطبق بر محور فاز 'a' استاتور خواهد بود.

اگر محور فاز 'a' استاتور به‌عنوان مبنا انتخاب شود، از روابط تحلیلی می‌توان دریافت که توزیع مؤلفه‌های

محیطی چگالی شار و شدت میدان مغناطیسی حول دیسک هیستریزس به‌صورت زیر خواهند بود:

$$B(t, \phi_s) = B_m \cos(\omega_e t - \phi_s - \phi_0) \quad (7-5)$$

$$H(t, \phi_s) = H_m \cos(\omega_e t - \phi_s - \phi_0 + \alpha) \quad (8-5)$$

بنابراین در لحظه $t=0$ روابط (7-5) و (8-5) به صورت زیر درمی‌آیند:

$$B(t=0, \phi_s) = B_m \cos(\phi_s + \phi_0) \quad (9-5)$$

$$H(t=0, \phi_s) = H_m \cos(\phi_s + \phi_0 - \alpha) \quad (10-5)$$

از این روابط مشاهده می‌شود که در لحظه $t=0$ محل حداکثر شدن چگالی شار محیطی در دیسک هیستریزس نسبت به محور فاز 'a' استاتور به اندازه زاویه ϕ_0 عقب‌تر است. همچنین در دیسک هیستریزس محل حداکثر شدن شدت میدان نسبت به محل حداکثر شدن چگالی شار به اندازه زاویه تأخیر هیستریزس α جلوتر است. زاویه ϕ_0 همان‌طور که قبلاً بیان شد به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\phi_0 = \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \left\{ \frac{\frac{2R_{avg} \sin \alpha}{p\mu}}{\frac{2R_{avg} \cos \alpha}{p\mu} + \frac{g t_r p}{2\mu_0 R_{avg}}} \right\} \quad (11-5)$$

یادآوری می‌شود که در این رابطه R_{avg} ، g و t_r به ترتیب شعاع متوسط دیسک هیستریزس، طول فاصله هوایی و ضخامت محوری دیسک هیستریزس می‌باشند.

اکنون با داشتن توزیع محیطی B و H داده شده در روابط (9-5) و (10-5)، توزیع مؤلفه محیطی مغناطیس‌شوندگی M در ارتفاع محوری متوسط دیسک هیستریزس نیز به صورت زیر به دست می‌آید:

$$M = \frac{B}{\mu_0} - H \quad (12-5)$$

با استفاده از رابطه (12-5)، مغناطیس‌شوندگی در تمام گره‌های مش مدل اجزاء محدود دیسک هیستریزس موتور محاسبه می‌شود و به مدل اجزاء محدود اعمال می‌شود.

از آنجایی که هر دو موتور در حداکثر گشتاور خود هستند، می‌توان مقدار زاویه توان موتور آهنربای دائم δ_{PM} و از آنجا موقعیت دیسک PM را نیز به دست آورد.

۴- یک مقدار اولیه برای مقدار مؤثر جریان متعادل فازهای استاتور انتخاب می شود.

همان طور که گفته شد جریان فازهای استاتور یک مجموعه سه فاز متعادل به صورت داده شده در معادلات (۴-۵) تا (۶-۵) خواهند بود.

۵- جریان ها و توزیع مغناطیس شوندهگی محیطی به دست آمده در مرحله ۳ به مدل اجزاء محدود اعمال می شوند.

همان طور که قبلاً اشاره شد در این رساله از یک مدل اجزاء محدود ساکن برای مدل سازی رفتار حالت دائمی موتور هیستریزس استفاده می شود. در این روش توزیع جریان استاتور و توزیع مغناطیس شوندهگی در یک لحظه از زمان (به طور اختیاری مثلاً $t = 0$) به مدل اجزاء محدود که از قبل به نرم افزار اجزاء محدود مثلاً COMSOL معرفی شده است، اعمال می شود و توزیع میدان مغناطیسی در تمامی بخش های ماشین محاسبه می شود.

با اجرای مدل اجزاء محدود، توزیع میدان مغناطیسی در تمام بخش های موتور از جمله دیسک هیستریزس به دست می آید. از توزیع میدان به دست آمده در دیسک هیستریزس، دامنه موج های اصلی مؤلفه محیطی چگالی و شدت میدان مغناطیسی در ارتفاع محوری متوسط دیسک هیستریزس $H_{m,FEM}$ ، $B_{m,FEM}$ مشخص می شوند.

۶- خطای نسبی چگالی شار به صورت زیر محاسبه می شود:

$$err_B = \frac{|B_m - B_{m,FEM}|}{B_m} \quad (۱۳-۵)$$

و در صورتی که err_B از یک حد از پیش تعیین شده مشخصی مثلاً ε_i بیشتر باشد، جریان مؤثر فازهای استاتور به صورت زیر اصلاح می شود:

$$I_{e,new} = I_e + \Delta I_e \quad (۱۴-۵)$$

برای اصلاح مقدار قبلی I_e لازم است که:

$$\Delta I_e = \begin{cases} \text{positive} & \text{if } B_m > B_{m,FEM} \\ \text{negative} & \text{if } B_m < B_{m,FEM} \end{cases} \quad (15-5)$$

گام ΔI_e نیز باید با دقت کافی انتخاب شود تا ضمن اطمینان از همگرایی پاسخها دقت مورد نیاز نتایج نیز تضمین شود. برای حصول چنین اهدافی از روش نصف کردن فاصلهها (Bisection Method) استفاده شده است به این صورت که مقدار گام ΔI_e ابتدا نسبتاً بزرگ انتخاب می شود و با نزدیک شدن به پاسخ نهایی مقدار آن به تدریج کوچک می شود.

اکنون با محاسبه جریانهای سه فاز جدید به مرحله ۵ باز می گردیم و محاسبات را تکرار می کنیم تا اینکه شرط $err_B < \varepsilon_i$ برآورده شود. در این صورت به مرحله بعد می رویم.

۷- ولتاژ فاز استاتور محاسبه می شود.

توزیع فضایی مغناطیس شونددگی محیطی حول دیسک هیستریزس در لحظه $t=0$ که در مرحله ۳ به دست آمده است را می توان به صورت زیر نشان داد:

$$M = M_m \cos(\phi_s + \phi_{m0}) \quad (16-5)$$

با تقریب خوبی می توان فرض کرد که حین چرخش روتور در سرعت سنکرون و در حالت دائمی، توزیع مغناطیس شونددگی حول دیسک هیستریزس نسبت به خود دیسک هیستریزس ثابت باقی می ماند و در نتیجه نسبت به استاتور با سرعت سنکرون جابجا می شود. بنابراین در هر لحظه دلخواه t توزیع مغناطیس شونددگی محیطی دیسک را می توان به صورت زیر بیان نمود:

$$M = M_m \cos(\omega_e t - \phi_s - \phi_{m0}) \quad (17-5)$$

که در این رابطه ω_e سرعت زاویه ای الکتریکی سنکرون است.

اگر برای لحظات مختلف t ، جریانهای سه فاز از روابط (۴-۵)، (۵-۵) و (۶-۵) و مغناطیس شونددگی دیسک از رابطه (۱۷-۵) محاسبه شوند و به مدل اجزاء محدود اعمال شوند، می توان توزیع میدان مغناطیسی

را برای یک سیکل الکتریکی عملکرد ماشین و برای هر بخش ماشین به‌دست آورد. در این صورت تغییرات شار پیوندی هر فاز در یک سیکل به راحتی قابل محاسبه خواهد بود.

برای محاسبه شار پیوندی هر فاز ابتدا شار عبوری از هر کلاف آن فاز φ_c به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\varphi_c = \oint \mathbf{A}_{avg} \cdot d\mathbf{l} \quad (18-5)$$

که در آن \mathbf{A}_{avg} و $d\mathbf{l}$ به ترتیب پتانسیل مغناطیسی برداری متوسط روی سطح مقطع هر ضلع کلاف (یا به عبارت دیگر پتانسیل مغناطیسی برداری در مرکز ثقل مغناطیسی آن ضلع کلاف) و طول دیفرانسیلی کلاف در امتداد شعاع ماشین می‌باشد. \mathbf{A}_{avg} مربوط به هر ضلع کلاف با انتگرال‌گیری بردار پتانسیل \mathbf{A} روی سطح مقطع آن ضلع و تقسیم آن بر سطح مقطع کلاف S_c به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\mathbf{A}_{avg} = \frac{1}{S_c} \int_S \mathbf{A} \cdot ds \quad (19-5)$$

با توجه به اینکه مدل اجزاء محدود مورد استفاده در این رساله دوبعدی است، پتانسیل برداری \mathbf{A} فقط دارای مؤلفه شعاعی است. یعنی:

$$\mathbf{A} = A_r \mathbf{a}_r \quad (20-5)$$

در نتیجه رابطه (18-5) به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\varphi_c = L_e [A_{r,1} - A_{r,2}] \quad (21-5)$$

که در این رابطه L_e طول محوری ماشین است و $A_{r,1}$ و $A_{r,2}$ پتانسیل‌های مغناطیسی متوسط برداری روی اضلاع کلاف هستند. این پتانسیل‌ها با توجه به مخالف هم بودن جهت جریان‌ها در اضلاع کلاف دارای علامت‌های مخالف همدیگر می‌باشند.

با معلوم شدن شار کلاف‌های مختلف مربوط به یک فاز شار پیوندی آن فاز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\lambda = \sum_{k=1}^K n_c \varphi_{c,k} \quad (22-5)$$

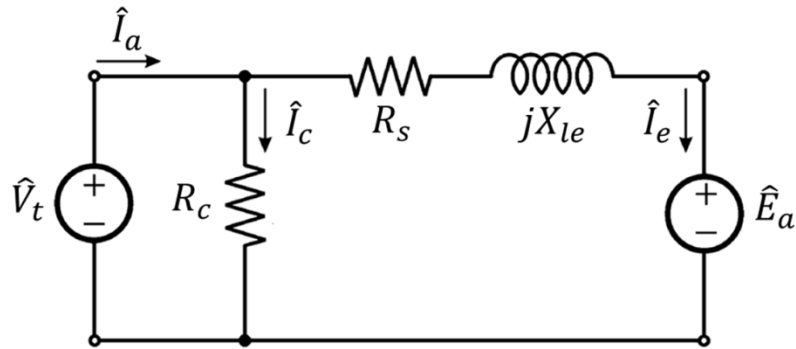
که در این رابطه n_c ، K و $\varphi_{c,k}$ به ترتیب تعداد دور هر کلاف از هر فاز، تعداد کلاف‌های هر فاز و شار عبوری از کلاف k ام می‌باشند. باید به این نکته اشاره کرد که همه مؤلفه‌های پراکندگی شار از قبیل شار پراکندگی دندان و شیار به جز پراکندگی شار مربوط به کله سیم‌ها در مقدار محاسبه شده λ با مدل اجزاء محدود دوبعدی لحاظ شده‌اند. بنابراین شار پراکندگی مربوط به سیم‌پیچی انتهایی لازم است در هنگام محاسبه ولتاژ ترمینال به کمک روابط تجربی برآورد شده و منظور شود.

پس از محاسبه شار پیوندی هر فاز در لحظات مختلف یک سیکل الکتریکی عملکرد ماشین به کمک اجرای مدل اجزاء محدود، منحنی تغییرات شار پیوندی در هر سیکل به دست می‌آید. اکنون می‌توان با استفاده از تبدیل فوریه گسسته (DFT¹) موج اصلی منحنی تغییرات شار پیوندی هر فاز یعنی λ_1 را محاسبه نمود. سپس با مشتق‌گیری از λ_1 نسبت به زمان، موج اصلی ولتاژ القایی در فاز مثلاً a را به دست آورد. در نهایت پس از محاسبه ولتاژ القایی e_1 با استفاده از مدل اجزاء محدود، ولتاژ ترمینال با استفاده از مدار معادل حالت دائمی موتور که در شکل ۵-۵ نشان داده شده است به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\hat{V}_t = \hat{E}_a + (R_s + jX_{le})\hat{I}_e \quad (۲۳-۵)$$

که در این رابطه \hat{V}_t ، \hat{E}_a ، \hat{I}_e و \hat{I}_a به ترتیب فازورهای ولتاژ ترمینال، ولتاژ القایی، جریان تحریک و جریان ورودی فاز هستند. R_s و X_{le} نیز به ترتیب مقاومت اهمی سیم‌پیچ هر فاز و راکتانس مربوط به شار پراکندگی سیم‌پیچ‌های انتهایی هر فاز هستند. در شکل ۵-۵ مقدار مقاومت معادل تلفات آهن هسته استاتور با R_c نشان داده شده است. نحوه محاسبه R_s ، X_{le} و R_c در فصل‌های قبل ارائه شده است.

¹ Discrete Fourier Transform



شکل ۵-۵: مدار معادل هر فاز در حالت دائمی برای محاسبه ولتاژ ترمینال که در آن \hat{E}_a فازور ولتاژ القایی به دست آمده با مدل اجزاء محدود است.

۸- اکنون خطای نسبی ولتاژ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$err_V = \frac{|V_{in} - V_t|}{V_{in}} \quad (24-5)$$

و در صورتی که err_V از یک حد مشخص (مثلاً ε_v) بیشتر باشد، حداکثر چگالی شار مغناطیسی با یک

گام مناسب به صورت زیر اصلاح می‌شود:

$$B_{m,new} = B_m + \Delta B_m \quad (25-5)$$

بطوریکه:

$$\Delta B_m = \begin{cases} \text{positive} & \text{if } V_{in} > V_t \\ \text{negative} & \text{if } V_{in} < V_t \end{cases} \quad (26-5)$$

و محاسبات از مرحله ۳ به بعد تکرار می‌شود. در غیر این صورت وقتی شرط $err_V \leq \varepsilon_v$ برقرار شود

برنامه به پایان می‌رسد و مشخصه‌های عملکردی ماشین از جمله جریان، گشتاور حداکثر، ضریب توان و

بازده به دست می‌آیند.

لازم به ذکر است که تحلیل و مقایسه نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش‌های تحلیلی و عددی در فصل ۷:

به همراه نتایج آزمایشات بر روی یک موتور PMHS نمونه ارائه خواهد شد.

فصل ۶: طراحی موتور PMHS نوع تخت

۶-۱- مقدمه

در این فصل یک الگوریتم طراحی برای موتور سنکرون هیستریزس آهنربای دائم نوع تخت شارمحيطي ارائه می‌شود. هر یک از موتورهای هیستریزس و آهنربای دائم دارای ویژگی‌های منحصر به فردی هستند که با ترکیب این دو موتور می‌توان به موتوری با مشخصه عملکردی بسیار درخشان دست یافت. توجه به این نکته ضروری است که روند طراحی صحیح و قابل انعطاف و انتخاب ساختار مناسب منجر می‌شود تا اکثر مزایای هر دو موتور، در موتور ترکیبی حاصل باقی بمانند. در الگوریتم طراحی پیشنهادی این رساله علاوه بر این که تلاش شده است تا ویژگی‌های مثبت هر دو موتور در موتور تلفیقی حاصل، حفظ شود، همچنین به کاربر این

اختیار داده می‌شود تا درصد تلفیق دو موتور را تعیین کند. به عبارت دیگر، کاربر می‌تواند سهم هر یک از دو موتور را در توان خروجی موتور حاصل، مشخص نماید.

۶-۲- طراحی موتور PMHS نوع تخت

تاکنون در هیچ مرجعی الگوریتم طراحی برای موتور PMHS در هیچکدام از ساختارها ارائه نشده است. در این بخش یک نمونه موتور PMHS نوع تخت طراحی می‌شود. همچنین الگوریتم طراحی پیشنهاد شده در این رساله، این امکان را در اختیار کاربر قرار می‌دهد تا درصد ترکیب هر یک از دو موتور را در موتور PMHS تعیین کند. به عبارت دیگر، کاربر می‌تواند سهم هر یک از دو موتور هیستریزیس و آهنربای دائم را در توان خروجی موتور PMHS مشخص کند.

در طی مراحل طراحی موتور PMHS لازم است فرضیات زیر در نظر گرفته شوند:

(۱) توزیع میدان مغناطیسی در دیسک هیستریزیس و دیسک نگه‌دارنده مگنت‌ها در راستای محوری یکنواخت است.

(۲) راستای میدان مغناطیسی در فاصله‌های هوایی کاملاً در جهت محوری و در دیسک هیستریزیس و دیسک نگه‌دارنده مگنت‌ها کاملاً در جهت محیطی است.

(۳) از مجموعه‌ای از بیضی‌های متحدالمرکز به منظور تقریب حلقه‌های هیستریزیس ماده دیسک روتور استفاده شده است.

در ادامه روند طراحی موتور PMHS نوع تخت ارائه می‌شود. در این بخش از روابط بخش ۳-۳-۶- استفاده شده است.

اطلاعات ورودی الگوریتم طراحی که توسط کارفرما تعیین می‌شود، در جدول ۶-۱ آورده شده است.

جدول ۱-۶: اطلاعات ورودی الگوریتم طراحی

P_{out}	توان خروجی موتور
n_p	درصد ترکیب
V_t	ولتاژ ترمینال موتور
m	تعداد فازها
f	فرکانس
n_m	سرعت موتور

در ابتدا با داشتن میزان درصد ترکیب موتور هیستریزیس n_p در موتور PMHS، توان خروجی حاصل از دیسک هیستریزیس به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$P_{out,Hys} = n_p P_{out} \quad (۱-۶)$$

گشتاور حاصل از دیسک هیستریزیس با صرف نظر از تلفات چرخشی به صورت زیر به دست می آید:

$$T_{Hys} = \frac{P_{out,Hys}}{2\pi f \frac{2}{p}} \quad (۲-۶)$$

برای هر ماده هیستریزیس مشخصات تقریب بیضوی حلقه های هیستریزیس آن با انجام آزمایش هایی قابل دستیابی است. مشخصات تقریب بیضوی حلقه های هیستریزیس ماده مورد استفاده این رساله در فصل ۷: آمده است. با انتخاب یک مقدار برای دامنه چگالی شار مغناطیسی در دیسک هیستریزیس $B_{m,Hys}$ ، تمامی پارامترهای مشخصه حلقه هیستریزیس کاری موتور متناظر با این دامنه چگالی شار به دست می آیند. این پارامترها عبارتند از نفوذپذیری مغناطیسی دیسک هیستریزیس μ ، زاویه تأخیر هیستریزیس α و مساحت حلقه هیستریزیس E_h . مساحت حلقه هیستریزیس بیضی شکل و در نتیجه حجم ماده هیستریزیس V ، با رابطه زیر به هم مرتبط می شوند [74].

$$V = \frac{4\pi T_{Hys}}{pE_h} \quad (۳-۶)$$

بنابراین ضخامت دیسک هیستریزیس t_r از رابطه زیر به دست می آید.

$$t_r = \frac{4V}{\pi D_o^2 (1 - \lambda^2)} \quad (4-6)$$

جاییکه

$$\lambda = \frac{D_i}{D_o} \quad (5-6)$$

که در آن D_o و D_i به ترتیب قطر خارجی و قطر داخلی دیسک هیستریزیس و یا به عبارتی قطر داخلی و خارجی هسته استاتور و دیسک PM می باشند. مقدار λ نیز براساس قواعد تجربی مشخص می شود.

لازم به ذکر است که در رابطه (4-6)، با اختیار یک مقدار برای D_o ، مقدار t_r محاسبه می شود. چنانچه مقدار به دست آمده برای ضخامت دیسک هیستریزیس از نقطه نظر مغناطیسی و مکانیکی منطقی باشد، روال طراحی ادامه می یابد و در غیر این صورت، مقدار D_o باید اصلاح شود. توجه به این نکته ضروری است که هرچه ضخامت دیسک هیستریزیس کمتر باشد، دامنه چگالی شار مغناطیسی در آن افزایش می یابد. این امر باعث می شود تا حلقه هیستریزیس کاری موتور بزرگتر شده و از آنجا، گشتاور، ضریب توان و بازده موتور افزایش یابد. از سوی دیگر، محدودیت های مکانیکی بسیاری در ساخت، عملیات حرارتی و مونتاژ یک دیسک با ضخامت کم وجود دارد.

ولتاژ تحریک القایی توسط دیسک هیستریزیس در سیم پیچی فاز 'a' استاتور از رابطه زیر قابل دستیابی است:

$$e_f = \frac{d\lambda_a}{dt} = -\frac{N_s L_e t_r B_{m,Hys} \pi \omega_e}{2a} \cos(\omega_e t - \phi_0) \quad (6-6)$$

که در آن ω_e و L_e ، a ، N_s ، t ، تعداد دور سیم‌پیچی سینوسی معادل هر فاز، تعداد مسیرهای موازی جریان هر فاز، طول شعاعی استاتور (R_o-R_i) و فرکانس زاویه‌ای جریان هر فاز. برای محاسبه ϕ_0 از رابطه زیر می‌توان استفاده نمود:

$$\phi_0 = \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \left(\frac{\frac{2R_{avg} \sin \alpha}{p\mu}}{\frac{2R_{avg} \cos \alpha}{p\mu} + \frac{g p t_r}{2\mu_0 R_{avg}}} \right) \quad (7-6)$$

جاییکه R_{avg} ، g و μ_0 به ترتیب شعاع متوسط دیسک هیستریزیس، طول فاصله هوایی و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی هوا می‌باشند.

از رابطه (6-6) و (7-6) و با اختیار یک مقدار برای دامنه ولتاژ القایی و با فرض $t=0$ می‌توان تعداد دور سیم‌پیچی سینوسی معادل هر فاز N_s را به دست آورد. دقت شود که پس از اینکه مراحل طراحی به پایان می‌رسد و تمامی پارامترهای ابعادی ماشین محاسبه می‌شوند، با استفاده از روابط ارائه شده در بخش‌های پیشین، المان‌های مدار معادل موتور محاسبه شده و بررسی می‌شود که این مقدار انتخابی برای ولتاژ تحریک القایی دیسک هیستریزیس، ولتاژ ترمینال را برآورده سازد، در غیر این صورت، ولتاژ القایی انتخابی باید اصلاح شود. در این رساله از ارائه این روند، به دلیل جلوگیری از پیچیدگی مباحث، صرف نظر شده است. با استفاده از رابطه زیر، مقدار مؤثر جریان هر فاز استاتور قابل محاسبه است:

$$I_s = \frac{B_{m,Hys} \sqrt{\left(\frac{g p t_r}{2\mu_0 R_{avg}} \right)^2 + \left(\frac{2R_{avg}}{p\mu} \right)^2} + 2 \frac{g t_r \cos \alpha}{\mu_0 \mu}}{\left(\frac{m}{2} \right) \left(\frac{N_s}{p} \right) \left(\frac{\sqrt{2}}{a} \right)} \quad (8-6)$$

با انتخاب یک مقدار منطقی برای چگالی سطحی جریان J_s ، می‌توان سطح مقطع هر هادی را از رابطه زیر به دست آورد:

$$S_{cond} = \frac{I_s}{J_s} \quad (9-6)$$

و از آنجا، با فرض هادی گرد، قطر هادی سیم‌پیچی از رابطه زیر قابل حصول است:

$$d_{cond} = 2\sqrt{\frac{S_{cond}}{\pi}} \quad (10-6)$$

با انتخاب یک مقدار منطقی برای ضخامت عایق هادی d_{insu} ، قطر سیم d_{wire} به دست آمده و بنابراین

تعداد لایه‌های سیم‌پیچی N_{layer} و همچنین ضخامت لایه سیم‌پیچی L_w به دست می‌آید.

$$d_{wire} = d_{cond} + d_{insu} \quad (11-6)$$

$$N_{layer} = \frac{2N_s m d_{wire}}{\pi D_i} \quad (12-6)$$

$$L_w = N_{layer} d_{wire} \quad (13-6)$$

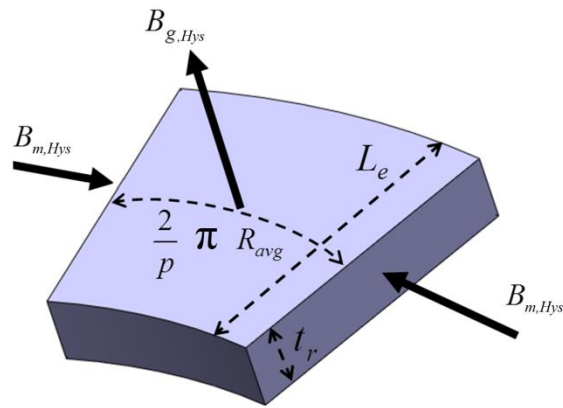
به این ترتیب، مشخصات مربوط به سیم‌پیچی ماشین و ابعاد دیسک هیستریزیس تعیین می‌شوند. در

مرحله بعد، ابعاد هسته استاتور و روتور PM محاسبه خواهند شد.

طبق اصل پیوستگی شار می‌توان چگالی شار فاصله هوایی سمت دیسک هیستریزیس $B_{g,Hys}$ را با

استفاده از رابطه زیر به دست آورد (شکل ۱-۶):

$$B_{g,Hys} = \frac{2B_{m,Hys} t_r}{\frac{2}{p}\pi R_{avg}} \quad (14-6)$$



شکل ۶-۱: برشی از دیسک هیستریزیس

با استفاده از همان قانون پیوستگی شار و انتخاب یک مقدار برای دامنه چگالی شار مغناطیسی در هسته استاتور B_{cs} ، بخشی از ضخامت محوری استاتور که شار سمت دیسک هیستریزیس از آن عبور می‌کند $L_{s,Hys}$ به دست خواهد آمد.

$$L_{s,Hys} = \frac{\pi B_{g,Hys} D_o (1 + \lambda)}{4 p B_{cs}} \quad (15-6)$$

چگالی شار فاصله هوایی سمت دیسک مگنت‌ها $B_{g,PM}$ را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد [72]:

$$B_{g,PM} = \frac{2 p P_{out,PM}}{\pi K_p K_i K_e \eta D_o^3 A f (1 + \lambda) (1 - \lambda^2)} \quad (16-6)$$

که در آن K_p ، K_i ، K_e ، η و f به ترتیب ضریب شکل موج توان الکتریکی، ضریب شکل موج جریان، ضریب نیروی محرکه الکتریکی، بازده دیسک PM و فرکانس می‌باشند. بارگذاری الکتریکی ویژه A و سهم توان دیسک PM در توان خروجی $P_{out,PM}$ از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$P_{out,PM} = (1 - n_p) P_{out} \quad (17-6)$$

$$A = \frac{m N_s I_s}{2 \pi R_{avg}} \quad (18-6)$$

مجدداً با به کارگیری اصل پیوستگی شار، بخشی از ضخامت محوری استاتور که شار سمت دیسک PM از آن عبور می کند $L_{s,PM}$ ، از رابطه زیر قابل حصول است:

$$L_{s,PM} = \frac{\pi B_{g,PM} D_o (1 + \lambda)}{4 p B_{cs}} \quad (19-6)$$

بنابراین ضخامت محوری استاتور برابر خواهد شد با:

$$L_s = L_{s,Hys} + L_{s,PM} \quad (20-6)$$

به این ترتیب ابعاد هسته استاتور بدون شیار ماشین مورد نظر طراحی شد. در مرحله آخر طراحی ابعاد مگنت‌ها و دیسک نگه‌دارنده آن به دست خواهند آمد.

طبق اصل پیوستگی شار و انتخاب یک مقدار برای دامنه چگالی شار در دیسک نگه‌دارنده مگنت‌ها B_{cr} ، می توان ضخامت محوری دیسک نگه‌دارنده مگنت‌ها L_r را با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$L_r = \frac{\pi \frac{B_{g,PM}}{K_d} D_o (1 + \lambda)}{4 p B_{cr}} \quad (21-6)$$

که در آن K_d ضریب نشت شار می‌باشد.

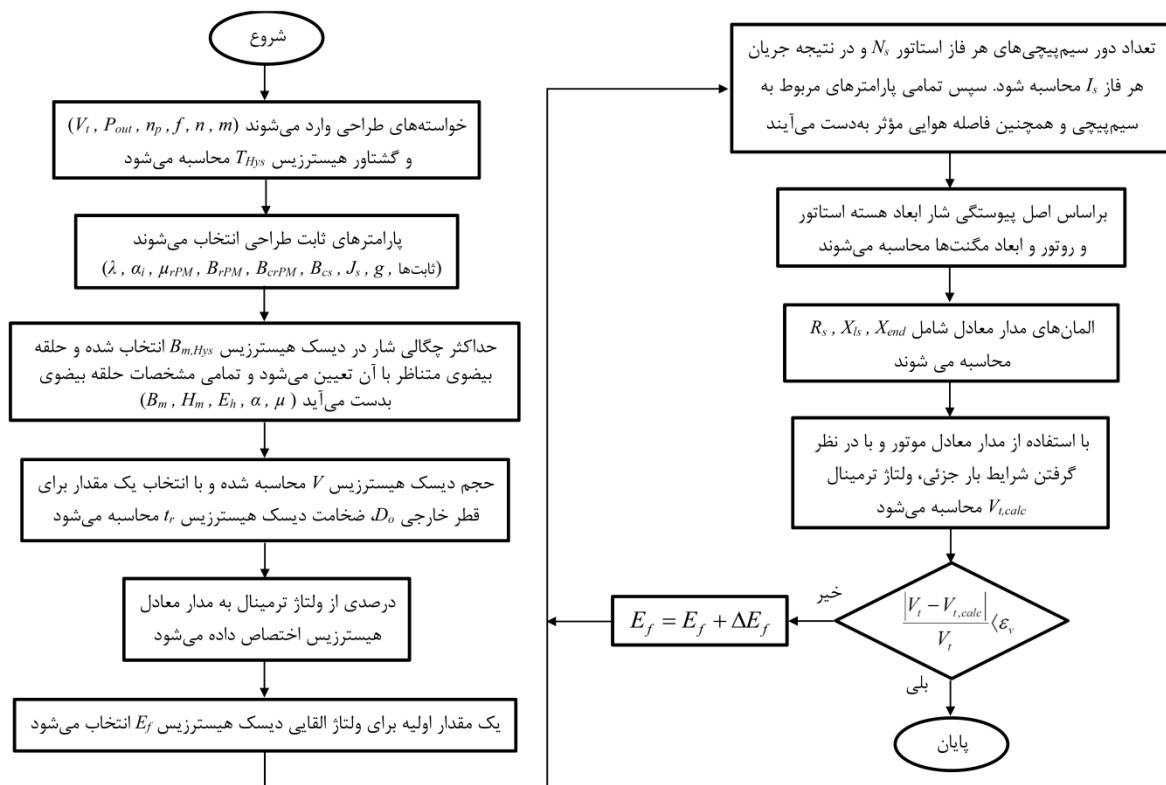
در نهایت طول محوری مگنت‌ها با استفاده از رابطه زیر قابل دستیابی است [72]:

$$L_{PM} = \frac{\mu_{r,PM} B_{g,PM} g}{B_{r,PM} - \frac{K_f}{K_d} B_{g,PM}} \quad (22-6)$$

که در آن K_f ، $\mu_{r,PM}$ و $B_{r,PM}$ به ترتیب ضریب شکستگی شار، ضریب نفوذپذیری مغناطیسی مگنت‌ها و چگالی شار پسماند مگنت‌ها می‌باشند.

در این مرحله فرآیند طراحی اولیه موتور PMHS نوع تخت به پایان می‌رسد. نکته‌ای که باید مدنظر قرار گیرد این است که تمامی پارامترهای ابعادی براساس انتخاب یک مقدار برای ولتاژ تحریک القایی توسط دیسک هیستریزیس E_f طراحی شده‌اند. پس از استخراج این پارامترها، المان‌های مدار معادل موتور به‌دست آمده و چنانچه در بار نامی، این مقدار انتخابی برای E_f ، مقدار ولتاژ ترمینال را برآورده سازد، روند طراحی به پایان می‌رسد. در غیر این صورت، باید مقدار E_f اصلاح شود.

به‌منظور درک بهتر روند طراحی، فلوجارت الگوریتم طراحی در شکل ۶-۲ ارائه شده است.



شکل ۶-۲: فلوجارت الگوریتم طراحی موتور PMHS نوع تخت

در ادامه نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم طراحی پیشنهادی برای طراحی یک نمونه موتور PMHS

نوع تخت ارائه می‌شوند.

۳-۶- نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم طراحی

در این بخش نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی برای طراحی یک نمونه موتور PMHS نوع تخت ارائه می‌گردد. سپس حساسیت سایر پارامترهای طراحی به تغییر درصد سهم دیسک هیستریزیس در توان خروجی، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول ۲-۶ اطلاعات ورودی برنامه طراحی این موتور را نشان می‌دهد. در این طراحی، برای دیسک هیستریزیس از ماده با خاصیت هیستریزیس مناسب با نام تجاری VCN-150 استفاده شده است. این ماده تشکیل شده از آلیاژ Fe-Cr-Ni-Mo-C می‌باشد که مشخصات تقریب بیضوی حلقه‌های هیستریزیس این آلیاژ در فصل ۷ آورده شده است. آهنرباهای مورد استفاده در این طراحی نیز از نوع فریت می‌باشد.

جدول ۲-۶: اطلاعات ورودی الگوریتم طراحی پیشنهادی

$P_{out} = 200 \text{ w}$	توان خروجی موتور
$n_p = 30 \%$	درصد ترکیب
$V_{t,L-L} = 100 \text{ V}$	ولتاژ ترمینال موتور
$m = 3$	تعداد فازها
$f = 50 \text{ Hz}$	فرکانس
$n_m = 1500 \text{ rpm}$	سرعت موتور

پس از اعمال اطلاعات ورودی به الگوریتم طراحی، پارامترهای خروجی حاصل از الگوریتم طراحی به دست می‌آیند که در جدول ۳-۶ ارائه شده‌اند.

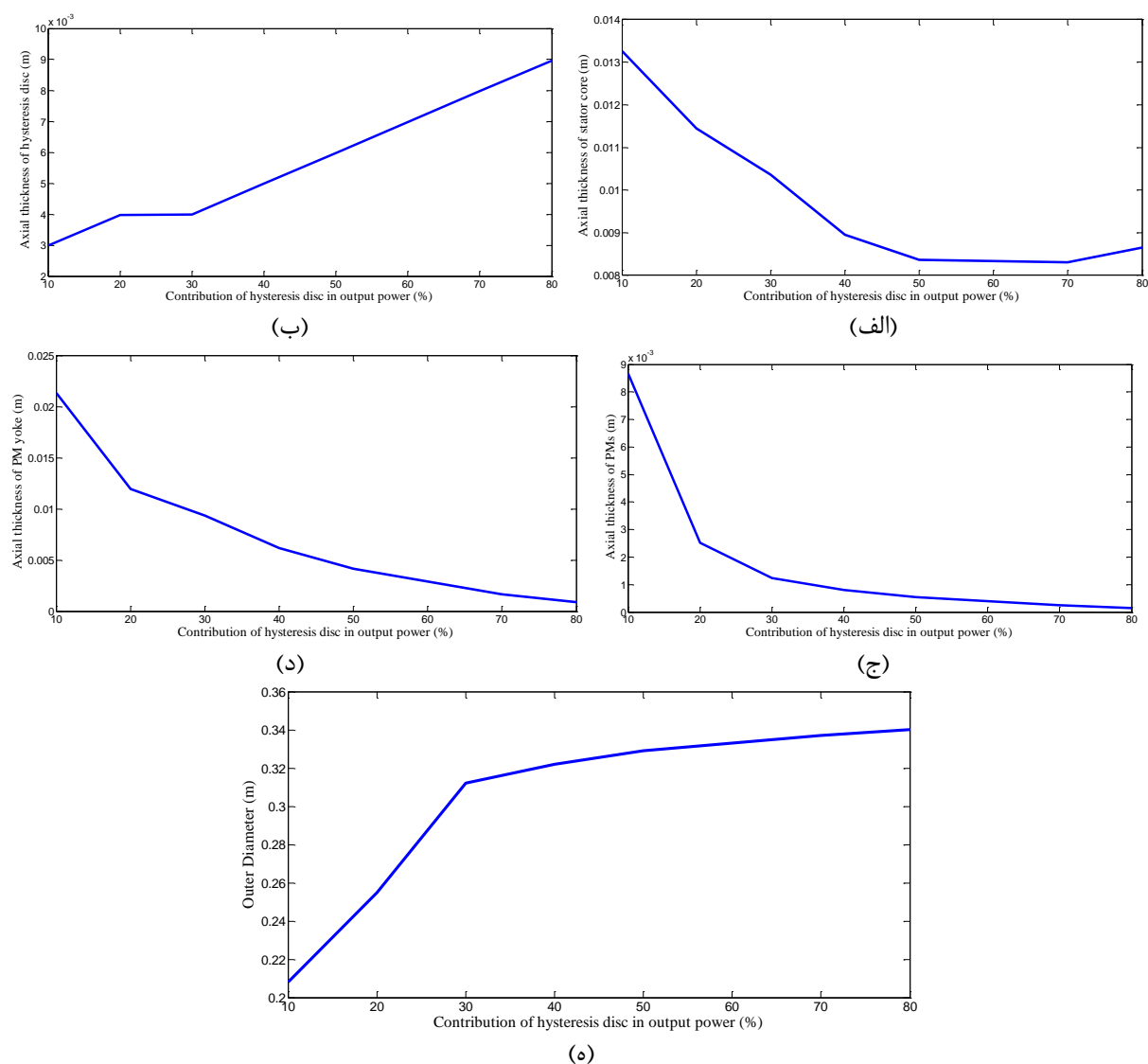
جدول ۳-۶: اطلاعات خروجی حاصل از الگوریتم طراحی موتور PMHS نوع تخت

$N_s = 300$	تعداد دور سیم‌پیچی هر فاز
$N_{layer} = 3$	تعداد لایه‌های سیم‌پیچی هر فاز
$nc = 50$	تعداد دورهای هر لایه سیم‌پیچی
$N_{coil} = 2$	تعداد کلایه‌های هر فاز

اتصال سیم پیچی استاتور	ستاره
نوع سیم پیچی	یک طبقه روی هم
گام سیم پیچی	کامل
سطح مقطع هادی	$S_{cond} = 0.29 \text{ mm}^2$
قطر سیم	$d_{wire} = 0.62 \text{ mm}$
قطر داخلی	$D_i = 179.2 \text{ mm}$
قطر خارجی	$D_o = 312 \text{ mm}$
ضخامت دیسک هیستریزیس	$t_r = 4 \text{ mm}$
ضخامت محوری هسته استاتور	$L_s = 10.4 \text{ mm}$
چگالی شار پسماند مگنتها	$B_{r,PM} = 0.4 \text{ T}$
ضخامت محوری مگنتها	$L_{PM} = 1.2 \text{ mm}$
ضخامت دیسک نگه دارنده مگنتها	$L_r = 8.1 \text{ mm}$
طول فاصله هوایی	$g = 1.2 \text{ mm}$

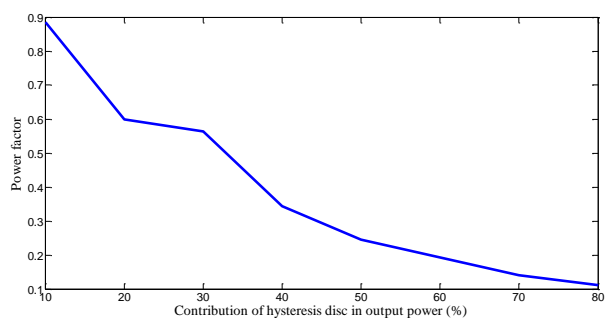
اکنون قصد بر این است تا با تغییر درصد سهم دیسک هیستریزیس در توان خروجی موتور n_p ، تغییرات سایر پارامترهای طراحی مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد. به این منظور، طراحی موتور با خواسته‌های طراحی ارائه شده در جدول ۶-۲، به‌ازای تغییرات مقدار n_p از ۱۰ تا ۸۰ درصد انجام شده و نتایج ارائه می‌شوند. لازم به ذکر است که برخی پارامترهای موتور از قبیل طول فاصله هوایی، نوع سیم پیچی و اتصال آن و... در طی تغییرات n_p ثابت فرض شده‌اند.

شکل ۶-۳ تغییرات ابعاد موتور را به‌ازای تغییرات سهم دیسک هیستریزیس در توان خروجی، نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش سهم دیسک هیستریزیس در توان خروجی، ابعاد روتور PM و طول محوری موتور کاهش یافته و ابعاد روتور هیستریزیس و همچنین قطر خارجی موتور افزایش می‌یابد.

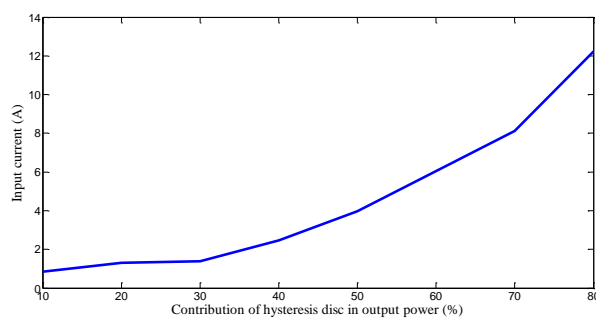


شکل ۳-۶: تغییرات ابعاد موتور به‌ازای تغییرات n_p (الف) ضخامت محوری هسته استاتور، (ب) ضخامت محوری دیسک هیستریزیس، (ج) ضخامت محوری مگنت‌ها، (د) ضخامت محوری نگه‌دارنده مگنت‌ها، (ه) قطر خارجی موتور

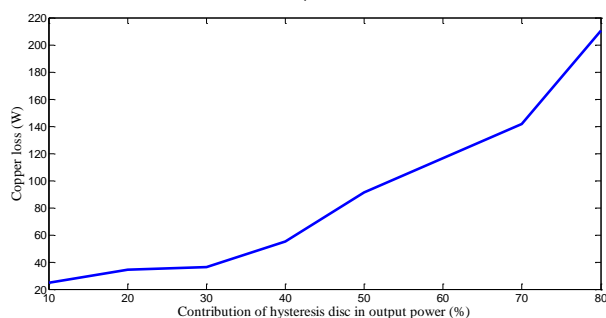
تغییرات پارامترهای عملکردی موتور به‌ازای تغییرات n_p در شکل ۴-۶ ارائه شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است، جریان ورودی موتور با افزایش سهم دیسک هیستریزیس در توان خروجی موتور، افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع را می‌توان با رابطه (۳-۶۲) توجیه نمود. این رابطه نشان می‌دهد که با افزایش شعاع متوسط دیسک هیستریزیس، امپدانس هیستریزیس کاهش می‌یابد. همچنین در این شکل مشخص می‌شود که با افزایش سهم هیستریزیس، رفتار موتور PMHS مشابه موتور هیستریزیس خواهد شد و ضریب توان و بازده موتور کاهش می‌یابند.



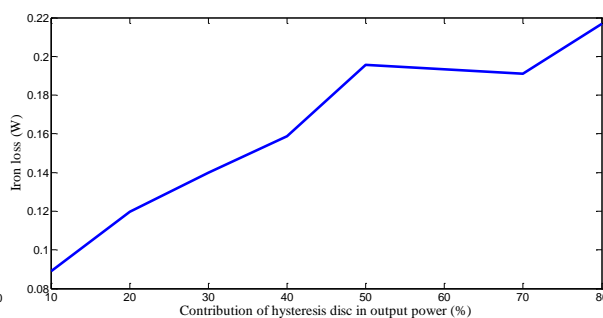
(ب)



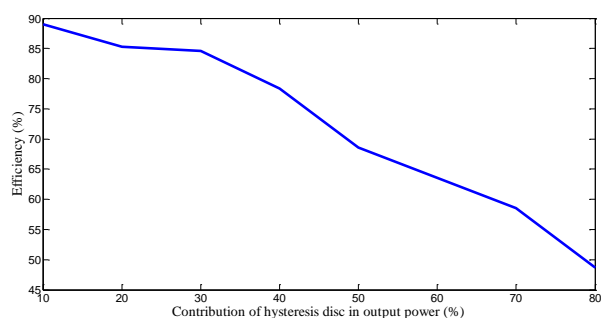
(الف)



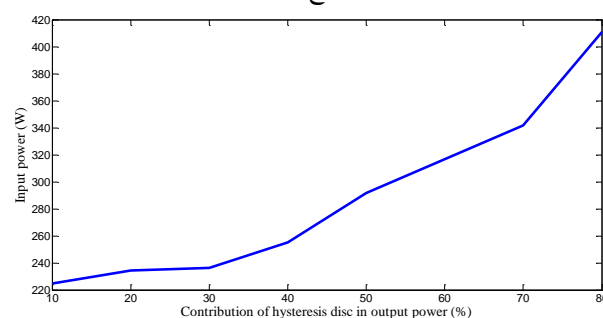
(د)



(ج)



(و)



(ه)

شکل ۴-۶: تغییرات پارامترهای عملکردی موتور به‌ازای تغییرات η_p (الف) جریان ورودی موتور، (ب) ضریب توان، (ج) تلفات آهنی، (د) تلفات مسی، (ه) توان ورودی، (و) بازده

با توجه به نتایج ارائه شده در این فصل می‌توان نتیجه گرفت که بسته به کاربرد موتور PMHS، باید مصالحه‌ای در میزان درصد ترکیب انجام شود. این موضوع با تعریف تابع هدف مناسب و اجرای روند بهینه‌سازی، قابل حصول است.

فصل ۷: نتایج شبیه‌سازی و آزمایشات عملی

۷-۱- مقدمه

در این بخش نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم‌های مدل‌سازی تحلیلی و عددی موتور PMHS نوع تخت ارائه می‌گردد. همچنین به منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از روش‌های تئوری، یک نمونه موتور PMHS نوع تخت دو طبقه ساخته شده و نتایج حاصل از آزمایشات آن با نتایج روش‌های مدل‌سازی مقایسه شده است.

۲-۷- مشخصات موتور PMHS ساخته شده

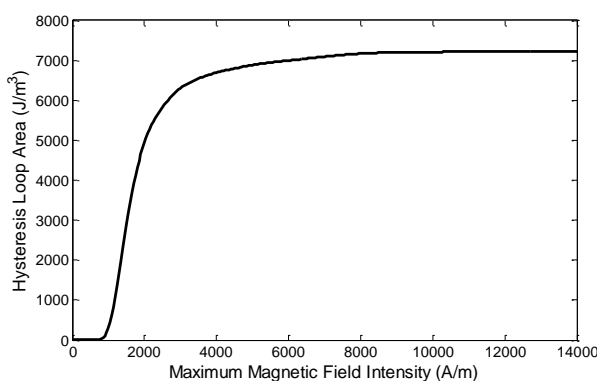
موتور ساخته شده توسط نویسنده رساله پیش‌رو، از نوع دوطبقه می‌باشد. به این صورت که دارای دو استاتور، دو دیسک هیستریزیس و یک دیسک نگهدارنده مگنت‌ها که در بین دو استاتور قرار گرفته است، می‌باشد. جدول ۱-۷ اطلاعات این موتور را نشان می‌دهد. برای ساخت دیسک هیستریزیس این موتور از آلیاژ Fe-Cr-Ni-Mo-C استفاده شده است که مشخصات تقریب بیضوی حلقه‌های هیستریزیس این آلیاژ پس از یک عملیات حرارتی خاص، در شکل ۱-۷ نشان داده شده است. داده‌های حاصل از آزمایشات مربوط به حلقه‌های هیستریزیس دیسک هیستریزیس روتور شامل شکل موج‌های چگالی شار مغناطیسی و شدت میدان مغناطیسی می‌باشند. با استفاده از این داده‌ها و با به‌کارگیری تکنیک‌های مناسب برازش منحنی‌ها و درون‌یابی، منحنی‌های چگالی شار حداکثر حلقه و سطح حلقه برحسب شدت میدان حداکثر حلقه به‌دست آمده‌اند.

شکل ۲-۷ اجزاء مختلف و مونتاژ نهایی موتور PMHS ساخته شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نیز مشخص شده است، دیسک نگهدارنده مگنت‌ها از جنس ماده فرومغناطیس بوده تا شار آهنرباها را با کمترین تضعیف عبور دهد. همچنین نگه‌دارنده دیسک هیستریزیس از جنس آلومینیوم انتخاب شده است تا شار به‌صورت محیطی در دیسک هیستریزیس مسیر خود را ببندد. هسته استاتور نیز با استفاده از یک ورق فرومغناطیس رول‌شده ساخته شده است.

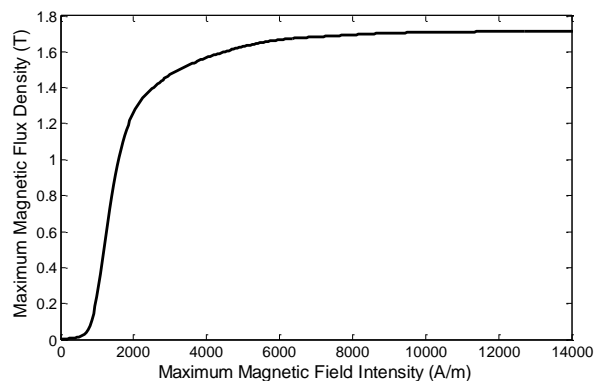
جدول ۱-۷: اطلاعات طراحی موتور PMHS نوع تخت ساخته شده

تعداد فازها	۳
فرکانس نامی	۵۰ هرتز
ولتاژ نامی فاز ورودی	۱۲ ولت
تعداد قطب‌ها	۴
تعداد کلاف‌های هر فاز	۴
تعداد دور سیم در هر کلاف	۲۸
شعاع داخلی	۲۵/۵ میلی‌متر

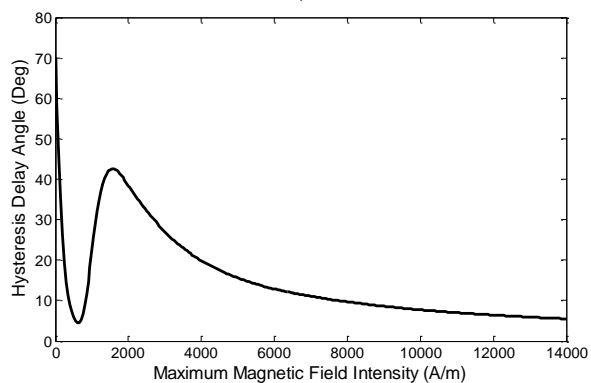
۴۵ میلیمتر	شعاع خارجی
۳ میلیمتر	ضخامت دیسک هیستریزیس
۲ میلیمتر	ضخامت محوری مگنت‌ها
۶ میلیمتر	عرض مگنت
۳ میلیمتر	ضخامت دیسک نگهدارنده مگنت‌ها
۳/۲ میلیمتر	طول مؤثر فاصله هوایی
۱۹ میلیمتر	ضخامت یوغ استاتور
ستاره	اتصال سیم‌پیچی استاتور
یک طبقه روی هم	نوع سیم‌پیچی
کامل	گام سیم‌پیچی



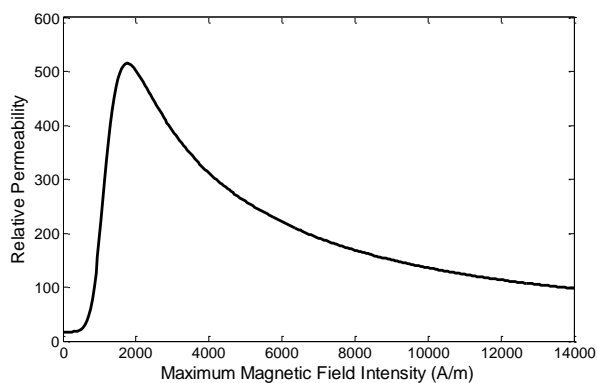
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۷-۱: مشخصات تقریب بیضوی حلقه‌های هیستریزیس ماده سازنده دیسک هیستریزیس موتور تحت مطالعه برحسب دامنه شدت میدان مغناطیسی حلقه، الف) دامنه چگالی شار مغناطیسی حلقه، ب) مساحت حلقه، ج) نفوذپذیری مغناطیسی نسبی و د) زاویه تأخیر هیستریزیس

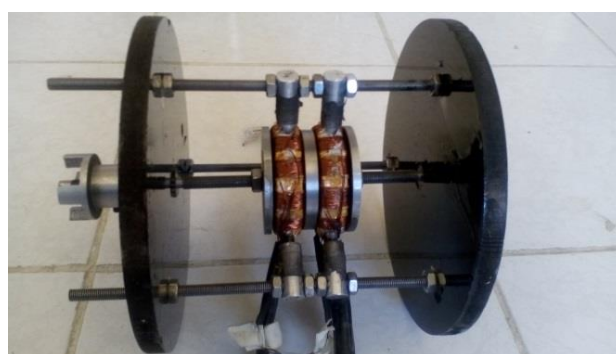


(ب)

(الف)



(د)



(ج)

شکل ۷-۲: اجزاء مختلف و مونتاژ نهایی موتور PMHS ساخته شده

همان‌طور که از شکل ۷-۲-الف مشخص است، یک نوآوری در مونتاژ مجموعه روتور بکار گرفته شده است و آن اینکه، شفت موتور رزوه شده و تمامی دیسک‌ها نیز حدیده شده‌اند. این کار موجب می‌شود تا به راحتی بتوان فاصله هوایی ماشین را تنظیم نمود. همچنین امکان تغییر توپولوژی ساختار، اضافه و یا کم کردن دیسک‌ها را نیز به سادگی میسر می‌سازد.

۷-۳- مقایسه و تحلیل نتایج

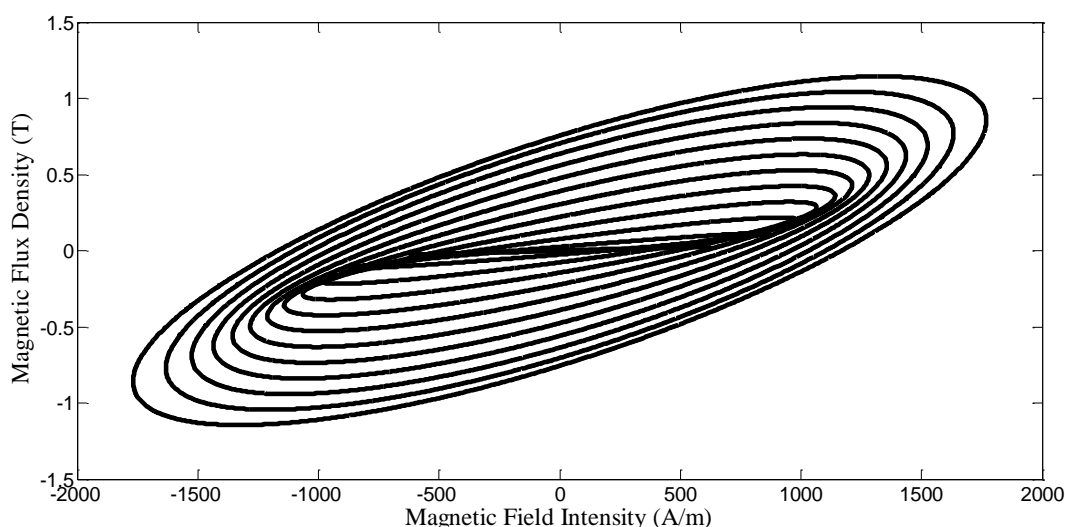
به کمک محیط برنامه‌نویسی نرم‌افزار Matlab یک برنامه نوشته شده است که الگوریتم مدل‌سازی تحلیلی نشان داده شده در شکل ۵-۳ را به ازای ولتاژهای ورودی مختلف پیاده‌سازی می‌کند. به این ترتیب

می‌توان رفتار موتور PMHS نوع تخت و مشخصه‌های عملکردی آن را در ولتاژهای مختلف مورد بررسی قرار داد.

در اکثر نرم‌افزارهای تجاری موجود برای مدل‌سازی الکترومغناطیسی ماشین‌های الکتریکی به کمک روش اجزاءمحدود، مشخصه هر ماده مغناطیسی تنها به صورت یک منحنی غیرخطی تک‌مقداره (منحنی مغناطیس‌شوندگی) منظور می‌شود. همانطور که قبلاً بیان شد مشخصه هیستریزیس یک پدیده غیرخطی خارق‌العاده چندمقداره و وابسته به سابقه تغییرات میدان است بطوریکه به ازای یک مقدار مشخص شدت میدان مغناطیسی لحظه فعلی، با توجه به شرایط مختلف کار قبلی مقادیر بسیار متفاوت برای چگالی شار مغناطیسی همین لحظه آن متصور است. به همین دلیل نرم‌افزارهای تجاری اجزاءمحدود الکترومغناطیس حداقل تاکنون نتوانسته‌اند مدل‌سازی دقیقی از پدیده هیستریزیس مغناطیسی را در معادلات پایه خود (معادلات مشتقات جزئی لاپلاس یا پواسون مستخرج از معادلات ماکسول) به طور مستقیم بگنجانند و حل نمایند. بنابراین برای منظور نمودن پدیده هیستریزیس در مدل‌سازی یک ماشین الکتریکی بنا بر اهداف تحلیل، نیاز مبرم به یک یا چند برنامه‌سازی جانبی پیچیده خاص در کنار نرم‌افزارهای اجزاءمحدود وجود دارد. در رابطه با این مقوله، قابلیت برقراری ارتباط بین نرم‌افزار COMSOL و نرم‌افزار Matlab باعث شده است که این نرم‌افزار به عنوان یکی از بهترین گزینه‌ها برای مدل‌سازی ماشین‌های هیستریزیس این رساله در نظر گرفته شود. اگرچه کاربرد این نرم‌افزار در مقایسه با سایر نرم‌افزارهای دیگر که به صورت تخصصی برای مدل‌سازی ماشین‌های الکتریکی طراحی شده‌اند دشوارتر می‌باشد اما این نرم‌افزار کنترل بیشتری را برای ایجاد مدل دلخواه و محاسبات غیرمتعارف در اختیار کاربر قرار می‌دهد.

به کمک یک برنامه نوشته شده در محیط نرم‌افزار Matlab و برقراری لینک آن با نرم‌افزار COMSOL، الگوریتم مدل‌سازی عددی نشان داده شده در شکل ۴-۵ به ازای ولتاژهای ورودی مختلف اجرا می‌شود و مشخصه‌های عملکردی مختلف موتور PMHS نوع تخت در ولتاژهای مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

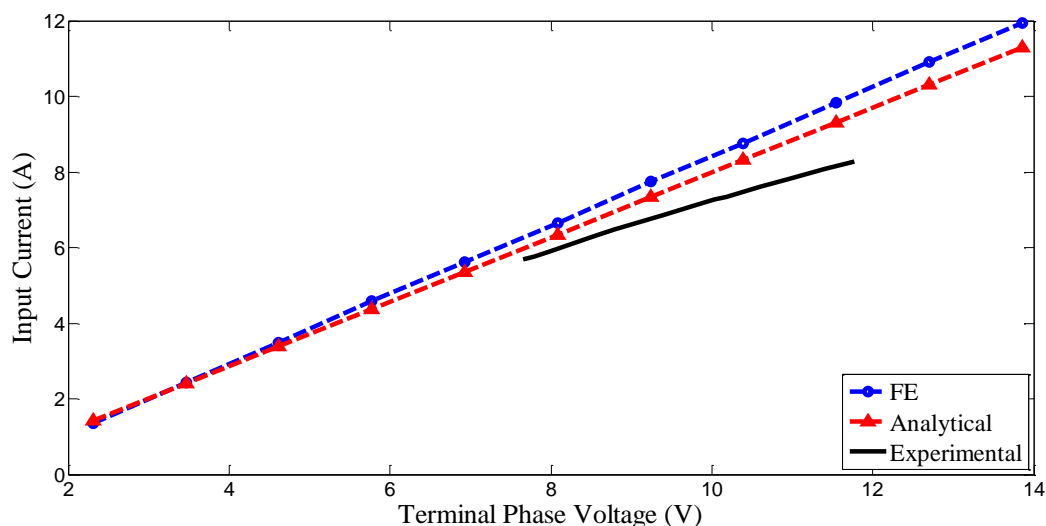
حلقه‌های هیستریزس کاری بیضوی شکل حاصل از مدل‌سازی تحلیلی موتور به ازای ولتاژهای ترمینال مختلف در شکل ۳-۷ به نمایش درآمده‌اند. این شکل نشان می‌دهد که تغییر ولتاژ علاوه بر تغییر مساحت حلقه، منجر به تغییر پهنا و نیز چرخش آن می‌شود. این موضوع به دلیل تغییرات زاویه تأخیر هیستریزس و نفوذپذیری مغناطیسی دیسک هیستریزس با تغییر ولتاژ ترمینال رخ می‌دهد.



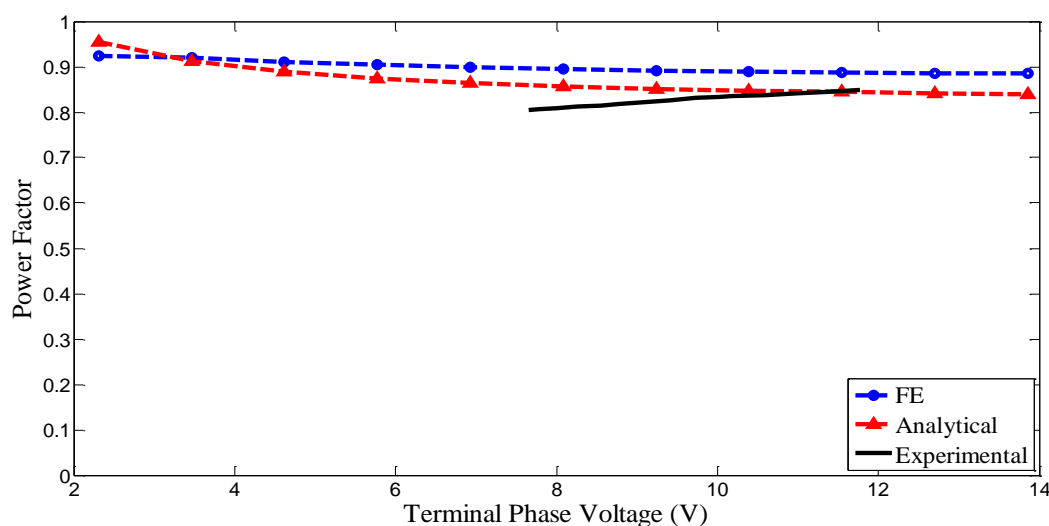
شکل ۳-۷: حلقه‌های هیستریزس کاری بیضوی شکل حاصل از مدل‌سازی تحلیلی موتور به ازای ولتاژهای ترمینال مختلف

در ادامه مهم‌ترین مشخصه‌های عملکردی موتور نمونه که از روش‌های مدل‌سازی تحلیلی و عددی و انجام آزمایشات عملی به دست آمده‌اند، ارائه می‌شوند. این مشخصه‌ها به ازای ولتاژهای فاز ورودی بین ۲ تا ۱۴ ولت ترسیم می‌شوند. لازم به ذکر است که به دلیل برخی محدودیت‌ها از قبیل محدودیت حداکثر جریان، خروج از سنکرونیزم در اثر اصطکاک و غیره، امکان آزمایش موتور در تمام رنج ولتاژی مذکور، مقدور نبوده است.

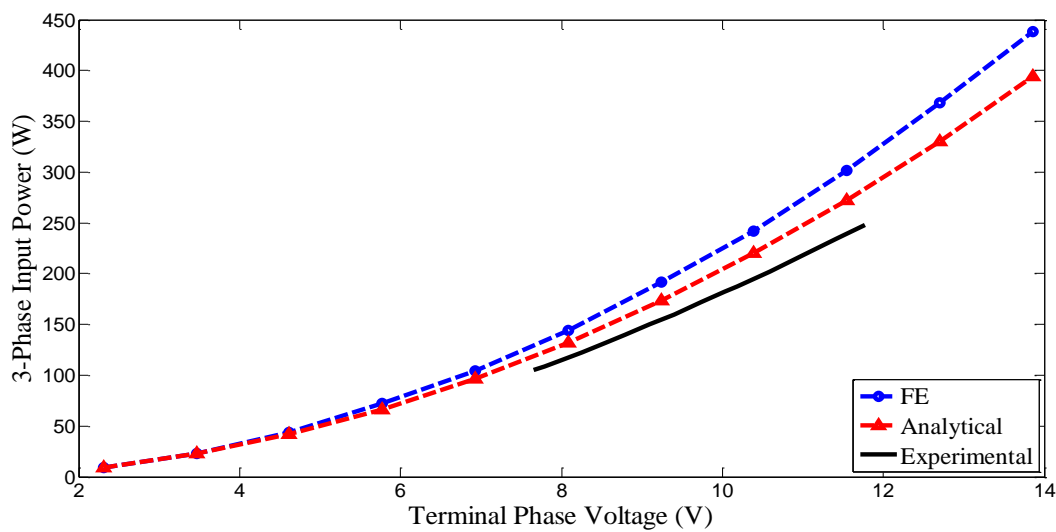
نحوه تغییرات اندازه جریان ورودی موتور بر حسب اندازه ولتاژ خط ترمینال برای هر دو روش مدل‌سازی و آزمایش عملی در شکل ۴-۷ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش ولتاژ ترمینال، جریان موتور افزایش می‌یابد. وابستگی ضریب توان ورودی به ولتاژ ترمینال در شکل ۵-۷ به نمایش درآمده است. شکل ۶-۷ منحنی‌های تغییرات توان ورودی سه فاز موتور بر حسب ولتاژ ترمینال را نمایش می‌دهد. تلفات اهمی سیم‌پیچ‌ها در شکل ۷-۷ ترسیم شده است.



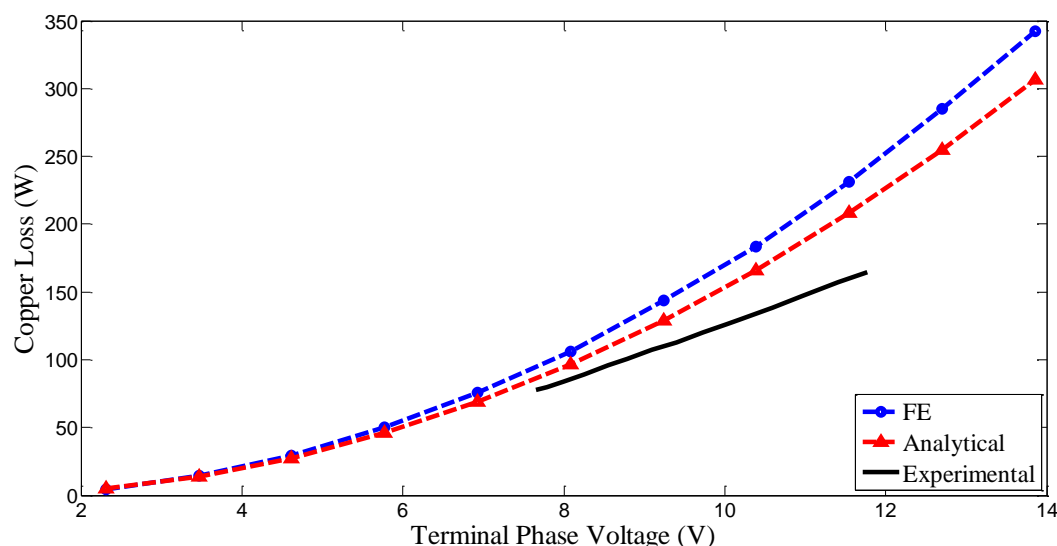
شکل ۴-۷: تغییرات جریان ورودی برحسب تغییرات ولتاژ ترمینال



شکل ۵-۷: تغییرات ضریب توان برحسب تغییرات ولتاژ ترمینال



شکل ۶-۷: تغییرات توان ورودی برحسب تغییرات ولتاژ ترمینال



شکل ۷-۷: تغییرات تلفات مسی برحسب تغییرات ولتاژ ترمینال

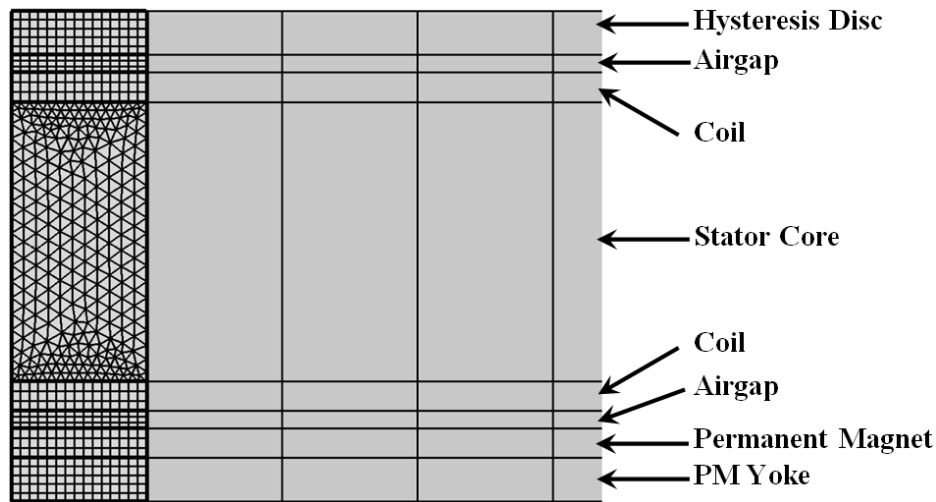
مشخصه‌های به‌دست آمده از مدل‌های تحلیلی و عددی و آزمایشات نشان می‌دهند که با افزایش ولتاژ ورودی، در اثر بزرگتر شدن حلقه هیستریزیس کاری موتور، کمیت‌های جریان ورودی، توان ورودی و تلفات همگی افزایش می‌یابند. این موضوع در مورد تمامی موتورهای هیستریزیس و PMHS صادق است.

از مقایسه نتایج مشخص می‌شود که برای هر یک از مشخصه‌های عملکردی موتور، مقادیر متناظر با دقت بسیار خوبی به هم نزدیک می‌باشند. همان‌طور که قبلاً بیان شد، دلیل اصلی اختلاف بین آنها این است که شبیه‌سازی مدل تحلیلی در شرایط حداکثر گشتاور بوده است و اجرای این شرایط در آزمایشات عملی به سادگی مقدور نمی‌باشد. هرچند که در این رساله تلاش شده است تا آزمایشات عملی تا حد ممکن در شرایط نزدیک به شرایط حداکثر گشتاور انجام گیرد.

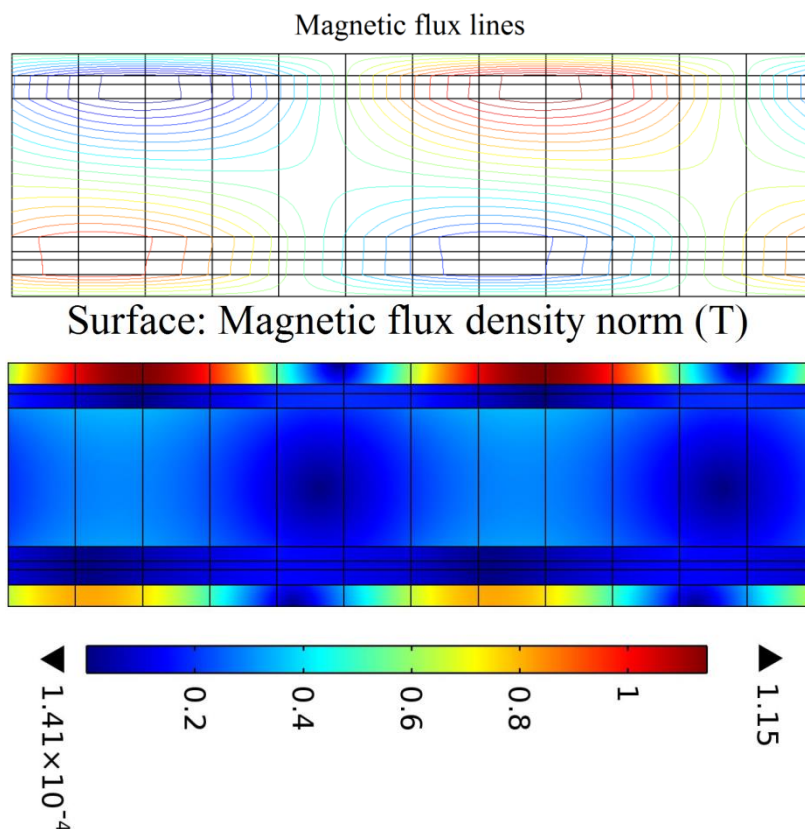
اکنون مناسب است تا نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی، شامل توزیع چگالی شار مغناطیسی و خطوط شار حول شعاع متوسط و در ضخامت محوری متوسط، در ولتاژ ۱۲ ولت ارائه شوند.

به‌منظور ایجاد مش مقارن در تمام بخش‌های ماشین، ابتدا نصف شیار فرضی (ماشین بدون شیار است) مش‌بندی شده و این الگو در تمام شیارها تکرار شده است. روند ایجاد مش در شکل ۷-۸ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که برای هسته استاتور از المان‌های مثلثی و برای سایر اجزا از المان‌های مستطیلی استفاده

شده است. این کار باعث افزایش تقارن و دقت نتایج می‌شود. توزیع چگالی شار مغناطیسی و خطوط شار مغناطیسی در شکل ۷-۹ نشان داده شده است.

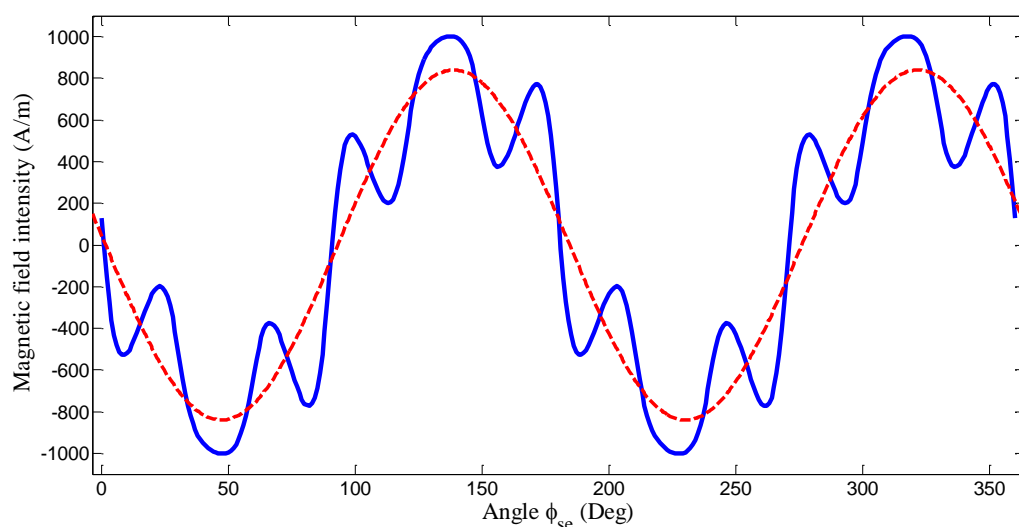


شکل ۷-۸: مش‌بندی نصف شیار فرضی موتور



شکل ۷-۹: توزیع چگالی شار مغناطیسی و خطوط شار مغناطیسی

توزیع مؤلفه محیطی شدت میدان مغناطیسی H_ϕ و موج اصلی آن نیز حول دیسک هیستریزیس و در شعاع متوسط و در ضخامت محوری متوسط دیسک به ازای چند ولتاژ ترمینال مختلف در شکل ۷-۱۰ ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که H_ϕ دارای یک سری نوسانات پرریودیک نسبتاً شدید است. اعوجاجات موجود روی شکل موج H_ϕ عمدتاً به دلیل سیم‌پیچی یک‌طبقه با گام کامل استاتور و نوسانات شار فاصله هوایی می‌باشد.



شکل ۷-۱۰: شکل موج شدت میدان مغناطیسی و هارمونیک اول آن

فصل ۸: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۸-۱- نتیجه‌گیری

هر یک از موتورهای هیستریزیس و آهنربای دائم دارای ویژگی‌های منحصربه‌فردی هستند. با ترکیب این دو موتور می‌توان به موتوری با مشخصه عملکردی بسیار درخشان دست یافت. در این رساله موتور ترکیبی هیستریزیس آهنربای دائم با ساختاری جدید معرفی شد. معایبی همچون عدم وجود گشتاور راه‌اندازی که از جمله مشکلات اصلی موتورهای آهنربای دائم محسوب می‌شود و همچنین بازده، ضریب توان و گشتاور خروجی پایین و نوسانات سرعت حول سرعت سنکرون که کاربرد موتورهای هیستریزیس را محدود ساخته‌اند، در موتور ترکیبی حاصل وجود نخواهند داشت. به‌علاوه ساختار انتخابی این رساله برای موتور PMHS منجر شده است تا مزایای ویژه موتورهای هیستریزیس (نویز کم و جریان راه‌اندازی پایین) و

موتورهای آهنربای دائم نیز در موتور ترکیبی حاصل محفوظ باقی بمانند. همچنین در این رساله دو روش مدل‌سازی تحلیلی و عددی برای پیش‌بینی عملکرد حالت دائمی موتور PMHS در شرایط حداکثر بار در سرعت سنکرون ارائه گردید. برای پیاده‌سازی این روش‌ها، دو الگوریتم تکراری معرفی شد و پیاده‌سازی آنها در محیط نرم‌افزار Matlab و با برقراری لینک آن با نرم‌افزار COMSOL صورت گرفت. همچنین یک نمونه موتور PMHS آزمایشی طراحی و ساخته شد و آزمایشات لازم بر روی این موتور انجام گرفت. از مقایسه نتایج حاصل از روش‌های مدل‌سازی تحلیلی و عددی با نتایج حاصل از آزمایشات عملی بر روی نمونه ساخته شده، مشخص می‌شود که مقادیر پیش‌بینی شده توسط روش تئوری با دقت خوبی به نتایج آزمایشات نزدیک بوده و اختلاف ناچیز بین آنها به دلیل محدودیت‌های انجام آزمایش موتور نمونه در شرایط حداکثر بار در سرعت سنکرون می‌باشد.

۸-۲- پیشنهادات

به منظور توسعه و بهره‌برداری بیشتر از نتایج حاصل از این رساله پیشنهاداتی به شرح زیر ارائه می‌گردد:

- ۱- تعمیر هرچه دقیق‌تر روش‌های مدل‌سازی ارائه شده در این رساله برای پیش‌بینی رفتار موتور PMHS نوع تخت در شرایط بار جزئی
- ۲- به کارگیری مدل‌های عددی مانند پریساج برای تقریب رفتار ماده هیستریزیس
- ۳- استفاده از الگوریتم مدل‌سازی ارائه شده و تعمیر آن به منظور مدل‌سازی حالت گذرا
- ۴- انجام روند بهینه‌سازی الگوریتم طراحی ارائه شده برای موتور PMHS نوع تخت
- ۵- تغییر ساختار ارائه شده با ایجاد شیار در سمت دیسک هیستریزیس (با توجه به محدودیت‌هایی در مراحل ساخت، عدم وجود شیار در سمت دیسک هیستریزیس منجر به افزایش بی‌رویه فاصله هوایی مؤثر شده و جریان مغناطیس‌کنندگی ماشین را افزایش می‌دهد که این امر باعث افزایش تلفات و کاهش بازده خواهد شد)

- [1] G.Wakui, "Hysteresis Motor with Reaction Torque and Its Analysis," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 98, pp. 58-67, 1978.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] M. A. Rahman and A. M. Osheiba, "Improved Performance of Polyphase Hysteresis-Reluctance Motors Fed from Single-phase Supplies," *IEEE Transactions on Industry Application*, vol. 26, no. 1, pp. 130-136, January/February 1990.
- [5] A. M. Osheiba, J. Qian, and M. A. Rahman, "Performance of Hysteresis Permanent Magnet Motors," *Electrical Machine and Power System*, vol. 16, no. 4, pp. 265-280, May 1989.
- [6] M. A. Rahman, "Combination Hysteresis Reluctance Permanent Magnet Motor". United States of America Patent 5,187,401, 16 February 1993.
- [7] M. Azizur Rahman and Ruifeng Qin,, "Starting and Synchronization of Permanent Magnet Hysteresis Motors," *IEEE Transactions on Industry Application*, vol. 32, no. 5, pp. 1183-1189, September/October 1996.
- [8] R. Qin, and M. A. Rahman,, "Magnetic Equivalent Circuit of PM Hysteresis Synchronous Motor," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 39, no. 5, pp. 2998-3000, September 2003.
- [9] Kazumi Kurihara, and M. Azizur Rahman,, "Transient Performance Analysis for Permanent-Magnet Hysteresis Synchronous Motor," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 40, no. 1, pp. 135-142, January/February 2004.
- [10] M. Azizur Rahman, and Ruifeng Qin, "A Permanent Magnet Hysteresis Hybrid Synchronous Motor for Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 44, no. 1, pp. 46-53, February 1997.
- [11] R. Qin, M. A. Rahman, "DSP Based Torque and Speed Controls of the Permanent Magnet Hysteresis Synchronous Motor," in *IEEE Conference*, 1997.
- [12] Jianhua Qian, and M. Azizur Rahman, "Analysis of Field Oriented Control for Permanent Magnet Hysteresis Synchronous Motors," *IEEE Transactions on Industry*

- Applications*, vol. 29, no. 6, pp. 1156-1163, November/December 1993.
- [13] 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.
- [14] H. Lesani, A. Darabi, Z. Nasiri Gheidari and F. Tootoonchian, "Very Fast Field Oriented Control for Permanent Magnet Hysteresis Synchronous Motor," *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 34-40, January 2006.
- [15] S. F. Rabbi and M. A. Rahman, "Equivalent Circuit Modeling of a Hysteresis Interior Permanent Magnet Motor for Electric Submersible Pump," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 52, no. 7, pp. 1-4, 2016.
- [16] S. F. Rabbi, M. Halloran, T. LeDrew, A. Matchem and M. A. Rahman, "Modeling and V/F control of a Hysteresis Interior Permanent Magnet Motor," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 2, pp. 1891-1901, 2016.
- [17] H. Hatami, M. B. Bannae Sharifian and M.R. Feyzi, "A new method for improved design of low speed axial flux permanent magnet machines used in HEV," *Tabriz Journal of Electrical Eng.*, vol. 45, no. 2, pp. 51-64, 2015.
- [18] م. ح. صادقی، "بهینه‌سازی ماشین‌های پسماند تخت چند طبقه، طراحی و شبیه‌سازی،" پایان‌نامه [۱۸] کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۸۹.
- [19] C.P.Steinmetz, *Theory and Calculation of Electrical Apparatus* (a book), 1917.
- [20] B.R.Teare, "Theory of Hysteresis Motor Torque," *AIEE*, vol. 59, pp. 907-912, March 1940.
- [21] H.C.Roters, "The Hysteresis Motor-Advances Which Permit Economical Fractional Horse Power Rating," *AIEE*, vol. 66, pp. 1419-1430, August 1947.
- [22] M.A.Copeland, G.R.Slemon, "An Analysis of Hysteresis Motor: I-Analysis of the Idealized Machine," *AIEE*, pp. 34-42, April 1963.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] M. A. Rahman, "Analytical Models for Polyphase Hysteresis Motor," in *IEEE Power Engineering Society*, New York, January/February 1971.
- [26] G.Cannistra and M.Sylos, "A Model for the Hysteresis Motor Analysis," *Electric Energy Conference Adelaide*, pp. 648-654, October 1987.

- [27] F. A.A.Zaher, "An Analytical Solution for the Field of a Hysteresis Motor Based on Complex Permeability," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 5, pp. 156-163, March 1990.
- [28] D. SCHIEBER, "Asynchronous Performance of Hysteresis Motor," *Journal of The Franklin Institute*, vol. 299, pp. 433-447, June 1975.
- [29] M.A.Rahman, "Field Analysis of Polyphase Hysteresis Motor," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 99, pp. 1164-1171, May/June 1980.
- [30] K.A.Macfaden, "Vector Permeability," *IEE*, vol. 94, pp. 407-414, 1947.
- [31] T.Ishikawa, T.Kataoka, "Basic Analysis of Disc-Type Hysteresis Motor," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 101, pp. 55-62, 1981.
- [32] V.I.Perov, "Synchronuos Motor with Excitation by Permanent Magnet with Hysteresis Loop," *Vestnik, Elektropomyshlennosti*, vol. 3, p. 32, 1959.
- [33] H. Papst.Patent 8615, 1959.
- [34] 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, April 1973.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] D. O'Kelly, "Hysteresis motor with overexcitation and solid-state control," *PROC. IEE*, vol. 125, pp. 288-292, APRIL 1978.
- [38] G.Wakui, S.Nishino, "Performance of Hysteresis Motor after Short-Duration Overexcitation (Underexcitation) and Its Analysis," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 101, pp. 100-109, June 1981.
- [39] S.T.Clurman, "On Hunting In Hysteresis Motors And New Damping Techniques New Damping Techniques," *IEEE Transactions on Magnetics*, pp. 512-517, September 1971.
- [40] T.Horii, N.Yuge, G.Wakui, "Analysis of a Hysteresis Motor on Asynchronous Speed Using Complex Permeability," *IEEE Translation Journal on Magnetics in Japan*, vol. 9, pp. 135-142, March/April 1994.
- [41] G.Wakui, K.Ichinose, T.Horii, "Analysis of Condenser Split-Phase Hysteresis Motor," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 103, pp. 105-112, 1983.
- [42] D.O'Kelly, "Computation of Hysteresis Motor Performance Including Negative

- Sequence Excitation," in *IEE Proceeding Electrical Power Application*, March 1996.
- [43] T.Kubota, G.Wakui, M.Itagaki, "Hysteresis Motor Using Magnetically Anisotropic Fe–Cr–Co Magnet," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 34, no. 6, pp. 3888-3896, November 1998.
- [44] N.Galan, "The Hysteresis Motor with an Anisotropic Rotor," *IEEE Power Engineering Review*, Vols. 87 WM 212-4, p. 36, December 1987.
- [45] م. صنعتی، "طراحی و مدل‌سازی موتور سنکرون پسماند نوع تخت دو روتوره،" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۸۷.
- [46] م. خسروی، "تحلیل عملکرد یک ترانسفورماتور با استفاده از مدل غیر خطی و چند مقداره پریساج،" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۸۸.
- [47] ز. نصیری، "بررسی موتورهای هیستریزس سنکرون،" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۱۳۸۵.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] 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*.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] زهرا نصیری قیداری، حمید لسانی، احمد دارابی و فرید توتونچیان، "تحلیل دینامیکی موتور هیستریزس سنکرون آهنربای دائم با در نظر گرفتن اثر فوکو،" *مجله فناوری و آموزش*، جلد ۲، شماره ۱، pp. 25-34, 1386.

- [55] H. Lesani, A. Darabi, Z. Nasiri Gheidari, and F. Tootoonchian, "Very Fast Field Oriented Control for Permanent Magnet Hysteresis Synchronous Motor," *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 34-40, 2006.
- [56] J. Kinnunen, "Direct-on-Line Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator Static and Dynamic Performance," Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland, 2007.
- [57] A. Bellara, Y. Amara, G. Barakat and P. Reghem, "Analytical Modeling of the Magnetic Field in Axial Flux Permanent Magnet Machines with Semi-Closed Slots at No Load," in *International Conference on Electrical Machines, ICEM*, Rome, 2010.
- [58] Fabrizio Marignetti, Giovanni Tomassi, Piergiacomo Cancelliere, Vincenzo Delli Colli, Roberto Di Stefano, Maurizio Scarano, "Electromagnetic and Mechanical design of a Fractional-slot-windings Axial-flux PM synchronous machine with Soft Magnetic Compound Stator," in *41st Industry Applications Conference IAS*, 2006.
- [59] A. Parviainen, J. Pyrhönen, M. Niemelä, "Axial Flux Interior Permanent Magnet Synchronous Motor With Sinusoidally Shaped Magnets," in *10th International Symposium on Electromagnetic Fields in Electrical Engineering Cracow, ISEF*, Poland, 2001.
- [60] Jacek F. Gieras, Rong-Jie Wang and Maarten J. Kamper, *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*, Springer, Second edition 2008.
- [61] M. Aydin, S. Huang and T. A. Lipo, "Axial Flux Permanent Magnet Disc Machines: A Review," University of Wisconsin-Madison, Wisconsin, 2004.
- [62] F. Sahin, "Design and Development of a High-Speed Axial-Flux Permanent- Magnet Machine," Technische Universiteit Eindhoven, 2001.
- [63] A. Parviainen, "Design of Axial-Flux Permanent- Magnet Low-Speed Machines and Performance Comparison between Radial-Flux and Axial-Flux Machine," Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland, 2005.
- [64] Metin Aydin, Surong Huang, Thomas A. Lipo, "A New Axial Flux Surface Mounted Permanent Magnet Machine Capable of Field Control," in *Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting*, 2002.
- [65] S. Huang, M. Aydin, and T. A. Lipo, "Comparison of (Non-Slotted and Slotted) Surface Mounted PM Motors and Axial Flux Motors for Submarine ship Drives," in *University of Wisconsin-Madison, 3rd Naval Symposium on Electrical Machines*, Wisconsin, 2000.
- [66] S. Huang, M. Aydin, and T. A. Lipo, "Torque Quality Assessment and Sizing Optimization for Surface Mounted Permanent Magnet Machines," in *Industry Applications Conference, Thirty-Sixth IAS Annual Meeting*, 2001.
- [67] S. Huang, J. Luo, F. Leonardi and T.A. Lipo, "A Comparison of Power Density for Axial Flux Machines Based on General Purpose Sizing Equations," *IEEE Transactions*

- on Energy Conversion*, vol. 14, no. 2, pp. 185-192, 1999.
- [68] T. Ishikawa and T. Kataoka, "Basic analysis of disc-type hysteresis motors," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 101, no. 6, pp. 55-62, 1981.
- [69] J. Gieras, *Permanent magnet motor technology: design and applications*, 3rd ed., CRC Press, 2010.
- [70] J. Pyrhonen, T. Jokinen, and V. Hrabovcov, *Design of rotating electrical machines*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Ltd, 2014.
- [71] M. A. Rahman, "Analytical Models for Polyphase Hysteresis Motor," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol. 92, no. 1, pp. 237-242, 1973.
- [72] م. نیکخو، "انتخاب فرکانس و تعداد فازها برای طراحی و مونتاژ ماشین شار محوری آهنربای دائم (AFPM) سرعت پایین،" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۲.
- [73] Z.-Q. Zhu, "The Electromagnetic Performance of Brushless Permanent Magnet DC Motors - With Particular Reference to Noise and Vibration," University of Sheffield, May 1991.
- [74] Ahmad Darabi, Mohammad Hossein Sadeghi, and Amir Hassannia, "Design Optimization of Multistack Coreless Disk-Type Hysteresis Motor," *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, vol. 26, no. 4, pp. 1081-1087, 2011.

Abstract

In this thesis, a new structure for permanent magnet hysteresis synchronous (PMHS) motor is introduced. Considering the characteristics of the hysteresis and permanent magnet (PM) motors, it seems that these two motors are complements of each other. Thus, their combination yields a motor with an excellent performance. In order to preserve the major advantages of the both motors in the new motor, a disc type slotless structure is chosen. Moreover, this report presents a new analytical and finite element method for modelling of the PMHS motor. In the analytical modelling method, mathematical equations are obtained by using Ampere's circuital law, flux continuity law and Faraday's law by which the air-gap voltage and exciting current of the motor can be evaluated. To implement this method, a new iterative algorithm is proposed. This algorithm consists of one iteration loop for each input voltage to find the maximum flux density of the operational hysteresis loop of the motor. In the finite element modelling method a new iterative algorithm is used. To implement this method a programming software has been linked to finite element software because of its limitation in modelling of hysteresis phenomena. Furthermore, this study presents a new design algorithm that allows user to determine the present of combination of the hysteresis and PM motors in the new hybrid motor. Validity of the proposed methods is checked by experimental results. A reasonable close agreement between the two is obtained and good performance of PMHS motor is verified.

Keywords: Hysteresis motor, PM motor, Analytical modeling, FE modeling, Hybrid motor



Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical Engineering and Robotic

PhD Dissertation in Power Electronic and Machine Engineering

**Design and Performance Analysis of Disc Type PMHS
Motor**

By: Ali Behniafar

**Supervisor:
Dr. Ahmad Darabi**

August 2017