

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی برق و رباتیک

عنوان پایان نامه:

طراحی و مدلسازی موتور سنکرون پسماند نوع تخت دو روتوره

نگارش:

محسن صنعتی مقدم

استاد راهنما:

دکتر احمد دارابی

استاد مشاور:

پرفسور حمید لسانی

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد مهندسی برق-قدرت

تابستان ۸۷

تقدیم به

پدر بزرگوارم

که پیوسته تشوق و همراهم بود.

و مادر عزیزم

که دعای خیرش را بدرقه راهم کرد.

تقدیر و تشکر:

لازم می‌دانم از زحمات بیدریغ استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر احمد دارابی تشکر نمایم. بدون تردید صبر و بردباری ایشان در برابر خطاهای این فرزند حقیر ستودنی است. همچنین از جناب آقای پرفور حمید لسانی به خاطر راهنمایی‌های ارزشمندشان تشکر می‌نمایم. از تمام اساتید بزرگوار که در طول تحصیل پیوسته روغنک راهم بودند تشکر می‌نمایم. از جناب آقای دکتر حیدر طوسیان شادیز و جناب آقای دکتر یوسف علی‌نژاد به خاطر قبول زحمت داوری این پایان‌نامه کمال تشکر را دارم.

سپاس ویژه خود را تقدیم جناب آقای مهندس فضل‌الله صنعتی مقدم به خاطر کمک‌های بیدریغ‌شان در ساختن می‌نمایم. لازم است از مهندس تیمور قسبری به خاطر سپیکری‌های مجدانه‌شان تشکر نمایم. در پایان از دوستان عزیزم جناب آقای مهندس مغز داودی، جناب آقای مهندس مهدی داودی، جناب آقای مهندس احسان ریحانی، جناب آقای مهندس هاشم یوسفی جاوید و جناب آقای مهندس علی ساریحانی به خاطر همراهی‌هایشان تشکر می‌نمایم.

چکیده:

موتورهای پسماند نوعی از موتورهای سنکرون بدون جاروبک هستند که در توان هایی در حدود کسری از اسب بخار کاربرد زیادی یافته اند. امروزه با توسعه علم مربوط به مواد مغناطیس دائم سخت شده و مناسب تر شدن قیمت تمام شده آنها، موتورهای پسماند کاربردهای بیشتری پیدا کرده است. موتورهای پسماند ویژگی های منحصر به فردی همانند گشتاور حین کار ثابت، جریان راه اندازی کم و عملکرد بدون نویز دارند. ساختار ساده و مستحکم روتور، جریان راه اندازی پایین (در حدود ۱/۲ تا ۱/۵ جریان نامی)، گشتاور ثابت و عملکرد نرم و بدون نویز از خصوصیات برجسته موتورهای پسماند هستند که این موتورها را برای استفاده در کاربرد های سرعت بالا مناسب نموده اند. اگرچه راندمان و ضریب توان نسبتا کم از معایب ذاتی موتور های پسماند بشمار می آیند، آنها را می توان با طراحی خوب و انتخاب مناسب ماده روتور بهبود بخشید. در این پایان نامه دو موتور جدید با عناوین موتور پسماند دو روتوره بدون هسته^۱ CDDHM و موتور پسماند نوع تخت دو روتوره بدون شیار^۲ SDDHM معرفی شده و عملکرد آنها تحلیل می شود. با استفاده از تحلیل الکترومغناطیسی مدار معادل حالت دائمی مبتنی بر پارامتر های طراحی برای هر دو موتور به دست می آید. همچنین یک الگوریتم برای شبیه سازی کامپیوتری و پیش بینی عملکرد موتورها در حالت دائمی ارائه می شود. فولاد آلیاژی Fe-Cr-Ni-Mo-C با ترکیبات آهن، کرم، نیکل، مولیبدن و کربن به عنوان یک ماده جدید برای ساخت روتور موتورهای پسماند معرفی شده و مشخصه مغناطیسی این آلیاژ با چندین ماده دیگر که به طور معمول در ساخت روتور موتورهای پسماند کاربرد دارند، مقایسه می شود. الگوریتم ژنتیک به منظور بهینه سازی طراحی موتورهای CDDHM و SDDHM به کار گرفته شده و سرانجام موتور ها بهینه شده با استفاده از آلیاژ های مختلف مواد پسماندی در روتور با یکدیگر مقایسه می شوند.

1 - Coreless Dual Rotor Disc Type Hysteresis Motor

2 - Slotless Dual Rotor Disc Type Hysteresis Motor

فهرست شکل ها.....	ه
فهرست جداول.....	ط
فصل اول: مقدمه.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- پدیده پسماند.....	۲
۳-۱- مکانیزم تولید گشتاور در موتورهای پسماند.....	۷
۴-۱- ویژگیهای خاص و کاربردهای موتور پسماند.....	۱۰
۵-۱- نتیجه گیری.....	۱۲
فصل دوم: مواد مغناطیس دائم، کاربرد در موتور پسماند و ساختارهای موتور پسماند.....	۱۴
۱-۲- مقدمه.....	۱۵
۲-۲- مواد مغناطیس دائم.....	۱۵
۳-۲- مواد مغناطیس دائم مورد استفاده در موتورهای پسماند.....	۱۸
۴-۲- ساختارهای موتور پسماند.....	۲۰
۵-۲- دو ساختار پیشنهادی برای موتور پسماند نوع تخت.....	۲۴
۱-۵-۲- موتور پسماند نوع تخت دو روتوره بدون هسته.....	۲۴
۲-۵-۲- موتور پسماند نوع تخت دو روتوره بدون شیار.....	۲۷
۶-۲- نتیجه گیری.....	۳۱
فصل سوم: مدلسازی موتورهای پسماند تخت دو روتوره.....	۳۲
۱-۳- مقدمه.....	۳۳
۲-۳- تحلیل عملکرد موتور پسماند تخت دو روتوره.....	۳۳
۳-۳- فرضیات در نظر گرفته شده.....	۳۴
۴-۳- موتور پسماند تخت دو روتوره بدون هسته CDDHM.....	۳۶
۱-۴-۳- تحلیل توزیع چگالی شار.....	۳۶
۲-۴-۳- مسائل خاص در موتور CDDHM.....	۴۰
۳-۴-۳- مدار معادل موتور پسماند تخت دو روتوره بدون هسته.....	۴۱

۴۴	۳-۴-۴- محاسبه مقاومت استاتور.....
۴۵	۳-۴-۵- محاسبه راکتانس پراکندگی.....
۴۹	۳-۵-۵- موتور پسماند تخت دو روتوره بدون شیار SDDHM.....
۴۹	۳-۵-۱- تحلیل توزیع چگالی شار.....
۵۳	۳-۵-۲- مدار معادل موتور پسماند تخت دو روتوره بدون شیار.....
۵۶	۳-۵-۳- تلفات آهن.....
۵۷	۳-۵-۴- محاسبه پراکندگی.....
۵۸	۳-۶- نتیجه گیری.....
۶۰	فصل چهارم: ملاحظات طراحی و بهینه سازی طراحی.....
۶۱	۴-۱- مقدمه.....
۶۱	۴-۲- ورودی های مسئله طراحی بهینه.....
۶۲	۴-۳- خروجی های مسئله طراحی.....
۶۴	۴-۴- مسائل خاص طراحی در موتور های CDDHM و SDDHM.....
۶۵	۴-۵- قید های مسئله طراحی.....
۶۵	۴-۶- بهینه سازی طراحی.....
۶۶	۴-۷- الگوریتم ژنتیک.....
۶۹	۴-۷-۱- تولید جمعیت اولیه.....
۷۰	۴-۷-۲- محاسبه شایستگی یا تابع هدف.....
۷۲	۴-۸- اعمال قید ها.....
۷۲	۴-۹- سایر مراحل الگوریتم بهینه سازی.....
۷۳	۴-۱۰- نتیجه گیری.....
۷۴	فصل پنجم: محاسبه عملکرد موتورهای CDDHM و SDDHM و طراحی بهینه آنها.....
۷۵	۵-۱- مقدمه.....
۷۵	۵-۲- الگوریتم محاسبه عملکرد.....
۷۷	۵-۳- بررسی صحت مدل تحلیلی.....

۷۸.....	۴-۵- اثر برخی پارامتر های طراحی بر عملکرد موتور CDDHM
۸۰.....	۴-۵-۱- نسبت شعاع داخلی به شعاع خارجی.....
۸۳.....	۴-۵-۲- قطر هادی.....
۸۶.....	۵-۵- اثر برخی پارامتر های طراحی بر عملکرد موتور SDDHM
۸۸.....	۵-۶- مقایسه ای بین مشخصه های مواد پسماند.....
۹۳.....	۵-۷- طراحی بهینه موتور CDDHM
۹۸.....	۵-۸- مقایسه موتور های CDDHM بهینه.....
۱۰۰.....	۵-۹- طراحی بهینه موتور SDDHM
۱۰۱.....	۵-۱۰- مقایسه موتور های SDDHM بهینه.....
۱۰۲.....	۵-۱۱- مقایسه موتورهای CDDHM و SDDHM
۱۰۳.....	۵-۱۲- نتیجه گیری.....
۱۰۵.....	فصل ششم: جمع بندی و پیشنهادات.....
۱۰۶.....	۶-۱- جمع بندی.....
۱۰۷.....	۶-۲- پیشنهادات.....
۱۰۸.....	مراجع.....

- شکل ۱-۱ تغییرات چگالی شار بر حسب شدت میدان مغناطیسی [۲]..... ۳
- شکل ۲-۱ هسته و سیم پیچی حامل جریان [۲]..... ۳
- شکل ۳-۱ منحنی شدت میدان و چگالی شار در یک ماده مغناطیسی..... ۴
- شکل ۴-۱ اختلاف فاز شدت میدان و مولفه اصلی چگالی شار در یک ماده مغناطیسی..... ۴
- شکل ۵-۱ منحنی هیستریزس با حلقه های جزئی [۴]..... ۶
- شکل ۶-۱ مکانیزم تولید گشتاور در موتور پسماند..... ۸
- شکل ۷-۱ مشخصه گشتاور موتور پسماند..... ۹
- شکل ۱-۲ منحنی مغناطیس شونده برای مواد دیامغناطیس پارامغناطیس و فرومغناطیس [۱۳]..... ۱۶
- شکل ۲-۲ الف: منحنی هیستریزس برای مواد فرومغناطیس نرم ب: منحنی هیستریزس برای مواد فرومغناطیس سخت [۱۳]..... ۱۶
- شکل ۳-۲ منحنی هیستریزس با حلقه های جزئی [۴]..... ۱۹
- شکل ۴-۲ الف: موتور پسماند استوانه ای شار محیطی ب: موتور پسماند استوانه ای شار شعاعی..... ۲۱
- شکل ۵-۲ موتور پسماند استوانه ای معکوس..... ۲۲
- شکل ۶-۲ موتور پسماند آهنربای دائم [۲۱]..... ۲۳
- شکل ۷-۲ موتور پسماند نوع تخت شار محیطی و نحوه تشکیل قطب ها در آن..... ۲۴
- شکل ۸-۲ ساختار موتور پسماند نوع تخت دو روتوره بدون هسته..... ۲۵
- شکل ۹-۲ مسیر شار در موتور پسماند نوع تخت دو روتوره بدون هسته..... ۲۵
- شکل ۱۰-۲ ساختار موتور پسماند نوع تخت دو روتوره بدون شیار..... ۲۸
- شکل ۱۱-۲ مسیر شار در موتور پسماند نوع تخت دو روتوره بدون شیار..... ۲۹
- شکل ۱-۳ الف: مسیر شار در موتور استوانه ای ب: مسیر شار در موتور تخت (شعاع داخلی) ج: مسیر شار در موتور تخت (شعاع خارجی)..... ۳۴
- شکل ۲-۳ مسیر بسته مغناطیسی شامل هر دو روتور در موتور CDDHM..... ۳۷
- شکل ۳-۳ مسیر شار در جزء دیفرانسیلی $d\phi$ فاصله هوایی و روتور موتور CDDHM..... ۳۸
- شکل ۴-۳ دیاگرام فازوری جریان ها و ولتاژ فاز a موتور CDDHM..... ۴۲

- شکل ۳-۵ مدار معادل یک فاز موتور پسماند تخت دو روتوره بدون هسته CDDHM.....۴۳
- شکل ۳-۶ استاتور و یک حلقه از سیم پیچی موتور CDDHM.....۴۴
- شکل ۳-۷ توزیع سیم پیچی در یک شیار مستطیلی [۳۱].....۴۵
- شکل ۳-۸ مسیر شار در موتور CDDHM.....۴۷
- شکل ۳-۹ مدار معادل مغناطیسی موتور CDDHM.....۴۷
- شکل ۳-۱۰ مدار معادل مغناطیسی موتور CDDHM.....۴۸
- شکل ۳-۱۱ دوگان الکتریکی مدار معادل مغناطیسی شکل ۳-۱۰.....۴۸
- شکل ۳-۱۲ مدار معادل الکتریکی موتور CDDHM.....۴۸
- شکل ۳-۱۳ مسیر بسته مغناطیسی شامل هر دو روتور و استاتور در موتور SDDHM.....۵۰
- شکل ۳-۱۴ مسیر شار فاصله هوایی، شار روتور و شار استاتور در جزء دیفرانسیلی $d\phi$ در موتور SDDHM.....۵۱
- شکل ۳-۱۵ مدار معادل موتور پسماند نوع دو روتوره بدون شیار.....۵۵
- شکل ۳-۱۶ تلفات بر حسب فرکانس و چگالی شار برای یک نمونه هسته.....۵۶
- شکل ۳-۱۷ مسیر شار در موتور SDDHM.....۵۷
- شکل ۳-۱۸ مدار مغناطیسی موتور SDDHM.....۵۸
- شکل ۴-۱ فلوچارت الگوریتم ژنتیک.....۶۸
- شکل ۲-۴ فلوچارت الگوریتم محاسبه راندمان (شایستگی) برای هر یک از اعضاء جمعیت اولیه و نسل های بعدی برای موتور های CDDHM و SDDHM.....۷۱
- شکل ۵-۱ فلوچارت محاسبه عملکرد موتورهای پسماند CDDHM و SDDHM.....۷۶
- شکل ۵-۲ دیسک ای روتور و یک نمونه موتور CDDHM [۳۵].....۷۷
- شکل ۵-۳ دیسک روتور و یک نمونه موتور SDDHM [۳۵].....۷۷
- شکل ۵-۴ مقاومت R_{h1} بر حسب ولتاژ ورودی موتور CDDHM نمونه.....۷۹
- شکل ۵-۵ اندوکتانس X_{h1} بر حسب ولتاژ ورودی موتور CDDHM نمونه.....۸۰
- شکل ۵-۶ راندمان بر حسب ولتاژ ورودی در موتور CDDHM برای مقادیر $K = Ri / Ro$ مختلف.....۸۱
- شکل ۵-۷ ضریب توان بر حسب ولتاژ ورودی موتور CDDHM برای مقادیر $K = Ri / Ro$ مختلف.....۸۲

- شکل ۵-۸ جریان بر حسب ولتاژ ورودی موتور CDDHM برای مقادیر $K = Ri / Ro$ مختلف.....۸۳
- شکل ۵-۹ راندمان بر حسب ولتاژ ورودی برای قطر های مختلف هادی بکار رفته در موتور CDDHM.....۸۴
- شکل ۵-۱۰ ضریب توان بر حسب ولتاژ ورودی برای قطر های مختلف هادی بکار رفته در موتور CDDHM.....۸۵
- شکل ۵-۱۱ جریان بر حسب ولتاژ ورودی برای قطر های مختلف هادی بکار رفته در موتور CDDHM.....۸۵
- شکل ۵-۱۲ مقاومت R_{h1} بر حسب ولتاژ ورودی موتور SDDHM.....۸۷
- شکل ۵-۱۳ اندوکتانس X_{h1} بر حسب ولتاژ ورودی موتور SDDHM.....۸۷
- شکل ۵-۱۴ راندمان بر حسب ولتاژ ورودی موتور SDDHM برای مقادیر $K = Ri / Ro$ مختلف.....۸۸
- شکل ۵-۱۵ منحنی مغناطیس شونده برای چند ماده پسماند و مقادیر پیک حلقه نرمال برای هر کدام.....۹۰
- شکل ۵-۱۶ پرمابیلیته نسبی و پرمابیلیته حلقه نرمال چند ماده پسماند بر حسب پیک شدت میدان مغناطیسی.....۹۰
- شکل ۵-۱۷ زاویه های تاخیر هیستریزیس بر حسب چگالی شار برای چند ماده پسماند.....۹۱
- شکل ۵-۱۸ سطح های حلقه هیستریزیس بر حسب چگالی شار چند ماده پسماند.....۹۲
- شکل ۵-۱۹ راندمان خروجی بر حسب تکرار در الگوریتم ژنتیک برای دستیابی به راندمان ماکزیمم برای موتور CDDHM ۵۰ هرتز و با استفاده از مواد پسماندی متفاوت برای روتور.....۹۴
- شکل ۵-۲۰ راندمان بر حسب ولتاژ ورودی موتورهای CDDHM با پارامترهای طراحی بهینه جدول ۳-۵.....۹۵
- شکل ۵-۲۱ جریان ورودی بر حسب ولتاژ ورودی موتورهای CDDHM با پارامترهای طراحی بهینه جدول ۳-۵.....۹۶
- شکل ۵-۲۲ توان ورودی بر حسب ولتاژ ورودی موتورهای CDDHM با پارامترهای طراحی بهینه جدول ۳-۵.....۹۶

شکل ۲۳-۵ مقایسه راندمان و ضریب توان برای موتور های CDDHM با طراحی بهینه جدول های	۳-۵ و ۴-۵.....
۹۸.....	
شکل ۲۴-۵ مقایسه حجم ماده استفاده شده در روتور موتور های CDDHM با توان خروجی ۲۵۰	
وات در فرکانس ۵۰ هرتز.....	۹۹.....
شکل ۲۵-۵ مقایسه حجم ماده استفاده شده در روتور موتور های CDDHM با توان خروجی ۱۰۰۰	
وات در فرکانس ۱۰۰۰ هرتز.....	۱۰۰.....
شکل ۲۶-۵ مقایسه راندمان و ضریب توان برای موتور های SDDHM با پارامتر های طراحی بهینه	
جدول ۴-۵.....	۱۰۲.....
شکل ۲۷-۵ مقایسه راندمان و ضریب توان برای موتور های CDDHM و SDDHM با پارامتر های	
طراحی بهینه.....	۱۰۳.....

جدول ۱-۵ مشخصات موتور CDDHM نمونه..... ۷۸

جدول ۲-۵ مشخصات موتور SDDHM نمونه..... ۸۶

جدول ۳-۵ مشخصات موتور های CDDHM بهینه با فرکانس ۵۰ هرتز..... ۹۴

جدول ۴-۵ مشخصات موتور های CDDHM بهینه با فرکانس ۱۰۰۰ هرتز..... ۹۷

جدول ۵-۵ مشخصات موتور های SDDHM بهینه..... ۱۰۱

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

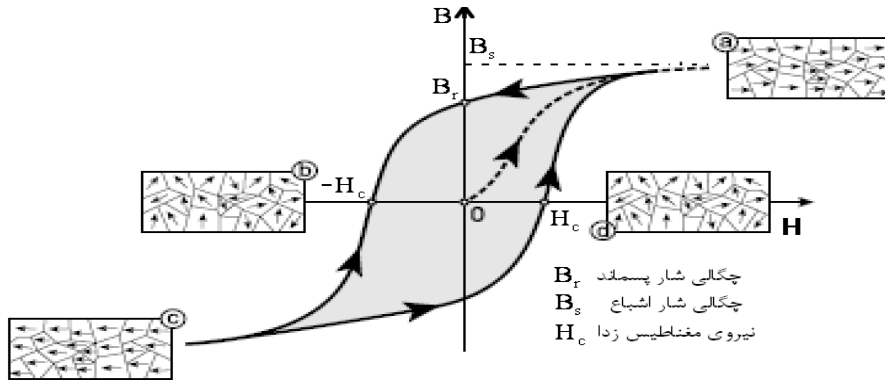
موتور پسماند^۱ یک موتور سنکرون است که بر اساس پدیده پسماند مغناطیسی کار می کند. معمولاً پدیده پسماند (هیستریزیس^۲) در ماشین های الکتریکی باعث ایجاد تلفات می شود اما در موتور پسماند این پدیده باعث ایجاد گشتاور الکترومغناطیسی می گردد. پدیده هیستریزیس تاخیر فاز بین تاثیر میدان مغناطیسی بر ماده پسماند و چگالی شار ناشی از آن می باشد. در حقیقت همین تاخیر فاز، گشتاور موتور پسماند را که متناسب با سطح حلقه هیستریزیس و حجم روتور می باشد بوجود می آورد. از آنجا که عملکرد این موتور بر اساس پدیده پسماند در مواد مغناطیس دائم است در این فصل ابتدا به طور مختصر در مورد پدیده پسماند صحبت خواهیم کرد. سپس اساس عملکرد موتور پسماند و کاربرد های این موتور بررسی خواهد شد.

۱-۲- پدیده پسماند

هنگامی که یک ماده مغناطیسی تحت تاثیر یک میدان مغناطیسی متناوب قرار می گیرد پدیده پسماند به وجود می آید. این پدیده ناشی از ثابت زمانی است که حوزه های مغناطیسی ماده به خاطر جهت یافتن یا جهت دادن به خود در اثر شدت میدان مغناطیسی بروز می دهند. به عبارت دیگر می توان گفت بین اعمال میدان مغناطیسی بر ماده و ظهور چگالی شار تاخیر فاز وجود دارد. شکل ۱-۱ تغییرات چگالی شار را بر حسب شدت میدان مغناطیسی و رفتار حوزه های مغناطیسی را در شرایط مختلف نشان می دهد [۱].

1 - Hysteresis Motor

2 - Hysteresis



شکل ۱-۱ تغییرات چگالی شار بر حسب شدت میدان مغناطیسی [۲].

در شکل ۱-۱ محل تقاطع منحنی با محور شدت میدان مغناطیسی، نیروی مغناطیسی زدا^۱ نامیده شده و محل تقاطع آن با محور چگالی شار به نام چگالی شار پسماند معروف می باشد. اگر فرض کنیم که در مدار شکل ۲-۱ جریان $i(t)$ سینوسی با فرکانس f باشد آنگاه شدت میدان مغناطیسی ایجاد شده در هسته سلونوئید برابر خواهد بود با:

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

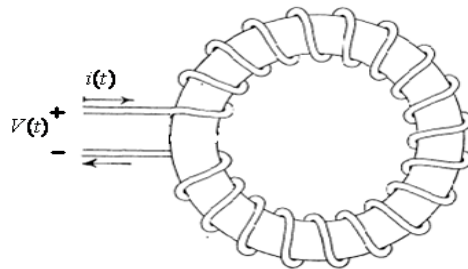
$$\oint H(t) dl = ni(t) \quad (2-1)$$

$$H(t) = H_{\max} \sin(\omega t) = \frac{nI_m}{l} \sin(\omega t) \quad (3-1)$$

که در آن:

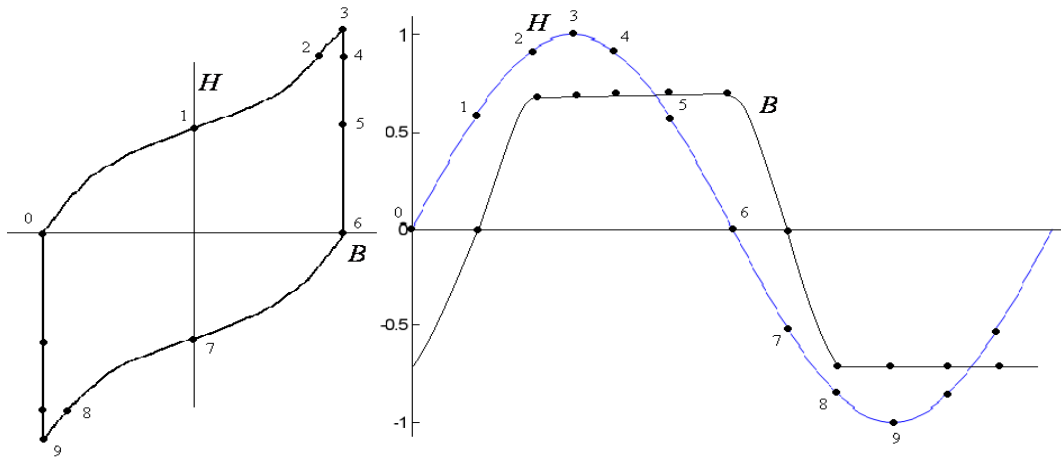
n : تعداد دور سیم پیچی

l : طول مسیر مغناطیسی هسته

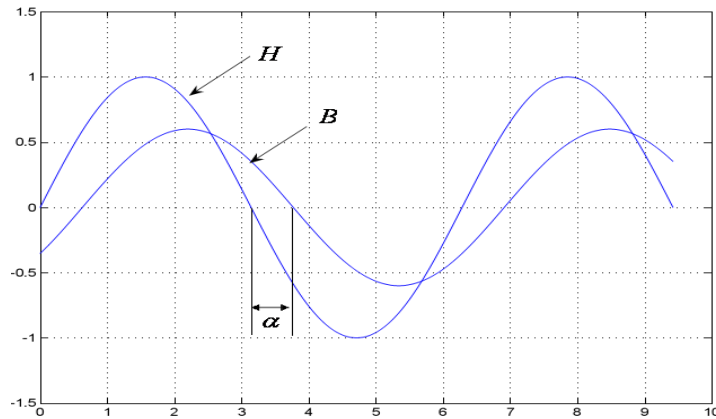


شکل ۲-۱ هسته و سیم پیچی حامل جریان [۲].

بنابراین $H(t)$ سینوسی و با جریان همفاز است. با فرض سینوسی بودن $H(t)$ با در نظر گرفتن منحنی غیر خطی هیستریزیس می توان چگالی شار $B(t)$ را به دست آورد. چگالی شار بر حسب زمان غیرخطی و پرپودیک است و اگر سری فوریه $B(t)$ نوشته شود، $B(t)$ فاقد هارمونیک های زوج خواهد بود و مولفه اصلی چگالی شار با شدت میدان مغناطیسی به اندازه زاویه α اختلاف فاز دارد. در شکل ۳-۱ منحنی چگالی شار بر حسب زمان با روش نقطه یابی به دست آمده است و شکل ۴-۱ اختلاف فاز شدت میدان مغناطیسی و مولفه اصلی چگالی شار میدان مغناطیسی را نشان می دهد.



شکل ۳-۱ منحنی شدت میدان و چگالی شار در یک ماده مغناطیسی



شکل ۴-۱ اختلاف فاز شدت میدان و مولفه اصلی چگالی شار در یک ماده مغناطیسی

پس داریم:

$$B(t) = B_{MAX} \sin(\omega t - \alpha) \quad (۴-۱)$$

$$\varphi(t) = SB_{MAX} \sin(\omega t - \alpha) \quad (۵-۱)$$

$\varphi(t)$ شار هسته و S سطح مقطع هسته می باشد.

بطوریکه ولتاژ القائی دو سر سیم پیچی برابر خواهد بود با:

$$v(t) = n \frac{d\varphi(t)}{dt} = 2n \pi f S B_{MAX} \cos(\omega t - \alpha) \quad (۶-۱)$$

که در آن n تعداد دور سیم پیچی است.

اکنون می توان فقط با در نظر گرفتن مولفه اصلی توان ورودی را به صورت زیر بدست آورد.

$$\bar{V} = \sqrt{2} \pi f n S B_{MAX} \angle 0 \quad (۷-۱)$$

$$\bar{I} = \frac{H_{MAX} l}{n \sqrt{2}} \angle (\alpha - \frac{\pi}{2}) \quad (۸-۱)$$

$$P = \bar{V} \bar{I} \cos(\alpha - \frac{\pi}{2}) = \pi f S B_{MAX} H_{MAX} l \cos(\alpha - \frac{\pi}{2}) \quad (۹-۱)$$

پس می توان نوشت:

$$p = (\sqrt{2} \pi f B_{MAX}) \left(\frac{H_{MAX} \sin \alpha}{\sqrt{2}} \right) V_{Hysteresis} \quad (۱۰-۱)$$

در معادله ۱۰-۱ عبارت $V_{Hysteresis} = Sl$ حجم ماده مغناطیسی است.

با دقت در معادله (۴-۱) می توان گفت که:

$$(۱۱-۱)$$

$p =$ (ولتاژ مؤثر القا شده در یک متر مربع ماده مغناطیسی) * (آمپر دور مؤثر در یک متر طول

ماده مغناطیسی هم فاز با ولتاژ) * (حجم ماده مغناطیسی)

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

$$P = V_{Hysteresis} f \oint H dB = V_{Hysteresis} E_h f \quad (۱۲-۱)$$

که در آن E_h سطح حلقه هیستریزیس است.

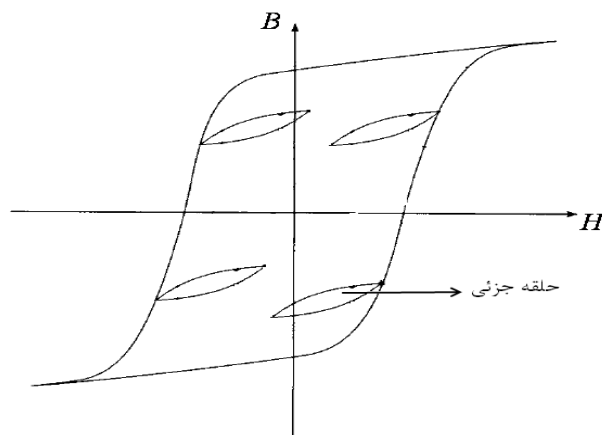
تقریب منحنی های پسماند با استفاده از روشی که گفته شد (یعنی استفاده از مولفه اصلی شدت میدان مغناطیسی و صرف نظر کردن از هارمونیک های دیگر آن) باعث می شود که منحنی های پسماند با بیضی های متحد المركز تقریب زده شوند. این بیضی ها هر کدام دارای زاویه تاخیر هیستریزس α و نفوذپذیری $\mu = \frac{B_{MAX}}{H_{MAX}}$ مغناطیسی منحصر به فرد می باشند. در مرجع [۱] روشهای متفاوت تقریب منحنی پسماند به تفصیل مطرح شده است. مقدار زاویه تاخیر هیستریزس از رابطه زیر به دست می آید.

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{E_h}{\pi H_{MAX} B_{MAX}} \right) \quad (13-1)$$

یکی دیگر از روش های تقریب منحنی هیستریزس تقریب متوازی الضلاع است. در مرجع [۳] از تقریب متوازی الاضلاع برای مدلسازی موتور پسماند استفاده شده است. در این پایان نامه برای تقریب منحنی های پسماند از بیضی های متحد المركز استفاده شده است. تقریب فوق نیز دقت کافی برای مدلسازی موتور پسماند به منظور طراحی را دارد.

در تحلیل بالا فرض شد که شدت میدان مغناطیسی کاملاً سینوسی است. اگر شدت میدان مغناطیسی هارمونیکی باشد منحنی هیستریزس دیگر مانند شکل ۱-۱ نخواهد بود بلکه دارای حلقه های جزئی^۱ نیز می باشد. این حلقه های جزئی اثر هارمونیک های شدت میدان مغناطیسی به وجود می آیند. حلقه های جزئی ایجاد شده در اثر این هارمونیک ها، متناسب با سطح خود باعث ایجاد تلفات توان می شوند که در موتور پسماند تحت عنوان تلفات پارزیتیک^۲ [۳] مطرح هستند. شکل ۱-۵ یک منحنی هیستریزس را همراه با چند حلقه جزئی نشان می دهد. برای مدل سازی دقیق پدیده هیستریزس و در نظر گرفتن حلقه های جزئی می توان از روش های عددی استفاده کرد.

1 - Minor Loops
2 - Parasitic Losses



شکل ۱-۵ منحنی هیستریزیس با حلقه های جزئی [۴]

۱-۳- مکانیزم تولید گشتاور در موتورهای پسماند

برای اولین بار در سال ۱۹۰۸، آقای Steinmetz ادعا کرد که پدیده هیستریزیس می تواند در یک موتور گشتاور تولید کند ولی در آن موقع توجه تئوری این موضوع بسیار ضعیف بود. در دهه های ۳۰ و ۴۰ میلادی موتور پسماند توسط مهندسان شرکت جنرال الکتریک مجدداً مورد بررسی قرار گرفت و یکسری نتایج تجربی در مورد استفاده از انواع مواد مغناطیس دائم موجود در آن زمان برای روتور موتور پسماند ارائه گردید. در سال ۱۹۳۴ آقای Teare^۱ در دانشگاه ییل^۲ موتور هیستریزیس را از لحاظ تئوری در رساله دکتری خود مورد تحلیل و بررسی قرار داد [۵]. در سالهای اخیر پروفیسور^۳ Rahman در دانشگاه تورنتو و دانشگاه Newfoundland^۴ و پرفیسور Kataoka در دانشگاه توکیو^۵ بر روی تئوری عملکرد و طراحی موتورهای پسماند مطالعات زیادی انجام داده و همچنان تحقیق می کنند.

اغلب موتورهای پسماند از نوع معمول و دارای ساختار استوانه ای هستند. یک ماشین پسماند استوانه ای دارای استاتوری مانند استاتور یک ماشین القائی است که سیم پیچی های تک فاز و یا چند فازی با توزیع سینوسی در آن قرار دارند. روتور موتور پسماند استوانه ای از یک رینگ از جنس مواد مغناطیسی با ویژه گی های خاص ساخته می شود.

1 - Teare, Benjamin Richard

2 - Yale University

3 - M. Azizur Rahman

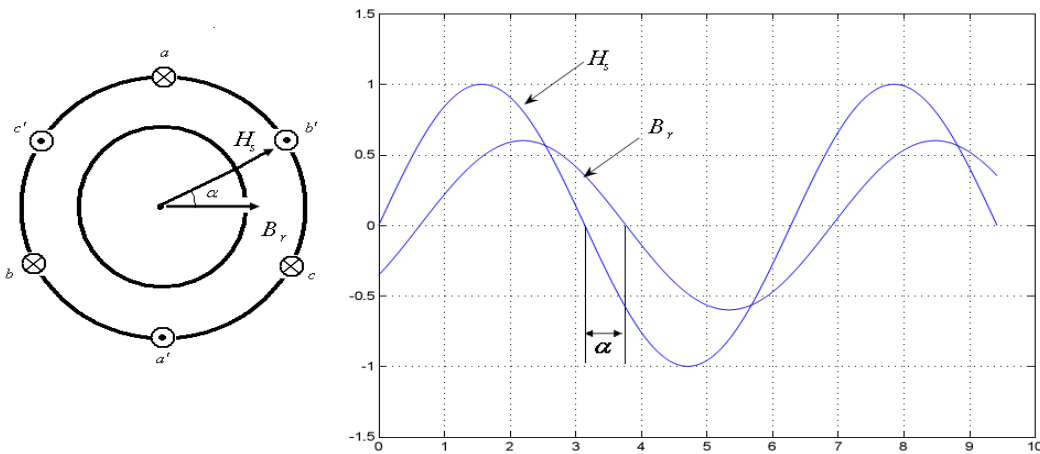
4 - Memorial University of Newfoundland

5 - Tokyo Institute of Technology

بطور معمول در مباحث مربوط به ماشین های الکتریکی از پدیده هیستریزیس و جریان های گردابی به عنوان عوامل ایجاد تلفات نام برده می شود ولی ماشین های پسماند بر اساس این دو پدیده کار می کنند. گشتاور موتور پسماند شامل دو مؤلفه است. مؤلفه گشتاور القائی مربوط به جریان گردابی در ماده روتور همانند ماشینهای القائی معمول است و گشتاور هیستریزیس ناشی از پدیده هیستریزیس می باشد که متناسب با سطح حلقه هیستریزیس است. بطور کلی گشتاور هیستریزیس از حالت سکون تا سرعت سنکرون تقریباً ثابت است.

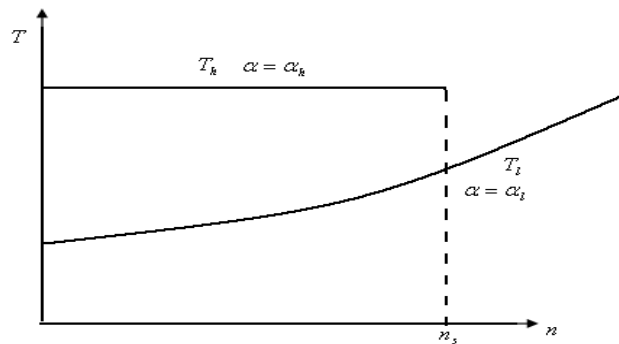
اگر روتور در حالت سکون باشد هر نقطه از روتور که در معرض میدان مغناطیسی متغیر با زمان (ناشی از گردش میدان) قرار بگیرد حلقه هیستریزیس را می پیماید. برای یافتن تغییرات زمانی شدت میدان مغناطیسی H مربوط به هر نقطه و چگالی شار مغناطیسی B حاصل از آن در همان نقطه می توان از حلقه هیستریزیس کمک گرفت. با توجه به تغذیه پرریودیک استاتور، چنانچه فرض شود که تغییرات H سینوسی است همان طور که قبلاً گفته شد با توجه به ماهیت غیر خطی پدیده هیستریزیس تغییرات B سینوسی نخواهد بود بلکه دارای هارمونیک خواهد بود. بدین ترتیب مؤلفه اصلی (هارمونیک اول) چگالی شار روتور با مؤلفه اصلی چگالی شار استاتور به اندازه زاویه α اختلاف فاز دارد. در شکل ۶-۱ این اختلاف فاز نشان داده شده است و همین اختلاف فاز همانطور که متذکر شد منجر به تولید گشتاور می شود. رابطه ۸-۱ گشتاور الکترومغناطیسی بوجود آمده را می توان از رابطه زیر به دست آورد.

$$T_h = KB_s B_r \sin \alpha \quad (۱۴-۱)$$



شکل ۶-۱ مکانیزم تولید گشتاور در موتور پسماند

در ماشین پسماند چند فازه تا زمانی که سرعت روتور از سرعت میدان گردان استاتور ω_s کمتر است تغییرات زمانی میدان گردان استاتور بر روی روتور حس می شود ولی و چگالی شار در روتور با میدان استاتور همجوار دارای اختلاف فاز α می باشد. در این شرایط میدان گردان استاتور نسبت به روتور با سرعت $s\omega_s$ حرکت می کند. با توجه به این موضوع تا زمانی که روتور با سرعت کمتر از سرعت میدان گردان استاتور بچرخد گشتاور هیستریزیس وجود دارد و تا رسیدن به سرعت سنکرون تقریباً ثابت است. شکل ۷-۱ مشخصه گشتاور هیستریزیس T_h بر حسب سرعت موتور پسماند را نشان می دهد. در این شکل گشتاور بار فرضی با T_l نشان داده شده اند.



شکل ۷-۱ مشخصه گشتاور موتور پسماند

هنگامیکه موتور به سرعت سنکرون می رسد گشتاور الکترومغناطیسی از گشتاور بار بزرگتر است پس سرعت موتور از سرعت سنکرون بالاتر می رود در این شرایط حلقه کاری عوض می شود و زاویه α نیز به تبع آن تغییر می کند تا گشتاور الکترومغناطیسی موتور برابر گشتاور بار شود. از آن به بعد قطب ها بر روی روتور جابجا نمی شوند و موتور به مشابه یک موتور مغناطیس دائم بعد از چند نوسان در سرعت ثابت و برابر با سرعت سنکرون به کار خود ادامه می دهد.

گشتاور اصلی تولید شده در موتور پسماند متناسب است با توان هیستریزیس روتور است. توان

هیستریزیس روتور برابر است با:

$$P_{hr} = E_h f_r V_r \quad (15-1)$$

که در آن:

$$E_h = \text{سطح حلقه هیستریزیس}$$

$$f_r = \text{فرکانس میدان روتور}$$

$$V_r = \text{حجم ماده هیستریزیس روتور}$$

تقریباً در همه شرایط کار توان وارد شده به فاصله هوایی برابر با توان هیستریزیسی است که از استاتور در حالت سکون به روتور وارد می شود یعنی:

$$P_{hs} = E_h f_s V_r \quad (16-1)$$

پس توان مکانیکی و گشتاور بترتیب برابر خواهند شد با:

$$P_{mech} = (1-s) E_h f_s V_r \quad (17-1)$$

$$T_h = \frac{P_{mech}}{\omega_r} = \frac{(1-s) E_h f_s V_r}{(1-s) \omega_s} = \frac{E_h V_r p}{4\pi} \quad (18-1)$$

۴-۱- ویژگیهای خاص و کاربرد های موتور پسماند

همانگونه که در شکل ۱-۶ و رابطه ۱-۱۸ نشان داده شده است موتور پسماند تا لحظه سنکرون شدن گشتاور نسبتاً ثابتی دارد. اگر جریان های گردابی ایجاد شده در روتور موتور پسماند را هم در نظر بگیریم موتور پسماند دارای گشتاور القائی نیز خواهد بود. بنابراین در موتور پسماند علاوه بر گشتاور پسماند، گشتاور القائی نیز در هنگام راه اندازی وجود دارد که باعث می شود گشتاور راه اندازی نسبتاً خوبی بوجود آید. (بنابراین موتور پسماند هر باری را که بتواند به حرکت در آورد به سرعت سنکرون می رساند) [۶]. نحوه شکل گیری قطب ها روی روتور موتور پسماند بگونه ای است که در سرعت سنکرون مشخصه گشتاور بسیار ثابت و یکنواخت است و موتور بسیار نرم و بدون نویز و سر و صدا کار می کند. در لحظه ای که وقتی روتور موتور پسماند به سرعت سنکرون می رسد شار روتور نوسان می نماید و چگالی شار پسماند ماده پسماند روی حلقه خاصی تثبیت می شود. از آنجا که در شرایط سنکرونیم گشتاور جریان القائی وجود ندارد موتور مثل یک موتور آهن ربای دائم عمل می کند. با این وجود وقتی که اغتشاش ناگهانی اتفاق می افتد، قطب های متوجه روی روتور حرکت خواهند کرد. بنابراین روتور حول سرعت سنکرون، در فرکانس کم (دو تا پنج هرتز) نوسان می کند بطوریکه موتور پسماند نقطه سنکرون مشخصی ندارد [۷] و موقعیت روتور نسبت به میدان

مغناطیسی گردان تصادفی است. این موضوع خطای شناور را در ژيروسکوپها افزایش می دهد [۸-۹]. اگر چه موتور های پسماند عموماً راندمان و ضریب توان نسبتاً پایینی دارند ولی خصوصیات منحصر به فرد این موتور ها از قبیل جریان راه اندازی کم (در حدود ۱۸۰ درصد جریان در بار نامی) باعث شده است که این موتور ها برای کاربردهای خاص بسیار مناسب و مورد توجه باشند. کاربردهای نظامی و صنایع ویژه ی این موتور ها باعث شده است که گزارشات کمی در مورد این موتور ها در دسترس باشد و بسیاری از پیشرفت ها به صورت مقالات علمی منتشر نشوند. از بعضی کاربردهای این موتور ها می توان به موارد زیر اشاره کرد.

• ژيروسکوپ^۱

ژيروسکوپها از جمله تجهیزات مورد استفاده در سیستم های ناوبری هواپیما ها، چرخبال ها، ماهواره ها و موشک های دور هستند. که نقش مهمی در دقت و عملکرد خوب سیستم های ناوبری دارند. در ژيروسکوپ یک اینرسی دوار لازم است تا ژيروسکوپ بتواند تغییرات زاویه از محور افق را تشخیص بدهد. بنابراین ژيروسکوپها دارای موتوری بعنوان محرک می باشند که قابلیت عملکرد در سرعت های بالا داشته باشد. همچنین موتور یک ژيروسکوپ باید ساختاری یکپارچه و محکم، سرعت و گشتاور ثابت و ممان اینرسی بالا داشته باشد. خصوصیات منحصر به فرد و ساختار یکپارچه روتور موتور پسماند باعث شده است این موتور قابلیت عملکرد مناسب در سرعتهای بالاتر از ۲۰۰۰۰ دور در دقیقه را داشته باشد. از این رو موتور پسماند به طور چشمگیری در ژيروسکوپها استفاده می شود [۹-۱۰].

• سانتریفوژ^۲

از جدا کننده های ملکولی یا سانتریفوژهای گازی سرعت بالا^۳ در صنایع غنی سازی اورانیم برای جدا سازی ایزوتوپ های اورانیم U-238 و U-235 استفاده می کنند. هنگامی که گاز هگزا فلوراید اورانیم وارد محفظه سانتریفوژ می شود به دلیل سرعت بسیار بالای سانتریفوژ، مولکول های سنگین تر

1 - Gyroscope

2 - Centrifuge

3 - Ultra Gas Centrifuges

یعنی مولوکولهای ایزوتوپ U-238 از مولوکولهای ایزوتوپ U-235 جدا سازی می شوند. البته این فرایند پس از عبور گاز هگزا فلوراید اورانیم از تعداد زیادی سانتریفوژ که به صورت سری قرار دارند در مقیاس صنعتی انجام می شود. این سانتریفوژ ها نیاز به موتوری به عنوان محرک دارند که قابلیت عملکرد خوب در سرعت ۶۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ دور بر دقیقه را داشته باشد. همچنین به علت نزدیکی جرم ملکولی ایزوتوپ های اورانیم، گشتاور موتور باید بسیار یکنواخت و صاف باشد. زیرا هر گونه نوسان یا حضور گشتاور ضربانی باعث می شود جداسازی به خوبی انجام نشود. موتور های پسماند به طور وسیعی در سانتریفوژهای گازی استفاده می شوند [۱۱].

- ضبط کننده های ویدئویی

موتور های پسماند به علت بدون سر و صدا بودن و همچنین عملکرد خیلی نرم، انتخاب مناسبی برای استفاده در ضبط کننده های ویدئویی و به طور کلی در سیستم های آکوستیک می باشند.

- شتاب دهنده توربوشارژرها

توربوشارژرها در ماشین های دیزلی از دیرباز برای افزایش راندمان سوخت و کم کردن آلایندگی های سوختی، مورد استفاده قرار می گیرند. این وسائل دارای یک مکانیزم خاص برای بهینه سازی و کنترل فشار شارژ کمپرسور می باشند. ماشینهای الکتریکی مختلفی تاکنون به عنوان شتابدهنده توربوشارژرهای وسایل نقلیه دیزلی مورد استفاده قرار گرفته اند. ماشین مورد استفاده در توربوشارژرها باید قابلیت عملکرد مناسب در سرعت ۱۰۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰۰ دور در دقیقه و دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد را داشته باشد. موتور پسماند به دلیل ساختار یک پارچه و مستحکم و تغییرات کم مشخصه کاری در دماهای بالا، می تواند انتخاب مناسبی برای استفاده در شتاب دهنده توربو شارژرها باشد [۱۲].

۱-۵- نتیجه گیری

در این فصل پدیده هیستریزیس به طور خلاصه توضیح داده شد، اساس عملکرد موتور پسماند بیان گردید و بالاخره به بعضی کاربردهای عمده موتور پسماند اشاره شد.

از موضوعات مهم مطرح شده در این فصل می توان به موارد زیر اشاره کرد.

۱- پدیده هیستریزیس تاخیر فاز بین اعمال میدان مغناطیسی بر ماده پسماند و ظهور چگالی شار در مواد فرومغناطیس می باشد. این پدیده در موتور پسماند عامل ایجاد گشتاور و در سایر ماشینهای الکتریکی باعث ایجاد تلفات می شود.

۲- مدلسازی پدیده پسماند را می توان با در نظر گرفتن بیشتر جزئیات همانند حلقه های جزئی انجام داد. روشهایی نیز برای مدلسازی راحت تر با اعمال تقریب هایی وجود دارد که در مقالات علمی مطرح شده اند.

۳- موتور پسماند علی رغم داشتن مسائلی همانند کم بودن بازده، ضریب توان نسبتاً پایین، نسبت گشتاور به حجم کم و بالا بودن زمان راه اندازی در کاربردهای ویژه ای نظیر سانتریفیوژها، ژيروسکوپها، توربوشارژرها و هدهای ویدئویی مطرح هستند.

فصل دوم

مواد مغناطیس دائم،

کاربرد در موتور پسماند

و ساختارهای موتور پسماند

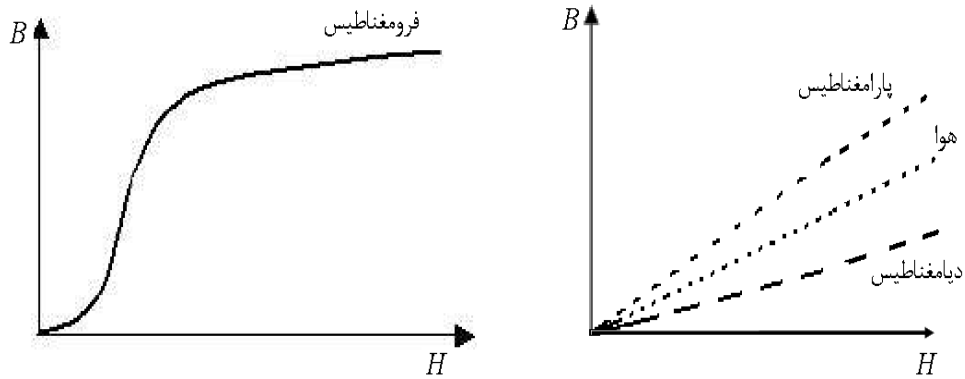
۲-۱- مقدمه

در این فصل مواد مغناطیسی دائم و ویژگی‌های مواد مغناطیسی دائم مناسب آنها برای استفاده در موتورهای پسماند مورد بررسی قرار گرفته‌اند. سپس انواع ساختارهای موتور پسماند بررسی و دو ساختار جدید برای موتور پسماند نوع تخت معرفی می‌شوند. در فصل‌های بعدی دو ساختار پیشنهادی از نقطه نظر مدل سازی، عملکرد و ملاحظات طراحی مورد تحلیل قرار می‌گیرند.

۲-۲- مواد مغناطیسی دائم

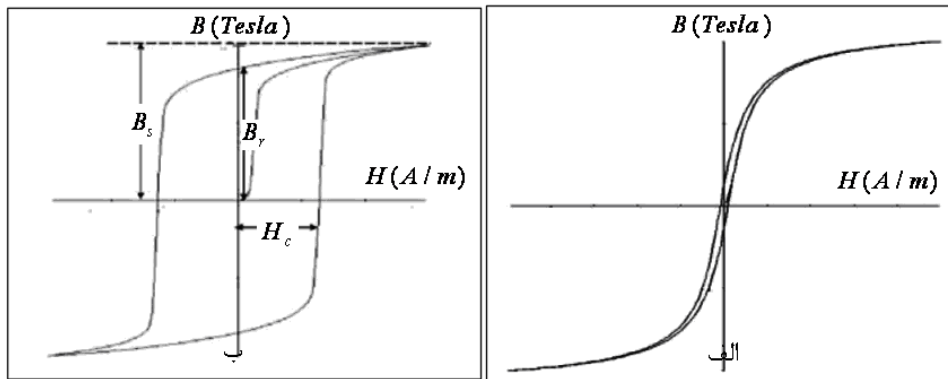
مواد از نظر رفتار مغناطیسی به مواد دیامغناطیسی^۱، پارامغناطیسی^۲، فرومغناطیسی^۳، و آنتی فرومغناطیسی^۴ تقسیم بندی می‌شوند. همانطور که در شکل ۱-۲ مشخص است شیب منحنی مغناطیسی شدگی مواد پارامغناطیسی از هوا بیشتر است در حالی که در مواد دیا مغناطیسی این شیب از هوا کمتر است. اما در مورد مواد فرومغناطیسی ابتدا شیب منحنی مغناطیسی شونده زیاد و بعد از رسیدن به اشباع شیب منحنی مغناطیسی شدگی این مواد کم می‌شود [۱۳].

1 - Diamagnetic
2 - Paramagnetic
3 - Ferromagnetic
4 - Anti-Ferromagnetic



شکل ۱-۲ منحنی مغناطیس شوندگی برای مواد دیامغناطیس پارامغناطیس و فرومغناطیس [۱۳]

مواد فرو مغناطیس فقط از نظر پرمابیلیته با مواد دیا مغناطیس و پارامغناطیس متفاوت نیستند بلکه وجود نیروی مغناطیس زدا و چگالی شار پسماند، عوامل دیگری هستند که این مواد را از مواد فوق متمایز می کنند. از نظر نیروی مغناطیس زدا مواد فرومغناطیس به مواد نرم و سخت تقسیم بندی می شوند. مواد فرومغناطیس سخت نیروی مغناطیس زدای بزرگی دارند و چگالی شار پسماند در این مواد قابل ملاحظه است ولی در مواد فرومغناطیس نرم نیروی مغناطیس زدا کم است و چگالی شار پسماند در این مواد بسیار کوچک است. منحنی های هیستریزس نمونه برای مواد فرومغناطیس نرم و سخت در شکل ۲-۲ نشان داده شده اند.



شکل ۲-۲ الف: منحنی هیستریزس برای مواد فرومغناطیس نرم

ب: منحنی هیستریزس برای مواد فرومغناطیس سخت [۱۳]

سختی و نرمی مغناطیسی معنای دیگری نیز دارد. بسیاری از آلیاژهای آهن، نیکل و کبالت، به عنوان موادی که پسماند آنها نسبت به پسماند آهن دوام بیشتری دارند شناخته شده اند. این آلیاژها تحت عملیات حرارتی قرار می گیرند و در نتیجه سختی مکانیکی و مغناطیسی آهن ربای بدست آمده افزایش می یابد. به همین دلیل موسوم به این مواد به عنوان مغناطیس دائم سخت شده هستند. در مواد مغناطیسی نرم سرعت و تسهیل مغناطیس شدگی به ازای مقادیر کم شدت میدان مغناطیسی، ناشی از حرکت دیواره حوزه ها است. چرخش حوزه، فقط در مقادیر زیاد شدت میدان در مغناطیس شدگی مشارکت الاستیک دارد که بلافاصله با کاهش شدت میدان ناپدید می شود. پسماند مواد مغناطیسی نرم بیشتر مربوط به حوزه هایی است که به مکانی که قبل از اعمال شدت میدان قرار داشته اند، برگشته اند. حاصل عملیات حرارتی بسیاری از مواد مغناطیسی سخت ایجاد کریستال های بسیار کوچک در ماده می باشد، ساختاری که مانع حرکت دیواره حوزه ها می باشد. بیشترین مغناطیس شدگی در مواد مغناطیسی سخت نتیجه تغییر جهت غیر الاستیک و ناگهانی تمام حوزه ها است. تداوم باقی ماندن حوزه ها در جهت های تغییر یافته شان حتی بعد از برداشته شدن شدت میدان سبب افزایش پسماند می شود و همین طور مقدار نیروی مغناطیس زدا آنها ممکن است چندین هزار برابر بزرگتر از نیروی مغناطیس زدای مواد نرم باشد [۱۴].

تا حدود سال ۱۹۳۰ همه مواد مغناطیس دائم تجاری فولادهای سخت سرمائی^۱ بودند. قبل از جنگ جهانی اول فولادهای پر کربن ساده و فولادهای آلیاژی ۰.۶٪ تنگستن به کار می رفت. در طول جنگ فولادهای پر کربن با ۱ تا ۶٪ تنگستن مورد استفاده قرار گرفتند. نیروی مغناطیس زدا برای این گروه از آلیاژها در رنج ۴۰ تا ۷۰ اورستد بود. اصلاح قابل ملاحظه در مورد فولاد های سخت در سال ۱۹۱۷ هنگامی که ژاپن یک فولاد کبالتی شامل ۰.۳۶٪ کبالت با یک نیروی مغناطیس زدا به بزرگی ۲۵۰ اورستد را تولید نمود صورت گرفت. این روال ادامه یافت تا این که مزیت فولادهای مغناطیسی با ساخته شدن آلیاژهای آلنیکو در سال ۱۹۳۲ کاهش یافت. آلنیکو ها آلیاژ آهن با آلومینیم نیکل مس و کبالت می باشند. اولین آلیاژ آهن، آلومینیم نیکل در سال ۱۹۳۲ توسط Nishima تهیه شد سپس برای بهبود خواص آن کبالت، مس و تیتانیوم به آن اضافه شد [۱] و [۱۴].

1 - Quench Hardening

۳-۲- مواد مغناطیسی دائم مورد استفاده در موتور های پسماند

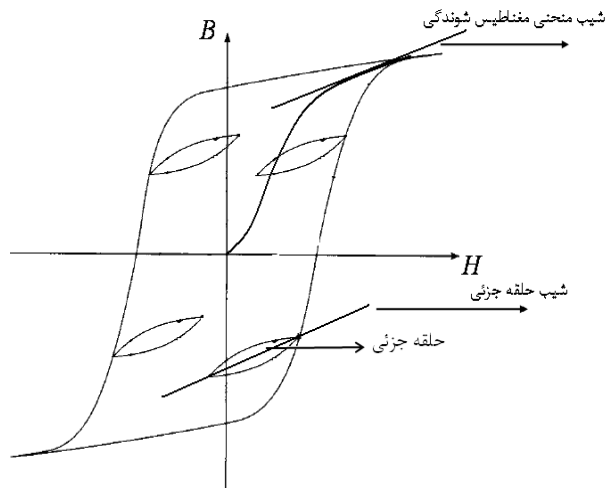
نوع ماده استفاده شده در روتور موتور پسماند تاثیر بسیار زیادی در مشخصه عملکرد این موتور دارد از مواد مغناطیسی دائم استفاده شده در روتور موتور پسماند می توان آلیاژ آهن - ۳۶٪ کبالت Fe-Co [۱۵]، آلیاژ آهن کبالت وانادیم یا P6 با ترکیب Fe-Co-V [۱۶]، آلیاژ آهن - ۵٪ کبالت Fe-Co [۶]، آلنیکو ها Fe-Co-Ni-Al و آلیاژ آهن کرم - کبالت Fe-Cr-Co [۱۷] را نام برد. مشخصه های مغناطیسی و جزئیات چگونگی تولید برخی از این آلیاژها تا حدودی غیر قابل دسترس است. در این پایان نامه از یک نوع فولاد آلیاژی خاص با ترکیب Fe-Cr-Ni-Mo-C برای استفاده در روتور موتور پسماند استفاده شده است. اگر چه این مواد همگی از فرو مغناطیسی های نوع سخت هستند ولی هر کدام از نظر مغناطیسی و مکانیکی ویژگی های خاص خود را دارند. از جمله مواردی که در انتخاب ماده روتور موتور پسماند باید به آن توجه کرد می توان به گزینه های زیر اشاره نمود.

۱- همانطور که در فصل اول اشاره شد توان خروجی موتور پسماند متناسب با سطح حلقه پسماند و حجم ماده استفاده شده در روتور است. پس هر چه سطح حلقه هیستریزس ماده روتور موتور پسماند بزرگتر باشد با یک حجم مشخص از ماده روتور می توان توان خروجی بالاتری داشت.

۲- در فصل های بعدی نشان خواهیم داد که راندمان ماکزیمم در موتور پسماند به ازاء یکی از حلقه های هیستریزس اتفاق می افتد. حلقه ای که در آن حلقه، راندمان موتور ماکزیمم است را حلقه نرمال می نامیم. هر چقدر چگالی شار پسماند و پرمابیلیته مربوط به حلقه نرمال بالاتر باشد جریان استاتور کمتر خواهد شد و بنابراین تلفات مسی پایین تر خواهد بود.

۳- در فصل (۱) گفته شد که هارمونیک های MMF در موتور پسماند باعث ایجاد حلقه های جزئی می شوند. و تلفات پارازیتیک تحت تاثیر این حلقه ها به وجود می آیند. در حقیقت شیب حلقه های جزئی حدوداً برابر است با شیب منحنی مغناطیسی شوندگی ماده روتور در نقطه ماکزیمم لوپ مورد نظر است. شکل ۳-۲ حلقه های جزئی را در حلقه هیستریزس نشان می دهد. هرچه شیب حلقه های جزئی بیشتر باشد تلفات پارازیتیک کمتر خواهد بود [۱۸]. پس می توان گفت هرچه شیب منحنی مغناطیسی شوندگی در نقطه ماکزیمم لوپ نرمال ماده پسماند بیشتر باشد تلفات پارازیتیک

کمتز خواهد بود. به این دلیل یکی از پارامتر های مهم انتخاب ماده روتور کمتز بودن شیب منحنی مغناطیس شونددگی در نقطه ماکزیمم لوپ های آن ماده می باشد.



شکل ۲-۳ منحنی هیستریزیس با حلقه های جزئی [۴].

۴- همانطور که در فصل اول گفته شد گشتاور مربوط به جریان گردابی در موتور پسماند در هنگام راه اندازی موتور با گشتاور هیستریزیس جمع می شود بنابراین هرچه گشتاور مربوط به جریان گردابی بزرگتر باشد گشتاور راه اندازی موتور بیشتر خواهد بود. گشتاور جریان گردابی در موتور پسماند به مقاومت ویژه ماده پسماند سطح حلقه هیستریزیس و پارامتر های دیگر طراحی بستگی دارد [۱۹]. از این رو با انتخاب مناسب ماده پسماند روتور می توان گشتاور راه اندازی را بهبود داد.

۵- مواد پسماند عموماً سختی مکانیکی بالایی دارند و این موضوع باعث مسائل و مشکلات خاصی در هنگام ساخت روتور می شود. این نکته نیز می تواند در انتخاب ماده روتور به لحاظ ماشین کاری مهم باشد.

۶- برخی از آلیاژهای به کار رفته در مواد پسماند مانند کبالت از عناصر کمیاب و بسیار گرانبقیمت هستند. بنابراین با انتخاب ماده مناسب برای روتور موتور پسماند شاید لازم باشد قیمت تمام شده موتور را نیز لحاظ کرد.

به هر حال در فصل ۵ سه نوع ماده پسماند که به طور معمول در موتور پسماند مورد استفاده قرار می گیرند و ماده Fe-Cr-Ni-Mo-C به عنوان یک ماده جدید به لحاظ میزان تاثیر بر عملکرد موتور پسماند مقایسه می شوند.

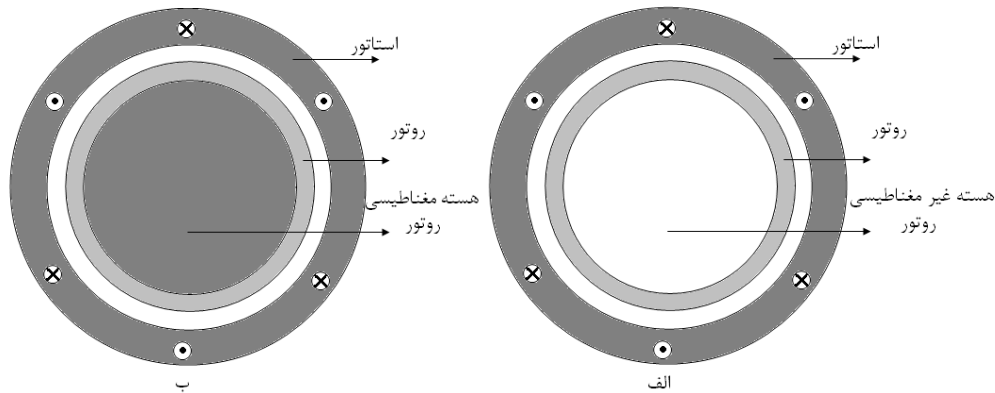
۲-۴- ساختار های موتور پسماند

کاربرد های متفاوت موتور پسماند باعث شده است که این موتور در ساختار های متنوع عرضه شود. هر کدام از ساختار های متفاوت موتور پسماند به لحاظ عملکرد و ملاحظات طراحی ویژگی های خاص خود را دارند که آنها را برای استفاده در کاربرد های خاص مناسب می کند. بر این اساس انواع موتور های پسماند به صورت زیر معرفی می شوند.

• موتور پسماند استوانه ای شار محیطی^۱

ساده ترین و معمول ترین ساختاری که می توان برای موتور پسماند معرفی کرد موتور پسماند استوانه ای شار محیطی است. در این موتور که استاتور همانند استاتور موتورهای القائی معمول با سیم پیچی های تک فاز و یا چند فاز می باشد، روتور از یک رینگ استوانه ای از ماده پسماند و هسته روتور از یک ماده غیر مغناطیسی ساخته می شود. بنابراین در چنین ساختاری مسیر شار در روتور بصورت محیطی می باشد. در چنین ماشینی اگر روتور از ماده یکپارچه پسماند ساخته شود گشتاور در حالت آسنکرون بیشتر خواهد بود ولی در حالت سنکرون ماشین دارای تلفات جریان گردابی ناشی از هارمونیک های شار خواهد بود. در صورتیکه روتور از ماده پسماند و به صورت ورق ساخته شود گشتاور القائی در حالت آسنکرون کمتر خواهد بود ولی در حالت سنکرون تلفات جریان های گردابی ناشی از هارمونیک های شار نسبت به روتور یکپارچه کاهش خواهد یافت. شکل ۲-۴ الف یک موتور پسماند شار محیطی را نشان می دهد.

1 - Circumferential Flux Cylindrical Hysteresis Motor



شکل ۲-۴ الف: موتور پسماند استوانه ای شار محیطی

ب: موتور پسماند استوانه ای شار شعاعی

- موتور پسماند استوانه ای شار شعاعی^۱

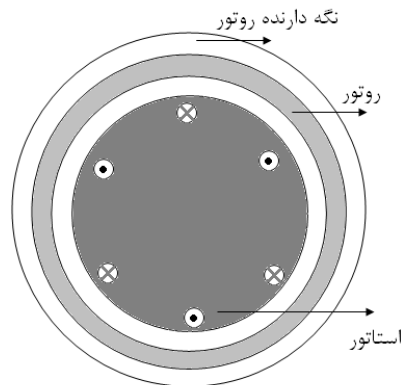
موتور پسماند استوانه ای شار شعاعی از لحاظ ساختار کاملاً مشابه موتور پسماند شار محیطی است تنها با این تفاوت که در این موتور، روتور از یک ماده فرو مغناطیس نرم مثلاً فولاد سیلیکون دار ساخته می شود. این موضوع باعث می شود که مسیر شار در روتور به صورت شعاعی باشد. شکل ۲-۴ ب موتور استوانه ای شار شعاعی را نشان می دهد.

- موتور پسماند استوانه ای معکوس^۲

در یک موتور پسماند استوانه ای معکوس، روتور روی قسمت بیرونی موتور قرار دارد. شکل ۲-۵ یک موتور پسماند استوانه ای معکوس را نشان می دهد. با طرح معکوس امکان ساخت موتور های مینیاتوری با ممان اینرسی بالا وجود دارد که به طور گسترده ای در ژيروسکوپها استفاده می شوند. این موتور ها نیز می توانند به صورت شار محیطی و یا شار شعاعی ساخته شوند.

1 - Radial Flux Cylindrical Hysteresis Motor

2 - Inverse Hysteresis Motor

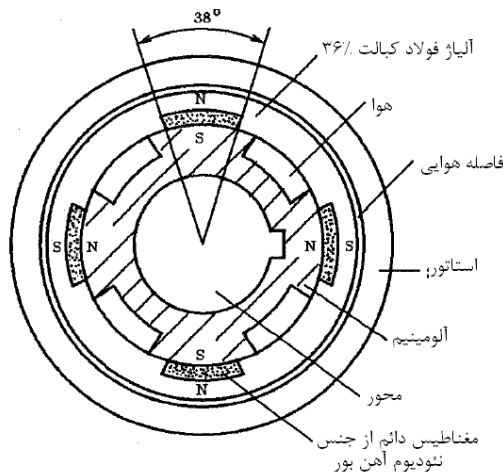


شکل ۲-۵ موتور پسماند استوانه ای معکوس

• موتور پسماند آهنربای دائم^۱

در دهه های اخیر با توسعه تولید مواد مغناطیس دائم، موتور آهنربای دائم به عنوان موتوری با راندمان بالا و گشتاور قابل ملاحظه نسبت به موتور القایی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. ساختار ساده و عدم وجود جاروبک در این موتور ها باعث استفاده روز افزون آنها در سرعت های بالا شده است. یکی از معایب این موتور ها این است که همانند موتورهای سنکرون دیگر گشتاور راه اندازی ندارند. از طرفی موتور پسماند به عنوان موتور سنکرونی که دارای گشتاور راه اندازی است دارای راندمان، ضریب توان و گشتاور کمتر نسبت به یک موتور مغناطیس دائم هم سایز خود می باشد. در سال ۱۹۹۳ آقای Rahman برای اولین بار، موتور هیبرید آهنربای دائم و پسماند را معرفی کرد [۲۰]. در این موتور روتور از مواد پسماندی با شیار های برای تعبیه مواد مغناطیس دائم ساخته می شود. این موتور مزیت های بسیاری نسبت به موتور مغناطیس دائم معمول دارد. در موتور پسماند آهنربای دائم، در حالت آسنکرون گشتاور موتور شامل گشتاور القایی و گشتاور هیستریزیس است. شکل ۲-۶ یک موتور پسماند آهنربای دائم را نشان می دهد. در موتور پسماند آهنربای دائم نشان داده شده در شکل ۲-۶ از آلیاژ فولاد کبالت ۳۶٪ به عنوان ماده پسماند و از آلیاژ نئودیم آهن بور Ne-Fe-B به عنوان آهنربای دائم استفاده می شود.

^۱ - Permanent Magnet Hysteresis Motor



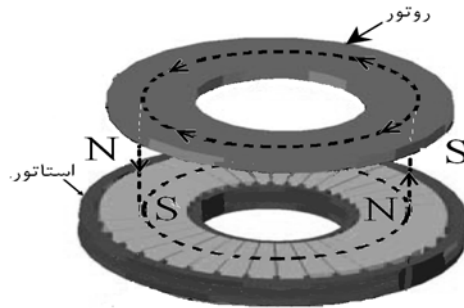
شکل ۲-۶ موتور پسماند آهنربای دائم [۲۱]

• موتور پسماند نوع تخت

در حالی که به نظر می رسد اولین ماشین الکتریکی ساخته شده ماشین نوع تخت فاراده باشد، ماشین های نوع تخت به خاطر ویژگیهای خاص و منحصر به فرد در دهه های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. به علت کمتر بودن مواد هسته در ماشین های تخت، این ماشین ها دارای نسبت توان به وزن بالاتری در مقایسه با ماشین های استوانه ای هستند. یکی دیگر از مزایای ماشین های تخت، قابلیت تنظیم راحت فاصله هوایی است. اگرچه وجود نیروهای محوری متقابل بین استاتور و روتور یکی از معایب این موتور ها است مزایا دیگر این موتور ها، آنها را برای استفاده در کاربرد های خاص بسیار مناسب کرده است.

امروزه ماشین های نوع تخت آهنربای دائم بسیار شناخته شده هستند. امکان تغییر دادن مسیر شار در موتور های نوع تخت باعث شده است که موتور های آهنربای دائم نوع تخت در ساختار های متنوع عرضه شوند [۲۲]. اما موتور پسماند نوع تخت بسیار کم مورد بررسی قرار گرفته است. در ساده ترین حالت موتور پسماند نوع تخت دارای استاتوری به صورت تخت است و روتور آن یک دیسک یکپارچه ساخته شده از ماده پسماند می باشد. در صورتی که روی روتور یک نگه دارنده از جنس فولاد سیلیکون دار یا هر ماده فرو مغناطیسی نرم قرار داشته باشد شار عبوری از روتور کاملاً محوری است و در این حالت این موتور، موتور پسماند نوع تخت شار محوری نامیده می شود و در صورتی که نگه دارنده وجود نداشته باشد و یا از یک ماده غیر مغناطیسی ساخته شده باشد، شار

عبوری از روتور محیطی است. در این صورت موتور پسماند نوع تخت را شار محیطی می نامند. شکل ۷-۲ موتور پسماند نوع تخت شار محیطی و نحوه تشکیل قطب ها را در آن نشان می دهد.



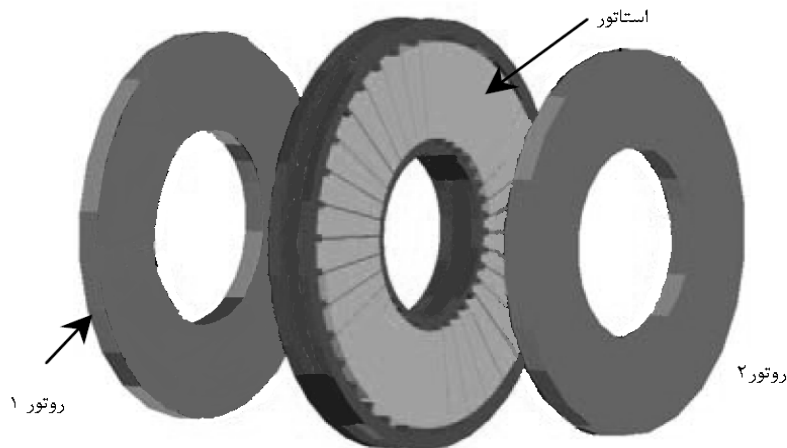
شکل ۷-۲ موتور پسماند نوع تخت شار محیطی و نحوه تشکیل قطب ها در آن

۵-۲- دو ساختار پیشنهادی برای موتور پسماند نوع تخت

۱-۵-۲- موتور پسماند نوع تخت دو روتوره بدون هسته

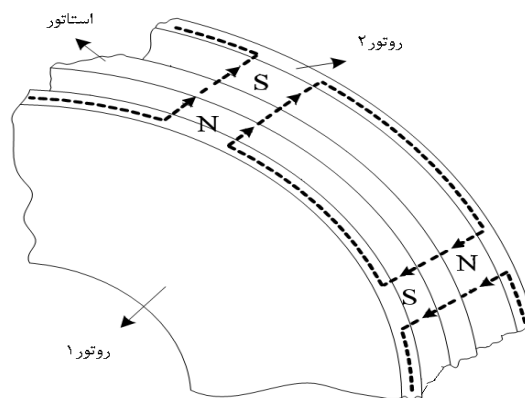
در این اینجا، ساختار و طرحی جدید برای موتور پسماند ارائه می شود. با این ساختار، مزایا و برتری ها و خصوصیات منحصر به فرد این موتورها افزایش می یابد و امکان بکار گیری آنها در کاربردهای خاص با راندمان بالاتر فراهم می شود. در این طرح، ساختار ماشین با همه موتورهای معمول تفاوت اساسی دارد. بویژه ساختارهای روتور و استاتور موتور متفاوت از ساختار های نوع استوانه ای معمول و شناخته شده می باشند. روتور و استاتور طرح جدید به صورت مسطح هستند بعلاوه دو روتور در طرفین استاتور گشتاور الکترومغناطیسی لازم را تامین می کنند. از مهمترین و جذابترین ویژگی های این موتور جدید، هسته غیر آهنی آن است که این خود می تواند مزیت های زیادی را برای این موتور در بر داشته باشد.

ساختار جدید همانطور که گفته شد با ساختارهای معمول متفاوت است. مشخصه عمده این موتور این است که استاتور تخت و دو روتور به صورت دیسک در دو طرف استاتور قرار گرفته اند. سیم پیچی های استاتور رویهم و در یک ماده غیر مغناطیسی به صورت سینوسی توزیع می شود. شکل ۸-۲ ساختار این موتور را به صورت سه بعدی نشان می دهد. همانطور که در شکل مشخص است دو روتور در دو طرف استاتور قرار دارند که از یک ماده با مشخصه هیستریزیس مناسب ساخته شده اند.



شکل ۸-۲ ساختار موتور پسماند نوع تخت دو روتوره بدون هسته

مسیر شار در این موتور با ساختار های معمول این تفاوت را دارد که شار بصورت محوری استاتور و فاصله های هوایی را طی کرده و به صورت محیطی روتورها را دور می زند. مسیر شار در این موتور در شکل ۹-۲ نشان داده شده است.



شکل ۹-۲ مسیر شار در موتور پسماند نوع تخت دو روتوره بدون هسته

همانگونه که در شکل ۹-۲ دیده می شود مسیر شار در استاتور ماشین بدون بدون هسته به گونه ای است که به لحاظ تئوریک نیازی به یوغ استاتور نیست. به این معنی که چون مسیر خود را در استاتور به صورت محوری می بندد می توان حتی هسته آهنی در استاتور را کاملاً حذف کرد.

بدیهی است این کار منجر به فاصله هوایی بزرگتر و بالا رفتن جریان مغناطیسی کنندگی می شود ولی عدم وجود هسته مزایایی را برای ساختار جدید نسبت به ساختار های قبلی بوجود می آورد. عدم وجود هسته باعث قابلیت های بیشتر از جمله حذف تلفات آهن استاتور در ساختار می گردد که معایب آن را برای کاربردهای خاص پوشش می دهد. باید توجه داشت که در این ساختار به علت عدم وجود یوغ استاتور نمی توان از سیم پیچی تروئیدی استفاده کرد بلکه در این طرح از سیم پیچی رویهم^۱ استفاده شده است. از این به بعد برای اختصار موتور پسماند نوع تخت دو روتوره را موتور CDDHM^۲

می نامیم. به طور کلی مزایای زیر را می توان برای موتور CDDHM متصور شد.

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

۲- عدم وجود هسته مغناطیسی که خود مزیت‌های زیر را ایجاد می کند:

- 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 می شود.
- عدم نیاز به هسته فولادی در استاتور امکان استفاده از انواع مواد غیر مغناطیسی ارزان تر بجای هسته آهنی معمول مورد استفاده در ماشینهای متداول را بوجود می آورد.
- در کاربرد های سرعت بالا به منبع تغذیه فرکانس بالا نیاز است ولی به علت وجود هسته غیر آهنی 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.
- سبک تر بودن ماشین برای کاربردهایی مثل صنایع هوا و فضا که در آنها وزن کم از اهمیت زیادی برخوردار است از خصوصیات منحصر به فرد دیگر این موتور ها می تواند باشد.
- استاتور هدایت گرمایی بهتری نسبت به موتور های هسته دار دارد.

1 - lap winding

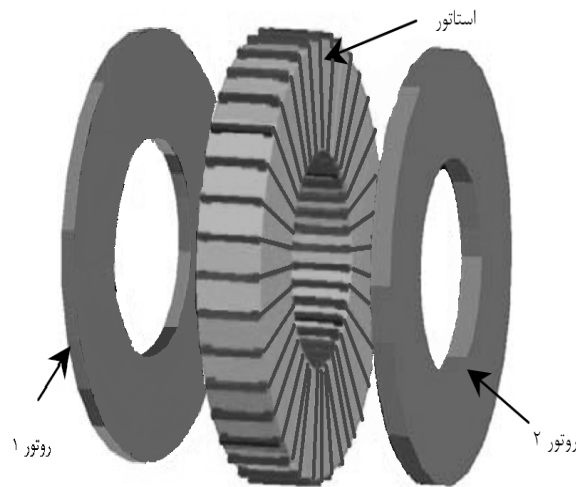
2 - Coreless Dual rotor Disc type Hysteresis Motor

- به علت نبودن تلفات هسته در این موتورها، ماشین کمتر گرم می شود و گرمای ایجاد شده در موتور فقط ناشی از تلفات مسی است.
- در دماهای بالا خواص مغناطیسی هسته تغییر می کند و باعث عوض شدن مشخصه مغناطیسی و الکتریکی موتورها می شود. به علت عدم وجود هسته مغناطیسی در موتور جدید مشخصه های این ماشین در دماهای بالا بطور قطع کمتر تغییر می کند.

۲-۵-۲- موتور پسماند نوع تخت دو روتوره بدون شیار

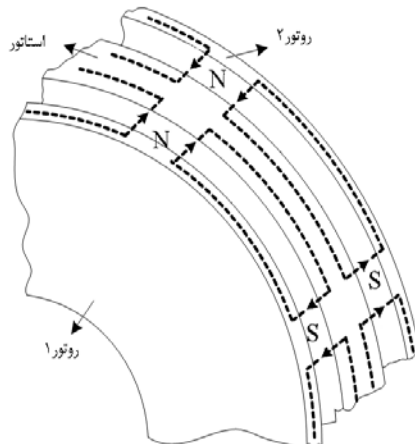
موتور پسماند نوع تخت دو روتوره بدون شیار یک ساختار جدید دیگر برای موتور پسماند است با توجه به نحوه عملکرد ویژه می توان از آن در کاربردهای بسیاری استفاده کرد. ساخت ماشین با این ساختار جدید در مقایسه با دیگر ساختارهای معرفی شده بسیار ساده و کم هزینه می باشد. علاوه بر این به دلیل حداکثر استفاده از فضای سیم پیچی ها، این موتورها می توانند دارای راندمان بسیار بالاتری باشند. نحوه سیم پیچی و ساختار منحصر به فرد آن باعث کاهش قابل توجه طول سیم پیچی نسبت به انواع دیگر سیم پیچی ها می شود که این خود منجر به کم شدن مقاومت سیم پیچی استاتور و کاهش تلفات اهمی می گردد. همچنین پراکندگی شار کله سیم ها در این موتورها بسیار کمتر از دیگر ساختار ها می باشد. بدین ترتیب می توان 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 می توان به سهولت و با ابزار های ساده بدون نیاز به برش های خاص که برای ساخت موتور های الکتریکی معمولاً با هزینه های سنگین نیاز است به عنوان استاتور بکار گرفت. شاید مهمترین و قابل توجه ترین مشخصه این موتورها امکان استفاده از سیم پیچی های تیروئیدی قرار گرفته روی هسته های استاتور باشد. بنابراین علاوه بر این که ساخت استاتور این ماشین ها ساده تر و کم هزینه تر می باشد پروسه سیم پیچی نیز بدلیل هسته استاتور بدون شیار بسیار ساده تر می شود. همچنین عدم وجود شیار ها تبادل گرمایی بهتری را برای سیم پیچ ها فراهم می کند و این نیز از جمله مزیت های منحصر به فرد ساختار جدید است. از دیگر ویژگی های بسیار شاخص این چنین ماشین هایی می توان به این نکته اشاره کرد که

این ماشین ها را می توان و حتی بسیار بهتر خواهد بود تا در چند لایه با تعداد روتورها و استاتور های متعدد ساخت. ماشین ارائه شده در اینجا نیز دارای یک استاتور و دو روتور می باشد، حال آنکه ساختارهای چند لایه ای در ماشین های استوانه ای به علت عدم امکان ساخت آسان، معمول نیست. همچنین وجود دو دیسک در روتور باعث می شود که موتور جدید به لحاظ مکانیکی پایداری مناسب تری داشته باشد. شکل ۲-۱۰ نمای سه بعدی استاتور و روتور این موتور را نشان می دهد. لازم به ذکر است دو دیسک روتور می توانند روی یاتاقان های مشترک و یا غیر مشترک سوار شوند و با هم و یا مستقل از هم گردش کنند.



شکل ۲-۱۰ ساختار موتور پسماند نوع تخت دو روتوره بدون شیار

سیم پیچی های استاتور موتور پسماند تخت دو روتوره بدون شیار بصورت حلقوی با اتصالات پشت به پشت هستند. این نوع سیم پیچی این امکان را بوجود می آورد که شار محوری فاصله هوایی مسیر خود را از داخل استاتور و روتورها به صورت محیطی ببندد. شکل ۲-۱۱ به خوبی این موضوع را نمایش می دهد



شکل ۱۱-۲ مسیر شار در موتور پسماند نوع تخت دو روتوره بدون شیار

چون مسیر شار در این موتور بنحوی است که شار دو روتور در استاتور با هم جمع می شوند وجود یوغ در استاتور این توپولوژی الزامی است. به هر حال ساختار این موتور به گونه ای است که می توان استاتور را بدون شیار ساخت. سیم پیچی ها به صورت حلقوی^۱ پیچیده می شوند و تمام سطح استاتور را می پوشانند. این گونه سیم پیچی باعث کوتاه شدن کله سیم ها و صرفه جویی در میزان سیم مصرفی و کاهش قابل توجه تلفات مس و بهبود راندمان می شود. کاهش میزان مس استفاده شده در این موتور و همچنین راندمان بالاتر به صورت چشمگیری نسبت توان به وزن موتور را افزایش می دهد. در واقع بدون شیار بودن استاتور در این موتور یکی از ویژگیهای ممتاز این موتور محسوب می شود. سیم پیچی ها در این ساختار درون شیار قرار ندارند و روی سطح استاتور قرار می گیرند. از این رو تبادل گرمایی سیم پیچی ها بهتر انجام می گیرد بطوریکه می توان چگالی جریان هادی ها را در این موتور نسبت به موتور شیار دار به میزان قابل توجهی بالاتر انتخاب کرد و متعاقباً می توان 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 مولفه پراکندگی شیار می باشد. اگر بخواهیم برای ماشین بدون شیار معایبی را مطرح کنیم شاید بتوان به فاصله هوایی نسبتاً بزرگ و بنابراین راکتانس مغناطیس کننده ضریب توان پائین آن اشاره کرد. البته این عیب موتور را می توان با دقت در ساخت و در حد امکان کاهش فاصله هوایی و همچنین استفاده از جبران کننده خازنی تا حدودی اصلاح کرد. به هر

1 - Toroidal

حال با وجود این عیب که کم و بیش در ماشین های تخت وجود دارد، مزایای زیاد این موتور معایب آن را در کاربردهای خاص پوشش می دهد. از طرفی یکی از معایب عمده موتورهای شیار دار وجود هارمونیکهای ناشی از شیار در میدان های مغناطیسی فاصله هوایی است که منجر به گشتاور ضربانی، تلفات فرکانس بالا در روتور و نویز صوتی می شود. بنابراین عدم وجود شیار در موتور معرفی شده معضلات فوق را بطور زیاد مرتفع می کند. به طور کلی مزایای زیر را برای موتور پسماند تخت دو روتوره بدون شیار می توان متصور شد.

۱- کله سیم ها بطور قابل ملاحظه ای در این موتور کوتاه شده اند که این خود مزایای زیر را بدنبال دارد:

- کاهش تلفات مسی و به طبع آن افزایش راندمان
 - کاهش میزان مس مصرفی در موتور که منجر به کاهش هزینه ساخت موتور و کاهش وزن تمام شده موتور می شود.
 - کاهش راکتانس پراکندگی ناشی از کله سیم ها
- 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 شیار ها بسیار مشکل و هزینه بر است. توجه شود که امکان پانچ ورق های 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 شیار دار بسیار ناچیز است.
- عدم وجود شیار باعث می شود که سیم پیچی ها بر روی سطح استاتور قرار گیرند که این موضوع تبادل حرارتی را برای سیم پیچی ها آسان می سازد. تبادل حرارتی مناسب امکان استفاده از سیم با چگالی جریان بالاتر را بوجود 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 هارمونیک های شیارها تقریبا منتفی است. بنابراین تلفات فرکانس بالا در روتور، گشتاور ضربانی و نویز صوتی در این ماشین ها 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 لایه های بیشتر نیز می توان ساخت.

۲-۶- نتیجه گیری

در این فصل ویژگی هایی که باید در انتخاب ماده مورد استفاده در روتور موتور پسماند باید مورد توجه قرار گیرد بررسی شد سپس دو ساختار جدید برای موتور پسماند نوع تخت معرفی و مزایا موتور های جدید بر شمرده شد.

از موضوعات کلیدی این فصل می توان به موارد زیر اشاره کرد.

۱- فولادهای مختلفی برای استفاده در ماشینهای الکتریکی مطرح هستند که فقط بعضی از آنها برای کاربرد در موتورهای پسماند مناسب هستند. این موضوع به کیفیت مشخصه مغناطیسی آنها مربوط می شود.

۲- از میان این فولادهای مختلف، فولاد آلیاژی با ترکیبات Fe-Cr-Ni-Mo-C برای استفاده در موتورهای پسماند مطرح شده است که می تواند به دلایلی که در فصل پنجم مطرح می شود، گزینه مناسبی باشد.

۳- هر کدام از ساختارهای موتور پسماند برای کاربردهای خاصی مناسب هستند ولی در کل غالب موتورهای پسماند ضعف های بزرگی نظیر کم بودن بازده و ضریب قدرت و نیز بالا بودن زمان راه اندازی را دارا می باشند. ساختارهای پیشنهادی در این تحقیق می توانند تا حد قابل توجهی بر این مشکلات غلبه کنند.

فصل سوم

مدلسازی موتور های

پسماند تخت دو روتوره

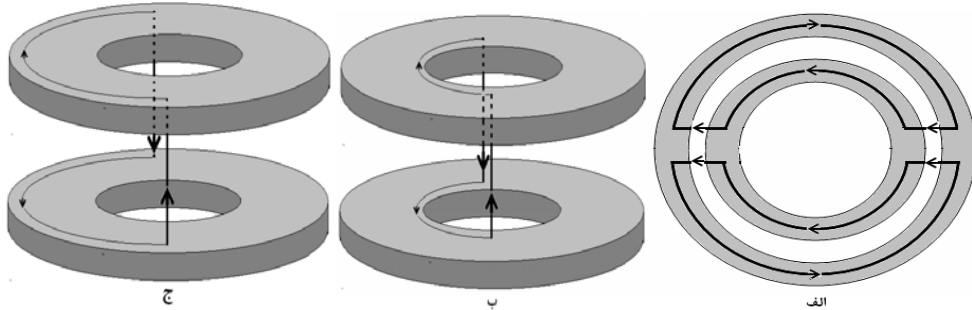
۳-۱- مقدمه

در فصل قبل دو ساختار جدید برای موتور پسماند معرفی کردیم و مزایای ساختارهای جدید را در مقایسه با ساختارهای معمول بر شمردیم. در این فصل با استفاده از تحلیل میدان الکترومغناطیسی، مدار معادل حالت دائمی را برای این دو موتور به دست می آوریم. مدلی که برای هر یک از موتورها در این فصل ارائه می شود مدلی مبتنی بر پارامترهای طراحی است و از این مدل با دقت کافی می توان به منظور طراحی استفاده کرد.

۳-۲- تحلیل عملکرد موتور پسماند تخت دو روتوره

در یک موتور استوانه ای اگر از اثر لبه^۱ صرف نظر کنیم، طول مسیر مغناطیسی ثابت و به موقعیت محوری استاتور بستگی ندارد. بنابراین چگالی شار فاصله هوایی در موتور استوانه ای در امتداد محوری آن کاملاً یکنواخت است. از طرف دیگر در یک موتور نوع تخت طول مسیر مغناطیسی در امتداد شعاع تغییر می کند و بنابراین چگالی شار فاصله هوایی در امتداد شعاع یکنواخت نیست که این اثر باید در موتور پسماند نوع تخت کاملاً مد نظر قرار گرفته شود. در شکل ۳-۱ این موضوع نشان داده شده است.

1 - Fringing



شکل ۱-۳ الف: مسیر شار در موتور استوانه ای ب: مسیر شار در موتور تخت (شعاع داخلی)

ج: مسیر شار در موتور تخت (شعاع خارجی)

۳-۳- فرضیات در نظر گرفته شده

همانند دیگر موتورها برای تحلیل موتورهای پسماند دو روتوره ابتدا فرضیاتی را در نظر می گیریم.

این فرضیات عبارتند از:

الف) موتور در حالت کاری سنکرون قرار دارد و دارای بیشترین باری است که آن را از حالت

سنکرون خارج نکند

ب) استاتور دارای یک سیم پیچی سه فاز توزیع شده سینوسی است و نیروی محرکه مغناطیسی

(MMF) سیم پیچی استاتور توسط یک جریان سینوسی ایجاد می شود. چگالی هادی های فاز n

می تواند با رابطه زیر توصیف شود.

$$Z_{(n)} = Z \cos\left(\phi - (n-1)\frac{2\pi}{m}\right) \quad (1-3)$$

که در آن $n=1,2,\dots,m$ و m تعداد فازها است. ϕ زاویه الکتریکی استاتور است بطوریکه

$\phi = p\theta$ که در آن θ زاویه مکانیکی و p تعداد زوج قطب ها است. Z حد اکثر چگالی هادی است

که از رابطه زیر بدست می آید.

$$Z = \frac{2K_w N_{ph}}{p\pi} \quad (2-3)$$

که در آن K_w ضریب سیم پیچی و N_{ph} تعداد دور سیم پیچی بر فاز است و داریم:

$$K_w = \cos\left(\frac{\varepsilon}{2}\right) \frac{\sin\left(q\frac{\gamma}{2}\right)}{q \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)} \quad (3-3)$$

که در آن q تعداد شیارهای بر قطب بر فاز است و برابر است با:

$$q = \frac{z}{2pm} \quad (4-3)$$

γ زاویه الکتریکی شیار است و از رابطه زیر بدست می آید:

$$\gamma = \frac{2\pi p}{z} \quad (5-3)$$

که در آن z تعداد کل شیارهای استاتور است.

اگر تعداد شیار بر قطب y_p را بصورت زیر تعریف کنیم:

$$y_p = \frac{z}{2p} \quad (6-3)$$

کوتاهی گام کلاف بر حسب تعداد شیارها برابر خواهد بود با:

$$y_z = y_p - ay_p \quad (7-3)$$

بطوریکه a گام سیم پیچی بر حسب پریونیت می باشد.

بنابراین زاویه کوتاهی گام بر حسب رادیان الکتریکی برابر است با:

$$\varepsilon = \gamma y_z \quad (8-3)$$

در صورتی که موتور سه فاز باشد سیم پیچی ها درای جریان سه فاز متعادل سینوسی به صورت

زیر خواهند بود:

$$\begin{cases} i_a = \sqrt{2} I \cos(\omega t) \\ i_b = \sqrt{2} I \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ i_c = \sqrt{2} I \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (9-3)$$

و نیروی محرکه مغناطیسی MMF فاصله هوایی برابر است با:

$$F = \frac{3}{2} \sqrt{2} I Z \cos(\omega t - \phi) \quad (10-3)$$

ج) در موتور CDDHM به علت بدون هسته بودن موتور، فاصله هوایی بقدر کافی بزرگ است و

می توان از هارمونیک های فضایی صرف نظر کرد. از طرف دیگر در موتور SDDHM به علت بدون

شیار بودن، هارمونیک های ناشی از شیارها وجود ندارد بنابراین می توان از تلفات پارازیتیک [۳] که

در اثر حلقه های جزئی ناشی از هارمونیک های شار در موتور پسماند وجود دارد صرف نظر کرد.

د) در مراجع [۲۵-۲۷] مشخصه هیستریزیس با تقریب متوازی الاضلاع و در مراجع [۲۸-۲۹] مشخصه هیستریزیس به صورت بیضی های متحد المركز با پرمابیلیته ماده هیستریزیس μ ثابت و α زاویه تأخیر هیستریزیس ثابت در نظر گرفته شده است. در نظر گرفتن این تقریب ها از دقت مدل می کاهد. در این پایان نامه مشخصه هیستریزیس به صورت بیضی های متحد المركز با μ و α متغیر و مرتبط با سطح حلقه های پسماند در نظر گرفته شده اند که این خود منجر به مدل سازی واقعی تر ماشین می شود. اگر مشخصه هیستریزیس و مؤلفه اصلی چگالی شار را در ماده هیستریزیس روتور در نظر بگیریم داریم:

$$B = B_m \cos(\omega t - \phi - \phi_0) \quad (۱۱-۳)$$

$$H = H_m \cos(\omega t - \phi - \phi_0 + \alpha) \quad (۱۲-۳)$$

که در آن:

$$H_m = \frac{B_m}{\mu} \quad (۱۳-۳)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{E_h}{\pi H_m B_m} \right) \quad (۱۴-۳)$$

μ پرمابیلیته ماده هیستریزیس، α زاویه تأخیر هیستریزیس و E_h سطح حلقه هیستریزیس می باشد.

ه) طول شعاعی مؤثر استاتور با تفاضل شعاع داخلی دیسک روتور و شعاع خارجی آن برابر است. (و) در هر دو موتور مورد بحث، فرض بر این است که ضخامت دیسک روتور بقدر کافی کم است که در این صورت مؤلفه اصلی چگالی شار در دیسک روتور هر دو موتور فقط شامل مؤلفه محیطی است.

۴-۳- موتور پسماند تخت دو روتوره بدون هسته CDDHM

۴-۳-۱- تحلیل توزیع چگالی شار

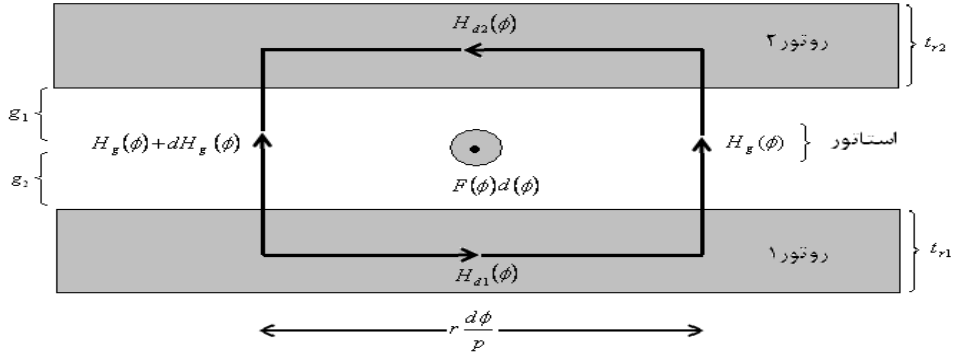
با استفاد از قانون مداری آمپر در مسیر بسته شامل دو روتور موتور CDDHM با توجه به شکل

۴-۳ می توان نوشت:

$$H_g(\phi)(g_1 + g_2) + (H_{a1}(\phi) + H_{a2}(\phi))r \frac{d\phi}{p} - (H_g(\phi) + dH_g(\phi))(g_1 + g_2) = F d\phi$$

بنابراین:

$$F = \frac{r}{p} (H_{d1}(\phi) + H_{d2}(\phi)) - (g_1 + g_2) \frac{dH_g(\phi)}{d(\phi)} \quad (15-3)$$



شکل ۲-۳ مسیر بسته مغناطیسی شامل هر دو روتور در موتور CDDHM

باید توجه کرد که استاتور هسته مغناطیسی ندارد و بنابراین فضای اشغال شده توسط استاتور بصورت بخشی از فاصله هوایی منظور می شود. در رابطه ۱۵-۳ پارامترها به قرار زیر می باشند.

r : فاصله شعاعی نقطه دلخواه دیسک روتور از مرکز

t_{r1} : ضخامت محوری دیسک یک

t_{r2} : ضخامت محوری دیسک دو

g_1 : طول فاصله هوایی از سطح مرکزی استاتور تا دیسک یک

g_2 : طول فاصله هوایی از سطح مرکزی استاتور تا دیسک دو

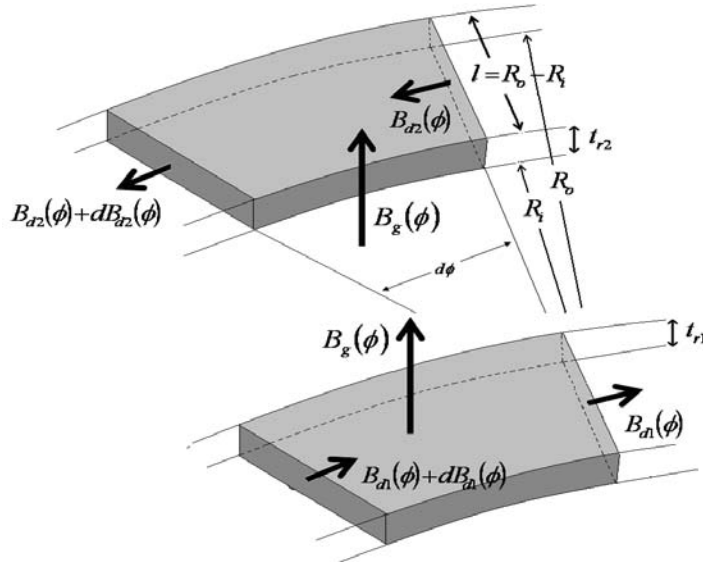
$H_g(\phi)$: شدت میدان مغناطیسی فاصله هوایی

$H_{d1}(\phi)$ و $H_{d2}(\phi)$ بترتیب شدت میدان مغناطیسی در دیسک یک و شدت میدان مغناطیسی

در دیسک دو می باشند و داریم:

$$H_{d1}(\phi) = \frac{B_{m1}}{\mu_1} \cos(\omega t - \phi - \phi_0 + \alpha_1) \quad (16-3)$$

$$H_{d2}(\phi) = \frac{B_{m2}}{\mu_2} \cos(\omega t - \phi - \phi_0 + \alpha_2) \quad (17-3)$$



شکل ۳-۳ مسیر شار در جزء دیفرانسیلی فاصله هوایی و روتور موتور CDDHM

با توجه به شکل ۳-۳ و اصل پیوستگی شار می توان چگالی شار فاصله هوایی را بدست آورد

بطوریکه در دیسک یک داریم:

$$t_{r1} \int_{R_i}^{R_o} (B_{d1}(\phi) + dB_{d1}(\phi)) dr - t_{r1} \int_{R_i}^{R_o} B_{d1}(\phi) dr = \int_{R_i}^{R_o} B_g(\phi) r \frac{d\phi}{p} dr$$

$$B_g(\phi) = \frac{p t_{r1} dB_{d1}(\phi)}{r d\phi} \quad (18-3)$$

همچنین در دیسک دو داریم:

$$t_{r2} \int_{R_i}^{R_o} (B_{d2}(\phi) + dB_{d2}(\phi)) dr - t_{r2} \int_{R_i}^{R_o} B_{d2}(\phi) dr = \int_{R_i}^{R_o} B_g(\phi) r \frac{d\phi}{p} dr$$

$$B_g(\phi) = \frac{p t_{r2} dB_{d2}(\phi)}{r d\phi} \quad (19-3)$$

در معادلات ۱۸-۳ و ۱۹-۳ پارامتر $B_g(\phi)$ توزیع چگالی شار فاصله هوایی است و داریم:

$$B_{d1}(\phi) = B_{m1} \cos(\omega t - \phi - \phi_0) \quad (20-3)$$

$$B_{d2}(\phi) = B_{m2} \cos(\omega t - \phi - \phi_0) \quad (21-3)$$

که B_{m1} و B_{m2} بترتیب چگالی شار دیسک یک و چگالی شار دیسک دو می باشند.

با استفاده از رابطه ۱۸-۳ و ۱۹-۳ داریم:

$$\frac{dB_{d2}(\phi)}{d\phi} = \frac{t_{r1}}{t_{r2}} \times \frac{dB_{d1}(\phi)}{d\phi}$$

$$B_{m2} = \frac{t_{r1}}{t_{r2}} B_{m1} \quad (22-3)$$

با قرار دادن رابطه ۲۰-۳ در رابطه ۱۸-۳ و قرار دادن نتیجه آن و رابطه های ۱۶-۳ و ۱۷-۳ در رابطه ۱۵-۳ و با توجه به رابطه ۲۲-۳ می توان نوشت:

$$\begin{aligned} \frac{3}{2} \sqrt{2} I Z \cos(\omega t - \phi) = \\ \frac{r}{p} \left(\frac{B_{m1}}{\mu_1} \cos(\omega t - \phi - \phi_0 + \alpha_1) + \frac{t_{r1} B_{m1}}{t_{r2} \mu_2} \cos(\omega t - \phi - \phi_0 + \alpha_2) \right) \\ + \frac{(g_1 + g_2) p t_{r1}}{\mu_0 r} B_{m1} \cos(\omega t - \phi - \phi_0) \end{aligned} \quad (23-3)$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ بطوریکه}$$

با بسط رابطه ۲۳-۳ می توان دامنه چگالی شار روتور $B_{m1}(r)$ و اختلاف فاز آن ϕ_0 با نیروی محرکه مغناطیسی بر حسب شعاع را بصورت زیر بدست آورد.

$$B_{m1}(r) = \frac{\frac{3}{2} \sqrt{2} I Z}{t_{r1}} \quad (24-3)$$

$$\begin{aligned} \frac{r}{p} \left(\frac{1}{\mu_1} \cos(\phi_0 - \alpha_1) + \frac{t_{r1}}{t_{r2} \mu_2} \cos(\phi_0 - \alpha_2) \right) + \frac{(g_1 + g_2) p}{\mu_0 r} \cos \phi_0 \\ \phi_0(r) = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{r}{p} \left(\frac{1}{t_{r1} \mu_1} \sin \alpha_1 + \frac{1}{t_{r2} \mu_2} \sin \alpha_2 \right)}{\frac{(g_1 + g_2) p}{\mu_0 r} + \frac{r}{p} \left(\frac{1}{t_{r1} \mu_1} \cos \alpha_1 + \frac{1}{t_{r2} \mu_2} \cos \alpha_2 \right)} \right) \end{aligned} \quad (25-3)$$

و بنابراین دامنه چگالی شار فاصله هوایی برابر می شود با:

$$B_{gm}(r) = \frac{p t_{r1}}{r} B_{m1}(r) \quad (26-3)$$

با توجه به رابطه هایی که برای دامنه های چگالی شار روتورها B_{m1} و B_{m2} بدست آمد در موتور CDDHM دامنه های چگالی شار روتورها و بنابراین دامنه چگالی شار در فاصله هوایی در امتداد شعاع تغییر می کنند. رابطه ۲۵-۳ وابستگی B_{m1} به r را بطور واضح نشان می دهد.

۳-۴-۲- مسائل خاص در موتور CDDHM

شعاعی که در موتور CDDHM چگالی شار در آن ماکزیمم می شود را می توان به دست آورد. این شعاع را بصورت زیر نشان می دهیم:

$$R_{B_{MAX}} = r \left| \frac{dB(r)}{dr} \right|_{=0} \quad (۲۷-۳)$$

یکی از مهمترین مسائلی که در طراحی ابعاد ماشین باید در نظر گرفته شود این است که چگالی شار ماکزیمم در شعاع $R_{B_{MAX}}$ از چگالی شار اشباع ماده هیستریزیس تجاوز نکند. پس برای اینکه حداکثر استفاده از ماده هیستریزیس روتور انجام گیرد ضمن اینکه ماده هیستریزیس روتور هم به اشباع نرود شاید بهترین انتخاب R_o و R_i بصورت زیر باشد:

$$R_o = R_{B_{MAX}} + \frac{l}{2} \quad (۲۸-۳)$$

$$R_i = R_{B_{MAX}} - \frac{l}{2} \quad (۲۹-۳)$$

چون در موتور های تخت $l = R_o - R_i$ نسبت به R_o و R_i معمولا کوچک است بنابراین برای محاسبات بعدی فرض $r = R_{av} = (R_i + R_o)/2$ را در نظر می گیریم. بدین ترتیب در موتور شار محیطی CDDHM می توان چگالی شار روتور را در امتداد شعاع تقریبا یکنواخت فرض کرد و مقدار آن را در هر نقطه بر روی یک زاویه مشخص برابر با مقدار متوسط آن یعنی $B_m(R_{av})$ در نظر گرفت. این فرض قابل قبول به ما این اجازه را می دهد تا بدون فرضیات ساده کننده مراجع [۲۸-۲۹] که حلقه های هیستریزیس را به صورت بیضی های متحد المکز با α و μ ثابت در نظر می گیرند به مدل کامل تری دست پیدا کنیم. مدل ارائه شده مدلی مبتنی بر پارامترهای طراحی خواهد بود و با دقت لازم می تواند به منظور طراحی بهینه بکار گرفته شود.

۳-۴-۳- مدار معادل موتور پسماند تخت دو روتوره بدون هسته

برای بدست آوردن مدار معادل لازم است ولتاژ القائی در یک فاز سیم پیچی استاتور محاسبه شود و جریان فاز استاتور به چند مؤلفه تقسیم شود. برای محاسبه ولتاژ القائی، ابتدا شار پیوندی یک حلقه سیم پیچی که شامل دو هادی در موقعیت ϕ و $\phi + \pi$ است به صورت زیر بدست می آید:

$$\varphi = \int_{R_i}^{R_o} \int_{\phi}^{\phi+\pi} (B_g(\phi, r) \Big|_{r=R_{av}}) r \frac{d\phi}{p} dr \quad (30-3)$$

اما با توجه به رابطه ۱۸-۳ داریم:

$$\left\{ B_g(\phi, r) \Big|_{r=R_{MAX}} \right\} = \left\{ \frac{pt_{r1}}{r} B_{m1}(r) \sin(\omega t - \phi - \phi_0) \Big|_{r=R_{av}} \right\} \quad (31-3)$$

در نتیجه:

$$\varphi = 2 t_{r1} (R_o - R_i) (B_{m1}(R_{av})) \cos(\omega t - \phi - \phi_0) \quad (32-3)$$

$$\varphi = \varphi_{MAX} \cos(\omega t - \phi - \phi_0) \quad (33-3)$$

$$\varphi_{MAX} = 2 t_{r1} (R_o - R_i) (B_{m1}(R_{av})) \quad (34-3)$$

بنابراین ولتاژ القائی در یک هادی در موقییت ϕ برابر است با $\frac{1}{2} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)$ و ولتاژ القائی فاز a برابر

می شود با:

$$e_a = \int_0^{2p\pi} \frac{1}{2} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right) Z \cos(\phi) d\phi \quad (35-3)$$

$$e_a = \omega K_w N_{ph} \phi_{MAX} \cos(\omega t - \phi_0 + \frac{\pi}{2}) \quad (36-3)$$

اگر طرفین رابطه ۳۲-۳ را بر $\frac{3}{2} Z$ تقسیم کنیم و مقدار $\phi = (n-1) \frac{2\pi}{3}$ که در آن $n = 1, 2, 3$

برای فاز a صفر قرار دهیم خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \sqrt{2} I \cos(\omega t) = & \frac{2r}{3Zp} \left(\frac{B_{m1}}{\mu_1} \cos(\omega t - \phi_0 + \alpha_1) + \frac{B_{m2}}{\mu_2} \cos(\omega t - \phi_0 + \alpha_2) \right) \\ & + \frac{2(g_1 + g_2) p t_{r1}}{3Z \mu_0 r} B_{m1} \cos(\omega t - \phi_0) \end{aligned} \quad (37-3)$$

در طرف راست معادله بالا جریان فاز a را داریم که با ولتاژ فاز a به اندازه $\phi_0 - \frac{\pi}{2}$ اختلاف فاز دارد. اکنون با تجزیه جریان فاز a استاتور به سه مؤلفه جریان می توان پارامترهای مدار معادل را بدست آورد.

$$i_a = i_{h1} + i_{h2} + i_{g1} + i_{g2} \quad (38-3)$$

$$i_{g1} = \frac{2g_1 p t_{r1} B_{m1}}{3Z \mu_0 r} \cos(\omega t - \phi_0) \quad (39-3)$$

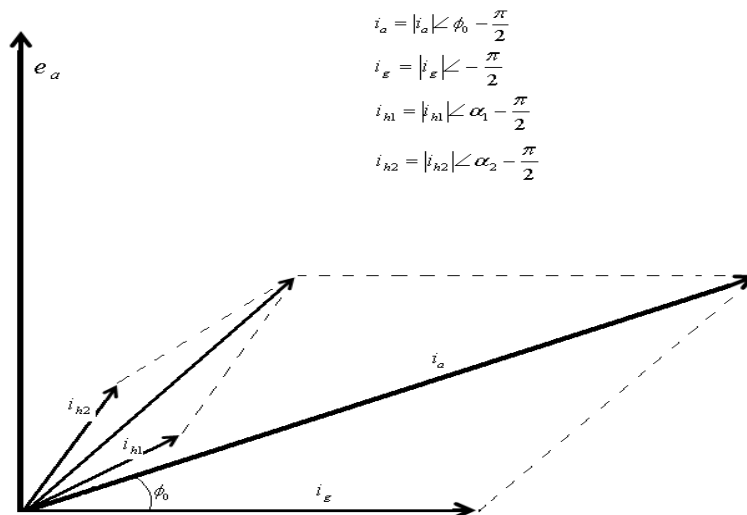
$$i_{g2} = \frac{2g_2 p t_{r2} B_{m2}}{3Z \mu_0 r} \cos(\omega t - \phi_0) \quad (40-3)$$

$$i_{h1} = \frac{2r B_{m1}}{3Z p \mu_1} \cos(\omega t - \phi_0 + \alpha_1) \quad (41-3)$$

$$i_{h2} = \frac{2r B_{m2}}{3Z p \mu_2} \cos(\omega t - \phi_0 + \alpha_2) \quad (42-3)$$

$$i_g = i_{g1} + i_{g2} = \frac{2(g_1 + g_2) p t_{r1} B_{m1}}{3Z \mu_0 r} \cos(\omega t - \phi_0) \quad (43-3)$$

باید توجه داشت که در معادلات بالا به جای متغیر r مطابق فرض قبلی باید R_{av} قرار داده شود. مؤلفه های جریان همراه با ولتاژ فاز a در دیاگرام فازوری شکل ۳-۴ نشان داده شده اند.



شکل ۳-۴ دیاگرام فازوری جریان ها و ولتاژ فاز a موتور CDDHM

بنابراین در حالت دائمی سینوسی می توان مقادیر راکتانس های مغناطیس کننده فاصله های

هوایی و امیدانس های هیستریزس متناظر با هر دیسک را جداگانه بصورت زیر محاسبه کرد.

$$j X_{g1} = j \frac{|e_a|}{|i_{g1}|} = j \frac{3\omega K_w N_{ph} \varphi_{MAX} \mu_0 R_{av} Z}{2g_1 p t_{r1} B_{m1}} \quad (44-3)$$

$$j X_{g2} = j \frac{|e_a|}{|i_{g2}|} = j \frac{3\omega K_w N_{ph} \varphi_{MAX} \mu_0 R_{av} Z}{2g_2 p t_{r2} B_{m2}} \quad (45-3)$$

$$Z_{h1} = \frac{|e_a|}{|i_{h1}|} \angle \frac{\pi}{2} - \alpha_1 = \frac{3\omega K_w N_{ph} \varphi_{MAX} p \mu_1 Z}{2R_{av} B_{m1}} \angle \frac{\pi}{2} - \alpha_1 \quad (46-3)$$

$$Z_{h2} = \frac{|e_a|}{|i_{h2}|} \angle \frac{\pi}{2} - \alpha_2 = \frac{3\omega K_w N_{ph} \varphi_{MAX} p \mu_2 Z}{2R_{av} B_{m2}} \angle \frac{\pi}{2} - \alpha_2 \quad (47-3)$$

بدین ترتیب مدار معادل یک فاز موتور پسماند تخت دو روتوره بدون هسته بصورت شکل ۳-۵

حاصل می شود. این مدار معادل شبیه مدار معادل ماشین پسماند معمول با یک شاخه موازی بیشتر

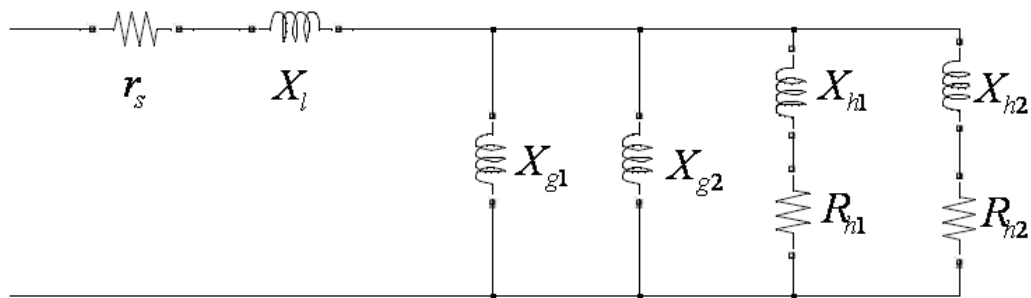
برای روتور دوم می باشد. در استفاده از این مدار معادل باید به این نکته بسیار مهم توجه داشت که

همانند دیگر ماشین های پسماند بعضی از عناصر مدار معادل شدیداً متغیر و تابع نقطه کار است و

فرض عناصر ثابت به نتایج غیر واقعی منجر می شود. در رابطه با دو عنصر مقاومت r_s و راکتانس

پراکندگی X_l هر فاز استاتور ماشین دو روتوره هنوز صحبتی نشده است که در بخش های بعدی به

آنها خواهیم پرداخت.



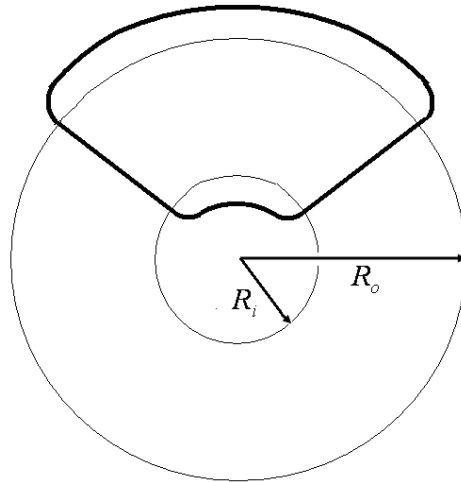
شکل ۳-۵ مدار معادل یک فاز موتور پسماند تخت دو روتوره بدون هسته CDDHM

۳-۴-۴- محاسبه مقاومت استاتور

برای محاسبه مقاومت سیم پیچی هر فاز ابتدا باید طول سیم بکار رفته در هر فاز را برآورد کرد. با توجه به شکل ۳-۶ طول تقریبی یک حلقه سیم را می توان از رابطه زیر بدست آورد.

$$l_{turn} = \frac{2\pi(R_i + R_o)y_z\gamma}{z} + (2R_o - 2R_i) \quad (۴۸-۳)$$

که در آن y_z گام کلاف بر حسب تعداد شیارها و z تعداد کل شیارها است. γ ضریب تجربی است که برای ماشین های دو قطبی $1/3$ برای ماشین های چهار قطبی $1/5$ و برای ماشین های شش قطبی و بالاتر $1/7$ منظور می شود [۳۰]. این ضریب طول پیشانی کلاف ها را بحساب می آورد.



شکل ۳-۶ استاتور و یک حلقه از سیم پیچی موتور CDDHM

بعد از محاسبه طول متوسط یک حلقه، مقاومت کل سیم پیچی هر فاز در دمای مشخص T_1 از رابطه زیر بدست می آید.

$$r_s = \frac{N_{ph} l_{turn}}{\sigma_c \left(\frac{D_{conductor}}{2} \right)^2 \pi} \quad (۴۹-۳)$$

که در آن $D_{conductor}$ قطر سیم و σ_c هدایت ویژه سیم داده شده در دمای T_1 می باشد. هدایت ویژه سیم مسی در دمای محیط 57×10^6 می باشد. مقاومت سیم پیچی استاتور به دما بستگی دارد و در هر دمای کاری T_2 می توان مقاومت را با رابطه زیر تصحیح کرد.

$$r_s(T_2) = r_s(T_1)(1 + \alpha_{T1}(T_2 - T_1)) \quad (۵۰-۳)$$

که در آن α_{T1} ضریب دمایی مقاومت می باشد که مقدار آن برای سیم مسی $0.0039/^\circ\text{C}$ می باشد. مقاومت محاسبه شده برای جریان DC صادق است. در فرکانس های بالا اثر تلفات جریان گردابی در هادی ها قابل توجه است و در مرجع [۳۱] روشی برای در نظر گرفتن اثر جریان های گردابی در سیم پیچی ها ارائه شده است. بنابراین مقدار مقاومت DC محاسبه شده باید توسط ضریبی برای فرکانس های بالا تصحیح شود. مقاومت AC را می توان از رابطه زیر به دست آورد [۳۱]:

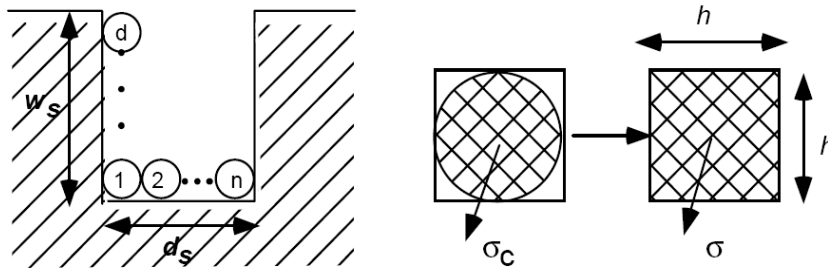
$$r_s(AC) = r_s(DC) \times \left(\frac{h \sinh 2(h/\delta_c) + \sin 2(h/\delta_c)}{\delta_c \cosh 2(h/\delta_c) - \cos 2(h/\delta_c)} + \frac{2}{3}(d^2 - 1) \frac{h \sinh 2(h/\delta_c) - \sin 2(h/\delta_c)}{\delta_c \cosh 2(h/\delta_c) + \cos 2(h/\delta_c)} \right) \quad (51-3)$$

همان گونه که در شکل ۳-۷ مشخص است اگر سطح مقطع هادی را یک مربع در نظر بگیریم ارتفاع مؤثر سطح مقطع هادی است. d تعداد هادی هایی که در یک شیار در جهت عمودی روی هم قرار می گیرند می باشد و δ_c ضریب اثر پوستی هادی است که از رابطه زیر به دست می آید.

$$\delta_c = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma_c}} \quad (52-3)$$

در این رابطه μ ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی هادی می باشد که مقدار آن را برابر نفوذ پذیری

مغناطیسی هوا در نظر می گیریم.



شکل ۳-۷ توزیع سیم پیچی در یک شیار مستطیلی [۳۱]

۳-۴-۵- محاسبه راکتانس پراکندگی

اصولا محاسبه دقیق پراکندگی های شار بر اساس پارامترهای طراحی در ماشینهای الکتریکی کار پیچیده ای است. برای این منظور از روشهای عددی مانند المان محدود بسیار استفاده می شود که پیچیدگی ها و معایب خاص خود را دارد. ساختار غیر خطی و چند مقداره پدیده هیستریزس در موتور

پسماند، به پیچیدگی این موضوع افزوده است. اما با توجه به این که فاصله هوایی به علت عدم وجود هسته مغناطیسی در موتور های مورد بحث بسیار بزرگ است، قسمت اعظم پراکندگی مربوط به شارهایی است که مسیر خود را در فاصله هوایی بین روتور و استاتور می بندند. بنابراین می توان ادعا کرد که سهمی از شار ناشی از MMF به نسبت رلکتانس دیسک روتور و رلکتانس فاصله هوایی از فاصله هوایی بر می گردد. با توجه به این موضوع می توان پراکندگی های شار و راکتانس های پراکندگی متناظر این موتورها را به سادگی و با تقریب نسبتا خوبی بر حسب پارامترهای طراحی محاسبه کرد. پس از محاسبه پراکندگی های مربوط به فاصله هوایی پراکندگی مربوط به کله سیمها هم محاسبه شده و به مقدار پراکندگی های مربوط به فاصله هوایی افزوده می شود تا مقدار پراکندگی کل بدست آید.

شماتیکی از مدار مغناطیسی موتور CDDHM و خطوط شار آن در شکل ۳-۸ نشان داده شده است. برای این موتورها می توان رلکتانس هایی را به صورت زیر تعریف کرد:

$$\tilde{R}_{g1} = \frac{2g_1}{\mu_0 A_{g1}} \quad (53-3)$$

$$\tilde{R}_{l_{g1}} = \frac{L}{2\mu_0 g_1 l} \quad (54-3)$$

$$\tilde{R}_{d1} = \frac{L}{2\mu_1 t_{r1} l} \quad (55-3)$$

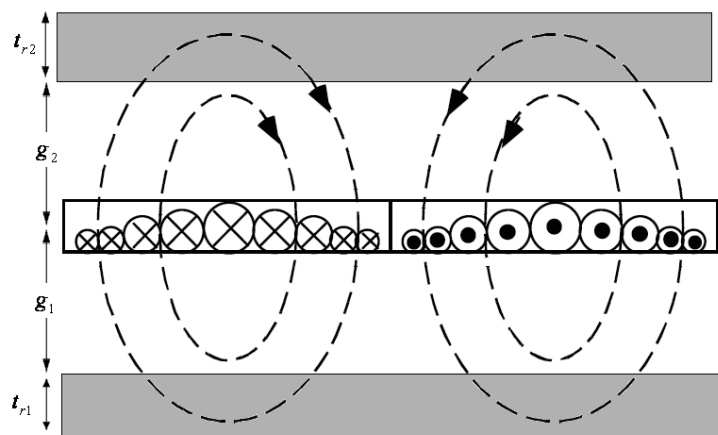
که در آنها $L = \pi R_{av} / p$ طول محیطی مؤثر دیسک هر کدام از روتورها زیر یک قطب، $l = R_o - R_i$ طول شعاعی دیسک هر کدام از روتورها و $A_{g1} = Ll$ سطح فاصله هوایی زیر یک قطب می باشند. بنابراین رلکتانس فاصله هوایی زیر یک جفت قطب در امتداد شعاع، \tilde{R}_{lg1} رلکتانس فاصله هوایی زیر یک جفت قطب در امتداد محیط و \tilde{R}_{d1} رلکتانس دیسک روتور ۱ زیر یک جفت قطب در امتداد محیط می باشند. مقادیر \tilde{R}_{d2} ، \tilde{R}_{g2} ، $\tilde{R}_{l_{g2}}$ برای فاصله هوایی و روتور طرف دیگر نیز بطور مشابه بدست می آیند. این عناصر در مدار معادل الکتریکی مدار مغناطیسی ماشین، مطابق شکل ۳-۹ کنار هم قرار می گیرند اگر در این مدار رلکتانس ها را با هم تلفیق کنیم مدار معادل مغناطیسی شکل ۳-۱۰ بدست می آید که در آن:

$$\tilde{R}_{total} = (\tilde{R}_{g1} + \tilde{R}_{d1}) \parallel (\tilde{R}_{g2} + \tilde{R}_{d2}) \quad (56-3)$$

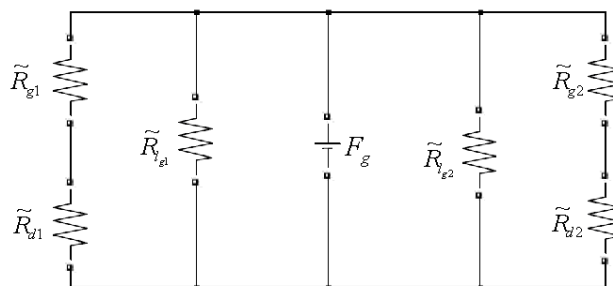
$$\tilde{R}_{lg} = \tilde{R}_{l_{g1}} \parallel \tilde{R}_{l_{g2}} \quad (57-3)$$

برای مدار معادل شکل ۹-۳ می توان دوگان الکتریکی همانند شکل ۳-۱۰ را در نظر گرفت. که در آن راکتانس پراکندگی و راکتانس محاسبه شده از دو سر A و B مدار معادل ماشین نشان داده شده در شکل ۳-۱۱ می باشد. بنابراین معقول بنظر می رسد با توجه به تقسیم شار، راکتانس پراکندگی فاصله هوایی را بصورت زیر برآورد نمود:

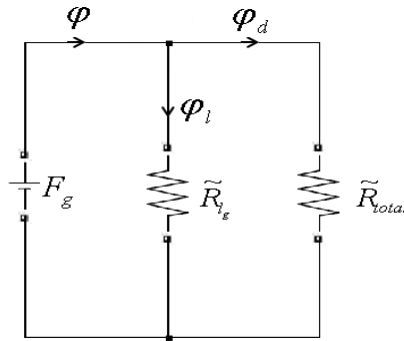
$$X_{lg} = \frac{\tilde{R}_{total}}{\tilde{R}_{lg}} X_{eq} \quad (58-3)$$



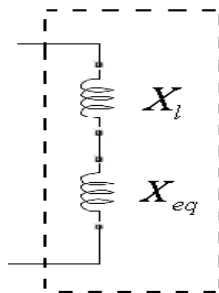
شکل ۳-۸ مسیر شار در موتور CDDHM



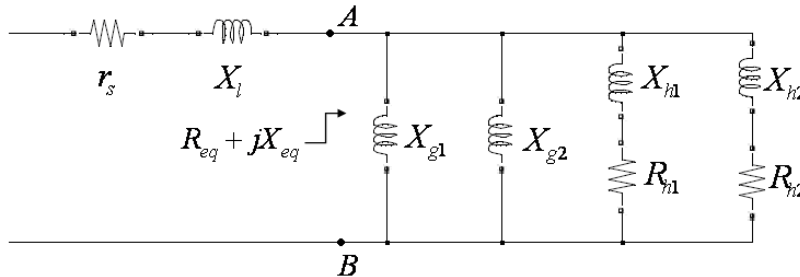
شکل ۳-۹ مدار معادل مغناطیسی موتور CDDHM



شکل ۱۰-۳ مدار معادل مغناطیسی موتور CDDHM



شکل ۱۱-۳ دوگان الکتریکی مدار معادل مغناطیسی شکل ۱۰-۳



شکل ۱۲-۳ مدار معادل الکتریکی موتور CDDHM

ساختار سیم پیچی موتورهای بدون هسته معمولاً از نوع رویهم و طول کله سیم ها و پراکندگی ناشی از آن قابل توجه می باشد. برای محاسبه راکتانس ناشی کله سیم ها می توان از رابطه تجربی زیر استفاده کرد [۳۲]:

$$X_{end} = \frac{0.482k_x \mu_0 m (2R_{av}) y_z}{1000 pz} \quad (۵۹-۳)$$

که در آن:

$$k_x = 2\pi f (2N_{ph} K_w)^2 \quad (۶۰-۳)$$

مجموع راکتانس پراکندگی کله سیم ها X_{end} با راکتانس پراکندگی فاصله هوایی X_{lg} ، کل راکتانس پراکندگی موتور X_l را تشکیل می دهند.

۳-۵- موتور پسماند تخت دو روتوره بدون شیار SDDHM

تحلیل عملکرد و مدلسازی موتور پسماند تخت دو روتوره بدون شیار مشابه تحلیل عملکرد موتور پسماند تخت دو روتوره بدون هسته است ولی در جزئیات تفاوت هایی وجود دارد که در مدلسازی باید مد نظر قرار گرفته شود. با در نظر گرفتن همان فرضیاتی که برای تحلیل موتور پسماند CDDHM به کار بسته شد، موتور SDDHM را تحلیل و مدار معادل حالت دائمی را برای این موتور به دست می آوریم.

۳-۵-۱- تحلیل توزیع چگالی شار

با اعمال قانون مداری آمپر به مسیر بسته شامل هر دو روتور و استاتور و با در نظر گرفتن شکل

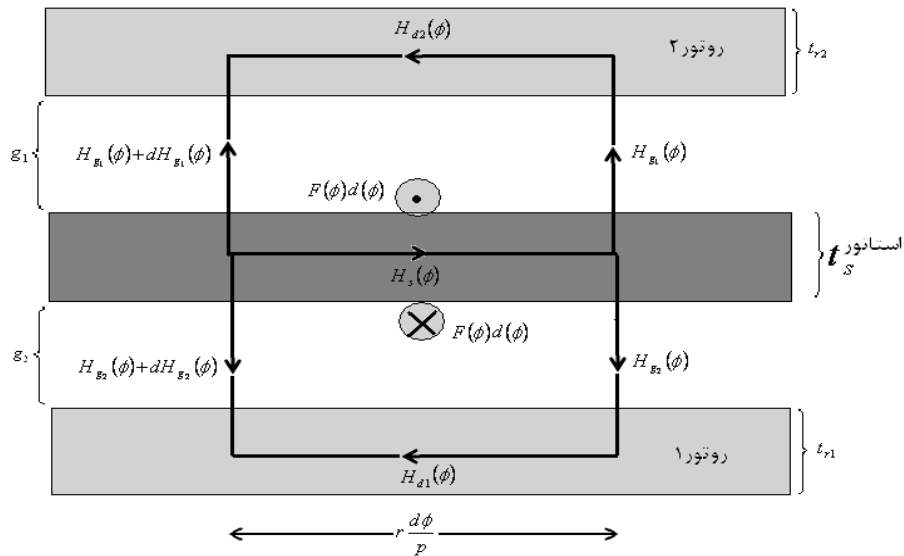
۳-۱۳ می توان نوشت:

در روتور (۱):

$$H_{g1}(\phi)(g_1) + (H_{d1}(\phi) + H_s(\phi))r \frac{d\phi}{p} - (H_{g1}(\phi) + dH_{g1}(\phi))(g_1) = F d\phi \quad (۶۱-۳)$$

در روتور (۲):

$$H_{g2}(\phi)(g_2) + (H_{d2}(\phi) + H_s(\phi))r \frac{d\phi}{p} - (H_{g2}(\phi) + dH_{g2}(\phi))(g_2) = F d\phi \quad (۶۲-۳)$$



شکل ۳-۱۳ مسیر بسته مغناطیسی شامل هر دو روتور و استاتور در موتور SDDHM

با توجه به این موضوع که پرمابلیته استاتور را بی نهایت در نظر می گیریم داریم:

$$H_s(\phi) = 0 \quad (۶۳-۳)$$

پس می توان نوشت:

$$F = \frac{r}{p} H_{d1}(\phi) - (g_1) \frac{dH_{g1}(\phi)}{d(\phi)} = \frac{r}{p} H_{d2}(\phi) - (g_2) \frac{dH_{g2}(\phi)}{d(\phi)} \quad (۶۴-۳)$$

$H_{g1}(\phi)$: شدت میدان مغناطیسی فاصله هوایی دیسک یک

$H_{g2}(\phi)$: شدت میدان مغناطیسی فاصله هوایی دیسک دو

g_1 : طول فاصله هوایی از استاتور تا دیسک یک

g_2 : طول فاصله هوایی از استاتور تا دیسک دو

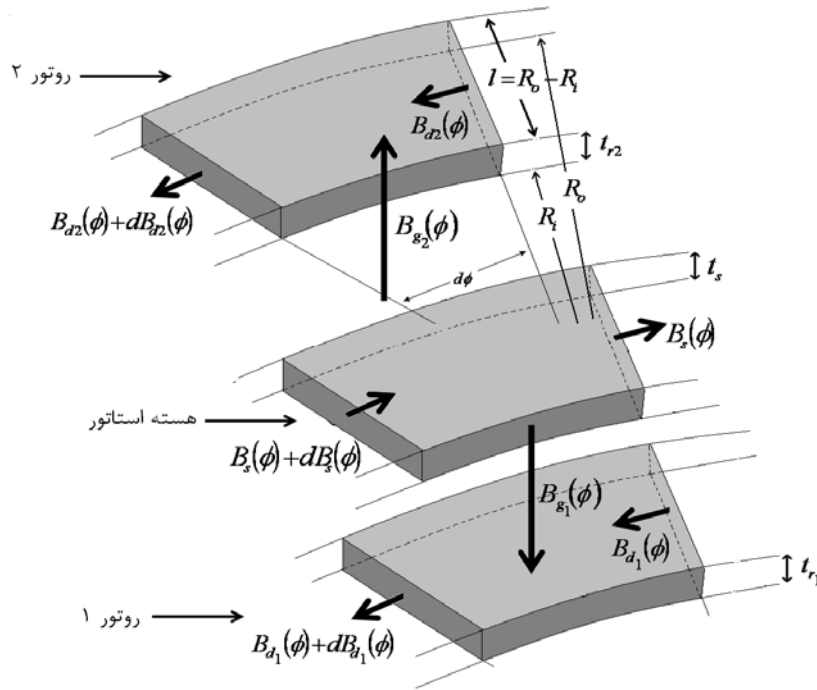
$$\text{شدت میدان مغناطیسی در دیسک یک } H_{d1}(\phi) = \frac{B_{m1}}{\mu_1} \cos(\omega t - \phi - \phi_0 + \alpha_1)$$

$$\text{شدت میدان مغناطیسی در دیسک دو } H_{d2}(\phi) = \frac{B_{m2}}{\mu_2} \cos(\omega t - \phi - \phi_0 + \alpha_2)$$

r شعاع دیسک روتور

t_{r1} ضخامت دیسک یک

t_{r2} ضخامت دیسک دو



شکل ۳-۱۴ مسیر شار فاصله هوایی، شار روتور و شار استاتور در جزء دیفرانسیلی $d\phi$ در موتور SDDHM

با توجه به شکل ۳-۱۴ و اصل پیوستگی شار می توانیم چگالی شار فاصله هوایی را به دست آوریم

در صورتی که دیسک یک را در نظر بگیریم می توان نوشت:

$$t_{r1} \int_{R_i}^{R_o} (B_{d1}(\phi) + dB_{d1}(\phi)) dr - t_{r1} \int_{R_i}^{R_o} B_{d1}(\phi) dr = \int_{R_i}^{R_o} B_{g1}(\phi) r \frac{d\phi}{p} dr$$

$$B_{g1}(\phi) = \frac{p t_{r1} dB_{d1}(\phi)}{r d\phi} \quad (۶۵-۳)$$

و در دیسک دو داریم:

$$t_{r2} \int_{R_i}^{R_o} (B_{d2}(\phi) + dB_{d2}(\phi)) dr - t_{r2} \int_{R_i}^{R_o} B_{d2}(\phi) dr = \int_{R_i}^{R_o} B_{g2}(\phi) r \frac{d\phi}{p} dr$$

$$B_{g2}(\phi) = \frac{p t_{r2} dB_{d2}(\phi)}{r d\phi} \quad (۶۶-۳)$$

بطوریکه:

$$B_{g2}(\phi) \text{ چگالی شار فاصله هوایی در سمت دیسک (۱)}$$

$$B_{g1}(\phi) \text{ چگالی شار فاصله هوایی در سمت دیسک (۲)}$$

$$B_{d1}(\phi) = B_{m1} \cos(\omega t - \phi - \phi_0) \text{ چگالی شار در دیسک یک}$$

$$B_{d2}(\phi) = B_{m2} \cos(\omega t - \phi - \phi_0) \text{ چگالی شار در دیسک دو}$$

همچنین در استاتور می توان نوشت:

$$t_s \int_{R_i}^{R_o} (B_s(\phi) + dB_s(\phi)) dr - t_s \int_{R_i}^{R_o} B_s(\phi) dr = \int_{R_i}^{R_o} B_{g1}(\phi) r \frac{d\phi}{p} dr + \int_{R_i}^{R_o} B_{g2}(\phi) r \frac{d\phi}{p} dr$$

$$t_s dB_s(\phi) = B_{g1}(\phi) r \frac{d\phi}{p} + B_{g2}(\phi) r \frac{d\phi}{p} \quad (۶۷-۳)$$

با قرار دادن روابط ۶۵-۳ و ۶۶-۳ در ۶۷-۳ می توان نوشت:

$$\frac{dB_s(\phi)}{d\phi} = \frac{1}{t_s} (t_{r1} B_{m1} + t_{r2} B_{m2}) \cos(\omega t - \phi - \phi_0) \quad (۶۸-۳)$$

از این رابطه می توان برای طراحی استاتور استفاده کرد.

با قرار دادن رابطه ۶۵-۳ و ۶۶-۳ در ۶۴-۳ داریم:

$$\begin{aligned} \frac{3}{2} \sqrt{2} I Z \cos(\omega t - \phi) &= \frac{r B_{m1}}{p \mu_1} \cos(\omega t - \phi - \phi_0 + \alpha_1) + \frac{g_1 p t_{r1}}{\mu_0 r} B_{m1} \cos(\omega t - \phi - \phi_0) \\ &= \frac{r B_{m2}}{p \mu_2} \cos(\omega t - \phi - \phi_0 + \alpha_2) + \frac{g_2 p t_{r2}}{\mu_0 r} B_{m2} \cos(\omega t - \phi - \phi_0) \end{aligned} \quad (۶۹-۳)$$

با بسط رابطه بالا می توان دامنه چگالی شار در روتور $B_{m1}(r)$ و $\phi_0(r)$ اختلاف فاز آن با (MMF)

را بر حسب شعاع به دست آورد:

$$B_{m1}(r) = \frac{\frac{3}{2} \sqrt{2} I Z}{\frac{r}{p \mu_1} (\cos \phi_0 \cos \alpha_1 + \sin \phi_0 \sin \alpha_1) + \frac{g_1 p t_{r1}}{\mu_0 r} \cos \phi_0} \quad (۷۰-۳)$$

$$B_{m2}(r) = \frac{\frac{3}{2} \sqrt{2} I Z}{\frac{r}{p \mu_2} (\cos \phi_0 \cos \alpha_2 + \sin \phi_0 \sin \alpha_2) + \frac{g_2 p t_{r2}}{\mu_0 r} \cos \phi_0} \quad (۷۱-۳)$$

با توجه به رابطه ۶۹-۳ می توان رابطه بین B_{m1} و B_{m2} را به دست آورد.

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{m2} = B_{m1} \frac{\mu_2 \sin \alpha_1}{\mu_1 \sin \alpha_2} \\ B_{m2} = B_{m1} \frac{\frac{r}{\rho \mu_1} \cos \alpha_1 + \frac{g_1 P t_{r1}}{\mu_0 r}}{\frac{r}{\rho \mu_2} \cos \alpha_2 + \frac{g_2 P t_{r2}}{\mu_0 r}} \end{array} \right. \quad (72-3)$$

در صورتی که ابعاد دیسک ها و اندازه فاصله هوایی ها در دو طرف با هم برابر باشد B_{m2} با B_{m1} برابر است و داریم:

$$\phi_0(r) = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{r}{\rho \mu_1} \sin \alpha_1}{\frac{g_1 P t_{r1}}{\mu_0 r} + \frac{r}{\rho \mu_1} \cos \alpha_1} \right) \quad (73-3)$$

و بنابراین دامنه چگالی شار فاصله هوایی برابر می شود با:

$$B_{gm}(r) = \frac{P t_{r1}}{r} B_{m1}(r) \quad (74-3)$$

با توجه به رابطه هایی که برای دامنه های چگالی شار روتورها B_{m1} و B_{m2} بدست آمد در موتور SDDHM دامنه های چگالی شار روتورها و بنابراین دامنه چگالی شار در فاصله هوایی در امتداد شعاع تغییر می کند. رابطه های ۷۰-۳ و ۷۱-۳ وابستگی B_{m1} به r را بطور واضح نشان می دهند. در موتور SDDHM نیز به دلایل مشابه می توان چگالی شار را روی روتور یکنواخت و برابر در $B_m(R_{av})$ در نظر گرفت.

۳-۵-۲- مدار معادل موتور پسماند تخت دو روتوره بدون شیار

برای بدست آوردن مدار معادل لازم است ولتاژ القایی در یک فاز سیم پیچی استاتور محاسبه شود و جریان فاز استاتور به چند مولفه تقسیم شود. در این موتور ها با توجه به این که سیم پیچی ها به صورت حلقوی هستند ولتاژ القایی در هر طرف با توجه به شار پیوندی در آن سمت به دست می آید و سپس ولتاژ القایی متناظر با هر طرف به دست می آید. به علت ساختار حلقوی در سیم پیچی ولتاژ القایی کل برابر با مجموع برداری ولتاژهای متناظر هر طرف می باشد با توجه به این که شار های

پیوندی سیم پیچی های هر دو سمت استاتور هم فاز می باشند پس ولتاژهای القائی برای هر دو طرف همفاز هستند.

در سمت روتور ۱، شار پیوندی یک حلقه سیم پیچی که شامل دو هادی در موقعیت ϕ و $\phi + \pi$ روبروی روتور ۱ می باشد به صورت زیر بدست می آید:

$$\varphi_1 = \int_{R_i}^{R_o} \int_{\phi}^{\phi+\pi} (B_{g1}(\phi, r) \Big|_{r=R_{av}}) r \frac{d\phi}{p} dr \quad (75-3)$$

اما با توجه به رابطه های ۶۵-۳ و ۶۶-۳ داریم:

$$\left\{ B_{g1}(\phi, r) \Big|_{r=R_{MAX}} \right\} = \left\{ \frac{pt_{r1}}{r} B_{m1}(r) \sin(\omega t - \phi - \phi_0) \Big|_{r=R_{av}} \right\} \quad (76-3)$$

در نتیجه:

$$\varphi_1 = 2t_{r1}(R_o - R_i)(B_{m1}(R_{av})) \cos(\omega t - \phi - \phi_0) \quad (77-3)$$

$$\varphi_1 = \varphi_{MAX1} \cos(\omega t - \phi - \phi_0) \quad (78-3)$$

$$\varphi_{MAX1} = 2t_{r1}(R_o - R_i)(B_{m1}(R_{av})) \quad (79-3)$$

بنابراین ولتاژ القائی در یک هادی در موقعیت ϕ در سمت روتور ۱ برابر است با $\frac{1}{2} \left(\frac{d\varphi_1}{dt} \right)$ و ولتاژ

القائی در سیم پیچی های یک طرف فاز a برابر است با:

$$e_{a1} = \int_0^{2p\pi} \frac{1}{2} \left(\frac{d\varphi_1}{dt} \right) Z \cos(\phi) d\phi \quad (80-3)$$

$$e_{a1} = \omega K_w N_{ph} \phi_{MAX} \cos(\omega t - \phi_0 + \frac{\pi}{2}) \quad (81-3)$$

و به روش مشابه می توان روابط ولتاژ و شار پیوندی را در سمت روتور ۲ نیز به دست آورد.

$$\varphi_{MAX2} = 2t_{r2}(R_o - R_i)B_{m2} \quad (82-3)$$

$$e_{a2} = \omega K_w N_{ph} \phi_{MAX2} \cos(\omega t - \phi_0 + \frac{\pi}{2}) \quad (83-3)$$

و بالاخره مدار معادل ماشین دو روتوره بدون شیار به صورت شکل ۱۵-۳ به دست می آید.

اگر طرفین رابطه ۶۹-۳ را بر $\frac{3}{2}Z$ تقسیم کنیم و مقدار $\phi = (n-1)\frac{2\pi}{3}$ که در آن $n = 1, 2, 3$

برای فاز a صفر قرار دهیم خواهیم داشت:

$$\begin{aligned}\sqrt{2} I \cos(\omega t) &= \frac{2r}{3Zp} \frac{B_{m1}}{\mu_1} \cos(\omega t - \phi_0 + \alpha_1) + \frac{2g_1 p t_{r1}}{3Z \mu_0 r} B_{m1} \cos(\omega t - \phi_0) \\ &= \frac{2r}{3Zp} \frac{B_{m2}}{\mu_2} \cos(\omega t - \phi_0 + \alpha_2) + \frac{2g_2 p t_{r1}}{3Z \mu_0 r} B_{m1} \cos(\omega t - \phi_0)\end{aligned}\quad (۸۴-۳)$$

در طرف راست معادله بالا جریان فاز a را داریم که با ولتاژ فاز a به اندازه $\frac{\pi}{2} - \phi_0$ اختلاف فاز دارد. اکنون با تجزیه جریان فاز a استاتور به دو مولفه جریان برای هر دو طرف استاتور می توان پارامترهای مدار معادل را بدست آورد.

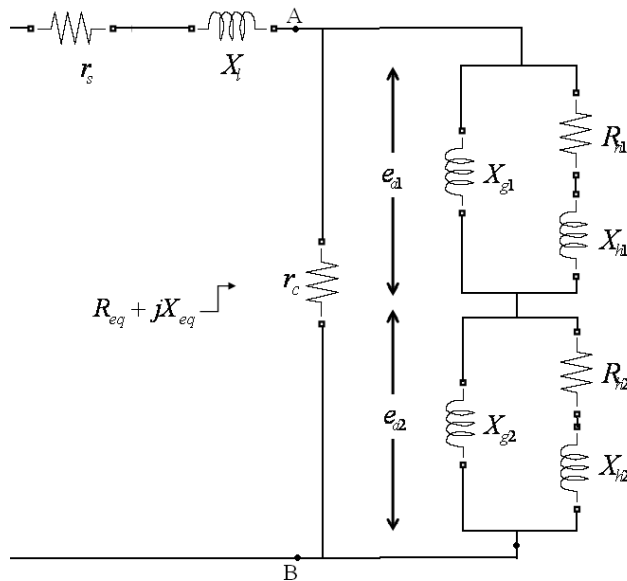
$$i_a = i_{h1} + i_{g1} = i_{g2} + i_{h2} \quad (۸۵-۳)$$

$$i_{g1} = \frac{2g_1 p t_{r1} B_{m1}}{3Z \mu_0 r} \cos(\omega t - \phi_0) \quad (۸۶-۳)$$

$$i_{g2} = \frac{2g_2 p t_{r2} B_{m2}}{3Z \mu_0 r} \cos(\omega t - \phi_0) \quad (۸۷-۳)$$

$$i_{h1} = \frac{2r B_{m1}}{3Z p \mu_1} \cos(\omega t - \phi_0 + \alpha_1) \quad (۸۸-۳)$$

$$i_{h2} = \frac{2r B_{m2}}{3Z p \mu_2} \cos(\omega t - \phi_0 + \alpha_2) \quad (۸۹-۳)$$



شکل ۱۵-۳ مدار معادل موتور پسماند نوع دو روتوره بدون شیار

پارامتر های مدار معادل موتور SDDHM از دو سر A و B را می توان مشابه روشی که پارامتر های مدار معادل موتور CDDHM به دست آمد با تقسیم مولفه های جریان هر طرف استاتور به ولتاژ متناظر آن سمت به دست آورد.

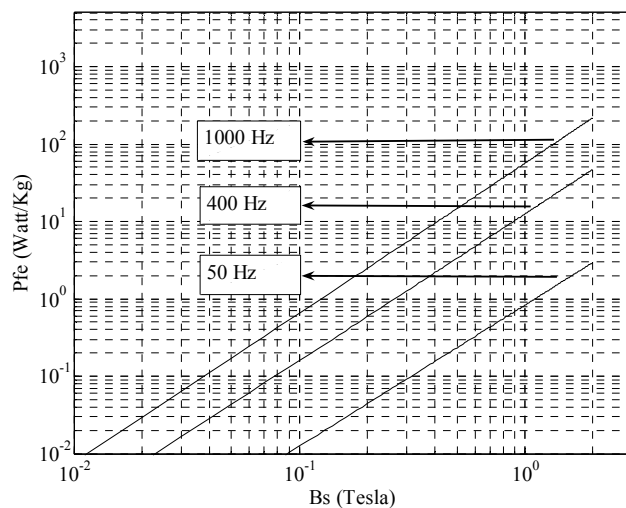
۳-۵-۳- تلفات آهن

در ساختار مورد بحث بخش عمده ای از تلفات مربوط به تلفات آهن هسته استاتور است که باید در نظر گرفته شود. البته نحوه سیم پیچی این موتور به گونه ای است که نسبت موتور بدون هسته مشابه مقاومت استاتور کوچکتر است و بنابراین تلفات مس کمتری خواهیم داشت.

تلفات هسته شامل تلفات جریان گردابی و تلفات هیستریزیس است. از رابطه Steinmetz می توان تلفات آهن را برحسب وات بر کیلوگرم به دست آورد [۳۳].

$$P_{fe} = P_h + P_{eddy} = c_h B_{ms}^n f + c_e B_{ms}^2 f^2 \quad (۹۰-۳)$$

بطوریکه c_e و c_h ضرایب ثابت هستند که توسط کارخانه سازنده تعیین می شوند. B_{ms} را می توان از رابطه ۳-۶۸ به دست آورد. شکل ۳-۱۶ رابطه تلفات در واحد جرم هسته را بر حسب چگالی شار هسته در فرکانس های مختلف برای یک نمونه هسته نشان می دهد. در این هسته $c_e = 0.00004219$ ، $c_h = 0.014492$ و $n = 1.8$ است.



شکل ۳-۱۶ تلفات بر حسب فرکانس و چگالی شار برای یک نمونه هسته

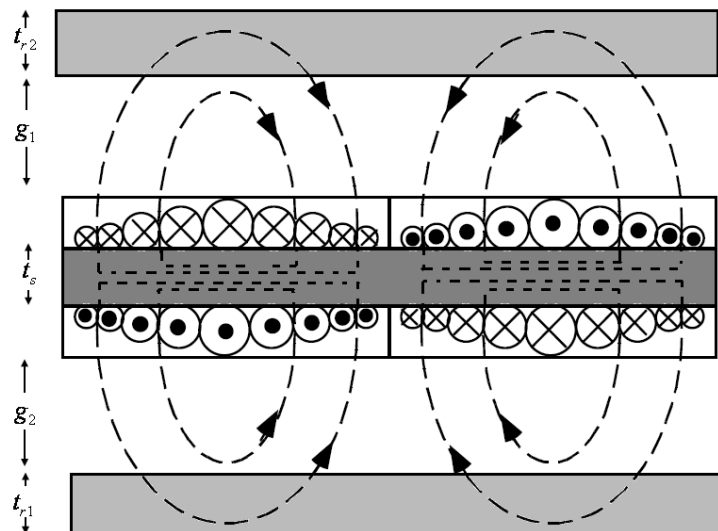
تلفات آهن را می توان با مقاومت موازی با دو شاخه مربوط به روتور ها در مدل مداری در نظر گرفت. مقاومت r_c که نماینده تلفات هسته است را می توان از رابطه زیر به دست آورد.

$$r_c = \frac{(E_{a1} + E_{a2})^2 3}{m_{Core} P_{fe}} \quad (91-3)$$

که در این رابطه m_{Core} وزن هسته استاتور، E_{a1} و E_{a2} مقادیر موثر ولتاژ های القائی است.

۳-۵-۴- محاسبه پراکندگی

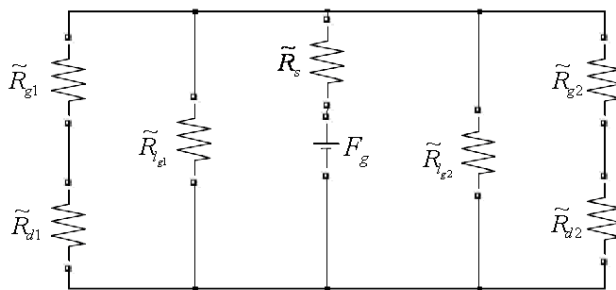
در موتور SDDHM به علت عدم وجود شیار ها سیم پیچی ها روی استاتور قرار می گیرند بنابراین فاصله هوایی در این موتور هم مانند موتور CDDHM بزرگ است لذا از همان روشی که پراکندگی ها را برای موتور CDDHM به دست آوردیم می توان پراکندگی را برای موتور SDDHM هم به دست آورد. در شکل ۳-۱۷ می توان شماتیکی از مدار مغناطیسی موتور SDDHM و خطوط شار آن را مشاهده کرد.



شکل ۳-۱۷ مسیر شار در موتور SDDHM

مسیر شار در موتور SDDHM از هسته استاتور بدون شیار موتور بسته می شود. مسیر شار در روتور ها مشابه موتور CDDHM است بنابراین پارامترهای مدار معادل مغناطیسی موتور SDDHM

مشابه پارامتر های مدار معادل مغناطیسی موتور CDDHM به دست می آیند. شکل ۳-۱۸ مدار معادل مغناطیسی موتور SDDHM را نشان می دهد. با فرض پرمابلیته بی نهایت برای هسته استاتور موتور SDDHM از رلوکتانس مربوط به هسته استاتور \tilde{R}_s صرف نظر کرده و مقدار آن را صفر در نظر می گیریم. با این توصیف نهایتاً رابطه ای مشابه رابطه ۳-۵۸ برای محاسبه راکتانس پراکندگی موتور SDDHM به دست می آید که در آن X_{eq} راکتانس محاسبه شده از دو سر A و B مدار معادل ماشین نشان داده شده در شکل ۳-۱۵ است.



شکل ۳-۱۸ مدار مغناطیسی موتور SDDHM

در موتور بدون شیار دو روتوره به علت سیم پیچی تروئیدال و ضخامت تقریباً کم استاتور، طول کله سیم ها بسیار کوتاه است و کله سیم ها طوری قرار گرفته اند که شار عبوری از استاتور را تقویت می کنند از این رو می توان از پراکندگی ناشی از کله سیم ها صرف نظر کرد.

۳-۶- نتیجه گیری

در این فصل مدلی تحلیلی برای هر کدام از موتور های CDDHM و SDDHM بدست آمد و مدار معادلی برای هر کدام از موتورها ارائه شد. مدلسازی های انجام شده بر اساس پارامتر های طراحی موتور است و می توان از این مدل ها برای تحلیل عملکرد موتور های CDDHM و SDDHM در حالت دائمی استفاده کرد. مدل های ارائه شده با دقت کافی می تواند به منظور بهینه سازی طراحی و پیش بینی عملکرد موتور های CDDHM و SDDHM به کار گرفته شوند. از مطالب کلیدی مطرح شده در این فصل می توان به موارد زیر اشاره کرد.

- ۱- بر اساس تحلیل الکترومغناطیسی و مدلسازی تقریبی پدیده پسماند، یک مدل حالت ماندگار برای هر کدام از موتور های CDDHM و SDDHM استخراج شد و مدار های معادل الکتریکی آنها ارائه گردید. با توجه به مبتنی بودن روابط مربوط به المان های این مدار های معادل بر پارامترهای طراحی امکان استفاده از آن در بهینه سازی های طراحی فراهم است.
- ۲- بر اساس مدار های معادل موتور CDDHM و SDDHM موضوعاتی همچون ضخامت بهینه دیسکها، نسبت قطر داخلی به خارجی آنها برای دستیابی به بازده ماکزیمم و سایر موارد مربوط به بهینه سازی عملکرد می تواند مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد.

فصل چهارم

ملاحظات طراحی

و بهینه سازی طراحی

۴-۱- مقدمه

اگرچه در طراحی ماشینهای الکتریکی بهینه سازی پارامترهایی مختلفی از جمله راندمان، ضریب توان، وزن تمام شده و هزینه ساخت موتور می تواند مد نظر باشد، ولی در کاربرد های مختلف هر یک از این اهداف می تواند اهمیت متفاوتی داشته باشند. در فصول قبل برای موتور های CDDHM و SDDHM مدلی هائی مبتنی بر پارامتر های طراحی یعنی ابعاد ماشین، نوع و ساختار سیم پیچی و پارامترهای مربوط به مواد پسماند استفاده شده در روتورها به دست آوردیم که با دقت و حساسیت کافی می توانند به منظور طراحی بهینه به کار گرفته شوند. در این فصل برخی از ملاحظات طراحی خاص موتور های CDDHM و SDDHM که باید به آنها توجه ویژه داشت مورد بررسی قرار می گیرند. سپس از الگوریتم ژنتیک^۱ برای بهینه سازی طراحی به منظور دستیابی به راندمان ماکزیمم در هر کدام از موتور ها استفاده می کنیم.

۴-۲- ورودی های مسئله طراحی بهینه

برخی از پارامترهای ورودی و خروجی ماشین که می خواهیم طراحی کنیم ورودی های مسئله طراحی هستند. ورودی های مسئله می توانند مشخصه های از ماشین باشند که ذیلا به آنها اشاره می شود.

۱- P_{out} : توان خروجی ماشین یا T_{out} : گشتاور خروجی ماشین

۲- n_{syn} : سرعت سنکرون یا سرعت کاری ماشین

۳- f_s : فرکانس تغذیه ماشین

۴- V_{in} : ولتاژ تغذیه ماشین

1 - Genetic algorithm

۵- m تعداد فازها

در یک ماشین پسماند توان خروجی ماشین حدوداً همان توان مصرف شده در حالت سکون به علت پدیده پسماند روتور است. همان طور که در فصل یک آمده است توان خروجی ماشین پسماند از رابطه زیر به دست می آید.

$$P = V_{Hysteresis} E_h f \quad (1-4)$$

که در این رابطه $V_{Hysteresis}$ حجم ماده پسماند روتور، f_s فرکانس ورودی و E_h سطح حلقه پسماند کاری موتور است. با استفاده از این رابطه می توان حجم روتور را به منظور دستیابی به توان خروجی مورد نظر به دست آورد. حال سؤال این است که کدام حلقه کاری را انتخاب کنیم؟ همانطور که در فصل دوم گفته شد، در موتور پسماند راندمان ماکزیمم به ازاء یکی از حلقه های پسماند کاری اتفاق می افتد که آن حلقه را حلقه نرمال می نامیم. از این رو می توان حجم ماده روتور را با در نظر گرفتن حلقه کاری نرمال در ماده هیستریزیس روتور به دست آورد.

تعداد قطب های ماشین را می توان بر حسب سرعت سنکرون n_{syn} ماشین و فرکانس تغذیه ورودی f_s به دست آورد.

$$p = \frac{120f}{n_{syn}} \quad (2-4)$$

در طراحی موتور تخت یک سری از محدودیت ها باید وجود دارند که قید های مسئله طراحی را تشکیل می دهند.

۳-۴- خروجی های مسئله طراحی

خروجی های مهم مسئله طراحی شامل موارد زیر هستند.

۱- شعاع خارجی روتور: R_o

۲- شعاع داخلی روتور: R_i

۳- ضخامت دیسک های روتور: t_{r1} و t_{r2}

۴- اندازه فاصله هوایی ها: g_1 و g_2

۵- ضخامت هسته استاتور در موتور SDDHM: t_s

۶- تعداد دور سیم پیچی هر فاز موتور: N_{ph}

۷- قطر هادی: $D_{Conductor}$

در فصل دوم گفته شد که راندمان موتور پسماند به ازاء یکی از حلقه های پسماند ماکزیمم می شود. از طرفی در فصل سوم در مدلسازی نشان دادیم که چگالی شار در دیسک های یک و دو با هم رابطه دارند و در صورتی که ضخامت دیسک ها با هم برابر باشند، چگالی شار در دیسک ها با هم برابر خواهد بود. از این رو پر واضح است که در صورتی از ماده روتور موتور پسماند استفاده بهینه انجام می شود که روتور ها با ضخامت برابر انتخاب شوند.

قبلاً گفته شد که برای موتور پسماند با یک توان خروجی مشخص، می توان حجم ماده پسماند را به دست آورد. پس با داشتن حجم روتور، شعاع داخلی و شعاع خارجی از رابطه زیر می توان ضخامت دیسک ها را به دست آورد:

$$t_{r1} = t_{r2} = \frac{V_{Hysteresis}}{2\pi(R_o^2 - R_i^2)} \quad (3-4)$$

در موتور CDDHM استاتور هسته مغناطیسی ندارد و بنابراین کل فضای که توسط سیم پیچ ها اشغال می شود بخشی از فاصله هوایی محسوب می شود. اگر فرض کنیم که محیط داخلی موتور ضرب در فاصله هوایی ، کل فضای اشغال شده توسط سیم پیچ ها است می توان اندازه فاصله هوایی را از رابطه زیر به دست آورد:

$$g_1 = g_2 = \frac{N_{ph} m D_{conductor}^2}{2\pi R_i K_{Conductor}} + l_m \quad (4-4)$$

در این رابطه $K_{Conductor}$ ضریب پرشوندگی برای هادی مورد نظر و l_m اندازه فاصله بین استاتور و یکی از روتورها است. اندازه l_m با توجه به محدودیت های مکانیکی تعیین می شود. در موتور SDDHM سیم پیچ ها درون شیار ها قرار نمی گیرند و روی سطح استاتور قرار می گیرند از این رو اندازه فاصله هوایی در هر طرف را می توان به طور مشابه به دست آورد. اندازه فاصله هوایی ها در موتور SDDHM را می توان از رابطه (۴-۴) به دست آورد با این تفاوت که در موتور SDDHM فاصله هوایی در هر طرف دو برابر این مقدار است.

۴-۴- مسائل خاص طراحی در موتور های CDDHM و SDDHM

در موتور CDDHM با توجه به سیم پیچی رویهم کله سیم ها طول و حجم زیادی دارند. از طرفی فضای داخلی استاتور با توجه به ابعاد موتور محدود است بنابراین شعاع داخلی موتور و حجم کله سیم ها باید طوری در نظر گرفته شوند که فضای کافی برای محور وجود داشته باشد.

وجود استاتور و نحوه سیم پیچی حلقوی فرق عمده ساختار موتور SDDHM با موتور CDDHM است. بنابراین طراحی استاتور موتور SDDHM یکی از مسائلی است باید در طراحی این موتور مد نظر قرار گیرد. دامنه چگالی شار هسته استاتور موتور SDDHM را می توان بر حسب دامنه چگالی شار روتور، ضخامت روتور و ضخامت استاتور از رابطه ۳-۶۸ به دست آورد. چگالی شار هسته استاتور را ماشینهای الکتریکی برای فرکانس کاری مختلف را می توان طوری در نظر گرفت که اولاً تلفات حداقل ممکن باشد، ثانیاً حجم هسته استاتور تا حد امکان کم باشد. زیرا وزن هسته استاتور بخش زیادی از وزن تمام شده موتور را تشکیل می دهد. همچنین بخش عمده ای از هزینه تمام شده موتور شامل هزینه مواد استفاده شده در استاتور است. به طور کلی در طراحی ماشین های الکتریکی هرچه فرکانس کاری بالاتر باشد چگالی شار را در هسته استاتور کمتر در نظر می گیرند. البته در هر کاربرد باید محدودیت های دیگر را هم در نظر گرفت. برای مثال در موتور هایی که در صنایع هوایی و فضایی استفاده می شود که در مواردی فرکانس کاری موتور ۴۰۰ هرتز است و همچنین وزن هسته استاتور اهمیت زیادی دارد. بنابراین می توان برای طراحی استاتور با توجه به کاربرد موتور چگالی شار مناسبی را در نظر گرفت. پس از انتخاب چگالی شار استاتور در موتور SDDHM ضخامت استاتور را می توان از رابطه زیر به دست آورد.

$$t_s = \frac{(t_{r1}B_{m1} + t_{r2}B_{m2})}{B_s} \quad (۵-۴)$$

در این رابطه B_s چگالی شاری است که برای هسته استاتور در نظر می گیریم و B_{m1} و B_{m2} چگالی شار در دیسک یک و در دیسک دو در روتور است. برای طراحی مناسب موتور SDDHM و CDDHM چگالی شار روتور را چگالی شار حلقه نرمال در نظر می گیریم.

۴-۵- قید های مسئله طراحی

به طور کلی در طراحی ماشین های الکتریکی یک سری محدودیت ها وجود دارد و یا باید در نظر گرفت که طرح بهینه علاوه بر اینکه تابع هدف را ماکزیمم یا مینیمم می کند نباید این محدودیت ها را نقض کند. در طراحی موتورهای پسماند CDDHM و SDDHM می توان محدودیت های زیر را در نظر گرفت.

۱- چگالی شار در روتور نباید از حد اشباع بیشتر شود.

۲- جریان در هادی های استاتور نباید از حد گرمایی استاتور بالاتر برود. چگالی جریان در هادی های استاتور را می توان با توجه به نحوه خنک سازی موتور مقدار مناسبی در نظر گرفت.

۳- شعاع خارجی و شعاع داخلی موتور در محدوده مجاز خواسته های مسئله طراحی باشد

۴- در موتور CDDHM شعاع داخلی موتور با توجه به میزان کله سیم ها حد اقل مجازی دارد که باید در نظر گرفته شود. علاوه بر این محدودیت ها می توان با توجه به تجربیات قبل محدودیت های دیگری مثل وزن تمام شده موتور و وزن مس استفاده شده در هادی ها را در نظر گرفت.

۴-۶- بهینه سازی طراحی

بسیاری از مسائل بهینه سازی در دنیای مهندسی ذاتاً پیچیده اند و حل آنها در بعضی از موارد به کمک روش های بهینه سازی متداول به دلیل پیچیدگی سیستم، وجود پارامترهای غیر خطی و چند مقداره بسیار دشوار و یا عملاً غیر ممکن می باشد. در یک مسئله بهینه سازی، یافتن بهترین راه حل از بین راه حل های ممکن برای مسئله مورد نظر بسیار مهم می باشد. الگوریتم های کلاسیک زیادی برای جستجو در فضای جواب ها و یافتن جواب بهینه مطرح شده اند. شاید یک سوال این باشد که چرا برای حل یک مسئله بهینه سازی خاص راه حل های متنوع زیادی ارائه شده است. جواب این سوال این است که هر یک از روشهای کلاسیک و سنتی موجود برای برخی از مسائل بهینه سازی جواب بهینه را پیدا می کنند در حالی که در سایر مسائل دچار مشکل می شوند. بدین ترتیب واضح است که وقتی یک مسئله جدید مطرح می شود باید راه حل مناسب برای آن را ابتدا جستجو کرد. از جمله روشهای بهینه سازی که جواب را به صورت تقریبی به دست می آورند می توان به روشهای

گرادپانی اشاره کرد. این روش ها اقدام به جستجوی اکستریم ها می نمایند و در مسائلی که نقاط بهینه محلی زیادی وجود دارند ممکن است به جای این که جواب بهینه مطلق را تعیین نمایند به یک جواب بهینه محلی همگرا شوند.

در مسائل طراحی ماشین به علت وجود پارامتر های زیاد در مسئله و تابع هدف غیر خطی و پیچیده، و در بعضی موارد وجود چند تابع هدف به طور هم زمان، پیدا کردن یک نقطه بهینه با روشهای کلاسیک یا به آسانی ممکن نیست و یا منجر به جواب های بهینه محلی می شوند. طراحی موتور پسماند هم از این قاعده مستثنی نیست حتی می توان گفت که با توجه به غیر خطی و چند مقداره بودن پدیده پسماند طراحی این موتور با استفاده از روشهای موجود بسیار سخت و پیچیده است. در فصل سوم برای موتورهای پسماند CDDHM و SDDHM مدلی مبتنی بر پارامتر های طراحی ارائه شد. در قسمت اول این فصل هم به برخی ملاحظات را که در طراحی موتورهای پسماند CDDHM و SDDHM باید در نظر گرفت اشاره شد. با توجه قابلیت های الگوریتم ژنتیک در این پایان نامه تصمیم گرفته شده که برای این که بتوانیم طرحی بهینه داشته باشیم از این الگوریتم با اصلاحاتی که در نحوه عملکرد آن با توجه به نوع مسئله انجام شده است استفاده کنیم.

۴-۷- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم تکاملی و یا به عبارت دیگر محاسبات تکاملی اولین بار توسط ریچن برگ^۱ در سال ۱۹۶۰ با توجه به نظریه چارلز داروین ارائه شده در سال ۱۸۵۹ مطرح شد. الگوریتم ژنتیک منشعب از نظریه تکاملی است. نظریه تکاملی بیان می کند که جاندارانی که امروز زندگی می کنند نتیجه هزاران سال سازگاری با محیط اطراف خود هستند. بدین ترتیب که در یک اکوسیستم، موجودات زیادی بر سر منابع محدودی با یکدیگر رقابت می کنند و موجوداتی که به هر دلیلی بتوانند منابع بیشتری بدست آورند از شانس بیشتری برای زنده ماندن و تولید مثل برخوردارند. در نتیجه این موجودات شایستگی بیشتری برای ادامه نسل خود پیدا می کنند و سایر موجودات فرزندان کمتری در نسل

1 - Rechenberg

بعدی خواهند داشت. با توجه به این نظریه در طول زمان جمعیت کل موجودات بیشتر شامل آن موجوداتی خواهد بود که شایستگی بیشتری برای بقای نسل خود داشته اند [۳۴].

امروزه از الگوریتم های مبتنی بر جمعیت مانند الگوریتم ژنتیک، Simulated Annealing (تقلیدی از پدیده سرد شدن فلزات)، تجمع مورچگان^۱ الگوریتم اجماع ذرات^۲ و الگوریتم های مشابه به طور گسترده ای در حل مسائل بهینه سازی استفاده می شود. الگوریتم ژنتیک یک روش شناخته شده است که بحث در مورد جزئیات آن از حوصله این پایان نامه خارج است. فلوچارت شکل ۴-۱ به طور خلاصه چگونگی عملکرد الگوریتم ژنتیک را بیان می کند.

با توجه به نوع مسئله بهینه سازی، تولید جمعیت اولیه، محاسبه شایستگی و اعمال قیدها در مسائل مختلف متفاوت می باشند. از آنجائیکه مسئله ما یک مسئله طراحی ماشین می باشد، بعضی از مراحل بهینه سازی طراحی ماشین با استفاده از الگوریتم ژنتیک می تواند متفاوت از مسائل بهینه سازی دیگر باشد.

1 - Ant colony

2 - Particle swarm optimization



شکل ۴-۱ فلوجارت الگوریتم ژنتیک

۴-۷-۱- تولید جمعیت اولیه

در قسمت اول توضیح دادیم که بسیاری از پارامترهای طراحی را می توان با استفاده از پارامترهای دیگر به دست آورد. پس می توان جمعیت اولیه را با توجه به پارامترهای مستقل طراحی تولید کرد. هر یک از اعضای جمعیت اولیه برای طراحی هر دو موتور را از بازه انتخاب ممکن که می تواند با توجه به قیود طراحی مربوط به آن پارامترها انتخاب شود انتخاب می کنیم. چهار پارامتر مستقل در طراحی هر دو موتور CDDHM و SDDHM پارامترهای زیر هستند.

۱- شعاع داخلی R_i که از بازه $R_{i\min} < R_i < R_{i\max}$ انتخاب می شود.

۲- شعاع خارجی R_o که از بازه $R_{o\min} < R_o < R_{o\max}$ انتخاب می شود.

۳- تعداد دور سیم پیچی N_{ph} در هر فاز که می تواند با توجه به محدودیت های ساخت از بازه $N_{ph\min} < N_{ph} < N_{ph\max}$ انتخاب شود.

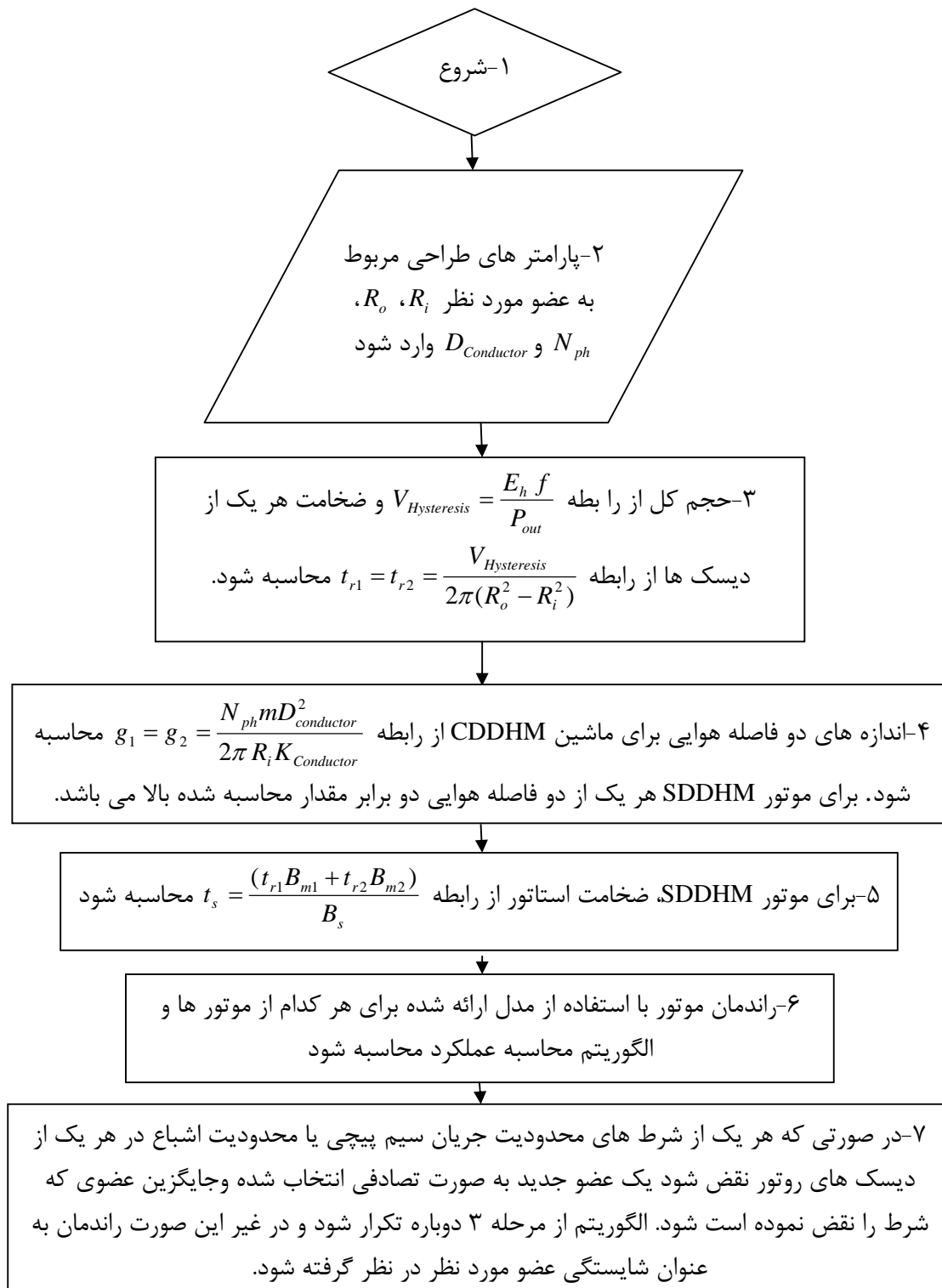
۴- قطر سیم پیچی $D_{Conductor}$ که با توجه به قطر سیم های موجود انتخاب می شود.

در تولید جمعیت اولیه از روش های کدینگ برای باینری کردن هر یک از اعضای می توان استفاده کرد. ما راه حل دیگری را برای این مسئله انتخاب کردیم که هم بعضی از قید های طراحی را در بر می گیرد و هم نیاز به باینری کردن پارامترهای اعضای جمعیت اولیه نیست. با توجه به محدودیت های دقت ساخت، شعاع داخلی و خارجی در بازه مجاز انتخاب می شوند. برای مثال اگر فرض بگیریم که دقت ساخت ۰/۱ میلی متر است، شعاع داخلی با گام های ۰/۱ میلی متر از $R_{i\min}$ تا $R_{i\max}$ تقسیم بندی می شود. برای انتخاب کروموزوم مربوط به یک عضو به صورت تصادفی یک عدد از این بازه انتخاب می شود. در مورد شعاع خارجی هم انتخاب کروموزوم به همین صورت است. تعداد دور سیم پیچی هم از میان بازه $N_{ph\min}$ تا $N_{ph\max}$ که با گام ۱ تقسیم بندی می شود یک عدد به صورت تصادفی انتخاب می شود. قطر سیم را می توان از بین داده های ماتریسی که درایه های آن قطرهای سیم استاندارد می باشند انتخاب کرد.

۴-۷-۲- محاسبه شایستگی یا تابع هدف

همان طور که گفته شد در مسئله طراحی ماشین توابع هدف متفاوتی را می توان در نظر گرفت از آنجا که موتور های مورد بحث در این پایان نامه کاربردهای خاص دارند و با توجه به این که موتور های پسماند عموماً راندمان پایین و ضریب توان کمی دارند ما بهینه سازی راندمان را به عنوان تابع هدف به منظور دسترسی به بیشترین راندمان انتخاب کرده ایم. راندمان ماکزیمم معمولاً متناظر با ضریب توان ماکزیمم است. بنابراین انتخاب راندمان ماکزیمم به عنوان تابع هدف مسئله انتخاب مناسبی است. از طرفی چون موتور های پسماند عموماً در توان های پایین ساخته می شوند با یک خازن می توان ضریب توان کم آنها را جبران کرد.

محاسبه راندمان ماشین برای هر یک از اعضای جمعت اولیه با استفاده از مدلی که برای هر یک از موتور های CDDHM و SDDHM در فصل سوم ارائه شد امکان پذیر است. فلوچارت الگوریتم محاسبه راندمان برای هر یک از اعضاء جمعیت اولیه و نسل های بعدی در موتور های CDDHM و SDDHM را می توان در شکل ۴-۲ مشاهده نمود. در فلوچارت شکل ۴-۲ مراحل مختلف محاسبه شایستگی به سادگی قابل درک است.



شکل ۲-۴ فلوجارت الگوریتم محاسبه راندمان (شایستگی) برای هر یک از اعضاء جمعیت اولیه و نسل های بعدی

برای موتور های CDDHM و SDDHM

۴-۸- اعمال قید ها

چگونگی اعمال قید ها در مسائل بهینه سازی مختلف مبحث گسترده ای است که با توجه به نوع مسئله بهینه سازی روشهای مختلفی برای آن وجود دارد. یکی از این روشها اعمال جریمه^۱ به شایستگی بر اساس میزان انحراف از قید ها است. اما این روش قابل اجرا بر روی مسئله طراحی بهینه ماشین تخت نبود زیرا شبیه سازی ها نشان داد که عده زیادی از اعضاء جمعیت اولیه قیود را نقض می کنند. یعنی یا جریان سیم پیچی از حد مجاز خارج می شد یا چگالی های شار دیسک های روتور از محدوده اشباع تجاوز می کنند. اعمال جریمه به شایستگی این عده از اعضاء هم نمی توانست کار ساز باشد. زیرا اولاً همانگونه که گفته شد تعداد اعضایی که قید را نقض می کردند زیاد می باشد و ثانیاً شایستگی یا راندمان بعضی از اعضایی که قید را نقض می کنند به اندازه ای بالا بود که اعمال جریمه شایستگی آن اعضاء را نسبت به اعضایی که قید ها را ارضاء می کردند کم نمی کند بلکه حتی در بعضی موارد با وجود اعمال جریمه شایستگی عضوی که قیود را نقض می کند بالاتر از بهترین عضوی می شود که تمام قید ها را ارضاء می کند. بنابراین روش دیگری را برای اعمال قید ها استفاده می کنیم بدین صورت که در مرحله محاسبه شایستگی اگر عضوی یکی از قید ها را نقض کند با عضو جدیدی جایگزین شده و شایستگی برای این عضو جدید محاسبه شود. این عمل تا جایی ادامه پیدا می کند که هیچ عضوی قید ها را نقض نکند. در این روش حتی اگر در مراحل برش^۲ یا جهش^۳ عضوی تولید شود که قیود را نقض کند، در مرحله محاسبه شایستگی، این عضو با یک عضو جدید که قید را نقض نمی کند جایگزین می شود.

۴-۹- سایر مراحل الگوریتم بهینه سازی

سایر مراحل الگوریتم بهینه سازی مشابه بهینه سازی های متداول با الگوریتم ژنتیک انجام شده است. البته با توجه به این که در یک بهینه سازی به منظور طراحی ماشین نیازی به سرعت بالای رسیدن به جواب نهایی وجود ندارد و فقط بهترین جواب مهم است، در نرخ انتخاب اعضاء برای تولید

1 - Penalty factor
2 - Crossover
3 - Mutation

نسل بعدی، نرخ برش^۱ و نرخ جهش^۲ ملاحظات مربوط به نوع مسئله بهینه سازی یعنی طراحی ماشین در نظر گرفته شده است.

۴-۱۰- نتیجه گیری

در این فصل مسائل خاص در طراحی موتورهای CDDHM و SDDHM و ملاحظاتی که در طراحی این موتورها باید در نظر گرفته شود را مورد بررسی قرار دادیم. سپس ملاحظات مربوط به نوع مسئله بهینه سازی که به الگوریتم ژنتیک اعمال شده است را بیان کردیم.

از مطالب کلیدی که در این فصل به آنها اشاره شد می توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- روشهای زیادی برای بهینه یابی مسائل در علوم مهندسی وجود دارند و وابسته به نوع مسئله باید روش مناسب را برای بهینه سازی انتخاب کرد. در اینجا با توجه به غیر خطی بودن شدید مسئله بهینه سازی طراحی موتورهای پسماند و نیز وجود نقاط بهینه محلی روش الگوریتم ژنتیک بکار گرفته می شود.

۲- برای موتورهای CDDHM و SDDHM تابع هدف و قیود مسئله تعریف شده و با استفاده از یک فلوچارت پیشنهادی با روش الگوریتم ژنتیک مهمترین پارامترهای این دو ماشین بهینه سازی می شود. نتایج حاکی از دقت بالای این روش در بهینه سازی ماشینهای الکتریکی دارد.

1 - Crossover

2 - Mutation

فصل پنجم

محاسبه عملکرد موتورهای

SDDHM و CDDHM

و طراحی بهینه آنها

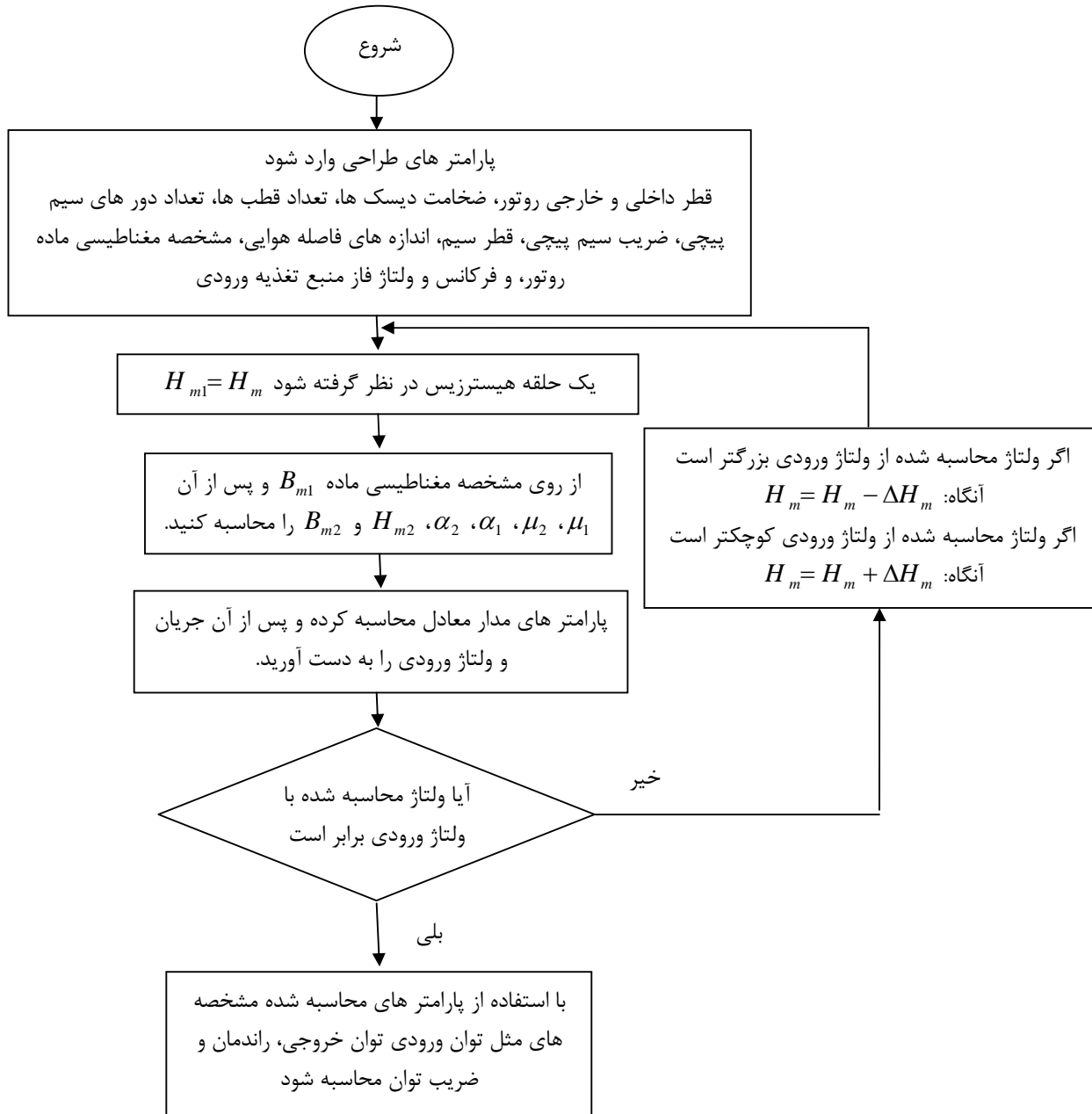
۵-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا یک الگوریتم برای محاسبه عملکرد موتور های CDDHM و SDDHM ارائه می شود و تاثیرات برخی از پارامتر های طراحی بر عملکرد این دو موتور بررسی می شود. در مرحله بعد سه نوع ماده که به طور معمول در ساخت روتور موتور های پسماند کاربرد دارند، با فولاد آلیاژی Fe-Cr-Ni-Mo-C که در این تحقیق به عنوان ماده جدیدی برای تهیه روتور موتور پسماند معرفی شده است، مقایسه می شوند. در پایان فصل نیز هر دو موتور CDDHM و SDDHM برای فرکانس های ۵۰ و ۱۰۰۰ هرتز با مواد مختلف طراحی بهینه شده و طرح های بهینه از نظر مشخصه های عملکرد با یکدیگر مقایسه می شوند.

۵-۲- الگوریتم محاسبه عملکرد

با توجه به مدار معادل ارائه شده در فصل دوم و با استفاده از پارامترهای طراحی که شامل ابعاد موتور و مشخصات سیم پیچی است می توان با یک شبیه سازی کامپیوتری رفتار ماشین را در ولتاژ و فرکانس تغذیه مشخص، محاسبه و مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار داد. ابتدا با در نظر گرفتن یک حلقه هیستریزیس فرضی به عنوان حلقه پسماند کاری، پارامتر های مدار معادل و ولتاژ و جریان ورودی بدست می آیند. در صورتی که ولتاژ محاسبه شده با ولتاژ واقعی برابر نباشد با توجه به این که ولتاژ بدست آمده کمتر یا بیشتر از ولتاژ ورودی باشد مقدار H_m برای حلقه جدید تصحیح شده و محاسبات با حلقه کاری جدید و پارامترهای مدار معادل متناظر با آن دوباره انجام می گیرد. این تکرار تا آنجا ادامه می یابد که ولتاژ محاسبه شده با یک تولرانس قابل قبول برابر با ولتاژ تغذیه واقعی ماشین شود. هنگامی که این شرط برقرار شد حلقه هیستریزیس که محاسبات بر اساس آن صورت گرفته درست بوده و می توان مشخصه های عملکرد از قبیل توان ورودی، توان خروجی، راندمان و

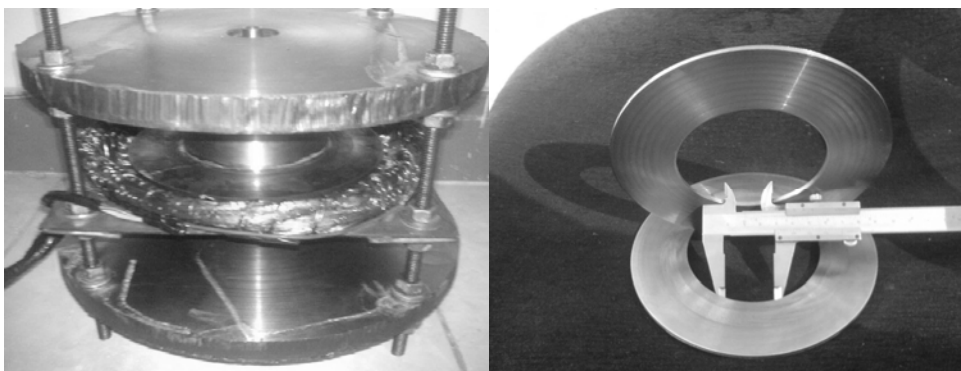
ضریب توان موتور را با استفاده از مدار معادل حالت ماندگار معرفی شده در فصل دوم محاسبه کرد. فلوجارت محاسبه عملکرد موتور های CDDHM و SDDHM در شکل ۵-۱ نشان داده شده است. شبیه سازی های این پایان نامه با استفاده از برنامه ای که با نرم افزار MATLAB نوشته شده است، انجام می شود.



شکل ۵-۱ فلوجارت محاسبه عملکرد موتورهای پسماند CDDHM و SDDHM

۳-۵- بررسی صحت مدل تحلیلی

شکل های ۲-۵ و ۳-۵ نمونه هایی از موتور CDDHM و SDDHM را به ترتیب نشان می دهند که نتایج عملی آنها برای مقایسه با نتایج شبیه سازی و بررسی دقت و صحت مدار های معادل ارائه شده در فصل سوم برای موتورهای CDDHM و SDDHM استخراج گردیده است. این نتایج به میزان قابل ملاحظه ای با هم تطبیق دارند [۳۵].



شکل ۲-۵ دیسک های روتور و یک نمونه موتور CDDHM [۳۵]



شکل ۳-۵ دیسک روتور و یک نمونه موتور SDDHM [۳۵]

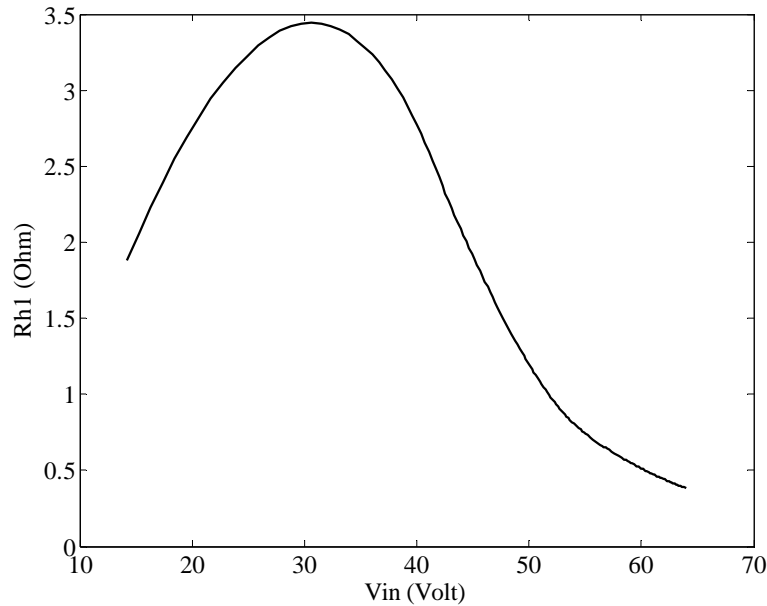
۴-۵- اثر برخی پارامترهای طراحی بر عملکرد موتور CDDHM

قبل از اینکه به بحث در زمینه بهینه سازی طراحی موتورهای CDDHM و SDDHM بپردازیم شاید بهتر باشد که تأثیر برخی پارامترهای طراحی بر عملکرد این موتورها بررسی شود. نتیجه این بررسی می تواند برای تعریف دقیقتر تابع هدف و نیز قیود مسئله بهینه سازی طراحی این دو موتور لازم باشد. مشخصه های عملکرد موتور پسماند CDDHM به ویژه راندمان و ضریب توان وابستگی زیادی به پارامترهای طراحی آن دارند. تعداد زیاد این پارامترها، قیود محدود کننده طراحی و پیچیدگی مدل لزوم استفاده از روشهای جدید بهینه سازی را ضروری تر می سازد. علاوه بر آن میزان بالای غیر خطی بودن مسئله و نیز وجود نقاط بهینه محلی به سبب چند مقداره بودن تابع مشخصه مغناطیسی در یک نقطه کار مشخص، امکان استفاده از روشهای گرادیانی را منتفی می سازد. بنابراین حل دقیق مسئله بهینه سازی طراحی با استفاده از روشهایی که پیشرفته ترند راحتتر امکان پذیر است. در این قسمت عملکرد یک موتور CDDHM با مشخصات جدول ۵-۱ شبیه سازی می شود و اثر دو پارامتر موثر بر عملکرد این موتور یعنی قطر سیم مورد استفاده در آن و نسبت شعاع داخلی به خارجی در محدوده ولتاژ کاری موتور بررسی می شود.

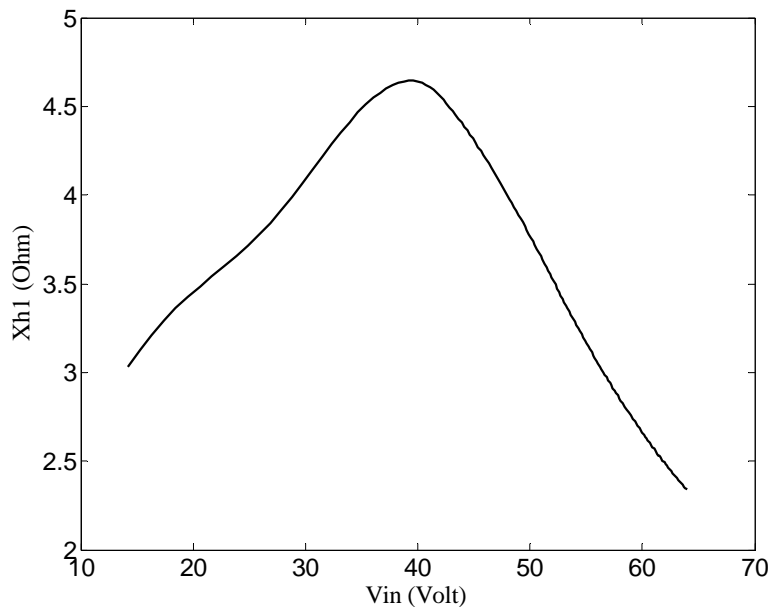
جدول ۵-۱ مشخصات موتور CDDHM نمونه

Material	Fe-Cr-Ni-Mo-C
Thickness of rotor 1	tr1=6.7 mm
Thickness of rotor 2	tr2=6.7 mm
Inner radius of rotor	Ri=50 mm
Outer radius of rotor	Ro=100 mm
Air gap length	g1=g2=4.58 mm
Per unit coil pitch	a=1
Number of turn per phases	Nph=100
Number of phases	m=3
Conductor diameter	Copper D=1.5 mm
Number of poles	2
Nominal frequency	50 Hz

شکل های ۴-۵ و ۵-۵ تغییرات مقاومت R_{hl} و اندوکتانس X_{hl} را بر حسب ولتاژ ورودی یک موتور CDDHM با مشخصات جدول ۱-۵ نشان می دهد. با توجه به این شکل ها می توان به این موضوع پی برد که در موتور CDDHM پارامتر های مدار معادل متغیر و به شدت وابسته به نقطه کار موتور و ولتاژ ورودی می باشند.



شکل ۴-۵ مقاومت R_{hl} بر حسب ولتاژ ورودی موتور CDDHM نمونه

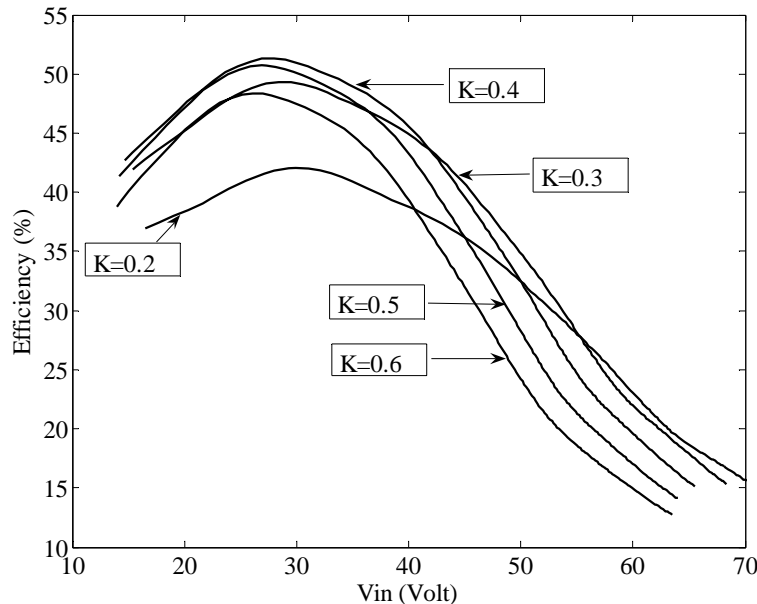


شکل ۵-۵ اندوکتانس X_{h1} بر حسب ولتاژ ورودی موتور CDDHM نمونه

۵-۴-۱- نسبت شعاع داخلی به شعاع خارجی

نسبت شعاع داخلی به شعاع خارجی $K = Ri / Ro$ در موتور CDDHM یکی از پارامترها مؤثر بر مشخصه های خروجی موتور می باشد به طوری که انتخاب بهینه آن از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در انتخاب این نسبت به دو نکته مهم باید توجه نمود. اول این که شعاع داخلی یک پارامتر مؤثر در تعیین اندازه فاصله هوایی است. با کم شدن شعاع داخلی، برای امکان جاسازی سیم پیچی استاتور به اجبار باید سیم پیچی را در چند لایه روی هم پیچید و این فضای اشغال شده توسط سیم پیچی را در امتداد محور افزایش می دهد. بنابراین از آنجاییکه در یک موتور بدون هسته فضای اشغال شده توسط سیم پیچی ها در امتداد محور بخشی از فاصله هوایی است شعاع داخلی دیسک روتور را نمی توان خیلی کوچک انتخاب کرد. در این مورد لازم است به این نکته نیز اشاره شود که انتخاب نوع سیم بندی نیز برای ایجاد کمترین فاصله هوایی از اهمیت بالایی برخوردار است. از طرف دیگر هر چه شعاع داخلی بزرگتر باشد طول کله سیم ها بزرگتر و به تبع آن پراکندگی ناشی از کله سیم ها بیشتر خواهد شد. بنابراین بنظر می رسد انتخاب بهینه شعاع داخلی و خارجی دیسک های روتور و ایجاد

موازنه بین دو مورد مذکور بدون استفاده از شبیه سازی و بهینه سازی کامپیوتری این نسبت کار آسانی نیست.

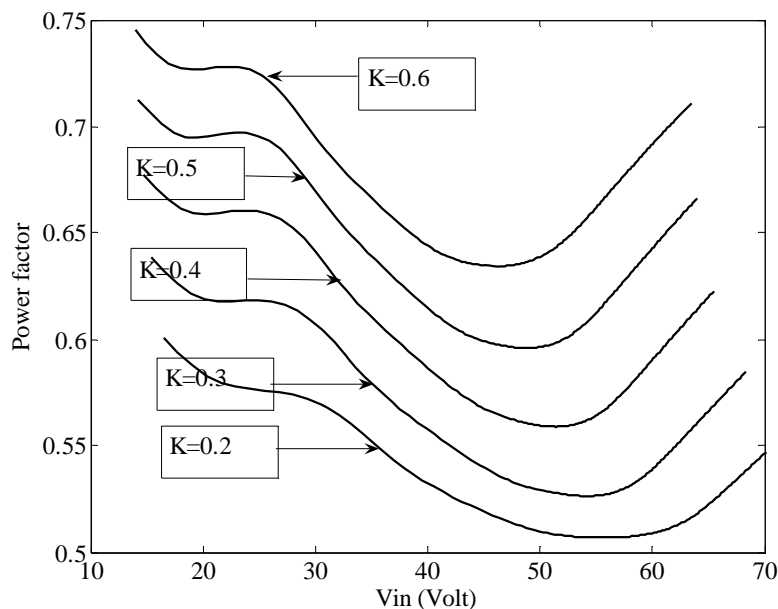


شکل ۵-۶ راندمان بر حسب ولتاژ ورودی در موتور CDDHM برای مقادیر $K = Ri / Ro$ مختلف

از نتایج شبیه سازیهای نمایش داده شده در شکل ۵-۶ می توان به دو نکته مهم در مورد این موتور پی برد. اول این که راندمان این موتور به شدت وابسته به نقطه کار این موتور است. یعنی در ولتاژهای مختلف راندمانهای متفاوت بدست می آید. در فصل دوم گفته شد که راندمان ماکزیمم در موتور هیستریزیس به ازای یکی از حلقه های پسماند کاری یعنی حلقه نرمال حاصل می شود، بنابراین ولتاژی که در آن ولتاژ راندمان ماکزیمم می شود متناظر با حلقه نرمال است. دوم این که انتخاب نسبت 0.4 تا 0.5 برای حصول بهترین راندمان برای موتور CDDHM در ولتاژ کار مورد نظر معمولاً ضروری است. تغییرات شعاع داخلی در شبیه سازی شکل ۵-۶ طوری صورت گرفته است که حجم ماده پسماند استفاده شده در روتور ثابت بماند. همچنین نسبت K یکی از عوامل مؤثر بر توان ورودی، جریان ورودی و ضریب توان موتور CDDHM است. از این رو بدون توجه کافی به پارامتر K ، نمی توان موتوری با مشخصات مطلوب طراحی کرد. البته با توجه به این که برای بهینه سازی طراحی از الگوریتم ژنتیک استفاده می شود، روند بهینه سازی طوری است که بهترین نسبت را انتخاب

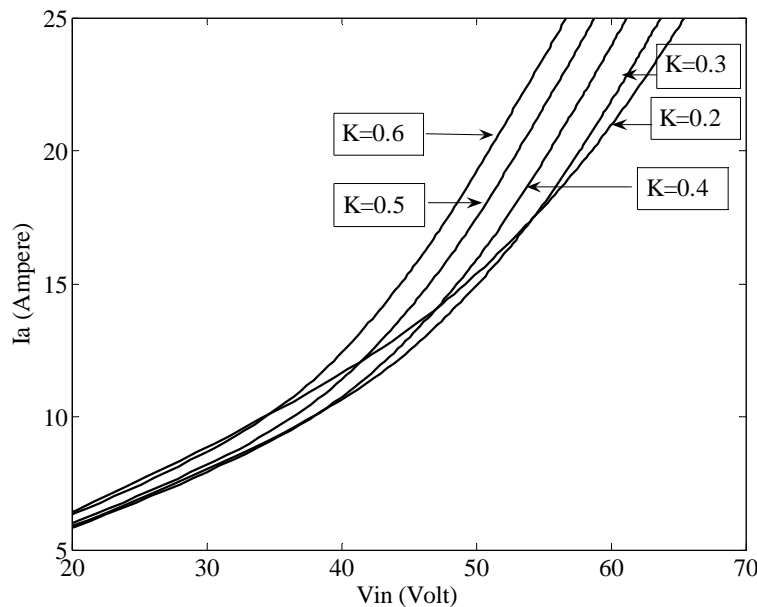
می کند. در قسمت های بعدی خواهیم دید که پس از بهینه سازی طرح با استفاده از الگوریتم ژنتیک نسبت K حدود $0/5$ به دست می آید.

در شکل ۷-۵ تغییرات ضریب توان بر حسب ولتاژ خط ورودی را برای مقادیر مختلف K می توان مشاهده کرد. همانگونه که در این شکل می بینیم هرچه نسبت K بزرگتر باشد ضریب توان بهتری بدست می آید. از آنجا که ضریب توان موتور نیز به تنهایی می تواند پارامتر مهمی برای موتور محسوب شود، می توان با پذیرش کمی کاهش در راندمان موتور، پارامتر K را طوری انتخاب کرد که خواسته ها یا محدودیت های احتمالی مربوط به افزایش ضریب توان را نیز تا حدودی برآورده کرد.



شکل ۷-۵ ضریب توان بر حسب ولتاژ ورودی موتور CDDHM برای مقادیر مختلف $K = Ri / Ro$

شکل ۸-۵ جریان ورودی موتور را برای نسبت های مختلف K بر حسب ولتاژ خط ورودی نشان می دهد. همانگونه که در شکل واضح است در محدوده ای که راندمان موتور ماکزیمم است، یعنی در ولتاژ حدود ۲۰ تا ۴۰ ولت جریان ورودی برای نسبت های مختلف K تغییرات زیادی ندارد. از این رو می توان گفت که تغییرات نسبت K تاثیر کمتری بر جریان ورودی دارد.

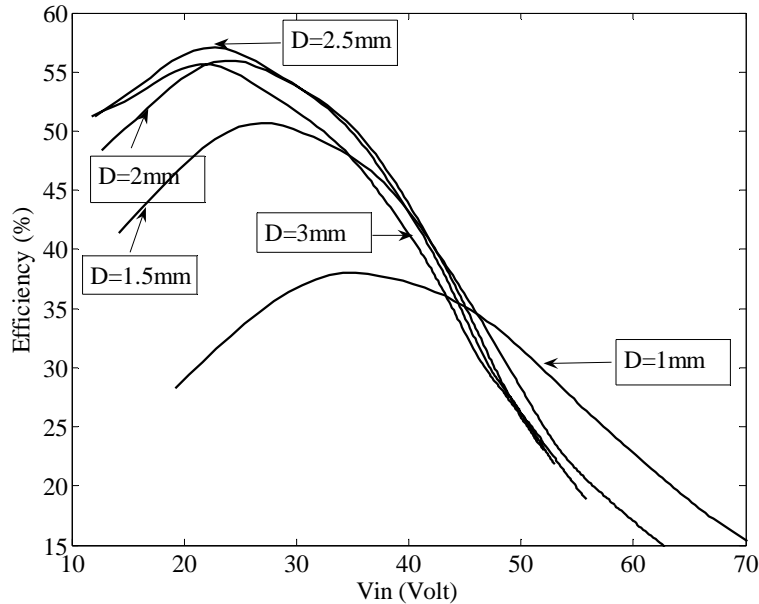


شکل ۵-۸ جریان بر حسب ولتاژ ورودی موتور CDDHM برای مقادیر $K = Ri / Ro$ مختلف

۵-۴-۲- قطر هادی

یکی از پارامترهای موثر بر عملکرد موتور CDDHM، قطر هادی مورد استفاده در روتور آن است. از آنجا که در موتور CDDHM تلفات اهمی بخش اصلی تلفات در این موتور است، بنابراین به نظر می‌رسد که هر چه هادی ضخیم‌تری انتخاب شود تلفات مسی کمتر و راندمان موتور بهتر خواهد بود. ولی نکته بسیار مهم این است که این موتور دارای استاتور با هسته مغناطیسی نیست و با توجه به رابطه ۴-۴ طول فاصله هوایی وابستگی مستقیم با قطر هادی دارد. از طرفی هرچه فاصله هوایی بزرگتر باشد جریان مغناطیس‌کنندگی بزرگتر و متعاقباً تلفات مسی بیشتر می‌شود. شکل ۵-۹ راندمان بر حسب ولتاژ ورودی در موتور CDDHM را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که اگر قطر هادی در موتور CDDHM را تغییر دهیم مشخصه کاری موتور هم تغییر می‌کند. در این شکل راندمان موتور بر حسب ولتاژ ورودی برای قطرهای مختلف هادی به دست می‌آید. در ولتاژ ۲۲ ولت بیشترین راندمان مربوط به هادی با قطر ۲/۵ میلی‌متر است. از طرفی با وجود این که به نظر می‌رسد هرچه قطر هادی بیشتر باشد راندمان موتور بالاتر است، راندمان موتور به ازاء قطر هادی ۳ میلی‌متر کاهش شدیدی پیدا می‌کند. همچنین با وجود این که برای هادی با قطر ۱ میلی‌متر در

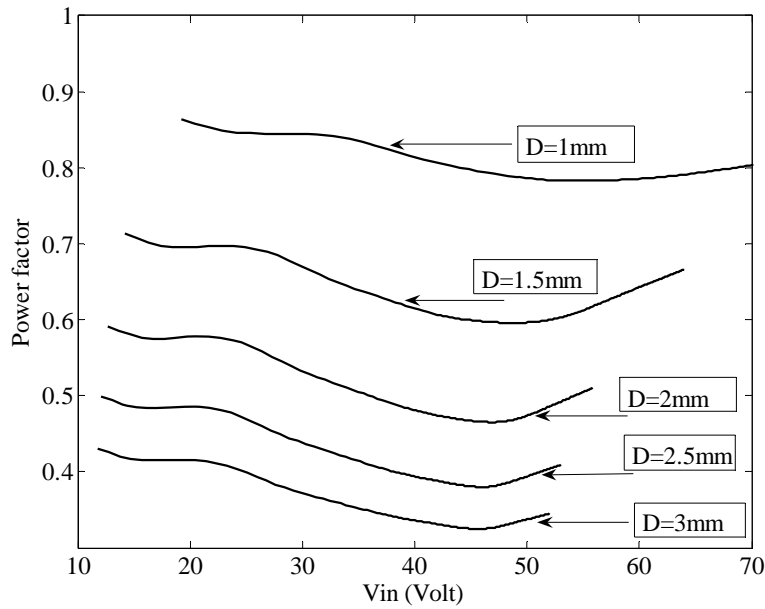
ولتاژ کمتر از ۴۵ ولت راندمان موتور کمتر می شود، در ولتاژ بالاتر از ۴۵ ولت راندمان برای موتوری با هادی با قطر ۱ میلیمتر راندمان بیشتر خواهد شد.



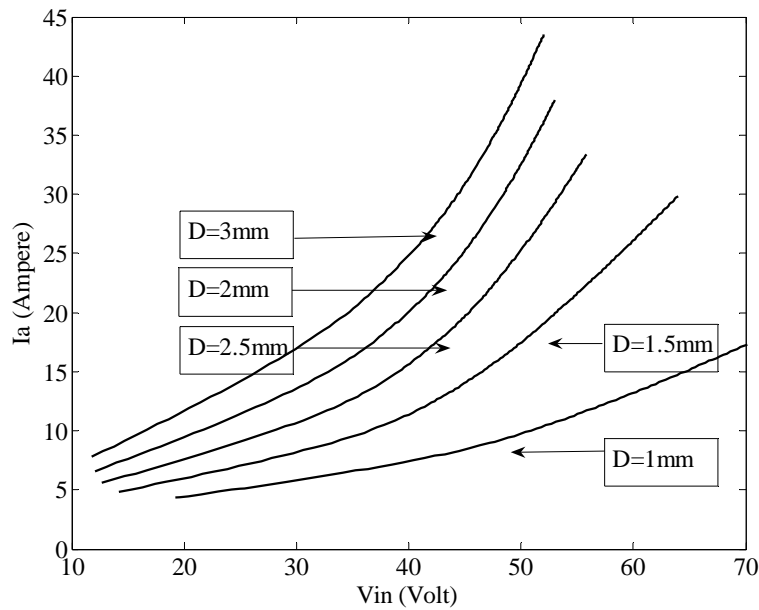
شکل ۵-۹ راندمان بر حسب ولتاژ ورودی برای قطر های مختلف هادی بکاررفته در موتور CDDHM

شکل ۵-۱۰ ضریب توان را بر حسب ولتاژ ورودی موتور CDDHM برای قطر هادی های متفاوت نشان می دهد. از این شکل می توان به راحتی متوجه شد که هرچه قطر هادی بکار رفته در موتور بیشتر باشد ضریب توان موتور کمتر خواهد بود. نکته قابل توجه در موتور CDDHM این است که بر عکس موتور های دیگر راندمان متناسب با ضریب توان نیست. با وجود اینکه راندمان موتور با هادی به قطر ۲/۵ میلیمتر، بالاتر از راندمان موتوری با هادی به قطر ۱/۵ میلیمتر است ولی ضریب توان در همان شرایط با هادی به قطر ۲/۵ میلیمتر پایین تر است.

شکل ۵-۱۱ جریان بر حسب ولتاژ ورودی را در موتور CDDHM نشان می دهد. واضح است که به ازاء قطر هادی بیشتر جریان ورودی به ازاء یک ولتاژ خاص بالاتر رود.



شکل ۵-۱۰ ضریب توان بر حسب ولتاژ ورودی برای قطر های مختلف هادی بکاررفته در موتور CDDHM



شکل ۵-۱۱ جریان بر حسب ولتاژ ورودی برای قطر های مختلف هادی بکاررفته در موتور CDDHM

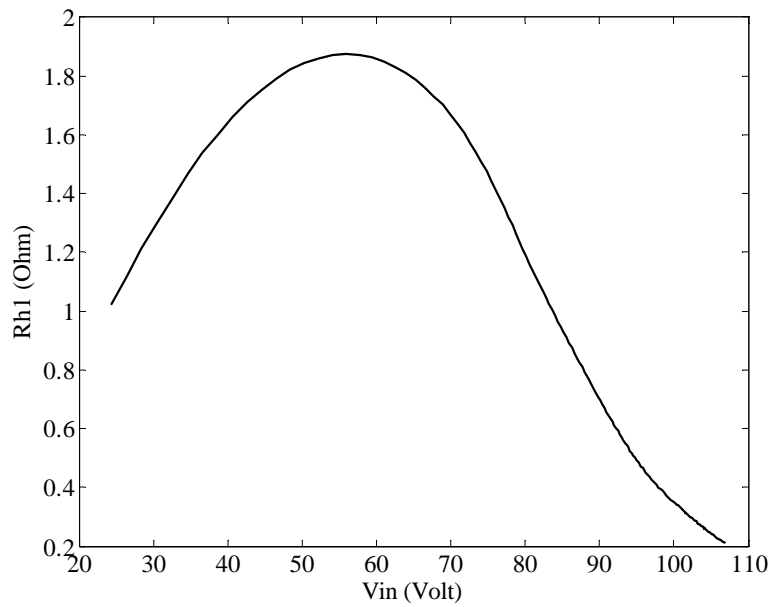
۵-۵- اثر برخی پارامترهای طراحی بر عملکرد موتور SDDHM

از آنجا که اساس عملکرد موتور SDDHM مشابه موتور CDDHM است، در موتور SDDHM هم مشخصه های عملکرد و پارامترهای مدار معادل به شدت به نقطه کار موتور و پارامترهای طراحی موتور وابسته هستند. در این قسمت اثر تغییرات نسبت $K = R_i / R_o$ بر عملکرد یک موتور SDDHM با مشخصات جدول ۲-۵ را بررسی می کنیم. باید متذکر شد که اثر قطر هادی و دیگر پارامترهای طراحی بر عملکرد موتور SDDHM مشابه موتور CDDHM است.

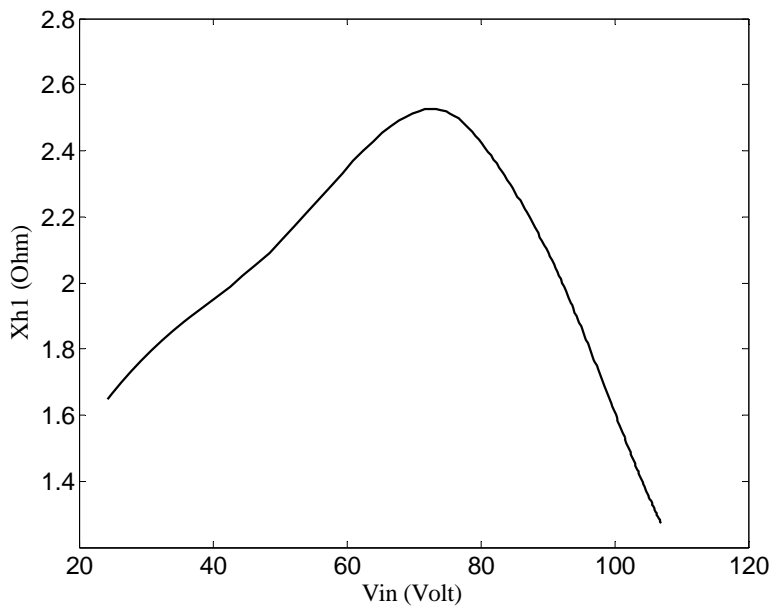
جدول ۱-۵ مشخصات موتور SDDHM نمونه

Material	Fe-Cr-Ni-Mo-C
Thickness of rotor 1	tr1=14.58 mm
Thickness of rotor 2	tr2=14.58 mm
Thickness of stator	ts=41.35 mm
Inner radius of rotor	Ri=50 mm
Outer radius of rotor	Ro=100 mm
Air gap length	g1=g2=5.11 mm
Per unit coil pitch	a=1
Number of turn per phases	Nph=50
Number of phases	m=3
Conductor diameter	Copper D=1.4 mm
Number of poles	2
Nominal frequency	50 Hz

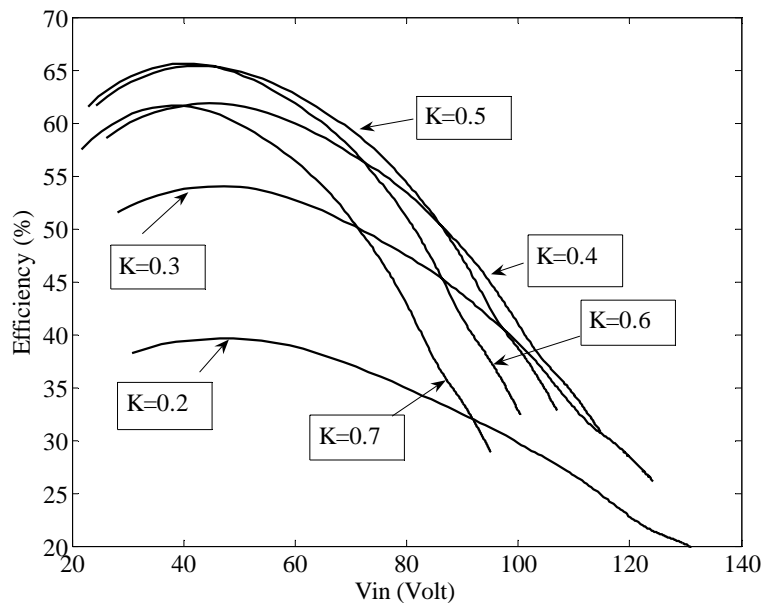
شکل های ۱۲-۵ و ۱۳-۵ تغییرات مقاومت R_{h1} و اندوکتانس X_{h1} را بر حسب ولتاژ ورودی یک موتور SDDHM با مشخصات جدول ۲-۵ نشان می دهد. در این موتور نیز مشابه موتور CDDHM پارامترهای مدار معادل متغیر و به شدت وابسته به نقطه کار موتور و ولتاژ ورودی می باشند.



شکل ۵-۱۲ مقاومت R_{h1} بر حسب ولتاژ ورودی موتور SDDHM



شکل ۵-۱۳ اندوکتانس X_{h1} بر حسب ولتاژ ورودی موتور SDDHM



شکل ۵-۱۴ راندمان بر حسب ولتاژ ورودی موتور SDDHM برای مقادیر $K = Ri / Ro$ مختلف

شکل ۵-۱۴ راندمان بر حسب ولتاژ ورودی در موتور SDDHM برای نسبت های $K = Ri / Ro$ مختلف را نشان می دهد. همان گونه که از شکل مشخص است در موتور SDDHM هم مشابه موتور CDDHM، راندمان موتور به نقطه کار و ولتاژ ورودی وابسته است. با مقایسه شکل های ۵-۴ و ۵-۱۳ می توان به این نکته پی برد که تغییرات نسبت K در موتور SDDHM تاثیر بیشتری بر راندمان می گذارد. تاثیر نسبت K بر ضریب توان در موتور SDDHM مشابه موتور CDDHM است. همچنین در موتور SDDHM وابستگی مشخصه های عملکرد به پارامتر هایی مانند قطر هادی مشابه موتور CDDHM است.

۵-۶- مقایسه ای بین مشخصه های مواد پسماند

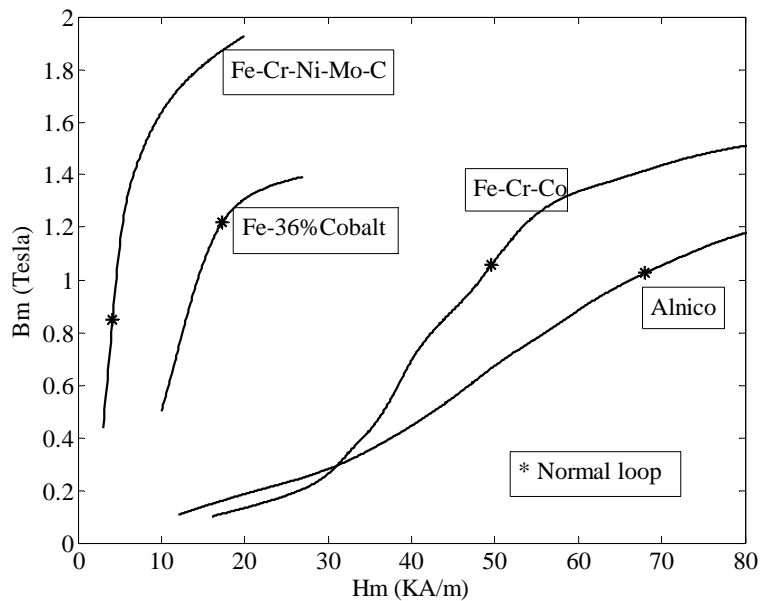
با توجه به مواردی که در فصل دوم در مورد انتخاب ماده مناسب برای استفاد در روتور موتور پسماند بیان شد و با استفاده از مشخصه مغناطیسی مواد پسماند می توان ماده مناسب را برای موتور انتخاب کرد. برای استخراج مشخصه مغناطیسی مواد پسماند در آزمایشگاه از روشی که در مرجع [۱] آمده است می توان استفاده کرد. در این روش یکسری پارامتر از جمله دامنه مولفه اصلی چگالی شار،

دامنه شدت میدان مغناطیسی برای هر حلقه هیستریزیس و سطح حلقه هیستریزیس برای چند نقطه تا نقطه ای که ماده مغناطیسی به اشباع می رود بدست می آید. برای این که بتوانیم در شبیه سازی از مشخصه مغناطیسی هر ماده استفاده کنیم از روش برازش منحنی^۱ Smoothing Spline استفاده می شود [۳۶].

یکی از پارامتر های موثر بر عملکرد موتور های پسماند نوع ماده استفاده شده در روتور این موتور ها است. مواد پسماند متنوعی برای استفاده در موتور پسماند معرفی شده اند. آلیاژ آهن - ۳۶٪ کبالت Fe-36%Co ، آلنیکو Fe-Co-Ni-Al ، آلیاژ آهن-کرم-کبالت Fe-Cr-Co از جمله موادی هستند که به طور گسترده ای در موتور های پسماند استفاده می شوند. آلیاژ Fe-Cr-Ni-Mo-C به عنوان ماده ای جدید می تواند برای کاربرد در موتور پسماند مناسب باشد. در این قسمت آلیاژ های آهن - ۳۶٪ کبالت Fe-36%Co ، آلنیکو Fe-Co-Ni-Al ، آلیاژ آهن - کرم - کبالت Fe-Cr-Co ، و آلیاژ Fe-Cr-Ni-Mo-C از لحاظ مشخصه هیستریزیس و کاربرد در موتور پسماند با یکدیگر مقایسه می شوند.

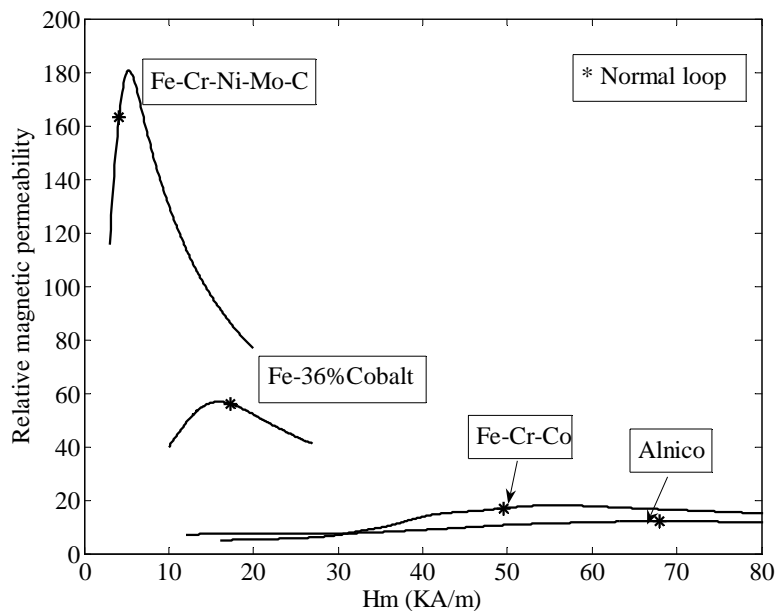
شکل ۵-۱۵ منحنی مغناطیس شونده برای آهن - ۳۶٪ کبالت Fe-36%Cobalt ، آلنیکو Fe-Co-Ni-Al ، آلیاژ آهن - کرم - کبالت Fe-Cr-Co ، و آلیاژ Fe-Cr-Ni-Mo-C و نقاط * در این شکل ها پیک های شدت میدان مغناطیسی و چگالی شار مربوط به حلقه نرمال را برای هر ماده نشان می دهد. از شکل ۵-۱۴ به وضوح می توان به این نکته پی برد که آلیاژ Fe-Cr-Ni-Mo-C سریع تر از مواد پسماند دیگر به اشباع می رود و شدت میدان مغناطیسی حلقه نرمال در آلیاژ Fe-Cr-Ni-Mo-C از تمام آلیاژ ها پایین تر است. همچنین شیب منحنی هیستریزیس برای آلیاژ Fe-Cr-Ni-Mo-C در حلقه نرمال از مواد دیگر بیشتر است.

^۱ - Curve fitting



شکل ۵-۱۵ منحنی مغناطیس شوندگی برای چند ماده پسماند و مقادیر پیک حلقه نرمال برای هر کدام

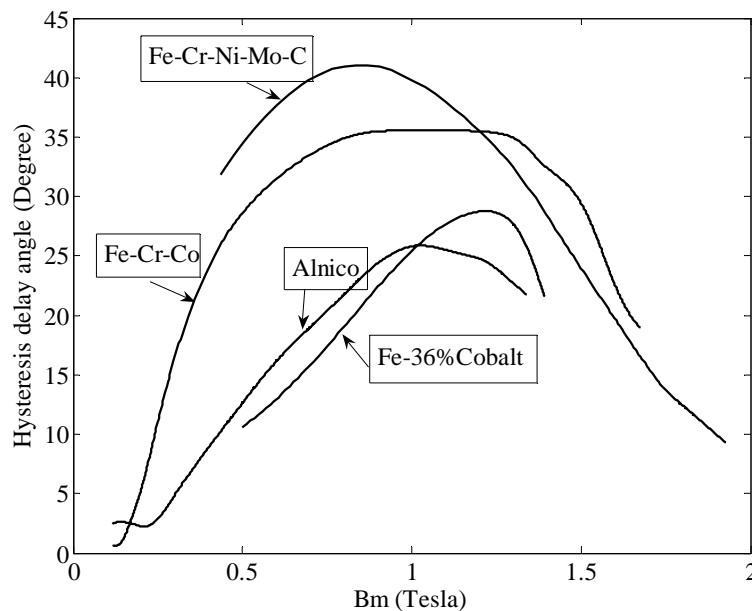
شکل ۵-۱۶ پرمابلیته نسبی μ/μ_0 و پرمابلیته حلقه نرمال برای مواد پسماند نشان می دهد. با توجه به شکل به خوبی می توان دریافت که پرمابلیته نسبی حلقه نرمال آلیاژ Fe-Cr-Ni-Mo-C از تمام آلیاژها بالاتر است.



شکل ۵-۱۶ پرمابلیته نسبی و پرمابلیته حلقه نرمال چند ماده پسماند بر حسب پیک شدت میدان مغناطیسی

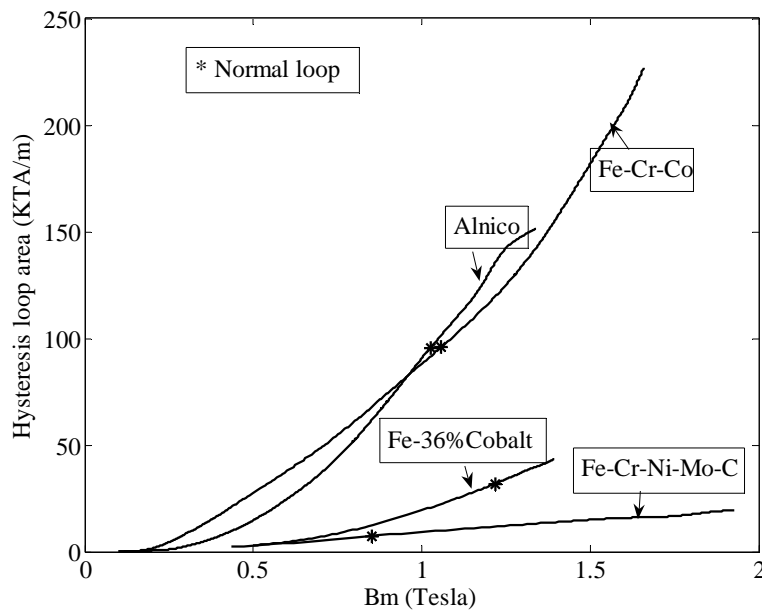
با توجه به مواردی که در مورد انتخاب مناسب ماده روتور در فصل دوم بیان شد می توان گفت که چون شدت میدان مغناطیسی در حلقه نرمال آلیاژ Fe-Cr-Ni-Mo-C کم تر از مواد دیگر است و پرمابلیته نسبی حلقه نرمال این آلیاژ از آلیاژهای دیگر بیشتر است، جریان مغناطیس کنندگی موتوری که روتور آن از آلیاژ Fe-Cr-Ni-Mo-C ساخته شده باشد کمتر و بنابراین تلفات مسی آن کمتر خواهد بود. با توجه به این که شیب منحنی مغناطیس شونده حلقه نرمال برای آلیاژ Fe-Cr-Ni-Mo-C از مواد پسماند دیگر بالاتر است تلفات پارازیتیک موتور پسماندی که روتور آن از آلیاژ Fe-Cr-Ni-Mo-C ساخته شده باشد نیز از دیگر آلیاژ ها کمتر است. بنابراین واضح است که استفاده از آلیاژ Fe-Cr-Ni-Mo-C در روتور موتور پسماند در مقایسه با چند آلیاژ مذکور در بالا راندمان بیشتری حاصل می کند.

شکل ۵-۱۷ زاویه های تاخیر هیستریزس بر حسب چگالی شار در مواد پسماند را نشان می دهد. زاویه تاخیر هیستریزس آلیاژ Fe-Cr-Ni-Mo-C از آلیاژهای دیگر بیشتر است. پس موتوری که روتور آن از آلیاژ Fe-Cr-Ni-Mo-C ساخته شده باشد، می تواند به ازاء یک چگالی شار معین روتور در مقایسه با سایر آلیاژهای مذکور دارای گشتاور خروجی بزرگتر باشد.



شکل ۵-۱۷ زاویه های تاخیر هیستریزس بر حسب چگالی شار برای چند ماده پسماند

شکل ۵-۱۸ سطح حلقه هیستریزیس را بر حسب چگالی شار مواد پسماند نشان می‌دهد. از آنجائیکه توان خروجی موتور هیستریزیس با سطح حلقه هیستریزیس و حجم روتور متناسب است در یک توان خروجی مشخص، در موتور پسماند که روتور آن از آلیاژ Fe-Cr-Ni-Mo-C ساخته شده است باید از حجم ماده هیستریزیس بیشتری استفاده شود. اگرچه این موضوع باعث سنگین تر شدن روتور می‌شود ولی در کاربرد هایی نظیر ژيروسکوپها که نیاز به روتوری با ممان اینرسی بالاتر است این موضوع می‌تواند مزیتی برای موتور محسوب شود.



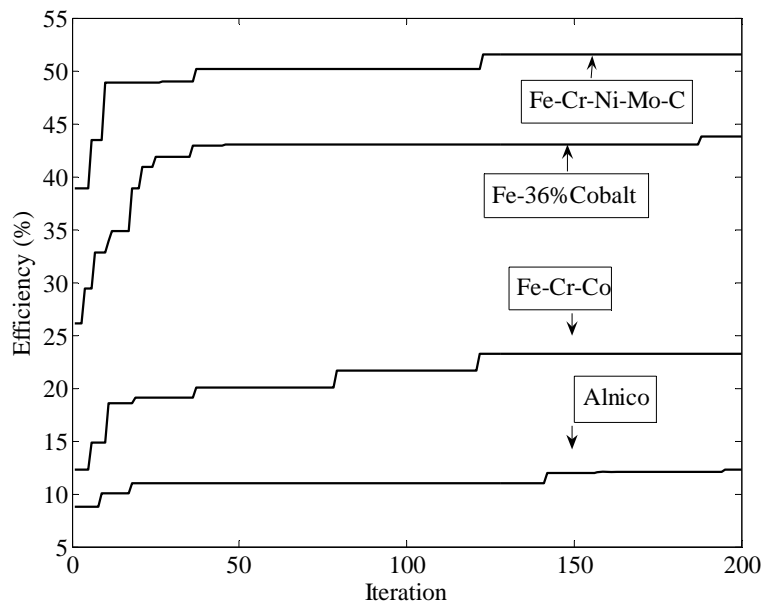
شکل ۵-۱۸ سطح های حلقه هیستریزیس بر حسب چگالی شار چند ماده پسماند

از طرف دیگر عنصر کبالت عنصری کمیاب و گران قیمت است همچنین آلیاژهایی که عنصر کبالت در آنها استفاده شده است دارای سختی مکانیکی زیادی هستند بنابراین آلیاژ Fe-Cr-Ni-Mo-C به علت عدم وجود کبالت در آن نسبت به آلیاژهای دیگر ارزانتر و از نظر مکانیکی سختی کمتری دارد و این هم می‌تواند به عنوان یک مزیت دیگر برای این آلیاژ محسوب شود.

۷-۵- طراحی بهینه موتور CDDHM

همان طور که دیدیم مشخصه های عملکرد موتور CDDHM به پارامتر های مختلف طراحی ولتاژ ورودی و نقطه کار موتور وابسته هستند همچنین در فصل چهارم گفته شد قید های زیادی در مسئله طراحی موتور های CDDHM و SDDHM وجود دارند. بنابراین کاملاً واضح است که برای این که بتوانیم یک طراحی بهینه برای هر دو موتور داشته باشیم باید از روشهای جدید بهینه سازی مثل الگوریتم ژنتیک استفاده کنیم. در این قسمت، طراحی موتور CDDHM را یک بار در ولتاژ ۵۰ ولت و فرکانس ۵۰ هرتز و توان خروجی ۲۵۰ وات و بار دیگر در ولتاژ ۲۰۰ ولت فرکانس کاری ۱۰۰۰ هرتز و توان خروجی ۱۰۰۰ وات بهینه می کنیم. این بهینه سازی ها برای هر کدام از فولاد ۳۶٪ کبالت Fe-36% Cobalt، آلنیکو Fe-Co-Ni-Al، آهن - کرم - کبالت Fe-Cr-Co، و آلیاژ Fe-Cr-Ni-Mo-C به صورت جداگانه انجام می شود و سپس طرح های بهینه با هم مقایسه می شوند.

شکل ۵-۱۹ راندمان خروجی بر حسب تکرار در الگوریتم ژنتیک برای دستیابی به راندمان ماکزیمم در یک موتور CDDHM ۵۰ ولت ۵۰ هرتز با توان خروجی ۲۵۰ وات را نشان می دهد. در ۲۰۰ تکرار الگوریتم با جمعیت اولیه به تعداد ۱۰۰ عدد به نقطه بهینه همگرا می شود. البته با توجه به محاسبات زمان بر برای هر کدام از اعضاء جمعیت اولیه و نسل های بعدی پروسه بهینه سازی در کل بسیار وقت گیر است. بهینه سازی برای هر کدام از مواد پسماند به طور جداگانه نشان می دهد که همان طور که پیش بینی شده بود راندمان موتوری که آلیاژ Fe-Cr-Ni-Mo-C در روتور آن به کار رفته است از موتور های دیگر که آلیاژ های دیگر در روتور آنها استفاده شده است بالاتر است. البته راندمان ۵۱ درصدی برای یک ماشین الکتریکی زیاد قابل قبول نیست ولی باید گفت در یک موتور پسماند ۵۰ هرتز این راندمان قابل ملاحظه است. جدول ۵-۳ مشخصات کامل طراحی چهار موتور CDDHM بهینه را نشان می دهد



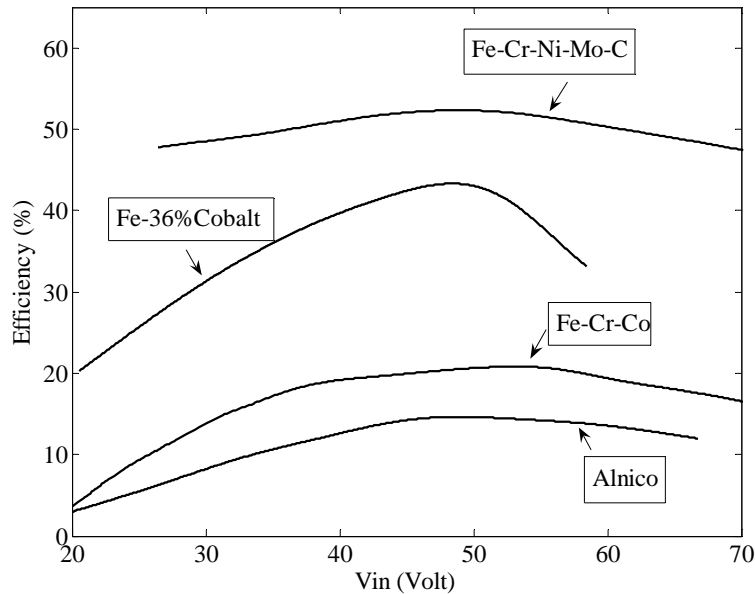
شکل ۵-۱۹ راندمان خروجی بر حسب تکرار در الگوریتم ژنتیک برای دستیابی به راندمان ماکزیمم برای موتور

CDDHM ۵۰ هرتز و با استفاده از مواد پسماندی متفاوت برای روتور

جدول ۵-۳ مشخصات موتور های CDDHM بهینه با فرکانس ۵۰ هرتز

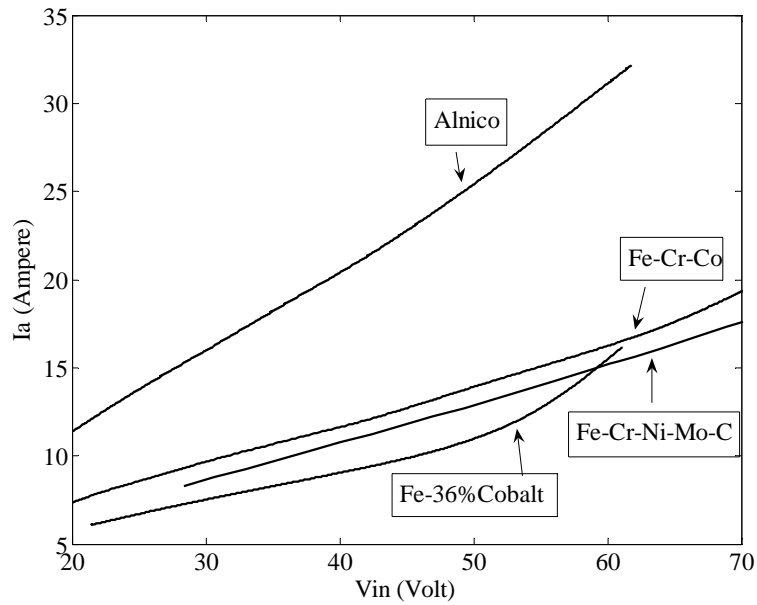
Rotor material	Fe-Cr-Ni-Mo-C	Fe-Cr-Co	Fe-36% Cobalt	Alnico
Thickness of rotor 1	tr1=15.4 mm	tr1=5.35 mm	tr1=3.65 mm	tr1=3.66 mm
Thickness of rotor 2	tr2=15.4 mm	tr2=5.35 mm	tr2=3.65 mm	tr1=3.66 mm
Inner radius of rotor	Ri=49.5 mm	Ri=47.2 mm	Ri=47.7 mm	Ri=47.4 mm
Outer radius of rotor	Ro=100 mm	Ro=63.6 mm	Ro=97.2 mm	Ro=64.2 mm
Air gap length	g1=g2=4 mm	g1=g2=11.7 mm	g1=g2=11.9 mm	g1=g2=11.83
Per unit coil pitch	a=1	a=1	a=1	a=1
Number of turn per phases	Nph=96	Nph=366	Nph=247	Nph=298
Conductor diameter	Copper D=1.8 mm	Copper D=1.7 mm	Copper D=2.1 mm	Copper D=1.9 mm
Number of poles	2	2	2	2
Nominal voltage	50 Volt	50 Volt	50 Volt	50 Volt
Nominal frequency	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz
Number of phases	m=3	m=3	m=3	m=3
Full load current	13.89 Ampere	13.93 Ampere	10.98 Ampere	25.29 Ampere
Output power	250 Watt	250 Watt	250 Watt	250 Watt
Efficiency	51.93%	23.02%	43.8%	12.27%
Power factor	0.4	0.90	0.60	0.93

شکل ۵-۲۰ راندمان را بر حسب ولتاژ ورودی برای طرح های بهینه جدول ۵-۳ نشان می دهد. با مشاهده شکل ۵-۲۰ می توان گفت که آلیاژ های آلنیکو و Fe-Cr-Co به علت بهره پایین برای استفاده در روتور موتور CDDHM به هیچ وجه نمی توانند انتخاب مناسبی باشند.

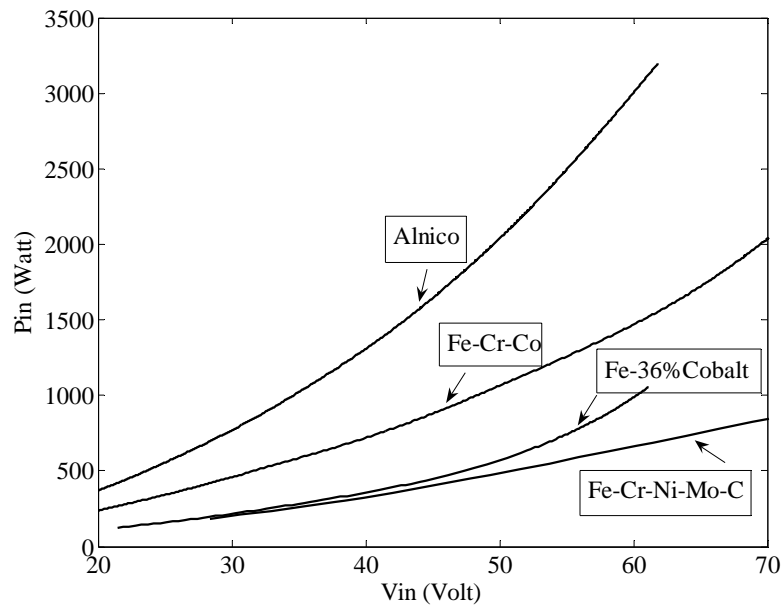


شکل ۵-۲۰ راندمان بر حسب ولتاژ ورودی موتورهای CDDHM با پارامترهای طراحی بهینه جدول ۵-۳

در شکل های ۵-۲۱ و ۵-۲۲ می توان به ترتیب جریان ورودی بر حسب ولتاژ ورودی و توان ورودی بر حسب ولتاژ ورودی برای موتور های CDDHM جدول ۵-۳ مشاهده و مقایسه کرد.



شکل ۳-۵ جریان ورودی بر حسب ولتاژ ورودی موتورهای CDDHM با پارامترهای طراحی بهینه جدول ۳-۵



شکل ۵-۲۲ توان ورودی بر حسب ولتاژ ورودی موتورهای CDDHM با پارامترهای طراحی بهینه جدول ۳-۵

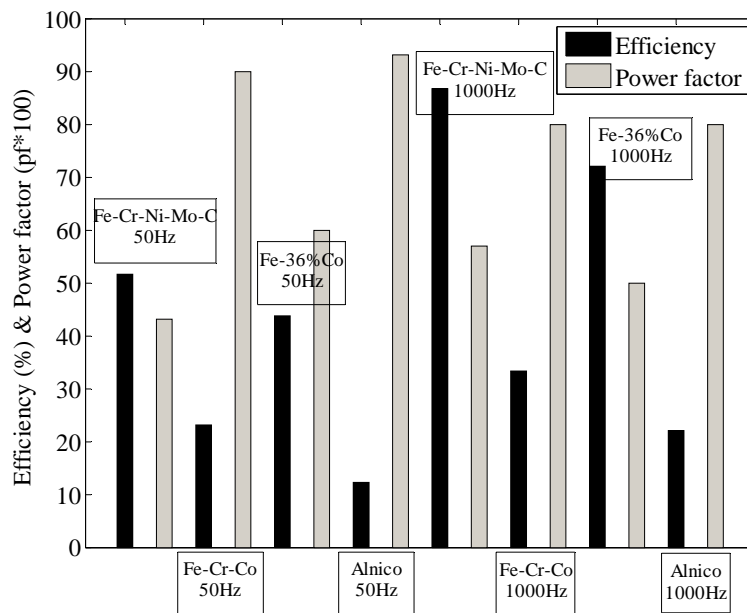
در جدول ۴-۵ مشخصات چهار موتور CDDHM با طراحی بهینه برای فرکانس ۱۰۰۰ هرتز ولتاژ ۲۰۰ ولت و توان خروجی ۱۰۰۰ وات داده شده است بهینه سازی طراحی ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک مشابه حالت قبلی با جمعیت اولیه ۱۰۰ و در ۲۰۰ تکرار به نتایج جدول ۴-۵ منتهی شده است.

جدول ۴-۵ مشخصات موتور های CDDHM بهینه با فرکانس ۱۰۰۰ هرتز

Rotor material	Fe-Cr-Ni-Mo-C	Fe-Cr-Co	Fe-36% Cobalt	Alnico
Thickness of rotor 1	tr1=3.29 mm	tr1=0.74 mm	tr1=1.96 mm	tr1=1.12 mm
Thickness of rotor 2	tr2=3.29 mm	tr2=0.74 mm	tr2=1.96 mm	tr1=1.12 mm
Inner radius of rotor	Ri=47.2 mm	Ri=40.7 mm	Ri=34.6 mm	Ri=45.6 mm
Outer radius of rotor	Ro=91.8 mm	Ro=60 mm	Ro=60 mm	Ro=60.3 mm
Air gap length	g1=g2=3.01 mm	g1=g2=6.03 mm	g1=g2=5.28 mm	g1=g2=6.34
Per unit coil pitch	a=1	a=1	a=1	a=1
Number of turn per phases	Nph=100	Nph=381	Nph=197	Nph=343
Conductor diameter	Copper D=1 mm	Copper D=0.95 mm	Copper D=1.1 mm	Copper D=1.1 mm
Number of poles	2	2	2	2
Nominal voltage	200 Volt	200 Volt	200 Volt	200 Volt
Number of phases	m=3	m=3	m=3	m=3
Nominal frequency	1000 Hz	1000 Hz	1000 Hz	1000 Hz
Full load current	5.84 Ampere	10.86 Ampere	8 Ampere	16.34 Ampere
Output power	1000 Watt	1000 Watt	1000 Watt	1000 Watt
Efficiency	86.71%	33.22%	72.12%	22.08%
Power factor	0.57	0.80	0.50	0.80

۵-۸- مقایسه موتور های CDDHM بهینه

در شکل ۵-۲۳ می توان به طور خلاصه مقایسه ای از راندمان و ضریب توان موتور های بهینه با پارامترهای طراحی و مشخصات جدول های ۵-۳ و ۵-۴ را داشت. همان گونه که در شکل می توان مشاهده کرد بهترین راندمان مربوط به موتور CDDHM ۱۰۰۰ هرتز با آلیاژ Fe-Cr-Ni-Mo-C می باشد که برابر با ۸۶/۷۱ درصد می باشد. و بدترین راندمان مربوط به موتور CDDHM ۵۰ هرتز با آلیاژ Alnico و برابر ۱۲/۲۷ درصد است. در هر دو فرکانس کاری بهترین راندمان مربوط به موتور ساخته شده با آلیاژ Fe-Cr-Ni-Mo-C است.



شکل ۵-۲۳ مقایسه راندمان و ضریب توان برای موتور های CDDHM با طراحی بهینه جدول های ۵-۳ و ۵-۴

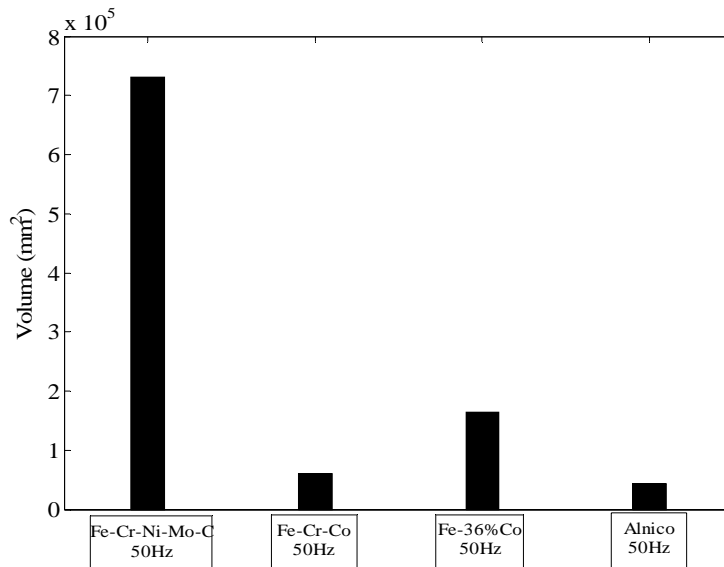
به طو کلی با مشاهده شکل ۵-۲۳ به سه نکته می توان پی برد که در ذیل آمده است

- ۱- در موتور CDDHM هرچه فرکانس خروجی بالاتر باشد به راندمان بهتری می توان دست پیدا کرد. دلیل این امر خصوصیت ذاتی موتورهای پسماند است که در فرکانس بالاتر راندمان بهتری دارند.
- ۲- در موتور CDDHM بر خلاف ماشین های معمول در بعضی موارد راندمان بالاتر هم ارز با ضریب توان بهتر نیست.

۳- آلیاژهای آلنیکو و Fe-Cr-Co در مقایسه با آلیاژ Fe-Cr-Ni-Mo-C و فولاد ۳۶٪ کبالت Fe-36% Cobalt انتخاب مناسبی برای استفاده در روتور موتور CDDHM نیستند.

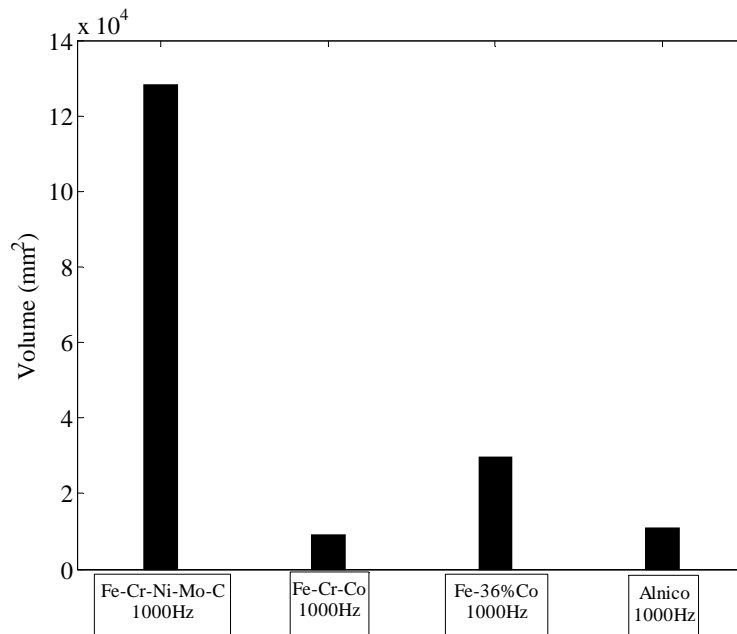
۴- راندمان موتوری که از آلیاژ Fe-Cr-Ni-Mo-C در روتور آن استفاده شده است در هر دو فرکانس از موتورهای دیگر بالاتر است.

همان طور که قبلاً گفته شد توان خروجی موتور پسماند متناسب با سطح حلقه هیستریزیس، فرکانس ورودی و حجم ماده پسماند استفاده شده در روتور موتور پسماند است. در شکل های ۲۴-۵ و ۲۵-۵ حجم ماده استفاده شده در روتور موتورهای CDDHM با پارامترهای داده شده در جدول های ۳-۵ و ۴-۵ آمده است. با مقایسه حجم ماده روتور ملاحظه می شود که برای یک توان خروجی خاص و فرکانس معین، در موتور CDDHM حجم آلیاژ Fe-Cr-Ni-Mo-C به مراتب بیشتر است. این موضوع باعث می شود که وزن تمام شده موتور و به خصوص وزن روتور در موتور بیشتر باشد. اگرچه این موضوع گاهی در یک ماشین الکتریکی می تواند یک عیب محسوب شود ولی در موتور پسماند با توجه به نوع کاربرد حتی در بعضی از موارد می تواند یک مزیت قلمداد شود. برای مثال در یک ژيروسکوپ که نیاز به یک روتور با ممان اینرسی بالا است می توان از آلیاژ Fe-Cr-Ni-Mo-C استفاده کرد.



شکل ۲۴-۵ مقایسه حجم ماده استفاده شده در روتور موتورهای CDDHM با توان خروجی ۲۵۰ وات در

فرکانس ۵۰ هرتز



شکل ۵-۲۵ مقایسه حجم ماده استفاده شده در روتور موتورهای CDDHM با توان خروجی ۱۰۰۰ وات در فرکانس ۱۰۰۰ هرتز

۵-۹- طراحی بهینه موتور SDDHM

در مورد موتور SDDHM هم مشابه موتور CDDHM عملکرد موتور به پارامترهای مختلف طراحی از قبیل ولتاژ ورودی و نقطه کار موتور وابسته است. علاوه بر قیدهای طراحی که تقریباً مشابه موتور CDDHM است، در موتور SDDHM طراحی استاتور، تلفات مربوط به استاتور و مسائل خاص طراحی این موتور هم باید لحاظ شود.

در جدول ۵-۵ مشخصات موتورهای SDDHM بهینه برای فرکانس ۵۰ هرتز، ولتاژ ۵۰ ولت و توان خروجی ۲۵۰ وات و مشخصات موتورهای بهینه برای ولتاژ ۲۰۰ ولت، فرکانس کاری ۱۰۰۰ هرتز و توان خروجی ۱۰۰۰ وات آمده است. همانطور که قبلاً مشاهده شد با استفاده از آلیاژهای آلنیکو و Fe-Cr-Co در روتور موتور نمی توان به راندمان مناسبی دست پیدا کرد و از آنجا که عملکرد موتور SDDHM تقریباً مشابه موتور CDDHM است در این قسمت طراحی بهینه برای آلیاژهای آلنیکو و Fe-Cr-Co انجام نشده است.

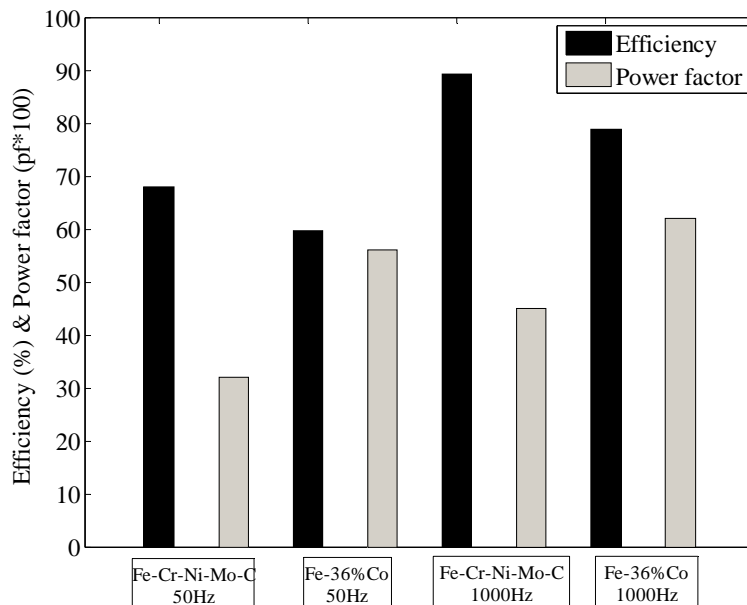
جدول ۵-۵ مشخصات موتور های SDDHM بهینه

Material	Fe-Cr-Ni-Mo-C	Fe-36% Cobalt	Fe-Cr-Ni-Mo-C	Fe-36% Cobalt
Thickness of rotor 1	tr1=15.5 mm	tr1=3.50 mm	tr1=2.65 mm	tr1=0.63 mm
Thickness of rotor 2	tr2=15.5 mm	tr2=3.50 mm	tr2=2.65 mm	tr2=0.63 mm
Thickness of stator	ts=43.6 mm	ts=15.53 mm	ts=11.26 mm	ts=3.83 mm
Inner radius of rotor	Ri=50 mm	Ri=46.7 mm	Ri=49.2 mm	Ri=46.7 mm
Outer radius of rotor	Ro=100 mm	Ro=98.2 mm	Ro=99 mm	Ro=98.2 mm
Air gap length	g1=g2=5.3 mm	g1=g2=6.45 mm	g1=g2=6.39 mm	g1=g2=6.45 mm
Per unit coil pitch	a=1	a=1	a=1	a=1
Number of turn per phases	Nph=53	Nph=140	Nph=53	Nph=140
Conductor diameter	Copper D=1.4 mm	Copper D=1 mm	Copper D=1.6 mm	Copper D=1 mm
Number of poles	2	2	2	2
Nominal voltage	50 Volt	50 Volt	200 Volt	200 Volt
Nominal frequency	50 Hz	50 Hz	1000 Hz	1000 Hz
Number of phases	m=3	m=3	m=3	m=3
Full load current	13.27 Ampere	8.63 Ampere	7.17 Ampere	5.9 Ampere
Output power	250 Watt	250 Watt	1000 Watt	1000 Watt
Efficiency	67.96%	59.73%	89.36%	78.9%
Power factor	0.32	0.56	0.45	0.62

برای بهینه سازی طراحی موتور SDDHM مشابه موتور CDDHM از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. بهینه سازی با جمعیت اولیه ۱۰۰ و ۲۰۰ تکرار به نتایج جدول ۵-۵ منتهی می شود.

۵-۱۰- مقایسه موتور های SDDHM بهینه

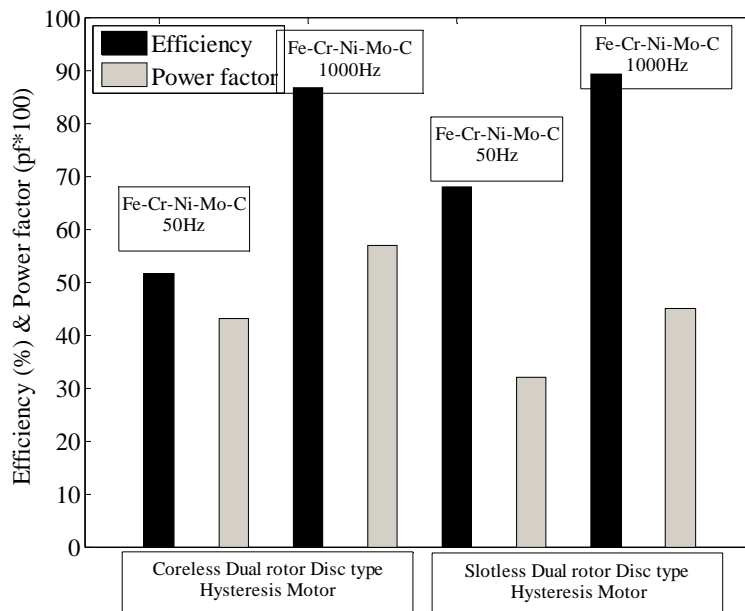
با مشاهده شکل ۵-۲۶ به این موضوع می توان پی برد که در موتورهای SDDHM هم با وجود تلفات هسته، راندمان موتورها در فرکانس ۱۰۰۰ هرتز از راندمان موتورها در فرکانس ۵۰ هرتز بالاتر است. همچنین در این موتورها هم مشابه موتورهای CDDHM راندمان برای موتور ها با روتور ساخته شده از آلیاژ Fe-Cr-Ni-Mo-C بالاتر است.



شکل ۵-۲۶ مقایسه راندمان و ضریب توان برای موتورهای SDDHM با پارامترهای طراحی بهینه جدول ۵-۵

۵-۱۱- مقایسه موتورهای CDDHM و SDDHM

در فصل دوم ویژگی‌های هر یک از موتورهای CDDHM و SDDHM بر شمرده شد و گفته شد که هر یک از این موتورها می‌توانند کاربردهای خاصی با توجه به ویژگی‌های شان داشته باشند. با مشاهده شکل ۵-۲۷ می‌توان به این موضوع پی برد که راندمان موتور SDDHM در هر دو فرکانس ۵۰ و ۱۰۰۰ هرتز از موتور CDDHM بالاتر است. البته این تفاوت در فرکانس ۱۰۰۰ هرتز کمتر از فرکانس ۵۰ هرتز است. همچنین در هر دو فرکانس کاری ضریب توان برای موتور CDDHM بهتر می‌باشد. از آنجائیکه راندمان موتور CDDHM در فرکانس ۵۰ هرتز به میزان قابل ملاحظه‌ای پایین‌تر است می‌توان گفت که در فرکانس‌های کاری پایین موتور SDDHM در مقایسه با موتور CDDHM انتخاب مناسب‌تری است. اما در فرکانس ۱۰۰۰ هرتز با وجودی که راندمان موتور SDDHM در مقایسه با موتور CDDHM بالاتر است ولی این اختلاف خیلی زیاد نیست و می‌توان با اندکی چشم‌پوشی از راندمان ضریب توان بهتری داشت.



شکل ۵-۲۷ مقایسه راندمان و ضریب توان برای موتورهای CDDHM و SDDHM با پارامترهای طراحی بهینه

۵-۱۲- نتیجه گیری

در این فصل برای محاسبه عملکرد حالت ماندگار موتورهای SDDHM و CDDHM یک الگوریتم مبتنی بر مدار معادل های ارائه شده در فصول قبل ارائه گردید. علاوه بر آن برای تعریف دقیق تر مسئله بهینه سازی طراحی هر دو موتور، حساسیت عملکرد ماشین ها به تغییرات برخی از پارامترهای مهم این مورد بررسی قرار گرفت. سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک طراحی بهینه هر دو موتور انجام شد و مشخصات آنها با هم مقایسه گردید.

از موضوعات کلیدی این فصل می توان به موارد زیر اشاره کرد.

۱- نتایج شبیه سازی و مطابقت آن با نتایج عملی متناظر حاکی از اعتبار مدل ارائه شده برای این موتورها است [۳۵].

۲- نسبت شعاع داخلی به شعاع خارجی و قطر هادی بکار رفته در این دو موتور از عوامل موثر در پارامترهایی همچون بازده و ضریب قدرت هستند که باید در مسئله بهینه سازی طراحی مورد توجه قرار گیرند.

۳- مشخصه مغناطیسی فولاد آلیاژی Fe-Cr-Ni-Mo-C به عنوان ماده جدید برای کاربرد در روتور موتور پسماند، با چند آلیاژ دیگر که در موتور پسماند استفاده می شوند مقایسه و مزایای این فولاد نسبت به دیگر آلیاژها بر شمرده شد.

۴- نتایج شبیه سازی ها نشان می دهد که هر دو موتور معرفی شده در فرکانس های کاری بالا راندمان خوبی دارند.

۵- الگوریتم ژنتیک به سبب نوع مسئله یکی از بهترین روشهای بهینه سازی است که در بهینه سازی طراحی موتور ها از آن استفاده شده است. نتایج این بهینه سازیها نشان می دهد که فولاد آلیاژی Fe-Cr-Ni-Mo-C انتخاب مناسبی برای ساخت روتور موتورهای پسماند است. البته حجم ماده بکار رفته در مقایسه با چند ماده دیگر زیاد می شود که این در برخی کاربردها می تواند یک مزیت بحساب آید.

فصل ششم

جمع بندی و پیشنهادات

۶-۱- جمع بندی

در فصل یک پدیده پسماند به اختصار تشریح شد. سپس اساس عملکرد موتورهای پسماند و انواع کاربرد های این موتورها بررسی شد. و در پایان فصل نقاط قوت و ضعف موتورهای پسماند برشمرده شدند.

در فصل دوم خصوصیات مواد مغناطیس دائم و نکات خاصی که در انتخاب ماده پسماند روتور موتور پسماند باید مد نظر قرار گیرد، بررسی شد. سپس انواع ساختارهای موتورهای پسماند و ویژگیهای هر یک از این ساختار ها تشریح شد. موتور های CDDHM و SDDHM به عنوان دو ساختار جدید برای موتور پسماند نوع تخت معرفی و خصوصیات منحصر به فرد هر یک از این ساختار ها مورد بررسی قرار گرفت.

در فصل سوم با استفاده از تحلیل میدان مغناطیسی دو ساختار جدید مدلسازی شدند. در این مدلسازی فرضیات قابل قبولی در نظر گرفته شد و در آخر فصل برای هر کدام از موتور ها مدار معادل حالت دائمی به دست آمد. مدل ارائه شده در فصل سوم برای هر یک از موتور ها، مدلی الکتریکی مبتنی بر پارامتر های طراحی است که به خوبی می تواند رفتار موتور را در حالت دائمی مدلسازی کند. این مدل ها، با دقت کافی می توانند به منظور طراحی بهینه موتور های CDDHM و SDDHM به کار گرفته شوند.

در طراحی ماشین های الکتریکی باید به مسائل خاص مربوط به آن ماشین توجه کرد. بنابراین فصل چهارم به بررسی مسائل ماشین های CDDHM و SDDHM اختصاص داده شد.

وجود پارامتر های زیاد در مسئله طراحی موتور پسماند همچنین غیر خطی و چند مقداره بودن پدیده هیستریزیس باعث شده است که بهینه سازی طراحی موتور پسماند بسیار پیچیده باشد بطوریکه طراحی این موتورها با استفاده از روش های معمول مشکل باشد. در فصل چهارم الگوریتم ژنتیک را به

عنوان روش جایگزین برای بهینه سازی طراحی موتور های CDDHM و SDDHM انتخاب شد و با توجه به این که هر مسئله بهینه سازی روش حل متفاوتی دارد، ملاحظات مربوط به مسئله طراحی ماشین های فوق الذکر به الگوریتم ژنتیک اعمال شد.

در فصل پنجم برای محاسبه عملکرد حالت ماندگار موتور های SDDHM و CDDHM یک الگوریتم مبتنی بر مدار معادل های ارائه شده در فصول قبل ارائه گردید. برای تعریف دقیق تر مسئله بهینه سازی طراحی هر دو موتور، حساسیت عملکرد ماشین ها به تغییرات برخی از پارامترهای مهم این مورد بررسی قرار گرفت. مشخصه مغناطیسی آلیاژ Fe-Cr-Ni-Mo-C به عنوان ماده جدید برای کاربرد در روتور موتور پسماند، با چند آلیاژ دیگر که در موتور پسماند استفاده می شوند مقایسه و مزایای این فولاد نسبت به دیگر آلیاژ ها بر شمرده شد. سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک طراحی بهینه هر دو موتور با آلیاژ های مختلف انجام شد و مشخصات آنها با هم مقایسه گردید.

۲-۶- پیشنهادات

در ادامه این پروژه موارد زیر را می تواند مورد توجه بیشتر قرار گیرد.

- ۱- مدلسازی و طراحی موتور پسماند با استفاده از روشهای عددی همچون المان محدود^۱
- ۲- به حساب آوردن گشتاور جریان گردابی برای عملکرد آسنکرون موتور پسماند به منظور کاهش زمان راه اندازی.

۳- بررسی اثر پارامتر های طراحی در بهبود رفتار دینامیکی موتور پسماند

۴- مدلسازی و طراحی موتور های پسماند چند طبقه و بررسی محاسن و معایب آنها

۵- طراحی و مدلسازی موتور های هیبرید پسماند و مغناطیس دائم نوع تخت و چند لایه

1 - Finite element

- [۱]. احمد دارابی " مدلسازی موتورهای هیستریزیس و طراحی وساخت یک نمونه " رساله کارشناسی ارشد به راهنمایی حمید لسانی دانشگاه فردوسی مشهد ۱۳۷۱
- [2]. K. Honda "Magnetic Properties of Matter", Syyokwabo and Company Tokyo, Japan, 1985,
- [3]. M. A. Rahman, M. A. Copeland, and G. R. Slemon, "An analysis of the hysteresis motor III—Parasitic losses," *IEEE Trans. Power App. Syst*, vol. PAS-88, pp. 954–960, Apr. 1969.
- [4]. I. Mayeregoyz "Mathematical Models of Hysteresis and Their Applications," Elsevier publication ,second edition 2003
- [5]. Teare. Jr. Benjamin Richard " Theory of Hysteresis Motor Torque," Phd Thesis Yale University 1937
- [6]. M. A. Rahman and A M. Osheiba, "Dynamic performance prediction of polyphase hysteresis motors," *IEEE Trans On INDUSTRY App*, vol. 26, no. 6, pp. 1026-1033, Nove /Dece. 1990
- [7]. S.P.Clurman, "On Hunting in Hysteresis Motors and New Damping Techniques," *IEEE Transactions on Magnetics*, September 1971, pp 512-517
- [۸]. زهرا نصیری قیداری " بررسی موتورهای هیستریزیس سنکرون " رساله کارشناسی ارشد به راهنمایی حمید لسانی و احمد دارابی دانشکده فنی دانشگاه تهران ۱۳۸۵
- [۹]. تیمور قنبری هاشم آبادی " تحلیل رفتار دینامیکی گذرای موتور های پسماند در شرایط مختلف تغذیه ورودی " رساله کارشناسی ارشد به راهنمایی احمد دارابی و محمد رضا رفیعی دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود ۱۳۸۶
- [10]. K. R. Rajagopal, "Design of a Compact Hysteresis Motor Used in a Gyroscope," *IEEE Trans On Magnetics*, vol. 39, no. 5, pp. 3013-3015, Sept 2003
- [11]. International Atomic Energy Agency IAEA "www.iaea.org", Publications and report
- [۱۲]. احمد دارابی، حمید لسانی، تیمور قنبری و محسن صنعتی مقدم " کاربرد ماشین پسماند در شتابدهنده توربوشارژرها " بیست و دومین کنفرانس بین المللی برق تهران ایران ۱۳۸۶
- [13]. C. Chen "Magnetic Thin Film Shielding on Electrical Wires," Master of Science Thesis Alfred University USA New York 2003
- [14]. Chee Mun Ong, "Modeling and Dynamic Simulation of Electric Machinery Using MATLAB/SIMULINK," 1998
- [15]. M. A. Rahman, A. M. Osheiba, T. A. Little, and G. R. Slemon, "Effects of samarium cobalt permanent magnet on the performance of polyphase hysteresis-

- reluctance motors,” *IEEE Trans. Magnetics.*, vol. MAG-20, pt. 2, pp. 1765-1767, Sept. 1984.
- [16]. L. I. Mendelsohn, “Heat treating P6 alloy for special properties for a four element gyro system,” *IEEE Trans on Magnetics*, vol. Mag-9, no. 3, pp. 356-359, Sept 1973
- [17]. 7 Kubota, G. Watui and M. Itagati. "Hysteresis motor using magnetically anisotropic Fe-Cr-CO magnet", *IEEE Trans on Magnetics*, vol.1.34, No. 6, pp. 3888-3896 Nov. 1998
- [18]. G. Wakui and M. Tomita, “Effect of harmonic flux density on the characteristics of hysteresis motor,” *Trans. IEE Jpn.*, vol. 102-B, no. 1, pp. 25–32, 1982.
- [19]. S. Miyairi and T. Kataoka, "Analysis of Hysteresis Motors Considering Eddy Current Effects", *Journal I.E.E., Japan*, vol. 86, 1966, pp. 67-77.
- [20]. M.A.Rahman, "Combination Hysteresis Reluctance Permanent Magnet Motor", *US Patent Number 5,187,401*, Feb.16, 1993.
- [21]. M. A. Rahman and R. Qin, “A permanent magnet hysteresis hybrid synchronous motor for electric vehicles,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 44, pp. 46–53, Feb.1997.
- [22]. Aydin, M., S. Huang, T.A. Lipo, “Axial Flux Permanent Magnet Disc Machines: A Review,” *Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation, and Motion (SPEEDAM) 2004, Capri, Italy*, June 16-18, 2004.
- [23]. Fang. Deng. “An improved iron loss estimation for permanent magnet brushless machines,” *IEEE Trans. on Energy Conversion*, pp.1391-1395, December 1998.
- [24]. D.C. Hanselman and W.H. Peake. “Eddy-current effects in slot bound conductors.” *IEE Proc. Elec. Power. Appl.*, 142(2) :pp 131-136, March 1995.
- [25]. M. A. Copeland and G. R. Slemon, “An analysis of the hysteresis motor: I-Analysis of the idealized machine,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-82, pp. 34-42, Apr. 1963.
- [26]. M. A. Copeland and G. R. Slemon, “Analysis of the hysteresis Motor: II-The circumferential-flux machine,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-83, pp. 619-625, June 1964.
- [27]. M. A. Rahman, “Analytical models for poly phase hysteresis motor,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-92, no. 1, pp. 237-242, Jan./Feb. 1973.
- [28]. S. Miyari and T. Kataoka, “A basic equivalent circuit of the hysteresis motor” *J. Inst. Elect. Eng. Japan*, 85, (10), pp. 1740 1748. 1965
- [29]. T. Ishikawa and T. Kataoka, “Basic Analysis of Disc-Type hysteresis motors” *J. Inst. Elect. Eng. Japan*, vol.101, No 6, pp. 659-666. 1981.
- [30]. Cyril. G. Veinott, “Theory and design of small induction motors”, 1th edition 1986.

- [31]. D.C. Hanselman and W.H. Peake. "Eddy-current effects in slot bound conductors." *IEE Proc. Elec. Power. Appl.*, 142(2) :pp 131-136, March 1995.
- [32]. AK. Sawhney, "A course in electrical machines design", Dhanpat Rai, 4th edition 1977.
- [33]. Fang. Deng. "An improved iron loss estimation for permanent magnet brushless machines," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, pp.1391-1395, December 1998.
- [34]. S.N.Sivanandam and S.N.Deepa "Introduction to Genetic Algorithms" Springer 2008
- [۳۵]. احمد دارابی، محسن صنعتی مقدم و تیمور قنبری " طراحی و ساخت موتور پسماند تخت سه فاز دو روتوره " گزارش طرح پژوهشی ویژه نوع ۳ حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شاهرود
- [36]. MATLAB "Curve Fitting Toolbox," Math Works 2006

Abstract:

Sub-fractional horse power rating hysteresis motor as an exciter less synchronous machine has found wide applications. Hysteresis motors becoming dominant machines with cost the competitiveness of semi hard permanent magnet materials in the some particular applications. This motor has some favorite features such as constant torque during run up, low startup current and noiseless operation. Simple and robust rotor's structure, low starting current (around 1.2 to 1.5 times of nominal current), constant torque, smooth and noiseless operation are the outstanding characteristics of hysteresis motor, which candidate these motors for high speed applications. However, low efficiency and low power factor are commonly mentioned as the main deficiencies of the hysteresis motors which can be improved somewhat with rotor substance and design contemplations. In this thesis two new structures named CDDHM (coreless dual rotor disc type hysteresis motor) and SDDHM (slotless dual rotor disc type hysteresis motor) for hysteresis motor are introduced and their operations are analyzed with some details. Electromagnetic field analysis of CDDHM and SDDHM are performed and steady state equivalent circuits based on design parameters for both motors are deduced. A computer simulation algorithm is presented to predict the steady state operation characteristics of the motors. Electromagnetic characteristics of a steel alloy which contains iron, chrome, nickel, molybdenum and carbon (Fe-Cr-Ni-Mo-C) are presented and a new application for this steel as an alternative material for the rotor of hysteresis motor is investigated. Magnetic properties of Fe-Cr-Ni-Mo-C are compared with those of a few common magnetic materials which are used in the conventional hysteresis motors. The genetic algorithm is used to optimize the design of CDDHM and SDDHM motors. Optimized motors with different alloys use in the rotor are finally compared.



Shahrood University of Technology
Faculty of Electrical and Robotics Engineering

Design and Modeling of Disc Type Dual Rotor Synchronous Hysteresis Motor

By:
Mohsen Sanati Moghadam

Under supervision of:
Dr. Ahmad Darabi
Prof. Hamid Lesani

A Thesis Submitted to the
Faculty of Electrical and Robotics Engineering
Shahrood University of Technology
In partial fulfillment of the requirements for the degree of
the Master of Science in Electrical Engineering

June 2008