

دانشگاه صنعتی شاهرود
دانشکده برق و رباتیک

گروه قدرت

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد موضوع: طراحی و شبیه سازی پمپ های پسماند تحت چند طبقه، طراحی و شبیه سازی

دانشجو: محمد حسین صادقی حداد زواره

استاد راهنما:

آقای دکتر احمد دارابی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

اردیبهشت ماه ۱۳۸۹

شماره : ۷۰۷.ت.ب
تاریخ : ۱۳۸۹/۰۲/۲۱
ویرایش : - - - -



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای محمد حسین صادقی حداد زواره رشته برق گرایش : قدرت تحت عنوان : بهینه سازی ماشین های پسماند تخت چند طبقه، طراحی و شبیه سازی که در تاریخ ۱۳۸۹/۰۲/۲۱ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است :

<input type="checkbox"/> مردود	<input type="checkbox"/> دفاع مجدد	<input checked="" type="checkbox"/> قبول (با درجه : عالی امتیاز ۱۹)
--------------------------------	------------------------------------	---

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶)

۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	احمد رازابی	دانشیار	
۲- استاد مشاور	---	---	---
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	اسیرضا مروی	استادیار	
۴- استاد ممتحن	علی دستک	استادیار	
۵- استاد ممتحن	سیداصغر غلامی	استادیار	

تأیید رئیس دانشکده :

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

وارستگی که هر آنچه در زندگی دارم از نعمت وجود آنهاست.

به امید آنکه خورشید فرزندان وجودشان بر پهنای دشت زندگی ام همواره

تابان بماند.

و تقدیم به:

تمام آنان که دوستان دارم

مشکر و قدردانی

بر خود واجب و لازم می دانم تا از استاد ارجمند و گرامی جناب آقای دکتر احمد دارابی که بارها بهمانی ها و حمایت های بی دریغ و دلسوزانه می خود را بهی بس دشوار را بر من بهموار نمودند مشکری ویژه نمایم و آرزوی کامیابی بیش از پیش ایشان را داشته باشم.

همچنین از محضر دیگر اساتید گروه برق - قدرت دانشگاه صنعتی شاهرود، آقایان دکتر دستقان، دکتر بهارزاد و دکتر علمی پاسکزاری می نمایم.

سعی نبرده در این راه به جایی نرسی مزد اگر میطلبی طاعت استاد بر
و اما در این مدت از بهمنشینی دوستانی بهره مند شدم که کمک های بی حصرشان راهگشای بسیاری از مشکلات بود. با پاس فراوان از آقایان مهندس امیر حسن نیا، مهندس محسن اولادی، مهندس محسن محمودی، مهندس علی معینی و دیگر دوستانی که مریاری دادند.

مقام امن و می بیغش و رفیق شفیق کورت مدام میسر شود زهی توفیق
همچنین از کارگاه ترانشاری و فرزکاری اتحاد اصفهان و دیگر صنعتگرانی که در مراحل ساخت موتور، تجربیاتشان را در اختیار اینجانب قرار دادند مشکر می کنم.

و در آخر برای کادر اداری دانشگاه صنعتی شاهرود بویژه آقای یونسیان آرزوی موفقیت دارم.

سرارادت ما و آستان حضرت دوست که هر چه بر سر ما میرود اراده اوست

تعهد نامه

اینجانب **محمد حسین صادقی** **مدیر زواریه** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد / دکتری رشته **مهندسی برق قدرت** دانشگاه **برق و رباتیک**، دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه / رساله **ایستگاه سازی ماشینهای پسماند** تحت **چند طبقه طراحی و شبیه سازی** تحت راهنمایی **دکتر احمد درواری** متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه / رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه / رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- «عقود معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه / رساله تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه / رساله رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه / رساله ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه / رساله ، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ : ۱۳۸۹،۲،۲۱

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات عامی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه / رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد .

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه / رساله وجود داشته باشد .

چکیده

موتورهای پسماند، موتورهای سنکرون خود راهاندازی هستند که بر اساس خصوصیات پسماند مواد مغناطیسی عمل می‌کنند. از مهمترین و بارزترین ویژگی‌های این نوع از موتورها می‌توان به ساختار مستحکم و ساده، مشخصه‌ی گشتاور-سرعت ثابت، عملکرد بسیار نرم و بدون نویز و جریان راهاندازی پایین اشاره کرد. در مقابل مزایای یاد شده، بازده و ضریب قدرت پایین از مهمترین معایب ماشین‌های هیستریزیس معمول به شمار می‌روند.

موتور پسماند نوع تخت دوروتوره بدون هسته CDDHM که به تازگی در دانشگاه صنعتی شاهرود و توسط دکتر دارابی و همکاران معرفی شده است، ساختار جدیدی از موتورهای پسماند است که قابلیت بهبود بازده و ضریب توان موتورهای پسماند را دارا می‌باشد. به دلیل جدید بودن موتور CDDHM تاکنون تحقیقات و مطالعات کافی بر روی الگوریتم طراحی و تاثیرات تغییرات پارامترهای طراحی بر نحوه‌ی عملکرد این موتور انجام نگرفته است. همچنین برخلاف ماشین‌های الکتریکی معمول، به علت عدم وجود اطلاعات و داده‌های تجربی در زمینه‌ی طراحی، الگوریتم مدون و کاملی برای طراحی موتور CDDHM در دسترس نیست. بنابراین استفاده از روش‌های بهینه‌سازی برای طراحی موتور CDDHM اجتناب ناپذیر است. علاوه بر این به علت وجود مدل چند مقدره، غیرخطی و پیچیده موتور هیستریزیس، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک که معمولاً برای مسائل بهینه‌سازی خطی استفاده می‌شوند، امکان‌پذیر نمی‌باشد. در نتیجه برای حل مسأله‌ی بهینه‌سازی مورد نظر باید از روش‌های بهینه‌سازی تکاملی استفاده نمود.

در این پایان‌نامه یک الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک با تمامی جزئیات به منظور دستیابی به مقدار بیشینه‌ی بازده‌ی موتور CDDHM ارائه می‌شود. سپس بر اساس طرح پیشنهادی الگوریتم ژنتیک، موتور CDDHM بهینه ساخته شده و تست‌های مختلف بر روی آن انجام شده است. طرح پیشنهادی و نتایج حاصل از آزمایش‌ها، بهبود خوبی در مقدار بازده و ضریب قدرت موتور CDDHM را نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: موتور پسماند نوع تخت دوروتوره بدون هسته، الگوریتم ژنتیک، بازده و ضریب توان

مقالات مستخرج از پایان نامه:

- 1) M.H. Sadeghi, A. Darabi, "Optimization of a New Type of Hysteresis Motor Using Genetic Algorithm," 9th IEEE Conference, Prague, Czech Republic, May 16-19, 2010.
- 2) M. H. Sadeghi, A. Darabi, A. Hassannia, "An Approach to Determine the Starting Characteristic of the New Disc Type Hysteresis Motor" International Conference on Electrical Machines and Systems 2010, Songdo Convensia in Incheon, Korea, Oct 10-13.

فهرست مطالب:

۱ فصل اول: مقدمه‌ای بر پدیده پسماند و مواد مغناطیس دائم.....۱

۱-۱. مقدمه ۲

۲-۱. پدیده پسماند..... ۲

۳-۱. مواد مغناطیس دائم..... ۵

۴-۱. مواد مغناطیس دائم مورد استفاده در موتورهای پسماند..... ۸

۲ فصل دوم: ساختارها و کاربردهای موتور پسماند..... ۱۱

۱-۲. مقدمه ۱۲

۲-۲. مکانیزم تولید گشتاور در موتورهای پسماند..... ۱۲

۳-۲. ساختارهای موتور پسماند..... ۱۵

۱-۳-۲. موتور پسماند استوانه ای شار محیطی..... ۱۶

۲-۳-۲. موتور پسماند استوانه ای شار شعاعی..... ۱۷

۳-۳-۲. موتور پسماند استوانه ای معکوس..... ۱۷

۴-۳-۲. موتور پسماند آهنربای دائم..... ۱۸

۵-۳-۲. موتور پسماند نوع تخت..... ۱۹

۴-۲. ویژگی های خاص و کاربردهای موتور پسماند..... ۲۸

۱-۴-۲. ژيروسکوپ..... ۲۹

۲-۴-۲. سانتریفیوژ..... ۳۰

۳۰ ۲-۴-۳ ضبط کننده های ویدئویی

۳۰ ۲-۴-۴ شتاب دهنده توربوشارژرها

۳ فصل سوم: مدل سازی موتور پسماند تخت دو روتوره ۳۲

۳۳ ۳-۱-۱ مقدمه

۳۳ ۳-۲-۱ تحلیل عملکرد موتور پسماند تخت دو روتوره بدون هسته

۳۴ ۳-۲-۱-۱ فرضیات مدلسازی

۳۷ ۳-۲-۲-۱ توزیع چگالی شار

۴۱ ۳-۲-۳-۱ مسائل خاص در موتور CDDHM

۴۲ ۳-۳-۱ مدار معادل موتور پسماند تخت دو روتوره بدون هسته

۴۶ ۳-۳-۱-۱ محاسبه مقاومت استاتور

۴۹ ۳-۳-۲-۱ محاسبه راکتانس پراکندگی

۴ فصل چهارم: الگوریتم ژنتیک و طراحی بهینه موتور CDDHM ۵۴

۵۵ ۴-۱-۱ مقدمه

۵۶ ۴-۲-۱ بهینه سازی و روش های آن

۵۶ ۴-۳-۱ الگوریتم ژنتیک

۵۷ ۴-۴-۱ الگوریتم طراحی موتور CDDHM

۵۸ ۴-۴-۱-۱ پارامترهای ورودی طراحی

۶۰ ۴-۴-۲-۱ پارامترهای خروجی طراحی

۶۳	..... قیود طراحی ۳-۴-۴
۶۳	..... طراحی بهینه ی موتور CDDHM ۵-۴
۶۴	..... ایجاد نسل اولیه ۱-۵-۴
۶۵	..... تابع هدف ۲-۵-۴
۶۵	..... تابع برازندگی (شایستگی) ۳-۵-۴
۶۶	..... همبری ۴-۵-۴
۶۶	..... جهش ۵-۵-۴
۶۶	..... نتایج بهینه سازی و ارائه طرح بهینه ۶-۴

۵ فصل پنجم: تکنولوژی و فرآیند ساخت موتور CDDHM بهینه ۶۸

۶۹	..... مقدمه ۱-۵
۶۹	..... استاتور ۲-۵
۶۹	..... بدنه استاتور ۱-۲-۵
۷۱	..... سیم پیچی استاتور ۲-۲-۵
۷۴	..... روتور ۳-۵
۷۴	..... دیسک های روتور ۱-۳-۵
۷۵	..... نگهدارنده روتور ۲-۳-۵
۷۷	..... شفت ۴-۵
۷۷	..... دیگر ملاحظات ساخت ۵-۵

۷۷	صفحه نگهدارنده استاتور	۵-۵-۱
۷۸	سیستم خنک سازی	۵-۵-۲
۸۱	پایه های استاتور	۵-۵-۳
۸۳	نقشه های ساخت و مونتاژ موتور CDDHM بهینه	۵-۶
۹۲	فصل ششم: تست های عملی و نتایج آن ها	۶
۹۳	مقدمه	۶-۱
۹۶	مطالعه و محاسبه زمان راه اندازی موتور هیستریزیس	۶-۲
۱۰۵	آزمایش لحظه ورود به سنکرون	۶-۳
۱۱۰	مشخصه گشتاور - سرعت موتور CDDHM	۶-۴
۱۱۶	نتیجه گیری و پیشنهادها	۷
۱۱۹	مراجع	۸

فهرست شکل‌ها و جداول:

- شکل (۱-۱): تغییرات چگالی شار بر حسب شدت میدان مغناطیسی ۳
- شکل (۲-۱): منحنی هیستریزیس با حلقه‌های جزئی ۵
- شکل (۳-۱): منحنی مغناطیس شونده‌گی برای مواد دیامغناطیس، پارامغناطیس و فرومغناطیس ۶
- شکل (۴-۱): الف) منحنی هیستریزیس برای مواد مغناطیسی نرم، ب) منحنی هیستریزیس برای مواد مغناطیسی سخت ۷
- شکل (۵-۱): منحنی هیستریزیس با حلقه‌های جزئی ۹
- شکل (۱-۲): مکانیزم تولید گشتاور در موتور پسماند ۱۴
- شکل (۲-۲): مشخصه گشتاور موتور پسماند ۱۴
- شکل (۳-۲): موتور استوانه‌ای شار محیطی ۱۶
- شکل (۴-۲): موتور استوانه‌ای شار شعاعی ۱۷
- شکل (۵-۲): موتور پسماند استوانه‌ای معکوس ۱۸
- شکل (۶-۲): موتور پسماند آهنربای دائم ۱۹
- شکل (۷-۲): موتور پسماند تخت شار محیطی و نحوه تشکیل قطب‌ها در آن ۲۰
- شکل (۸-۲): ساختار موتور پسماند نوع تخت دو روتوره بدون هسته ۲۱
- شکل (۹-۲): مسیر شار در موتور پسماند تخت دو روتوره بدون هسته ۲۲
- شکل (۱۰-۲): ساختار موتور پسماند نوع تخت دو روتوره بدون شیار ۲۵
- شکل (۱۱-۲): مسیر شار در موتور پسماند نوع تخت دو روتوره بدون شیار ۲۶

- شکل (۱-۳): الف) مسیر شار در موتور استوانه ای ب) مسیر شار در موتور تخت (شعاع داخلی) ج)
- ۳۳ مسیر شار در موتور تخت (شعاع خارجی).
- شکل (۲-۳): مسیر بسته مغناطیسی شامل هر دو روتور در موتور CDDHM ۳۸
- شکل (۳-۳): مسیر شار در جزء دیفرانسیلی $d\theta$ فاصله هوایی و روتور موتور CDDHM ۳۹
- شکل (۴-۳): دیاگرام فازوری جریان ها و ولتاژ فاز a موتور CDDHM ۴۵
- شکل (۵-۳): مدار معادل یک فاز موتور پسماند تخت دو روتوره بدون هسته ۴۶
- شکل (۶-۳): توزیع سیم پیچی در یک شیار مستطیلی ۴۸
- شکل (۷-۳): مسیر شار در CDDHM ۵۱
- شکل (۸-۳): مدار معادل مغناطیسی CDDHM ۵۱
- شکل (۹-۳): مدار معادل مغناطیسی CDHMM ۵۱
- شکل (۱۰-۳): دوگان الکتریکی مدار معادل مغناطیسی شکل (۳-۹) ۵۲
- شکل (۱۱-۳): مدار معادل الکتریکی موتور CDDHM ۵۲
- شکل (۱-۴): الگوریتم ژنتیک ۵۸
- شکل (۲-۴): حلقه داخلی استاتور ۶۲
- جدول (۱-۴): مشخصات طرح بهینه ۶۷
- شکل (۱-۵): حلقه بدنه استاتور ۷۰
- شکل (۲-۵): استاتور ۷۱
- شکل (۳-۵): یک نیم فاز از سیم پیچ ۷۳
- شکل (۴-۵): سیم پیچی کامل شده استاتور ۷۳

- شکل (۵-۵): قالب سیم پیچی ۷۴
- شکل (۶-۵): دیسک روتور ۷۶
- شکل (۷-۵): نگهدارنده روتور ۷۶
- شکل (۸-۵): شفت ۷۷
- شکل (۹-۵): صفحه نگهدارنده استاتور ۷۸
- شکل (۱۰-۵): نحوه نمایش روش خنک سازی ۸۰
- شکل (۱۱-۵): پایه های استاتور ۸۱
- شکل (۱۲-۵): موتور CDDHM بهینه ۸۲
- شکل (۱-۶): محیط نرم افزار Wave Scan ۹۴
- شکل (۲-۶): MATLAB/SIMULINK ۹۴
- شکل (۳-۶): توان اکتیو و راکتیو در فرکانس ۶۰ هرتز ۹۵
- شکل (۴-۶): ولتاژ فاز در فرکانس ۶۰ هرتز ۹۵
- شکل (۵-۶): جریان فاز در فرکانس ۶۰ هرتز ۹۶
- شکل (۶-۶): مقادیر سرعت بر حسب زمان در فرکانس ۸۰ هرتز ۹۹
- شکل (۷-۶): منحنی برازش شده بر روی مقادیر سرعت در فرکانس ۸۰ هرتز ۹۹
- شکل (۸-۶): منحنی های برازش شده سرعت در فرکانس ۸۰ هرتز در ولتاژهای مختلف ۱۰۰
- جدول (۱-۶): ضرایب معادله برازش برای فرکانس ۸۰ هرتز در ولتاژهای مختلف ۱۰۱
- شکل (۹-۶): مقادیر K و خط برازش شده بر آن در فرکانس ۸۰ هرتز ۱۰۱
- شکل (۱۰-۶): مقادیر برازش شده K برای فرکانس های ۵۰-۱۱۰ هرتز ۱۰۲

- شکل (۱۱-۶): ولتاژ تقاطع خط $k=25$ و خطوط k ۱۰۲
- جدول (۲-۶): مقادیر ولتاژ به منظور انجام تست راه اندازی ۱۰۳
- شکل (۱۲-۶): زمان راه اندازی در فرکانس های ۵۰-۱۱۰ هرتز ۱۰۳
- شکل (۱۳-۶): جریان ورودی راه اندازی در فرکانس های ۵۰-۱۱۰ هرتز ۱۰۴
- جدول (۳-۶): مقادیر ولتاژ لحظه ورود به سنکرون ۱۰۴
- جدول (۴-۶): مقادیر ورودی اندازه گیری شده و محاسبه شده ۱۰۶
- شکل (۱۴-۶): ولتاژ فاز ورودی ۱۰۷
- شکل (۱۵-۶): جریان فاز ورودی ۱۰۷
- شکل (۱۶-۶): توان تک فاز ورودی ۱۰۸
- شکل (۱۷-۶): ولتاژ فاز ورودی اعمالی به مدار معادل ۱۰۸
- شکل (۱۸-۶): ولتاژ فاز ورودی ۱۰۹
- شکل (۱۹-۶): جریان فاز ورودی ۱۰۹
- شکل (۲۰-۶): توان تک فاز ورودی ۱۱۰
- جدول (۵-۶): سرعت و گشتاور در فرکانس های مختلف ۱۱۱
- شکل (۲۱-۶): مشخصه گشتاور- سرعت موتور CDDHM در فرکانس ۱۲۰ هرتز ۱۱۲
- شکل (۲۲-۶): مشخصه گشتاور- سرعت موتور CDDHM در فرکانس ۱۰۰ هرتز ۱۱۳
- شکل (۲۳-۶): مشخصه گشتاور- سرعت موتور CDDHM در فرکانس ۱۳۰ هرتز ۱۱۳
- شکل (۲۴-۶): مشخصه گشتاور- سرعت موتور CDDHM در فرکانس ۱۴۰ هرتز ۱۱۴
- شکل (۲۵-۶): مشخصه گشتاور- سرعت موتور CDDHM در فرکانس ۱۵۰ هرتز ۱۱۴

فصل اول

مقدمه ای بر دیده سماند
پتت

و

مواد معناتیس داعم

۱-۱. مقدمه

پدیده پسماند یا هیستریزیس^۱ معمولاً از عوامل ایجاد تلفات در موتورهای الکتریکی می‌باشد. اما در نوع خاصی از موتورها که موتور پسماند نام گرفته‌اند، این پدیده باعث ایجاد گشتاور الکترومغناطیسی می‌شود. موتور پسماند یکی از انواع موتورهای سنکرون است که عملکرد آن بر اساس پدیده پسماند مغناطیسی است. پدیده هیستریزیس بصورت تاخیر فاز بین تاثیر میدان مغناطیسی بر ماده پسماند و چگالی شار ناشی از آن تعریف می‌شود. درحقیقت همین تاخیر فاز، باعث ایجاد گشتاور موتور پسماند می‌شود، که متناسب با سطح حلقه هیستریزیس و حجم روتور است.

با توجه به اهمیت پدیده پسماند و کاربرد مواد مغناطیسی و ویژگی‌های آن‌ها در موتورهای پسماند، آشنایی مختصری با این پدیده و انواع مواد مغناطیسی ضروری به نظر می‌رسد. لذا در این فصل پدیده‌ی پسماند مورد بررسی قرار گرفته و انواع مواد مغناطیسی قابل کاربرد در موتورهای پسماند ارائه می‌شود.

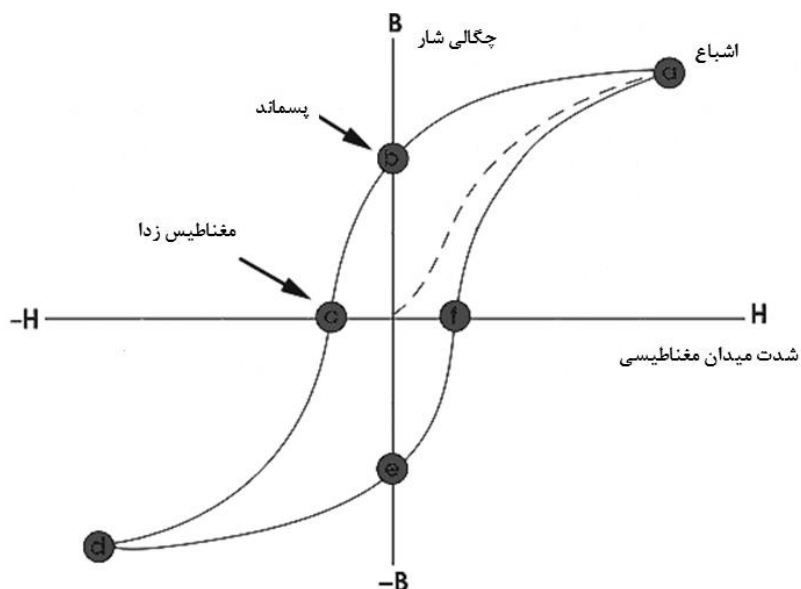
۱-۲. پدیده پسماند

مواد فرومغناطیس از تعدادی حوزه‌های مغناطیسی تشکیل شده‌اند که هنگامیکه تحت تاثیر یک میدان مغناطیسی قرار گیرند، با میدان هم جهت می‌شوند. از آنجائیکه تغییر جهت حوزه‌های مغناطیسی مستلزم صرف انرژی است، در صورت کاهش میدان، حوزه‌های مغناطیسی به حالت اولیه برنمی‌گردند. لذا اگر میدان متناوبی به یک ماده فرو مغناطیس اعمال شود، شار ایجاد شده در آن نسبت به میدان اعمالی تاخیر فاز خواهد داشت.

^۱-Hysteresis

شکل (۱-۱) تغییرات چگالی شار را بر حسب شدت میدان مغناطیسی و رفتار حوزه‌های

مغناطیسی را در شرایط مختلف نشان می‌دهد [۱].



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

در شکل (۱-۱) نقطه‌ی C نیروی مغناطیس زدا نام دارد که محل تقاطع منحنی با محور شدت میدان مغناطیسی است و محل تقاطع منحنی با محور چگالی شار (نقطه‌ی b) به نام چگالی شار پسماند شناخته می‌شود. بررسی روابط حاکم بر سلونوئید [۲] امکان دید و شناخت بهتر پدیده پسماند را فراهم می‌آورد.

میزان تلفات ایجاد شده در یک ماده هیستریزس طبق رابطه‌ی (۱-۱) بدست می‌آید [۲].

$$P = V_{Hysteresis} f \oint H dB = V_{Hysteresis} E_h f \quad (1-1)$$

که در آن:

$V_{Hysteresis}$: حجم ماده مغناطیسی.

f : فرکانس.

و E_h سطح حلقه‌ی هیستریزاس است.

به منظور تقریب منحنی‌های هیستریزاس مواد مغناطیسی مختلف، روش‌هایی ارائه شده است که شرح آن‌ها در [۱] آورده شده است.

یکی از روش‌های معمول تقریب منحنی هیستریزاس تقریب بیضی^۱ است، بدین صورت که با در نظر گرفتن مولفه اصلی شدت میدان مغناطیسی و صرف نظر کردن از هارمونیک‌های دیگر آن، منحنی‌های پسماند با بیضی‌های متحدالمرکز که هریک دارای یک زاویه تاخیر^۲ هیستریزاس α و نفوذپذیری مغناطیسی $\mu = \frac{B_{\max}}{H_{\max}}$ یکتایی هستند تقریب زده می‌شوند.

مقدار زاویه تاخیر هیستریزاس مورد اشاره از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{E_h}{\pi H_{\max} B_{\max}}\right) \quad (2-1)$$

یکی دیگر از روش‌های رایج به منظور تقریب منحنی هیستریزاس مواد تقریب متوازی الاضلاع^۳ است. در مرجع [۳] از تقریب متوازی الاضلاع برای مدلسازی موتور پسماند استفاده شده است. در این پایان‌نامه برای تقریب منحنی‌های پسماند از بیضی‌های متحدالمرکز استفاده شده است. تقریب فوق نیز دقت کافی برای مدلسازی موتور پسماند به منظور طراحی را دارد.

از موارد مهم و قابل بررسی دیگر در مواد هیستریزاس وجود حلقه‌های جزئی^۴ در منحنی‌های هیستریزاس است. این حلقه‌ها در اثر سینوسی نبودن مطلق شدت میدان مغناطیسی و وجود هارمونیک‌ها در این میدان بوجود می‌آیند. وجود حلقه‌های جزئی در منحنی‌های هیستریزاس باعث

¹ - Elliptical

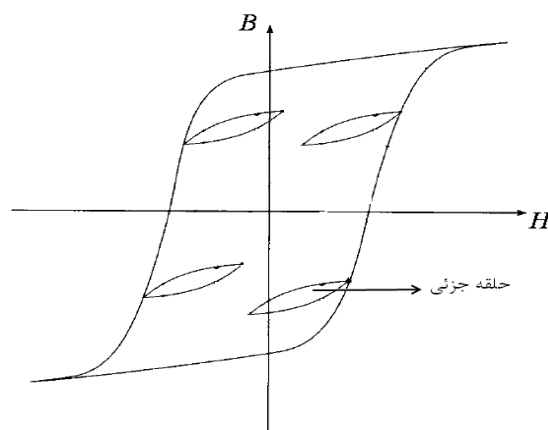
² - Delay Angle

³ - Parallelogram

⁴ - Minor Loop

ایجاد تلفاتی موسوم به تلفات پارازیتیک^۱ در موتورهای پسماند می‌شود [۳]. میزان این تلفات نیز متناسب با سطح حلقه‌های جزئی است.

شکل (۲-۱) وجود حلقه‌های جزئی را در یک منحنی هیستریزیس نشان می‌دهد. برای مدل-سازی دقیق پدیده هیستریزیس و در نظرگرفتن حلقه‌های جزئی می‌توان از روش‌های عددی استفاده کرد.



شکل (۲-۱): منحنی هیستریزیس با حلقه‌های جزئی [۴]

۳-۱. مواد مغناطیس دائم

در تقسیم بندی مواد از لحاظ رفتار مغناطیسی، به چهار دسته دیامغناطیس^۲، پارامغناطیس^۳، فرومغناطیس^۴ و آنتی مغناطیس^۵ بر خواهیم خورد.

با مشاهده شکل (۳-۱) و مقایسه شیب منحنی‌های مغناطیس شوندگی انواع مواد مغناطیسی با هوا درمی‌یابیم که شیب منحنی مغناطیس شدگی مواد پارامغناطیس از هوا بیشتر است در حالی که

^۱ - parasitic losses

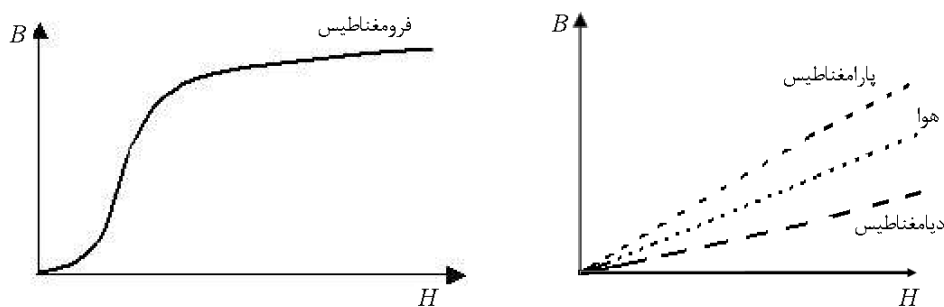
^۲ - Diamagnetic

^۳ - Paramagnetic

^۴ - Ferromagnetic

^۵ - Anti-ferromagnetic

در مواد دیامغناطیس این شیب از هوا کمتر است. اما در مورد مواد فرومغناطیس ابتدا شیب منحنی مغناطیس شونده زیاد و بعد از رسیدن به اشباع شیب منحنی مغناطیس شدگی این مواد کم می‌شود [۵].

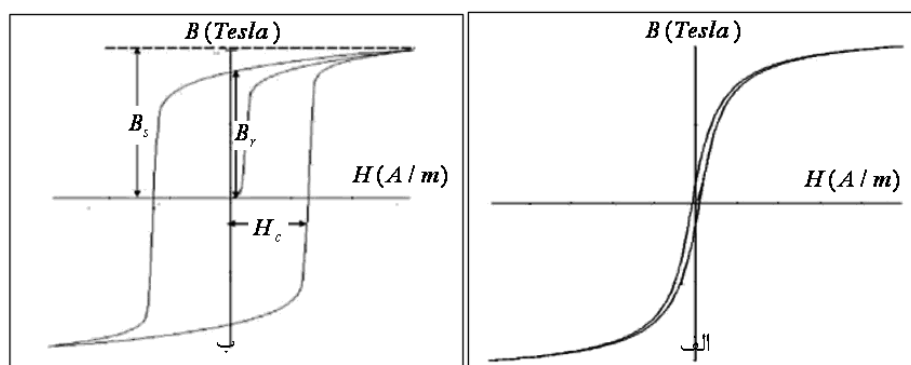


شکل (۱-۳): منحنی مغناطیس شونده برای مواد دیامغناطیس، پارامغناطیس و فرومغناطیس [۶]

علاوه بر پرمابلیته، وجود عوامل دیگری نظیر نیروی ضد مغناطیسی و چگالی شار پسماند باعث تفاوت مواد فرومغناطیس با مواد دیامغناطیس و پارامغناطیس می‌شوند. مواد فرومغناطیس را می‌توان با توجه به نیروی ضد مغناطیسی به دو دسته سخت و نرم تقسیم‌بندی نمود. در مواد فرومغناطیس نرم نیروی مغناطیس زدا کم و چگالی شار پسماند در این مواد بسیار کوچک است اما مواد فرومغناطیس سخت نیروی مغناطیس‌زدای بزرگی دارند و چگالی شار پسماند در این مواد مقدار قابل ملاحظه‌ای است. شکل (۱-۴) منحنی‌های هیستریزیس نمونه برای مواد فرومغناطیس نرم و سخت را نشان می‌دهد.

علاوه بر این معنای دیگری نیز برای سختی و نرمی مغناطیسی مواد وجود دارد. بسیاری از آلیاژهای آهن، نیکل و کبالت، به عنوان موادی که پسماند آن‌ها نسبت به پسماند آهن دوام بیشتری دارند شناخته شده‌اند. این آلیاژها تحت عملیات حرارتی قرار می‌گیرند و در نتیجه سختی مکانیکی و مغناطیسی آهن‌ربای بدست‌آمده افزایش می‌یابد. به همین دلیل این مواد به مواد مغناطیس دائم سخت

شده موسوم هستند. در مواد مغناطیسی نرم سرعت و تسهیل مغناطیس شدگی به ازای مقادیر کم شدت میدان مغناطیسی، ناشی از حرکت دیواره حوزه‌ها است. چرخش حوزه، فقط در مقادیر زیاد شدت میدان در مغناطیس‌شدگی مشارکت الاستیک دارد که بلافاصله با کاهش شدت میدان ناپدید می‌شود. پسماند مواد مغناطیسی نرم بیشتر مربوط به حوزه‌هایی است که به مکانی که قبل از اعمال شدت میدان قرار داشته‌اند، برگشته‌اند. حاصل عملیات حرارتی بسیاری از مواد مغناطیسی سخت ایجاد کریستال‌های بسیار کوچک در ماده می‌باشد، ساختاری که مانع حرکت دیواره حوزه‌ها می‌باشد. بیشترین مغناطیس‌شدگی در مواد مغناطیسی سخت نتیجه تغییر جهت غیر الاستیک و ناگهانی تمام حوزه‌ها است. تداوم باقی ماندن حوزه‌ها در جهت‌های تغییر یافته‌شان حتی بعد از برداشته شدن شدت میدان سبب افزایش پسماند می‌شود و همین‌طور مقدار نیروی مغناطیس زدا آن‌ها ممکن است چندین هزار برابر بزرگتر از نیروی مغناطیس زدای مواد نرم باشد [۷].



شکل (۴-۱): الف) منحنی هیستریزیس برای مواد مغناطیسی نرم، ب) منحنی هیستریزیس برای مواد مغناطیسی

سخت [۵]

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 ۶٪ تنگستن به کار می‌رفت. در طول

^۱ - Quench Hardening

جنگ فولادهای پر کربن با ۱ تا ۶ درصد 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 فولادهای سخت در سال ۱۹۱۷ هنگامی که ژاپن یک فولاد کبالتی شامل 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. آلنیکوها آلیاژ آهن با آلومینیم نیکل مس و کبالت می‌باشند. اولین آلیاژ آهن، آلومینیم نیکل در سال ۱۹۳۲ توسط Nishima تهیه شد سپس برای بهبود خواص آن کبالت، مس و تیتانیم به آن اضافه شد [۱]، [۷].

۱-۴. مواد مغناطیس دائم مورد استفاده در موتورهای پسماند

مشخصه عملکرد موتور پسماند بسیار تحت تاثیر نوع ماده استفاده شده در روتور این موتورها می‌باشد. از مهمترین مواد مغناطیس دائم قابل استفاده در روتور موتور پسماند می‌توان آلیاژ آهن-۳۶٪ کبالت (Fe-Co) [۸]، آلیاژ آهن کبالت وانادیم یا P6 با ترکیب (Fe-Co-V) [۹]، آلیاژ آهن-۵٪ کبالت (Fe-Co) [۱۰]، آلنیکوها (Fe-Co-Ni-Al) و آلیاژ آهن کرم کبالت (Fe-Cr-Co) [۱۱] را نام برد. مشخصه‌های 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. این ماده با نام تجاری VCN150 در بازار قابل دستیابی است. اگرچه این مواد همگی از فرومغناطیس‌های نوع سخت هستند ولی هر کدام از نظر مغناطیسی و مکانیکی ویژگی‌های خاص خود را دارند. از جمله مواردی که در انتخاب ماده روتور موتور پسماند باید به آن توجه کرد می‌توان به گزینه‌های زیر اشاره نمود.

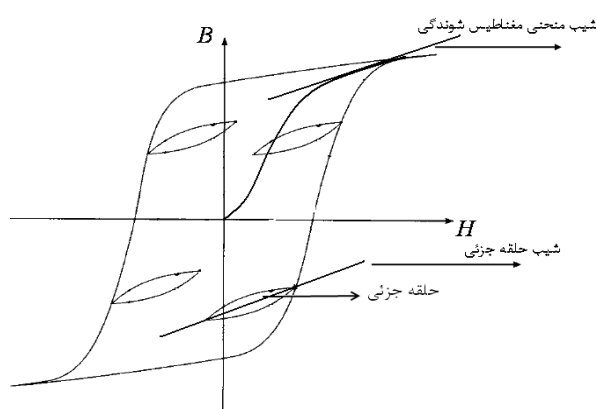
(۱) همانطور که در ابتدای فصل اشاره شد توان خروجی موتور پسماند متناسب با سطح حلقه

پسماند و حجم ماده استفاده شده در روتور است. پس هر چه سطح حلقه هیستریزیس ماده

روتور موتور پسماند بزرگتر باشد با یک حجم مشخص از ماده روتور می‌توان توان خروجی بالاتری داشت.

(۲) در فصل‌های بعدی نشان خواهیم داد که راندمان ماکزیمم در موتور پسماند به ازاء یکی از حلقه‌های هیستریزس اتفاق می‌افتد. حلقه‌ای که در آن حلقه، راندمان موتور ماکزیمم است را حلقه نرمال می‌نامیم. هر چقدر چگالی شار پسماند و پرمابیلیته مربوط به حلقه نرمال بالاتر باشد، جریان استاتور کمتر خواهد شد و بنابراین تلفات مسی پایین‌تر خواهد بود.

(۳) هارمونیک‌های MMF در موتور پسماند باعث ایجاد حلقه‌های جزئی می‌شوند و در نتیجه باعث ایجاد تلفات پارازیتیک خواهند شد. در هر حلقه‌ی مغناطیسی شیب حلقه‌های جزئی تقریباً برابر با شیب منحنی مغناطیس شوندگی ماده روتور در نقطه ماکزیمم حلقه است. شکل (۳-۲) حلقه‌های جزئی را در حلقه هیستریزس نشان می‌دهد. هرچه شیب حلقه‌های جزئی بیشتر باشد تلفات پارازیتیک کمتر خواهد بود [۱۲]. پس می‌توان گفت هرچه شیب منحنی مغناطیس شوندگی در نقطه ماکزیمم لوپ نرمال ماده پسماند بیشتر باشد تلفات پارازیتیک کمتر خواهد بود. به این دلیل یکی از پارامترهای مهم انتخاب ماده روتور کمتر بودن شیب منحنی مغناطیس شوندگی در نقطه ماکزیمم حلقه‌های آن ماده است.



شکل (۵-۱): منحنی هیستریزس با حلقه‌های جزئی [۴]

- (۴) در هنگام راه‌اندازی گشتاور مربوط به جریان گردابی در موتور پسماند با گشتاور هیستریزیس جمع می‌شود. بنابراین هرچه گشتاور مربوط به جریان گردابی بزرگتر باشد گشتاور راه‌اندازی موتور بیشتر خواهد بود. گشتاور جریان گردابی در موتور پسماند به سطح حلقه هیستریزیس، مقاومت ویژه ماده‌ی پسماند و دیگر پارامترهای طراحی بستگی دارد [۱۳]. از این رو با انتخاب مناسب ماده پسماند روتور می‌توان گشتاور راه‌اندازی را بهبود داد.
- (۵) برخی از آلیاژهای به کار رفته در مواد پسماند مانند کبالت از عناصر کمیاب و بسیار گران-قیمت هستند. بنابراین با انتخاب ماده مناسب برای روتور موتور پسماند شاید لازم باشد قیمت تمام‌شده موتور را نیز لحاظ کرد.
- سختی مکانیکی نسبتاً بالای مواد پسماند باعث مسائل و مشکلات خاصی در هنگام ساخت روتور می‌شود که در انتخاب ماده روتور به لحاظ ماشین کاری مهم می‌باشد.

فصل دوم

ساختارها و کاربردهای

موتور سماند

۲-۱. مقدمه

در این فصل برای آشنایی بیشتر با موتور هیستریزیس به توضیح مکانیزم تولید گشتاور در این موتورها می‌پردازیم و در ادامه ساختارهای مختلف موتور پسماند ارائه شده و مورد بررسی قرار می‌گیرد. در پایان برخی از کاربردهای موتورهای پسماند توضیح داده می‌شود.

۲-۲. مکانیزم تولید گشتاور در موتورهای پسماند

نظریه استفاده از پدیده هیستریزیس به منظور تولید گشتاور در یک موتور اولین بار در اوایل قرن نوزدهم مطرح شد. این کار توسط آقای Steinmetz در سال ۱۹۰۸ انجام شد که بدلیل توجیه تئوری ضعیف آن با استقبال روبرو نشد. اما پس از آن و در دهه‌های ۳۰ و ۴۰ میلادی شرکت جنرال الکتریک^۱ این موتورها را تحت آزمایش‌های تئوری و عملی قرار دادند و نتایجی در مورد بررسی مواد مختلف هیستریزیس قابل استفاده در این موتورها ارائه شد. در سال ۱۹۳۷ آقای Teare در دانشگاه ییل^۲ موتور هیستریزیس را از لحاظ تئوری در رساله دکتری خود مورد تحلیل و بررسی قرار داد [۱۴]. در سال‌های اخیر پروفیسور Rahman در دانشگاه تورنتو و دانشگاه Newfoundland و پروفیسور Kataoka در دانشگاه توکیو^۳ بر روی تئوری عملکرد و طراحی موتورهای پسماند مطالعات زیادی انجام داده و همچنان تحقیق می‌کنند.

موتورهای پسماند اغلب دارای ساختاری معمول و استوانه‌ای هستند. در این موتورها استاتور مشابه استاتور موتورهای القایی بوده و سیم‌پیچی آن‌ها بسته به نوع موتور تکفاز یا چندفاز بوده و با توزیع سینوسی در استاتور قرار می‌گیرد. روتور موتورهای پسماند استوانه‌ای بصورت یک رینگ ساخته شده از مواد مغناطیسی با ویژگی‌های خاص می‌باشد.

^۱ - General Electric

^۲ - Yale University

^۳ - Tokyo Institute of Technology

موتورهای پسماند بر اساس دو مولفه پدیده هیستریزیس و جریان‌های گردابی عمل می‌کنند که این خود از تفاوت‌های این موتورها با موتورهای معمول می‌باشد. چراکه در موتورهای معمول این دو عامل از عوامل ایجاد تلفات در موتور هستند. آنچه به‌عنوان مولفه جریان گردابی شناخته می‌شود و باعث ایجاد گشتاور القایی می‌شود، مشابه ماشین‌های القایی معمول است و همانطور که اشاره شد گشتاور هیستریزیس متناسب با سطح حلقه هیستریزیس و ناشی از پدیده هیستریزیس است که این گشتاور از حالت سکون تا رسیدن به سرعت سنکرون تقریباً ثابت می‌ماند.

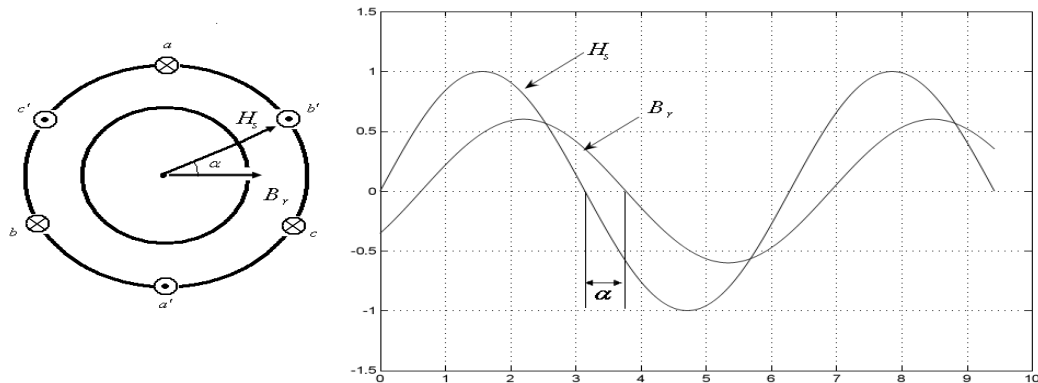
در حالتی که روتور در حالت سکون قرار دارد هر نقطه از روتور که در معرض میدان مغناطیسی ناشی از گردش میدان قرار می‌گیرد روی حلقه هیستریزیس حرکت می‌کند. به منظور ثبت تغییرات زمانی شدت میدان مغناطیسی مربوط به هر نقطه و نیز چگالی شار مغناطیسی متناظر با آن نقطه از حلقه هیستریزیس استفاده می‌شود. در صورت تغذیه متناوب استاتور و با فرض سینوسی کامل بودن شدت میدان مغناطیسی H ، تغییرات چگالی شار مغناطیسی B به علت غیرخطی بودن پدیده هیستریزیس سینوسی نبوده و همراه با هارمونیک خواهد بود. بنحوی که مولفه اصلی چگالی شار روتور دارای اختلاف فازی برابر با α با مولفه اصلی شدت میدان استاتور خواهد بود. همین اختلاف فاز α که در شکل (۱-۲) نیز نشان داده شده است نهایتاً باعث ایجاد گشتاور خواهد شد.

رابطه‌ی (۱-۲) گشتاور الکترومغناطیسی مربوطه را بیان می‌کند.

$$T_h = KB_s B_r \sin \alpha \quad (1-2)$$

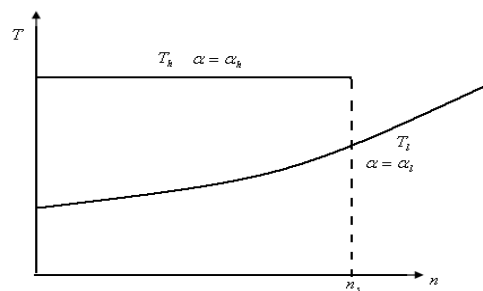
در ماشین‌های پسماند چندفازه تا پیش از زمان رسیدن سرعت روتور به سرعت میدان گردان استاتور ω_s ، تغییرات زمانی میدان گردان استاتور بر روی روتور حس می‌شود و چگالی شار در روتور با میدان استاتور همجوار دارای اختلاف فاز α می‌باشد. در این شرایط میدان گردان استاتور نسبت به روتور با سرعت کمتر از $s\omega_s$ حرکت می‌کند. در نتیجه گشتاور هیستریزیس تا وقتی که روتور با

سرعتی کمتر از سرعت میدان گردان استاتور بچرخد وجود دارد و میزان این گشتاور تا رسیدن به سرعت سنکرون ثابت خواهد بود.



شکل (۲-۱): مکانیزم تولید گشتاور در موتور پسماند [۲]

با در نظر گرفتن مشخصه بار فرضی بصورت T_l و مشخصه گشتاور هیستریزیس T_h بر حسب سرعت موتور که در شکل (۲-۲) نشان داده شده است، می توان گفت 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 قطبها بر روی روتور جابجا نمی شوند و موتور مشابه یک موتور مغناطیس دائم بعد از چند نوسان در سرعت ثابت و برابر با سرعت سنکرون به کار خود ادامه می دهد.



شکل (۲-۲): مشخصه گشتاور موتور پسماند [۲]

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

هیستریزیس روتور برابر است با:

$$P_{hr} = V_r E_h f_r \quad (2-2)$$

که در آن:

V_r : حجم ماده هیستریزیس روتور.

f : فرکانس میدان روتور.

و E_h سطح حلقه‌ی هیستریزیس است.

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 می‌شود یعنی:

$$P_{hs} = V_r E_h f_s \quad (3-2)$$

پس توان مکانیکی و گشتاور بترتیب برابر خواهند شد با:

$$P_{mech} = (1-s) V_r E_h f_s \quad (4-2)$$

$$T_h = \frac{P_{mech}}{\omega_r} = \frac{(1-s) E_h f_s V_r}{(1-s) \omega_s} = \frac{E_h V_r P}{4\pi} \quad (5-2)$$

۲-۳. ساختارهای موتور پسماند

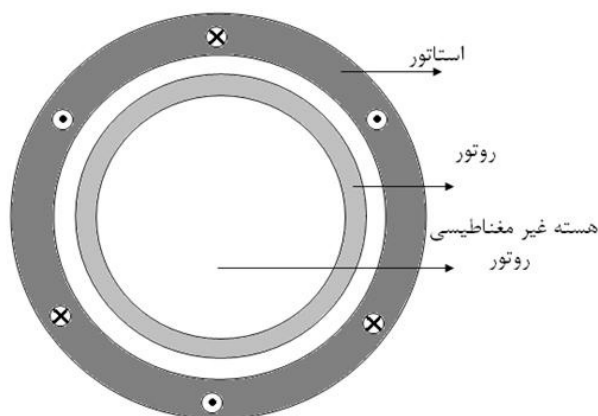
وجود کاربردهای متنوع و متفاوت برای موتور پسماند باعث شده است که این موتور در

ساختارهای متنوعی عرضه شود. هرکدام از این ساختارهای متفاوت موتور پسماند به لحاظ عملکرد و

ملاحظات طراحی ویژگی‌های خاص خود را دارند که آن‌ها را برای استفاده در کاربردهای خاص مناسب می‌کند. بر این اساس انواع موتورهای پسماند به صورت زیر معرفی می‌شوند.

۲-۳-۱. موتور پسماند استوانه‌ای شار محیطی^۱

موتور پسماند استوانه‌ای شار محیطی ساده‌ترین و معمول‌ترین ساختاری است که می‌توان برای موتور پسماند معرفی کرد. استاتور این موتور همانند استاتور موتورهای القائی معمول دارای سیم پیچی‌های تک‌فاز و یا چند فاز است و روتور از یک رینگ استوانه‌ای از ماده‌ی پسماند و هسته‌ی روتور از یک ماده‌ی غیر مغناطیسی ساخته می‌شود، بنابراین در چنین ساختاری مسیر شار در روتور بصورت محیطی خواهد بود. 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 هارمونیک‌های 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 جریان‌های گردابی ناشی از هارمونیک‌های شار نسبت به روتور یکپارچه کاهش خواهد یافت. شکل (۲-۳) یک موتور پسماند شار محیطی را نشان می‌دهد.

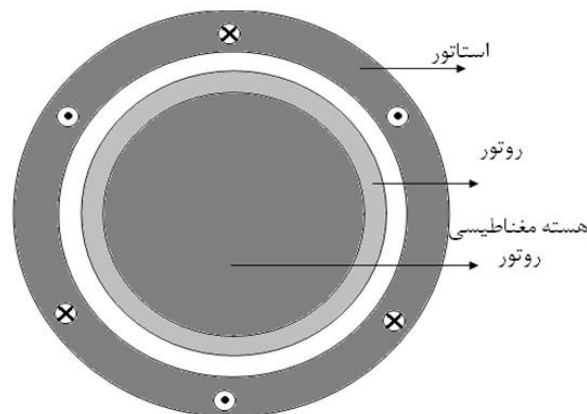


شکل (۲-۳): موتور استوانه‌ای شار محیطی [۲]

^۱ - Circumferential Flux Cylindrical Hysteresis Motor

۲-۳-۲. موتور پسماند استوانه‌ای شار شعاعی^۱

تنها تفاوت موتور پسماند استوانه‌ای شار شعاعی با موتور پسماند شار محیطی استفاده از یک ماده فرو مغناطیس نرم مثلاً فولاد سیلیکون دار برای ساخت روتور، است. این موضوع باعث ایجاد مسیر شار در روتور به صورت شعاعی می‌گردد. شکل (۴-۲) موتور استوانه‌ای شار شعاعی را نشان می‌دهد.



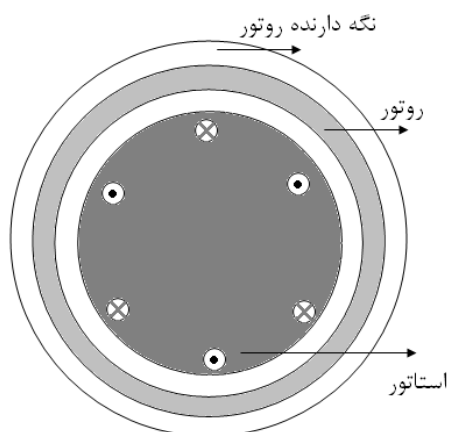
شکل (۴-۲): موتور استوانه‌ای شار شعاعی [۲]

۲-۳-۳. موتور پسماند استوانه‌ای معکوس^۲

در یک موتور پسماند استوانه‌ای معکوس، روتور روی قسمت بیرونی موتور قرار دارد. با طرح معکوس امکان ساخت موتورهای مینیاتوری با ممان اینرسی بالا وجود دارد که به طور گسترده‌ای در ژيروسکوپها استفاده می‌شوند. شکل (۵-۲) یک موتور پسماند استوانه‌ای معکوس را نشان می‌دهد. این موتورها نیز می‌توانند به صورت شار محیطی و یا شار شعاعی ساخته شوند.

^۱ - Radial Flux Cylindrical Hysteresis Motor

^۲ - Inverse Hysteresis Motor



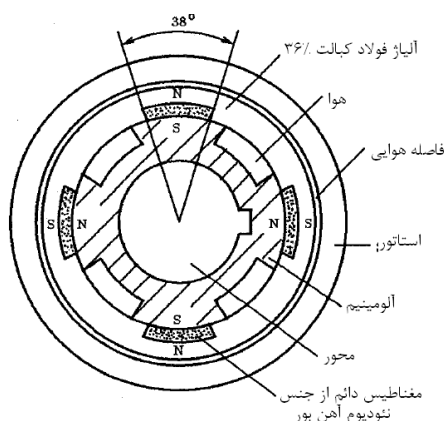
شکل (۲-۵): موتور پسماند استوانه‌ای معکوس [۲]

۲-۳-۴. موتور پسماند آهنربای دائم^۱

با توسعه تولید مواد مغناطیس دائم در دهه‌های اخیر، موتور آهنربای دائم به عنوان موتوری با راندمان بالا و گشتاور قابل ملاحظه نسبت به موتور القایی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از مهمترین مزایای این موتورها می‌توان به ساختار ساده و عدم وجود جاروبک اشاره نمود. یکی از معایب این موتورها این است که همانند موتورهای سنکرون دیگر گشتاور راه‌اندازی ندارند. از طرفی موتور پسماند به عنوان موتور سنکرونی که دارای گشتاور راه‌اندازی است دارای راندمان، ضریب توان و گشتاور کمتر نسبت به یک موتور مغناطیس دائم هم سایز خود می‌باشد. اولین موتور هیبرید آهنربای دائم و پسماند در سال ۱۹۹۳ توسط آقای رحمان^۲ ارائه گردید [۱۵]. در این موتور روتور از مواد پسماندی با شیارهایی برای تعبیه مواد مغناطیس دائم ساخته می‌شود. این موتور مزیت‌های بسیاری نسبت به موتور مغناطیس دائم معمول دارد. در موتور پسماند آهنربای دائم، در حالت آسنکرون گشتاور موتور شامل گشتاور القایی و گشتاور هیستریزس است. شکل (۲-۶) یک موتور پسماند آهنربای دائم را نشان می‌دهد.

^۱ - Permanent Magnet Hysteresis Motor

^۲ - Rahman



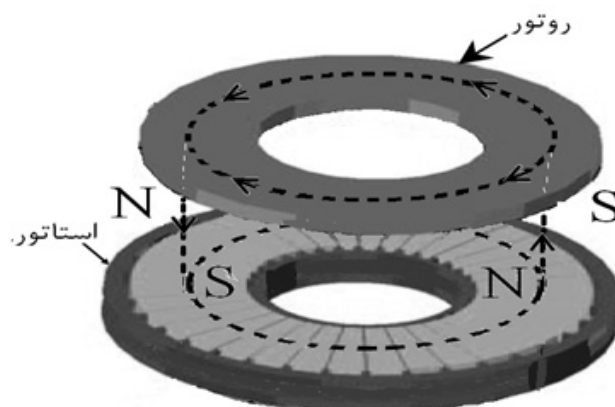
شکل (۲-۶): موتور پسماند آهنربای دائم [۱۶]

۲-۳-۵. موتور پسماند نوع تخت^۱

در حالی که به نظر می‌رسد اولین ماشین الکتریکی ساخته شده ماشین نوع تخت فاراده باشد، ماشین‌های نوع تخت به خاطر ویژگی‌های خاص و منحصر به فرد در دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. به علت کمتر بودن مواد هسته در ماشین‌های تخت، این ماشین‌ها دارای نسبت توان به وزن بالاتری در مقایسه با ماشین‌های استوانه‌ای هستند. یکی دیگر از مزایای ماشین‌های تخت، قابلیت تنظیم راحت فاصله هوایی است. با وجود نیروهای محوری متقابل بین استاتور و روتور که یکی از معایب این موتورها است، با توجه به مزایای یاد شده، این موتورها برای استفاده در کاربردهای خاص بسیار مناسب‌اند. امروزه ماشین‌های نوع تخت آهنربای دائم بسیار شناخته شده هستند. امکان تغییر دادن مسیر شار در موتورهای نوع تخت باعث شده است که موتورهای آهنربای دائم نوع تخت در ساختارهای متنوع عرضه شوند [۱۷]. اما موتور پسماند نوع تخت بسیار کم مورد بررسی قرار گرفته‌است. در ساده‌ترین حالت موتور پسماند نوع تخت دارای استاتوری به صورت تخت است و روتور آن یک دیسک یکپارچه ساخته شده از ماده پسماند می‌باشد. در صورتی که روی روتور یک نگه دارنده از جنس فولاد سیلیکون دار یا هر ماده فرو مغناطیس نرم قرار داشته باشد شار عبوری

^۱ - Flat Type Hysteresis Motor

از روتور کاملاً محوری است و در این حالت این موتور، موتور پسماند نوع تخت شار محوری^۱ نامیده می‌شود و در صورتی که نگه‌دارنده 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^۲ می‌نامند. شکل (۷-۲) موتور پسماند نوع تخت شار محیطی و نحوه تشکیل قطب‌ها را در آن نشان می‌دهد.



شکل (۷-۲): موتور پسماند تخت شار محیطی و نحوه تشکیل قطب‌ها در آن [۲]

۲-۳-۵-۱. موتور پسماند نوع تخت دو روتوره بدون هسته^۳

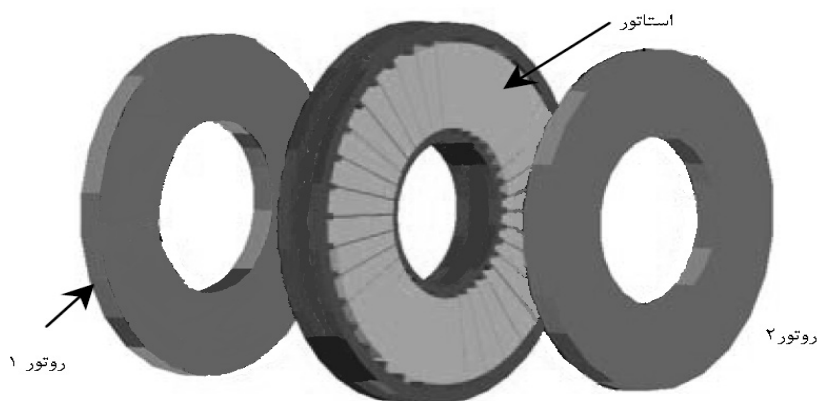
در این اینجا، موتور پسماند نوع تخت دو روتوره بدون هسته که ساختار و طرحی جدید برای موتور پسماند است، ارائه می‌شود. این ساختار برای اولین بار توسط دارابی و همکاران در سال ۲۰۱۰ در دانشگاه صنعتی شاهرود ارائه شد [۱۸]. با این ساختار، مزایا، برتری‌ها و خصوصیات منحصر به فرد این موتورها افزایش می‌یابد و امکان بکارگیری آن‌ها در کاربردهای خاص با راندمان بالاتر فراهم می‌شود. در این طرح، ساختار ماشین با همه موتورهای معمول تفاوت اساسی دارد. بویژه ساختارهای روتور و استاتور موتور متفاوت از ساختارهای نوع استوانه‌ای معمول و شناخته شده می‌باشند. روتور و

^۱ - Axial Flux Disc Type Hysteresis Motor

^۲ - Circumferential Flux Disc Type Hysteresis Motor

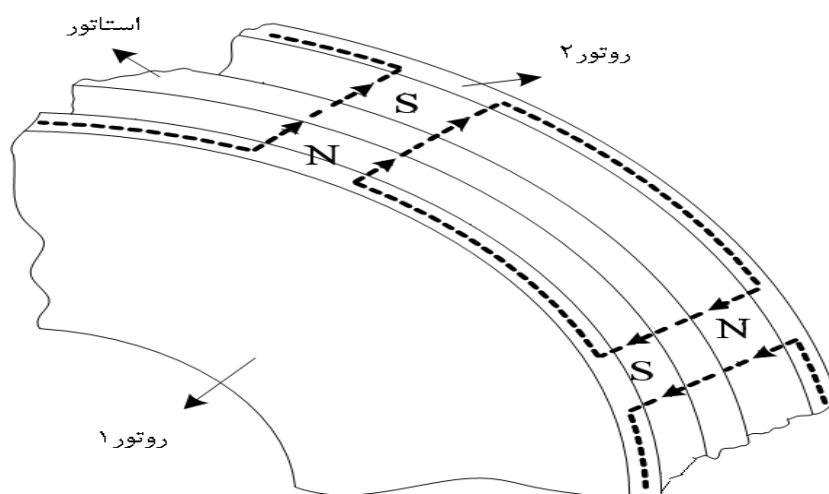
^۳ - Core-less Dual Rotor Disc Type Hysteresis Motor

استاتور طرح جدید به صورت مسطح هستند. بعلاوه دو روتور در طرفین استاتور گشتاور الکترومغناطیسی لازم را تامین می‌کنند. از مهمترین و جذابترین ویژگی‌های این موتور جدید، هسته غیر آهنی آن است که این خود می‌تواند مزیت‌های زیادی را برای این موتور در برداشته باشد. ساختار جدید همانطور که گفته شد با ساختارهای معمول متفاوت است. مشخصه‌ی عمده‌ی این موتور این است که استاتور تخت و دو روتور به صورت دیسک در دو طرف استاتور قرار گرفته‌اند. سیم‌پیچی‌های استاتور رویهم و در یک ماده غیر مغناطیسی به صورت سینوسی توزیع می‌شود. شکل (۸-۲) ساختار این موتور را به صورت سه بعدی نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است دو روتور در دو طرف استاتور قرار دارند که از یک ماده با مشخصه هیستریزیس مناسب ساخته شده‌اند.



شکل (۸-۲): ساختار موتور پسماند نوع تخت دو روتوره بدون هسته [۱۸]

مسیر شار در این موتور با ساختارهای معمول این تفاوت را دارد که شار بصورت محوری استاتور و فاصله‌های هوایی را طی کرده و به صورت محیطی روتورها را دور می‌زند. مسیر شار در این موتور در شکل (۹-۲) نشان داده شده است. همانگونه که در شکل (۹-۲) دیده می‌شود مسیر شار در استاتور ماشین بدون هسته به گونه‌ای است که به لحاظ تئوریک نیازی به یوغ استاتور نیست، به این معنی که چون شار مسیر خود را در استاتور به صورت محوری می‌بندد، می‌توان حتی هسته آهنی در استاتور را کاملاً حذف کرد. بدیهی



شکل (۲-۹): مسیر شار در موتور پسماند تخت دو روتوره بدون هسته [۲]

است این کار منجر به فاصله‌ی هوایی بزرگتر و بالا رفتن جریان مغناطیس‌کنندگی می‌شود ولی عدم وجود هسته مزایایی را برای ساختار جدید نسبت به ساختارهای قبلی بوجود می‌آورد. عدم وجود هسته باعث قابلیت‌های بیشتر از جمله حذف تلفات آهن استاتور در ساختار می‌گردد که معایب آن را برای کاربردهای خاص پوشش می‌دهد. باید توجه داشت که در این ساختار به علت عدم وجود یوغ استاتور نمی‌توان از سیم‌پیچی تروئیدی استفاده کرد بلکه در این طرح از سیم‌پیچی رویهم استفاده شده است. از این به بعد برای اختصار موتور پسماند نوع تخت دو روتوره را موتور CDDHM می‌نامیم.

به طور کلی مزایای زیر را می‌توان برای موتور CDDHM متصور شد [۲]:

- (۱) به علت وجود دو روتور، گشتاور الکترومغناطیسی از هرکدام از روتورها به طور مجزا به محور موتور اعمال می‌شود و این امر باعث توزیع نیروی محرک در طول محور موتور، و متعاقباً پایداری مکانیکی بهتر این نوع موتور می‌شود.
- (۲) عدم وجود هسته مغناطیسی که خود مزیت‌های زیر را ایجاد می‌کند:

- عدم وجود تلفات هسته اعم از تلفات جریان گردابی و تلفات هیستریزیس هسته، باعث بالاتر رفتن بازده و چگالی توان به وزن در این موتورها می‌شود.
- عدم نیاز به هسته فولادی در استاتور امکان استفاده از انواع مواد غیر مغناطیسی ارزان‌تر بجای هسته آهنی معمول مورد استفاده در ماشین‌های متداول را بوجود می‌آورد.
- در کاربردهای سرعت بالا به منبع تغذیه‌ی 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.
- سبک‌تر 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 موتورها می‌تواند باشد.
- استاتور هدایت گرمایی بهتری نسبت به موتورهای هسته دار دارد.
- به علت نبودن تلفات هسته در این موتورها، ماشین کمتر گرم می‌شود و گرمای ایجاد شده در موتور فقط ناشی از تلفات مسی است.
- در دماهای بالا خواص مغناطیسی هسته تغییر می‌کند و باعث عوض شدن مشخصه مغناطیسی و الکتریکی موتورها می‌شود. به علت عدم وجود هسته مغناطیسی در موتور جدید مشخصه‌های این ماشین در دماهای بالا بطور قطع کمتر تغییر می‌کند.

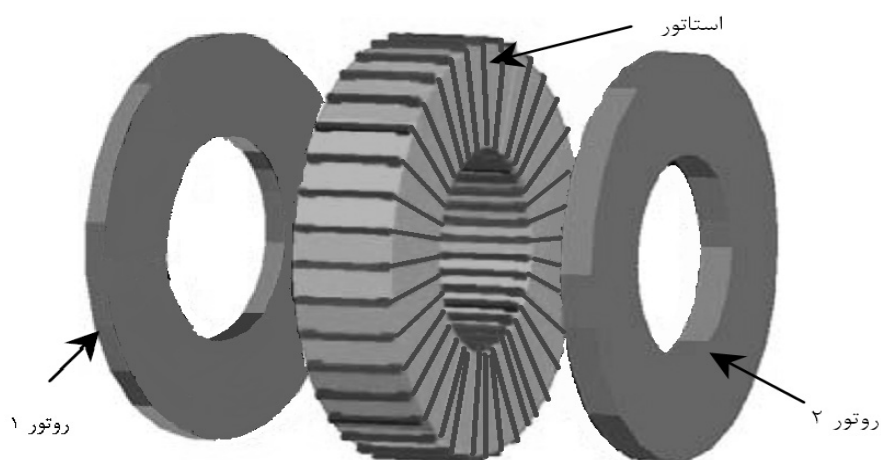
۲-۳-۵-۲. موتور پسماند نوع تخت دو روتوره بدون شیار^۱

در این بخش، موتور پسماند نوع تخت دو روتوره بدون شیار که ساختار و طرحی جدید برای موتور پسماند است، ارائه می‌شود. این ساختار برای اولین بار توسط دارابی و همکاران در سال ۲۰۰۹ در دانشگاه صنعتی شاهرود ارائه شد [19]. ساخت ماشین با این ساختار جدید در مقایسه با دیگر ساختارهای معرفی شده بسیار ساده و کم هزینه می‌باشد. علاوه بر این به دلیل حداکثر استفاده از فضای سیم پیچی‌ها، این موتورها می‌توانند دارای راندمان بسیار بالاتری باشند. نحوه‌ی سیم‌پیچی و ساختار منحصر به فرد آن باعث کاهش قابل توجه طول سیم پیچی نسبت به انواع دیگر سیم‌پیچی‌ها می‌شود که این خود منجر به کم شدن مقاومت سیم‌پیچی استاتور و کاهش تلفات اهمی می‌گردد. همچنین پراکندگی شار کله سیم‌ها در این موتورها بسیار کمتر از دیگر ساختارها می‌باشد. بدین-ترتیب می‌توان با استفاده از این ساختار، موتورهای با راندمان و چگالی توان به وزن بالاتر را ساخت. در این ساختار جدید، استاتور از ورق یکپارچه فولاد سیلیکون روی هم پیچیده شده تشکیل شده است. این ورق رول شده را می‌توان به سهولت و با ابزارهای ساده بدون نیاز به برش‌های خاص که برای ساخت موتورهای الکتریکی معمولاً با هزینه‌های سنگین نیاز است به عنوان استاتور بکار گرفت. شاید مهمترین و قابل توجه‌ترین مشخصه این موتورها امکان استفاده از سیم‌پیچی‌های تیروئیدی قرار گرفته روی هسته‌های استاتور باشد. بنابراین علاوه بر این که ساخت استاتور این ماشین‌ها ساده‌تر و کم هزینه‌تر می‌باشد، پروسه سیم‌پیچی نیز به دلیل هسته استاتور بدون شیار بسیار ساده‌تر می‌شود. همچنین عدم وجود شیارها تبادل گرمایی بهتری را برای سیم‌پیچ‌ها فراهم می‌کند و این نیز از جمله مزیت‌های منحصر به فرد ساختار جدید است. از دیگر ویژگی‌های بسیار شاخص این چنین ماشین-هایی می‌توان به این نکته اشاره کرد که این ماشین‌ها را می‌توان و حتی بسیار بهتر خواهد بود تا در چند لایه با تعداد روتورها و استاتورهای متعدد ساخت. ماشین ارائه شده در اینجا نیز دارای یک

¹ - Slot-lees Dual Rotor Disc Hysteresis Motor

استاتور و دو روتور می‌باشد، حال آنکه ساختارهای چند لایه‌ای در ماشین‌های استوانه‌ای به علت عدم امکان ساخت آسان، معمول نیست.

همچنین وجود دو دیسک در روتور باعث می‌شود که موتور جدید به لحاظ مکانیکی پایداری مناسب‌تری داشته باشد. شکل (۱۰-۲) نمای سه بعدی استاتور و روتور این موتور را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است دو دیسک روتور می‌توانند روی یاتاقان‌های مشترک و یا غیر مشترک سوار شوند و با هم و یا مستقل از هم گردش کنند.

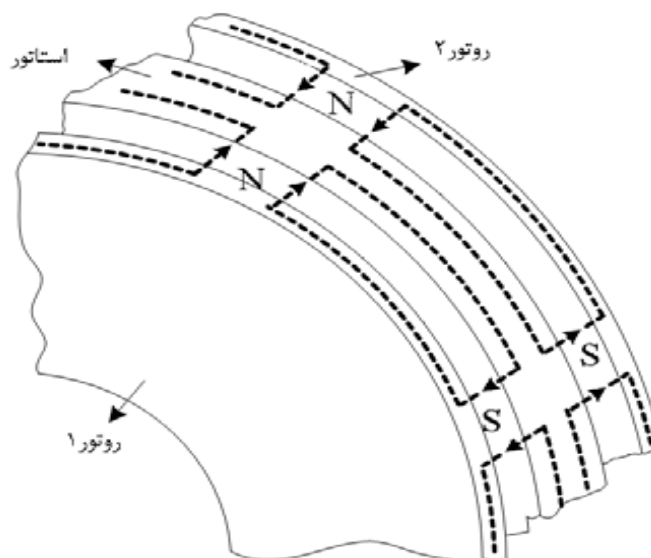


شکل (۱۰-۲): ساختار موتور پسماند نوع تخت دو روتوره بدون شیار [۱۹]

سیم‌پیچی‌های استاتور موتور پسماند تخت دو روتوره بدون شیار بصورت حلقوی با اتصالات پشت به پشت هستند. این نوع سیم‌پیچی این امکان را بوجود می‌آورد که شار محوری فاصله هوایی مسیر خود را از داخل استاتور و روتورها به صورت محیطی ببندد. شکل (۱۱-۲) به خوبی این موضوع را نشان می‌دهد.

چون مسیر شار در این موتور بنحوی است که شار دو روتور در استاتور با هم جمع می‌شوند وجود یوغ در استاتور این توپولوژی الزامی است. به هر حال ساختار این موتور به گونه‌ای است که می‌توان استاتور را بدون شیار ساخت. سیم‌پیچی‌ها به صورت حلقوی پیچیده می‌شوند و تمام سطح استاتور را می‌پوشانند. این گونه سیم‌پیچی باعث کوتاه شدن کله سیم‌ها و صرفه جویی در میزان سیم

مصرفی و کاهش قابل توجه تلفات مس و بهبود راندمان می‌شود. کاهش میزان مس استفاده شده در این موتور و همچنین راندمان بالاتر به صورت چشمگیری نسبت توان به وزن موتور را افزایش می‌دهد.



شکل (۲-۱۱): مسیر شار در موتور پسماند نوع تخت دو روتوره بدون شیار [۲]

در واقع بدون شیار بودن استاتور در این موتور یکی از ویژگی‌های ممتاز این موتور محسوب می‌شود. سیم‌پیچی‌ها در این ساختار درون شیار قرار ندارند و روی سطح استاتور قرار می‌گیرند. از این رو تبادل گرمایی سیم‌پیچی‌ها بهتر انجام می‌گیرد بطوریکه می‌توان چگالی جریان هادی‌ها را در این موتور نسبت به موتور شیاردار به میزان قابل توجهی بالاتر انتخاب کرد و متعاقباً می‌توان نسبت توان به وزن بالاتری در مقایسه با ساختار شیاردار به دست آورد. با توجه به عدم وجود شیار در این موتور، راکتانس پراکندگی فاقد مولفه پراکندگی شیار می‌باشد. اگر بخواهیم برای ماشین بدون شیار معایبی را مطرح کنیم شاید بتوان به فاصله هوایی نسبتاً بزرگ و بنابراین راکتانس مغناطیس کننده و ضریب توان پائین آن اشاره کرد. البته این عیب موتور را می‌توان با دقت در ساخت و در حد امکان کاهش فاصله هوایی و همچنین استفاده از جبران کننده خازنی تا حدودی اصلاح کرد. به هر حال با وجود این عیب که کم و بیش در ماشین‌های تخت وجود دارد، مزایای زیاد این موتور معایب آن را در کاربردهای خاص پوشش می‌دهد. از طرفی یکی از معایب عمده موتورهای شیار دار وجود هارمونیک-

های ناشی از شیار در میدان‌های مغناطیسی فاصله هوایی است که منجر به گشتاور ضربانی، تلفات فرکانس بالا در روتور و نویز صوتی می‌شود. بنابراین عدم وجود شیار در موتور معرفی شده معضلات فوق را بطور زیاد مرتفع می‌کند. به طور کلی مزایای زیر را برای موتور پسماند تخت دو روتوره بدون شیار می‌توان متصور شد.

(۱) کله سیم‌ها بطور قابل ملاحظه‌ای در این موتور کوتاه شده‌اند 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 می‌شود.
- کاهش راکتانس پراکندگی ناشی از کله‌سیم‌ها.

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

- ساخت استاتور موتورهای تخت به دلیل مشکلات ساخت مربوط به شیارها بسیار مشکل و هزینه بر است. توجه شود که امکان پانچ ورق‌های رول شده وجود ندارد. حال آنکه استاتور موتور جدید فاقد شیار و مشکلات ساخت آن می‌باشد. در حقیقت استاتور بسیار ساده یک ورق رول شده می‌باشد و بدین ترتیب هزینه ساخت آن در مقایسه با ساخت نوع شیاردار بسیار ناچیز است.
- عدم وجود شیار باعث می‌شود که سیم‌پیچی‌ها بر روی سطح استاتور قرار گیرند که این موضوع تبادل حرارتی را برای سیم‌پیچی‌ها آسان می‌سازد. تبادل حرارتی مناسب امکان استفاده از سیم با چگالی جریان بالاتر را بوجود می‌آورد که این موضوع امکان صرفه‌جویی بیشتری در مس را فراهم می‌کند.

○ با ساختار استاتور و سیم‌پیچی بکار رفته در این ماشین موضوع هارمونیک‌های شیارها تقریباً منتفی است. بنابراین تلفات فرکانس بالا در روتور، گشتاور ضربانی و نویز صوتی در این ماشین‌ها کاهش می‌یابد.

در این ماشین دو روتور در طرفین استاتور قرار می‌گیرند و بدین ترتیب ضمن استفاده ایده‌آل از فضا و نیروی محرکه مغناطیسی استاتور، تعادل مناسب سیستم گردان فراهم می‌گردد. ضمن اینکه این ماشین‌ها را با تعداد لایه‌های بیشتر نیز می‌توان ساخت.

۲-۴. ویژگی‌های خاص و کاربردهای موتور پسماند

همانگونه که در شکل (۲-۲) و رابطه (۲-۵) نشان داده شده است موتور پسماند تا لحظه‌ی سرعت سنکرون گشتاور نسبتاً ثابتی دارد. اگر جریان‌های گردابی ایجاد شده در روتور موتور پسماند را هم در نظر بگیریم موتور پسماند دارای گشتاور القایی نیز خواهد بود. بنابراین در موتور پسماند علاوه بر گشتاور پسماند، گشتاور القایی نیز در هنگام راه‌اندازی وجود دارد که باعث می‌شود گشتاور راه-اندازی نسبتاً خوبی بوجود آید (بنابراین موتور پسماند هر باری را که بتواند به حرکت در آورد به سرعت سنکرون می‌رساند [۱۰]). نحوه شکل‌گیری قطب‌ها روی روتور موتور پسماند به‌گونه‌ای است که در سرعت سنکرون مشخصه گشتاور بسیار ثابت و یکنواخت است و موتور بسیار نرم و بدون نویز و سر و صدا کار می‌کند. در لحظه‌ای که روتور موتور پسماند به سرعت سنکرون می‌رسد شار روتور نوسان می‌کند و چگالی شار پسماند ماده پسماند روی حلقه خاصی تثبیت می‌شود. از آنجا که در شرایط سنکرونیسم گشتاور جریان القایی وجود ندارد موتور مثل یک موتور آهن ربای دائم^۱ عمل می‌کند. با این وجود وقتی که اغتشاش ناگهانی اتفاق می‌افتد، قطب‌های منتجه روی روتور حرکت خواهند کرد. بنابراین روتور حول سرعت سنکرون، در فرکانس کم (دو تا پنج هرتز) نوسان می‌کند

^۱ - Permanent Magnet Motor

بطوریکه موتور پسماند نقطه سنکرون مشخصی ندارد [۲۰] و موقعیت روتور نسبت به میدان مغناطیسی گردان تصادفی است. این موضوع خطای شناور را در ژيروسکوپها افزایش می‌دهد [۲۲،۲۱]. این موتورها دارای خصوصیات ذاتی ویژه‌ای هستند که باعث شده مطالعات بر روی آن‌ها و نیز کاربردهایشان افزایش یابد. از مهمترین این ویژگی‌ها می‌توان به ایجادگشتاور ثابت، دارا بودن مشخصه‌ی گشتاور-سرعت مسطح، وجود جریان راه‌اندازی ثابت و پایین (۱.۲ تا ۱.۵ برابر جریان بار کامل)، سطح نویز پایین و ... اشاره نمود. در مقابل این مزایا، موتورهای پسماند دارای معایبی همچون بازده و ضریب توان پایین می‌باشند [۲۳،۲۴]. به دلیل کاربردهای نظامی و صنایع ویژه‌ی این موتورها گزارشات کمی در مورد این موتورها در دسترس است و بسیاری از پیشرفت‌ها به صورت مقالات علمی منتشر نمی‌شوند. در ادامه برخی از کاربردهای موتورهای هیستریزیس آورده شده است.

۲-۴-۱. ژيروسکوپ^۱

ژيروسکوپها از جمله تجهیزات مورد استفاده در سیستم‌های ناوبری هواپیماها، چرخبال‌ها، ماهواره‌ها و موشک‌های دوربرد هستند که نقش مهمی در دقت و عملکرد خوب سیستم‌های 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 می‌باشند که قابلیت عملکرد در سرعت‌های 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 20000 دور در دقیقه را داشته باشد. از این رو موتور پسماند به طور چشمگیری در ژيروسکوپها استفاده می‌شود [۲۲،۶].

¹ - Gyroscope

۲-۴-۲. سانتریفیوژ^۱

از جدا کننده‌های ملکولی یا سانتریفیوژهای گازی سرعت بالا در صنایع غنی سازی اورانیم برای جداسازی ایزوتوپ‌های اورانیم U-238 و U-235 استفاده می‌کنند. هنگامی که گاز هگزا فلوراید اورانیم وارد محفظه سانتریفیوژ می‌شود به دلیل سرعت بسیار بالای سانتریفیوژ، مولکول‌های سنگین‌تر یعنی مولکول‌های ایزوتوپ U-238 از مولکول‌های ایزوتوپ U-235 جداسازی می‌شوند. البته این فرایند پس از عبور گاز هگزا فلوراید اورانیم از تعداد زیادی سانتریفیوژ که به صورت سری قرار دارند در مقیاس صنعتی انجام می‌شود. این سانتریفیوژها نیاز به موتوری به عنوان محرک دارند که قابلیت عملکرد خوب در سرعت 60000 تا 100000 دور بر دقیقه را داشته باشد. همچنین به علت نزدیکی جرم ملکولی ایزوتوپ‌های اورانیم، گشتاور موتور باید بسیار یکنواخت و صاف باشد. زیرا هر گونه نوسان یا حضور گشتاور ضربانی باعث می‌شود جداسازی به خوبی انجام نشود. موتورهای پسماند به طور وسیعی در سانتریفیوژهای گازی استفاده می‌شوند [۲۵].

۲-۴-۳. ضبط کننده‌های ویدئویی

موتورهای پسماند به علت بدون سر و صدا بودن و همچنین عملکرد خیلی نرم، انتخاب مناسبی برای استفاده در ضبط کننده‌های ویدئویی و به طور کلی در سیستم‌های آکوستیک^۲ می‌باشند.

۲-۴-۴. شتاب دهنده توربوشارژرها

توربوشارژرها در ماشین‌های دیزلی از دیرباز برای افزایش راندمان سوخت و کم کردن آلاینده‌های سوختی، مورد استفاده قرار می‌گیرند. این وسایل دارای یک مکانیزم خاص برای بهینه‌سازی و

^۱ - Centrifuge

^۲ - Acoustic

کنترل فشار شارژ کمپرسور می‌باشند. ماشین‌های الکتریکی مختلفی تاکنون به عنوان شتاب‌دهنده توربوشارژرهای وسایل نقلیه دیزلی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ماشین مورد استفاده در توربوشارژرها باید قابلیت عملکرد مناسب در سرعت 10000 تا 120000 دور در دقیقه و دمای 200 درجه سانتیگراد را داشته باشد. موتور پسماند به دلیل ساختار یک پارچه و مستحکم و تغییرات کم مشخصه کاری در دماهای بالا، می‌تواند انتخاب مناسبی برای استفاده در شتاب‌دهنده توربوشارژرها باشد [۲۶].

فصل سوم

مدل سازی

موتور پسماند تخت دور و توره

بدون هسته

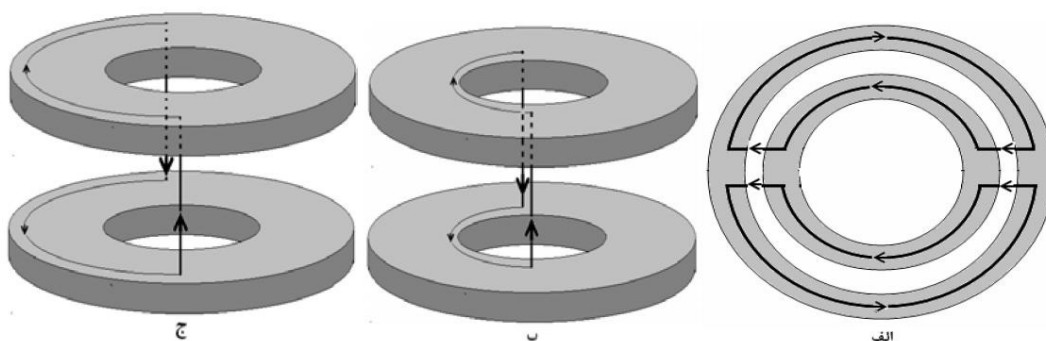
۳-۱. مقدمه

همانطور که در فصل قبل بررسی شد، موتور پسماند نوع تخت دو روتوره از جمله ساختارهای جدید موتورهای پسماند است. در این فصل به بررسی دقیق تر و جامع تر این موتور پرداخته و با استفاده از تحلیل میدان الکترومغناطیسی، مدار معادل حالت دائمی را برای این نوع موتور بدست می آوریم.

مدل ارائه شده در این فصل بر پارامترهای طراحی استوار بوده و از دقت کافی به منظور طراحی برخوردار است.

۳-۲. تحلیل عملکرد موتور پسماند تخت دو روتوره بدون هسته

در موتورهای استوانه‌ای از آنجاییکه با صرف نظر نمودن از اثر لبه، طول مسیر مغناطیسی ثابت و به موقعیت محوری استاتور بستگی ندارد، چگالی شار فاصله‌ی هوایی در امتداد محوری آن کاملاً یکنواخت خواهد بود. در یک موتور نوع تخت با توجه به شکل (۳-۱) طول مسیر مغناطیسی در امتداد شعاع تغییر می‌کند که در نتیجه آن چگالی شار فاصله‌ی هوایی در امتداد شعاع یکنواخت نخواهد بود. بنابراین باید در موتورهای نوع تخت این موضوع لحاظ گردد.



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

تخت (شعاع خارجی) [۲]

۳-۲-۱. فرضیات مدلسازی

به منظور تحلیل این موتور فرضیاتی در نظر گرفته شده است که عبارتند از:

الف) موتور در حالت کاری سنکرون قرار گرفته و دارای بیشترین باری است که آن را از حالت سنکرون خارج نسازد.

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 فازهاست. ϕ زاویه الکتریکی استاتور است بطوریکه $\phi = p\theta$ که در آن θ زاویه مکانیکی و p تعداد زوج قطبهاست. Z حداکثر چگالی هادی است که از رابطه زیر بدست می آید.

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

که در آن ضریب سیم پیچی و تعداد دور سیم پیچی بر فاز است و داریم:

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

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

$$q = z/2pm \quad (4-3)$$

زاویه‌ی الکتریکی شیار است و از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\gamma = 2\pi p/z \quad (5-3)$$

که در آن z تعداد کل شیارهای استاتور است.

اگر تعداد شیار بر قطب را به صورت زیر تعریف کنیم:

$$y_p = z/2p \quad (6-3)$$

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

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

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

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

در صورتی که موتور سه فاز باشد، سیم‌پیچی‌ها دارای جریان سه فاز متعادل سینوسی به

صورت زیر خواهند بود:

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

و نیروی محرکه‌ی مغناطیسی MMF فاصله‌ی هوایی برابر است با:

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

ج) در موتور هیستریز نوع تخت دو روتوره بدون هسته (CDDHM) به علت عدم وجود هسته، فاصله‌ی هوایی به اندازه‌ی کافی بزرگ خواهد بود. بنابراین هارمونیک‌های فضایی قابل صرف نظر کردن خواهد بود.

د) در مراجع [۱۰،۱۱] مشخصه هیستریز با تقریب متوازی الاضلاع و در مراجع [۲۷،۲۸] مشخصه‌ی هیستریز به صورت بیضی‌های متحد‌المرکز با پرمابیلیته ماده هیستریز μ ثابت و α زاویه تأخیر هیستریز ثابت در نظر گرفته شده است. در نظر گرفتن این تقریب‌ها از دقت مدل می‌کاهد. در این پایان‌نامه مشخصه هیستریز به صورت بیضی‌های متحد‌المرکز با μ و α متغیر و مرتبط با سطح حلقه‌های پسماند در نظر گرفته شده‌اند که این خود منجر به مدل‌سازی واقعی‌تر ماشین می‌شود. اگر مشخصه هیستریز و مؤلفه اصلی چگالی شار را در ماده هیستریز روتور در نظر بگیریم داریم:

$$B = B_m \cos(\omega t - \phi - \phi_0) \quad (11-3)$$

$$H = H_m \cos(\omega t - \phi - \phi_0 + \alpha) \quad (12-3)$$

که در آن:

$$H_m = \frac{B_m}{\mu} \quad (13-3)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{E_h}{\pi H_m B_m} \right) \quad (14-3)$$

μ ، α و E_h به ترتیب پرمابلیته‌ی ماده‌ی هیستریزیس، زاویه‌ی تاخیر هیستریزیس و سطح حلقه‌ی هیستریزیس می‌باشند.

ه) طول شعاعی موثر استاتور برابر با تفاضل شعاع خارجی روتور از شعاع داخلی آن است.

و) با این فرض که ضخامت دیسک روتورها به اندازه‌ی کافی کم است، مولفه‌ی اصلی چگالی شار در دیسک روتورها فقط شامل مولفه‌ی محیطی است.

۲-۲-۳. توزیع چگالی شار

با توجه به شکل (۲-۳) و بکارگیری قانون مداری آمپر در مسیر بسته‌ای شامل دو روتور موتور

CDDHM داریم:

$$H_g(\phi)(g_1+g_2)+(H_{d1}(\phi)+H_{d2}(\phi))r\frac{d\phi}{p}-(H_g(\phi)+dH_g(\phi))(g_1+g_2)=Fd\phi \quad (۱۵-۳)$$

$$F=\frac{r}{p}(H_{d1}(\phi)+H_{d2}(\phi))-(g_1+g_2)\frac{dH_g(\phi)}{d\phi} \quad (۱۶-۳)$$

در رابطه‌ی (۱۵-۳) داریم:

r : فاصله‌ی شعاعی یک نقطه‌ی دلخواه دیسک روتور از مرکز.

t_{r1} : ضخامت محوری روتور یک.

t_{r2} : ضخامت محوری روتور دو.

g_1 : طول فاصله‌ی هوایی از سطح مرکزی استاتور تا دیسک یک.

g_2 : طول فاصله‌ی هوایی از سطح مرکزی استاتور تا دیسک دو.

$H_g(\theta)$ شدت میدان مغناطیسی در فاصله ی هوایی.

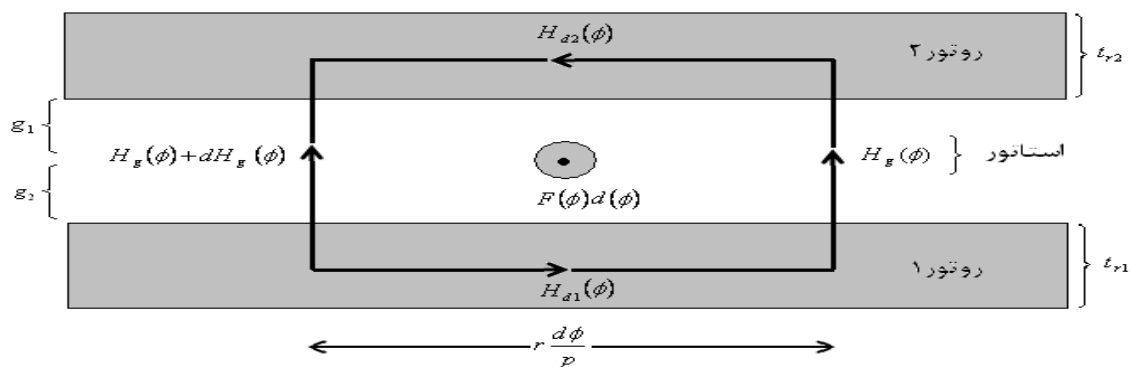
$H_{d1}(\theta)$ شدت میدان مغناطیسی در دیسک یک.

$H_{d2}(\theta)$ شدت میدان مغناطیسی در دیسک دو.

همچنین داریم:

$$H_{d1}(\phi) = \frac{B_{m1}}{\mu_1} \cos(\omega t - \phi - \phi_0 + \alpha_1) \quad (17-3)$$

$$H_{d2}(\phi) = \frac{B_{m2}}{\mu_2} \cos(\omega t - \phi - \phi_0 + \alpha_2) \quad (18-3)$$



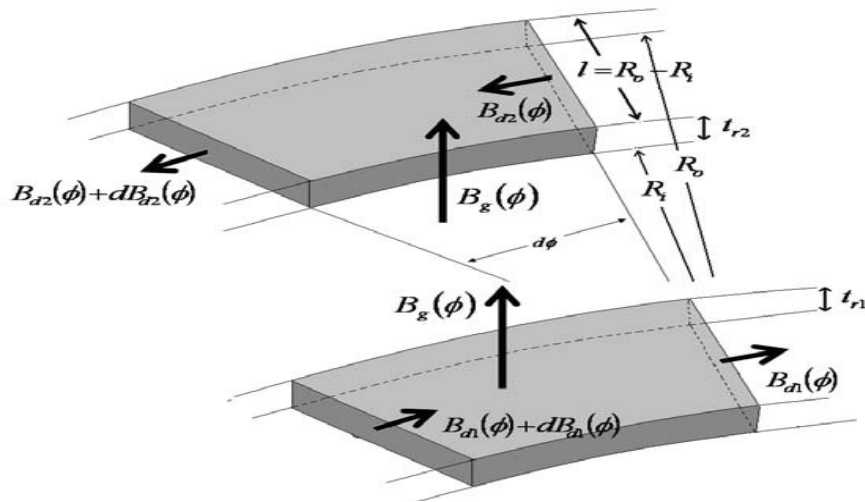
شکل (۲-۳): مسیر بسته مغناطیسی شامل هر دو روتور در موتور CDDHM [۲]

از آنجاییکه استاتور این نوع موتور فاقد هسته ی آهنی است، فضایی که توسط سیم پیچی

استاتور اشغال شده است در واقع بخشی از فاصله هوایی محسوب می شود.

در ادامه و با توجه به شکل (۳-۳) و نیز بکارگیری اصل پیوستگی شار، چگالی شار در فاصله-

ی هوایی به صورت زیر بدست خواهد آمد.



شکل (۳-۳): مسیر شار در جزء دیفرانسیلی $d\theta$ فاصله هوایی و روتور موتور CDDHM [۲]

در دیسک ۱ داریم:

$$t_{r1} \int_{R_i}^{R_o} (B_{d1}(\phi) + dB_{d1}(\phi)) dr - t_{r1} \int_{R_i}^{R_o} B_{d1}(\phi) dr = \int_{R_i}^{R_o} B_g(\phi) r \frac{d\phi}{p} dr \quad (۱۹-۳)$$

$$B_g(\phi) = \frac{pt_{r1} dB_{d1}(\phi)}{rd\phi}$$

همچنین برای دیسک ۲ داریم:

$$t_{r2} \int_{R_i}^{R_o} (B_{d2}(\phi) + dB_{d2}(\phi)) dr - t_{r2} \int_{R_i}^{R_o} B_{d2}(\phi) dr = \int_{R_i}^{R_o} B_g(\phi) r \frac{d\phi}{p} dr \quad (۲۰-۳)$$

$$B_g(\phi) = \frac{pt_{r2} dB_{d2}(\phi)}{rd\phi}$$

$B_g(\theta)$ در روابط (۱۹-۳) و (۲۰-۳) توزیع چگالی شار فاصله‌ی هوایی است بطوریکه:

$$B_{d1}(\phi) = B_{m1} \cos(\omega t - \phi - \phi_0) \quad (۲۱-۳)$$

$$B_{d2}(\phi) = B_{m2} \cos(\omega t - \phi - \phi_0) \quad (22-3)$$

که B_{m1} و B_{m2} به ترتیب چگالی شار در روتور یک و چگالی شار در روتور دو می باشند.

با استفاده از روابط (۱۹-۳) و (۲۰-۳) خواهیم داشت:

$$\frac{dB_{d2}(\phi)}{d\phi} = \frac{t_{r1}}{t_{r2}} \times \frac{dB_{d1}(\phi)}{d\phi} \quad (23-3)$$

$$B_{m2} = \frac{t_{r1}}{t_{r2}} B_{m1} \quad (24-3)$$

اکنون با جایگذاری رابطه‌ی (۲۱-۳) در رابطه‌ی (۱۹-۳) و استفاده از نتیجه‌ی آن و رابطه‌های

(۱۷-۳) و (۱۸-۳) در رابطه‌ی (۱۶-۳) و نیز با توجه به رابطه‌ی (۲۴-۳) داریم:

$$\begin{aligned} & \frac{3}{2} \sqrt{2} IZ \cos(\omega t - \phi) \\ & = \frac{r}{p} \left(\frac{B_{m1}}{\mu_1} \cos(\omega t - \phi - \phi_0 + \alpha_1) + \frac{t_{r1} B_{m1}}{t_{r2} \mu_2} \cos(\omega t - \phi - \phi_0 + \alpha_2) \right) \quad (25-3) \\ & + \frac{(g_1 + g_2) p t_{r1}}{\mu_0 r} B_{m1} \cos(\omega t - \phi - \phi_0) \end{aligned}$$

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

با گسترش و بسط رابطه‌ی (۲۵-۳)، دامنه‌ی چگالی شار روتور $B_{m1}(r)$ و اختلاف فاز آن با

نیروی محرکه‌ی مغناطیسی ϕ_0 بر حسب شعاع بصورت روابط (۲۶-۳) و (۲۷-۳) بدست می آید.

$$B_{m1}(r) = \frac{\frac{3}{2} \sqrt{2} IZ}{\frac{r}{p} \left(\frac{1}{\mu_1} \cos(\phi_0 - \alpha_1) + \frac{t_{r1}}{t_{r2} \mu_2} \cos(\phi_0 - \alpha_2) \right) + \frac{(g_1 + g_2) p t_{r1}}{\mu_0 r} \cos \phi_0} \quad (26-3)$$

$$\phi_0(r) = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{r}{p} \left(\frac{1}{t_{r1}\mu_1} \sin \alpha_1 + \frac{1}{t_{r2}\mu_2} \sin \alpha_2 \right)}{\frac{(g_1+g_2)p}{\mu_0 r} + \frac{r}{p} \left(\frac{1}{t_{r1}\mu_1} \cos \alpha_1 + \frac{1}{t_{r2}\mu_2} \cos \alpha_2 \right)} \right) \quad (27-3)$$

و در نتیجه دامنه‌ی چگالی شار فاصله‌ی هوایی برابر است با:

$$B_{gm}(r) = \frac{pt_{r1}}{r} B_{m1}(r) \quad (28-3)$$

با توجه به روابط بدست آمده برای B_{m1} و B_{m2} ، دامنه‌های چگالی شار روتورها و در نتیجه دامنه‌ی چگالی شار در فاصله‌ی هوایی در امتداد شعاع تغییر می‌کنند که رابطه (۲۶-۳) این وابستگی B_{m1} به r را بخوبی نشان می‌دهد.

۳-۲-۳. مسائل خاص در موتور CDDHM

در طراحی ابعاد ماشین CDDHM باید به این نکته توجه نمود که چگالی شار ماکزیمم که در شعاع R_{Bmax} ایجاد می‌شود از چگالی شار اشباع ماده‌ی هیستریزیس تجاوز نکند. R_{Bmax} به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R_{Bmax} = r \left| \frac{dB(r)}{dr} \right|_{=0} \quad (29-3)$$

در نتیجه برای جلوگیری از به اشباع رفتن ماده‌ی هیستریزیس روتور و حداکثر استفاده از آن بهترین انتخاب برای شعاع‌های داخلی و خارجی می‌تواند به صورت زیر باشد:

$$R_o = R_{Bmax} + \frac{l}{2} \quad (30-3)$$

$$R_i = R_{Bmax} - \frac{l}{2} \quad (31-3)$$

چون در موتورهای تخت l نسبت به R_i و R_o معمولاً کوچک است، بنابراین برای محاسبات بعدی فرض $r = R_{av} = (R_i + R_o)/2$ را در نظر می‌گیریم. بدین ترتیب در موتور شار محیطی CDDHM می‌توان چگالی شار روتور را در امتداد شعاع تقریباً 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 می‌دهد تا بدون فرضیات ساده کننده مراجع [۲۷، ۲۸] که حلقه‌های هیستریزیس را به صورت بیضی‌های متحد المركز با α و μ ثابت در نظر می‌گیرند به مدل کامل‌تری دست پیدا کنیم. مدل ارائه شده مدلی مبتنی بر پارامترهای طراحی خواهد بود و با دقت لازم می‌تواند به منظور طراحی بهینه بکار گرفته شود.

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

با محاسبه‌ی ولتاژ القایی در یک فاز سیم‌پیچی استاتور و تقسیم جریان فاز استاتور به چند مولفه، می‌توان به مدار معادل CDDHM دست یافت. به منظور محاسبه‌ی این ولتاژ القایی، ابتدا شار پیوندی یک حلقه‌ی سیم‌پیچی که شامل دو هادی در موقعیت θ و $\theta + \pi$ است از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\varphi = \int_{R_i}^{R_o} \int_{\phi}^{\phi + \pi} \left(B_g(\phi, r) \Big|_{r=R_{av}} \right) r \frac{d\phi}{p} dr \quad (32-3)$$

با قراردادن رابطه‌ی (۳-۲۱) در رابطه‌ی (۳-۱۹) داریم:

$$\left[B_g(\phi, r) \Big|_{r=R_{BMAX}} \right] = \left[\frac{pt_r 1}{r} B_{m1}(r) \right] \sin(\omega t - \phi - \phi_0) \Big|_{r=R_{av}} \quad (33-3)$$

پس:

$$\varphi = 2t_{r1}(R_o - R_i)(B_{m1}(R_{av})) \cos(\omega t - \phi - \phi_0) \quad (34-3)$$

$$\varphi = \varphi_{MAX} \cos(\omega t - \phi - \phi_0) \quad (35-3)$$

$$\varphi_{MAX} = 2t_{r1}(R_o - R_i)(B_{m1}(R_{av})) \quad (36-3)$$

بنابراین ولتاژ القائی در یک هادی در موقعیت ϕ برابر است با $\frac{1}{2} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)$ و ولتاژ القائی فاز a از رابطه‌ی (۳۷-۳) بدست می‌آید.

$$e_a = \int_0^{2\pi p} \frac{1}{2} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right) Z \cos(\phi) d\phi \quad (37-3)$$

$$e_a = \omega K_{\omega N_{ph}} \phi_{MAX} \cos\left(\omega t - \phi_0 + \frac{\pi}{2}\right) \quad (38-3)$$

حال اگر دو طرف رابطه‌ی (۳۵-۳) را بر $\frac{3}{2}Z$ تقسیم کنیم و مقدار $\phi = (n-1)\frac{2\pi}{3}$ را که در

آن $n=1,2,3$ است، برای فاز a صفر قرار دهیم رابطه‌ی زیر را خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} & \frac{3}{2} \sqrt{2} I Z \cos(\omega t) \\ &= \frac{2R_{av}}{3Zp} \left(\frac{B_{m1}}{\mu_1} \cos(\omega t - \phi_0 + \alpha_1) + \frac{B_{m2}}{\mu_2} \cos(\omega t - \phi_0 + \alpha_2) \right) \\ &+ \frac{2g_1 p t_{r1}}{3Z \mu_0 R_{av}} B_{m1} \cos(\omega t - \phi_0) + \frac{2g_2 p t_{r2}}{3Z \mu_0 R_{av}} B_{m2} \cos(\omega t - \phi_0) \end{aligned} \quad (39-3)$$

همانطور که مشاهده می کنید، سمت راست معادله ی (۳-۳۹) جریان فاز a است که اختلاف

فازی برابر با $\phi_0 - \frac{\pi}{2}$ با ولتاژ فاز a دارد. حال با تجزیه این جریان به سه مولفه ی جریانی پارامترهای

مدار معادل بدست خواهد آمد.

$$i_a = i_{h1} + i_{h2} + i_{g1} + i_{g2} \quad (۳-۴۰)$$

$$i_{h1} = \frac{2R_{av} B_{m1}}{3Z \mu_1 p} \cos(\omega t - \phi_0 + \alpha_1) \quad (۳-۴۱)$$

$$i_{h2} = \frac{2R_{av} B_{m2}}{3Z \mu_2 p} \cos(\omega t - \phi_0 + \alpha_2) \quad (۳-۴۲)$$

$$i_{g1} = \frac{2g_1 p t_{r1} B_{m1}}{3Z \mu_0 R_{av}} \cos(\omega t - \phi_0) \quad (۳-۴۳)$$

$$i_{g2} = \frac{2g_2 p t_{r2} B_{m2}}{3Z \mu_0 R_{av}} \cos(\omega t - \phi_0) \quad (۳-۴۴)$$

$$i_g = i_{g1} + i_{g2} = \frac{2(g_1 + g_2) p t_{r1} B_{m1}}{3Z \mu_0 R_{av}} \cos(\omega t - \phi_0) \quad (۳-۴۵)$$

دیاگرام فازوری مولفه های جریان و نیز ولتاژ فاز a در شکل (۳-۴) آورده شده است.

با توجه به روابط بدست آمده، مقادیر راکتانس های مغناطیس کننده ی فاصله ی هوایی و

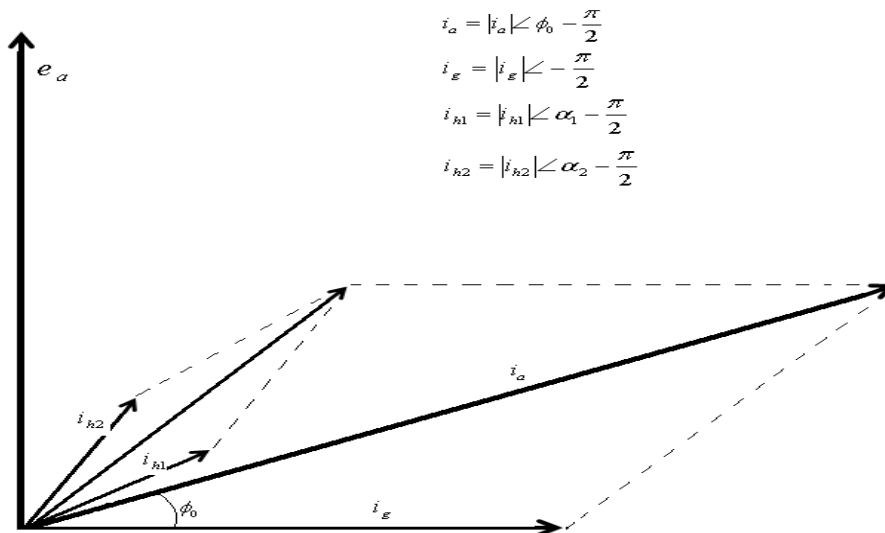
امپدانس های هیستریزیس متناظر با هر دیسک در حالت دائمی سینوسی بصورت زیر محاسبه می شود.

$$Z_{h1} = \frac{\overline{E_a}}{I_{h1}} \angle \frac{\pi}{2} - \alpha_1 = \frac{3\omega K_{\omega} N_{ph} \phi_{MAX} Z \mu_1 p}{2R_{av} B_{m1}} \angle \frac{\pi}{2} - \alpha_1 \quad (۳-۴۶)$$

$$Z_{h2} = \frac{\overline{E_a}}{I_{h2}} \angle \frac{\pi}{2} - \alpha_2 = \frac{3\omega K_{\omega} N_{ph} \phi_{MAX} Z \mu_2 p}{2R_{av} B_{m2}} \angle \frac{\pi}{2} - \alpha_2 \quad (47-3)$$

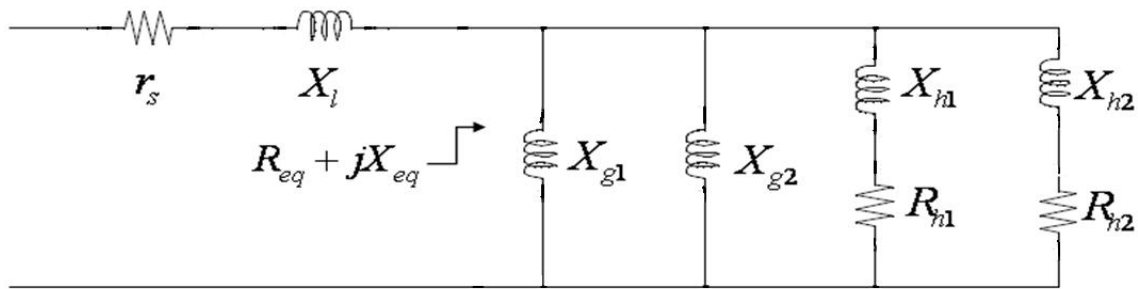
$$jX_{g1} = j \frac{\overline{E_a}}{I_{g1}} = j \frac{3\omega K_{\omega} N_{ph} \phi_{MAX} Z \mu_0 R_{av}}{2g_1 p t_{r1} B_{m1}} \quad (48-3)$$

$$jX_{g2} = j \frac{\overline{E_a}}{I_{g2}} = j \frac{3\omega K_{\omega} N_{ph} \phi_{MAX} Z \mu_0 R_{av}}{2g_2 p t_{r2} B_{m2}} \quad (49-3)$$



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

با توجه به مطالب گفته شده، مدار معادلی به صورت شکل (۵-۳) برای یک فاز موتور پسماند تخت دو روتوره ارائه می شود. این مدار معادل شبیه مدار معادل ماشین پسماند معمول، با یک شاخه موازی بیشتر برای روتور دوم است. همچنین باید توجه داشت که بعضی از عناصر مدار معادل همانند دیگر ماشین های پسماند، شدیداً متغیر و تابع نقطه‌ی کار است و فرض عناصر ثابت به نتایج غیر واقعی منجر می شود.



شکل (۵-۳): مدار معادل یک فاز موتور پسماند تخت دو روتوره بدون هسته

۳-۳-۱. محاسبه مقاومت استاتور

به منظور محاسبه مقدار مقاومت اهمی سیم پیچی هر فاز، در ابتدا باید با توجه به طرح ساخت موتور مورد نظر طول سیم مورد استفاده در هر فاز محاسبه شود که این طول با توجه به طرح پیشنهادی در این پایان نامه توسط رابطه ی (۵۰-۳) بدست خواهد آمد:

$$\ell_{turn} = \frac{2\pi(R_i + R_o)y_z\gamma}{z} + 2(R_o - R_i) + 4\ell_s + 4\ell_f + 4\ell_p \quad (۵۰-۳)$$

در رابطه (۵۰-۳) داریم:

y_z : گام کلاف بر حسب تعداد شیارها.

z : تعداد کل شیارها.

γ : ضریب تجربی است که برای ماشین های دو قطبی، چهار قطبی و شش قطبی و بالاتر به

ترتیب برابر ۱.۳، ۱.۵ و ۱.۷ در نظر گرفته می شود [۲۹].

ℓ_s : طول محل قرار گرفتن هر دور از سیم روی شعاع داخلی یا خارجی استاتور.

ℓ_f : فاصله‌ی بین شعاع داخلی (خارجی) روتور و خارج (داخل) حلقه‌ی داخلی (خارجی)

استاتور.

ℓ_p : میزان خم‌ش سیم در حلقه‌های داخلی (خارجی) استاتور.

حال با توجه به رابطه‌ی (۳-۵۰) و محاسبه‌ی طول متوسط یک حلقه از سیم‌پیچ، مقاومت

اهمی کل سیم‌پیچ هر فاز در دمای مشخص T_1 از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$r_s = \frac{N_{ph} \ell_{turn}}{\sigma_c \left(\frac{D_{conductor}}{2} \right)^2 \pi} \quad (۳-۵۱)$$

که در آن $D_{conductor}$ قطر سیم و σ_c هدایت ویژه سیم مورد استفاده در دمای T_1 است.

هدایت ویژه‌ی سیم مسی در دمای محیط 57×10^6 می‌باشد. برای تصحیح مقاومت اهمی سیم‌پیچی

در دماهای مختلف از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود:

$$r_s(T_2) = r_s(T_1) (1 + \alpha_{T_1} (T_2 - T_1)) \quad (۳-۵۲)$$

که α_{T_1} ضریب دمایی مقاومت است و مقدار آن برای سیم مسی 0.0039 می‌باشد. مقاومت

محاسبه شده برای جریان DC صادق است. در فرکانس‌های بالا اثر تلفات جریان گردابی در هادی‌ها

قابل توجه است و در مرجع [۳۰] روشی برای در نظر گرفتن اثر جریان‌های گردابی در سیم‌پیچی‌ها

ارائه شده‌است. بنابراین مقدار مقاومت DC محاسبه شده باید توسط ضریبی برای فرکانس‌های بالا

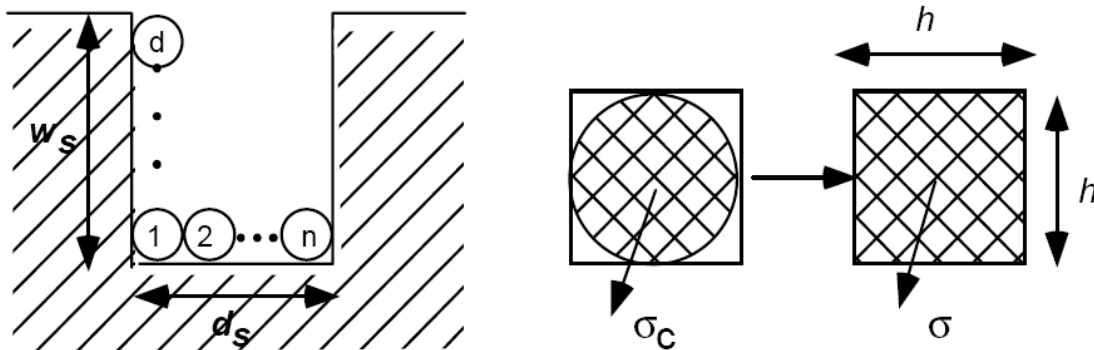
تصحیح شود. مقاومت AC را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد [۳۰]:

$$r_s(AC) = r_s(DC) \times \left(\frac{h \sinh 2\left(\frac{h}{\delta_c}\right) + \sin 2\left(\frac{h}{\delta_c}\right)}{\delta_c \cosh 2\left(\frac{h}{\delta_c}\right) - \cos 2\left(\frac{h}{\delta_c}\right)} + \frac{2}{3}(d^2 - 1) \frac{h \sinh 2\left(\frac{h}{\delta_c}\right) - \sin 2\left(\frac{h}{\delta_c}\right)}{\delta_c \cosh 2\left(\frac{h}{\delta_c}\right) + \cos 2\left(\frac{h}{\delta_c}\right)} \right) \quad (53-3)$$

همان گونه که در شکل (۳-۶) مشخص است اگر سطح مقطع هادی را یک مربع در نظر بگیریم h ارتفاع مؤثر سطح مقطع هادی است. D تعداد هادی‌هایی است که در یک شیار در جهت عمودی روی هم قرار می‌گیرند، و δ_c ضریب اثر پوستی هادی است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\delta_c = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma_c}} \quad (54-3)$$

که در این رابطه μ ضریب نفوذپذیری هادی می‌باشد که مقدار آن را برابر نفوذپذیری مغناطیسی هوا در نظر می‌گیریم.



شکل (۳-۶): توزیع سیم پیچی در یک شیار مستطیلی [۳۰]

۳-۳-۲. محاسبه راکتانس پراکندگی

اصولا محاسبه دقیق پراکندگی های شار بر اساس پارامترهای طراحی در ماشین های الکتریکی کار پیچیده ای است. برای این منظور معمولا از روش های عددی مانند المان محدود استفاده می شود که پیچیدگی ها و معایب خاص خود را دارد. ساختار غیر خطی و چند مقدار پدیده هیستریزیس در موتور پسماند، به پیچیدگی این موضوع افزوده است. اما با توجه به این که فاصله ی هوایی به علت عدم وجود هسته مغناطیسی در موتورهای مورد بحث بسیار بزرگ است، قسمت اعظم پراکندگی مربوط به شارهایی است که مسیر خود را در فاصله ی هوایی بین روتور و استاتور می بندند. بنابراین می توان ادعا کرد که سهمی از شار ناشی از MMF به نسبت راکتانس دیسک روتور و راکتانس 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 ی پراکندگی های مربوط به فاصله ی هوایی پراکندگی مربوط به کله سیم ها هم محاسبه شده و به مقدار پراکندگی های مربوط به فاصله ی هوایی افزوده می شود تا مقدار پراکندگی کل بدست آید.

شماتیکی از مدار مغناطیسی موتور CDDHM و خطوط شار آن در شکل (۳-۷) نشان داده

شده است. برای این موتورها می توان راکتانس هایی را به صورت زیر تعریف کرد:

$$\mathcal{R}_{g1} = \frac{2g_1}{\mu_0 A_{g1}} \quad (55-3)$$

$$\mathcal{R}_{lg1} = \frac{L}{2\mu_0 g_1 l} \quad (56-3)$$

$$\mathcal{R}_{d1} = \frac{L}{2\mu_t r_1 l} \quad (57-3)$$

که در روابط بالا $L = \frac{\pi R_{av}}{p}$ طول محیطی موثر دیسک هرکدام از روتورها زیر یک قطب، $l = R_o - R_i$ طول شعاعی دیسک هرکدام از روتورها و $A_{g1} = Ll$ سطح فاصله‌ی هوایی زیر یک قطب هستند. در نتیجه \mathcal{R}_{g1} رلکتانس فاصله‌ی هوایی زیر یک قطب در امتداد شعاع، $\mathcal{R}_{l_{g1}}$ رلکتانس فاصله‌ی هوایی زیر یک قطب در امتداد محیط و \mathcal{R}_{d1} رلکتانس دیسک روتور یک زیر یک قطب در امتداد محیط می‌باشند. مقادیر \mathcal{R}_{g2} ، $\mathcal{R}_{l_{g2}}$ و \mathcal{R}_{d2} برای فاصله‌ی هوایی و روتور طرف دیگر نیز بطور مشابه بدست می‌آیند. مقادیر بدست آمده در مدار معادل الکتریکی مدار مغناطیسی ماشین، به صورت عناصری مطابق شکل (۸-۳) در کنار هم قرار می‌گیرند.

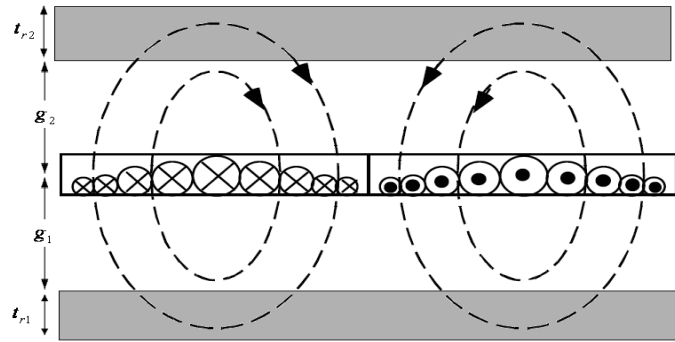
با ترکیب رلکتانس‌ها در شکل (۸-۳) طبق روابط زیر مدار معادل مغناطیسی شکل (۹-۳) را خواهیم داشت.

$$\mathcal{R}_{total} = (\mathcal{R}_{g1} + \mathcal{R}_{d1} + \mathcal{R}_{g2} + \mathcal{R}_{d2}) \quad (۵۸-۳)$$

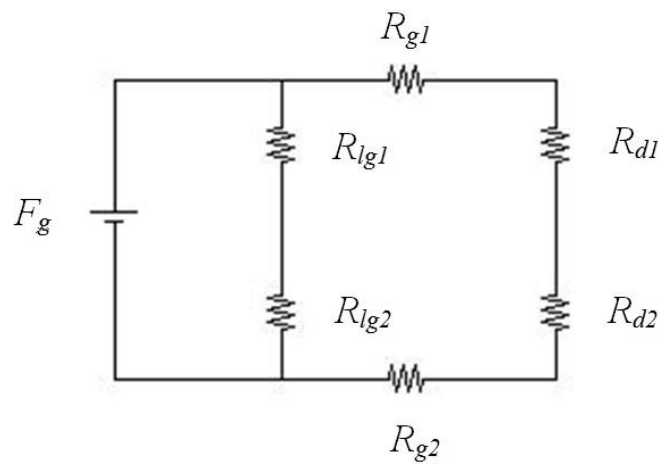
$$\mathcal{R}_{lg} = \mathcal{R}_{lg1} + \mathcal{R}_{lg2} \quad (۵۹-۳)$$

برای مدار معادل شکل (۹-۳) می‌توان دوگان الکتریکی همانند شکل (۱۰-۳) در نظر گرفت که در آن X_1 راکتانس پراکندگی و X_{eq} راکتانس محاسبه شده از دو سر A و B مدار معادل ماشین نشان داده شده در شکل (۱۱-۳) است. بنابراین می‌توان با توجه به تقسیم شار، راکتانس پراکندگی فاصله‌ی هوایی را بصورت زیر برآورد نمود:

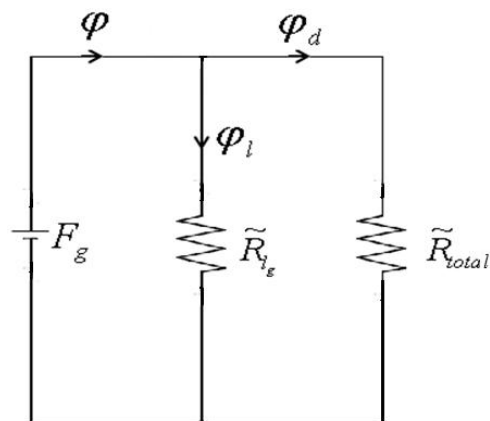
$$X_{lg} = \frac{\mathcal{R}_{total}}{\mathcal{R}_{lg}} X_{eq} \quad (۶۰-۳)$$



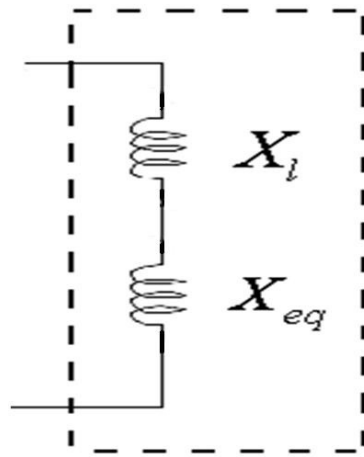
شکل (۷-۳): مسیر شار در CDDHM [۲]



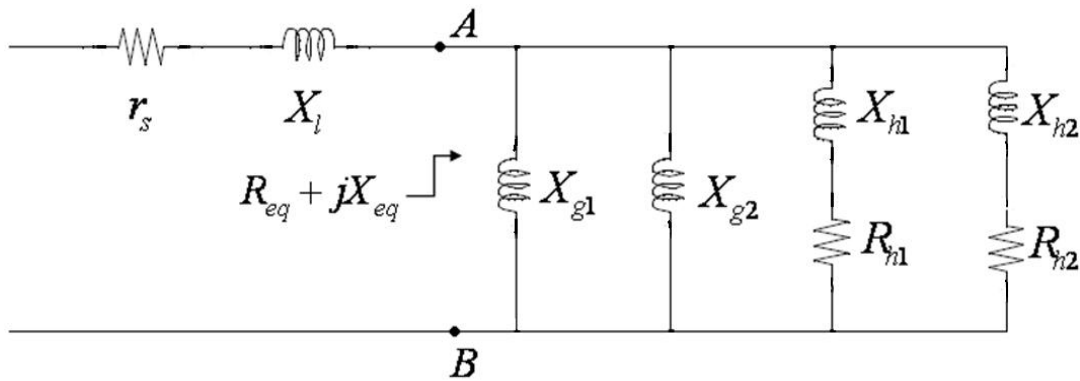
شکل (۸-۳): مدار معادل مغناطیسی CDDHM



شکل (۹-۳): مدار معادل مغناطیسی CDHMM



شکل (۳-۱۰): دوگان الکتریکی مدار معادل مغناطیسی شکل (۳-۹)



شکل (۳-۱۱): 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 نشتی کله سیم ها می توان از رابطه تجربی زیر

استفاده کرد [۳۱].

$$X_{end} = \frac{0.482k_x \mu_0 m (2R_{av}) y_z}{1000pz} \quad (۳-۶۱)$$

که در آن:

$$k_x = 2\pi f (2N_{ph}K_w)^2 \quad (۳-۶۲)$$

مجموع راکتانس پراکندگی کله‌سیم‌ها X_{end} بعلاوه‌ی راکتانس پراکندگی فاصله‌ی هوایی

X_{lg} کل راکتانس پراکندگی موتور X_1 را تشکیل می‌دهند.

فصل چہارم

الکوریتم ڈیٹا سٹرکچر

و

طراحی ہینہ موتور CDDHM

۴-۱. مقدمه

الگوریتم‌های طراحی برای ماشین‌های الکتریکی معمول به صورت دقیق و با جزئیات کامل در بسیاری از مقالات و کتاب‌های طراحی ماشین و یا به صورت داده‌های تجربی توسط کارخانه‌های صنعتی ساخت ماشین‌های الکتریکی آورده شده است. همچنین اینگونه اطلاعات برای موتورهای هیستریزیس استوانه‌ای معمول ارائه شده است. در مقابل به علت جدید بودن موتور CDDHM و نیز عدم وجود اطلاعات و داده‌های تجربی در این زمینه، الگوریتم مدون و کاملی برای طراحی این موتور در دسترس نیست. بنابراین استفاده از روش‌های بهینه‌سازی برای طراحی موتور CDDHM اجتناب ناپذیر است. علاوه بر این، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی کلاسیک مستلزم وجود جواب‌های تقریبی اولیه‌ای نزدیک به جواب نهایی می‌باشند و در غیر اینصورت الگوریتم بسیار زمانبر خواهد بود و یا با مشکل اکسترموم‌های محلی روبرو خواهد شد. در نتیجه با توجه به دلایل ذکر شده و عدم وجود اطلاعات تجربی کافی برای موتور CDDHM، باید از یک روش بهینه‌سازی قابل اعتماد از نظر زمانی و شروع از یک جواب تصادفی اولیه، استفاده نمود.

با توجه به مشکلات ذکر شده و نیز وجود یک مدل پیچیده، غیر خطی و چند مقداره برای پدیده‌ی هیستریزیس، در این پایان نامه الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک به علت کارایی بالای آن در حل اینگونه مسائل پیشنهاد شده است.

در این فصل که با عنوان طراحی بهینه‌ی موتور پسماند تخت دو روتوره بدون هسته، ارائه خواهد شد، ابتدا توضیحات مختصری در مورد بهینه‌سازی و روش‌های مختلف آن بیان خواهد شد و در ادامه پس از معرفی و بررسی روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک^۱، به ارائه‌ی روش طراحی بهینه برای موتور مورد نظر خواهیم پرداخت.

^۱ - Genetic Algorithm

۴-۲. بهینه‌سازی و روش‌های آن

امروزه با توجه به پیشرفت علم و تکنولوژی و محدودیت موجود در منابع انرژی، روش‌های بهینه‌سازی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار شده‌اند. بهینه‌سازی پیدا کردن بهترین جواب در حضور محدودیت‌های حاکم بر یک مساله است. بطور کلی روش‌های بهینه‌سازی را می‌توان به دو دسته کلاسیک و نوین تقسیم‌بندی نمود. روش‌های کلاسیک شامل برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی غیرخطی و برنامه‌ریزی پویا می‌باشند و از روش‌های نوین می‌توان به سرد شدن تدریجی، روش‌های جستجوی جدولی و الگوریتم‌های تکاملی اشاره کرد. پیاده‌سازی روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی با توجه به پیچیدگی‌های موجود در سیستم‌های واقعی گهگاه بسیار دشوار است. با توجه به گسترش علوم کامپیوتری و افزایش سرعت عملیاتی این ابزار، الگوریتم‌های جستجوگر مبتنی بر روش‌های عددی گسترش یافته و بعنوان روش‌های نوین بهینه‌سازی کاربرد ویژه‌ای پیدا کرده‌اند.

۴-۳. الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک روش قدرتمند برای حل مسائل بهینه‌سازی براساس سیر تکامل تدریجی بیولوژیکی است. بویژه هنگامیکه مساله بهینه‌سازی دارای نقاط ماکزیمم یا مینیمم محلی^۱ باشد، معمولاً الگوریتم ژنتیک بهترین روش برای تمایز جواب کلی^۲ و جواب‌های محلی است. در این روش، جمعیتی از افراد برای مساله انتخاب شده و بصورت تکراری تصحیح می‌شوند. هر فرد جامعه یک ژن نامیده می‌شود و آرایه‌ای از متغیرهای مساله یا همان کروموزوم‌ها است. در هر مرحله، با تولید نسل جدید، برخی از افراد جامعه به جواب‌های واقعی مساله نزدیکتر می‌شوند. الگوریتم کلی این روش در فلوجارت شکل (۴-۱) خلاصه شده است. همگرایی این روش تا حد زیادی به استراتژی تولید مثل بستگی دارد که بطور کلی تابع سه روش عمده می‌باشد:

^۱- Local Minimum

^۲- Global Minimum

الف) ترکیب ژن‌ها (همبیری)^۱: تعداد زیادی از فرزندان هر نسل از ترکیب ژنتیکی والدین تولید می‌شوند. در این روش، هر فرزند یا ژن جدید با انتخاب کروموزوم‌های ویژه‌ای از دو ژن دیگر تولید می‌شود. چگونگی انتخاب کروموزوم‌های والدین نیز تابع قوانین ویژه و مشخصی است.

ب) فرزندان نمونه^۲: در هر مرحله، درصد مشخصی از افراد جامعه که بیشترین میزان تطابق با تابع هدف را دارند، بعنوان فرزندان نمونه انتخاب شده و بدون تغییر به مرحله بعد می‌روند. این شیوه تولید، تاثیر محسوسی بر سرعت همگرایی الگوریتم دارد.

ج) جهش ژنتیکی^۳: تغییرات تصادفی در کروموزوم‌های یک ژن منجر به تولید یک ژن جهش یافته بعنوان فرزندی در مرحله بعدی می‌شود. بدین ترتیب طیف وسیع‌تری از جواب‌های ممکن مساله بررسی می‌شوند.

شرایط ویژه‌ای برای توقف این الگوریتم مشخص می‌شود که در مسائل مختلف، متفاوت است، اما عدم تجاوز تغییرات پارامترهای مساله از محدوده‌ای مشخص پس از طی تعداد مشخصی از مراحل، شرط رایج برای توقف الگوریتم در اغلب مسائل می‌باشد.

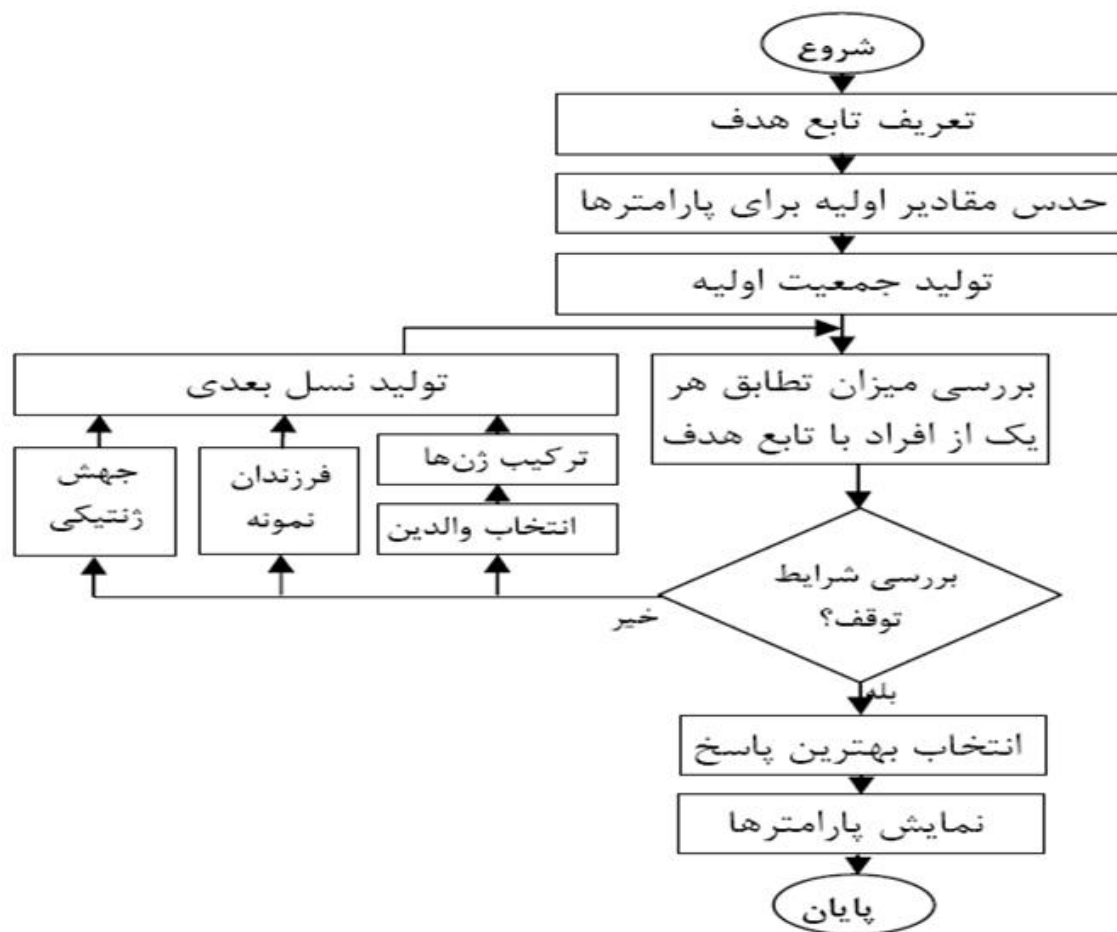
۴-۱. الگوریتم طراحی موتور CDDHM

به منظور طراحی موتور پسماند تخت دو روتوره بدون هسته، همانند اغلب موتورهای بایستی مقادیر و پارامترهای موردنظر ورودی طراحی، پارامترهای خروجی طراحی و نیز قیود اعمالی بر طرح مورد نظر بررسی گردد. در ادامه هر یک از این موارد با توجه به مدار معادل استخراج شده برای موتور CDDHM به تفصیل بیان شده است.

^۱ - Crossover

^۲ - Elite Children

^۳ - Mutation



شکل (۴-۱): الگوریتم ژنتیک

در اینجا بار دیگر ذکر می‌شود که موتور پسماند تخت دو روتوره بدون هسته، از یک سیم-پیچی سه فاز به عنوان استاتور در مرکز و دو دیسک یکی در بالا و دیگری در پایین استاتور به عنوان روتور تشکیل شده است. فاصله‌ی بین دو روتور در حقیقت فاصله هوایی موتور را نشان می‌دهد.

۴-۱-۱. پارامترهای ورودی طراحی

پارامترهای ورودی طراحی در هر ماشین الکتریکی عبارتست از برخی از پارامترهای الکتریکی و مکانیکی ورودی و خروجی ماشین موردنظر. در این پایان نامه و برای طراحی موتور CDDHM بهینه عوامل زیر به عنوان پارامترهای ورودی طراحی بهینه بیان می‌شوند (پنج پارامتر):

P_{out} : توان خروجی موتور

V_{in} : ولتاژ ورودی (تغذیه) موتور

f : فرکانس ورودی (تغذیه) موتور

n_{sync} : سرعت کاری (سنکرون) موتور

m : تعداد فاز موتور

با استفاده از عوامل مستقل بیان شده، تعداد دیگری از عوامل طراحی ماشین بدست خواهد آمد که از جمله آن‌ها می‌توان به تعداد قطب‌های ماشین اشاره نمود که طبق رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$p = \frac{120f}{n_{sync}} \quad (1-4)$$

همچنین همانطور که در فصل اول بیان شد، توان خروجی در موتورهای هیستریزس از رابطه‌ی (۲-۴) بدست می‌آید:

$$P_h = V_h E_h f \quad (2-4)$$

که در رابطه‌ی بالا V_h حجم ماده هیستریزس بکار رفته در روتور، E_h سطح حلقه‌ی هیستریزس کاری موتور و f فرکانس ورودی موتور می‌باشد. بنابراین با استفاده از رابطه‌ی بالا و توجه به این نکته که راندمان ماکزیمم و بهینه در حلقه‌ی هیستریزس نرمال ایجاد می‌شود و انتخاب این حلقه، حجم مورد نیاز روتور برای ایجاد توان مورد نظر از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$V_h = \frac{P_h}{E_h f} \quad (3-4)$$

۴-۱-۲. پارامترهای خروجی طراحی

پارامترهای خروجی طراحی اغلب پارامترهای مکانیکی همچون ابعاد قسمت‌های مختلف موتور می‌باشد. از مهمترین این خروجی‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

R_i : شعاع داخلی دیسک‌های روتور

R_o : شعاع خارجی دیسک‌های روتور

N_{ph} : تعداد دور سیم‌پیچی هر فاز موتور

$D_{conductor}$: قطر هادی سیم‌پیچی

t_{r1} و t_{r2} : ضخامت دیسک‌های روتور یک و دو

g_1 و g_2 : اندازه‌ی فاصله هوایی‌های یک و دو

با توجه به فضای محدود واقع در شعاع داخلی روتور و استاتور و نیز وجود کله سیم‌ها در این ناحیه، محاسبه‌ی اندازه‌ی R_i تحت تاثیر این موضوع قرار می‌گیرد. بنابراین اندازه‌ی R_i با توجه به رابطه‌ی (۴-۴) بدست خواهد آمد:

$$R_i = R_{sh} + l_s + l_f + l_t + l_w + R_{rand} \quad (4-4)$$

در رابطه‌ی بالا R_{sh} شعاع شفت بکار رفته در موتور، l_s طول محل قرار گرفتن هر دور از سیم روی شعاع داخلی استاتور (ضخامت حلقه‌ی داخلی استاتور) و l_f فاصله‌ی بین شعاع داخلی روتور و شعاع خارجی حلقه‌ی داخلی استاتور است. همچنین l_t فاصله‌ی بین کله‌سیم‌ها و شفت است که با توجه به محدودیت مکانیکی معین می‌شود. R_{rand} برابر مقدار دلخواهی برای انعطاف پذیری اندازه‌ی شعاع داخلی دیسک است. l_w فضای لازم برای قرار گرفتن کله‌سیم‌هاست که برابر است با:

$$\ell_w = \frac{N_{ph} D_{conductor}^2 K_1}{h_w} \quad (5-4)$$

در رابطه‌ی (۵-۴)، h_w ارتفاع مجاز برای قرار دادن سیم‌ها روی یکدیگر و K_1 ضریبی برای در نظر گرفتن جلوآمدگی سیم‌ها بعلت خمش است.

همانگونه که قبلاً ذکر شد، در موتور پسماند، حداکثر راندمان به ازای یکی از حلقه‌های پسماند که حلقه‌ی کاری نرمال نامیده می‌شود، بدست می‌آید. همچنین چگالی شار در دیسک‌های روتور طبق رابطه‌ی (۳-۲۴)، در صورت برابری ضخامت روتورها با هم برابر خواهند بود. در نتیجه در صورت انتخاب برابر ضخامت دیسک روتورها، حداکثر استفاده از ماده هیستریزیس مصرفی خواهد شد. بنابراین با داشتن مقادیر شعاع‌های داخلی و خارجی دیسک‌ها و بدست آوردن حجم ماده هیستریزیس مورد نیاز از رابطه‌ی (۴-۳)، ضخامت دیسک‌های روتور از رابطه‌ی (۴-۶) بدست خواهد آمد.

$$t_{r1} = t_{r2} = \frac{V_h}{2\pi(R_o^2 - R_i^2)} \quad (6-4)$$

در این قسمت به محاسبه‌ی اندازه‌ی فاصله‌ی هوایی در موتور CDDHM با توجه به طرح پیشنهادی برای ساخت می‌پردازیم. اگر حلقه‌ی داخلی استاتور را که درون شعاع داخلی دیسک روتور قرار می‌گیرد و در شکل (۴-۲) نشان داده شده‌است، در نظر بگیریم، با توجه به تعداد دور هر فاز سیم-پیچی (N_{ph})، تعداد فاز ورودی (m)، و قطر هادی مورد استفاده ($D_{conductor}$)، اندازه‌ی فاصله‌های هوایی در موتور CDDHM از رابطه‌ی (۴-۷) بدست خواهد آمد:

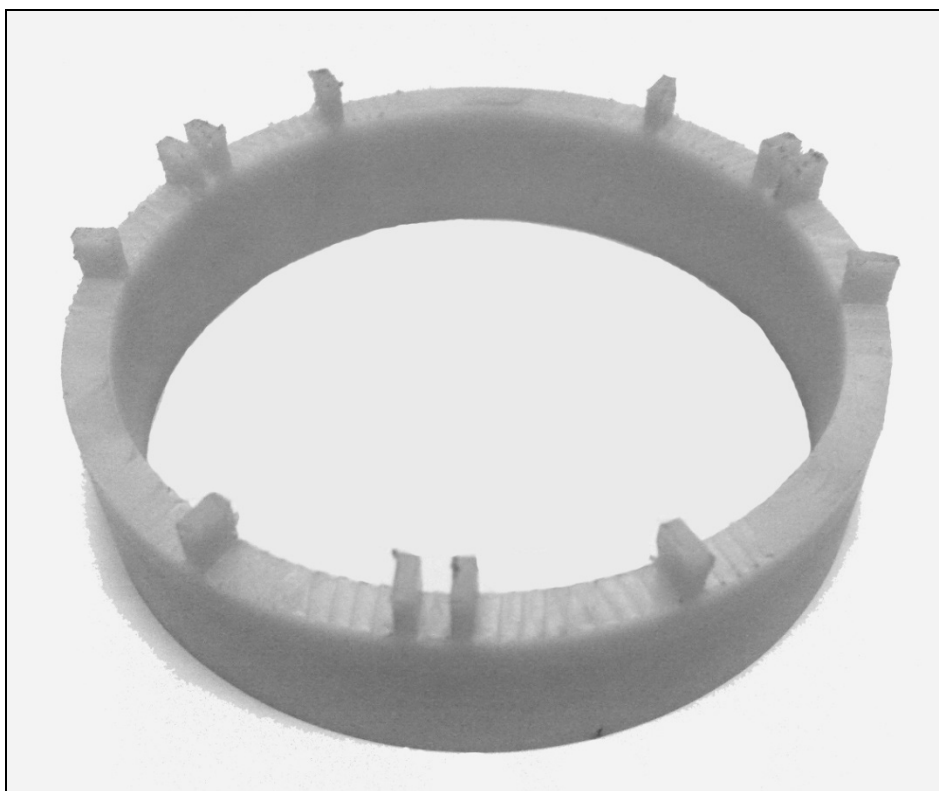
$$g_1 = g_2 = \left(\frac{N_l \times D_{conductor} \times k_p}{2} \right) + g_l \quad (7-4)$$

در رابطه‌ی بالا k_p ضریب پرشوندگی و N_l برابر است با:

$$N_l = \frac{mN_{ph}D_{conductor}}{2\pi(R_i - \ell_s - \ell_f) - m_s} \quad (۸-۴)$$

که در رابطه‌ی (۸-۴)، m_s طول اشغال شده از محیط حلقه‌ی داخلی استاتور توسط دندانه‌های استاتور می‌باشد.

همچنین در رابطه‌ی (۷-۴)، g_l برابر فاصله‌ی سطح بیرونی سیم‌پیچ با دیسک روتور است که با توجه به محدودیت‌های مکانیکی طرح انتخاب می‌گردد.



شکل (۲-۴): حلقه داخلی استاتور

۴-۱-۳. قیود طراحی

به طور کلی در طراحی ماشین‌های الکتریکی یک سری محدودیت‌ها وجود دارد و یا باید در نظر گرفت که طرح بهینه علاوه بر اینکه تابع هدف را ماکزیمم یا مینیمم می‌کند، نباید این محدودیت‌ها را نقض کند. در طراحی موتورهای پسماند CDDHM می‌توان محدودیت‌های زیر را در نظر گرفت.

- چگالی شار در روتور نباید از حد اشباع بیشتر شود.
- جریان در هادی‌های استاتور نباید از حد گرمایی استاتور بالاتر برود. چگالی جریان در هادی‌های استاتور را می‌توان با توجه به نحوه خنک سازی موتور مقدار مناسبی در نظر گرفت.
- شعاع خارجی و شعاع داخلی موتور در محدوده مجاز خواسته‌های مسئله طراحی باشد.

علاوه بر این محدودیت‌ها می‌توان با توجه به تجربیات قبل، محدودیت‌های دیگری مثل وزن تمام شده موتور و وزن مس استفاده شده در هادی‌ها را در نظر گرفت.

۴-۲. طراحی بهینه موتور CDDHM

در این بخش با توجه به توضیحات دو قسمت قبل (الگوریتم ژنتیک و الگوریتم طراحی موتور) و ترکیب آنها، به طراحی بهینه موتور CDDHM می‌پردازیم.

در ابتدا ذکر این نکته لازم به نظر می‌رسد که منظور از طرح بهینه در این پایان نامه، طراحی است که در کلاس کاری مشخصی از موتور CDDHM دارای ماکزیمم راندمان بوده و نیز قابلیت ساخت داشته‌باشد. کلاس کاری انتخابی برای این پایان نامه، ساخت موتوری با مشخصات زیر است:

$$P_{out} = 450w \text{ : توان خروجی موتور}$$

$$V_{in} = 300V \text{ : ولتاژ ورودی (تغذیه) موتور}$$

فرکانس ورودی (تغذیه) موتور : $f = 400\text{Hz}$

سرعت کاری (سنکرون) موتور : $n_{\text{sync}} = 24000\text{rpm}$

تعداد فاز موتور : $m = 3\text{ph}$

یکبار دیگر به بررسی اجزای الگوریتم ژنتیک به منظور بهینه‌سازی این طرح خاص می‌پردازیم.

پردازیم.

۴-۲-۱. ایجاد نسل اولیه

در این مساله نسل اولیه متشکل از تعداد ۱۰۰ کروموزوم است که هر کروموزوم از پنج ژن تشکیل یافته‌اند. تغییرات هریک از ژن‌ها بصورت پیوسته و در محدوده‌ی مجاز تعریف شده، می‌باشد. این پنج ژن به ترتیب عبارتند از:

(۱) R_{rand} : همانطور که از رابطه‌ی (۴-۴) مشخص است، مقدار R_{rand} به مینیمم مقدار شعاع

داخلی روتور اضافه می‌گردد و در نتیجه اندازه‌ی شعاع داخلی دیسک روتور بدست می‌آید.

R_{rand} دارای مقداری مثبت و کوچکتر از R_{randmax} است.

(۲) ℓ_r : برابر است با مقدار اختلاف شعاع خارجی دیسک روتور و شعاع داخلی آن (رابطه (۴-۹)).

$$\ell_r = R_o - R_i \quad (۹-۴)$$

در نتیجه با داشتن مقدار ℓ_r و R_i ، شعاع خارجی دیسک روتور بدست خواهد آمد.

(۳) D_i : برابر عدد صحیح مثبتی می‌باشد که با توجه به جدول قطر هادی‌های قابل استفاده،

انتخاب خواهد شد و در نتیجه قطر هادی مورد نظر بدست می‌آید.

(۴) N_{ph} : برابر تعداد دور سیم‌پیچی هر فاز از موتور می‌باشد که با توجه به حدود بالایی و

پایینی مورد نظر، انتخاب می‌شود.

(۵) H_p : شدت میدان مغناطیسی ایجاد شده که حدود آن با توجه به ماده‌ی هیستریزیس مورد نظر مشخص می‌شود. با داشتن مقدار H_p و اطلاعات تجربی مربوط به ماده‌ی هیستریزیس، سطح حلقه‌ی هیستریزیس مورد نظر بدست می‌آید.

اکنون با توجه به کلاس کاری موتور مورد نظر، کروموزوم تولیدی و روابط (۳-۴) تا (۸-۴)، دیگر پارامترهای طراحی بدست خواهد آمد.

۲-۲-۴. تابع هدف

همانگونه که ذکر شد از معایب موتورهای پسماند، راندمان و ضریب توان پایین این ماشین‌ها است. همچنین راندمان بالا متناظر با ضریب توان بالا می‌باشد. بنابراین تابع هدف انتخابی در این مساله‌ی بهینه‌سازی، بدست آوردن بالاترین مقدار راندمان برای موتور پسماند تخت دو روتوره بدون هسته است. راندمان ماشین CDDHM با توجه به مدار معادل بدست آمده در فصل قبل بدست خواهد آمد.

۳-۲-۴. تابع برازندگی (شایستگی)

از آنجایی که الگوریتم ژنتیک استفاده شده در این پایان نامه، قادر به مینیمم‌سازی مقدار تابع می‌باشد، تابع برازندگی را به صورت رابطه‌ی زیر تعریف می‌کنیم:

$$fitness = K_1(1-\eta) + K_2(E_{a1} - V_{in})^2 + K_3(P_{out1} - P_{out})^2 + K_4(I_a - S \times A)^2 \quad (۱۰-۴)$$

در رابطه‌ی بالا K_1 ، K_2 ، K_3 و K_4 ضرایبی هستند که به منظور نرمالایز نمودن جملات تابع شایستگی بکار رفته‌اند. E_{a1} مقدار ولتاژ ورودی حاصل از مدار معادل، P_{out1} مقدار توان خروجی موتور حاصل از مدار معادل، I_a جریان بدست آمده از مدار معادل، S ماکزیمم جریان مجاز عبوری از هادی به ازای هر میلی‌متر مربع از هادی و A سطح مقطع هادی انتخابی برحسب میلی‌متر مربع می‌باشد.

در رابطه‌ی بالا جملات دوم و سوم به منظور اعمال قید توان خروجی و ولتاژ ورودی مورد نظر می‌باشد. همچنین جمله‌ی چهارم باعث استفاده‌ی حداکثری از سطح مقطع هادی خواهد شد.

۴-۲-۴. همبری

عملگر همبری استفاده شده در این مسئله همبری هیوریستیک است. همچنین انتخاب مقدار ضریب همبری با استفاده از روش آزمون و خطا و برابر با ۰.۹ بوده است.

۴-۲-۵. جهش

عملگر جهش استفاده شده در این مسئله جهش گوسین است. این عملگر در هر مرحله یک تغییر تصادفی نرمال به کروموزوم‌های منتخب اعمال می‌کند. مقدار واریانس این تابع نرمال در مرحله اول برابر ۱ بوده و بصورت خطی در مراحل بعدی کاهش می‌یابد.

۴-۳. نتایج بهینه‌سازی و ارائه‌ی طرح بهینه

مشخصات طرح بهینه‌ی موتور CDDHM مستخرج از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک در جدول (۱-۴) آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در طرح بهینه بازده موتور برابر با ۷۶.۵۳ درصد است. همانطور که قبلاً هم اشاره شد، موتورهای پسماند عموماً دارای راندمان و ضریب توان بسیار کمتری نسبت به سایر انواع موتورهای AC هستند. اما جدول (۱-۴) نشان می‌دهد با طراحی این موتورها براساس الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، می‌توان راندمان و ضریب توان این موتورها را تا حد قابل قبولی افزایش داد. اگرچه این مقادیر برای یک موتور القایی سه‌فاز معمولاً بیشتر از راندمان و ضریب توان ارائه شده در جدول (۱-۴) است، اما در کنار سایر مزایای یاد شده برای موتورهای پسماند بایستی کاهش راندمان و ضریب توان آن را نیز تا حدی پذیرفت. مقادیر ارائه شده در جدول (۱-۴) نشان

می‌دهد این حد از پایین بودن راندمان و ضریب توان برای موتور طراحی شده، بعنوان یک مشکل جدی مطرح نیست.

جدول (۱-۴): مشخصات طرح بهینه

Symbol	Quantity	CDDHM
$t_{r1}=t_{r2}$	Thickness of discs	3.5 mm
R_i	Inner radius of rotor	52.4 mm
R_o	Outer radius of rotor	95.5 mm
$g_1=g_2$	Air gaps	4 mm
N_{ph}	No. of turns per phase	266
a	Per-unit coil pitch	1
D	Conductor diameter	0.7 mm
r_s	Stator resistance	7.5 Ω
X_l	Leakage inductance	2.22 Ω
$X_{h1}=X_{h2}$	Rotor reactance	102.91 Ω
$R_{h1}=R_{h2}$	Rotor resistance	89.10 Ω
$X_{g1}=X_{g2}$	Magnetizing reactance	317.29 Ω
f	Frequency	400 Hz
I_L	Full load current	2.48 A
P_{out}	Output power	452.11 W
P_{in}	Input power	593.15 W
$\% \eta$	Efficiency	76.53 %
$\cos \phi$	Power factor	0.462

فصل پنجم

تکنولوژی و فرآیند ساخت

موتور CDDHM هینه

۵-۱. مقدمه

در این فصل، روش، تکنولوژی و نوآوری‌های استفاده شده به منظور ساخت موتور پسماند تخت دو روتوره بدون هسته شرح داده خواهد شد. این توضیحات شامل مراحل مختلف ساخت اجزای موتور از جمله استاتور و سیم‌پیچی آن، دیسک‌های روتور، شفت و . . . می‌باشد. همچنین در انتهای این فصل نقشه‌های مونتاژ و هریک از قطعات موتور ساخته شده که توسط نرم‌افزار Solid Work تهیه شده است، آورده شده است.

۵-۲. استاتور

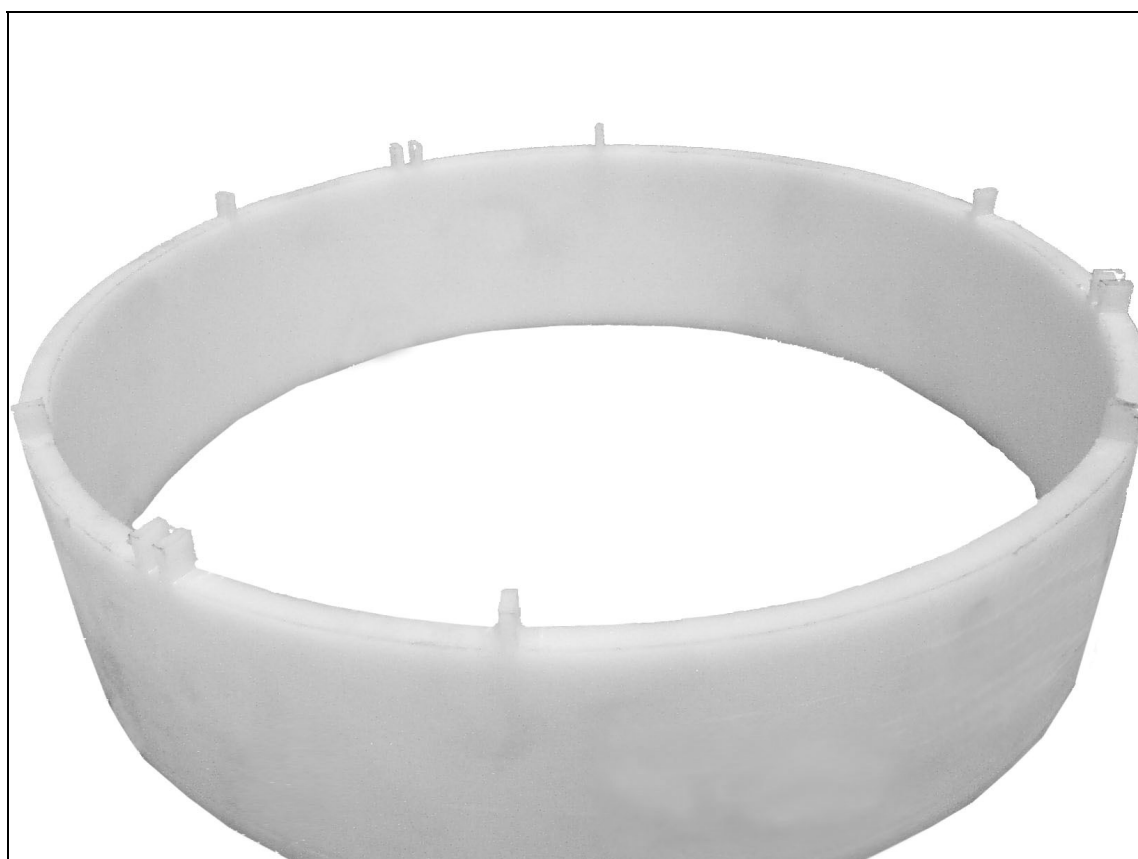
استاتور از دو قسمت بدنه‌ی استاتور و سیم‌پیچی سه فاز استاتور تشکیل شده که روش ساخت آن به تفصیل در ادامه آورده شده است.

۵-۲-۱. بدنه استاتور

با توجه به عدم وجود هسته‌ی آهنی در موتور CDDHM انتخاب ماده‌ی مورد استفاده به منظور ساخت استاتور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ماده‌ی مورد نظر باید از ویژگی‌های خاصی برخوردار باشد. این ماده باید از میان موادی با خاصیت عایقی الکتریکی و مغناطیسی بالا انتخاب گردد و نیز دارای تحمل حرارتی بالا بوده تا در اثر گرمای ناشی از عبور جریان از سیم‌پیچی‌های استاتور دچار ذوب شدگی و یا تغییر شکل فیزیکی نشود. از دیگر خصوصیات ماده‌ی قابل استفاده برای بدنه‌ی استاتور می‌توان به سبکی و دارا بودن قابلیت انجام تراشکاری و فرزکاری بر روی آن اشاره کرد. از آنجایی که ساخت این موتور به صورت آزمایشگاهی و نمونه بوده‌است، قیمت مواد نیز از اهمیت خاصی برخوردار است.

با توجه به توضیحات بالا و بررسی و تست نسبتاً جامع مواد موجود در بازار ایران، برای ساخت بدنه‌ی استاتور از ماده‌ای به نام پلی‌آمید^۱ استفاده شده است. این ماده از نوع مواد پلاستیکی بوده و تحمل حرارتی بالایی در حدود ۲۱۰-۲۲۰ درجه‌ی سانتیگراد (حرارت غیر مستقیم) دارد. همچنین دارای سختی مناسبی برای انجام تراشکاری و فرزکاری می‌باشد.

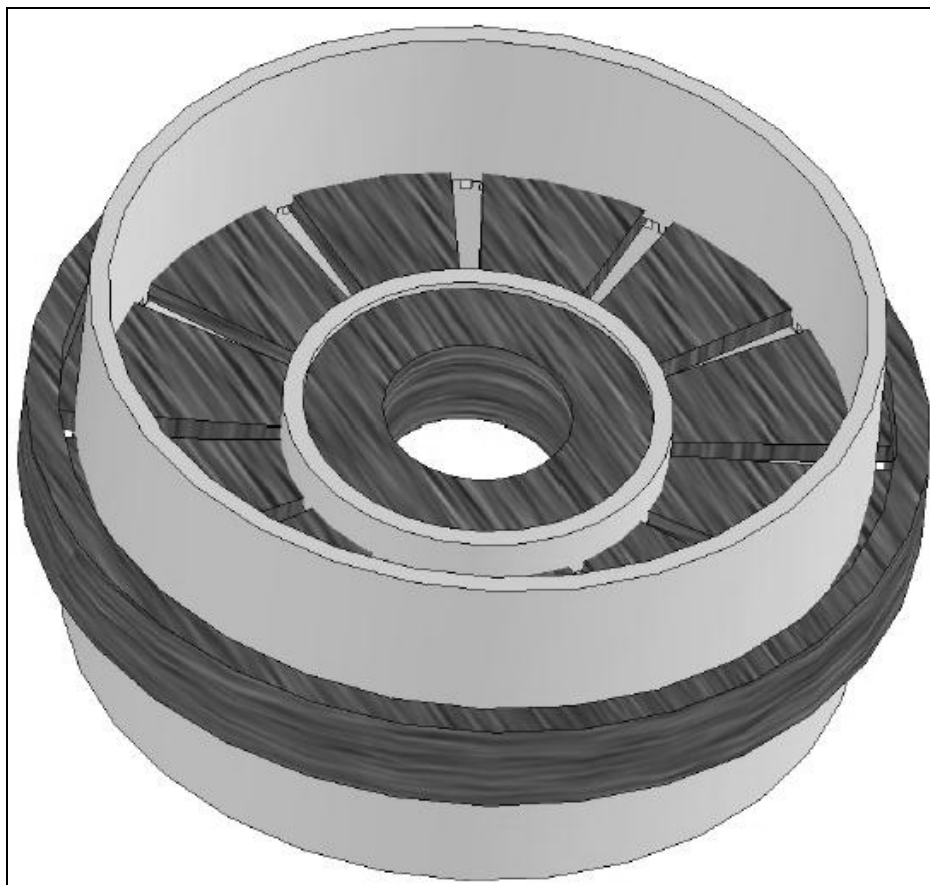
استاتور موتور CDDHM از دو حلقه‌ی استوانه‌ای شکل تشکیل شده که دارای دندانه‌هایی به منظور ایجاد شیارهای لازم برای قرار گرفتن سیم‌پیچی‌ها در آن‌ها می‌باشند. ضخامت هر دندانه برابر با ۲ میلی‌متر و ارتفاع هر یک برابر ۳ میلی‌متر می‌باشد. شکل (۵-۱) تصویر یکی از حلقه‌های بدنه‌ی استاتور را نمایش می‌دهد.



شکل (۵-۱): حلقه بدنه استاتور

^۱ - Polyamide

دو حلقه‌ی بالایی و پایینی از لحاظ نقشه‌ی طراحی و ساخت کاملاً شبیه یکدیگر بوده و تنها با چرخش محوری یکی از آن‌ها معادل ۶۰ درجه، دو حلقه روی یکدیگر سوار شده و تشکیل بدنه‌ی استاتور را خواهند داد. شکل (۲-۵) تصویری از استاتور ساخته‌شده را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۵): استاتور

۲-۲-۵. سیم‌پیچی استاتور

از آنجایی که فضای داخلی موتور CDDHM به علت شعاع داخلی محدود دیسک‌ها محدود می‌باشد، استفاده‌ی حداکثری از این فضا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با در نظر گرفتن این موضوع، برای ساخت سیم‌پیچی موتور CDDHM از روشی کاملاً جدید استفاده شده است که در ادامه به تشریح آن خواهیم پرداخت.

هر فاز از سیم‌پیچی سه فاز این موتور از دو نیم فاز تشکیل شده که هریک از آن‌ها بر روی یکی از حلقه‌های بالایی و پایینی استاتور قرار می‌گیرد و در مراحل نهایی مونتاژ موتور دو نیم‌فاز با یکدیگر سری شده و تشکیل یک فاز را خواهند داد. شکل (۳-۵) تصویر یک نیم فاز و شکل (۴-۵) سیم‌پیچی کامل شده‌ی موتور CDDHM را نشان می‌دهد.

این نوع سیم‌پیچی دارای ویژگی‌هایی است که در زیر به آن‌ها اشاره می‌شود.

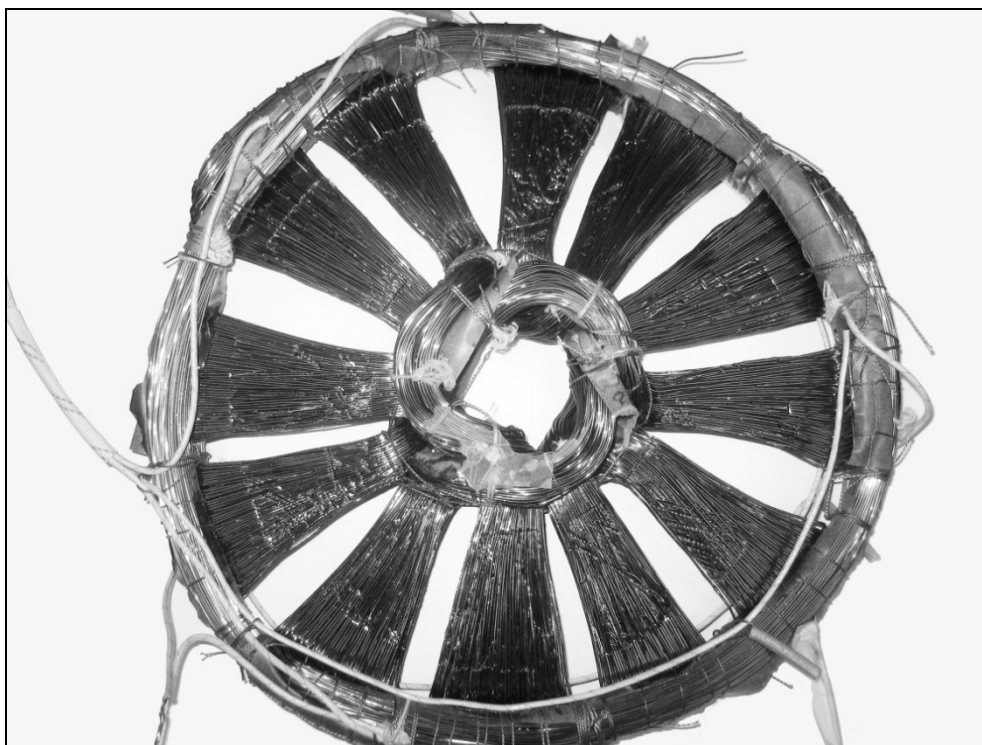
(۱) در هر نیم‌فاز، سیم‌پیچی دارای کوتاهی گامی به مقدار ۳۰ درجه است که این کوتاهی گام مزایایی چون کاهش طول سیم مصرفی و در نتیجه کاهش مقاومت اهمی و تلفات دارد. از سوی دیگر هنگامی که دو نیم فاز به هم متصل می‌شوند سیم‌پیچی به صورت گام کامل دیده می‌شود.

(۲) در موتور پسماند نوع تخت دو روتوره بدون هسته قسمتی از سیم‌پیچی استاتور در ماشین تولید شار اصلی می‌کند که در میان دو دیسک روتور قرار می‌گیرند. در اثر عبور جریان از قسمتی از سیم‌پیچی که در محیط داخلی و خارجی استاتور قرار دارد، نیرویی به سیم‌ها وارد می‌گردد. طراحی این سیم‌پیچ به گونه‌ای انجام شده است که با توجه به جهت جریان در هر نیم فاز، نیروهای وارد به سیم‌ها یکدیگر را خنثی می‌کنند.

به علت ساختار خاص این نوع سیم‌پیچی، نحوه‌ی ساخت ویژه‌ای برای کلاف‌ها ارائه می‌شود. بدین منظور قالبی از جنس چوب برای سیم‌پیچی طراحی شده است. شکل (۵-۵) نمونه‌ای از این قالب را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۵): یک نیم فاز از سیم پیچ



شکل (۴-۵): سیم پیچی کامل شده‌ی استاتور



شکل (۵-۵): قالب سیم‌پیچی

۵-۱. روتور

۵-۱-۱. دیسک‌های روتور

روتور در موتور CDDHM به صورت دو صفحه‌ی دیسک مانند، با شعاع‌های داخلی و خارجی و است که در بالا و پایین سیم‌پیچی استاتور قرار می‌گیرند. تاکنون مواد مغناطیسی و هیستریزیس مختلفی به منظور استفاده در موتورهای هیستریزیس مورد آزمایش قرار گرفته و بکار برده شده است. از جمله‌ی این مواد می‌توان به آلیاژ آهن-۳۶٪ کبالت (Fe-Co) [۷]، آلیاژ آهن کبالت وانادیم یا P6 با ترکیب (Fe-Co-V) [۸]، آلیاژ آهن-۵٪ کبالت (Fe-Co) [۱۰]، آلنیکوها (Fe-Co-Ni-Al) و آلیاژ آهن کرم کبالت (Fe-Cr-Co) [۱۹] اشاره کرد. در موتور نمونه‌ی ساخته‌شده از ماده‌ی مغناطیسی با نام تجاری VCN 150 که آلیاژی با ترکیب Fe-Cr-Ni-Mo-C است برای ساخت روتور استفاده

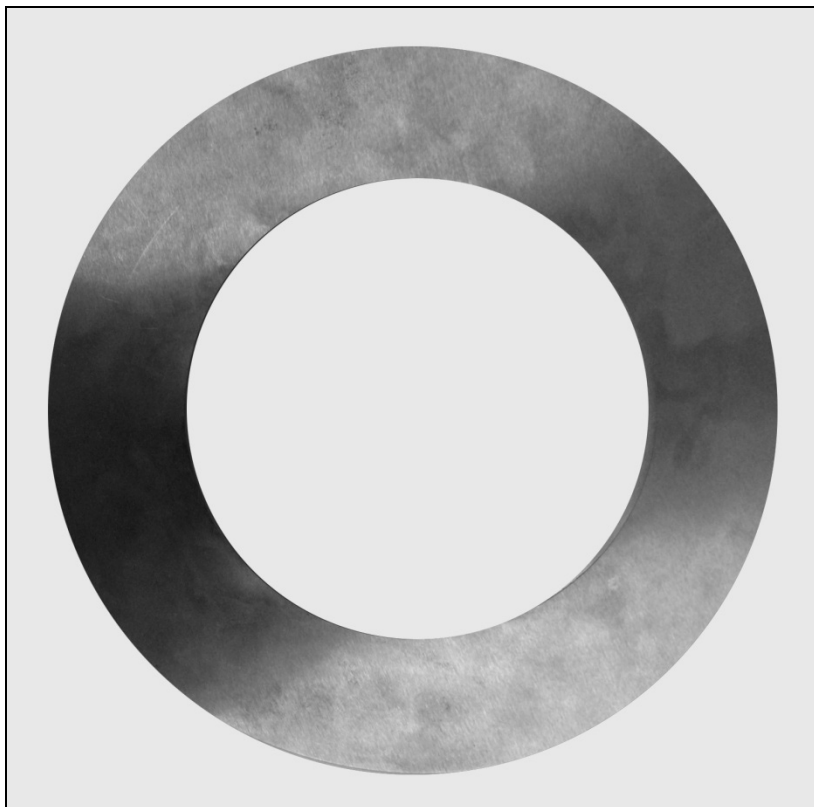
شده است. این ماده دارای مزایایی برای استفاده در موتورهای پسماند تخت دو روتوره بدون هسته می- باشد که در [۳۲] مورد تحلیل قرار گرفته است.

دیسک‌های روتور پس از ماشین‌کاری اولیه (برشکاری و تراشکاری) ، تحت عملیات حرارتی^۱ قرار گرفته‌اند. با انجام عملیات حرارتی، فولاد مورد نظر به حداکثر سختی خود می‌رسد. از آنجایی که موتور نمونه‌ی ساخته شده به منظور کاربردهای سرعت بالا طراحی شده است، تعادل و بالانس دیسک- های روتور از اهمیت خاصی برخوردار است. بدین منظور پس از انجام عملیات حرارتی، دیسک‌ها توسط دستگاهی تحت عنوان سنگ مغناطیسی به اندازه‌ی دقیق خود خواهند رسید. دیسک‌های ساخته شده تلورانسی برابر با پنج هزارم میلی‌متر دارند. شکل (۵-۶) تصویر یکی از روتورها را نشان می‌دهد.

۵-۱-۲. نگهدارنده‌ی روتور

به منظور اتصال دیسک‌های روتور به شفت ماشین از دو قطعه‌ی کاسه‌ای شکل از جنس استیل‌نگیر استفاده شده است. یک سمت این نگهدارنده داخل شعاع داخلی روتور قرار می‌گیرد و طرف دیگر به شفت ماشین متصل می‌شود. شکل (۵-۷) نگهدارنده‌ی روتور را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، روی این قطعه منافذی برای عبور هوا به منظور خنک‌سازی سیم‌پیچی استاتور تعبیه شده است که در بخش ملاحظات خنک‌سازی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. هریک از روتورهای موتور دارای یک نگهدارنده می‌باشند.

^۱ - Heat Treatment



شکل (۵-۶): دیسک روتور



شکل (۵-۷): نگهدارنده‌ی روتور

۵-۲. شفت

شفت موتور بایستی از بالانس بسیار خوبی برخوردار باشد. شفت مورد نظر از جنس فولاد ساخته شده و دارای چندین پله برای قرار گرفتن نگهدارنده‌های روتور و نیز بلبرینگ‌ها می‌باشد. شکل (۵-۸) تصویر شفت موتور CDDHM را نشان می‌دهد.



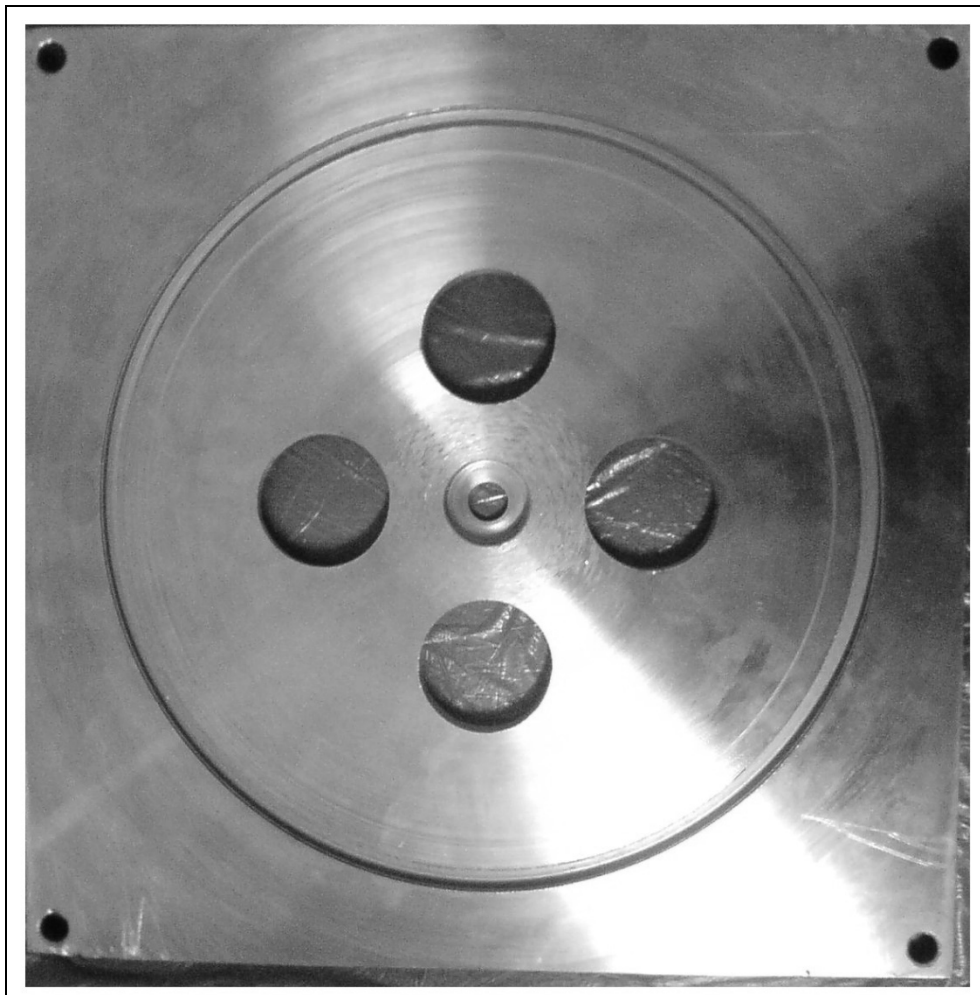
شکل (۵-۸): شفت

۵-۳. دیگر ملاحظات ساخت

۵-۳-۱. صفحه‌ی نگهدارنده استاتور

به منظور ثابت نگاه داشتن دو حلقه‌ی استاتور بر روی یکدیگر و نیز محل قرار دادن بلبرینگ‌ها از دو صفحه از جنس آهن استفاده شده است. استفاده از آهن به دلیل قیمت مناسب آن نسبت به دیگر مواد موجود بوده است که البته باعث افزایش وزن موتور شده که این موضوع یکی از معایب

موتور نمونه‌ی ساخته شده است. برای رفع این مشکل می‌توان از مواد سبکتری همچون آلومینیوم استفاده نمود. شکل (۵-۹) یکی از این صفحات را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۹): صفحه‌ی نگهدارنده‌ی استاتور

۵-۳-۲. سیستم خنک‌سازی

بعد از طراحی الکترومغناطیسی، طراحی مکانیکی و گرمایی ماشین از یک درجه‌ی اهمیت برخوردارند. در حقیقت مدلسازی گرمایی یک ماشین الکتریکی، غیرخطی‌تر از مدلسازی الکترومغناطیسی آن است. همچنین هر طراحی ماشین الکتریکی شدیداً تحت تاثیر محدودیت‌های

گرمایی است. به گونه‌ای که انتقال حرارت و توزیع دما در موتورها دو هدف عمده‌ی طراحی گرمایی می‌باشد.

انتقال گرما در ماشین‌ها، به سطح و مکان تلفات، هندسه‌ی ماشین و روش خنک سازی بستگی دارد.

روش های خنک کاری به دو دسته‌ی مستقیم و غیر مستقیم تقسیم بندی می‌شود.

در روش خنک کاری مستقیم، هوای محیط در تماس مستقیم با منابع گرما (سیم پیچ و هسته) می‌باشد. در حالی که در روش خنک کاری غیر مستقیم، هدایت گرما به محفظه‌ای کاملاً بسته صورت گرفته و سپس بوسیله‌ی همرفت یا بوسیله‌ی یک مدار خنک کننده داخلی از سطح محفظه به هوای محیط انتقال می‌یابد.

۵-۳-۲-۱. استانداردهای خنک سازی ماشین های الکتریکی:

بر اساس استاندارد بین المللی (IEC 34-6) توصیف روش مورد استفاده در خنک سازی ماشین‌های الکتریکی از طریق هوا توسط حروف IC همراه با دو عدد دنبال آن صورت می‌گیرد. برای مثال، IC00 به ماشینی اشاره دارد که با گردش آزاد هوا خنک می‌شود (صفر اول) و حرکت هوا براساس اختلاف دما یا همرفت آزاد صورت می‌گیرد. نمونه‌هایی از روش‌های خنک‌سازی که معمول تر می‌باشند عبارتند از:

IC01 یا IC1 تهویه‌ی عادی.

IC11 یا IC1 تهویه از طریق مجرا و کانال ایجاد شده در ماشین.

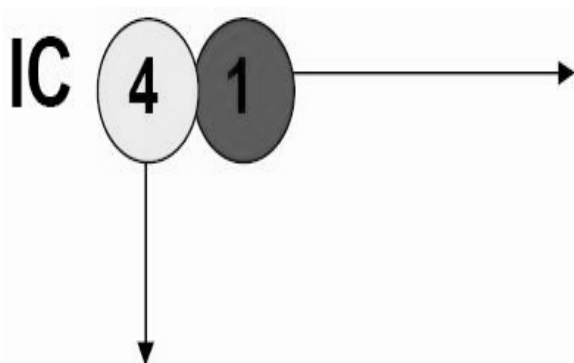
IC41 یا IC4 ماشین خنک شده با فن محصور.

IC05 تهویه‌ی عادی همراه با فن تغذیه‌ی مجزا.

IC17 تهویه از طریق مجرا و کانال ایجاد شده در ماشین همراه با فن تغذیه‌ی مجزا.

IC48 خنک‌سازی سطح ماشین با جریان هوا.

شکل (۵-۱۰) یک نمونه از استاندارد بیان شده را نشان می‌دهد.



عدد دوم نحوه تامین انرژی جهت بد گردش درآوردن هوای خنک را نشان می‌دهد. این عدد از ۰ برای همرفت آزاد که در آن برای بد گردش درآوردن هوای خنک، انرژی صرف نمی‌شود، تا ۸ برای حالت جابجایی سازی نسبی نظیر وقتی که موتور، یک فن را می‌گرداند و از طریق جریان ایجاد شده توسط فن، خنک می‌شود، تغییر می‌کند.

عدد اول آرایش مدار خنک‌سازی را مشخص می‌کند. این عدد بین ۰ تا ۹ تغییر می‌کند که ۰ برای حالت گردش آزاد هوا و ۹ هتلمی که یک مبدل گرمایی جداگانه نصب شده است، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

شکل (۵-۱۰): نحوه‌ی نمایش روش خنک‌سازی

برای خنک‌سازی موتور نمونه‌ی ساخته شده از معمول‌ترین روش خنک‌سازی که خنک‌سازی از طریق عبور جریان هوا می‌باشد، استفاده شده است. برای این منظور بر روی صفحات نگهدارنده‌ی استاتور و همچنین نگهدارنده‌های روتور منافذی برای عبور جریان هوا در نظر گرفته شده است. با چرخش روتورها، هوا به داخل موتور مکش شده و پس از عبور از روی سیم‌پیچی‌های استاتور و خنک‌سازی آن‌ها، از سمت دیگر ماشین خارج می‌شود. در نتیجه روش خنک‌سازی این ماشین را با استاندارد IC01 نشان می‌دهیم.

۳-۳-۵. پایه‌های استاتور

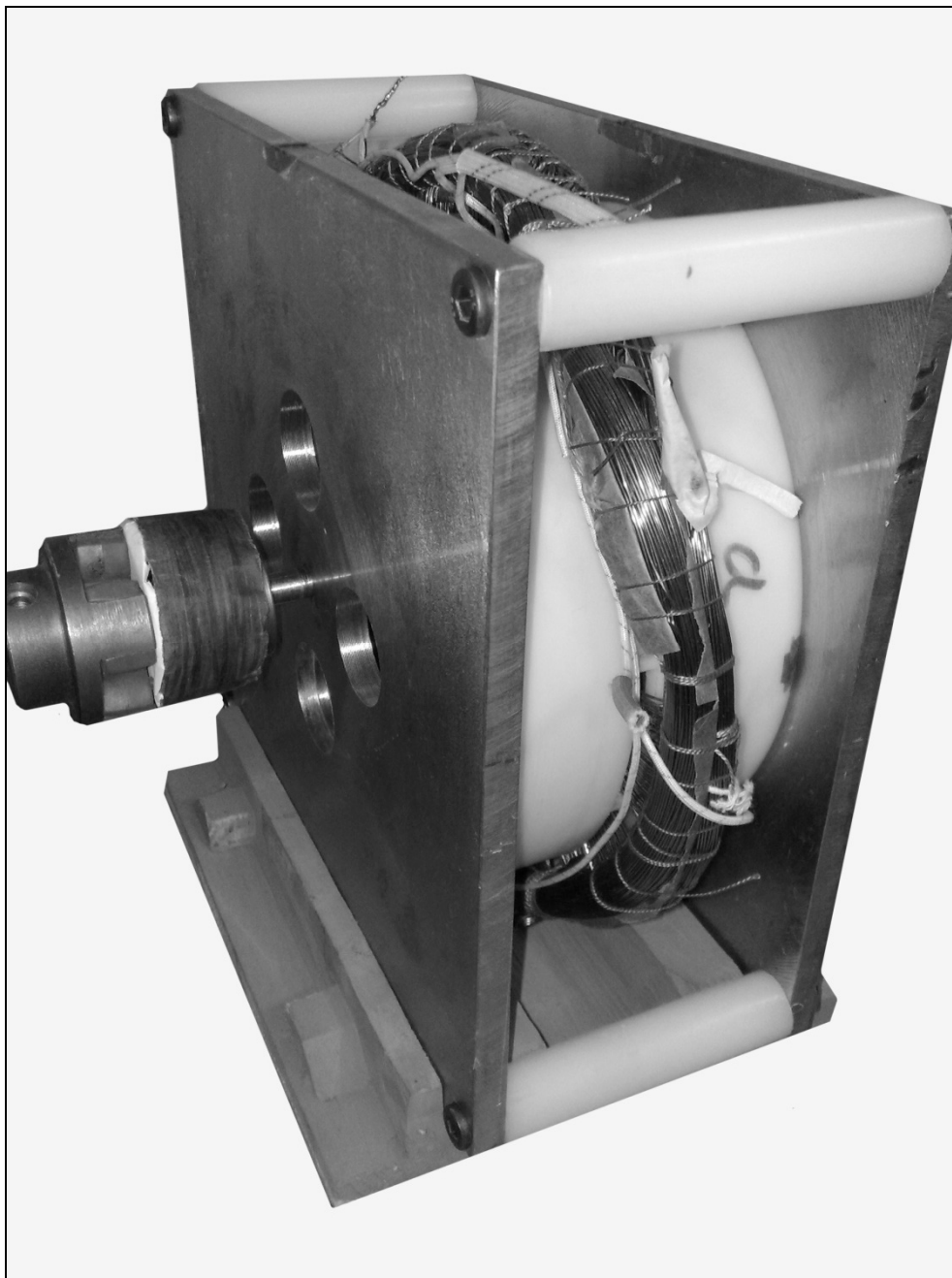
برای آنکه فاصله‌ی بین دو صفحه‌ی نگهدارنده کاملاً یکنواخت بوده و موتور دچار عدم تعادل و بالانس نشود، از پایه‌هایی از جنس پلی‌اتیلن^۱ استفاده شده‌است. این پایه‌ها در شکل (۵-۱۱) نشان داده شده‌اند.



شکل (۵-۱۱): پایه‌های استاتور

با مونتاژ دقیق و نسبتاً آسان قطعات بالا موتور بهینه‌ی CDDHM ساخته می‌شود که در شکل (۵-۱۲) نشان داده شده است.

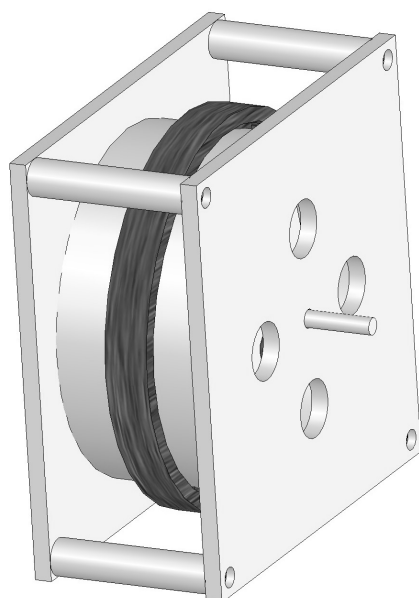
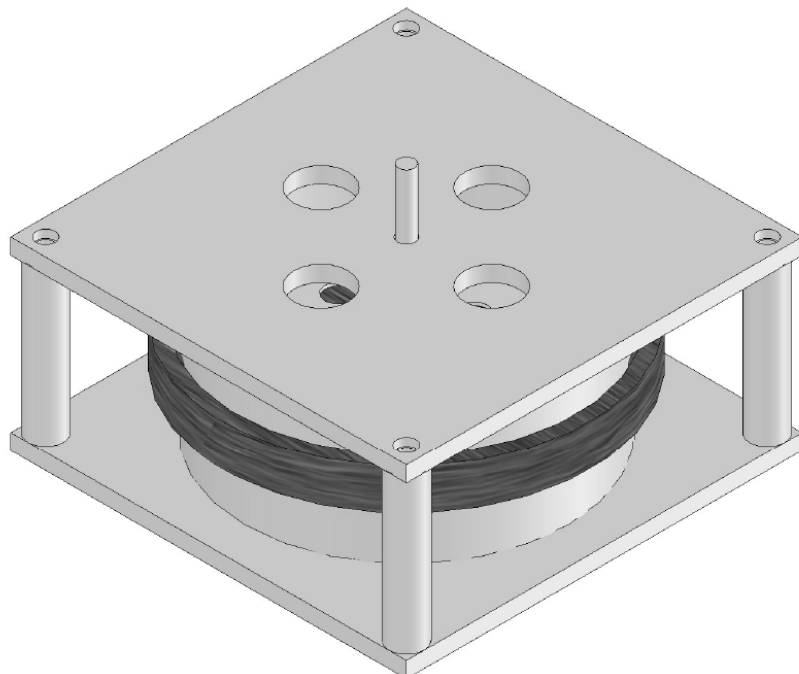
^۱ - Polyethylene

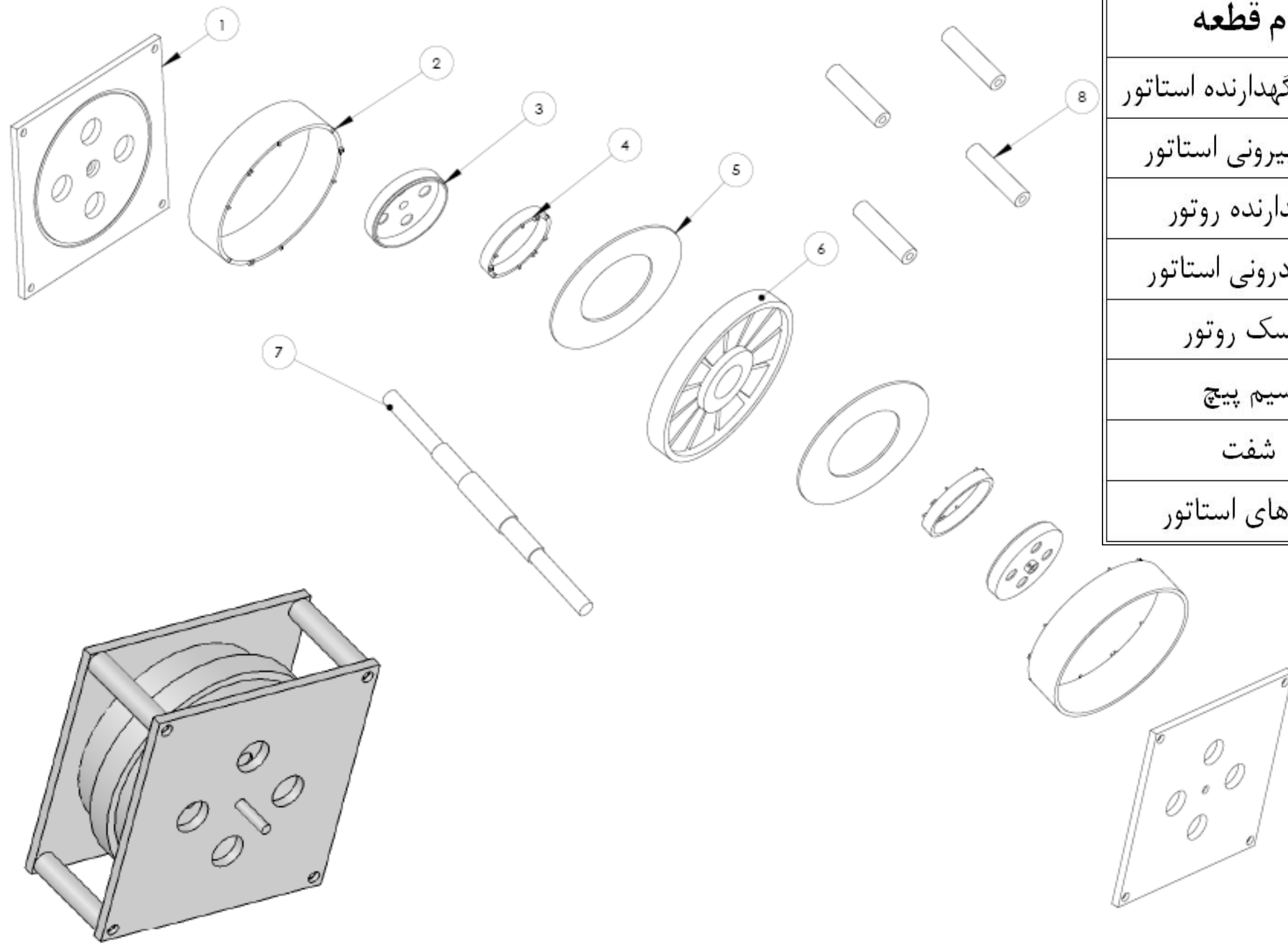


شکل (۵-۱۲): موتور CDDHM بهینه

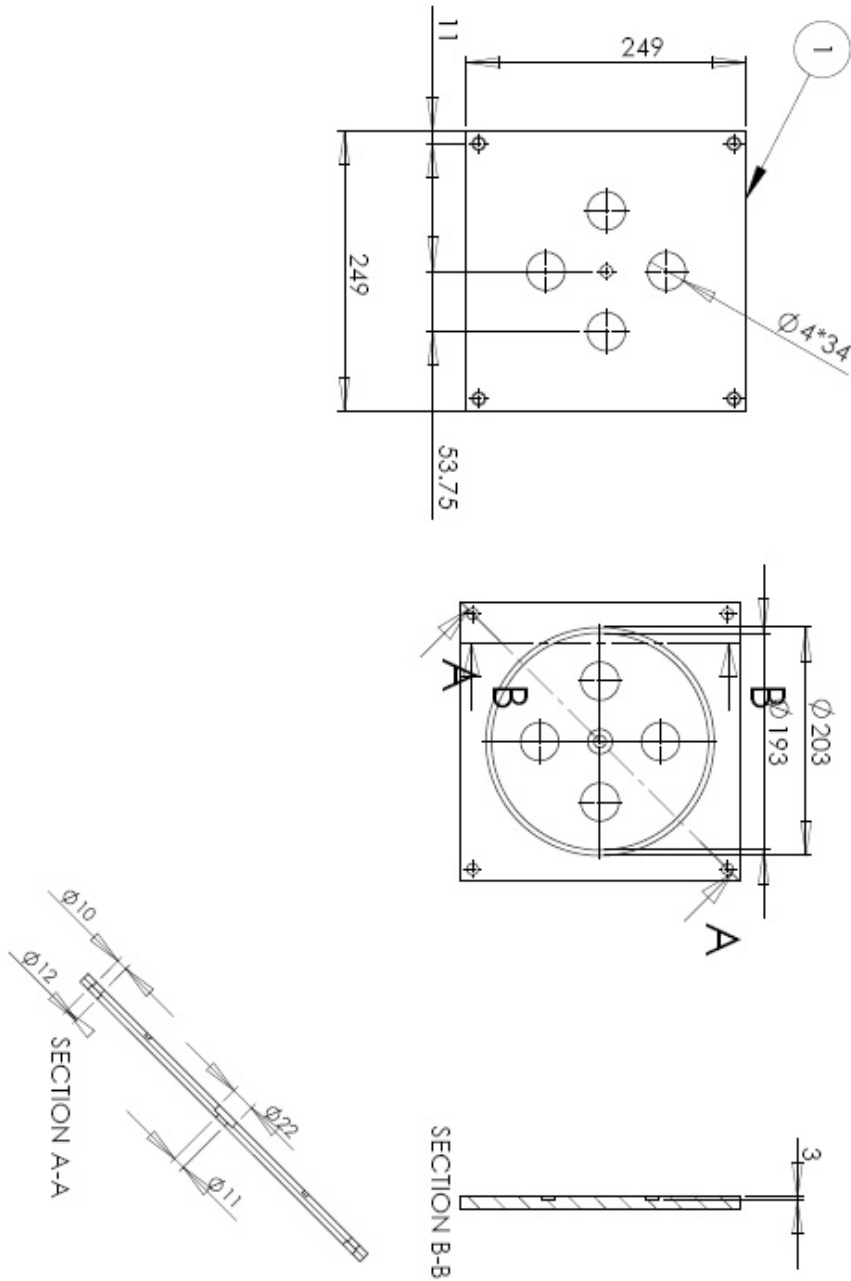
در پایان ذکر این نکته لازم می‌باشد که تمامی مراحل ساخت ارائه شده در این پایان‌نامه با توجه به امکانات صنعتی و مالی محدود انجام گرفته است که این موضوع تا حدی بر عملکرد مکانیکی موتور تاثیرگذار بوده است.

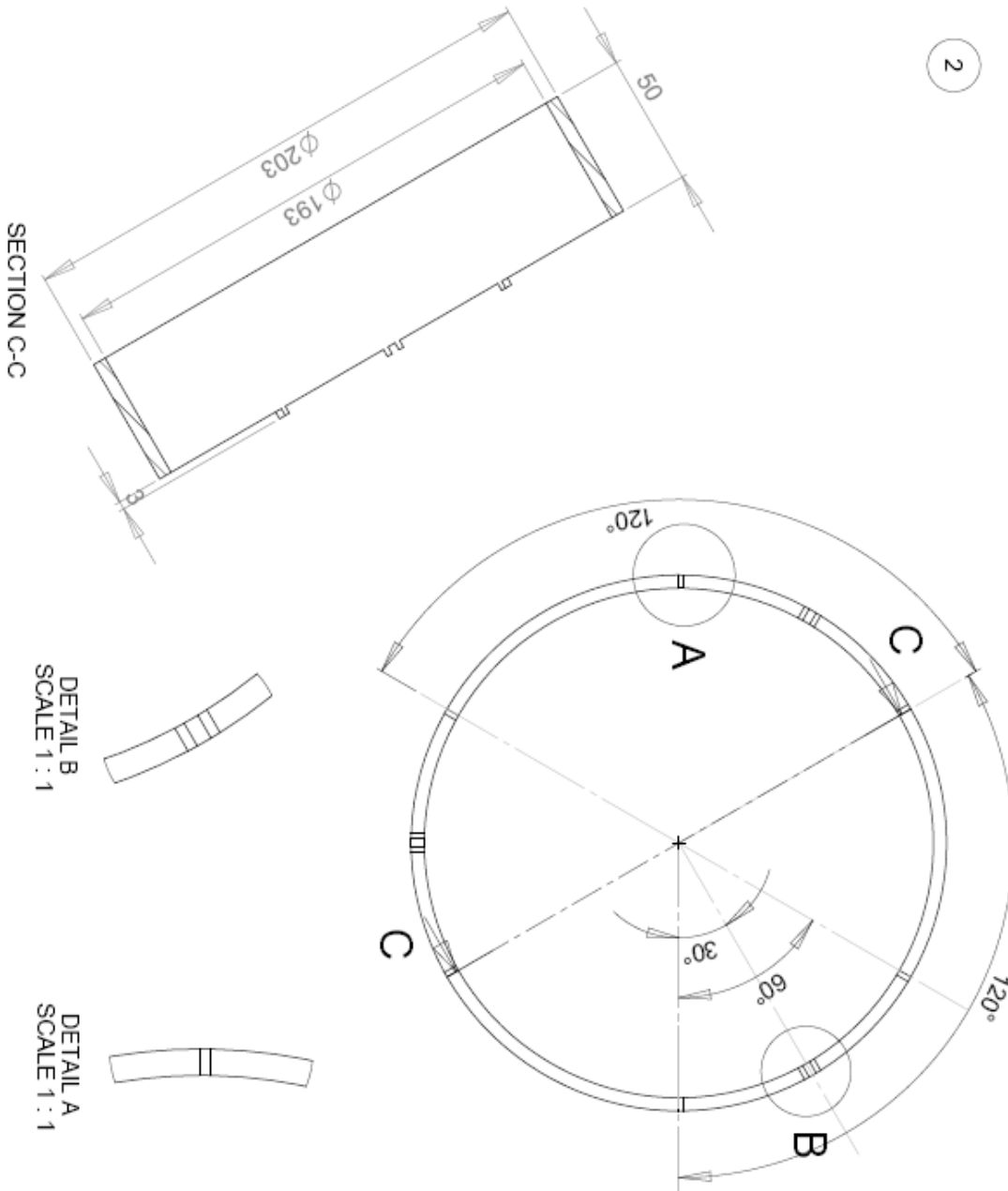
۴-۵. نقشه‌های طراحی و مونتاژ موتور CDDHM بهینه



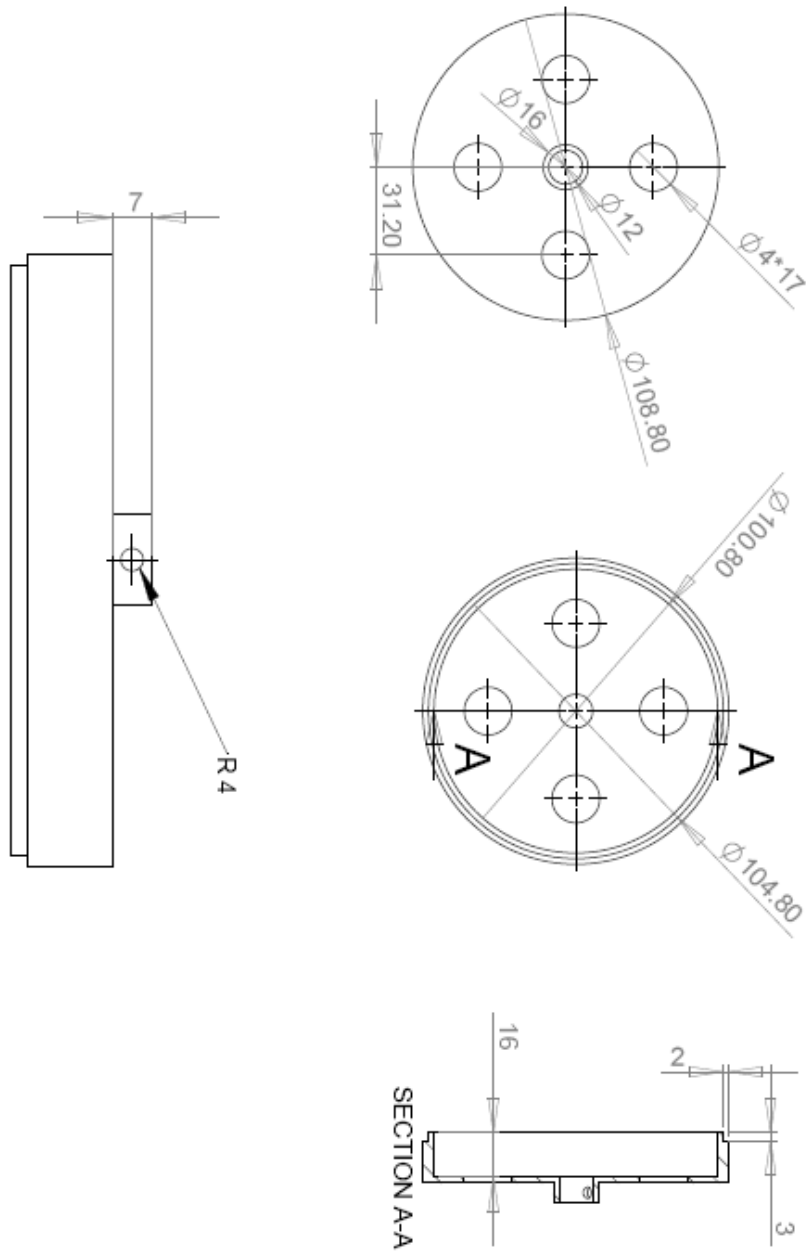


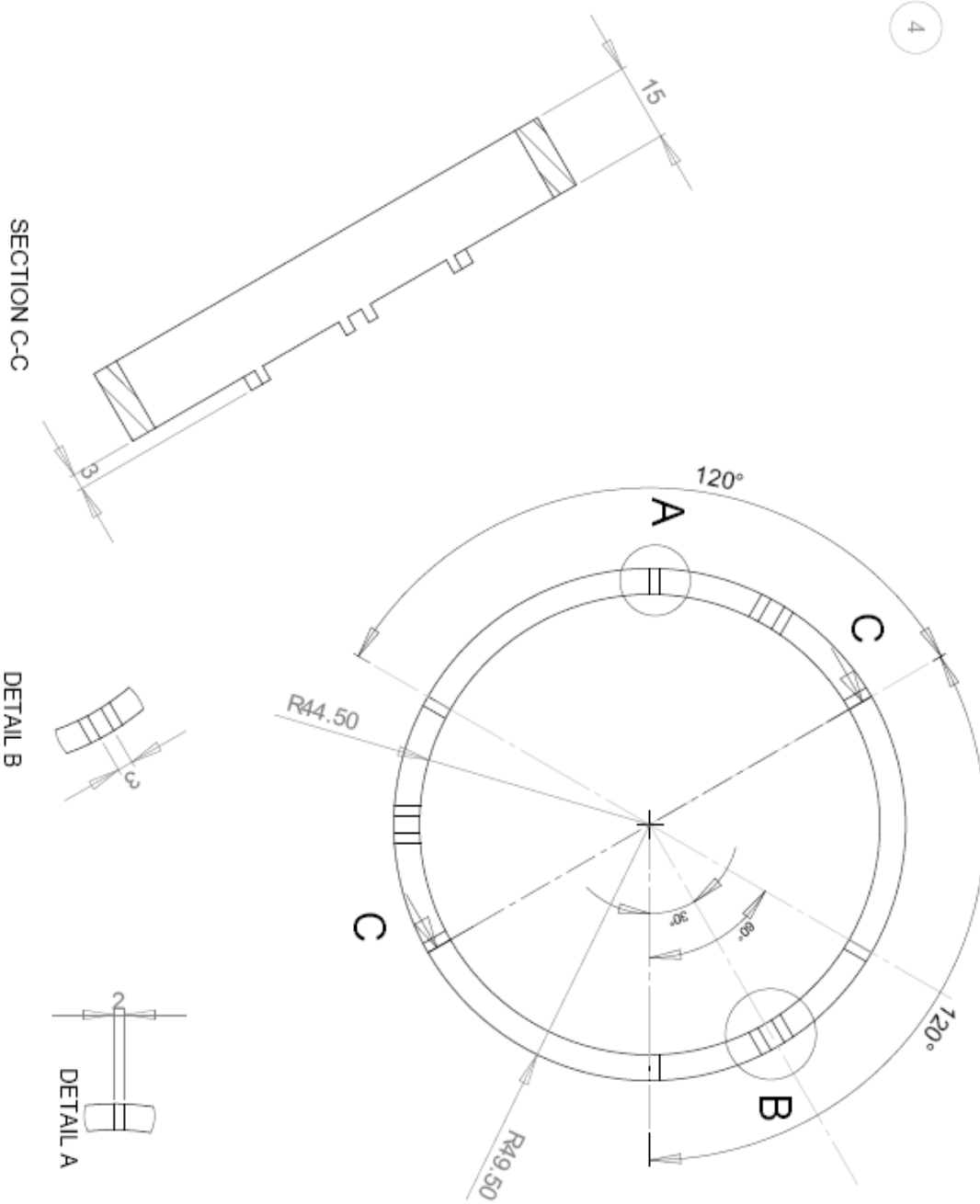
شماره قطعه	نام قطعه
۱	صفحه نگهدارنده استاتور
۲	حلقه بیرونی استاتور
۳	نگهدارنده روتور
۴	حلقه درونی استاتور
۵	دیسک روتور
۶	سیم پیچ
۷	شفت
۸	پایه های استاتور

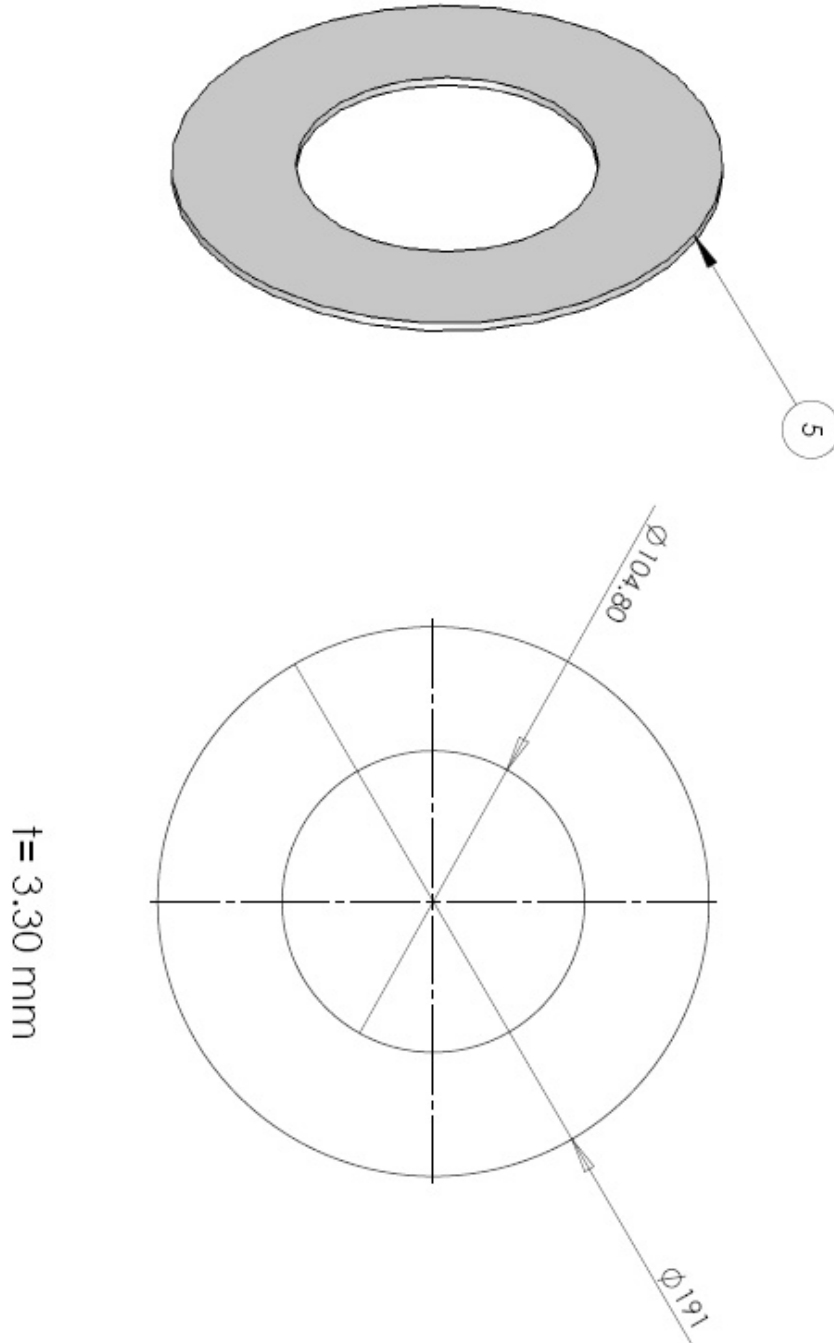


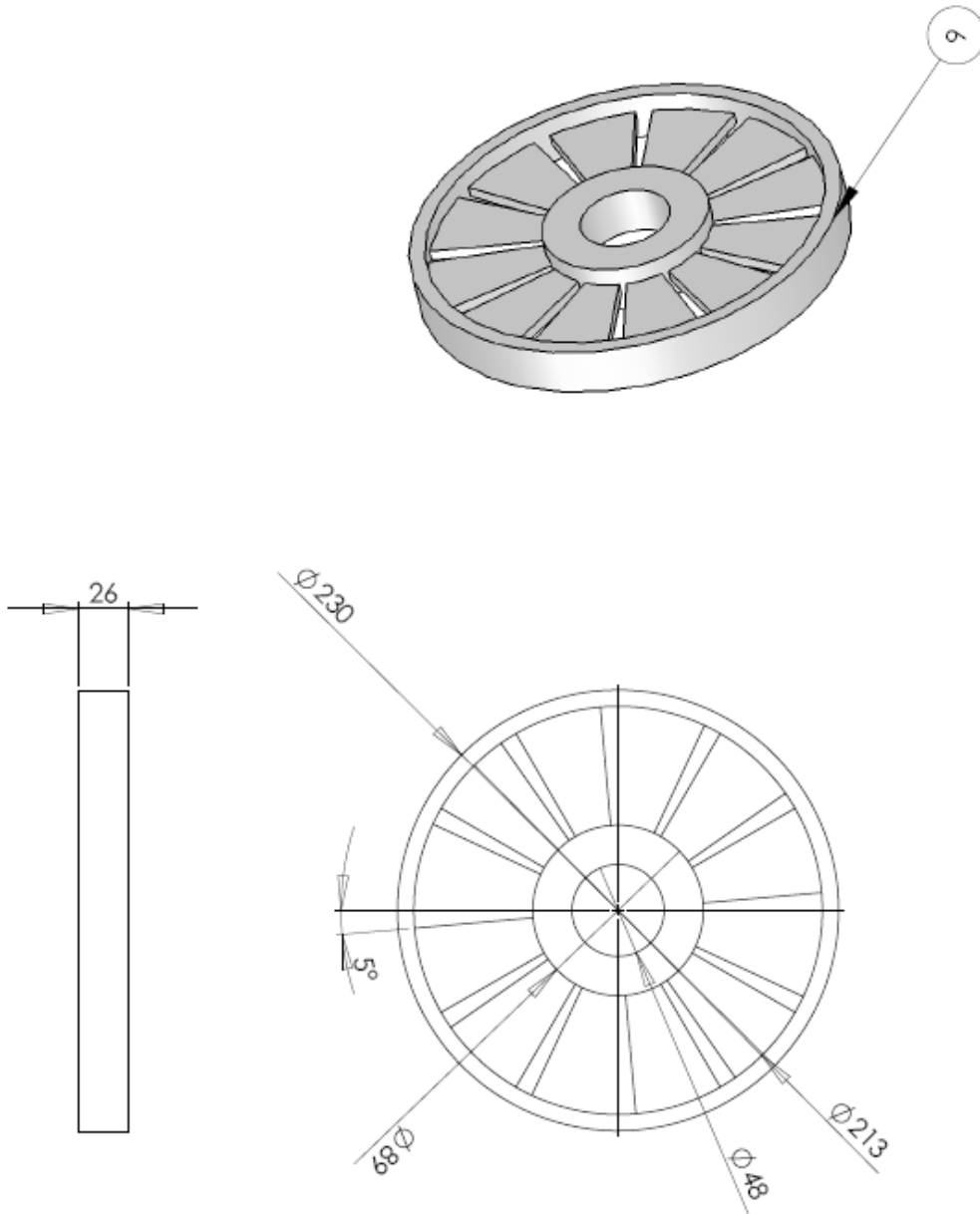


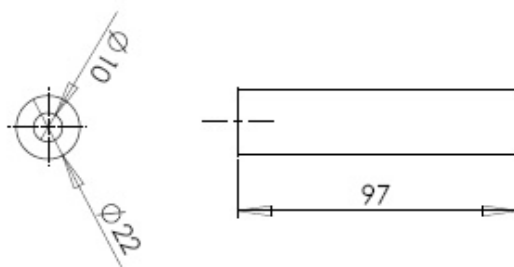
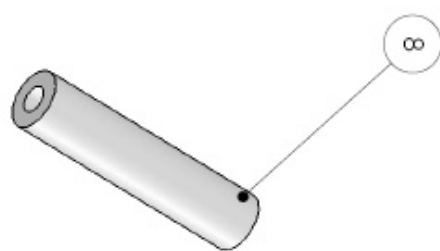
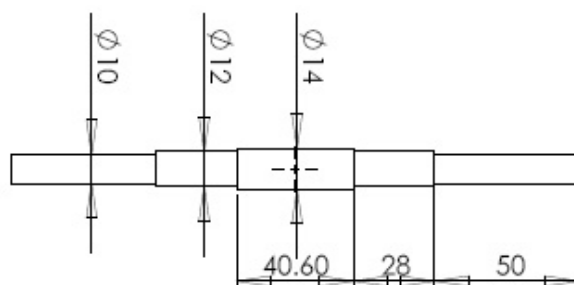
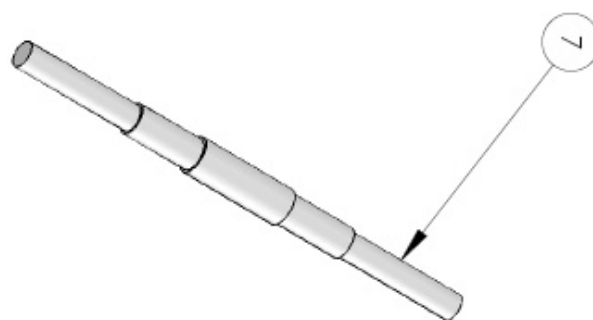
3











فصل هشتم

تست‌های عملی

و

نتایج آن‌ها

۶-۱. مقدمه

در این فصل برای بررسی بهتر و دقیق‌تر عملکرد موتور هیستریزیس نوع تخت دو روتوره بدون هسته، مجموعه‌ای از آزمایش‌های ممکن طراحی شده و بر روی موتور ساخته‌شده‌ی مورد نظر پیاده‌سازی می‌شود.

همچنین برای اندازه‌گیری و ثبت مقادیر ولتاژ و جریان از ماژول اکتساب داده مدل Advantech USB-4716 استفاده شده است.

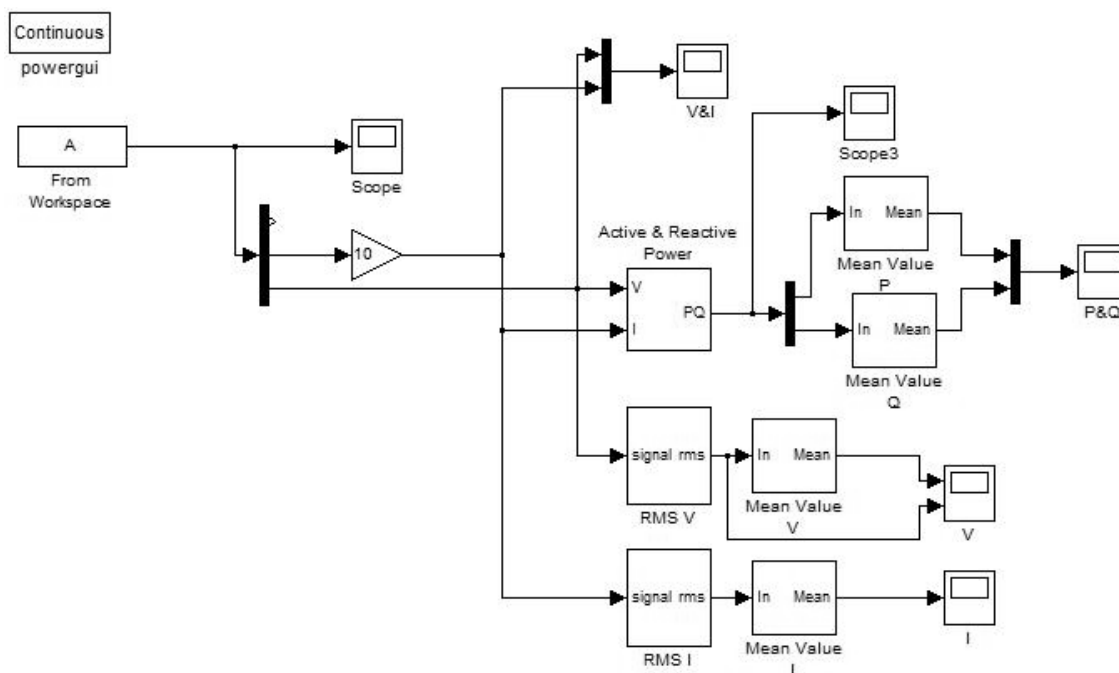
از آنجائیکه شکل موج خروجی درایور مورد استفاده (Vynckier VSD-200) بصورت موج PWM بوده و دارای فرکانس سوئیچینگ نسبتاً بالایی (10 KHz) است، برای ثبت دقیق این شکل موج، استفاده از نرخ نمونه برداری بالا اجتناب ناپذیر خواهد بود. از سوی دیگر با توجه به زمان نسبتاً طولانی برخی از آزمایش‌ها (حدود چندین دقیقه)، نرخ نمونه برداری بالا باعث ایجاد حجم بسیار بالایی از داده‌ها می‌شود. بدین ترتیب و با در نظر گرفتن امکانات سخت‌افزاری موجود، ثبت و ذخیره‌سازی این حجم از اطلاعات بسیار دشوار است. برای غلبه بر این مشکل و با توجه به گستره‌ی مجاز ورودی ماژول اکتساب داده از یک مدار RC استفاده شده است. در این مدار پس از فیلتر شکل موج اصلی، می‌توان با نرخ نمونه‌برداری کمتری به اطلاعات شکل موج اصلی دست پیدا نمود.

برای نمایش داده‌ها از نرم‌افزار Wave Scan استفاده شده است. این نرم‌افزار قابلیت تبدیل اطلاعات خوانده شده از ماژول اکتساب داده را به قالب یک فایل نرم‌افزار Exel دارد. شکل (۶-۱) یک شکل موج نمونه را در فرکانس ۶۰ هرتز در محیط نرم‌افزار Wave Scan نشان می‌دهد.

سپس مقادیر ثبت شده در فایل Exel توسط نرم‌افزار MATLAB فراخوانی شده و توسط بلوک‌هایی در محیط SIMULINK پردازش می‌شوند (شکل (۶-۲)).

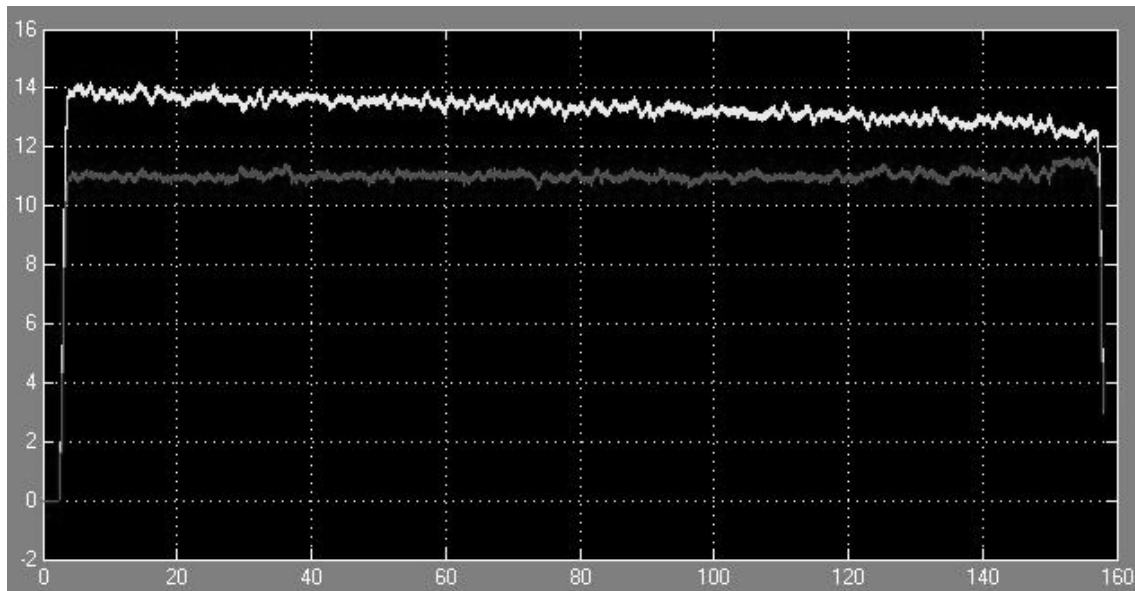


شکل (۶-۱): محیط نرم‌افزار Wave Scan

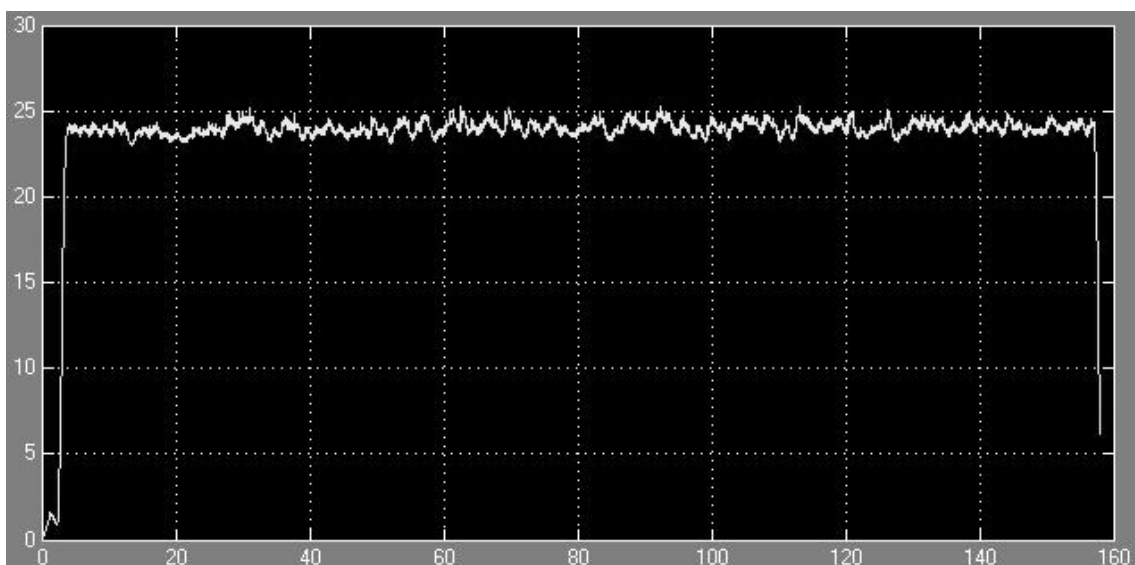


شکل (۶-۲): MATLAB/SIMULINK

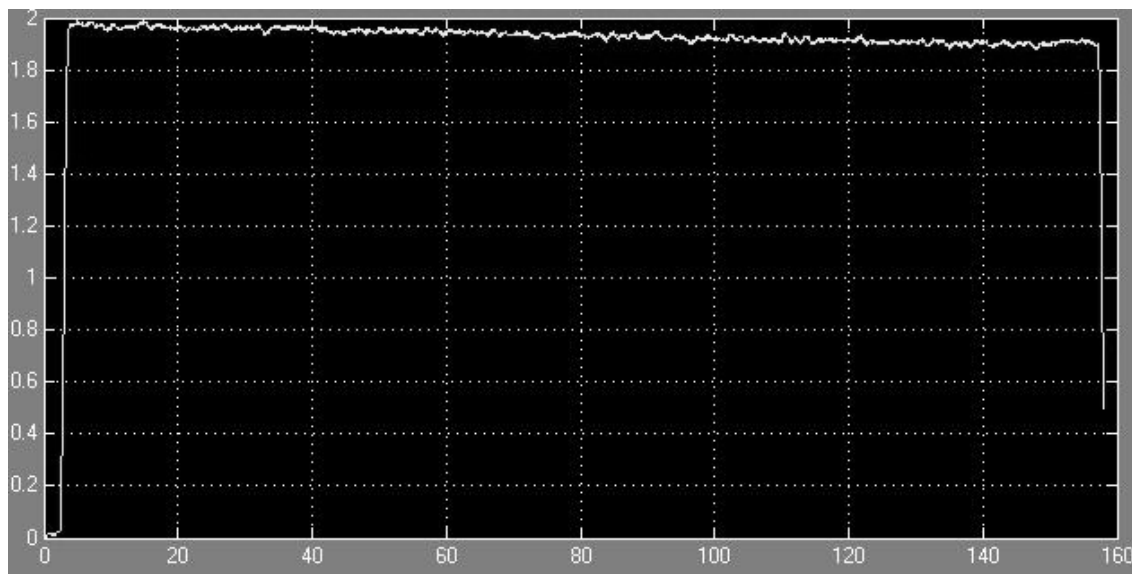
شکل‌های (۳-۶) تا (۵-۶) به ترتیب مقادیر توان اکتیو و راکتیو، ولتاژ فاز و جریان فاز را در فرکانس ۶۰ هرتز نشان می‌دهند.



شکل (۳-۶): توان اکتیو و راکتیو در فرکانس ۶۰ هرتز



شکل (۴-۶): ولتاژ فاز در فرکانس ۶۰ هرتز



شکل (۶-۵): جریان فاز در فرکانس ۶۰ هرتز

مقادیر ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده به صورت متوسط مقدار موثر شکل موج می‌باشند.

۶-۲. مطالعه و محاسبه زمان راه‌اندازی^۱ موتور هیستریزی

این آزمایش به منظور دستیابی به دو هدف زیر انجام می‌گیرد.

(۱) مطالعه رفتار موتور هیستریزی بهینه‌ی مورد نظر ساخته شده، از نظر زمان راه‌اندازی و نیز

جریان راه‌اندازی^۲ به ازای فرکانس‌ها و ولتاژهای مختلف.

(۲) محاسبه ولتاژ لحظه‌ی ورود به سنکرون به منظور صحت‌گذاری^۳ مدار معادل پیشنهاد شده.

به منظور هدف اول، سیستم مورد نظر را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

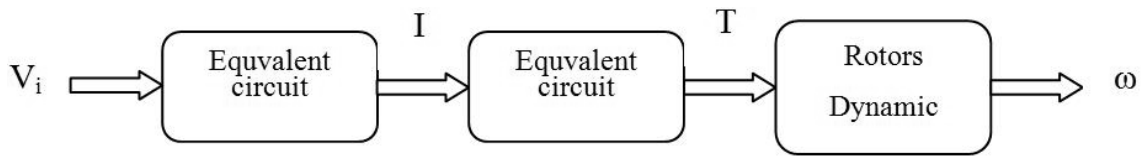


^۱ - Starting Time

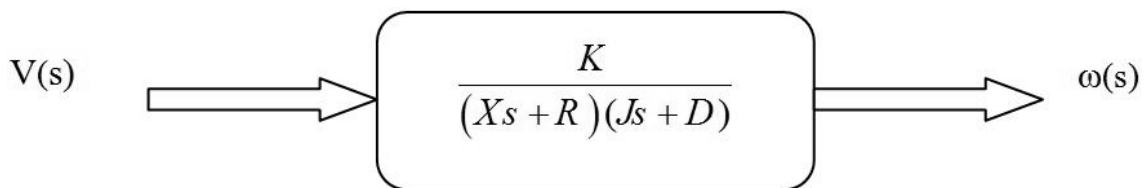
^۲ - Starting Current

^۳ - Validation

این سیستم به صورت بلوک دیاگرام زیر قابل تجزیه است:



اگر مدار معادل را در حالت کلی متشکل از یک مقاومت (R) و یک اندوکتانس (L) در نظر بگیریم، مدار معادل (تونن) و دینامیک روتور با سیستم‌های درجه یک قابل بیان هستند.



با توجه به رابطه‌ی بالا، داریم:

$$\omega(s) = \frac{K}{(Xs + R)(Js + D)} V(s) \quad (1-6)$$

از آنجایی که ولتاژ به صورت ناگهانی به موتور اعمال می‌شود، اثر آن را به صورت یک تابع پله در نظر

می‌گیریم. پس:

$$V(s) = \frac{V_0}{s} \quad (2-6)$$

$$\omega(s) = \frac{V_0 K}{s(Xs + R)(Js + D)} = \frac{A_1}{s + \frac{R}{X}} + \frac{A_2}{s + \frac{D}{J}} + \frac{A_3}{s} \quad (3-6)$$

با استفاده از عکس تبدیل لاپلاس برای رابطه‌ی فوق، تابع سرعت در حوزه زمان بصورت زیر

بدست می‌آید:

$$\omega(t) = A_0 + A_1 e^{-k_1 t} + A_2 e^{-k_2 t} \quad (4-6)$$

در ساختار روتور این ماشین از دیسک‌های نسبتاً سنگین و با اینرسی بالا استفاده شده است. لذا ثابت زمانی دینامیک روتور بسیار بیشتر از ثابت زمانی مدار معادل بوده و در نتیجه معادله سرعت به صورت مجموع یک جمله‌ی ثابت و یک جمله‌ی نمایی قابل تقریب است.

$$\omega(t) = A_0 + A_1 e^{-k_1 t} \quad (5-6)$$

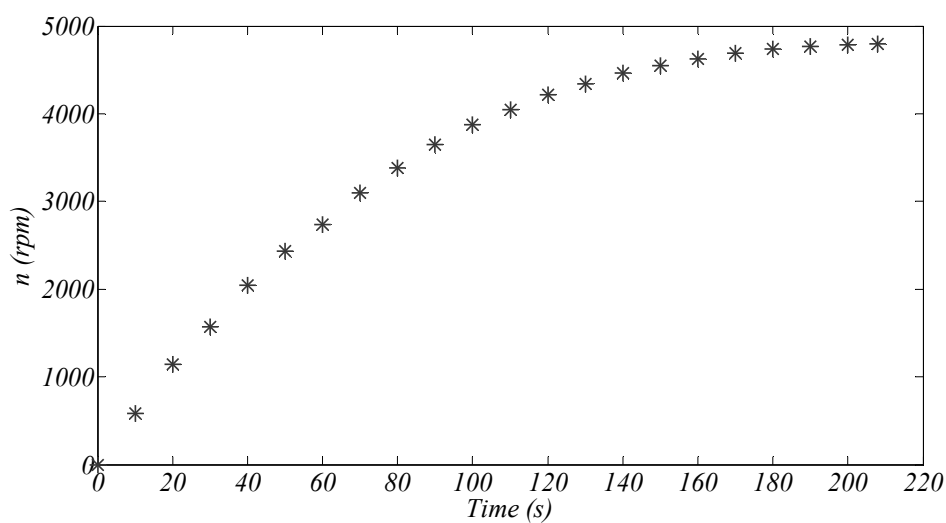
برای انجام آزمایش و تعیین پارامترهای رابطه‌ی بالا، به ازای فرکانس‌های مشخص و مختلف، ولتاژهایی با اندازه‌ی متفاوت و به صورت ناگهانی به سیستم اعمال می‌شود و سرعت در لحظات مختلف ثبت می‌شود. شکل (۶-۶) مقادیر سرعت بر حسب زمان را برای فرکانس نمونه‌ی ۸۰ هرتز و ولتاژ فاز اعمالی ۳۲.۵۶ ولت نشان می‌دهد.

در این مرحله با استفاده از الگوریتم ژنتیک (که از دقت بسیار بالایی به منظور برازش برخوردار است)، رابطه (۵-۶) را بر نقاط بدست آمده از آزمایش برازش کرده و ضرایب این رابطه را جهت تعیین معادله حاکم بر سرعت بر حسب زمان در ولتاژ و فرکانس‌های مختلف بدست می‌آید. برای نمونه در فرکانس ۸۰ هرتز و ولتاژ ۳۲.۵۶ ولت داریم:

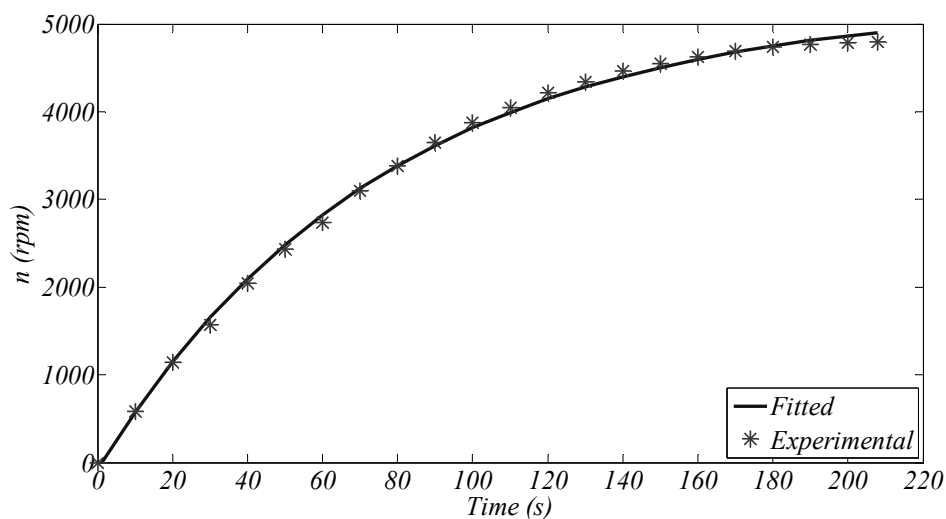
$$\omega(t) = 5334.10 e^{-0.0130t} + 5254.10 \quad (6-6)$$

شکل (۷-۶) منحنی حاصل از آزمایش و نیز منحنی برازش شده را نشان می‌دهد.

معادلاتی مشابه این معادله برای فرکانس‌های مختلف و نیز ولتاژهای مختلف بدست خواهد آمد.

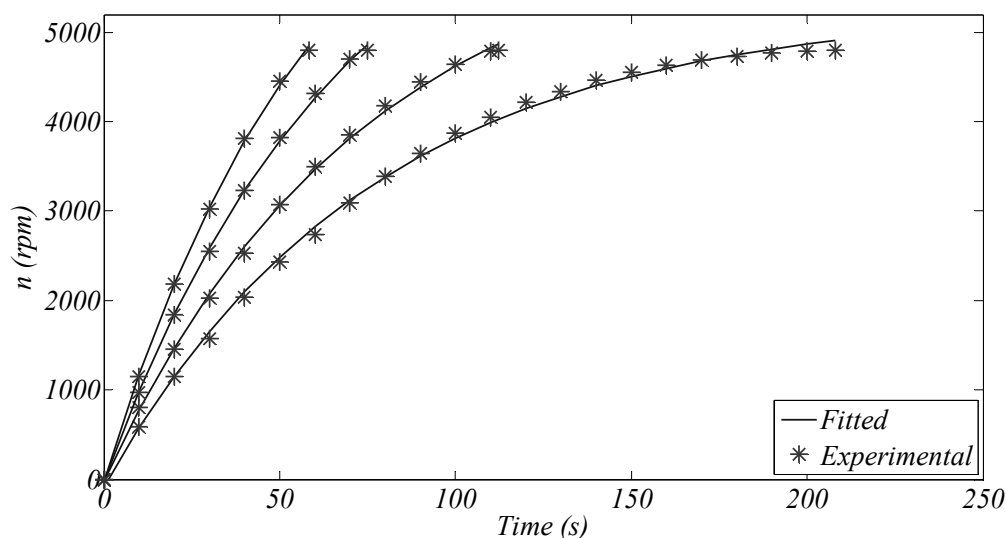


شکل (۶-۶): مقادیر سرعت بر حسب زمان در فرکانس ۸۰ هرتز



شکل (۶-۷): منحنی برازش شده بر روی مقادیر سرعت در فرکانس ۸۰ هرتز

در یک فرکانس ثابت با افزایش ولتاژ ورودی به موتور، زمان راه‌اندازی کم می‌شود. علاوه بر این موضوع همانطور که از شکل (۶-۸) مشاهده می‌شود، شیب منحنی در لحظه ورود به سنکرون برای ولتاژهای مختلف متفاوت است.



شکل (۶-۸): منحنی های برازش شده سرعت در فرکانس ۸۰ هرتز در ولتاژهای مختلف

برای مقایسه‌ی زمان راه‌اندازی موتور CDDHM باید شرایط تست برای فرکانس‌های مختلف یکسان باشد. برای یکسان‌سازی شرایط تست به تعریف پارامتری به نام شیب ورود به سرعت سنکرون [۳۳] می‌پردازیم.

شیب ورود به سرعت سنکرون (K)، عبارت است از مشتق معادله‌ی منحنی سرعت-زمان برازش شده بر نقاط اندازه‌گیری شده، در لحظه‌ی ورود به سرعت سنکرون.

مقادیر ضرایب معادله منحنی برازش شده و نیز مقادیر K برای فرکانس ۸۰ هرتز در جدول (۶-۱) آورده شده است.

در این مرحله، یک معادله‌ی خط بر روی مقادیر بدست آمده برای K در هر یک از ولتاژهای مورد آزمایش برازش می‌شود. شکل (۶-۹) مقادیر K و نیز خط برازش شده بر آنها را برای فرکانس ۸۰ هرتز نشان می‌دهد.

¹ - Kappa

جدول (۶-۱): ضرایب معادله برازش برای فرکانس ۸۰ هرتز در ولتاژهای مختلف

$f = 80 \text{ Hz}$	A_1	A_0	k_1	κ
$V = 32.56 \text{ v}$	5334.1096	5254.1089	0.0131	4.5842
$V = 35.96 \text{ v}$	6239.0159	6220.3058	0.0136	18.4024
$V = 39.89 \text{ v}$	7294.7326	7277.4423	0.0147	35.5938
$V = 43.41 \text{ v}$	7938.0096	7919.4439	0.0163	49.9415

اکنون مراحل فوق برای تمامی فرکانس‌های قابل آزمایش (۵۰-۱۲۰ هرتز) تکرار می‌شود.

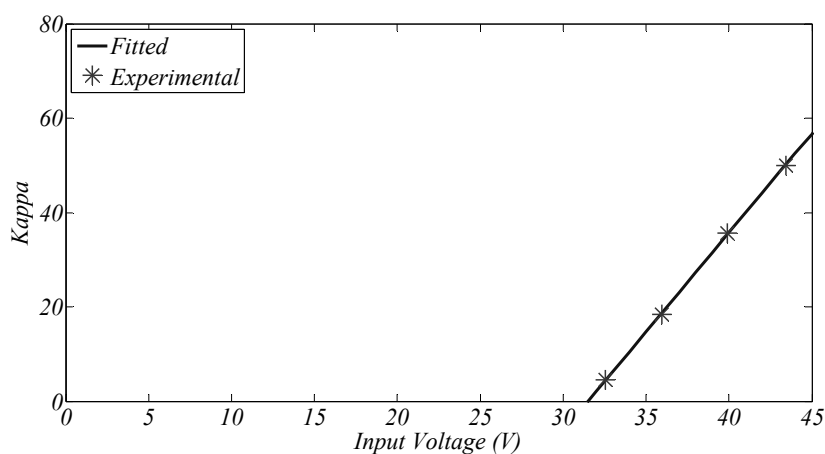
نتیجه‌ی این آزمایش‌ها در شکل (۶-۱۰) نشان داده شده است.

در این مرحله به منظور یکسان‌سازی شرایط تست و دستیابی به هدف اول، خطی با معادله‌ی

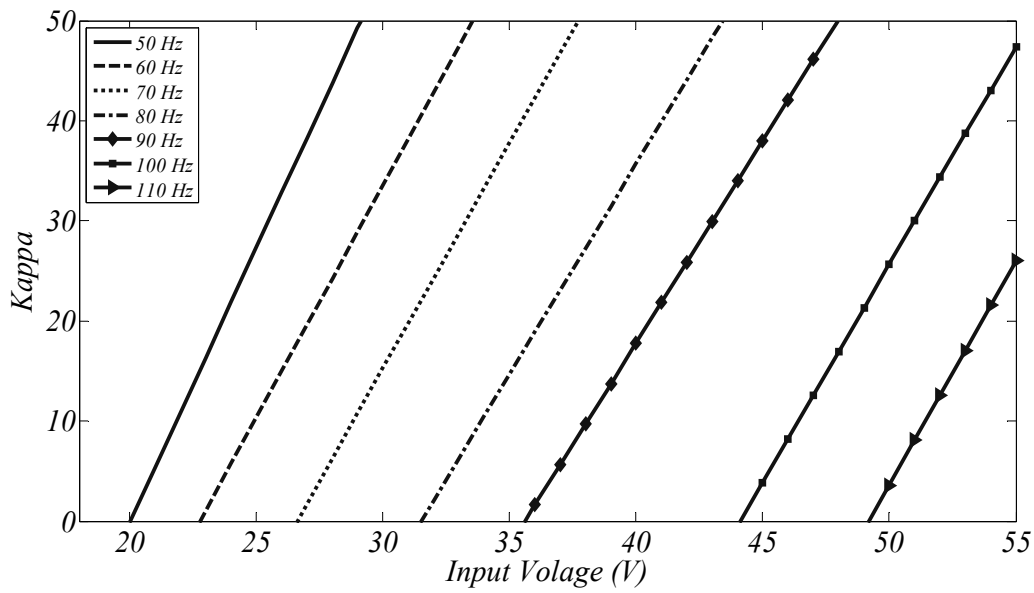
$\kappa = 25$ بر روی منحنی‌های بالا رسم می‌کنیم (شکل (۶-۱۱)) و ولتاژ محل تلاقی این خط با خطوط

حاصل از برازش را به عنوان ولتاژ تست راه‌اندازی در نظر می‌گیریم. جدول (۶-۲) مقادیر این ولتاژها را

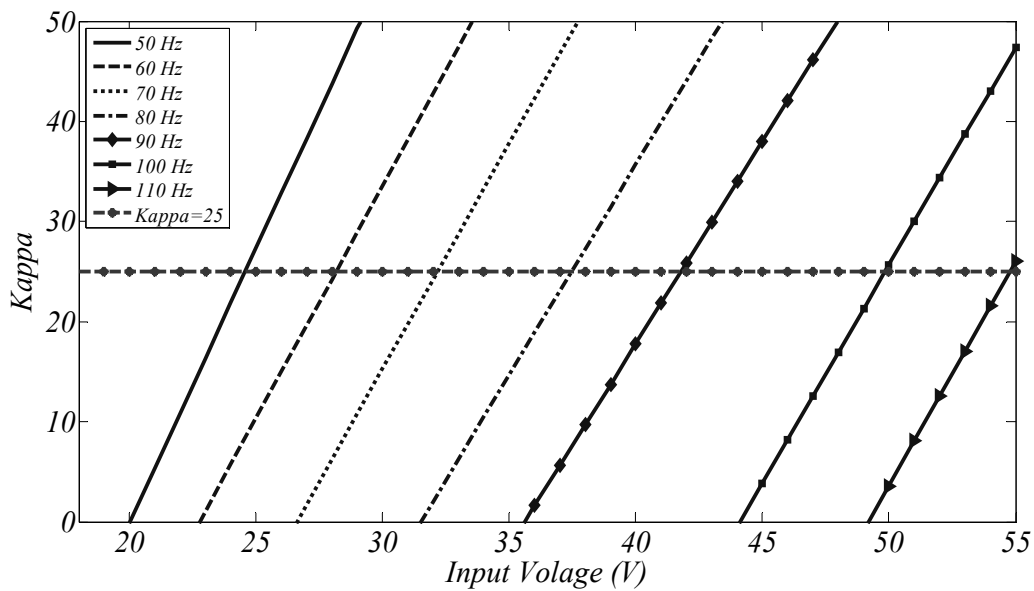
نشان می‌دهد.



شکل (۶-۹): مقادیر κ و خط برازش شده بر آن در فرکانس ۸۰ هرتز



شکل (۱۰-۶): مقادیر برازش شده K برای فرکانس‌های ۵۰-۱۱۰ هرتز



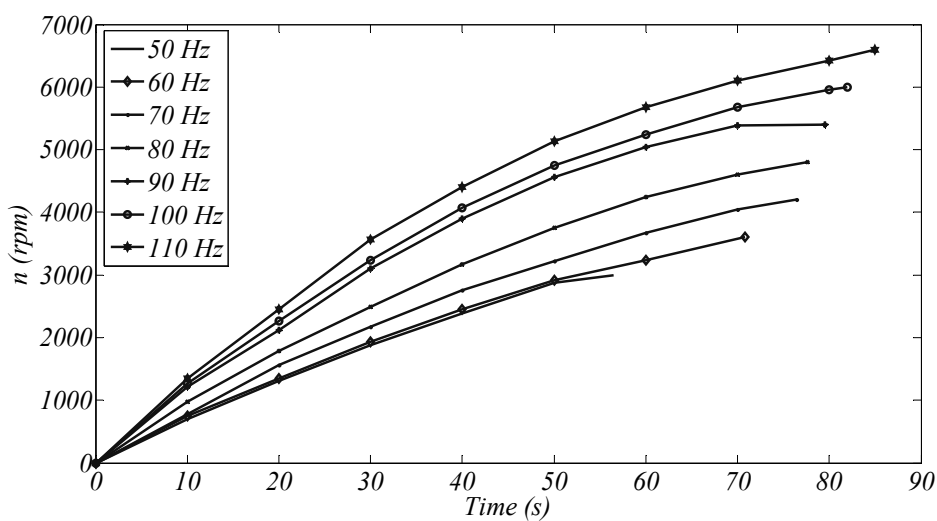
شکل (۱۱-۶): ولتاژ تقاطع خط $K=25$ و خطوط K

جدول (۲-۶): مقادیر ولتاژ به منظور انجام تست راه اندازی

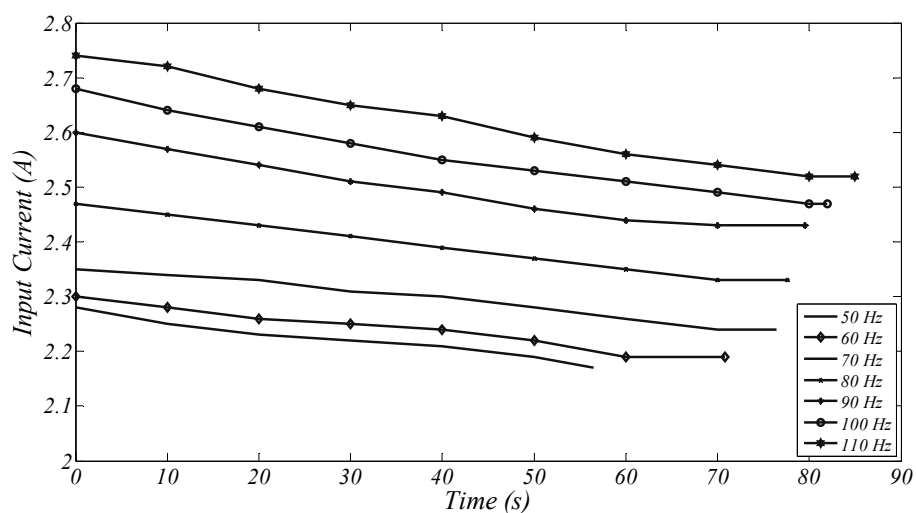
f	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰	۱۱۰
V _{starting time}	۲۴.۵۷	۲۸.۱۵	۳۲.۱۵	۳۷.۴۵	۴۱.۷۸	۴۹.۸۵	۵۴.۷۷

اکنون بار دیگر در ولتاژهای بدست آمده تست راه‌اندازی را به منظور مقایسه‌ی زمان راه‌اندازی و جریان راه‌اندازی در فرکانس‌های مختلف تکرار می‌کنیم.

شکل (۱۲-۶) نتایج آزمایش زمان راه‌اندازی و شکل (۱۳-۶) نتایج آزمایش جریان راه‌اندازی را در فرکانس‌های مختلف نشان می‌دهند.



شکل (۱۲-۶): زمان راه‌اندازی در فرکانس‌های ۱۱۰-۵۰ هرتز



شکل (۶-۱۳): جریان ورودی راه اندازی در فرکانس های ۵۰-۱۱۰ هرتز

همانطور که از شکل (۶-۱۲) مشاهده می‌شود، زمان راه‌اندازی موتور هیستریزس ساخته شده، با افزایش فرکانس تغذیه‌ی ماشین افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل (۶-۱۳)، جریان راه‌اندازی ماشین در حدود ۱.۰۴-۱.۱ برابر جریان حالت دائم آن است که نسبت به ماشین‌های هیستریزس معمول از مقدار کمتری برخوردار است.

همچنین برای دستیابی به هدف دوم که عبارت است از محاسبه ولتاژ لحظه‌ی ورود به سنکرون به منظور صحت‌گذاری مدار معادل پیشنهاد شده، بایستی مقادیر ولتاژ حاصل از تقاطع خطوط برازش شده با محور افقی (ولتاژ فاز موتور) بدست آوریم. این مقادیر در جدول (۶-۳) آورده شده‌اند.

جدول (۶-۳): مقادیر ولتاژ لحظه ورود به سنکرون

f	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰	۱۱۰
V_{sync}	۲۰.۰۲	۲۲.۷۶	۲۶.۶۰	۳۱.۵۰	۳۵.۶۰	۴۳.۱۰	۴۹.۰۰

۶-۳. آزمایش لحظه‌ی ورود به سنکرون

آزمایش لحظه‌ی ورود به سنکرون موتور CDDHM به منظور صحت‌گذاری مدار معادل پیشنهادی در فصل سوم طراحی شده است.

در این آزمایش موتور بهینه‌ی ساخته شده در فرکانس‌های مختلف تحت آزمایش قرار گرفته و مقادیر ولتاژ ورودی، جریان ورودی و همچنین توان ورودی به موتور در لحظه‌ی ورود به سنکرون اندازه‌گیری می‌شود. سپس این مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر محاسبه شده توسط مدار معادل مقایسه می‌گردد.

در این آزمایش ابتدا در یک فرکانس مشخص، ولتاژ لحظه‌ی ورود به سنکرون بدست آمده از قسمت قبل به ورودی موتور اعمال می‌گردد. ولتاژ، جریان و توان ورودی به موتور در این لحظه را به عنوان مقادیر ولتاژ، جریان و توان ورودی در لحظه‌ی ورود به سنکرون تعریف کرده و این مقادیر ثبت می‌گردند. سپس با اعمال ولتاژ به دست آمده در این آزمایش به مدار معادل پیشنهادی موتور هیستریزیس نوع تخت دو روتوره بدون هسته و محاسبه‌ی مقادیر بدست آمده برای جریان و توان ورودی توسط مدار معادل، به مقایسه‌ی این مقادیر خواهیم پرداخت.

از آنجایی که موتور CDDHM مورد نظر به منظور کار در فرکانس ۴۰۰ هرتز و سرعت ۲۴۰۰۰ rpm طراحی شده است، باید عملکرد این موتور در این فرکانس بررسی گردد. اما به دلیل محدودیت امکانات آزمایشگاهی و نیز برخی محدودیت‌های مکانیکی نظیر عدم دسترسی به بلبیرینگ مناسب به منظور کار در این فرکانس، از تکنیک زیر جهت صحت‌گذاری بر عملکرد ماشین استفاده نموده‌ایم.

موتور CDDHM در فرکانس‌های مختلف تحت آزمایش لحظه‌ی ورود به سنکرون قرار می‌گیرد.

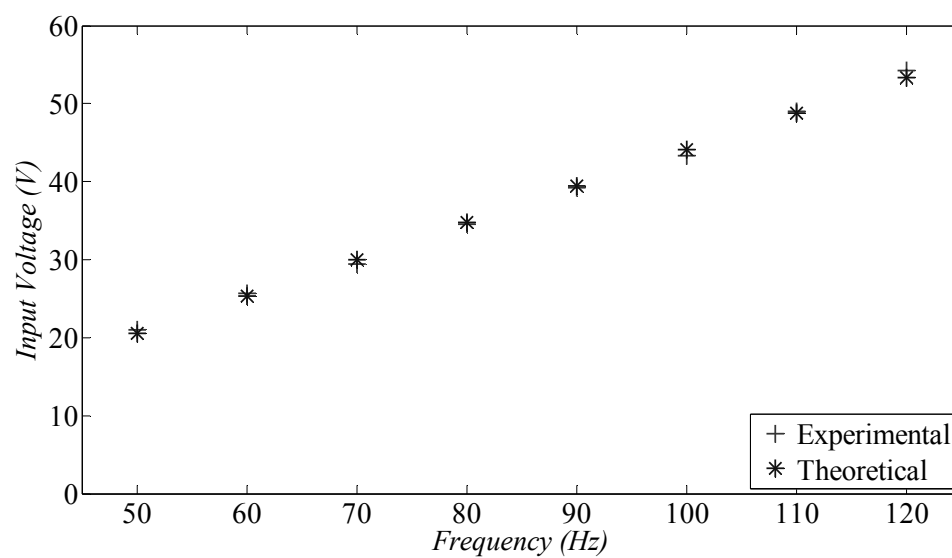
با توجه به امکانات آزمایشگاهی موجود و نیز محدودیت‌های مکانیکی آزمایش‌های موردنظر در محدوده‌ی فرکانسی ۵۰ الی ۱۲۰ هرتز انجام گرفته است.

نتایج مقادیر تست عملی در جدول (۴-۶) آورده شده است. همچنین به منظور مقایسه و نیز صحت‌گذاری مدار معادل، این مقادیر همراه با مقادیر محاسبه شده توسط مدار معادل در شکل‌های (۶-۶) تا (۱۴-۶) آورده شده‌اند.

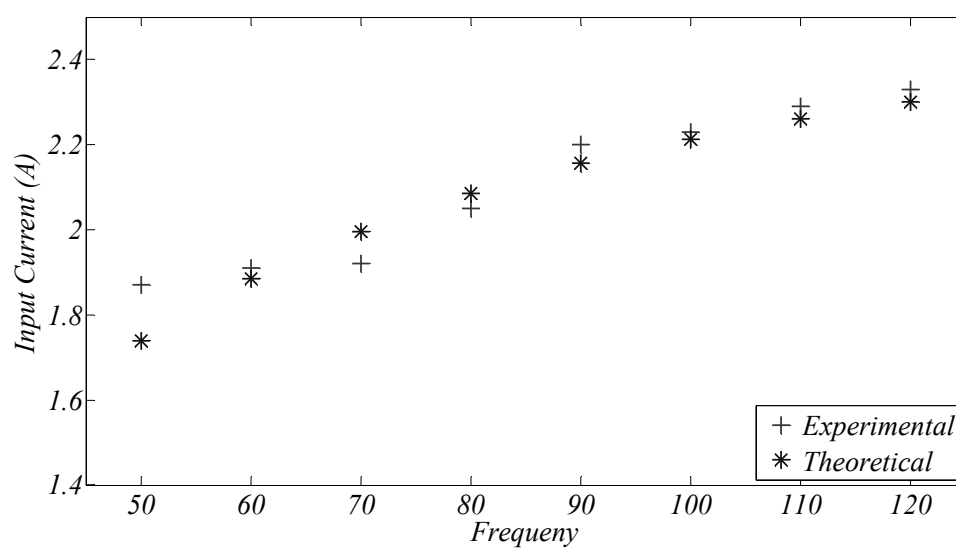
همانگونه که مشاهده می‌شود، نتایج ارائه شده در جدول (۴-۶) و منحنی‌های موجود در شکل‌های (۶-۶) تا (۱۴-۶) صحت و کارایی بالای مدار معادل پیشنهادی در فرکانس‌های مختلف قابل تست را تایید می‌نماید.

جدول (۴-۶): مقادیر ورودی اندازه‌گیری شده و محاسبه شده

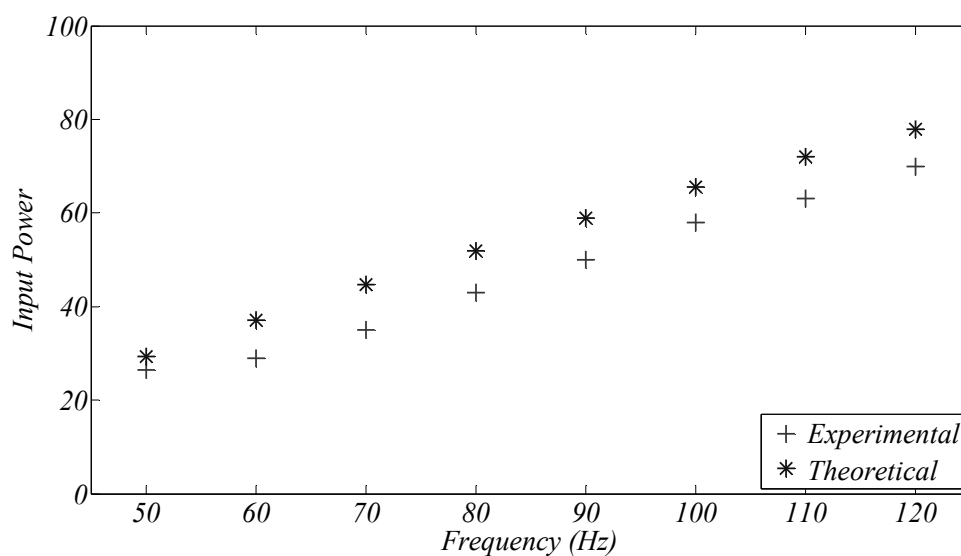
نتایج آزمایش		نتایج تئوری		$V_{ph} (v)$	f
$P_{in} (1\phi, w)$	$I_{ph} (A)$	$P_{in} (1\phi, w)$	$I_{ph} (A)$		
۲۶.۵	۱.۸۷	۲۵.۱۱	۱.۶۰	۲۱	۵۰
۲۸.۹	۱.۹۱	۳۲.۷۳	۱.۷۶	۲۵.۷	۶۰
۲۹.۹	۱.۹۲	۴۰.۲۱	۱.۸۸	۲۹.۴	۷۰
۳۵.۷	۲.۰۵	۴۷.۵۵	۱.۹۷	۳۴.۵	۸۰
۴۲.۵	۲.۲	۵۴.۶۴	۲.۰۵	۳۹.۲	۹۰
۴۷	۲.۲۳	۶۱.۴۷	۲.۱۱	۴۳.۳	۱۰۰
۴۹.۲	۲.۲۹	۶۸.۰۳	۲.۱۶	۴۹	۱۱۰
۵۴	۲.۳۳	۷۴.۳۱	۲.۲۰	۵۴.۲	۱۲۰



شکل (۶-۱۴): ولتاژ فاز ورودی

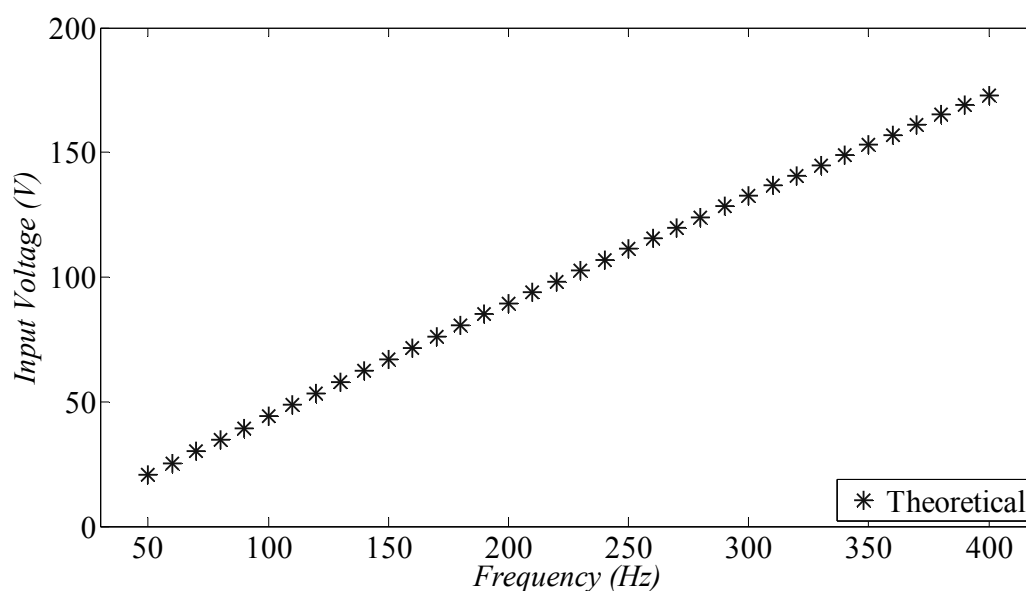


شکل (۶-۱۵): جریان فاز ورودی



شکل (۶-۱۶): توان تکفاز ورودی

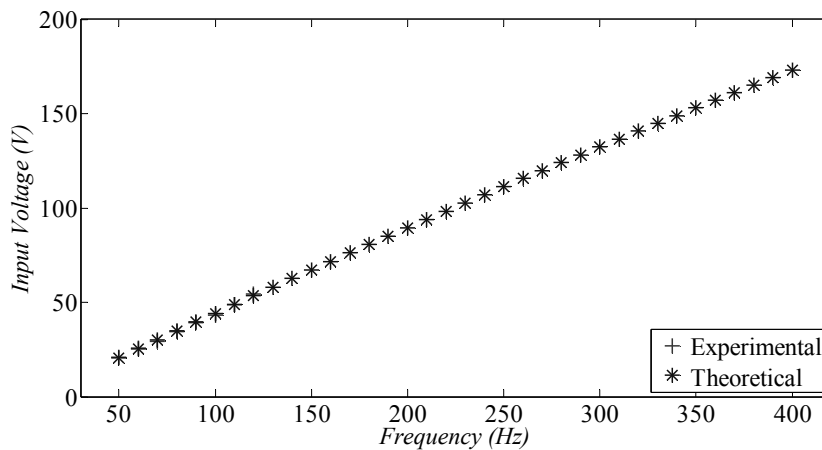
اکنون روی مقادیر ولتاژ بدست آمده از تست عملی، منحنی ولتاژ لحظه‌ی ورود به سنکرون برای فرکانس‌های مختلف (۵۰ الی ۴۰۰ هرتز) برازش می‌شود. شکل (۶-۱۷) منحنی مذکور را نشان می‌دهد.



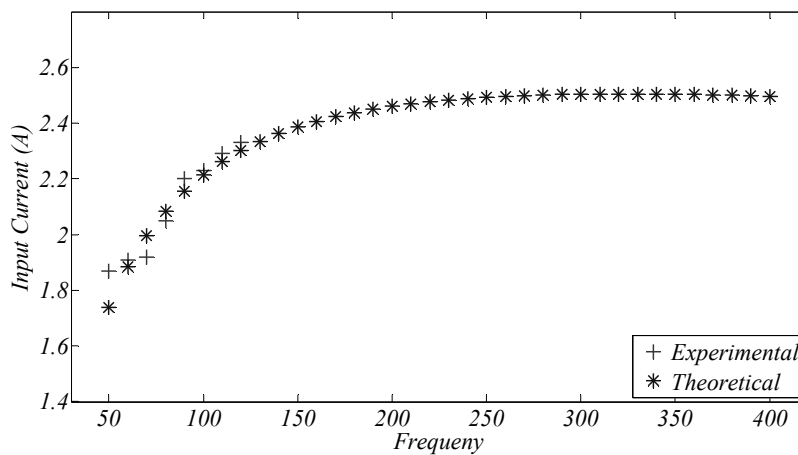
شکل (۶-۱۷): ولتاژ فاز ورودی اعمالی به مدار معادل

سپس بار دیگر و با توجه به معادله بدست آمده برای ولتاژ بر حسب فرکانس، با اعمال ولتاژهای مختلف به مدار معادل موتور CDDHM، مقادیر جریان و توان ورودی موتور برای کار در فرکانس‌های مختلف محاسبه می‌شود.

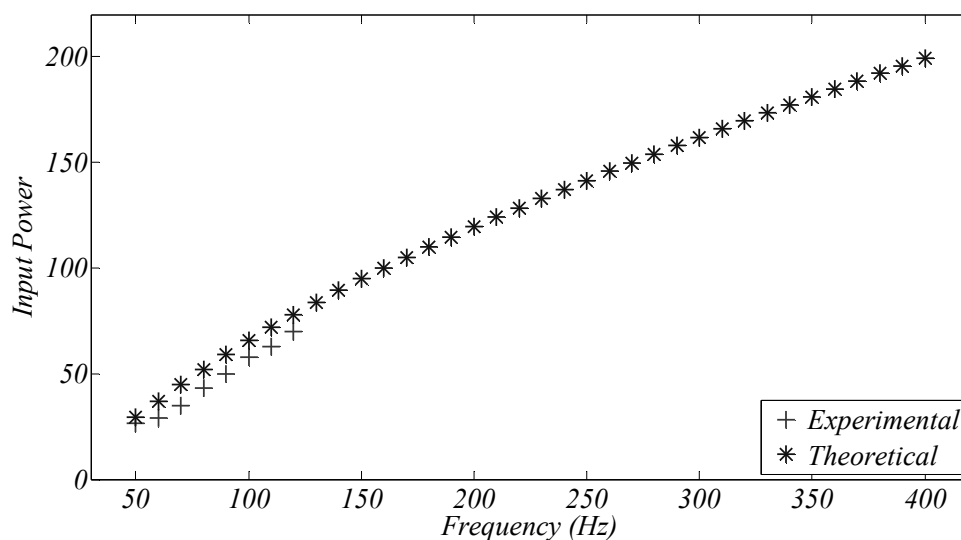
اکنون با توجه به تکنیک ذکر شده و توضیحات ارائه شده و نیز صحت‌گذاری مدار معادل، می‌توان منحنی‌های (۶-۱۸) تا (۶-۲۰) را برای پیش‌بینی عملکرد موتور هیستریزس نوع تخت دو روتوره بدون هسته بهینه ساخته شده، ارائه نمود.



شکل (۶-۱۸): ولتاژ فاز ورودی



شکل (۶-۱۹): جریان فاز ورودی



شکل (۶-۲۰): توان تک فاز ورودی

۶-۴. مشخصه گشتاور – سرعت موتور CDDHM

همانطور که در بخش ۲-۲ توضیح داده شد، مشخصه گشتاور هیستریزیس T_h بر حسب سرعت موتور مطابق با شکل (۲-۲) و ثابت می‌باشد.

هدف از این آزمایش بدست آوردن مشخصه‌ی گشتاور سرعت ماشین است.

به منظور انجام این آزمایش، موتور CDDHM را در فرکانس‌های مختلف به سرعت سنکرون می‌رسانیم. سپس با افزایش پله‌ای گشتاور بار موتور، مشخصه‌ی گشتاور موتور بر حسب سرعت را بدست می‌آوریم.

این آزمایش در محدوده‌ی فرکانسی ۱۰۰-۱۵۰ هرتز انجام می‌گیرد. به علت گشتاور مقاوم اصطکاک یاتاقان‌های موتور، سرعت موتور در فرکانس‌های ۱۴۰ و ۱۵۰ هرتز به سرعت سنکرون نخواهد رسید.

مقادیر قابل اندازه‌گیری گشتاور برای فرکانس‌های ۱۰۰، ۱۲۰، ۱۳۰، ۱۴۰ و ۱۵۰ هرتز در

جدول (۵-۶) آورده شده اند.

جدول (۵-۶): سرعت و گشتاور در فرکانس‌های مختلف

f=100 Hz		f=120 Hz		f=130 Hz		f=140 Hz		f=150 Hz	
n (rpm)	T (Nm)	n (rpm)	T (Nm)	n (rpm)	T (Nm)	n (rpm)	T (Nm)	n (rpm)	T (Nm)
6000	0.0027	7200	0.00272	7800	0.0041	8310	0.0051	8555	0.0051
6000	0.0054	7200	0.00272	7800	0.0058	8255	0.00714	8468	0.0071
6000	0.0102	7200	0.0051	7792	0.0088	8202	0.00986	8390	0.0109
		7182	0.0068	7753	0.0112	8157	0.01122	8348	0.0122
		7175	0.00952						
		7138	0.01224						

همان‌طور که مشاهده می‌کنید به علت محدودیت‌های اندازه‌گیری (گشتاورسنج مورد استفاده

محدوده‌ی خاصی از گشتاور بار را به موتور اعمال می‌کند)، در فرکانس ۱۰۰ هرتز سرعت موتور از

سنکرون خارج نمی‌شود و نیز به دلیل مشکلات مکانیکی (اصطکاک یاتاقان‌های موتور) در فرکانس-

های ۱۴۰ و ۱۵۰ هرتز موتور به سرعت سنکرون نمی‌رسد. اما همین داده‌ها نیز در بدست آوردن

مشخصه‌ی گشتاور سرعت کمک شایانی می‌کنند.

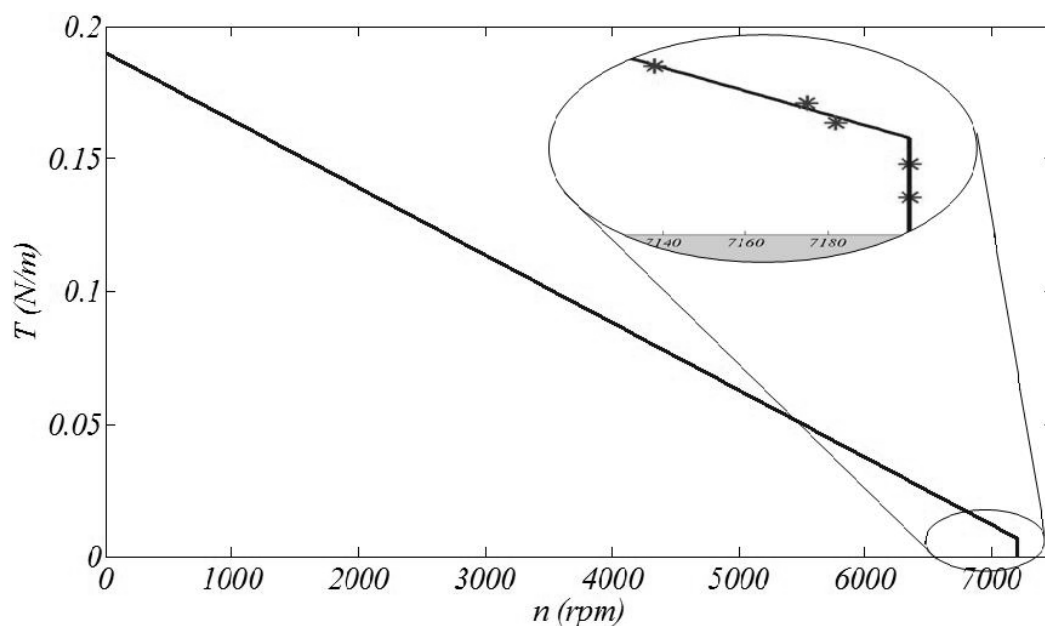
اکنون در هر فرکانس خاص، بر روی نقاط بدست آمده از آزمایش، دو منحنی برازش می‌کنیم. یک منحنی به صورت خط مستقیم در سرعت سنکرون و دیگری یک منحنی درجه دو در خارج از سرعت سنکرون. برای نمونه شکل (۶-۲۱) برای فرکانس ۱۲۰ هرتز بدست خواهد آمد.

معادله‌ی بدست آمده برای فرکانس ۱۲۰ هرتز به صورت زیر می‌باشد.

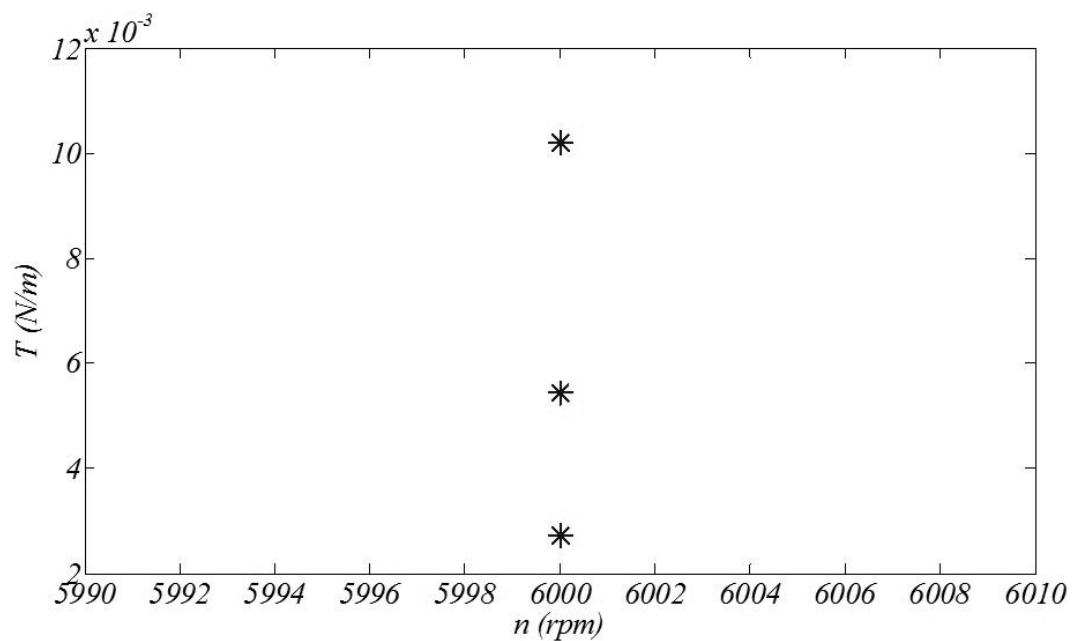
$$T = \left(-8.293468 \times 10^{-9} \times n_{sync}^2\right) + \left(3.4289626731 \times 10^{-5} \times n_{sync}\right) + 0.1901 \quad (۶-۷)$$

با این روش محل تقاطع دو منحنی برازش شده، گشتاور لحظه‌ی خروج از سنکرون خواهد بود.

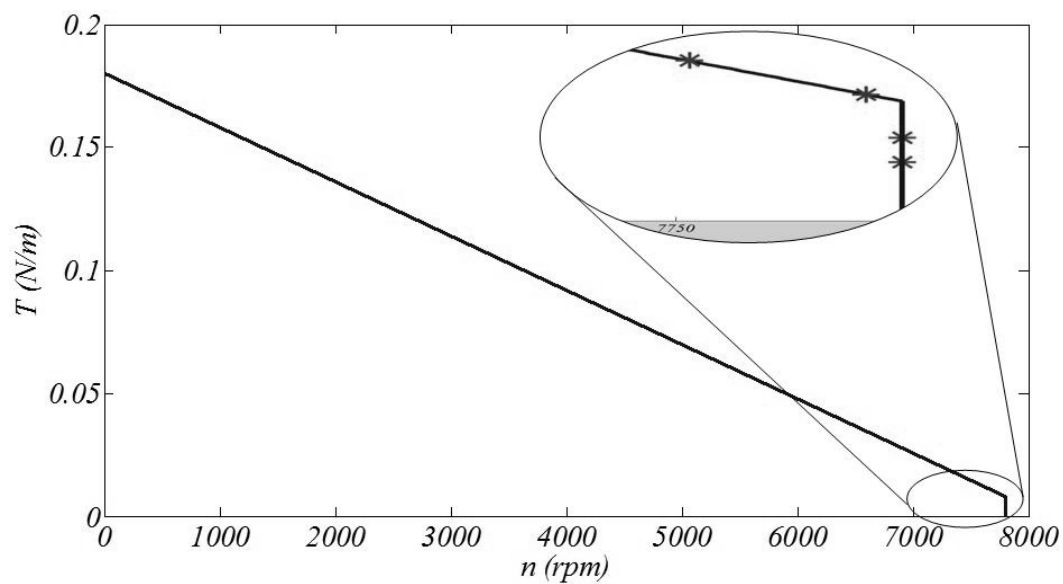
با تکرار روش و تکنیک فوق برای دیگر فرکانس‌های تست شده، شکل‌های (۶-۲۲) تا (۶-۲۵) بدست می‌آید.



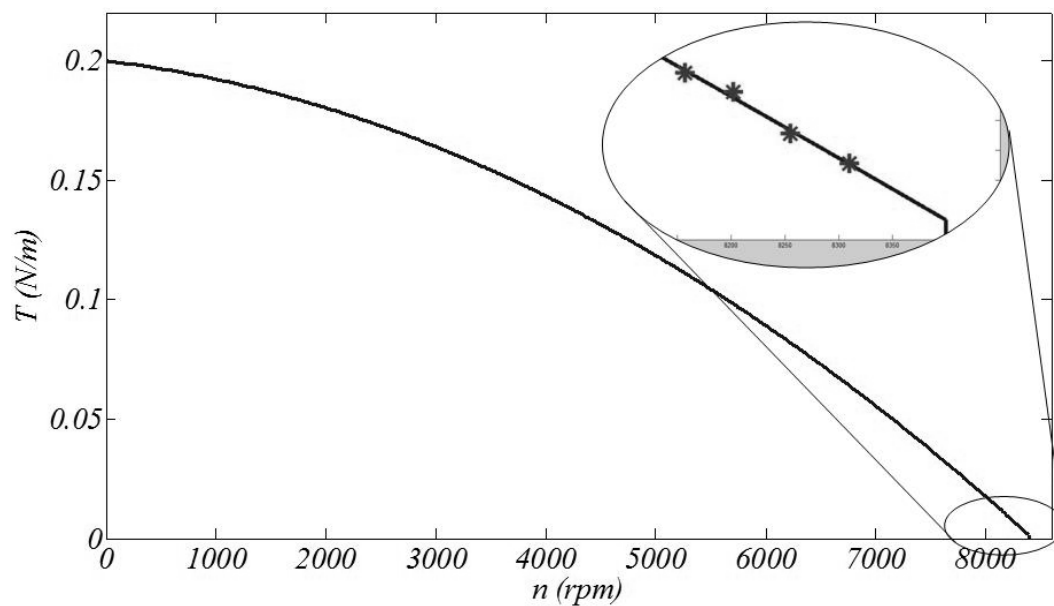
شکل (۶-۲۱): مشخصه گشتاور-سرعت موتور CDDHM در فرکانس ۱۲۰ هرتز



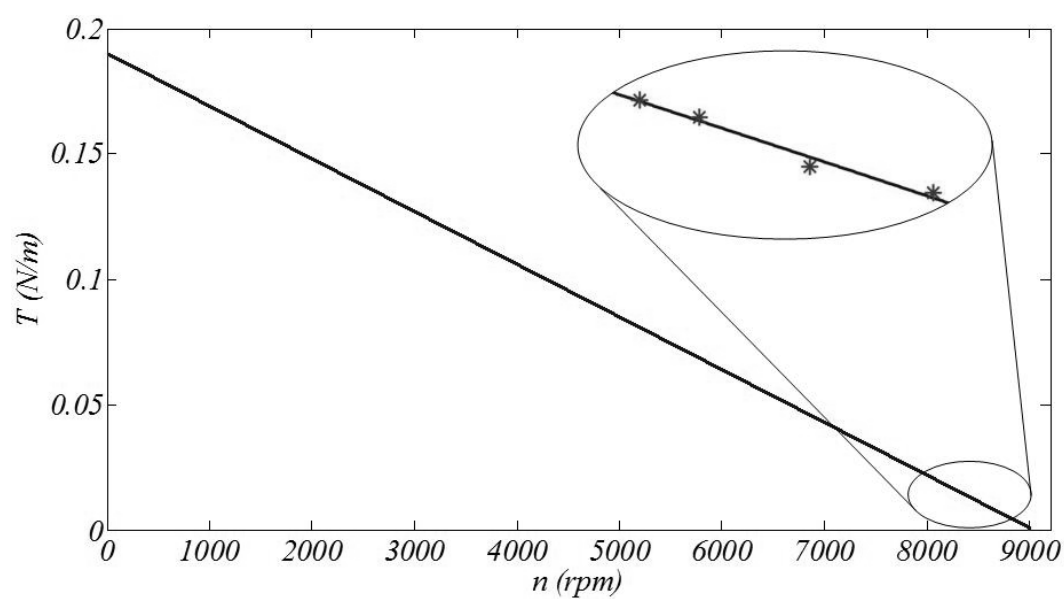
شکل (۶-۲۲): مشخصه گشتاور-سرعت موتور CDDHM در فرکانس ۱۰۰ هرتز



شکل (۶-۲۳): مشخصه گشتاور-سرعت موتور CDDHM در فرکانس ۱۳۰ هرتز



شکل (۶-۲۴): مشخصه گشتاور-سرعت موتور CDDHM در فرکانس ۱۴۰ هرتز



شکل (۶-۲۵): مشخصه گشتاور-سرعت موتور CDDHM در فرکانس ۱۵۰ هرتز

بررسی شکل‌های فوق نشان می‌دهد مشخصه‌ی گشتاور-سرعت موتور در تمام فرکانس‌ها،

محور عمودی را تقریباً در گشتاور ۰.۲ نیوتن-متر قطع می‌کند. در این مشخصه‌ها گشتاور خروجی

موتور بر حسب سرعت نشان داده شده است. گشتاور خروجی موتور حاصل گشتاور هیستریزیس در موتور و گشتاور مقاوم یاتاقان‌ها و اصطکاک است. از آنجائیکه گشتاور هیستریزیس این موتور در سرعت‌های مختلف ثابت بوده اما گشتاور مقاوم آن با افزایش سرعت زیاد می‌شود، طبیعی است مشخصه گشتاور-سرعت این موتور بصورت تقریباً خطی، نزولی باشد. از سوی دیگر بدلیل آنکه گشتاور مقاوم در سرعت‌های پایین به صفر میل می‌کند، می‌توان نتیجه گرفت محل تقاطع مشخصه گشتاور-سرعت و محور عمودی بیانگر گشتاور هیستریزیس موتور می‌باشد. بنابراین گشتاور تولید شده داخلی موتور از آزمایش‌های فوق برابر 0.2 نیوتن-متر بدست می‌آید. این مقدار نتیجه حاصل از تحلیل تئوری ($T=0.18^{N.m}$) را تایید می‌کند.

نتیج

و

پیشہ اور

در فصول مختلف این پایان نامه با توجه به اهمیت و کاربردهای زیاد انواع موتورهای پسماند در صنعت و نیز کاربردهای نظامی و ... این نوع از موتورها، به معرفی اجمالی مهمترین انواع آنها پرداخته شد. همچنین بسیاری از ساختارهای ارائه شده، مورد بررسی قرار گرفت و کاربردهایی از انواع موتورهای پسماند موجود ذکر گردید. علاوه بر این توضیحاتی در مورد انواع مواد مغناطیس دائم قابل استفاده در موتورهای پسماند داده شده و این مواد مورد بررسی قرار گرفتند. در ادامه دو نوع از موتورهای پسماند به نام‌های موتور پسماند نوع تخت دو روتورهی بدون هسته (CDDHM) و موتور پسماند نوع تخت دو روتورهی بدون شیار (SDDHM) معرفی شد. این دو ساختار جدید موتور پسماند توسط دارایی و همکاران در دانشگاه صنعتی شاهرود ثبت گردیده‌اند. موتور CDDHM بسار جدید بوده و علاوه بر این از مشخصات عملکرد بسیار مطلوبی برخوردار است. از طرف دیگر به دلیل عدم وجود اطلاعات و داده‌های تجربی کافی در زمینه طراحی و ساخت این نوع از موتور هیستریزیس، مراحل طراحی و ساخت این موتور با مشکلات بسیار زیادی همراه بوده است. بنابراین ارائه‌ی یک الگوریتم طراحی بر پایه‌ی روش‌های هوشمند (الگوریتم ژنتیک) و نیز ارائه قطعات و طرح‌های نوآورانه در زمینه‌ی ساخت این نوع از موتورها و ساخت موتور بهینه شده‌ی CDDHM در این پایان‌نامه، راه-گشای بسیاری از مسائل آتی در زمینه‌ی ساخت و تحلیل عملکرد این نوع از موتورها خواهد بود.

همچنین تست‌های عملی نسبتاً زیادی بر روی موتور ساخته شده انجام شده و روش جدیدی نیز برای بررسی مشخصه‌ی راه‌اندازی موتور CDDHM ارائه شده است. نتایج این آزمایش‌ها برآورده شدن هدف اصلی این پایان نامه که افزایش بازده و ضریب توان موتور CDDHM است را تایید می-نماید.

در پایان به منظور ادامه و نیز بهره برداری بیشتر از نتایج حاصل از این پایان‌نامه پیشنهادهایی ارائه می‌گردد.

- (۱) ارائه‌ی یک شیوه و الگوریتم مدون طراحی موتورهای پسماند تخت چند طبقه با توجه به تجربیات حاصل از ساخت چندین موتور از این نوع.
- (۲) بررسی بیشتر و دقیق‌تر مدل تحلیل عملکرد موتور CDDHM و تعمیم آن برای مدهای القایی و پس از سنکرون و نیز سنجش مطابقت مدل پیشنهادی با استفاده از انجام تست‌های لازم.
- (۳) استفاده از موتور CDDHM ساخته شده به عنوان یک ژنراتور پسماند و بررسی مد ژنراتوری برای این نوع از ماشین‌ها.
- (۴) ارائه طرح و قالبی جدیدتر به منظور سادگی بیشتر در نحوه‌ی سیم‌پیچی موتور CDDHM.
- (۵) بهینه‌سازی موتور پسماند نوع تخت دو روتوره بدون شیار (SDDHM) و بررسی و مقایسه‌ی نتایج حاصل از آن با نتایج ارائه شده در این پایان نامه برای موتور CDDHM.

مراجعه:

- [۱]. دارابی ا، (۱۳۷۱) ، پایان نامه کارشناسی ارشد به راهنمایی حمید لسانی: "مدلسازی موتورهای هیستریزیس و طراحی و ساخت یک نمونه"، دانشگاه فردوسی مشهد.
- [۲]. صنعتی مقدم م، (۱۳۸۷) ، پایان نامه کارشناسی ارشد به راهنمایی احمد دارابی: "طراحی و مدلسازی موتور سنکرون پسماند نوع تخت دو روتوره"، دانشکده برق و رباتیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [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]. C. Chen "Magnetic Thin Film Shielding on Electrical Wires" Master of Science Thesis Alfred University USA New York 2003.
- [6]. 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.
- [7]. 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.
- [8]. 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.
- [9]. Kubota, G. Watui and M. Itagati. "Hysteresis motor using magnetically anisotropic Fe-Cr-CO magnet", IEEE Trans on Magnetics, vo1.34, No. 6, pp. 3888-3896 Nov. 1998.
- [10]. 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.
- [11]. Chee Mun Ong, "Modeling and Dynamic Simulation of Electric Machinery Using MATLAB/SIMULINK" 1998.

- [12]. 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.
- [13]. S. Miyairi and T. Kataoka, "Analysis of Hysteresis Motors Considering Eddy Current Effects", Journal I.E.E., Japan, vol. 86, 1966, pp. 67-77.
- [14]. Teare. Jr. Benjamin Richard "Theory of Hysteresis Motor Torque" Phd Thesis: Yale University 1937.
- [15]. M.A.Rahman, "Combination Hysteresis Reluctance Permanent Magnet Motor", US. Patent Number 5,187,401, Feb.16, 1993.
- [16]. 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.
- [17]. 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.
- [18]. A. Darabi, T. Ghanbari, M.S. Moghadam, "Coreless Dual-rotor Disc Hysteresis Motor, Modeling, and Performance Prediction" Electric Power Components and Systems, 38:575–591, 2010, Vol.33, No 10, DOI: 10.1080/15325000903376909.
- [19]. A. Darabi, T. Ghanbari, M.S. Moghadam, "Slotless axial flux hysteresis motor, modelling and performance calculation" IET Electric Power Applications, pp. 1-11, 2009, Doi:10.1049/iet-epa.2008.0234.
- [20]. S.P.Clurman, "On Hunting in Hysteresis Motors and New Damping Techniques" IEEE Transactions on Magnetics, pp 512-517, Sept 1971.
- [۲۱]. نصیری قیداری ز، (۱۳۸۵) ، پایان نامه کارشناسی ارشد به راهنمایی حمید لسانی و احمد دارابی: "بررسی موتورهای هیستریزیس سنکرون"، دانشکده فنی دانشگاه تهران.
- [۲۲]. قنبری هاشم آبادی ت، (۱۳۸۶) ، پایان نامه کارشناسی ارشد به راهنمایی احمد دارابی و محمدرضا رفیعی: "تحلیل رفتار دینامیکی گذرای موتورهای پسماند در شرایط مختلف تغذیه ورودی"، دانشکده برق و رباتیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [23]. Copeland, M. A. and Slemon, G. R. "An analysis of the hysteresis motor: I-Analysis of the idealized machine" IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-(82), pp. 34-42, 1963.

- [24]. Copeland, M. A. and Slemon, G. R. "Analysis of the hysteresis Motor: II-The circumferential-flux machine," IEEE Trans. Power App. Syst. Vol. PAS- 83, pp. 619-625, 1964.
- [25]. International Atomic Energy Agency IAEA "www.iaea.org", Publications and report.
- [۲۶]. دارابی ا. و لسانی ح. و قنبری ت. و صنعتی مقدم م، (۱۳۸۶) ، "کاربرد ماشین پسماند در شتابدهنده توربوشارژرها"، بیست و دومین کنفرانس بین المللی برق، تهران، ایران.
- [27]. S. Miyari and T. Kataoka, "A basic equivalent circuit of the hysteresis motor" J. Inst. Elect. Eng. Japan, 85, (10), pp. 1740 1748. 1965.
- [28]. 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.
- [29]. Cyril. G. Veinott, "Theory and design of small induction motors", 1th edition 1986.
- [30]. 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.
- [31]. AK. Sawhney, "A course in electrical machines design", Dhanpat Rai, 4th edition 1977.
- [32]. Mohsen Sanati Moghadam, Ahmad Darabi, Mohammad Sadeghierad "Application of Fe-Cr-Ni-Mo-C Steel Alloy in Hysteresis Motors", Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines (ICEM' 08), Paper ID 1496, 6-9 September 2008.
- [33]. M. H. Sadeghi, A. Darabi, A. Hassannia, "An Approach to Determine the Starting Characteristic of the New Disc Type Hysteresis Motor" International Conference on Electrical Machines and Systems 2010, Songdo Convensia in Incheon, Korea, Oct 10-13.

Abstract: HYSTERESIS motors are self-starting synchronous motors that take advantage of the hysteresis characteristics of the magnetic materials. Robust structure, flat speed-torque characteristics, smooth operation and constant low starting current are the outstanding specifications of these machines. Nevertheless, low efficiency and low power factor are among the disadvantages of common hysteresis motors. Very recently, Coreless Dual Discs Hysteresis Motors (CDDHM) has been introduced to increase power factor and efficiency of the hysteresis machines. Design algorithms of the ordinary machines can be found in many textbooks, but for the new machine due to unavailability of some design or manufacturing experiments, initial design methodology has not been yet proposed. So, employing an optimization algorithm to evaluate dimensions of CDDHM is inevitable. Moreover, conventional optimization approaches are converged normally to a global extremum if the approximated values of the parameters (not far from the optimized values) are available, while is not the case for CDDHM. Briefly, when an initial design is not available, the conventional optimization methods cannot be applied conveniently for the complicated, nonlinear and multi values model of the hysteresis machines. This paper describes a genetic algorithm-based approach with all details, solving successfully the maximum efficiency optimization problem of a CDDHM commencing from any rough initial design parameters. The optimized machine is fabricated and its measured output quantities are compared with those of obtained from the theory. This is given as a validation of the model and design algorithm of the machine.

Key words: Coreless Dual Discs Hysteresis Motor, Genetic Algorithm, Efficiency and Power Factor



Shahrood University of Technology
Faculty of Electrical and Robotic Engineering
Power Engineering

Optimization of Multi-Stacks Disc Type Hysteresis Machines, Design and Simulation

By:

Mohammad Hossein Sadeghi Haddad Zavareh

Supervisor:

Ahmad Darabi

Thesis Submitted for the Degree of Master of Science

May 2010