

اللَّهُمَّ صَلِّ عَلَى مُحَمَّدٍ



دانشگاه صنعتی شاهرود

مرکز آموزشهای الکترونیکی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی الکترونیک قدرت و ماشینهای

الکتریکی

مقایسه عملکرد موتورهای مدولار و معمولی برای کاربرد در

آسانسورهای بدون جعبه دنده (گیرلس)

نگارنده:

یاسر حاجب

استاد راهنما:

دکتر امیر حسن نیا خیبری

تقدیم بہ

پدر بزرگوارم

مادر فداکارم

ہمسرد و لسو زم

دختر نازنینم

تشکر و قدردانی:

خدای راسپاس، که شعله شوق علم در قلب من برافروخت و طریق تحصیل دانش به من نمود و دری از بوستان علم برویم بکشود. منت خدای تعالی را که توفیق و عنایت فرمود تا تهیه و تنظیم این محضر را به عنوان پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت به اتمام برسانم.

این موفقیت را پیش از هر چیز و امدار چهار محور استوار زندگی پدر، مادر، همسر و دختر کرامت قدر می باشم. آنان که با سکینایی و بردباری، سخط ای از پشتیبانی ام غافل نبوده و با گذشت و فداکاری در ناهمواری های زندگی راه دانش آموزی را بر من هموار نمودند.

و وظیفه خود می دانم از همه اساتید بزرگوار دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی شاهرود، بویژه استاد کرامت قدر جناب آقای دکتر حسن نیا قدردانی نموده، راهبانی های ارزنده و تشویق های پیوسته ایشان را سپاس گویم.

از خداوند سبحان، سلامتی و موفقیت روز افزون این عزیزان، در راه خدمت به جامعه علمی ایران را خواهانم.

تعمیرنامه

اینجانب یاسر حاجب دانشجوی دوره کارشناسی ارشد (دکتری) رشته برق قدرت دانشکده برق دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه مقایسه عملکرد موتورهای مدولار و معمولی برای کاربرد در آسانسور های بدون جعبه دنده (گیرلس) تحت راهنمایی دکتر امیر حسن نیا متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه 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 پایان‌نامه 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 می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

حکیده

طراحی هر نوع ماشین الکتریکی با هدف خاصی صورت گرفته و در نهایت طراح به دنبال این است تا نتایج حاصل طراحی جوابگوی نیاز مورد نظر بوده و از نظر مشخصه‌های خروجی و راندمان بهینه باشد. از بین انواع مختلف موتورهای الکتریکی، موتور سنکرون مغناطیس دائم (PMSM) بخاطر داشتن مزایایی از قبیل: ساختار ساده، هزینه تولید پایین، فشردگی و چگالی شار بالا، تلفات کم و عملکرد خوب در صنعت استفاده می‌شوند. از سوی دیگر، می‌توان سرعت موتور سنکرون را از طریق تغییر فرکانس میدان مغناطیسی دوار که سرعت سنکرون نامیده می‌شود کنترل نمود. در دهه‌های اخیر تلاش‌های زیادی توسط محققین جهت دستیابی به روش مناسب جهت بهینه‌سازی انواع ماشین‌های الکتریکی صورت پذیرفته است که از مدل سازی به روش اجزاء محدود به عنوان یک مدل ریاضی بجای ساخت یک نمونه واقعی که از لحاظ هزینه و زمان ارزانتر و سریعتر است، استفاده می‌شود. ترکیب شیار استاتور و روتور امکان پذیر را می‌توان برای پیکربندی^۱ FSCW و چیدمان متقارن که قادر به ارائه حداکثر ضریب سیم پیچ هستند به طور جامع مورد بررسی قرار داد. در این پژوهش به تحلیل و طراحی بهینه سیم پیچ استاتور موتور سنکرون سه فاز مغناطیس دائم جهت کاربرد در آسانسور پرداخته می‌شود. در ابتدا مشخصات مربوط به موتورهای مورد کاربرد در صنایع آسانسور مورد بررسی قرار گرفته و سپس روابط مربوط به طراحی مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت و سیم پیچ استاتور به منظور رسیدن به بهترین شکل موج هارمونیک و رپیل گشتاور نسبت به تحقیقات گذشته بهبود می‌یابد. در این پژوهش سعی شده است تا با تلفیق دو ایده متفاوت در زمینه بهبود هارمونیک های فضایی شکل موج mmf فاصله هوایی موتور آهنربای دائم، رفتار موتور بهبود داده شود. در روش پیشنهاد شده برای بهبود هارمونیک های فضایی شکل موج mmf فاصله هوایی موتور آهنربای دائم، از انتقال سیم پیچ طبقه دوم برای تقویت هارمونیک کاری موتور و حذف هارمونیک اول و کاهش هارمونیک های غیر ضروری استفاده می‌شود. از سوی دیگر تلفات موتور به حداقل رسیده و راندمان افزایش می‌یابد. پس از بهینه‌سازی، توسط تحلیل المان محدود (FEA)، به بررسی جنبه‌های تحلیل مغناطیسی موتور پرداخته می‌شود. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار JMAG بهبود رفتار موتور را تحت طرح پیشنهادی تایید میکنند. در نهایت با ساخت نمونه آزمایشگاهی کارایی روش پیشنهادی مورد تایید قرار می‌گیرد.

واژه های کلیدی - سیم پیچ متمرکز با کسری شیار (FSCW)، موتور سنکرون مغناطیس دائم سه فاز، صنعت آسانسور، طراحی موتور، تحلیل اجزای محدود، انتقال استاتور، هارمونیک فضایی (mmf)

^۱ Fractional Slot Concentrated Winding (FSCW)

پیشگفتار

موتورهای الکتریکی بعنوان سیستم محرکه اصلی صنایع از تجهیزات مورد استفاده در لوازم خانگی گرفته تا صنایع پیشرفته نظیر هوافضا (از جمله موشک، هواپیمای بدون سرنشین، جت، ربات‌ها و ...)، همواره در حال تغییر و تحول هستند. امروزه بدنبال محرک‌های الکتریکی پیشرفته با چگالی توان بالا و کارایی بالا به عنوان هدف اصلی در دانشگاه و صنعت در حال تبدیل شدن به نگرانی‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و سیاسی در حال افزایش است. علاوه بر این، کاربردهای فراوان در حال ظهور، مانند نیروی محرکه الکتریکی و انرژی تجدیدپذیر، به طور مداوم خواستار ماشین‌های الکتریکی عملکرد بالا هستند. مزیت‌های ممتاز، مانند بازده بالا، چگالی توان بالا، سیم پیچ انتهایی کوتاه، تحمل خطا، ریز موج گشتاور پایین و قابلیت تضعیف شار خوب، در تحقیقات با پیکره بندی FSCW در طول چند دهه اخیر، موردعلاقه نشان داده‌اند.

طراحی هر نوع ماشین الکتریکی با هدف خاصی صورت گرفته است. از بین انواع مختلف موتورهای الکتریکی، موتور سنکرون مغناطیس دائم (PMSM) بخاطر داشتن مزایایی از قبیل: ساختار ساده، هزینه تولید پایین، فشردگی و چگالی شار بالا، تلفات کم و عملکرد خوب سیستم درایو CNC، رباتیک و سیستم‌های تولید در بسیاری از کاربردهای صنعتی، نیرو محرکه زیر دریایی، ماشین‌های اتوماتیک در صنعت استفاده می‌شوند.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- "عملکرد موتور سنکرون آهنربای دائم سرعت پایین (مدولار) با یک طرح جدید سیم پیچی متمرکز با کسری شیار بهبود یافته (FSCW)" ، چهارمین همایش بین المللی مهندسی برق ، علوم کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دوازدهم بهمن ۱۳۹۸.

فهرست مطالب

ث	فهرست جداول
ج	فهرست اشکال
خ	فهرست علائم

فصل ۱: آشنایی با موتور های سنکرون آهنربای دائم

۲	۱-۱ مقدمه
۲	۲-۱ کاربردهای موتور های سنکرون آهنربای دائم
۲	۱-۲-۱ موتورهای شار شعاعی
۷	۲-۲-۱ موتورهای شار محوری
۸	۳-۲-۱ موتورهای خود راه انداز، مدولار و القایی
۱۱	۳-۱ انتخاب موتور مناسب جهت کاربرد در آسانسور
۱۳	۱-۳-۱ کنترل الکتریکی موتور
۱۶	۲-۳-۱ انتخاب موتور الکتریکی مناسب برای کاربرد در آسانسور
۱۸	۴-۱ جمع بندی

فصل ۲: بررسی پژوهش های پیشین در خصوص طراحی موتور سنکرون مغناطیس دائم

۲۰	۱-۲ مقدمه
۲۰	۲-۲ طراحی بهینه موتور های سنکرون مغناطیس دائم
۲۶	۳-۲ جمع بندی

فصل ۳: اصول و کلیات طراحی ماشین های الکتریکی مغناطیس دائم

۲۸	۱-۳ مقدمه
۲۸	۲-۳ تعاریف
۳۰	۳-۳ معادلات خروجی
۳۰	۱-۳-۳ معادله خروجی ماشین های AC
۳۱	۴-۳ انتخاب مقادیر نامی ماشین
۳۱	۵-۳ تفکیک L و D
۳۲	۶-۳ مراحل طراحی
۳۳	۱-۶-۳ تعیین مشخصات اساسی موتور
۳۵	۲-۶-۳ انتخاب متغیرهای طراحی با توجه به ویژگی موتور
۳۷	۳-۶-۳ تعیین ابعاد و پارامترهای موتور
۴۲	۷-۳ روش کلی طراحی
۴۳	۸-۳ محاسبه تحلیلی یک موتور نمونه
۴۴	۹-۳ جمع بندی

فصل ۴: طراحی بهینه موتور های سنکرون مغناطیس دائم و آنالیز الکترومغناطیسی موتور با استفاده از روش المان محدود

۴۶	۱-۴ مقدمه
۴۶	۲-۴ تعیین مواد و مشخصات موتور
۴۸	۳-۴ متغیرهای طراحی
۴۸	۴-۴ طراحی بهینه موتور سنکرون مغناطیس دائم
۴۹	۱-۴-۴ الگوریتم طراحی چند هدفه
۵۰	۲-۴-۴ مسائل بهینه سازی

۵۱.....	۳-۴-۴ نتایج الکترومغناطیسی موتور با استفاده از روش المان محدود
۵۳.....	۵-۴ آنالیز میدان الکترومغناطیسی و گذرای موتور
۵۳.....	۵-۲-۱ تعیین مدل موتور
۵۴.....	۵-۲-۲ انتخاب مواد
۵۴.....	۵-۲-۲ نتایج شبیه سازی

فصل ۵: مراحل ساخت و آزمایش عملکرد موتور مغناطیس دائم

۶۰.....	۱-۵ مقدمه
۶۰.....	۲-۵ مراحل ساخت موتور
۶۰.....	۱-۲-۵ مشخصات طراحی موتور
۶۲.....	۲-۲-۵ انتخاب مواد موتور
۶۲.....	۳-۲-۵ ساخت موتور
۶۴.....	۳-۵ مراحل آزمایش موتور
۶۴.....	۱-۳-۵ آزمایش موتور با منبع DC و کوپلینگ با موتور کمکی
۶۶.....	۲-۳-۵ آزمایش موتور با منبع AC

فصل ۶: نتیجه گیری و پیشنهادات

۶۸.....	۱-۶ نتیجه گیری
۶۹.....	۲-۶ پیشنهادات

۷۰	پیوست
۷۱	مراجع

فهرست جداول

فصل اول

جدول ۱-۱. خصوصیات عملکردی مورد نیاز ماشین های الکتریکی جهت کاربرد در آسانسور ۱۶

جدول ۲-۱. مقایسه ماشین های الکتریکی از نظر ویژگی های مهم آنها ۱۶

فصل سوم

جدول ۱-۳. نحوه انتخاب تعداد فاز ها ، شیار ها و قطب ها ۳۳

جدول ۲-۳. پارامتر های اصلی طراحی موتور ۳۶

جدول ۳-۳. بازده اولیه بر حسب قطر موتور ۳۷

جدول ۴-۳. پارامتر های اولیه موتور ۴۳

جدول ۵-۳. ابعاد و مشخصات عملکردی موتور ۴۴

فصل چهارم

جدول ۱-۴. مشخصات مورد نیاز موتور ۴۷

جدول ۲-۴. محدوده متغیرهای بهینه سازی ۴۸

جدول ۳-۴. نوع مواد مغناطیسی اجزاء مختلف موتور ۵۴

جدول ۴-۴. مقایسه مقادیر دامنه هارمونیک های mmf فاصله هوایی موتور ۵۸

فصل پنجم

جدول ۱-۵. پارامترهای اولیه موتور ۶۰

جدول ۲-۵. ابعاد و مشخصات عملکردی موتور ۶۰

جدول ۳-۵. نوع مواد انتخابی ۶۲

فهرست اشکال

فصل اول

- شکل ۱-۱. محرک آسانسور و محرک قایق ۲
- شکل ۱-۲. ماشین RFPM ۳
- شکل ۱-۳. ماشین ISMPM ۴
- شکل ۱-۴. ماشین OSMPM ۴
- شکل ۱-۵. ماشین IPM ۵
- شکل ۱-۶. ماشین VBPM ۶
- شکل ۱-۷. ماشین TBPM ۶
- شکل ۱-۸. ماشین AFPM ۷
- شکل ۱-۹. ماشین TORUS ۸
- شکل ۱-۱۰. ماشین LSPM ۹
- شکل ۱-۱۱. ماشین آهنربای دائم مدولار سرعت متغییر ۱۰
- شکل ۱-۱۲. ماشین آهنربای دائم القائی ۱۰
- شکل ۱-۱۳. موتور گیرلس مورد استفاده در آسانسور ۱۳
- شکل ۱-۱۴. متعلقات موتور الکتریکی آسانسور ۱۷

فصل دوم

- شکل ۲-۱. موتور PMSM ۱۴ قطب (a) ۲۴ شیار (b) ۱۲ شیار ۲۱
- شکل ۲-۲. هارمونیک های فضایی mmf فاصله هوایی موتور ۱۴ قطب ۱۲ شیار ۲۱
- شکل ۲-۳. نمودار ضریب تضعیف دامنه هارمونیک V_{adk} بر حسب زاویه انتقال مکانیکی سیم پیچ ۲۳
- شکل ۲-۴. (a) مشخصات موتور طراحی شده (b) نمودار هارمونیک ۸ طرح سیم پیچی استاتور ۲۴
- شکل ۲-۵. (a) موتور سنکرون مغناطیس دائم (b) سیم پیچی استاتور ۲۴ قطب ۲۸ شیار ۲۵

فصل سوم

- شکل ۳-۱. ابعاد اصلی ماشین الکتریکی ۲۸
- شکل ۳-۲. تاثیر افزایش قطر موتور بر دیگر مشخصات موتور ۳۲
- شکل ۳-۳. توپولوژی موتور سنکرون مغناطیس دائم سطحی ۳۲

فصل چهارم

- شکل ۴-۱. توپولوژی موتور سنکرون آهنربای دائم ۴۶
- شکل ۴-۲. نحوه سیم پیچی جدید استاتور موتور ۲۰ قطب ۲۴ شیار بر اساس انتقال دندان ۴۹
- شکل ۴-۳. نحوه سیم پیچی جدید استاتور موتور ۲۰ قطب ۲۴ شیار بر اساس شیار ۴۹
- شکل ۴-۴. مراحل بهینه سازی طراحی موتور ۵۰

- شکل ۴-۵. نمودار هارمونیک mmf فاصله هوایی سیم پیچ استاتور دو نمونه سیم پیچی (a) مرجع [۱۰] و
 (b) پیشنهادی ۵۱
- شکل ۴-۶. گشتاور دندانان ای موتور با سیم پیچ استاتور مرجع [۱۰] ۵۲
- شکل ۴-۷. گشتاور دندانان ای موتور ۲۰ قطب ۲۴ شیار با سیم پیچ استاتور پیشنهادی ۵۲
- شکل ۴-۸. سطح مقطع دو بعدی از موتور طراحی شده ۵۳
- شکل ۴-۹. سیم پیچی متمرکز ماشین الکتریکی ۵۳
- شکل ۴-۱۰. چگالی شار مغناطیسی موتور طراحی شده ۵۴
- شکل ۴-۱۱. شکل (B/H) ورقه های استیل ۱۰۰۸ ۵۴
- شکل ۴-۱۲. منحنی (B/H) آهنربا ۵۵
- شکل ۴-۱۳. توزیع خطوط شار مغناطیسی ۵۵
- شکل ۴-۱۴. منحنی چگالی شار فاصله هوایی ۵۶
- شکل ۴-۱۵. جریان سه فاز منبع جریان اعمال شده به موتور ۵۷
- شکل ۴-۱۶. ولتاژ سه فاز دیده شده در سیم پیچ استاتور موتور ۵۷
- شکل ۴-۱۷. گشتاور خروجی موتور ۵۸

فصل پنجم

- شکل ۵-۱. نمونه موتور ساخته شده ۲۰ قطب ۲۴ شیار ۶۰
- شکل ۵-۲. سیم پیچی استاتور موتور نمونه ۲۰ قطب ۲۴ شیار ۶۳
- شکل ۵-۳. سیم پیچی روتور موتور نمونه ۲۰ قطب ۲۴ شیار ۶۳
- شکل ۵-۴. اسلیپ رینگ روتور موتور نمونه ۲۰ قطب ۲۴ شیار ۶۳
- شکل ۵-۵. آزمایش موتور نمونه ۲۰ قطب ۲۴ شیار با منبع DC و گویپلینگ با موتور کمکی ۶۴
- شکل ۵-۶. (a) : نتایج حاصل از تست عملی موتور نمونه ۲۰ قطب ۲۴ شیار با منبع DC
 (b) نتایج حاصل از نرم افزار jmag موتور نمونه ۲۰ قطب ۲۴ شیار ۶۵
- شکل ۵-۷. آزمایش موتور نمونه ۲۰ قطب ۲۴ شیار با منبع AC ۶۶
- شکل ۵-۸. سیگنال القا شده در روتور توسط منبع AC ۶۶

فهرست علائم

FEA	تحلیل اجزای محدود	PMSM	موتورهای سنکرون مغناطیس دائم
EMA	محرک الکترو مکانیکی	EHA	محرک‌ها الکترو هیدرواستاتیکی
Bav	بارگذاری مغناطیسی ویژه	Ac	بارگذاری الکتریکی ویژه
Bg	چگالی شار فاصله هوایی	Byr	چگالی شار یوغ روتور
Bys	چگالی شار یوغ استاتور	Bt	چگالی شار دندانه های استاتور
η	بازده	PF	ضریب قدرت
L/τ_p	نسبت طول محوری به گام قطب	Br	چگالی شار پسماند
C_0	ضریب خروجی	Q	توان ظاهری ورودی
g Li	فاصله هوایی	Lpm	ضخامت آهنرباء دائم
E_s	طول خالص هسته	Φ	شار هر قطب
Z_t	ولتاژ فاز استاتور	N_p	تعداد دور در فاز استاتور
K_w	تعداد کل هادی ها ضریب	h	تعداد هادی در شیار
N_p	سیم پیچی موتور	Z_{slo}	تعداد شیار استاتور
I_s	پهنای پیچک	t α	زاویه گام
P_c	جریان فاز	l_{mts}	طول دور متوسط سیم پیچی استاتور
u	تلفات مسی	R_s	مقاومت فاز استاتور
P_w	تلفات بادخوری	P_f	تلفات اصطکاکی
P_{stra}	تلفات هرزگرد	P_c	تلفات هسته
y	چگالی توان	P_{tot}	تلفات کل
P_{de}	گشتاور خروجی	Vol	حجم موتور
		FSCW	سیم پیچ متمرکز با شیار کسری

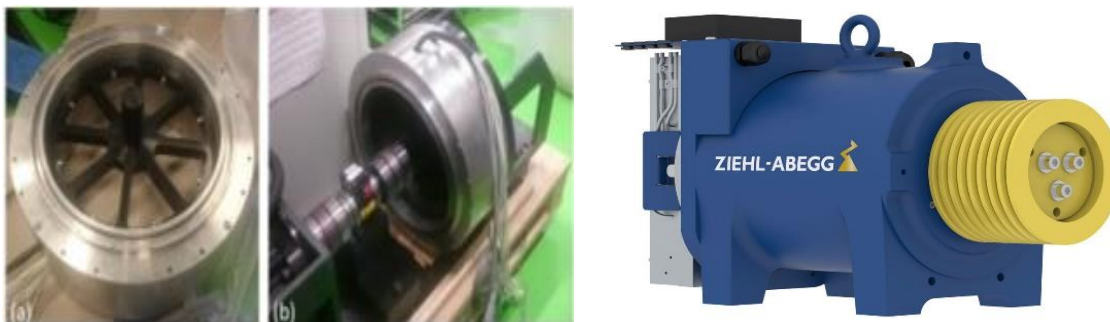
فصل ۱: آشنایی با موتورهای سنکرون آهنربای دائم

۱-۱. مقدمه

موتورهای الکتریکی حدود ۶۵ درصد مصرف انرژی جهانی را در حال حاضر به خود اختصاص داده‌اند. به علت نگرانی‌های زیست محیطی، محرک‌های الکتریکی باید از راندمان بالایی برخوردار باشند در سال‌های اخیر ماشین‌های سنکرون، به دلیل ارزانی مواد آهنربای دائم، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در اینگونه ماشین‌ها روتور به سیم پیچ نیاز نداشته، در نتیجه تلفات مسی آنها کمتر بوده و راندمان بیشتری نسبت به موتور القایی دارد. در موتورهای سنکرون مغناطیس دائم (PMSM) به دلیل سیم پیچ استاتور توزیع شده در شیارها، و همچنین شکل و نحوه قرار گیری آهنرباها بر روی سطح روتور، توزیع شار فاصله هوایی سینوسی خواهد بود. [۲،۱]

۱-۲. کاربردهای موتورهای سنکرون مغناطیس دائم^۱

امروزه، این نوع موتورها بطور گسترده در محرک آسانسور ها، قایقها (شکل ۱-۱) توربینهای بادی مورد استفاده قرار می‌گیرند.



شکل (۱-۱): محرک آسانسور و محرک قایق

استفاده از این نوع موتورها در توربین‌های بادی، باعث تقلیل اغتشاشات صوتی می‌گردد.

در این بخش، انواع ماشین‌های آهنربای دائم و در ادامه مزایا و معایب هر یک مورد بررسی قرار گرفته است.

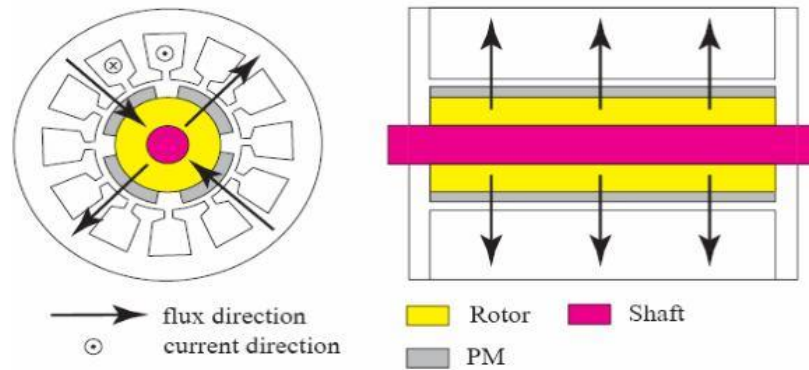
۱-۲-۱. موتورهای شار شعاعی (RFPM)^۲

شکل (۱-۲) دو نما از این نوع ماشین را همراه با جهت شار و جریان نشان می‌دهد. شار در ماشین به طور شعاعی است در

حالی که مسیر جریان در جهت محور روتور آن قرار دارد. [۳]

^۱ Permanent Magnet Synchronous Machines (PMSM)

^۲ Radial Flux Permanent Magnet Machines (RFPM)



شکل (۱-۲) : ماشین شار شعاعی

این موتورها، از لحاظ ساخت، ساده‌ترین و ارزان‌ترین ماشین‌های آهنربای دائم بوده، که این امر استفاده آنها را در صنعت معمول‌تر کرده است. انواع این ماشین‌ها به شرح زیر می‌باشد:

الف) موتورهای با آهنربای نصب شده بر روی سطح با روتور داخلی (ISMPM)^۱

همانطور که در شکل (۱-۳) نشان داده شده است در این نوع موتورها، آهنرباهای دائمی روی سطح روتور قرار داده می‌شوند. مزیت اصلی این نوع ماشین‌ها سادگی و هزینه کم ساخت آن می‌باشد. عیب اصلی آنها نیز نحوه توزیع آهنرباهای دائمی برای مغناطیس‌زدائی میدان‌ها می‌باشد بعلاوه آهنرباها در معرض نیروهای گریز از مرکز، که باعث جدا شدن آنها از روتور می‌شود، قرار دارند. [۳-۴]

ب) موتورهای با آهنربای نصب شده بر روی سطح با روتور خارجی (OSMPM)^۲

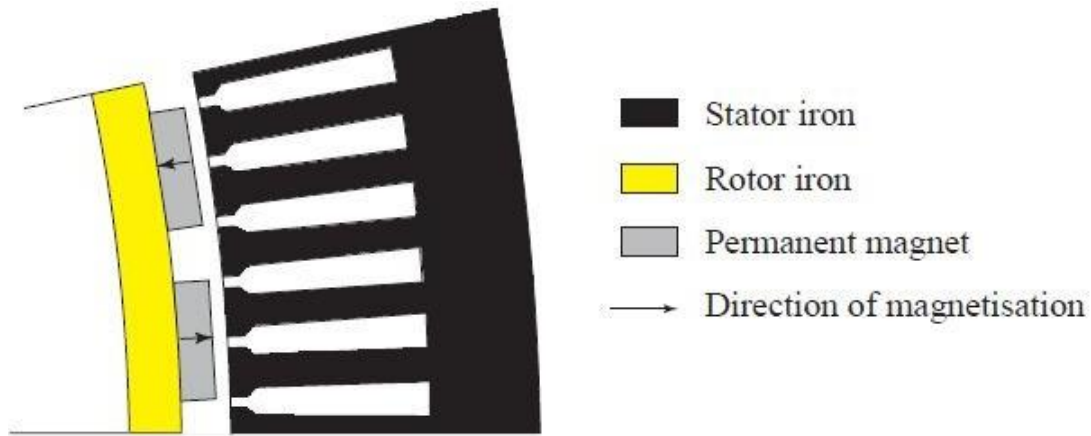
این نوع ماشین متشکل از یک استاتور سیم پیچی شده ثابت که در مرکز ماشین قرار گرفته است می‌باشد که در آن آهنرباها در طول محیط داخلی روتور ثابت شده اند (شکل ۱-۴).

مزایای این پیکربندی عبارتند از:

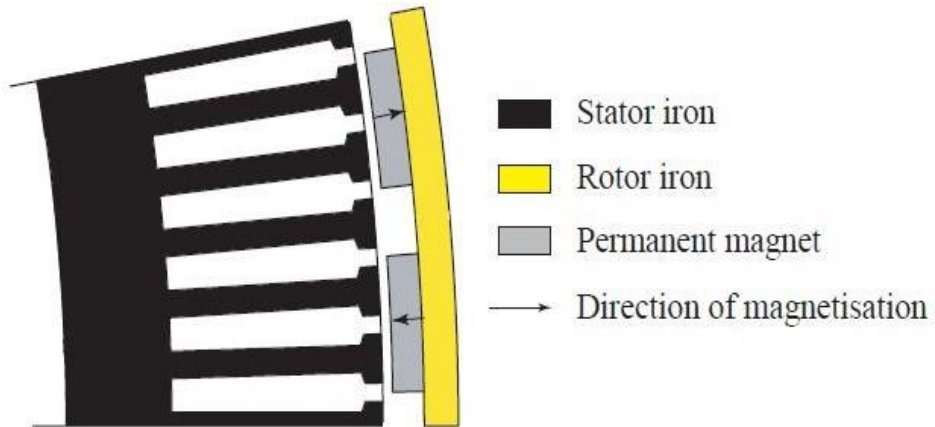
- ✓ بزرگتر بودن قطر روتور و در نتیجه نصب تعداد بیشتر آهنرباها.
- ✓ عدم تاثیر نیروهای گریز از مرکز بر جدا شدن روی آهنرباها از سطح روتور.

^۱ Surface-Mounted PM machines with inner rotor (ISMPM)

^۲ Surface-Mounted PM machines with outer rotor (OSMPM)



شکل (۱-۳): ماشین با آهنربای نصب شده بر روی سطح با روتور داخلی

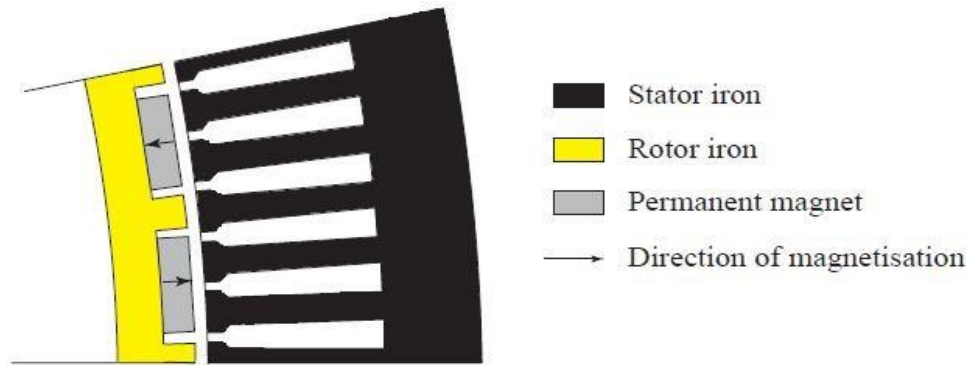


شکل (۱-۴): ماشین با آهنربای نصب شده بر روی سطح با روتور خارجی [۵]

ج) موتورهای با آهنرباهای دائمی الحاقی (IPM)

تفاوت این نوع موتورها با ماشینهای PMSM، در وجود آهن بین آهنرباهای دائمی می باشد. آهن موجود بین آهنرباها، باعث ایجاد یک گشتاور مقاوم علاوه بر گشتاور تولیدی توسط آهنربا می شود. تاکنون این نوع ماشینها در سرعت‌های دورانی پائین کاربرد نداشته اند. تاثیر گشتاور مقاوم روی نفوذپذیری و مقایسه آن با ماشین طرح‌های ماشینهای PMSM می تواند قابل توجه باشد.

۱ Interior Permanent Magnet Machines (IPM)



شکل (۱-۵): ماشین با آهنرباهای دائمی الحاقی

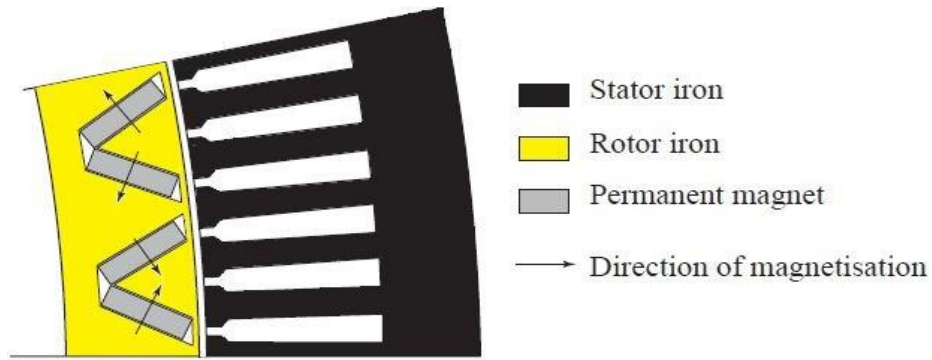
د) موتورهای با آهنرباهای دائمی دفن شده در هسته

راه دیگری برای قرارگیری آهنرباهای دائمی در روتور قراردادن آنها داخل هسته روتور می‌باشد. مزیت این نوع ماشین‌ها در مقایسه با ماشین‌های آهنربائی سطحی، امکان تمرکز شار تولید شده بوسیله آهنرباها در روتور است که باعث رسیدن به چگالی‌های شار بیشتری در فاصله هوائی می‌شود. به هر حال، آهنرباهای کاشته شده به خوبی در برابر نیروهای مکانیکی و مغناطیسی زدائی محافظت می‌شوند. روش‌های مختلفی برای قرارگیری آهنرباها در روتور وجود دارد که در زیر دو شیوه آن توضیح داده شده است:

✓ آهنرباهای دائمی V شکل (VBPM)

همانطور که در شکل (۱-۶) نشان داده می‌شود، در این پیکربندی دو آهنربا به ازاء هر قطب در یک زاویه مشخص به شکل V جایگذاری شده است. از معایب اصلی این نوع موتورها کاهش چگالی شار مغناطیسی آهنربا می‌باشد. علاوه بر این، روتور برای تعداد قطب‌های زیاد به آسانی قابل تعبیه و تنظیم نیست.

تعداد جفت قطب‌های زیاد، فضای کوچکتری برای آهنرباها ایجاد کرده و زاویه کوچکتری بین دو آهنربا را سبب می‌شود. یکی دیگر از معایب پیکربندی V شکل ازدیاد تعداد آهنرباها است، که باعث افزایش هزینه ماشین می‌شود. ماشین‌هایی که در مرجع [۷] مورد بررسی قرار گرفته‌اند نشان دهنده کاربرد این موتور (موتور سنکرون ۴۵ Kw، ۶۰۰ rpm) در صنایع کاغذسازی می‌باشد.

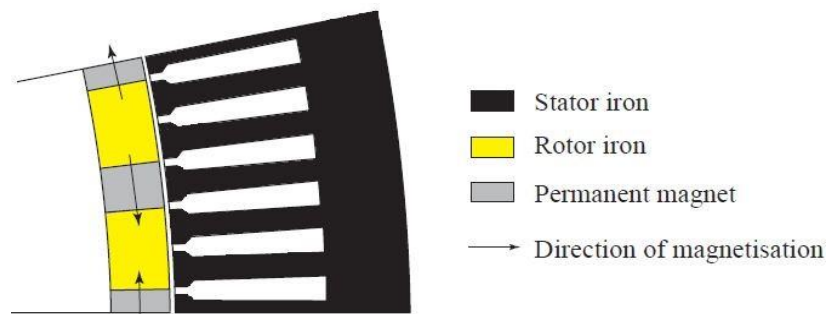


شکل (۶-۱): ماشین با آهنرباهای دائمی V شکل [۷]

✓ آهنرباهای دائمی مغناطیس شده بطور مماسی (TBPM)

در شکل (۷-۱) این نوع پیکربندی نشان داده شده است. روتور از قطعات مغناطیس و غیرمغناطیس شامل شده که بر روی یک میله فرومغناطیس نصب شده، تشکیل یافته است. کاربرد میله فرومغناطیس، انتقال شار تولیدی توسط آهنرباها به محور موتور می باشد.

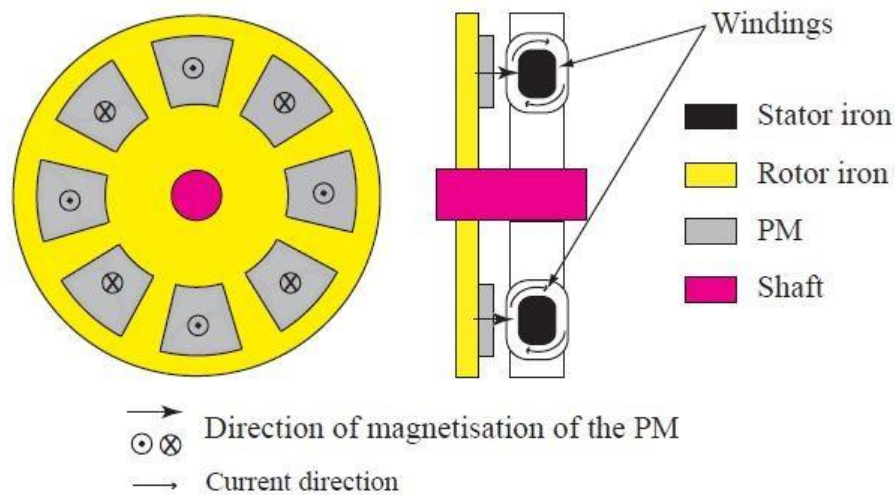
عیب این نوع موتورها استفاده از تعداد زیاد قطعات الحاقی است که اگر تعداد قطبها زیاد باشد باید با مهارت خاصی جایگذاری گردند. این امر دشواری تولید این نوع از پیکربندی را سبب می شود. به هر حال، در مقایسه با حالت V شکل، به دلیل عدم وجود لبه های آهن، نشت شار مغناطیسی خیلی کمتر است.



شکل (۷-۱): ماشین آهنرباهای دائمی مغناطیس شده بطور مماسی

۲-۲-۱. موتورهای شار محوری (AFPM)

موتورهای آهنربای دائم شار محوری یکی دیگر از موتورهای کاربردهای سرعت پائین هستند. این نوع موتورها در مقایسه با موتورهای شار شعاعی قطر بزرگتری و بطور نسبی طول محوری کوتاه تری دارند. باتوجه به نام گذاری این نوع موتور و همانطور که در شکل (۸-۱) نشان داده شده است، شار مغناطیسی از آهنرباها بطور محوری عبور می کند.



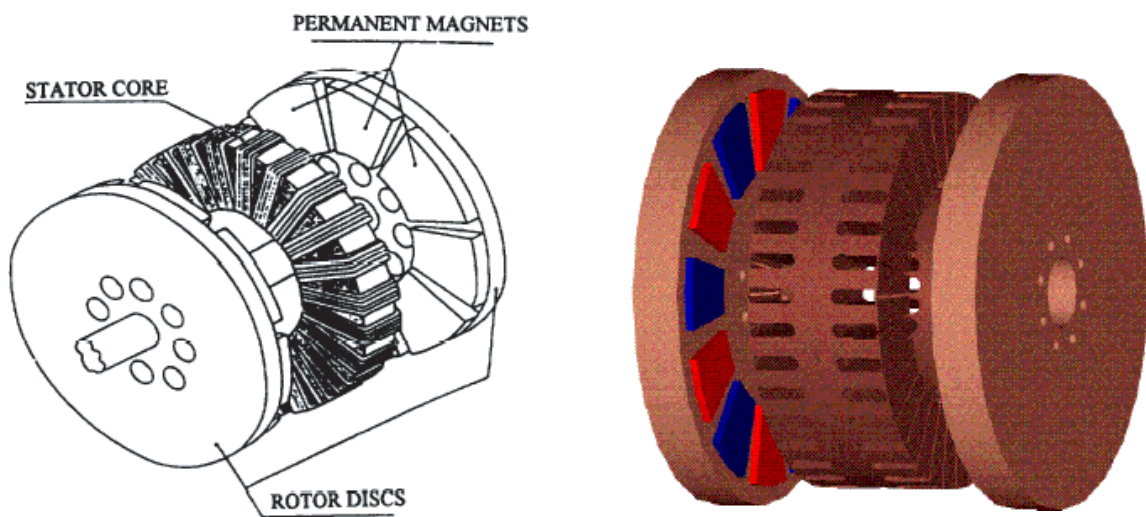
شکل (۸-۱): ماشین شار محوری [۱۰]

در کاربردهای سرعت پائین رایج ترین ساختار این موتورها، ماشین های Torus می باشند.

که در آن، استاتور بین دو روتور خارجی که بطور محکم به محور متصل شده اند قرار می گیرد آهنرباهای دائم به طور متضاد روبروی هم و در دو طرف روتور قرار گرفته اند. شکل (۹-۱). [۱۰]

مزایای اصلی ماشین های Torus عبارتند از:

- ✓ وزن سبک به همراه طول محوری کوتاه.
- ✓ قابلیت تهویه و خنک کنندگی مناسب برای سیم پیچ های استاتور.
- ✓ عدم نیاز به شیار در استاتور.
- ✓ کاهش گشتاور دندانه ای، راندمان بالا و کم بودن اغتشاش صوتی، به علت فاصله هوایی زیاد و حذف شیار.



شکل (۹-۱): ماشین Torus

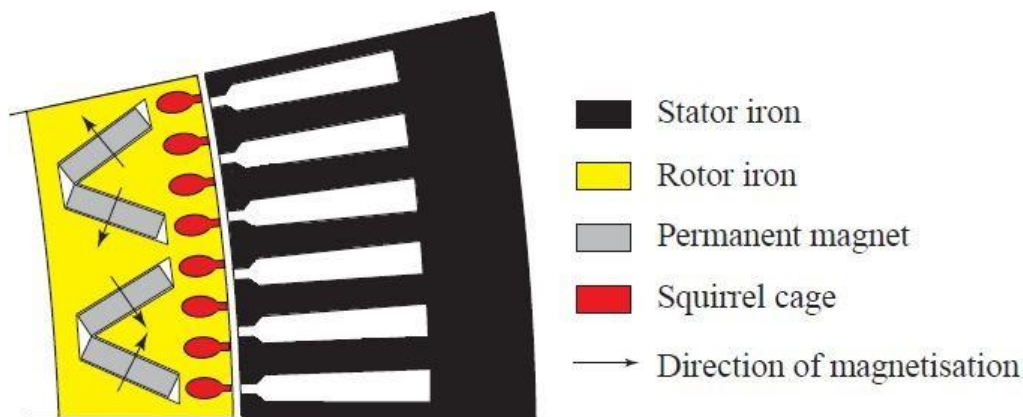
مهمترین عیب‌های این نوع ماشین‌ها مونتاژ دشوار آن به علت نیروهای محوری است دیگر پیکربندی ماشین AFPM، ماشین‌های آهنربای دائمی داخلی دو طرفه، ماشین‌های تک لبه، ماشین‌های دو طرفه بدون آهن و ماشین‌های چند دیسکی هستند. این نوع ماشین‌ها در مراجع به [۱۱-۱۳] طور کامل شرح داده شده‌اند. کاربردهای این ماشین‌ها در توربین‌های کوچک، محرک‌های کشتی و آسانسورها می‌باشند.

۱-۲-۳. ماشین‌های خود راه انداز، مدولار و القائی

الف) ماشین‌های آهنربای دائم خود راه انداز (LSPM)

این نوع موتورها در واقع یک موتور سنکرون آهنربای دائمی با قفس سنجابی در داخل روتور می‌باشد. قفس سنجابی، حالتی از یک ماشین القائی است که اجازه می‌دهد موتور بدون هر گونه معکوس شونده‌گی شروع بکار کند. بنابراین میتوان آنرا بطور مستقیم به منبع تغذیه وصل کرد. این نوع موتور بعلت وجود قفس سنجابی در ابتدا به صورت آسنکرون و سپس در حالت پایدار به صورت سنکرون بکار ادامه می‌دهد.

^۱ Line Start PM Machines (LSPM)



شکل (۱-۱۰): ماشین آهنربای دائم خود راه انداز

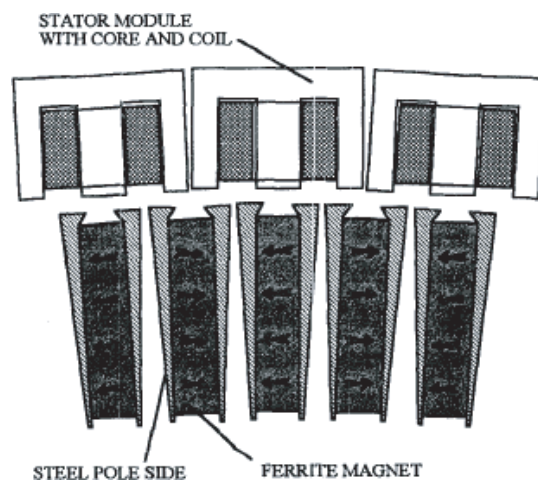
موتورهای آهنرباء دائم خود راه انداز به علت داشتن کارائی و ضریب توان بالا می‌تواند جایگزین مناسبی برای موتورهای القائی باشد. قدرت استارت کمتر، طراحی مشکل و هزینه بالا را می‌توان از معایب این نوع موتورها نام برد. در این نوع موتورها را به عنوان جایگزینی برای موتورهای القائی در پمپ‌ها مورد بررسی قرار داده است.

ب) ماشینهای آهنربای دائمی مدولار سرعت متغیر (LSPM)

این ماشین‌ها در بخش ژنراتور توربین‌های بادی با سرعت متغیر مورد استفاده قرار می‌گیرند. همانگونه که از اسم این موتورها پیدا است، ماشین از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده است.

هر واحد موتور یک قطب را شامل می‌شود. واحدهای استاتور دارای هسته E شکل بوده که دو شیار آن یک کلاف از سیم‌پیچ را تشکیل می‌دهد. شکل (۱-۱۱) سپس هر کلاف به یک لبه از یکسوکننده تکفاز متصل شده و بطور مستقل کار می‌کند از مزایای این پیکربندی، می‌توان به راحتی پیاده سازی، سادگی خنک‌کاری و شکل سیم‌پیچ ساده آن اشاره نمود.

نیاز به وجود چندین خازن در تنظیم کردن افت ولتاژ واکنشی تولید مقاومت القائی زیاد در سیم‌پیچ‌ها را سبب می‌گردد را می‌توان عیب آن ذکر کرد. مقدار تلفات جریان‌های گردابی اضافی نیز ممکن است بخاطر نوع ساختار طرح افزایش یابد.



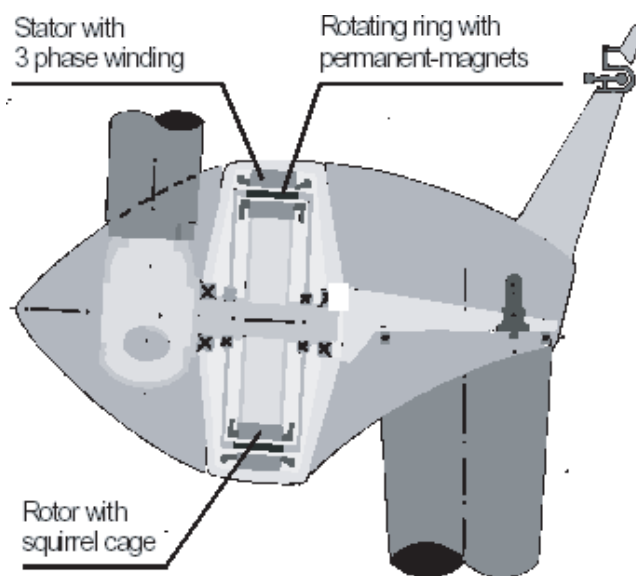
شکل (۱۱-۱): ماشین آهنربای دائمی مدولار سرعت متغیر

ج) ماشین‌های آهنربای دائمی القائی

شبیه سازی روش المان محدود برای این ماشین‌ها در دانشگاه Darmstadt ، برای استفاده در توربین‌های بادی مورد مطالعه

قرار گرفته است. [۶] ژنراتور از ۲ بخش چرخشی ، روتور با یک قفسه سنجابی در مرکز و یک رینگ که آهنرباهای دائمی را

حمایت می کند، تشکیل شده است. شکل (۱۲-۱)



شکل (۱۲-۱): ماشین آهنربای دائمی القائی [۶]

مزیت استفاده از ژنراتور القائی برای توربین‌های بادی، امکان اتصال ژنراتور از راه ترانسفورماتور بدون هرگونه نیروی الکتریکی، به طور مستقیم به شبکه است. لغزش ماشین القائی تنش کمتری را روی پره‌ها نسبت به موتورهای سنکرون ایجاد می‌کند. به هر حال، به خاطر داشتن دو بخش چرخشی دارای ساختار پیچیده ای می‌باشد.

۱-۳. انتخاب موتور مناسب جهت کاربرد در آسانسور

در صورتی که محرکه از طریق اتصال مستقیم از موتور به قرقره کشش منتقل گردد، موتور از نوع بدون بدون گیر بکس است. شکل (۱-۵) توان موتورهای بدون گیر بکس از ۲۲ تا ۸۳ کیلو وات متفاوت است، اما موتورهای بدون گیربکسی کشش از ۳ تا ۳۰ کیلو وات برخوردارند. از بالابرها بدون گیر بکس مدت هاست که برای آسانسورهای سرعت بالا استفاده می‌شود. این بالابرها فاقد گیر بکس بوده و این مسئله باعث می‌شود لرزش کابین هنگام حرکت به حداقل برسد و حداقل ۵۰٪ در مصرف انرژی الکتریکی صرفه جویی می‌نماید. (نسل جدیدی از موتورها می‌باشد و از لحاظ حرکتی به هیچ عنوان قابل قیاس با موتورهای گیربکس دار نیستند. اما از لحاظ قیمتی دو برابر آنها هستند). فلکه کشش مستقیماً به شفت یک موتور الکتریکی متصل می‌باشد. ترمز الکترو مکانیکی نیز به طور مستقیم بر روی شفت موتور اعمال می‌شود. به دلیل استفاده از گیربکس‌های کاهنده سرعت (دور) این گونه موتورها باید گشتاور خروجی بسیار بالایی در دوره‌های پایین تولید کنند و به همین دلیل ابعاد این گونه موتورها بایستی بسیار بزرگ طراحی شود. کاربرد بالابر بدون گیر بکس در سرعت‌های پایین بسیار آسان تر است. یک مبدل ولتاژ و فرکانس در سر راه منبع تغذیه و موتور قرار می‌گیرد که قادر است به راحتی منحنی شتاب مثبت و شتاب منفی را در این گونه آسانسورها کنترل نماید. در گذشته و قبل از رایج شدن کاربرد مبدل‌های ولتاژ و فرکانس از موتورهای DC برای کنترل این منحنی‌ها استفاده می‌گردید. موتورهای DC اگر چه دارای قابلیت کنترلی بسیار بالایی می‌باشند ولی به دلیل گران بودن آنها و نیز هزینه‌های بالای تعمیر و نگهداری به جز استفاده در آسانسورهای سنگین در سایر موارد فاقد توجیه اقتصادی می‌باشند. در اثر پیشرفت‌های فنی در زمینه الکترونیک قدرت و مگنت‌های دائمی در سالیان اخیر بالابرهای بدون گیربکس در صنعت رایج شده‌اند.

این موتورهای AC که توسط مبدل‌های ولتاژ-فرکانس کنترل می‌شوند علاوه بر توانایی کنترل پذیری بسیار بالا از نظر

اقتصادی در مقایسه با موتور های DC بسیار مقرون به صرفه بوده و از نظر ابعاد نیز کاملاً مناسب کاربرد در آسانسورهای تا یک متر بر ثانیه می باشند.

موتورهای مورد استفاده در بالابرها بدون گیر بکس را موتورهای سنکرون می نامند. این موتور ها به موتور های DC بدون زغال (Brush less) و یا اختصاراً "موتور های بدون زغال" معروف اند . زیرا این موتور ها از نظر مشخصات فنی کاملاً شبیه موتور های DC بوده ولی فاقد زغال می باشد. سابقه کاربرد این گونه موتور ها در صنعت به ۲۰ سال پیش بر می گردد. از این گونه موتور ها در ماشین افزار ها ، ماشین مورد استفاده در صنعت چوب ، ماشین های بسته بندی و مشابه آنها استفاده می شده است. مدت کوتاهی است که از کاربرد این گونه موتور ها در صنعت آسانسور نیز استفاده می شود. در این گونه موتور ها ، سیم پیچی استاتور در اطراف روتور قرار دارد و روتور که مگنت های دائمی بر روی آن قرار دارند در داخل استاتور واقع شده است. در این گونه موتور ها باتوجه به کاهش تعداد دندانه ها به بهای افزایش پیچیدگی و هزینه های تولید ، ابعاد موتور تا حد قابل توجهی کاهش می یابد. با توجه به پهنای بسیار کم این موتور ها ، در ابتدای کار از آنها در آسانسور های بدون موتور خانه استفاده می شد.

امروزه با پیشرفت دانش ساخت و فن آوری صنعتی استفاده از این بالابر ها در آسانسور های سرعت پایین نیز در حال گسترش است. پیش از پیدایش بالابرها بدون گیربکس در شکل کنونی آنها، برای آسانسور های بدون موتور خانه در بالای چاهک از بالابرها ی هیدرولیک استفاده می شد اما در حال حاضر مکانیزم کاهنده سرعت (گیربکس) را حذف میکنند ، که این امر موجب کاهش وزن و اندازه موتور کششی می شود ، با این راه حل امکان نصب آنها در داخل چاهک آسانسور فراهم می شود. به ویژه در مواقعی که امکان فراهم نمودن موتور خانه در بالا یا پایین چاهک وجود نداشته و اینکه معماری ساختمان لطمه وارد میکند. بالابر های بدون گیر بکس با موتور های سنکرون در حال حاضر جهت سرعت های پایین و ظرفیت متوسط مورد استفاده قرار می گیرند (۱۰۰۰ کیلو گرم در سرعت یک متر بر ثانیه). برای سرعت ها و ظرفیت های بالاتر در این گونه بالا بر ها از موتور های آسنکرون استفاده می شود که دلیل آن مزیت های فنی و اقتصادی موتور های آسنکرون می باشد . مگنت های دائمی قطعات بسیار گران می باشد و در کاربرد های سرعت و ظرفیت های بالا موتور های سنکرون برخی از امتیاز های خود را از بین می برند. این محدودیت ها عبارتند از :

این گونه آسانسور ها طبعاً دارای موتور خانه بوده و بنابراین ابعاد بالابر چندان مورد نظر نمی باشد. در سرعت های بالا، کاهش تعداد قطب های موتور ها جهت جلوگیری از اتلاف توان ضرورت دارد و بنابراین موتور سنکرون با داشتن قطب های زیاد، امتیازی نخواهند داشت. اختلاف بین بازدهی موتور سنکرون و موتور آسنکرون در سرعت های بالا کاهش می یابد (بازدهی موتور سنکرون بالاتر از موتور آسنکرون میباشد). در هر صورت، امتیازات هر دو نوع موتور قابل توجه هستند. این گونه موتور ها بدلیل سادگی ساختار و کاهش قابل توجه قطعات دارای هزینه ای نگهداری بسیار پایین تری بوده و قابلیت تعمیر و جایگزینی آنها بسیار بالاتر از بالابر های گیربکسی است. در هر دو نوع این موتور ها اتلاف انرژی در استاتور های بیرونی اتفاق می افتد و بنابراین برخلاف موتورهای DC نیازی به سیستم خنک کننده وجود ندارد. بر این اساس، مقاومت این موتور ها در محیط های رطوبتی و گرد و غبار بالاتر بوده و بدلیل عدم استفاده از روغن در بالا برهایی که با این نوع موتور ساخته می شوند، سازگاری با محیط زیست نیز بالاتر است.



شکل (۱-۱۳): موتور گیرلس مورد استفاده در آسانسور

۱-۳-۱. کنترل الکتریکی موتور

بالابرهای بدون گیربکس به همراه یک دستگاه الکترونیکی مورد استفاده قرار می گیرند. این کنترل کننده موتور بالابر، در واقع یک مبدل ولتاژ - فرکانس پیشرفته است که در نوعی از آن گشتاور خروجی موتور در شرایط متفاوت بار به صورت برداری کنترل می شود. نحوه حرکت و کارکرد آسانسور بستگی کاملی بویژگی های موتور و کنترل کننده دارد به گونه ای که در صورت عدم استفاده از تجهیزات مناسب و یا عدم تطابق موتور و کنترل کننده آن، مشکلات زیر بروز خواهد کرد.

۱- حرکت فلکه کشش در اثر باز شدن ترمز

در این حالت یک گشتاور نامتعادل به سرعت اعمال شده و لذا پاسخ بسیار سریعی برای محو کردن اثر حرکت لحظه ای فلکه کشش مورد نیاز است، به گونه ای که این حرکت در کابین احساس نشود.

۲- یکنواختی حرکت

سیستم کابین، بکسل، وزنه تعادل در ماهیت خود دارای بسامد نوسانات طبیعی خود می باشد. مقدار این بسامد از نظر اندازه مشابه بسامد نوسانات سرعت زاویه ای فلکه کشش می باشد که عمدتاً از مشکلات احتمالی در اتصال (کوپلینگ) احساسگر سرعت (speed sensor) و وجود اشکالات ماهوی در منحنی خروجی کنترل دستگاه کنترل کننده دور موتور ناشی می شود. این اشکال می تواند ناشی از ماهیت سویچینگ ترانزیستورهای قدرت (IGBT) در دستگاه مبدل ولتاژ - فرکانس باشد. دقت و مشخصات فنی احساسگر سرعت دارای نقش بسیار حیاتی است. به همین دلیل، استفاده انکودرهای بادقت حداقل ۱۰۰۰۰ پالس در هر دور ضروری است.

۳- مصرف انرژی

آسانسورهای سرعت بالا عمدتاً دارای ظرفیت های بالای حمل مسافر یا بار هستند (۱۰۰۰ کیلو گرم و بیشتر) و بنابراین مصرف انرژی آنها بالاست. از سوی دیگر بالابر های بدون گیر بکس بدلیل بازدهی بسیار بالا دارای خاصیت برگشت پذیری (reversibility) بالایی نیز هستند. بنابراین، با توجه به ماهیت ترمز الکتریکی (Electrical stop) در این گونه آسانسورها (کاهش سرعت در منحنی حرکت تا حد ایست کامل توسط موتور انجام شده و پس از توقف کامل، ترمز الکترومکانیکی وظیفه نگهداشتن و حمایت از ایست را برعهده دارد) در مرحله ترمز (کابین خالی رو به بالا و کابین پر رو به پایین) انرژی ناشی از ترمز دارای مقادیر بسیار بالایی است که در مقاومت های حرارتی مخصوص تلف می شود. در یکی دو سال اخیر، برخی سازندگان برای حل این مشکل، دستگاه های کنترل دور خود را به وسایلی مجهز کرده اند که قادر است ترمز را به جای اتلاف به صورت حرارت مجدداً به شبکه تزریق نماید و این نقطه عطفی در صرفه جویی انرژی در این گونه بالابر ها است.

بدین ترتیب علاوه بر کاهش یا حذف کامل شوک های وارده به شبکه در هنگام استارت موتور، انرژی جنبشی ذخیره شده در کابین در زمان حرکت، در هنگام کاهش سرعت به صورت انرژی پتانسیل ذخیره می شود و این صرفه جویی به حدی است که گاهی با برق مصرف شده برای کشش برابری می کند. بالابرها بدون گیربکس امروزی با موتورهای سنکرون و آسنکرون نیاز های حیاتی آسانسور های مدرن را به خوبی برآورده می سازند. سرعت بالا، نرمی و راحتی مطلوب مسافر، مصرف بسیار پایین انرژی برق، کاهش ضربات الکتریکی بر روی شبکه برق ورودی و تاسیسات ساختمان ها، هزینه های نگهداری پایین و عدم نیاز به سیالات آلوده کننده محیط از مهم ترین ویژگی های این بالابر های آسانسور می باشند. از طرف دیگر، کاهش ابعاد این گونه ماشین ها سبب گسترش استفاده آنها در موارد خاص (آسانسور های بدون موتور خانه) گردیده و تحولی در معماری نوین به شمار می روند. جای تردید نیست که با پیشرفت فن آوری مهندسی در سالیان آتی و کاهش هزینه های تولید، این گونه بالابر ها جایگزین مناسبی برای انواع مرسوم بالا بر گیربکس دار خواهند بود.

پارامتر های طراحی

پارامترهای مورد استفاده برای مقایسه راه حل های مختلف محرک را می توان در دو نوع، سطح پایین و بالا تقسیم نمود. پارامترهای سطح پایین نیاز قابلیت های این دستگاه می باشد، و پارامترهای سطح بالا از نظر سیستمی مورد نیاز می باشد. به عنوان مثال سطح پایین قابلیت های محرک از نظر میزان گشتاور، توان و فرکانس و... بررسی می شود و در سطح بالا سیستم هزینه، قابلیت اطمینان، متوسط مصرف برق و مد نظر می باشد. [۹] قابلیت خنک کنندگی دستگاه برای گشتاور خروجی مناسب به عنوان نمونه ای از یک پارامتر تابعی باید در نظر گرفته شود. سایر پارامترهای عملکردی مهم در بررسی یک الکتریکی ماشین های الکتریکی تحویلی توان هارمونیک سطح قدرت الکترونیک تجهیزات هارمونیک ها به عنوان مثال کلیدزنی (بسیار مهم هستند. این هارمونیک ها باعث تلفات اضافی می شود. نمونه ای از چنین خصوصیات عملکردی، برای ماشین های الکتریکی جهت کاربرد در بالابر آسانسور (۳/۹ کیلووات)، در جدول (۱-۴) داده می شود. [۱۴] ماشین الکتریکی در میان دیگر پارامترها اندوکتانس، شار مغناطیسی و سطح برجستگی هستند.

جدول (۱-۱): خصوصیات عملکردی مورد نیاز ماشین های الکتریکی جهت کاربرد در آسانسور

مقادیر	پارامتر	مقادیر	پارامتر
145 [kg]	وزن	250 [kN]	حداکثر بار محوری ، فشردگی
195[rpm]	گشتاور	1300 [kN]	حداکثر بار محوری ، کششی
192[rpm]	سرعت	-10 to 60 [°C]	محدوده درجه حرارت
145[kg]	وزن موتور	air	خنک کاری
10.5[A]	جریان	3.9 kW	توان
380[V]	ولتاژ	> 81 [%]	بازده EM و گیربکس
		> 93 [%]	بازده ، اینورتر

۱-۳-۲. انتخاب موتور الکتریکی مناسب برای کاربرد در آسانسور

ماشین های الکتریکی تبدیل توان در هر دو جهت، الکتریکی به مکانیکی (موتور) و مکانیکی به الکتریکی (ژنراتور) را انجام می دهند. مقایسه بین این ماشین های الکتریکی بر اساس امتیاز بندی از بالا به پایین در جدول (۲-۱) ارائه شده است.

جدول (۲-۱): مقایسه ماشین های الکتریکی از نظر ویژگی های مهم آنها

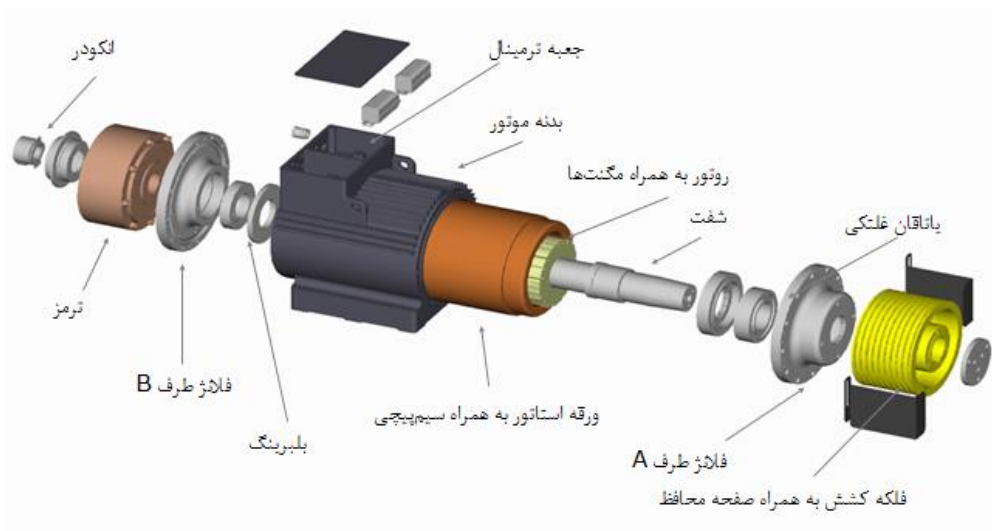
ویژگی های مهم ماشین الکتریکی	AM	PMSM	SR	SM
چگالی توان	۱	۲	۳	۴
تعمیر و نگه داری	۱	۱	۱	۲
قابلیت اطمینان	۱	۳	۲	۴

از جدول (۲-۱) مشاهده می شود که ماشین سنکرون (SM) دارای بالاترین چگالی توان و قابلیت اطمینان است. ماشین های الکتریکی دیگر در جدول (۲-۱) ماشین آسنکرون (AM)، ماشین سنکرون آهنربای دائم (PMSM) و ماشین سوئیچ رلوکتانسی (SR) دارای چگالی توان و قابلیت اطمینان پائین تر از SM می باشند. تمامی این چهار ماشین الکتریکی تقریباً به اندازه هم به تعمیر و نگهداری نیازمندند. از ویژگی های مهم ماشین الکتریکی سنکرون توانایی کنترل جریان سینوسی با تعیین موقعیت روتور و گشتاور بالا، نوسان گشتاور کم، عملکرد در سرعت پایین، و تلفات هارمونیک کم می باشد. ماشین

DC نیاز به یک سنسور موقعیت و معمولاً نوسان گشتاور بالا دارد. [۱۵]

موتورهای سنکرون مغناطیس دائم سطحی یک نوع موتور AC می باشند که آهنرباء دائم بر روی سطح روتور قرار گرفته است. در این نوع موتورها چگالی توان بالا و راندمان بالا بخاطر استفاده از آهنرباء دائم می باشد. حذف تلفات سیم پیچی روتور این موتورها راندمان را در مقایسه با موتور القایی ۱۰ درصد بهبود می بخشد.

موتورسنکرون مغناطیس دائم معمولا بر اساس اندازه کوچک، چگالی توان بالا، گشتاور بالا، وزن کم و سرعت بالا طراحی می شود. [۱۶] این ماشین عملکرد رضایت بخشی برای کاربرد در آسانسور را نشان می دهد و با هدف افزایش کارائی، این ماشین با توجه به قطر استاتور و هندسه آهنربای دائم بهینه سازی می شود. آرایش سیم پیچ متمرکز در ترکیب با شکل دندانه های استاتور چگالی گشتاور بالایی را می دهد. دندانه ها بین هر فازدارای اثر مطلوب بر شار هسته استاتور بوده و اثر خنک کننده در اجزای سیم پیچ های نزدیک را فراهم می سازد. ماشین سنکرون مغناطیس دائم دارای چهار بخش می باشد : استاتور، سیم پیچ، شافت روتور و آهنرباء دائم. یک نمونه متعلقات موتور الکتریکی برای آسانسور در شکل (۱-۱۴) با طول ۲۳۲ میلیمتر و قطر ۱۶۹ میلی متر نشان داده شده است.



شکل (۱-۱۴) : متعلقات موتور الکتریکی آسانسور

موتور مورد مطالعه برای محرک آسانسور در این پایان نامه یک موتور سنکرون مغناطیس دائم سطحی ۳/۹ کیلووات ، ۳۸۰ ولت AC و سرعت ۱۹۲ دور در دقیقه طراحی شده است. این ماشین الکتریکی ۳ فاز و ۲۰ قطب و ۲۴ شیار است.

۱-۴. جمع بندی

در سال‌های اخیر ماشین‌های سنکرون، به دلیل ارزانی مواد آهنربای دائمی، مورد استفاده قرار گرفته اند. در این فصل به بررسی انواع ماشین‌های سنکرون پرداخته شد. از بین این ماشین‌ها، ماشین سنکرون مغناطیس دائم بخاطر اینکه روتور به سیم پیچ نیاز ندارد، تلفات مسی آنها کمتر بوده و راندمان بیشتری نسبت به موتور القائی دارد. انواع موادی که در این ماشین‌ها بکار می‌روند از قبیل: مواد مغناطیسی نرم، مواد هادی الکتریسیته، مواد عایق، آهنرباهای دائم می‌باشند که در این فصل از جهات مختلف توضیح داده شد. همچنین خصوصیات عملکردی مورد نیاز ماشین‌های الکتریکی و انتخاب موتور الکتریکی مناسب جهت کاربرد در آسانسور مورد بررسی قرار گرفته و یک نمونه موتور با مشخصات خاص انتخاب گردید.

فصل ۲: بررسی پژوهش‌های پیشین در خصوص طراحی هیمنه

موتور سکرون مغناطیس دائم

۲-۱. مقدمه

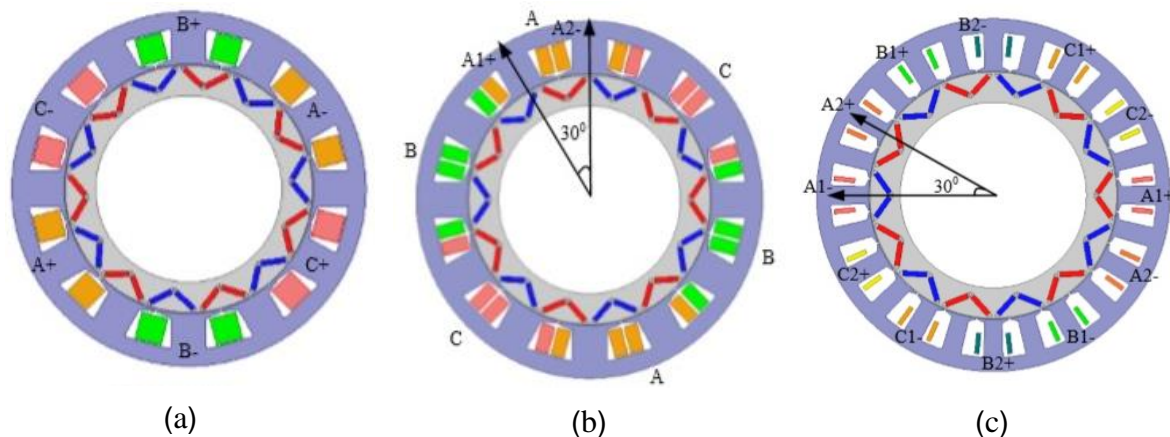
در این فصل به بررسی و بحث در مورد تحقیقات انجام شده درباره طراحی بهینه موتورهای سنکرون مغناطیس دائم پرداخته می‌شود. در این بخش پژوهش‌های مربوط به طراحی سیم پیچ استاتور در جهت بهینه سازی هارمونیک های فاصله هوایی موتور سنکرون مغناطیس دائم مطرح می‌شود.

۲-۲. طراحی بهینه موتورهای سنکرون مغناطیس دائم

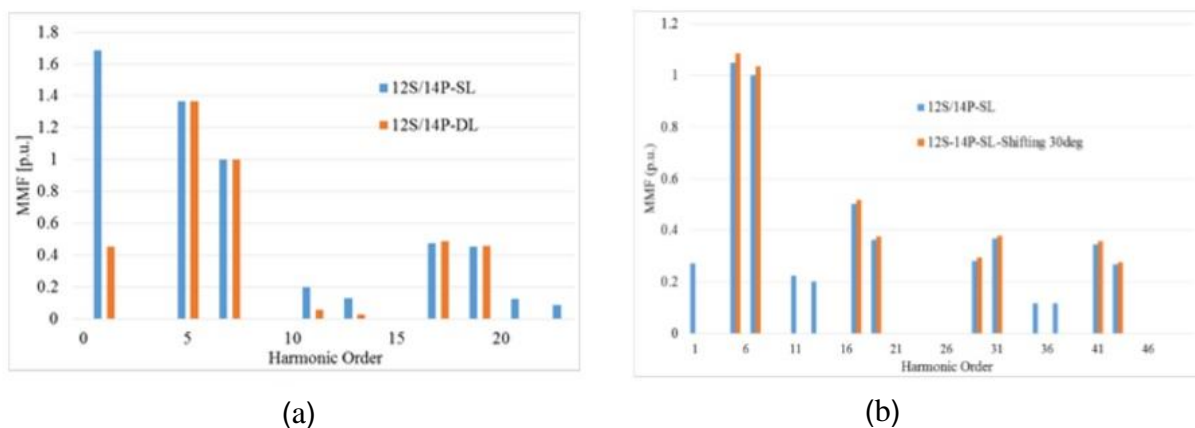
به دلیل افزایش کاربرد گسترده موتورهای سنکرون مغناطیس دائم در صنایع مختلف، مقالات زیادی در مورد طراحی بهینه این نوع موتورها ارائه گردیده است. جدیدترین تحقیقی که در زمینه بهینه سازی هارمونیک های فاصله هوایی موتورهای سنکرون مغناطیس دائم انجام شده است توسط شائوینگ زو و همکارانش [۱۰] در سال ۲۰۱۸ می‌باشد که از طراحی سیم پیچ دو طبقه و مقایسه آن با سیم پیچ یک طبقه و در نهایت سیم پیچ پیشنهادی از طریق انتقال سیم پیچ طبقه دوم جهت بهینه نمودن یک موتور سنکرون مغناطیس دائم سرعت بالا برای کاربرد کمپرسور استفاده کرده است و جنبه‌های حذف هارمونیک اول و تضعیف هارمونیک های اضافی نیز بررسی گردیده است که در نهایت مدل تحلیلی ارائه شده با استفاده از روش اجزاء^۱ محدود تحلیل می‌شود.

توابع هدف در مرجع [۱۰] هارمونیک های فضایی mmf فاصله هوایی موتور می‌باشند. متغیرهای طراحی در شکل (۲-۱) عبارتند از: سیم پیچ یک طبقه ۱۲ شیار ۱۴ قطب، سیم پیچ دو طبقه ۱۲ شیار ۱۴ قطب، سیم پیچ یک طبقه ۱۲ شیار ۱۴ قطب با انتقال شیار. هارمونیک های فضایی mmf فاصله هوایی موتور در شکل (۲-۲) برای متغیرهای طراحی، با استفاده از تحلیل المان محدود و پارامترهای بهینه موتور به دست می‌آید.

^۱ Finite element analysis (FEA)



شکل (۲-۱): موتور مغناطیس‌های دائم درونی (a) ۱۲ شیار ۱۴ قطب یک لایه (b) ۱۲ شیار ۱۴ قطب دو لایه (c) ۲۴ شیار ۱۴ قطب یک لایه [۱۰]



شکل (۲-۲): هارمونیک های فضایی mmf فاصله هوایی موتور (a) ۱۴ قطب ۱۲ شیار (b) ۱۴ قطب ۱۲ شیار با انتقال شیار [۱۰]

تاثیر تعداد لایه‌ها بر عملکرد ماشین‌های سنکرون آهنربای دائم سطحی (SPM) در [۲۱] مورد بررسی قرار گرفته است، که نشان می‌دهد که پیکربندی دو طبقه دارای محتوای هارمونیک کم‌تر و در نتیجه موج گشتاور کم‌تر است، اما قابلیت سربار ضعیف‌تر نسبت به هم‌تای یک طبقه دارد. در [۲۲] [۲۳]، روش سیم‌پیچ دو طبقه ای برای کاهش یا حتی خنثی کردن برخی هارمونیک‌های خاص با تغییر زاویه خاص مکانیکی بین طبقات اول و دوم پیشنهاد شده است. سه مجموعه سیم‌پیچ و به طور خاص در [۲۳] اثر چهار لایه سیم‌پیچ روی تلفات جریان گردابی و ارتعاش / نویز مورد شناسایی قرار گرفته‌اند.

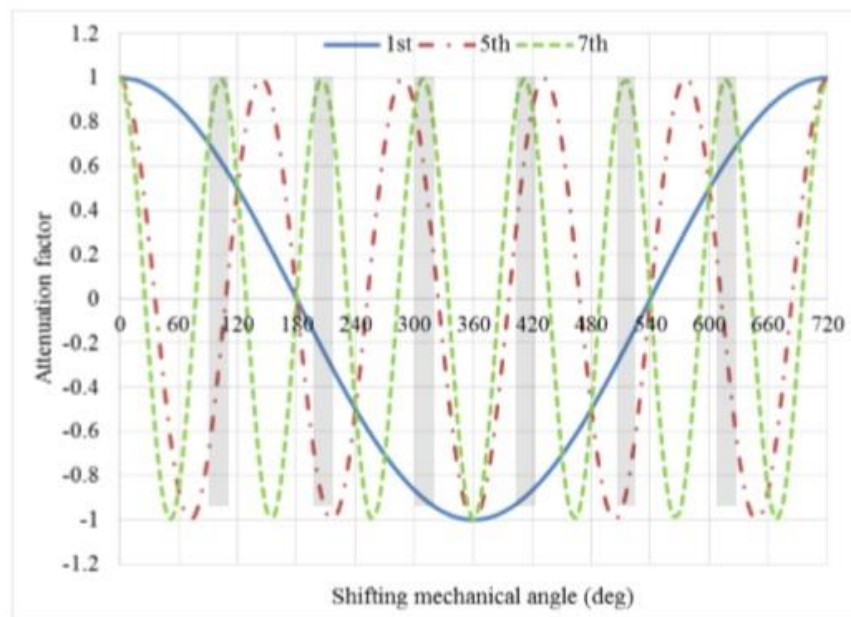
روش دیگر استفاده از مفهوم جابجایی استاتور توسط Dajaku [۲۴] با دابل کردن تعداد شیار معرفی شد. با این روش در ارتباط با تعداد coil نابرابر، تقریباً تمام هارمونیک‌ها حذف شده‌اند، اما سیم‌پیچ دیگر با توجه به گام سیم‌پیچ دو شیار دیگر همپوشانی ندارد [۲۴]. با این حال، اولین استفاده از این روش برای لغو تمام هارمونیک‌های فضایی مرتبه پایین برای یک موتور القایی خطی در [۲۶] ارائه شده‌است. با این حال، برای هر دو روش سیم‌پیچ لایه‌ای و یا جابجایی استاتور متداول، اعتقاد بر این است که از آنجا که دو سیم‌پیچ مربوط به فازهای مختلف در اطراف دندانه برای طراحی سیم‌پیچ لایه‌ای وجود دارد، در نتیجه هم پوشانی‌های فازهای مختلف برای روش جابجایی استاتور متداول وجود دارد. علاوه بر آن، دابل کردن طبقه‌ها با سیم‌پیچ با هم پوشانی یا با استفاده از چهار سیم‌پیچ لایه‌ای و تعداد coil نابرابر روند تولید را پیچیده‌تر می‌کند و می‌تواند به طور منفی ضریب پرکننده شکاف را تحت تاثیر قرار دهد. یک چیدمان سیم‌پیچ با استفاده از موتور PM ۱۴ قطب ۲۴ شیار بدون استفاده از یک سیم‌پیچ همپوشانی دار ارائه شده‌است. در این چیدمان سیم‌پیچ، هارمونیک فرعی اول کاملاً لغو شده و هارمونیک پنجم پارازیتی کاهش یافته است [۱۰].

در این پژوهش، یک چیدمان سیم‌پیچ بهبود یافته با استفاده از موتور PM ۲۰ قطب ۲۴ شیار برای مقابله با این چالش‌ها با استفاده از تغییر سیم‌پیچ استاتور و مجموعه‌های سیم‌پیچ سه‌فاز ارائه شده‌است. با این چیدمان سیم‌پیچ جدید، هارمونیک فرعی اول کاملاً لغو شده و هارمونیک هفتم پارازیتی کاهش یافته است. یک ماشین سیم‌پیچ متمرکز کسری، به دلیل سیم‌پیچی‌های غیر سینوسی اش، هارمونیک MMF قابل توجهی را وارد می‌کند. این به ویژه برای ماشین‌هایی با یک سیم‌پیچ یک طبقه (SL) که دو سیم‌پیچ متضاد در هر طرف وجود دارد، جدی است. در نهایت هارمونیک اول مهم ایجاد خواهد شد و دامنه آن ممکن است حتی بالاتر از هارمونیک کاری باشد [۲۰]. برای ماشین ۲۰ قطب اینجا تنها هارمونیک کاری هارمونیک پنجم است، بنابراین هارمونیک‌های اول، هفتم، یازدهم و غیره، هارمونیک‌های غیر کاربردی هستند که این هارمونیک‌ها باعث افزایش ریپل گشتاور، تلفات روتور، و اشباع موضعی می‌شوند که برای ماشین نامطلوب است. لازم به ذکر است که هارمونیک کاری می‌تواند هارمونیک هفتم برای یک ماشین ۱۴ قطب باشد. در واقع، مولفه اول مهم در توزیع MMF طراحی سیم‌پیچ SL آشکار است.

دلیل ذاتی این پدیده این است که دو سیم پیچ متضاد هر سیم پیچ در سمت مقابل ماشین توزیع می شود، که به این معنی است که شار مغناطیسی القا شده توسط یک سیم پیچ باید توسط یک سیم پیچ دیگر در یک مسیر شار مغناطیسی بسیار طولانی بسته شود. به منظور مقابله با مشکل مهم هارمونیک اول برای ماشین ها در پیکربندی سیم پیچ لایه ای، نوع جدیدی از ماشین با دو سیم پیچ متفاوت در مجاورت یکدیگر پیشنهاد شده است [۱۰]، که نتایج در شار تولید شده توسط یک سیم پیچ را می توان در یک مسیر جریان کوتاه از طریق یک سیم پیچ دیگر بسته دید. سه حالت بهینه برای طراحی به دست آمده است: (۱) حذف هارمونیک اول (تضعیف و ۲) تضعیف بقیه هارمونیک ها (۳) تقویت هارمونیک کاری مورد نظر.

دامنه هر هارمونیک از رابطه (۲-۱) حاصل می شود. همانطور که در بالا نمودار سمت چپ مشاهده می کنید هارمونیک های ناشی از سیم پیچی معمولی یک طبقه و دو طبقه ترسیم شده و در نمودار سمت راست با استفاده از انتقال سیم پیچ طبقه دوم در این مرجع هارمونیک های اول حذف و هارمونیک های هفتم زیاد و هارمونیک های اضافی تضعیف شده اند که در این مرجع از رابطه زیر استفاده شده است:

$$V_{adk} = V_{adk} \cos\left(\frac{k\alpha}{2}\right) \quad (1-2)$$

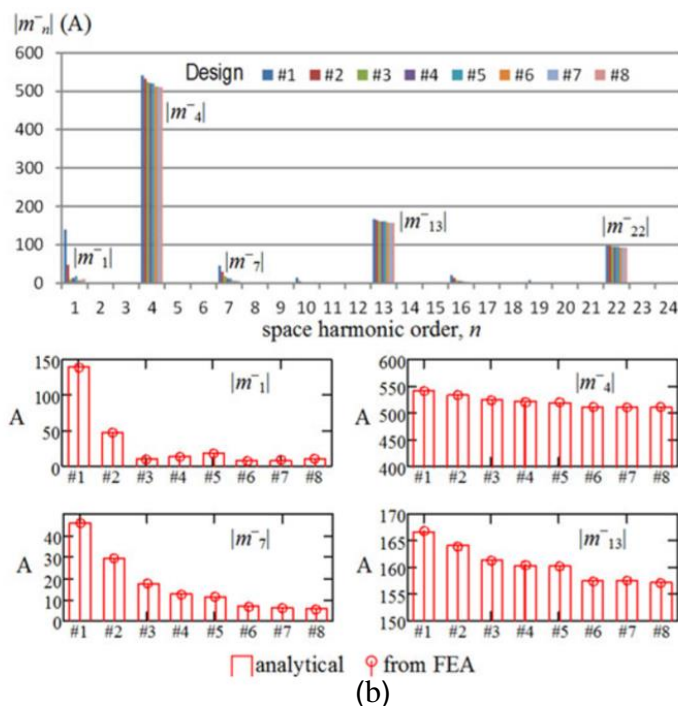


شکل (۲-۳): نمودار ضریب تضعیف دامنه هارمونیک (V_{adk}) بر حسب زاویه انتقال مکانیکی سیم پیچ

در نهایت یک سیم پیچ دو طبقه برای تقویت هارمونیک هفتم با زاویه انتقال مکانیکی سیم پیچ $15 \times 7 = 105$ ارائه شده است. در مرجع [۱۱] پژوهشی تحت عنوان طراحی بهینه چند هدفه سیم پیچ استاتور موتور سنکرون مغناطیس دائم درونی با سیم پیچی نامتقارن توسط البرت تسارلو در سال ۲۰۱۸ با ارائه ۸ طرح و مقایسه آنها از نظر هارمونیک های فاصله هوایی مطرح شده است. در مرجع [۱۱] دو تابع هدف دنبال می شود: ۱- ماکزیمم کردن هارمونیک اصلی ۲- کاهش تلفات کلی روتور

Number of stator slots, Z	9	Maximum number of turns per coil, N_0	100
Number of pole pairs, p	4	Peak value of stator current, I_0	8 A
Stator bore radius, R_s	55 mm	Stator frequency, f	50 Hz
Rotor core diameter R_r	48 mm	Magnet permeability, μ	$4\pi 10^{-7}$ H/ m
Permanent magnet height, h_m	4 mm	Magnet electrical conductivity, σ	0.667 MSm
Air gap width, g	3 mm	Magnet to pole span ratio, c_m	0.8
Core length, L	100 mm	Stator and rotor core permeability	$4\pi 10^{-2}$ H/ m

(a)



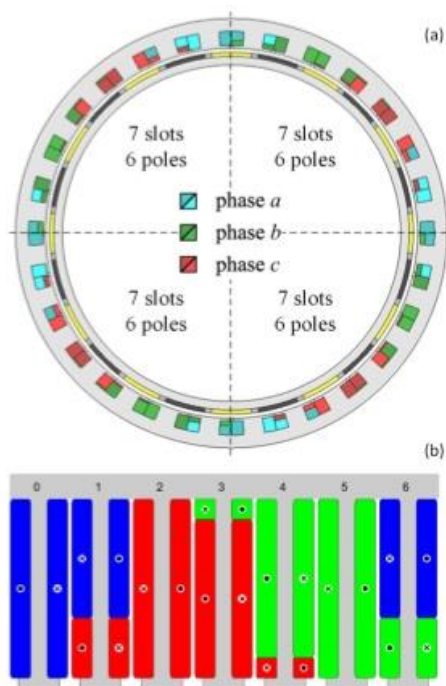
(b)

شکل (۲-۴). (a) مشخصات موتور طراحی شده در مرجع [۱۱] (b) نمودار هارمونیک ۸ طرح متفاوت سیم پیچی استاتور [۱۱]

در شکل (۴-۲) مشخصات نمونه موتور استفاده شده در مرجع [۱۱] و نمودار هارمونیک مربوط به موتور مورد نظر را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می کنید در شکل (۴-۲)(b) دامنه هارمونیک چهارم به عنوان هارمونیک اصلی موتور ۸ قطب افزایش پیدا کرده و هارمونیک های ۱، ۷ و ۱۳ تقلیل یافته است.

حداکثر کردن هارمونیک اصلی و کاهش تلفات روتور بهینه می شود. در نهایت، توسط تحلیل اجزای محدود کارایی روش تحلیلی بررسی شده است مشخص شده که قابلیت های عملیاتی موتور تا حد زیادی بهبود یافته وضع های آن کاهش یافته است.

در مرجع [۱۲] طراحی بهینه سیم پیچ استاتور با تعداد نامتعارف شیار استاتور و تعداد نامتقارن سیم پیچ در هر فاز موتور سنکرون مغناطیس دائم سطحی جهت استفاده در موتور محرک قایق پیشنهاد شده است. در این پژوهش تعداد نامتقارن سیم پیچ هر دندانه در مجموع برابر ۱۰۰ می شود. دو مدل طراحی سیم پیچ در این مرجع مورد بررسی قرار می گردد موتور ۸ شیار ۶ قطب و موتور ۱۱ شیار ۱۰ قطب. موتور سنکرون مغناطیس دائم با آهنرباء سطحی که در شکل (۵-۲) نشان داده شده است برای سرعت (۱۰۰۰ دور در دقیقه) و ولتاژ ۳۸۰ ولت طراحی شده است.



شکل (۵-۲):(a) موتور سنکرون مغناطیس دائم ۲۴ قطب ۲۸ شیار و (b) ساختار سیم پیچ موتور مورد مطالعه در مرجع [۱۲]

جهت کاربردهای محرک های قایق نیاز به موتورهایی با حداکثر گشتاور می باشد. در مرجع [۱۲] بهینه سازی یک موتور PMSM برای حداکثرسازی گشتاور در یک سرعت ثابت توضیح داده شده است. در این تحقیق، ضریب توان و راندمان به عنوان تابع هدف در نظر گرفته می شوند. سپس با استفاده از ترکیبات نامتقارن قطب وشیار طراحی بهینه انجام می گردد همانند دیگر پژوهش ها، در نهایت با استفاده از تحلیل اجزای محدود کارایی بهینه سازی تایید می گردد.

۲-۳. جمع بندی

یکی از اجزای مهم و پرکاربرد در صنایع ، موتورهای الکتریکی می باشد. بنابراین بهبود عملکرد آن امری لازم و ضروری به نظر می رسد. موتورهای الکتریکی در انواع مختلف طراحی و ساخته می شوند که از میان انواع گوناگون موتورهای الکتریکی ، موتورهای سنکرون مغناطیس دائم بخاطر داشتن راندمان بالا و حجم کم امروزه بطور وسیع در صنایع مختلف بکار می روند. بخاطر همین تاکنون طراحی بهینه این موتورها مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. در مرجع های مورد بررسی شده به طراحی بهینه سیم پیچ استاتور پرداخته شده است.

فصل ۳: اصول و کلیات طراحی ماشین های الکتریکی

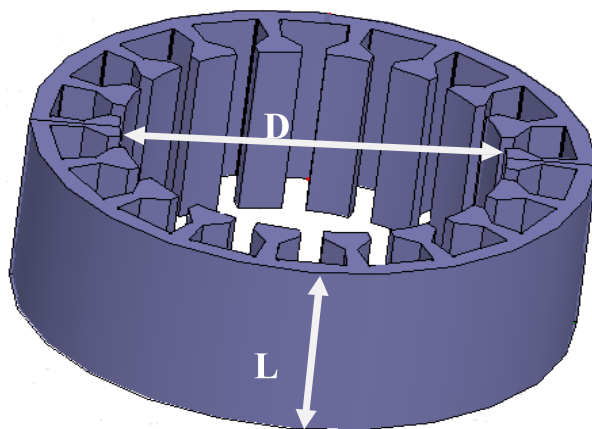
مغناطیس و اعم

۳-۱. مقدمه

شایع ترین موتور الکتریکی PM ماشین شار شعاعی است. این محبوبیت بخاطر قابلیت افزایش گشتاور و توان ماشین به دلیل تورق آهن پشته می باشد. در چنین ماشین هایی روتور اغلب در داخل هسته استاتور قرار داده شده است. موتورهای آهنربای دائم به علت نداشتن تلفات سیم پیچی روتور، از راندمان بالایی برخوردار میباشند. اهمیت راندمان بالا در افزایش طول عمر باتری تجهیزات قابل حمل، روشن و بدیهی است. در این فصل ابتدا، نحوه طراحی و محاسبه ابعاد یک موتور سنکرون مغناطیس دائم سطحی بصورت تحلیلی مورد بررسی قرار می گیرد. سپس با توجه به روابط، یک نمونه موتور سنکرون مغناطیس دائم با توان $9/3 \text{ kW}$ طراحی می شود. با این حال باید ذکر نمود که طراحی، فرآیند پیچیده‌ای است و عوامل متعددی که بر طراحی انواع مختلف ماشین‌ها تأثیر می‌گذارند را نمی‌توان در یک یا چند معادله کلی جای داد. از این رو، مفاهیم طراحی و محدودیت‌های بیان شده در این فصل، نشان دهنده ارتباط کلی ابعاد ماشین با مقادیر نامی آن می‌باشد.

۳-۲. تعاریف

قطر آرمیچر (قطر داخلی استاتور) D و طول هسته آرمیچر (استاتور) L ابعاد اصلی ماشین می‌باشند. این ابعاد در شکل (۳-۱) نشان داده شده اند.



شکل (۳-۱): ابعاد اصلی ماشین الکتریکی

شار مغناطیسی کل در فاصله هوایی ماشین، بارگذاری مغناطیسی کل (Total Magnetic Loading) نامیده می شود که با رابطه زیر نشان داده می شود:

$$\text{بارگذاری مغناطیسی کل} = \Phi p \quad wb \quad (1-3)$$

که در آن Φ شار زیر هر قطب و p تعداد قطب های ماشین می باشد.

بارگذاری مغناطیسی ویژه (Specific Magnetic Loading) به چگالی شار میانگین در فاصله هوایی اطلاق می شود. بارگذاری مغناطیسی ویژه به صورت زیر بیان می شود (D قطر داخلی استاتور و L طول استاتور می باشد):

$$B_{av} = \frac{p\Phi}{\pi DL} \quad (2-3)$$

مجموع آمپر هادی های اطراف آرمیچر بارگذاری الکتریکی کل (Total Electric Loading) نامیده می شود که طبق رابطه زیر مشخص می گردد:

$$\text{آمپر هادی} = I_z Z = \text{بارگذاری الکتریکی کل} \quad (3-3)$$

که در آن Z تعداد کل هادی ها و I_z جریان گذرنده از هر هادی می باشد.

تعداد آمپر هادی های آرمیچر در هر متر از محیط آرمیچر در فاصله هوایی، بارگذاری الکتریکی ویژه خوانده می شود: (Specific Electric Loading)

$$\text{متر/آمپر هادی} = \frac{I_z Z}{\pi D} = a_c \quad (4-3)$$

چهار معادله فوق اصل و اساس تحلیل و طراحی ماشین های الکتریکی را تشکیل می دهند که بر اساس آنها دیگر روابط استخراج و مرتب می شوند. اولین و مهم ترین قدم در طراحی ماشین های الکتریکی به دست آوردن مقدار $D^2 L$ می باشد. این مقدار با انتخاب مقادیر مناسب برای بارگذاری های الکتریکی و مغناطیسی ویژه متناسب است.

۳-۳. معادلات خروجی

معادله ای که رابطه بین توان خروجی ماشین، ابعاد اصلی ماشین، سرعت آن و بارگذاری های الکتریکی و مغناطیسی ویژه را تشریح می کند، به عنوان معادله خروجی شناخته می شود. گام نخست طراحی از این معادله برداشته می شود.

۳-۳-۱. معادله خروجی ماشین های AC

با فرض یک ماشین m فازه که دارای یک مدار در هر فاز است، توان ایجاد شده توسط آرمیچر از رابطه زیر به دست می آید (N_{ph} تعداد دور در فاز استاتور می باشد):

$$Q = m(\sqrt{2} \text{ pf } \phi T_{ph} K_w)(I_{ph}) \times 10^{-3} \quad \text{KVA} \quad (5-3)$$

از آنجاییکه $f = \frac{p.n_s}{120}$ و $I_z = I_{ph}$ (با فرض بودن یک مدار در هر فاز) و $Z = 2.m.T_{ph}$ معادله (۲-۵) به صورت زیر بازنویسی می گردد (ns سرعت نامی موتور می باشد):

$$Q = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} (p\phi)(I_z Z) n_s K_w \times 10^{-3} \quad \text{KVA} \quad (6-3)$$

با جاگذاری مقادیر بارگذاری مغناطیسی و الکتریکی کل داریم:

$$Q = (1.11\pi^2 B_{av} A_c K_w \times 10^{-3}) D^2 L n_s \quad \text{KVA} \quad (7-3)$$

با در نظر گرفتن مقدار به عنوان ضریب خروجی $C_0 = 1.11\pi^2 B_{av} A_c K_w * 10^{-3}$ ، معادله خروجی ماشین های ac به صورت زیر تعیین می گردد [۱۷]:

$$Q = C_0 D^2 L n_s \quad \text{KVA} \quad (8-3)$$

نکات:

- Q توان ایجاد شده توسط آرمیچر بوده و نباید با توان ماشین اشتباه شود
- از آنجا که تلفات مکانیکی و آهنی در ماشین های بزرگ نسبتاً کوچک می باشند، در مرحله محاسبه اولیه می توان از آنها صرف نظر نمود.
- بین عملکرد موتوری و ژنراتوری باید تفاوت قائل شد.
- در ماشین های کوچک، تلفات آهنی و مکانیکی نسبتاً بزرگ بوده و برای شروع می توان فرض نمود. این تلفات تقریباً ۳۰ درصد تلفات کل در بار کامل را تشکیل می دهند.

۳-۴. انتخاب مقادیر نامی ماشین

مقادیر نامی مورد نیاز ماشین ها باید بسته به کاربرد تعیین گردد. در حالت کلی این مقادیر از جداول از پیش تعیین شده قابل

استخراج کردن است ولی می توان این مقادیر را به صورت زیر تعیین نمود :

(۱) توان خروجی (اسب بخار) : مقدار اسب بخار معمولاً با توجه به بار مورد نیاز مشخص می شود.

(۲) سرعت : سرعت مورد نیاز (دور در دقیقه) نیز بر اساس بار تعیین می شود.

(۳) ولتاژ و فرکانس : ولتاژ و فرکانس نامی موتور بر اساس NEMA MG 1-10,30 و NEMA MG 1-10,31 و 1-

NEMA MG 20,5 و NEMA MG 1-20,6 تعیین می گردند. ولتاژ نامی استاندارد کمتر از ولتاژ استاندارد سیستم

است (به دلیل جبران افت ولتاژ احتمالی).

(۴) جهت چرخش : اکثر موتور های AC، چند فازه القایی دو جهته می باشند. اما بخش قابل توجهی از موتورها به صورت تک

جهته می باشند (یعنی قابلیت چرخش در یک جهت را دارند). باید مشخص شود که موتور در دو جهت قادر به چرخش است

یا فقط توانایی چرخش در یک جهت را دارد.

علاوه بر موارد فوق الذکر، دیگر جنبه های ماشین نظیر ضریب سرویس (Service Factor)، مشخصه های عملکردی، زمان

سرویس (Duty Time) و ... نیز باید مورد توجه قرار گیرد.

۳-۵. تفکیک D و L

مقدار D^2L را می توان با استفاده از معادلات خروجی ماشین های محاسبه، dc و ac محاسبه کرد. قدم بعدی در تفکیک این

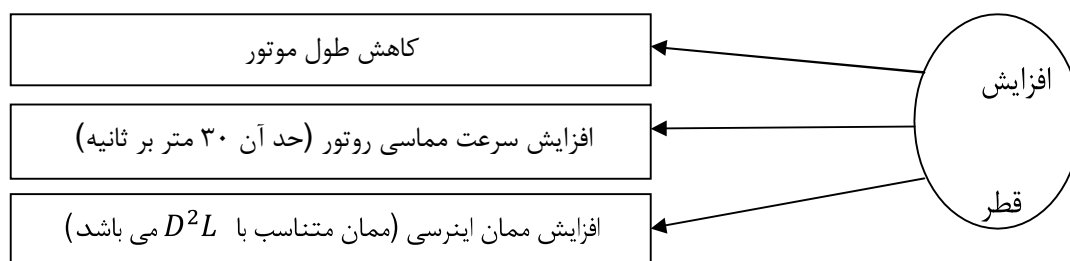
حاصل ضرب به مولفه های D و L می باشد.

هم بارگذاری الکتریکی ویژه و هم ضریب خروجی هر دو با جذر قطر فاصله هوایی D متناسب اند. بنابراین در اغلب موارد،

طراحی با قطر بزرگ و طول هسته کوچک، مزایای عمده ای را در بر خواهد داشت. باید توجه نمود که چنانچه قطر افزایش

یابد، گام قطب (و طول اتصالات انتهایی) افزایش می یابد. بدیهی است که برای نسبت $\frac{L}{D}$ یک حدی وجود دارد به طوری که

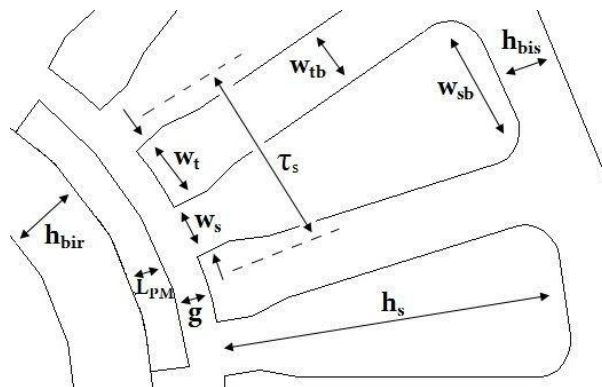
تحت آن حد، مقاومت ناحیه انتهایی، تلفات، شار و شرط خنک سازی، مزیت طراحی با قطر بزرگ را متعادل می‌کند. بعضی از عواملی که مقادیر مربوط D و L را تحت تأثیر قرار می‌دهند بین همه انواع ماشین‌ها مشترک می‌باشند و بعضی عوامل فقط مربوط به انواع خاصی از ماشین‌ها هستند. در شکل (۲-۳) تأثیرات افزایش قطر موتور مشخص شده است.



شکل (۲-۳): تأثیر افزایش قطر موتور بر دیگر مشخصات موتور

۳-۶. مراحل طراحی

مانند انواع ماشین‌ها، موتور سنکرون مغناطیس دائم سطحی از طریق چند مرحله طراحی می‌شود. اولین قدم تعیین موارد استفاده موتور است. مقادیر اصلی مجاز مورد نیاز برای یک هدف خاص، باید ذکر شود. پس از آن، برخی از متغیرهای طراحی از طریق بینش مهندسی و در برخی موارد بصورت تجربه تعریف شده است. در نهایت، ابعاد و سایر پارامترهای مورد نیاز با استفاده از معادلات طراحی محاسبه شده است. این مراحل را می‌توان به طور جداگانه به شرح زیر طبقه‌بندی کرد. در شکل (۳-۳) توپولوژی موتور سنکرون آهنربای دائم سطحی شیاردار را که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته، نشان داده شده است.



شکل (۳-۳): توپولوژی موتور سنکرون مغناطیس دائم سطحی

۳-۶-۱. مرحله اول: تعیین مشخصات اساسی موتور

در این مرحله، پارامترهای اصلی موتور مشخص شده است. به عبارت دیگر، پارامترها برای کاربردهای خاص انتخاب شده است. با تعریف این پارامترها، برای طراح مشخص می‌گردد که چگونه باید طراحی انجام دهد. تعیین مقدار خروجی با بار و نوع بار مربوط می‌شود. ولتاژ نامی با عایق کاری محدود می‌گردد. سرعت موتور به تعداد قطب‌ها و فرکانس تغذیه و بار بستگی دارد.

تعداد فازها، قطب‌ها و شیارها

چند قانون کلی در مورد نحوه انتخاب تعداد قطب‌ها، دندانه‌ها و فازها در جدول (۳-۱) آمده است.

جدول (۳-۱): نحوه انتخاب تعداد قطب‌ها، دندانه‌ها و فازها بر اساس سرعت، گشتاور، گشتاور دندانه‌ای، مواد مصرفی، هزینه

هزینه	مواد مصرفی	گشتاور دندانه‌ای	گشتاور	سرعت		
افزایش	افزایش	کاهش	ثابت	ثابت	فاز	افزایش
کاهش	کاهش	افزایش	ثابت	ثابت		کاهش
افزایش	افزایش	کاهش	افزایش	کاهش	قطب	افزایش
کاهش	کاهش	افزایش	کاهش	افزایش		کاهش
افزایش	افزایش	کاهش	ثابت	ثابت	دندانه	افزایش
کاهش	کاهش	افزایش	ثابت	ثابت		کاهش

الف) تعداد فازها

عیب موتورهای تکفاز عدم استفاده بهینه از هادی‌های الکتریکی و همچنین اندازه بزرگ ریپل در گشتاور و مقادیر صفر در گشتاور، که موانعی را در برابر راه اندازی موتور ایجاد می‌کند می‌باشد. اما این موتورها از ساختار ساده در سیم پیچی برخوردار بوده و در مدار کنترل کننده، یک یا دو کلید قدرت نیاز دارند، در نتیجه قیمت نهائی ساخت این موتورها ارزان می‌باشد. اگرچه ضریب استفاده از هادی‌ها در موتورهای دو فاز نیز کم است، ولی نواحی خنثی حذف شده‌اند، در نتیجه ریپل گشتاور نیز کاهش می‌یابد و البته قیمت نهائی آنها به دلیل احتیاج به حداقل ۴ کلید قدرت در مدار کنترل کننده بیشتر می‌گردد.

در موتورهای ۳ فاز ضریب استفاده از هادی ها نسبتاً بزرگ بوده و مشکل راهاندازی در آنها و ریپل گشتاور در آنها کاهش یافته است. البته در آنها از ۶ کلید قدرت استفاده میشود و سیم پیچی موتورهای ۳ فاز نیز گرانتر است. با افزایش تعداد فازها به ۴ یا بیشتر بهبود اندکی در استفاده از هادی ها و ریپل گشتاور حاصل می گردد، ولی هزینه سیم پیچی و کلیدهای قدرت بالامی رود. با توجه به مطالب بیان شده در خصوص تعداد فازها، ۳ فاز گزینه مناسبی می باشد.

ب) تعداد قطب ها

محدوده خیلی کوچکی از تعداد قطبها موجود است که طراحی های مناسب و رضایت بخشی را نتیجه می دهد. به طور کلی، تعداد قطبها باید به گونه ای انتخاب شود که مشخصات طراحی ماشین مطابق با حداقل وزن ماده فعال و کمترین هزینه ساخت باشد. عامل محدودکننده اصلی در انتخاب تعداد قطب ها، فرکانس شار متقابل در هسته آرمیچر و (جریانها در هادیهای آرمیچر) می باشد. معمولاً مقدار فرکانس آرمیچر بین ۲۵ تا ۵۰ هرتز انتخاب می شود. در عملکردهای سرعت بالا، که فرکانس حتی با دو قطب نیز بیشتر از ۵۰ هرتز خواهد بود، چگالی شار در دندانه ها و هسته آرمیچر باید در حد پائین نگه داشته شود. افزایش تعداد قطبها برای یک قطر معین باعث کوچکتر شدن گام قطب و کوتاه تر شدن طول اتصالات انتهایی و کاهش تلفات مسی آرمیچر و کاهش وزن مس به کار رفته در سیم پیچی آرمیچر می گردد.

علاوه بر این، افزایش تعداد قطبها برای یک قطر معین منجر به کاهش ناچیز وزن مس میدان و کاهش قابل توجه آمپر دورهای سیم پیچ میدان می شود. هر دوی این عوامل موجب می شوند تا تلفات مسی میدان کاهش یافته و تهویه سیم پیچ های میدان ساده تر صورت پذیرد. شار یوغ به طور معکوس با تعداد قطبها متناسب می باشد. بنابراین با افزایش تعداد قطبها این امکان وجود دارد تا در وزن قطعات آهنی صرفه جویی شود. با توجه به مشخصات فنی در موتور مورد نظر، که در آن سرعت عملکرد کم می باشد، تعداد قطب موتور در این پژوهش، ۲۰ قطب (۱۰ زوج قطب) انتخاب شده است.

ج) تعداد دندانه ها

ترکیبات مختلفی از دندانه ها و قطبها در موتور مورد استفاده قرار می گیرند. تعداد معمول دندانه ها برای موتورهای ۳ فاز برابر ۶، ۹، ۱۲، ۱۵، ۱۸، ۲۱، ۲۴، ۳۶، ۴۸ می باشد. البته از اعدادی غیر از این موارد نیز میتوان استفاده نمود. با افزایش تعداد دندانه های انتخابی، تعداد شیارها نیز افزایش می یابد و در نتیجه تعداد کلاف در هر قطب افزایش می یابد.

عموماً باید حداقل تعداد دندانه‌های ممکن را که یک طرح منطقی سیم‌پیچی قابل پیاده‌سازی باشد، انتخاب نمود. انتخاب تعداد کمتر شیارها موجب صرفه جویی در ماده عایقی خواهد شد. اما این صرفه جویی به بهای کموتاسیون ضعیف تر و ضربان شار بیشتر خواهد بود. ضربان شار از تغییر رلوکتانس مسیر شار که نتیجه چرخش آرمیچر است ناشی می‌شود. رلوکتانس فاصله هوایی با وضعیت آرمیچر هنگامی که تعداد شیارهای هر قطب یک عدد صحیح است تغییر می‌کند. عامل مهم دیگری که هنگام انتخاب تعداد شیارها باید مورد بررسی قرار گیرد، مناسب بودن تعداد شیارها جهت سیم‌پیچی با توجه به تعداد کل کلاف‌های سیم‌پیچی و بازوهای کلاف در هر شیار می‌باشد. تعداد شیارها باید طوری انتخاب شود که تعداد هادی‌های هر شیار یک عدد صحیح زوج باشد. همچنین، تعداد هادی‌های هر شیار باید بر تعداد بازوهای کلاف در هر شیار تقسیم پذیر باشد. در حالت سیم‌بندی حلقوی، تعداد شیارها باید مضربی از تعداد زوج قطب‌ها باشد. این امر موجب تقارن سیم‌پیچی نسبت به قطب‌ها شده و اجازه استفاده از اتصالات متعادل کننده را می‌دهد. در این پروژه با توجه به تعداد قطب‌ها و فازها، تعداد شیارهای استاتور ۲۴ و ۶۰ انتخاب شد.

۳-۶-۲. مرحله دوم: انتخاب متغیرهای طراحی با توجه به ویژگی موتور

پس از مشخص شدن مشخصات اصلی ماشین، نوبت به پارامترهای اولیه طراحی می‌رسد. انتخاب مناسب این متغیرها منجر به یک طراحی خوب می‌گردد. لیستی از متغیرها در نشریات موجود می‌باشد. در کل پارامترهای زیادی برای طراحی در نظر گرفته می‌شوند که از این میان برخی از مهم‌ترین محدودیت‌ها در جدول (۳-۲) آورده شده است. این پارامترها که همان مشخصات و ابعاد فیزیکی موتور هستند بعنوان مبنای اصلی طراحی مدنظر می‌باشند. این پارامترها ذاتاً و برخی دیگر به علت محدودیت‌های موجود در مواد نمی‌توانند تغییرات زیادی داشته باشند. طراح می‌تواند یک مقدار مناسب بین محدودیت‌ها با توجه به تجربه خود یا در برخی موارد جداولی ارائه شده است که می‌تواند برای تصمیم‌گیری مقدار مناسب به ما کمک کند. به طور کلی، این متغیرها بر اساس پارامترهای اصلی موتور که در مرحله ۱ انتخاب شده است معرفی گردید. بارگذاری الکتریکی ویژه به متغیرهای مختلف از جمله، تغییرات توان، سرعت، فرکانس و تغییرات ولتاژ بستگی دارد. برای ماشین‌های با تعداد قطب کم، قطر کوچک یا گام قطب بزرگ، یک مقدار کمتری از ac باید استفاده شود.

به طور مشابه، در ماشین‌های ولتاژ بالا که نیاز به عایق کاری شیار بزرگتری دارند، ac باید کوچک باشد. برای ماشین‌های با تعداد قطب بالا، ولتاژ پایین، و فرکانس پایین، ac ممکن است تا ۲۰٪ افزایش یابد. بارگذاری الکتریکی ویژه این موتورها محدوده ای بین ۸۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ آمپر بر متر در نظر گرفته می‌شود. باید دقت داشت که مقادیر چگالی شار در فاصله‌هوائی و بارگذاری الکتریکی ویژه، هر دو ممکن است به میزان قابل توجهی، در موتورهایی که به صورت مقطعی و متناوب کار می‌کنند افزایش یابد. مقدار بارگذاری الکتریکی ویژه، با افزایش دمای مجاز، کموتاسیون، راندمان و هزینه ساخت محدود می‌شود. در نتیجه، نوع محفظه، شیوه خنک سازی به کار گرفته شده و افزایش دمای ماشین در مقدار بارگذاری الکتریکی ویژه مربوط به طراحی موثر است. چگالی شار متوسط B_{av} عمدتاً با تلفات هسته و اشباع محدود می‌گردد.

جدول (۲-۳) : پارامترهای اصلی طراحی موتور

متغیر	توصیف
B_{av} (T)	بارگذاری مغناطیسی ویژه
ac (A/m)	بارگذاری الکتریکی ویژه
B_g (T)	چگالی شار فاصله هوایی
B_{ys}, B_{yr} (T)	چگالی شار یوغ روتور و استاتور
B_t (T)	چگالی شار دندانه های استاتور
η (%)	بازده
PF	ضریب قدرت
L/τ_p	نسبت طول محوری به گام قطب
B_r (T)	چگالی شار پسماند

تاثیر افزایش بارگذاری الکتریکی در زیر مشاهده می‌شود :

بارگذاری مغناطیسی ویژه با متوسط چگالی شار فاصله هوایی، B_{av} ، یکسان در نظر گرفته می‌شود. مقدار مناسب برای بارگذاری مغناطیسی ویژه موتورهای سنکرون مغناطیس دائم بین ۰/۸ تا ۰/۴۵ تسلا می‌باشد.

افزایش بارگذاری ویژه ← کاهش قطر ← افزایش تعداد هادی های آرمیچر

پارامترهای دیگر نظیر چگالی شار در یوغ استاتور و رتور و همچنین چگالی شار دندانه در حدود ۱ تا ۲ تسلا می‌باشند و با توجه به ماده به کار رفته در استاتور و هسته رتور انتخاب می‌گردند. چگالی شار پسماند بسته به مغناطیس دائم به کار رفته در رتور تعیین می‌گردد. نسبت $\frac{L}{\tau_p}$ یکی از مهم ترین پارامترها در طراحی است که بسته به نوع قطب تعیین می‌شود. برای قطب صاف مقداری بین ۰/۶ تا ۰/۷ و برای قطب برجسته بین ۱ تا ۳ اختیار می‌شود. علاوه بر موارد فوق، برای شروع طراحی نیاز است که دیگر پارامترهای اولیه نظیر بازده، ضریب قدرت، ضریب سیم پیچی و ... را به صورت فرضی تعیین کرده و در آخر پس از انجام طراحی نسبت به بر آورده شدن آنها اقدام می‌گردد. بازده اولیه را می توان بر حسب قطر موتور که در جدول (۳-۳) نشان داده شده است، مشخص نمود. ضریب قدرت به صورت تجربی انتخاب می شود.

جدول (۳-۳) : بازده اولیه بر حسب قطر موتور

بازده	قطر موتور (میلی متر)
۵۶٪	$D < 50$
۵۷٪	$50 < D < 100$
۵۸٪	$D > 100$

۳-۶-۳. مرحله سوم : تعیین ابعاد و پارامترهای موتور

در این بخش، ابعاد و معادله های لازم برای طراحی PMSM ارائه شده است. طراحی ماشین با تعیین ابعاد اصلی آن شروع می شود. طول محوری موتور، L و قطر داخلی استاتور (قطر فاصله هوایی)، D ابعاد اصلی ماشین می باشند که سایر ابعاد و پارامترها به شدت به آنها بستگی دارد.

اول از همه، بارگذاری الکتریکی ویژه، ac ، به شرح زیر تعیین می گردد :

$$ac = 2mT_s \frac{I_s}{\pi D} \quad (۹-۳)$$

محاسبه ابعاد اصلی موتور

ضریب خروجی به شرح زیر محاسبه می گردد:

$$C_0 = 1.11 \pi^2 B_{av} c K_w \times 10^{-3} \quad (10-3)$$

در مرحله طراحی اولیه، توان آرمیچر را می توان با توان نامی موتور برابر فرض نمود.

توان ظاهری ورودی از رابطه زیر تعیین می گردد :

$$O = \frac{P_{out}}{\eta PF} \quad KVA \quad (11-3)$$

صورت دیگر این معادله که بر اساس ابعاد اصلی می باشد به صورت زیر است:

$$Q = C_0 D^2 L n_s \quad KVA \quad (12-3)$$

از این معادله می توان مقدار $D^2 L$ را تعیین کرد که کمیتی مهم است.

$$D^2 L = \frac{Q}{1.1 \pi^2 A_c B_{av} K_w n_s} \quad (13-3)$$

که در این رابطه Q بر حسب KVA و n_s بر حسب rad/s می باشد. با اعمال معادله (10-3) در معادله (13-3) میتوان

ابعاد اصلی موتور یعنی L و D را تعیین کرد.

علاوه بر این یک رابطه دیگر به صورت زیر وجود دارد:

$$L = \frac{L \pi D}{\tau_p p} \quad (14-3)$$

که τ_p بر حسب mm می باشد.

محاسبه فاصله هوایی و مغناطیس دائم

انتخاب طول فاصله هوایی تحت تاثیر عوامل زیادی است. افزایش این مقدار دارای مزایای زیر می باشد :

- کاهش تغییر شکل میدان
- کم کردن تلفات ضربان (ناشی از شیارهای آرمیچر)
- عملکرد نرم تر و تهویه بهتر

• افزایش آمپردورهای سیم پیچ میدان
در کل فاصله هوایی موتورهای سنکرون باید از شرط زیر پیروی کند

$$g \geq \frac{1}{2} \alpha_{SM} \mu_0 \tau_p \frac{ac}{B_g^{\Delta}} = \gamma \tau_p \frac{ac}{B_g^{\Delta}} \quad (۱۵-۳)$$

که $\alpha_{SM} \mu_0 \tau_p \frac{ac}{B_g^{\Delta}} = \gamma$ و برای موتورهای قطب صاف $\gamma = ۱۰-۳$ و برای موتورهای قطب برجسته $\gamma = ۱۰-۷$ و $\gamma = ۴$ میباشد.
در حال حاضر، روش‌های طراحی به کمک کامپیوتر شامل حل عددی میدان به صورت گسترده‌های جهت بهینه-سازی طراحی وسایل آهنربای دائم مورد استفاده قرار گرفته اند.

با این حال، ابعاد آهنربای دائم به کار رفته در یک وسیله الکترومکانیکی جهت فراهم نمودن مقدار معینی چگالی شار فاصله هوایی را می توان به کمک چندمعادله ساده تخمین زد.
ضخامت آهنرباء دائم به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$L_{PM} = (\mu_r B_g / (B_r - ((K_g / K_d) B_g)) K_c g \quad (۱۶-۳)$$

که در آن $K_f = B_{gpk} / B_g$ و K_d ضریب نشتی شار است. همچنین K_c ضریب کارتر می باشد. با استفاده از معادله (۱۵-۳) می توان فاصله هوایی فیزیکی موتور سنکرون مغناطیس دائم را تعیین کرد.

$$g_{PM} = \frac{L_{PM}}{\mu_{rPM}} + K_c g \quad (۱۷-۳)$$

محاسبه تعداد دور و ضریب سیم پیچی

که مقدار آن برای موتورهای سنکرون مغناطیس دائم با ابعاد کوچک بین $۰/۳$ تا ۱ میلی متر می‌باشد. از آنجاییکه هسته ماشین های الکتریکی به صورت مورق ساخته می‌شود، پس طول خالص هسته باید در ضریب تورق هسته ضرب گردد تا مقدار واقعی آن به دست آید.

$$L_i = L \times k_{st} \quad (۱۸-۳)$$

که K_{st} ضریب تورق معمولاً مقداری در حدود $۰/۹$ دارد.

شار هر قطب از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$\Phi = B_{av} \cdot I_p \cdot L_i \quad (19-3)$$

ولتاژ فاز استاتور از رابطه زیر تعیین می‌شود که ضریب ۰/۹۷ به دلیل افت ولتاژ درونی لحاظ می‌گردد.

$$E_s = 0.97 \times V_L / \sqrt{3} \quad (20-3)$$

تعداد دور در فاز استاتور طبق رابطه (۲۱-۳) محاسبه می‌گردد:

$$N_{ph} = \frac{E_s}{4.44 f \phi k_w} \quad (21-3)$$

تعداد کل هادیها:

$$Z_T = 6 N_{ph} \quad (22-3)$$

تعداد هادی در شیار:

$$Z_{slot} = \frac{Z_T}{S} \quad (23-3)$$

ضریب سیم پیچی موتور مشخص می‌گردد:

$$k_w = k_p \times k_d \quad (24-3)$$

که

$$K_p = \sin \frac{\alpha}{2}, \alpha = 2\pi p \frac{N_p}{S} \quad (25-3)$$

در این معادله α زاویه گام و N_p پهنای پیچک است

$$K_d = \frac{\sin m \frac{\gamma}{2}}{m \sin \frac{\gamma}{2}}, \gamma = \frac{2\pi p}{s} \quad (26-3)$$

در این رابطه m تعداد فاز و γ زاویه الکتریکی شیار است.

Js بر طبق Is انتخاب می‌شود. برای PMSMs های کوچک مقدارش از ۳ تا ۷ می‌باشد.

تلفات در موتور PMSM

تلفات در موتور PMSM عبارتند از:

✓ تلفات مسی آرمیچر

✓ تلفات آهنی یا هسته در دندانه‌ها و بدنه هسته آرمیچر

✓ تلفات مکانیکی ناشی از اصطکاک (یاتاقان‌ها) و بادخوری

تلفات جریان گردابی یا هرزگرد در هادی‌های آرمیچر و... را طبق استاندارد IEC می‌بایست به ترتیب برابر با ۱ درصد و ۰/۵ درصد توان ورودی نامی در نظر گرفته شوند.

تلفات مسی کل:

بر اساس استانداردهای بین‌المللی، تلفات مسی باید برای همه نوع سیم‌بندی‌ها در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد برای کلاسهای B، E، A و در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد برای کلاس‌های H و F برای تمام بارها محاسبه شود.

$$P_{cu} = 3R_s (I_s)^2 \quad (۲۷-۳)$$

تلفات بادخوری به سرعت مماسی روتور، به ابعاد روتور و به ساختار ماشین وابسته است.

تلفات اصطکاکی و بادخوری:

$$P_{fw} = 0.5 - 3\% P_{out} \quad (۲۸-۳)$$

تلفات هسته:

$$P_c = 15\% P_{cu} \quad (۲۹-۳)$$

همچنین تلفات هسته می‌تواند به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$P_c = k_h f B_m^2 + k_e f^2 B_m^2 \quad (۳۰-۳)$$

تلفات هرزگرد:

$$P_{stray} = 0.5 - 1\% P_{out} \quad (۳۱-۳)$$

بنابراین می توان رابطه تلفات کل را به صورت زیر بیان نمود:

$$P_{tot} = P_{cu} + P_c + P_{fsw} + P_{stray} \quad (3-32)$$

محاسبه راندمان، گشتاور و چگالی توان

راندمان موتور در گشتاور نامی و سرعت نامی از رابطه زیر بدست می آید:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{tot}} \quad (3-33)$$

چگالی توان از تقسیم توان خروجی به حجم موتور محاسبه می گردد:

$$P_{den} = \frac{P_{out}}{Vol} \quad (W / m^3) \quad (3-34)$$

که Vol حجم موتور از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$Vol = \frac{\pi}{8} D^2 L \quad (3-35)$$

برای محاسبه گشتاور خروجی می توان از معادله زیر استفاده نمود:

$$T = B_{av} L (D / 2) I_s Z_{slot} \quad (3-36)$$

۳-۷. روش کلی طراحی

حال با توجه به موضوعات و بحث‌های قبلی در مورد طراحی موتور می توان به صورت زیر روش کلی طراحی رانتيجه گیری

کرد. بلوک دیاگرام کلی طراحی موتور در شکل (۳-۴) مشاهده می شود.

مرحله (۱): پارامترهای داده شده که توان خروجی، ولتاژ، سرعت و فرکانس می باشند .

مرحله (۲): انتخاب تعداد قطبها، فازها، دندانهها و نوع سیم پیچی

مرحله (۳): تعریف محدودیت‌های موتور (بارگذاری الکتریکی ویژه ، بارگذاری مغناطیسی ویژه ، طول محوری و قطر داخلی استاتور)

مرحله (۴): به دست آوردن D^2L و در نهایت محاسبه قطر و طول موتور

مرحله (۵): محاسبه فاصله هوائی و مغناطیس دائم و تعداد دور

مرحله (۶): محاسبه ابعاد فیزیکی

مرحله (۷): محاسبه تابع هدف (راندمان، تلفات، چگالی توان، وزن، قیمت، گشتاور و)

مرحله (۸) : در صورت نیاز بهینه سازی ابعاد و اندازه های به دست آمد

۳- ۸. محاسبه تحلیلی یک موتور نمونه

با توجه به روش کلی بالا و محدودیت هایی که در طراحی وجود دارد می توان موتور مورد نظر را طراحی کرد. در این بخش نحوه طراحی موتور ساخته شده بررسی می گردد. صورت مسئله را می توان به این صورت توصیف کرد: طراحی یک موتور سنکرون مغناطیس دائم ۳۸۰ ولت، ۳/۹ کیلو وات توان خروجی مجاز و ۱۹۲ دور بر دقیقه [۹].

همانطور که در قسمت قبلی توضیح داده شد، می توان پارامترهای اولیه طراحی را بر اساس مشخصات موتور تعیین کرد. مقادیر انتخاب شده برای پارامترهای اولیه موتور در جدول (۳-۴) نمایش داده شده است. با اعمال مقادیر این دو جدول به معادلات طراحی، ابعاد و پارامترهای عملکردی موتور مشخص می شود که در جدول (۳-۵) ارائه شده است. در ضمن در این حالت طراحی، می توان تلفات و گشتاور را با استفاده از معادلات ارائه شده محاسبه نمود. در ضمن تلفات ثابت را حدود یک درصد و تلفات هرزگرد را نیم درصد تلفات خروجی در نظر می گیریم.

جدول (۳-۴) : پارامترهای اولیه موتور

پارامتر	مقدار
B_{av} (T)	۰/۶
a_c (A/m)	۳۰۰۰۰
PF	۰/۹۵
B_r (T)	۱/۵۲
L/τ_p	۱/۳
J_s	۵
Φ (wb)	۰/۰۰۳۷۶۸

جدول (۳-۵): ابعاد و مشخصات عملکردی موتور

مقدار	بعد / پارامتر
۲۰۰	D (mm)
۲۰۰	L (mm)
۲۳	τ_p (mm)
۰/۲	LPM (mm)
۰/۵	gPM (mm)
۱/۱۰	τ_s (mm)
۱۳/۷	ω_t (mm)
۱۲/۴۶	ω_s (mm)
۱۲	ω_{tb} (mm)
۱۳	ω_{sb} (mm)
۴۸/۸۴	hs (mm)
۱۱/۷	hbis, hbir (mm)
۵۷	Zslot (turns)
۵۹	Ptot
۰/۸۵	η
۲/۱۱	Pd

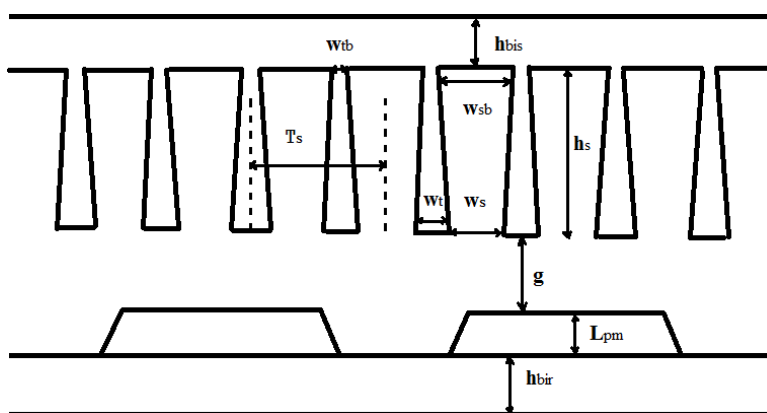
۳-۹. جمع بندی

در کل باید متذکر شد که طراحی ماشین های الکتریکی پروسه ای دقیق و زمانبر است که نیازمند دقت و وقت زیادی می باشد. از این رو طراح باید جنبه های مختلف عملکردی ماشینی که قرار است طراحی کند را در نظر بگیرد. قدم اول در طراحی تعیین کاربرد ماشین می باشد. اول از همه باید بدایینم ماشینی که قرار است طراحی شود دارای چه کاربردی می باشد. برای مثال ماشین مورد نظر قرار است به صورت موتور به کار رود یا ژنراتور، یا در چه شبکه ای با چه مشخصاتی به کار گرفته خواهد شد. سوالاتی این چنین قدم اول طراحی را مشخص می کند. بنابراین کاربرد ماشین باید مشخص شود، یعنی پارامتر های اصلی عملکردی موتور مانند توان الکتریکی، سطح ولتاژ کاری، سرعت چرخش و تعداد قطب (فرکانس) بسته به کاربرد تعیین گردد. سپس بر اساس این پارامتر ها، طراح با استفاده از روند طراحی پیاده شده برای انواع ماشین ها به طرح مطلوب می رسد. کلیات این روند در این فصل توضیح داده شده است.

فصل ۴: طراحی هیئت موتور سنکرون مغناطیس دائم و
آنالیز الکترومغناطیسی موتور با استفاده از روش المان محدود

۴-۱. مقدمه

در حدود سه دهه است که الگوریتم های بهینه سازی به تحلیل مسائل مهندسی برق پرداخته اند. در این میان طراحی بهینه ماشین های الکتریکی پدیده ای نو ظهور است که حدود چندین سال است که از شروع آن میگذرد. در حال حاضر شمار زیادی از تحقیقات نظری و آزمایشگاهی به این امر اختصاص یافته است و هر روزه شاهد افزایش گرایش به این حیطه هستیم. در این پایان نامه از روش بهینه سازی سیم پیچ استاتور با ساختار FSCW که روش بهینه سازی موثری برای بهبود هارمونیک های فضایی mmf فاصله هوایی موتور مغناطیس دائم می باشد استفاده می کنیم. در شکل (۴-۱) توپولوژی موتور سنکرون آهنربای دائم سطحی شیاردار را که در این پایان نامه مورد بررسی قرار گرفته، نشان داده شده است.



شکل (۴-۱): توپولوژی موتور سنکرون آهنربای دائم سطحی

این ماشین دارای چهار بخش می باشد: استاتور، سیم پیچ، شافت روتور و آهنرباء دائم.

۴-۲. تعیین مواد و مشخصات موتور

توسعه مواد آهنرباء دائم برای اولین بار در اوایل قرن ۲۰ با فولاد مغناطیسی آغاز شد [۲۵]. در سال ۱۹۳۰ اولین مواد برای دستگاه های الکترومکانیکی توسعه داده شد. این مواد بنام آلیاژ آلومینیوم-نیکل-کبالت (ALNICO) بودند که هنوز در کاربردهای خاص استفاده می شوند اما اشکال عمده این مواد نیروی اجباری کم (HC) می باشد.

نقطه عطف بعدی در پیشرفت آهنرباء دائم توسعه ، نفوذ خاک کمیاب ، کبالت، آهنرباها در اطراف سال ۱۹۷۰ بخصوص آلیاژ ساماریوم، کبالت SmCo می باشد. با این حال، به دلیل قیمت بالای مواد خام SmCo، این مواد در مقیاس های بزرگ استفاده نمی شوند. امروزه آهنرباهای نئودیمیوم آهن بور NdFeB که در سال ۱۹۸۳ معرفی شدند بخوبی شناخته شده می باشند. که بخاطر ارزانتر بودن و چگالی انرژی بالاتر نسبت به SmCo مورد استفاده قرار می گیرد. در تمام آهنرباها ضریب نفوذ مغناطیسی کم، شبیه هوا می باشد. ضریب نفوذ پذیری نسبی برای آهنرباء NdFeB معمولا در حدود $\mu_r = 1.05$ می باشد. سیم پیچ استاتور شامل ۳ فاز A، B و C می باشد. مواد انتخابی برای هسته استاتور از نوع استیل ۱۰۰۹ ، سیم پیچی از نوع مسی و شافت روتور از نوع استیل ۱۰۰۹ و آهنرباء NdFeB35 از جنس NdFe35 با چگالی شار پسماند ۱/۲ تسلا انتخاب شده است. همانطور که مشخصات مورد نیاز موتور خاص جهت کاربرد در آسانسور در جدول (۴-۱) دیده میشود، توان خروجی پیوسته ۳/۹ کیلو وات با سطح ولتاژ از ۳۸۰ ولت AC است. ضریب قدرت برای یک ماشین الکتریکی با آهن ربا سطحی نصب شده می تواند بین ۰/۹ تا ۱ باشد.

جدول (۴-۱) : مشخصات مورد نیاز موتور

3.9 [kW]	توان الکتریکی
380 [VAC]	ولتاژ ترمینال
192 [rpm]	سرعت مکانیکی
> 90 [%]	بازده
< 2 [kg]	وزن
< 148[mm]	طول موتور
< 169 [mm]	قطر داخلی موتور

۳-۴. متغیرهای طراحی

در میان متغیرهای طراحی سیم پیچ موتور که در جدول (۲-۴) داده شده است. بهینه‌سازی باید برای متغیرهای بیان شده در جدول (۲-۴) رضایت بخش باشد.

جدول (۲-۴) : محدوده تغییرات متغیرهای بهینه‌سازی

پارامتر	محدوده تغییرات
تعداد شیار	[۲۲،۲۴،۶۰]
تعداد طبقات سیم پیچی استاتور	یک طبقه ، دو طبقه

۴-۴. طراحی بهینه موتور سنکرون مغناطیس دائم

مشکل بهینه‌سازی طراحی ماشین الکتریکی پیچیده بودن آنها است. روش پیشنهادی برای طراحی بهینه موتور PMSM سیم پیچ FSCW می باشد [۹]. هدف از بهینه‌سازی، حداکثر شدن همزمان توابع راندمان ، هارمونیک اصلی و تضعیف هارمونیک های غیر اصلی می باشد. ماشین های با پیکربندی FSCW مزایای زیادی دارند اما به منظور استفاده از آنها، لازم است که هارمونیک های غیر ضروری MMF حذف شود. با توجه به روش های کاهش یا حتی لغو هارمونیک های غیر ضروری مورد بررسی قرار گرفته در مرجع [۱۰] از جابجایی سیم پیچ استاتور استفاده شده و در نهایت دامنه هر هارمونیک را از رابطه زیر بدست می آورد:

$$V_{adk} = V_{adk} \cos\left(\frac{k\alpha}{2}\right) \quad (1-4)$$

در ماشین مورد نظر با توجه به ۲۴ شیار در استاتور زاویه مکانیکی دو شیار مجاور هم برابر است با:

$$\alpha = \frac{360}{24} = 15 \text{ deg} \quad (2-4)$$

در نتیجه برای تقویت هارمونیک پنجم سیم پیچ دوم را به اندازه (۱۵*۵) ۷۵ درجه انتقال می دهیم. به بیان ساده تر طبقه دوم را ۵ دندانه جابه جا می کنیم. همانطور که در شکل (۲-۴) مشاهده می کنیم منظور از دندانه ۱ که A' هست یعنی به صورت

A'-A دور دندان ۱ پیچیده شده است. بقیه جدول نیز به همین صورت می باشد. نحوه سیم پیچی جدید استاتور موتور ۲۰

قطب ۲۴ شیار پیشنهادی بر اساس شیاریهای استاتور در شکل (۳-۴) نشان داده شده است.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
A'	A	C	C'	B'	B	A	A'	C'	C	B	B'	A	A'	C'	C	B	B'	A	A'	C'	C	B	B'
B	B'	A'	A	C	C'	B'	B	A	A'	C'	C	B	B'	A	A'	C'	C	B	B'	A	A'	C'	C

شکل (۳-۴): نحوه سیم پیچی جدید استاتور موتور ۲۰ قطب ۲۴ شیار پیشنهادی بر اساس انتقال دندانها

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
A'	A	A	A'	B	A'	A	A	A'	B	B	B'	A	A'	A'	A	B'	A	A'	A'	A	B'	B'	B
C'	B	B'	B'	C	C'	C'	C	B'	C	C'	C'	C	B'	B	B	C'	C	C	C'	B	C'	C	C

شکل (۳-۴): نحوه سیم پیچی جدید استاتور موتور ۲۰ قطب ۲۴ شیار پیشنهادی بر اساس شیاریها

۴-۴-۱. الگوریتم طراحی چند هدفه

بطور کلی، بهینه سازی موتور سنکرون مغناطیس دائم یک مسئله بهینه سازی چند هدفه با متغیرهای مختلف و دارای محدودیت هایی می باشد. مسائل بهینه سازی دارای سه مرحله تعریف می شود.

اول: تعریف متغیرهای بهینه سازی

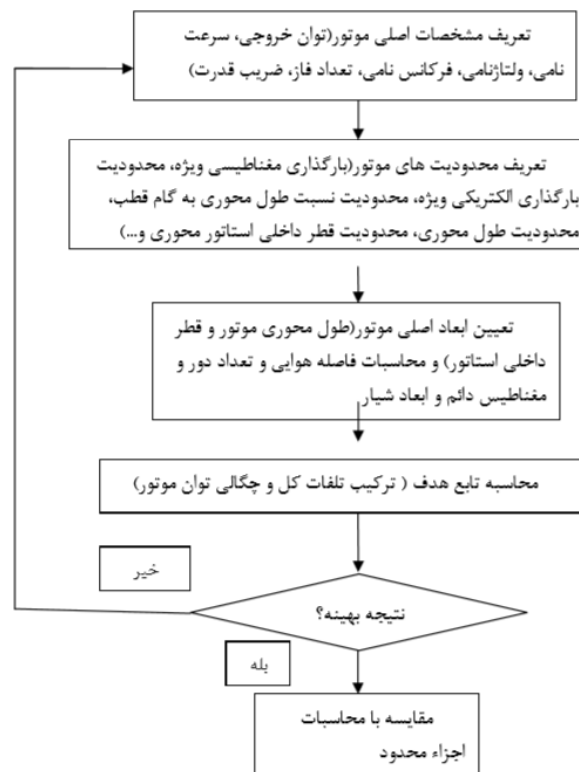
دوم: فرمول بندی تابع هدف و محدودیت های موتور

سوم: بکارگیری الگوریتم های بهینه سازی برای یافتن ابعاد بهینه موتور

مهم ترین بخش های بهینه سازی، فرمول بندی تابع هدف، که معمولا ترکیبی از تلفات توان، بازده و حجم و چگالی توان و هزینه می باشد. علاوه بر محدودیت های قیمتی، تولید و حجم، محدودیت های مکانیکی (گشتاور و سرعت نامی) و الکتریکی (سطح ولتاژ) نیز به مسئله بهینه سازی اعمال می شوند. تکنیک بهینه سازی می تواند از نوع برنامه نویسی غیر خطی مانند برنامه نویسی درجه دو متوالی باشد [۱۰].

۴-۲-۴. مسائل بهینه سازی

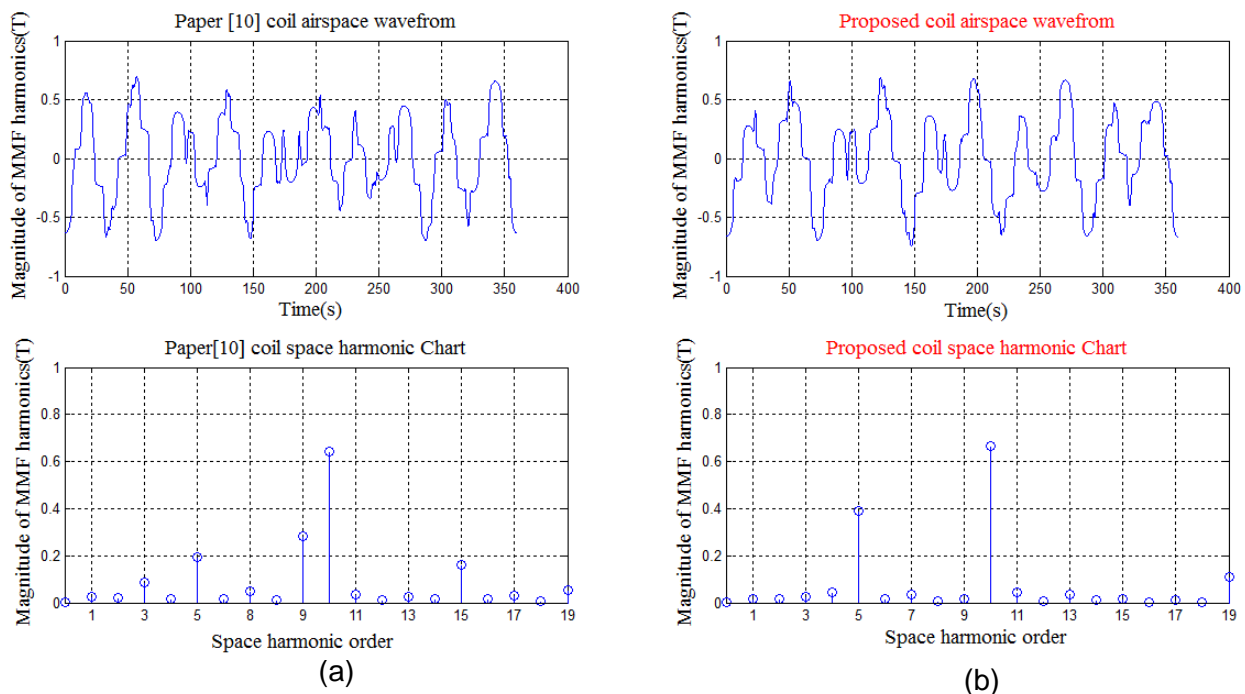
محدودیت های طراحی منجر به پیچیده تر شدن مشکلات طراحی برای یک نوع موتور خاص می گردد. برای برنامه های کاربردی ، موتور می تواند برای تنها چند هدف طراحی شود. موتوری که در این پایان نامه مورد بررسی قرار گرفته است یک موتور $3/9 \text{ kw}$ و 192 rpm می باشد. در این طراحی بهینه سازی مجموع دو تابع راندمان و چگالی توان ماشین برای پارامتر های هندسی موتور که در شکل (۴-۱) نشان داده شده است انجام شد. با توجه به فرض مذکور، تابع هدف به عنوان یک مسئله بهینه سازی به صورت زیر تعریف می گردد. از آنجایی که در طراحی موتور، تقویت هارمونیک از اهمیت بیشتری برخوردار است، وزن بیشتری را در تابع هدف به خود اختصاص می دهد. فرمول بازده و چگالی توان در فصل سوم (بخش ۳-۵) ارائه شده است. همانطور که در فصل قبل توضیح داده شد، فلوجارت مربوط به مراحل طراحی ابعاد و مشخصات موتور در شکل (۴-۴) نشان داده می شود.



شکل (۴-۴) : مراحل بهینه سازی طراحی موتور

۴-۳-۴. نتایج آنالیز الکترومغناطیسی موتور با استفاده از روش المان محدود

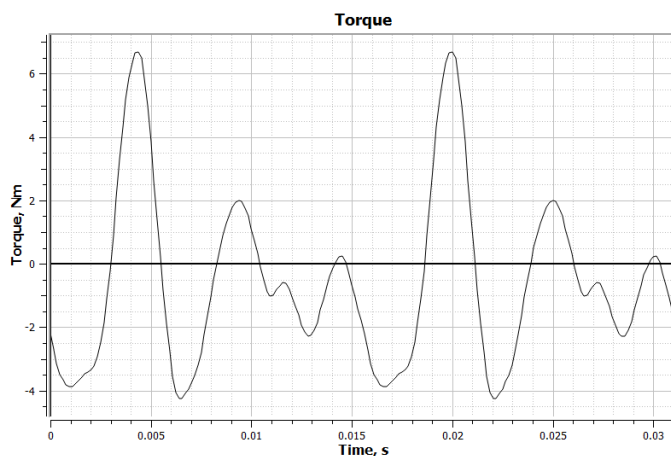
در روش اجزاء محدود، مسئله میدان اصلی به تعدادی زیر دامنه یا المان تقسیم می‌شود. سپس توزیع پتانسیل در هر یک از المان‌ها بوسیله یک چندجمله‌ای به نام تابع آزمون تقریب زده می‌شود و پس از آن یک حل عددی برای مسئله میدان نسبت به یک معیار بهینه بدست می‌آید. در این بخش نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی پارامترهای موتور مغناطیس دائم توسط matlab و jmag شبیه‌سازی می‌شود. تمامی شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم افزار MATLAB 2010 (Mathworks) انجام شده‌اند. در شکل (۴-۵) شکل موج mmf فاصله هوایی سیم پیچ استاتور مرجع [۱۰] و هارمونیک‌های فضایی آن نسبت به شکل موج mmf فاصله هوایی سیم پیچ استاتور پیشنهادی در این پژوهش نشان داده می‌شود. همانطور که در شکل دیده می‌شود با مقایسه دامنه هارمونیک کاری دو شکل موج، دامنه هارمونیک پنجم شکل موج mmf فاصله هوایی سیم پیچ استاتور پیشنهادی در این پژوهش دامنه بیشتری نسبت به نمودار دیگر در حدود ۱۵۰ درصد دارد.



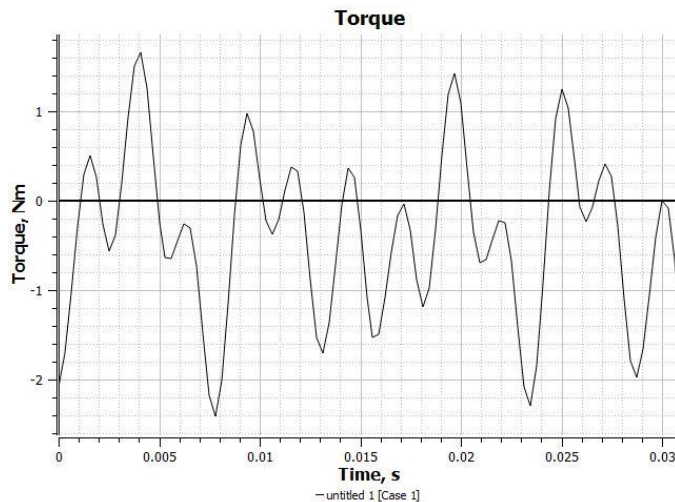
شکل (۴-۵): نمودار هارمونیک mmf فاصله هوایی سیم پیچ استاتور دو نمونه سیم پیچی (a) مرجع [۱۰] و (b) پیشنهادی

همان‌طور که در شکل (۴-۵) مشخص است، تابع هدف، حداکثر کردن دامنه هارمونیک اصلی و تضعیف هارمونیک‌های غیر ضروری است. همچنین در طراحی سیم پیچی جدید هارمونیک پنجم به ماکزیمم مقدار خود رسیده است و بقیه هارمونیک‌ها

هم تقلیل یافته است. علاوه بر این در مقایسه با یک سیم پیچ معمولی موتور ۲۰ قطب ۶۰ شیار علاوه بر اصلاح دامنه هارمونیک ریپل گشتاور نیز کاهش یافته و با توجه به کاهش تعداد شیارها استحکام مکانیکی نیز افزایش می یابد. در نهایت با توجه به موارد بالا طراحی سیم پیچی جدید با ۲۴ شیار و انتقال سیم پیچ لایه اول تا ۵ شیار و زاویه $5 = 15\%$ روش بهینه می باشد. با استفاده از طرح پیشنهادی جدید هارمونیک پنجم $98/34$ درصد و هارمونیک دهم $78/34$ درصد افزایش و هارمونیک دوازدهم حدود 100 درصد و هارمونیک هشتم حدود 98 درصد نسبت به موتور با ۶۰ شیار کاهش یافته اند. با استفاده از طرح پیشنهادی جدید هارمونیک پنجم $94/8$ درصد و هارمونیک دهم $3/12$ درصد افزایش و هارمونیک هفتم حدود 40 درصد و هارمونیک نهم حدود $96/4$ درصد نسبت به موتور با سیم پیچ استاتور پیشنهادی در مرجع [۱۰] کاهش یافته اند. شکل (۴-۶) و (۴-۷) ریپل گشتاور دندانه ای را در طراحی های مختلف نشان می دهد.



شکل (۴-۶): گشتاور دندانه ای موتور با سیم پیچ استاتور مرجع [۱۰]



شکل (۴-۷): گشتاور دندانه ای موتور ۲۰ قطب ۲۴ شیار با سیم پیچ استاتور پیشنهادی

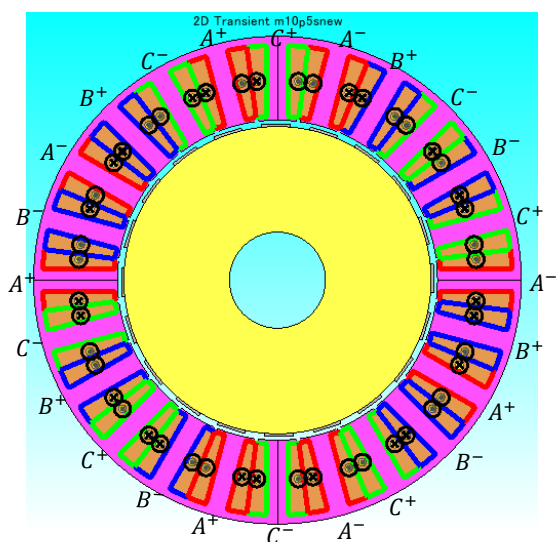
۴-۵. آنالیز میدان الکترومغناطیسی و گذرای موتور

موتور سنکرون مغناطیس دائم سطحی با سیم‌پیچی متمرکز جهت کاربرد در آسانسور در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته شده است. آرایش سیم‌پیچی متمرکز اثر سیم پیچ انتهایی و تلفات مس را کاهش می‌دهد.

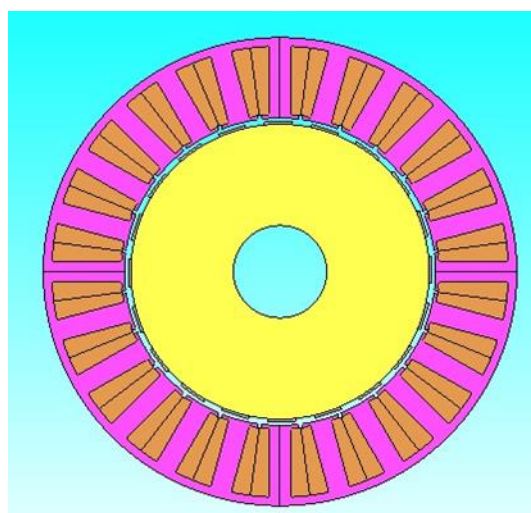
به منظور بدست آوردن آنالیز میدان الکترومغناطیسی و گذرای موتور طراحی شده از نرم افزار jmag استفاده شده است. شبیه سازی در ۳ مرحله قابل انجام می باشد.

۴-۵-۱. تعیین مدل موتور

ابتدا ، پیکربندی موتور بر اساس مقادیر بهینه به دست آمده دربخش قبلی که در شکل(۴-۸) نشان داده شده است طراحی می‌شود. مدل از ۲۰ عدد آهنربا با آهنرباهای NdFeB ، فاصله هوایی، استاتور با ۲۴ شیار همراه کویل های مسی و شافت تشکیل شده است. همچنین در شکل (۴-۹) سیم‌پیچی متمرکز ماشین الکتریکی مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل (۴-۹) : سیم پیچی متمرکز ماشین الکتریکی



شکل(۴-۸) : سطح مقطع دو بعدی از موتور طراحی شده

۴-۵-۲. انتخاب مواد

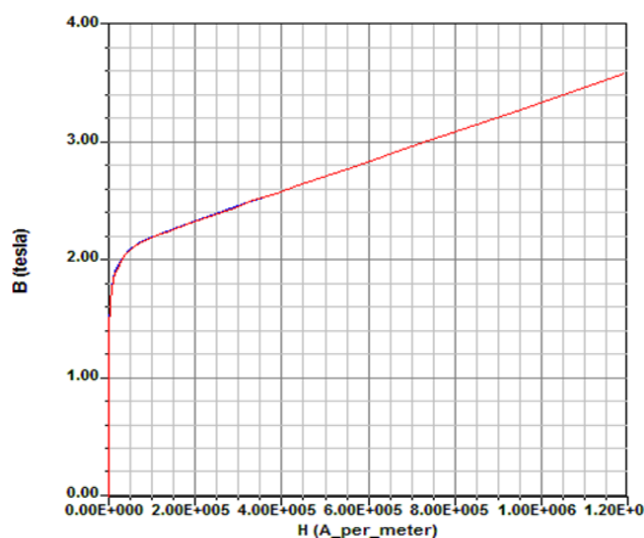
برای اجزاء مختلف موتور، مواد مغناطیسی مختلفی انتخاب شده اند. این مواد در جدول (۳-۴) نشان داده شده است.

جدول (۳-۴): نوع مواد مغناطیسی اجزاء مختلف موتور

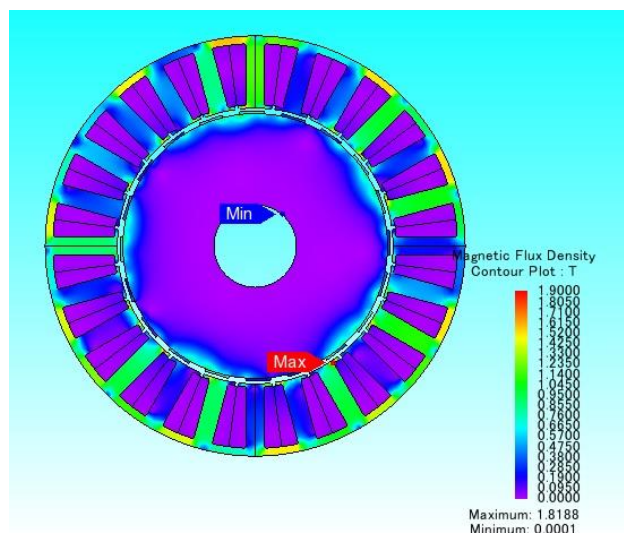
استاتور	Steel ۸۰۰۱
روتور	Steel ۸۰۰۱
نوع هادی های استاتور	مس
آهنرباهای دائم	نئودیمیوم - آهن - برون
فاصله هوایی	هوا
شافت	Stainless steel

۴-۵-۳. نتایج شبیه سازی

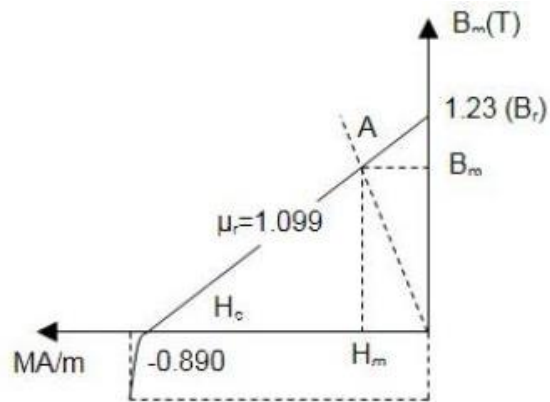
به منظور بررسی و آنالیز الکترومغناطیسی موتور طراحی شده از نرم افزار jmag 2016 استفاده شده است. با استفاده از این آنالیز، مقدار پتانسیل واقعی و شدت میدان مغناطیسی موتور بدست آمده است. نتایج آنالیز مغناطیسی در شکل (۴-۱۰) نشان داده شده است. در شکل (۴-۱۰) توزیع چگالی شار مغناطیسی موتور طراحی شده با فرض اینکه موتور AC مغناطیس دائم باشد انجام گرفته است. در شکل (۴-۱۱) منحنی مشخصه های (B/H) فولاد فلزی استیل ۱۰۰۸ استفاده شده برای ورقه های روتور و استاتور و در شکل (۴-۱۲)، منحنی مشخصه های (B/H) آهنرباهای استفاده شده نشان داده شده اند.



شکل (۴-۱۱): شکل (B/H) ورقه های استیل ۱۰۰۸



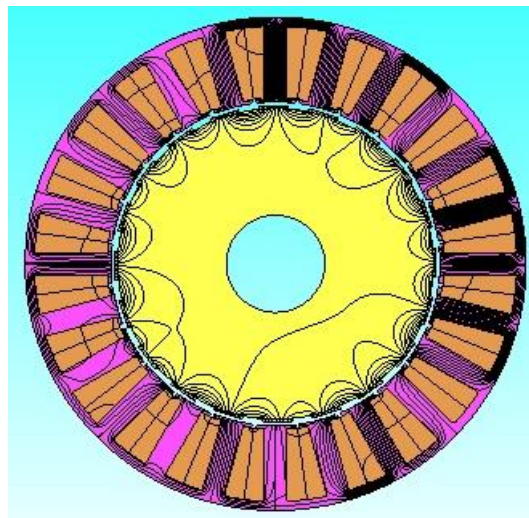
شکل (۴-۱۰): چگالی شار مغناطیسی موتور طراحی شده



شکل (۱۲-۴) : منحنی B/H آهنرباها

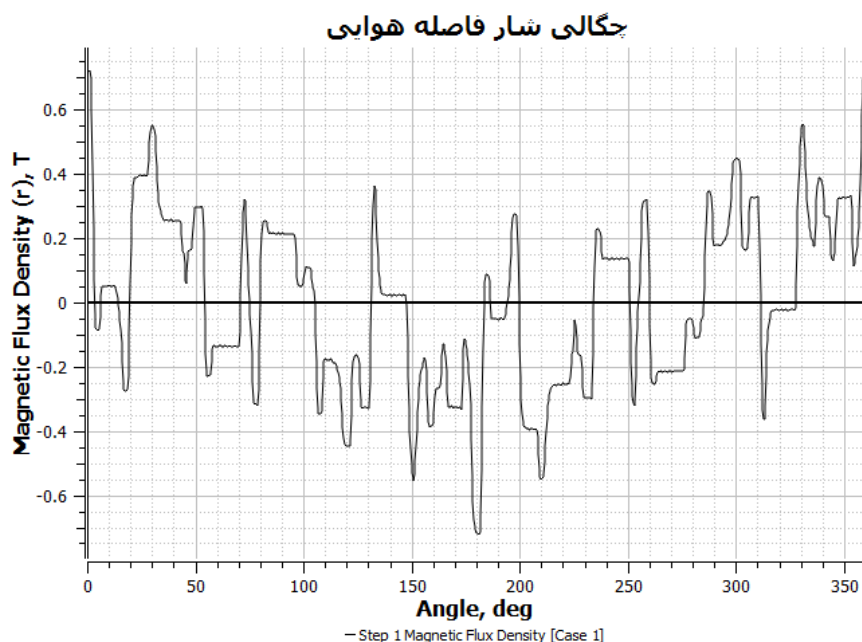
همانطور که در شکل (۱۱-۴) نشان داده شده است، نقطه اشباع صفحات فلزی استیل ۱۰۰۸ در حدود ۱/۸ تا ۲ تسلا می باشد. با توجه به شکل (۱۲-۴)، نقطه اشباع آهنرباها مقدار ۱/۲۳ تسلا بوده که در آنالیز مغناطیسی این مقدار بین ۰/۸۹ تا ۰/۲۲ تسلا محاسبه شده است.

این نتایج به این معنی بوده که موتور در نقطه اشباع خود در حال کار بوده که در این صورت موتور بالاترین گشتاور را انتقال خواهد داد. در شکل (۱۳-۴)، توزیع خطوط شار مغناطیسی موتور طراحی شده نشان داده شده است.



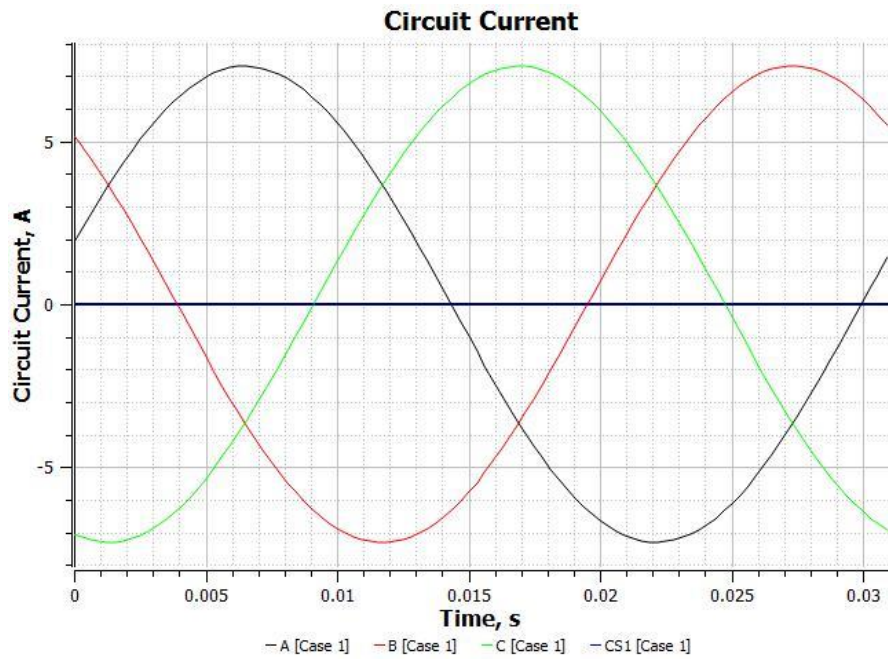
شکل (۱۳-۴) : توزیع خطوط شار مغناطیسی موتور

نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۴-۱۴) تا (۴-۱۷) نشان داده شده است. این نمودارها نشان می‌دهد که مرزهای کاری در سطوح قابل قبولی می‌باشند. منحنی‌ها نشان می‌دهند که مقادیر کاری در فاصله‌های هوایی از سطح مناسبی برخوردار می‌باشند. شکل (۴-۱۴)، چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی موتور بر حسب درجه مکانیکی را نشان می‌دهد.

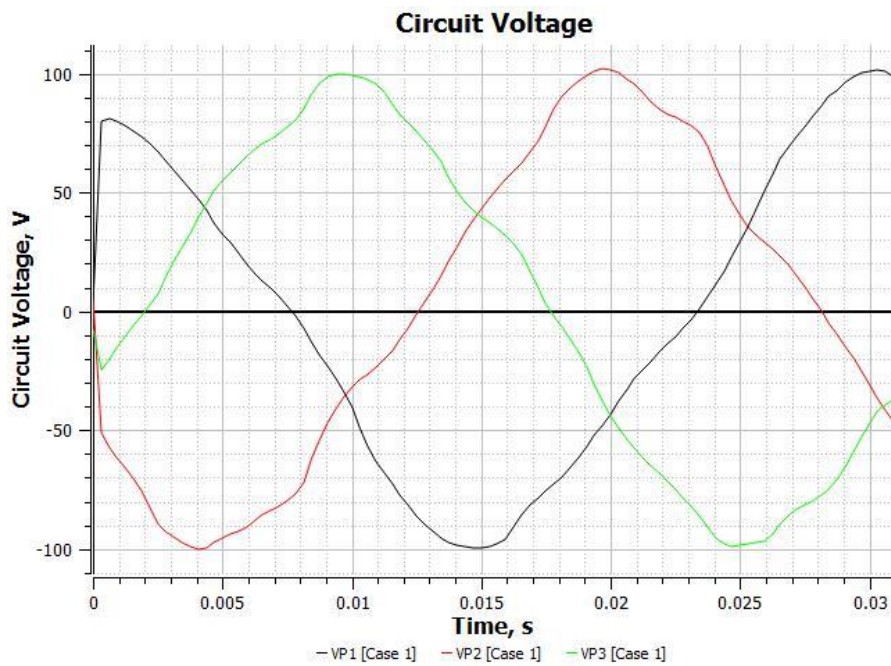


شکل (۴-۱۴): منحنی چگالی شار فاصله هوایی

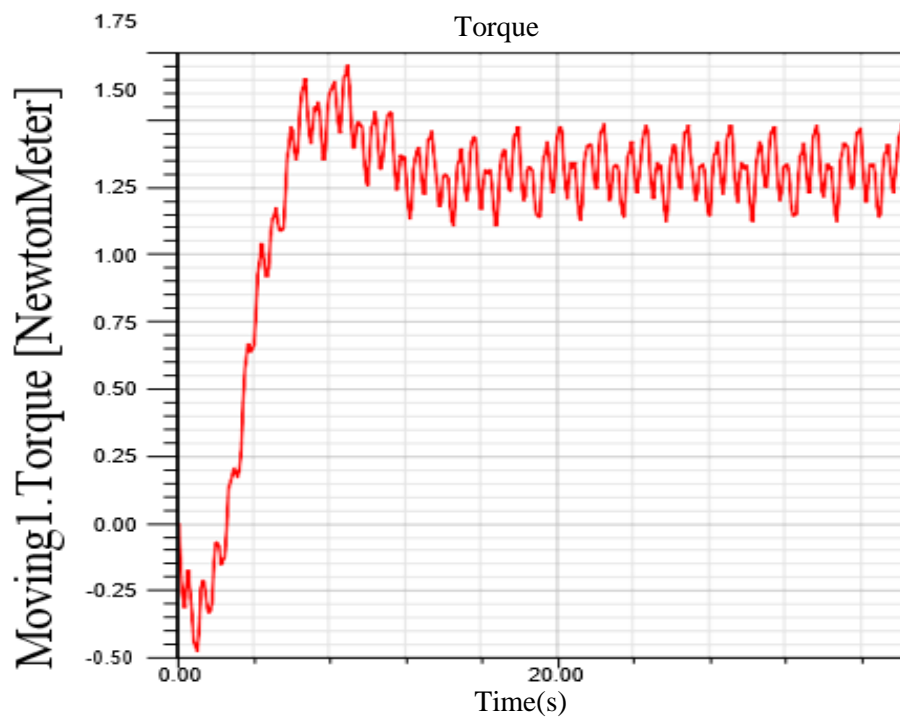
شکل‌های بعدی (۴-۱۵) تا (۴-۱۷) به ترتیب نمودارهای جریان، ولتاژ و گشتاور خروجی موتور را نسبت به زمان نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است مقدار موثر جریان و ولتاژ فاز استاتور و همچنین گشتاور موتور مطابق با مقادیر به دست آمده از روابط تحلیلی می‌باشد. جدول (۴-۴) دامنه هارمونیک های mmf فاصله هوایی موتور با سیم پیچ استاتور پیشنهادی و سیم پیچ استاتور مرجع [۱۰] به دست آمده از تحلیل اجزای محدود و برنامه مطلب را مقایسه می‌کند.



شکل (۴-۱۵): جریان سه فاز منبع جریان اعمال شده به موتور



شکل (۴-۱۶): ولتاژ سه فاز دیده شده در سیم پیچ استاتور موتور



شکل (۴-۱۷) : گشتاور خروجی موتور

جدول (۴-۴) : مقایسه مقادیر دامنه هارمونیک های mmf فاصله هوایی موتور پیشنهادی با طرح های دیگر

شماره هارمونیک	(۱) دامنه هارمونیکي mmf فاصله هوایی موتور پیشنهادی (T)	(۲) دامنه هارمونیکي mmf فاصله هوایی موتور مرجع [۱۰]. (T)	درصد افزایش / کاهش دامنه طرح (۱) نسبت به (۲) (%)
هارمونیک اول	۰/۰۱۵	۰/۰۲۶	% -۴۲/۳
هارمونیک پنجم (اصلی)	۰/۳۸	۰/۱۹۵	% +۹۴/۸
هارمونیک دهم	۰/۶۶	۰/۶۴	% +۳/۱۲
هارمونیک هفتم	۰/۰۳	۰/۰۵	% -۴۰
هارمونیک نهم	۰/۰۱	۰/۲۸	% -۹۶/۴

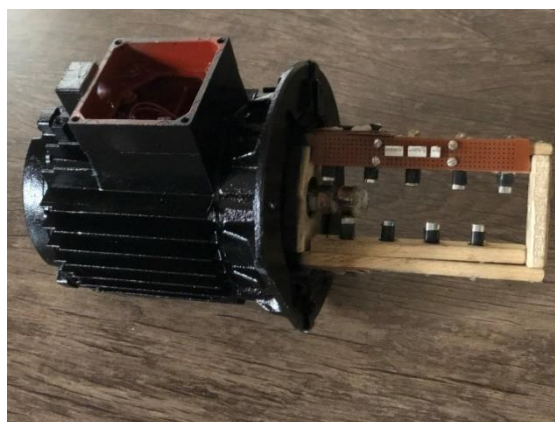
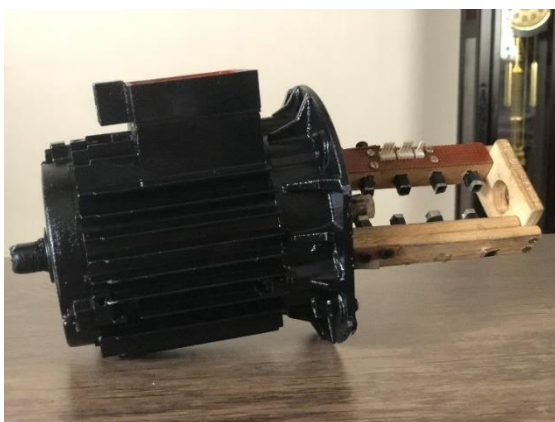
فصل ۵: مراحل ساخت و آزمایش عملکرد موتور مغناطیس

دائم

۵-۱. مقدمه

در این فصل به مراحل ساخت یک موتور نمونه جهت تست های آزمایشگاهی (experimental) و بررسی نتایج حاصل از تست های آزمایشگاهی می پردازیم.

۵-۲. مراحل ساخت موتور



شکل (۵-۱): نمونه موتور ساخته شده ۲۰ قطب ۲۴ شیار

همانطور که در شکل (۵-۱) مشاهده می کنید از یک موتور ۲۴ شیار جهت تست های آزمایشگاهی عملکرد ماشین استفاده شده است. در قسمت بالای روتور از اسلیپ رینگ جهت انتقال سیگنال کوئل دو سر روتور استفاده شده است.

۵-۲-۱. مشخصات طراحی موتور

مشخصات طراحی موتور ساخته شده در جداول (۵-۱) و (۵-۲) جهت تست های آزمایشگاهی (experimental) آورده شده است. نتایج حاصل از آزمایش فوق در این پایان نامه جهت تایید تحلیل های ارائه شده در فصل قبل آورده شده است.

جدول (۵-۲): ابعاد و مشخصات عملکردی موتور

مقدار	بعد / پارامتر	مقدار	بعد / پارامتر
۳/۷	ωt (mm)	۰/۵۴	D (mm)
۳/۳	ωs (mm)	۰/۶۵	L (mm)
۱۰/۵۹	hs (mm)	۴	τp (mm)
۶	hbis, hbir (mm)	۰/۵۸	η
۲۵	Zslot (turns)	۹	v
۲۰	Ptot(w)	۸	τs (mm)

جدول (۵-۱): پارامترهای اولیه موتور

مقدار	پارامتر
۰/۶	Bav (T)
۳۰۰۰۰	ac (A/m)
۰/۹۵	PF
۱/۵۲	Br (T)
۱/۳	L/ τp
۵	Js
۰/۰۰۸۶۵	φ (wb)

تعداد دور هر کلاف استاتور ۲۵ دور می باشد که در نتیجه آن تعداد دور هر فاز برابر است با :

$$N_{coil}=24/8=3 ; N_{ph}=25*8=200 ; \varphi =B_{av}*(\pi DL/P)=0.000330642(T) ;$$

$$B_{av}=0.6(T) ; K_w=0.933 [12] ; V_{ph} =4.44* \varphi *f*N_{ph}*K_w=13.7(v) ;$$

$$B_{teeth}=1.8(T) ; f=50(Hz) ; \varphi = (2/\pi)*1.8*1.2*t*L \quad t=3.7(mm) ;$$

$$W =(\frac{\pi D}{24})-t=3.3(mm); A_{coil} =\pi(\frac{d}{2})^2*N_{coil}*2=11.873125(mm^2);$$

$$A_{slot}=A_{coil}/K_{fil}=16.79(mm^2); H_{slot} = (A_{slot}/w) +3+2+0.5=10.59(mm) ; B_y=1.7(T) ;$$

$$B_y=(\varphi /2)/(b*L) \longrightarrow b=1.5(mm) ; D_{out} = D+2*(b+h)=54+2*(1.5+10.5)=78.18 (mm);$$

همانطور که در محاسبات بالا مشاهده میکنیم برای اینکه دندانهای استاتور به اشباح نرود باید V_{ph} برابر ۱۳٫۷ ولت بیشتر

باشد . در این موتور از سیم مسی با سطح مقطع ۰٫۵۵ میلیمتر استفاده شده که با توجه به فرض چگالی جریان

$$j=5(A/mm^2) \text{ جریان فاز برابر با :}$$

$$I_{ph}=0.55*5=2.75 (A);$$

و بر اساس روابط فصل سوم داریم ;

توان ظاهری برابر است با :

$$S=3*V_{ph}*I_{ph} ; S=113.025 (w) ;$$

تلفات کل موتور(بر اساس روابط فصل سوم) :

$$P_{tot}=0.647 (w) ;$$

راندمان:

$$\eta=P_{out}/(P_{out}+P_{tot}) ; \eta=0.99 ;$$

چگالی توان:

$$P_{den}=24*10^4 (w) ;$$

گشتاور:

$$T=0.07 \left(\frac{N}{M}\right) ;$$

۵-۲-۲. انتخاب مواد موتور

در این موتور طبق جدول (۵-۱) از یک استاتور ۲۴ شیار از جنس سیلیس M70، رتور با یک شیار از جنس CK45، سیم مسی ۰/۵۵ جهت سیم پیچی استاتور و رتور، عایق مایله ۰/۱۵ جهت عایق کردن شیار استاتور و شارلاک جهت عایق کردن سیم پیچی استاتور استفاده شده است.

جدول (۵-۳): نوع مواد انتخابی

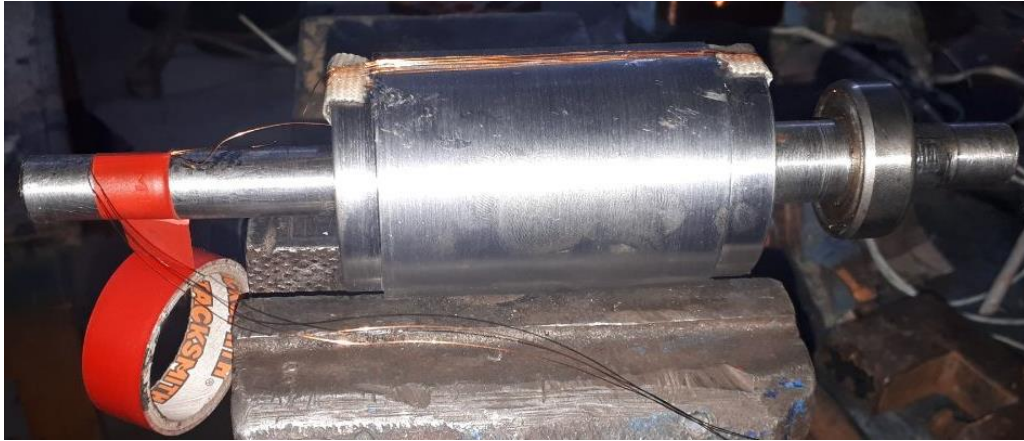
Silis M70	استاتور
CK45	رتور
۰,۵۵ (mm) مس	نوع هادی های استاتور
۰,۵۵ (mm) مس	نوع هادی های رتور
آلومینیوم	پوسته
Stainless steel	شافت
۰,۱۵ (mm) مایله	عایق شیار

۵-۲-۳. ساخت موتور

- (۱) پاکسازی شیار های استاتور و سمپلاست و رنگ آمیزی موتور. شکل (۵-۱)
- (۲) عایق کاری شیار های استاتور توسط مایله. شکل (۵-۲)(b)
- (۳) سیم پیچی استاتور با روش FSCW پیشنهادی در این پایان نامه. شکل (۵-۲)(a)
- (۴) نخبندی سیم پیچ انتهای استاتور. شکل (۵-۲)(a)
- (۵) عایق کاری سیم پیچ استاتور توسط شارلاک. شکل (۵-۲)(a)
- (۶) ساخت رتور با یک شیار. شکل (۵-۳)
- (۷) سیم پیچی رتور (یک کلاف ۶ دور سیم ۰,۵۵ میلیمتر). شکل (۵-۳)
- (۸) جاگذاری رتور و بلبرینگ ها و درپوش موتور
- (۹) ساخت اسلیپ رینگ جهت بیرون آوردن دو سر کوئل رتور بمنظور استفاده در اسیلوسکوپ. شکل (۵-۴)



شکل (۵-۲): سیم پیچی استاتور موتور نمونه ۲۰ قطب ۲۴ شیار



شکل (۵-۳): سیم پیچی روتور موتور نمونه ۲۰ قطب ۲۴ شیار



شکل (۵-۴): اسلپ رینگ روتور موتور نمونه ۲۰ قطب ۲۴ شیار

۵-۳. مراحل آزمایش موتور

در این بخش موتور را در آزمایشگاه ماشین های الکتریکی به دو روش زیر مورد آزمایش قرار می دهیم.

(۱) تست با منبع DC و گوپلینگ با موتور کمکی

(۲) تست با منبع سه فاز AC

۵-۳-۱. آزمایش موتور با منبع DC و گوپلینگ با موتور کمکی

همانطور که در شکل (۵-۵) مشاهده می کنید موتور با یک موتور کمکی گوپل می شود تا چرخش روتور با سرعت ثابت توسط

آن انجام شود سپس توسط یک منبع DC، ولتاژ ۲۲ ولت به سیم پیچ استاتور با سربندی زیر اعمال می کنیم و در نهایت

شکل موج القا شده به کوئل روتور^۱ را توسط اسیلوسکوپ مشاهده می کنیم.

سربندی استاتور:

سر مثبت متصل به فاز A

سر منفی متصل به فاز های B,C

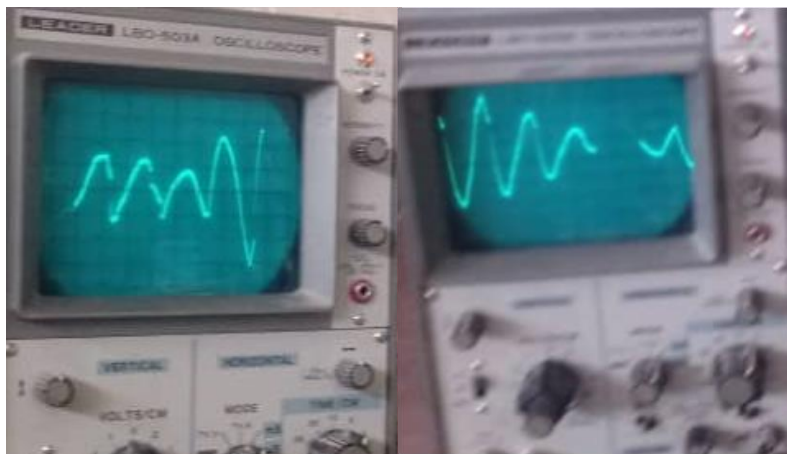


شکل(۵-۵): آزمایش موتور نمونه ۲۰ قطب ۲۴ شیار با منبع DC و گوپلینگ با موتور کمکی

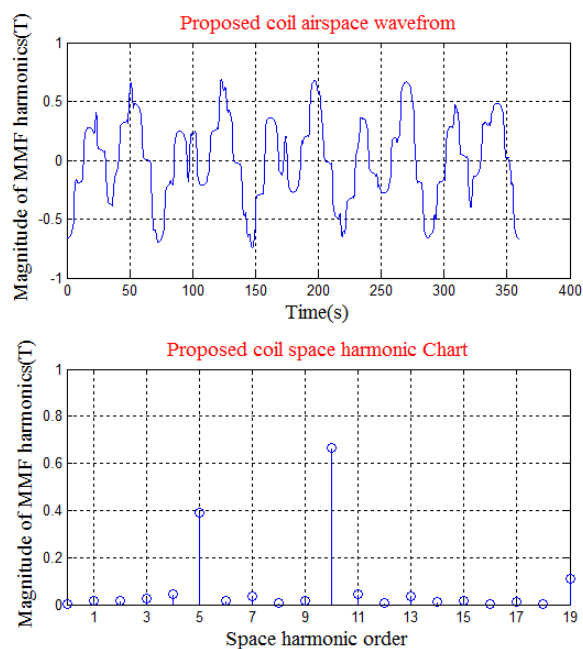
^۱ Search Coil

نتایج آزمایش DC:

همانطور که در شکل (۵-۶) مشاهده می شود شکل موج mmf فاصله هوایی در اسیلوسکوپ وجود هارمونیک دهم را نشان داده که مشابه شکل موج mmf فاصله هوایی در نرم افزار jmag است.



(a)



(b)

شکل (۵-۶): (a): نتایج حاصل از تست عملی موتور نمونه ۲۰ قطب ۲۴ شیار با منبع DC

(b): نتایج حاصل از نرم افزار jmag موتور نمونه ۲۰ قطب ۲۴ شیار

۵-۳-۲. آزمایش موتور با منبع AC

همانطور که در شکل (۷-۵) مشاهده می کنید موتور به یک منبع سه فاز متصل کرده و روتور را ثابت نگه می داریم سپس ولتاژ سه فاز AC، ۸ ولت به سه فاز استاتور با سربندی A,B,C اعمال می کنیم و در نهایت شکل موج میدان دوار سیم پیچ استاتور القا شده به کویل روتور را توسط اسیلوسکوپ مشاهده می کنیم.

نتایج آزمایش AC:

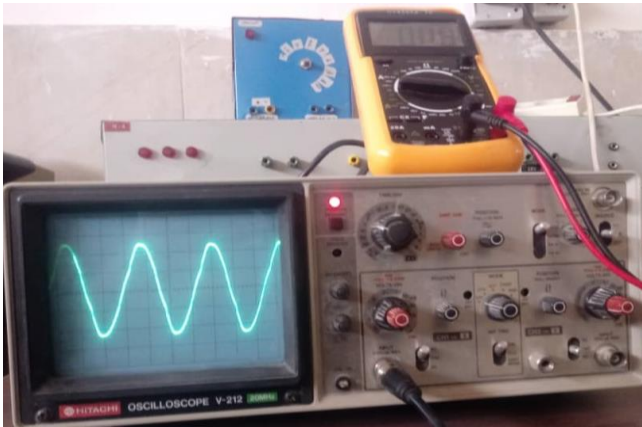
همانطور که در شکل (۸-۵) مشاهده می شود شکل موج میدان دوار سیم پیچ استاتور در اسیلوسکوپ وجود یک سیگنال سینوسی با دامنه ۴۸ mV و فرکانس ۵۰ هرتز را نشان میدهد.

$$V_{ph} = 4.44 * \varphi * f * N_{ph} * K_w = 8(v) \quad \varphi = 0.00019312(T);$$

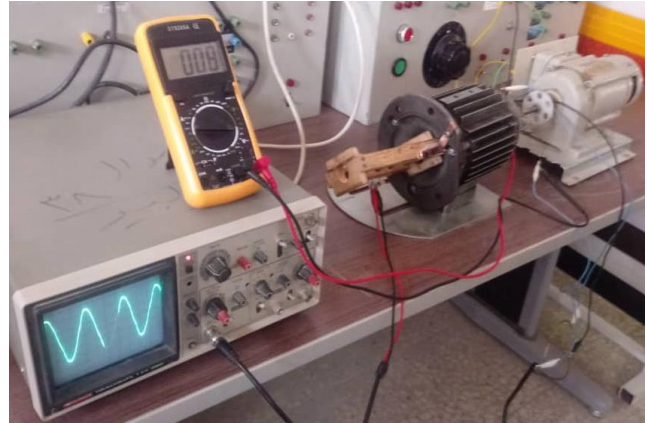
$$t = \pi/5 * (1/192) = 0.00327 \text{ (زمان به حداقل رسیدن شار)}$$

$$E_{ave} = 1/2 * (\varphi / t) = 29.5(mv); \quad \text{ولتاژ محاسبه شده}$$

$$E_m = (2.4 * 20) = 48(mv) \quad E_m = (48/\sqrt{2}) = 34(mv); \quad \text{ولتاژ دیده شده در اسیلوسکوپ شکل (۸-۵)}$$



شکل (۸-۵): سیگنال القا شده در روتور توسط منبع AC



شکل (۷-۵): آزمایش موتور نمونه ۲۰ قطب ۲۴ شیار با منبع AC

فصل ۶: نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱. نتیجه گیری

در این پایان نامه به بررسی روند طراحی تا آنالیز المان محدود یک نمونه موتور سنکرون مغناطیس دائم و تحلیل آزمایشگاهی (experimental) مراحل بهینه سازی پرداخته شده است.

در کل می توان یافته های این پژوهش را به صورت زیر خلاصه نمود:

- در ابتدا با مقایسه ای بین موتورهای سنکرون، موتور سنکرون مغناطیس دائم به دلیل مزایایی از قبیل راندمان بالا، قابلیت اطمینان بالاتر، ابعاد فیزیکی کوچکتر (تولید گشتاور بیشتر در ابعادی کوچکتر)، تعمیر و نگهداری کمتر، امکان استفاده موتور در فضای کم چاله آسانسور، امکان کار در سرعت های کم (کمتر از ۱۰۰ rpm) و سرعت های خیلی زیاد (بیشتر از ۸۰۰۰ rpm) جهت کاربرد در صنعت آسانسور انتخاب گردید.
- مطالعه ای بر روابط و معادلات حاکم بر موتور سنکرون سه فاز مغناطیس دائم انجام گردید.
- جنبه های هارمونیک و ریپل گشتاور این موتورها برای آسانسور حائز اهمیت می باشد.
- بهینه سازی موتور بر اساس توابع هدف که ترکیبی از حداکثر سازی راندمان و هارمونیک اصلی و تضعیف هارمونیک های غیر اصلی بود طراحی بهینه شد. با انجام بهینه سازی در مقایسه با موتور طراحی شده به روش معمولی، راندمان بیش از ۵ درصد افزایش و دامنه هارمونیک بیش از ۱۸۰ درصد افزایش یافت.
- در نهایت با استفاده از نرم افزارهای در دسترس جهت تحلیل الکترومغناطیسی، مواد انتخابی برای موتور و نحوه عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفت و منحنی های مربوطه بر اساس خروجی نرم افزارهای ارائه شده است. نتایج حاصل از تحلیل الکترومغناطیسی با استفاده از روش اجزاء محدود نشان داد که موتور دارای راندمان و گشتاور خوبی می باشد که این نتایج با درصد خطای کمی نتایج حاصل از بهینه سازی را تأیید می کند که این خود کارایی و دقت روند بهینه سازی را اثبات می کند. همچنین نتایج حاصل از تحلیل آزمایشگاهی (experimental) مراحل بهینه سازی را تأیید می کند.

۶-۲. پیشنهادات

با توجه به مراحل طراحی و آنالیز موتور، در نهایت ایده‌هایی در رابطه با موضوع مورد تحقیق قابل ارائه میباشند.

الف) به منظور بهبود راندمان موتور، ورقه‌های استاتور را می توان با ورقه‌هایی که تلفات کمتری ایجاد می‌کنند جایگزین نمود.

به عنوان مثال: استفاده از ورقه‌های فولادی ایزوتروپیک یا استفاده از مواد کامپوزیتی.

ب) استفاده از طراحی سیم پیچ جدید انتقال ۹ و یا ۱۰ شیار در طبقه اول.

ج) استفاده از توابع هدف مختلف مثل کاهش نوسان گشتاور ، وزن، هزینه و ...

د) بررسی آنالیز حرارتی موتور به صورت یک پارامتر به منظور بهینه‌سازی ابعاد موتور

ZAtop Gearless elevator machine

SM160



Synchronous motor actuated by permanent magnets and according to the provisions of the Lift Directive 2014/33/EU

Drive

- NdFeB magnets
- Structural width ≤ 250 mm for the narrowest shaft dimensions
- Noise emissions: < 50 dB(A)
- Insulation class F with temperature monitoring

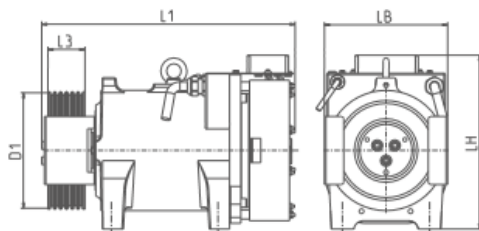
Brake system

- Safety component according to the Lift Directive 2014/33/EU
- Separately activated brake circuits
- Deployable as an element of the ascending car overspeed protection means
- Deployable as part of the protection against unintended car movement

Machine frames	Page 60
Deflection pulleys	Page 70
Adapter plates	Page 69
ZAlift	Page 74

Technical data

SM160



Motor type	Nominal torque	Max. axle load	Nominal speed	Rated output power	L1	LH	LB	D1	L3	Weight
	Nm				kg	min ⁻¹				
SM160.30B/S	195	1900	192...384	3.9...7.3	532	359	248	120	101	140
					531					146
					523					149
					523					150
					523					155
SM160.40B/S	260	2500	192...384	5.2...10.5	617	359	248	120	140	165
					615					172
					596					178
					596					178
					596					181



منابع و مراجع

- [1] Haring T., Forsman K., Huhtanen T., Zawadzki M., "Direct drive – opening a new era in many applications", Pulp and Paper Industry Technical Conference, pp. 1971,2003.
- [2] Chen J., Nayar C., Xu L., "Design and finite-element analysis of an outer-rotor permanent- magnet generator for directly coupled wind turbines", IEEE Transactions on Magnetics, Vol63, No. 5, pp. 2083-9083, 2000.
- [3] Heikkilä T., "Permanent magnet synchronous motor for industrial inverter applications - analysis and design, Doctoral thesis", Lappeenranta University of Technology, 2002.
- [4] Caricchi F., Crescimbeni F., "Axial-flux machines: design and applications", Overheads of the Seminar at KTH, 2000.
- [5] Cirani M., "Analysis of an innovative design of an axial flux torusmachine", Licentiate Thesis, ISSN .561-476X, 2002.
- [6] Epskamp T., Hagenkort B., Hartkopf T., Jöckel S., "No gearing, no converter - assessing the idea of highly reliable permanent-magnet induction generators", European Union Wind Energy Conference, EWEC'99, Nice, France, 1999.
- [7] Steinmetz, C. P. Lectures on Electrical Engineering, (P. L. Alger, ed.), Vol. 1, Dover Publications, New York, 1997.
- [8] Chalmers, B. J. (ed.) (1998) "Electric Motor Handbook, London: Butterworths", p.633.
- [9] مطالعه و بررسی جامع انواع مدارهای کنترلی آسانسور و موتورهای مورد استفاده در آن; محمد رضا حلمی
- [10] Shaohong Zhu, Tom Cox, Zeyuan Xu, and Chris Gerada' A Novel 24-Slots14-Poles Fractional-Slot Concentrated Winding Topology with Low Space Harmonics for Electrical Machine ', , on 09 January 2019.
- [11] A. Tessarolo , Senior Member, IEEE.: 'A Quadratic-Programming Approach to the Design Optimization of Fractional-Slot Concentrated Windings for Surface Permanent-Magnet Machines', IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 33, NO. 1, MARCH 2018

[12] A. Tassarolo, IEEE Senior Member, C. Ciriani, M. Bortolozzi, M. Mezzarobba and N. Barbini.: 'Investigation into Multi-Layer Fractional-Slot Concentrated Windings with Unconventional SlotPole Combinations', 0885-8969 (c) 2019 IEEE. Personal use is permitted, but republication/redistribution requires IEEE permission

[13] Xavier Jannot, Jean-Claude Vannier, Claude Marchand, Mohamed Gabsi, Jacques Saint- Michel, and Daniel Sadarnac, Multiphysic Modeling of a High-Speed Interior Permanent- Magnet Synchronous Machine for a Multiobjective Optimal Design, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.62, NO. 2, June 2011.

[14] Ki-Chan Kim, Ju Lee, Hee Jun Kim, and Dae-Hyun Koo, Multiobjective Optimal Design for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.54, NO.3, March2009.

[15] Z. Makni, M. Besbes, and C. Marchand, Multiphysics Design Methodology of Permanent- Magnet Synchronous Motors, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.65, NO.4, July2007.

[16] Arash Hassanpour Isfahani, and Siavash Sadeghi, Design of a Permanent Magnet Synchronous Machine for the Hybrid Electric Vehicle, World Academy of Science, Engineering and Technology 54, 2008.

[17] Chandur Sadarangani, "Electrical machines – Design and Analysis of Induction and Permanent Magnet Motors", ISBN 19-0717-726-5, Stockholm 2003

[18] Armor,A.F.(1980) IEEE Trans, PAS-99,p.439

[19] Gerada, Chris, and Keith J. Bradley. "Integrated PM machine design for an aircraft EMA." IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55, no.9, pp. 3300-3306, 2008.

[20] Bianchi, Nicola, Silverio Bolognani, M. Dai Pre, and G. A. G. G. Grezzani. "Design considerations for fractionalslot winding configurations of synchronous machines." IEEE transactions on industry applications, 42, no. 4, pp. 997-1006, 2006.

- [21] El-Refaie, Ayman M., and Thomas M. Jahns. "Impact of winding layer number and magnet type on synchronous surface PM machines designed for wide constant-power speed range operation." *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23, no. 1. 53-60, 2008.
- [22] Cistelecan, Mihail V., Fernando JTE Ferreira, and Mihail Popescu. "Three phase tooth-concentrated multiple-layer fractional windings with low space harmonic content." In *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 1399-1405, 2010.
- [23] Kim, Hae-Joong, Do-Jin Kim, and Jung-Pyo Hong. "Characteristic analysis for concentrated multiple-layer winding machine with optimum turn ratio." *IEEE Transactions on Magnetics*, 50, no. 2, pp. 789-792, 2014.
- [24] Dajaku, Gurakuq, and Dieter Gerling. "A novel 24slots/10-poles winding topology for electric machines." In *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), IEEE International*, pp. 65-70, 2011. [8] Patel, Vipulkumar I., Jiabin Wang, Weiya Wang, and Xiao Chen. "Six-phase fractional-slot-per-pole-per-phase permanent-magnet machines with low space harmonics for electric vehicle application." *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50, no. 4, pp. 2554-2563, 2014.
- [25] Abdel-Khalik, Ayman S., Shehab Ahmed, and Ahmed M. Massoud. "A six-phase 24-slot/10-pole permanent-magnet machine with low space harmonics for electric vehicle applications." *IEEE Transactions on Magnetics*, 52, no. 6, 8700110, 2016.
- [26] Eastham, J. F., T. Cox, and J. Proverbs. "Application of planar modular windings to linear induction motors by harmonic cancellation." *IET electric power applications*, 4, no. 3, pp. 140-148, 2010. [11] Cox, T., and J. F. Eastham. "Multi layer planar concentrated windings." In *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International*, pp. 14391444, 2011.
- [27] <https://www.emetor.com/edit/windings/>
- [28] Tong, Chengde, Fan Wu, Ping Zheng, Bin Yu, Yi Sui, and Luming Cheng. "Investigation of magnetically isolated multiphase modular permanent-magnet synchronous machinery series for wheel-driving electric vehicles." *IEEE Transactions on Magnetics*, 50, no. 11, 8203704, 2014.

Abstract

Design of electrical machines has a certain aim. Designer seeks to meet required need such as efficiency. Among all types of electrical motors, permanent magnet synchronous motors (PMSM) are good candidate for in industry due to simple structure, low cost, compactness, high flux density, low loss and good performance of drive system. Besides, their speed can be controlled via changing frequency of rotating magnetic field called synchronous speed. In recent decades, there were lots of method devoting to optimal design of electrical machines which led to new methods and. Finite element analysis is also used as a simpler way to analyze and investigate the behavior of machines. This method has great accuracy and uses field equations for modeling physical systems. Therover extensive research has been done to understand the FSCW principle using different approaches. The combination of the possible stator and rotor grooves can be comprehensively investigated for FSCW configuration and symmetrical alignment that can provide the maximum coil coefficient. This thesis presents design optimization of three-phase permanent magnet synchronous motors to use in elevators systems. For this purpose, characteristics of a motor used in elevators applications are investigated and then equations related to design are evaluated and the motor is optimized to have the best harmonic wavefrom and torque wavefrom compared to previous research. In this paper, two different ideas are presented in terms of improving the spatial harmonics of the mmf waveforms of the airbag of the rear axle motor. The method used to improve the spatial harmonics of the mmf waveforms of the airbag, uses a second-class winding to enhance the working harmonics of the engine and eliminate the first harmonic and reduce unnecessary harmonics. On the other hand, the engine speed is increased and efficiency is increased. After optimization, By finite element analysis, aspects of the magnetic analysis of the motor are examined. Looking at JMAG software improves engine performance in a simple way. Finally, the performance of the proposed method is confirmed by the construction of the laboratory sample.

Keywords: Fractional-Slot Concentrated Winding (FSCW), three-phase permanent magnet synchronous motor, elevator industry, motor design, Finite element analysis, Stator shifting, MMF space harmonic



**Shahrood University of
Technology**

Department of Electronic Learning

M.Sc Thesis in Power Electronic and Machine Engineering.

Title of the Thesis

**Comparison of the performance of modular and conventional
engines for use in gearless elevators**

By:

Yasser hageb

Supervisor:

Dr. amir hassan nia

October 2020