



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

محاسبه توزیع تلفات و دمای ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار متقاطع TFPM
با استفاده از روش اجزاء محدود

حامد طحانیان

استاد راهنما:

دکتر احمد دارابی

استاد مشاور:

دکتر علی سررشته‌داری

شهریور ۱۳۹۱

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

گروه قدرت

محاسبه توزیع تلفات و دمای ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار متقاطع TFPM
با استفاده از روش اجزاء محدود

دانشجو: حامد طحانیان

استاد راهنما:

دکتر احمد دارابی

استاد مشاور:

دکتر علی سررشته‌داری

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۹۱



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره : ۰۹۷۸/آ.ت.ب
تاریخ : ۹۱/۰۶/۲۱
ویرایش :

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای :
حامد طحانیان رشته : برق گرایش : قدرت
تحت عنوان : محاسبه توزیع تلفات و دمای ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار متقاطع TFPM با استفاده از روش اجزاء محدود
که در تاریخ ۹۱/۰۶/۲۱ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است

قبول (با درجه : عالی) امتیاز (۱۹.۴۴) دفاع مجدد مردود

۱- عالی (۲۰ - ۱۹) ۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶) ۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	رئیس	احمد رازی	۱- استاد راهنما
	استادیار	علی کریمی	۲- استاد مشاور
	استادیار	امیرحسین	۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	استادیار	امیرحسین حاجی زاده	۴- استاد ممتحن
	استادیار	علی امیرحسین	۵- استاد ممتحن

رئیس دانشکده:

تقدیم به تمامی محققین دوستدار علم و دانش

آنچنان زندگی کن گویی که فردا فواهی مرد
آنچنان بیاموز گویی که تا ابد زنده فواهی ماند

ماهاتما گاندی

تقدیر و تشکر

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. و درود بر محمد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است؛ و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز...

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه‌ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بگوییم یا بنگاریم. اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تأمین کرده و سلامت امانت‌هایی را که به دستش سپرده‌اند، تضمین می‌کند؛ بر حسب وظیفه و به مصداق "من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق"، شایسته است:

- از پدر دلسوز و مادر فداکارم، این دو معلم بزرگوار، که همواره بر کوتاهی و درستی من قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت‌هایم گذشته‌اند. آن‌ها که در تمام عرصه‌های زندگی یار و یابوری بی چشم داشت برای من بوده‌اند و با حمایت‌های خود در محیطی مطلوب، آرامش روحی و آسایش فکری لازم را فراهم نمودند تا مراتب تحصیلی و نیز پایان‌نامه خود را به نحو احسن به اتمام برسانم؛

- از استاد شایسته، جناب آقای دکتر دارابی، که در کمال سعه‌صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه برای من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند؛

- از استاد با کمالات، جناب آقای دکتر سررشته‌داری که زحمت مشاوره این رساله را در حالی متقبل شدند که بدون مساعدت ایشان، این پروژه به نتیجه مطلوب نمی‌رسید؛

کمال تشکر و قدردانی را دارم. باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید. همچنین، بر خود فرض می‌دانم که سپاسگزار کمک‌ها و حمایت‌های تمامی اعضای خانواده و دوستان صمیمی خود، به ویژه آقایان علاءالدینی و میرزاحسینی، باشم.

حامد طحانیان

شهریور ۱۳۹۱

تعهد نامه

اینجانب **حامد طاهریان** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی برق** دانشکده مهندسی برق و ماشین های الکتریکی و الکترونیک دروس

ریاتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان :

طراحی و ساخت و دمای ماشین سگروت قطبیس دائم سگروت قطع (TFPM) با استفاده از

روش اجزای محدود

تحت راهنمایی آقای دکتر **احمد حارثی** متعهد می شوم :

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

تاریخ : ۹۱ / ۶ / ۲۱

امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

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

با توجه به چگالی توان، چگالی گشتاور و بازدهی بالای ماشین TFPM قطب چنگالی، برآورد صحیح از توزیع تلفات این ماشین، تحلیل حرارتی دقیق آن و طراحی سیستم خنک‌ساز مناسب برای آن از اهمیت بالایی برخوردار است. در پایان‌نامه پیش رو، یک موتور سنکرون ۵۰۰ کیلوواتی از نوع TFPM قطب چنگالی به عنوان "مطالعه موردی" انتخاب شده است. این موتور، که با سرعت مکانیکی نامی ۳۰۰ دور بر دقیقه به گردش درمی‌آید، از طریق یک بانک باتری با ولتاژ لینک DC ۲۲۰ ولت تغذیه می‌شود. با توجه به نواقص موجود در الگوریتم‌های طراحی استخراج شده از مراجع مورد بررسی، طراحی و بهینه‌سازی این موتور بر اساس یک الگوریتم طراحی جدید انجام گرفته است. با استفاده از تحلیل اجزاء محدود، توزیع تلفات این موتور در شرایط مدار باز و بار کامل به دست خواهد آمد. تلفات هسته، که بخش اعظم تلفات این موتور را تشکیل می‌دهد، به کمک روشی بر پایه معادله معروف اشتینمتر و با استفاده از منحنی‌های تلفات ماده سازنده هسته محاسبه می‌شود. تلفات مسی سیم‌پیچ استاتور و تلفات آهنرباهای دائم با بکارگیری قانون اهم به دست می‌آیند. با فرض بدترین حالت محتمل، توزیع دمای موتور در شرایط همرفت طبیعی با استفاده از ترکیب مدار معادل حرارتی و روش اجزاء محدود به دست آمده است. با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی همرفت طبیعی، ژاکت آبی به عنوان سیستم خنک‌ساز مناسب برای جلوگیری از آسیب‌دیدگی موتور پیشنهاد می‌شود. پس از ارائه یک الگوریتم جامع و کامل برای طراحی ژاکت آبی، طراحی سیستم خنک‌ساز و محاسبات پمپ مورد نیاز انجام خواهد گرفت.

کلمات کلیدی:

ماشین شار متقاطع قطب چنگالی، تحلیل اجزاء محدود، توزیع تلفات، معادله اشتینمتر، توزیع دما، همرفت طبیعی، همرفت اجباری، خنک‌سازی، ژاکت آبی

فصل ۱: مقدمه	۱
۱-۱- ماشین شار متقاطع یا شار عرضی (TFM)	۲
۲-۱- محاسبه تلفات در ماشین‌های الکتریکی	۷
۳-۱- تحلیل حرارتی و خنک سازی ماشین‌های الکتریکی	۱۰
فصل ۲: ساختار و مشخصات موتور مورد مطالعه	۱۶
۱-۲- ساختار ماشین TFPM قطب چنگالی و نحوه تغذیه آن	۱۷
۲-۲- مشخصات موتور TFPM قطب چنگالی مورد مطالعه	۲۳
۳-۲- نتایج تحلیل اجزاء محدود موتور مورد مطالعه	۲۵
فصل ۳: محاسبه تلفات موتور TFPM قطب چنگالی مورد مطالعه	۳۰
۱-۳- مؤلفه های تلفات در ماشین‌های الکتریکی	۳۱
۱-۱-۳- تلفات آهن	۳۳
۲-۱-۳- تلفات اهمی	۳۷
۳-۱-۳- تلفات باد خوری و اصطکاک	۳۸
۴-۱-۳- تلفات بار سرگردان	۳۸
۲-۲-۳- نحوه محاسبه تلفات	۳۹
۳-۳- نتایج محاسبات تلفات	۴۱
۱-۳-۳- تلفات در حالت مدار باز	۴۱
۲-۳-۳- تلفات در بار کامل	۴۸
۱-۲-۳-۳- تلفات آهن در بار کامل	۴۸
۲-۲-۳-۳- تلفات مسی سیم پیچ	۵۵
۳-۲-۳-۳- تلفات آهنرباهای دائم	۶۱
فصل ۴: تحلیل حرارتی موتور TFPM قطب چنگالی و طراحی سیستم خنک ساز مناسب آن	۶۵

۶۶	۱-۴-۱- مروری کوتاه بر تئوری انتقال حرارت
۶۷	۱-۴-۱-۱- رسانش
۶۹	۱-۴-۲- همرفت
۷۰	۱-۴-۳- تابش
۷۱	۲-۴- محدودیت‌های حرارتی ماشین‌های الکتریکی
۷۱	۱-۴-۲-۱- مغناطیس زدایی حرارتی آهنربای دائم
۷۴	۲-۴-۲- آسیب‌دیدگی سیستم عایقی
۷۷	۳-۴- تحلیل حرارتی موتور در حالت همرفت طبیعی
۷۸	۱-۴-۳-۱- مراحل شبیه سازی
۷۹	۱-۴-۳-۱-۱- مشخصات حرارتی مواد سازنده ماشین
۸۰	۱-۴-۳-۲- اعمال منابع حرارتی
۸۰	۱-۴-۳-۳- ایجاد مدار معادل حرارتی
۸۲	۱-۴-۳-۴- محاسبه پارامترهای مورد نیاز و معرفی آن‌ها به نرم افزار
۸۶	۱-۴-۳-۵- نتایج شبیه سازی
۸۶	۴-۴- طراحی سیستم خنک ساز و تحلیل حرارتی ماشین با در نظر گرفتن سیستم خنک ساز
۸۷	۱-۴-۴- سیستم‌های خنک ساز ماشین‌های الکتریکی
۹۳	۲-۴-۴- الگوریتم پیشنهادی برای طراحی سیستم خنک ساز ژاکت آبی
۹۸	۳-۴-۴- طراحی سیستم خنک ساز ژاکت آبی برای موتور مورد بررسی
۱۰۷	فصل ۵: نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۰۸	۱-۵- نتیجه گیری
۱۱۰	۲-۵- پیشنهادات
۱۱۲	پیوست: نحوه طراحی موتور TFPM قطب چنگالی مورد مطالعه
۱۲۰	مراجع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: یک جفت قطب از یک فاز یک ماشین TFPM قطب چنگالی ۶
- شکل ۲-۱: مسیرهای عبور شار در داخل ماشین TFPM قطب چنگالی ۶
- شکل ۱-۲: یک جفت قطب از یک ماشین TFPM قطب چنگالی ۱۸
- شکل ۲-۲: یک فاز از یک ماشین TFPM قطب چنگالی ۱۹
- شکل ۳-۲: ساختار کامل یک ماشین TFPM قطب چنگالی سه فاز ۱۹
- شکل ۴-۲: ساختار کامل یک ماشین TFPM قطب چنگالی شش فاز ۲۰
- شکل ۵-۲: ساختار سه فاز دو لایه از یک ماشین TFPM قطب چنگالی ۲۰
- شکل ۶-۲: دیاگرام فازوری سیستم شش فاز ۲۲
- شکل ۷-۲: تغذیه ماشین شش فاز به کمک منبع شش فاز ۲۲
- شکل ۸-۲: تغذیه ماشین شش فاز به کمک منبع سه فاز ۲۳
- شکل ۹-۲: هندسه ترسیم شده برای موتور طراحی شده در محیط اجزاء محدود ۲۵
- شکل ۱۰-۲: موتور با دندانه‌ها و متمرکز کننده های شار اصلاح شده برای نزدیک کردن ولتاژ داخلی به موج سینوسی ۲۶
- شکل ۱۱-۲: نقشه رنگی توزیع چگالی شار در موتور اصلاح شده به ازای موقعیت‌های مختلف روتور در حالت مدار باز ۲۷
- شکل ۱۲-۲: توزیع برداری چگالی شار در موتور اصلاح شده در موقعیت‌های مختلف روتور در حالت مدار باز ۲۸
- شکل ۱۳-۲: تغییرات شار پیوندی سیم پیچ یک فاز موتور اصلاح شده در یک سیکل الکتریکی ۲۹
- شکل ۱۴-۲: شکل موج ولتاژ داخلی و هارمونیک اصلی آن برای موتور اصلاح شده ۲۹
- شکل ۱-۳: جریان ادی ایجاد شده در سطح کفشک قطب ناشی از هارمونیک‌های ایجاد شده به وسیله شیارها ۳۵
- شکل ۲-۳: توزیع متوسط تلفات هیستریزیس در یک سیکل الکتریکی در حالت مدار باز ۴۳
- شکل ۳-۳: توزیع متوسط تلفات ادی در یک سیکل الکتریکی در حالت مدار باز ۴۴
- شکل ۴-۳: توزیع متوسط تلفات آهن در یک سیکل الکتریکی در حالت مدار باز ۴۵
- شکل ۵-۳: آنالیز هارمونیک تلفات ادی در حالت مدار باز ۴۷

- شکل ۳-۶: جریان ورودی و ولتاژ داخلی یک فاز از ماشین به صورت نرمالیزه شده بر حسب مقدار ماکزیمم آن‌ها ۴۹
- شکل ۳-۷: توزیع متوسط تلفات هیستریزیس در یک سیکل الکتریکی در بار کامل ۵۱
- شکل ۳-۸: توزیع متوسط تلفات ادی در یک سیکل الکتریکی در بار کامل ۵۲
- شکل ۳-۹: توزیع متوسط تلفات آهن در یک سیکل الکتریکی در بار کامل ۵۳
- شکل ۳-۱۰: آنالیز هارمونیک تلفات ادی در بار کامل ۵۴
- شکل ۳-۱۱: توزیع جریان متغیر با زمان در یک هادی استوانه‌ای ۵۵
- شکل ۳-۱۲: ایجاد اثر پوستی در اثر جریان‌های گردابی ۵۶
- شکل ۳-۱۳: سیم پیچی چند رشته ای موتور برای کاهش اثر پوستی ۶۰
- شکل ۳-۱۴: توزیع چگالی جریان در لحظه ماکزیمم شدن جریان سیم پیچ یک فاز ۶۰
- شکل ۳-۱۵: توزیع چگالی تلفات مسی سیم پیچ یک فاز در لحظه ماکزیمم شدن جریان سیم پیچ ۶۰
- شکل ۳-۱۶: تلفات مسی لحظه ای و تلفات متوسط سیم پیچ یک فاز از ماشین در یک سیکل الکتریکی ۶۱
- شکل ۳-۱۷: چگالی جریان ادی القا شده در یک مگنت در یک لحظه خاص ۶۲
- شکل ۳-۱۸: تلفات لحظه ای و متوسط مگنت های یک فاز ۶۳
- شکل ۳-۱۹: نحوه تقسیم کردن مگنت به ۵ قسمت مساوی ۶۳
- شکل ۳-۲۰: چگالی جریان ادی القا شده در تکه های یک مگنت در یک لحظه خاص ۶۴
- شکل ۳-۲۱: تلفات لحظه ای و متوسط مگنت های یک فاز با مگنت های جدید ۶۴
- شکل ۴-۱: جریان گرمایی تک بعدی ۶۷
- شکل ۴-۲: خنک سازی یک جسم گرم شده به روش همرفت ۶۹
- شکل ۴-۳: منحنی‌های BH یک مگنت خاص در دماهای مختلف ۷۳
- شکل ۴-۴: اثرات تغییرات دمایی در دو نقطه مختلف از مگنت شکل ۴-۳ ۷۳
- شکل ۴-۵: دسته منحنی‌های BH مگنت NEOMAX-32EH ۷۵
- شکل ۴-۶: توزیع تلفات متوسط در ماشین ۸۰
- شکل ۴-۷: مدل حرارتی مورد استفاده برای شبیه سازی ماشین در حالت همرفت طبیعی ۸۱
- شکل ۴-۸: مدار حرارتی برای شبیه سازی حرارتی در همرفت طبیعی ۸۲
- شکل ۴-۹: توزیع دما در حالت همرفت طبیعی ۸۷

- شکل ۴-۱۰: سیستم کدگذاری سیستم‌های خنک ساز ماشین‌های الکتریکی بر اساس استاندارد IEC 60034-6 ۸۸
- شکل ۴-۱۱: یک نمونه از ماشین‌های خنک شونده به وسیله ژاکت آبی ساخت شرکت WEG ۹۱
- شکل ۴-۱۲: یک نمونه دیگر از ماشین‌های خنک شونده به وسیله ژاکت آبی شرکت WEG ۹۲
- شکل ۴-۱۳: یک نمونه از منحنی‌های افت فشار در لوله های مسی ۹۷
- شکل ۴-۱۴: آرایش سیستم خنک ساز پیشنهادی برای موتور TFPM ۹۹
- شکل ۴-۱۵: توزیع دما در موتور به ازای یک لوله ۱۰۲
- شکل ۴-۱۶: توزیع دما در موتور به ازای دو لوله ۱۰۳
- شکل ۴-۱۷: توزیع دمای ماشین به ازای فاصله هوایی‌های مختلف بین قطعات ۱۰۵

فهرست جداول

جدول ۱-۲: مهم‌ترین پارامترهای موتور مورد مطالعه.....	۲۴
جدول ۱-۳: نتایج عددی مربوط به تلفات آهن در حالت مدار باز.....	۴۸
جدول ۲-۳: نتایج عددی مربوط به تلفات آهن در بار کامل.....	۵۴
جدول ۱-۴: دسته بندی کلاس‌های عایقی مختلف ماشین‌های الکتریکی بر اساس استاندارد IEC 60085.....	۷۷
جدول ۲-۴: مشخصات حرارتی قسمت‌های مختلف ماشین.....	۷۹
جدول ۳-۴: مقادیر نوعی ضرایب انتقال حرارت همرفتی برای سیال‌های مختلف در حالات مختلف.....	۸۵
جدول ۴-۴: پارامترهای به کار رفته در شبیه سازی حرارتی موتور.....	۸۶
جدول ۵-۴: دسته بندی سیستم‌های خنک ساز ماشین‌های الکتریکی بر اساس مشخصات ماشین.....	۸۸
جدول ۶-۴: مشخصات لوله مسی انتخاب شده برای عبور آب.....	۱۰۰
جدول ۷-۴: پارامترهای انتقال حرارت از طریق لوله حامل آب در دماهای مختلف.....	۱۰۱

فصل ۱:

مقدمه

هدف از این فصل پاسخ به سه سؤال اولیه و اساسی است، که در هر تحقیق بنیادی باید مطرح شوند: چه چیز؟ چرا؟ چگونه؟

در این فصل پس از معرفی ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار متقاطع، به بحث در مورد تلفات ماشین‌های الکتریکی و روش‌های مختلف محاسبه آن پرداخته می‌شود. روش مناسب برای مقاصد این پژوهش نیز انتخاب می‌شود. تحلیل حرارتی ماشین‌های الکتریکی و روش‌های گوناگون برای این منظور، موضوع دیگری است که در این فصل مورد توجه قرار گرفته است. همانند بحث محاسبه تلفات، روش مناسب برای تحلیل حرارتی ماشین مورد نظر نیز معرفی می‌شود. بحث در مورد ضرورت خنک‌سازی ماشین‌های الکتریکی و انتخاب سیستم خنک‌ساز مناسب پایان بخش این فصل خواهد بود.

یکی از مهم‌ترین بخش‌های یک تحقیق، "مروری بر کار گذشتگان"^۱ است. رویکرد اساسی در نگارش این گزارش به گونه‌ای بوده است، که اکثر مطالب مربوط به مرور کار گذشتگان در همین فصل ارائه شود. با توجه به این که نمی‌توان تمامی جزئیات را در مقدمه جای داد، در فصل‌های آینده و در حین بررسی دقیق‌تر موضوعات، نقد و بررسی جامع‌تری از کارهای گذشتگان ارائه خواهد شد.

۱-۱- ماشین شار متقاطع یا شار عرضی (TFM)^۲

در سالیان اخیر ماشین‌های شار متقاطع، و یا به اختصار TFMs، مورد توجه گسترده قرار گرفته‌اند. از جمله کاربردهای این نوع ماشین‌ها می‌توان به کاربردهای گشتاور بالا در سرعت پایین، همانند ژنراتورهای توربین‌های بادی و موتورهای وسایل نقلیه الکتریکی اشاره کرد [۱]. چگالی توان و گشتاور بالای ماشین‌های شار متقاطع آن‌ها را برای کاربردهای بسیار حساس، مانند کاربرد در صنایع هوا و فضا و صنایع دریایی، که در آن‌ها حجم و وزن ماشین از معیارهای محدودکننده اصلی برای انتخاب

^۱ Literature Review

^۲ Transverse Flux Machine

نوع ماشین هستند، مناسب ساخته است [۲]. پیشرفت تکنولوژی ساخت آهنرباهای دائم، که امکان استفاده تجاری از موادی نظیر نئودیوم- آهن- بورون ($NdFeB$)^۱ و ساماریوم- کبالت ($SmCo_5$)^۲ را فراهم آورده است، نیز در گسترش توجه به این ماشین‌ها مؤثر بوده است [۲].

مفهوم TFM برای اولین بار در سال ۱۹۸۶ توسط آقای Weh معرفی شد [۳]. بر خلاف ماشین‌های متداول، توپولوژی TFM به گونه‌ای است که امکان افزایش تعداد جفت قطب‌ها، بدون کاهش شار پیوندی سیم‌پیچ وجود دارد [۴]. با ثابت ماندن شار پیوندی و افزایش تعداد جفت قطب‌ها (یا همان فرکانس)، نرخ تغییرات شار پیوندی سیم‌پیچ استاتور افزایش می‌یابد و در نتیجه ولتاژ داخلی القایی نیز افزایش می‌یابد. لذا افزایش تعداد جفت قطب‌ها، تا جایی که ناشی شار و ملاحظات مکانیکی اجازه دهد، باعث افزایش ولت- آمپر ماشین می‌شود. این موضوع در مورد ماشین‌های معمول صادق نیست و افزایش تعداد قطب‌ها تأثیری در ریتینگ این ماشین‌ها ندارد. این ویژگی TFM باعث شده است که چگالی توان این نوع ماشین نسبت به ماشین‌های متداول بالاتر باشد. نسبت توان تولیدی قابل دسترس به کل وزن ماشین برای TFM با روتور اکتیو بین ۰/۵ تا ۲ کیلووات بر کیلوگرم است، در حالی که این نسبت برای ماشین‌های متداول در حدود ۰/۲۴ تا ۰/۸ کیلووات بر کیلوگرم گزارش شده است [۵].

به طور کلی می‌توان مزایای توپولوژی TFM نسبت به سایر توپولوژی‌های متداول را به این صورت برشمرد [۲]:

(۱) افزایش تعداد قطب‌ها شار پیوندی سیم‌پیچ را کاهش نمی‌دهد. به عبارت دیگر تا جایی که محدودیت‌های ناشی از شار ناشی اجازه دهد، می‌توان با افزایش تعداد قطب‌ها چگالی توان و گشتاور ماشین را بالا برد.

(۲) مسیر عبور شار و ناحیه سیم‌پیچی در استاتور تقریباً به هم وابسته نیستند. به عبارت دیگر،

^۱ Neodymium-Iron-Boron

^۲ Samarium-Cobalt

تغییر در هندسه هر کدام می‌تواند به صورت مستقل صورت گیرد. لذا، درجه آزادی در طراحی بالا می‌رود.

۳) کوئل‌های بسیار ساده‌ای در آرمیچر به کار می‌روند و لذا مس مصرفی کل در سیم‌پیچی TFM به نسبت کمتر از ماشین‌های متداول است. این موضوع باعث کاهش هزینه و تلفات ماشین می‌شود.

۴) فازها در TFM از لحاظ مغناطیسی مستقل از هم هستند، که این موضوع کنترل ماشین را آسان‌تر می‌سازد.

ضریب قدرت پایین و ساختار پیچیده با مسیرهای شار سه‌بعدی از معایب اصلی TFM هستند. استفاده از هسته لایه لایه شده برای ساخت ماشین دشوار است و نتیجه ناگزیر باید از مواد SMC برای ساخت هسته استفاده شود. این موضوع هزینه تولید این نوع ماشین‌ها را بالا می‌برد [۲].

ماشین‌های شار متقاطع از لحاظ ساختاری به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند: (۱) TFM با روتور اکتیو، که در این ساختار سیستم تحریک متشکل از آهنرباهای دائم بر روی روتور قرار می‌گیرد، (۲) TFM با روتور پسیو، که در آن آهنرباهای دائم بر روی استاتور قرار می‌گیرند و (۳) TFM رلوکتانسی که هیچ گونه آهنربای دائمی در آن وجود ندارد. دسته‌های ۱ و ۲ به نام ماشین TFPM^۱ مشهورند. ماشین مورد بررسی در این تحقیق از نوع TFPM با روتور اکتیو است.

هر یک از سه نوع TFM که در بالا به آن‌ها اشاره شد، می‌تواند به صورت یک طرفه و یا دو طرفه باشد. ساخت ماشین‌های یک طرفه ساده‌تر است. این در حالی است که چگالی توان و گشتاور نوع دوطرفه معمولاً بیشتر از نوع یک طرفه است [۶]. ساختارهای متعددی برای هر یک از این دسته‌ها مطرح شده‌اند، که در مراجع [۱]، [۲] و [۷] می‌توان اطلاعات بیشتری از این ساختارها به دست آورد.

^۱ Transverse Flux Permanent Magnet

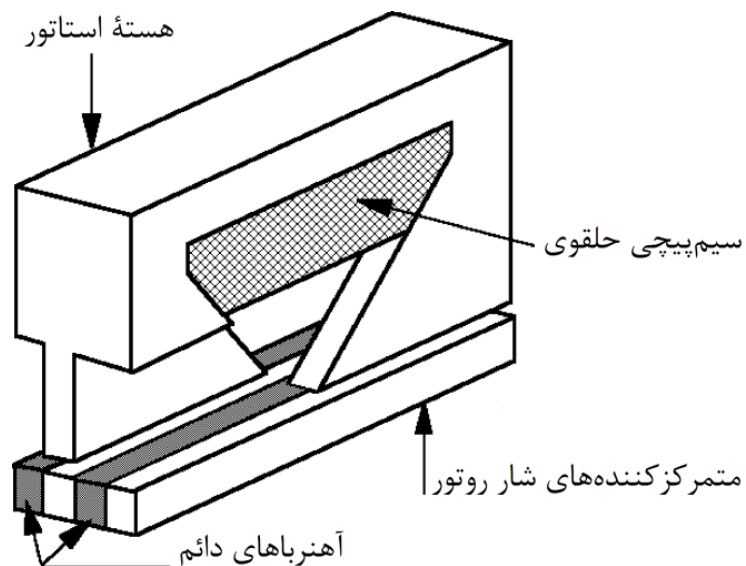
ساختار قطب چنگالی TFPM از یک سو سادگی ساخت انواع یک طرفه را دارد و از سوی دیگر عملکرد بالایی نظیر انواع دوطرفه از خود نشان می‌دهد [۶]. مقایسه بین ساختارهای مختلف TFPM در [۱] نشان می‌دهد که چگالی گشتاور ساختار قطب چنگالی از دیگر ساختارهای TFPM بیشتر است. لذا، ساختار قطب چنگالی برای انجام مطالعات مورد نظر این پژوهش انتخاب شده است. با این حال، بسیاری از مطالب این گزارش جنبه عمومی دارد و در مورد دیگر ساختارها نیز قابل استفاده است.

شکل ۱-۱ یک جفت قطب از یک فاز یک ماشین TFPM قطب چنگالی که در این گزارش بررسی خواهد شد را نشان می‌دهد. مسیرهای عبور شار در داخل ماشین در شکل ۱-۲ نمایش داده شده است.

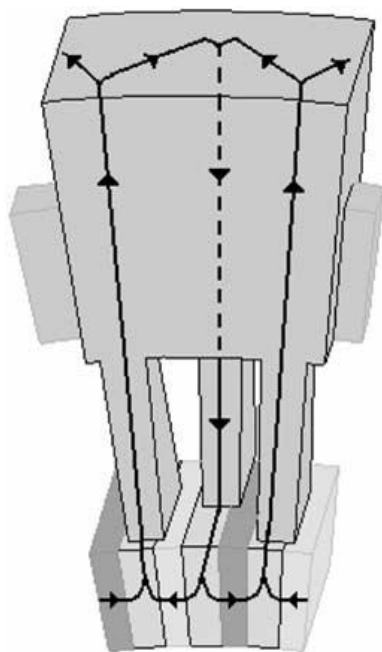
متأسفانه به دلیل نو بودن ساختار قطب چنگالی و پیچیدگی‌های ساختاری و تحلیلی آن، تعداد مراجع معتبری که طراحی و تحلیل این ساختار را مورد توجه قرار داده‌اند بسیار اندک است. اگر چه در مراجع متعدد، از جمله [۴]، [۸] و [۹]، به طراحی ماشین‌های TFPM با ساختارهای مختلف (به جز ساختار قطب چنگالی) پرداخته شده است، شاید بتوان [۶] را بهترین مرجع در دسترس قلمداد کرد که در مورد الگوریتم طراحی ماشین TFPM با ساختار قطب چنگالی مطالبی را در خود جای داده است. با این حال، با استفاده از روابط تحلیلی و شبیه‌سازی‌های لازم به کمک روش اجزاء محدود (FEM)^۱ می‌توان نشان داد که این الگوریتم دچار اشکالات متعددی است. لذا برای طراحی ماشین TFPM قطب چنگالی، هم با فرض ولتاژ داخلی دوزنقه‌ای و هم با فرض ولتاژ داخلی سینوسی، توسط نویسنده این گزارش الگوریتم‌های جدیدی ارائه شده است. این الگوریتم‌ها به گونه‌ای هستند که به کمک آن می‌توان ماشین با کمترین حجم مواد اکتیو (هسته، سیم‌پیچ و مگنت) را طراحی نمود. در فصل دوم، پس از ارائه توضیحات بیشتر در مورد ساختار ماشین TFPM قطب چنگالی چند فاز و نحوه تغذیه آن، به معرفی موتور ۵۰۰ کیلوواتی انتخاب شده برای انجام مطالعات تلفاتی و حرارتی

^۱ Finite Element Method

مورد نظر این پژوهش پرداخته می‌شود. با توجه به موضوع این پایان‌نامه، نمی‌توان جزئیات کامل طراحی این موتور را در متن اصلی گزارش ارائه نمود. لذا، روند طراحی این موتور بر اساس الگوریتم طراحی جدید در پیوست گزارش به طور خلاصه بیان شده است.



شکل ۱-۱: یک جفت قطب از یک فاز یک ماشین TFPM قطب چنگالی [۶]



شکل ۱-۲: مسیرهای عبور شار در داخل ماشین TFPM قطب چنگالی [۶]

با توجه به پیچیدگی‌های الگوی شار در ساختار TFPM قطب چنگالی، ساده سازی‌های فراوانی برای یافتن یک مدل تحلیلی مورد نیاز است. همچنین، به علت غیر خطی بودن هسته در اثر اشباع و تغییرات در نقطه کار آهنرباهای دائم، پیچیدگی‌های یافتن یک مدل تحلیلی دقیق دو چندان می‌شود. از این‌رو، تمامی محاسبات الکتریکی و مغناطیسی ماشین TFPM قطب چنگالی باید به کمک روش اجزاء محدود انجام شود. در مراحل مختلف این تحقیق از نرم‌افزار اجزاء محدود JMAG Designer، که یکی از بهترین نرم‌افزارها در این حوزه است، برای انجام تحلیل‌های اجزاء محدود استفاده شده است. برای اطلاع از قابلیت‌های این نرم‌افزار می‌توان به [۱۰] مراجعه کرد.

۲-۱- محاسبه تلفات در ماشین‌های الکتریکی

عملکرد ماشین‌های الکتریکی همواره با مقداری تلفات انرژی همراه است. این تلفات انرژی که به دلایل مختلف به وجود می‌آیند، تحت تأثیر عوامل و پارامترهای متعدد طراحی، محیطی و عملکردی می‌باشند. تلفات ماشین از تلفات هسته، تلفات مکانیکی، تلفات اهمی و غیره تشکیل می‌شود. امروزه متناسب با افزایش تقاضا برای موتورهای با بهره بالا، موضوعات مربوط به صرفه‌جویی در انرژی مصرفی و کاهش تلفات موتورها بیش از گذشته مطرح شده‌اند. تلفات ماشین‌های الکتریکی علاوه بر کاهش راندمان ماشین، منابع حرارتی هستند که باعث بالا رفتن دمای ماشین می‌شود.

به علت این که تغذیه موتور انتخابی در این پژوهش از طریق باتری‌ها با ظرفیت انرژی محدود صورت می‌گیرد، باید راندمان موتور تا حد امکان بالا باشد. لذا، به منظور افزایش بازده کلی سیستم، تحلیل و ارزیابی میزان تلفات این موتور در مرحله طراحی و بهینه‌سازی فرآیند طراحی از اهمیت زیادی برخوردار است. از طرف دیگر، این موتور و دیگر ماشین‌های TFPM قطب چنگالی به دلیل ویژگی منحصر به فرد خود، یعنی چگالی توان و گشتاور بالا، اکثراً در کاربردهایی استفاده می‌شوند که محدودیت در فضا وجود دارد. این فشردگی موتور و کوچکی محیط اطراف آن دفع حرارت ناشی از

تلفات ماشین را از آن دشوارتر خواهد کرد. از این رو، تحلیل حرارتی دقیق ماشین و طراحی سیستم خنک‌ساز آن باید با ملاحظات و دقت زیاد انجام شود. این موضوع، اهمیت برآورد صحیح از توزیع تلفات موتور را به عنوان منابع حرارتی در تحلیل حرارتی آن دو چندان می‌کند. شناخت انواع تلفات در ماشین‌های الکتریکی، علل ایجاد آن‌ها و پارامترهای مؤثر در مقدار آن‌ها به طراح این امکان را خواهد داد تا ماشینی با حداقل تلفات طراحی کند. بنابراین در ابتدای فصل سوم به بررسی مؤلفه‌های مختلف تلفات و عوامل مؤثر در آن‌ها پرداخته می‌شود.

همان طور که در بخش قبل بیان شد، در این گزارش برای تحلیل‌های الکترومغناطیسی موتور مورد نظر از روش اجزاء محدود استفاده می‌شود. بنابراین محاسبه تلفات الکترومغناطیسی موتور نیز با استفاده از روش اجزاء محدود انجام خواهد گرفت. با استفاده از این روش، علاوه بر محاسبه دقیق‌تر تلفات کل نسبت به روش‌های تحلیلی، امکان محاسبه توزیع فضایی تلفات نیز وجود دارد. این موضوع از دو جنبه مهم است: (۱) بهینه‌سازی ساختار برای کاهش تلفات امکان‌پذیر خواهد شد و (۲) آنالیز حرارتی ماشین دقیق‌تر خواهد بود و لذا سیستم خنک‌سازی به صورت مؤثرتری طراحی خواهد شد.

در فصل سوم نشان داده خواهد شد که بخش عمده تلفات موتور مورد بررسی را تلفات هسته تشکیل می‌دهد. از طرف دیگر، محاسبه تلفات اهمی ماشین بسیار سراسر است و با به‌کارگیری قانون معروف اهم انجام می‌شود. لذا در این گزارش بحث اصلی در مورد محاسبه تلفات ماشین، به تلفات هسته اختصاص پیدا می‌کند. اکثر روش‌های مطرح در محاسبه تلفات هسته ماشین‌های الکتریکی به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: (۱) استفاده از مدل‌های ریاضی پدیده هیستریزیس و (۲) روش‌های بر پایه معادله اشتینمتز^۱ [۱۱]. با توجه به مراجع موجود در ادامه این بخش در مورد این دو دسته بحث خواهد شد. مزایا و معایب هر کدام بیان می‌شود و در نهایت، روش مناسب برای محاسبه تلفات در TFPM قطب چنگالی انتخاب می‌شود.

^۱ Steinmetz Equation

مدل‌های پریساژ^۱، هُدگدون^۲، جیلز- ائرتون^۳ و مدل‌های بر پایه شبکه‌های عصبی از مهم‌ترین مدل‌های هیستریزیس هستند که در [۱۲] مورد بررسی قرار گرفته‌اند. اگرچه مدل‌سازی هیستریزیس دقیق‌ترین نتایج را از تلفات ارائه می‌دهد، اما بسیار پیچیده و زمان‌بر است و به اطلاعات زیادی از مواد سازنده ماشین نیاز دارد [۱۱]. می‌توان گفت که به‌کارگیری این مدل‌ها در تحلیل و برآورد تلفات ماشین‌هایی که باید به صورت سه‌بعدی مدل شوند، با توجه به ظرفیت‌های محاسباتی متداول و در دسترس عملاً امکان‌پذیر نیست.

در مرجع [۱۳] به کمک مدل پریساژ، که معروف‌ترین مدل ریاضی برای مدل‌سازی پدیده هیستریزیس است، تلفات آهن نقطه‌ای را در مرکز یکی از دندان‌های استاتور یک ماشین سنکرون معمولی محاسبه شده است. در این محاسبه از مدل اسکالر پریساژ استفاده شده است، زیرا فرض شده است که در هر نقطه از ماشین جهت خطوط شار ثابت است (مدل یک بعدی). اگر چه این فرض در مورد ماشین‌های سنکرون معمولی با هسته لایه لایه تا حدود زیادی صحیح است، اما نمی‌توان آن را در مورد ماشین‌هایی مثل ماشین TFPM قطب چنگالی که مسیرهای عبور شار در آن‌ها سه بعدی بوده و چرخش ماشین باعث تغییرات زیادی در این مسیرها می‌شود به کار برد. در این گونه موارد حتماً باید از مدل برداری پریساژ (مدل چند بعدی) استفاده کرد. استفاده از مدل برداری پریساژ بسیار پیچیده‌تر از مدل اسکالر پریساژ است و همچنین نیازمند زمان زیادی برای انجام محاسبات است، بطوریکه اکثراً به جای استفاده از این مدل از مدل‌های بر پایه شبکه‌های عصبی استفاده می‌شود [۱۲].

در این تحقیق محاسبه تلفات در یک یا چند نقطه خاص، و مقایسه روش‌های مختلف در برآورد تلفات ماشین مدنظر نیست. هدف اصلی این پژوهش به دست آوردن توزیع تلفات در کل ماشین تحت شرایط عملکردی مختلف (مدار باز، بار کامل و ...) با یک دقت مهندسی مناسب است، تا بتوان بر اساس آن سیستم خنک‌سازی مؤثر را برای ماشین طراحی کرد. با توجه به این موضوع و در نظر

^۱ Preisach Model

^۲ Hodgdon's Model

^۳ Jiles-Atherton Model

داشتن توضیحات قبلی در مورد محاسبه تلفات به کمک مدل‌های ریاضی پدیده هیستریزیس، بهتر است تا از یک روش ساده‌تر، سریع‌تر و متداول‌تر برای محاسبه تلفات ماشین TFPM قطب چگالی استفاده شود.

استفاده از معادله اشتینمتر متداول‌ترین روش محاسبه تلفات هسته به حساب می‌آید. می‌توان گفت که تمام روابط تحلیلی مشهور برای محاسبه تلفات، که در کتاب‌های مرجع ماشین‌های الکتریکی یافت می‌شوند، از این معادله استخراج شده‌اند. معادله اشتینمتر در ابتدا برای محاسبه تلفات آهن در هسته‌هایی از جنس فریت با تغییرات چگالی شار سینوسی خالص مطرح شد. با گذشت زمان، اصلاحات زیادی روی این معادله انجام شد تا بتوان آن را در مورد چگالی شارهای دلخواه و همچنین سایر مواد هسته، از جمله مواد SMC، به کار برد. روند این اصلاحات در مرجع [۱۱] به طور کامل مرور شده است.

توضیحات کامل‌تر در مورد محاسبه تلفات موتور مورد نظر در فصل سوم ارائه خواهد شد.

۱-۳- تحلیل حرارتی و خنک‌سازی ماشین‌های الکتریکی

تحلیل حرارتی و همچنین خنک‌سازی ماشین در طراحی انواع ماشین‌های الکتریکی، جایگاه ویژه‌ای دارد. برخی از مهم‌ترین دلایل اهمیت تحلیل حرارتی و استفاده از یک سیستم خنک‌کننده مناسب به این قرار هستند [۱۴]:

- افزایش دما باعث افزایش تلفات می‌شود. به عنوان مثال مقاومت سیم‌پیچ‌ها با افزایش دما، افزایش می‌یابد و در نتیجه تلفات اهمی بیشتر می‌شود.
- شار مواد مغناطیس دائم کمیاب خاکی^۱ با افزایش دما کاهش می‌یابد.
- ابعاد و اندازه ماشین مستقیماً وابسته به میزان تلفات و گرمای ماشین است.

^۱ Rare-Earth Permanent Magnet

- عمر ماشین با افزایش دمای ماشین و به ویژه دمای عایق سیم‌پیچ‌ها، کاهش می‌یابد.
- نفوذپذیری نسبی هسته با افزایش دما کاهش می‌یابد.

در گذشته، تحلیل حرارتی ماشین‌های الکتریکی کمتر از آنالیز الکترومغناطیسی مورد توجه بوده است. این موضوع از تعداد مقالات فنی چاپ شده در هر یک از این دو حوزه به وضوح مشخص است. این نابرابری در مورد موتورهای با اندازه کوچک و متوسط بیشتر مشهود است. برای این چنین ماشین‌هایی، طراحان به صورت بسیار سطحی با مسائل حرارتی طراحی برخورد می‌کردند، که تنها شامل تعیین یک حد مجاز برای چگالی جریان یا برخی متغیرهای اولیه در تعیین اندازه ماشین بوده است. مشکل این روال طراحی این است که نمی‌توان پیش‌بینی نمود که چگونه می‌توان طراحی را به گونه‌ای بهبود داد که دما کاهش پیدا کند [۱۵]. امروزه با توجه به نیاز روزافزون به کوچک‌سازی، بالا بردن بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و همچنین استفاده از توپولوژی‌ها و مواد جدید، لازم است که به همان میزان تحلیل الکترومغناطیسی به تحلیل حرارتی نیز توجه نمود.

امروزه، تحلیل حرارتی نه تنها در مورد خود ماشین الکتریکی مورد توجه است، بلکه شامل طراحی درایو و مبدل‌های الکترونیک قدرت نیز می‌شود. یکی از دلایل اینکه چرا تحلیل حرارتی کمتر از تحلیل الکترومغناطیسی مورد توجه قرار گرفته است این است که طراحان ماشین‌های الکتریکی معمولاً در حوزه مهندسی برق تخصص دارند، در حالی که تحلیل حرارتی یکی از زیرمجموعه‌های مهندسی مکانیک است.

روش‌های تحلیل حرارتی ماشین‌های الکتریکی را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم نمود: مدار فشرده تحلیلی و روش‌های عددی. روش تحلیلی این مزیت را دارد که انجام محاسبات آن بسیار سریع است، اما تعریف مداری که به طور دقیق مسیرهای اصلی انتقال حرارت را مدل کند نیازمند تلاش زیادی است [۱۵].

در اکثر موارد شبکه انتقال حرارت در مدل‌های مدار فشرده شبیه یک شبکه الکتریکی است، و

محاسبات اصلی شامل محاسبه مقاومت‌های هدایتی، همرفتی و تابشی قسمت‌های مختلف در ساختار ماشین است. فرمول‌های محاسبه این مقاومت‌ها تقریباً ساده هستند. مقامت هدایتی برابر است با طول مسیر تقسیم بر حاصل ضرب مساحت سطح مقطع مسیر و هدایت حرارتی ماده. مقاومت‌های همرفتی و تابشی نیز از تقسیم عدد یک بر حاصل ضرب مساحت سطح و ضریب انتقال حرارت محاسبه می‌شوند. ضریب انتقال حرارت تابشی تابعی از ویژگی‌های سطح، یعنی تابندگی و ضریب دید، است. تابندگی برای سطوح مختلف مشخص است و ضریب دید نیز بر اساس هندسه قابل محاسبه است. ضریب انتقال حرارت همرفتی اکثراً بر اساس فرمول‌های تجربی محاسبه می‌شود که این روابط در کتب مرجع مربوط به انتقال حرارت موجود است. خوشبختانه، برای اکثر شکل‌های هندسی به کار رفته در ماشین‌های الکتریکی (سطوح استوانه‌ای، سطوح مسطح و ...) روابط ارزشمندی برای محاسبه ضریب انتقال حرارت، چه در همرفت طبیعی و چه در همرفت اجباری، وجود دارند [۱۵].

نقطه قوت اصلی روش‌های عددی این است که هندسه ماشین می‌تواند در تحلیل حرارتی مدل شود. به هر حال، در این روش‌ها زمان مورد نیاز برای ایجاد مدل و انجام محاسبات بسیار بالا می‌رود. در تحلیل حرارتی دو نوع روش عددی وجود دارد: تحلیل اجزاء محدود (FEA)^۱ و دینامیک سیال محاسباتی (CFD)^۲. مزیت CFD این است که می‌تواند برای پیش‌بینی جریان سیال در نواحی پیچیده، مثل کله سیم‌ها، به کار برده شود. FEA، به طور مستقیم، تنها می‌تواند برای مدل‌سازی انتقال حرارت هدایتی مورد استفاده قرار گیرد و برای مدل‌سازی همرفت و تابش باید از همان روال تحلیلی - تجربی مورد استفاده در مدل مدار فشرده حرارتی بهره برد. اگر چه دقت روش CFD بیشتر از روش اجزاء محدود است، اما این روش بسیار پیچیده است و در این پایان‌نامه از آن صرف نظر می‌شود. برای توضیح بیشتر در مورد هر کدام از روش‌های فوق می‌توان به مرجع [۱۵] مراجعه کرد.

در یک ماشین الکتریکی، قسمت‌هایی وجود دارند که توزیع دما در آن‌ها تقریباً یکنواخت است.

^۱ Finite-Element Analysis

^۲ Computational Fluid Dynamics

بدنه ماشین و هوای محبوس در داخل آن از جمله این قسمت‌ها هستند. بنابراین این قسمت‌ها را می‌توان با یک گره در مدار معادل حرارتی مدل کرد [۱۶]. با این حال، توزیع دما در بسیاری از قسمت‌های دیگر ماشین یکنواخت نبوده و لذا مدل‌سازی این قسمت‌ها با یک گره به نتایج غیر دقیقی منجر می‌شود. برای این منظور یا باید این قسمت‌ها را با چندین گره مدل کرد و بین این گره‌ها مقاومت‌های حرارتی مناسب قرار داد، یا این که از روش اجزاء محدود استفاده نمود. در این پایان‌نامه از ترکیب مدار معادل حرارتی و روش اجزای محدود استفاده می‌شود. به این ترتیب بخش‌های با توزیع دمای یکنواخت، مثل بدنه و هوای محبوس در داخل آن، با یک گره در مدار معادل حرارتی مدل می‌شوند و بقیه قسمت‌ها با استفاده از مش بندی در محیط اجزاء محدود مدل می‌شوند. بین این مدار معادل حرارتی و مدل اجزاء محدود توزیع وجود خواهد داشت.

در فصل چهارم، پس از ارائه توضیحات کامل در مورد نحوه مدل‌سازی و تحلیل حرارتی موتور TFPM قطب چنگالی مورد مطالعه، توزیع دمایی موتور در شرایط همرفت طبیعی (بدون استفاده از سیستم خنک‌کننده خارجی) به دست خواهد آمد. نتایج این شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با توجه به محدودیت‌های حرارتی موتور مورد نظر، عدم استفاده از یک سیستم خنک‌ساز مناسب موجب آسیب جدی موتور خواهد شد.

در دوران اولیه طراحی ماشین‌های الکتریکی، ماشین‌ها معمولاً با سرعت کم می‌چرخیدند و لذا سایز آن‌ها در مقایسه با توان آن‌ها بزرگ بود. به علت سطوح بزرگ، دفع حرارت در این ماشین‌ها با یک افزایش دمای اندک میسر بود. در واقع در این ماشین‌های قدیمی معمولاً به غیر از تهویه طبیعی ذاتی نیازی به ایجاد یک سیستم خنک‌سازی اضافی و یا ایجاد باد طبیعی توسط قسمت چرخان، وجود نداشت [۱۷]. با پیشرفت توربوژنراتورهای پرسرعت و همچنین ژنراتورهای هیدرو الکتریک، سایز ماشین‌ها کوچک‌تر شد، در حالی که تلفات تقریباً بدون تغییر ماند. این تجمع تلفات در یک فضای کوچک‌تر تنها با بهبود فرآیند خنک‌سازی ماشین امکان‌پذیر بود، در غیر این صورت دمای ماشین بیش از حد مجاز افزایش می‌یافت. امروزه، با افزایش روزافزون چگالی توان ماشین‌های الکتریکی

(کاهش اندازه نسبی آنها)، طراحی سیستم‌های خنک‌کننده مؤثر بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است.

امروزه حد گرمایی یک عامل تعیین‌کننده در تعیین ریتینگ ماشین‌ها می‌باشد. برای طراحی اقتصادی ماشین، باید به دمای ماشین در شرایط بار کامل توجه ویژه نمود. علت این است که اگر دمای ماشین از حد مجاز بالاتر رود، عمر ماشین کوتاه خواهد شد و اگر دمای ماشین از حد مجاز بسیار کمتر شود، معنی آن به‌کارگیری نابجا و هدر دادن مواد تشکیل‌دهنده ماشین می‌باشد [۱۷]. لذا طراحی سیستم خنک‌ساز مناسب، به گونه‌ای که دمای ماشین را در یک حد مجاز نگه دارد، از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد.

انتخاب سیستم خنک‌ساز در یک ماشین الکتریکی به پارامترهای متعدد، از جمله مشخصات ماشین (مثل توان، اندازه، هندسه، جنس مواد، نوع محفظه ماشین و ...)، شرایط محیطی و عملکردی، امکانات در دسترس، کاربرد ماشین و محدودیت‌های پیش‌رو در انتخاب سیستم خنک‌ساز و بسیاری از موارد دیگر بستگی دارد. در فصل چهارم در این مورد توضیحات کامل‌تری ارائه خواهد شد.

با توجه به محدودیت‌های محیطی متداول در کاربردهایی که می‌توان موتور مورد مطالعه را در آن‌ها به کار برد، فرض بر این است که امکان استفاده از هوای محیط اطراف به عنوان خنک‌ساز وجود ندارد. با توجه به رنج توانی موتور مورد نظر و با فرض در دسترس بودن آب خنک‌ساز با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد و یک سیستم خنک‌ساز مرکزی در محل کارکرد موتور، از سیستم آبی برای خنک‌سازی ماشین استفاده خواهد شد.

خنک‌سازی با آب یک راه بسیار مؤثر برای دفع حرارت موتور است و موتورهای خنک‌کننده با آب، نسبت توان خروجی به واحد وزن بالایی را فراهم می‌کنند [۱۸]. بازدهی خنک‌سازی در رنج وسیعی از سرعت‌ها حفظ می‌شود، که مخصوصاً برای کاربردهای با گشتاور ثابت بسیار مهم است. این مزایا موتورهای خنک‌شونده با آب را برای کاربردهای وسیعی، از جمله کاربردهای دریایی، پمپ‌های

آب و فاضلاب و ژنراتورهای توربین‌های بادی، ایده‌آل می‌کند [۱۸].

سیستم‌های خنک‌شونده با آب آرایش‌ها و فرم‌های متنوعی دارند. با توجه به رنج توانی موتور مورد نظر، برای خنک‌سازی آن استفاده از ژاکت آبی پیشنهاد می‌شود. ماشین‌های خنک‌شونده با ژاکت آبی برای رسیدن به تقاضای روزافزون به ماشین‌های فشرده و با سطح نوپز پایین مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۹]. موتورهای خنک‌شونده با ژاکت آبی کاربردهای متنوعی دارند که در [۱۹] بیان شده‌اند. مزایای ماشین‌های خنک‌شونده با ژاکت آبی عبارتند از [۱۹]:

- (۱) سطح نوپز پایین
 - (۲) مناسب برای عملکرد درایوهای با فرکانس متغیر
 - (۳) حداقل پراکندگی حرارت به محیط اطراف
 - (۴) ساختار فشرده
 - (۵) مناسب برای شرایط عملکرد سخت و دشوار
- در فصل چهارم پس از ارائه یک الگوریتم جامع و کامل برای طراحی ژاکت آبی، سیستم خنک‌ساز مناسب برای موتور مطالعه طراحی می‌شود. ساختار دقیق سیستم خنک‌کننده، تعداد لوله‌های خنک‌کننده مورد نیاز، قطر لوله‌ها و سرعت آب درون آن‌ها از جمله مواردی هستند که در این طراحی مشخص خواهند شد. در پایان طراحی، پارامترهای پمپ مورد نیاز برای گردش آب در سیستم خنک‌ساز نیز به دست خواهند آمد.

فصل پنجم نیز به نتیجه‌گیری و بیان پیشنهادات اختصاص داده شده است.

فصل ۲:

ساختار و مشخصات موتور مورد مطالعه

در فصل قبل بیان شد که در مراجع مختلف، ساختار قطب چنگالی، به عنوان بهترین ساختار در بین ماشین‌های TFPM به لحاظ چگالی توان شناخته شده است. همچنین، بحث‌های مقدماتی در مورد ساختار و ویژگی‌های این ماشین و مزایا و معایب آن ارائه شد. در این فصل پس از یک بحث دقیق‌تر در مورد ساختار ماشین TFPM قطب چنگالی، تعداد فازها و نحوه تغذیه آن، پارامترها و مشخصات موتور انتخاب شده برای انجام بررسی‌های مورد نظر این پژوهش ارائه می‌شود. همان طور که در فصل قبل نیز بیان شد، با توجه به اشکالات یافت شده در الگوریتم‌های موجود، از یک الگوریتم جدید برای طراحی این موتور استفاده شده است. خلاصه‌ای از روال طراحی این موتور در پیوست گزارش ارائه شده است.

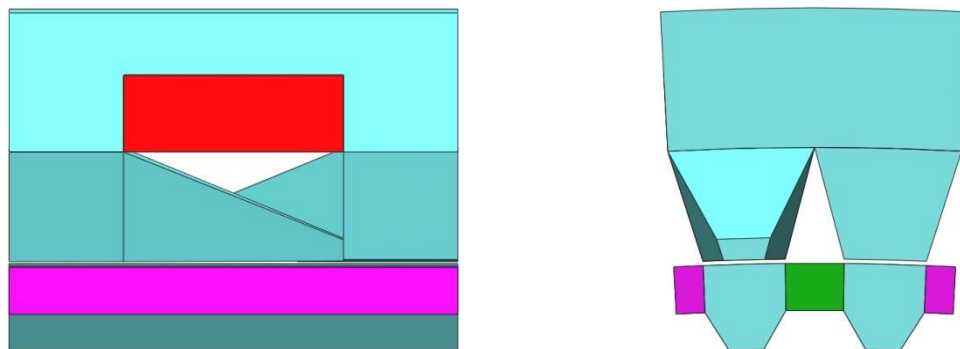
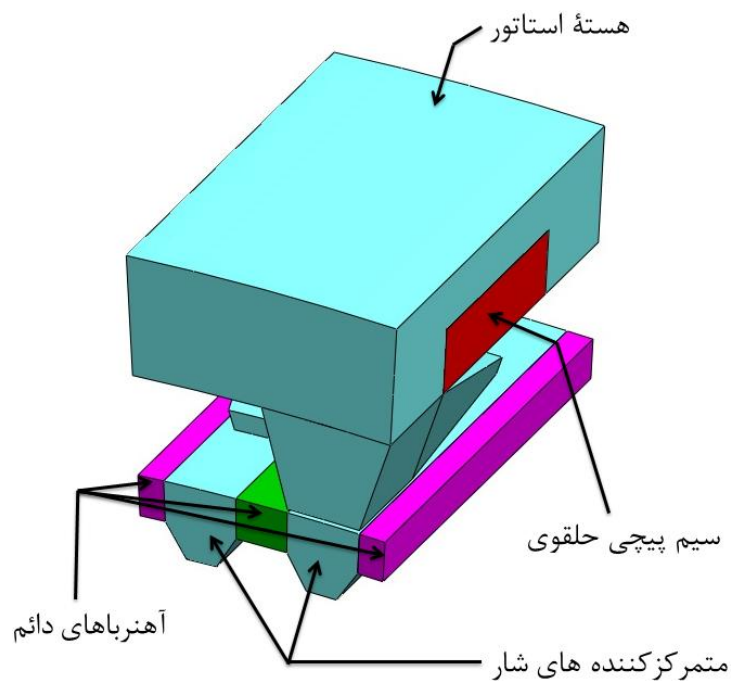
۲-۱- ساختار ماشین TFPM قطب چنگالی و نحوه تغذیه آن

یک جفت قطب از یک فاز یک ماشین TFPM قطب چنگالی در شکل ۲-۱ نمایش داده شده است. بین این شکل و شکل ۱-۱ تفاوت‌هایی، هر چند جزئی، به چشم می‌خورد. متأسفانه با توجه به محدودیت در حجم گزارش پیش رو، امکان ارائه توضیحات کامل در مورد این تفاوت‌ها وجود ندارد. به طور کلی می‌توان گفت که این تفاوت‌ها حاصل اصلاحات ساختاری است که به کمک روش اجزاء محدود و به منظور بهبود توزیع چگالی شار و عملکرد ماشین TFPM قطب چنگالی انجام گرفته‌اند و تأثیری بر روی عملکرد کلی ماشین و ویژگی‌های اصلی آن ندارند.

شکل ۲-۲ یک فاز از ماشین TFPM قطب چنگالی را نمایش می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود هر فاز از کنار هم قرار گرفتن p جفت قطب حول محور ماشین به وجود می‌آید. در این شکل‌ها، تنها مواد اکتیو ماشین (شامل هسته، سیم‌پیچ و آهنربای دائم) نمایش داده شده‌اند.

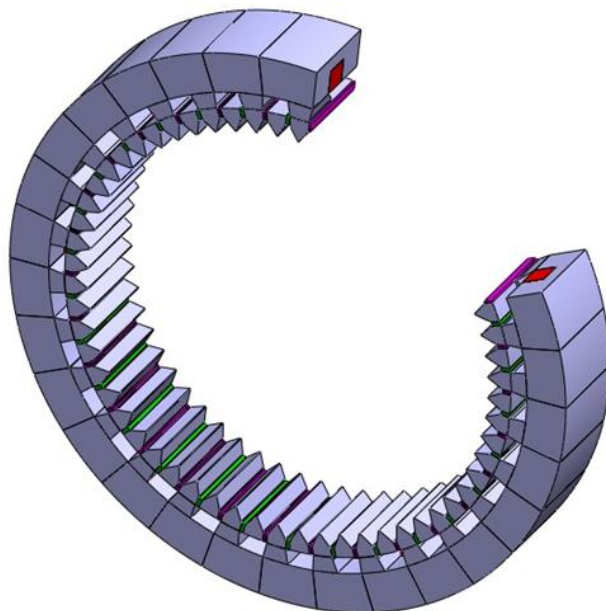
ساختار چند فاز ماشین TFPM قطب چنگالی از کنار هم قرار گرفتن چند فاز در امتداد محور ماشین حاصل می‌شود. استاتور و یا روتور این فازها نسبت به یکدیگر حول محور ماشین شیفت یافته-

اند. زاویه الکتریکی شیف‌ت فازها برای دو فاز مجاور برابر $360/m$ درجه است، که m تعداد فازها می‌باشد. این شیف‌ت به روتور هر فاز، یعنی به مگنت‌ها و متمرکزکننده‌های شار، و یا به هسته‌های هر فاز استاتور اعمال می‌شود. در این گزارش فرض می‌شود هسته‌های استاتور فازهای مختلف نسبت به هم شیف‌ت پیدا می‌کنند و روتور همه فازها در یک امتداد در راستای محور ماشین هستند و هیچ شیف‌تی نسبت به هم ندارند. در شکل ۲-۳ ساختار سه فاز و در شکل ۲-۴ ساختار شش فاز ماشین نمایش داده شده است.

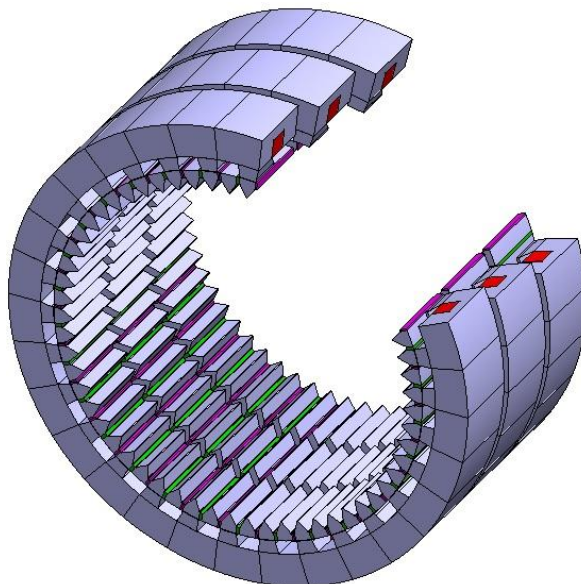


شکل ۲-۱: یک جفت قطب از یک ماشین TFPM قطب چنگالی

هر چه تعداد فازها بیشتر باشد، معمولاً عملکرد ماشین ملایم‌تر بوده و نوسانات گشتاور به خصوص گشتاور کوچینگ^۱، لرزش و ارتعاشات ماشین کاهش پیدا می‌کند.



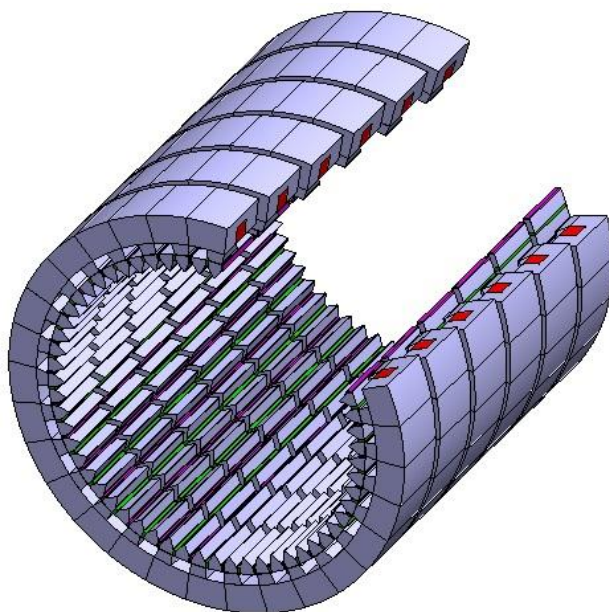
شکل ۲-۲: یک فاز از یک ماشین TFPM قطب چنگالی



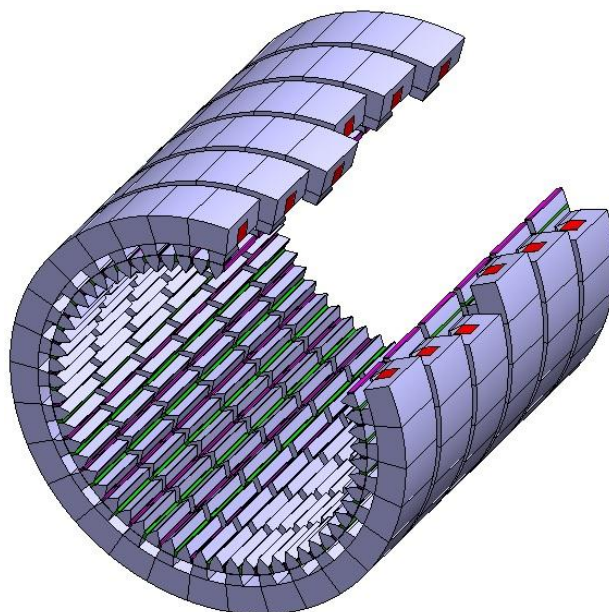
شکل ۲-۳: ساختار کامل یک ماشین TFPM قطب چنگالی سه فاز

^۱ Cogging

گاهی اوقات به دلیل برخی از مسائل فنی، تعداد لایه‌هایی که برای یک فاز در نظر گرفته می‌شود می‌تواند بیش از یک باشد. به عنوان مثال، در شکل ۲-۵ یک ماشین سه فاز دو لایه نشان داده شده است. باید توجه شود که ساختار ماشین چند لایه منحصر به فرد نیست.



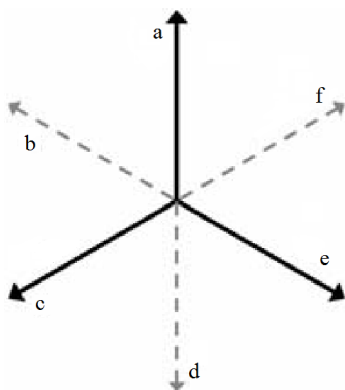
شکل ۲-۴: ساختار کامل یک ماشین TFPM قطب چنگالی شش فاز



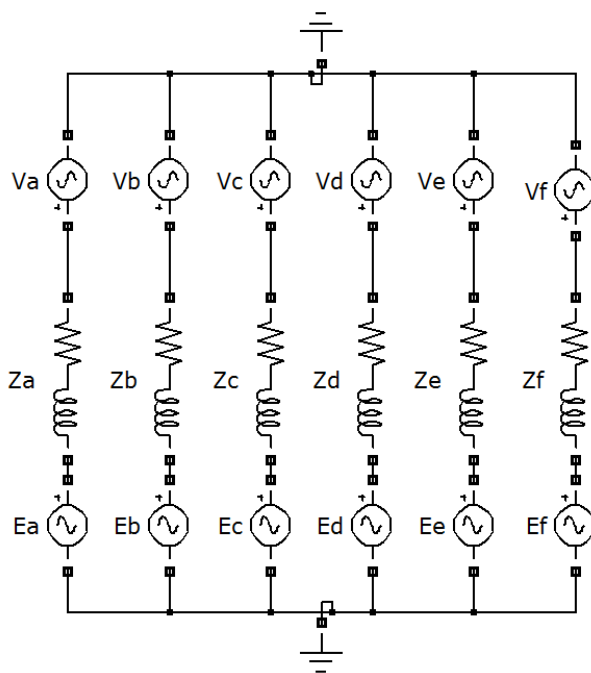
شکل ۲-۵: ساختار سه فاز دو لایه از یک ماشین TFPM قطب چنگالی

ماشین‌های TFPM عموماً در کاربردهای با سرعت متغیر و قابل کنترل استفاده می‌شوند. این ماشین‌های چند فاز به عنوان ماشین‌های سنکرون در حالت عملکرد موتوری و در حالت اتصال مستقیم به شبکه چند فاز نیز دارای گشتاور راه اندازی نمی‌باشند. بنابراین حتی در حالت سه فاز و در شرایطی که کنترل سرعت نیز مطرح نمی‌باشد، موتور باید توسط یک درایو و سیستم تغذیه با ولتاژ و فرکانس قابل کنترل تغذیه شود. از طرف دیگر مسائل طراحی، ساخت و کنترل درایوهای سه فاز شناخته شده تر از درایوهای بیش از سه فاز هستند. با این نوع نگرش اگر به طراحی ماشینی بپردازیم که در آن مثلاً دوازده کوئل برای تولید توان مورد نظر لازم است، از دیدگاه تغذیه ساخت ماشین به صورت چهار ماشین سه فاز کوئل شده شاید بهتر از ساخت ماشین به صورت دوازده فاز و یا دو ماشین شش فاز کوئل شده جلوه کند. اما این مطلب در حالت کلی به هیچ وجه درست نیست. برای روشن شدن موضوع به شکل ۲-۶ توجه کنید که در آن دیاگرام فازوری یک سیستم شش فاز نشان داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان گفت یک سیستم تغذیه شش فاز چیزی جز یک سیستم سه فاز با امکان به‌کارگیری همزمان ولتاژهای فاز با پلاریته معکوس نیست. مثلاً اگر توالی فاز سیستم شش فاز همانند شکل ۲-۶ به صورت a, b, c, d, e, f باشد با دقت در این شکل مشاهده می‌شود که می‌توان این سیستم شش فاز را به صورت دو سیستم سه فاز با توالی‌های a, c, e و d, f, b در نظر گرفت. از طرف دیگر سیستم d, f, b همان سیستم a, c, e با پلاریته معکوس می‌باشد. بنابراین اگر درایو شش فاز در اختیار نباشد، می‌توان به کمک یک درایو سه فاز یک ماشین شش فاز را بدون هیچ‌گونه تفاوت در عملکرد ماشین تغذیه نمود. برای این کار سه کوئل به طور معکوس با سه کوئل دیگر به ترتیب موازی شده سپس کوئل‌های موازی شده به منبع سه فاز متصل می‌شوند. شکل ۲-۷ شماتیک مداری یک ماشین شش فاز را نشان می‌دهد. با توجه به توضیحات فوق، می‌توان این مدار را به صورت مدار شکل ۲-۸ توسط یک منبع سه فاز تغذیه کرد. در این صورت علی‌رغم وجود تفاوت‌ها در منبع ولتاژ سه فاز و شش فاز و جریان‌های آن‌ها، در مورد ماشین ۶ فاز می‌توان گفت که این ماشین دقیقاً یک ماشین سه فاز با دو کوئل موازی است.

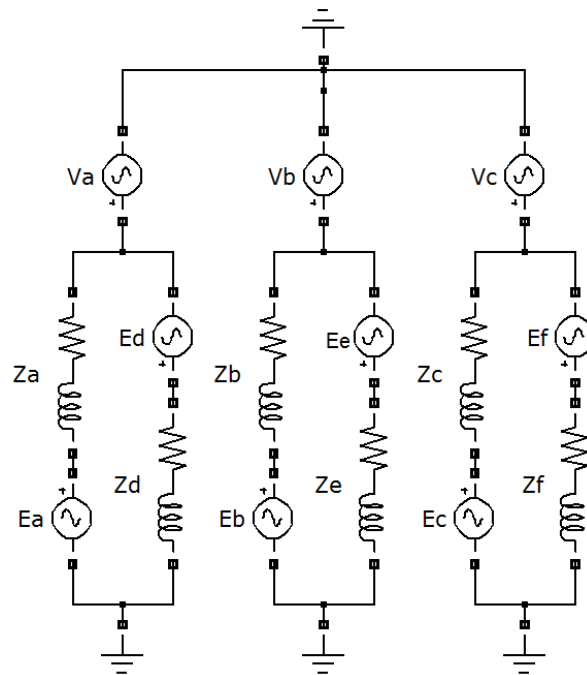
در مورد ساختار و اصول عملکرد ماشین‌های TFPM قطب چنگالی مباحث جالب دیگری نیز می‌توانند مطرح شوند. برای اطلاع از این موضوعات می‌توان به مراجعی همچون [۱]، [۲]، [۴]، [۶]، [۷]، [۸]، [۲۰] و بسیاری دیگر از مراجع موجود در این زمینه مراجعه نمود.



شکل ۲-۶: دیاگرام فازوری سیستم شش فاز



شکل ۲-۷: تغذیه ماشین شش فاز به کمک منبع شش فاز



شکل ۲-۸: تغذیه ماشین شش فاز به کمک منبع سه فاز

۲-۲- مشخصات موتور TFPM قطب چنگالی مورد مطالعه

آقای مسمودی^۱ یکی از محققانی هستند که در زمینه ماشین‌های TFPM، و مخصوصاً ساختار قطب چنگالی، فعالیت‌های گسترده‌ای داشته‌اند. تقریباً تمام فرمول‌ها و الگوریتم‌های استخراج و تشریح شده در مراجع مورد بررسی برای ساختار قطب چنگالی ماشین TFPM، از کارهای ایشان اقتباس شده است. به هر حال بررسی تحلیلی دقیق این روابط طراحی و مشاهده نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های انجام شده به روش اجزاء محدود، نشان می‌دهد که روابط و روش ارائه شده دارای نواقصی است. لذا برای طراحی ماشین TFPM قطب چنگالی، هم با فرض ولتاژ داخلی دوزنقه‌ای و هم با فرض ولتاژ داخلی سینوسی، توسط نویسنده این گزارش الگوریتم‌های جدیدی ارائه شده است. این الگوریتم‌ها به گونه‌ای هستند که به کمک آن می‌توان ماشین با کمترین حجم مواد اکتیو (هسته، سیم‌پیچ و مگنت) را طراحی نمود. با توجه به موضوع این پایان‌نامه، نمی‌توان بحث طراحی موتور مورد

^۱ Masmoudi

نظر را با جزئیات کامل ارائه نمود. لذا، خلاصه‌ای از روال طراحی این موتور بر اساس این الگوریتم‌های جدید در پیوست گزارش ارائه شده است. جنس مواد سازنده موتور به همراه منحنی‌های مشخصه آن -ها در این پیوست آمده است. همچنین، تمام پارامترها، مشخصات و ابعاد هندسی موتور طراحی شده نیز در پیوست ارائه شده است. برای سهولت بیشتر، مهم‌ترین پارامترهای موتور در جدول ۱-۲ ارائه شده‌اند.

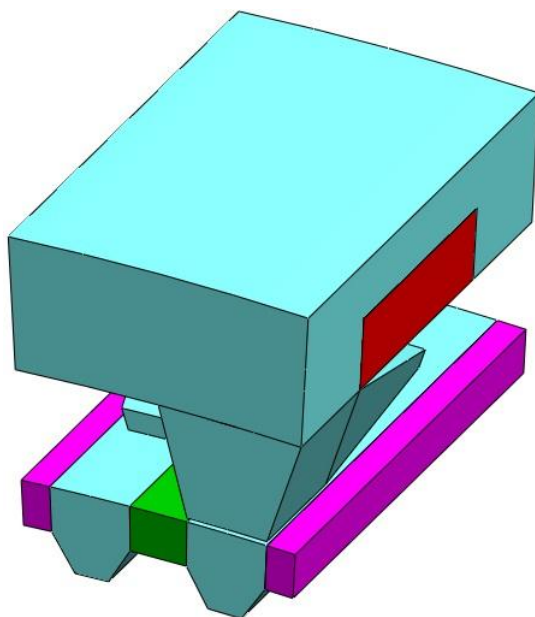
جدول ۱-۲: مهم‌ترین پارامترهای موتور مورد مطالعه

ردیف	نام پارامتر	نماد	مقدار پارامتر
۱	توان خروجی	P_{out}	۵۰۰ کیلووات
۲	سرعت چرخش	n_s	۳۰۰ دور در دقیقه
۳	ولتاژ تغذیه dc	V_{dc}	۲۲۰ ولت
۴	مقدار موثر ولتاژ فاز	V_{in}	۷۴/۲۴ ولت
۵	تعداد فازها	m	۶
۶	مقدار حداکثر دامنه ولتاژ داخلی با توجه به ولتاژ dc تغذیه	E_f	۱۲۰ ولت
۷	تعداد دور سیم‌پیچ در هر فاز	N_t	۱ دور
۸	چگالی شار ماکزیمم هسته	B_{cs}	۱/۲ تسلا
۹	فرکانس ورودی	f	۳۰۰ هرتز
۱۰	قطر خارجی هسته استاتور	D_o	۱/۳۷۷ متر
۱۱	قطر داخلی روتور	D_{ir}	۱/۲۳۶ متر
۱۲	طول محوری هر فاز استاتور	L_s	۱۰۵ میلی‌متر

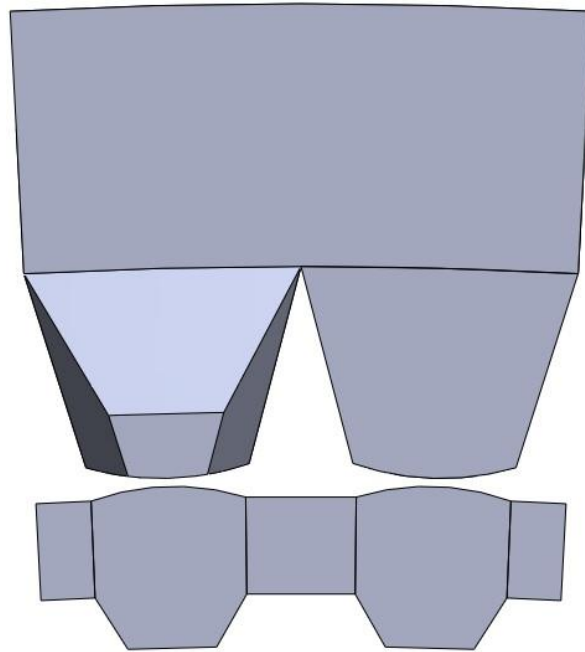
۲-۳- نتایج تحلیل اجزاء محدود موتور مورد مطالعه

در این بخش با شبیه‌سازی موتور طراحی شده در نرم‌افزار اجزاء محدود JMAG Designer، برخی از مشخصات و جنبه‌های عملکردی موتور مورد نظر بررسی می‌شود. برای پرهیز از طولانی شدن گزارش، از بیان جزئیات مدل‌سازی خودداری می‌شود. در صورت نیاز به اطلاعات کامل و دقیق از قابلیت‌های این نرم‌افزار و نحوه کار با آن می‌توان به راهنمای این نرم‌افزار و مثال‌های آموزشی همراه با آن مراجعه نمود [۱۰].

شکل ۲-۹ یک جفت قطب از یک فاز موتور طراحی شده را نشان می‌دهد. می‌توان نشان داد که ولتاژ داخلی این موتور دارای هارمونیک‌های ناخواسته‌ای است. به منظور نزدیک کردن شکل موج ولتاژ داخلی موتور به موج سینوسی خالص، بجای استفاده از یک فاصله هوایی ثابت در ضمن چرخش ماشین، از یک فاصله هوایی متغیر استفاده می‌شود. برای نیل به این هدف، روی متمرکز کننده‌های شار و دندانه‌های استاتور اصلاحاتی انجام گرفته است که این اصلاحات در شکل ۲-۱۰ نشان داده شده است.



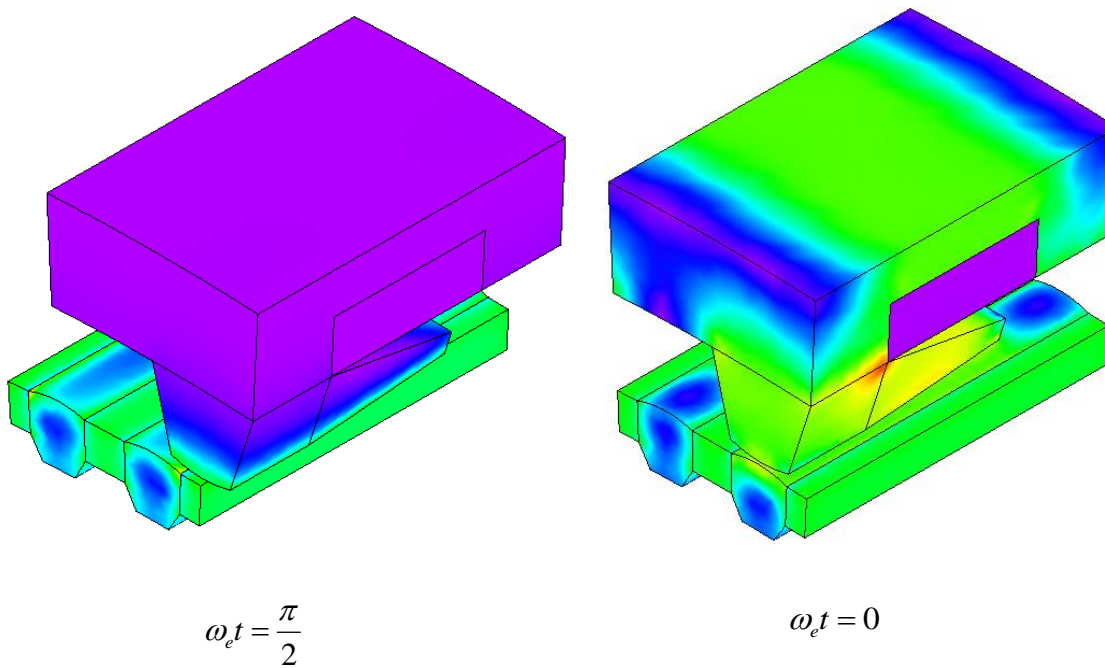
شکل ۲-۹: هندسه ترسیم شده برای موتور طراحی شده در محیط اجزاء محدود



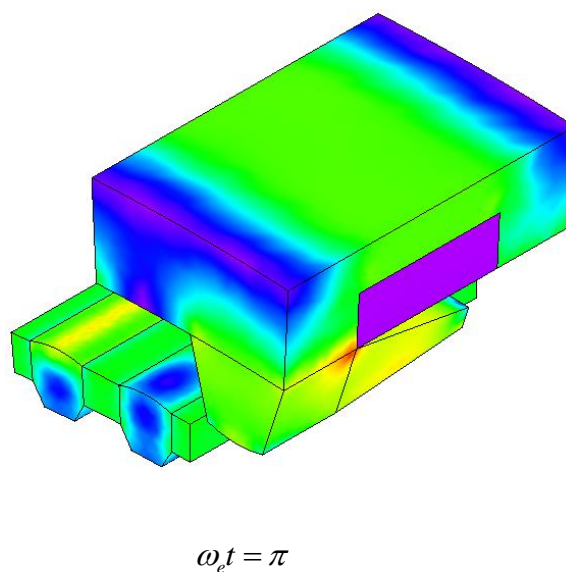
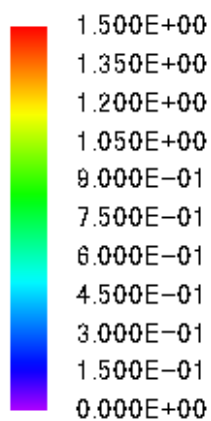
شکل ۲-۱۰: موتور با دندانه‌ها و متمرکز کننده های شار اصلاح شده برای نزدیک کردن ولتاژ داخلی به موج سینوسی

از این به بعد تمرکز خود را بر روی ساختار اصلاح شده در شکل ۲-۱۰ متمرکز خواهیم کرد. شکل ۲-۱۱ و شکل ۲-۱۲، به ترتیب توزیع عددی و برداری چگالی شار این موتور در حالت بی‌باری را نشان می‌دهند. در شکل ۲-۱۳ شکل موج شار پیوندی سیم‌پیچ همراه با موج اصلی آن نشان داده شده است. از ظاهر این شکل کاملاً مشخص است که در ماشین اصلاح شده شار پیوندی به حالت سینوسی خالص بسیار نزدیک شده است.

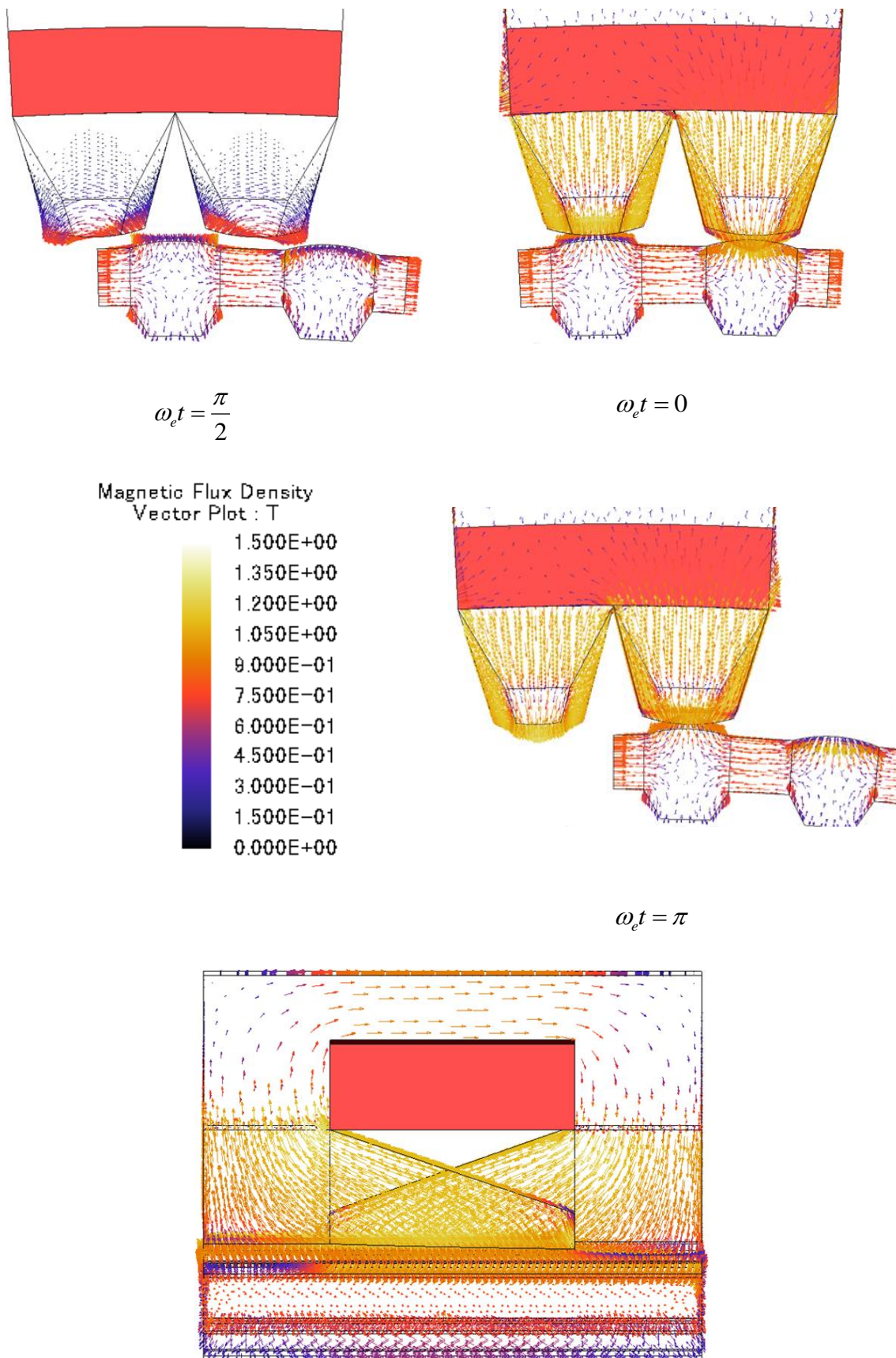
برای محاسبه ولتاژ داخلی باید مشتق شار پیوندی محاسبه شود. در این صورت شکل موج ولتاژ داخلی همانند شکل ۲-۱۴ بدست می‌آید. در این شکل، هارمونیک اصلی موج ولتاژ داخلی نیز نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که ولتاژ داخلی ماشین اصلاح شده به موج سینوسی بسیار نزدیک است.



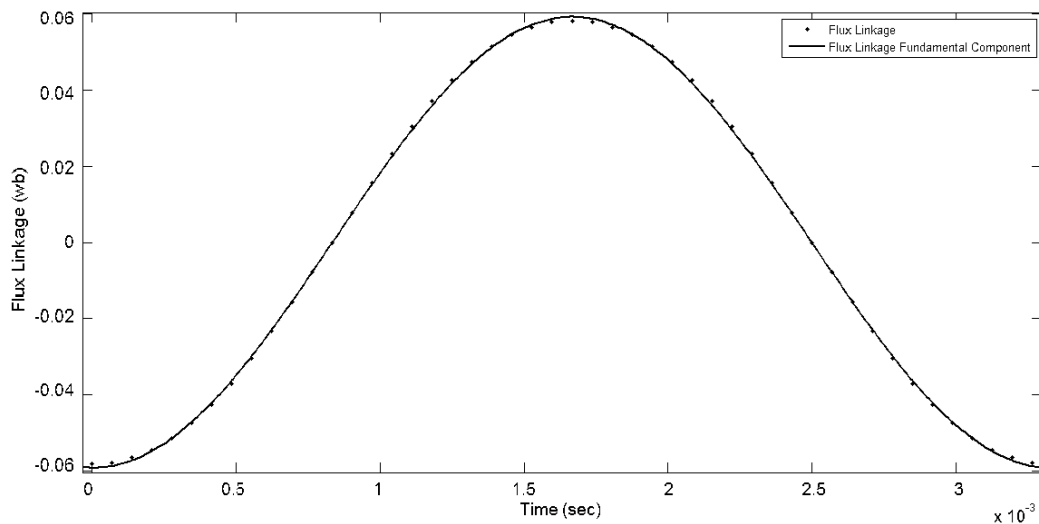
Magnetic Flux Density
Contour Plot : T



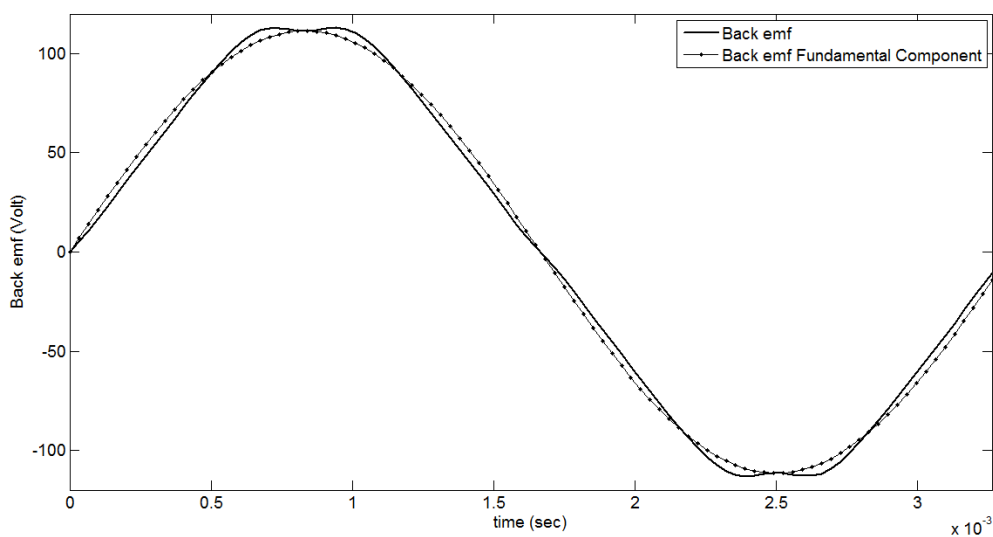
شکل ۲-۱۱: نقشه رنگی توزیع چگالی شار در موتور اصلاح شده به ازای موقعیت‌های مختلف روتور در حالت مدار باز



شکل ۲-۱۲: توزیع برداری چگالی شار در موتور اصلاح شده در موقعیت‌های مختلف روتور در حالت مدار باز



شکل ۲-۱۳: تغییرات شار پیوندی سیم پیچ یک فاز موتور اصلاح شده در یک سیکل الکتریکی



شکل ۲-۱۴: شکل موج ولتاژ داخلی و هارمونیک اصلی آن برای موتور اصلاح شده

فصل ۳:

محاسبه تلفات موتور TFPM قطب چنگالی

مورد مطالعه

در فصل قبل، یک موتور سنکرون TFPM قطب چنگالی ۵۰۰ کیلوواتی برای انجام مطالعات تلفاتی و حرارتی طراحی و معرفی شد. به علت این که تغذیه این موتور از طریق باتری‌ها با ظرفیت انرژی محدود صورت می‌گیرد، باید راندمان موتور تا حد امکان بالا باشد. لذا تحلیل و ارزیابی میزان تلفات این موتورها در مرحله طراحی و بهینه‌سازی فرآیند طراحی به منظور افزایش بازده کلی سیستم از اهمیت زیادی برخوردار است. از طرف دیگر با توجه به حجم نسبتاً کوچک این موتورها، طراحی سیستم خنک‌ساز نیز باید با ملاحظات و دقت زیاد انجام شود. این موضوع اهمیت محاسبه تلفات را دو چندان می‌کند.

شناخت انواع تلفات در ماشین‌های الکتریکی، علل ایجاد آن‌ها و پارامترهای مؤثر در مقدار آن‌ها به طراح این امکان را خواهد داد تا ماشینی با حداقل تلفات طراحی کند. بنابراین در ابتدای این فصل به بررسی مؤلفه‌های مختلف تلفات و عوامل مؤثر در آن‌ها پرداخته می‌شود. در ادامه به بحث در مورد نحوه محاسبه تلفات پرداخته می‌شود. با توجه به این که سهم عمده تلفات موتور مورد نظر را تلفات هسته تشکیل می‌دهد، بخش اعظم این بحث به نحوه محاسبه این تلفات اختصاص دارد. به کمک روش اجزای محدود، در دو حالت بی‌باری و بار کامل، توزیع تلفات در داخل موتور به دست می‌آید. در فصل بعد، از توزیع تلفات در بار کامل برای آنالیز حرارتی ماشین استفاده خواهد شد.

۳-۱- مؤلفه های تلفات در ماشین‌های الکتریکی

تلفات، عامل ایجاد حرارت در ماشین‌های الکتریکی و در نتیجه گرم شدن آن‌ها می‌باشد. تلفات ماشین مؤلفه‌های متعددی دارد و در مراجع مختلف، دسته‌بندی‌های متفاوتی برای آن ارائه شده است. صرف‌نظر از جزئیات، یک دسته‌بندی کلی برای تلفات، که تقریباً بین تمامی مراجع مشترک است، می‌تواند به صورت زیر بیان شود [۲۱]:

- تلفات مقاومتی در هادی‌های روتور و استاتور

- تلفات آهن در مدارهای مغناطیسی
- تلفات اضافی
- تلفات مکانیکی

تلفات اضافی در این دسته‌بندی، مجموع تلفات الکترومغناطیسی است که در قالب تلفات اهمی و تلفات آهنی که با استفاده از روابط تحلیلی محاسبه می‌شوند، قرار نگیرد. معمولاً اندازه‌گیری و محاسبه تلفات اضافی بسیار دشوار است و لذا در استانداردهای IEC پیشنهاد شده است که این تلفات را به اندازه درصد مشخصی از توان ورودی، در نظر گرفته شود. این درصد با توجه به نوع ماشین و تجربیات و اندازه‌گیری‌های قبل توسط جداول داده می‌شوند [۲۱].

با توجه به این که موضوع این گزارش در مورد ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم است، از دسته‌بندی تلفات ارائه شده در استاندارد IEEE 115-2009 برای ماشین‌های سنکرون استفاده می‌کنیم. این دسته‌بندی به صورت زیر است [۲۲]:

- تلفات آهن
- تلفات اهمی آرمیچر
- تلفات اهمی تحریک
- تلفات باد خوری و اصطکاک
- تلفات بار سرگردان

در ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم سیم‌پیچ تحریک وجود ندارد، و لذا تلفات اهمی تحریک از این دسته‌بندی حذف می‌شود. در عوض، به علت وجود هارمونیک‌های زمانی در جریان آرمیچر و تغییرات مقاومت مغناطیسی مسیر شار آهنرباهای دائم حین چرخش، شار عبوری از داخل آن‌ها تغییر می‌کند. با توجه به این که آهنرباهای دائم رسانای الکتریکی هستند، جریان‌های گردابی در آن‌ها به راه می‌افتد. این جریان‌های گردابی باعث ایجاد تلفات اهمی در آهنرباهای دائم می‌شود، که دقیقاً همان مکانیزم تلفات ادی در هسته است. لذا برای ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم، تلفات آهنرباهای دائم نیز به لیست فوق اضافه می‌شود.

در ادامه این بخش به توضیحات کلی در مورد هر یک از این مؤلفه‌های تلفات پرداخته می‌شود.

۳-۱-۱- تلفات آهن

این تلفات به علت عبور شار مغناطیسی متغیر و یا متناوب از مدار مغناطیسی آهنی ایجاد می‌شود. تلفات آهن دو منشأ اساسی دارد:

الف) تلفات هیستریزیس: این تلفات ناشی از مشخصه $B-H$ چند مقداره و یا حلقه‌های هیستریزیس هسته روتور و استاتور است. این تلفات زمانی ایجاد می‌شود که یک شار متناوب در هسته وجود داشته باشد.

ب) تلفات جریان ادی یا فوکو: تغییرات شار مغناطیسی باعث ایجاد یک ولتاژ القایی در هر مسیر بسته که این شار از درون آن می‌گذرد، می‌شود. اگر این ولتاژ درون یک ماده رسانا ایجاد شود، باعث ایجاد جریان در این مسیر بسته خواهد شد. با توجه به این که هسته آهنی استاتور و روتور رسانای الکتریکی نیز هستند، در آن‌ها نیز جریان‌های گردابی ایجاد می‌شود. این جریان‌ها باعث ایجاد تلفات اهمی در هسته خواهد شد. در مرجع [۲۱] نشان داده شده است که تلفات ادی در یک قطعه آهنی، متناسب با مکعب ضخامت آن قطعه است. لذا برای کاهش این تلفات، به جای یکپارچه ساختن هسته، آن را به صورت لایه لایه می‌سازند.

در مراجع مختلف روابط تحلیلی گوناگونی برای محاسبه تلفات ارائه شده است، ولی نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که خطای این روابط در بسیاری از موارد قابل توجه است. مثلاً تلفات واقعی ادی مربوط به ورقه‌های سیلیکونی ۵۰٪ بیشتر از تلفات ادی محاسبه شده از رابطه تحلیلی ارائه شده در بعضی از مراجع است [۲۱]. به عنوان مثال دیگر، تلفات آهن محاسبه شده از روابط تحلیلی در مرجع [۲۳] تا ۲۰٪ کمتر از مقادیر اندازه‌گیری است، و این اختلاف در ماشین‌های PM بیشتر است. این اختلاف‌ها ناشی از عدم مدل‌سازی دقیق و یا ساده‌سازی‌هایی است که در استخراج برخی از روابط تحلیلی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

در ادامه به چند نکته، که در محاسبه دقیق تلفات آهن باید مد نظر قرار گیرند، اشاره می‌شود:

نکته ۱ روابط تحلیلی کلاسیک برای محاسبه تلفات هسته، فقط برای میدان‌های ضربانی معتبر می‌باشند. در حالی که در ماشین‌های الکتریکی با میدان‌های دوار مواجه هستیم، و باید این روابط اصلاح شوند [۲۴]. در [۲۴] بیان شده است که تلفات میدان دوار می‌تواند تا دو برابر تلفات میدان ضربانی، با همان مقدار چگالی شار ماکزیمم باشد. لذا، عدم منظور کردن اثر میدان‌های دوار، خطای زیادی در محاسبات به همراه دارد. این خطا در ماشین‌های متداول، که مسیر شار دوبعدی است، کمتر است و در برخی ماشین‌های الکتریکی خاص که مسیرهای شار به صورت سه‌بعدی هستند، بیشتر خواهد بود.

نکته ۲ در استخراج نکته ۱ اکثر روابط تحلیلی فرض می‌شود که شار مغناطیسی در هسته مغناطیسی تنها یک مؤلفه متناوب دارد که آن هم سینوسی است. این فرض معمولاً غلط است، چرا که این شار مغناطیسی شامل هارمونیک‌های متعددی است که تلفات آهن را افزایش می‌دهند.

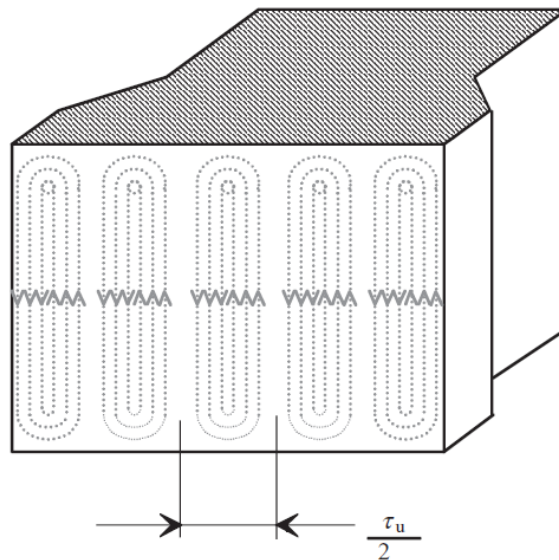
نکته ۳ تلفات آهن در ماشین‌های گردان، مؤلفه‌های دیگری نیز دارد. دو مورد از این تلفات عبارتند از تلفات آهن انتهایی و تلفات آهن اضافی. تلفات انتهایی زمانی اتفاق می‌افتد که شار ناشی در قسمت‌های انتهایی ماشین به ساختارهای یکپارچه انتهایی ماشین، مثل درپوش‌ها وارد می‌شود و باعث افزایش تلفات ادی می‌شود. محاسبات این تلفات بسیار دشوار است. تلفات آهن اضافی در دندانه‌ها اتفاق می‌افتد و از هارمونیک‌های موجود در هدایت مغناطیسی مسیر شار و یا از عبور دندانه‌های روتور و استاتور از کنار هم ناشی می‌شوند [۲۱]. برای محاسبه تلفات اضافی باید هارمونیک‌هایی را که یک دندانه تجربه می‌کند بدست آورده شوند.

نکته ۴ در تغذیه موتورها با مدولاسیون پهنای باند، تلفات کلی موتور به طرق مختلف افزایش می‌یابد. با این نوع تغذیه تلفات آهن، مخصوصاً روی سطح روتور، افزایش می‌یابد. می‌توان گفت که بسته به فرکانس سوئیچینگ، بازدهی کلی یک موتور ۱ تا ۲ درصد کمتر از حالت تغذیه با منبع سینوسی خالص می‌باشد [۲۱].

نکته ۵ در ماشین‌های با بخش‌های یکپارچه، مثلاً روی سطح کفشک قطب، هارمونیک‌های ایجاد شده به وسیله شیارها جریان‌های ادی ایجاد می‌کنند و باعث تلفات در سطح قطب می‌شوند (شکل ۱-۳). آنالیز دقیق این پدیده به دلیل نیاز به حل معادلات میدان در ماده‌های یکپارچه معمولاً دشوار است [۲۱].

نکته ۶ استرس‌هایی که در هنگام پانچ کردن صفحات ایجاد می‌شود و همچنین ناهمواری‌هایی که در سطوح وجود دارند، مشخصه تلفات را تغییر می‌دهند.

نکات فوق به وضوح نشان می‌دهند که برای محاسبه دقیق تلفات، باید از روش‌های عددی، نظیر روش اجزاء محدود، استفاده شود.



شکل ۱-۳: جریان ادی ایجاد شده در سطح کفشک قطب ناشی از هارمونیک‌های ایجاد شده به وسیله شیارها [۲۱]

در موتورهای سنکرون و مخصوصاً در موتورهای سنکرون PM، توجه به نکات زیر در مورد تلفات آهن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است:

نکته ۱ در انواع ماشین‌های سنکرون فرکانس پایه مربوط به هسته آرمیچر (معمولاً استاتور) همان فرکانس شبکه یا فرکانس مبدل فرکانسی تغذیه‌کننده است و فرکانس مربوط به هسته روتور در حالت

عادی صفر است. به هر حال سطح روتور مؤلفه‌های شار متغیر با زمان فرکانس بالایی را تجربه می‌کند، که به علت تغییرات در هدایت مغناطیسی ناشی از شیارهای استاتور می‌باشد. علاوه بر این در طی گذرایی‌های متفاوت، روتور یک ماشین سنکرون نیز تحت تأثیر شار متغیر با زمان قرار می‌گیرد و در آن تلفات آهن پدید می‌آید. روتور ماشین سنکرون می‌تواند از فولاد یکپارچه ساخته شود، زیرا در کاربردهای معمولی، هارمونیک‌های شار مغناطیسی فقط روی سطح روتور اتفاق می‌افتند. دامنه این مؤلفه‌های فرکانس بالای شار به دلیل فاصله هوایی بزرگ مخصوصاً در ماشین‌های قطب صاف معمول بسیار کوچک است [۲۱].

نکته ۲ موتورهای PM بدون جاروبک بر خلاف موتورهای القایی و موتورهای سنکرون تغذیه شونده سینوسی، یک شار فاصله هوایی غیر سینوسی تولید می‌کنند. در حقیقت سیستم تحریک PM، معمولاً یک شکل موج چگالی شار مغناطیسی دوزنقه‌ای تولید می‌کند. سیم‌پیچ‌های استاتور نیز از یک منبع dc و از طریق یک اینورتر با کنترل PWM و یا موج مربعی تغذیه می‌شوند. لذا ولتاژ اعمالی و در نتیجه شار استاتور حاوی هارمونیک‌های بسیار زیادی است. بنابراین بین تلفات هسته اندازه‌گیری شده و تلفات هسته محاسبه شده با روابط تحلیلی کلاسیک، خطای زیادی در حدود ۲۵٪ تا ۷۵٪ مشاهده می‌شود [۲۴].

نکته ۳ در ماشین‌های PM سنکرون، تلفات هسته روتور به دلیل شار ضربانی ایجاد شده توسط تغییرات سریع رلوکتانس فاصله هوایی یا عبور سریع روتور از مقابل دندان‌های استاتور اتفاق می‌افتد. این تلفات در موتورهای مغناطیس دائم با آهنرباهای سوار شده بر روی سطح روتور، قابل صرف‌نظر کردن است، زیرا فاصله هوایی مؤثر در این ماشین‌ها بزرگ است [۲۴].

نکته ۴ موتورهای سنکرون مغناطیس دائم نسبت به ماشین‌های القایی با همان اندازه و مقادیر نامی، بازدهی بیشتری دارند. با این وجود در موتورهای مغناطیس دائم، تلفات آهن بخش بزرگ‌تری از تلفات کل آن را تشکیل می‌دهد [۲۳]. لذا در موتورهای سنکرون مغناطیس دائم، محاسبه و مینیمم کردن

تلفات آهن اهمیت فوق العاده‌ای دارد.

نکته ۵ طبیعت و شکل موج چگالی شار تأثیر مهمی در تلفات آهن دارد. بنابراین با شکل‌دهی مناسب مگنت‌ها، طراحی مناسب شیارها و انتخاب مناسب تعداد قطب‌ها، تلفات آهن ماشین‌های PM را می‌توان کاهش داد [۲۳].

نکته ۶ در ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم با آهنرباهای سوار شده بر روی سطح روتور، تلفات آهن عمدتاً متعلق به هسته استاتور است. شکل موج چگالی شار در هسته استاتور نه یکنواخت و نه سینوسی است. این شکل موج چگالی شار غیر سینوسی بر روی تلفات هیستریزیس اثر نمی‌گذارد، البته به شرط این که در مشخصه B-H حلقه‌های کوچک^۱ به وجود نیاید، اما بر روی تلفات ادی تأثیرگذار است [۲۳].

۳-۱-۲- تلفات اهمی

تلفات اهمی ناشی از عبور جریان در سیم‌پیچ‌ها می‌باشد و به تلفات ژولی و یا تلفات مسی نیز معروف است. محاسبه این تلفات سراسر است و پیچیدگی‌های تلفات آهنی را ندارد. البته باید در محاسبه این تلفات به دو نکته توجه کرد:

نکته ۱ با افزایش فرکانس، جریان تمایل دارد که بیشتر از سطح هادی‌ها عبور کند و چگالی جریان در داخل هادی کمتر خواهد شد. این پدیده که به اثر پوستی معروف است باعث می‌شود که مقاومت مؤثر هادی در فرکانس‌های بالاتر بیشتر شود. برای منظور کردن اثر پوستی در روابط به دست آمده برای محاسبه تلفات اهمی، از ضریبی به نام ضریب اثر پوستی استفاده می‌شود [۲۴].

نکته ۲ مقاومت سیم‌پیچ‌ها و تلفات اهمی با افزایش دما افزایش می‌یابند. بنابراین تلفات اهمی باید در دمای مشخص بیان شوند [۲۲].

^۱ Minor Loops

۳-۱-۳- تلفات باد خوری و اصطکاک

تلفات باد خوری و اصطکاک به تلفات چرخشی یا مکانیکی نیز معروف هستند. منظور از تلفات اصطکاک تلفات در یاتاقان‌ها می‌باشد و تلفات باد خوری، شامل تلفات ناشی از سایش هوا با روتور در حال چرخش و همچنین تلفات تهویه است. تعدادی روابط نیمه تجربی جهت محاسبه تلفات چرخشی وجود دارند که دقت‌های متفاوتی دارند. از این جمله می‌توان به روابط ارائه شده در مرجع [۲۵] اشاره نمود. تلفات تهویه به دو قسمت تقسیم می‌شود: (۱) توان مورد نیاز برای سیستم خنک ساز (P_F) و (۲) تلفات اصطکاک سطحی به علت جریان خنک‌ساز در داخل ماشین (P_{OR}). معمولاً P_F راحت‌تر قابل محاسبه است ولی محاسبه P_{OR} مشکل‌تر و به آزمایشات مختلف و روابط تجربی نیاز دارد [۲۵].

تلفات باد خوری معمولاً با مکعب سرعت و تلفات یاتاقان به صورت خطی با سرعت افزایش می‌یابند. سرعت موتور مورد بررسی نسبتاً کم است، به صورتی که می‌توان از تلفات مکانیکی صرف‌نظر نمود. با این وجود، در صورت لزوم می‌توان با اندازه‌گیری‌های انجام شده بر روی موتورهای مشابه، تلفات مکانیکی این موتور را تخمین زد [۲۶].

۳-۱-۴- تلفات بار سرگردان

تلفات بار سرگردان ناشی از عکس‌العمل آرمیچر، شار نشتی و نقص‌های مکانیکی موتور است. به طور خلاصه می‌توان گفت که محاسبه این تلفات به صورت کامل و دقیق امکان‌پذیر نیست. برای محاسبه تلفات بار سرگردان در ماشین‌های بزرگ روابطی وجود دارند، اما برای ماشین‌های الکتریکی با سایز متوسط و کوچک در عمل می‌توان درصدی از کل توان ورودی را به عنوان تلفات بار سرگردان در نظر گرفت [۲۳]. لازم به ذکر است که این مطلب در مورد روش‌های تحلیلی صادق می‌باشد و به کمک روش اجزاء محدود، می‌توان تلفات سرگردان را با یک دقت قابل قبول محاسبه کرد. در این صورت تلفات سرگردان در قالب سایر مؤلفه‌های تلفات محاسبه می‌شوند.

۳-۲- نحوه محاسبه تلفات

با توجه به نکاتی که در بخش قبل بیان شد، در این پژوهش، محاسبه تلفات به کمک روش اجزاء محدود انجام می‌شود. با استفاده از این روش، علاوه بر محاسبه دقیق تر تلفات کل نسبت به روش‌های تحلیلی، امکان محاسبه توزیع فضایی تلفات نیز وجود دارد. این موضوع از دو جنبه مهم است: (۱) بهینه‌سازی ساختار برای کاهش تلفات امکان‌پذیر خواهد شد. (۲) آنالیز حرارتی ماشین دقیق تر خواهد بود و لذا سیستم خنک‌سازی به صورت مؤثرتری طراحی خواهد شد.

یکی از بهترین نرم‌افزارهای موجود برای انجام انواع تحلیل‌های الکترومغناطیسی و حرارتی ماشین‌های الکتریکی با استفاده از روش اجزای محدود، نرم‌افزار JMAG Designer است. در فصل قبل به کمک شبیه‌سازی‌های انجام شده با این نرم‌افزار، صحت طراحی الکترومغناطیسی موتور مورد نظر تأیید گردید. تمامی محاسبات تلفات در این فصل نیز با استفاده از این نرم‌افزار انجام می‌شود. برای انجام تحلیل حرارتی ماشین در فصل بعد نیز از این نرم‌افزار استفاده خواهد شد. یکی از ویژگی‌های برجسته این نرم‌افزار راهنمای بسیار جامع آن و مثال‌های آموزشی متعدد همراه با آن است [۱۰]. با توجه به سرعت پایین موتور مورد بررسی، می‌توان از تلفات مکانیکی آن در مقابل تلفات الکترومغناطیسی صرف‌نظر کرد. به کمک روش اجزاء محدود، محاسبه مؤلفه‌های الکترومغناطیسی تلفات بار سرگردان در قالب تلفات آهن و تلفات مسی میسر خواهد بود. اگرچه مکانیزم تلفات در آهن‌باهای دائم همان مکانیزم تلفات ادی است، بهتر است این تلفات جدای از تلفات هسته در نظر گرفته شوند. به طور خلاصه، در ادامه گزارش کل تلفات ماشین متشکل از تلفات آهن، تلفات مسی و تلفات آهن‌باهای دائم در نظر گرفته می‌شود.

توزیع تلفات مسی در درون سیم‌پیچ استاتور بر اساس قانون مشهور اهم به دست می‌آید. توزیع تلفات جریان گردابی در آهن‌باهای دائم نیز به همین صورت به دست می‌آید. برای توضیحات بیشتر در این مورد می‌توان به [۱۰] مراجعه کرد. اگر چه امکان محاسبه تلفات ادی هسته به کمک قانون

اهم وجود دارد، ولی تلفات هیستریزیس هسته، که در مواد SMC بخش عمده تلفات هسته را تشکیل می‌دهد، را نمی‌توان با یک چنین روند سرراستی محاسبه نمود. برای محاسبه تلفات آهن معمولاً از روش‌های پیچیده‌تری استفاده می‌شود.

در فصل اول، روش‌های محاسبه تلفات هسته مرور شد و پس بیان نقاط ضعف و قوت هر کدام و بیان اهداف مد نظر این پژوهش از محاسبه تلفات، نتیجه آن شد که بهتر است برای محاسبه تلفات در موتور مورد نظر از روش‌های بر پایه معادله اشتینمتر استفاده شود. استفاده از معادله اشتینمتر متداول‌ترین روش محاسبه تلفات هسته به حساب می‌آید. می‌توان گفت که تمام روابط تحلیلی مشهور برای محاسبه تلفات، که در کتاب‌های ماشین‌های الکتریکی مرجع یافت می‌شوند، از این معادله استخراج شده‌اند.

معادله اشتینمتر در ابتدا تنها برای محاسبه تلفات آهن در هسته‌هایی از جنس فریت با تغییرات چگالی شار سینوسی خالص مطرح شد. فرم اولیه معادله اشتینمتر در رابطه (۱-۳) داده شده است [۱۱]. در این رابطه، \hat{B} مقدار ماکزیمم چگالی شار در هسته است و ضرایب C_{SE} ، α و β از برازش منحنی تلفات هسته به دست می‌آیند. آقای جوردن^۱ با تقسیم تلفات آهن به تلفات هیستریزیس استاتیکی و تلفات جریان ادی دینامیکی، فرم جدیدی از معادله (۱-۳) را برای محاسبه تلفات آهن به صورت رابطه مشهور (۲-۳) ارائه کرد [۱۱]. نکته مهمی که باید به آن توجه کرد این است که روابط (۱-۳) و (۲-۳) تنها برای چگالی شار کاملاً سینوسی معتبر هستند و اکثراً برای محاسبه تلفات آهن در هسته‌های مورق به کار برده می‌شوند. با گذشت زمان، اصلاحات زیادی روی این معادله انجام شد تا بتوان آن را در مورد چگالی شارهای دلخواه و همچنین سایر مواد هسته، از جمله مواد SMC، به کار برد. با توجه به این که روند این اصلاحات در مرجع [۱۱] به طور کامل مرور شده است، برای جلوگیری از حجیم شدن گزارش از ارائه این روند خودداری می‌شود.

^۱ Jordan

$$P_{Fe} = C_{SE} f^\alpha \hat{B}^\beta \quad (1-3)$$

$$P_{Fe} = P_{hyst} + P_{ec} = C_{hyst} f \hat{B}^2 + C_{ec} f^2 \hat{B}^2 \quad (2-3)$$

تقریباً تمام نرم‌افزارهایی که تلفات را با استفاده از روش اجزاء محدود حساب می‌کنند، از روش‌های بر پایه معادلات اشتینمتر استفاده می‌کنند، و نتایج آن‌ها از دقت لازم برای مقاصد مهندسی برخوردار است. یکی از بهترین نرم‌افزارها برای این منظور، نرم‌افزار JMAG Designer است. در این پایان‌نامه از این نرم‌افزار برای به دست آوردن توزیع تلفات استفاده خواهد شد. این نرم‌افزار با دریافت منحنی‌های تلفات W/Kg بر حسب چگالی شار در فرکانس‌های مختلف، ضرایب لازم برای محاسبه تلفات هسته را محاسبه می‌کند و با یک الگوریتم دقیق، توزیع تلفات را به دست می‌آورد. الگوریتم کامل محاسبه تلفات به کمک این نرم‌افزار در [۱۰] توضیح داده شده است.

برای منظور کردن اثر میدان‌های دوار در تلفات هسته، توزیع تلفات هسته برای به هر یک از مؤلفه‌های فضایی چگالی شار به دست می‌آید. با این کار میدان دوار به سه میدان ضربانی تبدیل می‌شود، که می‌توان توزیع تلفات هر یک از آن‌ها را محاسبه کرد. تلفات هسته کل به صورت مجموع تلفات ناشی از هر یک از این مؤلفه‌ها خواهد بود.

۳-۳- نتایج محاسبات تلفات

۳-۳-۱- تلفات در حالت مدار باز

در این وضعیت در حالی که ماشین با سرعت نامی در حال چرخش است، سیم‌پیچ به سیستم تغذیه متصل نیست. به همین دلیل، تلفات مسی سیم‌پیچ وجود ندارد. همچنین، با توجه به این که تلفات آهنرباهای دائم نیز عمدتاً به خاطر هارمونیک‌های موجود در جریان استاتور بوجود می‌آید، در این حالت از این تلفات صرف نظر می‌شود. لذا در حالت مدار باز تنها به بررسی تلفات هسته پرداخته می‌شود.

در حالت مدار باز، تلفات آهن تنها ناشی از شار تولیدی به وسیله مگنت‌هاست. شکل ۲-۳ توزیع متوسط تلفات هیستریزیس در هسته‌های استاتور و روتور این ماشین را نشان می‌دهد. توزیع تلفات هیستریزیس ناشی از هر یک از مؤلفه‌های فضایی چگالی شار نیز در این شکل آمده است. در شکل ۲-۳ محورهای x ، y و z برای تاکید بیشتر و برای جلوگیری از اشتباه روی شکل نیز نشان داده شده است. شکل ۳-۳ توزیع تلفات ادی را در هسته‌های استاتور و روتور نشان می‌دهد. توزیع تلفات ادی ناشی از هر یک از مؤلفه‌های فضایی چگالی شار نیز در این شکل آمده است. در نهایت، شکل ۴-۳ توزیع تلفات آهن کل را در هسته‌های استاتور و روتور نشان می‌دهد. توزیع تلفات آهن کل، مربوط به هر یک از مؤلفه‌های فضایی چگالی شار نیز در این شکل نمایش داده شده است.

از بررسی دقیق شکل ۲-۳ تا شکل ۴-۳ می‌توان نکات زیر را استخراج نمود:

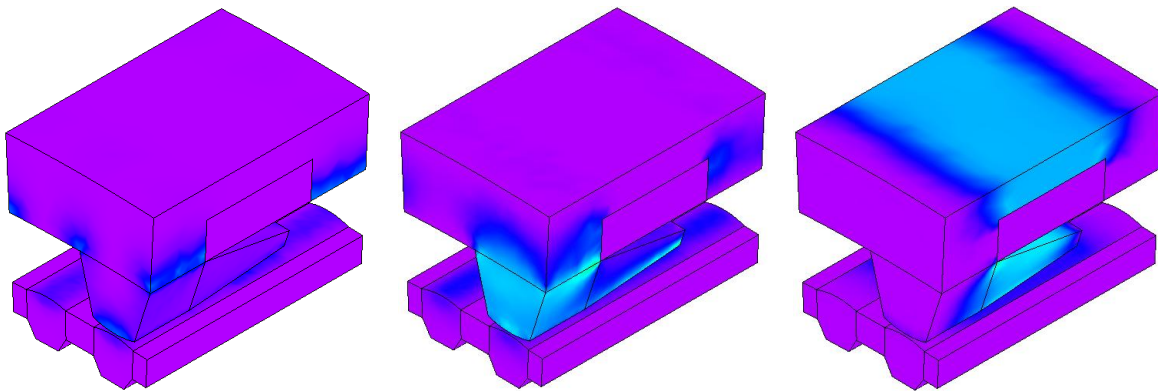
نکته ۱ هر سه مؤلفه شار باعث ایجاد تلفات (هیستریزیس و ادی) می‌شوند.

نکته ۲ در ماشین TFPM با متمرکز کننده شار، روتور نیز دارای تلفات قابل توجهی است، که این ماشین را از ماشین‌های سنکرون متداول کاملاً متمایز می‌کند.

نکته ۳ تلفات مؤلفه x چگالی شار در استاتور از دو مؤلفه دیگر کمتر است.

نکته ۴ چگالی تلفات در سطح متمرکز کننده‌های شار بیشتر از سایر قسمت‌های متمرکز کننده‌های شار است.

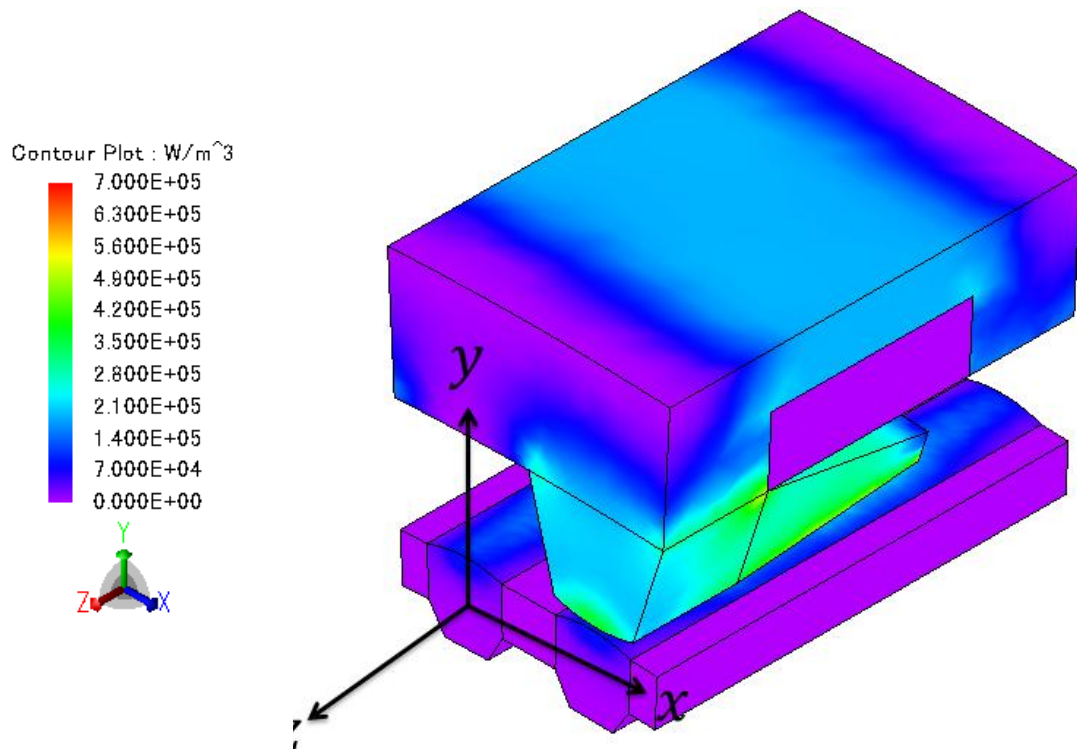
نکته ۵ چگالی تلفات در پایه‌های استاتور، و به خصوص در قسمت پاشنه کفشک قطب، از بقیه جاها بیشتر است. لذا اگر امکان بهینه‌سازی بیشتر در مورد تلفات آهن وجود داشته باشد، پایه‌های استاتور همچنان اولین انتخاب برای اصلاح، هستند.



(ج) تلفات هیستریزیس مربوط به مؤلفه x چگالی شار

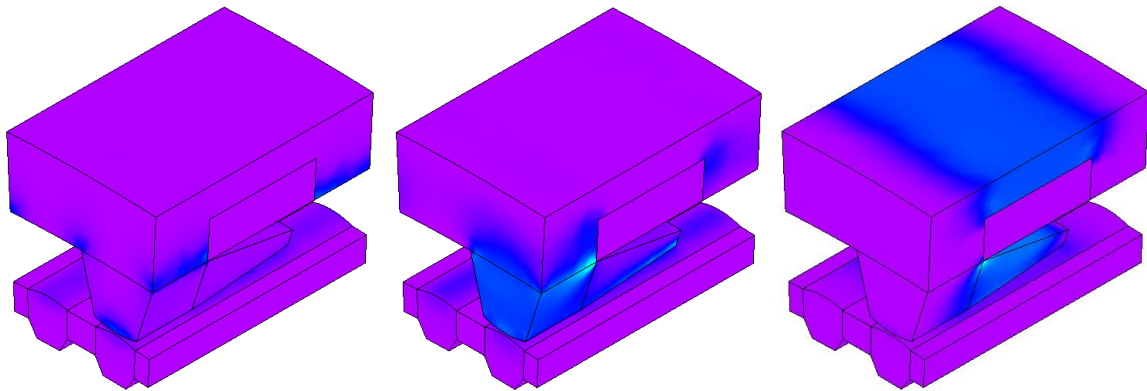
(ب) تلفات هیستریزیس مربوط به مؤلفه y چگالی شار

(الف) تلفات هیستریزیس مربوط به مؤلفه z چگالی شار



(د) تلفات هیستریزیس کل

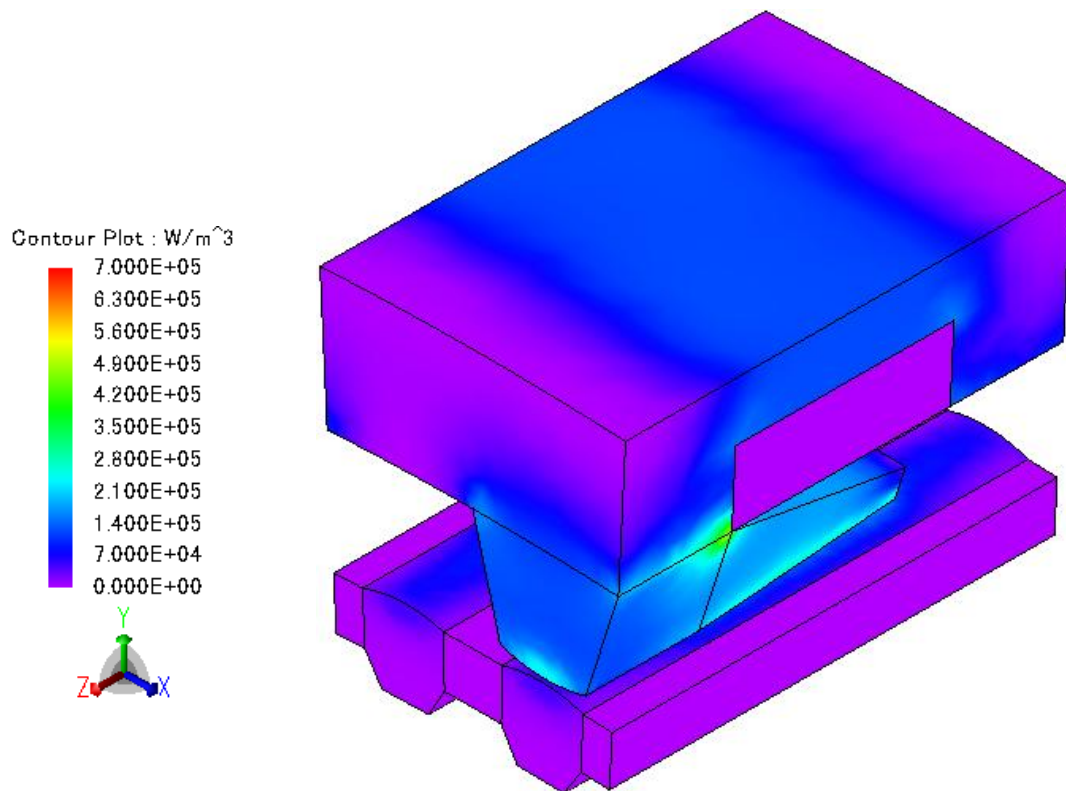
شکل ۳-۲: توزیع متوسط تلفات هیستریزیس در یک سیکل الکتریکی در حالت مدار باز



الف) تلفات ادی مربوط به مؤلفه Z .
چگالی شار

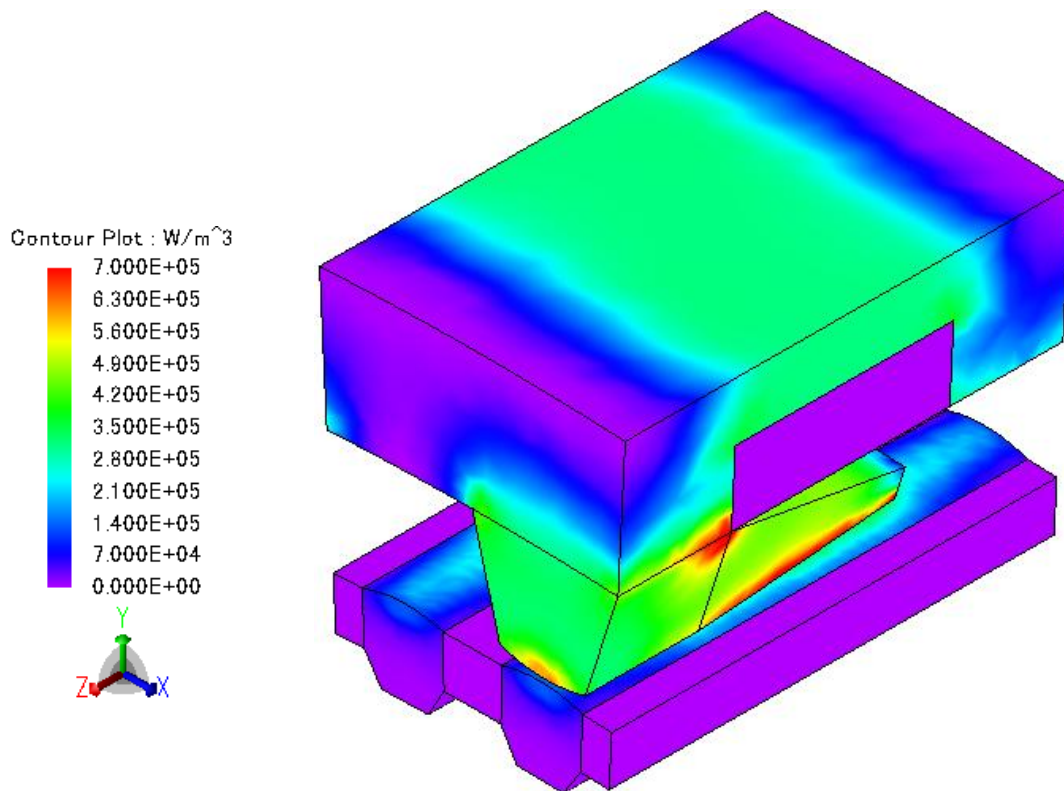
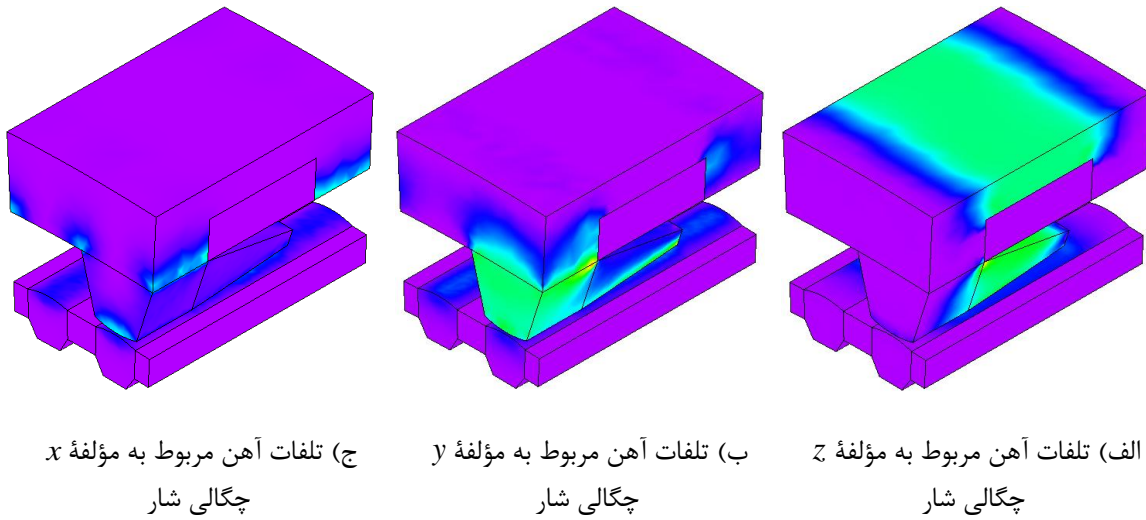
ب) تلفات ادی مربوط به مؤلفه Y .
چگالی شار

ج) تلفات ادی مربوط به مؤلفه X .
چگالی شار



د) تلفات ادی کل

شکل ۳-۳: توزیع متوسط تلفات ادی در یک سیکل الکتریکی در حالت مدار باز



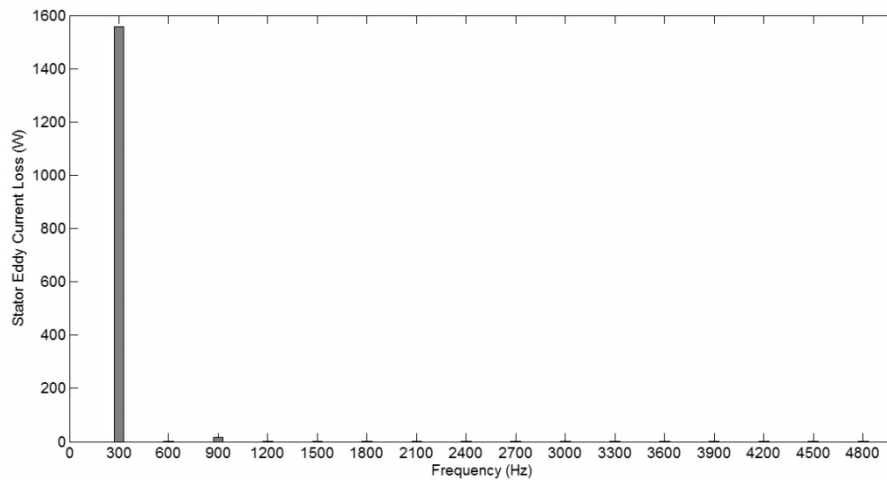
د) تلفات آهن کل

شکل ۳-۴: توزیع متوسط تلفات آهن در یک سیکل الکتریکی در حالت مدار باز

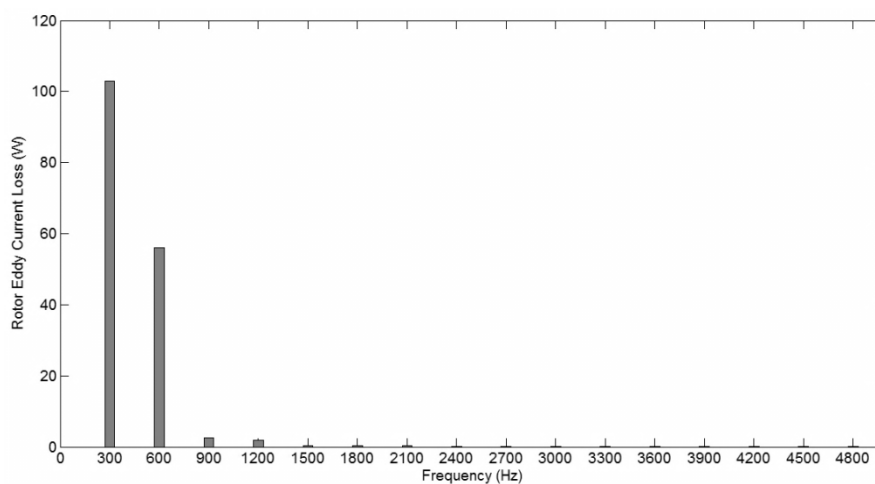
در ادامه به بررسی عددی تلفات آهن در حالت مدار باز پرداخته می‌شود. قبل از این کار، مناسب است در رابطه با منظور نمودن هارمونیک‌های شار در محاسبه تلفات هیستریزیس و ادی به یک نکته اشاره شود. با توجه به اینکه در مورد تلفات هیستریزیس حلقه‌های فرعی کاملاً با حلقه‌های اصلی متفاوتند به کارگیری تحلیل فرکانسی و جمع آثار در مورد تلفات هیستریزیس به نتایج غیر دقیقی منتهی می‌شود. لذا آنالیز فرکانسی تنها در مورد تلفات ادی به کار می‌رود [۱۰].

شکل ۳-۵ تلفات ادی مربوط به هر یک از مؤلفه‌های فرکانسی چگالی شار را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که تلفات ادی استاتور، فقط با هارمونیک‌های فرد چگالی شار به وجود می‌آیند در حقیقت به دلیل تقارن ساختاری هارمونیک‌های زوج هرگز به وجود نمی‌آیند. عمده تلفات حاصل از مؤلفه اصلی شار می‌باشد و بعد از هارمونیک اول تلفات حاصل از هارمونیک سوم بیشتر از هارمونیک‌های مرتبه بالاتر است. به هر حال، بر عکس استاتور همه هارمونیک‌ها اعم از زوج و فرد در ایجاد تلفات ادی روتور سهم دارند. همچنین باید توجه کرد که هر چند هارمونیک اصلی شار سهم عمده در تلفات ادی استاتور دارد و سهم هارمونیک‌های دیگر در مقایسه با هارمونیک اصلی بسیار ناچیز است، ولی هارمونیک‌های مرتبه بالاتر به خصوص هارمونیک مرتبه دوم سهم قابل توجه در تلفات ادی روتور ایفا می‌کند. کمی کنجکاو در رابطه با این نتیجه بسیار جالب است، به این معنی که در نگاه اول به نظر می‌رسد رفتار ماشین TFPM قطب چنگالی شبیه به رفتار ماشین سنکرون معمول در شرایط تغذیه نامتعادل می‌باشد. در ماشین‌های سنکرون معمول میدان چپ‌گرد حاصل از جریان‌های نامتعادل نسبت به روتور با سرعت سنکرون در جهت عکس گردش روتور می‌چرخد. بنابراین سرعت نسبی بین میدان چپ‌گرد و روتور دو برابر سرعت سنکرون می‌باشد و این باعث ایجاد تلفات آهن با فرکانس دو برابر در روتور می‌شود. در ماشین TFPM چنین پدیده‌ای به دلیل عدم وجود تزویج بین فازها مفهومی ندارد. در واقع این ماشین‌ها اساساً از تئوری ماشین‌های تک فاز به هم کوپل شده تبعیت می‌کنند و کوپلینگ فازها با شیفت فاز مناسب فقط باعث هم‌پوشانی تغییرات گشتاور و بنابراین کاهش رپل سرعت و لرزش می‌شود. با این توصیف مؤلفه تلفات هارمونیک دوم در روتور علت دیگری دارد. در

حقیقت تغییر جهت شار در هر متمرکز کننده شار دو بار در هر سیکل الکتریکی عامل اصلی مؤلفه تلفات هارمونیک دوم در روتور می باشد. متأسفانه عملکرد شبیه به عدم تعادل در طرف روتور هنگام تغذیه متعادل از طرف استاتور شاید یک نقطه ضعف برای این ساختار ماشین بشمار رود. البته باید توجه شود که خوشبختانه این پدیده بر عکس ماشین های معمول هرگز باعث ایجاد مؤلفه چپ گرد گشتاور نمی شود. نکته آخر اینکه در همه شکل های ارائه شده در زیر، هارمونیک های ناشی از حضور هارمونیک های زمانی حاصل مدار سوئیچینگ و منبع تغذیه، منظور نشده اند.



الف) تلفات ادی استاتور



ب) تلفات ادی روتور

شکل ۳-۵: آنالیز هارمونیک تلفات ادی در حالت مدار باز

جدول ۱-۳ به صورت عددی، تمام نتایج مربوط به تلفات آهن در حالت مدار باز را در اختیار می‌گذارد. این جدول به عنوان خلاصه نتیجه شبیه‌سازی این بخش به وضوح هر کدام از مؤلفه‌های تلفات ادی و هیستریزیس و به تفکیک در هر فاز و در هر بخش استاتور و روتور و تلفات آهن کل ماشین را نشان می‌دهد. قطعاً چنین جدولی کمک شایانی در طراحی و بهینه‌سازی ماشین و سیستم خنک کننده می‌کند.

جدول ۱-۳: نتایج عددی مربوط به تلفات آهن در حالت مدار باز

تلفات آهن کل (وات)				تلفات ادی (وات)				تلفات هیستریزیس (وات)				
کل	z	y	x	کل	z	y	x	کل	z	y	x	
۴۴۰	۲۸۷	۹۴	۵۹	۱۶۶	۱۰۰	۴۰	۲۶	۲۷۴	۱۸۷	۵۴	۳۳	روتور هر فاز
۴۱۴۶	۲۱۷۴	۱۶۸۸	۲۸۴	۱۵۸۱	۸۴۱	۶۴۰	۱۰۰	۲۵۶۵	۱۳۳۳	۱۰۴۸	۱۸۴	استاتور هر فاز
۴۵۸۶	۲۴۶۱	۱۷۸۲	۳۴۳	۱۷۴۷	۹۴۱	۶۸۰	۱۲۶	۲۸۳۹	۱۵۲۰	۱۱۰۲	۲۱۷	هر فاز
مجموع تلفات آهن در کل موتور (وات) = ۲۷۵۱۶												

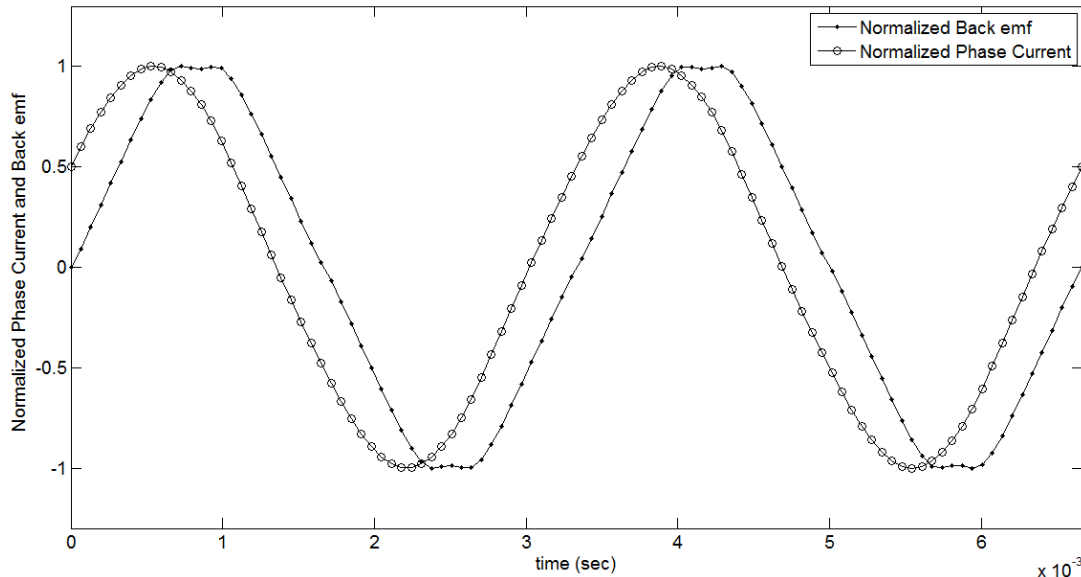
۳-۲-۳- تلفات در بار کامل

در این حالت موتور توان مورد نیاز بار را در سرعت و گشتاور نامی تأمین می‌کند.

۳-۲-۱- تلفات آهن در بار کامل

رژیم عملکردی ماشین‌های الکتریکی متنوع می‌باشد. در اینجا این سؤال اساسی مطرح می‌شود که در شرایط عملکردی مختلف تلفات آهن ماشین چگونه تغییر می‌کند. برای پاسخ به این سؤال ابتدا به محاسبه تلفات آهن در بار کامل پرداخته می‌شود. برای این کار قبل از هر چیز باید جریان حالت دائمی و سرعت و موقعیت نسبی بین روتور و استاتور در حین چرخش (توابعی از زمان) را که از شبیه‌سازی دینامیکی-گذرای ماشین در محیط Matlab/Simulink بدست می‌آیند را به نرم افزار اجزاء محدود معرفی و یا اعمال کنیم. اختلاف فاز بین جریان ورودی و ولتاژ داخلی و تغییرات لحظه-ای این پارامترها همزمان با جابجایی روتور نقش اساسی در تلفات آهن دارند. در شکل ۳-۶ جریان

ورودی و ولتاژ داخلی یک فاز از ماشین به صورت نرمالیزه شده بر حسب مقدار ماکزیمم آن‌ها، در کنار هم ترسیم شده‌اند.



شکل ۳-۶: جریان ورودی و ولتاژ داخلی یک فاز از ماشین به صورت نرمالیزه شده بر حسب مقدار ماکزیمم آن‌ها

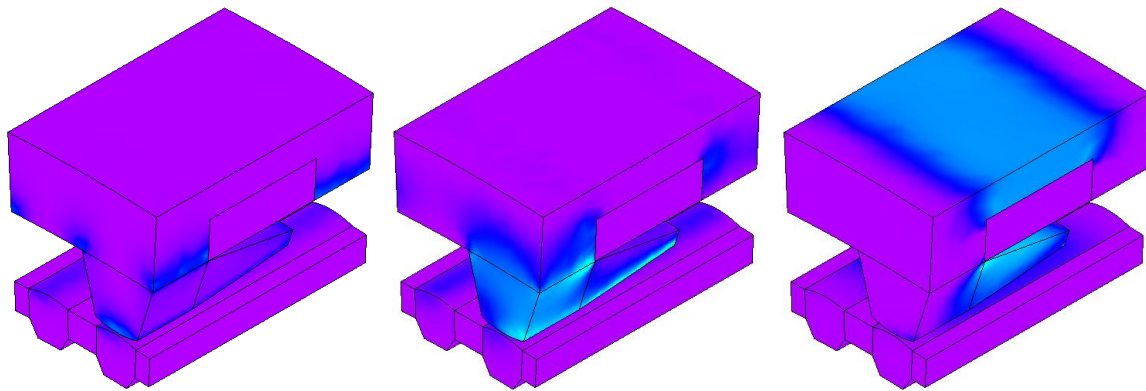
با شبیه‌سازی ماشین در حال چرخش و جریان‌های لحظه‌ای حالت دائمی در شرایط بار کامل با نرم افزار اجزاء محدود توزیع تلفات ماشین محاسبه می‌شود. شکل ۳-۷ تا شکل ۳-۹، به ترتیب توزیع تلفات هیستریزیس، تلفات ادی و تلفات آهن کل هسته را به همراه هر یک از مؤلفه‌های فضایی آن‌ها نشان می‌دهند. در مورد این نتایج می‌توان به نکاتی مشابه با مطالبی که در مورد نتایج مربوط به حالت مدار باز مطرح شد اشاره کرد. برای اجتناب از اضافه گویی در اینجا فقط در رابطه با تفاوت‌های اساسی تلفات آهن در بار کامل و تلفات آهن در حالت مدار باز نکاتی ارائه می‌شود:

نکته ۱ در بار کامل چگالی تلفات در اکثر نقاط هسته کمتر از چگالی تلفات در حالت مدار باز است. این موضوع الزاماً در مورد هر ماشین و هر شرایط تغذیه‌ای صحیح نیست. در این موتور، با توجه به این که دامنه ولتاژ ورودی از دامنه ولتاژ داخلی کمتر است، انتظار چنین حالتی می‌رفت. در شرایط

عملکرد با ولتاژ نامی شار فاصله هوایی و به تبع آن شار در بخش‌های مختلف ماشین برای انطباق با ولتاژ ترمینال کاهش می‌یابد. به همین دلیل است که در یک ماشین الکتریکی، در شرایط اتصال کوتاه، شار فاصله هوایی و شار هسته استاتور و بنابراین تلفات آهن بسیار کم می‌باشد.

نکته ۲ در بار کامل تقارن نسبی توزیع چگالی تلفات در برخی از قسمت‌ها (از جمله پاشنه‌های کفشک قطب استاتور و متمرکز کننده‌های شار) از بین می‌رود. علت این موضوع عکس‌العمل آرمیچر است، که باعث می‌شود شار آرمیچر و شار منته‌ج فاصله هوایی در حالت بار کامل در لحظاتی حداکثر شوند که کفشک قطب و متمرکز کننده شار روبروی هم نیستند در صورتی که در حالت مدار باز شار آرمیچر صفر است و شار فاصله هوایی در لحظه‌ای ماکزیمم می‌شد که کفشک قطب و متمرکز کننده شار کاملاً روبروی هم قرار داشتند.

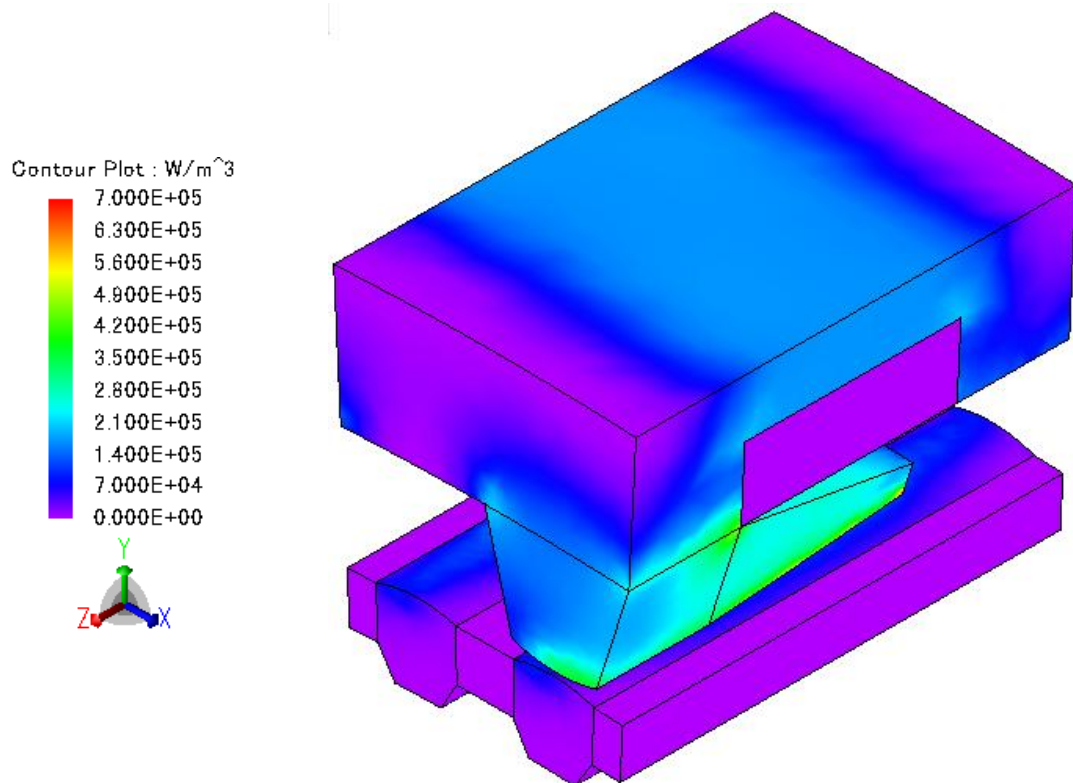
آنالیز هارمونیک تلفات ادی در شکل ۳-۱۰ نمایش داده شده است. جدول ۳-۲ به صورت عددی، تمام اطلاعات مربوط به تلفات آهن در بار کامل را در اختیار می‌گذارد. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، تقریباً تمام مؤلفه‌های تلفات آهن در بار کامل نسبت به حالت مدار باز کاهش یافته است. با این کاهش مؤلفه‌های تلفات، تلفات آهن کل در کل موتور در شرایط بار کامل، بیش از ۴ کیلووات کمتر از تلفات کل حالت مدار باز شده است. به همین دلیل است که تلفات آهن را در تقریباً همه ماشین‌های الکتریکی AC، متناسب با مجذور ولتاژ پشت مقاومت سیم‌پیچی و راکتانس پراکندگی هر فاز فرض می‌کنند و با یک مقاومت الکتریکی موازی در هر فاز مدل می‌نمایند. چنین مدل‌سازی تلفات آهن ماشین TFPM نیز در تمامی ولتاژهای ترمینال و شرایط بار مختلف نتایج معقول و منطقی ارائه می‌کند. برای محاسبه مقاومت معادل تلفات آهن، یکی از نتایج شبیه‌سازی‌های فوق، ترجیحاً برای مطابقت با استانداردها نتایج محاسبات مربوط به مدار باز، می‌تواند بکار گرفته شود و مقاومت معادل محاسبه شده به صورت موازی در هر فاز پشت مقاومت و اندوکتانس پراکندگی منظور شود. مدل بدست آمده با این روش برای تمامی شرایط عملکرد دائمی و گذرا با یک دقت قابل قبول می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.



ج) تلفات هیستریزیس مربوط به مؤلفه x چگالی شار

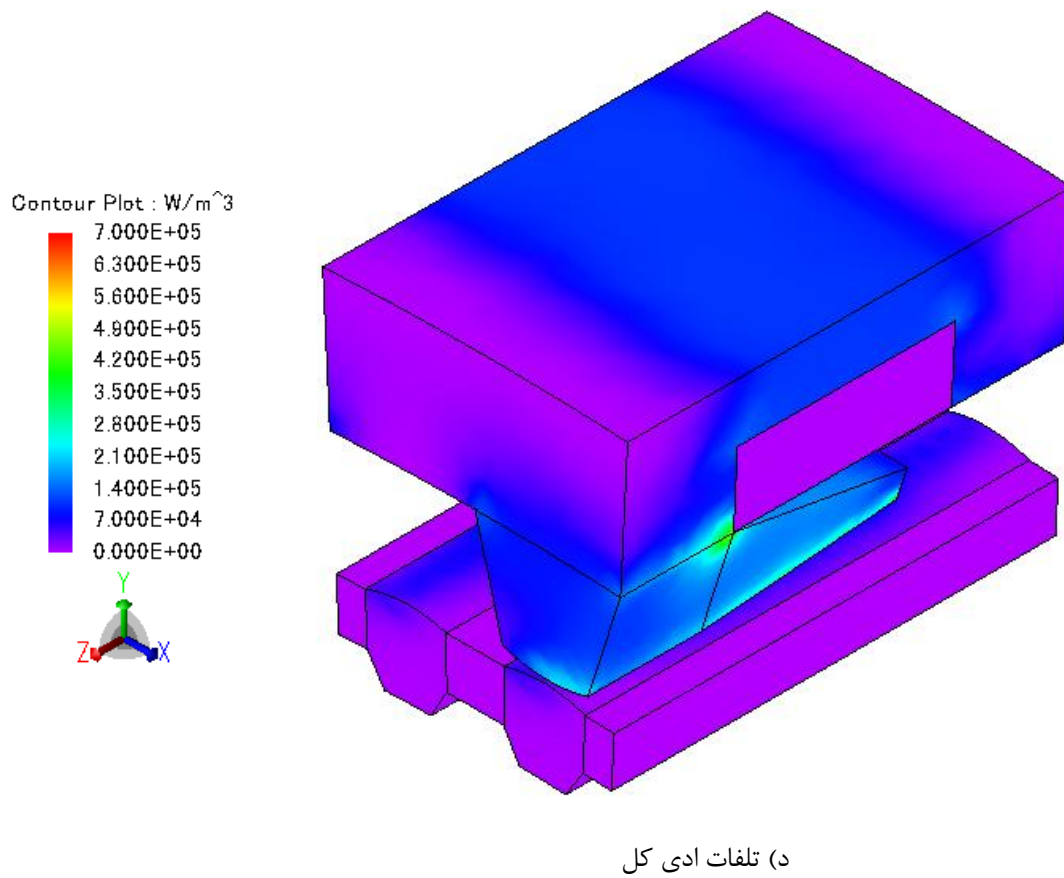
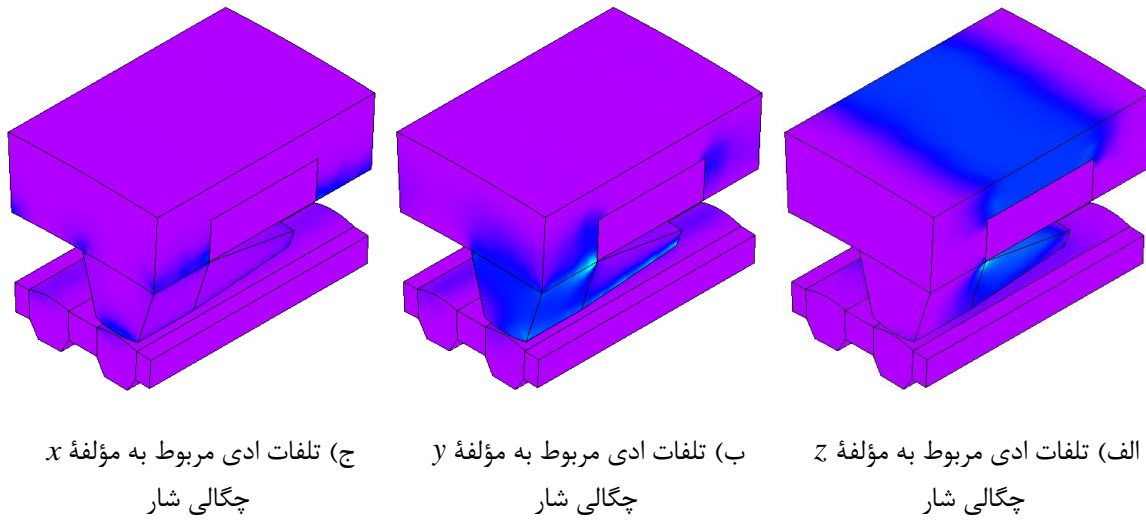
ب) تلفات هیستریزیس مربوط به مؤلفه y چگالی شار

الف) تلفات هیستریزیس مربوط به مؤلفه z چگالی شار

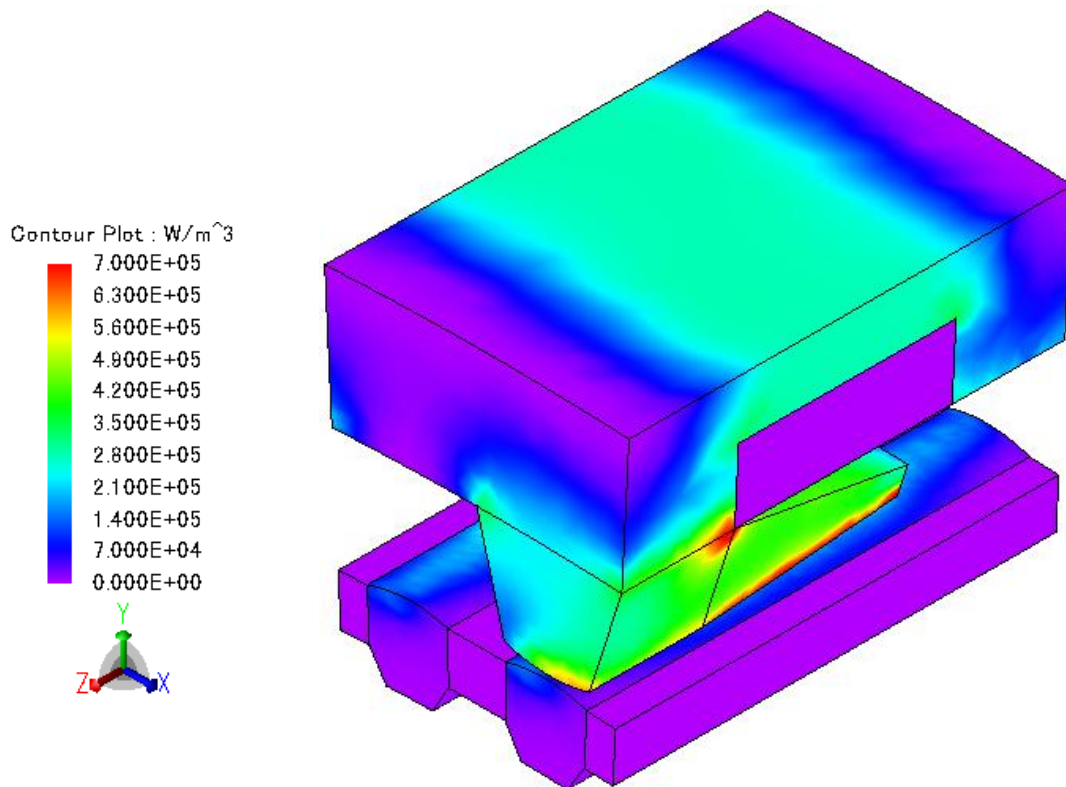
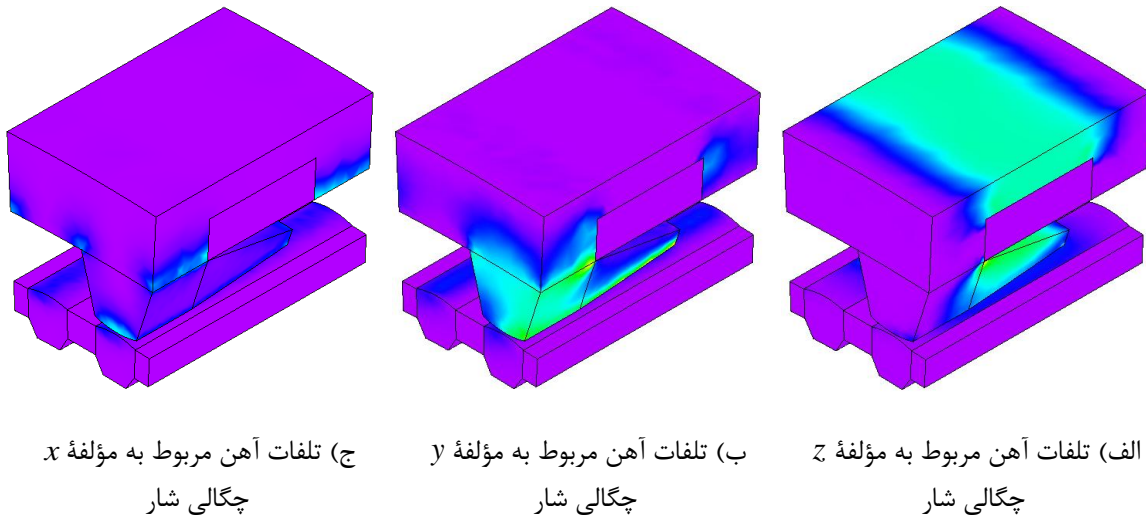


د) تلفات هیستریزیس کل

شکل ۳-۷: توزیع متوسط تلفات هیستریزیس در یک سیکل الکتریکی در بار کامل

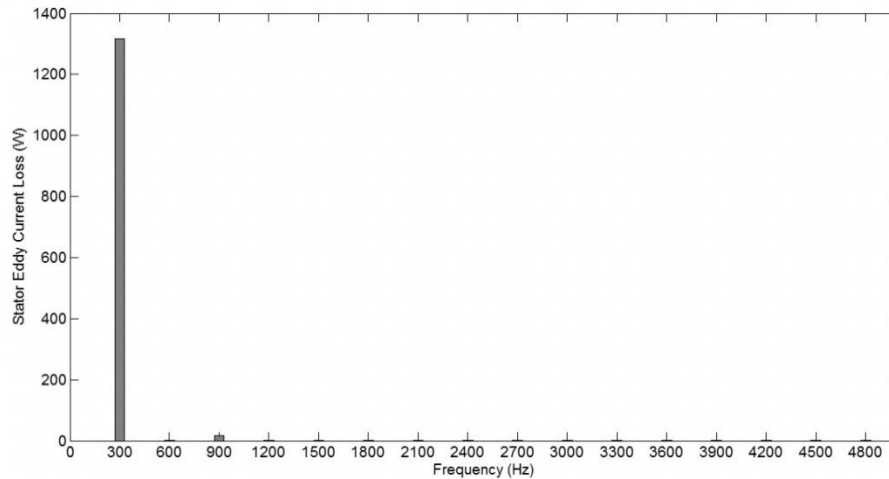


شکل ۳-۸: توزیع متوسط تلفات ادی در یک سیکل الکتریکی در بار کامل

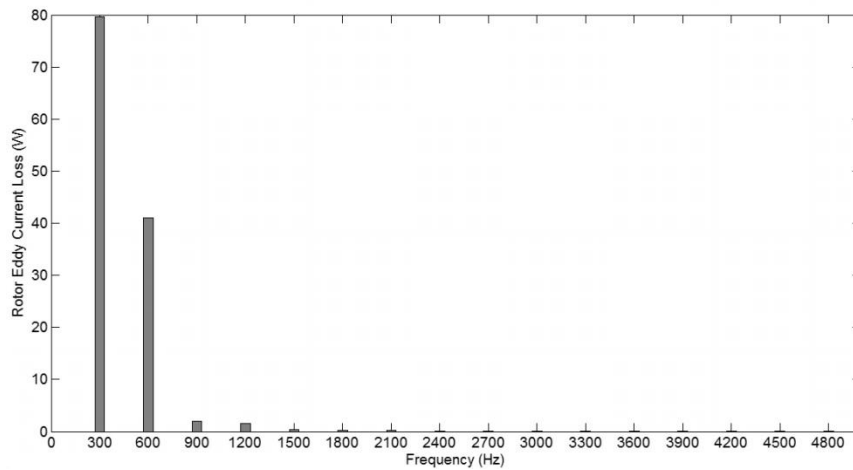


د) تلفات آهن کل

شکل ۳-۹: توزیع متوسط تلفات آهن در یک سیکل الکتریکی در بار کامل



الف) تلفات ادی استاتور



ب) تلفات ادی روتور

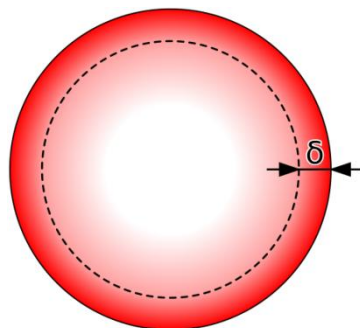
شکل ۳-۱۰: آنالیز هارمونیک تلفات ادی در بار کامل

جدول ۳-۲: نتایج عددی مربوط به تلفات آهن در بار کامل

تلفات آهن کل (وات)				تلفات ادی (وات)				تلفات هیستریزیس (وات)				
کل	z	y	x	کل	z	y	x	کل	z	y	x	
۳۵۰	۲۴۰	۶۷	۴۳	۱۲۶	۷۸	۲۹	۱۹	۲۲۴	۱۶۲	۳۸	۲۴	روتور هر فاز
۳۵۳۲	۱۹۱۴	۱۳۶۸	۲۵۰	۱۳۳۸	۷۴۴	۵۰۸	۸۶	۲۱۹۴	۱۱۷۰	۸۶۰	۱۶۴	استاتور هر فاز
۳۸۸۲	۲۱۵۴	۱۴۳۵	۲۹۳	۱۴۶۴	۸۲۲	۵۳۷	۱۰۵	۲۴۱۸	۱۳۳۲	۸۹۸	۱۸۸	هر فاز
مجموع تلفات آهن در کل موتور (وات) = ۲۳۲۹۲												

۳-۳-۲- تلفات مسی سیم پیچ

در یک هادی حامل جریان متغیر با زمان، جریان به گونه‌ای توزیع می‌شود که چگالی جریان نزدیک سطح هادی بالاترین مقدار را دارا است و هر چه به مرکز هادی نزدیک‌تر می‌شویم، چگالی جریان کمتر می‌شود. به این پدیده اثر پوستی گفته می‌شود. در این حالت بخش بزرگی از جریان الکتریکی (حدود ۶۳٪) در "پوسته"^۱ هادی، بین سطح خارجی و سطحی که در مرز داخلی عمق پوستی قرار دارد، جریان می‌یابد. این سطح در شکل ۳-۱۱ با نقطه چین نشان داده شده است. اثر پوستی باعث کاهش سطح مقطع مؤثر هادی و بنابراین افزایش مقاومت هادی می‌شود. این افزایش مقاومت در فرکانس‌های بالاتر بیشتر مشهود است. اثر پوستی به علت جریان‌های گردابی به وجود آمده با جهت مخالف جریان اصلی در اثر میدان مغناطیسی متغیر با زمان پدید می‌آید. شکل ۳-۱۲ به صورت تصویری نحوه به وجود آمدن اثر پوستی را نشان می‌دهد [۲۷].

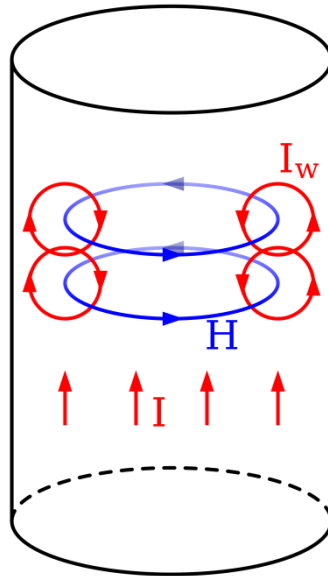


شکل ۳-۱۱: توزیع جریان متغیر با زمان در یک هادی استوانه‌ای [۲۷]

برای توصیف اثر پوستی، توزیع چگالی جریان (J) در هر نقطه داخلی یک هادی، با یک تابع نمایی بر حسب فاصله تا سطح هادی (d) به صورت زیر بیان می‌شود [۲۷]:

$$J = J_s e^{-\frac{d}{\delta}} \quad (۳-۳)$$

^۱ Skin



شکل ۳-۱۲: ایجاد اثر پوستی در اثر جریان‌های گردابی [۲۷]

در معادله (۳-۳) J_s چگالی جریان در سطح هادی است و δ عمق پوستی نامیده می‌شود. بدین ترتیب عمق پوستی را می‌توان به صورت عمقی از سطح هادی فرض کرد که در آن چگالی جریان به مقدار $1/e$ چگالی جریان در سطح هادی افت می‌کند. عمق پوستی هادی‌ها ممکن است به کمک رابطه زیر تقریب زده شود [۲۷]:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu}} \quad (۴-۳)$$

در رابطه (۴-۳) σ هدایت ویژه هادی، ω فرکانس زاویه‌ای ($\omega = 2\pi f$) و μ پرماییلیت یا نفوذپذیری مغناطیسی هادی می‌باشند.

برای موتور مورد بررسی این پایان‌نامه با توجه به فرکانس جریان هادی‌های استاتور ۳۰۰ هرتز، عمق پوستی برابر با ۳/۷۵۸ میلی‌متر بدست می‌آید. بنابراین انتظار می‌رود که برای این هادی بخش عمده جریان در پوسته‌ای به عمق کمتر از ۴ میلی‌متر از سطح هادی جاری شود. بنابراین فرض جریان یکنواخت کاملاً نادرست است.

با توجه به این که هادی‌های بکار رفته برای سیم‌پیچ یک لایه از ماشین فضای مستطیلی با ابعاد

50.5mm×18mm را اشغال می‌کند، می‌توان گفت که اگر یک هادی تک رشته‌ای با این ابعاد استفاده شود به دلیل اثر پوستی استفاده از مس غیر بهینه خواهد بود. به هر حال اگر این چنین هادی با سطح مقطع بزرگ بکار گرفته شود علاوه بر تجاوز چگالی جریان از حد مجاز در سطح هادی و بلا استفاده بودن هادی در بخش میانی، مقاومت مؤثر سیم‌پیچ و تلفات اهمی آن بسیار بزرگ خواهد بود. این مشکل و همچنین عدم انعطاف پذیری مکانیکی هادی با بکارگیری هادی‌های رشته‌ای مرتفع می‌شود. در هادی‌های چند رشته‌ای به جای استفاده از یک هادی با سطح مقطع بزرگ، از چند هادی عایق دار و سطح مقطع کوچک به صورت موازی استفاده می‌شود. قطر هر رشته از یک هادی چند رشته‌ای کمتر یا مساوی عمق پوستی محاسبه شده در فرکانس کار هادی است. با توجه به استاندارد IEC 317-0-1، قطر سیم استاندارد نزدیک به عمق پوستی محاسبه شده در فرکانس کار ۳۰۰ هرتز یعنی ۳/۷۵۸ میلی‌متر، مربوط به سیم شماره ۹ است که قطر آن ۰/۱۴۴ اینچ یا ۳/۶۵۸ میلی‌متر می‌باشد [۲۸]. با احتساب قطری برابر ۳/۵۳ میلی‌متر برای قسمت مسی این سیم، بدون احتساب عایق آن، سطح مقطع مؤثر این سیم برابر ۹/۷۸۷ میلی‌متر مربع خواهد بود. شکل ۳-۱۳ سیم‌پیچ موتور را با استفاده از این رشته سیم‌های موازی نشان می‌دهد.

تعداد رشته‌های مورد نیاز به وسیله حداکثر چگالی جریان مجاز به راحتی محاسبه می‌شود. به بیان ریاضی:

$$A_{total} = \frac{I_{rms}}{J_S} \quad (5-3)$$

در رابطه (۵-۳) A_{total} کل سطح مقطع مورد نیاز بر حسب میلی‌متر مربع، I_{rms} جریان مؤثر فاز بر حسب آمپر و J_S حداکثر چگالی جریان مجاز بر حسب آمپر بر میلی‌متر مربع است. به کمک شبیه‌سازی دینامیکی، جریان مؤثر هر فاز موتور مورد مطالعه تقریباً برابر ۱۳۰۰ آمپر خواهد شد. لذا:

$$A_{total} \approx \frac{1300}{6} = 216.67 \text{ mm}^2 \quad (6-3)$$

در نهایت، تعداد هادی‌های مورد نیاز از رابطه زیر محاسبه خواهد شد:

$$N_{wire} = \frac{A_{total}}{A_{wire}} \quad (7-3)$$

که در رابطه (7-3)، A_{wire} سطح مقطع هر رشته سیم بر حسب میلی‌متر مربع و N_{wire} تعداد هادی‌های مورد نیاز است.

برای ماشین مورد بررسی و برای هادی شماره ۹ خواهیم داشت:

$$N_{wire} = \frac{216.67}{9.787} = 22.14 \quad (8-3)$$

و تعداد هادی‌های مورد نظر برابر ۲۳ در نظر گرفته می‌شود. باید توجه داشت که اگرچه با رشته رشته کردن سیم پیچی اثر پوستی به شدت کاهش یافته است، ولی توزیع جریان در این رشته سیم‌ها نیز غیر یکنواخت بوده و در سطح آن‌ها بیشتر است. همچنین، در محاسبات فوق هارمونیک‌های جریان، و به خصوص هارمونیک‌های تزریق شده توسط درایو، منظور نشده‌اند، که اثر پوستی آن‌ها شدیدتر از مؤلفه اصلی است. به علاوه، اضافه بارها، تغییرات در شرایط عملکرد و خطاهای محتمل، ممکن است باعث آسیب دیدن این سیم پیچی با این تعداد هادی‌ها شود. با توجه به این موارد، تعداد هادی‌های مورد نیاز بیشتر از مقدار مورد نیاز، یعنی ۲۲ عدد در نظر گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن آرایش سیم پیچ به صورت سه ردیف ۱۲ تایی از هادی‌های موازی، تعداد ۳۶ عدد هادی موازی برای سیم پیچ هر لایه در نظر گرفته می‌شود.

مقاومت هر هادی برابر است با:

$$R_{wire} = \frac{\rho l}{A} = \frac{1.673 \times 10^{-8} \times 2\pi \times 0.656}{9.787 \times 10^{-6}} = 7.046 \times 10^{-3} \Omega \quad (9-3)$$

در نتیجه مقاومت کویل متشکل از این ۳۶ هادی موازی از تقسیم مقاومت هر هادی بر تعداد

هادی‌های موازی شده، یعنی ۳۶، بدست می‌آید. به بیان ریاضی:

$$R = \frac{7.046 \times 10^{-3}}{36} = 1.96 \times 10^{-4} \quad (10-3)$$

اما با توجه به سه دلیل زیر، مقاومت سیم‌پیچی باید از این مقدار بزرگ‌تر در نظر گرفته شود:

(۱) در محاسبه مقاومت از اثر پوستی چشم‌پوشی شده است. برای این منظور مقاومت واقعی باید

حداقل ۱/۲ برابر مقاومت محاسبه‌شده در نظر گرفته شود.

(۲) در محاسبه مقاومت، از مقاومت ویژه مس در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شده است.

این در حالی است که دمای سیم‌پیچ در حین کار موتور از این مقدار بیشتر بوده و در نتیجه

مقاومت ویژه نیز بزرگ‌تر می‌شود. این موضوع نیز باعث افزایش مقاومت می‌شود.

(۳) در محاسبه مقاومت، فقط طول کوئل در داخل شیار استاتور منظور شده است اما کابل‌کشی

از منبع تغذیه تا ترمینال ماشی، طول مؤثر کوئل را افزایش می‌دهد که خود باعث افزایش

مقاومت سیم‌پیچی می‌شود.

با در نظر گرفتن موارد فوق، با ۱/۵ برابر کردن مقاومت محاسبه شده، می‌توان تقریبی از مقاومت

واقعی را به دست آورد. حاصل این عمل مقاومتی برابر ۰/۳ میلی اهم خواهد بود.

با توجه به این که مدل‌سازی تمامی رشته سیم‌ها در محیط اجزاء محدود منجر به افزایش شدید

تعداد مش‌ها می‌شود، برای جلوگیری از طولانی شدن محاسبات فضای سیم‌پیچی به صورت محیطی

یکپارچه مدل می‌شود. فرض می‌شود که توزیع چگالی جریان در سیم‌پیچ یک دوری چند رشته‌ای یک

لایه از ماشین یکنواخت است. برای محاسبه تلفات اهمی، مقاومت سیم یک دوری چند رشته‌ای یک

لایه از ماشین، که در رابطه (۱۰-۳) محاسبه شد، به نرم‌افزار معرفی می‌شود. باید توجه داشت که

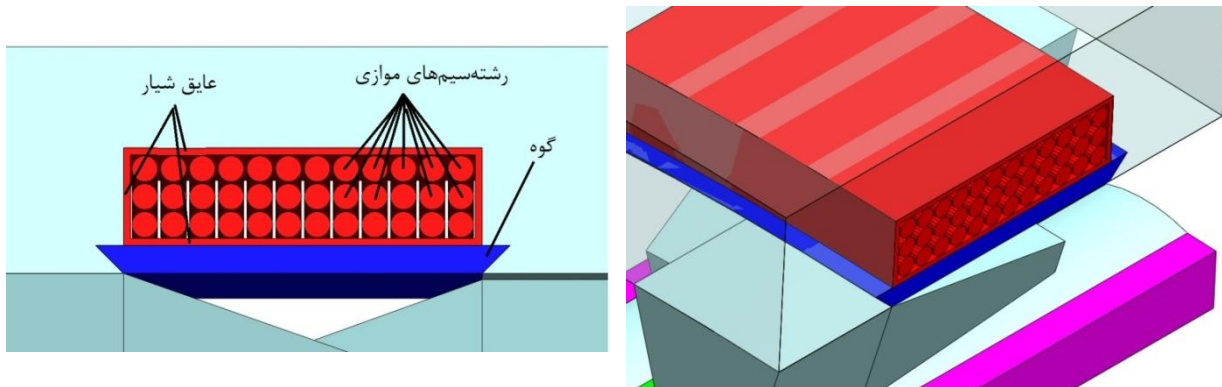
یکنواخت در نظر گرفتن جریان تأثیری در اندازه تلفات مسی ندارد، زیرا در محاسبه مقاومت سیم‌پیچ

فرض چند رشته‌ای بودن آن در نظر گرفته شده است. با این حال، با فرض توزیع جریان یکنواخت

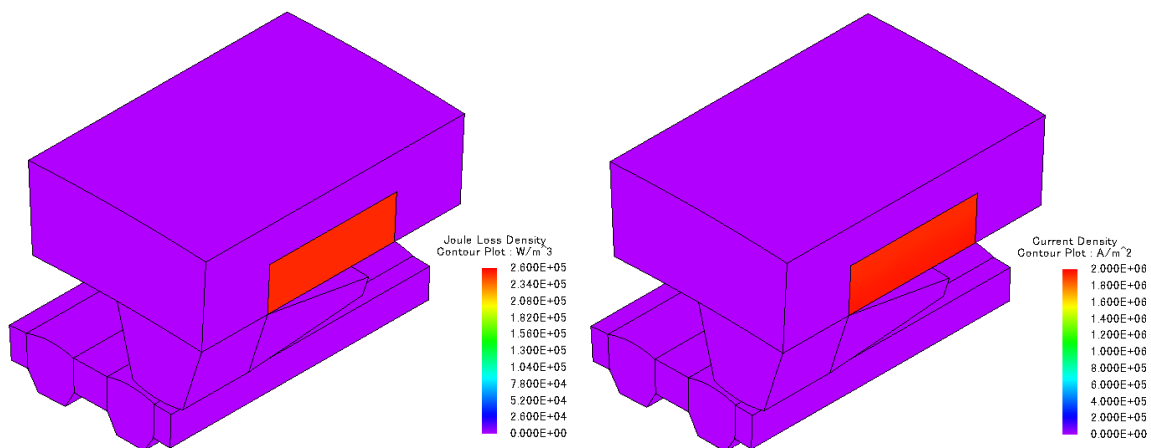
توزیع تلفات اهمی در فضای سیم‌پیچ نیز یکنواخت خواهد بود، که با آنچه در عمل اتفاق می‌افتد

اندکی متفاوت خواهد بود.

شکل ۳-۱۴ توزیع چگالی جریان معرفی شده به نرم افزار اجزاء محدود در لحظه ماکزیمم شدن جریان سیم را نشان می دهد. توزیع تلفات انرژی و یا چگالی تلفات مسی محاسبه شده توسط نرم افزار برای همان لحظه جریان ماکزیمم در شکل ۳-۱۵ نشان داده شده است.



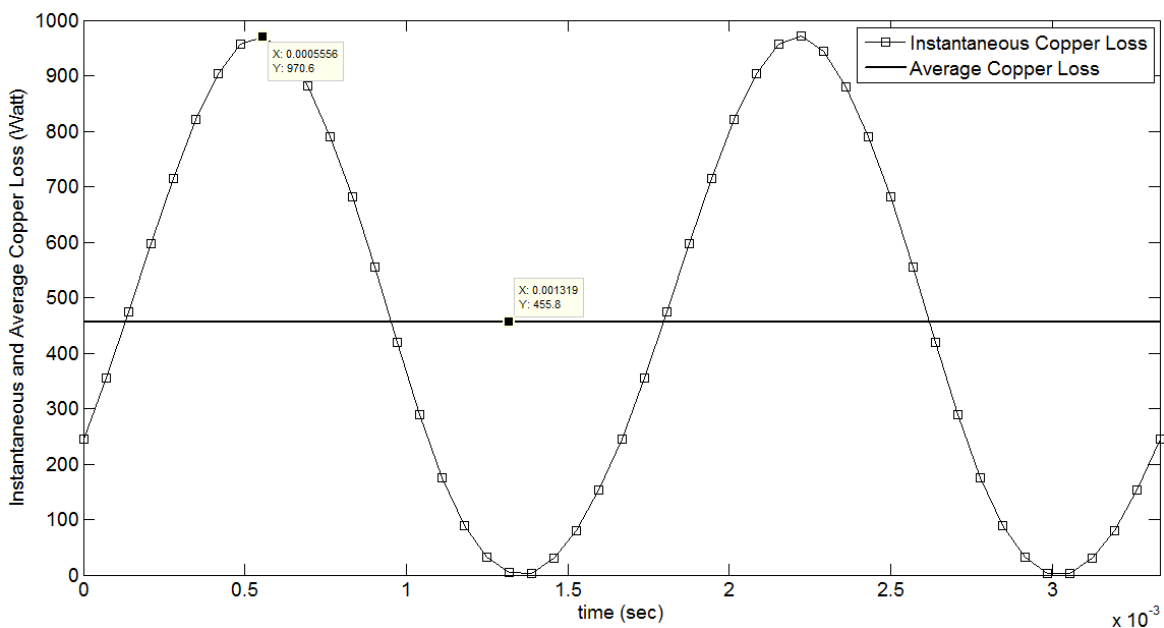
شکل ۳-۱۳: سیم پیچی چند رشته ای موتور برای کاهش اثر پوستی



شکل ۳-۱۴: توزیع چگالی جریان در لحظه ماکزیمم شدن جریان سیم پیچ یک فاز
 شکل ۳-۱۵: توزیع چگالی تلفات مسی سیم پیچ یک فاز در لحظه ماکزیمم شدن جریان سیم پیچ

با اعمال جریان در لحظات مختلف و با روند مشابه، توزیع تلفات و تلفات کل مسی برای لحظات مختلف بدست می آید. نتیجه این محاسبات برای تلفات مس یک فاز از ماشین به صورت تابعی از زمان

در شکل ۳-۱۶ نشان داده شده است. مقدار متوسط این تلفات بسیار کوچک یعنی حدود ۴۵۶ وات است که در همان شکل نمایش داده شده است. بدیهی است به دلیل تغذیه چند فاز مختلف، تلفات لحظه‌ای فازهای دیگر نیز بجز اختلاف در فاز مشابه همین فاز خواهد بود. جمع تلفات اهمی لحظه‌ای فازهای مختلف تلفات اهمی کل ماشین را نتیجه می‌دهد. تلفات اهمی لحظه‌ای کل ماشین چند فاز یک مقدار ثابت و برابر با حاصل ضرب تلفات متوسط یک فاز در تعداد فازها خواهد بود.



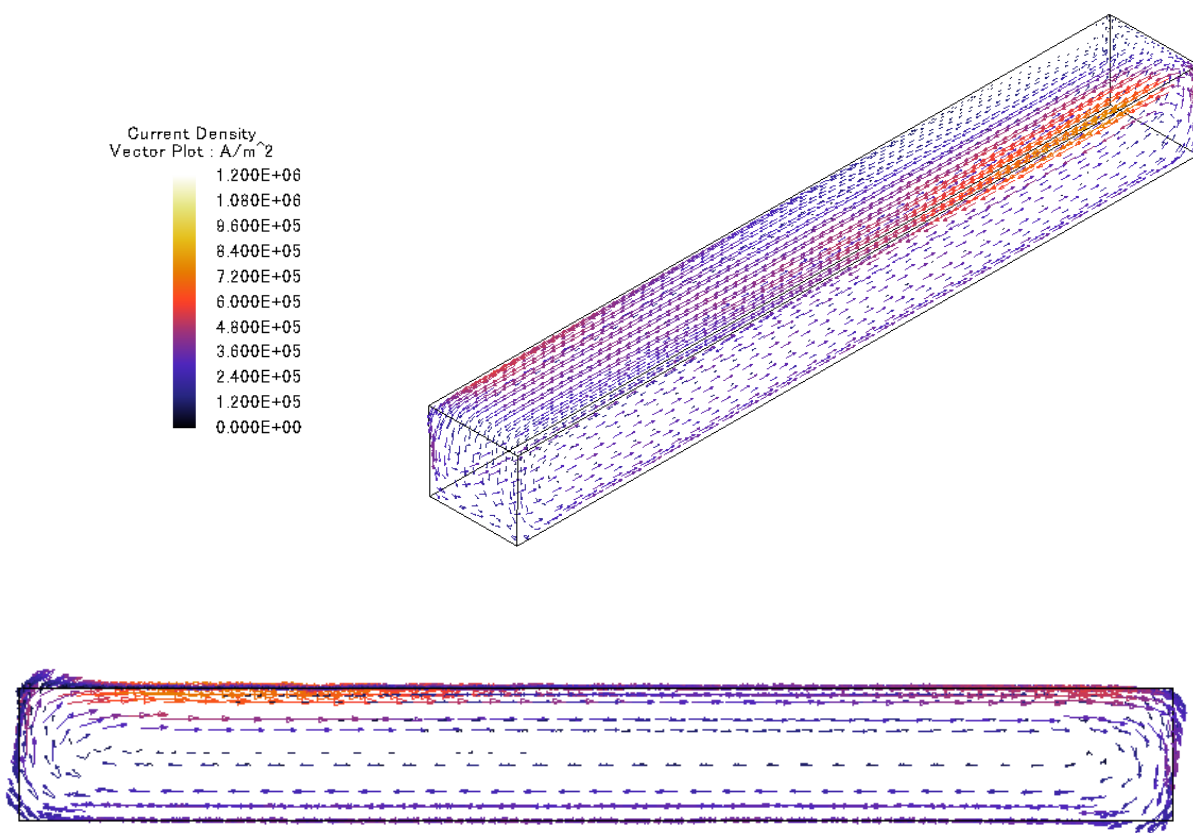
شکل ۳-۱۶: تلفات مسی لحظه‌ای و تلفات متوسط سیم پیچ یک فاز از ماشین در یک سیکل الکتریکی

۳-۳-۳- تلفات آهنرباهای دائم

این تلفات همان مکانیزم تلفات ادی را دارد. به علت تغییرات شار عبوری از داخل آهنرباهای دائم، که رسانا هستند، جریان‌های گردابی در آن‌ها به راه می‌افتد. تغییرات شار یا ناشی از تغییرات مقاومت مغناطیسی مسیر شار آهنرباهای دائم است و یا به علت هارمونیک‌های موجود در جریان استاتور است. برای کاهش این تلفات دو راه وجود دارد: (۱) تکه تکه کردن آهنرباهای دائم، به جای یکپارچه ساختن آن‌ها. (۲) کاهش هارمونیک‌های جریان در استاتور [۲۹]. البته تلفات آهنرباهای دائم در ماشین‌های سرعت پایین زیاد مسئله‌ساز نیست و این تلفات در ماشین‌های سرعت بالا مشکلاتی را

به همراه دارد.

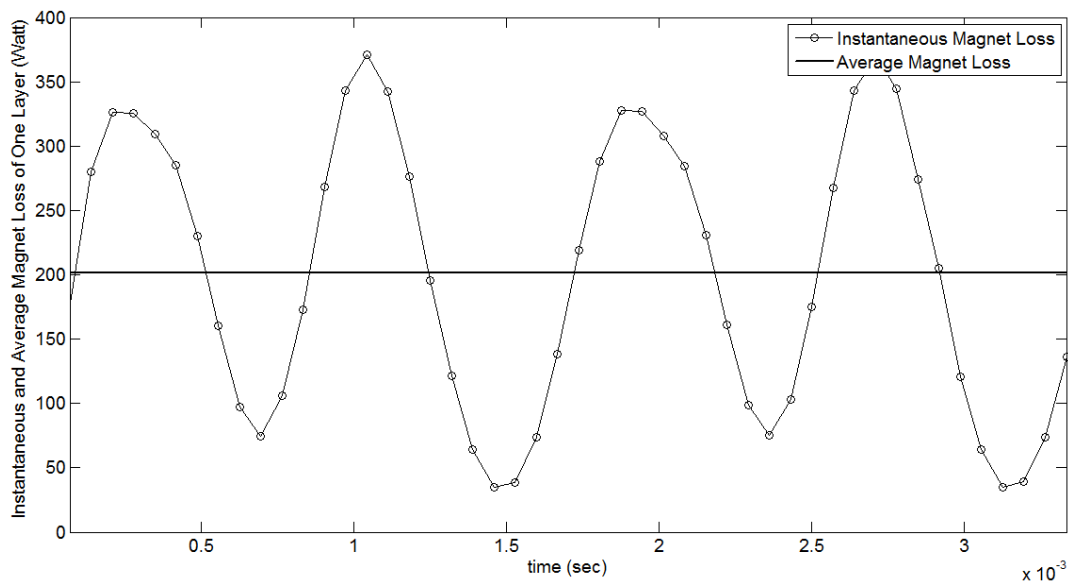
شکل ۳-۱۷ چگالی جریان ادی القا شده در یک مگنت را در یک لحظه خاص نشان می‌دهد. شکل ۳-۱۸ نیز مجموع تلفات لحظه‌ای و متوسط مگنت‌های یک فاز را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که تلفات متوسط هر فاز حدود ۲۰۰ وات است. به عبارت دیگر، تلفات متوسط هر عدد مگنت برابر $200/120=1.67$ وات است.



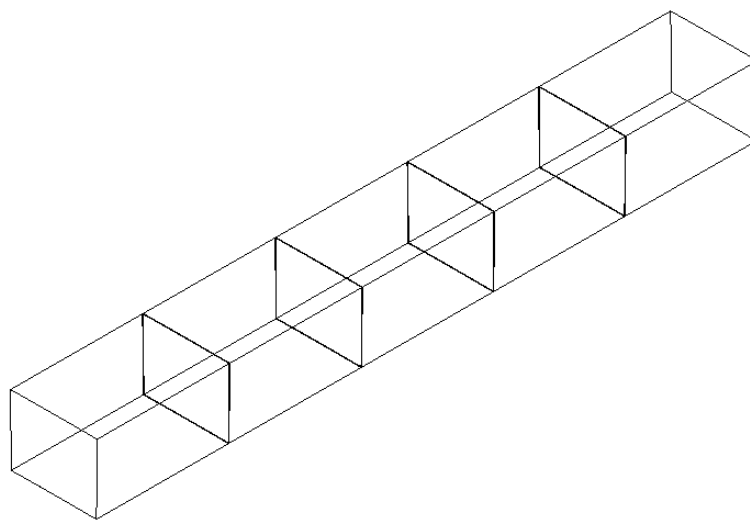
شکل ۳-۱۷: چگالی جریان ادی القا شده در یک مگنت در یک لحظه خاص

همان راه کاری که در مورد کاهش تلفات ادی در هسته‌های معمولی انجام می‌شود، در مورد مگنت‌ها نیز قابل کاربرد است. با تقسیم کردن مگنت به ۵ قسمت مساوی (مطابق شکل ۳-۱۹) مجدداً تلفات مگنت محاسبه می‌شود. چگالی جریان ادی مگنت در این حالت در شکل ۳-۲۰ نشان داده شده است. مجموع تلفات لحظه‌ای و متوسط مگنت‌های یک فاز در این حالت در شکل ۳-۲۱ نشان داده

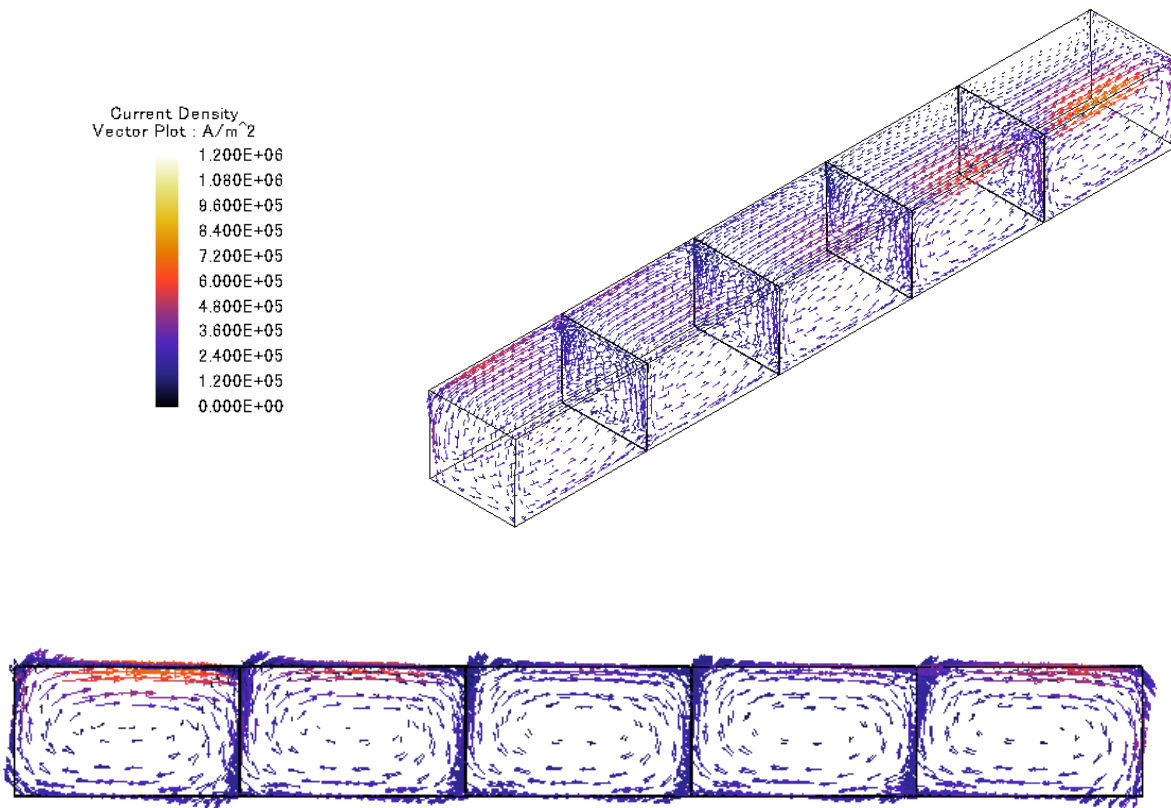
شده است. مشاهده می‌شود که با تکه تکه کردن مگنت‌ها، تلفات متوسط مگنت‌های هر فاز از ۲۰۰ وات به زیر ۱۵۰ وات، یعنی بیشتر از ۲۵٪، کاهش پیدا کرده است. با این حال این کاهش تلفات در برابر کل تلفات الکترومغناطیسی هر فاز ناچیز است و اگر تکه تکه کردن مگنت‌ها از لحاظ عملی مشکل باشد، یکپارچه ساختن آن‌ها مشکل چندانی به وجود نخواهد آورد.



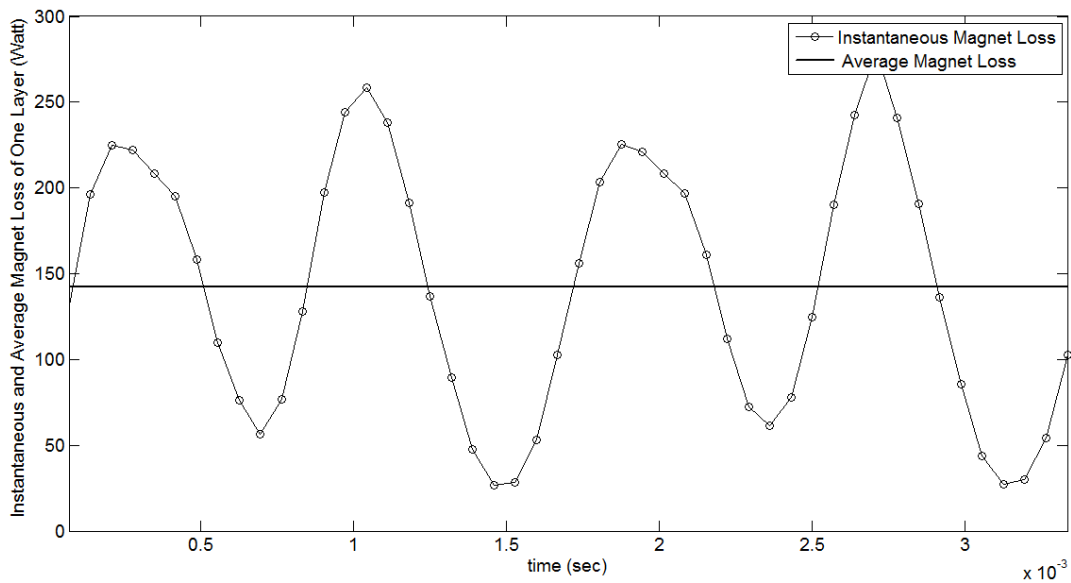
شکل ۳-۱۸: تلفات لحظه‌ای و متوسط مگنت‌های یک فاز



شکل ۳-۱۹: نحوه تقسیم کردن مگنت به ۵ قسمت مساوی



شکل ۳-۲۰: چگالی جریان ادی القا شده در تکه های یک مگنت در یک لحظه خاص



شکل ۳-۲۱: تلفات لحظه ای و متوسط مگنت های یک فاز با مگنت های جدید

فصل ۴:

تحلیل حرارتی موتور TFPM قطب چنگالی
و طراحی سیستم خنک ساز مناسب آن

در فصل گذشته توزیع تلفات ماشین در دو حالت مدار باز و بار کامل به دست آمد. نتایج محاسبات تلفات موتور در شرایط بار کامل به عنوان منابع حرارتی در تحلیل‌های حرارتی این فصل استفاده می‌شود. در این فصل از گزارش، پس از مقدمه کوتاهی در مورد مفاهیم انتقال حرارت به بحث در مورد محدودیت‌های حرارتی در ماشین‌های الکتریکی پرداخته می‌شود. سپس به کمک ترکیب روش اجزاء محدود و مدار معادل حرارتی، توزیع دمای موتور مورد مطالعه با در نظر گرفتن بدترین حالت ممکن در حالت همرفت طبیعی به دست می‌آید. این نتایج نشان می‌دهند که با توجه به محدودیت‌های حرارتی موجود، کارکرد موتور در شرایط همرفت طبیعی باعث آسیب دیدن آن می‌شود. لذا به منظور حفاظت از موتور، استفاده از یک سیستم خنک‌کننده مناسب الزامی است. بنابراین در ادامه این فصل به معرفی اجمالی سیستم‌های خنک‌کننده و نحوه انتخاب آن‌ها پرداخته می‌شود. با توجه به شرایط و ویژگی‌های موتور مورد بررسی، ژاکت آبی مناسب‌ترین گزینه برای خنک‌سازی موتور مورد مطالعه به نظر می‌رسد. در نهایت، پس از ارائه یک الگوریتم جامع برای طراحی ژاکت آبی، که در مراجع مورد بررسی مشابه آن یافت نشده است، طراحی کامل سیستم خنک‌ساز ماشین انجام می‌گیرد.

۴-۱- مروری کوتاه بر تئوری انتقال حرارت [۳۰]

انتقال حرارت دانشی است که به مطالعه انتقال انرژی بین دو جسم، به واسطه اختلاف دما، می‌پردازد. سه مکانیزم برای انتقال حرارت وجود دارد:

- هدایت یا رسانش^۱
- همرفت^۲
- تابش^۳

^۱ Conduction

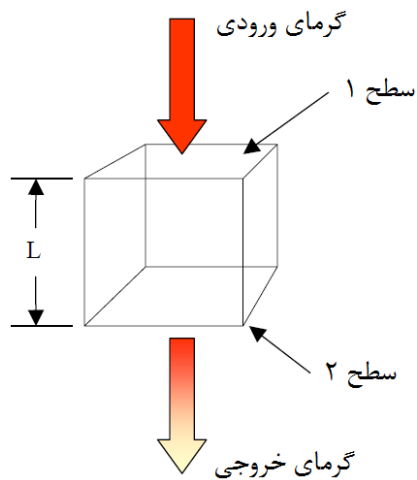
^۲ Convection

^۳ Radiation

۴-۱-۱- رسانش

رسانش نوعی مکانیزم انتقال حرارت است که در صورت وجود گرادیان دما در طول یک جسم رخ می‌دهد. در این حالت، انرژی به دلیل حرکت‌های مولکولی رندم از ناحیه با دمای بیشتر به ناحیه با دمای کمتر انتقال پیدا می‌کند (دیفیوژن). دماهای بالاتر مربوط به انرژی‌های مولکولی بیشتر هستند و وقتی این مولکول‌ها به مولکول‌های با انرژی کمتر برخورد می‌کنند، انتقال انرژی رخ می‌دهد.

انتقال گرمای هدایتی می‌تواند به وسیله ساده‌ترین نوع آن، یعنی "جریان گرمایی تک‌بعدی" توصیف شود، که در شکل ۴-۱ نشان داده شده است. در این شرایط، گرما از طریق یک سطح از جسم وارد و از سطح روبروی آن خارج می‌شود، و هیچ تلفات گرمایی از طریق سطوح جانبی جسم رخ نمی‌دهد. سطوح ۱ و ۲ در دمای ثابت نگه داشته شده‌اند. واضح است که در این نوع از انتقال حرارت هدایتی دمای جسم تنها تابعی از یک متغیر، یعنی فاصله از هر یک از سطوح ۱ یا ۲ است.



شکل ۴-۱: جریان گرمایی تک‌بعدی [۳۰]

نرخ انتقال حرارت به وسیله هدایت می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (۴-۱)$$

در رابطه (۱-۴) نرخ انتقال حرارت بر حسب وات، $\partial T/\partial x$ گرادیان دما در جهت جریان گرما بر حسب K/m ، K هدایت گرمایی ماده بر حسب W/mK و A مساحت سطح مقطع مسیر جریان گرما بر حسب متر مربع است.

معادله (۱-۴) با نام قانون هدایت گرمایی فوریه شناخته می‌شود. با توجه به این معادله، نرخ انتقال حرارت به وسیله رسانش در درون جسم نشان داده شده در شکل ۱-۴ می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$q = \frac{kA}{L} \Delta T_{12} \quad (۲-۴)$$

در معادله (۲-۴) مساحت سطح مقطع جسم، L ضخامت دیواره، ΔT_{12} اختلاف دمای بین سطوح ۱ و ۲ ($\Delta T_{12} = T_1 - T_2$) و K هدایت گرمایی ماده بر حسب W/mK است.

با بررسی معادلات (۱-۴) و (۲-۴)، نرخ انتقال حرارت می‌تواند به صورت یک جریان (شارش) در نظر گرفته شود، و ترکیب مقاومت حرارتی، ضخامت ماده و مساحت نیز به عنوان یک مقاومت در برابر این جریان در نظر گرفته شود:

$$\text{جریان گرمایی} = \frac{\text{اختلاف پتانسیل حرارتی}}{\text{مقاومت حرارتی}} \quad (۳-۴)$$

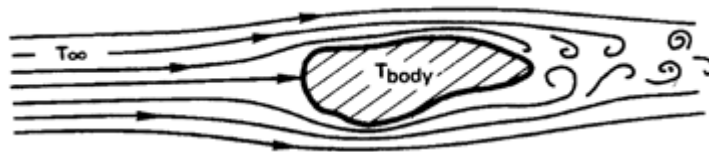
به عبارت دیگر، با تعریف مقاومت به صورت نسبت اختلاف پتانسیل حرارتی محرک به نرخ انتقال حرارت مربوطه، مقاومت حرارتی برای رسانش می‌تواند به صورت زیر مطرح شود:

$$R_{cond} = \frac{T_1 - T_2}{q} = \frac{L}{kA} \quad (۴-۴)$$

با توجه به رابطه (۴-۴)، مشاهده می‌شود که کاهش ضخامت و یا افزایش مساحت سطح مقطع یا هدایت حرارتی یک جسم، مقاومت حرارتی آن را کاهش و نرخ انتقال حرارت آن را افزایش می‌دهد.

۴-۱-۲- همرفت

انتقال حرارت همرفتی شامل دو مکانیزم است: (۱) حرکت مولکولی رندم (دیفیوژن)، و (۲) انتقال انرژی به وسیله حرکت ماکروسکوپیک سیال. انتقال حرارت همرفتی زمانی رخ می‌دهد که یک سیال خنک از کنار یک جسم گرم عبور می‌کند، که این حالت در شکل ۲-۴ نشان داده شده است. سیال مجاور یک ناحیه باریک با سرعت کمتر را تشکیل می‌دهد که لایه مرزی نامیده می‌شود. سرعت سیال در سطح جسم به علت عمل ویسکوز به صفر کاهش می‌یابد. بنابراین در این نقطه، حرارت تنها به وسیله رسانش انتقال می‌یابد. سپس سیال متحرک این حرارت را دور می‌کند. گرادیان دما در سطح جسم به نرخی بستگی دارد که سیال حرارت را دور می‌کند.



شکل ۲-۴: خنک سازی یک جسم گرم شده به روش همرفت [۳۰]

قانون خنک‌سازی نیوتون کل پدیده همرفت را توصیف می‌کند:

$$q = hA(T_w - T_\infty) \quad (۵-۴)$$

در معادله (۵-۴) آن A مساحت سطح، T_w دمای دیواره (سطح)، T_∞ دمای سیال و h ضریب انتقال حرارت همرفتی بر حسب W/m^2K است.

درست مانند رسانش، مقاومت حرارتی در انتقال حرارت همرفتی می‌تواند به صورت زیر بیان

شود:

$$R_{conv} = \frac{T_w - T_\infty}{q} = \frac{1}{hA} \quad (۶-۴)$$

انتقال حرارت همرفتی می‌تواند با توجه به طبیعت جریان سیال دسته‌بندی شود. همرفت اجباری

زمانی اتفاق می افتد که جریان سیال در اثر یک عامل خارجی مانند فن، پمپ و یا سایر موارد مشابه ایجاد شود. در حالیکه در همرفت طبیعی، جریان سیال به وسیله نیروهای بویانسی^۱، که در اثر چگالی های ناشی از تغییرات دمایی در سیال ایجاد می شوند، به وجود می آید. در خنک سازی به وسیله همرفت طبیعی، هوایی که با قسمت های داغ جسم تماس دارند، افزایش دما پیدا کرده و در نتیجه چگالی آن کاهش می یابد. به علت این که اکنون این هوای گرم از هوای اطراف سبک تر است، نیروهای بویانسی باعث دور شدن این هوای گرم از جسم شده و هوا با دمای محیط جایگزین آن می شود.

۳-۱-۴- تابش

تمام اجسام به وسیله تابش الکترومغناطیس انرژی ساطع می کنند. تابش الکترومغناطیسی انتشار یافته در اثر اختلاف دما، تابش حرارتی نامیده می شود. یک تابشگر گرمایی ایده آل، انرژی را با نرخی که متناسب با توان چهارم دمای مطلق آن و مساحت سطح آن است، ساطع می کند. بنابراین:

$$q_{emitted} = \sigma AT^4 \quad (۷-۴)$$

که در آن $\sigma = 5.669 \times 10^{-8} W/m^2K^4$ ثابت تناسب (ثابت استفان- بولتزمان^۲) است. معادله (۷-۴) قانون تابش گرمایی استفان- بولتزمان است که فقط در مورد تابشگر کامل کاربرد دارد. برای سطوحی که به صورت یک تابشگر کامل عمل نمی کنند، یک ضریب به نام تابندگی که تابش یک سطح را به تابش یک تابشگر ایده آل مرتبط می کند، معرفی می شود. به علاوه، باید توجه داشت که تمام تابشی که یک سطح را ترک می کند الزاماً به سطح دیگر نمی رسد. بنابراین، برای دو جسم با دماهای T_1 و T_2 تبادل حرارت تابشی می تواند به صورت زیر بیان شود:

$$q = F_{\varepsilon} F_G \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (۸-۴)$$

^۱ Buoyancy Forces

^۲ Stefan-Boltzmann Constant

در رابطه (۸-۴) F_ε تابع تابندگی^۱ و F_G تابع هندسی "ضریب دید"^۲ هستند. به علت این که تابش گرمایی می تواند به شدت پیچیده باشد، در اینجا یک مسئله تابشی ساده بررسی می شود که در آن یک انتقال حرارت تابشی بین یک سطح با دمای T_1 و یک سطح بسیار بزرگ تر با دمای T_2 ، که سطح اول را کاملاً در بر گرفته است، رخ می دهد. برای این چنین موردی، تبادل تابشی خالص می تواند با رابطه (۹-۴) محاسبه شود:

$$q = \varepsilon_1 \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (9-4)$$

در معادله (۹-۴) ε_1 تابندگی سطح با دمای T_1 و A_1 مساحت سطح آن است.

ضریب تابندگی، که مقدار آن در بازه $0 \leq \varepsilon_1 \leq 1$ تغییر می کند، معیاری است که نشان می دهد نسبت به تابشگر ایده آل، یک سطح به چه میزان انرژی را به صورت مؤثر ساطع می کند. ضریب تابندگی به شدت وابسته به جنس سطح و رنگ و جلای آن است و در کتاب های مربوط به انتقال حرارت مقادیر آن برای موارد مختلف ذکر شده است.

۴-۲- محدودیت های حرارتی ماشین های الکتریکی

علاوه بر وابستگی مشخصات به دما، برخی از مواد در اثر افزایش بیش از حد دما آسیب جدی می بینند. از مهم ترین این موارد می توان به آسیب دیدگی سیستم عایقی و آهنربای دائم در دماهای غیر مجاز اشاره نمود. در ادامه این دو مورد بیشتر مورد بررسی قرار می گیرند.

۴-۲-۱- مغناطیس زدایی حرارتی^۳ آهنربای دائم [۳۲]

در ماشین های مغناطیس دائم، حین چرخش، ممکن است پدیده مغناطیس زدایی رخ دهد که

^۱ Emissivity Function

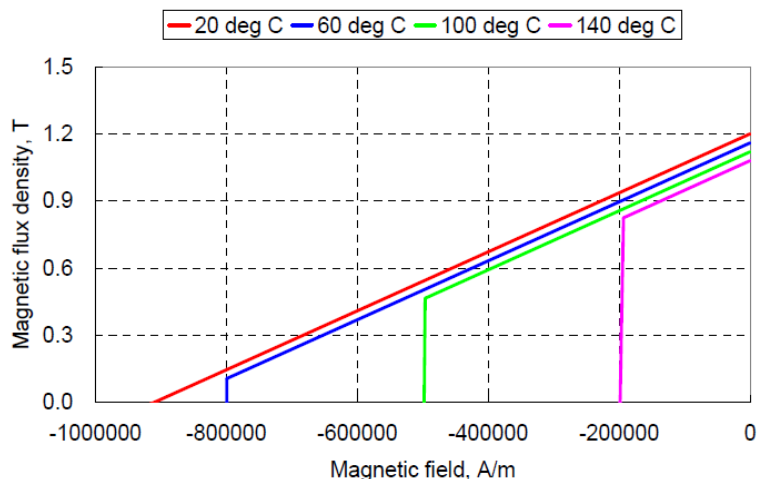
^۲ Geometric "View Factor" Function

^۳ Thermal Demagnetization

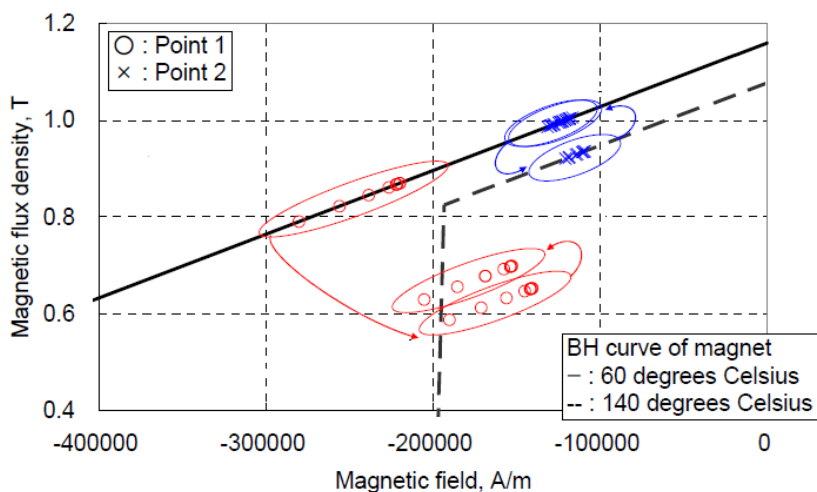
دلایل آن افزایش دمای مگنت و همچنین میدان مغناطیسی مخالفی است که توسط سیم پیچ ایجاد می شود. امروزه نیاز به تحلیل مغناطیس زدایی در ماشین های مغناطیس دائم مهم تر شده است، زیرا این پدیده می تواند عملکرد ماشین را به شدت تحت تأثیر قرار دهد.

یکی از موادی که خصوصیات آن با دما تغییر قابل توجهی می کند، آهنربای دائم است. شار تولیدی تمامی مگنت ها با افزایش دما کاهش می یابد، تا جایی که در دمایی موسوم به دمای کوری^۱، مگنت به کلی خاصیت مغناطیسی خود را از دست می دهد. دمای کوری برای هر مگنت منحصر به فرد است، اما به طور کلی می توان گفت که این دما برای خانواده NdFeB از بقیه مگنت ها کمتر است. کاهش شار مگنت ها باعث کاهش ولتاژ داخلی می شود و در نتیجه توان خروجی کاهش می یابد. با این حال تا زمانی که این پدیده برگشت پذیر باشد قابل تحمل است. مشکل اساسی زمانی ایجاد می شود که این پدیده شکل برگشت ناپذیر به خود بگیرد. شکل ۳-۴ و شکل ۴-۴ این موضوع را روشن تر می کنند. شکل ۳-۴ منحنی های BH یک مگنت را در دماهای مختلف نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش دما چگالی شار مگنت کاهش می یابد. در شکل ۴-۴ اثرات تغییرات دمایی در دو نقطه مختلف از یک قطعه آهنربای دائم نشان داده شده است. مشاهده می شود که در نقطه ۲ تغییرات دمایی بین ۶۰ و ۱۴۰ درجه سانتی گراد فرآیندی برگشت پذیر است. به این مفهوم که پس از بازگشت از دمای ۱۴۰ درجه به دمای ۶۰ درجه سانتی گراد، مگنت همان وضعیت مغناطیسی قبل از افزایش دما را پیدا می کند. اما در مورد نقطه شماره ۱ وضعیت متفاوت است. در اینجا پس از بازگشت دما از ۱۴۰ درجه به ۶۰ درجه سانتی گراد، وضعیت مغناطیسی مگنت مشابه حالت قبل از افزایش دما نیست. علت این است که پس از افزایش دما، نقطه کار مگنت از نقطه زانویی منحنی BH در دمای ۱۴۰ درجه عبور کرده است. این حالت به نوعی می تواند یک آسیب جدی برای ماشین مغناطیس دائم تلقی شود.

^۱ Curie Temperature



شکل ۳-۴: منحنی‌های BH یک مگنت خاص در دماهای مختلف [۳۱]



شکل ۴-۴: اثرات تغییرات دمایی در دو نقطه مختلف از مگنت شکل ۳-۴ [۳۱]

با توجه به توضیحات فوق باید به این نکات توجه نمود:

نکته ۱ مگنت به گونه‌ای انتخاب شود که در دمای کاری ماشین، منحنی BH آن با منحنی BH مورد

استفاده در طراحی ماشین تقریباً یکسان باشد.

نکته ۲ مگنت به گونه‌ای انتخاب شود که در افزایش دماهای احتمالی، هیچ نقطه‌ای از مگنت دچار

مغناطیس زدایی برگشت‌ناپذیر نشود.

همان طور که در پیوست گزارش بیان شده است، مگنت انتخابی برای استفاده در موتور مورد

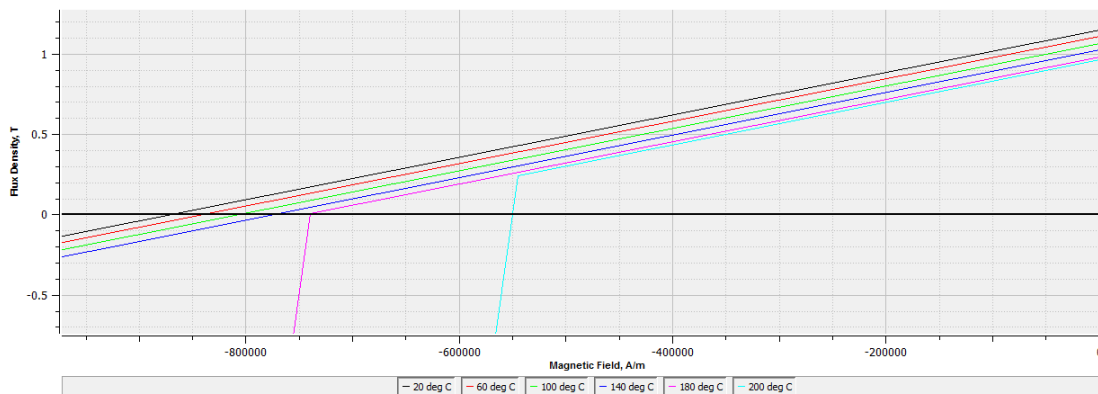
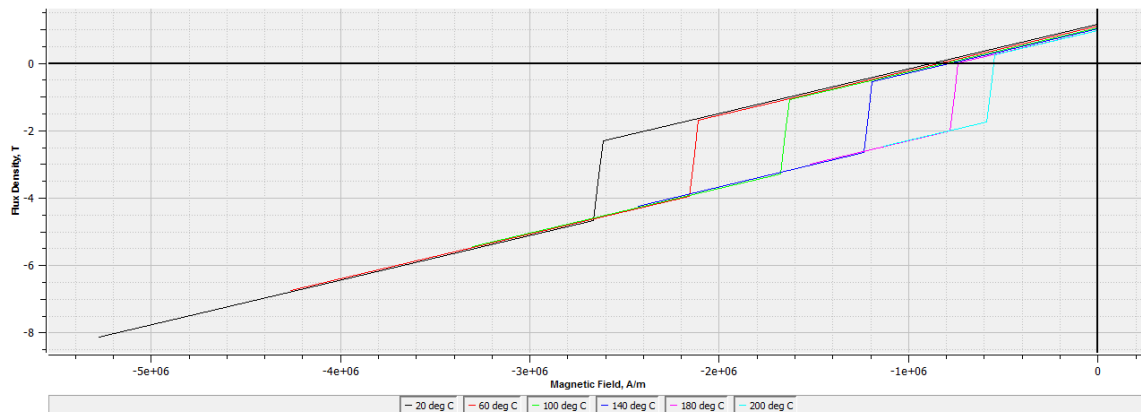
مطالعه از نوع NdFeB با چگالی شار پسماند یک تسلا است. کارخانه‌های مختلف مگنت‌های NdFeB را می‌سازند که مشخصات آن‌ها با هم متفاوت است. به عنوان مثال می‌توان به کارخانه‌های Hitachi، JSOL، TDK و Shin-Etsu اشاره کرد. هر کدام از محصولات این کارخانه‌ها با نام تجاری خاص خود روانه بازار می‌شوند. بنابراین انتخاب یکتایی برای مگنت مورد نیاز وجود ندارد و هر کدام از محصولاتی که مشخصات مورد نیاز را برآورده کند، می‌تواند برای استفاده در موتور انتخاب شود. مثلاً مگنت با نام تجاری NEOMAX-32EH محصول Hitachi(SSMC) که دسته منحنی‌های BH آن در شکل ۴-۵ رسم شده است، گزینه مناسبی برای استفاده در موتور است که نیازهای بیان شده در دو نکته فوق را برآورده می‌کند. از شکل ۴-۵ مشخص است که در دماهای زیر ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد، چگالی شار پسماند مگنت کمی از یک تسلا بیشتر است. این موضوع نکته مثبتی است، زیرا در این صورت اثر مغناطیس زدایی در اثر جریان‌های استاتور نیز می‌تواند جبران شود.

۴-۲-۲- آسیب‌دیدگی سیستم عایقی

قابلیت یک سیستم عایقی برای تحقق اهداف آن، تابعی از فاکتورهای حرارتی و فاکتورهای دیگر مانند استرس‌های الکتریکی و مکانیکی، لرزش، مواد شیمیایی، رطوبت، آلودگی و تابش است. در حین طراحی، تمام این فاکتورها باید در نظر گرفته شوند. یکی از مراجعی که می‌توان برای نحوه ارزیابی این جنبه‌ها از آن بهره برد، استاندارد IEC 60505 است. به هر حال، دما در یک تجهیز الکتریکی عمدتاً عامل اصلی فرسودگی مواد و سیستم‌های عایقی است. در این فصل از گزارش فقط به بررسی مسائل حرارتی مرتبط با سیستم‌های عایقی پرداخته می‌شود. تجربه نشان می‌دهد که تحت شرایط عملکرد نرمال، بسیاری از تجهیزات الکتریکی نظیر ماشین‌های گردان، ترانسفورماتورها و غیره، که بر اساس استانداردهای ارزیابی‌های حرارتی سیستم عایقی طراحی و ساخته شده‌اند، عمر اقتصادی رضایت بخش را خواهند داشت.

یکی شایع‌ترین عامل آسیب‌دیدگی ماشین‌های الکتریکی از بین رفتن عایق‌بندی ماشین و در

نتیجه ایجاد اتصال کوتاه است. در این حالت به اصطلاح ماشین می‌سوزد. افزایش بیش از حد مجاز دمای عایق مهم‌ترین دلیل از بین رفتن آن است. اگر دما از این مقدار تجاوز کند، عمر ماشین به شدت کاهش می‌یابد. طبق قانون مانتسینگر^۱، بسته به جنس عایق، به ازای ۶ تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد افزایش دما عمر ماشین نصف می‌شود [۳۲].



شکل ۴-۵: دسته منحنی‌های BH مگنت NEOMAX-32EH [۱۰]

دمای مجاز برای هر عایق با توجه به کلاس عایقی ماشین مشخص می‌شود. دسته‌بندی کلاس-های عایقی مختلف در ماشین‌های الکتریکی بر اساس استاندارد IEC 60085 در جدول ۴-۱ آمده

^۱ Montsinger

است. برای توضیح بیشتر، لازم است ابتدا چند تعریف بر اساس استاندارد IEC 60085 ارائه شود [۳۳]:

ماده عایق الکتریکی (EIM): جامد یا مایعی است، و یا ترکیب ساده‌ای از آن‌هاست، که هدایت الکتریکی کم و قابل صرف نظری دارد و برای جداسازی بخش‌های رسانا با پتانسیل‌های الکتریکی متفاوت در یک تجهیز الکترومکانیکی به کار می‌رود.

سیستم عایق الکتریکی (EIS): ساختار عایقی شامل یک یا چند EIM است، که هر کدام مرتبط با یکی از بخش‌های رسانای به کار رفته در یک تجهیز الکترومغناطیسی هستند.

کلاس حرارتی: مقدار عددی توصیه شده دمای ماکزیمم برای EIS در حین کار مداوم تحت شرایط عملکرد نرمال را بر حسب درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد.

EIM هایی با تحمل حرارتی متفاوت ممکن است یک EIS با کلاس حرارتی تشکیل دهند که ممکن است از مقدار توصیه شده برای دمای ماکزیمم کار مداوم هر یک از اجزا کمتر یا بیشتر باشد. توصیف یک تجهیز الکترومکانیکی به صورت قرار داشتن در یک کلاس حرارتی معنی ندارد، و متضمن این معنی نیست که هر کدام از EIM های مورد استفاده در ساختمان آن تحمل حرارتی برابری دارند. کلاس حرارتی یک EIS نباید به صورت مستقیم به تحمل حرارتی EIM های تشکیل دهنده ربط داده شوند. در یک EIS خصوصیات حفاظتی یک EIM مورد استفاده در سیستم ممکن است عملکرد EIM دیگر را بهبود ببخشد، که امکان استفاده از آن را در یک EIS با کلاس حرارتی بزرگ‌تر از تحمل حرارتی EIM تنها را فراهم آورد. از طرف دیگر، مشکلات ناسازگاری بین EIM ها می‌تواند کلاس حرارتی مناسب سیستم را تا زیر تحمل حرارتی EIM ها کاهش دهد. بنابراین، قابلیت‌های حرارتی یک EIM نباید از کلاس حرارتی EIS ای که EIM مربوطه جزئی از آن است، نتیجه گرفته شود.

^۱ Electrical Insulating Material

^۲ Electrical Insulation System

جدول ۴-۱: دسته بندی کلاس‌های عایقی مختلف ماشین‌های الکتریکی بر اساس استاندارد IEC 60085 [۳۳]

دسته بندی عددی	دسته بندی الفبایی	ماکزیمم دمای مجاز
کلاس ۱۰۵	کلاس A	۱۰۵
کلاس ۱۳۰	کلاس B	۱۳۰
کلاس ۱۵۵	کلاس F	۱۵۵
کلاس ۱۸۰	کلاس H	۱۸۰

۴-۳- تحلیل حرارتی موتور در حالت همرفت طبیعی

در این بخش مراحل تحلیل حرارتی موتور در حالت همرفت طبیعی به کمک استفاده همزمان از روش اجزاء محدود و مدار معادل حرارتی بیان می‌شود. لازم به تذکر است که هدف از این بخش این است که آیا نیاز به سیستم خنک‌ساز وجود دارد یا خیر.

برخی از نکات مهم در مورد مدل‌سازی این بخش که عبارتند از:

نکته ۱ توزیع دمای کاور و هوای داخل آن یکنواخت فرض می‌شود. بنابراین، کاور و هوای داخل آن با استفاده از یک مدار معادل مدل می‌شوند تا تعداد مش‌ها کاهش پیدا کند. هوای داخل کاور خود به دو قسمت تقسیم می‌شود (از دو گره در مدار معادل برای هوای داخل کاور استفاده می‌شود): هوای موجود در فاصله هوایی و مابقی هوای گیر افتاده در کاور. سایر قسمت‌ها مش بندی می‌شوند.

نکته ۲ همانند تحلیل الکترومغناطیسی، توزیع حرارت و دما نیز دارای تقارن است. به همین دلیل تنها یک جفت قطب از یک فاز شبیه‌سازی می‌شود. لازم به ذکر است که برخلاف مدل الکترومغناطیسی، از لحاظ حرارتی ممکن است فازها اندکی بر روی هم تأثیر گذار باشند. با توجه به ظرفیت‌های محاسباتی در دسترس و همچنین با توجه به این که هدف از این بخش تنها تحلیل حرارتی اولیه ماشین است، این موضوع در این فصل بررسی نمی‌شود.

نکته ۳ با توجه به این که فضای بزرگی در داخل روتور خالی است و از این فضا تنها برای اتصال شفت به متمرکز کننده‌های شار و مگنت‌ها استفاده می‌شود، می‌توان آن را به گونه‌ای طراحی کرد که

انتقال حرارت از طریق روتور نیز به خوبی انجام گیرد. این کار می‌تواند با پره‌ای ساختن این اتصالات و ایجاد داکت‌های محوری انجام گیرد. به هر حال، با توجه به این که از این طراحی اطلاعاتی در دسترس نیست، در این گزارش از یک ضریب انتقال حرارت در سطح داخلی آهنرباهای دائم و متمرکز کننده‌های شار استفاده می‌شود. بدیهی است که برای حصول نتایج دقیق‌تر باید مدل حرارتی شامل تمام جزئیات هندسی ماشین باشد.

نکته ۴ با توجه به تقریبی بودن برخی از پارامترها، در شبیه‌سازی‌ها سعی شده است پارامترها به گونه‌ای انتخاب شوند که بدترین حالت ممکن از لحاظ حرارتی در نظر گرفته شود.

نکته ۵ با توجه به این که سرعت تغییرات حرارتی بسیار کمتر از سرعت تغییرات الکترومغناطیسی (تلفاتی) است، تلفات متوسط هر بخش به عنوان منابع حرارتی در نظر گرفته می‌شوند و تحلیل تلفاتی نیز به صورت حالت دائمی انجام می‌پذیرد.

نکته ۶ در تحلیل تلفاتی ماشین الکتریکی می‌توان از انتقال حرارت تابشی چشم پوشی کرد و فقط رسانش و همرفت در نظر گرفته شود [۱۶]. در واقع این کار نیز به نحوی در نظر گرفتن بدترین حالت ممکن است.

نکته ۷ فرض می‌شود که هیچ گونه ارتباط هوایی بین داخل ماشین و محیط اطراف وجود ندارد. یعنی هوای داخل ماشین نمی‌تواند به بیرون نفوذ کند و بالعکس. این فرض نیز برای در نظر گرفتن بدترین حالت ممکن است.

۴-۳-۱- مراحل شبیه سازی

در این بخش مراحل شبیه‌سازی همرفت طبیعی به کمک ترکیب مدار معادل حرارتی و روش اجزای محدود ارائه می‌شود.

۳-۱-۱- مشخصات حرارتی مواد سازنده ماشین

جدول ۲-۴ مشخصات حرارتی قسمت‌های مختلف ماشین را ارائه می‌دهد. در مورد این جدول می‌توان نکات زیر را مطرح کرد:

الف) با وجود این که سیم‌ها از جنس مس هستند (هدایت حرارتی $400 W/(m.^{\circ}C)$ ، گرمای ویژه $380 J/(Kg.^{\circ}C)$ و چگالی $8960 Kg/m^3$)، اما با توجه به وجود روکش عایقی و هوای گیر افتاده در فضای سیم‌پیچی این پارامترها برای ناحیه معادل سیم‌پیچی تغییر می‌کند. در این گزارش، هدایت حرارتی معادل در ناحیه سیم‌پیچی ۱۰ برابر هدایت حرارتی هوا، یعنی $0.2614 W/(m.^{\circ}C)$ در نظر گرفته می‌شود. همچنین گرمای ویژه معادل نیز افزایش می‌یابد و چگالی معادل نیز کاهش پیدا می‌کند (با توجه به ضریب پرشوندگی مس می‌توان تقریبی برای این پارامترها در نظر گرفت).

ب) گوه نگه‌دارنده از جنس آلومینیوم انتخاب شده است تا حرارت سیم‌پیچ به صورت مؤثرتری دفع شود.

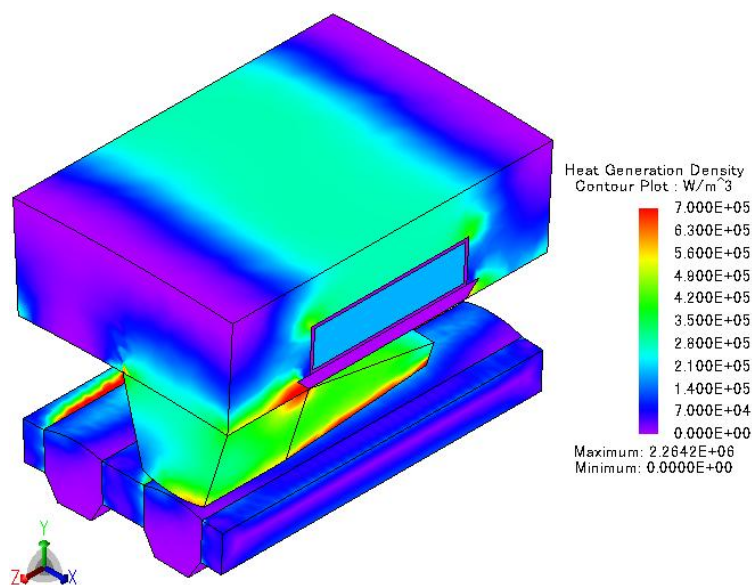
ج) عایق بین سیم‌پیچ و شیار از جنس اپوکسی در نظر گرفته شده است. هدایت حرارتی این عایق نسبت به اکثر عایق‌های دیگر کمتر بوده و می‌تواند به عنوان بدترین حالت در نظر گرفته شود.

جدول ۲-۴: مشخصات حرارتی قسمت‌های مختلف ماشین

بخش ماشین	هدایت حرارتی $W/(m.^{\circ}C)$	گرمای ویژه $J/(Kg.^{\circ}C)$	چگالی Kg/m^3
هسته استاتور	۱۸	۴۶۰	۷۳۴۰
هسته روتور	۱۸	۴۶۰	۷۳۴۰
آهنربای دائم	۲۰	۴۶۰	۷۵۰۰
ناحیه سیم‌پیچی	۰/۲۶۱۴	۵۰۰	۵۰۰۰
عایق بین شیار و سیم‌پیچ	۰/۱۵	۱۱۰۰	۱۲۰۰
گوه نگه‌دارنده سیم‌پیچ	۲۳۰	۹۰۰	۲۷۰۰

۴-۳-۱-۲- اعمال منابع حرارتی

منابع حرارتی برای تحلیل حرارتی همان تلفات متوسط آهن، تلفات متوسط مسی سیم پیچ و تلفات متوسط آهنرباهای دائم است که در فصل قبل محاسبه شدند. توزیع تلفات متوسط ماشین در شکل ۴-۶ نشان داده شده است.



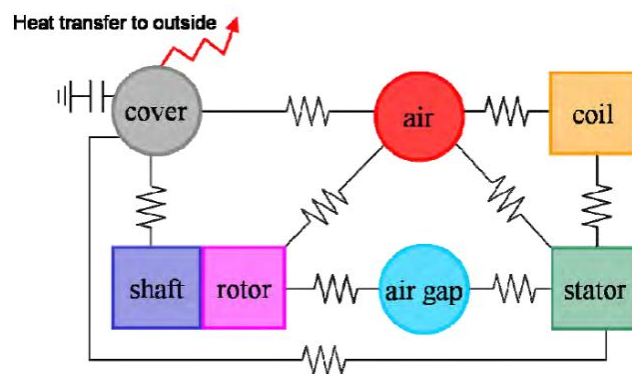
شکل ۴-۶: توزیع تلفات متوسط در ماشین

۴-۳-۱-۳- ایجاد مدار معادل حرارتی

مدل حرارتی مورد استفاده برای شبیه‌سازی حرارتی ماشین با همرفت طبیعی در مرجع [۱۶] در شکل ۴-۷ نشان داده شده است. در این شکل، قسمت‌هایی که با دایره مشخص شده‌اند به صورت یک گره در مدار معادل حرارتی در نظر گرفته می‌شود و قسمت‌هایی که با مربع مشخص شده‌اند، با مش مدل می‌شوند.

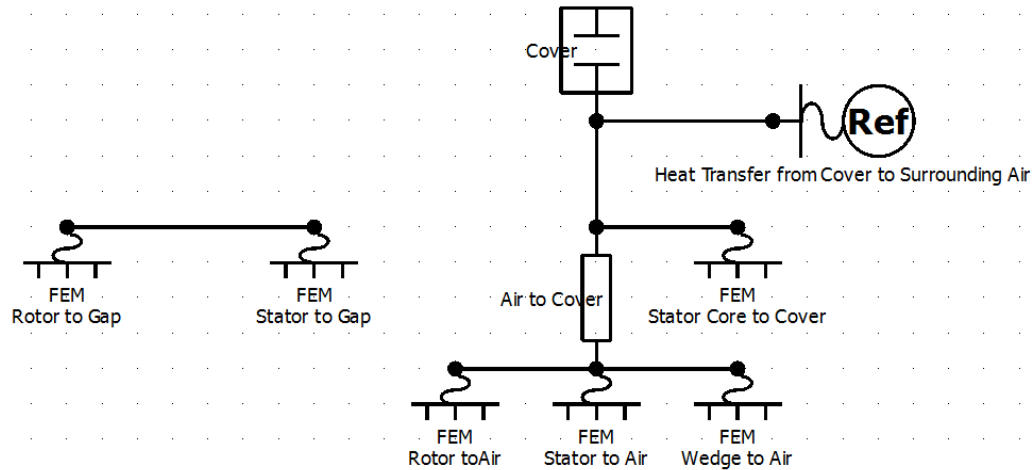
در این گزارش هم مدل مورد استفاده تقریباً مشابه مدل شکل ۴-۷ است. در مدل شکل ۴-۷ عایق شیار، که یکی از حساس‌ترین بخش‌ها نسبت به دما است، به صورت مستقیم مدل نشده است و تنها به صورت یک مقاومت حرارتی تماسی بین سیم پیچ و شیار استاتور در نظر گرفته شده است. اما

در مورد مدل مورد استفاده در این گزارش این عایق به صورت یک لایه یک میلی متری، در نظر گرفته شده است. همچنین، همانطور که قبلاً نیز بیان شد، با توجه به اینکه اطلاعاتی از طراحی شفت و فضای داخلی روتور در دسترس نیست، برای مدل سازی انتقال حرارت از طریق روتور از یک ضریب انتقال حرارت معادل در سطح داخلی آهنرباهای دائم و متمرکز کننده های شار استفاده می شود.



شکل ۴-۷: مدل حرارتی مورد استفاده برای شبیه سازی ماشین در حالت همرفت طبیعی [۱۶]

مدار معادل حرارتی شبیه سازی شده در شکل ۴-۸ نشان داده شده است. این مدار به دو قسمت مجزا از هم تقسیم شده است. قسمت سمت چپ مربوط به انتقال حرارت بین فاصله هوایی بین روتور و استاتور و صفحات مجاور به فاصله هوایی روتور و استاتور است. بخش سمت راست نیز انتقال حرارت در سایر قسمت های ماشین را مدل می کند. در این مدار حرارتی کاور (بدنه) با یک خازن حرارتی مدل شده است. البته اندازه این ظرفیت خازنی در تحلیل حالت دائمی تأثیری ندارد و فقط در نتایج بررسی های حرارتی گذرا نقش دارد. همچنین از چندین ضریب انتقال حرارت برای مدل سازی انتقال حرارت بین بخش های مختلف ماشین استفاده شده است. ضرایب انتقال حرارتی که در مدار معادل با نام FEM مشخص شده اند، مربوط به انتقال حرارت همرفتی بین یک گره از مدار معادل و یک یا چند سطح از بخش های مدل سازی شده به کمک روش اجزاء محدود هستند.



شکل ۴-۸: مدار حرارتی برای شبیه سازی حرارتی در همرفت طبیعی

۴-۱-۳-۴ - محاسبه پارامترهای مورد نیاز و معرفی آن‌ها به نرم افزار

۴-۱-۳-۴-۱ - محاسبه خازن حرارتی کاور

همان‌طور که قبلاً بیان شد، کاور (بدنه) می‌تواند با یک خازن حرارتی مدل شود. همچنین گفته شد که مقدار این خازن حرارتی در تحلیل حالت دائمی تأثیری ندارد. به هر حال در اینجا نحوه محاسبه این خازن حرارتی بیان می‌شود. ظرفیت خازن حرارتی کاور از رابطه (۴-۱۰) به دست می‌آید [۱۶]:

$$C = V \cdot C_p \cdot \rho \quad (4-10)$$

در رابطه (۴-۱۰)، V حجم قسمتی از کاور که با یک جفت قطب در تماس است، C_p گرمای ویژه کاور و ρ چگالی کاور است.

با فرض کاور آلومینیومی استوانه‌ای شکل با ضخامت ۵ سانتی متر، مقدار این ظرفیت خازنی $1216 \text{ J/}^\circ\text{C}$ فرض می‌شود.

۴-۱-۳-۴-۲ - محاسبه ضرایب انتقال حرارت

ضریب انتقال حرارت همرفتی با مشخصات سطح، نوع سیال در تماس با آن و سرعت سیال تغییر

می‌کند، و حتی دما. در این گزارش از وابستگی ضریب انتقال حرارت به دما صرف نظر می‌شود. برای محاسبه ضرایب انتقال حرارت همرفتی روابط تجربی ارزشمندی وجود دارند که می‌توان در مراجع مربوط، از جمله مرجع [۳۰]، آن‌ها را یافت. جدول ۳-۴ مقادیر نوعی ضرایب انتقال حرارت همرفتی را برای سیال‌های مختلف و در حالات مختلف نشان می‌دهد. برای هوا و آب، که دو سیال مهم هستند، ضریب انتقال حرارت به ترتیب بین ۲۵۰-۱۰ و ۵۰۰۰-۲۵۰ تغییر می‌کند، که مقادیر کمتر مربوط به همرفت طبیعی و مقادیر بیشتر مربوط به همرفت اجباری است. با توجه به اینکه در این بخش قصد داریم تا بدترین حالت ممکن را در نظر بگیریم، مقدار پیش فرض برای ضریب انتقال حرارت همرفتی را همرفت طبیعی برابر مقدار مینیمم آن، یعنی $10 \text{ W}/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ، در نظر می‌گیریم. برای نواحی خاص، مثل فاصله هوایی، باید ضریب انتقال حرارت محاسبه شود. در ادامه این روند این محاسبات ارائه می‌شود.

الف- ضریب انتقال حرارت در فاصله هوایی

یک رابطه ساده برای تخمین ضریب انتقال حرارت فاصله هوایی بین روتور و استاتور به صورت رابطه (۱۱-۴) است [۱۶]:

$$h_1 = \frac{6.6 \nu r^{0.67}}{10^5 g^{0.33}} \quad (11-4)$$

در رابطه (۱۱-۴)، νr سرعت چرخش روتور بر حسب سانتی‌متر بر ثانیه و g طول فاصله هوایی بر حسب سانتی‌متر است.

روابط پیچیده‌تر برای محاسبه این ضریب را می‌توان در مرجع [۳۴] یافت. در [۳۴] بیان شده است که برجستگی قطب استاتور تا ۱۰٪ و برجستگی قطب روتور تا ۲۰٪ می‌تواند این ضریب انتقال حرارت را افزایش دهد. ساختار ماشین مورد بررسی دارای نوعی برجستگی در روتور و استاتور است، که برجستگی قطب در استاتور بسیار شدیدتر است. متأسفانه نوع برجستگی قطب در ماشین TFPM مانند ماشین‌های معمول نبوده و تعیین ضریب انتقال حرارت در فاصله هوایی نیاز به اندازه‌گیری در

آزمایشگاه دارد. در این گزارش از این افزایش ضریب انتقال حرارت در اثر برجستگی‌های قطب چشم-پوشی می‌کنیم.

با فرض فاصله طول متوسط هوایی برابر ۲ میلی‌متر، ضریب انتقال حرارت فاصله هوایی بین روتور و استاتور با استفاده از رابطه (۴-۱۱) برابر $180 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ خواهد شد.

ب: ضریب انتقال حرارت بین هسته استاتور و کاور

این ضریب از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$h = \frac{\lambda}{d} \quad (۴-۱۲)$$

که در این رابطه λ هدایت حرارتی هوا بر حسب $W/(m \cdot ^\circ C)$ و d فاصله بین کاور و هسته بر حسب متر است. با در نظر گرفتن فاصله یک میلی‌متر و $\lambda = 0.027 W/(m \cdot ^\circ C)$ ، این ضریب برابر $27 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ خواهد شد.

ج: ضریب انتقال حرارت بین کاور و محیط اطراف

این پارامتر که در مدار معادل شکل ۴-۸ با خازن حرارتی به گره مشترکی متصل شده است، از ضرب ضریب انتقال حرارت در سطح بیرونی کاور، که با محیط اطراف در تماس است، و مساحت قسمتی از کاور که یک جفت قطب را پوشش می‌دهد، به دست می‌آید. با فرض ضریب انتقال حرارت $20 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ در سطح بیرونی کاور، این پارامتر برابر $0.2 W/^\circ C$ خواهد شد. ضمناً، با در نظر گرفتن یک شرایط محیطی سخت، دمای محیط اطراف ۷۰ درجه سانتی‌گراد فرض می‌شود.

د: ضریب انتقال حرارت معادل در سطح داخلی روتور (سطح زیرین مگنت‌ها و متمرکزکننده‌ها)

معمولاً فضای داخلی روتور به گونه‌ای طراحی می‌شود که انتقال حرارت از این ناحیه نیز به راحتی انجام گیرد. این کار معمولاً با ایجاد داکت‌های محوری انجام‌پذیر است. به خصوص در مورد موتور مورد بررسی که فضای داخلی روتور (زیر مگنت‌ها و متمرکزکننده‌ها) از نظر مغناطیسی غیر

فعال است، می توان اقدامات ویژه ای را برای بهبود این انتقال حرارت انجام داد. به هر حال، فعلاً می توان از یک ضریب انتقال حرارت معادل در سطح داخلی روتور، که این انتقال حرارت را می تواند به صورت تقریبی مدل کند، استفاده کرد. این ضریب انتقال حرارت $50 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ در نظر گرفته می شود. این ضریب از مقادیر نوعی برای همرفت طبیعی بیشتر است که می توان دو علت برای آن مطرح کرد: (۱) روتور می چرخد و لذا نوعی همرفت اجباری با هوا در فضای داخلی روتور (به دلیل برخورد هوا با پره ها و داکت ها) ایجاد می شود. (۲) سطح مؤثر فضای داخلی روتور که با هوا در تماس است، از سطح زیرین مگنت ها و متمرکز کننده ها بزرگ تر است.

جدول ۳-۴: مقادیر نوعی ضرایب انتقال حرارت همرفتی برای سیال های مختلف و در حالات مختلف [۳۵]

نوع همرفت	ضریب انتقال حرارت بر حسب $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
همرفت طبیعی گازها	۲-۲۵
همرفت طبیعی مایع ها	۱۰-۱۰۰۰
همرفت اجباری گازها	۲۵-۲۵۰
همرفت اجباری مایع ها	۵۰-۲۰۰۰۰
جوش و میعان	۲۵۰۰-۱۰۰۰۰۰

۳-۴-۱-۳-۴ - محاسبه مقاومت حرارتی بین کاور و هوای محبوس در داخل آن

این مقاومت در شکل ۴-۸ نشان داده شده است. مقدار این مقاومت بر حسب $^\circ C/W$ با استفاده

از رابطه (۴-۱۳) تعیین می شود [۱۶]:

$$R = \frac{1}{A \cdot h} \quad (4-13)$$

در رابطه (۴-۱۳)، A مساحت داخل کاور و h ضریب انتقال حرارت بین کاور و هوای داخل آن

است. با فرض ضریب انتقال حرارت $10 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ بین کاور و هوای داخل آن و همچنین با در

نظر گرفتن کاور فرضی بخش قبل، مقدار این مقاومت برابر $7^\circ C/W$ محاسبه خواهد شد.

جدول ۴-۶ کلیه پارامترهای به کار رفته در شبیه سازی حرارتی ماشین را ارائه می دهد.

جدول ۴-۴: پارامترهای به کار رفته در شبیه سازی حرارتی موتور

مقدار پارامتر	نام پارامتر
$1216 J/^{\circ}C$	ظرفیت خازنی کاور
$7^{\circ}C/W$	مقاومت حرارتی بین هوا و کاور
$10 W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$	ضریب انتقال حرارت استاتور در ارتباط با هوای داخل کاور
$10 W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$	ضریب انتقال حرارت گوه در ارتباط با هوای داخل کاور
$10 W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$	ضریب انتقال حرارت روتور در ارتباط با هوای داخل کاور
$180 W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$	ضریب انتقال حرارت سطوح مجاور به فاصله هوایی
$27 W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$	ضریب انتقال حرارت بین هسته استاتور و کاور
$50 W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$	ضریب انتقال حرارت معادل در سطح داخلی روتور
$0.12 W/^{\circ}C$	انتقال حرارت بین کاور و محیط اطراف
۷۰ درجه سانتی‌گراد	دمای محیط اطراف

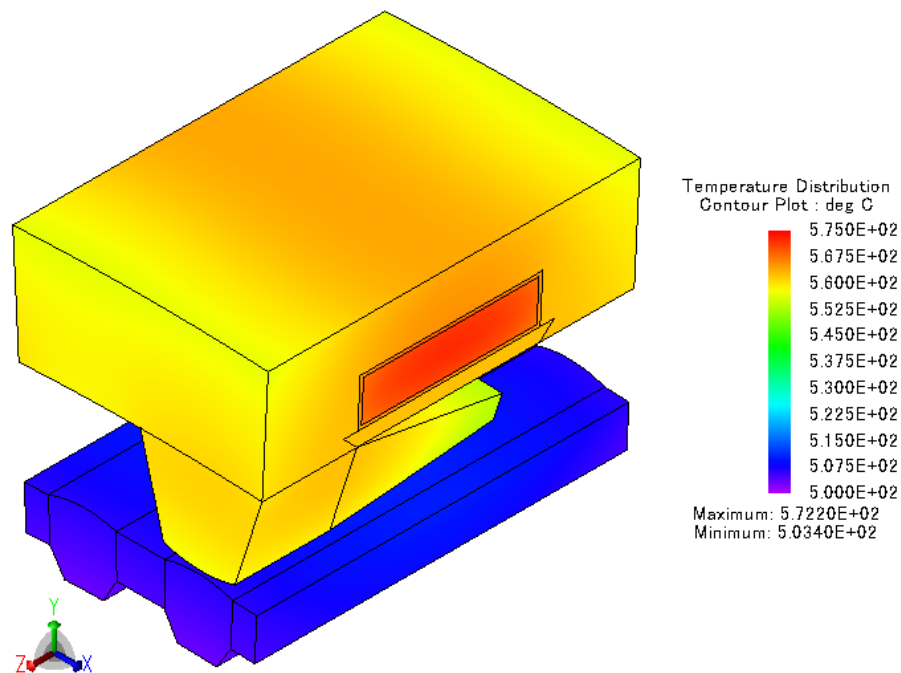
۴-۳-۱-۵- نتایج شبیه سازی

شکل ۴-۹ توزیع دما در حالت همرفت طبیعی را نشان می‌دهد. با توجه به توضیحات قبل، این توزیع دما مربوط به بدترین شرایط حرارتی ممکن است. با توجه به این شکل و توضیحات ارائه شده در بخش محدودیت‌های دمایی ماشین‌های الکتریکی، حتماً نیاز به یک سیستم خنک‌کننده وجود دارد. در غیر این صورت هم سیستم عایقی و هم مگنت‌ها قطعاً آسیب جدی خواهند دید.

۴-۴- طراحی سیستم خنک ساز و تحلیل حرارتی ماشین با در نظر

گرفتن سیستم خنک ساز

نتایج شبیه‌سازی همرفت طبیعی نشان داد که برای استفاده از موتور مورد نظر در شرایط محیطی فرض شده، حتماً لازم است تا از یک سیستم خنک‌کننده مناسب استفاده نمود. در این بخش پس از مقدمه‌ای اجمالی در مورد سیستم‌های خنک‌کننده، به طراحی سیستم خنک‌ساز مؤثر و مناسب پرداخته می‌شود.

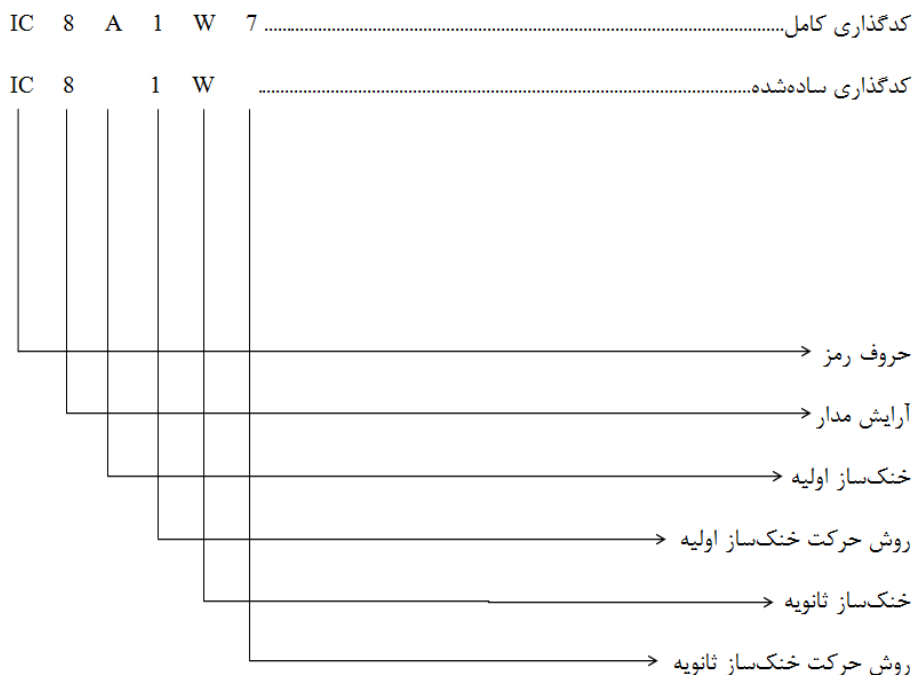


شکل ۴-۹: توزیع دما در حالت همرفت طبیعی

۴-۴-۱- سیستم‌های خنک ساز ماشین‌های الکتریکی

اهمیت استفاده از سیستم‌های خنک‌کننده در ماشین‌های الکتریکی مدرن امروزی در مقدمه بیان شد و لذا از تکرار آن در اینجا خودداری می‌شود.

بر اساس استاندارد IEC 60034-6 هر سیستم خنک‌ساز می‌تواند با یک کد مشخص شود. کدهای بکار رفته در سیستم کدگذاری مورد استفاده در روش خنک‌سازی یک ماشین، به دو صورت کامل و ساده شده می‌باشد. شکل ۴-۱۰ چیدمان این کدها را با یک مثال نشان می‌دهد. نحوه تعیین هر یک از اعداد و حروف بکار رفته در این سیستم کدگذاری در استاندارد IEC 60034-6 به صورت کامل توضیح داده شده است، که برای پرهیز از زیاده‌گویی در اینجا مطرح نمی‌شود. در صورت نیاز به اطلاعات بیشتر می‌توان به [۳۶] مراجعه کرد.



شکل ۴-۱۰: سیستم کدگذاری سیستم‌های خنک ساز ماشین‌های الکتریکی بر اساس استاندارد IEC 60034-6

انتخاب سیستم خنکساز در یک ماشین الکتریکی بستگی به پارامترهای متعدد، از جمله مشخصات ماشین (مثل توان، اندازه، هندسه، جنس مواد، نوع محفظه ماشین و ...)، شرایط محیطی عملکرد ماشین، امکانات در دسترس، کاربرد ماشین و محدودیت‌های پیش‌رو در انتخاب سیستم خنکساز و بسیاری از موارد دیگر دارد. به عنوان نمونه‌ای از دسته‌بندی سیستم‌های خنکساز ماشین-های الکتریکی بر اساس مشخصات ماشین می‌توان به دسته‌بندی ارائه شده در جدول ۴-۵ اشاره کرد.

جدول ۴-۵: دسته بندی سیستم‌های خنک ساز ماشین‌های الکتریکی بر اساس مشخصات ماشین [۲۵]

تهویه مدار باز	ماشین‌های کاملاً بسته - خنکساز سطحی	ماشین‌های کاملاً بسته با تبادل گر حرارتی	خنکساز به وسیله کانال- های توخالی هادی
خنک کننده: هوا	خنکساز با هوا یا ژاکت آبی	خنک کننده: هوا تبادل گر حرارتی: هوا به هوا یا هوا به آب	خنکساز: گاز هیدروژن، روغن یا آب دی یونیزه شده
درپوش‌های انتهایی ماشین برای جریان یافتن خنکساز باز هستند.	افزایش سطح ماشین به واسطه فین‌ها یا تیوب‌هایی برای خنکساز با هوا یا ژاکت آبی	جریان خنکساز از میان ماشین و تبادل گر حرارتی، به یک مسیر بسته هدایت می‌شود.	پمپ‌ها، خنکساز را در درون هدایت‌گرهای توخالی با فشار به حرکت درمی‌آورند

تهویه مدار باز	ماشین‌های کاملاً بسته - خنک‌سازی سطحی	ماشین‌های کاملاً بسته با تبادل گر حرارتی	خنک‌سازی به وسیله کانال - های توخالی هادی
معمولاً برای ماشین‌های تا ۵۰۰ کیلووات مورد استفاده قرار می‌گیرد (در توان‌های بیشتر، نویز آکوستیک بسیار زیاد می‌شود).	معمولاً برای ماشین‌های تا ۲۰۰۰ کیلووات مورد استفاده قرار می‌گیرد.	برای ماشین‌های تا ۴۰۰ مگاوات مورد استفاده قرار می‌گیرد.	برای ماشین‌های با حداکثر قدرت ۲۰۰۰ مگاوات مورد استفاده قرار می‌گیرد.
معمولاً از فن سوار شده بر روی شفت استفاده می‌شود.	معمولاً از فن سوار شده بر روی شفت استفاده می‌شود.	از فن‌های سوار شده بر روی شفت یا فن‌های خارجی استفاده می‌شود.	از پمپ‌های خارجی استفاده می‌شود.

با توجه به جدول ۴-۵، برای ماشین مورد بررسی (که توان خروجی آن یک ۵۰۰ کیلووات است) بهتر است از خنک‌سازی سطحی استفاده کرد. با توجه به محدودیت‌های محیطی متداول در کاربرد-هایی که می‌توان موتور مورد مطالعه را در آن‌ها به کار برد، فرض بر این است که امکان استفاده از هوای محیط اطراف به عنوان خنک‌ساز وجود ندارد. با فرض در دسترس بودن آب خنک‌ساز با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد و یک سیستم خنک‌ساز مرکزی در محل کارکرد موتور، از سیستم آبی برای خنک‌سازی ماشین استفاده خواهد شد.

خنک‌سازی با آب یک راه بسیار مؤثر برای دفع حرارت موتور است و موتورهای خنک‌کننده با آب، نسبت توان خروجی به واحد وزن بالایی را فراهم می‌کنند [۱۸]. بازدهی خنک‌سازی در رنج وسیعی از سرعت‌ها حفظ می‌شود، که مخصوصاً برای کاربردهای با گشتاور ثابت بسیار مهم است.

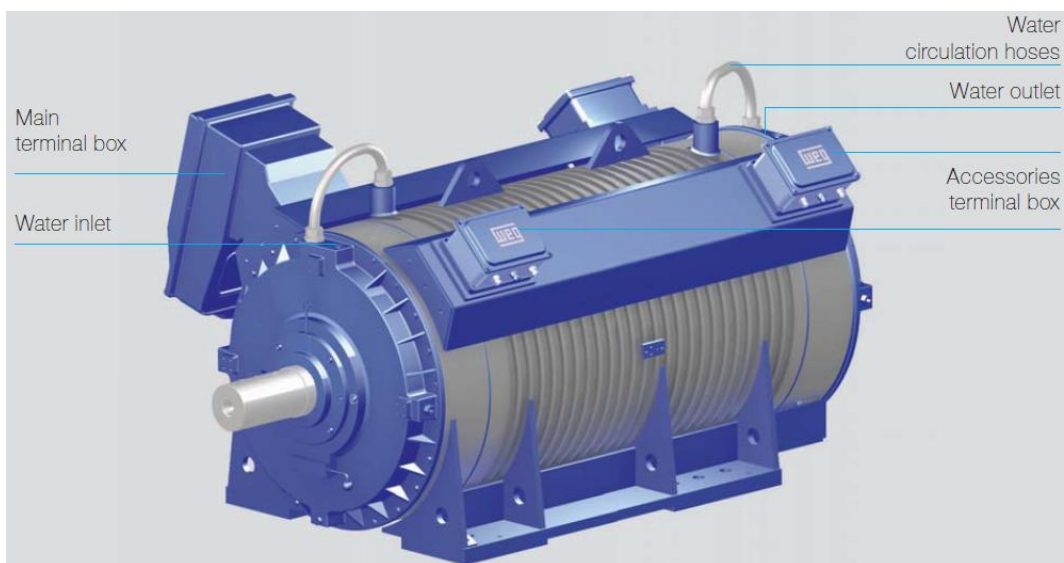
سیستم‌های خنک شونده با آب آرایش‌ها و فرم‌های متنوعی دارند. با توجه به رنج توانی موتور مورد نظر، برای خنک‌سازی آن استفاده از ژاکت آبی پیشنهاد می‌شود. ماشین‌های خنک شونده با ژاکت آبی برای رسیدن به تقاضای روزافزون به ماشین‌های فشرده و با سطح نویز پایین مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۹]. موتورهای خنک شونده با ژاکت آبی کاربردهای متنوعی دارند که در [۱۹] بیان شده‌اند.

مزایای ماشین‌های خنک شونده با ژاکت آبی عبارتند از [۱۹]:

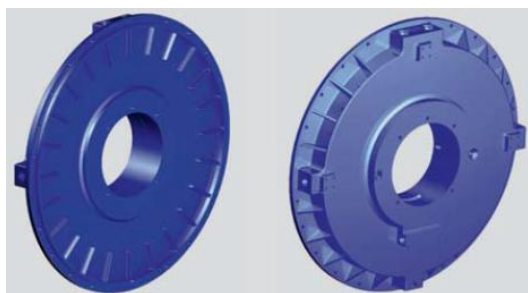
- (۱) سطح نوپز پایین
- (۲) مناسب برای عملکرد درایوهای با فرکانس متغیر
- (۳) حداقل پراکندگی حرارت به محیط اطراف
- (۴) ساختار فشرده
- (۵) مناسب برای شرایط عملکرد سخت و دشوار

شکل ۴-۱۱ یک نمونه از ماشین‌های خنک شونده به وسیله ژاکت آبی ساخت شرکت WEG را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشخص است، آب ورودی پس از دور زدن در درپوش اولیه، در مسیر مارپیچ که پشت هسته استاتور را پوشش می‌دهد به گردش درمی‌آید و پس از عبور از درپوش دوم از ماشین خارج می‌شود. گردش آب در درپوش باعث دفع تلفات مکانیکی یاتاقان‌ها و بخشی از تلفات روتور می‌شود.

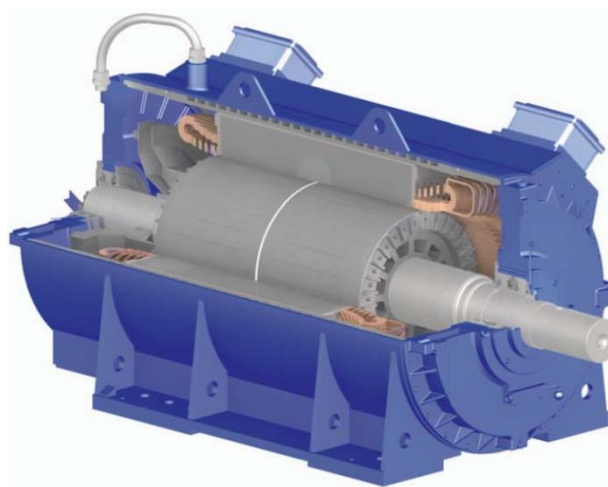
شکل ۴-۱۲ یک نمونه دیگر از ماشین‌های خنک شونده به وسیله ژاکت آبی ساخت شرکت WEG را به تصویر می‌کشد. همچنین در این شکل سیستم خنک‌ساز ژاکت آبی به صورت مشخص-تری نمایش داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص می‌شود، لوله‌های آب بر روی پوسته-ای که هسته استاتور را در بر گرفته است پیچیده می‌شوند. جنس این پوسته باید به گونه‌ای انتخاب شود که انتقال حرارت به راحتی صورت گیرد. این پوسته دارای شیارهایی است که لوله‌های آب از میان آن‌ها عبور می‌کنند. با این کار سطح مؤثر در انتقال حرارت افزایش می‌یابد. نحوه عبور لوله‌ها از داخل درپوش‌ها نیز به خوبی نشان داده شده است. نکته مهم در این شکل این است که آب ورودی پس از ورود به ماشین در حین عبور از لوله‌ها حرارت ناشی از تلفات را به خود جذب می‌کند و دمای آن به تدریج افزایش می‌یابد، به صورتی که آب خروجی از ماشین بیشترین دما را دارا خواهد بود. این افزایش دما باید محدود باشد، در غیر این صورت مشکلاتی پیش خواهد آمد.



الف: ساختار کلی ماشین و نام‌گذاری قسمت‌های مختلف آن

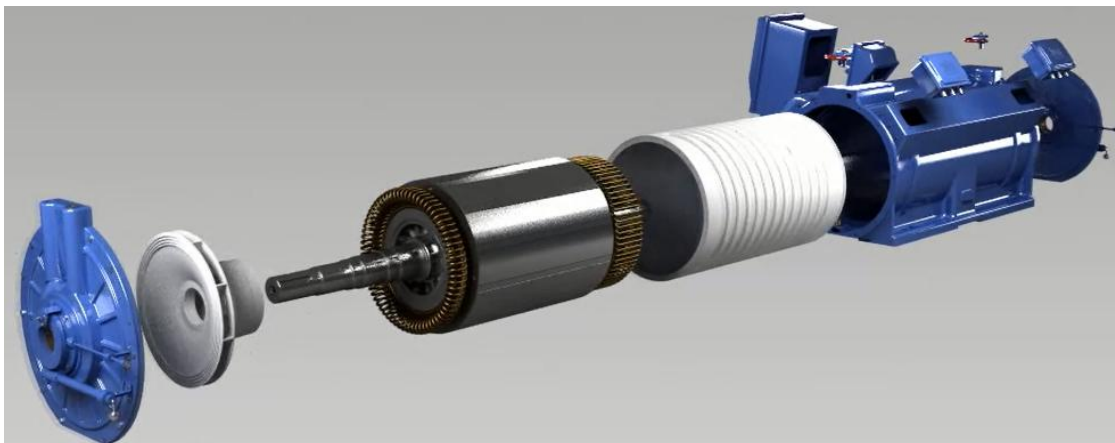


ج: درپوش‌های انتهایی خنک شونده به وسیله آب

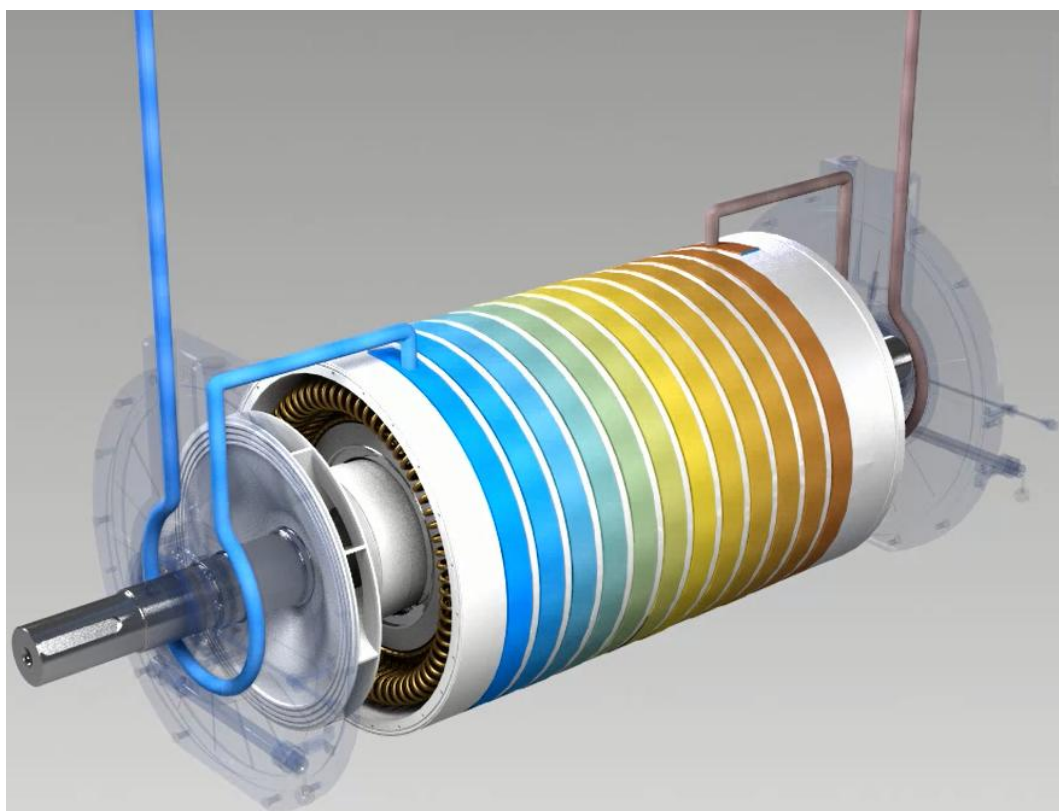


ب: برشی از ماشین و سیستم خنک‌کننده آن

شکل ۴-۱۱: یک نمونه از ماشین‌های خنک شونده به وسیله ژاکت آبی ساخت شرکت WEG [۱۹]



الف: بخش‌های مختلف تشکیل‌دهنده ماشین



ب: نمایش نحوه عملکرد سیستم خنک‌ساز

شکل ۴-۱۲: یک نمونه دیگر از ماشین‌های خنک شونده به وسیله ژاکت آبی ساخت شرکت WEG [۳۷]

به صورت کلی در یک سیستم خنک کننده با آب حدودی برای برخی از پارامترها وجود دارد که مهم ترین آن ها عبارتند از: خلوص آب، ماکزیمم فشار مجاز آب خنک کننده، دمای ماکزیمم آب ورودی، میزان افزایش دمای آب خروجی. در کاتالوگ موتورهای ولتاژ پایین خنک شونده با آب ساخت شرکت ABB، این محدودیت ها به صورت زیر بیان شده است [۱۸]:

- کیفیت آب خنک کننده باید حداقل در حد آب آشامیدنی باشد. آب دریا، و یا آب حاوی بیشتر از ۲۰ میلی گرم در لیتر کلراید، نباید مورد استفاده قرار گیرد.
- ماکزیمم فشار مجاز آب خنک کننده ۵ بار است.
- ماکزیمم دمای توصیه شده برای آب ورودی، ۴۰ درجه سانتی گراد است. هر چقدر این دما کمتر باشد، اثر خنک سازی بهتر خواهد بود.
- حداکثر افزایش دمای آب خروجی بین ۱۰ تا ۱۵ درجه سانتی گراد است.

در این گزارش نیز از همین حدود استفاده خواهد شد. البته لازم به یاد آوری است که در این گزارش آب ورودی به صورت آب مقطر و با دمای ۳۰ درجه سانتی گراد فرض می شود.

۴-۲-۴- الگوریتم پیشنهادی برای طراحی سیستم خنک ساز ژاکت آبی

در این بخش یک الگوریتم طراحی اولیه برای ژاکت آبی ارائه می شود. قبل از بیان مراحل الگوریتم، لازم است به بحث در مورد محاسبات انتقال حرارت از طریق یک پایپ یا داکت پرداخته شود. در مباحث مربوط به همرفت اجباری سه عدد بدون بعد Re و Pr ، Nu ، تعریف می شوند که به ترتیب عدد نوسلت^۱، عدد پراندتل^۲ و عدد رینولدز^۳ نامیده می شوند. این اعداد به صورت زیر تعریف می شوند [۳۰]:

$$Nu = \frac{h \cdot D_H}{k} \quad (14-4)$$

^۱ Nusselt Number

^۲ Prandtl Number

^۳ Reynolds Number

$$Re = \frac{D_H \cdot V \cdot \rho}{\mu} \quad (15-4)$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{K} \quad (16-4)$$

تعریف پارامترهای به کار رفته در معادلات (۱۴-۴) تا (۱۶-۴) به قرار زیر است:

K : هدایت گرمایی سیال بر حسب $W/(m \cdot ^\circ C)$

D : طول مشخصه، مثلاً قطر هیدرولیک برای جریان سیال درون یک پایپ یا داکت، بر حسب متر

V : سرعت مشخصه، مثلاً سرعت متوسط برای جریان سیال درون یک پایپ یا داکت، بر حسب متر بر

ثانیه

ρ : چگالی بر حسب Kg/m^3

μ : ویسکوزیته سیال بر حسب $N \cdot S/m^2$

C_p : گرمایی ویژه بر حسب $J/(Kg \cdot ^\circ C)$

برای همرفت اجباری به وسیله جریان غیر لمینار در یک پایپ یا داکت، عدد نوسلت با رابطه

تجربی زیر محاسبه می شود [۳۰]:

$$Nu = \frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1+1.27\sqrt{f/8}(Pr^{2/3}-1)} \quad (17-4)$$

رابطه (۱۷-۴) به ازای $2300 \leq Re \leq 5 \times 10^6$ و $0.5 \leq Pr \leq 2000$ معتبر است. در رابطه

(۱۷-۴)، f که ضریب اصطکاک نامیده می شود، به صورت زیر محاسبه می شود:

$$f = \frac{1}{(1.82 \log_{10} Re - 1.64)^2} \quad (18-4)$$

برای هر پایپ یا داکت، با هر شکل سطح مقطع، قطر هیدرولیک به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$D_H = \frac{4A}{P} \quad (19-4)$$

که رابطه (۱۹-۴)، A مساحت سطح مقطع و P محیط آن است. برای سطح مقطع دایروی قطر هیدرولیک با قطر واقعی سطح مقطع برابر خواهد شد.

نکته مهمی که باید در هنگام به کارگیری روابط بالا به آن توجه کرد، این است که مشخصات سیال به شدت به دما وابسته است. به عبارت دیگر، ویسکوزیته، هدایت گرمایی، ظرفیت گرمایی ویژه و چگالی آب با دما تغییر می‌کند، که این موضوع بر روی ضریب انتقال حرارت تأثیرگذار خواهد بود. در تحلیل‌های حرارتی آینده، این موضوع در نظر گرفته خواهد شد.

مراحل الگوریتم طراحی اولیه برای سیستم خنک‌ساز به صورت زیر خواهد بود (در این الگوریتم از تکرار معرفی پارامترها و متغیرهای معرفی شده در قبل خودداری شده است):

گام ۱ با توجه به ویژگی‌های ماشین، ساختار مناسب برای سیستم خنک‌ساز در نظر گرفته می‌شود. همچنین محدودیت‌های طراحی، مثل ماکزیمم افزایش دمای سیال، نیز مشخص می‌شوند.

گام ۲ با توجه به افزایش دمای مجاز سیال در حین گردش در ماشین، حداقل دبی مورد نیاز تعیین می‌شود. این دبی با کمک رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_{\min} = \frac{\sum P_{\text{Loss}}}{\rho \cdot C_p \cdot \Delta T_{\max}} \quad (20-4)$$

در رابطه (۲۰-۴) Q_{\min} حداقل دبی مورد نیاز بر حسب m^3/s ، مجموع تلفات بر حسب وات و ΔT_{\max} ماکزیمم افزایش دمای سیال خروجی بر حسب درجه سانتی‌گراد است.

گام ۳ شکل و جنس پایپ یا داکت مورد استفاده برای خنک‌سازی ماشین انتخاب می‌شود و سپس قطر داکت و سرعت سیال درون آن تعیین می‌گردد.

در این مرحله باید به نکات زیر توجه شود:

نکته ۱ ابعاد پایپ یا داکت و سرعت سیال باید به گونه‌ای باشند که جریان سیال کاملاً آشفته باشد، که در غیر این صورت انتقال حرارت به خوبی انجام نخواهد شد. برای ایجاد جریان آشفته عدد رینولدز باید از ۴۰۰۰ بیشتر شود [۳۰]. لازم به ذکر است که در مقاصد انتقال حرارت، ابعاد کوچک‌تر بیشتر مورد توجه هستند. چرا که اولاً ضریب انتقال حرارت در آن‌ها بیشتر بوده و ثانیاً فرم دهی آن‌ها نیز آسان‌تر است. اگرچه افت فشار سیال در حامل‌های با ابعاد کوچک‌تر، بیشتر است.

نکته ۲ برای مقاصد خنک‌سازی، سرعت آب در درون پایپ یا داکت حامل آن نباید از ۱/۵-۲/۵ متر بر ثانیه تجاوز کند [۳۸]. توجه شود که سرعت‌های بیشتر از ۱/۲ متر بر ثانیه باعث ایجاد سر و صدا خواهد شد.

نکته ۳ حتی‌المقدور، قطر انتخاب شده باید استاندارد باشد. یکی از راه‌های انتخاب قطر مناسب برای پایپ‌های دایروی، استفاده از منحنی‌های افت فشار در لوله‌ها است. به طوری که با انتخاب یک افت فشار مناسب و داشتن دبی، قطر پایپ و سرعت سیال درون آن مشخص می‌شود. شکل ۴-۱۳ یک نمونه از این منحنی‌ها را برای پایپ‌های مسی نشان می‌دهد.

در صورت عدم استفاده از منحنی‌هایی مشابه شکل ۴-۱۳ می‌توان با انتخاب یکی از ابعاد استاندارد، سرعت سیال را به صورت زیر محاسبه نمود:

$$V = \frac{Q_{\min}}{A} \quad (۲۱-۴)$$

گام ۴ ضریب انتقال حرارت از طریق دیواره داکت یا پایپ با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود.

$$D_H = \frac{4A}{P} \quad (۱۹-۴)$$

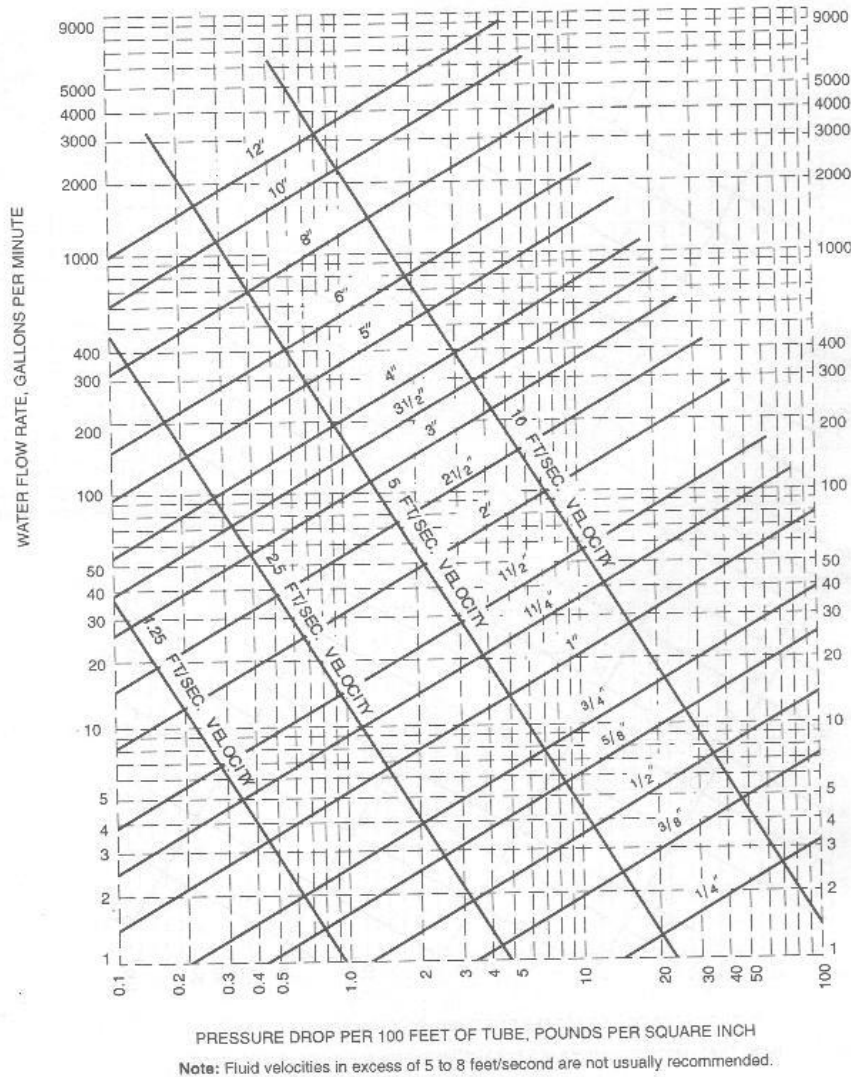
$$Re = \frac{D_H \cdot V \cdot \rho}{\mu} \quad (۱۵-۴)$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{K} \quad (۱۶-۴)$$

$$f = \frac{1}{(1.82 \log_{10} Re - 1.64)^2} \quad (۱۸-۴)$$

$$Nu = \frac{(f/8)(Re - 1000)Pr}{1 + 1.27\sqrt{f/8}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (۱۷-۴)$$

$$h = \frac{k \cdot Nu}{D_H} \quad (۲۲-۴)$$



شکل ۴-۱۳: یک نمونه از منحنی‌های افت فشار در لوله‌های مسی [۳۹]

گام ۵ سطح انتقال حرارت لازم (و یا همان تعداد پایپ‌ها و داکت‌های سری و یا موازی لازم) برای رسیدن به شرایط دمایی مطلوب در کلیه نقاط در داخل ماشین محاسبه می‌شود.

در این مرحله باید از شبیه‌سازی حرارتی به کمک روش اجزاء محدود استفاده کرد. در صورت نیاز می‌توان به گام ۳ بازگشت و اصلاحاتی را در مورد ابعاد پایپ یا داکت و سرعت سیال منظور کرد.

گام ۶ هد مورد نیاز برای پمپ تعیین می‌شود.

گام ۷ انتخاب پمپ و موتور محرک مناسب آن، با توجه به هد و دبی محاسبه شده در مراحل گذشته و با استفاده از دیاگرام‌های موجود برای پمپ‌ها.

گام ۸ در صورت نیاز، به منظور کاهش توان مورد نیاز برای خنک‌سازی، بالا بردن بهره پمپ و بهبود توزیع دمایی در داخل ماشین سیستم خنک‌ساز اصلاح می‌شود.

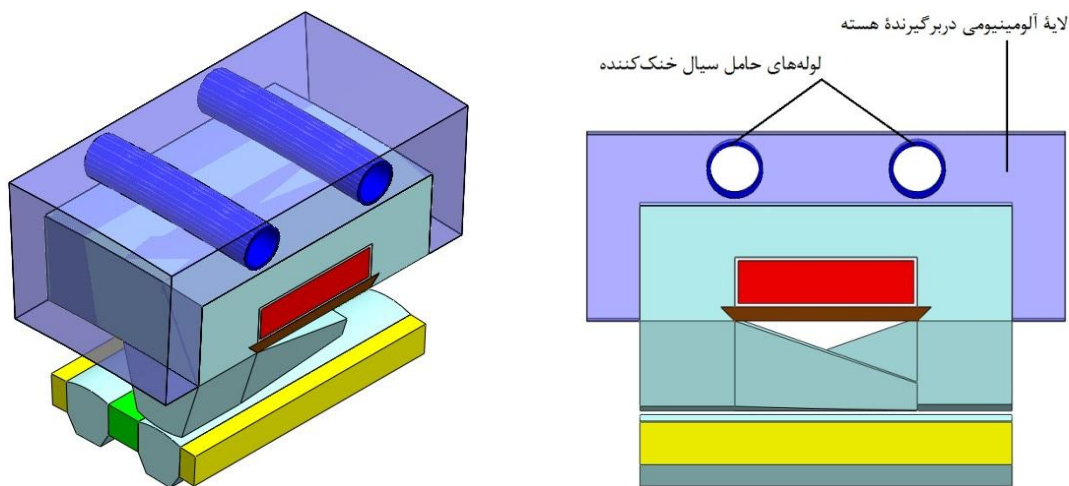
۴-۳- طراحی سیستم خنک ساز ژاکت آبی برای موتور مورد بررسی

اکنون با استفاده از الگوریتم ارائه شده در بخش قبل، به طراحی ژاکت آبی خنک‌ساز موتور TFPM قطب چنگالی پرداخته می‌شود. این طراحی دقیقاً طبق مراحل الگوریتم ارائه شده انجام خواهد گرفت.

۱) ابتدا لازم است تا ساختار سیستم خنک‌کننده مشخص شود. در ماشین‌های الکتریکی اغلب از ژاکت‌های آبی مانند شکل ۴-۱۱ استفاده می‌شود. با توجه به این که در ماشین‌های TFPM قطب چنگالی فازها در امتداد محور و به صورت مستقل از هم قرار گرفته‌اند، اگر از سیستم شکل ۴-۱۱ استفاده شود فازها از نظر دمایی با هم متفاوت خواهند بود. به همین دلیل برای هر فاز از یک ورودی و خروجی آب مستقل استفاده می‌شود. همچنین برای دفع تلفات مکانیکی، از خنک‌سازی درپوش‌ها به شیوه نشان داده شده شکل ۴-۱۱ استفاده می‌شود. به عبارت دیگر برای ماشین مورد بررسی در این گزارش به ۸ ورودی آب و ۸ خروجی آب نیاز است (۶ عدد برای ۶ فاز و دو تا برای درپوش‌ها). پشت هسته استاتور هر فاز را لایه‌ای از آلومینیوم، که با فشار به هسته متصل شده است تا هیچ فاصله

هوایی ایجاد نشود، پوشانده است و لوله‌های آب خنک‌کننده از داخل این لایه آلومینیومی عبور کرده و هسته را دور می‌زنند. شکل ۴-۱۴ این ساختار را نشان می‌دهد. لوله‌ها در این شکل می‌توانند به صورت سری یا موازی تغذیه شوند. استفاده از لوله‌های سری این مزیت را دارد که تعداد اتصالات، که یکی از عوامل اصلی افت فشار هستند، در سیستم کمتر است. لذا در این گزارش لوله‌های خنک‌کننده در هر فاز به صورت سری تغذیه می‌شوند.

همچنین فرض می‌شود که آب خالص با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد در دسترس است.



شکل ۴-۱۴: آرایش سیستم خنک ساز پیشنهادی برای موتور TFPM

(۲) با در نظر گرفتن ۶ کیلووات تلفات به ازای هر فاز (با در نظر گرفتن اثر هارمونیک‌های تغذیه بر روی تلفات و همچنین تلفات اضافی دیگر) و انتخاب ۱۰ درجه به عنوان حداکثر افزایش دمای مجاز سیال در خروجی، حداقل دبی مورد نیاز بر حسب گالن بر دقیقه (gpm) محاسبه می‌شود. در این محاسبات از پارامترهای آب در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شده است.

$$Q_{\min} = \frac{\sum P_{\text{Loss}}}{\rho \cdot C_p \cdot \Delta T_{\max}} = \frac{6000}{992.3 \times 4.179 \times 10} = 1.4446 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s} = 2.3 \text{ gpm} \quad (23-4)$$

(۳) لوله مسی گرد استاندارد با مشخصات جدول ۴-۶ برای عبور آب از درون هر فاز انتخاب می‌شود.

این لوله قابلیت انعطاف بالایی دارد و به راحتی به صورت حلقه در می آید.

برای این لوله، سرعت سیال به صورت زیر محاسبه می شود:

$$V = \frac{Q_{\min}}{A} = \frac{1.4446 \times 10^{-4}}{\pi(0.013843/2)^2} = 0.958 \frac{m}{s} \quad (24-4)$$

که این سرعت، در محدوده سرعت مناسب برای عبور آب قرار دارد.

جدول ۴-۶: مشخصات لوله مسی انتخاب شده برای عبور آب [۴۰]

نام دقیق	سایز نامی یا استاندارد	قطر خارجی	قطر داخلی	ضخامت دیواره
تیوب مسی نوع L آبدیده شده	1/2 اینچ	۰/۶۲۵ اینچ	۰/۵۴۵ اینچ	۰/۰۴ اینچ

برای محاسبه افت فشار در لوله های خنک کننده در درون ماشین می توان از منحنی های شکل ۴-۱۳ استفاده کرد که برای لوله مسی گرد است. در این صورت افت فشار در هر صد فوت لوله انتخاب شده حدود $5/5 \text{ PSI}$ خواهد بود. قطر لوله های اصلی انتقال آب را می توان به گونه ای انتخاب کرد که افت فشار در این لوله ها برابر همان افت $5/5 \text{ PSI}$ در هر صد فوت لوله باشد. اما بر خلاف لوله های داخل ماشین که بهتر است کم قطر باشند، برای لوله های اصلی قطورتر بودن لوله ها مناسب تر است که می توان سه دلیل برای این ادعا مطرح نمود: (۱) با توجه به شکل ۴-۱۳، با افزایش قطر لوله افت فشار در آن، و در نتیجه هد مورد نیاز پمپ، به صورت لگاریتمی کاهش می یابد و (۲) انتقال حرارت از طریق لوله های اصلی مطلوب نیست، و با افزایش قطر لوله ضریب انتقال حرارت کاهش می یابد (۳) قابلیت انعطاف برای لوله های اصلی مطرح نیست. اگر قطر لوله اصلی برابر $3\frac{1}{2}$ اینچ انتخاب شود، به ازای دبی کل 14 gpm ، افت فشار به حدود $0/2 \text{ PSI}$ در هر صد فوت لوله کاهش می یابد. این افت فشار در مقابل افت فشار در لوله های انتقال حرارت در داخل ماشین قابل صرف نظر کردن است و لذا می توان در محاسبات پمپ مورد نیاز فقط لوله های داخل ماشین را در نظر گرفت. البته می توان از یک ضریب اصلاح کننده نیز بهره برد تا محاسبات دقیق تر باشد.

(۴) با توجه به وابستگی مشخصات سیال به دما، ضریب انتقال حرارت هم برای دمای ۳۰ درجه (ورودی) و هم برای دمای ۴۰ درجه (خروجی) محاسبه می‌شود. نتایج این محاسبات، که بر اساس معادلات ارائه شده در گام ۴ الگوریتم انجام شده‌اند، در جدول ۴-۷ آمده است. مشاهده می‌شود که در دمای بالاتر ضریب انتقال حرارت و آشفتگی جریان سیال، که به وسیله عدد رینولدز مشخص می‌شود، بیشتر است.

جدول ۴-۷: پارامترهای انتقال حرارت از طریق لوله حامل آب در دماهای مختلف

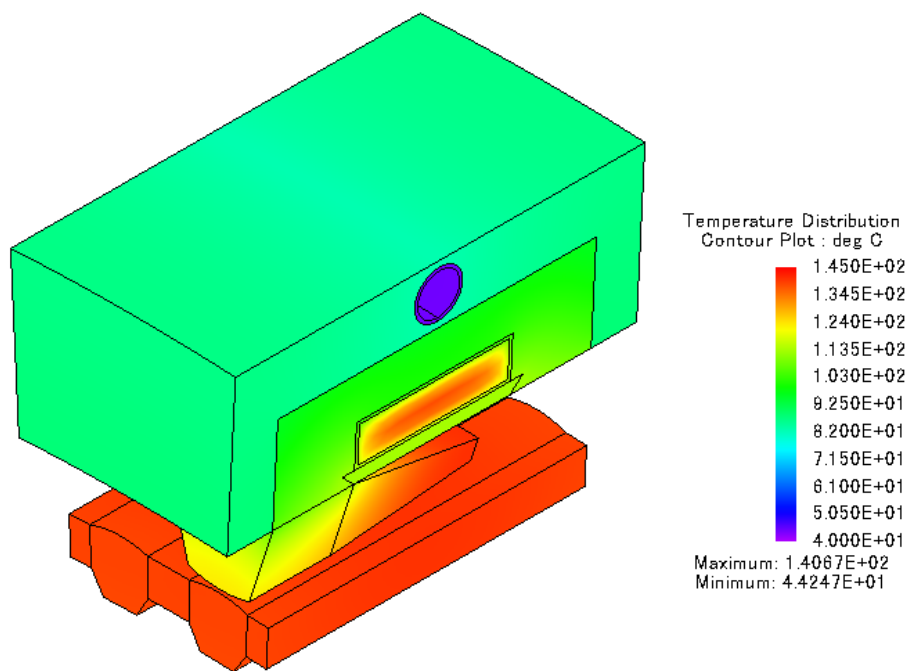
دما (°C)	Re	Pr	Nu	h
30	1.6561×10^4	5.3997	113.2777	5.0484×10^3
40	2.0169×10^4	4.3165	122.8188	5.603×10^3

(۵) در این مرحله به کمک شبیه‌سازی به کمک روش اجزاء محدود تعداد لوله‌های خنک‌کننده مورد نیاز (به عبارت دیگر، سطح مقطع لازم برای انتقال حرارت بین ماشین و سیال خنک‌کننده) در هر فاز برای رسیدن به شرایط دمایی مطلوب در تمامی نقاط داخلی ماشین مشخص می‌شود. در این شبیه‌سازی هم همرفت طبیعی، مانند آنچه قبلاً بیان شد، و هم همرفت اجباری از طریق لوله‌ها در نظر گرفته می‌شوند.

برای اولین انتخاب تعداد لوله‌ها برابر یک در نظر گرفته می‌شود. شکل ۴-۱۵ توزیع دمای ماشین را با در نظر گرفتن یک لوله خنک‌ساز نشان می‌دهد. این شکل مربوط به وضعیت دمایی جفت قطب در محل خروجی آب با دمای ۴۰ درجه از لوله است. در این شبیه‌سازی فرض شده است که بین تمامی سطوح چسبیده به هم یک فاصله هوایی ۰/۰۵ میلی‌متری وجود دارد، که در هنگام مونتاژ ماشین به وجود می‌آید. اگرچه این فاصله به نظر کوچک است، ولی تأثیر آن بسیار زیاد است. مشاهده می‌شود که دمای مگنت‌ها به بالاتر از ۱۴۰ رسیده است و همچنین درون سیم‌پیچ نقاطی با دمای بالاتر از ۱۳۰ درجه وجود دارد.

برای کاهش دمای ماکزیمم ماشین و همچنین مشکلاتی که ممکن است در ساخت سیستم

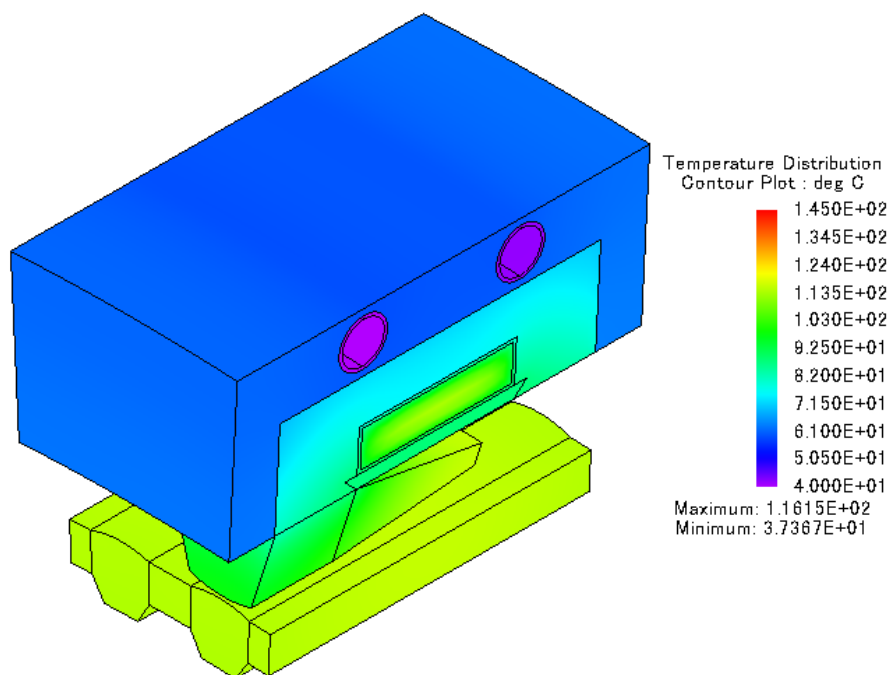
خنک‌ساز با یک لوله به وجود آید، بهتر است از دو لوله سری استفاده شود. در این صورت، توزیع دما در داخل ماشین مطابق شکل ۴-۱۶ خواهد شد. این شکل نیز مربوط به وضعیت دمایی جفت قطب در محل خروجی آب با دمای ۴۰ درجه از لوله است. در این حالت دمای آب در لوله سمت چپ برابر ۳۵ و در لوله سمت راست برابر ۴۰ درجه فرض شده است و ضرایب انتقال حرارت مربوطه نیز بر اساس اطلاعات جدول ۴-۷ به نرم‌افزار معرفی شده است. همچنین، در اینجا نیز فرض شده است که بین تمامی سطوح چسبیده به هم یک فاصله هوایی ۰/۰۵ میلی‌متری وجود دارد. در این حالت می‌توان با اطمینان بالایی از کلاس عایقی ۱۳۰ استفاده نمود. همچنین دمای مگنت‌ها هم در حد معقولی نگه داشته شده است.



شکل ۴-۱۵: توزیع دما در موتور به ازای یک لوله

اکنون مناسب است تا اندکی در مورد تأثیر فاصله هوایی بین سطوح مختلف بحث شود. شکل ۴-۱۷ توزیع دما را با در انتخاب دو لوله و به ازای فواصل هوایی متفاوت بین صفحات نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که اگر فرآیند ساخت به گونه‌ای باشد که این فاصله کمترین مقدار ممکن را داشته

باشد، عملکرد سیستم خنک‌ساز بسیار بهبود می‌یابد و توزیع دما در داخل ماشین کاهش پیدا می‌کند. به هر حال، عدم وجود فاصله هوایی بین قطعات غیرممکن است، ولی مقادیر ۰/۰۱ تا ۰/۰۳ مقادیر نرمالی هستند.



شکل ۴-۱۶: توزیع دما در موتور به ازای دو لوله

۶) تعیین هد مورد نیاز برای پمپ

افت فشار در سیستم خنک‌ساز به افت فشار در لوله‌های داخل ماشین و همچنین افت فشار در لوله‌های اصلی انتقال آب در خارج از ماشین تقسیم می‌شود. هر کدام از این افت‌ها به دو بخش افت فشار ناشی از اصطکاک و افت فشار مربوط به اتصالات دسته‌بندی می‌شود. در کاربردهای انتقال آب و یا سیستم‌های گرمایشی ساختمان، می‌توان برای منظور کردن افت فشار در اتصالات، طول لوله‌ها را ۱/۵ برابر فرض کرد. اما در سیستم طراحی شده، با توجه به کمتر بودن نسبت طول لوله‌ها به تعداد اتصالات، این ضریب باید بزرگ‌تر انتخاب شود. در این گزارش این ضریب برابر ۲/۵ در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، اگر قطر لوله اصلی انتقال‌دهنده آب به قدر کافی بزرگ انتخاب

شود، می توان از افت فشار آن در مقابل فشار لوله های داخلی صرف نظر کرد. به هر حال، برای افزایش ضریب اطمینان، از یک ضریب ۱/۵ برای منظور کردن اثر این لوله ها استفاده می شود. توجه شود که برای انجام محاسبات دقیق حتماً باید از شبیه سازی های کامپیوتری مناسب برای تعیین افت فشار و یا افت هد در این سیستم استفاده شود. همچنین با توجه به این که تغذیه سیال خنک ساز تمامی لایه ها به صورت موازی صورت می گیرد، افت فشار در هر یک از مسیرهای موازی برابر بوده و افت فشار کلی نیز برابر همین مقدار خواهد شد. با توجه به توضیحات فوق، افت هد در سیستم به صورت زیر محاسبه می شود:

$$Head\ Loss = \frac{(2.5 \times 1.5) L_{in} \cdot PD}{100} \quad (25-4)$$

در رابطه (۲۵-۴)، L_{in} طول مسیر عبور آب در هر فاز بر حسب فوت و PD افت فشار در هر ۱۰۰ فوت لوله بر حسب PSI است. با توجه به این که افت هد بر حسب متر ستون آب مطرح می شود، رابطه (۲۵-۴) به صورت زیر تغییر می کند، تا اینکه افت هد بر حسب متر ستون آب به دست آید:

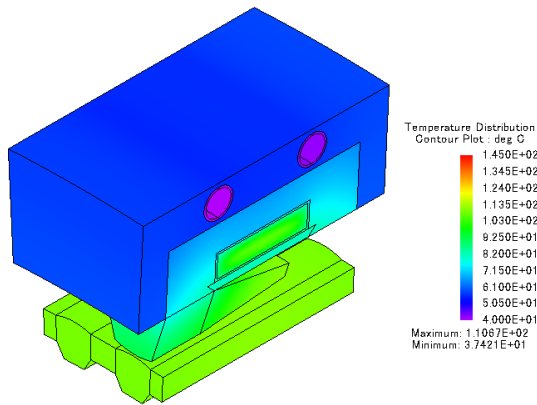
$$Head\ Loss = \frac{2L_{in}PD}{100} \times \frac{1\ foot}{0.3048m} \times \frac{1\ Atmosphere}{14.696\ PSI} \times \frac{10m\ H_2O}{1\ Atmosphere} \quad (26-4)$$

لذا افت هد در سیستم خنک ساز به صورت زیر محاسبه می شود:

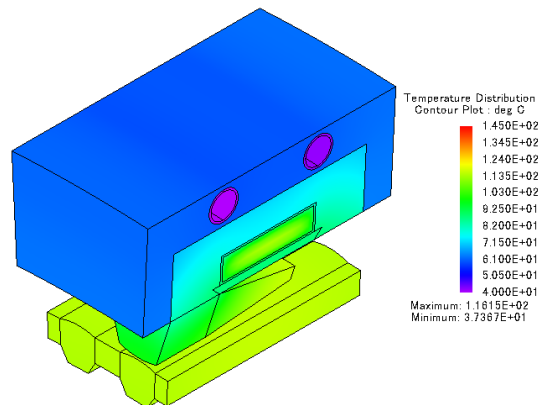
$$Head\ Loss = \frac{(2.5 \times 1.5)(2 \times 2\pi \times 0.6985) \times 10}{100 \times 0.3048 \times 14.696} = 0.735m\ H_2O \quad (27-4)$$

(۷) انتخاب پمپ مناسب و موتور محرک آن

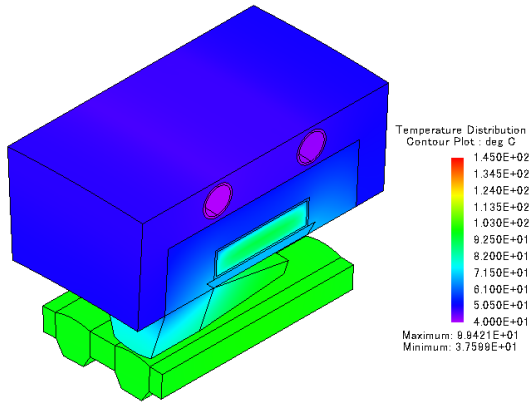
با داشتن دبی $14\ gpm$ و هد 0.735 متر ستون آب، می توان با مراجعه به دیاگرام های موجود برای پمپ ها، پمپی را که در این نقطه کار بیشترین بازده را دارد پیدا کرد.



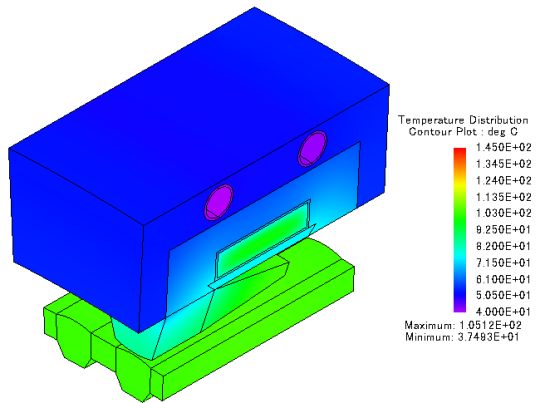
ب: فاصله هوایی ۰/۰۴ میلی متری بین قطعات



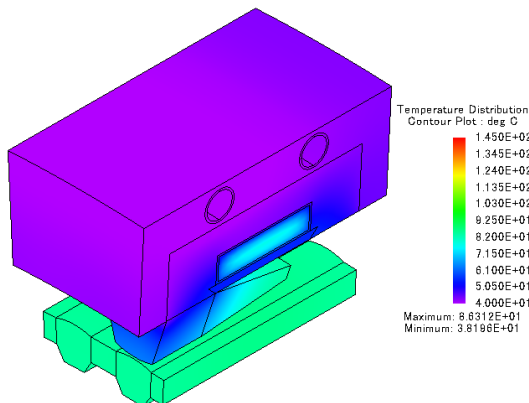
الف: فاصله هوایی ۰/۰۵ میلی متری بین قطعات



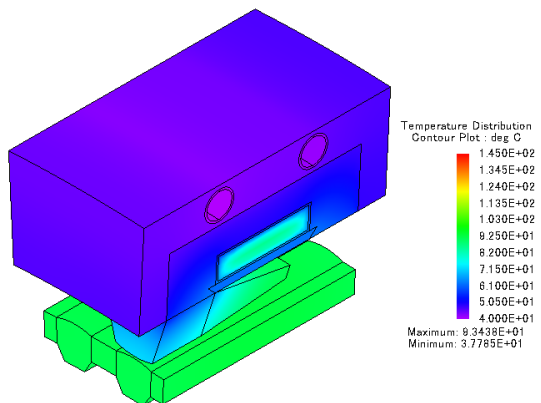
د: فاصله هوایی ۰/۰۲ میلی متری بین قطعات



ج: فاصله هوایی ۰/۰۳ میلی متری بین قطعات



و: عدم وجود فاصله هوایی بین قطعات



ه: فاصله هوایی ۰/۰۱ میلی متری بین قطعات

شکل ۴-۱۷: توزیع دمای ماشین به ازای فاصله هوایی‌های مختلف بین قطعات

در کاتالوگ اکثر پمپ‌ها، موتور محرک مناسب برای آن پمپ معرفی شده است. به هر حال می‌توان توان ورودی پمپ، یا همان توان خروجی موتور محرک مورد نیاز، را از رابطه زیر که برای پمپاژ آب صادق است، تعیین کرد:

$$P_{pump} = \frac{H \times Q}{367\eta} \quad (28-4)$$

در این رابطه (۲۸-۴)، P_{pump} توان مورد نیاز پمپ بر حسب کیلووات، H هد بر حسب متر، Q دبی بر حسب متر مکعب در ساعت و η راندمان (بین صفر تا یک) است.

فصل ۵:

نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتیجه گیری

چگالی توان، چگالی گشتاور و بهره بالا ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار متقاطع با ساختار قطب چنگالی را به یکی از موضوعات جذاب برای تحقیق در مراکز دانشگاهی و صنعتی سرتاسر جهان تبدیل کرده است. انتظار می‌رود با پیشرفت تکنولوژی‌های مرتبط با طراحی و تولید انبوه این ماشین‌ها شاهد گسترش استفاده از آن‌ها و جایگزینی این ماشین‌ها به جای توپولوژی‌های قدیمی‌تر باشیم. در کشور عزیزمان، ایران، می‌توان از ظرفیت‌های این ماشین‌ها برای استفاده در نیروگاه‌های بادی و صنایع خاص، مانند صنایع دریایی، به خوبی بهره گرفت.

مرور پژوهش‌های قبلی نشان می‌دهد که مباحث مربوط به محاسبات تلفاتی و تحلیل‌های حرارتی و طراحی سیستم‌های خنک‌ساز بسیار کمتر از سایر حوزه‌های تحقیقاتی مرتبط با ماشین‌های الکتریکی مورد توجه قرار گرفته‌اند. غفلت از این زمینه‌های تحقیقاتی با نیاز روزافزون به ماشین‌های کاملاً بهینه سازگار نخواهد بود. این موضوع در ماشین‌های خاصی مانند ماشین شار متقاطع قطب چنگالی نمود بیشتری دارد، به طوری که مزایای یاد شده برای این ماشین‌ها کاملاً وابسته به دقت ارزیابی‌های تلفاتی و تحلیل‌های حرارتی ماشین است.

در این پایان‌نامه یک موتور سنکرون مغناطیس دائم شار متقاطع قطب چنگالی یک ۵۰۰ کیلوواتی، که با سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه به گردش در می‌آید، به منظور انجام مطالعات انتخاب شد. با توجه به پیچیدگی‌های ساختاری و جنس مواد مورد استفاده در ماشین TFPM قطب چنگالی، روش اجزاء محدود به عنوان ابزار اصلی در تحلیل‌های الکترومغناطیسی و حرارتی این ماشین معرفی شد. با توجه به اشتباهات یافت شده در الگوریتم‌های طراحی موجود در مراجع مورد بررسی، طراحی این موتور بر اساس یک الگوریتم طراحی اولیه جدید و اصلاح شده انجام گرفت. از بین شرایط عملکرد مختلف، برآورد توزیع تلفات در دو وضعیت مدار باز و بار کامل به کمک روشی بر پایه معادله معروف

اشتیمنمز انجام شد. نتایج این ارزیابی‌ها نشان داد که در هر دو حالت، تلفات هسته سهم عمده تلفات موتور مورد بررسی را به خود اختصاص می‌دهد. همچنین، مشخص شد که تلفات هسته این ماشین در بار کامل حدود ۱۵ درصد کمتر از تلفات هسته در بی‌باری است. به علاوه، تغییر شکل فاصله هوایی بین روتور و استاتور به منظور کاهش هارمونیک‌های اضافی در شکل موج ولتاژ فاصله هوایی، تلفات موتور را کمی کاهش داد. از این موضوع می‌توان نتیجه گرفت که در صورت بهره بردن از یک روش مناسب برای ارزیابی دقیق توزیع تلفات در داخل ماشین، به خوبی می‌توان ساختار و شرایط عملکرد ماشین را به صورت بهینه انتخاب کرد.

با فرض بدترین حالت محتمل، توزیع دمای موتور در شرایط همرفت طبیعی با استفاده از ترکیب مدار معادل حرارتی و روش اجزای محدود به دست آمد. نشان داده شد که در این وضعیت دما می‌تواند به بیش از ۵۷۰ درجه سانتی‌گراد برسد. نتیجه شد که با توجه به کلاس عایقی موتور و جنس آهنرباهای دائم به کار رفته در آن، بدون استفاده از یک سیستم خنک‌ساز مناسب قطعاً موتور آسیب جدی خواهد دید. ژاکت آبی به عنوان مناسب‌ترین گزینه برای خنک‌سازی موتور پیشنهاد شد. پس از ارائه یک الگوریتم جامع و کامل برای طراحی ژاکت آبی، طراحی سیستم خنک‌ساز انجام گرفت. نشان داده شد که برای رسیدن به توزیع دمایی مطلوب باید از دو لوله خنک‌کننده با قطر ۵/۰ اینچ در هر فاز ماشین استفاده شود و آب با دمای ۳۰ درجه با سرعتی نزدیک به یک متر در ثانیه درون این لوله‌ها به گردش درآید. یک نتیجه مهم که در تحلیل خنک‌سازی ماشین به دست آمد، مربوط به تأثیر کیفیت تولید و مونتاژ قطعات موتور می‌شود. اگر فرآیند ساخت به گونه‌ای باشد که فاصله سطوح متصل به هم قطعات موتور کمترین مقدار ممکن را داشته باشد، عملکرد سیستم خنک‌ساز بسیار بهبود می‌یابد و توزیع دما در داخل ماشین کاهش پیدا می‌کند.

۵-۲- پیشنهادات

با توجه به اهمیت موضوعات مطرح شده در قالب پایان نامه حاضر و به منظور پیشرفت سریع تر در این حوزه ها، پیشنهاداتی برای انجام پژوهش های جدید ارائه می شود:

(۱) در این پژوهش به دلیل محدودیت در ظرفیت های محاسباتی در دسترس و نبود اطلاعات کافی در مورد مواد سازنده این نوع ماشین، ارزیابی تلفات هسته بر پایه معادله اشتینمتر صورت گرفت. در صورت رفع این محدودیت ها می توان از مدل های تلفاتی دقیق تری، همچون مدل پریساژ و مدل جیلز-اثرتون، برای برآورد توزیع تلفات هسته بهره برد.

(۲) در این تحقیق اشاره ای به بهینه سازی ساختار ماشین TFPM قطب چنگالی برای بهبود شکل موج ولتاژ داخلی ماشین شد. با توجه به درجه آزادی بالایی که ساختار شار متقاطع قطب چنگالی به طراحی می دهد، در صورت استفاده از ارزیابی های تلفاتی دقیق در حین طراحی، امکان بهبود راندمان ماشین وجود دارد.

(۳) در مراجع مورد بررسی در قالب پروژه حاضر، ساختارهای شار متقاطع مختلف از لحاظ چگالی توان و گشتاور مقایسه شده اند. می توان این ساختارها را از نظر توزیع تلفات و بازده نیز با هم مقایسه کرد.

(۴) در این تحقیق به بحث در مورد تأثیر هارمونیک های زمانی جریان و هارمونیک های فضایی چگالی شار در تلفات موتور TFPM قطب چنگالی پرداخته شد. با توجه به این که برای تغذیه موتورهای سنکرون مغناطیس دائم از مبدل های الکترونیک قدرت استفاده می شود، می توان تأثیر هارمونیک های زمانی تزریق شده در جریان ماشین TFPM قطب چنگالی را، که ناشی از استفاده از این مبدل های الکترونیک قدرت است، بررسی نمود.

(۵) در این پایان نامه، از ترکیب روش اجزای محدود و مدار معادل حرارتی برای تحلیل حرارتی موتور استفاده گردید. اگر چه این روش نتایج دقیق تری نسبت به روش های تحلیلی متداول

ارائه می‌کند، اما می‌توان CFD را به عنوان دقیق‌ترین روش برای تحلیل حرارتی معرفی نمود. در صورت همکاری بیشتر دانشکده‌های برق و مکانیک، می‌توان از این روش در تحلیل حرارتی ماشین‌های الکتریکی استفاده کرد.

(۶) در این پایان‌نامه، طراحی سیستم خنک‌ساز ژاکت آبی با استفاده از یک الگوریتم طراحی اولیه انجام گرفت. استفاده از روش‌های بهینه‌سازی در این طراحی کمک شایانی به کاهش توان مصرفی سیستم خنک‌ساز و بهبود توزیع دما در داخل موتور خواهد کرد.

پیوست: نحوه طراحی موتور TFPM قطب چنگالی مورد مطالعه

الف: انتخاب شکل موج ولتاژ داخلی برای موتور مورد نظر

محاسبات طراحی ماشین با ولتاژ داخلی دوزنقه‌ای بر اساس ولتاژ داخلی انجام می‌شود و ولتاژ ورودی در محاسبات منظور نمی‌شود. اما یکی از محدودیت‌های اساسی در طراحی، محدودیت ولتاژ ورودی است. از این‌رو، پس از طراحی ماشین با ولتاژ داخلی دوزنقه‌ای باید راکتانس سنکرون ماشین محاسبه شده و به کمک شبیه‌سازی‌های لازم، سطح ولتاژ مورد برای تغذیه ماشین با جریان نامی در شرایط سرعت و یا بار نامی به دست آید. اگر این سطح ولتاژ بتواند توسط منبع تغذیه فراهم شود طرح را می‌توان قابل قبول فرض کرد، و در غیر این صورت طراحی باید دوباره انجام گیرد. این در حالی است که الگوریتم طراحی ماشین با ولتاژ داخلی سینوسی به گونه‌ای است که هم ولتاژ ورودی و هم ولتاژ داخلی در محاسبات طراحی نقش دارند. پس از طراحی ماشین با ولتاژ داخلی سینوسی، راکتانس سنکرون ماشین محاسبه می‌شود و به کمک شبیه‌سازی دینامیکی ماشین می‌توان بررسی کرد که آیا موتور طراحی شده با ولتاژ ورودی مفروض قادر به تأمین توان مورد نیاز است یا خیر.

موتوری که در این پژوهش به عنوان "مطالعه موردی"^۱ انتخاب شده است، از بانک باتری با ولتاژ لینک DC ۲۲۰ ولت تغذیه می‌شود. با فرض این که امکان استفاده از مبدل‌های DC/DC وجود ندارد، مقدار دامنه ولتاژ فاز در خروجی اینورتر دارای محدودیت خواهد بود، که این حد در بدترین حالت حدود ۱۰۵ ولت در نظر گرفته می‌شود. می‌توان نشان داد که برای تأمین نیاز بار توسط موتور TFPM قطب چنگالی با ولتاژ داخلی دوزنقه‌ای، دامنه ولتاژی فراتر از این مقدار محدود مورد نیاز است. یکی از دلایل نیاز به این ولتاژ زیاد، بزرگ بودن اندوکتانس خودی هر فاز این نوع موتورها نسبت به انواع دیگر با این سطح ولتاژ و توان می‌باشد. همچنین تغییرات شدید در شکل موج جریان دوزنقه‌ای، نیاز

^۱ Case Study

به ولتاژ با دامنه بزرگتر را تشدید می‌نماید.

با توجه به توضیحات بالا، طراحی مورد مطالعه در این پایان‌نامه با فرض ولتاژ داخلی سینوسی انجام خواهد گرفت. با این حال، رسیدن به ولتاژ داخلی کاملاً سینوسی، به خصوص در ساختار TFPM قطب چنگالی، تقریباً غیر ممکن است.

ب: مراحل طراحی موتور مورد مطالعه

قبل از اقدام به طراحی، مناسب است تا در مورد محدودیت‌های طراحی توضیحاتی ارائه شود. اولین محدودیت مربوط به قطر خارجی موتور است، که فرض می‌شود این مقدار باید از ۱۸۰۰ میلی-متر کوچکتر باشد. با احتساب حدود ۴۰۰ میلی‌متر برای سیستم خنک‌سازی و بدنه، قطر خارجی هسته به حدود ۱۴۰۰ میلی‌متر محدود می‌شود.

محدودیت بعدی مربوط به حداکثر دامنه ولتاژ ورودی است. با توجه به این که موتور توسط درایو با ولتاژ لینک ۲۲۰ ولت DC تغذیه خواهد شد، حداکثر ولتاژ فاز ورودی برابر ۱۰۵ ولت انتخاب می‌شود. یعنی $V_{in} = 105/\sqrt{2}$.

اکنون با در نظر گرفتن این محدودیت، به بررسی توان قابل جذب موتور پرداخته می‌شود. توان ورودی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{in} = \frac{P_R}{\eta} = m \frac{E_f}{X} \frac{105}{\sqrt{2}} \sin \delta$$

در این رابطه P_{in} توان ورودی ماشین، P_R توان خروجی ماشین، η بازده، m تعداد فازها، E_f مقدار مؤثر ولتاژ داخلی در هر فاز، X راکتانس خودی هر فاز استاتور و δ زاویه قدرت می‌باشند.

با ولتاژ ورودی محدود به یک مقدار کم، تنها راه برای دستیابی به توان بالا، افزایش نسبت mE_f/X است. ماشین TFPM به نسبت ماشین‌های سنکرون دیگر دارای E_f/X کوچک‌تری است،

و این مسئله کار را برای طراحی سخت تر می کند. تجربیات طراحی و شبیه سازی مکرر و روابط تحلیلی قابل اثبات نشان می دهند که با افزایش تعداد قطبها (و در نتیجه افزایش فرکانس)، چگالی شار ماکزیمم هسته و طول کمان خارجی آهنرباهای دائم، می توان نسبت E_f/X را افزایش داد، در حالیکه با افزایش تعداد دور سیم پیچی نسبت کاهش می یابد. همچنین این تجربیات نشان می دهند که برای طراحی ماشین مورد نظر باید تعداد فازها را زیاد در نظر گرفت. لذا پس از بررسی های زیاد، تعداد فازها و پارامترهای دیگر به صورت جدول پ-۱ انتخاب شدند.

جدول پ-۱: پارامترهای انتخابی برای طراحی موتور ۵۰۰ کیلوواتی مدنظر

ردیف	نام پارامتر	نماد	مقدار پارامتر
۱	تعداد فازها	m	۶
۲	مقدار حداکثر دامنه ولتاژ داخلی با توجه به ولتاژ dc تغذیه	E_f	۱۲۰ ولت
۳	تعداد دور سیم پیچ در هر فاز	N_t	۱ دور
۴	چگالی شار ماکزیمم هسته	B_{cs}	۱/۲ تسلا
۵	فرکانس ورودی	f	۳۰۰ هرتز

در ادامه مراحل طراحی به ترتیب بیان می شوند.

گام ۱ پارامترهای اصلی خواسته شده و محدودیت های اصلی پیش رو مشخص می شوند. جدول پ-۲ این اطلاعات را ارائه می دهد.

جدول پ-۲: پارامترهای اصلی خواسته شده به همراه محدودیت های طراحی موتور مورد نظر

ردیف	نام پارامتر	نماد	مقدار پارامتر
۱	توان خروجی	P_{out}	۵۰۰ کیلووات

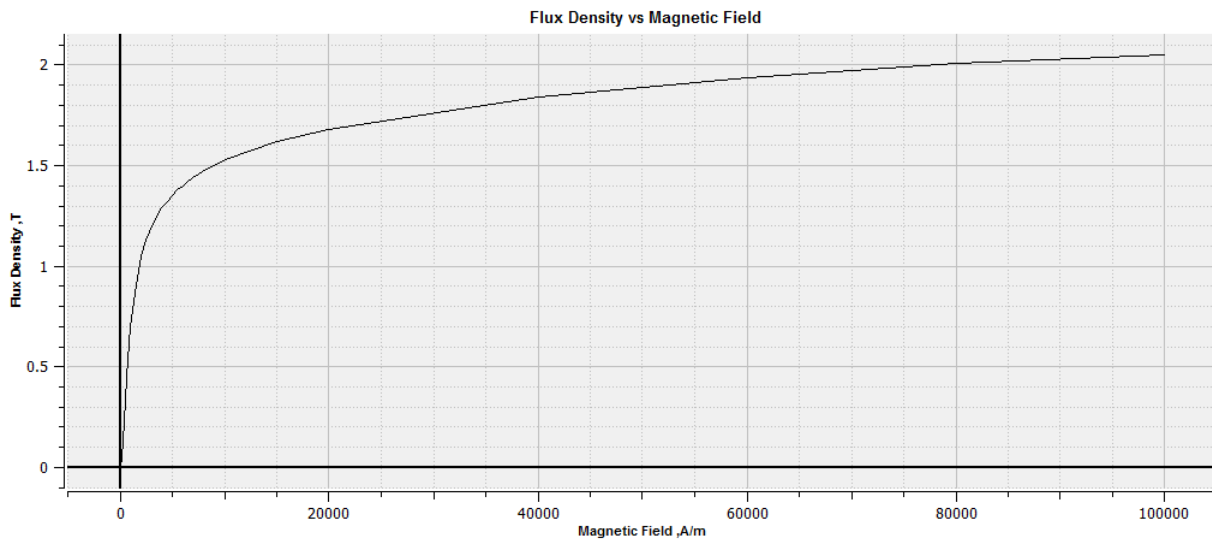
ردیف	نام پارامتر	نماد	مقدار پارامتر
۲	سرعت چرخش	n_s	۳۰۰ دور در دقیقه
۳	ولتاژ تغذیه dc	V_{dc}	۲۲۰ ولت
۴	مقدار موثر ولتاژ فاز	V_{in}	۷۴/۲۴ ولت
۵	حداکثر قطر خارجی مجاز موتور به همراه متعلقات آن	$D_{o,max}$	۱/۸ متر

گام ۲ انتخاب مواد سازنده برای ماشین

هسته از جنس Somaloy500+0.5% Kenolube-800MPa انتخاب می‌شود، که منحنی B-H آن در شکل پ-۱ نشان داده شده است. دسته منحنی‌های تلفات این ماده بر حسب چگالی شار در فرکانس‌های مختلف نیز در پ-۲ نشان داده شده‌اند.

آهنربای دائم از جنس NdFeB با چگالی شار پسماند یک تسلا انتخاب می‌شود، که منحنی B-H مربوط به ربع دوم آن در پ-۳ نشان داده شده است. توجه شود که می‌توان از آهنربا با چگالی شار پسماند ۱/۲ یا ۱/۴ تسلا نیز استفاده کرد، اما برای افزایش طول کمان آهنربای دائم و در نتیجه کاهش اندوکتانس خودی هر فاز، از آهنربا با چگالی شار یک تسلا استفاده می‌شود. از شکل پ-۳ خواهیم داشت:

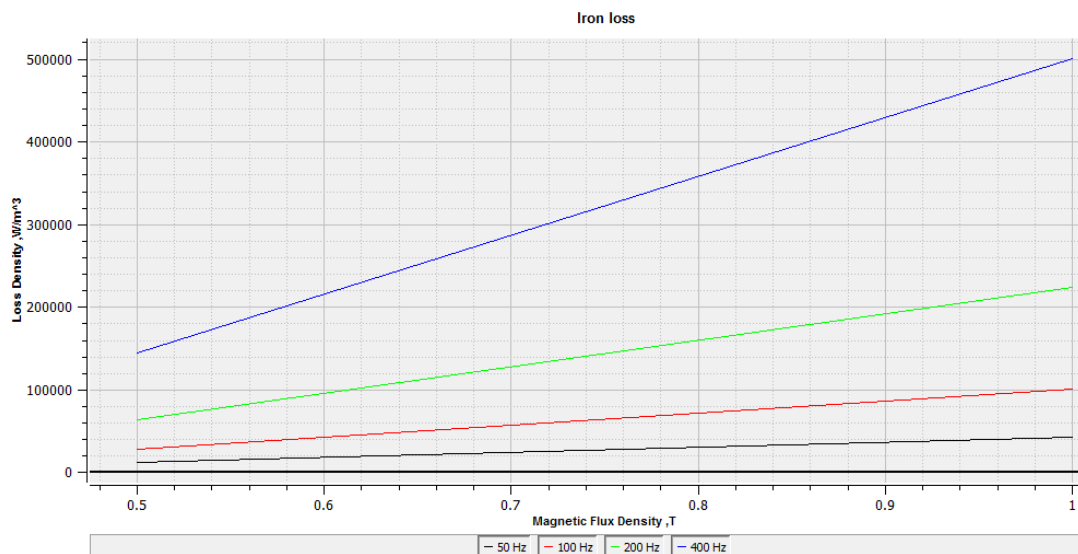
$$B_r = 1 T \quad , \quad H_c = 757250 \frac{A}{m}$$



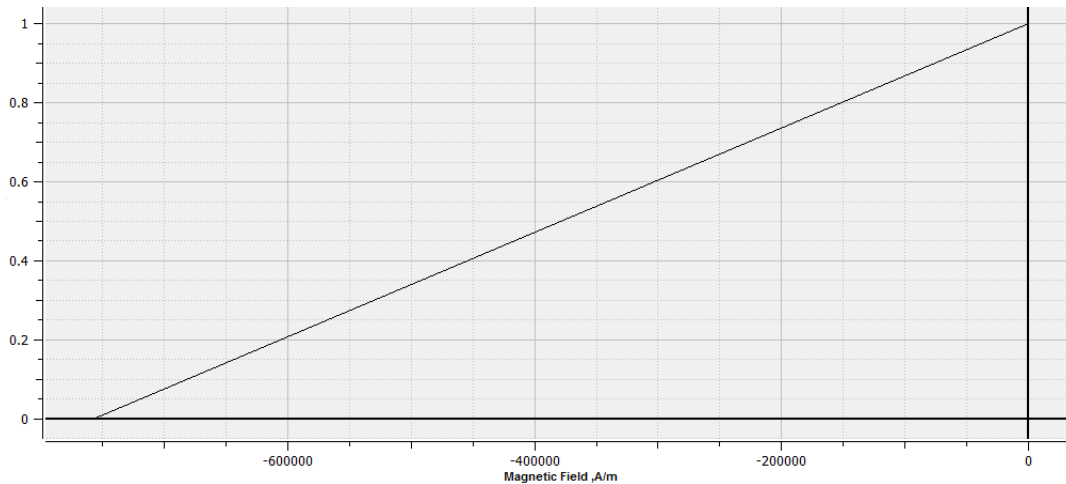
شکل پ-۱: منحنی B-H هسته های استاتور و روتور موتور مورد نظر [۱۰]

گام ۳ مقادیر اختصاص یافته بهینه یا معقول به پارامترهای اختیاری بر اساس تجربه‌های قبلی و یا بررسی‌های انجام گرفته با تحلیل اجزاء محدود مشخص می‌شوند. این پارامترها و مقادیر آنها در جدول پ-۳ آمده است.

گام ۴ مشخص نمودن پارامترهای قابل تغییر برای رسیدن به چگالی توان ماکزیمم و حدود تغییرات آنها. این پارامترها و حدود تغییرات آنها در پ-۴ ارائه شده‌اند.



شکل پ-۲: دسته منحنی‌های تلفات هسته بر حسب وات بر متر مکعب برای هسته موتور مورد نظر [۱۰]



شکل پ-۳: منحنی B-H آهنربای دائم در ربع دوم [۱۰]

جدول پ-۳: پارامترهای انتخابی و پارامترهای به دست آمده از روش اجزاء محدود برای طراحی موتور، همراه با مقادیر آنها

ردیف	نام پارامتر	نماد	مقدار پارامتر
۱	بازده	η	۰/۹۳
۲	طول فاصله هوایی	g	۱ میلی متر
۳	چگالی جریان هادی	J_s	۶ آمپر بر میلی متر مربع
۴	ضریب پرشوندگی مس	K_{cu}	۰/۴۸
۵	طول شعاعی نوک پایه‌های استاتور در قسمت انتهایی مجاور به روتور	d_{tip}	۵ میلی متر
۶	ضخامت عایق بین شیار و سیم‌پیچ	l_{ins}	۱ میلی متر
۷	ضریب نشت شار مگنت‌ها در روتور	K_{lpm}	۰/۴
۸	ضریب نشت شار مگنت‌ها در دندانه‌های استاتور	$K_{l-tooth}$	۰/۱
۹	ضریب نشت شار مگنت‌ها در هسته استاتور	K_{l-core}	۰/۰۳۵
۱۰	نسبت افت mmf مگنت‌ها در هسته به افت mmf در فاصله هوایی	K_r	۱/۱۵

جدول پ-۴: پارامترهای قابل تغییر برای رسیدن به طرح با چگالی توان ماکزیمم و حدود تغییرات آنها

ردیف	نام پارامتر	نماد	حدود تغییرات
۱	درصد پوشش متمرکز کننده شار توسط کفشک قطب	K_{cov}	۵۰-۶۵ درصد
۲	نسبت طول محوری شیار به طول محوری هر فاز	K_s	۰/۲۵-۰/۷
۳	نسبت طول محوری مؤثر موتور به قطر داخلی استاتور	K_L	۰/۵-۱/۲

گام ۵ با استفاده از الگوریتم طراحی جدید و به کمک برنامه نوشته شده به زبان Matlab، طراحی ماشین انجام می شود. مقادیر بهینه پارامترهای پ-۴ در جدول پ-۵ آورده شده اند. ابعاد هندسی ماشین طراحی شده نیز در جدول پ-۶ داده شده اند.

جدول پ-۵: مقادیر بهینه پارامترهای جدول پ-۴

ردیف	نام پارامتر	نماد	مقدار بهینه
۱	درصد پوشش متمرکز کننده شار توسط کفشک قطب	K_{cov}	۵۰ درصد
۲	نسبت طول محوری شیار به طول محوری هر فاز	K_s	۰/۴۹
۳	نسبت طول محوری مؤثر موتور به قطر داخلی استاتور	K_L	۱

جدول پ-۶: ابعاد هندسی موتور طراحی شده

ردیف	نام پارامتر	نماد	مقدار پارامتر
۱	قطر داخلی روتور	D_{ir}	۱۲۳۶ میلی متر
۲	طول شعاعی آهنربای دائم	H_{pm}	۱۱ میلی متر
۳	قطر داخلی استاتور	D_g	۱۲۶۰ میلی متر

ردیف	نام پارامتر	نماد	مقدار پارامتر
۴	طول شعاعی پایه (دندان) استاتور	d_{os}	۲۶ میلی‌متر
۵	طول شعاعی شیار استاتور	d_{ws}	۱۸ میلی‌متر
۶	طول شعاعی یوغ استاتور (عمق هسته پشت سیم‌پیچ)	d_{cs}	۱۴/۵ میلی‌متر
۷	طول محوری هر فاز استاتور	L_s	۱۰۵ میلی‌متر
۸	طول محوری شیار استاتور	L_{ss}	۵۱/۵ میلی‌متر
۹	قطر خارجی هسته استاتور	D_o	۱۳۷۷ میلی‌متر

- [۱] حسین آذرین‌فر، "مدل‌سازی، الگوریتم طراحی اولیه و بهینه‌سازی موتور شار متقاطع مغناطیس دائم،" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۰.
- [2] J. S. D. Garcia, M. V. Ferreira da Luz, J. P. A. Bastos, and N. Sadowski, "Transverse Flux Machines: What for?," IEEE MULTIDISCIPLINARY ENGINEERING EDUCATION MAGAZINE, VOL. 2, NO. 1, MARCH 2007.
- [3] H. Weh and H. May, "Achievable force densities for permanent magnet excited machines in new configuration," in International Conference on Electrical Machines – ICEM, Munchen, Sept. 1986.
- [4] W. M. Arshad, T. Backstrom, and C. Sadarangani, "Analytical Design and Analysis Procedure for A Transverse Flux Machine," IEEE International Electric Machines and Drives Conference - IEMDC, 2001.
- [5] G. Henneberger and I. A. Viorel, "Variable Reluctance Electrical Machines," Aachen: Shaker Verlag, 2001.
- [6] A. Masmoudi, A. Njeh, A. Mansouri, H. Trabelsi, and A. Elantably, "Optimizing the Overlap Between the Stator Teeth of a Claw Pole Transverse-Flux Permanent-Magnet Machine," IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 40, NO. 3, MAY 2004.
- [7] M.R. Dubois, "Optimized permanent magnet generator topologies for direct-drive wind turbines," Ph.D dissertation, Department of Electrical Engineering, Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 2004.
- [8] A. Masmoudi and A. Elantably, "An Approach to sizing high power density TFPM intended for hybrid bus electric propulsion," Electric Machines and Power Systems, vol. 28, no. 4, pp. 341-354, April 2000.
- [9] S. Huang, J. Luo and T.A. Lipo, "Evaluation of the transverse flux circumferential current machine by the use of sizing equations", IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 1997.
- [10] JMAG Designer Ver. 10.5 Online Help, 2011.
- [11] A. Krings and J. Soulard, "OVERVIEW AND COMPARISON OF IRON LOSS MODELS FOR ELECTRICAL MACHINES," Journal of Electrical Engineering, VOL. 10, NO. 3, 2010.

- [12] L. Dupré and J. Melkebeek, "Electromagnetic hysteresis modelling: from material science to finite element analysis of devices", International Compumag Society Newsletter, VOL. 10, NO. 3, 2008.
- [13] A. Darabi, M. E. Ghazi, H. Lesani, and A. Askarinejad, "Calculation of Local Iron Loss in Electrical Machines Using Finite Elements Method," Engineering Letters, pp.170-174, 2007.
- [14] D. G. Dorrell, M.F. Hsieh, M. Popescu, L. Evans, D. A. Staton, and V. Grout, "A Review of the Design Issues and Techniques for Radial-Flux Brushless Surface and Internal Rare-Earth Permanent Magnet Motors," IEEE Transactions on Industrial Electronics, VOL. 58, NO. 9, Sept. 2011.
- [15] A. Boglietti, A. Cavagnino, D. Staton, M. Shanel, M. Mueller, and C. Mejuto, "Evolution and Modern Approaches for Thermal Analysis of Electrical Machines," IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 56, NO. 3, MARCH 2009.
- [16] JMAG Application Note, "Thermal Analysis of an IPM Motor," JMAG Designer 10.5 Documentations, 2011.
- [17] G. E. Luke, "The Cooling of Electric Machines," Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, VOL. XLII, 1923.
- [18] ABB Motors and Generators, "Low Voltage Water Cooled Motors Catalog," EN 02-2011.
- [19] WEG Brochures, "Water Jacket Cooled Motors," Sep. 2011.
- [20] J. Luo, "Axial Flux Circumferential Current Permanent Magnet Electric Machine," PhD Thesis, University of Wisconsin-Madison, 1999.
- [21] J. Pyrhonen, T. Jokinen, V. Hrabovcova, "Design of Rotating Electrical Machines," John Wiley & Sons, Ltd, 2008.
- [22] IEEE Std 115, "IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines. Part I- Acceptance and Performance Testing, Part II- Test Procedures and Parameter Determination for Dynamic Analysis," 2009.
- [23] C. Mi, "Modelling of Iron Losses of Permanent Magnet Synchronous Motors," PhD Thesis, University of Toronto, 2001.
- [24] J. F. Gieras, M. Wing, "Permanent Magnet Motor Technology, Design and Applications," Second edition, Marcel Dekker, Inc., 2002.
- [25] PROF. A. Binder, "Large Generators and High Power Drives," part 2.

- [26] F. Magnussen, D. Svehkarenko, P. Thelin, And C. Sadarangani, “Analysis of a PM Machine with Soft Magnetic Composites Core,” Department Of Electrical Engineering, Kth – Royal Institute Of Technology, Stockholm, Sweden, 2004.
- [27] http://en.wikipedia.org/wiki/Skin_effect
- [28] J. Kanakaraj, “Electrical Machines and Appliances Theory,” First Edition, Tamil Nadu Textbook Corporation, 2011.
- [29] H. Polinder, M. J. Hoeijmakers, “Eddy-Current Losses in the Permanent Magnets of a PM Machine,” Eighth International Conference on Electrical Machines and Drives, 1997.
- [30] J. H. Lienhard IV, and J. H. Lienhard V, “A Heat Transfer Textbook,” Phlogiston Press, 2012.
- [31] JMAG Application Note, “Thermal Demagnetization Analysis of an SPM Motor,” JMAG Designer 10.5 Documentations, 2011.
- [32] V.M. Montsinger, “Loading Transformers By Temperature,” Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, VOL 49, NO.2 , 1930.
- [33] IEC Standard 60085, “Electrical insulation – Thermal evaluation and designation,” Edition 4.0, 2007.
- [34] D. Staton, A. Boglietti, A. Cavagnino, “Solving the More Difficult Aspects of Electric Motor Thermal Analysis,” IEMDC 2003, Madison, USA, July 2003.
- [35] Y. A. Cengel, “Heat and Mass Transfer A Practical Approach,” McGraw-Hill, 3rd Edition. 2007.
- [36] IEC Standard 60034-6, “Rotating Electrical Machines, Part 6. Methods of Cooling (IC Code),” 1994.
- [37] www.youtube.com/watch?v=tpp1BfCT3as, “WEG Water Jacket Cooled Motors - WGM Line,” Uploaded by WEGCanada, 2011.
- [38] <http://www.engineeringtoolbox.com>
- [39] http://publicecodes.citation.com/icod/ipc/2000/icod_ipc_2000_appe_par001.htm
- [40] Copper Development Association Inc. “The Copper Tube Handbook,” 2010

Abstract

Accurate estimation of losses, correct thermal analysis, and designing an effective cooling system are of great importance for a Claw Pole Transverse Flux Permanent Magnet (TFPM) machine, as a high efficiency motor showing highest power and torque densities compared to those provided by conventional and emerging converter-fed machines. In this thesis, a 500 kW Claw Pole TFPM synchronous motor is selected as the case study. This motor, which rotates at 300 rpm, is fed by a battery bank with a DC link voltage of 220 V. Considering the weaknesses of extracted algorithms from references, design and optimization of this motor is carried out by using a new design algorithm. Losses distribution at open circuit and full load conditions will be obtained by using Finite Element Analysis (FEA). Core losses, the dominant part of motor losses, are estimated by a method based on the Steinmetz equation and by using loss curves of core material. Copper losses of stator windings and permanent magnets losses are determined using Ampere's law. Considering the worst case scenario, temperature distribution inside the motor at natural convection condition is obtained by using the combination of the heat equivalent circuit and finite element method (FEM). According to the results of this simulation, to prevent any thermal damage to the motor, water jacket is proposed as the proper and efficient cooling system. After presenting a comprehensive design algorithm for the water jacket, this cooling system and its circulating pump are designed.

Keywords— Claw Pole Transverse Flux Permanent Magnet machine, finite element analysis, losses distribution, Steinmetz equation, temperature distribution, natural convection, forced convection, cooling, water jacket



Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical & Robotic Engineering

Power Engineering Department

Thesis Submitted for the Degree of Master of Science

**Calculation of Loss and Temperature Distributions for a
Transverse Flux Permanent Magnet Synchronous Machine
Using Finite Elements Method**

Hamed Tahanian

**Supervisor:
Dr. Ahmad Darabi**

**Advisor:
Dr. Ali Sarreshtehdari**

September 2012