



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی الکترونیک قدرت و ماشین‌های الکتریکی

طراحی بهینه پوسته میراکننده برای یک ماشین سنکرون ابررسانا

نگارنده: معصومه محمدی

استاد راهنما

دکتر احمد دارابی

استاد مشاور

دکتر امیر حسن نیا خیبری

بهمن ۱۳۹۴

کاش شدنی بود که در خلال بی‌شمار گزاره‌ها و استندهای علمی، محاسبات ریاضی، روابط
نه چندان ساده الکترومغناطیسی و مدل‌سازی‌ها و شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری که در سراسر این
پژوهش به چشم می‌خورد، فصلی را گنجانند و در آن از کسانی نوشت که هیچ‌گاه اسمشان در
ابتدا و سربرگ مقاله‌ای نمی‌آید و تصویر سیمایشان نیز در انتهای آن.

کسانی که اگر نبودند هیچ وقت به جواب نمی‌رسیدی

تقدیم به پدرم

تقدیم به مادرم

تقدیم به خانواده‌ام

مراتب تقدیر و تشکر فراوان خود را از جناب آقای دکتر احمد دارابی به پاس تلاش‌ها و زحمات بی‌دریغشان که به بنده در طول تحصیل در دوره کارشناسی ارشد عنایت داشته‌اند، به جای می‌آورم و بخصوص از صبوری‌های مهربانانه ایشان در گام به گام انجام پایان‌نامه که وصف آن در متن کلام و زبان نمی‌گنجد و تنها می‌بایست برای درکش معنای واژه بی‌نهایت را دانست، صمیمانه سپاسگذارم. بدون شک پژوهش حاضر مدیون رهنمودهای بی‌وقفه و بی‌بدیل ایشان است.

همچنین از جناب آقای دکتر امیر حسن‌نیا که مشاور اینجانب در تمامی مسیر انجام پایان‌نامه بودند و مرا یاری کردند، قدردانی می‌نمایم.

علم‌آموزی در محضر این دو استاد بزرگوار از ارزشمندترین تجارب من در طول زندگی‌ام خواهد بود.

تعهد نامه

اینجانب **معصومه محمدی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **برق- قدرت** دانشکده

مهندسی برق و (باتیک) دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **طراحی بهینه پوسته میراکننده برای یک**

ماشین سنکرون ابررسانا تحت راهنمایی **دکتر احمد دارابی** متعهد می‌شوم.

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

تاریخ: ۱۳۹۴/۱۱/۲۸

معصومه محمدی

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده:

ماشین‌های سنکرون ابررسانا ساختارهای مختلفی دارند که رایج‌ترین آن متشکل از یک استاتور هسته گرم با سیم‌پیچی مسی معمولی و روتور هسته سرد با سیم‌پیچی ابررساناست. در این ساختار، هارمونیک‌های میدان استاتور و نوسانات میدان فاصله هوایی در حالات گذرای از جمله عوامل مزاحم در حفظ فاز ابررسانایی سیم‌پیچ روتور است که لایه‌ای رسانا، با پوشش هسته و سیم‌پیچ‌های روتور از ورود نوسانات میدان به روتور جلوگیری می‌کند. با توجه به پیچیدگی‌های توپولوژیکی زیاد در مدار مغناطیسی، محاسبه شار پیوندی دمپر به روش تحلیلی مشکل است. یک راه حل محاسبه توزیع جریان در پوسته میراکننده، بکارگیری روش‌های تحلیل میدان به ویژه استفاده از روش اجزاء محدود است. ضخامت پوشش دمپر معمولاً بصورت درصدی از عمق نفوذ میدان مغناطیسی استاتور در حالت دائمی در نظر گرفته می‌شود در حالیکه حفظ فاز ابررسانایی سیم‌پیچ روتور در شرایط گذرای از اهمیت بیشتری برخوردار است و تعیین ضخامت پوشش، نیازمند واکاوی عملکرد گذرای ماشین است. در این پایان‌نامه، برای حل مسئله تعیین ضخامت استوانه پوشش دمپر، مشخصه‌های عملکرد حالت گذرای ماشین سنکرون ابررسانا با استفاده از مدل‌سازی دو بعدی ماشین و قابلیت Transient FEM نرم‌افزار اجزاء محدود تجاری انجام می‌گیرد. با ایجاد لایه‌های دمپر با ضخامت‌های مختلف بین روتور و استاتور و در دو موقعیت گرم و سرد، بررسی عملکرد و تاثیر پوسته‌های مختلف میراکننده بر رفتار ماشین سنکرون ابررسانا صورت می‌پذیرد و ضخامت بهینه دمپر شیلد^۱ الکترومغناطیسی با درجاتی از دقت تعیین می‌شود. مقایسه شبیه‌سازی‌های عملکرد ماشین بدون پوسته میراکننده و ماشین با دمپرهای مختلف جذابیت شیوه مدل‌سازی اجزاء محدود پایان نامه را نمایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: ماشین سنکرون ابررسانا، لایه دمپر الکترومغناطیسی، طراحی بهینه، تحلیل

اجزاء محدود، مشخصه‌های عملکردی، دینامیکی گذرای.

^۱ Shield

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	۱- فصل اول شناخت ماشین‌های ابرسانا.....
۲	۱-۱- مقدمه
۳	۲-۱- ابرسانایی چیست؟
۵	۳-۱- محدوده نرمال و محدوده ابرسانایی
۶	۴-۱- معرفی موتور ابرسانا
۶	۱-۴-۱- تاریخچه موتور ابرسانا
۷	۲-۴-۱- انواع موتور ابرسانا
۸	۳-۴-۱- مزایای موتور ابرسانا
۱۰	۴-۴-۱- کاربردهای موتور ابرسانا
۱۰	۵-۱- تهدید ابرسانایی
۱۲	۱-۵-۱- تشخیص پدیده تهدید ابرسانایی در موتورهای ابرسانا
۱۶	۶-۱- ساختار پایان‌نامه
۱۹	۲- فصل دوم عملکرد پوسته میراکننده در ماشین سنکرون ابرسانا
۲۰	۱-۲- مقدمه
۲۰	۲-۲- عوامل دستیابی به فناوری طراحی و ساخت موتورهای ابرسانا

- ۳-۲ - ساختار ماشین سنکرون ابرسانا ۲۲
- ۴-۲ - موتورهای الکتریکی ابرسانا در سرعت‌های پایین ۲۶
- ۵-۲ - اقداماتی در زمینه طراحی و ساخت ماشین‌های ابرسانا در سرعت‌های پایین ۲۸
- ۶-۲ - میراساز نفوذ میدان مغناطیسی به روتور ۳۱
- ۷-۲ - عملکرد دمپر در ماشین سنکرون کلاسیک ۳۵
- ۸-۲ - عملکرد دمپر در ماشین سنکرون ابرسانا ۳۶
- ۳ - فصل سوم مدل‌سازی الکترومغناطیسی ماشین سنکرون ابرسانا ۳۹**
- ۱-۳ - مقدمه ۴۰
- ۳-۲ - انتخاب ساختار ماشین ابرسانا مورد مطالعه ۴۰
- ۱-۲-۳ - پارامترهای ماشین معرفی شده ۴۱
- ۲-۲-۳ - تحلیل طراحی ماشین معرفی شده ۴۶
- ۳-۳ - مدل‌سازی ماشین مورد مطالعه با اجزاء محدود ۴۸
- ۱-۳-۳ - معرفی روش اجزاء محدود ۴۸
- ۲-۳-۳ - معرفی آهن ماشین ۵۰
- ۳-۳-۳ - ولتاژ القایی در استاتور ۵۱
- ۴-۳ - مدل‌سازی دینامیک روتور ۵۲
- ۴ - فصل چهارم طراحی بهینه پوسته میراکننده ۵۵**
- ۱-۴ - مقدمه ۵۶
- ۲-۴ - ساختار و موقعیت دمپر در ماشین سنکرون ابرسانا ۵۷

- ۳-۴ - بررسی عملکرد حالت دائمی ۶۳
- ۳-۴-۱ - تأثیر ضخامت لایه دمپر بر مشخصه‌های حالت دائمی بی‌باری ۶۳
- ۳-۴-۲ - تأثیر ضخامت لایه دمپر بر مشخصه‌های حالت دائمی بار کامل ۶۷
- ۴-۴ - بررسی عملکرد حالت گذرا ۷۲
- ۴-۴-۱ - بارزدایی ۷۲
- ۴-۴-۲ - بارگذاری ۸۳
- ۴-۵ - بحث و جمع‌بندی ۹۳
- ۵ - فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۹۵
- ۵-۱ - پیشنهادات برای ادامه پژوهش ۹۹

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: محدوده ابرسانایی و نرمال ۶
- شکل ۲-۱: (الف) ماشین رلوکتانسی ابرسانا (ب) ماشین هیستریزس ابرسانا (ج) ماشین PM ابرسانا [۱۲] ۷
- شکل ۳-۱: (الف) پدیده تهدید ابرسانایی با نمایش ولتاژ [۲۲] (ب) پدیده تهدید ابرسانایی با نمایش دما [۲۳] ۱۱
- شکل ۴-۱: QDS به کار رفته در KSTAR [۲۴] ۱۳
- شکل ۵-۱: خنثی شدن ولتاژ القا شده در سلف با کمک مدار پل و پتانسیومتر تنظیم شده [۲۴] ۱۵
- شکل ۶-۱: حذف اغتشاش در ولتاژ ناشی از خودالقایی با کمک سیم‌پیچ کمکی [۲۴] ۱۵
- شکل ۷-۱: حذف اعوجاج ولتاژ با کمک مجموعه اندازه‌گیری با ضرایب مناسب [۲۴] ۱۶
- شکل ۱-۲: چند روش خنک‌کردن روتور ابرسانا (الف) جرم خنک (ب) گردش گاز (ج) تبخیر مایع ۲۴
- شکل ۲-۲: ساختار یک موتور ابرسانا [۲۹] ۲۴
- شکل ۳-۲: رتور قطب برجسته با سیم‌پیچ تحریک HTS [۹] ۲۶
- شکل ۴-۲: کلاف تحریک ابرسانا مربوط به رتور یک ماشین سنکرون که توسط شرکت American Superconductors ساخته شده است [۹] ۲۶
- شکل ۵-۲: (الف) مقایسه حجم نگهداری (حجم نگهداری ضریبی از حجم واقعی است که این ضریب با افزایش حجم افزایش می‌یابد) موتور ابرسانا با موتور معمولی (ب) مقایسه وزن موتور ابرسانا با موتور معمولی [۹] ۲۷
- شکل ۶-۲: بازدهی موتور ابرسانا در مقایسه با موتور معمولی سنکرون و القایی [۳۰] ۲۸
- شکل ۷-۲: (الف) موتور سنکرون ابرسانا با توان ۵ MW برای سیستم پیش‌رانش کشتی در حال تست در کارخانه Alstom [۱]، [۲] (ب) موتور سنکرون ابرسانا با توان ۳۶/۵ MW برای سیستم پیش‌رانش نسل جدید کشتی‌های جنگی نیروی دریایی آمریکا ساخته شده توسط شرکت AMSC [۸]، [۹] ۳۰
- شکل ۸-۲: (الف) استفاده از یک دمپر مغناطیسی [۳۳] (ب) استفاده از دو دمپر مغناطیسی [۳۴] ۳۲
- شکل ۱-۳: دیاگرام شماتیکی از مدل سیستم ماشین ۱۰۰ KW HTS [۴۱] ۴۳
- شکل ۲-۳: برش عرضی از مدل سطح مقطع ماشین [۴۱] ۴۵

- شکل ۳-۳: نمایش مش‌بندی دو قطب از ماشین در دو بعدی..... ۵۰
- شکل ۴-۳: منحنی مغناطیسی آهن به کار رفته در موتور..... ۵۱
- شکل ۵-۳: نمودار ولتاژ القا شده در سیم‌پیچی سه فاز استاتور..... ۵۲
- شکل ۶-۳: پارامترهای معادله حرکت برای بار کامل در نرم‌افزار اجزای محدود..... ۵۳
- شکل ۱-۴: پیکربندی اجزاء ماشین ابررسانا..... ۵۹
- شکل ۲-۴: موقعیت دمپر در محفظه سرد و گرم..... ۵۹
- شکل ۳-۴: توپولوژی تقسیم‌بندی لایه‌های دمپر در فضای بین روتور و استاتور..... ۶۱
- شکل ۴-۴: شکل موج نوسانات سرعت ماشین بدون دمپر در حالت بی‌باری..... ۶۳
- شکل ۵-۴: شکل موج نوسانات سرعت ماشین با دمپره‌های مختلف در حالت بی‌باری..... ۶۴
- شکل ۶-۴: شکل موج نوسانات جریان تحریک روتور بدون دمپر در بی‌باری..... ۶۵
- شکل ۷-۴: شکل موج نوسانات جریان تحریک روتور با دمپره‌های مختلف در بی‌باری..... ۶۵
- شکل ۸-۴: شکل موج جریان‌های سه فاز استاتور بدون دمپر در بی‌باری..... ۶۶
- شکل ۹-۴: شکل موج جریان‌های سه فاز استاتور با دمپره‌های مختلف در بی‌باری..... ۶۷
- شکل ۱۰-۴: شکل موج نوسانات سرعت ماشین بدون دمپر در بار کامل..... ۶۸
- شکل ۱۱-۴: شکل موج نوسانات سرعت ماشین با دمپره‌های مختلف در بار کامل..... ۶۸
- شکل ۱۲-۴: شکل موج نوسانات جریان تحریک روتور بدون دمپر در بار کامل..... ۶۹
- شکل ۱۳-۴: شکل موج نوسانات جریان تحریک روتور با دمپره‌های مختلف در بار کامل..... ۷۰
- شکل ۱۴-۴: شکل موج جریان‌های سه فاز استاتور بدون دمپر در بار کامل..... ۷۰
- شکل ۱۵-۴: شکل موج جریان‌های سه فاز استاتور با دمپره‌های مختلف در بار کامل..... ۷۱
- شکل ۱۶-۴: مقایسه شکل موج‌های نوسانات سرعت ماشین با تغییر ضخامت دمپر..... ۷۳
- شکل ۱۷-۴: مقایسه شکل موج‌های نوسانات گشتاور در حالت بدون دمپر و با دمپر..... ۷۴
- شکل ۱۸-۴: شکل موج نوسانات ولتاژ القایی در تحریک با تغییر ضخامت دمپر..... ۷۵

- شکل ۴-۱۹: توزیع چگالی شار نرمال (الف) چگالی شار عمود (ب) چگالی شار عمود بر سطح سیم‌پیچ تحریک ۷۶
- شکل ۴-۲۰: شکل موج تغییرات چگالی شار عمودی با تغییر ضخامت دمپر ۷۷
- شکل ۴-۲۱: شکل موج نوسانات جریان میدان در حالت بدون دمپر و با دمپر ۷۸
- شکل ۴-۲۲: نمایش توزیع چگالی جریان گردابی با موقعیت دمپر سرد ۷۹
- شکل ۴-۲۳: شکل موج نوسانات سرعت با دمپرهای مختلف از بار کامل به بی‌باری ۸۰
- شکل ۴-۲۴: شکل موج نوسانات گشتاور در لحظه اعمال گذرایی با دمپرهای مختلف ۸۰
- شکل ۴-۲۵: مقایسه نوسانات لحظه گذرایی شکل موج سرعت ۸۱
- شکل ۴-۲۶: شکل موج تغییرات چگالی شار عمودی در نقطه ماکزیمم ۸۲
- شکل ۴-۲۷: شکل موج نوسانات جریان میدان با دمپرهای مختلف ۸۲
- شکل ۴-۲۸: نمایش توزیع چگالی جریان گردابی با موقعیت دمپر گرم ۸۳
- شکل ۴-۲۹: شکل موج نوسانات سرعت با دمپرهای مختلف ۸۴
- شکل ۴-۳۰: شکل موج نوسانات گشتاور با دمپرهای مختلف ۸۵
- شکل ۴-۳۱: شکل موج نوسانات ولتاژ القا شده در روتور با دمپرهای مختلف ۸۵
- شکل ۴-۳۲: شکل موج تغییرات چگالی شار عمود بر سطح ابرسانا در نقطه ماکزیمم ۸۶
- شکل ۴-۳۳: شکل موج نوسانات جریان تحریک ۸۷
- شکل ۴-۳۴: نمایش توزیع چگالی جریان گردابی با موقعیت دمپر سرد ۸۸
- شکل ۴-۳۵: شکل موج نوسانات سرعت با دمپر و بدون دمپر ۸۹
- شکل ۴-۳۶: شکل موج نوسانات گشتاور با تغییر ضخامت لایه دمپر ۸۹
- شکل ۴-۳۷: شکل موج نوسانات ولتاژ القایی در روتور با ضخامت‌های مختلف دمپر ۹۰
- شکل ۴-۳۹: شکل موج نوسانات جریان تحریک با دمپرهای مختلف ۹۲
- شکل ۴-۴۰: نمایش توزیع چگالی جریان گردابی با موقعیت دمپر گرم ۹۲

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲: مشخصات فنی دو موتور سنکرون ابرسانا ساخته شده در شرکت AMSC به سفارش نیروی دریایی آمریکا [۸]، [۹] ۳۰
- جدول ۲-۲: مقایسه مشخصات دمپر مسی و آلومینیومی ۳۴
- جدول ۱-۳: موتورهای مطرح ابرسانای سنکرون ساخته شده توسط بعضی از کشورها ۴۱
- جدول ۲-۳: پارامترهای موتور طراحی شده [۴۱] ۴۳
- جدول ۳-۳: پارامترهای ابعادی روتور و استاتور [۴۱] ۴۴

فصل اول

شناخت ماشین‌های ابرسانا

۱-۱- مقدمه

موتورهای الکتریکی توان بالا از جایگاه خاصی در صنایع مختلف و از جمله در صنعت حمل و نقل برخوردارند. امروزه با بهره‌گیری از تکنولوژی ابررسانا^۱ و نیز موتورهای آهنربای دائم، امکان دستیابی به حجم و وزن کمتر و نیز راندمان بهتر در موتورهای توان بالا در مقایسه با نمونه‌های رایج فراهم شده و پروژه‌های مختلفی در خصوص طراحی و ساخت موتورهای الکتریکی با توان چند مگاوات برای استفاده در صنایع مختلف و سیستم پیشران‌ش کشتی به انجام رسیده و یا در حال انجام است. علاوه بر این در حوزه ژنراتورها نیز بهره‌گیری از فناوری‌هایی نظیر ابررسانا امکان طراحی و ساخت ژنراتورهای توربین‌های مزارع بادی چند مگاواتی را با دارا بودن حجم و وزنی به مراتب کمتر از نمونه‌های رایج فراهم آورده است.

به موجب فراهم آمدن و امکان سازی عبور جریان‌های بسیار زیاد بدون ایجاد تلفات، مقاومت الکتریکی صفر ابررسانا سبب به کارگیری این مواد در سیستم‌های قدرت و بلاخص مورد توجه قرار گرفتن در ماشین‌های الکتریکی شده است. از این رو پرداختن به مبحث دستیابی به دانش طراحی و ساخت موتورهای الکتریکی ابررسانا با شدت گرفتن گرایش به سمت این نوع ماشین‌ها پس از کشف ابررساناهای دما بالا^۲ و اقتصادی شدن سیستم‌های خنک‌کننده و نیز لزوم و اهمیت دستیابی به فناوری طراحی و ساخت این موتورها با پیش‌بینی اینکه تا سال ۲۰۲۰ ماشین‌های ابررسانا بتوانند به صورت تجاری ساخته شده و وارد بازار جهانی شوند [۱]. از این رو در این فصل به بعضی از کاربردهای عمده استفاده از مواد ابررسانا در ماشین‌های الکتریکی، پس از آشنایی با پدیده‌هایی همچون ابررسانایی^۳ و ماده ابررسانا و موارد دیگر اشاره شده است.

^۱ Superconductor

^۲ High Temperature Superconductors (HTS)

^۳ Superconductivity

در انتهای این فصل، معرفی فصل‌های بعدی و ساختار پایان‌نامه ارائه شده است.

۱-۲- ابررسانایی چیست؟

در سال ۱۹۰۸ هایک کمرلینگ^۱ اونز^۱ هلندی در دانشگاه لیدن موفق به تولید هلیوم مایع گردید و با استفاده از آن توانست به درجه حرارت حدود یک درجه کلونین برسد. به دلیل آنکه چندین سال قبل از آن کشف شده بود که مقاومت فلزات وقتی دمای آنها به کمتر از دمای اتاق برسد کاهش پیدا می‌کند، یکی از اولین بررسی‌هایی که اونز با دسترسی به این درجه حرارت پایین انجام داد، مطالعه تغییرات مقاومت الکتریکی فلزات بر حسب درجه حرارت بود. زیرا مشخص نبود که در صورت کاهش درجه حرارت فلزات تا حدود کلونین، مقاومت تا چه حد تنزل می‌یابد [۲]. در سال ۱۹۱۱ وی دریافت که در درجه حرارت‌های خیلی پایین، مقاومت جیوه تا حد غیر قابل اندازه‌گیری کاهش می‌یابد و نحوه از بین رفتن مقاومت غیر منتظره به نظر می‌رسید [۳، ۴]. اونز مشاهده نمود هنگامی که درجه حرارت جیوه به سمت صفر درجه مطلق تنزل داده می‌شود، کاهش آرام مقاومت ناگهان در حدود ۴ درجه کلونین با افت بسیار بزرگی مواجه شده و پایین‌تر از این درجه حرارت، جیوه هیچ‌گونه مقاومتی از خود نشان نمی‌داد.

همچنین این گذار ناگهانی به حالت بی‌مقاومتی، فقط مربوط به خواص فلزات نمی‌شد و حتی در جیوه ناخالص نیز رخ داد. بنابراین اونز به چنین نتیجه‌ای رسید که پایین‌تر از ۴ درجه کلونین، جیوه به حالت دیگری از خواص الکتریکی که کاملاً با حالت‌های شناخته شده قبلی متفاوت بود رسیده است. این حالت تازه ابررسانایی و دمای مربوط به آن، دمای بحرانی^۲ نامیده می‌شود. بنابراین در حالت ابررسانایی مقاومت الکتریکی ماده صفر شده و ماده خاصیت دیامغناطیس^۳ کامل پیدا می‌کند و میدان

^۱ Kamerlings Onnes

^۲ Critical Temperature

^۳ Diamagnetic

مغناطیسی را از درون خود دفع می کند که این موضوع تفاوت مهم و اساسی بین ابررسانا و رسانای کامل است [۲]. ویژگی دیامغناطیسی ابررساناها پس از ورود به فاز ابررسانایی، اثر مایسنر^۱ نامیده می شود. در سال ۱۹۳۳ مایسنر به همراه تیم تحقیقاتی خود ویژگی های مغناطیسی ابررساناها را در شرایطی اندازه گیری می کردند که دما را به زیر مقدار بحرانی رسانیده بودند [۵].

با افزایش دادن دوباره دما، خاصیت ابررسانایی از بین می رود. یعنی مقاومت الکتریکی فلزاتی که به وضعیت ابررسانایی رسیده اند، مجدداً قابل بازیابی است. همچنین با بررسی خصوصیت های مغناطیسی فلزات ابررسانا، مشخص شد که اگر یک میدان مغناطیسی قوی به ابررسانا اعمال شود، خواص مغناطیسی فلز ابررسانا نسبت به درجه حرارت های معمولی بسیار متفاوت می باشد.

نیمی از عناصر فلزی و همچنین بعضی آلیاژها و سرامیک ها در درجه حرارت های پایین ابررسانا می شوند. مشکل اصلی در استفاده از ابررساناها، ایجاد دمای بسیار پایین آن است. دمای بحرانی یا همان دمای ابررسانایی برای ابررساناهای اولیه در حدود کمتر از ۲۵ درجه کلوین (۲۴۸- درجه سانتیگراد) بود که ابررساناهای دمای پایین (LTS)^۲ نامیده شدند و تنها با کمک هیدروژن یا هلیوم مایع این دما مهیا می شد که بسیار پر هزینه و خطرناک است.

بعد از حدود هفت دهه از کشف ابررساناهای معمولی، سرانجام در سال ۱۹۸۶ مواد سرامیکی جدیدی از نوع اکسیدهای مس کشف شدند که در دمای بالاتر از ۷۷ درجه کلوین که دمای جوش نیتروژن مایع است، توانایی بروز خاصیت ابررسانایی داشتند و به ابررساناهای دما بالا (HTS) معروف شدند. پیشرفت های چشمگیر حاصل شده در علم و تکنولوژی تولید ابررساناها و تحقیقات صورت گرفته تا سال ۲۰۰۵ منجر به ساخت ابررساناهایی شده است که در فشار بالا و دمای حدود ۱۶۵ درجه کلوین (۱۰۸- درجه سانتیگراد) ابررسانا می شوند. با زیاد شدن دمای ابررسانایی، هزینه های مربوط به

^۱ Meissner Effect

^۲ Low Temperature Superconductor

سیستم خنک‌سازی ابررسانا کاهش می‌یابد و به لحاظ اقتصادی استفاده از این مواد را در صنعت توجیه می‌کند [۲]، [۶].

۱-۳- محدوده نرمال و محدوده ابررسانایی

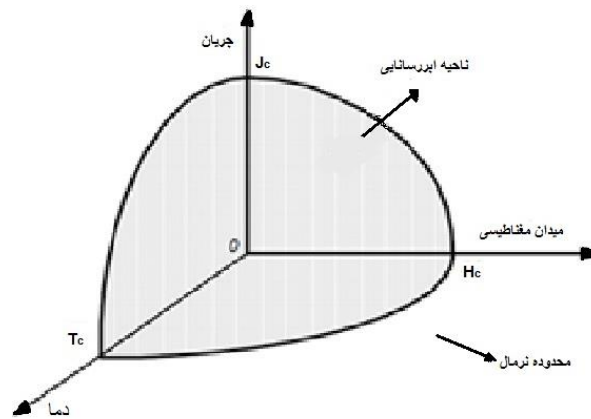
خواص ابررسانایی زمانی بروز خواهد کرد که ماده دو خاصیت مقاومت الکتریکی DC صفر و دیامغناطیسی را در صورت برقرار بودن سه شرط زیر داشته باشد:

- دمای کاری کوچکتر از دمای بحرانی ($T < T_c$)
- شدت میدان مغناطیسی خارجی کوچکتر از شدت میدان مغناطیسی بحرانی ($H < H_c$)
- چگالی جریان انتقالی کوچکتر از چگالی جریان بحرانی ($J < J_c$)

در این شرایط به آن ماده ابررسانا گفته می‌شود. وابستگی سه مقدار مربوط به دمای بحرانی (T_c)، شدت میدان مغناطیسی بحرانی (H_c) و چگالی جریان بحرانی (J_c) در مواد ابررسانا به یکدیگر، سبب شده که حالت ابررسانایی^۱ محدود به ناحیه ابررسانایی که در شکل ۱-۱ نشان داده شده، باشد و چنانچه نقطه کاری در محدوده مشخص شده توسط دما، شدت میدان مغناطیسی و چگالی جریان بحرانی قرار گیرد، ماده به حالت ابررسانایی وارد می‌شود [۸،۷] و در صورت عدم واقع شدن در این منطقه، ماده به حالت نرمال^۲ باز خواهد گشت.

^۱ Superconducting State

^۲ Normal State



شکل ۱-۱: محدوده ابررسانایی و نرمال

۴-۱- معرفی موتور ابررسانا

استفاده از ابررسانا چه به صورت سیم و چه به صورت توده در موتورهای مختلف مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است که نمونه‌هایی نیز از این موتورها تولید شده‌اند. در واقع با توجه به مزایای اجتناب ناپذیر موتورهای ابررسانا این دسته ماشین‌ها به شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند. به ویژه برای کاربردهای دریانوردی و هوانوردی که حجم و وزن موتور مهمترین پارامترهای طراحی هستند، این نوع موتورها که نسبت به موتورهای معمولی کوچک‌تر و سبک‌تر و بازدهی بالاتری دارند مناسب‌ترین گزینه هستند.

علیرغم ویژگی‌های بسیار برجسته این نوع موتورها، بعضی مشکلات عملی در بهره‌برداری از این ماشین‌ها وجود دارد که نیاز به مطالعه و بررسی دارد.

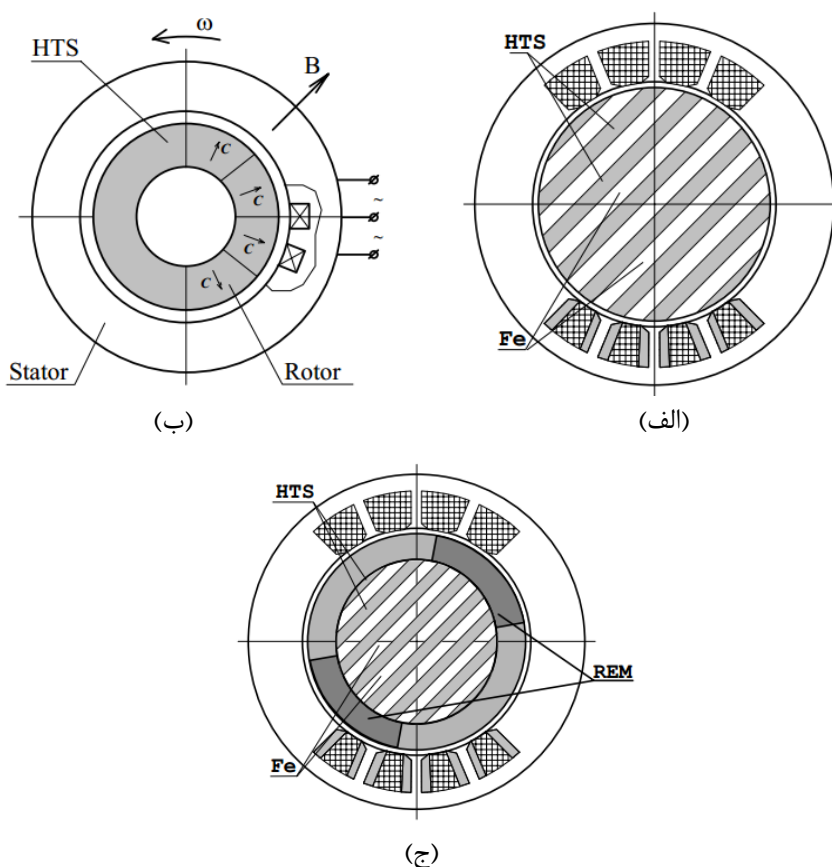
۴-۱-۱- تاریخچه موتور ابررسانا

موسسه بین‌المللی تحقیق و توسعه نیوکاسل (NIRD) مطالعات استفاده از سیم‌های ابررسانا در ماشین‌های الکتریکی را برای وزارت دفاع آمریکا در سال ۱۹۶۳ آغاز کرد. اولین موتور ابررسانای دما بالا که یک موتور DC بود در سال ۱۹۹۰ به نمایش گذاشته شد و یک سال بعد از آن اولین موتور سنکرون ساخته شد. در سال ۲۰۰۲ اولین پروژه ساخت موتور ابررسانا به عنوان موتور پیشرانه کشتی

بین شرکت American Superconductor و دفتر تحقیقات نیروی دریایی آمریکا برای ساخت یک موتور ۵ مگاوات بسته شد. چند سال بعد، این شرکت ساخت موتور سنکرون ۳۶/۵ مگاواتی را جهت اجرایی شدن در اختیار گرفت [۹,۸].

۱-۴-۲- انواع موتور ابررسانا

موتور ابررسانا به موتوری گفته می‌شود که در ساختار آن سیم‌ها و توده‌های ابررسانا به کار رفته باشد. در تمام موتورهای موجود مانند موتور DC، موتور پله‌ای، موتور سنکرون، موتور رلوکتانسی، موتور القایی، موتور هیستریزیس، موتور مغناطیس دائم (PM)^۱ می‌توان از ابررسانا استفاده کرد و از مزایای آن بهره برد [۱۱,۱۰].



شکل ۱-۲: (الف) ماشین رلوکتانسی ابررسانا (ب) ماشین هیستریزیس ابررسانا (ج) ماشین PM ابررسانا [۱۲]

^۱ Permanent Magnet

موتورهای ابررسانا انتخابی مناسب برای کاربرد در اجزای اساسی سیستم‌های حمل و نقل نظیر پمپ‌ها، فن‌ها، کمپرسورها، سیستم‌های تهویه می‌باشند. علاوه بر این، موتورهای ابررسانا استفاده‌های دیگری در بسیاری از صنایع سنگین مانند فرزکاری فلزات، کاغذسازی، صنایع شیمیایی، پالایش نفت و گاز و استخراج معادن نیز دارند [۱۳، ۱۴].

عملکرد موتورهای ابررسانا در دماهای بالاتر، هزینه و پیچیدگی سیستم‌های خنک‌سازی را به شدت کاهش داد و موجب گسترش این ماشین‌ها در کاربردهای مختلف شد. در موتورهای مانند موتور سنکرون مغناطیس دائم از توده ابررسانای مغناطیس شده استفاده می‌شود. در موتورهای هیستریزیس از حلقه هیستریزیس در توده ابررسانا برای تولید گشتاور استفاده می‌شود و در موتورهای رلوکتانسی و پله‌ای از خاصیت دیامغناطیس توده ابررسانا استفاده می‌شود [۸]. از طرفی گسترش ابررساناهای دما بالا سبب گردید تا طراحی ماشین‌های ابررسانا در توان‌های پایین‌تر نیز به لحاظ فنی و همچنین عملی امکان‌پذیر بوده و از نظر اقتصادی توجیه شود. در حقیقت ورود مواد ابررسانای دما بالا به صنعت، محققان را برای شناخت بیشتر ماشین‌های ابررسانا تشویق کرد [۶]، [۱۵].

اما در عمل استفاده از ابررسانا برای ماشین‌های الکتریکی به موتورها و ژنراتورهای سنکرون محدود شده است. علت اصلی این امر آن است که سیم‌ها و توده‌های ابررسانا از نظر قیمت با آهن و سیم مسی قابل رقابت نیست و از طرف دیگر برای خنک‌سازی نیاز به تجهیزات جانبی وجود دارد، لذا استفاده از ابررسانا برای کاربردهای کمتر از چند مگاوات از نظر اقتصادی به صرفه نیست [۱۶].

۱-۴-۳- مزایای موتور ابررسانا

موتور ابررسانا در مقایسه با یک موتور معمولی مزایای زیادی دارد. مهمترین برتری یک موتور ابررسانا بر یک موتور معمولی چگالی توان بسیار بیشتر آن است. در توان‌های بسیار زیاد این چگالی توان به ۸ تا ۹ برابر هم می‌رسد که عدد بسیار قابل توجهی است. گاهی در آهن استاتور موتورهای

ابررسانا شیار و دندانه وجود ندارد چرا که ممکن است شار بسیار زیاد تولید شده توسط سیم‌پیچ‌های ابررسانا در روتور، منجر به اشباع دندانه‌های استاتور شده که در این صورت سیم‌پیچ‌های استاتور در سطح داخلی هسته قرار گرفته و توسط یک تیوب محافظ، ثابت نگه داشته می‌شوند. طبیعتاً در این گونه موتورها، فاصله هوایی بسیار بزرگ است [۱۶]. بنابراین علاوه بر چگالی توان زیاد و داشتن حجم کمتر در توان یکسان، به علت حذف هسته آهنی بسیار سبک‌تر از موتورهای معمولی‌اند. برای مثال در توان‌های زیاد وزن یک موتور ابررسانا یک چهارم یک موتور معمولی است.

مزیت دیگر موتور ابررسانا بازدهی ثابت این موتور می‌باشد. بازدهی موتور ابررسانا در نزدیکی بار نامی تنها ۰/۵ تا ۰/۶ درصد بیشتر از یک موتور معمولی است که علت آن حذف تلفات روتور و حذف دندانه‌های آهن است. مزایای چشمگیر ماشین‌های ابررسانا که بنا به شرایط نسبت به ماشین‌های معمولی، کوچک‌تر، سبک‌تر و دارای راندمان بالاتری هستند، به زودی صنعت ماشین‌های الکتریکی را متحول خواهد نمود [۶]، [۱۷-۱۹].

مزیت مهم دیگر عدم نیاز به درایو جدیدی است که مخصوص موتور ابررسانا باشد و برای کنترل سرعت و گشتاور موتور می‌توان از درایوهای موجود استفاده کرد.

به علت حذف دندانه‌های استاتور که منشا اصلی نویز در ماشین است، عملکرد موتور ابررسانا بسیار ساکت‌تر و آرام‌تر از یک موتور معمولی است [۱۶].

به علت ثابت نگه داشتن دمای روتور توسط سیستم خنک کننده در شرایط خطا و حالت‌های گذرا نسبت به موتور معمولی پایدارتر است و نیازی به تعمیرات دوره‌ای روتور نیست.

در ضمن با مورد توجه قرار گرفتن ابررساناها در ژنراتورهای سنکرون برای سرعت‌های گوناگون، از سرعت‌های پایین به کار رفته در ژنراتورهای توربین بادی تا سرعت‌های بالا، مشخص گردید که در

ژنراتورهای سنکرون ابررسانا ولتاژ خروجی هارمونیک کمتری نسبت به ژنراتورهای سنکرون معمولی دارد [۲۰].

۱-۴-۴- کاربردهای موتور ابررسانا

با توجه به قیمت زیاد موتور ابررسانا در مقایسه با یک موتور معمولی استفاده از این موتور تنها در کاربردهایی مطرح می‌شود که وزن و حجم مهم‌ترین پارامترهای طراحی و انتخاب موتور هستند. لذا استفاده عملی از این موتورها به کاربردهای متحرک مانند دریانوردها، هوانوردها و سیستم‌های حمل و نقل ریلی محدود می‌شود. البته در حال حاضر تنها کاربرد این موتور در کشتی‌ها عملی شده است. البته مزیت‌های فراوان موتورهای پیشران ابررسانا سبب شده تا علاوه بر صنایع دریایی، توجه محققان به کاربرد این ماشین‌ها در صنایع هوایی معطوف شود. نمونه‌ای از موفقیت در تست این موتورها به عنوان پیشران هواپیما نیز محقق شده است [۲۱].

۱-۵- تهدید ابررسانایی

موتور ابررسانا در کنار مزایای بسیار زیادی که دارد مسائل و مشکلات جانبی نیز دارد که در صورت عدم توجه به آن‌ها عملکرد موتور دچار اشکال می‌شود و حتی ممکن است موتور به طور کلی از کار بیفتد و مجبور به تعویض موتور شد. با توجه به هزینه بالای موتور ابررسانا، شناخت پدیده‌های خطر آفرین و حفاظت موتور در برابر آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد. تهدید ابررسانایی از پدیده‌های بسیار خطرناکی است که در صورت عدم تشخیص و اقدام به موقع، موجب آسیب رسیدن به ابررساناهای به کار رفته در سیم‌پیچ میدان می‌شود.

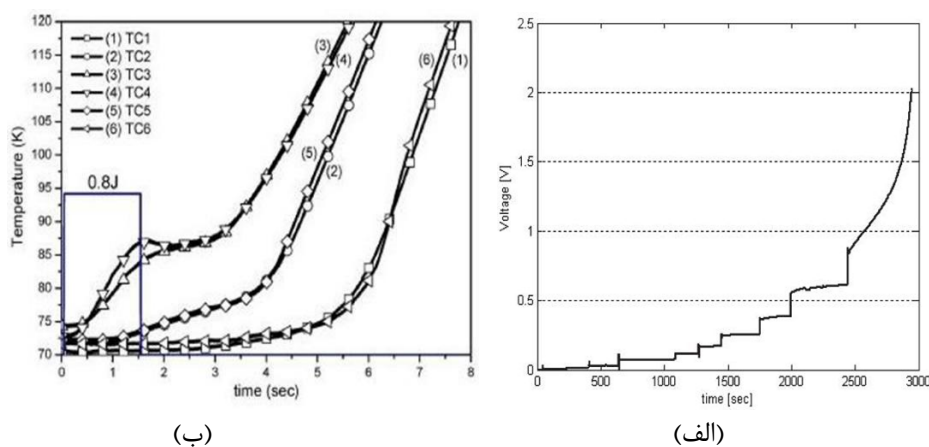
تهدید ابررسانایی به پدیده‌ای اطلاق می‌شود که در آن دما و ولتاژ سیم‌پیچی به صورت ناپایدار افزایش می‌یابد. این پدیده زمانی اتفاق می‌افتد که گرمای تولید شده در سیم‌پیچی ابررسانا از توان

^۱ Quench

سیستم خنک‌کننده برای پایدار نگه داشتن دما بیشتر شود. برخلاف سیم‌های ابرسانای دما پایین که در حالت ابرسانایی مقاومت صفر دارند، ابرساناهای دما بالا در شرایط سرمایش معمولی مقاومت بسیار کوچکی دارند و همین مقاومت کوچک موجب ایجاد تلفات ناچیز و در نتیجه ایجاد حرارت می‌شود [۲۲].

موتورهای ابرسانا به گونه‌ای طراحی می‌شوند که اغتشاشات معمولی (مثلاً تغییر جریان میدان) منجر به گذرای‌های دمایی بشوند که نهایتاً به یک مقدار پایدار قابل قبول برسند. البته باید در نظر داشت که مکانیزم تلفات در سیم‌های ابرسانای دما بالا بسیار غیر خطی است؛ مقاومت آن‌ها با افزایش جریان و نیز با افزایش دما زیاد می‌شود. در نتیجه با افزایش دما و یا بالا رفتن جریان، مقاومت افزایش یافته و تلفات افزایش می‌یابد تا آنجاییکه دیگر سیستم خنک‌کننده قادر به محدود کردن دما نخواهد بود (Quench).

در شکل ۱-۳ پدیده تهدید ابرسانایی به صورت افزایش ناپایدار ولتاژ نمایش داده شده است. می‌بینیم که صرف وجود ولتاژ در سیم پیچی به معنی وجود پدیده تهدید ابرسانایی نیست. بنابراین ناپایداری ولتاژ در مطالعه این پدیده باید مورد توجه قرار گیرد. در شکل (ب) این پدیده به صورت افزایش دما نشان داده شده است.



شکل ۱-۳: (الف) پدیده تهدید ابرسانایی با نمایش ولتاژ [۲۲] (ب) پدیده تهدید ابرسانایی با نمایش دما [۲۳]

۱-۵-۱- تشخیص پدیده تهدید ابررسانایی در موتورهای ابررسانا

علیرغم این که در هنگام طراحی سعی می‌شود ماشین در برابر پدیده تهدید ابررسانایی مقاوم باشد اما به علت حساسیت موضوع یک سیستم تشخیص تهدید ابررسانایی و یک سیستم محافظت ماشین در برابر آن ضروری است [۲۴] که ابتدا سیستم محافظ بررسی شده است.

با فرض این که سیستم تشخیص به موقع رخداد این پدیده را متوجه شود، سیستم محافظ وارد عمل می‌شود. رایج‌ترین شیوه محافظت سیم‌پیچی ابررسانا، خارج کردن انرژی میدان و تلف کردن آن در یک مقاومت خارجی است. چون انرژی زیادی در مدت زمان کمی باید تخلیه شود استفاده از سیستم‌های ذخیره انرژی الکتریکی عملی به نظر نمی‌رسد و تنها راه حل، اتلاف کردن انرژی در یک مقاومت است.

اما سیستم تشخیص تهدید ابررسانایی پیچیده‌تر از سیستم حفاظت است. طبق بحث‌های مطرح شده دو راه برای تشخیص وجود دارد. یکی اندازه‌گیری دمای سیم‌پیچی و دیگری اندازه‌گیری ولتاژ سیم‌پیچی.

پر واضح است که اندازه‌گیری ولتاژ ساده‌تر، دقیق‌تر و ارزان‌تر است. برای مثال اندازه‌گیری ولتاژ دو سر سیم‌پیچی به راحتی توسط یک ولت‌متر مقدور است اما برای اندازه‌گیری دمای موتور نیاز به تعبیه کردن سنسورهای دما در نقاط مخصوصی می‌باشد که کار را پیچیده و گران می‌کند و اگر مکان سنسورها مناسب نباشد دقت آن نیز پایین خواهد بود.

بنابراین سیستم‌های تشخیص تهدید ابررسانایی (QDS)^۱ معمولاً بر اساس اندازه‌گیری ولتاژ عمل می‌کنند.

^۱ Quench Detection System

الگوریتم کلی QDS برای تشخیص این پدیده این است که اگر ولتاژ اندازه‌گیری شده از یک ماکزیمم از پیش تعیین شده بیشتر شد سیستم حفاظت را فعال می‌کند.

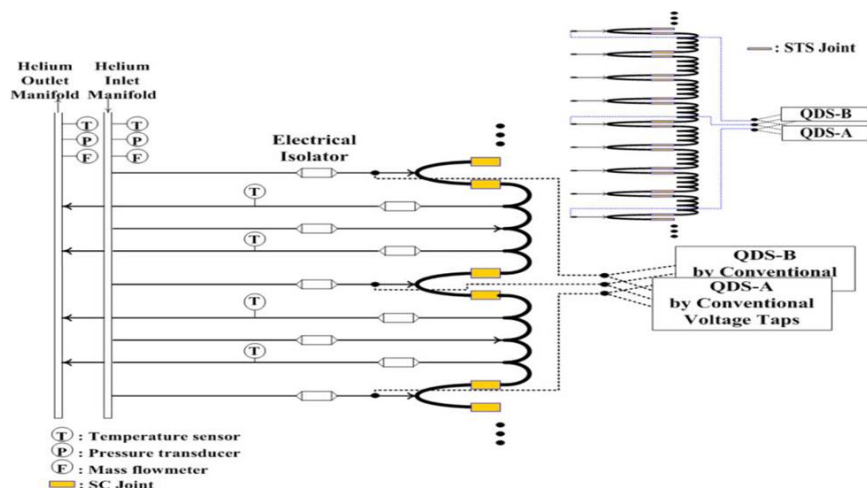
مهم‌ترین مشکل این روش تشخیص تغییرات یا اغتشاش در ولتاژ است. تغییرات ولتاژ ناشی از دو منشاء اصلی است [۲۴]:

۱- افزایش و کاهش جریان مخصوصا در هنگام مغناطیس‌کنندگی اولیه و حالت‌های گذرا، ولتاژ القایی دو سر سیم‌پیچ ایجاد می‌کند که ممکن است مقدار آن نیز زیاد باشد.

۲- اندوکتانس متقابل بین سیستم‌های مغناطیسی نیز می‌تواند تولید ولتاژ القایی کند.

قبل از این که نحوه برخورد QDS با اغتشاش مورد بررسی قرار گیرد شماتیک یک سیستم

تشخیص که در پروژه KSTAR (Korean Superconducting Tokamak Advanced Research) به کار رفته نمایش داده می‌شود.



شکل ۴-۱: QDS به کار رفته در KSTAR [۲۴]

مشاهده می‌شود QDS ولتاژ، توسط یک تپ ولتاژ در مرکز سیم‌پیچی و دو تپ ولتاژ در انتهای سیم‌پیچی اندازه‌گیری می‌شود. استفاده از دو QDS برای این است که نتیجه آن‌ها با هم مقایسه شود و صحت عملکرد آن‌ها مورد ارزیابی واقع شود.

۱-۵-۱-۱- روش‌های مقابله با تغییرات ولتاژ

سیستم تشخیص تهدید ابررسانایی (QDS) می‌تواند از ۴ روش زیر برای از بین بردن اثر تغییرات ولتاژ استفاده کند [۲۴]:

۱- استفاده از یک مدار پل با یک پتانسیومتر که با تنظیم دقیق پتانسیومتر در مدار ولتاژ ناشی از خودالقایی خنثی می‌شود.

۲- استفاده از سیم‌پیچی کمکی (Co-Wound voltage taps) که در مدار کوپل مغناطیسی قوی با سیم‌پیچی میدان دارد.

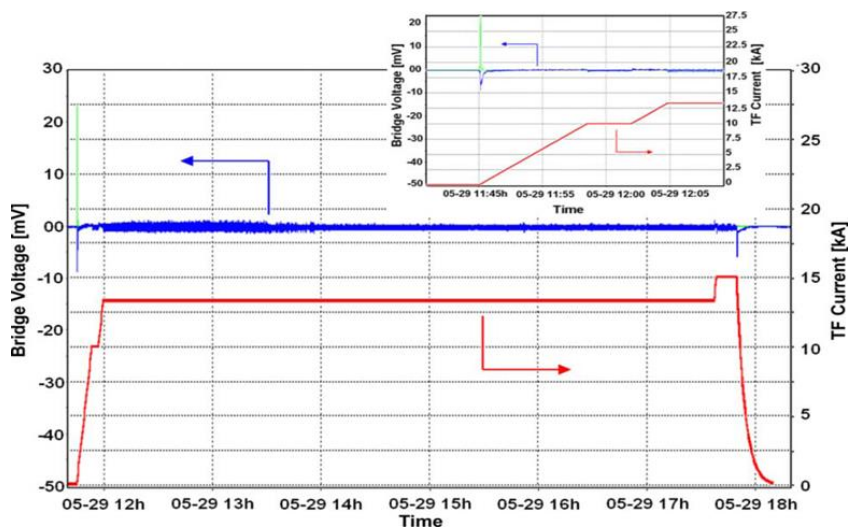
۳- استفاده از یک مجموعه اندازه‌گیری که با اعمال ضرایب مناسب، ولتاژ ناشی از خودالقایی را خنثی می‌کند.

۴- استفاده از یک زمان از پیش تعیین شده به نام زمان ثبات تشخیص تهدید ابررسانایی^۱

روش کار در زمان ثبات تشخیص تهدید (QDHT) به این صورت است که اگر ولتاژ اندازه‌گیری شده برای یک مدت مشخص از حد تعیین شده بیشتر بود در این صورت به عنوان پدیده تهدید ابررسانایی شناخته شود. چون ولتاژهای ناشی از خودالقایی گذرا بوده و بعد از مدت زمان کوتاهی از بین می‌روند با انتخاب مناسب این زمان ثبات می‌توان از تشخیص اشتباه جلوگیری کرد. البته باید توجه داشت هر چه این زمان طولانی‌تر باشد دمای نقطه داغ بالاتر رفته و ممکن است سیم‌پیچی آسیب ببیند.

شکل ۱-۵ خنثی کردن ولتاژ القایی را با کمک مدار پل نشان می‌دهد. دیده می‌شود که علی‌رغم وجود جریان متغیر و القای ولتاژ در سلف، ولتاژ پل تقریباً برابر صفر باقی می‌ماند.

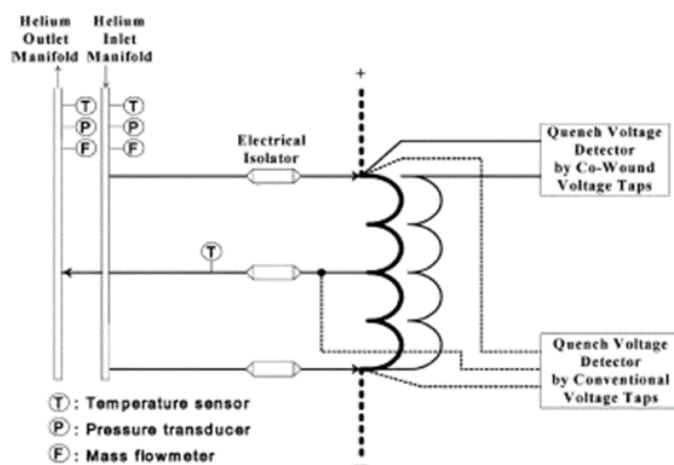
^۱ Quench Detection Holding Time



شکل ۵-۱: خنثی شدن ولتاژ القا شده در سلف با کمک مدار پل و پتانسیومتر تنظیم شده [۲۴]

شکل ۶-۱ خنثی کردن تغییرات ولتاژ ناشی از خودالقایی توسط سیم‌پیچی کمکی را نشان

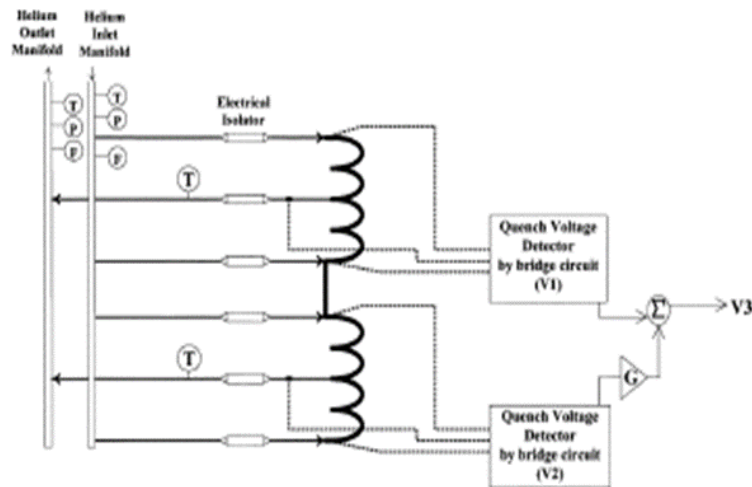
می‌دهد.



شکل ۶-۱: حذف اغتشاش در ولتاژ ناشی از خودالقایی با کمک سیم‌پیچ کمکی [۲۴]

شکل ۷-۱ نیز استفاده از مجموعه اندازه‌گیری با ضرایب مناسب برای از بین بردن اثر اغتشاش در

ولتاژ را نمایش می‌دهد.



شکل ۱-۷: حذف اعوجاج ولتاژ با کمک مجموعه اندازه‌گیری با ضرایب مناسب [۲۴]

۱-۶- ساختار پایان‌نامه

پس از ارائه و بررسی مقدماتی در خصوص ابررسانایی و بکارگیری ماشین‌های الکتریکی ابررسانا در صنایع مختلف در خلال فصل اول، در فصل دوم با مرور اجمالی توسعه فناوری طراحی و ساخت موتورهای الکتریکی سنکرون ابررسانا، چرایی و چگونگی قرار گرفتن پوسته‌ای هادی با قالبی استوانه‌ای در ساختار این نوع ماشین‌ها با نقش میراکنندگی بررسی و پاسخ داده شده و با پرداختن به تأثیرات میله‌های دمپر در ماشین‌های سنکرون معمولی، مقایسه‌ای بین ماشین‌های سنکرونی که از سیم‌پیچ ابررسانا به عنوان سیم‌پیچ میدان استفاده کرده‌اند و نوع کلاسیک آن، بیان شده است.

با توجه به اینکه هدف در این پایان‌نامه طراحی بخشی از ماشین ابررسانا بوده، در فصل سوم طی روندی منسجم به معرفی و تشریح ماشین سنکرون ابررسانایی که مورد مطالعه قرار گرفته و پیکربندی آن در نرم‌افزار اجزای محدود ترسیم شده، پرداخته و با در نظر گرفتن ماشین برای کارکرد در حالت موتوری، تحلیل الکترومغناطیسی ماشین سنکرون ابررسانا صورت پذیرفته است.

در فصل چهارم با معرفی شیوه شبیه‌سازی‌های المان محدود برای طراحی بهینه میراکننده الکترومغناطیسی که با دقتی مناسب به نتایج همگرا رسیده‌اند، بررسی‌های جامعی در گذرایی‌های

بارگذاری و بارزدایی به ترتیبی منظم انجام شده است و در نهایت، در فصل پنجم ضمن بیان بعضی پیشنهادات در خصوص پژوهش‌های مرتبط، با جمع‌بندی نتایج به دست آمده مقدار پیشنهادی ضخامت بهینه لایه دمپر ارائه گردیده است.

فصل دوم

عملکرد پوسته میرا کننده در ماشین

سنکرون ابررسانا

۲-۱- مقدمه

موتور ابررسانای دما بالا به گونه‌ای طراحی می‌شود که بازده انرژی و توان و تلفات را بهینه کرده و اندازه و وزن را در صورت امکان کاهش دهد. برای طراحی یک موتور ابررسانا متغیرهای زیادی از جمله ماده سازنده و حتی محدودیت‌هایی که هر جزء با آن روبه‌روست، باید مورد توجه قرار گیرند [۲۵]. عبارتی در کنار مزایای موتور ابررسانا، چالش‌های زیادی در به کارگیری ابررسانا در موتورهای الکتریکی وجود دارد. یکی از محدودیت‌ها در سیستمی که از ابررسانا استفاده می‌کند، هزینه این ماده است. در زمینه ماشین‌های الکتریکی ابررسانا بهینه‌سازی‌های متعددی به منظور به کارگیری آن‌ها در صنعت صورت گرفته است. به طور کلی مشخص شده است که فواید اقتصادی به کارگیری مواد ابررسانای دما بالا مستقیماً از یک ماشین کوچک قابل درک نیست. یکی از روش‌های بهینه سازی استفاده از روش اجزاء محدود به منظور کاهش میزان ابررسانای بکار رفته در موتور می‌باشد [۲۶].

در توان‌های بالا بهترین موتور، موتور سنکرون است. به این دلیل که به راحتی و با کنترل جریان میدان آن می‌توان به ضریب توان واحد دست یافت که تاثیر بسزایی در افزایش بازدهی و کاهش تلفات دارد. برای کاربرد ژنراتوری هم ماشین سنکرون بهترین گزینه است که قابلیت کنترل ضریب توان با کنترل جریان میدان و داشتن فرکانس خروجی ثابت در تمام بارها از عمده‌ترین دلایل آن است.

با توجه به بحث فوق از این به بعد منظور از موتور ابررسانا، موتور سنکرونی است که در ساختار آن از سیم‌ها و صفحات ابررسانا استفاده شده است.

۲-۲- عوامل دستیابی به فناوری طراحی و ساخت موتورهای ابررسانا

همان‌طور که بیان شد بیشتر موتورهای ابررسانای AC که تاکنون ساخته و با موفقیت مورد آزمایش قرار گرفته‌اند از نوع سنکرون می‌باشند. استفاده از سیم‌پیچ تحریک ابررسانا می‌تواند چگالی شار

مغناطیسی بالایی را با تلفات صفر در شکاف هوایی ایجاد نماید. این سیم‌پیچ تحریک، مشخصات عملکردی خواهد داشت که دست یافتن به آن از طریق سیستم‌های تحریک رایج، تاکنون امکان پذیر نبوده است. با استفاده از هادی‌های ابررسانا به عنوان سیم‌پیچ میدان تحریک، تلفات اهمی این سیم‌پیچی حذف خواهد شد و علاوه بر این، میدان مغناطیسی نیز با اشباع مغناطیسی هسته استاتور محدود نخواهد شد؛ زیرا امکان ساخت استاتور بدون دندانه‌های فرومغناطیس وجود خواهد داشت. استاتور بدون شیار، حذف تلفات در ناحیه دندانه‌ها را به دنبال داشته و توزیع سینوسی چگالی شار مغناطیسی در شکاف هوایی را نتیجه خواهد داد. مزایای ماشین‌های سنکرون که از ابررسانای دما بالا در سیم‌پیچی تحریک رتور بهره می‌برند، در مقایسه با ماشین‌های سنکرون کلاسیک، عبارتند از:

- چگالی توان بالاتر نسبت به سایر ماشین‌های سنکرون معمول
- وزن کمتر
- راندمان بالاتر از ۹۹ درصد به دلیل کاهش تلفات به میزان ۵۰ درصد در مقایسه با نوع کلاسیک
- نویز صوتی کمتر
- بهبود پایداری شبکه تغذیه
- راکتانس سنکرون و زاویه بار کوچکتر
- داشتن ویژگی‌های هارمونیکی بهتر
- بازگشت هزینه بالاتر
- محدود نبودن فضای موجود برای سیم‌پیچی آرمیچر
- نیاز کمتر به تعمیر و نگهداری نسبت به موتور سنکرون معمولی [۹]

۲-۳- ساختار ماشین سنکرون ابررسانا

در ساختار کلی و طراحی یک ماشین ابررسانا با توجه به امکانات در دسترس، استاتور، روتور و یا هم روتور و هم استاتور می‌توانند ابررسانا انتخاب شوند. اگر از سیم ابررسانا هم در سیم‌پیچی آرمیچر و هم در سیم‌پیچی میدان استفاده شود به آن موتور، موتور کاملاً ابررسانا می‌گویند. به این منظور بررسی‌های لازم در مورد ساختار ماشین سنکرون و اینکه روتور یا استاتور یا هر دو ابررسانا باشند، نیازمند برآوردهای مناسبی بوده است [۹].

نکته مهم در بکارگیری ابررساناها در ماشین‌های الکتریکی هزینه تمام شده ساخت ماشین است. در یک ماشین ابررسانا بخش اصلی هزینه‌ها، هزینه ماده ابررسانا و سیستم سرد کننده می‌باشد و به دلیل عدم صرفه اقتصادی، معمولاً فقط روتور یا فقط استاتور یک ماشین را ابررسانا می‌گیرند.

ابررساناها در برابر عبور جریان مستقیم مقاومت تقریباً صفر از خود نشان می‌دهند اما آزمایش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که در جریان متناوب رفتار متفاوتی دارند. بنابراین با توجه به این که سیم‌های ابررسانا در جریان‌های ac دارای تلفات هستند معمولاً فقط سیم‌پیچی میدان را از سیم ابررسانا می‌سازند و سیم‌پیچی آرمیچر توسط سیم مسی معمولی ساخته می‌شود.

سطح اشباع جنس ماده مورد نظر برای استاتور که برای کار در چگالی شارهای بالا تعبیه شده باشند نیز بایستی مورد توجه قرار گیرد. همچنین سطح اشباع بالای یکسری مواد برای کارکرد سیستم سردکننده به دلیل بالا بودن تلفات جریان فوکوی آن‌ها می‌تواند مشکل‌آفرین باشد [۲۷].

توضیحات بالا دلالت بر این دارد که ابررساناها ترجیحاً در روتور به کار گرفته شوند تا مشکلات ساختاری به مقدار زیادی مرتفع شوند. اگر به جای سیم‌پیچی‌های مسی روتور از سیم‌های ابررسانا استفاده شود، با توجه به این که این سیم‌ها قادر به عبور دادن جریان‌های بسیار زیاد هستند و به طور نوعی می‌توانند چگالی جریان حدود ۱۰ برابر سیم مسی را تحمل کنند، می‌توان میدان‌های مغناطیسی بسیار قوی تولید کرد.

نکته دیگری که در مورد ساختار ماشین قابل توجه است وجود دمپر یا شیلد مغناطیسی است. بارهای گذرا بر روی موتور می‌تواند باعث تغییر میدان ناگهانی در سیم‌پیچ‌های میدان گردد که منجر به کاهش حالت ابررسانایی و کاهش چگالی جریان می‌گردد. برای جلوگیری از این پدیده از یک شیلد مغناطیسی در فاصله هوایی استفاده می‌شود که از جنس یک فلز رسانا ساخته می‌شود. اندازه شیلد مغناطیسی با بازده موتور رابطه معکوس دارد. با افزایش ضخامت آن فاصله هوایی زیاد شده و شار نشتی به شدت زیاد می‌شود که باعث کاهش بازدهی می‌شود. شیلد مغناطیسی وظایف دیگری نیز دارد که از جمله آن‌ها می‌توان تحمل گشتاور زیاد گذرا در هنگام خطا را نام برد.

بحث دیگری که در مورد ساختار مطرح است بحث سرمایش ابررسانا و دور نگه داشتن آن از هر گونه منبع تولید حرارت است. به دماهای بسیار کم و در حدود چند ده کلوین دماهای کرایوجنیک^۱ و تجهیزات رسیدن به این دماهای کم را کرایوکولر^۲ گویند. سه روش برای خنک سازی سیم‌های ابررسانا ارائه شده [۲۸] که عبارت‌اند از:

۱- انتقال حرارت از طریق جرم خنک

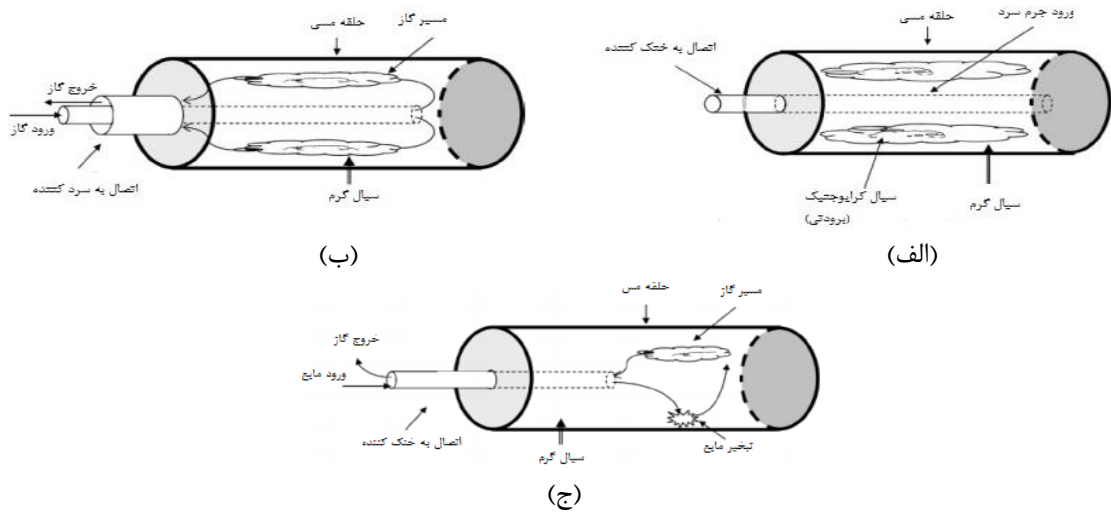
۲- استفاده از گردش گاز خنک داخل روتور

۳- تبخیر مایع خنک در محفظه موتور

^۱ Cryogenic Temperatures

^۲ Cryocooler

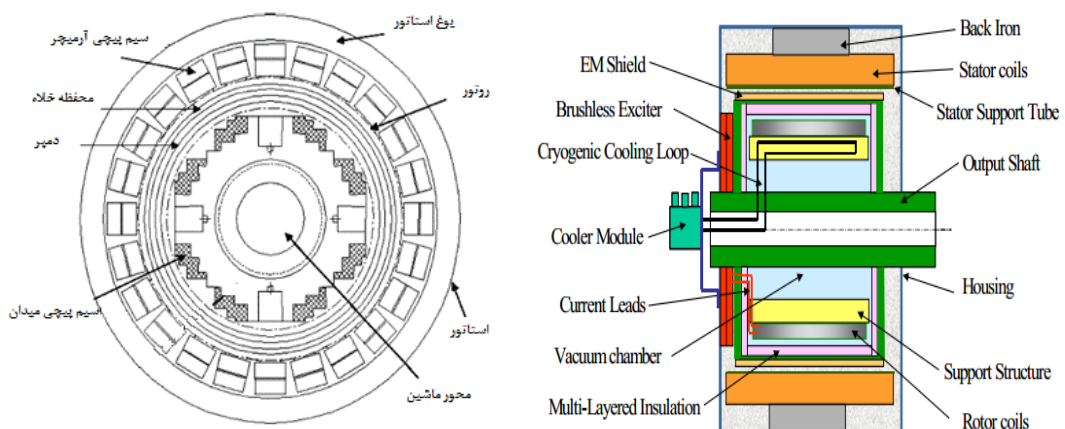
طراحی بهینه پوسته میرا کننده برای یک ماشین سنکرون ابررسانا



شکل ۲-۱: چند روش خنک کردن روتور ابررسانا (الف) جرم خنک (ب) گردش گاز (ج) تبخیر مایع

همانطور که گفته شد معمولا سیم پیچی استاتور از سیم مسی معمولی ساخته می شود و لذا دارای تلفات است و در ضمن آهن بیرونی ماشین هم ایجاد تلفات می کند. با ایجاد یک فضای خلا و تعبیه کردن عایق در فاصله هوایی می توان تبادل حرارت بین روتور و استاتور را از بین برد. یک راه دیگر انتقال حرارت از طریق شافت موتور است که برای جلوگیری از انتقال حرارت از این طریق از انتقال دهنده های گشتاور ایزوله استفاده می شود.

در شکل های ۲-۲ می توان کلیت ساختار یک نمونه موتور ابررسانا را دید.



شکل ۲-۲: ساختار یک موتور ابررسانا [۲۹]

ساختار ماشین‌های سنکرون ابررسانا به دو دسته تقسیم می‌شوند:

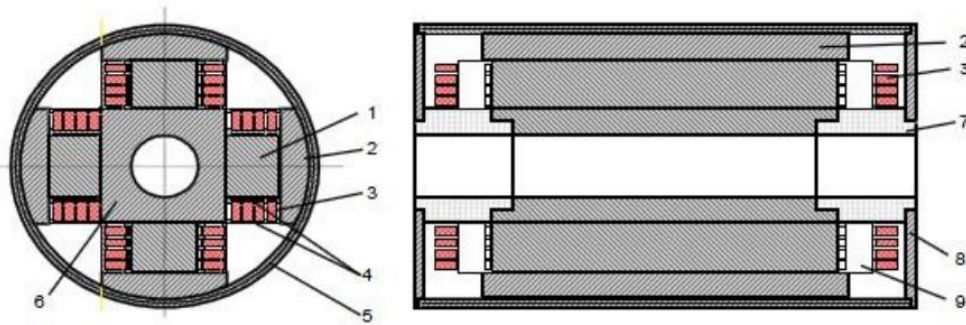
- ماشین‌های سنکرون ابررسانا با رتور بدون هسته
- ماشین‌های سنکرون ابررسانا با رتور فرومغناطیس

در ماشین ابررسانا با رتور بدون هسته، به دلیل وجود چگالی شار مغناطیسی بالا در شکاف هوایی، بالاترین چگالی گشتاور را در میان انواع ماشین‌های الکتریکی خواهیم داشت. در نتیجه هسته آهنی قابل حذف است چون نه تنها نقش تقویت چگالی شار را نخواهد داشت بلکه امکان اشباع آن نیز وجود دارد. در ضمن دندانه‌های استاتور نیز باید حذف شوند تا از اشباع آنان جلوگیری شود. عیب این ساختار آنست که نیروی الکترومغناطیسی، که باید از طریق منتقل کننده گشتاور با رسانایی حرارتی پایین، به محور که هم دمای اتاق است منتقل شود، مستقیماً بر سیم‌پیچی ابررسانا اعمال می‌شود. علاوه بر این، در این ساختار به ابررسانای بیشتری احتیاج خواهد بود. اگرچه ماشین ابررسانا با رتور بدون هسته، چگالی گشتاور بالایی دارد اما مشکل مهار کردن کلاف ابررسانا در سرعت‌های بالا موجب شده است که این ساختار برای کاربردهای سرعت بالا مناسب نباشد. در مواردیکه رتور ماشین سنکرون ابررسانا از هسته فرومغناطیس ساخته شده، به دلیل بالا بودن نفوذپذیری مغناطیسی فولاد در مقایسه با هوا، نیروی محرکه مغناطیسی (mmf)^۱ تحریک مورد نیاز به طور قابل توجهی کمتر بوده و بنابراین ابررسانای کمتری برای سیم‌پیچ تحریک رتور نیاز خواهد بود. در این ساختار، کلاف‌های تحریک کمتر و نگهدارنده‌های مکانیکی ساده‌تر امکان افزایش سرعت و چگالی توان را فراهم می‌آورد.

ساختار معمول مورد استفاده در ماشین‌های سنکرون ابررسانای دما بالا از رتور فرومغناطیس قطب برجسته با سیم‌پیچ تحریک ابررسانا بهره می‌برد. ساختار رتور فرومغناطیس با کلاف‌های ابررسانا

^۱ Magnetic Motive Force

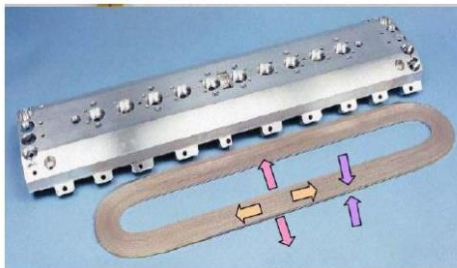
در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. کلاف‌های ابررسانای حلقوی بر روی هر قطب قرار گرفته و بصورت سری بهم متصل می‌شوند. رتور توسط شیلد الکترومغناطیسی و حرارتی محصور می‌شود.



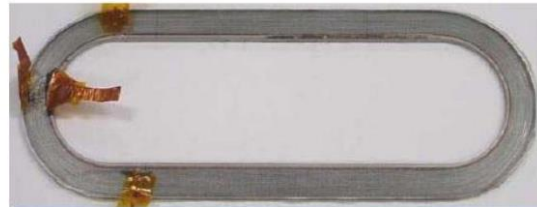
شکل ۲-۳: رتور قطب برجسته با سیم‌پیچ تحریک HTS [۹]

۱- هسته قطب (ماده فرو مغناطیس)، ۲- کفشک قطب (ماده فرو مغناطیس)، ۳- کلاف HTS، ۴- حائل کلاف، ۵- شیلد الکترومغناطیسی سرد، ۶- یوغ رتور (ماده فرو مغناطیس)، ۷- پوشینگ غیر مغناطیسی ضد زنگ، ۸- دیسک انتهایی (فولاد ضد زنگ غیر مغناطیسی)، ۹- نگهدارنده اتصالات نهایی HTS (ماده غیر رسانا و غیر مغناطیس)

در شکل ۲-۴ سیم‌پیچ تحریک ابررسانا مربوط به یک ماشین سنکرون نشان داده شده است [۹].



ب- کلاف و کفشک قطب فرومغناطیس



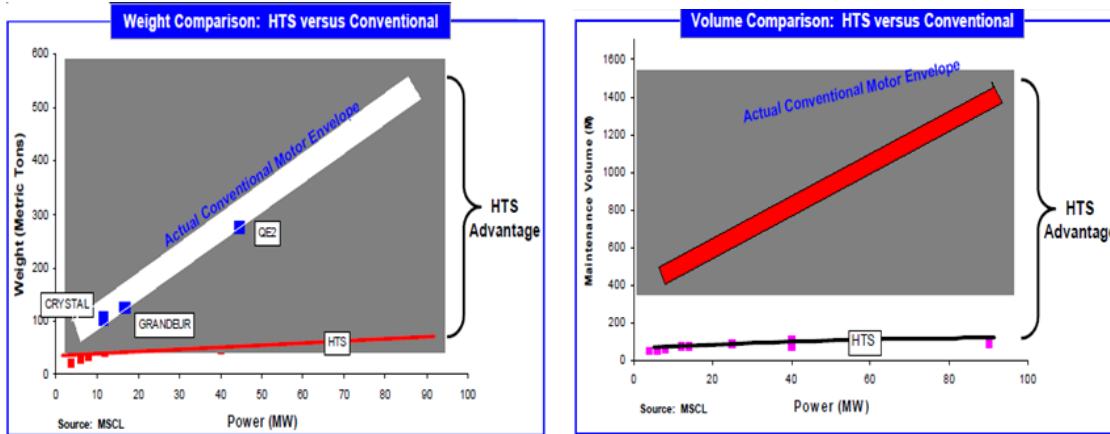
الف- کلاف

شکل ۲-۴: کلاف تحریک ابررسانا مربوط به رتور یک ماشین سنکرون که توسط شرکت American Superconductors ساخته شده است [۹] فلش‌ها نیز جهت تنش‌های مکانیکی را نشان می‌دهند.

۴-۲- موتورهای الکتریکی ابررسانا در سرعت‌های پایین

یکی از کاربردهای مهم موتورهای الکتریکی ابررسانا در سرعت‌های پایین، استفاده از آن‌ها در سیستم پیشران‌ش کشتی است. موتورهای الکتریکی سنکرون ابررسانا در مقایسه با موتورهای سنکرون کلاسیک بطور قابل توجهی کوچکتر هستند. شکل‌های ۲-۵ (الف) و (ب) به ترتیب حجم و وزن

موتورهای سنکرون ابررسانا را با نمونه‌های کلاسیک که در سیستم پیشرانش کشتی استفاده می‌شوند، بر حسب توان‌های مختلف مورد مقایسه قرار داده‌اند.



(ب)

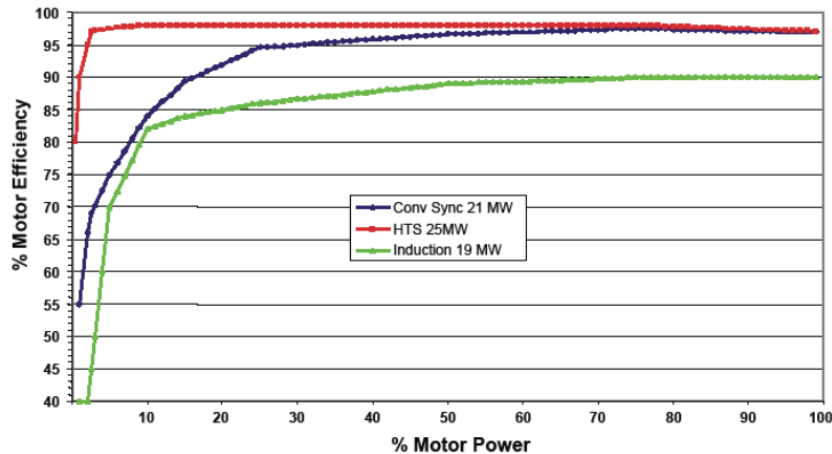
(الف)

شکل ۲-۵: (الف) مقایسه حجم نگهداری (حجم نگهداری ضریبی از حجم واقعی است که این ضریب با افزایش حجم افزایش می‌یابد) موتور ابررسانا با موتور معمولی (ب) مقایسه وزن موتور ابررسانا با موتور معمولی [۹]

راندمان موتورهای الکتریکی ابررسانا، و موتورهای القایی و سنکرون کلاسیک که در سیستم پیشرانش کشتی مورد استفاده قرار می‌گیرند به ازای بارهای مختلف در شکل ۲-۶ نشان داده شده است [۸]. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، منحنی راندمان موتورهای سنکرون ابررسانا در بازه ۵ تا ۱۰۰ درصد بار نامی بصورت یکنواخت و تقریباً بدون تغییر می‌باشد و این نکته مهم‌ترین مزیت موتورهای الکتریکی سنکرون با سیم‌پیچی تحریک ابررسانا می‌باشد.

به عنوان نمونه در یک کشتی نظامی که از موتور الکتریکی به عنوان پیشرانه خود استفاده می‌کند در صورتی موتور در بار نامی کار می‌کند که کشتی با حداکثر سرعت خود حرکت کند. این کشتی نظامی برای مثال تنها در ۲۰ درصد زمان کاری خود با حداکثر سرعت حرکت می‌کند و در ۸۰ درصد زمان در سرعت‌های تا حداکثر ۵۰ درصد سرعت نامی حرکت می‌کند. اگر در این کشتی نظامی از موتور ابررسانا استفاده شود انرژی بسیار زیادی صرفه‌جویی می‌شود زیرا مثلاً در ۲۰ درصد بار نامی بازدهی یک موتور ابررسانا نسبت به یک موتور معمولی تا ۱۰ درصد بیشتر است که در توان‌های بالا

بسیار قابل توجه است. عبارتی در توان‌های چند ده مگاوات همین مقدار ناچیز می‌تواند بازگشت سرمایه بسیار زیادی را در پی داشته باشد اما مهم‌تر از این بحث ثابت بودن بازده است.



شکل ۲-۶: بازدهی موتور ابررسانا در مقایسه با موتور معمولی سنکرون و القایی [۳۰]

۲-۵- اقداماتی در زمینه طراحی و ساخت ماشین‌های ابررسانا در سرعت-های پایین

در کشور آمریکا در سال ۱۹۸۷ رئیس جمهور وقت با حضور در کنفرانس فدرال ابررسانایی سخنرانی کرد و در آن با برشمردن موارد مورد نیاز در زمینه ابررسانایی به اهمیت تحقیق و توسعه در این زمینه اشاره نمود. از آن زمان به بعد، تحقیقات علمی در این زمینه شکل قوی‌تری به خود گرفت و سازمان‌های مختلفی در این زمینه شروع به فعالیت نمودند. در وزارت انرژی آمریکا پروژه‌های ذیل در ارتباط با موتورها و ژنراتورهای ابررسانا انجام شده یا در حال انجام است:

- طراحی ژنراتور ۱۰۰ مگاواتی با همکاری شرکت جنرال الکتریک
- تحقیقات جهت بررسی و طراحی ژنراتور ۱۰۰ مگاوات آمپر توسط آزمایشگاه‌های Los Alamos و Oak Ridge در سال ۲۰۰۵

طبق گزارش‌های دپارتمان انرژی آمریکا حجم بازار جهانی برای تجهیزات ابررسانای دما بالا بالغ بر ۱۰۰ میلیارد دلار در سال ۲۰۲۰ خواهد بود. بر اساس پیش‌بینی دپارتمان انرژی آمریکا در سال ۲۰۰۶، موتورهای الکتریکی ابررسانا در سال ۲۰۱۶ وارد بازار خواهند شد.

از دیگر پروژه‌های انجام شده در ایالات متحده در خصوص موتورهای ابررسانا می‌توان به دو پروژه نیروی دریایی آمریکا اشاره نمود:

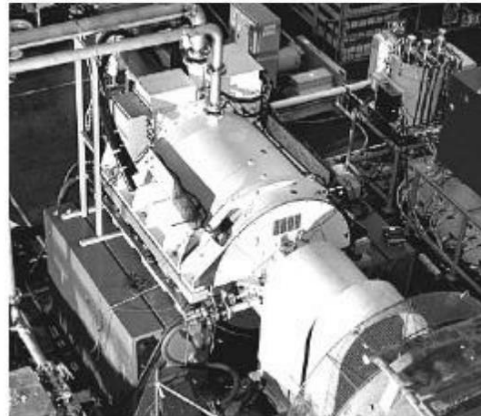
در سال ۲۰۰۳ طراحی و ساخت یک موتور الکتریکی سنکرون ابررسانا با توان ۵ MW به سفارش نیروی دریایی آمریکا توسط شرکت American Superconductors برای استفاده در سیستم پیشرانش کشتی با هزینه‌ای در حدود ۸ میلیون دلار انجام شد. تست‌های مدار باز و اتصال کوتاه این ماشین در کارخانه Alstom در انگلستان انجام گرفت. شکل ۲-۷-الف این موتور را در حال تست در کارخانه Alstom نشان می‌دهد.

در سال ۲۰۰۶ شرکت American Superconductors (AMSC) با همکاری شرکت Northrop Grumman طراحی و ساخت یک موتور الکتریکی سنکرون ابررسانا با توان ۳۶/۵ MW را برای نیروی دریایی آمریکا با هزینه‌ای حدود ۱۰۰ میلیون دلار به پایان رساند. شکل ۲-۷-ب این موتور را که برای نسل جدید کشتی‌های جنگی نیروی دریایی آمریکا ساخته شد نشان می‌دهد. وزن این موتور در حدود ۷۵ تن می‌باشد که در مقایسه با موتور القایی به وزن ۲۰۰ تن با گشتاور تولیدی مشابه، بطور قابل توجهی کاهش یافته است [۹،۸]. مشخصات فنی دو موتور ذکر شده در جدول ۱-۲ آمده است.

طراحی و ساخت بزرگترین توربین بادی جهان با بهره‌گیری از ژنراتور سنکرون ابررسانا با عنوان Sea Titan با توان خروجی ۱۰ MW و سرعت ۱۰ RPM در سال ۲۰۱۲ توسط شرکت American Superconductor به اتمام رسید. استفاده از تکنولوژی ابررسانا در ژنراتور این توربین باعث شده که در مقایسه با نمونه‌های رایج، کوچکتر و سبک‌تر باشد.



(ب)



(الف)

شکل ۲-۷: (الف) موتور سنکرون ابررسانا با توان ۵ MW برای سیستم پیش‌ران‌ش کشتی در حال تست در کارخانه Alstom [1]، [2]، (ب) موتور سنکرون ابررسانا با توان ۳۶/۵ MW برای سیستم پیش‌ران‌ش نسل جدید کشتی‌های جنگی نیروی دریایی آمریکا ساخته شده توسط شرکت AMSC [۸]، [۹]

جدول ۲-۱: مشخصات فنی دو موتور سنکرون ابررسانا ساخته شده در شرکت AMSC به سفارش نیروی دریایی آمریکا [۸]، [۹]

توان نامی	۵ MW	۳۶/۵ MW
سرعت	۲۳۰ rpm	۱۲۰ rpm
ولتاژ نامی	۴۱۶۰ V (line to line)	۶۰۰۰ V
جریان فاز	۷۲۲ A rms	۱۲۷۰ A rms
راندمان	۹۶%	۷۹%
ضریب قدرت	۱,۰	۱,۰
تعداد فاز	۳	۹
تعداد قطب‌ها	۶	۱۶
فرکانس	۱۱/۵ Hz	۱۶ Hz
وزن	۲۳ t	۷۵ t
ابعاد (طول، عرض، ارتفاع)	۲/۵*۱/۹*۱/۹ m	۳/۴*۴/۶*۴/۱ m

در کشور ژاپن، در سال ۱۹۸۶ اولین تحقیقات در زمینه تکنولوژی ابررسانایی شروع شد و مبلغ ۲ میلیون دلار در این حوزه هزینه شد. پروژه‌ای نیز تحت عنوان توسعه موتور ابررسانای دما بالا با توان ۱ مگاوات جهت استفاده در رانش کشتی توسط سازمان NEDO مورد حمایت مالی قرار گرفت و با

همکاری شرکت صنایع سنگین کاوازاکی، دانشکده دریایی دانشگاه توکیو و انستیتو تحقیقات دریایی ژاپن، سازمان ابررسانایی ژاپن انجام شد.

از کارهای انجام شده در آلمان در خصوص ماشین‌های الکتریکی ابررسانا می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

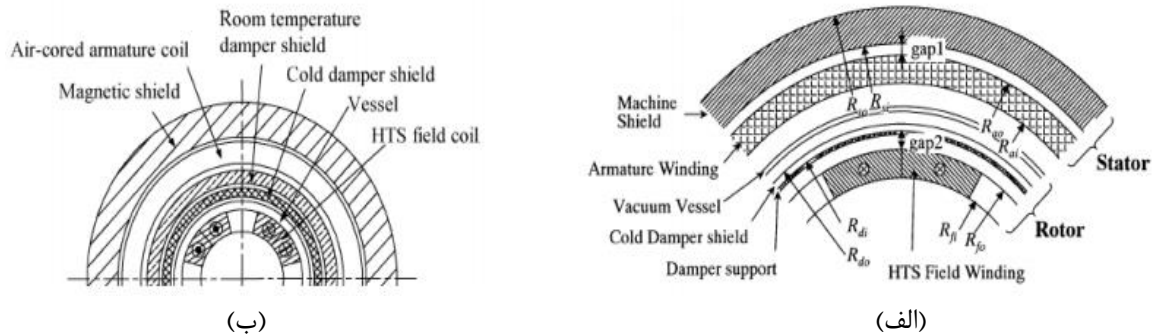
- ژنراتور ۴ مگاوات آمپر با بازده ۹۸,۷ درصد که در سال ۲۰۰۵ به اتمام رسید.
- طراحی و ساخت موتور کشتی با قدرت ۴ مگاوات آمپر و سرعت ۱۲۰ دور بر دقیقه
- شرکت اسوالد پروژه موتور الکتریکی ۱۵۶ کیلو وات، ۲۶۰۰۰ نیوتن متر، ۵۷ دور بر دقیقه با بازده ۹۹,۶ درصد از نوع Torque Motor را با همکاری دانشگاه‌ها، موسسات تحقیقاتی و اجرائی به پایان رساند.

در اتحادیه اروپا اولین پروژه توسط کنسرسیونمی با عنوان POSE2IDON با همکاری شرکت‌های GE و AMSC و موسسات تحقیقاتی از جمله آزمایشگاه پیشرفته مغناطیس آمریکا جهت بهینه‌سازی بخش‌های الکتریکی کشتی انجام شد که بخشی از آن پروژه طراحی موتور الکتریکی کشتی بود. علاوه بر این، اتحادیه اروپا برنامه‌ای در جهت طراحی ژنراتورهای توربین بادی ۱۰ تا ۲۰ مگاواتی (Superpower) را آغاز نموده است [۳۲,۳۱].

۲-۶- میراساز نفوذ میدان مغناطیسی به روتور

در موتور سنکرون، ابررسانای نصب شده در روتور با سرعت سنکرون می‌چرخد. بنابراین در حالت ماندگار تحت تأثیر میدانی ثابت که توسط سیم‌پیچ‌های استاتور تولید شده است قرار می‌گیرد. اما در حالت راه‌اندازی و گذرا این چنین نخواهد بود و از دید سیم‌پیچ‌های روتور میدان متغیر با زمان وجود دارد. اعمال میدان‌های متغیر به سیم‌پیچ‌های ابررسانا باعث ایجاد تلفات در سیم‌های ابررسانا می‌شود که خود می‌تواند مشکلات بسیاری را بوجود آورد. لذا استفاده از دمپر برای حفاظت از سیم‌پیچ‌های

ابرسانا در برابر تغییرات شدید میدان‌های مغناطیسی اهمیت فراوانی دارد. برای حفاظت از سیم‌های ابررسانا نوع اول معمولاً از دو دمپر استفاده می‌شود اما می‌توان با توجه به تأثیر پذیری کمتر سیم‌های ابررسانا نوع دوم تنها از یک دمپر الکترومغناطیسی استفاده کرد.



شکل ۲-۸: (الف) استفاده از یک دمپر مغناطیسی [۳۳] (ب) استفاده از دو دمپر مغناطیسی [۳۴]

اندازه دمپر شیلد مغناطیسی با کارایی و بازده موتور سنکرون ابررسانای دما بالا رابطه معکوس دارد. زیرا با افزایش ضخامت آن فاصله هوایی افزایش می‌یابد. بنابراین طراحی بهینه دمپر مغناطیسی اهمیت بسیاری می‌یابد که در فصل چهارم برای یک موتور سنکرون که طراحی ابعادش با بکارگیری تکنولوژی ابررساناها صورت گرفته بوده، میراکننده الکترومغناطیسی طراحی شده است و نوعی طراحی بهینه برای دمپر الکترومغناطیسی یک ماشین سنکرون ابررسانا با هسته مغناطیسی برجسته ارائه شده است. میراکننده پوسته‌ای هادی با قالبی استوانه‌ای شکل است که جریان آزاد است بطور غیر یکنواخت در آن توزیع شود که این جریان‌های سطحی را جریان‌های گردابی می‌گویند. بنابراین از ورود جریان‌های سطحی به داخل هسته روتور، توسط میراکننده الکترومغناطیسی ممانعت و یا حداقل تضعیف شده آن وارد روتور شده و در دمپر ایجاد می‌شوند.

میراکننده مغناطیسی باید میدان مغناطیسی ثابتی که توسط سیم‌پیچ ابررسانا تولید می‌شود را عبور دهد، اما میدان مغناطیسی متغیر از دید سیم‌پیچ میدان که از طرف سیم‌پیچ‌های استاتور در اثر شرایط گذرا به این سیم‌پیچ اعمال می‌شود را کاهش دهد. بنابراین دمپر نمی‌تواند از جنس مواد

فرومغناطیس انتخاب شود. زیرا باعث بسته شدن شار روی دمپر و کاهش شار از دید سیم پیچ استاتور می گردد. در مواد فرومغناطیس همچون آهن گشتاورهای مغناطیسی (گشتاور چرخشی یا اسپینی) بزرگ بوده، بدین خاطر حوزه های مغناطیسی دارای چگالی شار مغناطیسی هم جهت می باشند و در صورت وجود میدان های مغناطیسی بیرونی، حوزه های مغناطیسی هم جهت شده و در نتیجه افزایش زیادی در چگالی شار مغناطیسی حاصل می گردد ($\mu_r \gg 1$). در حقیقت رفتار مغناطیسی مواد به واسطه حرکت الکترون های اتم پدید می آید زیرا حرکت الکترون ها به معنای وجود جریان است. الکترون های آزاد دوران کننده به دور هسته، نیروی مغناطیسی (گشتاور مغناطیسی) پدید می آورند، همانطوری که به واسطه چرخش الکترون ها به دور محور خود نیروی مغناطیسی ایجاد می شود. در اینجا نیز لازم است که با اعمال میدان مغناطیسی بیرونی، مسیر الکترون ها طوری تنظیم شود که افزایش یا کاهش زیادی در چگالی شار مغناطیسی حاصل نشود. در مواد پارامغناطیس مانند آلومینیوم در هر اتم، گشتاورهای مغناطیسی با جهت های نامنظم همدیگر را خنثی نمی کنند و وجود میدان مغناطیسی بیرونی افزایش کمی در چگالی شار مغناطیسی ایجاد می کند ($\mu_r > 1$). در مواد دیامغناطیس مشابه مس گشتاورهای چرخشی همدیگر را بطور کامل خنثی می کنند و هر اتم به تنهایی بدون حضور میدان مغناطیسی بیرونی، هیچ گشتاور مغناطیسی ندارد که با اعمال یک میدان مغناطیسی بیرونی، کاهش کمی در چگالی شار مغناطیسی حاصل می گردد ($\mu_r < 1$) [۳۵].

از طرف دیگر برای آنکه تغییرات شار با جریان های القایی و میدان ناشی از آن به راحتی جبران شود لازم است تا دمپر هادی خوب جریان الکتریکی باشد. معمولاً از آلومینیوم یا مس برای ساخت دمپر مغناطیسی استفاده می شود. مس دارای عمق نفوذ کمتری نسبت به آلومینیوم است لذا دمپر مغناطیسی مس دارای ضخامت کمتری نسبت به آلومینیوم خواهد بود. اما آلومینیوم چگالی حجمی کمتری نسبت به مس دارد و حتی با در نظر گرفتن ضخامت بیشتر برای داشتن کارایی مساوی با

طراحی بهینه پوسته میرا کننده برای یک ماشین سنکرون ابررسانا

مس، دمپر مغناطیسی آلومینیومی سبک تر از دمپر مغناطیسی مسی خواهد بود. مشخصات مهم در طراحی دمپر مغناطیسی آلومینیومی و مسی در جدول ۲-۲ ذکر شده است.

جدول ۲-۲: مقایسه مشخصات دمپر مسی و آلومینیومی

واحد	مس	آلومینیوم	پارامتر
$S.m^{-1}$	$59/6 * 10^6$	$37/8 * 10^6$	هدایت الکتریکی
-	≈ 1	≈ 1	نفوذپذیری مغناطیسی نسبی
$g.cm^{-3}$	۸/۹۶	۲/۷۰	چگالی
mm	۹/۲	۱۱/۶	عمق نفوذ مغناطیسی در ۵۰ هرتز
mm	۱۸/۴	۲۳/۲	عمق نفوذ مغناطیسی در ۱۲/۵ هرتز

برای مقایسه نسبی وزن دمپر آلومینیومی و مسی با استفاده از جدول بالا می توان به سادگی نسبت وزن دمپرها را محاسبه کرد. به این ترتیب نسبت وزن دمپر مسی به آلومینیومی با قابلیت میرایی میدان مغناطیسی برابر حدود ۲/۶ برابر است. البته نسبت ضخامت دمپر مسی به آلومینیومی حدود ۰/۸ است که می تواند باعث بهبود کارایی موتور گردد.

در [۳۶] برای بهینه سازی دمپر مغناطیسی، فرض می شود که فرکانس تغییرات میدان مغناطیسی متغیر با زمان متناسب با مشخصه پاسخ جریان سیم پیچ استاتور است و مشخصه پاسخ فرکانس میدان مغناطیسی متغیر با زمان توسط سیم پیچ میدان موتور ابررسانا باید بر اساس راه اندازی و تغییر بارهای موتور باشد. همانطور که گفته شد زیاد بودن اندازه لایه دمپر باعث افزایش فاصله هوایی ماشین و در نتیجه کم شدن میدان در فاصله هوایی خواهد شد و از طرفی با کوچک در نظر گرفتن این اندازه، از ایجاد جریان های گردابی در هسته روتور به دلیل عدم توانایی دمپر در حذف و خنثی نمودن کامل نفوذ میدان های هارمونیک استاتور به داخل روتور، ممانعت به عمل نمی آید. در [۳۶] محاسبات بر اساس مدل ماشین سنکرون انجام گرفته است و برای موتور ابررسانا سنکرون ۵MW، حداقل فرکانس ۱۰ هرتز با توجه به در نظر گرفتن حاشیه پایداری برای سیم پیچ ابررسانای میدان انتخاب شده است و

از آنجا که جریان‌های گردابی حاصل از هارمونیک‌های شار میدان استاتور تا میزان مشخص و عمق معینی می‌توانند در پوسته میراکننده الکترومغناطیسی نفوذ کنند، رابطه (۱-۲) را برای تعیین عمق نفوذ میدان مغناطیسی بیان کرده است.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu f \sigma}} \quad (1-2)$$

f فرکانس نامی ماشین، μ تراوایی مغناطیسی (پرماییلیته) و σ هدایت الکتریکی ویژه ماده تشکیل دهنده لایه دمپر است.

۲-۷- عملکرد دمپر در ماشین سنکرون کلاسیک

نقش اصلی آن در ژنراتورها و موتورهای میرا کردن نوسانات سرعت و نوسانات گشتاور می‌باشد. عبارتی دمپر سعی می‌کند گذرایی‌هایی همچون تغییرات بار و یا تغییرات ولتاژ در شرایطی که موتور یا ژنراتور سنکرون معمولی موازی با شبکه است را زودتر از بین ببرد و هر اغتشاشی که اتفاق بیفتد ماشین بتواند حالت سنکرونیزم خودش را حفظ کند و پاسخ حالت دائمی زودتر فرا برسد. در حالت ژنراتوری، زمانی که بار نامتعادل پیش می‌آید موجب ولتاژ نامتعادل می‌شود و در شرایط نامتعادل، میدان‌های چپگرد ایجاد می‌شود که باعث القای ولتاژ در دمپر می‌شود و جریان بوجود آمده در دمپر توسط این ولتاژ، شار ایجاد می‌کند که شار میدان چپگرد را تضعیف کرده و در نتیجه ولتاژها را متعادل تر می‌کند. شار هارمونیک اصلی میدان سرعتی یکسان با سرعت چرخش دمپرها دارد ولی هارمونیک‌های دیگر با سرعتی غیر از سرعت روتور می‌چرخند که در حالت دائمی، دمپر این هارمونیک‌ها را کاهش می‌دهد. به عبارتی میدان مغناطیسی هارمونیک‌های شار فاصله هوایی که در فاصله هوایی حضور دارند، سرعتی متفاوت و بیشتر از سرعت گردش روتور دارند و شاری متغیر با زمان تولید می‌کنند که در نتیجه با به وجود آوردن جریان گردابی در روتور سبب گرم شدن روتور می‌شوند. هادی میراکننده با عبور دادن این جریان‌ها مانع از ایجاد جریان‌های فوکو در سیم‌پیچ تحریک می‌شود. به

این ترتیب چنانچه به عنوان مثال در استاتور سیم‌پیچ‌های موازی وجود داشته باشد و جریان فوکو ایجاد شود که به موجب آن ولتاژها با هم متفاوت شوند، دمپر مانع از ایجاد این اختلاف ولتاژ خواهد شد [۳۷].

۸-۲- عملکرد دمپر در ماشین سنکرون ابررسانا

نقش دمپر در ماشین ابررسانا بسیار مهم‌تر می‌شود. در ارتباط با سیم‌پیچ‌های ابررسانا در [۳۶] معیار عمق نفوذ مغناطیسی جهت طراحی دمپر در نظر گرفته شده بود که پیشتر توضیح داده شد. اهمیت تأثیر دمپر روی بحث گذرایی موتور ابررسانا از آنجایی که ممکن است سیم‌پیچ میدان تحریک به محدوده غیر ابررسانایی رود، مطرح می‌شود که در فصل‌های بعدی با نشان دادن شکل موج جریان میدان در لحظه گذرایی و توزیع چگالی جریان در دمپر شیلد بحث و بررسی خواهد شد.

سیم‌پیچی میدان ابررسانا همواره یک میدان AC ناشی از هارمونیک‌های فضایی آرمیچر و همینطور هارمونیک‌های زمانی تحمیل شده به آرمیچر را در شرایط اتصال به منابع خارجی تجربه می‌کند. به این دلیل که توزیع سیم‌پیچی‌ها بصورت کاملاً سینوسی نیستند، هارمونیک‌های فضایی بوجود می‌آیند. هارمونیک‌های زمانی نیز از منابع تغذیه حاصل می‌شوند که مجموعه این‌ها میدان‌هایی را در فاصله هوایی ایجاد می‌کنند که سرعت چرخشی بجز سرعت سنکرون دارند و چون روتور با سرعت سنکرون می‌چرخد، اختلاف سرعت موجب إلقاء ولتاژ در روتور می‌شود که ایجاد تلفات را در پی خواهد داشت که برای از بین بردن آن، میراکننده را در ساختار موتور قرار می‌دهند که هر گونه إلقاء ولتاژی در لایه دمپر انجام گیرد. جریان‌هایی که در دمپر شیلد جاری می‌شوند با عامل به وجود آورنده خود مخالفت کرده و با تضعیف کردن میدان و ممانعت از نفوذ آن به داخل هسته روتور سبب می‌شوند إلقاء ولتاژ در روتور کم شود. لذا سیم‌پیچی میدان ابررسانا شده، شبیه به آن است که یک میدان AC ناشی از هارمونیک‌های فضایی آرمیچر را به همراه تمامی هارمونیک‌های زمانی حاصل از منبع خارجی اتصال یافته به آرمیچر را تحمل می‌کند. این میدان‌های هارمونیکی می‌توانند منجر به

تلفات اضافی در سیم‌پیچی ابررسانا و ساختار پوشاننده (تکیه‌گاه) آن شوند. برای کم کردن و یا حداقل کردن میدان AC هارمونیک که توسط سیم‌پیچی میدان دیده می‌شود و نیز هارمونیک‌هایی که سیم‌پیچ‌های میدان را تحت تأثیر قرار می‌دهند، سیم‌پیچی ابررسانا به وسیله‌ی یک پوسته (سیلندر) ساخته شده از ماده رسانای الکتریکی مثل مس یا آلومینیوم احاطه می‌شود. به بیان دیگر پوسته‌ای هادی هسته روتور را احاطه می‌کند و جریان‌ها درون این پوشش فلزی به طور کاملاً غیریکنواخت برقرار می‌شوند تا اثر هارمونیک‌ها را از بین ببرند. در این غشاء پیوسته، جریان‌های اِلِقاء شده آزادند که با توزیع غیریکنواخت در سراسر پوسته جاری و برقرار شوند [۳۸].

در ژنراتور ابررسانای ۲۰۰ کیلوولت‌آمپر و سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه که توسط آقای سورپانا و دوستانش طراحی و تست شد، فکر تازه‌ای در روند طراحی ژنراتور ابررسانا با بالا بردن نسبت اتصال کوتاه (SCR)^۱ معرفی شد. این کار با حذف نیاز به دمپر الکترومغناطیسی و سیستم تحریکی با پاسخ سریع صورت گرفته است. روتور این ماشین از سیم‌های ابررسانا با آلیاژ Nb-Ti پیچیده شد و سیستم مدار بسته هلیم مایع طراحی و برای خنک سازی سیم‌پیچ‌های ابررسانا نصب گردید. استاتور ماشین نیز از نوع آرمیچر سیم‌پیچی شده و هسته مغناطیسی با آهن ورقه شده می‌باشد [۳۹].

عیب مهم در فعالیت ژنراتور ابررسانا با شبکه قدرت، پاسخ بسیار کند آن است. به خاطر ثابت زمانی شدیداً بزرگ میدان، سیستم تحریک قادر نخواهد بود از طریق تغییر سریع جریان میدان به نیاز شبکه‌ای که به آن متصل است پاسخ دهد. یک راه غلبه کردن بر این مشکل بکارگیری میدان بیرونی با سقف ولتاژ بالاتر از ۱۰۰۰ پیرونیست می‌باشد. چنین سیستم تحریکی با پاسخ سریع (QRES)^۲ در این مدل ژنراتور ابررسانا امتحان شده است.

^۱ Short-Circuit Ratio

^۲ Quick Response Excitation System

از مشکلات دیگر مربوط به عملکرد ژنراتور ابررسانا با سیستم قدرت، حساسیت سیم پیچ ابررسانا به جریان های متناوب به وجود آمده در حین فعل و انفعالات متفاوت شبکه قدرت همچون بارگذاری و بارزدائی، کلیدزنی از راه دور، بارهای نامتعادل و حضور موارد این چنین است. راه حل موجود برای غلبه بر این مشکل از طریق دمپر الکترومغناطیسی (EMD)^۱ به صورت پوسته ای برای سیم پیچ ابررسانا می باشد.

در [۳۹] بیان شده که استفاده از سیستم تحریکی با پاسخ سریع برای دستیابی به نرخ بالای سرعت تغییر شار پرهزینه بوده و همچنین موانع شدیدی را برای طراحی روتور ابررسانا تحمیل کرده و پایداری هیدرولیکی-حرارتی سردکننده روتور را تغییر می دهد. همچنین دمپر الکترومغناطیسی گرم که لایه بیرونی روتور است؛ تحت تأثیر نیروهای الکترومغناطیسی و نیروی گریز از مرکز بالایی قرار دارد. یکی از محدودیت های اصلی در توسعه ژنراتورهای ابررسانا با ظرفیت بزرگ تر با قابلیت هدایت الکتریکی و استحکام بالا، عمل فورج برای تو خالی کردن فلزات غیر آهنی با وزن چندین تنی است. بنابراین در طراحی این ژنراتور ابررسانا، کاهش اثرات مغناطیس زدائی عکس العمل آرمیچر بر سیم پیچی میدان به وسیله طراحی ماشین با نسبت اتصال کوتاه خیلی بالا (بیشتر از ۵) انجام شده است. این ژنراتور توسعه یافته با نسبت اتصال کوتاه بالا مشخصات زیر را دارا می باشد:

- ترمینال ولتاژ ثابت از بی باری به بار کامل
- توانایی جذب اغتشاشات نرمال شبکه قدرت توسط روتور ابررسانا بدون تهدید ابررسانایی
- قابلیت تحمل بارهای نامتعادل

^۱ Electro-Magnetic Damper

فصل سوم

مدل سازی الکترومغناطیسی ماشین

سنکرون ابررسانا

۳-۱- مقدمه

با توجه به آنچه که در دو فصل قبلی گفته شد بهره‌گیری از خاصیت ابررسانایی باعث پیشرفت چشمگیر در ساخت و بکارگیری تکنولوژی ابررساناها در وسایلی همچون موتورهای الکتریکی، ژنراتورها، ترانسفورماتورها و محدودکننده‌های جریان شده است. به این علت که ماشین‌های ابررسانا در مقایسه با ماشین‌های معمول، میدان مغناطیسی قوی‌تری ایجاد می‌کنند، ابررساناها در فشرده‌تر شدن، کوچک‌تر شدن و کاهش چشمگیر تلفات نسبت به طرح‌هایی که ابررسانا در آنها به کار نرفته است، سهم بزرگی دارند. راندمان بهتر در موتورها و کم شدن حدود ۵۰ درصدی تلفات و اندازه در مقایسه با موتورهای معمولی از مزایای استفاده از ابررساناهاست. هر چه اندازه موتور کوچکتر باشد میزان اصطکاک و تلفات سیم‌پیچ و همچنین تلفات ماده سازنده موتور کاهش می‌یابد [۶].

۳-۲- انتخاب ساختار ماشین ابررسانا مورد مطالعه

موتورهای سنکرون با سیم‌پیچ تحریک ابررسانا می‌توانند فواید تحریک بسیاری را به همراه داشته باشند که در بخش ۲-۲ بیان گردید. طبق جدول ۱-۳ که موتورهای مهم ابررسانای ساخته شده در جهان را نشان می‌دهد پر واضح است که ماشین سنکرون ابررسانا بیشترین توجهات را برای اجرایی شدن به خود اختصاص داده است [۸].

جدول ۳-۱: موتورهای مطرح ابرسانای سنکرون ساخته شده توسط بعضی از کشورها

سازنده	توان نامی	سال ساخت	تعداد قطب	سرعت
امریکا	۱/۵ KW(۲ hp)	۱۹۹۳	۲-pole	۳۶۰۰ rpm
	۱/۷ KW(۵ hp)	۱۹۹۳	۴-pole	۱۸۰۰ rpm
	۹۲ KW(۱۲۵ hp)	۱۹۹۵	۴-pole	۱۸۰۰ rpm
	۷۳۵ KW(۱۰۰۰ hp)	۲۰۰۰	۴-pole	۱۸۰۰ rpm
	۳/۷ MW(۵۰۰۰ hp)	۲۰۰۱	۴-pole	۱۸۰۰ rpm
	۵ MW(۶۵۰۰ hp)	۲۰۰۳	۶-pole	۲۳۰ rpm
	۳۶/۵ MW(۴۹۰۰۰ hp)	۲۰۰۶	۱۶-pole	۱۲۰ rpm
زیمبس	۴۰۰ KW(۵۵۰ hp)	۲۰۰۱	۴-pole	۱۸۰۰ rpm
	۴ MW(۵۵۰۰ hp)	۲۰۰۵	۲-pole	۳۶۰۰ rpm
کره	۷۳/۵ KW(۱۰۰ hp)	۲۰۰۲	۴-pole	۱۸۰۰ rpm
	۳ KW(۴ hp)	۲۰۰۱	۴-pole	۱۸۰۰ rpm
ژاپن	۳/۱ KW(۴ hp)	۲۰۰۵	۸-pole	۷۲۰ rpm
فنلاند	۱/۵ KW(۲ hp)	۱۹۹۷	۴-pole	۱۵۰۰ rpm

همانگونه که اطلاعاتی کلی در بخش‌های قبل در خصوص ماشین سنکرون که جایگاه ویژه‌ای در صنعت دارد بیان شده، از بین ساختارهای متنوع ماشین‌های ابرسانا و با توجه به مقالات علمی، ماشین سنکرون ابرسانای معرفی شده جهت بررسی‌های لازم انتخاب گردید.

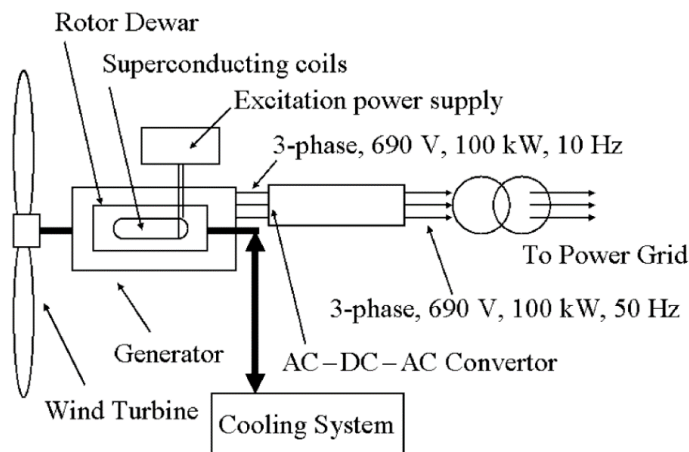
۳-۲-۱- پارامترهای ماشین معرفی شده

مزایای فراوان سیستم‌های پیشران الکتریکی و رویکرد توسعه روزافزون و سریع در پیشرفته‌ترین دانش‌های مربوط به صنایع دریایی و هوایی سبب شده که صنعت کشتی‌سازی و شناورهای زیر سطحی، کاربرد آن‌ها را مد نظر قرار دهند [۴۰]. همینطور در دهه اخیر، مزارع و نیروگاه‌های بادی به منظور بکارگیری هر چه دقیق‌تر قدرت باد، تلاش‌های بسیاری را جهت تولید جدیدترین ژنراتورهای

توان بالا با بیشترین راندمان همچون ژنراتورهای مغناطیس دائم رانش مستقیم و ژنراتورهای ابررسانا آغاز نموده‌اند. بنابراین توان ژنراتورها بموازات نیاز شدید گسترش مزارع بادی و همچنین سایز و وزن ژنراتورها نیز افزایش یافت. در قدرت‌های ۵-۶ مگاوات، وزن و سایز ژنراتورهای سنکرون مغناطیس دائم رانش مستقیم دور پایین نیز همچون ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه سرعت بالای گیربکسی، مزارع بادی را به لحاظ منافع اقتصادی با موانع جدی روبرو کرد. ژنراتورهای ابررسانا برای غلبه بر این مشکلات به جهت چگالی انرژی بالا و در نتیجه مزایای وزن و سایز آن‌ها پیشنهاد شدند. مسائلی همچون: ساختار الکترومغناطیسی در بخش عرضی، توزیع میدان در سیم‌پیچ‌های تحریک، تأثیرات میدان بر قابلیت‌ها و توانایی‌های نوارهای HTS حامل جریان و تحمل اضافه جریان در سیم‌پیچ مطرح بوده که موجب به جلو رانده شدن و تسریع در امر گسترش چنین ژنراتورهایی شده است [۴۱]. برای طراحی یک سیستم توربین بادی با توان ۱۰ مگاوات، مدلی از ماشین سنکرون ابررسانا با توان ۱۰۰ کیلووات در مقاله‌ای طراحی شده که پارامترهای الکترومغناطیسی سیم‌پیچ‌های تحریک در روتور با روشی عددی و همچنین مطابق با خصیصه‌های نوارهای HTS بازرگانی و تجاری، ارزیابی و بهینه شده که پارامترهای طراحی این ماشین برای بررسی در این پایان‌نامه مورد مطالعه قرار داده شده است. بنابراین لازم به ذکر است که ماشین انتخاب شده در بخش شبیه‌سازی‌ها مورد نگرش و بازبینی قرار گرفته و تحقیقات با مشخصات این ماشین به انتها رسانیده شده است که البته نمونه‌های فراوان و ساختارهای مختلفی از این موتورها برای شناورهای سطحی و زیرسطحی با کاربردهای تجاری یا نظامی تاکنون ارائه شده است.

بنابراین با توجه به همه نکات ذکر شده در بالا و بررسی و جمع‌بندی آن‌ها، پایان‌نامه حاضر بر اساس پارامترهای طراحی یک ماشین سنکرون با عملکرد موتوری، با ساختار روتور ابررسانا و هسته آهنی یکپارچه بنا شده است و استاتور موتور مشابه با ماشین‌های معمول سنکرون خواهد بود.

در این انتخاب، با توجه و در نظر گرفتن تجهیزات معمول مورد نیاز توربین‌های توان بالا، یک ماشین سنکرون HTS پیشنهاد شده بود که تست‌ها برای ماشین ۱۰ مگاواتی HTS عملی شود. لذا شکل ۱-۳ دیاگرام شماتیکی از مدل سیستم ۱۰۰ کیلووات را که شامل توربین بادی، ماشین ابرسانا، مبدل و باقی اجزاء می‌باشد نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳: دیاگرام شماتیکی از مدل سیستم ماشین ۱۰۰ KW HTS [۴۱]

پارامترهای طراحی شده مدل در جدول ۲-۳ بر اساس نیازها و تجهیزات معمول یک شبکه قدرت

قطعی شده‌اند.

جدول ۲-۳: پارامترهای موتور طراحی شده [۴۱]

۱۰۰	توان نامی موتور (Kw)
۱۰	فرکانس نامی (Hz)
۲۰۰	سرعت نامی روتور (rpm)
YBCO	ابرسانای به کار رفته
۶۹۰	ولتاژ نامی خط (rms)
۸۴	جریان نامی (A)
۳	تعداد فازها
۳	تعداد جفت قطب‌ها
۵۰	جریان تحریک (A)
۸/۵	چگالی جریان نامی روتور (A/mm^2)

همانطور که در جدول آمده، ولتاژ سه فاز خروجی ماشین ۶۹۰ ولت می‌باشد که جریان اسمی را

برابر با ۸۴ آمپر نتیجه خواهد داد.

$$V_{L-L} = 690 \text{ volt}(rms)$$

$$P = \sqrt{3} * V_{Lrms} * I_{rms}$$

$$= \sqrt{3} * 690 * I_{rms} = 100 * 10^3$$

$$I_{rms} = \frac{100000}{\sqrt{3} * 690} = 83.6739 \cong 84A$$

(۱-۳)

$$V_{PhPeak} = \frac{690_{L-L} * \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 563.3826 \cong 563 \text{ volt}$$

به این ترتیب مقدار پیک ولتاژ در هر فاز ۵۶۳ ولت می‌باشد. پارامترهای ابعادی استاتور و روتور

مطابق با جدول ۳-۳ است.

جدول ۳-۳: پارامترهای ابعادی روتور و استاتور [۴۱]

۱۳۲	تعداد دور سیم‌پیچ استاتور	۴۵۰	قطر داخلی استاتور (mm)
۷	اتصال سیم‌پیچ استاتور	۷۴۰	قطر خارجی استاتور (mm)
۳۶	تعداد شیارها	۶۶۰	طول استاتور (mm)
۲	شیار بر قطب بر فاز	۱۷	عرض فاصله هوایی (mm)
۵۲	ارتفاع سیم‌پیچ روتور (mm)	۵۰	قطر داخلی روتور (mm)
۱۵۶	عرض سیم‌پیچ روتور (mm)	۴۱۶	قطر خارجی روتور (mm)
۴۰	تعداد دور هر پنکیک	۸	تعداد پنکیک در هر قطب

فرکانس خروجی سیستم با توجه به شبکه قدرت استاندارد ۵۰ هرتز بوده که با این وجود برای

داشتن سرعت چرخشی ۲۰۰ دور در دقیقه برای توربین، بر طبق رابطه زیر روتور بایستی ۱۵ جفت

قطب داشته باشد:

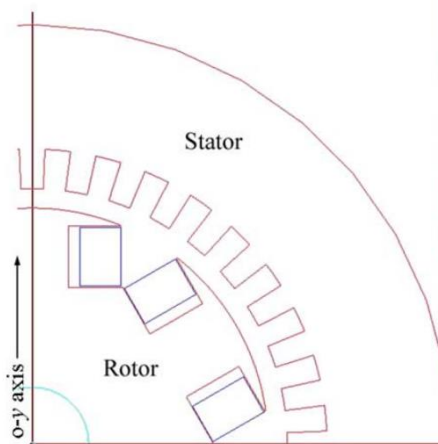
$$n = 60 f / p$$

$$p = 60 * 50 / 200 = 15$$

(۲-۳)

n سرعت چرخشی روتور بر حسب f rpm، فرکانس خروجی ژنراتور و p تعداد جفت قطب‌های مغناطیسی در روتور می‌باشد. برای داشتن کمترین خمش نوارهای HTS تجاری موجود که به طور معمول حدود $40-70$ mm می‌باشند، روتوری با 15 جفت قطب با سیم‌پیچ‌هایی از نوع HTS از نقطه نظر ابعادی بزرگ خواهد بود و برای چگالی انرژی مانع مهم و قابل توجهی خواهد شد. از طرف دیگر سیستم‌های خیلی از توربین‌های بادی شامل مبدل‌های AC-DC-AC هستند که می‌تواند هر فرکانسی را به 50 هرتز تبدیل کند. با قبول یک مبدل AC-DC-AC در این مدل، فرکانس خروجی ماشین 10 هرتز خواهد بود که هم نیاز سرعت توربین و هم راحتی طراحی را توأمان مرتفع می‌کند. بنابراین، بر طبق رابطه (۲-۳) روتور این ماشین HTS در فرکانس خروجی 10 هرتز شامل 3 جفت قطب خواهد بود.

نتیجه اینکه در مدل ماشینی که در حال حاضر استفاده شده، روتور دربرگیرنده سیم‌پیچ‌های تحریک HTS و استاتور شامل سیم‌پیچی‌های معمولی همانند استاتور ژنراتورها و موتورهای تجاری می‌باشد. $1/4$ از سطح مقطع ماشین سنکرون ابررسانا در شکل ۲-۳ نمایش داده شده است.



شکل ۲-۳: برش عرضی از مدل سطح مقطع ماشین [۴۱]

چگالی انرژی و در نتیجه وزن و سایز ماشین به میدان مغناطیسی و چگالی شار در فاصله هوایی وابسته است. در قالب قاعده‌ای کلی، میدان مغناطیسی قوی‌تر در فاصله هوایی، چگالی انرژی بهتر

ماشین را در پی خواهد داشت. اما نیازهای عایق بندی حرارتی محفظه ای که دربرگیرنده روتور است و دمای پایین مورد نیاز سیم پیچی HTS را تولید می کند، سبب شده که طول فاصله هوایی در ماشین های HTS نسبت به ماشین های معمولی بسیار بزرگ تر باشد. بخش زیادی از قسمت های ماشین معمولی از هسته آهنی تشکیل شده است و فاصله هوایی بین استاتور و روتور بسیار کوچک و تا چند میلی متر می باشد. در طراحی ماشین معرفی شده، فاصله هوایی با در نظر گرفتن فضای لازم برای لایه عایق و دمپر و بقیه اجزای فاصله هوایی در ماشین ابررسانا ۱۷ میلی متر در نظر گرفته شده است.

نظر به اینکه محدودیت هایی در ابعاد سیم پیچ های تحریک HTS وجود دارد که بر اساس نیازهای عایق حرارتی و مشخصات مکانیکی نوارهای HTS برای سائز آن ها تصمیم گرفته می شود و نیز با در نظر گرفتن فاصله هوایی زیادی که گفته شد، مزایایی همچون چگالی توان که در ماشین های ابررسانا خیلی مطرح است، در این ماشین به دلیل داشتن توان پایین و ۱۰۰ کیلووات صادق نیست به طوریکه چگالی توان در این ماشین در مقایسه با ماشین مغناطیس دائم جریان مستقیم مزیت بزرگی محسوب نمی شود. لازم به ذکر است که چون فاصله هوایی با توجه به محدودیت های حرارتی ماشین انتخاب شده و از طرفی ابعاد سیم پیچ تحریک ابررسانا با توجه به محدودیت های مکانیکی اتخاذ شده که بتواند در سرعت های مختلف استحکام خودش را حفظ کند و با افزایش توان ماشین ابررسانا، این دو محدودیت افزایش پیدا نمی کند و تقریباً ثابتند، در توان های بالا مزیت و برتری این ماشین ها نسبت به دیگر ماشین ها مشخص خواهد شد.

۳-۲-۲- تحلیل طراحی ماشین معرفی شده

گذشته از پهنای فاصله هوایی، میدان فاصله هوایی و توزیع میدان در مسیرهای عبور شار تولید شده به وسیله چگالی جریان تحریک در ماشین تعیین می شوند. به همان اندازه که ساختار و اندازه سیم پیچ های تحریک در چگالی شار در فاصله هوایی نقش دارند، ساختار و خصوصیات مغناطیسی

هسته‌های آهنی استاتور و روتور نیز در مقدار چگالی شار مؤثر هستند. با توجه به تغییرات چگالی شار در تمام قسمت‌های موتور، طبق قانون بیوساوار ولتاژ القا شده در فاصله‌های مختلف از مرکز محور موتور قابل محاسبه است که ولتاژ القایی در هادی‌های آرمیچر استاتور برابر است با:

$$E = Blv \quad (3-3)$$

B چگالی میدان مغناطیسی بر روی هر هادی، l طول مفید آرمیچر و v سرعت خطی میدان مغناطیسی است که:

$$v = 2\pi nr / 60 \quad (4-3)$$

r فاصله هادی از مرکز محور است. با به کار بردن پارامترهای طراحی لیست شده در جدول ۳-۳ در روابط (۳-۳) و (۴-۳) و همچنین طول مفید آرمیچر که ۵۰۰ میلی‌متر بود و نیز با به دست آوردن منحنی تغییرات چگالی شار در موتور، ماکزیمم ولتاژ القا شده در هر هادی برابر با ۲/۱۴ ولت می‌شود [۴۱]. به عبارت دیگر با توجه به ولتاژ سه فاز اسمی مؤثر برابر با ۶۹۰ v که مقدار پیک ولتاژ در هر فاز را ۵۶۳ v می‌دهد، تعداد دورهای سری به هم پیوسته مورد نیاز در هر فاز استاتور ۱۳۲ دور خواهد بود که از رابطه زیر E_{max} در هر هادی از ۲۶۴ هادی نیز به دست می‌آید:

$$132 * 2 = 264$$

$$264 * E_{max} = V_{Peak_{PH}} \Rightarrow E_{max} = \frac{563}{264} = 2.14v \quad (5-3)$$

برای استاتور طراحی شده در این مدل که عرض و عمق هر شیار آن به ترتیب ۲۰ و ۳۶ میلی‌متر می‌باشد، مجموع سطحی که سیم‌پیچی‌ها از آن عبور می‌کنند 25920 mm^2 است:

$$S_{slot} = 20 * 36 = 720 \text{ mm}^2$$

$$S_{SUM} = N(slot) * S_{slot} = 36 * 720 = 25920 \text{ mm}^2 \quad (6-3)$$

در جریان ۸۴ آمپر، برآوردی که برای چگالی جریان سیم پیچ‌های استاتور انجام شده A/mm^2 در ۲/۶۳ می‌باشد که برای هادی‌های مسی مرسوم در استاتوری که در دمای اتاق کار می‌کند و توسط هوا خنک‌سازی می‌شود، معقول بوده است.

۳-۳- مدل‌سازی ماشین مورد مطالعه با اجزاء محدود

عملکرد دقیق ماشین با در نظر گرفتن بار آن، با استفاده از روش‌های محاسباتی در محیط شبیه‌سازی موجب پدید آمدن برآوردهایی می‌شود که به راحتی از نتایج تحلیل و آزمایش حاصل نمی‌شود.

۳-۳-۱- معرفی روش اجزاء محدود

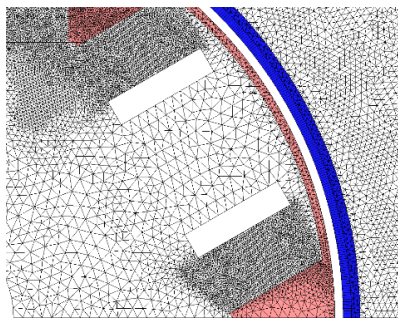
روش اجزاء محدود یا روش المان‌های محدود که به اختصار FEM^۱ نامیده می‌شود، روشی عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی و نیز حل انتگرال‌ها می‌باشد. اساس کار این روش به گونه‌ایست که با حذف کامل معادلات دیفرانسیل یا ساده سازی آنها به معادلات دیفرانسیل معمولی برسیم که با روشهای عددی مثل روش اویلر حل می‌شوند. در حل معادلات دیفرانسیل جزئی مسئله مهم این است که به معادله ساده‌ای که از نظر عددی پایدار است برسیم. به عبارت دیگر میزان خطا آنقدر نباشد که به نتایج نامفهوم منتهی شود. روشهایی با مزایا و معایب مختلف برای این امر وجود دارد، که روش اجزاء محدود یکی از بهترین آنهاست.

جزء‌نگری و تحلیل اجزاء محدود شامل یک مدل کامپیوتری از یک ماده و یا یک طرح می‌باشد که به منظور یافتن نتایجی خاص مورد ریزبینی قرار می‌گیرد. با تکرار موفقیت‌ها و همچنین پیگیری عوامل شکست‌ها در آنالیز اجزاء محدود برای یک طرح، پیش‌بینی شرایط ممکن برای دستیابی به مدل بهینه، عملی خواهد بود. به طور کلی از دو مدل آنالیز دو بعدی و سه بعدی استفاده می‌شود. مدل دو

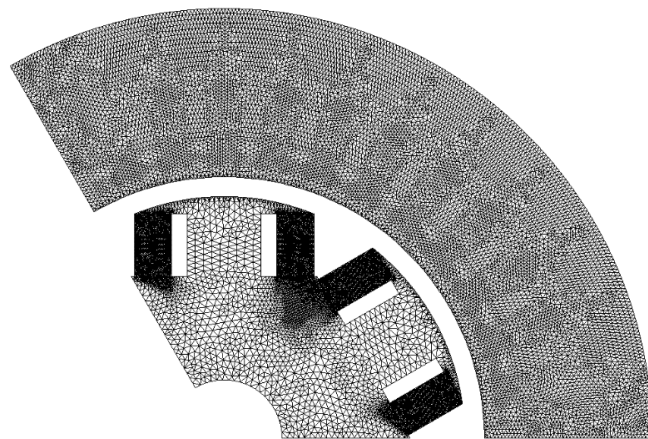
^۱ Finite Element Methode

بعدی زمانی استفاده می شود که طرح مربوطه ساده بوده و اجرای آنالیز را توسط کامپیوترهای عادی ممکن می کند. اگر فیزیک مساله ساده باشد مدل دو بعدی پاسخ دقیقی را ارائه می کند. برای بسیاری از موتورهای استوانه‌ای معمول، نشت شارهای انتهایی کم و تحلیل‌های دو بعدی توزیع میدان مغناطیسی نتایج نسبتاً دقیق ارائه می دهد. اجرای مدل سه بعدی علی‌رغم دارا بودن پاسخ‌های دقیق‌تر، اما نیاز به وقت و بار محاسباتی پیچیده‌تری دارد.

تحلیل اجزای محدود رفتار کل مجموعه را با آنالیز و حل تعدادی از مسایل ریزتر و ساده‌تر شده پیش‌بینی می کند. هر المان در آنالیز اجزای محدود یکی از این مسایل ساده شده است. هر المان در مدل اجزای محدود از تعداد مشخصی گره تشکیل شده است که هم مرز هر المان را مشخص می کند و هم اعمال شرایط مرزی را ممکن خواهد کرد. گره‌ها مش را ایجاد می کنند. هر چه مش ریزتری تشکیل شود در واقع تعداد المان‌ها بیشتر شده و دقت حل مساله بالاتر خواهد رفت. البته دقت به این امر مهم است که با بیشتر شدن المان‌ها و ریزتر شدن مش، حل مساله نیز پیچیده‌تر می گردد. شکل ۳-۳ تقسیمات المان‌ها (مش‌بندی) در ماشین مورد مطالعه را نشان می دهد. شکل ۳-۳-الف مش‌بندی دو قطب از شماتیک ماشین را نشان داده و شکل ۳-۳-ب مش‌های فاصله هوایی را در یک بخش از سیستم نمایش داده است. ملاحظه می شود در نقاطی که نیاز به دقت بیشتر بوده، تراکم المان‌ها بیشتر و مش‌بندی ریزتر است.



(ب)



(الف)

شکل ۳-۳: نمایش مش بندی دو قطب از ماشین در دو بعدی

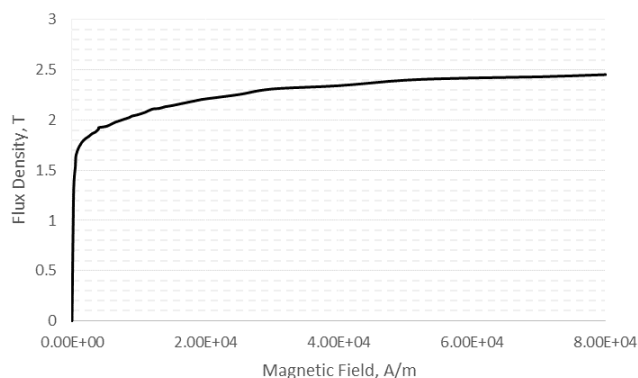
با در نظر گرفتن شرایط مرزی تکرار شونده برای بخش های مختلف ماشین، به دلیل وجود تعداد قطب های زیاد، تقارنی در مدل الکترومغناطیسی حاصل می شود که از حجم محاسبات تحلیل اجزاء محدود می کاهد.

۳-۳-۲- معرفی آهن ماشین

به منظور مدل سازی المان محدود موتور، جنس ماده تشکیل دهنده هر بخش موتور به نرم افزار معرفی می شود. در ماشین های الکتریکی از ماده هایی با نام گذاری های استاندارد که نشان دهنده ویژگی های آن است استفاده می شود. ماده ابررسانا جهت شبیه سازی سیم پیچی میدان در موتور در کتابخانه مرتبط با مواد نرم افزارهای موجود، مدل نشده است. به این منظور در شبیه سازی ها از یک هادی موجود در کتابخانه نرم افزار با هدف ایجاد آمپر دور مورد نیاز استفاده شده است. این کار تحلیل الکترومغناطیسی را بدون نقص می تواند مدل کند اما در تحلیل های حرارتی ممکن است نتواند به درستی پاسخگو باشد. پس از معرفی جنس تمامی قسمت های ماشین به نرم افزار، ارتباط مداری اجزاء موتور تعریف می گردد. بخش های غیرمغناطیسی در تحلیل مغناطیسی نقشی نظیر هوا دارند.

ماده فرومغناطیس استاتور و دندانه های آن و همچنین هسته مغناطیسی روتور از ورقه های

فولادی با منحنی مغناطیسی^۱ که در شکل ۳-۴ آورده شده، در نظر گرفته شده اند.



^۱ B-H Curve

شکل ۳-۴: منحنی مغناطیسی آهن به کار رفته در موتور

همان طور که در این شکل مشاهده می شود شدت میدان مغناطیسی در چگالی شار کمتر از $2/3$ تسلا بیشتر از 2200 آمپر بر متر است. با استفاده از این ماده در یوغ مغناطیسی استاتور و هسته روتور مغناطیسی شبیه سازی اجزای محدود انجام گرفته است.

با فرض مقدار معلومی برای تراوایی مغناطیسی یوغ و نفوذپذیری مغناطیسی آهن روتور و استفاده از این مقادیر به همراه سایر پارامترهای مسأله می توان چگالی شار در مناطق مختلف ماشین را محاسبه کرد.

۳-۳-۳ - ولتاژ القایی در استاتور

ولتاژ القایی یا همان ولتاژ پستی^۱ موتور باید در شروع اجزای شبیه سازی ماشین مد نظر قرار گیرد. چنانچه سیم پیچ های استاتور اتصال باز باشند، در صورتی که روتور با جریان نامی تحریک و در سرعت سنکرون بچرخد میدان دوار حاصله در سیم پیچ های چند فاز استاتور طبق قانون فاراده ولتاژی القا می کند. ولتاژ القا شده در سیم پیچ های استاتور ناشی از میدان تحریک را ولتاژ پستی می نامند. اندازه ولتاژ القایی در استاتور به عنوان یک پارامتر مهم در جهت ارزیابی طراحی و مدل سازی ملاک قرار می گیرد که در این کار نیز به آن توجه شده است. ولتاژ القایی به دست آمده در حالت بی باری، مطابق شکل ۳-۵، از نظر دامنه نزدیک به ولتاژ ترمینال ماشینی که برای کار در آن ولتاژ طراحی شده، می باشد. این ولتاژ برای ماشین معرفی شده پس از شبیه سازی در نرم افزار اجزاء محدود بدست آمده و نتایج حدود 392 ولت مؤثر را در هر فاز استاتور ماشین نشان می دهد که رابطه $(3-7)$ این عدد را برای ولتاژ پستی تأیید می کند.

^۱ Back EMF

معادله بالا در نرم افزار مطابق شکل ۳-۶ تعریف شده است. بنابراین با در نظر گرفتن بار به صورت اصطکاکی، ضریب K و مقدار گشتاور ثابت بار برابر با صفر در نظر گرفته می شود. پارامترهای B و J را برای حالت های مختلف منظور کرده و بعد از اجرای ماشین مدل شده در نرم افزار، خطا در لحظه t=0.5 ثانیه به موتور اعمال می شود. در شکل ۳-۶ ضرایب برای بار کامل آورده شده است.

JMAG-Designer: Define Equation of Motion

$$T = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} + K (\theta - \theta_0) + \tau$$

Torque, $T = kT_1 + T_2$

Torque Condition, T_1 : untitled

Torque Multiplier, k : 1

Load Torque, T_2 :

Constant: 0 Nm

Table: vs Time

Periodic

Inertia Moment, $J = \rho J_1 + J_2$

Inertia, J_1 : 9.15211 kgm²

Calculate During Analysis

Inertia Coefficient, ρ : 1

Correction Value, J_2 : 0 kgm²

Attenuation Constant, B

Constant: 4 Nm/(deg/s)

Table: <new>

Spring Constant, K

Constant: 0 Nm/deg

Table: <new>

Initial State

Displacement, θ_0 : 0 deg

Angular Velocity, ω_0 : 201.345908562 r/min

Range of Movements

Upper Limit, θ_{max} : 1000000000 deg

Lower Limit, θ_{min} : -1000000000 deg

Friction Torque, $\tau = \mu r F_c$

$\mu = \mu_d$ or μ_s

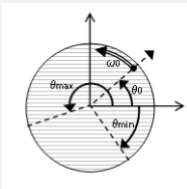
Coefficient of Static Friction, μ_s : 0

Coefficient of Dynamic Friction, μ_d : 0

Radius to Point of Face, r : 1000 mm

Normal Force, F_c : 0 N

Help... OK Cancel



شکل ۳-۶: پارامترهای معادله حرکت برای بار کامل در نرم افزار اجزای محدود

طراحی بهینه پوسته میرا کننده برای یک ماشین سنکرون ابررسانا

فصل چهارم

طراحی بهینه پوسته میراکننده

۴-۱- مقدمه

در موتورهای الکتریکی و نیز موتور سنکرون از طریق هسته آهنی و بسته شدن مدار مغناطیسی، چگالی شار الکتریکی تولید شده به وسیله سیم‌پیچی‌های مسی استاتور و روتور تقویت گردیده و گشتاور مورد نیاز برای چرخش ماشین ایجاد می‌شود. بنابراین گشتاور منتجه در موتور، حاصل برآیند بردار میدان‌های مغناطیسی آرمیچر و روتور است. اگر در طراحی و ساخت ماشین، سیم‌پیچی‌های مسی با سیم‌های ابررسانا تعویض شود و با توجه به این نکته که سیم‌های HTS توانایی عبور دادن جریان‌هایی با چگالی بسیار زیاد و حدود ده‌ها برابر سیم مسی را دارند، شرایط تولید میدان‌های مغناطیسی بسیار قوی فراهم می‌آید. از طرفی، با توجه به ثابت بودن جریان روتور در ماشین‌های سنکرون ابررسانا، نیاز است که ولتاژ القایی در روتور ثابت باشد.

در این شرایط هارمونیک‌های میدان فاصله هوایی در روتور مشکل‌ساز می‌شوند و در نتیجه ولتاژ القا شده در سیم‌پیچ تحریک نمی‌تواند ثابت بماند. از اینرو معمولاً در ساختار ماشین HTS یک لایه دمپر بین روتور و استاتور قرار می‌گیرد که از نفوذ هارمونیک‌های استاتور به داخل هسته روتور جلوگیری می‌کند.

طراحی الکترومغناطیسی ماشین الکتریکی به معنای مشخص کردن تمامی پارامترهای هندسی، الکتریکی و مغناطیسی قسمت‌های مختلف موتور به شیوه‌ای است که موتور امکان برآورده کردن مشخصات مورد نیازی که برایش تعریف می‌گردد را داشته باشد. البته باید در نظر گرفت که با توجه به این که ساختار در موتور ابررسانا با ساختار در موتورهای کلاسیک متفاوت است، چگونگی شکل‌گیری روند طراحی نیز متفاوت خواهد بود. به هر ترتیب آنچه که غالباً شکل گرفته چنین بوده که برای طراحی قسمتی از ماشین، با مطالعه ماشین‌های متعدد، انتخاب پارامترهای کلی طراحی صورت می‌پذیرد که با در نظر گرفتن این موضوع که معمولاً ماشین‌های مختلفی می‌توانند تمام شرایط را تأمین کنند، پارامترهای مهم مورد نیاز ماشین برای اختیار کردن انتظار و هدف این پایان‌نامه

همان طور که در فصل قبل گفته شد، از طراحی ماشین سنکرون ابررسانا در [۴۱] انتخاب شده است که در نهایت بتوان به منظور کاربرد مورد نظر ماشین از میان تمام طراحی‌های مقذور، طراحی بهینه پوسته میراکننده برای موتور ابررسانای سنکرون را انجام داد.

مشخصه مهم که در ساختارهای مختلف ماشین‌های ابررسانا در مقایسه با ماشین‌های کلاسیک قابل توجه است، فاصله هوایی زیاد در این گونه ماشین‌هاست. لذا در این سری از ماشین‌ها برخلاف ماشین‌های معمول امکان تعیین مسیر به عنوان راستایی مشخص برای خطوط شار مغناطیسی وجود ندارد و در واقع آنچه که سبب خطای زیاد و بعضاً غیر قابل قبول حاصله از روش‌های مرسوم به کار گرفته شده در ماشین‌های کلاسیک برای محاسبه شار فاصله هوایی و اندوکتانس‌های ماشین شده، بزرگ بودن فاصله هوایی در ماشین‌های ابررسانا می‌باشد. بنابراین متفاوت بودن تحلیل مغناطیسی با استفاده از روش‌های گوناگون جهت تحلیل ماشین‌های ابررسانا امری بوده که به بررسی بیشتر نیاز داشته که در این راستا در این فصل از پایان‌نامه اعتبارسنجی نتایج بررسی‌های مغناطیسی ماشین مذکور از طریق نرم‌افزار اجزاء محدود با دقت خوبی یافتن طرحی برای پوسته میراساز در ساختار ماشین‌های ابررسانا را به چالش کشیده است.

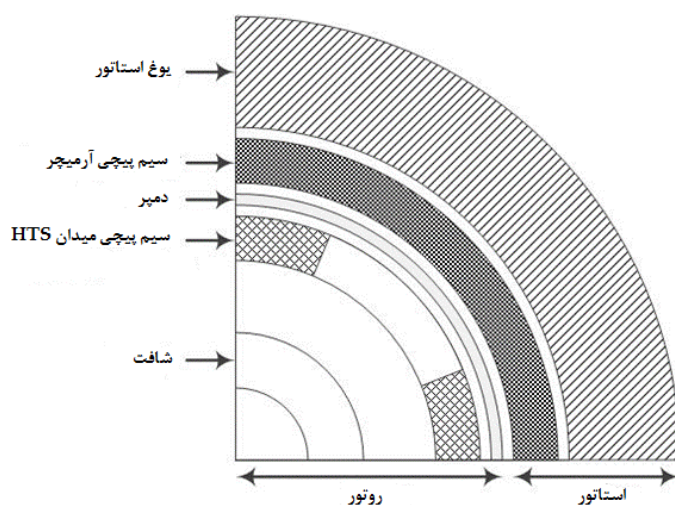
۴-۲- ساختار و موقعیت دمپر در ماشین سنکرون ابررسانا

از آنجایی که اندوکتانس ماشین به تعداد دور سیم‌پیچ و رلوکتانس مغناطیسی مسیر خطوط شار بستگی دارد، استفاده از سیم ابررسانا در سیم‌پیچ میدان موتور سنکرون امکان افزایش فاصله هوایی و در نتیجه افزایش رلوکتانس را خواهد داشت [۴۴]. تعداد دور سیم‌پیچ تحریک در ماشین ابررسانا را شاید به طور کلی نتوان با تعداد دور میدان در ماشین‌های کلاسیک مقایسه کرد و با توجه به ساختار منبع تغذیه روتور و بنا به طراحی مقدار جریان نامی برای تحریک موتور می‌توان تعداد دور سیم‌پیچ

میدان را بدست آورد. اما همان طور که گفته شد چگالی جریان در سیم‌پیچ ابررسانا و میدان ماشین سنکرون ابررسانا بسیار بالاتر از ماشین‌های معمولی است. با در نظر گرفتن این که راکتانس سنکرون یکی از مهمترین پارامترهای ماشین سنکرون است و تأثیر بسزایی بر رفتار حالت دائمی و نیز گذرای ماشین دارد، تعیین فاصله هوایی مهم بوده و با توجه به راکتانس سنکرون، فاصله هوایی قابل محاسبه است. در ماشین‌های الکتریکی مقدار راکتانس مغناطیسی، تقریباً با فاصله هوایی نسبت عکس دارد زیرا راکتانس سنکرون ماشین سنکرون، تابع رلوکتانس مغناطیسی مسیر عبور شار است [۴۵].

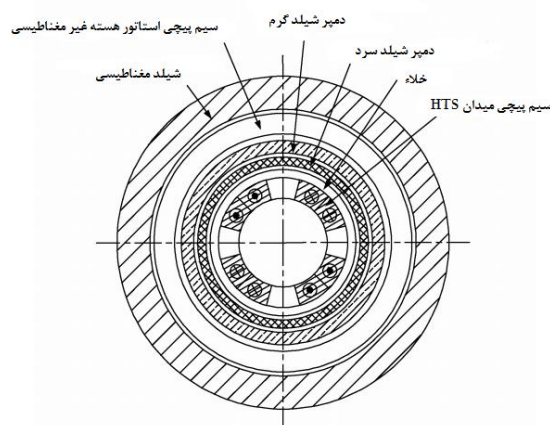
مشخص کردن اندازه فاصله هوایی در مراجع مختلف روش‌های تشخیص متفاوتی داشته که در اغلب آن‌ها برخی از محدودیت‌های عملی، معیار تعیین پایین‌ترین حد برای این اندازه قرار گرفته است که باید رعایت شود. فاصله هوایی برای ممانعت از به وجود آمدن مشکلات مکانیکی و برخورد روتور و استاتور باید از کوچکترین مقداری که خود وابسته به توان نامی ماشین و تعداد قطب‌های آن است بیشتر باشد. از طرف دیگر چنانچه اندازه فاصله هوایی زیاد باشد طراحی سیم‌پیچ میدان با محدودیت‌های الکتریکی، حرارتی و مکانیکی روبرو می‌شود زیرا بارگذاری مغناطیسی ایجاد شده توسط سیم‌پیچی‌های روتور تحت تأثیر میزان افزایش فاصله هوایی باید بیشتر شود که آنچنان محدودیت‌هایی را ایجاد خواهد کرد..

با توجه به موقعیت دمپر در ماشین سنکرون ابررسانا که پوسته‌ای استوانه‌ای شکل در اطراف روتور می‌باشد و در شکل ۴-۱ نشان داده شده است، به منظور در نظر گرفتن حداقل اندازه فاصله هوایی رابطه‌های بسیاری در مراجع موجود بررسی شده است تا بدون ایجاد خلل در کارکرد موتور لایه دمپر در فضای بین روتور و استاتور ماشین سنکرون ابررسانا طراحی و گنجانده شود.



شکل ۴-۱: پیکربندی اجزاء ماشین ابررسانا

کل فاصله بین روتور و استاتور در ماشین طراحی شده برابر ۱۷ میلی‌متر داده شده است. این فاصله شامل محفظه خلا، دمپر مغناطیسی، فواصل بین بخش‌ها و فاصله هوایی است. برای انجام تنظیمات مورد نیاز طراحی ساختار و موقعیت شیلد میراکننده سعی شده است با توجه به شکل ۴-۲ که چگونگی قرارگیری عایق حرارتی و لایه دمپر ماشین سنکرون ابررسانا را نسبت به روتور و استاتور نمایش می‌دهد، با لحاظ کردن دقت در میزان فاصله‌های لایه‌های مربوطه و بررسی موقعیت لایه‌ها در محفظه سرد و یا در دمای کار موتور، تأثیر تغییر اندازه‌های مختلف از پهنای پوسته میراکننده در عملکرد حالت دائمی و گذرای ماشین مشاهده و روند طراحی بهینه برای طراحی شیلد الکترومغناطیسی تحقق یابد.



شکل ۴-۲: موقعیت دمپر در محفظه سرد و گرم

در بعضی منابع حداقل فاصله هوایی ماشین سنکرون معمولی بر اساس توان ماشین با استفاده از

یک رابطه تجربی تعیین شده است. P در رابطه (۱-۴) توان ماشین بر حسب وات می باشد [۴۶].

$$ag = 0.2 + 0.006 \times P^{0.4} \quad (1-4)$$

بنابراین مقدار ۰/۸ میلی متر برای توان ۱۰۰ کیلووات در این ماشین به دست می آید:

$$ag = 0.2 + 0.006 \times P^{0.4} = 0.8 \quad mm \quad (2-4)$$

از طرفی تخمین دیگر حداقل اندازه فاصله هوایی مکانیکی که در بین روابط تجربی موجود در

مراجع طراحی ماشین برای ماشین های استوانه ای موجود می باشد، از رابطه زیر مقدار حداقل ۱

میلی متر را به فاصله هوایی ماشین اختصاص می دهد [۴۷].

$$ag = 5 \times 10^{-3} \sqrt{\frac{\pi \cdot D_{ir}^2}{2p}} = 5 \times 10^{-3} \sqrt{\frac{\pi \cdot (100)^2}{2(6)}} \approx 1 \quad mm \quad (3-4)$$

در رابطه بالا D_{ir} قطر داخلی روتور می باشد که ۱۰۰ میلی متر بوده و p تعداد قطب های ماشین

است. بنا بر آنچه که پیشتر گفته شد، فاصله هوایی ماشین ابررسانا نسبت به ماشین های معمولی

بزرگتر طراحی می شود. بنابراین در شبیه سازی های انجام گرفته ۲ میلی متر فاصله هوایی برای ماشین

لحاظ شده است.

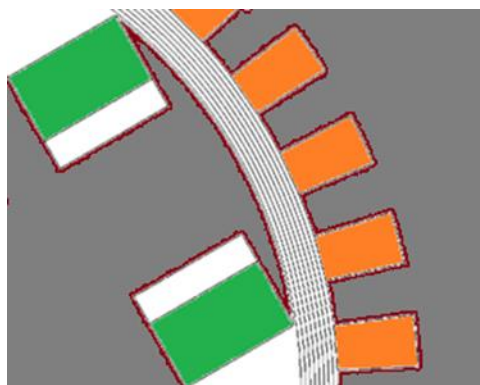
با توجه به ماشین های مشابه، با در نظر گرفتن ۱ میلی متر جهت فاصله مورد نیاز بین کفشک

قطب روتور و لایه دمپر، ۸ لایه ۲ میلی متری در ۱۷ میلی متر فضای بین روتور و استاتور در ماشین

ابررسانا به منظور بررسی ضخامت های مختلف لایه دمپر مدل سازی شده است. از طرفی ضخامت لایه

محفظه خلا تابع قواعد مشخصی نمی باشد. لذا بر اساس قواعد تجربی در اجرای شبیه سازی ها حداقل

۴ میلی متر به عایق حرارتی اختصاص داده می شود. طراحی این لایه ها به صورت شکل ۳-۴ می باشد.



شکل ۴-۳: توپولوژی تقسیم‌بندی لایه‌های دمپر در فضای بین روتور و استاتور

بنابراین رسانایی ویژه ماده سازنده پوسته میراکننده که در اینجا مس فرض شده است، چنانچه در محفظه سرد ماشین قرار گیرد و یا در دمای کاری موتور و نزدیک به استاتور واقع شود، دستخوش تغییرات قابل توجهی نسبت به حالت نرمال خواهد شد. زیرا دما در محفظه سرد به میزان قابل توجهی از دمای معمولی کمتر و در فضای کاری موتور نیز به دلیل وجود تلفات و گرما دما قدری بالاتر از دمای معمول است که در این حالت با توجه به کلاس عایقی موتور دمای کار موتور تخمین زده می‌شود.

رابطه زیر مقاومت در هر دما را می‌دهد که r_0 مقاومت در دمای 20°C می‌باشد:

$$r_T = r_0(1 + \alpha\Delta T) \quad (4-4)$$

α تغییر نسبی مقاومت ویژه هادی (dp/ρ) به‌ی‌زای یک درجه تغییر دماست. کمیت α با دما تغییر می‌کند، $\alpha = 1/\rho * dp/dT$ مقدار داده شده برای مس در دمای 20°C برابر است با: $\alpha = 3.9 * 10^{-3}/\text{C}$ که یعنی با افزایش هر درجه سلسیوس از دما در حوالی دمای 20°C مقاومت ویژه به اندازه 0.39% درصد افزایش می‌یابد.

بنابراین با کاهش دما هدایت ویژه مس افزایش می‌یابد. رسانایی ویژه در دماهای مختلف با ضریب حرارتی (K_T) تغییر می‌کند.

$$K_T = \frac{234 + t_0}{234 + t} \quad (5-4)$$

t_0 همان دمای پایه 20°C و t دما در شرایط عملکردی است که می‌بایست میزان تغییر را در آن دما با این ضریب پیدا کرد.

دمای کار روتور که همان دمای خنک کننده در طراحی ماشین است 77°C درجه کلونین داده شده است. پس هدایت ویژه مس را برای زمانی که در محفظه سرد قرار می‌گیرد به صورت $(4-6)$ می‌توان به دست آورد:

$$\sigma_{77^\circ\text{C}} = \sigma_{20^\circ\text{C}} \frac{20 + 234}{(77 - 273) + 234} = \sigma_{20^\circ\text{C}} \times 6.6842 = 399.73 \times 10^6 \quad (6-4)$$

یعنی رسانایی مس در زمانی که دمایش تا 77°C درجه کلونین پایین بیاید، حدود $6/7$ برابر می‌شود. با توجه به مقادیر تجربی در ماشین‌های مشابه با رنج توان این موتور، کلاس عایقی برای ماشین مورد نظر را F لحاظ کرده که حداکثر دمای قابل تحمل در این محدوده 135°C درجه سانتیگراد می‌باشد. دمای عملکرد موتور در این کلاس عایقی نسبت به دمای 20°C که دمای پایه بود 79°C درجه سانتیگراد در نظر گرفته می‌شود که هدایت مس برای این دما نیز محاسبه می‌شود:

$$\sigma_{79^\circ\text{C}} = \sigma_{20^\circ\text{C}} \frac{20 + 234}{79 + 234} = \sigma_{20^\circ\text{C}} \times 0.8115 = 46.95 \times 10^6 \quad (7-4)$$

طبق رابطه $(7-4)$ رسانایی مس در محیط گرم بیرون روتور، تقریباً 20% درصد کاهش می‌یابد.

در مدل‌سازی‌ها بر اساس ضخامت‌های متفاوت لایه دمپر در ساختار ماشین، نتایج متفاوت و قابل بحث در حالت‌های مختلف بار گرفته شده است که با تغییر دادن موقعیت پوشش استوانه‌ای در موتور سنکرون ابررسانا، با توجه به تغییر نسبی مقاومت ویژه به‌یزای تغییر دما و بموجب آن تغییر هدایت ویژه هادی این نتایج دیده شده است. از این رو مشخصه‌های عملکرد در وضعیت ماندگار برای تمامی

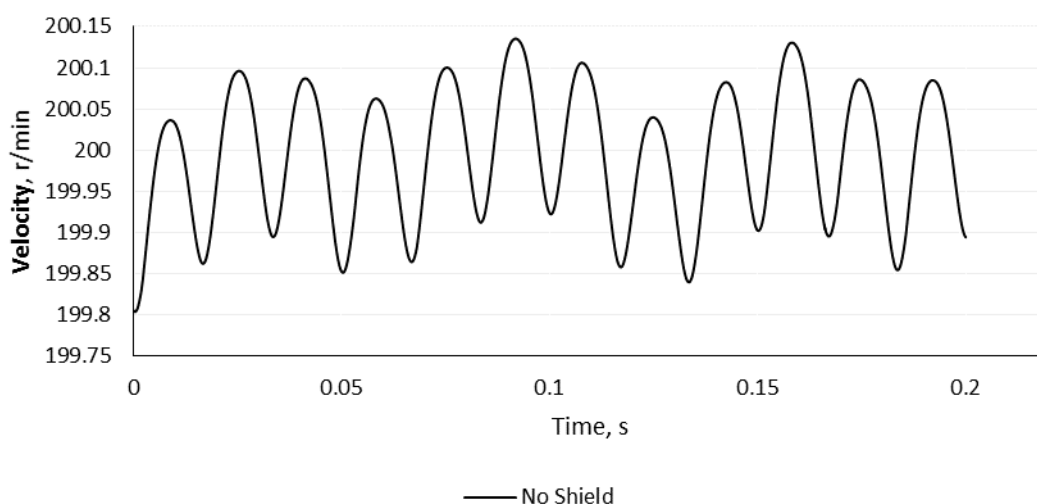
این حالت‌ها به تفضیل آورده شده است که رفتار شیلد الکترومغناطیسی در عملکرد دینامیکی گذرای ماشین با دقت بیشتری بررسی گردد.

۳-۴- بررسی عملکرد حالت دائمی

در این بخش تأثیر تغییر ضخامت لایه دمپر بر مشخصه‌های عملکرد ماشین ابررسانا در حالت دائمی بررسی می‌شود. این موضوع با مشاهده شکل موج‌های جریان سه‌فاز استاتور و جریان تحریک و سرعت پس از سپری شدن حالت‌های گذرای ماشین بررسی می‌شود. ضخامت لایه دمپر برای سه حالت ۴، ۸ و ۱۰ میلی‌متر در مدل اجزای محدود ماشین در هر مشخصه تغییر کرده و تأثیر آن بر مشخصه‌های مذکور تعیین می‌شود. مشخصه‌های دیگر ماشین همچون گشتاور و ولتاژ تحریک به منظور پرهیز از تکرار و به دلیل داشتن رابطه مستقیم با سرعت و جریان تحریک در بخش حالت دائمی آورده نشده‌اند.

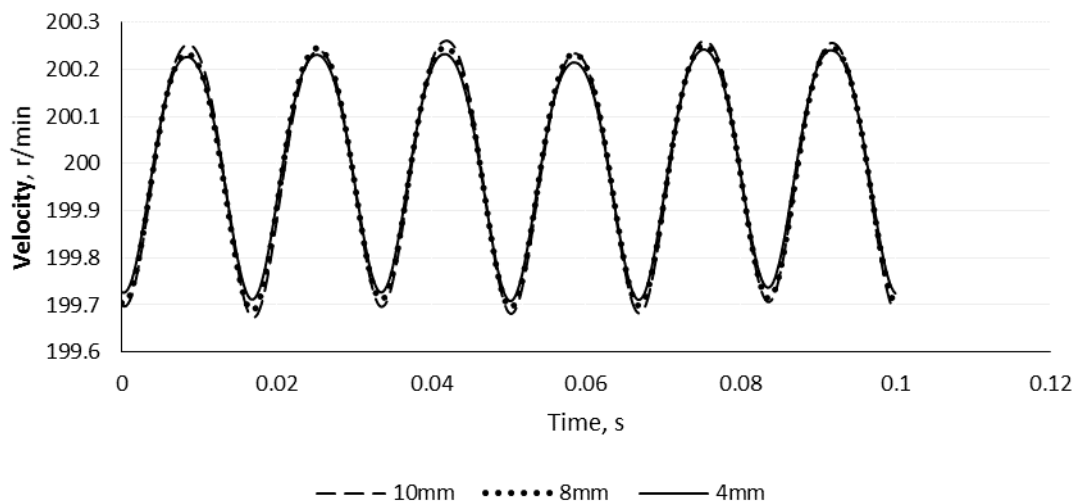
۳-۴-۱- تأثیر ضخامت لایه دمپر بر مشخصه‌های حالت دائمی بی‌باری

ابتدا ضخامت این لایه صفر فرض شده و عملکرد ماشین ابررسانا در حالتی که فاقد دمپر باشد، بررسی می‌شود. شکل ۴-۴ نوسانات سرعت ماشین در حالت بی‌باری را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۴: شکل موج نوسانات سرعت ماشین بدون دمپر در حالت بی‌باری

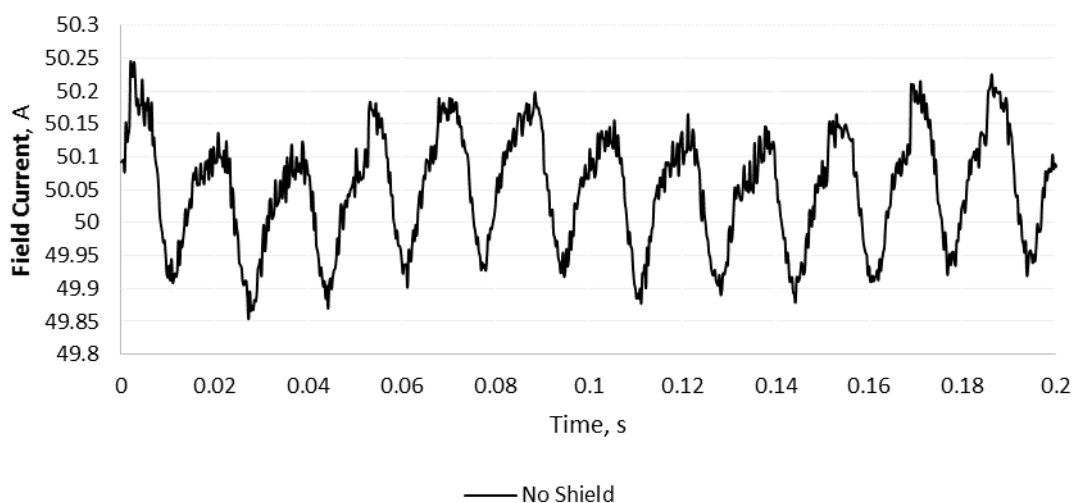
شکل ۴-۴ نشان می‌دهد سرعت سنکرون ماشین، همانطور که انتظار می‌رفت، در حدود 200^{rpm} است. همچنین با توجه به این شکل، در حالتی که ماشین ابررسانا فاقد دمپر باشد، نوسانات سرعت چندان زیاد نیست ولی دارای مولفه‌های نوسانی مختلف است. افزودن یک لایه دمپر با ضخامت ۴ میلی‌متر به این ماشین باعث تغییراتی در مولفه‌های نوسانی سرعت ماشین در حالت دائمی و شرایط بی‌باری خواهد شد. این مساله در یک پریود از نوسانات در شکل ۴-۵ نشان داده شده است.



شکل ۴-۵: شکل موج نوسانات سرعت ماشین با دمپره‌های مختلف در حالت بی‌باری

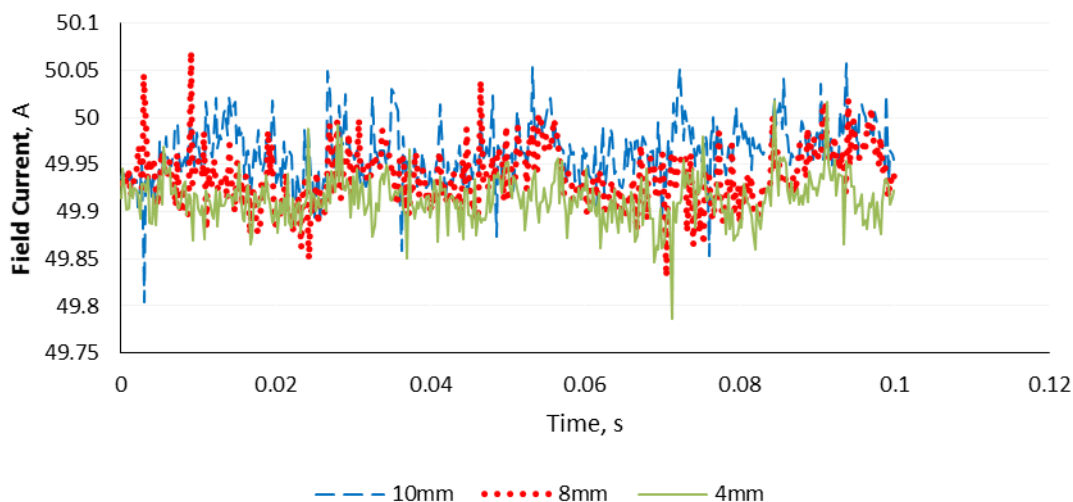
شکل ۴-۵ چگونگی نوسانات سرعت ماشین در شرایطی که ضخامت لایه دمپر بین ۴ تا ۱۰ میلی‌متر در فضای سرد تغییر می‌کند را نشان می‌دهد که دامنه نوسانات سرعت، تغییر قابل توجهی نکرده است.

مشخصه جریان تحریک در روتور ماشین سنکرون ابررسانا برای زمانی که لایه دمپر در شبیه‌سازی‌ها لحاظ نشده، در شکل ۴-۶ نشان داده شده است.



شکل ۴-۶: شکل موج نوسانات جریان تحریک روتور بدون دمپر در بی‌باری

همانطور که از نمودار پیداست تغییرات جریان روتور را با نوسانات و ریپل بسیار پایینی حول مقدار ثابت ۵۰ آمپر می‌توان مشاهده کرد. یک پریود زمانی از چگونگی تغییرات جریان میدان تحریک در شرایط عملکرد دائمی و بدون بار موتور سنکرون ابررسانا با در نظر گرفتن اندازه‌های مختلف برای ضخامت میراکننده در محفظه سرد روتور در شبیه‌سازی به صورت شکل ۴-۷ نتیجه شده است.

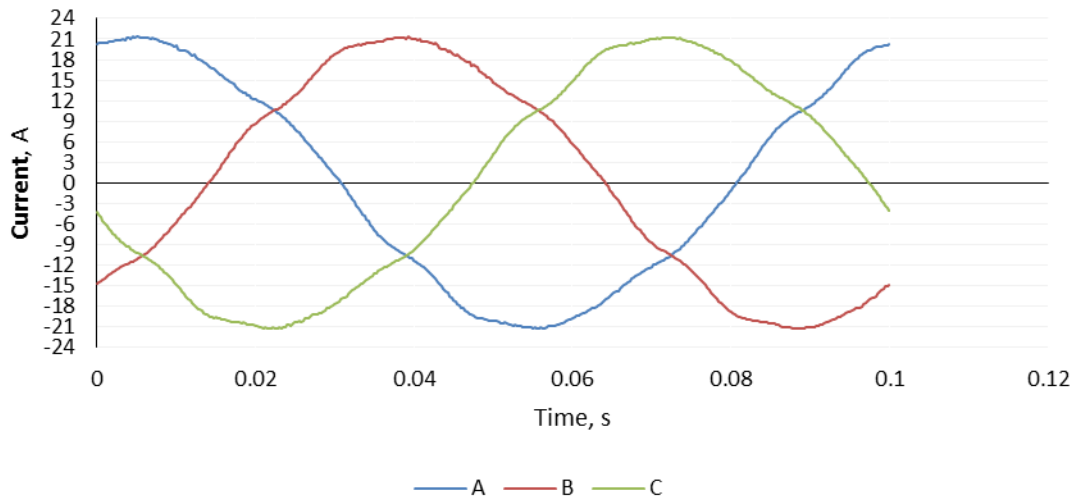


شکل ۴-۷: شکل موج نوسانات جریان تحریک روتور با دمپرهای مختلف در بی‌باری

مشاهده می‌شود که میزان نوسانات در شکل موج جریان میدان با حضور لایه دمپر تفاوت قابل

ملاحظه‌ای نسبت به عدم حضور آن ندارد.

شکل موج جریان‌های سه فاز ماشین سنکرون ابررسانا در شکل ۴-۸ نمایش داده شده است.



شکل ۴-۸: شکل موج جریان‌های سه فاز استاتور بدون دمپر در بی‌باری

ملاحظه می‌شود که با وجود هارمونیکی بودن شکل موج‌ها، مقدار پیک جریان در هر فاز کمتر از

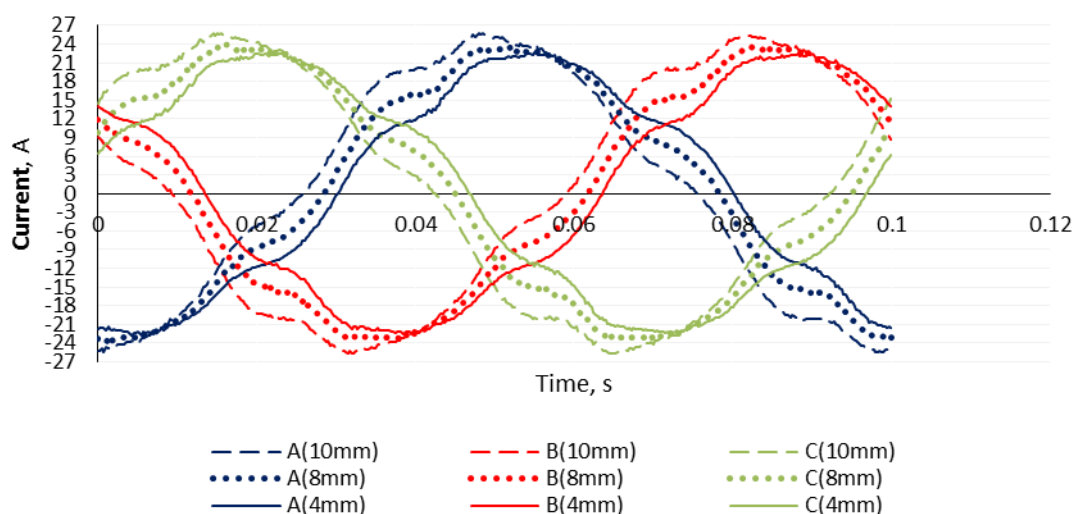
۲۵ آمپر است که در شرایط بی‌باری، تلفات مکانیکی موتور را نشان می‌دهد. در اینجا جریان استاتور به

دلیل تلفات مکانیکی مانند اصطکاک یا تاقان صفر نیست. برای مطالعه چگونگی تغییرات جریان‌های

استاتور در ماشین سنکرون ابررسانا با وجود لایه دمپر، ضخامت‌های مختلف میراکننده مسی را در

محفظه سرد موتور مدل کرده که نتایج حالت ماندگار ماشین در شرایط بدون بار در شکل ۴-۹ آورده

شده است.



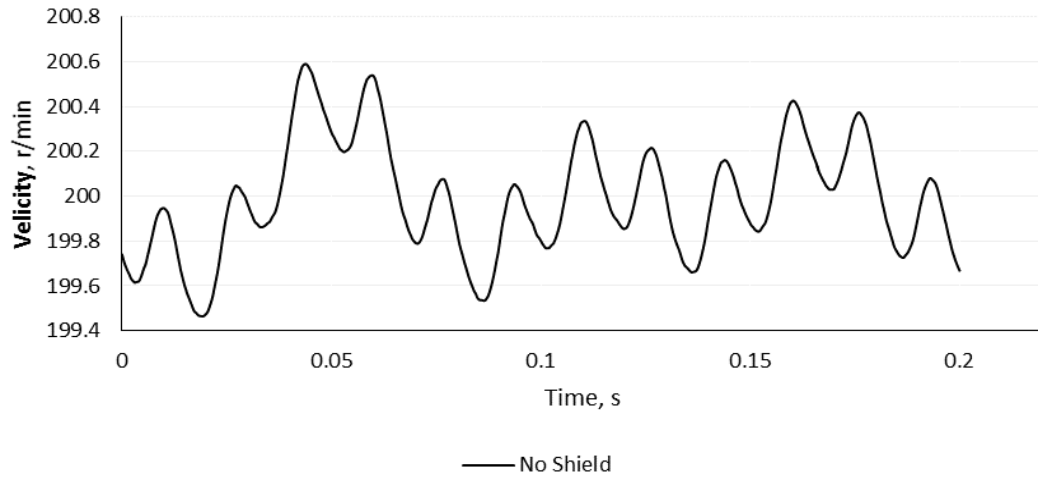
شکل ۴-۹: شکل موج جریان‌های سه فاز استاتور با دمپره‌های مختلف در بی‌باری

با دقت در گراف‌های جریان سه فاز به دست آمده از شبیه‌سازی با دمپره‌های مختلف، می‌توان مشاهده کرد که هارمونیک اول این جریان‌ها جابجا شده و شیفت پیدا کرده‌اند. نمودار جریان استاتور $\cos\phi$ ماشین را نشان می‌دهد. عبارتی می‌توان تأثیر ضخامت‌های متفاوت دمپر را در تغییر $\cos\phi$ ، هر چند خیلی جزئی و ناچیز دید. دمپر اندوکتانسی را در ماشین ایجاد می‌کند بنابراین بر روی $\cos\phi$ آن تغییر ایجاد خواهد کرد. در نمودار جریان‌های سه فاز ماشین در حالت بی‌باری که جریان خیلی کمی از استاتور می‌گذرد، اندوکتانسی که از روتور دیده می‌شود، بر روی ضریب توان ماشین تأثیر ناچیزی خواهد گذاشت که چون میزان دامنه جریان در این حالت کم است این اثر دیده شده است. لذا پر واضح است که دامنه‌ها خیلی تفاوتی ندارند.

۴-۳-۲- تأثیر ضخامت لایه دمپر بر مشخصه‌های حالت دائمی بار کامل

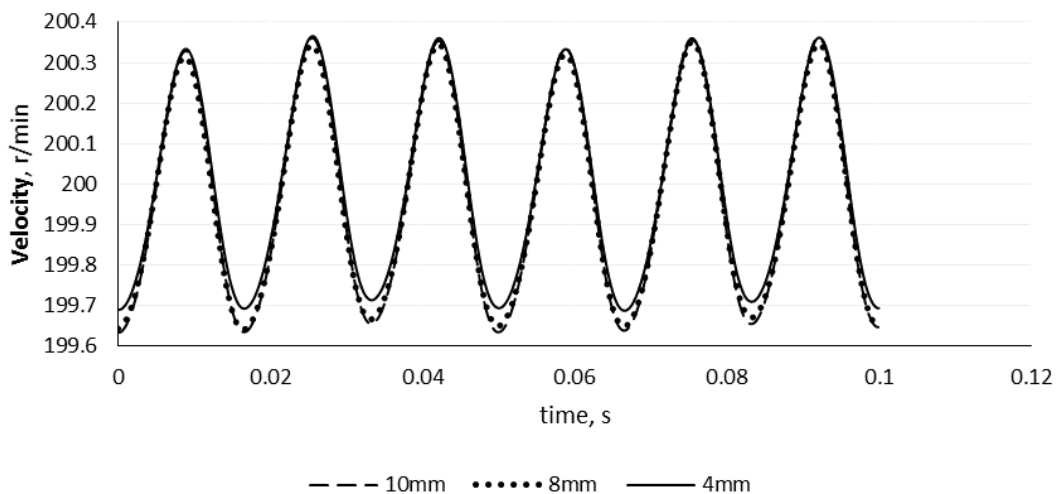
همانطور که رفتار ماشین در شرایط بدون بار نشان داده شد، در بار کامل نیز بررسی‌ها در شرایط عملکرد دائمی برای مشخصه‌های گوناگون انجام گرفته و نتایج این بررسی‌ها در شکل موج‌های سرعت و جریان آورده شده است که گویای تأثیرات جزئی و بسیار کم پوسته میراکننده در ماشین سنکرون

ابرسانا در حالت ماناست. شکل موج نوسانات سرعت چرخش روتور وقتی که لایه دمپر در مدل سازی وجود ندارد در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۰: شکل موج نوسانات سرعت ماشین بدون دمپر در بار کامل

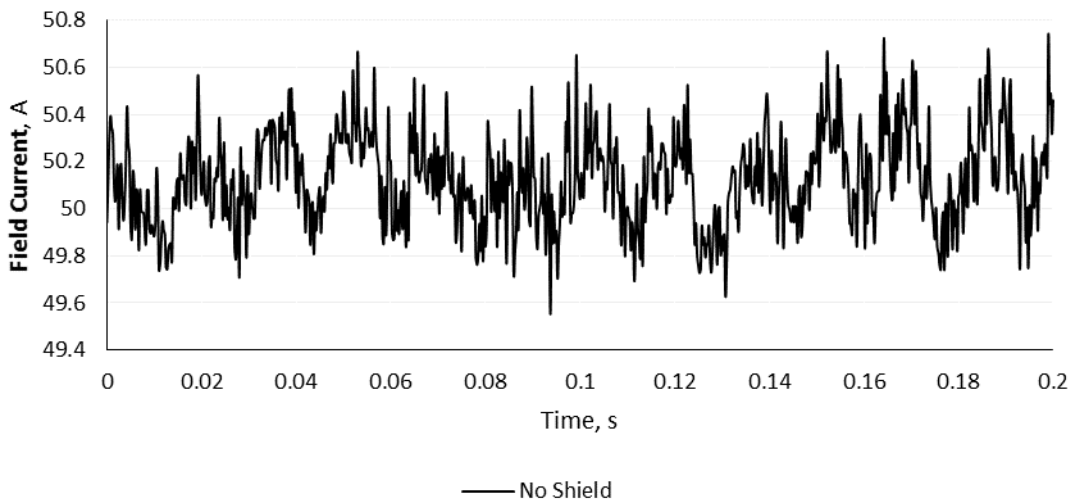
شکل ۴-۱۰ سرعت سنکرون ماشین را آشکارا بیان دارد که 200^{rpm} می باشد ولی نوسانی بودن سرعت در بار کامل وقتی ضخامت لایه دمپر صفر در نظر گرفته شده است به وضوح زیادتر از حالت بی باری است. با اضافه کردن مرحله به مرحله لایه های دمپر در بخش سرد روتور، تأثیرات پوسته میراکننده مدل شده بر نوسانات سرعت موتور سنکرون ابررسانا برای بار کامل در شکل ۴-۱۱ دیده شده است.



شکل ۴-۱۱: شکل موج نوسانات سرعت ماشین با دمپره های مختلف در بار کامل

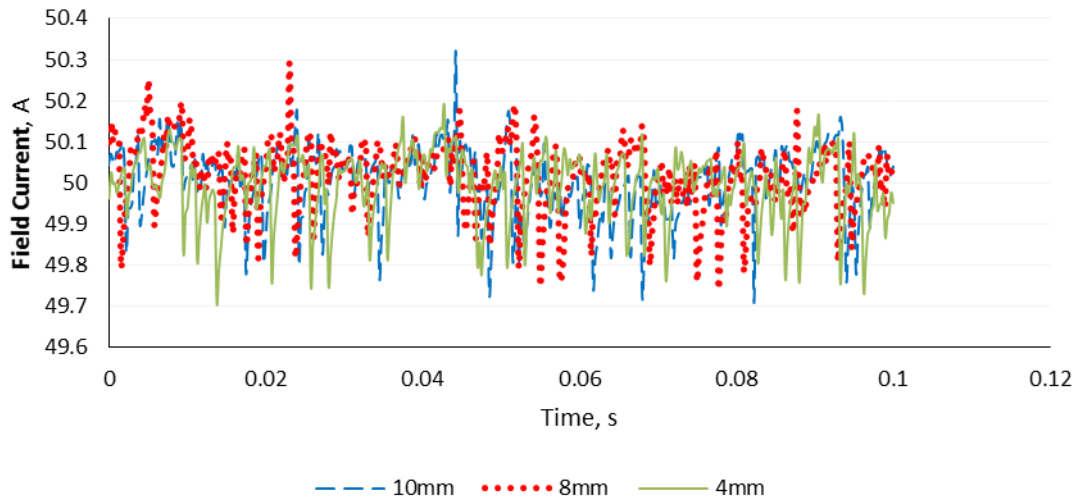
لایه دمپر بر میزان نوسانات سرعت ماشین مطابق شکل ۴-۱۱ در مقایسه با حالت بدون دمپر در بار کامل نسبت به شرایط بی‌باری تأثیر بیشتری داشته است به گونه‌ای که با نسبت درصد بیشتری مؤلفه‌های نوسانی مختلف را از شکل موج سرعت ماشین حذف کرده است.

نمودار جریان میدان در موتور سنکرون ابررسانا برای بار کامل بدون در نظر گرفتن پوسته الکترومغناطیسی میراساز در شبیه‌سازی ماشین در شکل ۴-۱۲ نشان داده شده است که مقدار ثابت ۵۰ آمپر را برای جریان تحریک روتور مشخص می‌کند.



شکل ۴-۱۲: شکل موج نوسانات جریان تحریک روتور بدون دمپر در بار کامل

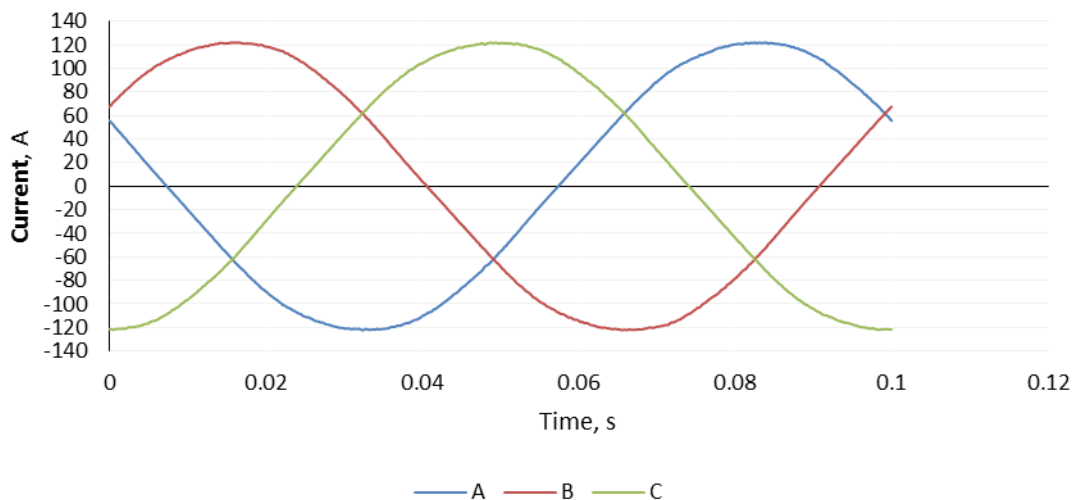
شکل موج جریان میدان برای بار کامل در مقایسه با بی‌باری و با لحاظ نکردن لایه دمپر در مدل‌سازی ماشین، اعوجاج بیشتری را نشان می‌دهد به طوری که تا حدود ۰/۶ آمپر نوسان را در جریان موتور سنکرون ابررسانای بدون دمپر در حالت ماندگار از شکل ۴-۱۲ می‌توان دریافت کرد. برای کم کردن این نوسانات، اندازه‌های مختلف دمپر توانسته نسبتاً مؤثر واقع شود و آن را تا ۰/۲ آمپر مطابق شکل ۴-۱۳ کاهش دهد.



شکل ۴-۱۳: شکل موج نوسانات جریان تحریک روتور با دمپره‌های مختلف در بار کامل

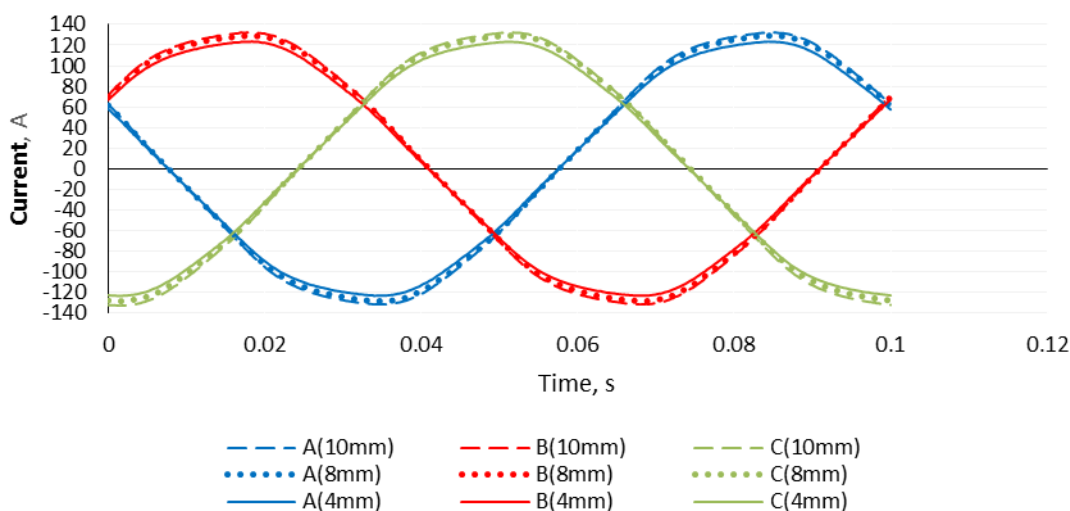
همانگونه که بیان شد شیلد الکترومغناطیسی میراکننده در بار کامل هر چند بر نوسانات مشخصه جریان روتور تأثیری جزئی داشته ولی ملاحظه می‌شود که در مقایسه با حالت بی‌بار برای همین مشخصه اثراتی قابل توجه را دارا بوده است.

به منظور تکمیل بررسی موتور سنکرون ابررسانا در شرایط مانا، گراف جریان بار کامل فازهای استاتور در مدل ماشین بدون دمپر در شکل ۴-۱۴ آورده شده است.



شکل ۴-۱۴: شکل موج جریان‌های سه فاز استاتور بدون دمپر در بار کامل

نمودار جریان موتور مطالعه شده در بار اسمی سینوسی بوده و با توجه به مقدار مؤثر جریان در بار کامل که در بخش ۳-۲-۱ برای ماشین سنکرون ابررسانای معرفی شده ۸۴ آمپر محاسبه شده بود، اندازه پیک جریان در هر فاز حدود ۱۲۰ آمپر خواهد بود که در نتیجه شبیه‌سازی نیز این مقدار کاملاً مشهود است. با توجه به ناچیز بودن تأثیر حضور لایه دمپر در شرایط عملکردی دائمی ماشین در مشخصه‌های قبل، این انتظار می‌رود که به دلیل بزرگ‌تر بودن اندازه دامنه شکل موج جریان در حالت بار کامل نسبت به حالت بی‌باری، این میزان کم تغییرات برای حالت ماندگار با وجود ضخامت‌های مختلفی از دمپر شیلد الکترومغناطیسی در شبیه‌سازی قابل رؤیت نباشد که شکل ۴-۱۵ این مطلب را تأیید می‌کند.



شکل ۴-۱۵: شکل موج جریان‌های سه فاز استاتور با دمپرهای مختلف در بار کامل

همانطور که بیان شد اثرات بسیار محدود و جزئی اندازه‌های متفاوت لایه دمپر پیداست و مقدار ۱۲۰ آمپر را در پیک جریان هر فاز استاتور می‌توان برای شرایط دائمی ماشین ملاحظه کرد. بنابراین در بار کامل نیز همانند بی‌باری تأثیر لایه میراکننده مغناطیسی در حالت مانا چشمگیر نبود. لازم به ذکر است که مشابه با بررسی‌های انجام گرفته برای موقعیت لایه دمپر در محفظه سرد ماشین، چگونگی روند مشخصه‌های موتور سنکرون ابررسانا با تغییر موقعیت پوسته میراکننده در فاصله بین روتور و استاتور و با این تفاوت که در مجاورت استاتور باشد تا شرایط دمایی متفاوتی را

برای دمپر مسی به لحاظ دمای عملکردی موتور ایجاب کند، نیز مورد بحث و مطالعه قرار گرفت که به منظور جلوگیری از روند تکراری، نتایج کاملاً یکسان و مشابه با مدل‌سازی لایه‌های مختلف دمپر در فضای سرد موتور برای شرایط حالت دائمی، آورده نشده است.

۴-۴- بررسی عملکرد حالت گذرا

با توجه به آنچه در فصل دوم در ارتباط با تأثیر میله‌های دمپر بر عملکرد ماشین سنکرون کلاسیک مطرح شد، در این بخش مشخصه‌های عملکرد ماشین سنکرون ابررسانا در بعضی از حالت‌های گذرای از قبیل بارزدائی و بارگذاری با ضخامت‌های مختلف لایه دمپر بررسی می‌شود.

بدین منظور ضخامت لایه دمپر در مدل اجزای محدود ماشین بین صفر تا ۱۰ میلی‌متر تغییر کرده و در هر حالت مشخصه‌های مهم عملکرد ماشین از قبیل سرعت، گشتاور، ولتاژ القایی در سیم‌پیچ تحریک، چگالی شار عمود بر سطح سیم‌پیچ ابررسانا، جریان سیم‌پیچ میدان و عمق نفوذ میدان مغناطیسی در لایه دمپر طی دوره گذرای بارزدایی و بارگذاری، بررسی و مقایسه می‌شود. نهایتاً با تحلیل شاخص‌های کیفی هر مشخصه عملکرد، مقدار بهینه ضخامت لایه دمپر برای ماشین ابررسانای مورد مطالعه، پیشنهاد می‌شود.

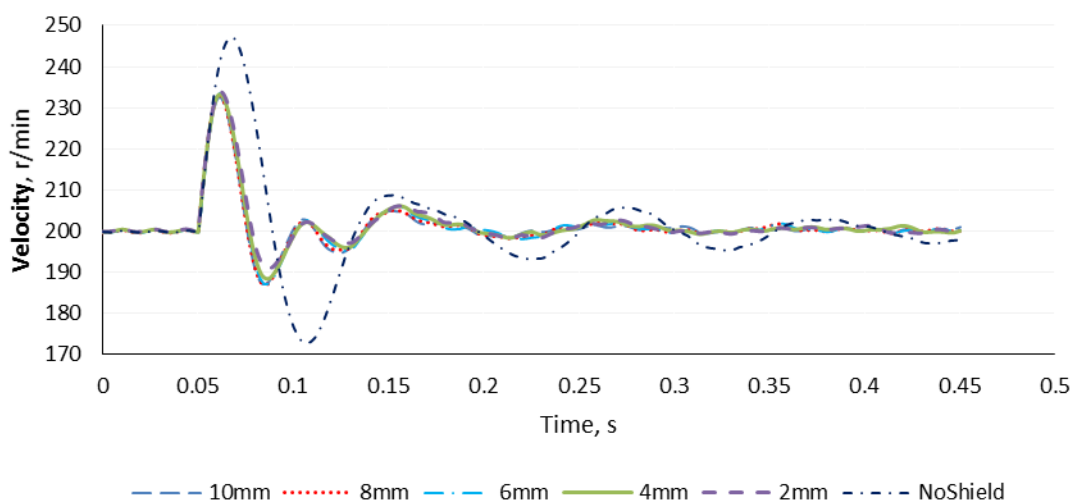
۴-۴-۱- بارزدایی

موتور سنکرون ابررسانا در نرم‌افزار اجزاء محدود مدل‌سازی و در حالت بار کامل به منبع ولتاژ نامی ماشین وصل شده است. بعضی از مشخصه‌های موتور در این شرایط عملکردی در بخش ۴-۳-۲ آورده شد که رفتار ماشین را در حالت ماندگار نشان داد. بعد از اینکه موتور به شرایط سنکرون خود رسید، با کم کردن بار نامی از روی موتور در یک لحظه، بار ماشین را تغییر داده که این عمل منجر به نوسان تمام مشخصه‌های کاری ماشین شده و مجدداً با گذشت زمان شرایط مانا تثبیت خواهد شد.

۴-۱-۱-۴- بررسی عملکرد دمپر در بخش سرد موتور ابررسانا

همان طور که در بخش ۲-۴ همین فصل گفته شد ضریب مقاومت مس نسبت به دما با رابطه (۴-۵) تغییر می‌کند که در زمان اجرای شبیه‌سازی، با اعمال نسبت دمایی مربوطه بررسی‌ها انجام گرفته است.

به منظور تحلیل گذرایی ماشین سنکرون ابررسانا، با اعمال شرایط اولیه مربوط به حالت دائمی موتور در نرم‌افزار مانند جریان سیم‌پیچ‌های استاتور و همچنین آرگومان ولتاژ منبع تغذیه سه فاز استاتور در لحظه مورد نظر، موتور را در نرم‌افزار به گردش در آورده و سپس با کاهش بار ماشین به اندازه بار نامی در نیم سیکل ابتدایی پس از چرخش، مشخصه‌های عملکرد موتور به دست می‌آید. گراف‌های مربوط به نوسانات سرعت روتور با تغییر ضخامت لایه دمپر از صفر تا ۱۰ میلی‌متر به طور همزمان در شکل ۴-۱۶ تحلیل می‌شود.

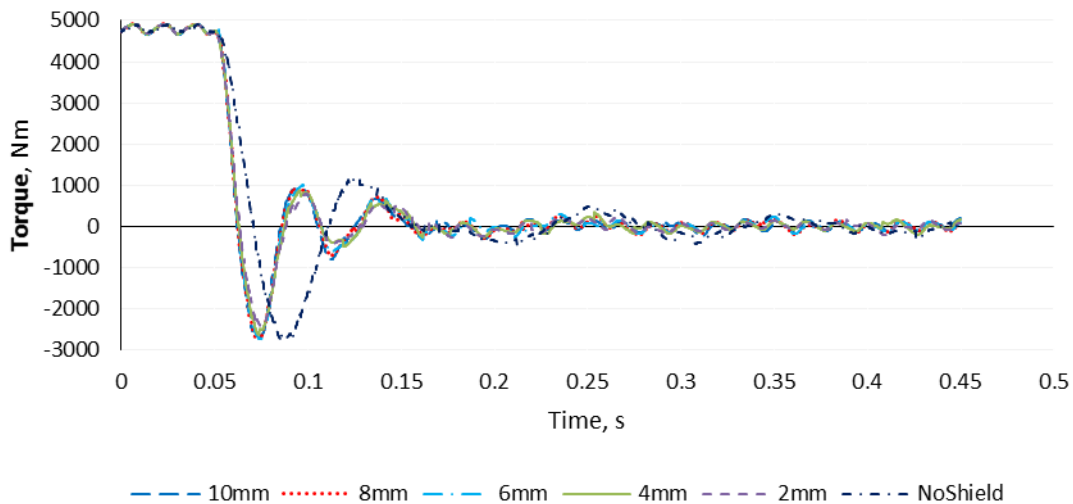


شکل ۴-۱۶: مقایسه شکل موج‌های نوسانات سرعت ماشین با تغییر ضخامت دمپر

شکل ۴-۱۶ نشان می‌دهد که وجود دمپر شیلد الکترومغناطیسی در چگونگی نوسانات سرعت موتور سنکرون ابررسانا به هنگام اعمال گذرایی که در اینجا با اضافه کردن بار صورت گرفته، تفاوت ایجاد خواهد کرد که با دقت در زمان میرا شدن شکل موج‌ها و نیز در اندازه دامنه نوسان تأیید می‌شود

وجود یا عدم وجود پوسته میراکننده در چگونگی رسیدن موتور به سرعت سنکرون که قبل از ایجاد گذرایی نیز موتور در همین سرعت نامی خود بوده، بسیار قابل ملاحظه است. به طوری که با افزایش ضخامت لایه دمپر این تغییرات کاهش می‌یابد. در دامنه نوسانات سرعت مربوط به گذرایی ماشین، برای شبیه‌سازی‌هایی که بین ۲ تا ۱۰ میلی‌متر ضخامت برای لایه دمپر در نظر گرفته شده، آنچنان تغییری دیده نمی‌شود و در همگی بعد از زمانی مشابه و با اختلافی یکسان نسبت به حالت بدون دمپر، موتور به سرعت سنکرون خود که ۲۰۰ دور در دقیقه است، می‌رسد.

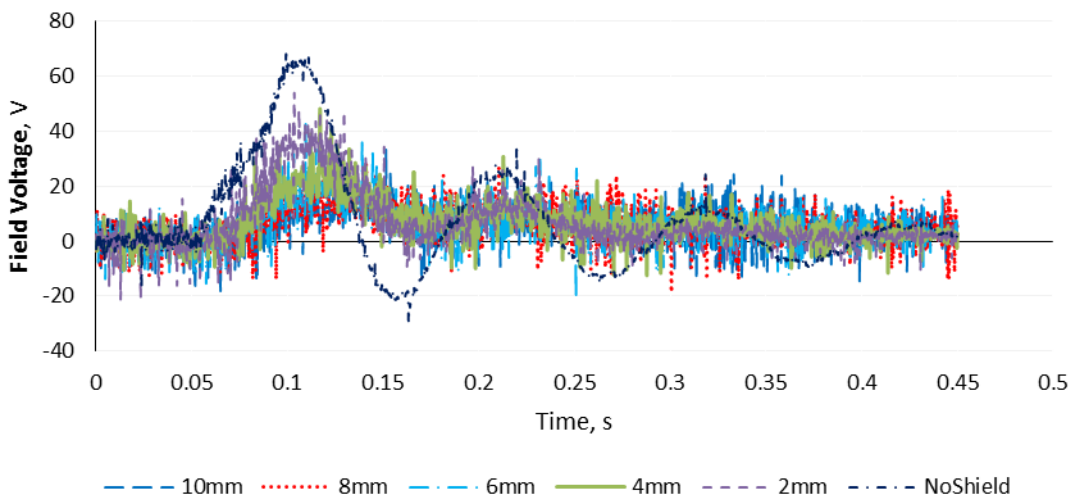
شکل موج نوسانات گشتاور در لحظه گذرایی در شکل ۴-۱۷ آورده شده است.



شکل ۴-۱۷: مقایسه شکل موج‌های نوسانات گشتاور در حالت بدون دمپر و با دمپر

در مشخصه گشتاور که در شکل ۴-۱۷ آورده شده، مشاهده می‌شود که گشتاور از مقدار نامی به صفر رسیده و نوع نوسان در حالت بدون شیلد با بقیه حالت‌ها متفاوت است. دامنه نوسانات گشتاور تقریباً در تمامی شبیه‌سازی‌ها در زمان گذرایی برابر بوده ولی زمان نشست برای میرا شدن شکل موج‌ها تفاوت قابل توجه دارد. زمان میرایی برای این مشخصه در شرایط عدم وجود میرا کننده حدود $0/3$ ثانیه و با وجود ضخامت‌های مختلف از لایه دمپر در ماشین سنکرون ابررسانا، این زمان به نصف کاهش پیدا می‌کند.

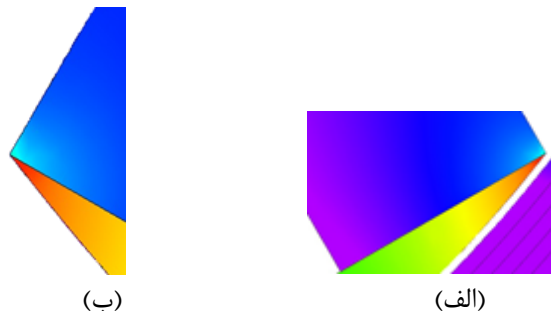
به هنگام کاهش بار از روی موتور، جریان کاهش یافته و به منظور برقراری قانون ولتاژ کریشهف، باید ولتاژ در ماشین افزایش یابد. در اینجا مدل سازی تغذیه مدار تحریک ماشین سنکرون ابررسانا، با منبع ولتاژ انجام گرفته و ولتاژ ترمینال ثابت گذاشته شده است. طبیعتاً در حین گذرایی میدان تحریک تغییر خواهد کرد و سبب می شود جریان تحریک عوض شود. در حقیقت وجود جریان ثابت dc برای حالت ایده آل اتفاق می افتد و در ماشین سنکرون جریان تحریک همواره ثابت نیست. نوسان جریان تحریک در ماشین سنکرون ابررسانا باعث می شود که سیم پیچ ابررسانا مقاومت ac نشان داده و ایجاد تلفات ac کند که برای سیستم سرد کننده ماشین ابررسانا اعمال بار حرارتی بیشتر را به همراه خواهد داشت. بنابراین از اهداف مهم در طراحی شیلد الکترومغناطیسی در ماشین سنکرون ابررسانا این است که با ممانعت از ورود هارمونیک های میدان استاتور به روتور، از ایجاد تغییرات در ولتاژ القا شده روی سیم پیچ میدان جلوگیری کند. هر اندازه نوسان تحریک کمتر باشد برای ماشین ابررسانا بهتر خواهد بود. به منظور بحث در خصوص چگونگی تأثیر دمپر بر مشخصه های مربوط به تحریک، ابتدا در شکل ۴-۱۸ نوسانات مربوط به ولتاژ القایی در سیم پیچ میدان نمایش داده شده است.



شکل ۴-۱۸: شکل موج نوسانات ولتاژ القایی در تحریک با تغییر ضخامت دمپر

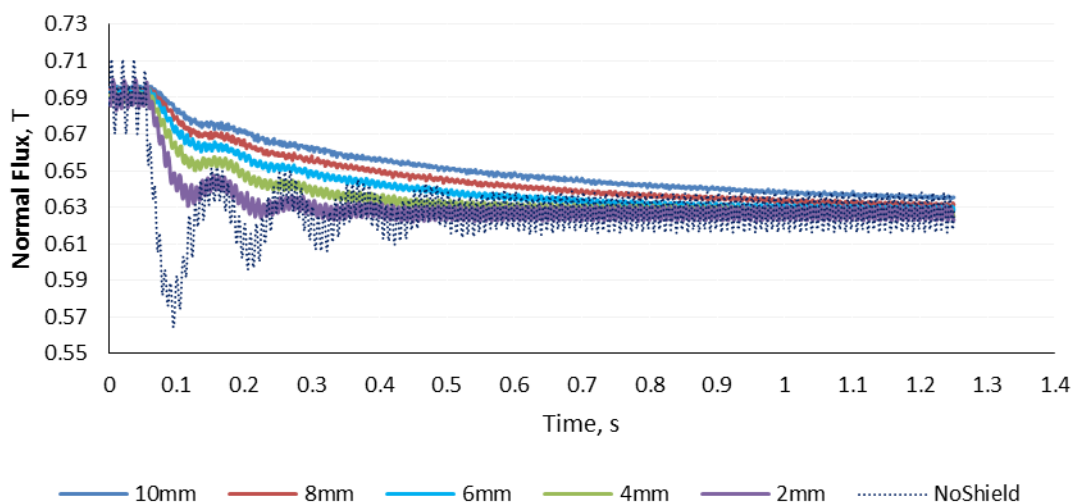
آنچه که از نتیجه اجزاهای شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار اجزاء محدود کاملاً واضح به نظر می‌رسد تأثیر مفید وجود لایه دمپر در ماشین سنکرون ابررساناست. چنانچه از شکل ۴-۱۸ برمی‌آید دامنه ولتاژ القایی میدان در حالتی که ضخامت لایه دمپر ۲ میلی‌متر است حدود ۷۰ درصد مقدار دامنه در شرایط بدون دمپر بوده و با تغییر این ضخامت بین ۴ تا ۱۰ میلی‌متر برای دمپر شیلد، تفاوت زیادی در دامنه‌های ولتاژ دیده نشده که میزان نوسانات دامنه ولتاژ با در نظر گرفتن این بازه از ضخامت برای دمپر، حدوداً بین ۴۰ تا ۴۵ درصد افت می‌کند.

آنچه که ولتاژ میدان را تغییر می‌دهد، تغییرات مؤلفه مماسی میدان مغناطیسی است که بر سطح نوار ابررسانا مماس است و از داخل آن عبور می‌کند. در واقع آهنگ تغییرات شار پیوندی در راستای مماس بر پنکک‌ها ولتاژ القایی در روتور را موجب می‌شود. اما عامل محدود کننده برای جریان بحرانی سیم‌پیچ ابررسانا مؤلفه عمود بر آن است. مؤلفه‌ای که نوساناتش هیچ ولتاژی القا نمی‌کند در حالیکه اگر در یک لحظه مقدار چگالی شار نرمال از حد مجازش تجاوز کند، باعث می‌شود سیم‌پیچ از محدوده ابررسانایی خارج گردد زیرا به شدت داغ شده و سیستم سرد کننده را از بین می‌برد. بنابراین اهمیت ماکزیمم چگالی شار نرمال در سطح سیم‌پیچ ابررسانا در تعیین جریان بحرانی آن مشخص می‌شود که بدین منظور تغییرات مشخصه چگالی شار عمودی برای یکی از نقاط بیشینه میدان عمودی در گذرایی موتور از بار کامل به بی‌باری در شکل ۴-۲۰ بررسی می‌شود. لازم به ذکر است که نقاطی که بیشترین چگالی شار عمود در آنجا وجود دارد، در گوشه‌ترین و دورترین سطح کلاف ابررسانا از قطب روتور می‌باشد که در شکل ۴-۱۹ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۹: توزیع چگالی شار نرمال (الف) چگالی شار عمود (ب) چگالی شار عمود بر سطح سیم‌پیچ تحریک

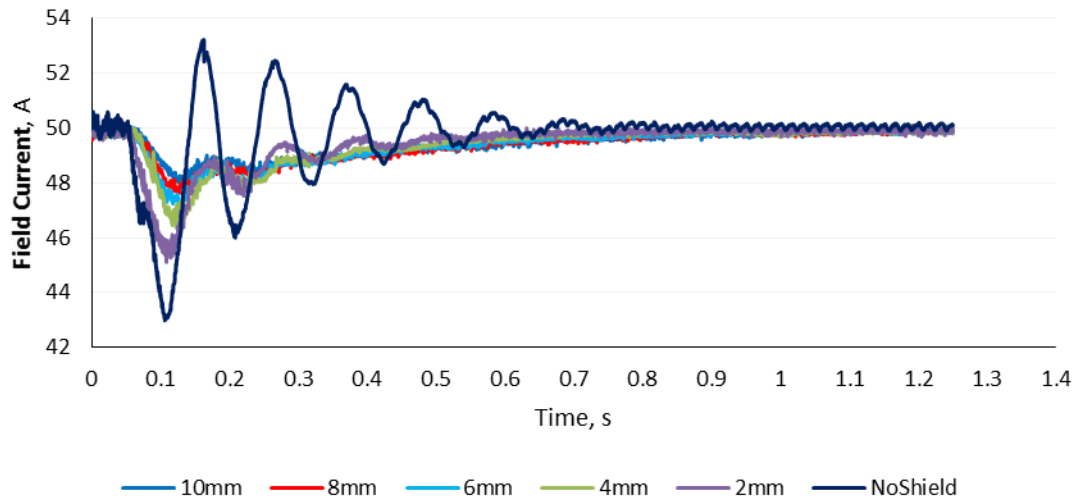
فلز مس بدلیل فرومغناطیسی نبودن نباید در حالت دائم توزیع چگالی شار اثر بگذارد و از طرفی مقدار جریان روتور نیز قبل و بعد از گذرایی یکسان خواهد بود ولی تغییر اندازه جریان استاتور در گذرایی از بار کامل به بی‌باری، دلیل تغییر در مقدار حالت دائمی توزیع چگالی شار عمود می‌باشد.



شکل ۴-۲۰: شکل موج تغییرات چگالی شار عمودی با تغییر ضخامت دمپر

در این گذرایی بدلیل اینکه با کم شدن بار موتور، کاهش چگالی شار رخ داده و از طرفی اندازه ماکزیمم چگالی شار عمودی در طول زمان کارکرد ماشین مهم می‌باشد، شکل موج‌های چگالی شار نرمال بدست آمده از مدل ماشین، در تغییرات خود به سمت بی‌باری با وجود داشتن روندی متفاوت، برای سیم‌پیچ ابرسانا تهدید نخواهند بود. البته در شرایطی که جریان بحرانی ابرسانا با توجه به میدان مغناطیسی ۰/۷ تسلا که بیشینه چگالی شار نرمال در شرایط بار کامل ماشین می‌باشد، طراحی شده باشد.

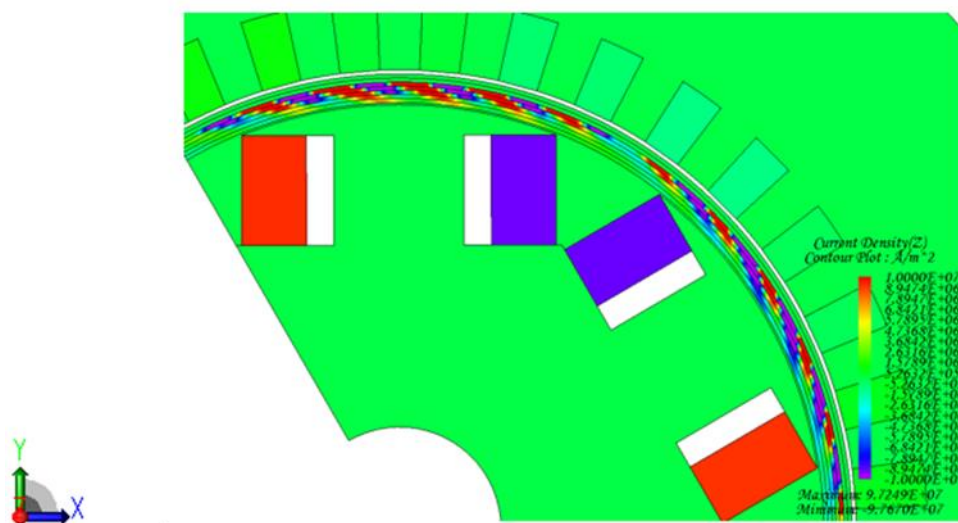
دیگر مشخصه مربوط به تحریک موتور، شکل موج جریان در سیم‌پیچ میدان تحریک می‌باشد که در شکل ۴-۲۱ تغییراتش برای گذرایی ماشین نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۱: شکل موج نوسانات جریان میدان در حالت بدون دمپر و با دمپر

گفته شده بود که برای ماشین سنکرون ابررسانا جریان تحریک هر چه نوسانش کمتر باشد بهتر است. بنابراین حالت بدون دمپر اصلاً خوب نیست. به نظر می‌رسد با در نظر گرفتن ضخامت بیشتر برای لایه دمپر، مشخصه جریان تحریک را با تغییرات خیلی کمتری می‌توان بدست آورد ولی با تغییر بیش از اندازه در میزان ضخامت دمپر شیلد تأثیر چندانی بر روند تغییرات دیده نخواهد داشت. در اینجا اختلاف بین حالت بدون دمپر و دمپر ۲ میلی‌متری خیلی واضح است ولی بین ۶ تا ۱۰ میلی‌متر شدن برای شیلد نه در زمان میرایی نوسانات جریان تحریک و نه در چگونگی آن اثری ندارد.

جریان گردابی یا جریان فوکو به دلیل قانون فاراده در اثر تغییر میدان مغناطیسی در یک رسانا ایجاد می‌شود. زیرا تغییر میدان سبب تغییر شار پیوندی و القای ولتاژ و در نتیجه به وجود آمدن جریان می‌شود. نمایش توزیع چگالی جریان گردابی در جهت محور z برای یک لحظه مشخص در لایه دمپر با ضخامت ۱۰ میلی‌متر در شکل ۴-۲۲ آورده شده است.



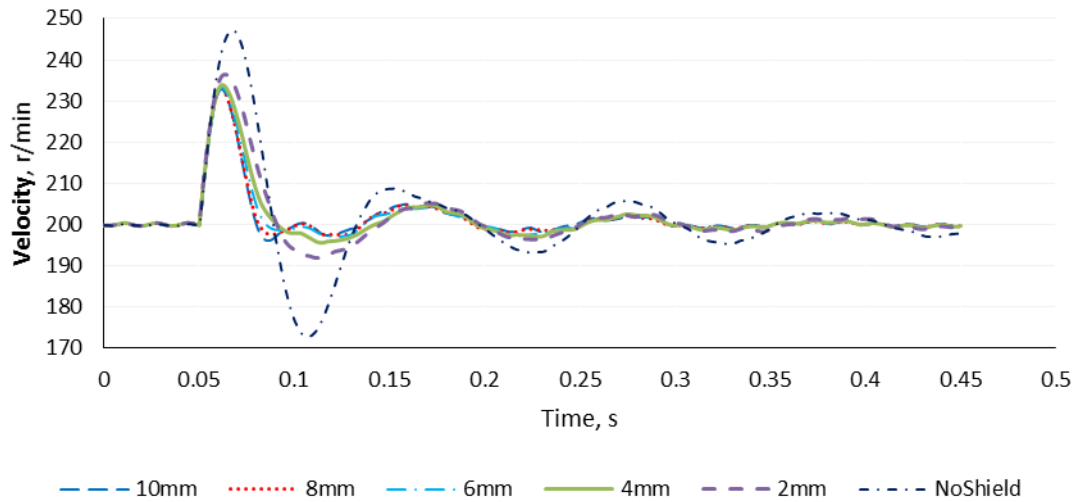
شکل ۴-۲۲: نمایش توزیع چگالی جریان گردابی با موقعیت دمپر سرد

در شکل ۴-۲۲ توزیع جریان گردابی را در جهت محور Z نشان می‌دهد میدانی که این جریان را تولید می‌کند، به صورت هارمونیکی کم و زیاد شده و در نتیجه جریان را کم و زیاد می‌کند. به دلیل زیاد بودن فاصله هوایی، عکس العمل آرمیچر نیز کم می‌باشد و اثرش دیده نمی‌شود. بنابراین عمده این جریان مربوط به هارمونیک شیار است. همچنین دیده می‌شود که جریان ناشی از هارمونیک شیار در بخش‌های عمقی‌تر نسبت به قسمت‌های سطحی دمپر شیلد، کمی اختلاف فاز دارند که به دلیل اندوکتانس ناشی بالاتر در عمق بیشتر است. بعلاوه، این جریان‌ها عمق نفوذ میدان مغناطیسی را در پوسته میراساز نشان می‌دهند که جریان گردابی تا چه میزان می‌تواند نفوذ کند و به نظر می‌رسد ضخامت ۱۰ میلی‌متری که برای دمپر محفظه سرد در اینجا در نظر گرفته شده، بیشتر از میزان عمق نفوذ میدان است.

۴-۱-۲-۴- بررسی عملکرد دمپر در بخش گرم موتور ابرسانا

موتور سنکرون مورد مطالعه را با شرایط اولیه مشابه و پارامترهای یکسان با بخش قبل همچون ضریب اصطکاک و ممان اینرسی روتور در معادله حرکت برای حل معادلات عددی و با تفاوت قرار دادن لایه دمپر در محیط خارج از روتور و در دمای کار موتور برای اجرا در نرم‌افزار اجزاء محدود

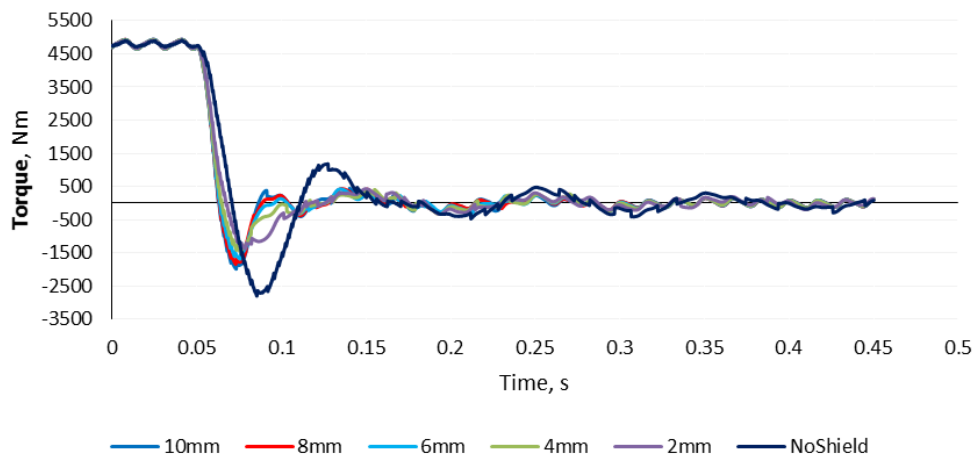
مدل سازی کرده و برای گذرایی از بار کامل به بی باری مشخصه های زیر را بررسی کرده که نوسانات سرعت ماشین در چند سیکل از این زمان در شکل ۴-۲۳ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۳: شکل موج نوسانات سرعت با دمپره های مختلف از بار کامل به بی باری

به نظر می رسد دمپره های مختلف تنها توانسته اند میزان نوسان را دقیقاً در لحظه گذرایی کاهش دهند و در زمان میرا شدن آن ها تفاوت چشمگیری نسبت به زمان بدون دمپر مشاهده نمی شود. با توجه به آنچه در بخش قبل نشان داده شد، در مقایسه با مدل کردن دمپر شیلد در قسمت روتور ماشین سنکرون ابررسانا، نوسانات سرعت ماشین در این حالت نیز با درصد خوبی کاهش یافته است.

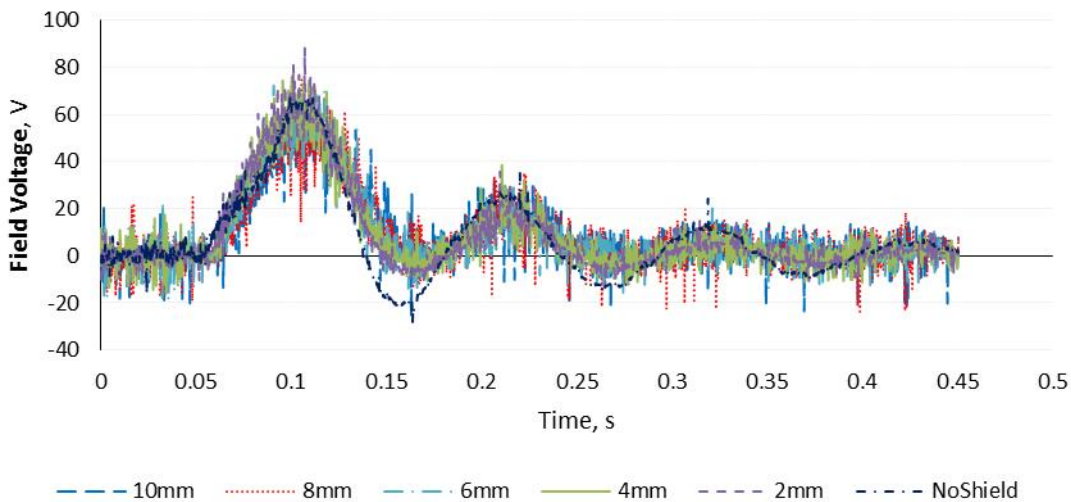
نوسانات گشتاور ماشین را شکل ۴-۲۴ نمایش داده است.



شکل ۴-۲۴: شکل موج نوسانات گشتاور در لحظه اعمال گذرایی با دمپره های مختلف

همانند نوسانات موج سرعت ماشین، برای تغییرات گشتاور نیز در زمان تغییر بار، لایه میرا کننده در نزدیکی استاتور که قرار می‌گیرد در کم کردن نوسانات گذرا نسبت به بخش سرد، تا حدود ۳۰ درصد مؤثرتر عمل می‌کند.

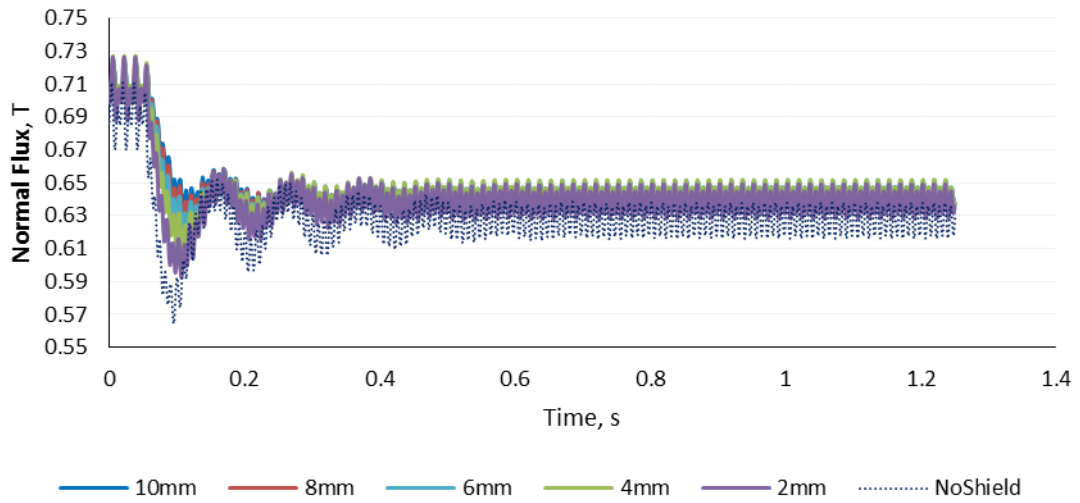
شکل موج تغییرات ولتاژ القایی در سیم‌پیچ روتور در شکل ۴-۲۵ آورده شده است.



شکل ۴-۲۵: مقایسه نوسانات لحظه گذرای شکل موج سرعت

با مشاهده شکل ۴-۲۵ دیده می‌شود که دمپ‌های با ضخامت ۲ و ۴ و حتی ۶ میلی‌متر هیچ تأثیری بر اولین نوسان شکل موج ولتاژ القایی نداشته‌اند و رفتار ماشین مشابه با عملکردش در حالت بدون دمپر می‌باشد و با طراحی لایه ۸ میلی‌متری برای لایه دمپر، می‌توان گفت که روتور نسبتاً از نفوذ هارمونیک‌های میدان استاتور حفظ شده است.

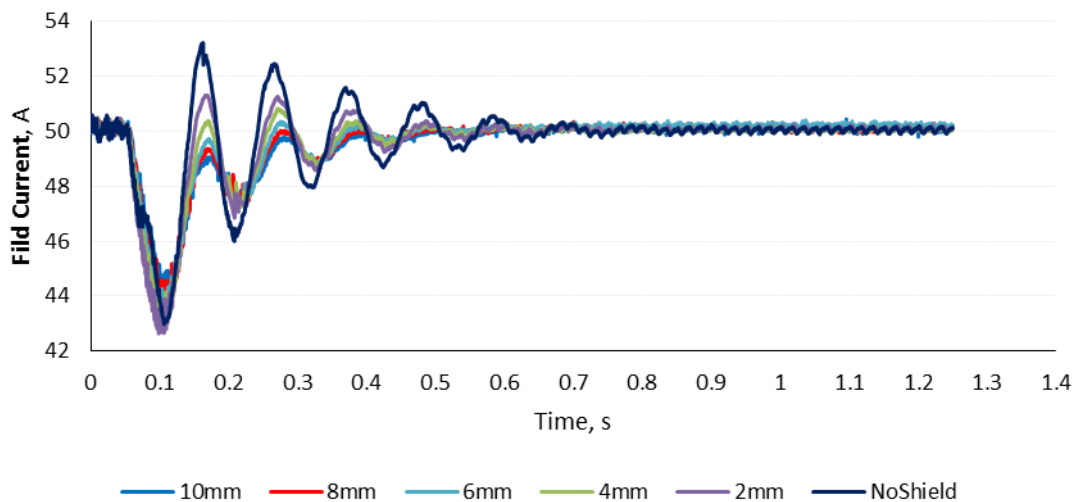
با تغییر ضخامت دمپر، میزان تغییرات مؤلفه شار عمود بر سطح سیم‌پیچ میدان که برای یک نقطه از انتهای‌ترین سطوح کلاف ابررسانا که در شبیه‌سازی‌ها به عنوان نقاط بیشینه چگالی شار عمودی مشخص شده بودند، محاسبه شده که مطابق شکل ۴-۲۶ می‌باشد.



شکل ۴-۲۶: شکل موج تغییرات چگالی شار عمودی در نقطه ماکزیمم

بدیهی است که برای این مشخصه تفاوتی در شکل و نحوه نوسان حاصل نشده است ولی به هر ترتیب، در صورت طراحی لایه ضخیم‌تری برای دمپر شیلد، می‌تواند تأثیر خودش را نشان دهد. عبارتی در اینجا نیز لایه دمپر بر عملکرد مشخصه با درصد کمتری اثر گذار خواهد بود.

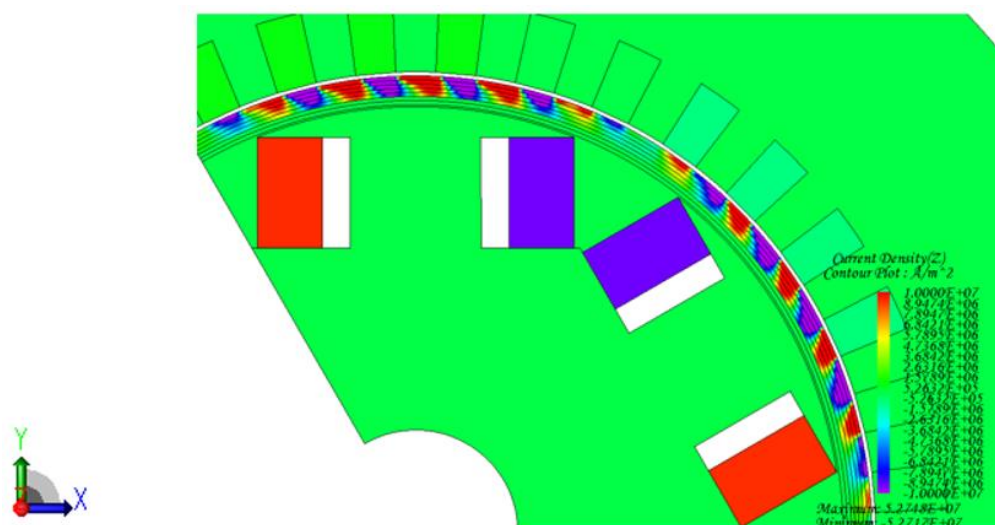
چگونگی تغییر در جریان میدان را برای دمپرهای مختلف در شکل ۴-۲۷ می‌توان دید.



شکل ۴-۲۷: شکل موج نوسانات جریان میدان با دمپرهای مختلف

ملاحظه می‌شود که دمپر نباشد، شرایط برای جریان تحریک ماشین خیلی بد می‌شود و وجود لایه دمپر نوساناتش را بهبود می‌بخشد و بهتر می‌کند و در مجموع چنانچه ضخامت شیلد بیشتر باشد، تأثیر مثبتی بر این روند خواهد داشت.

نمایش عمق نفوذ جریان گردابی در لایه دمپر در شکل ۴-۲۸ آورده شده است.



شکل ۴-۲۸: نمایش توزیع چگالی جریان گردابی با موقعیت دمپر گرم

مشاهده می‌شود که در مقایسه با بخش سرد، تأخیر فاز جریان در لایه‌های عمقی‌تر در اینجا کمتر است که دلیل آن کم بودن اختلاف اندوکتانس سطح و عمق در این بخش می‌باشد. مرتبه هارمونیک در اینجا نیز همان هارمونیکی است که در قسمت سرد سبب تشکیل جریان گردابی شده بود.

۴-۲-۴ بارگذاری

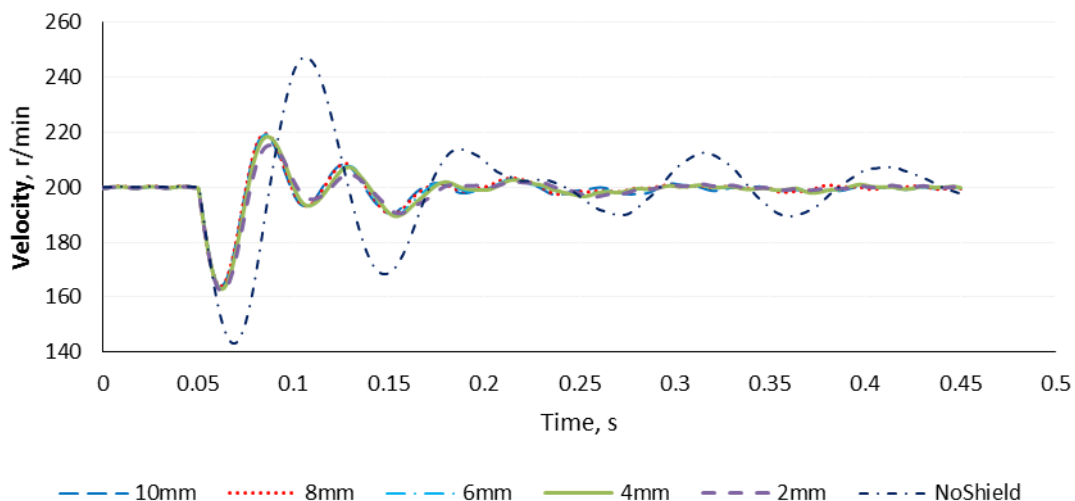
مدل‌سازی بارگذاری ماشین سنکرون ابررسانا در نرم‌افزار اجزای محدود، با شروع از شرایط اولیه بی‌باری انجام شده است که به این منظور ماشین با منبع ولتاژ نامی تغذیه می‌شود و بر اساس ارزیابی‌های انجام شده بعضی از مشخصه‌های موتور در حالت ماندگار بخش ۴-۳-۱ برای به دست آوردن شرایط اولیه، با اضافه کردن بار نامی به موتور بعد از اینکه موتور به حالت سنکرون رسید، بار

ماشین تغییر خواهد کرد که مشخصات دینامیکی گذرای ماشین جهت مطالعه ضرورت پیدا خواهند کرد چرا که گذرای ایجاد شده منتهی به نوسان تمام مشخصه‌های عملکردی ماشین شده که البته با گذشت زمان به حالت ماندگار خود در بار کامل خواهند رسید.

توجه به این نکته ضروری به نظر می‌رسد که در حل معادله دینامیک حرکت در زمان اضافه بار، ضریب اصطکاک که خود نوعی از دمپینگ را شامل می‌شود، کمتر از زمان بارزدایی است. لذا نوع میرا شدن در دو نمودار بارزدایی و بارگذاری مربوط به یک مشخصه عملکرد ماشین متفاوتند و زمان نشست بیشتر برای مشخصه‌های این بخش ناشی از پارامتر مربوط به ضریب گفته شده می‌باشد.

۴-۲-۱- بررسی عملکرد دمپر در بخش سرد ماشین ابررسانا

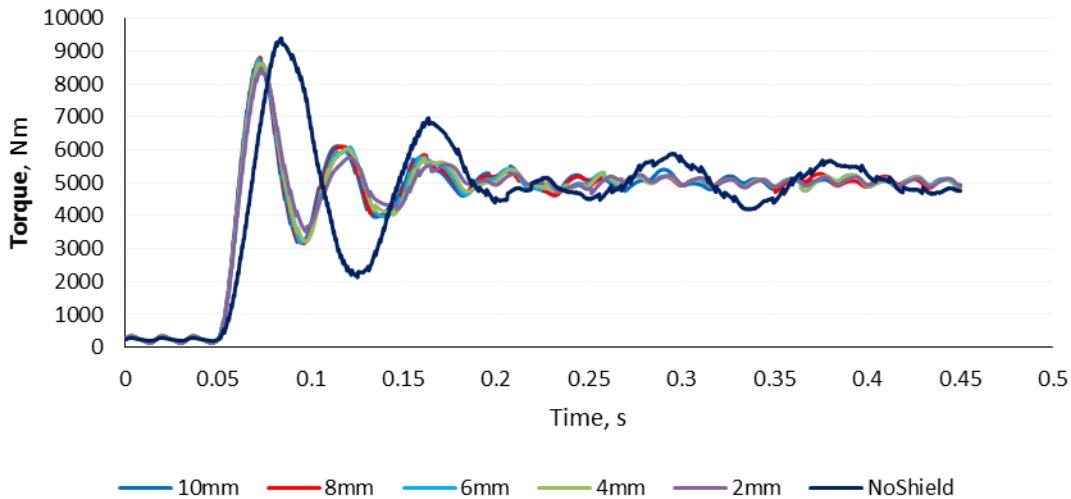
موتور سنکرون مورد مطالعه را با شرایط اولیه به دست آمده از حالت دائمی بی‌باری و برای شرایطی که لایه دمپر در قسمت سرد روتور مدل‌سازی شده، به چرخش در آورده و سپس در لحظه‌ای $t=0.5$ ثانیه با را تا بار نامی تغییر داده که نوسانات سرعت ماشین در شکل ۴-۲۹ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۹: شکل موج نوسانات سرعت با دمپرهای مختلف

با نگاه به شکل ۴-۲۹ می‌توان متوجه شد که اگر ضخامت برای دمپر صفر در نظر گرفته شود نسبت به زمانی که لایه دمپر بین ۲ تا ۱۰ میلی‌متر تغییر داده شود، تفاوت آشکاری وجود دارد.

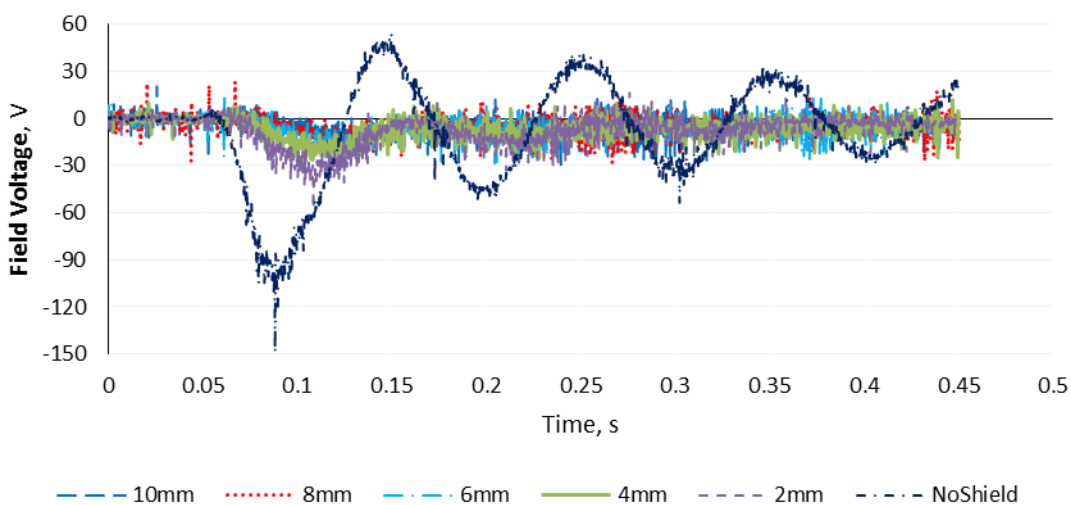
نوسانات گشتاور ماشین در این حالت در شکل ۴-۳۰ نشان داده شده است.



شکل ۴-۳۰: شکل موج نوسانات گشتاور با دمپره‌های مختلف

نمودار در مدت زمانی مشابه با حالتی که بار از روی موتور برداشته شده، رسم گردیده که چگونگی و میزان تأثیر لایه دمپر برای گشتاور ماشین تقریباً به همان صورت بوده است.

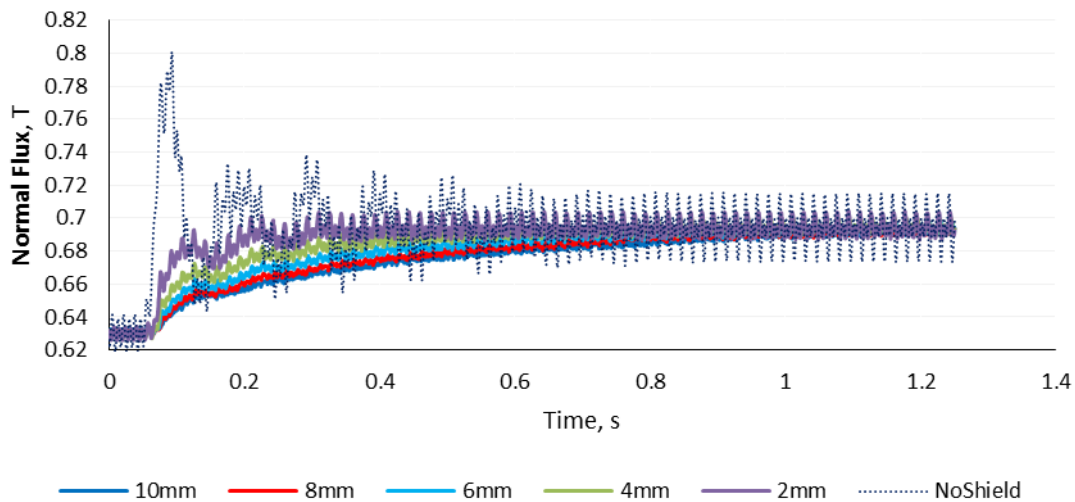
تغییرات شکل موج ولتاژ القا شده در سیم‌پیچ تحریک در شکل ۴-۳۱ آورده شده است.



شکل ۴-۳۱: شکل موج نوسانات ولتاژ القا شده در روتور با دمپره‌های مختلف

به نظر می‌رسد در گذرایی مربوط به اضافه شدن بار که در اینجا به اندازه بار نامی برای موتور بدون بار بوده، تغییر ولتاژ القایی در سیم‌پیچ روتور در زمان گذرایی بیشتر از وقتی است که بارزدایی را برای موتور داشتیم. به هر صورت از شکل ۴-۳۱ برمی‌آید که لایه دمپر توانسته نقش بسزایی در از بین بردن اعوجاج مشخصه ولتاژ القایی میدان به هنگام گذرایی داشته باشد.

این نتیجه، اثرات مفید شیلد را نیز برای چگالی شار نرمال در نقطه‌ای از سطح سیم‌پیچ ابررسانا به ترتیبی که در شکل ۴-۳۲ نشان داده شده است به همراه خواهد داشت. در این حالت نیز تراکم نقاط بیشینه چگالی شار نرمال در سطح کلاف ابررسانا مشابه با حالت‌های قبل می‌باشد و نمودارهای چگالی شار نرمال در نقطه‌ای یکسان، برای تمام حالت‌ها محاسبه شده است.

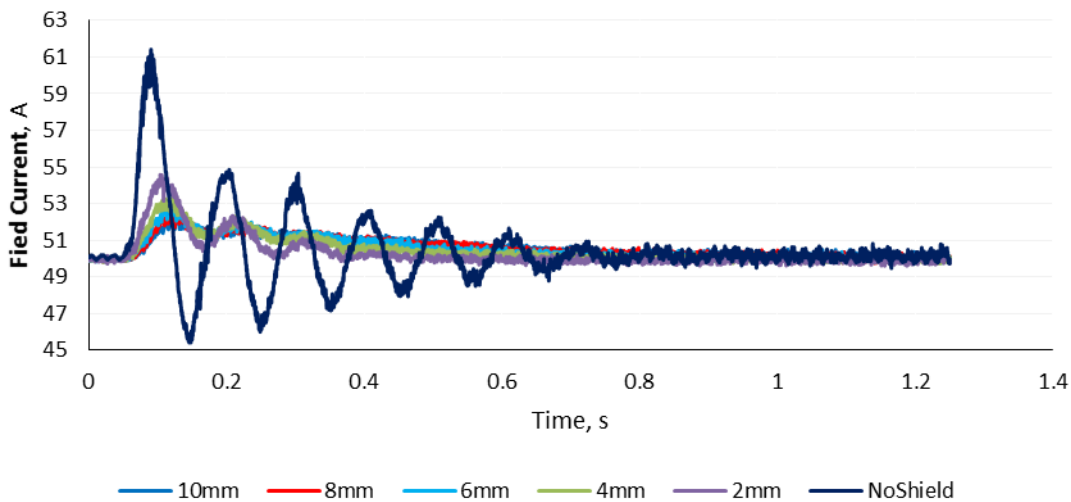


شکل ۴-۳۲: شکل موج تغییرات چگالی شار عمود بر سطح ابررسانا در نقطه ماکزیمم

همانطور که انتظار می‌رفت تأثیر بسزای تغییر لایه‌های میراکننده در ساختار ماشین سنکرون ابررسانا بر روی مؤلفه شار عمود بر سیم‌پیچ میدان در زمان گذرایی ناشی از افزایش بار موتور که ازدیاد و تراکم خطوط شار را در فاصله هوایی در این حالت در مقایسه با کاهش بار به همراه دارد، برای این مشخصه عملکردی در شکل ۴-۳۲ نیز نمایش داده شده است که صحت مدلسازی‌ها را توأمان بیان دارد. ملاحظه می‌شود که در صورت عدم وجود لایه دمپر در حدود ۰/۱ تسلا بر روی تعیین جریان بحرانی ابررسانا تأثیر خواهد گذاشت و آن را کاهش خواهد داد که موجب می‌شود در طراحی سیم‌پیچ

ابرسیانا به دلیل جریان بحرانی کمتر، تعداد دور بیشتری برای تامین mmf میدان تحریک در نظر گرفته شود که در نتیجه هزینه بیشتر را در بر خواهد داشت.

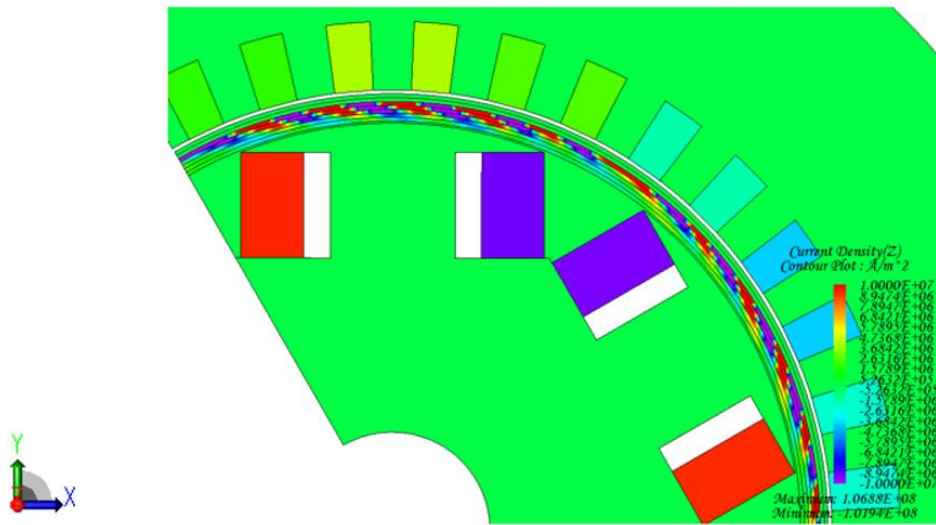
چگونگی تأثیر اندازه‌های مختلف برای ضخامت لایه دمپر بر جریان کلاف تحریک در شکل ۴-۳۳ نمایش داده شده است.



شکل ۴-۳۳: شکل موج نوسانات جریان تحریک

با نگاه به نمودار می‌توان عملکرد ضخامت‌های مختلف لایه دمپر را متوجه شد که تا درصد بالایی از تغییرات جریان تحریک که در سیم‌پیچ ابررسیانا تأثیر فراوانی را به لحاظ عدم وجود تلفات ناشی از ac شدن جریان خواهد داشت، جلوگیری می‌کند.

توزیع چگالی جریان فوکو را برای این شرایط در شکل ۴-۳۴ می‌توان دید.

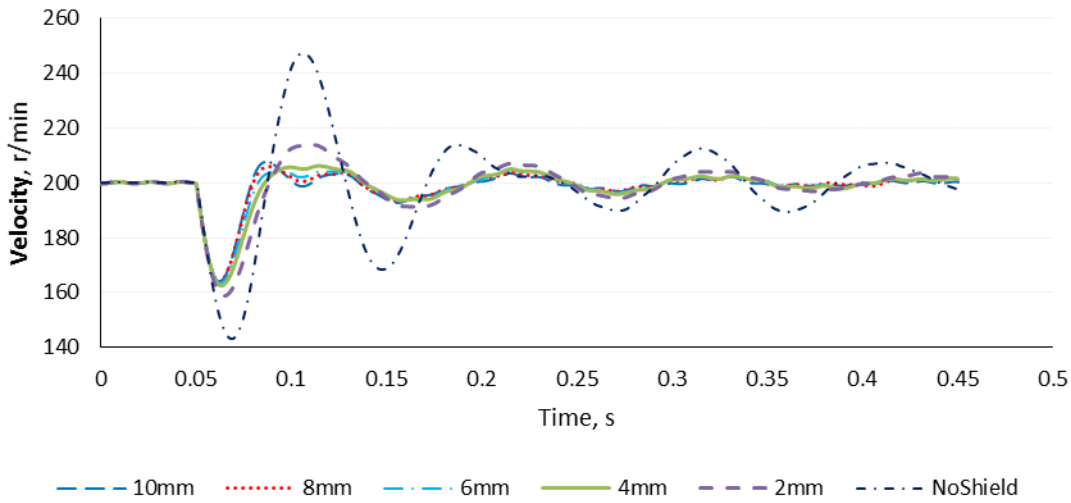


شکل ۴-۳۴: نمایش توزیع چگالی جریان گردابی با موقعیت دمپر سرد

مشابه با حالت بارزدایی اثر هارمونیک شیار خودش را در جریان‌های گردابی نشان داده است.

۴-۲-۲- بررسی عملکرد دمپر در بخش گرم ماشین ابررسانا

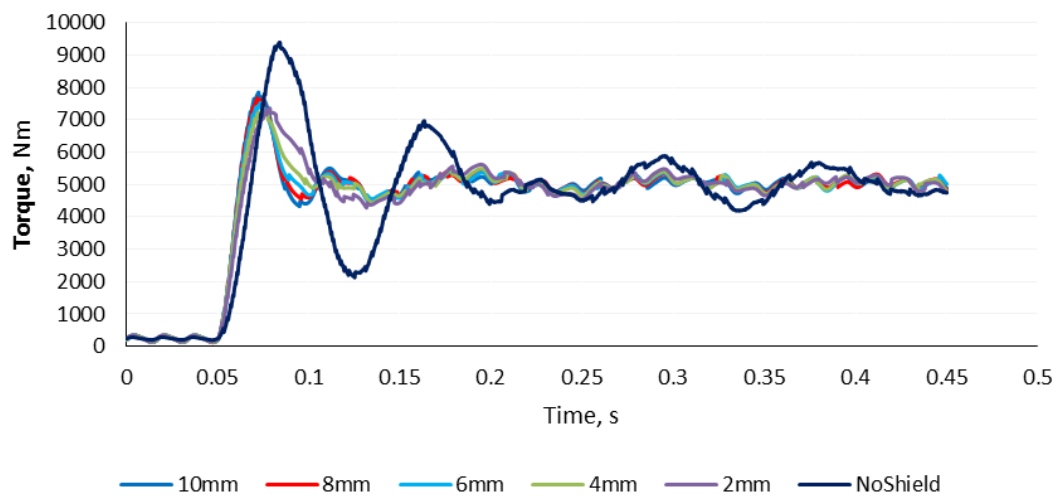
ماشین سنکرون ابررسانای معرفی شده بدون تغییر در شرایط اولیه و نیز با پارامترهای مشابه برای حرکت موتور نسبت به بخش قبل همچون ضریب اصطکاک و ممان اینرسی موتور در معادله حرکت و با تفاوت در مدل‌سازی لایه دمپر برای اجرا در نرم‌افزار اجزای محدود به گردش در می‌آید. بنابراین به دلیل شبیه‌سازی لایه دمپر در محیط خارجی روتور و بخش گرم، دمای کار موتور در هدایت الکتریکی برای حل معادلات اعمال شده است و برای گذرایی از بی‌باری به بار کامل چندین مشخصه عملکرد بررسی شده که نوسانات سرعت ماشین به عنوان اولین مشخصه با تغییر بار در نیم پریود اول برای چند سیکل از زمان گذرایی در شکل ۴-۳۵ نشان داده شده است.



شکل ۴-۳۵: شکل موج نوسانات سرعت با دمپر و بدون دمپر

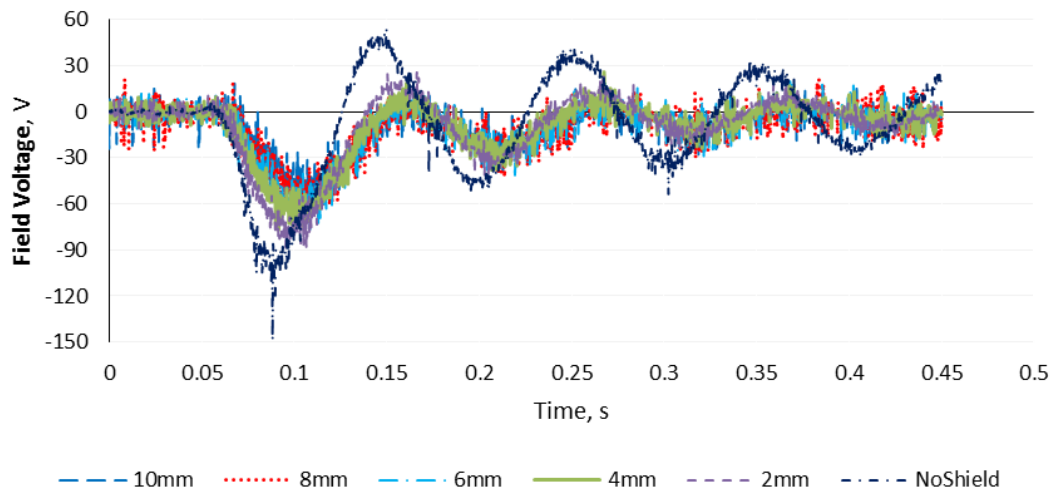
بدیهی است که در صورت نبودن لایه دمپر نوسانات را با شدت بیشتری برای مدت زمان گذرایی در شکل موج سرعت می‌توان ارزیابی کرد.

نوسانات سرعت با تأثیر بر گشتاور موجب شده که با تغییر در ضخامت لایه دمپر تفاوت بسیار زیادی بین شرایط عملکرد موتور با لایه دمپر و بدون آن و همچنین با درصد کمتری در چگونگی نوسانات گشتاور با ضخامت‌های مختلف لایه دمپر وجود داشته باشد که در شکل ۴-۳۶ برای لحظه تغییر بار موتور، شکل موج مربوط به این مشخصه آورده شده است.



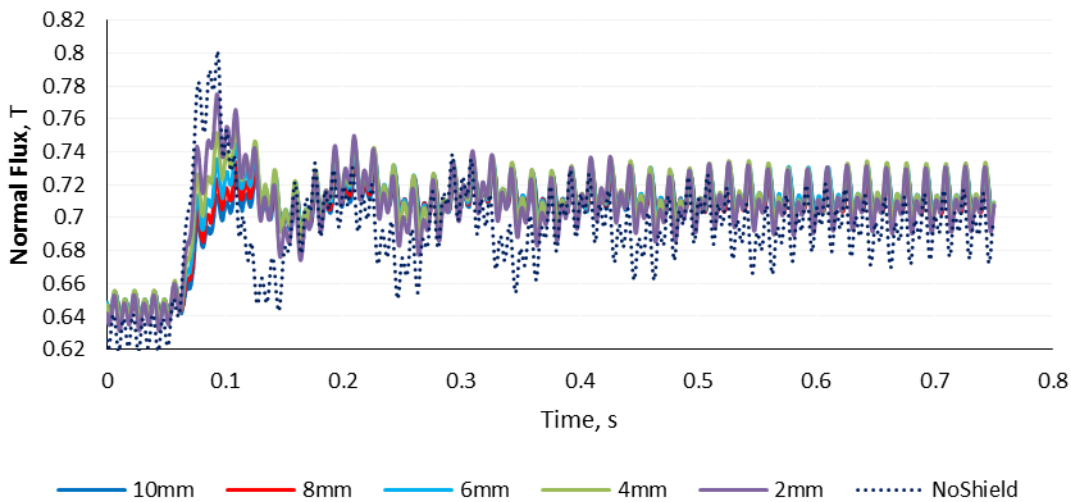
شکل ۴-۳۶: شکل موج نوسانات گشتاور با تغییر ضخامت لایه دمپر

با توجه به نوسانات سرعت ماشین سنکرون ابررسانا، برای نوسانات در شکل موج گشتاور ماشین نیز پیش‌بینی شده بود که وجود لایه دمپر در شرایط حاکم بر گذرایی ماشین کاملاً نقش داشته باشد. مشخصه ولتاژ القایی در سیم‌پیچ تحریک موتور ابررسانا برای شرایط با ضخامت‌های مختلف دمپر شیلد در شکل ۴-۳۷ نشان داده شده است.



شکل ۴-۳۷: شکل موج نوسانات ولتاژ القایی در روتور با ضخامت‌های مختلف دمپر

در اینجا هم لایه دمپر توانسته بر دامنه نوسان تأثیرگذار باشد. اگر ضخامت این لایه صفر باشد از شکل ۴-۳۷ پیداست که نوسانات زیاد شده و هر چه ضخامت دمپر بیشتر شود، نوسان کمتر می‌شود. چگالی شار عمود بر سطح سیم‌پیچ ابررسانا در نقطه‌ای ماکزیمم و یکسان با حالت‌های قبل، با وجود لایه‌های متفاوت دمپر تغییری نخواهد داشت که در شکل ۴-۳۸ نمایش داده شده است.

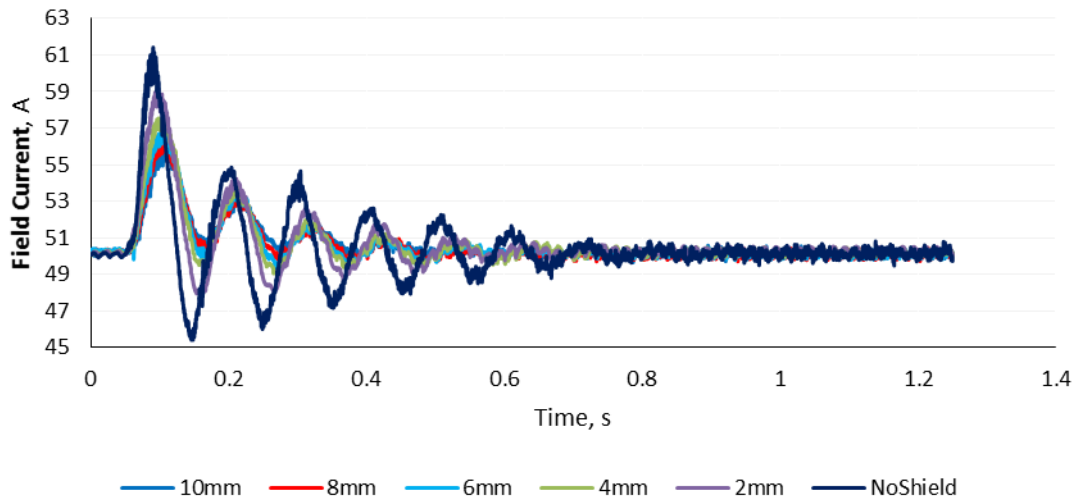


شکل ۴-۳۸: شکل موج تغییرات چگالی شار عمودی در نقطه ماکزیمم در دمپرهای مختلف

به نظر می‌رسد لایه دمپر بر روی این مشخصه تأثیر بسزایی نداشته است. در اینجا در زمان تعیین جریان بحرانی برای سیم‌پیچ ابرسانا بایستی بیشترین مقدار چگالی شار نرمال را در نظر گرفت زیرا قبلاً هم گفته شده بود که در ماشین ابرسانا، کلاف تحریک مجاز به یک لحظه خروج از محدوده ابرسانایی نمی‌باشد. به دلیل نزدیک بودن مقدار نقطه ماکزیمم چگالی شار در تمامی حالت‌های مختلف شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار اجزاء محدود به یکدیگر، می‌توان مؤثر نبودن عملکرد دمپر شیلد بر مشخصه چگالی شار عمود بر سطح سیم‌پیچ ابرسانا را در ماشین سنکرون ابرسانا برای این حالت با توجه به شکل ۴-۳۸ مشاهده نمود.

نمودار شکل موج جریان میدان موتور مطالعه شده در ضخامت‌های مختلف لایه دمپر در شکل ۴-

۳۹ نشان داده شده است.

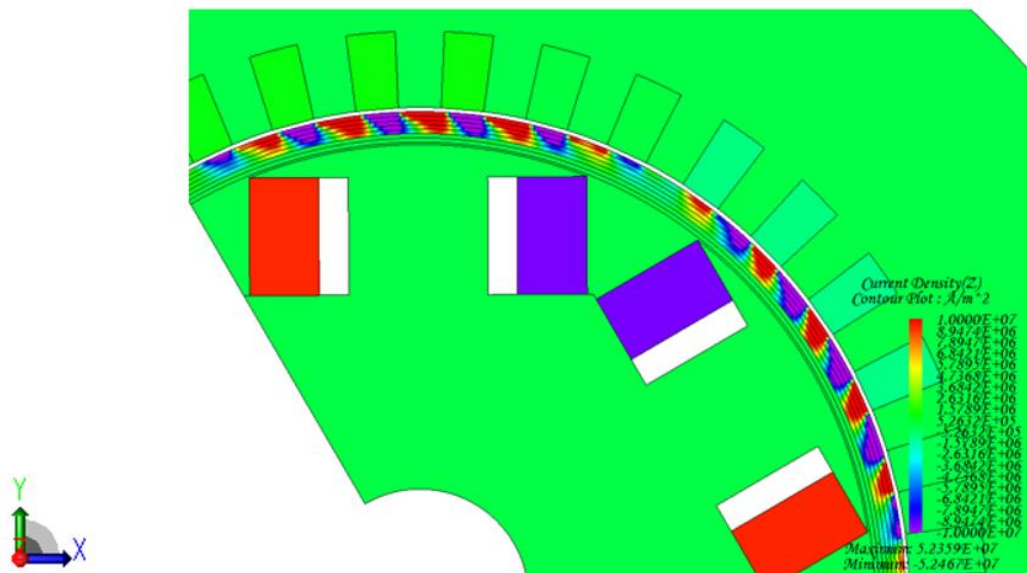


شکل ۴-۳۹: شکل نوسانات جریان تحریک با دمپره‌های مختلف

مشاهده می‌شود که عملکرد در شرایط بدون دمپر چندان تغییری نسبت به شرایط وجود لایه‌های

مختلف دمپر در ساختار موتور سنکرون ابررسانا نکرده است.

چگالی جریان گردابی در لایه دمپر مطابق شکل ۴-۴۰ در محور Z توزیع شده است.



شکل ۴-۴۰: نمایش توزیع چگالی جریان گردابی با موقعیت دمپر گرم

مشابه با عملکرد دمپر گرم در بخش بارزدایی ماشین، جریان فوکو در راستای محور Z در دمپر شیلد جاری می‌شود که در اینجا نیز تا حدودی عمق نفوذ جریان گردابی بیشتر از زمانی است که لایه دمپر در محفظه سرد قرار می‌گیرد.

۴-۵- بحث و جمع‌بندی

با مشاهده نتایج حالت‌های دائمی و گذرا که در این ماشین در دو حالت بدون بار و بار کامل انجام شده، نتیجه می‌شود در حالت ماندگار سیم‌پیچ ابرسانا تحت تأثیر میدانی ثابت که توسط سیم‌پیچ‌های استاتور تولید شده است قرار می‌گیرد. اما در حالت‌های گذرا این چنین نخواهد بود. در موتور سنکرون، سیم‌پیچ HTS نصب شده در روتور با سرعت سنکرون می‌چرخد که در نمودارهای ۴-۴، ۴-۵، ۴-۱۰، ۴-۱۱ و یا دو سیکل از نوسانات سرعت در حالت‌های دائمی ماشین با اندازه‌های متفاوتی از ضخامت دمپر الکترومغناطیسی و نیز با در نظر گرفتن موقعیت‌های مختلف برای شیلد الکترومغناطیسی آورده شده است که تمامی آنها گویای سرعت سنکرون ۲۰۰ دور در دقیقه برای موتور می‌باشند. به این ترتیب با ملاحظه چگونگی رفتار دینامیکی گذرای ماشین سنکرون ابرسانا از طریق مطالعه و کاوش بر روی تمام مشخصه‌های عملکردی آن، در دو حالت بارزدایی و بارگذاری این بحث مطرح می‌شود که چنانچه در طراحی ماشین، محفظه سرد و یا خارج از فضای روتور برای مدل‌سازی لایه دمپر لحاظ شده باشد، تعیین و تشخیص ضخامت بهینه این لایه با توجه به برآوردهای لازم و لحاظ کردن این نکته که وزن ماشین و اینرسی روتور با بیشتر شدن ضخامت پوسته میراکننده افزایش می‌یابد، ارزیابی و پیش‌بینی گردد. از طرفی اگر محل قرارگیری لایه دمپر در محاسبات مربوط به طراحی و ساختار ماشین سنکرون ابرسانا ملاحظه نشده باشد، بررسی تعیین جایگاه این لایه در پیکربندی ماشین نیز علاوه بر تشخیص ضخامت آن باید با توجه به تحلیل مشخصه‌های کارکرد موتور در شرایط یکسان برای هر دو بخش گرم و سرد صورت پذیرد. حقیقت آن است که در کنار مزایای موتور ابرسانا، چالش‌های زیادی در به کارگیری ابرسانا در موتورهای الکتریکی وجود دارد. بنابراین باید تأثیر افزایش ضخامت لایه دمپر بر مشخصه‌های

گذرایی با در نظر گرفتن محدودیت‌های ماده ابررسانا که در طراحی به جای مس برای تحریک ماشین سنکرون به منظور داشتن چگالی جریان بالاتر انتخاب شده، بررسی گردد تا در تعامل بین هزینه و کیفیت عملکرد ضخامت بهینه برتری یابد.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

عملکرد پایدار سیم‌پیچ ابررسانای روتور در فاز ابررسانایی، مستلزم عدم افزایش جریان عبوری از نوار نازک ابررسانا، دمای کاری آن و چگالی شار مغناطیسی عمودی روی نوار هادی سیم‌پیچ ابررسانا، بیش از مقادیر بحرانی مشخصی است. با وجود آنکه ایجاد این شرایط در ماشین‌های ابررسانا با مسائل متعددی روبروست اما بطور کلی به دلیل اینکه ماشین‌های ابررسانا نسبت به ماشین‌های معمولی، سبک‌تر و کوچک‌تر بوده و از راندمان بیشتری برخوردارند از مقبولیت ویژه‌ای برخوردار است.

دمپر یا میرا کننده یکی از اجزای اصلی ماشین‌های سنکرون ابررسانا است که در ماشین‌های سنکرون ابررسانا معمولاً به صورت یک پوسته هادی دربرگیرنده مجموعه روتور و سیم‌پیچی ابررسانای میدان می‌باشد و برای بهبود میرایی نوسانات روتور در شرایط گذرای و نیز کاهش هارمونیک‌های موجود در کمیت‌های الکتریکی و مغناطیسی ماشین به کار گرفته می‌شود. با وجود آنکه در بعضی موارد می‌توان از دینامیک سیم‌پیچی یا پوسته هادی دمپر در پیش‌بینی عملکرد ماشین صرف‌نظر کرد، اما در مواقعی همانند عملکرد ماشین در شرایط گذرا، خطای ناشی از این چشم‌پوشی، نسبتاً بزرگ است. مشکلات موجود در تخمین دقیق پارامترهای الکتریکی ماشین و مدل‌سازی سیم‌پیچی یا پوشش دمپر، به اهمیت طراحی دمپر در ماشین‌های سنکرون بخصوص در ماشین‌های ابررسانا، افزوده است. این پیچیدگی‌ها و اهمیت از آنجا ناشی می‌شود که در ماشین‌های سنکرون ابررسانا، عموماً به جای استفاده از میله‌ها یا سیم‌پیچ‌های دمپر، از یک سیلندر رسانا (مس یا آلومینیوم) که مانند یک پوسته، کل روتور را دربر می‌گیرد، استفاده می‌شود. انتظار می‌رود که این پوسته هادی علاوه بر نقش میراکنندگی نوسانات روتور (مشابه با ماشین‌های سنکرون معمول) و کاهش هارمونیک‌های شار نفوذی به روتور، باعث کاهش مولفه‌های عمودی شار بر روی هادی‌های ابررسانا و افزایش حاشیه پایداری فاز ابررسانایی شود. در نظر گرفتن همه این نقش‌ها برای دمپر، به پیچیدگی‌ها و دشواری‌های طراحی دمپر برای یک ماشین سنکرون ابررسانا می‌افزاید. با وجود تلاش‌های صورت گرفته در این زمینه، در این پایان‌نامه، یک ماشین سنکرون ابررسانا مدل شده و با تغییر در ضخامت دمپر، جریان دمپر مشاهده شده است. در ادامه پس

از طراحی، با استفاده از مدل المان محدود، بررسی موقعیت‌های گوناگون برای میراکننده انجام گرفته است و چگالی شار نرمال یا مولفه شار عمود بر سیم‌پیچ میدان در حین گذرایی مورد توجه قرار گرفته است. در حقیقت به منظور مشاهده اغلب پدیده‌های گذرایی به ناچار مدل ماشین با مش‌بندی بسیار ریز و متراکم با آگاهی و پذیرش تکرار بسیار زیاد محاسبات میدان‌های مغناطیسی و طولانی بودن زمان اجرای برنامه، به نرم‌افزار معرفی گردیده و دیده شده است که با حضور دمپر، جریان میدان تحریک نوسان کمتری داشته و از تغییرات سیم‌پیچ میدان ابررسانا جلوگیری می‌کند. میراکننده الکترومغناطیسی علاوه بر محافظت از سیم‌پیچ ابررسانا در شرایط گذرا، کاربردهای دیگری از جمله تحمل گشتاور خطا و میرا کردن نوسانات فرکانس پایین را نیز دارد.

نکته مهم در به کارگیری ابررسانا در موتور الکتریکی، بحث ایجاد تلفات سیم‌پیچ ابررسانا در گذرایی ماشین است که در اثر میدان‌های مغناطیسی متغیر با زمان به وجود می‌آید. این اندازه تلفات ممکن است به ابررسانا آسیب برساند. به منظور ممانعت از تهدید ابررسانایی، دمپر شیلد الکترومغناطیسی در فاصله هوایی بین روتور و استاتور با ضخامتی که متناسب با بدترین شرایط گذرای ممکن در ماشین است، طراحی می‌شود. از آنجاییکه وابسته بودن جریان بحرانی سیم ابررسانا به میدان مغناطیسی خارجی از ویژگی‌های آن است، هر اندازه شدت میدان عمود بر سیم ابررسانا بیشتر باشد، جریان کمتری می‌توان از آن عبور داد. به این خاطر به مطالعه نقش دمپر با ضخامت‌های مختلف در شرایط گذرای ماشین بر بسیاری از مشخصه‌های عملکرد موتور سنکرون ابررسانا و در دو موقعیت سرد و گرم پرداخته شده است و با توجه به نتایجی که گرفته شد، پیشنهاد می‌گردد که وجود لایه دمپر در محفظه سرد برای عملکرد ماشین بهتر از دمای اتاق خواهد بود. از طرفی با توجه به مهم‌ترین اصل در ماشین‌های ابررسانا که مسأله خنک کردن سیم‌پیچ ابررساناست و با در نظر گرفتن میراکننده مغناطیسی در بخش روتور، وجود دمپر برای سیستم سردکننده به منزله بار حرارتی بیشتر و در نتیجه هزینه بالاتر می‌باشد. لذا در این صورت نیاز است مشخص گردد که ضخامت بهینه تعیین شده، از نقطه نظر حرارتی نیز با توجه به بازده

کم سیستم خنک کننده، تا حد مطلوب بهینه باشد که چنانچه فاکتور هزینه بر تابع هدف اعمال گردید، در تعامل بین هزینه ناشی از نبودن انتقال حرارت بین آرمیچر و سیم پیچ ابررسانا و کیفیت عملکرد بتوان به درستی طراحی را برای تعیین ضخامت پوسته میراساز به جوابی بهینه رساند.

از سوی دیگر، علیرغم نگرانی‌های مربوط به دفع حرارت از قسمت روتور، در دمای پایین و بخش سرد ماشین ابررسانا به لحاظ بالا رفتن رسانایی الکتریکی فلز هادی و در واقع کاهش زیاد مقاومت آن نکته قابل توجهی در خصوص پیشنهاد مطرح شده برای قرارگیری دمپر شیلد در محفظه سرد وجود خواهد داشت چراکه ابررسانا برای حفظ حالت ابررسانایی خود باید تا دمای حداقل ۷۷ درجه کلوین خنک شود.

به طور کلی در شرایط عملکرد مختلف، چنانچه لایه دمپر در محفظه سرد قرار گیرد، با توجه به مشخصه سرعت، گشتاور، ولتاژ القایی در روتور، جریان تحریک و چگالی شار نرمال و چگالی جریان گردابی در دمپر در حالت‌های دائمی و گذرا که در هر بخش برای هر مشخصه توضیح داده شد که رفتار موتور با تغییر لایه دمپر چگونه خواهد بود، ضخامت بهینه برای پوسته میراکننده بین ۳ تا ۴ میلی‌متر پیشنهاد می‌شود و چنانچه نیاز باشد این لایه برای بخش گرم طراحی شود، ضخامت میراکننده را تا حدود سه برابر بایستی افزایش داد که حدود ۱۰ میلی‌متر خواهد بود. در حقیقت تأثیر دما بر رابطه عمق نفوذ مغناطیسی سبب شده که ضخامت پوشش فلزی دمپر در بخش گرم حدود سه برابر این ضخامت در بخش سرد باشد.

۵-۱- پیشنهادات برای ادامه پژوهش

- با توجه به ساختار متفاوت و استفاده از صفحه میراکننده در ماشین سنکرون ابررسانا که به جای میله‌های دمپر در انواع کلاسیک آن مورد استفاده قرار می‌گیرند، محاسبات و تحلیل‌های پارامترهای گذرا نسبت به سنکرون معمولی متفاوت خواهد بود که در تحقیقات بعدی می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.
- بررسی‌های دقیق طراحی‌های مکانیکی و حرارتی ماشین که در این پایان‌نامه از مدل کردن حرارت در نرم‌افزار اجزاء محدود صرف‌نظر شده است، می‌تواند در تحلیل‌های مربوط به بررسی رفتار ماشین ابررسانا در شرایطی که سیستم سرد کننده به درستی عمل نکند و این اتفاق برای زمان‌های کوتاه و گذرا باشد، بسیار مؤثر واقع شود. به گونه‌ای که بتوان چالش چگونگی عملکرد ماشین ابررسانا را در شرایطی که ابررسانایی برای زمان‌های کوتاه تغییر می‌کند، به درستی پاسخ داد.
- بررسی ساختارهای متفاوت برای میراکننده همچون میله‌های دمپر و نیز فلزی با جنس دیگر مانند آلومینیوم به عنوان پوسته فلزی در ماشین سنکرون ابررسانا در پژوهش‌های آینده می‌تواند دیده شود.
- چگونگی تأثیر دمپری اضافی در اطراف سیم‌پیچ ابررسانا از نقطه نظر کاهش سطحی از سیم‌پیچ ابررسانا که در معرض میدان مغناطیسی متعامد قرار می‌گیرد، در مدل‌سازی‌های دو بعدی و سه بعدی تغییرات چگالی شار نرمال می‌تواند به دقت مشاهده و بحث شود.

طراحی بهینه پوسته میزباننده برای یک ماشین سنکرون ابررسانا

پیوست الف

با توجه به اینکه به بررسی کیفی پدیده تهدید ابرسانایی پرداخته شد، برای شناخت دقیق این پدیده و ایجاد روشی برای تشخیص و حفاظت موتور در برابر آن نیاز هست که این پدیده به صورت کمی نیز مورد بررسی قرار گیرد.

مشخصه‌های پدیده تهدید ابرسانایی در موتورهای ابرسانا

این پدیده دارای ۴ مشخصه است که به معرفی این مشخصه‌ها، معادلات مربوط به آن‌ها و ارتباط آن‌ها به پارامترهای ابرسانا پرداخته شده است.

۱- جریان تهدید ابرسانایی (I_q)

در حالت دائمی، دمای کاری سیم ابرسانا از تعادل توان اتلاف شده در سیم و سرمایش موجود تعیین می‌شود. اگر سرمایش ماشین ایده‌آل باشد یعنی تمام حرارت تولیدی را بتوان دفع کرد جریان سیم ابرسانا می‌تواند به طور نامحدود افزایش یابد. اما در شرایط سرمایش معمولی جریان حداکثر سیم ابرسانا محدود است. برای سیم ابرسانای دمای بالا دو جریان حداکثر قابل تعریف است. اولی جریان بحرانی و دومی جریان تهدید ابرسانایی است. جران بحرانی (I_c) جریانی است که در آن میدان الکتریکی 1 uV/cm در داخل ابرسانا ایجاد می‌شود [۲۲]. این جریان تابعی از دمای کار ابرسانا، چگالی شار داخل سیم ابرسانا و در سیم‌پیچ‌های بزرگ تابع شرایط خنک‌کنندگی است. همان‌طور که در بخش قبل بحث شد پدیده تهدید ابرسانایی به معنای وجود ولتاژ دو سر سیم‌پیچ ابرسانا نیست بلکه به معنای ناپایدار شدن ولتاژ دو سر ابرسانا است. بنابراین جریان بحرانی نمی‌تواند برای مشخص کردن پدیده تهدید ابرسانایی به کار رود. I_q جریانی است که جریان‌های بالاتر از آن موجب ایجاد ولتاژ و دمایی در ابرسانا می‌شود که با گذشت زمان به صورت ناپایدار افزایش می‌یابند. I_q تابعی از مشخصات سیم‌پیچ، میدان مغناطیسی و سیستم خنک‌کنندگی است. جریان تهدید ابرسانایی می‌تواند از جریان

بحرانی کمتر یا بیشتر باشد که به شرایط کاری بستگی دارد اما در شرایط کلی جریان تهدید ابررسانایی بیشتر از جریان بحرانی است. جریان تهدید ابررسانایی به جریان بحرانی بستگی دارد و هر چه جریان بحرانی بیشتر باشد جریان تهدید ابررسانایی هم بیشتر است. پس باید توجه داشت که تنها پارامتر محدودکننده جریان کاری سیم ابررسانا جریان تهدید ابررسانایی است [۲۲].

فرمول محاسبه جریان تهدید ابررسانایی در زیر آمده است [۴۸]:

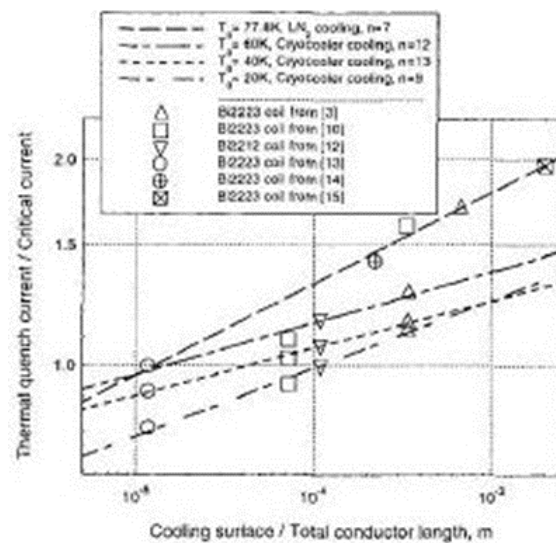
$$\frac{I_q}{I_c(T_0)} = \frac{n}{n+1} \left[\frac{hp(T_c - T_0)}{nE_0 I_c(T_0)} \right]^{\frac{1}{n+1}} \quad (\text{الف-۱})$$

در این رابطه I_c جریان بحرانی، h ضریب انتقال حرارت، P محیط خنک‌کنندگی موثر، E_0 میدان ثابت برابر 1 uV/cm ، T_0 دمای محیط، T_c دمای بحرانی و n پارامتری است که شیب منحنی E بر حسب I را طبق رابطه زیر تعیین می‌کند [۴۸]:

$$E_q = \frac{hpT_c}{I_c(T_0)n} \quad (\text{الف-۲})$$

نکته مهمی که در این رابطه وجود دارد توان $1/(n+1)$ برای عبارت داخل کروشه است که تاثیر پارامترهای داخل کروشه را بر روی I_q کاهش می‌دهد و می‌توان نتیجه گرفت تاثیرگذارترین پارامتر بر روی مقدار جریان تهدید ابررسانایی، جریان بحرانی است.

هر چند تاثیر جریان بحرانی بر روی I_q بیش از سایر عوامل است اما تاثیر سایر پارامترها نیز مهم و تعیین‌کننده است و باید آن‌ها را مد نظر قرار داد. شکل زیر نمودار نسبت جریان تهدید ابررسانایی به جریان بحرانی بر حسب سطح خنک‌کنندگی در واحد طول آورده شده است. می‌بینیم که با افزایش سطح خنک‌کنندگی در واحد طول نسبت جریان تهدید ابررسانایی به جریان بحرانی افزایش می‌یابد و حتی به دو برابر آن نیز می‌رسد:



شکل الف-۱: I_q/I_c بر حسب سطح خنک‌کنندگی در واحد طول [۴۸]

۲- دمای تهدید ابرسانایی (T_q)

T_q دمای مشخصه است که در آن دما، افزایش سریع دما و ولتاژ شروع می‌شود و از رابطه زیر قابل

محاسبه است [۴۸]:

$$T_q - T_0 = \frac{T_c - T_0}{n + 1} \quad (\text{الف-۳})$$

۳- میدان الکتریکی در تهدید ابرسانایی (E_q)

میدان الکتریکی داخل ابرسانا در دمای T_q یا در زمان t_q است و از رابطه زیر قابل محاسبه است

[۴۸]:

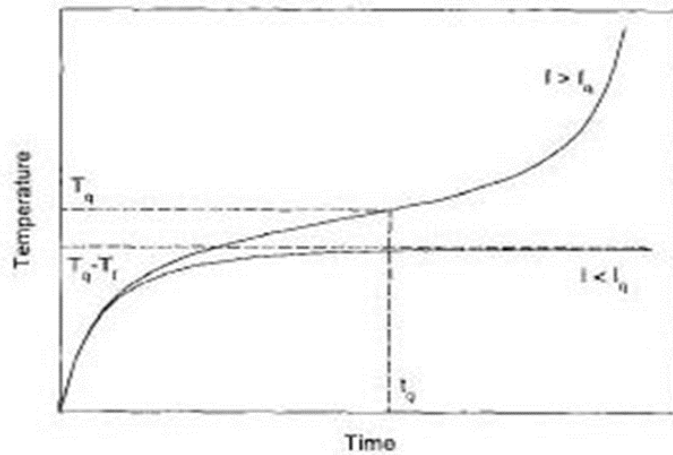
$$E_q = \frac{hpT_c}{I_c(T_0)n} \quad (\text{الف-۴})$$

۴- زمان تهدید ابرسانایی (t_q)

زمان مشخصه تهدید ابرسانایی زمانی است که در آن شدت افزایش دما مثبت می‌شود یا به بیان

دیگر دما به دمای T_q می‌رسد. این زمان از نقطه نظر طراحی سیستم حفاظت بسیار حائز اهمیت است.

هر چه t_q بیشتر باشد سیستم حفاظت زمان بیشتری برای تخلیه انرژی سیم‌پیچی میدان دارد. در شکل زیر دیده می‌شود که برای جریان‌های بیشتر از جریان تهدید ابررسانایی تا قبل از t_q دما افزایش قابل ملاحظه‌ای ندارد اما از t_q به بعد دما به شدت شروع به افزایش می‌کند.



شکل الف-۲: دما بر حسب زمان برای دو جریان کمتر و بیشتر از I_q [۴۸]

برای محاسبه t_q می‌توان از روابط زیر استفاده کرد [۴۸]:

$$\frac{t_q}{t_f} = \tan^{-1} \frac{t_f}{2t_h} \quad (\text{الف-۵})$$

$$t_f = t_h \sqrt{\frac{2I_q}{|I - I_q|(n+1)}} \quad (\text{الف-۶})$$

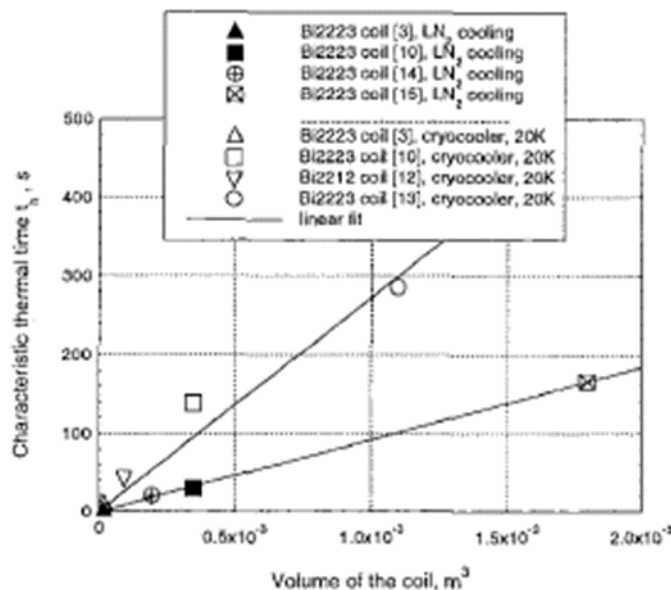
در این روابط t_h ، زمان مشخصه دمایی است که بیانگر زمان لازم برای انتقال حرارت و سرعت انتقال

حرارت است و از رابطه زیر قابل محاسبه است [۴۸]:

$$t_h = \frac{CA}{hP} \quad (\text{الف-۷})$$

C ظرفیت گرمایی حجمی، A سطح مقطع، P محیط خنک‌کنندگی موثر و h ضریب انتقال حرارت است. با توجه به این رابطه می‌بینیم که این زمان به حجم سیم‌پیچی بستگی دارد و با افزایش حجم سیم‌پیچی، با توجه به این که زمان بیشتری برای کاهش دمای آن لازم است t_h افزایش می‌یابد. بهبود کیفیت سرمایش نیز باعث کاهش t_h می‌شود. نحوه تغییر t_h بر حسب حجم و شیوه خنک‌سازی در شکل (۸) آورده شده است. t_f زمانی است که در آن دمای سیم‌پیچی برای $I < I_q$ به دمای تعادل $(T_q - T_f)$ می‌رسد. در شکل الف-۳ می‌توان دمای تعادل را دید. برای محاسبه دمای T_f می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد [۴۸]:

$$T_f = (T_c - T_0) \sqrt{\frac{2|I - I_q|}{(n+1)I_q}} \quad (\text{الف-۸})$$

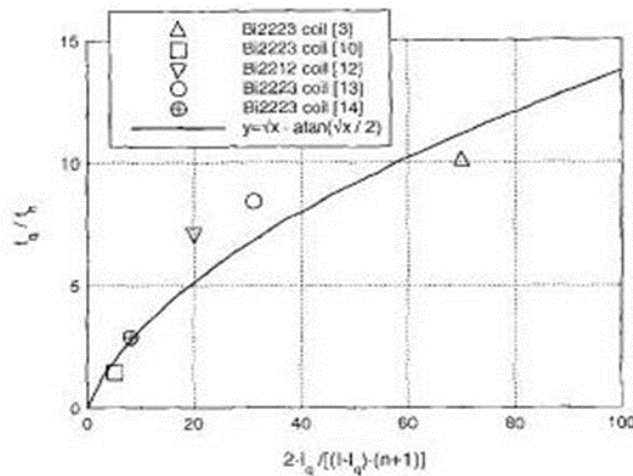


شکل الف-۳: t_h بر حسب حجم سیم‌پیچی (اشکال سیاه رنگ خنک‌سازی با نیتروژن مایع و اشکال سفید رنگ خنک‌سازی با Cryocooler است) [۴۸]

همان‌طور که از روابط الف-۴ و الف-۳ دیده می‌شود t_q به t_h و $I - I_q$ بستگی دارد. هر چه t_h بیشتر باشد t_q نیز بیشتر خواهد بود. پس هرچه حجم سیم‌پیچی بیشتر باشد t_h بزرگتر و در نتیجه t_q هم

بزرگتر خواهد بود و از نظر دمایی پایدارتر است. این نتیجه از قبل قابل پیش‌بینی بود زیرا هر چه سیم‌پیچی بزرگتر باشد دمای آن به راحتی یک سیم‌پیچ کوچک افزایش نمی‌یابد و زمان بیشتری برای ناپایدر شدن نیاز دارد.

از طرف دیگر هر چه جریان از I_q بیشتر باشد t_q کاهش می‌یابد. این نتیجه هم منطقی است زیرا جریان بیشتر به معنی تلفات بیشتر است و در زمان کمتری به حالت ناپایداری می‌رسد.



شکل الف-۴: t_q/t_h بر حسب $\frac{2I_q}{|I-I_q|(n+1)}$ (با افزایش اختلاف جریان از I_q ، t_q کم می‌شود و سیم‌پیچی در زمان کمتری ناپایدار می‌شود) [۴۸]

حال می‌توان معادلات دما و ولتاژ یا میدان را برای جریان‌های کمتر و بیشتر از I_q نوشت [۴۸]:

$$\frac{T(t) - T_q}{T_f} = \frac{E(t) - E_q}{E_f} = \tan \frac{t - t_q}{t_f} \quad I > I_q \quad (\text{الف-۹})$$

$$\frac{T(t) - T_q}{T_f} = \frac{E(t) - E_q}{E_f} = \frac{1 + g \exp\left(\frac{2t}{t_f}\right)}{1 - g \exp\left(\frac{2t}{t_f}\right)} \quad (\text{الف-۱۰})$$

$$g = \frac{T_q - T_0 + T_f}{T_q - T_0 - T_f}, \quad I < I_q$$

(این معادلات مربوط به شکل الف-۲ می‌باشند.)

مراجع

- [1] H. Rogalla and P. H.Kes (2011) "*100 year of superconductivity*" ed: CRC Press.
- [2] <http://wikibooks.org/>
- [3] <http://www.zomit.ir/>
- [4] H. K. Onnes (1911) "Further experiments with liquid helium D-On the change of the electrical resistance of pure metals at very low temperatures, etc V The disappearance of the resistance of mercury", in *Proceedings of the Koninklijke Akademie van Wetenschappen te Amsterdam*, pp. 113-115.
- [5] W. Meissner and R. Oschenfeld (1933) "Ein neuer effect bei eintritt der supraleitfähigkeit, *Naturwiss*, 21: 787-788.
- [6] I. Dobrin, Alexandru M. morega, Mihail Popescu (2010) "The Development of a small power, High temperature superconductor (HTS) Synchronous motor", *Annals of the University of Croatia, Electrical Engineering series*, No. 34.
- [7] R. Hott, R.Kleiner, T. Wolf, G. Zwicknagl (2004) "*Superconductive material, a topical overview*", Springer, Verlag, Berlin.
- [8] J.F. Gieras (2008) "*Advancements in electric machines*", Springer, Dordrecht–Boston–London.
- [9] J. F. Gieras (2009) "Superconducting electrical machines-state of the art", *Organ*, vol. 12, p. 09.
- [10] L. Hail Zheng, et al (2006) "Technical and Theoretical Analysis of HTS Machines and Their Development", *Nature Sciences*, Vol. 1, No. 1, PP. 33-41.
- [11] Y. K. Kwon, et al (2008) "Performance test of a 1 MW class HTS synchronous motor for industrial application", *Physica C*, 468, 2081–2086.
- [12] L. Kovalev, K. Ilushin, V. Penkin, K. Kovalev, S. Koneev, and V. Poltavets, (2006) "Electrical Machines with Bulk HTS Elements" *Sixth International Symposium Nikola Tesla*.
- [13] K Umemoto, K Aizawa, M Yokoyama, K Yoshikawa, Y Kimura, M Izumi, K Ohashi, M Numano, K Okumura, M Yamaguchi, Y Gocho and E Kosuge, (2010) "Development of 1 MW-class HTS motor for podded ship propulsion system", *EUCAS 09, Physics: Conference Series* 234,032060.
- [14] Swarn S. Kalsi, Nancy Henderson and John Voccio (2005) "Superconductor motors for high speed ship propulsion", *American SuperconductorTM Corporation*, Westborough, MA.
- [15] S. Lee et al. (2002) "Test Results of a Three Phase HTS Transformer with Double Pan Cake Windings", *IEEE trans. Appl. Superconductivity*, Vol. 12, No. 1.
- [16] J. Xun Jin, L. H. Zheng, Y. G. Guo and Jian Guo Zhu (2007) "Development of High Temperature Superconducting Machines", *Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol.15, Supplement.
- [17] S. Il Han, Itsuya Muta, Tsutomu Hoshino, and Taketsune Nakamura (2004) "An Approach of Optimal Design of HTS Synchronous Motor Using Genetic Algorithm", *IEEE trans. Appl. Superconductivity*, Vol. 14, No.2.
- [18] Maitham K. Al-Mosawi, C. Beduz, and Y. Yang (2005) "Construction of a 100 kVA High Temperature Superconducting Synchronous Generator", *IEEE trans. Appl. Superconductivity*, Vol. 15, No. 2.

-
-
- [19] S. K. Baik, M. H. Sohn, E. Y. Lee, Y. K. Kwon, Y. S. Jo, T. S. Moon, H. J. Park, and Y. C. Kim (2005) "Design Considerations for 1 MW Class HTS Synchronous Motor", *IEEE trans. Appl. Superconductivity*, Vol. 15, No.2.
- [20] K. F. Goddard, et al (2009) "Alternative Designs of High-Temperature Superconducting Synchronous Generators" *IEEE trans. Appl. Superconductivity*, Vol. 19, NO. 6.
- [21] P. J. Masson, J. E. Pienkos, and Cesar A. Luongo (2007) "Scaling Up of HTS Motor Based on Trapped Flux and Flux Concentration for Large Aircraft Propulsion", *IEEE trans. Appl. Superconductivity*, Vol. 17, No. 2.
- [22] Stephen D. Umans, Boris A. Shoykhet (2006) "Quench in High Temperature Superconducting Motor Field Coils: Experimental Results", *IEEE trans. Industry Applications*, Vol 42, No. 4.
- [23] Jin Hong Joo (2009) "Development of Quench Detection Method Based on Normal Transition Behaviors for HTS Coils", *IEEE trans. Appl. Superconductivity*, Vol. 19, No.3.
- [24] Yong Chu (2009) "Quench Detection Based on Voltage Measurement for the KSTAR Superconducting Coils" ,*IEEE trans. Appl. Superconductivity*, Vol.19, No. 3.
- [25] N. Mijatovic, et al (2011) "Coil Optimization for High Temperature Superconductor Machines", *IEEE trans. Appl. Superconductivity*, Vol. 21, No. 3.
- [26] Y. Jiang, et al (2008) "Design of an HTS motor", *J. Phys.: Conf. Ser.* 97 012123.
- [27] B. Oswald, K - J Best, et al (2006) "AC Application of HTS Conductors in Highly Dynamic Electric Motors", *J. Phys.: Conf. Ser.* 43, 800–803.
- [28] J. Leveque, D. Netter, B. Douine, and A. Rezzoug (2007) "Some considerations about the cooling of the rotor of a superconducting motor," *IEEE transactions on applied superconductivity*, vol. 17, pp. 44-51.
- [29] S. Kalsi (2005) "The state of superconducting technology", *American Superconductor Corporation, Westborough, MA01581, California*, pp. 17-20.
- [30] A. L. Rodrigues (2009) "Drum and disc type hysteresis machines with superconducting rotors", *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*.
- [31] www.AMSC.com/Products
- [32] www.siemens.com
- [33] H.-M. Jang, I. Muta, T. Hoshino, T. Nakamura, S.-W. Kim, M.-H. Sohn, *et al.* (2003) "Design and electrical characteristics analysis of 100 HP HTS synchronous motor in 21st Century Frontier Project, Korea", *IEEE trans. Appl. Superconductivity*, Vol. 13, pp. 2197-2200.
- [34] S.-I. Han, I. Muta, T. Hoshino, and T. Nakamura (2004) "An approach of optimal design of HTS synchronous motor using genetic algorithm," *IEEE trans. Appl. Superconductivity*, Vol. 14, pp. 896-899.
- [35] Stephen Chapman (2005) "*Electric Machinery Fundamentals*", McGrawHill, Aus.4.
- [36] H. Kim, Y. Yoon, Y. Kwon, Y. Kim, S. Lee, J. Hong, *et al.* (2009) "Design of damper to protect the field coil of an HTS synchronous motor," *IEEE trans. Appl. Superconductivity*, Vol. 19, pp. 1683-1686.

-
-
- [37] A. Darabi and C. Tindall (2004) "Damper cages in genset alternators: FE simulation and measurement", *Energy Conversion, IEEE Trans*, Vol. 19, pp. 73-80.
- [38] S. S. Kalsi (2011) "*Applications of high temperature superconductors to electric power equipment*": John Wiley & Sons.
- [39] T. Suryanarayana, J. Bhattacharya, K. Raju, and D. A. Prasad (1997) "Development and performance testing of a 200 kVA damperless superconducting generator", *Energy Conversion, IEEE Trans*, Vol. 12, pp. 330-336.
- [40] T. Nakamura, H. Miyake, Y. Ogama, G. Morita, I. Muta, and T. Hoshino (2006) "Fabrication and characteristics of HTS induction motor by the use of Bi-2223/Ag squirrel-cage rotor", *IEEE trans. Appl. Superconductivity* , Vol. 16, pp. 1469-1472.
- [41] X. Li, Y. Zhou, L. Han, D. Zhang, J. Zhang, Q. Qiu, *et al.* (2011) "Design of a high temperature superconducting generator for wind power applications", *IEEE trans. Appl. Superconductivity*, Vol. 21, pp. 1155-1158.
- [42] E. Pollard (1932) "Calculation of no-load damper-winding loss in synchronous machines", *IEEE. Electrical Engineering*, Vol. 51, pp. 46-46.
- [43] J. Walker (1947) "Parasitic losses in synchronous-machine damper windings", *Electrical Engineers-Part II: Power Engineering, Journal of the Institution of*, Vol. 94, pp. 13-25.
- [44] A. Hughes and T. Miller (1977) "Analysis of fields and inductances in air-cored and iron-cored synchronous machines", *Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of*, Vol. 124, pp. 121-126.
- [45] P. Elhaminia, M. Yazdanian, M. R. Zolghadri, and M. Fardmanesh (2015) "Optimal Electromagnetic Design of a Nonsalient Magnetic-Cored Superconducting Synchronous Machine Using Genetic Algorithm ", *IEEE trans. Appl. Superconductivity*, Vol. 25, pp. 1-9.
- [46] J. Pyrhönen, T. Jokinen, and V. Hrabovcová (2008) " *Design of Rotating Electrical Machine* ", John Wiley & Sons.
- [47] T. A. Lipo (2004) "*Introduction to AC machine design*": Wisconsin Power Electronics Research Center, University of Wisconsin.
- [48] V.S.V ysotsky (2001) " *Quench Development Analysis in HTSC Coils by Use of the Universal Scaling Theory*", *IEEE trans. Appl. Superconductivity*, Vol. 11, No 1, Mar 2001

Abstract

Superconducting synchronous machines have different structures that the most common type consists of a rooming stator core with the regular copper coils, and cold-core rotor with superconducting coils. In this structure, for stay on the superconducting mode of the rotor coil, some troublemaker factors such as the harmonics of the stator field and air gap field distortions especially in the case of transient state exist. So for solving these problems, a conductive shield which covering core and rotor coil is provided to eliminate the field distortion on the rotor. Due to complex topology of the magnetic circuit of electric machine, the accurate calculation of flux linkage of the damper layer is very difficult or impossible by analytical methods. So the most precise and practical solution for calculation of the current distribution in damper shield, is utilizing a numerical method such as the finite element method. Thickness of damper shield, with a preliminary argument, usually is a percentage of the influence depth of the stator magnetic field in steady state while stay on the superconducting mode of coil rotor in transient state is more important, and for determining the thickness of damper shield, accurate analysis of machine performance in transient conditions is required. Therefore, to solve the problem of determining the thickness of damper shield, performance characteristics of a superconducting synchronous machine in transient state is reviewed by 2-D modeling of machine by utilizing transient FEM capability of a finite element software. in this thesis, analysis of effect of different thicknesses damper shield on superconductor synchronous machine treatment with study of characteristics machine performance and finally by showing eddy current density colored distribution on the surface of conductive damper shield with purpose of diagnosis influence depth of magnetic field, optimal design of electro-magnetic damper shield, for the first time, is determined by considering the different positions for damper layer in air-gap. Comparing the results of this method, with the previous studies represent an acceptable accuracy. JMAG Designer software is used for finite element modeling.

Keywords:

Superconducting Synchronous Machine, Electromagnetic Damper Shield, Optimal Design, Analysis of Finite Element, Characteristics Performance, Dynamics Transient



Faculty of Electrical Engineering and Robotic

M.Sc. Thesis in Power Electronic and Machine Engineering

Optimal Design of Damper Shield for a Superconducting Synchronous Machine

By: Ma'soume Mohammadi

Supervisor:

Dr. Ahmad Darabi

Advisor:

Dr. Amir Hassannia

February 2016