



دانشکده مهندسی برق و رباتیک  
گروه برق - قدرت

# مدلسازی، طراحی و تحلیل عملکرد یک ماشین

## سنکرون ابررسانا

امیر حسن نیا خیبری

استاد راهنما:

دکتر احمد دارابی

استاد مشاور:

دکتر محمد ابراهیم قاضی

خرداد ماه ۱۳۹۳

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک  
گروه برق - قدرت

## مدلسازی، طراحی و تحلیل عملکرد یک ماشین

### سنکرون ابررسانا

دانشجو: امیر حسن نیا خیبری

استاد راهنما:

دکتر احمد دارابی

استاد مشاور:

دکتر محمد ابراهیم قاضی

رساله دکتری جهت اخذ درجه دکتری

خرداد ماه ۱۳۹۳



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۱۲

باسمه تعالی

صورت جلسه دفاع از رساله دکتری (Ph.D)

شماره: ۱۱۷۴، آ.ع.

تاریخ: ۹۳، ۳، ۳۱

ویرایش: —

بدینوسیله گواهی می شود آقای/خانم ابرحسین نبی خیری دانشجوی دکتری رشته مهندسی برق قدرت به شماره

دانشجویی ۸۸۱۸۴۹۵ ورودی سال ۸۸ در تاریخ ۹۳، ۲، ۲۸ از رساله خود با عنوان:

مدلسازی، طراحی و تحلیل عملکرد یک ماشین سنکرون ابر رسانا

دفاع و با اخذ نمره ۱۸، ۶۵ به درجه: دکتری نائل گردید.

بسیار خوب

- الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰
- ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۷
- ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹ - ۱۵
- د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد
- ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
	دکتر احمد ذابین	استاد/ اساتید راهنما	رئیس داوران	
	دکتر محمد ابراهیم قاضی دکتر	مشاور / مشاورین	دانشیار	
	دکتر حواری فیض	استاد مدعو داخلی / خارجی	استاد	
	دکتر مهدی باخترار	استاد مدعو داخلی / خارجی	استادیار	
	دکتر امید رضا مفروضی	استاد مدعو داخلی / خارجی	استادیار	
	دکتر امین حاجی زاده	سرپرست ( نماینده ) تحصیلات تکمیلی دانشکده	استادیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم بعمل آید.

دانشکده برق و توانایی  
تاریخ و امضاء:  
دانشگاه مازندران  
۹۳، ۳، ۳۱

رئیس دانشکده و رئیس هیأت داوران  
دانشگاه مازندران

## تشکر و قدردانی

بر خود لازم می‌دانم تا از راهنمایی‌های ارزشمند و بدون وقفه استاد عزیز و گرانقدر جناب آقای دکتر دارابی که مسئولیت راهنمایی این پایان‌نامه را متعهدانه قبول فرمودند و پیوسته از حمایت‌های علمی و معنوی ایشان بهره‌مند بوده‌ام، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم. همچنین از جناب آقای دکتر قاضی که مشاور اینجانب در طول انجام پایان‌نامه بودند، تشکر می‌نمایم. از تمامی اساتید و کارکنان دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نیز که از راهنمایی‌ها و حمایت‌های ایشان بهره‌مند بوده‌ام، تشکر می‌کنم. از پدر و مادر بزرگواری که دلسوزانه هر چه را داشتند فدا کردند تا به هر چه دارم برسم، قدردانی می‌کنم. از همسر عزیزم نیز که همراه من در تمامی مراحل انجام پایان‌نامه بود، تشکر ویژه دارم.

## تعهد نامه

اینجانب **امیر حسن نیا خیبری** دانشجوی دوره دکتری رشته **برق- قدرت** دانشکده **مهندسی برق و رباتیک** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **مدلسازی، طراحی و تحلیل عملکرد 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: ۱۳۹۳/۳/۱

امیر حسن نیا خیبری

### 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:

ابرسانایی به معنای صفر شدن مقاومت الکتریکی و بروز رفتارهای مغناطیسی ویژه در بعضی مواد است هنگامی که دمای آنها تا کمتر از یک مقدار بحرانی، کاهش یابد. ابرساناها می‌توانند چگالی جریان نسبتاً زیادی بدون تلفات اهمی داشته باشند. ماشین‌های الکتریکی که با استفاده از سیم‌پیچ‌های ابرسانا ساخته می‌شوند، دارای حجم و وزن کمتر و راندمان بیشتری نسبت به ماشین‌های الکتریکی معمولی هستند و از این رو برای صنایع حمل و نقل و پیشران‌های الکتریکی مناسب می‌باشند. در این رساله برای نخستین بار ساختار جدیدی از یک موتور ابرسانای سنکرون برای پیشران دریایی ارائه می‌شود. با ارائه یک الگوریتم طراحی جدید، یک نمونه موتور ابرسانای ۲/۵ مگاوات با سرعت اسمی ۲۲۰ دور بر دقیقه، با ساختار پیشنهادی، طراحی می‌شود. مشخصات عملکرد این ماشین در شرایط بی‌باری و تحت بار با استفاده از روش اجزای محدود مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته و دقت الگوریتم طراحی و صحت عملکرد ماشین تایید می‌شود. همچنین اصول کلی طراحی سیستم سردکننده برای عملکرد پایدار سیم‌پیچ‌های ابرسانای ماشین مزبور نیز بیان می‌شود. سپس مسائل جانبی مرتبط با طراحی ماشین‌های ابرسانا از قبیل بهینه‌سازی شکل و بهبود جریان بحرانی سیم‌پیچ‌های ابرسانا، امکان حذف هسته مغناطیسی ماشین و تعیین فرکانس بهینه طراحی، مطرح شده و برای ساختار پیشنهادی ماشین ابرسانا، مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. نتایج بررسی‌های اخیر منجر به بهبود بعضی مشخصات ماشین بویژه حجم، وزن و راندمان ماشین می‌شود. ارزیابی کلی ماشین طراحی شده با ساختار پیشنهادی، نشان می‌دهد این موتور می‌تواند یکی از مناسب‌ترین انتخاب‌های ممکن برای پیشران‌های الکتریکی باشد.

**واژه‌های کلیدی:** موتور ابرسانا، موتور رانش لبه‌ای، طراحی، بهینه‌سازی.

## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- [1] Amir Hassannia and Ahmad Darabi, “*Design and Performance Analysis of Superconducting Rim-Driven Synchronous Motors for Marine Propulsion*”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity (ISSN: 1051-8223), Vol. 24, No. 1, p. 5200207, February 2014.  
(ISI, IF: 1.199)
- [2] Amir Hassannia, Ahmad Darabi and Mohamad-Ebrahim Ghazi, “*Comparison of cored and rotor coreless superconducting motors for rim-driven marine propulsion*”, Accepted for publication in: Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences (ISSN: 1300-0632).  
(ISI, IF: 0.568)
- [3] Amir Hassannia, Ahmad Darabi and Mohamad-Ebrahim Ghazi, “*An Innovative Design of Field Winding of a Superconducting Rim-Driven Motor*”, the revised version is under review in: Journal of Electrical Engineering & Technology (ISSN: 1975-0102).  
(ISI, IF: 0.725)
- [4] Amir Hassannia, Ahmad Darabi and Mohamad-Ebrahim Ghazi, “*Optimal Frequency Selection for Designing a Superconducting Rim-Driven Propulsion Motor*”, Accepted for publication in: Journal of Electrical Engineering (ISSN: 1582-4594).  
(SCOPUS, IF: 0.967)
- [5] Amir Hassannia, Ahmad Darabi and Mohamad-Ebrahim Ghazi, “*Design and Performance Analysis of a New Hydropower Superconducting Synchronous Generator*”, Accepted for publication in: Journal of Power and Energy Engineering (ISSN: 2327-5901).



## فهرست مطالب

- ۱- مقدمه..... ۱
- ۲- پدیده ابرسانایی و ماشین‌های ابرسانا..... ۷
- ۲-۱. پدیده ابرسانایی در دمای زیاد ..... ۸
- ۲-۲. ابرساناهای نوع ۱ ..... ۸
- ۲-۲-۱- مقاومت AC ..... ۹
- ۲-۲-۲- مغناطیس‌زدایی کامل (اثر مایسنر)..... ۱۰
- ۲-۳. ابرساناهای نوع ۲ ..... ۱۲
- ۲-۳-۱- مغناطیس‌کنندگی ..... ۱۳
- ۲-۳-۲- میدان‌های بحرانی بالا و پایین ..... ۱۵
- ۲-۳-۳- حالت نیمه‌ابرسانایی ..... ۱۶
- ۲-۳-۴- مکانیزم نفوذ شار مغناطیسی ..... ۱۸
- ۲-۳-۵- جریان بحرانی در مواد HTS ..... ۲۰
- ۲-۴. مواد HTS پیشرفته..... ۲۱
- ۲-۴-۱- ابرساناهای BSCCO ..... ۲۲
- ۲-۴-۲- ابرساناهای YBCO ..... ۲۳
- ۲-۴-۳- ابرساناهای REBCO ..... ۲۵

- ۵-۲. کاربردهای ابرساناها در ماشین‌های الکتریکی ..... ۲۹
- ۱-۵-۲- موتورهای سنکرون ۵ و ۳۶ مگاوات ..... ۳۰
- ۲-۵-۲- موتور DC هم‌قطبی ..... ۳۲
- ۳-۵-۲- ماشین سنکرون ابرسانای ۴۰۰ کیلووات زیمنس ..... ۳۳
- ۴-۵-۲- ماشین سنکرون ابرسانای ۴ مگاوات زیمنس ..... ۳۴
- ۵-۵-۲- موتور سنکرون ابرسانای شار محوری ۱۲/۵ کیلووات ..... ۳۵
- ۶-۵-۲- موتور سنکرون شار شعاعی ابرسانای ۱۵ کیلووات ..... ۳۶
- ۷-۵-۲- موتور القایی ابرسانا ..... ۳۶
- ۳- طراحی و تحلیل عملکرد موتور ابرسانای سنکرون ..... ۳۹**
- ۱-۳. انتخاب ساختار موتور ..... ۴۰
- ۲-۳. الگوریتم کلی طراحی ..... ۴۴
- ۳-۳. مشخصات و محدودیت‌های ماشین ..... ۴۵
- ۴-۳. طراحی ماشین ..... ۴۸
- ۱-۴-۳- انتخاب پارامترهای اساسی ماشین ..... ۴۸
- ۲-۴-۳- طراحی اجزای فاصله هوایی ..... ۵۰
- ۳-۴-۳- طراحی روتور ..... ۵۵
- ۴-۴-۳- طراحی استاتور ..... ۶۴
- ۵-۴-۳- طراحی طول محوری ماشین ..... ۶۸
- ۵-۳. ارزیابی مقدماتی طرح ..... ۷۱

- ۶-۳. ارزیابی طرح با روش اجزای محدود ..... ۷۴
- ۳-۶-۱- تحلیل عملکرد ماشین در شرایط بی‌باری ..... ۷۶
- ۳-۶-۲- تحلیل عملکرد ماشین در شرایط تحت بار ..... ۷۹
- ۳-۷. ملاحظات سیستم درایو ..... ۸۱
- ۳-۸. مقایسه با موتور مشابه غیرابرسانا ..... ۸۴
- ۴- طراحی سیستم سردکننده موتور ابرسانا ..... ۸۷
- ۴-۱. متداول‌ترین سیستم‌های سردکننده ماشین‌های ابرسانا ..... ۸۸
- ۴-۱-۱- سیستم دوفازی ترموسیفون ..... ۸۹
- ۴-۱-۲- سیستم دوفازی تبخیری باز ..... ۹۱
- ۴-۱-۳- سیستم دوفازی تبخیری لوله‌ای ..... ۹۲
- ۴-۱-۴- سیستم تک‌فازی نیتروژن مایع ..... ۹۳
- ۴-۲. طراحی سیستم سردکننده برای ماشین مورد مطالعه ..... ۹۴
- ۴-۳. ملزومات سیستم سردکننده ..... ۱۰۳
- ۴-۴. تحلیل عملکرد سیستم سردکننده ..... ۱۰۴
- ۵- طراحی ماشین ابرسانای بدون هسته ..... ۱۰۵
- ۵-۱. انتخاب ساختار مناسب ..... ۱۰۶
- ۵-۲. طراحی ماشین بدون هسته ..... ۱۰۷
- ۵-۳. تحلیل عملکرد ماشین بدون هسته ..... ۱۱۰
- ۵-۴. مقایسه ماشین معمولی و ماشین بدون هسته ..... ۱۱۳

۱۱۵	۶- بهینه‌سازی شکل و بهبود جریان بحرانی سیم‌پیچ ابررسانا.....
۱۲۱	۶-۱. بررسی روش‌های کاهش میدان عمودی.....
۱۲۳	۶-۲. ارائه روشی جدید برای کاهش میدان عمودی.....
۱۲۹	۷- انتخاب بهینه فرکانس طراحی.....
۱۳۰	۷-۱. ساختار موتور و سیستم تغذیه.....
۱۳۱	۷-۲. طراحی موتور در فرکانس‌های مختلف.....
۱۳۱	۷-۲-۱- انتخاب مناسب پارامترهای اختیاری.....
۱۳۴	۷-۲-۲- محاسبه ضریب نشت شار مغناطیسی.....
۱۳۷	۷-۳. تلفات متاثر از فرکانس در بخش‌های مختلف ماشین.....
۱۳۷	۷-۳-۱- تلفات نیروی مقاوم آب.....
۱۳۹	۷-۳-۲- تلفات هسته استاتور.....
۱۴۰	۷-۳-۳- تلفات اهمی استاتور.....
۱۴۱	۷-۳-۴- تلفات سوئیچینگ سیستم درایو.....
۱۴۲	۷-۴. طراحی موتور ابررسانای سنکرون در فرکانس بهینه.....
۱۴۵	۸- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری.....
۱۴۸	۸-۱. پیشنهادات.....
۱۵۱	مراجع.....

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲: شدت میدان بحرانی و دمای بحرانی فلزات LTS..... ۹
- جدول ۲-۲: مشخصات چند نمونه ابررسانای نوع دوم ..... ۱۶
- جدول ۳-۲: مشخصات بعضی سیم‌های ابررسانای سوپرپاور ..... ۲۹
- جدول ۱-۳: مشخصات ماشین مورد نظر ..... ۴۶
- جدول ۲-۳: ضرایب تضعیف دامنه هارمونیک‌های میدان فاصله هوایی ..... ۶۷
- جدول ۳-۳: مقایسه موتور  $2.5^{MW}$  و  $220^{rpm}$  ابررسانای طراحی شده با موتور PM مشابه ..... ۸۵
- جدول ۱-۴: بار حرارتی قسمت‌های مختلف سیستم ..... ۹۷
- جدول ۱-۵: مقایسه موتور  $2.5^{MW}$  و  $220^{rpm}$  دارای هسته و بدون هسته ..... ۱۱۳
- جدول ۱-۷: تاثیر فرکانس بهینه بر شاخص‌های عملکرد موتور مورد مطالعه ..... ۱۴۳

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: تغییرات مقاومت الکتریکی هادی‌های معمولی و HTSها ..... ۲
- شکل ۱-۲: سیر زمانی افزایش دمای بحرانی ابررساناها و تغییرات سیستم‌های سردکننده ..... ۳
- شکل ۱-۳: کاربرد ابررسانا بعنوان کابل‌های زیرزمینی انتقال انرژی ..... ۳
- شکل ۱-۲: گذار به فاز ابررسانایی: الف) در یک هادی کامل، ب) در ابررسانا ..... ۱۱
- شکل ۲-۲: تغییرات میدان مغناطیسی در اطراف ابررسانا ..... ۱۲
- شکل ۲-۳: مغناطیس‌شوندگی یک ابررسانای نوع ۲ ایده‌آل ..... ۱۳
- شکل ۲-۴: مغناطیس‌شوندگی یک ابررسانای نوع ۲ واقعی ..... ۱۴
- شکل ۲-۵: مقایسه مشخصه مغناطیسی ابررساناهای نوع ۱ و نوع ۲ ..... ۱۶
- شکل ۲-۶: حالت نیمه‌ابررسانایی ..... ۱۷
- شکل ۲-۷: اولین عکس منتشر شده از شبکه فلکسون ..... ۱۸
- شکل ۲-۸: مکانیزم ایجاد شار مغناطیسی در ابررساناهای نوع ۲ ..... ۱۹
- شکل ۲-۹: مشخصه E-I دو ماده ابررسانا ..... ۲۱
- شکل ۲-۱۰: ساختار یک سلول واحد از ابررسانای  $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_x$  ..... ۲۳
- شکل ۲-۱۱: ساختار یک سلول واحد از ابررسانای  $YBa_2Cu_3O_x$  ..... ۲۳
- شکل ۲-۱۲: ساختار کلی یک نوار ابررسانای YBCO ..... ۲۴
- شکل ۲-۱۳: نوار ابررسانای YBCO ..... ۲۵
- شکل ۲-۱۴: ساختار سیم ابررسانای SCS4050 ساخت شرکت سوپرپاور ..... ۲۶
- شکل ۲-۱۵: یک نوع سیم ابررسانا ساخت شرکت سوپرپاور ..... ۲۶
- شکل ۲-۱۶: تغییرات جریان بحرانی لایه ابررسانا بر حسب ضخامت آن ..... ۲۷
- شکل ۲-۱۷: جریان بحرانی چند نوع ابررسانای REBCO بر حسب اندازه میدان مغناطیسی ..... ۲۸

- شکل ۲-۱۸: تغییرات جریان بحرانی سیم‌ابرسانا با تغییر زاویه میدان مغناطیسی ..... ۲۸
- شکل ۲-۱۹: ساختار متداول یک موتور ابرسانای سنکرون ..... ۳۰
- شکل ۲-۲۰: نمای کلی موتور سنکرون ابرسانای ۵ مگاوات ..... ۳۱
- شکل ۲-۲۱: نمای کلی استاتور و روتور موتور سنکرون ابرسانای ۳۶/۵ مگاوات ..... ۳۲
- شکل ۲-۲۲: ساختار کلی موتور DC هم‌قطبی ..... ۳۳
- شکل ۲-۲۳: ساختار نمونه عملی موتور DC هم‌قطبی ..... ۳۳
- شکل ۲-۲۴: ماشین ۴۰۰ کیلووات زیمنس ..... ۳۴
- شکل ۲-۲۵: نمای کلی ژنراتور ۴ مگاوات زیمنس و سیستم سردکننده آن ..... ۳۴
- شکل ۲-۲۶: موتور ابرسانای شار محوری ۱۲/۵ کیلووات ..... ۳۵
- شکل ۲-۲۷: ساختار داخلی موتور ابرسانای شار محوری ۱۲/۵ کیلووات ..... ۳۶
- شکل ۲-۲۸: موتور ابرسانای سنکرون ۱۵ کیلووات ..... ۳۶
- شکل ۲-۲۹: ساختار روتور قفسی ابرسانا ..... ۳۷
- شکل ۲-۳۰: روتور ابرسانا و کل موتور ..... ۳۷
- شکل ۲-۳۱: مقایسه مشخصه مکانیکی موتور القایی ابرسانا و موتور معمولی ..... ۳۸
- شکل ۳-۱: سه نمونه سیستم رانش محور گرا ..... ۴۰
- شکل ۳-۲: ساختار کلی سیستم رانش مستقیم ..... ۴۱
- شکل ۳-۳: ساختار کلی سیستم رانش لبه‌ای ..... ۴۲
- شکل ۳-۴: الگوریتم کلی طراحی ماشین ..... ۴۶
- شکل ۳-۵: فرآیند تکرار طراحی برای تعیین مقدار مجاز ضریب بارگذاری الکتریکی ..... ۵۰
- شکل ۳-۶: ساختار کلی ماشین ..... ۵۰
- شکل ۳-۷: چند نمونه سیم‌های Litz ..... ۵۳
- شکل ۳-۸: ساختار کلی یک قطب ماشین ..... ۵۵

- شکل ۳-۹: فرآیند تکرار برای تعیین ارتفاع قطب و تعداد دور سیم پیچ ..... ۵۷
- شکل ۳-۱۰: توزیع شار و مدار معادل مغناطیسی در فاصله هوایی ..... ۵۸
- شکل ۳-۱۱: زاویه بین میدان مغناطیسی و راستای عمود بر سطح نوار ابرسانا ..... ۵۹
- شکل ۳-۱۲: تغییرات جریان بحرانی چند نمونه سیم REBCO نسبت به زاویه میدان مغناطیسی ..... ۶۰
- شکل ۳-۱۳: تغییرات جریان بحرانی سیم ابرسانا با تغییر اندازه میدان مغناطیسی ..... ۶۱
- شکل ۳-۱۴: پنیک‌های ابرسانا ..... ۶۲
- شکل ۳-۱۵: نگه‌دارنده‌های سیم پیچ‌های استاتور ..... ۶۴
- شکل ۳-۱۶: نقشه سیم پیچی استاتور ..... ۶۷
- شکل ۳-۱۷: دیاگرام برداری موتور سنکرون در حالت پسفاز ..... ۶۹
- شکل ۳-۱۸: دیاگرام برداری موتور سنکرون در ضریب قدرت واحد ..... ۷۰
- شکل ۳-۱۹: نمای کلی هسته و سیم پیچ ابرسانای ماشین ..... ۷۱
- شکل ۳-۲۰: مشخصه مغناطیسی هسته ماشین ..... ۷۲
- شکل ۳-۲۱: مش بندی ماشین طراحی شده توسط نرم افزار ..... ۷۵
- شکل ۳-۲۲: توزیع چگالی شار مغناطیسی ماشین در شرایط بی باری ..... ۷۶
- شکل ۳-۲۳: شار عبوری از یوغ روتور و استاتور ..... ۷۷
- شکل ۳-۲۴: جهت عمود بر سطح سیم پیچ ابرسانا در ماشین مورد مطالعه ..... ۷۷
- شکل ۳-۲۵: توزیع مولفه عمودی چگالی شار مغناطیسی روی سیم پیچ ابرسانا ..... ۷۷
- شکل ۳-۲۶: ولتاژ القایی در مدار آرمیچر ناشی از جریان تحریک ..... ۷۸
- شکل ۳-۲۷: جریان اعمال شده به استاتور در شرایط اسمی ..... ۷۹
- شکل ۳-۲۸: گشتاور القایی روتور در بار اسمی ..... ۸۰
- شکل ۳-۲۹: توزیع چگالی شار مغناطیسی ماشین در شرایط بار اسمی ..... ۸۰
- شکل ۳-۳۰: ساختار کلی اینورتر سه فاز ..... ۸۱



- شکل ۳-۳۱: ساختار اینورتر سه فاز سه سطحی ..... ۸۲
- شکل ۳-۳۲: محدوده عملکرد بعضی سوئیچ‌های متداول ..... ۸۳
- شکل ۳-۳۳: سوئیچ IGBT مدل 2MBI450VN-170-50 ..... ۸۴
- شکل ۴-۱: ساختار کلی سیستم ترموسیفون ..... ۸۹
- شکل ۴-۲: اتصال کندانسور ثابت و روتور چرخان ..... ۹۰
- شکل ۴-۳: توزیع سیال در سطح داخلی تبخیرکننده ..... ۹۰
- شکل ۴-۴: ساختار کلی سیستم تبخیری باز ..... ۹۱
- شکل ۴-۵: ساختار کلی سیستم تبخیری لوله‌ای ..... ۹۲
- شکل ۴-۶: ساختار کلی سیستم تکفازی نیتروژن مایع با سردکننده فرعی ..... ۹۳
- شکل ۴-۷: قسمت‌های اصلی سیستم سردکننده نیتروژن مایع ..... ۹۴
- شکل ۴-۸: الگوریتم کلی طراحی سیستم سردکننده ..... ۹۵
- شکل ۴-۹: دمای طراحی شده نقاط مختلف حلقه برودتی ..... ۹۸
- شکل ۴-۱۰: مشخصه عملکرد میرد مدل AL300 ..... ۹۹
- شکل ۴-۱۱: رابط فایبرگلاس برای ایزولاسیون حرارتی ..... ۱۰۳
- شکل ۴-۱۲: توزیع دما در سطح مقطع هسته روتور ..... ۱۰۴
- شکل ۴-۱۳: توزیع دما در سطح مقطع سیم‌پیچ ابررسانا ..... ۱۰۴
- شکل ۵-۱: ساختار کلی ماشین ابررسانای بدون هسته ..... ۱۰۶
- شکل ۵-۲: قسمت‌های اصلی هر قطب روتور ..... ۱۱۱
- شکل ۵-۳: موقعیت لوله‌های سردکننده ..... ۱۱۱
- شکل ۵-۴: نمای کلی هسته استاتور و روتور ماشین ابررسانای بدون هسته ..... ۱۱۱
- شکل ۵-۵: توزیع چگالی شار مغناطیسی در قسمت‌های مختلف ماشین ..... ۱۱۲
- شکل ۵-۶: توزیع مولفه عمود بر سطح چگالی شار مغناطیسی در سیم‌پیچ ابررسانا ..... ۱۱۲

- شکل ۶-۱: سطح مقطع سیم پیچ ابرسانی یک ژنراتور ۳ کیلووات ..... ۱۱۶
- شکل ۶-۲: سطح مقطع بهینه سازی شده سیم پیچ ابرسانی ژنراتور ۳ کیلووات ..... ۱۱۶
- شکل ۶-۳: موقعیت صفحه فرومغناطیسی نسبت به سیم پیچ ابرسانا ..... ۱۱۷
- شکل ۶-۴: خطوط شار مغناطیسی، (a) بدون صفحه، (b) با صفحه فرومغناطیس ..... ۱۱۷
- شکل ۶-۵: تعریف متغیرهای بهینه سازی (نقاط روی اضلاع سطح مقطع سیم پیچ) ..... ۱۱۸
- شکل ۶-۶: شکل بهینه هر یک از اضلاع سطح مقطع سیم پیچ ابرسانا ..... ۱۱۸
- شکل ۶-۷: شکل بهینه اضلاع سطح مقطع سیم پیچ با قيود مختلف ..... ۱۱۸
- شکل ۶-۸: بهینه سازی شکل سیم پیچ موتور با شکل اولیه: (a) نیم دایره، (b) متوازی الاضلاع ..... ۱۱۹
- شکل ۶-۹: بهینه سازی شکل سیم پیچ موتور برای دستیابی به حداکثر شار پیوندی ..... ۱۱۹
- شکل ۶-۱۰: ساختار روتور و موقعیت منحرف کننده های شار در ماشین ۱۰۰ کیلووات ..... ۱۲۰
- شکل ۶-۱۱: توزیع مولفه عمودی چگالی شار مغناطیسی با بهینه سازی شکل ..... ۱۲۱
- شکل ۶-۱۲: توزیع مولفه عمودی چگالی شار مغناطیسی با استفاده از منحرف کننده شار ..... ۱۲۲
- شکل ۶-۱۳: توزیع مولفه عمودی شار با جابجایی بخشی از سیم پیچ ..... ۱۲۳
- شکل ۶-۱۴: توزیع مولفه عمودی شار با جابجایی بخش هایی از سیم پیچ ..... ۱۲۴
- شکل ۶-۱۵: کاهش میدان عمودی با استفاده از AFD ..... ۱۲۵
- شکل ۶-۱۶: موقعیت AFD های پیشنهادی برای ماشین مورد مطالعه ..... ۱۲۶
- شکل ۶-۱۷: توزیع مولفه عمودی شار با استفاده از مجموعه AFD ..... ۱۲۶
- شکل ۷-۱: ساختار کلی موتور و سیستم تغذیه اینورتری ..... ۱۳۰
- شکل ۷-۲: مقادیر حداکثر و بهینه چگالی شار فاصله هوایی در فرکانس های مختلف ..... ۱۳۲
- شکل ۷-۳: طول محوری و ضخامت شعاعی ماشین در فرکانس های مختلف ..... ۱۳۳
- شکل ۷-۴: مدار معادل مغناطیسی ماشین رانش لبه ای ..... ۱۳۴
- شکل ۷-۵: مقدار ضریب نشت شار با استفاده از رابطه تحلیلی  $k_{leak} = 0.629$  ..... ۱۳۵

- شکل ۶-۷: مقدار ضریب نشت شار با استفاده از رابطه تحلیلی  $k_{leak} = 0.566$  ..... ۱۳۵
- شکل ۷-۷: مقدار ضریب نشت شار با استفاده از رابطه تحلیلی  $k_{leak} = 0.681$  ..... ۱۳۶
- شکل ۸-۷: مقدار ضریب نشت شار با استفاده از رابطه تحلیلی  $k_{leak} = 0.803$  ..... ۱۳۶
- شکل ۹-۷: رابطه ضریب نیروی مقاوم و عدد رینولدز برای دو شکل نمونه ..... ۱۳۸
- شکل ۱۰-۷: تلفات نیروی مقاوم آب در فرکانس‌های مختلف ..... ۱۳۹
- شکل ۱۱-۷: چگالی تلفات هسته 65JN1600 بر حسب فرکانس و چگالی شار ..... ۱۳۹
- شکل ۱۲-۷: تلفات هسته استاتور در فرکانس‌های مختلف ..... ۱۴۰
- شکل ۱۳-۷: تلفات توان هنگام تغییر وضعیت سوئیچ ..... ۱۴۱
- شکل ۱۴-۷: تلفات سوئیچینگ در فرکانس‌های مختلف ..... ۱۴۲
- شکل ۱۵-۷: تغییرات تلفات بخش‌های مختلف موتور ابرسانا و سیستم تغذیه ..... ۱۴۳

## فصل اول

### مقدمه

یکی از بزرگترین رویدادهای صنعت برق در قرن بیستم، کشف پدیده ابررسانایی است که در سال ۱۹۱۱ توسط کامرلینگز اوونز<sup>۱</sup> معرفی شد [۱]. بطور خلاصه می‌توان ابررسانایی را بصورت ناپدید شدن مقاومت الکتریکی در دماهای بسیار کم تعریف کرد. صفر شدن این مقاومت در دمای صفر مطلق، از سال‌ها قبل، یک پدیده شناخته‌شده بود، اما محدود شدن مقاومت الکتریکی به صفر در دماهای نزدیک به صفر مطلق، برای اولین بار در سال ۱۹۱۱ مشاهده شد. در آن زمان اوونز توانست با استفاده از هلیوم مایع به دمایی در حدود ۱ درجه کلوین برسد. او مشاهده کرد روند کاهش هموار و تدریجی مقاومت الکتریکی جیوه با کاهش دما، در یک دمای مشخص (حدود ۴ کلوین) ناگهان تغییر کرده و به صفر می‌رسد. این دما امروزه با عنوان دمای بحرانی<sup>۲</sup> ( $T_c$ ) شناخته می‌شود. بسیاری از مواد در دماهای کمتر از دمای بحرانی وارد حالت جدیدی با ویژگی‌های الکتریکی و مغناطیسی متفاوت می‌شوند که به آن فاز ابررسانایی<sup>۳</sup> گفته می‌شود.

---

<sup>1</sup> Kamerlings Onnes

<sup>2</sup> Critical temperature

<sup>3</sup> Superconducting state