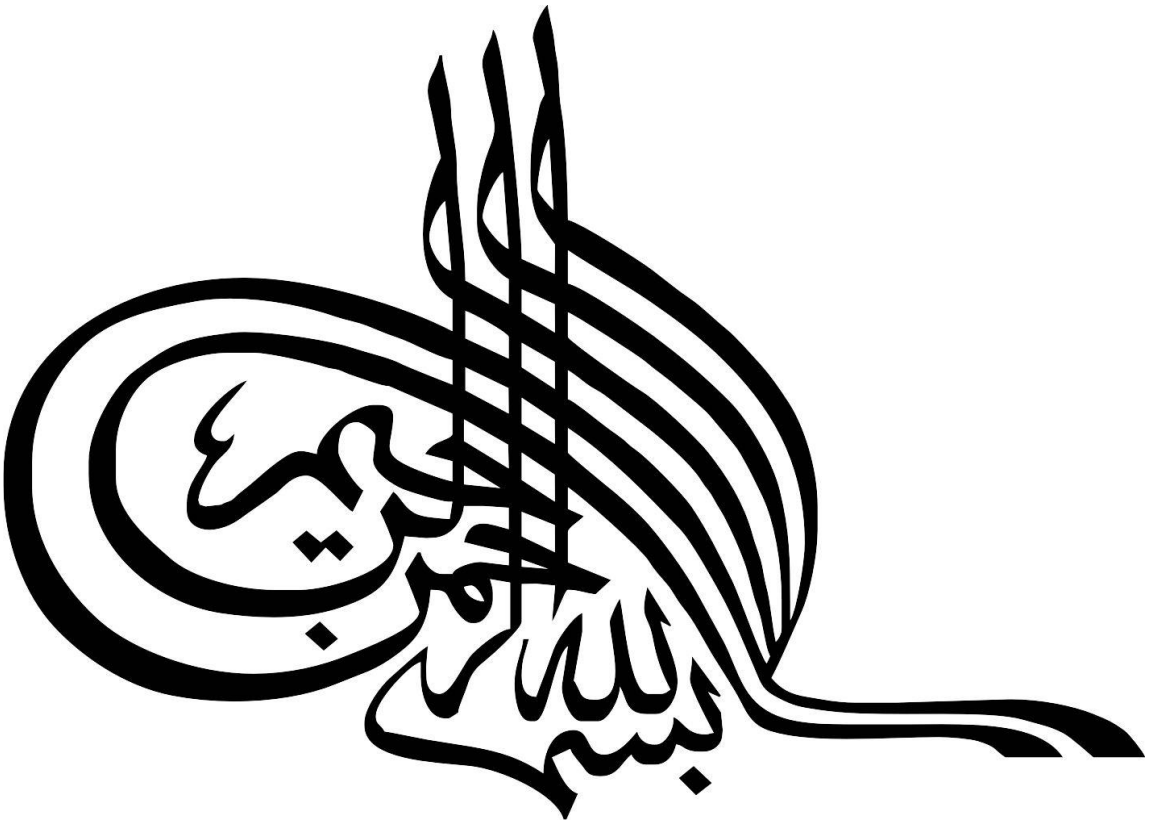
بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی برق و رباتیک

گروه قدرت

بررسی عوامل ساختاری مؤثر بر روی شکل موج ولتاژ داخلی و تغییرات اندوکتانس سری یک ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار متقاطع

دانشجو : علی علاءالدینی

استاد راهنما:

دکتر احمد دارابی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۱۳۹۲

شماره : ۱۱۳۸ /آ.ت.ب
تاریخ : ۹۲/۱۱/۳۰
ویرایش : ------

بسمه تعالی

مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای :

علی علاءالدینی رشته : **برق** گرایش : **قدرت**

تحت عنوان : **بررسی عوامل ساختاری مؤثر بر روی شکل موج ولتاژ داخلی و تغییرات اندوکتانس سری یک ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار متقاطع**

که در تاریخ **۹۲/۱۱/۳۰** با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است :

قبول (با درجه : عالی امتیاز ۱۹/۸۷) ☑ دفاع مجدد ☐ مردود ☐

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

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

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام ونام خانوادگی	مرتبهٔ علمی	امضـــاء
۱ـ استاد راهنما	احمد دارابی	دانشیار	
۲ـ استاد مشاور	—	—	
۳ـ نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	مرتضی رحیمیان	استادیار	
۴ـ استاد ممتحن	امیررضا معروض	استادیار	
۵ ـ استاد ممتحن	علی دستفال	استادیار	

رئیس دانشکده : علی دستفال

تقدیم به تمامی محققین دوستدار علم و دانش

آنچنان زندگی کن گویی که فردا خواهی مرد

آنچنان بیاموز گویی که تا ابد زنده خواهی ماند

ماهاتما گاندی

تقدیر و تشکر

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

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

- از **پدر دلسوز** و **مادر فداکارم**، *این دو معلم بزرگوار، که همواره بر کوتاهی و درشتی من قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت‌هایم گذشته‌اند. آن‌ها که در تمام عرصه‌های زندگی یار و یاوری بی چشم داشت برای من بوده‌اند و با حمایت‌های خود در محیطی مطلوب، آرامش روحی و آسایش فکری لازم را فراهم نمودند تا مراتب تحصیلی و نیز پایان‌نامه خود را به نحو احسن به اتمام برسانم؛*
- *از استاد شایسته، جناب آقای* **دکتر دارابی**، *که در کمال سعه‌صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه برای من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند؛*

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

علی علاءالدینی

بهمن ۱۳۹۲

تعهد نامه

اینجانب ..... علی علاء الدینی ..... دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته ..... برق قدرت .....

دانشکده ..... برق ..... دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه ..... بررسی عوامل ساختاری موثر بر روی شطل موج و تاثیر داخلی و تغییرات اندرکنش موج و سازه های متقاطع ..... تحت راهنمائی ..... دکتر احمد دلاری ..... متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا 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 ۹۲/۱۱/۳۰

امضای دانشجو علی علاء الدینی

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

در این پایان نامه تأثیر عوامل و پارامترهای ساختاری مهم در فرایند طراحی ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع قطب چنگالی بر روی عملکرد آنها مورد بررسی قرار گرفته است. این عوامل و پارامترها عبارتند از: تعداد فازها، طول و شکل فاصله هوایی، درصد پوشش روتور توسط دندانه‌های استاتور، نحوه قرار گیری فازها کنار هم، تعداد قطب‌ها، شکل کفشک قطب استاتور، مستقیم یا مورب بودن قطب‌های روتور، شکل متمرکزکننده شار روتور و نسبت کمان آهنربای دائم به کمان متمرکزکننده شار روتور. معیارهای مورد استفاده برای ارزیابی عملکرد این ماشین‌ها شامل گشتاور الکترومغناطیسی، گشتاور دندانه‌ای، تلفات آهن و شاخص‌های عملکرد دینامیکی گذرایی می‌شود. برای محاسبه این معیارها، شکل موج ولتاژ داخلی و اندوکتانس سیم پیچ آرمیچر به کمک تحلیل اجزای محدود بدست آمده و شکل موج جریان آرمیچر در شرایط عملکردی مختلف از طریق شبیه‌سازی دینامیکی گذرایی محاسبه می‌شود.

کلمات کلیدی:

ماشین شار متقاطع قطب چنگالی، تحلیل اجزاء محدود، شکل موج ولتاژ داخلی، تغییرات اندوکتانس سیم پیچ آرمیچر، رفتار دینامیکی گذرایی، گشتاور الکترومغناطیسی، گشتاور دندانه‌ای

فهرست عناوین

فصل۱: مقدمه ۱

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

۱-۲- اهداف پایان‌نامه و ضرورت انجام آن ۷

۱-۳- فصل‌بندی گزارش ۸

فصل۲: معرفی ماشین TFPM قطب چنگالی و عوامل ساختاری مؤثر در شاخص‌های عملکردی آن . ۹

۲-۱- معرفی ساختار TFPM قطب چنگالی ۱۰

۲-۲- ماشین TFPM قطب چنگالی مورد مطالعه ۱۳

۲-۳- پارامترهای ساختاری مؤثر در عملکرد ماشین ۱۴

۲-۳-۱- فاصله هوایی ۱۵

۲-۳-۲- درصد پوشش روتور توسط دندانه استاتور ۱۵

۲-۳-۳- نحوه قرارگیری فازها کنار هم ۱۶

۲-۳-۴- تعداد قطب‌ها ۱۶

۲-۳-۵- شکل کفشک قطب استاتور ۱۹

۲-۳-۶- نسبت کمان آهنربای دائم به کمان متمرکزکننده شار روتور ۱۹

۲-۳-۷- مستقیم یا مورب بودن قطب‌های روتور ۲۰

۲-۳-۸- تغییرات دیگر ۲۰

فصل۳: محاسبه و بررسی ولتاژ داخلی و تلفات آهن ماشین TFPM قطب چنگالی ۲۱

۳-۱- مقدمه ۲۲

۳-۲- نحوه تولید ولتاژ داخلی دلخواه در فرایند طراحی ۲۳

۳-۳- محاسبه تلفات در ماشین‌های الکتریکی ۲۵

۳-۴- بررسی تأثیر عوامل ساختاری بر روی ولتاژ داخلی و تلفات آهن ۲۶

۳-۴-۱- تأثیر فاصله هوایی ۲۶
۳-۴-۲- تأثیر درصد یا ضریب پوشش روتور توسط دندانه استاتور ۲۷
۳-۴-۳- تأثیر نحوه قرارگیری فازها کنار هم ۲۸
۳-۴-۴- تأثیر تعداد قطب‌ها ۲۹
۳-۴-۵- تأثیر شکل کفشک قطب استاتور ۳۱
۳-۴-۶- تأثیر نسبت کمان آهنربای دائم به کمان متمرکزکننده شار روتور ۳۲
۳-۴-۷- تأثیر مستقیم یا مورب بودن قطب‌های روتور ۳۳
۳-۵- عوامل مؤثر دیگر در شکل موج ولتاژ داخلی ۳۴
۳-۵-۱- تأثیر فرکانس بر روی شکل موج ولتاژ داخلی ۳۴
۳-۵-۲- گام‌هایی جهت دستیابی به ولتاژ داخلی سینوسی ۳۵
۳-۵-۲-۱- ولتاژ داخلی موتور مورد مطالعه ۳۵
۳-۵-۲-۲- اصلاح شکل موج ولتاژ داخلی موتور مورد مطالعه ۳۸
فصل۴: شبیه سازی، محاسبه و بررسی اندوکتانس ماشین TFPM قطب چنگالی و رفتار دینامیکی گذرایی ۴۳
۴-۱- مقدمه ۴۴
۴-۲- اندوکتانس ظاهری و دیفرانسیلی ۴۵
۴-۳- مؤلفه‌های شار در ماشین‌های مغناطیس دائم ۴۸
۴-۳-۱- مؤلفه مربوط به میدان تحریک روتور ۴۸
۴-۳-۲- مؤلفه مربوط به عکس‌العمل آرمیچر ۴۹
۴-۳-۳- مؤلفه مربوط به شارهای نشتی ۵۱
۴-۴- راکتانس سنکرون ۵۳
۴-۵- روش مورد استفاده برای محاسبه اندوکتانس‌ها ۵۳
۴-۵-۱- نحوه محاسبه اندوکتانس ظاهری ۵۴
۴-۵-۲- نحوه محاسبه اندوکتانس دیفرانسیلی ۵۴

۴-۶- شبیه‌سازی دینامیکی گذرایی به کمک سیمولینک ۵۶
۴-۷- بررسی تأثیر عوامل ساختاری بر روی اندوکتانس و شاخصه‌های عملکردی دینامیکی گذرایی ۶۱
۴-۷-۱- تأثیر فاصله هوایی ۶۱
۴-۷-۲- تأثیر درصد یا ضریب پوشش روتور توسط دندانه استاتور ۶۳
۴-۷-۳- تأثیر تعداد قطب‌ها ۶۴
۴-۷-۴- تأثیر شکل کفشک قطب استاتور ۶۸
۴-۷-۵- تأثیر نسبت کمان آهنربای دائم به کمان متمرکزکننده شار روتور ۷۱
۴-۷-۶- تأثیر مستقیم یا مورب بودن قطب‌های روتور ۷۲
۴-۸- عوامل مؤثر دیگر در شکل موج اندوکتانس ۷۳
فصل۵: گشتاور و ریپل گشتاور ماشین TFPM قطب چنگالی ۷۷
۵-۱- مقدمه ۷۸
۵-۲- مؤلفه‌های ریپل گشتاور ۷۸
۵-۲-۱- گشتاور متقابل ۷۸
۵-۲-۲- گشتاور رلوکتانسی ۷۹
۵-۲-۳- گشتاور دندانه‌ای ۸۰
۵-۲-۳-۱- اصول تولید گشتاور دندانه‌ای ۸۰
۵-۲-۳-۲- گشتاور دندانه‌ای هم راستا ۸۱
۵-۲-۳-۳- گشتاور دندانه‌ای غیر هم راستا ۸۲
۵-۲-۳-۴- روش‌های به حداقل رساندن گشتاور دندانه‌ای ۸۳
۵-۳- تأثیر تعداد فازها بر روی گشتاور خروجی ۸۵
۵-۳-۱- گشتاور الکترومغناطیسی در ماشین m فاز ۸۷
۵-۳-۱-۱- ماشین m فاز ($m\geq3$) ۸۷
۵-۳-۱-۲- ماشین ۲ فاز ($m=2$) ۹۰

۵-۳-۱-۳- ماشین تک فاز (m=1) ۹۱
۵-۳-۲- بحث بر روی ریپل گشتاور ۹۲
۵-۳-۳- تحلیل و بررسی تأثیر تعداد فازها بر روی ماشین مورد مطالعه ۹۶
۵-۴- بررسی تأثیر عوامل ساختاری بر روی گشتاور خروجی ۱۰۲
۵-۴-۱- تأثیر فاصله هوایی ۱۰۲
۵-۴-۲- تأثیر درصد پوشش روتور توسط دندانه استاتور ۱۰۴
۵-۴-۳- تأثیر نحوه قرارگیری فازها کنار هم ۱۰۵
۵-۴-۴- تأثیر تعداد قطب‌ها ۱۰۶
۵-۴-۵- تأثیر شکل کفشک قطب استاتور ۱۰۸
۵-۴-۶- تأثیر نسبت کمان آهنربای دائم به کمان متمرکزکننده شار روتور ۱۰۹
۵-۴-۷- تأثیر مستقیم یا مورب بودن قطب‌های روتور ۱۱۰
۵-۵- عوامل مؤثر دیگر در گشتاور خروجی ۱۱۲
فصل۶: نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۱۳
۶-۱- نتیجه گیری ۱۱۴
۶-۲- پیشنهادات ۱۱۵
پیوست: نحوه طراحی موتور TFPM قطب چنگالی مورد مطالعه ۱۱۷
الف: انتخاب شکل موج ولتاژ داخلی برای موتور مورد نظر ۱۱۷
ب: مراحل طراحی موتور مورد مطالعه ۱۱۸
مراجع ۱۲۳

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱: یک جفت قطب از یک فاز یک ماشین TFPM قطب چنگالی ۶
شکل ۱-۲: مسیرهای عبور شار در داخل ماشین TFPM قطب چنگالی ۶
شکل ۲-۱: ساختار یک ماشین TFPM قطب چنگالی الف) تک فاز، ب) سه فاز ۱۲
شکل ۲-۲: یک جفت قطب از یک ماشین TFPM قطب چنگالی ۱۲
شکل ۲-۳: نام‌گذاری ابعاد هندسی ماشین TFPM قطب چنگالی در نماهای دوبعدی یک جفت قطب ۱۲
شکل ۲-۴: ساختار کامل یک ماشین TFPM قطب چنگالی شش فاز ۱۳
شکل ۲-۵: اثر تغییر تعداد قطب در ماشین‌های معمولی و TFPM الف) ۴ قطب از ماشین معمولی، ب) ۴ قطب از ماشین TFPM، ج) ۸ قطب از ماشین معمولی، د) ۸ قطب از ماشین TFPM ۱۷
شکل ۲-۶: نماهای مختلف پایه استاتور ماشین TFPM قطب چنگالی الف) نمای سهبعدی ب) نمای جلو ج) نمای کف ۱۹
شکل ۲-۷: ساختار یک ماشین TFPM قطب چنگالی با روتور الف) مستقیم، ب) مورب ۲۰
شکل ۳-۱: شکل موج ولتاژ ذوزنقه‌ای ۲۴
شکل ۳-۲: شار ورودی به هر قطب استاتور ۲۵
شکل ۳-۳: شکل موج ولتاژ داخلی به ازای فاصله هوایی‌های مختلف ۲۶
شکل ۳-۴: مقادیر عددی تلفات آهن به ازای فاصله هوایی مختلف ۲۷
شکل ۳-۵: شکل موج ولتاژ داخلی به ازای K_{co} های مختلف ۲۷
شکل ۳-۶: مقادیر عددی تلفات آهن به ازای K_{co} های مختلف. ۲۸
شکل ۳-۷: شکل موج ولتاژ داخلی برای حالت الف) استاتور و روتور هر فاز از هم مستقل، ب) استاتور هر فاز با فاز دیگر مستقل و روتور هر فاز با فاز دیگر یکپارچه، ج) روتور هر فاز با فاز دیگر مستقل و استاتور هر فاز با فاز دیگر یکپارچه و د) استاتور و روتور هر فاز یکپارچه. ۲۹
شکل ۳-۸: شکل موج ولتاژ داخلی به ازای تعداد قطب‌های مختلف الف) در سرعت ثابت، ب) در فرکانس ثابت ۳۰
شکل ۳-۹: مقادیر عددی تلفات آهن به ازای تعداد قطب‌های مختلف در سرعت ثابت ۳۰
شکل ۳-۱۰: مقادیر عددی تلفات آهن به ازای تعداد قطب‌های مختلف در فرکانس ثابت ۳۱
شکل ۳-۱۱: شکل موج ولتاژ داخلی به ازای شکل‌های مختلف کفشک قطب. ۳۱

شکل ۳-۱۲: مقادیر عددی تلفات آهن به ازای شکل‌های مختلف کفشک قطب. ۳۲
شکل ۳-۱۳: شکل موج ولتاژ داخلی به ازای K_m های مختلف. ۳۳
شکل ۳-۱۴: مقادیر عددی تلفات آهن به ازای K_m های مختلف..... ۳۳
شکل ۳-۱۵: تأثیر مورب ساختن قطب‌های روتور بر روی شکل موج ولتاژ داخلی. ۳۴
شکل ۳-۱۶: شکل موج ولتاژ داخلی به ازای فرکانس‌های مختلف ۳۴
شکل ۳-۱۷: الف) یک جفت قطب از موتور مورد مطالعه، ب) توزیع چگالی شار در داخل موتور در شرایط مدار باز ۳۵
شکل ۳-۲۱: شکل موج شار پیوندی در شرایط مدار باز موتور مورد مطالعه..... ۳۷
شکل ۳-۲۲: شکل موج ولتاژ داخلی موتور مورد مطالعه ۳۷
شکل ۳-۲۳: افزایش برجستگی در سطوح فاصله هوایی با استفاده از استوانه‌هایی با شعاعی کمتر از شعاع سطح فاصله هوایی. الف) متمرکز کننده شار روتور اصلاح شده. ب) دندانه استاتور اصلاح شده. ۳۹
شکل ۳-۲۴: شکل موج ولتاژ داخلی موتور با متمرکز کننده‌های شار روتور اصلاح شده ۳۹
شکل ۳-۲۵: فاصله هوایی بهینه توسط تغییر سطوح رو به رو به فاصله هوایی متمرکز کننده‌های شار روتور و دندانه‌های استاتور. ۴۱
شکل ۳-۲۶: شکل موج ولتاژ داخلی موتور با متمرکز کننده‌های شار روتور و دندانه‌های استاتور اصلاح شده ۴۱
شکل ۴-۱: نحوه تعیین اندوکتانس ظاهری و اندوکتانس دیفرانسیلی ۴۶
شکل ۴-۲: شار پیوندی در دو حالت بی‌باری و بار کامل ۵۰
شکل ۴-۳: توزیع برداری چگالی شار در موقعیت الف) $\theta = 0$؛ ب) $\theta = 0.5$؛ ج) $\theta = 1$؛ د) $\theta = 1.5$؛ هـ) $\theta = 2$؛ و) $\theta = 2.5$ ۵۱
شکل ۴-۴: الف) اندوکتانس ظاهری سیم پیچ آرمیچر بر حسب موقعیت روتور، ب) اندوکتانس دیفرانسیلی سیم پیچ آرمیچر بر حسب موقعیت روتور ۵۶
شکل ۴-۵: شماتیک شبیه‌سازی موتورهای طراحی شده در محیط سیمولینک ۵۸
شکل ۴-۶: بلوک دیاگرام مورد استفاده برای مدل‌سازی الف) منبع تغذیه، ب) تلفات هسته و ج) اندوکتانس خودی. ۵۹
شکل ۴-۷: بلوک دیاگرام مورد استفاده برای مدل‌سازی ولتاژ داخلی. الف) بلوک دیاگرام کلی، ب) زیر سیستم شماره ۲ (سمت راست) در شکل الف، ج) زیر سیستم شماره ۱ (سمت چپ) در شکل الف ۵۹

شکل ۴-۸: بلوک دیاگرام مورد استفاده برای مدل‌سازی رابطه گشتاور-سرعت ۶۰
شکل ۴-۹: شکل موج اندوکتانس به ازای فاصله هوایی‌های مختلف..... ۶۱
شکل ۴-۱۰: شاخص‌های عملکردی بدست آمده از شبیه‌سازی دینامیکی گذرایی به ازای فاصله هوایی‌های مختلف ۶۲
شکل ۴-۱۱: شکل موج ولتاژ داخلی به ازای K_{co} های مختلف ۶۳
شکل ۴-۱۲: شاخص‌های عملکردی بدست آمده از شبیه‌سازی دینامیکی‌گذرایی به ازای K_{co} های مختلف..... ۶۴
شکل ۴-۱۳: شکل موج اندوکتانس به ازای تعداد قطب‌های مختلف در سرعت ثابت ۶۵
شکل ۴-۱۴: شاخص‌های عملکردی بدست آمده از شبیه‌سازی دینامیکی گذرایی به ازای تعداد قطب‌های مختلف در سرعت ثابت.....۶۶
شکل ۴-۱۵: شکل موج اندوکتانس به ازای تعداد قطب‌های مختلف در فرکانس ثابت. ۶۷
شکل ۴-۱۶: شاخص‌های عملکردی بدست آمده از شبیه‌سازی دینامیکی گذرایی به ازای تعداد قطب‌های مختلف در فرکانس ثابت..... ۶۸
شکل ۴-۱۷: شکل موج اندوکتانس به ازای شکل‌های مختلف کفشک قطب. ۶۹
شکل ۴-۱۸: شاخص‌های عملکردی بدست آمده از شبیه‌سازی دینامیکی گذرایی به ازای شکل‌های مختلف کفشک قطب. ۷۰
شکل ۴-۱۹: شکل موج اندوکتانس به ازای K_m های مختلف..... ۷۱
شکل ۴-۲۰: شاخص‌های عملکردی بدست آمده از شبیه‌سازی دینامیکی گذرایی به ازای K_m های مختلف..... ۷۲
شکل ۴-۲۱: تأثیر مورب ساختن قطب‌های روتور بر روی شکل موج اندوکتانس. ۷۳
شکل ۴-۲۲: شکل موج اندوکتانس به ازای فرکانس‌های مختلف ۷۴
شکل ۴-۲۳: شاخص‌های عملکردی بدست آمده از شبیه‌سازی دینامیکی گذرایی به ازای فرکانس‌های مختلف..... ۷۵
شکل ۵-۱: الف) یک سیکل از گشتاور دندانه‌ای یک ماشین TFPM، ب) نمایش اجزای محدود چگالی شار برای گشتاور دندانه‌ای در موقعیت هم راستایی، ج) نمایش اجزای محدود چگالی شار برای پیک منفی گشتاور دندانه‌ای در انحراف از موقعیت هم راستایی به اندازه ۰/۷ درجه مکانیکی، د) نمایش اجزای محدود چگالی شار برای گشتاور دندانه‌ای در موقعیت غیر هم راستایی ۸۳
شکل ۵-۲: تأثیر تعداد فازها بر روی ریپل گشتاور دندانه‌ای بر حسب پریونیت..... ۸۴

شکل ۵-۳: شکل موج ولتاژ داخلی و مقدار اصلی آن برای فاز 'a' ۹۷
شکل ۵-۴: اندوکتانس خودی فاز 'a' بر حسب موقعیت روتور ۹۷
شکل ۵-۵: شکل موج جریان برای فاز 'a' ۹۸
شکل ۵-۶: تغییرات گشتاور الکترومغناطیسی بر حسب زمان برای فاز 'a' ۹۹
شکل ۵-۷: گشتاور الکترومغناطیسی نرمالیزه شده برای ماشین‌های تک فاز و ۶ فاز ۹۹
شکل ۵-۸: گشتاور الکترومغناطیسی برای ماشین‌های TFPM قطب چنگالی با تعداد فازهای مختلف ۱۰۲
شکل ۵-۹: درصد ریپل گشتاور الکترومغناطیسی برای ماشین‌های TFPM قطب چنگالی با تعداد فازهای مختلف ۱۰۲
شکل ۵-۱۰: شکل موج گشتاور خروجی به ازای فاصله هوایی‌های مختلف ۱۰۳
شکل ۵-۱۱: شکل موج گشتاور دندانه‌ای به ازای فاصله هوایی‌های مختلف..... ۱۰۳
شکل ۵-۱۲: شکل موج گشتاور خروجی به ازای به ازای K_{co} های مختلف ۱۰۴
شکل ۵-۱۳: شکل موج گشتاور دندانه‌ای به ازای به ازای K_{co} های مختلف ۱۰۵
شکل ۵-۱۴: تأثیر نحوه قرارگیری فازها کنار هم بر روی شکل موج گشتاور دندانه‌ای منتجه شش فاز ۱۰۵
شکل ۵-۱۵: شکل موج گشتاور خروجی به ازای تعداد قطب‌های مختلف در سرعت ثابت..... ۱۰۷
شکل ۵-۱۶: شکل موج گشتاور دندانه‌ای به ازای تعداد قطب‌های مختلف در سرعت ثابت ۱۰۷
شکل ۵-۱۷: شکل موج گشتاور خروجی به ازای تعداد قطب‌های مختلف در فرکانس ثابت ۱۰۸
شکل ۵-۱۸: شکل موج گشتاور دندانه‌ای به ازای تعداد قطب‌های مختلف در فرکانس ثابت ۱۰۸
شکل ۵-۱۹: درصد ریپل گشتاور الکترومغناطیسی به ازای شکل‌های مختلف کفشک قطب ۱۰۹
شکل ۵-۲۰: درصد ریپل گشتاور دندانه‌ای به ازای شکل‌های مختلف کفشک قطب..... ۱۰۹
شکل ۵-۲۱: شکل موج گشتاور خروجی به ازای K_m های مختلف ۱۱۰
شکل ۵-۲۲: شکل موج گشتاور دندانه‌ای به ازای K_m های مختلف ۱۱۰
شکل ۵-۲۳: تأثیر مورب ساختن قطب‌های روتور بر روی شکل موج گشتاور خروجی..... ۱۱۱
شکل ۵-۲۴: تأثیر مورب ساختن قطب‌های روتور بر روی شکل موج گشتاور دندانه‌ای..... ۱۱۱
شکل ۵-۲۵: شکل موج گشتاور خروجی به ازای فرکانس‌های مختلف..... ۱۱۲
شکل ۵-۲۶: شکل موج گشتاور دندانه‌ای به ازای فرکانس‌های مختلف ۱۱۲

فهرست جداول

جدول ۲-۱: مهمترین پارامترهای موتور مورد مطالعه ۱۴
جدول ۳-۱: پارامترهای و مقادیر نامی موتور مورد مطالعه..... ۳۶
جدول ۳-۲: مواد به کار رفته در ساختار موتور مورد مطالعه..... ۳۶
جدول ۳-۳: آنالیز هارمونیک ولتاژ داخلی موتور مورد مطالعه ۳۷
جدول ۳-۴: آنالیز هارمونیک ولتاژ داخلی موتور با متمرکز کننده‌های شار روتور اصلاح شده ۳۹
جدول ۳-۵: آنالیز هارمونیک ولتاژ داخلی موتور با متمرکز کننده‌های شار روتور و دندانه‌های استاتور اصلاح شده..... ۴۱
جدول ۴-۱: شاخص‌های بدست آمده از شبیه‌سازی دینامیکی گذرایی برای طراحی‌هایی با روتور مستقیم و مورب..... ۷۳
جدول ۵-۱: تأثیر جفت هارمونیک‌های ولتاژ داخلی و جریان فاز بر روی گشتاور الکترومغناطیسی در ماشین‌های m فاز ۹۵
جدول ۵-۲: هارمونیک‌های ولتاژ داخلی برای فاز 'a'..... ۹۸
جدول ۵-۳: هارمونیک‌های اندوکتانس خودی فاز 'a'..... ۹۸
جدول ۵-۴: هارمونیک‌های جریان برای فاز 'a' ۹۸
جدول ۵-۵: مؤلفه‌های هارمونیکی گشتاور الکترومغناطیسی برای هر دو ماشین تک فاز و ۶ فاز .. ۱۰۰

فصل ۱:

مقدمه

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

در این فصل پس از معرفی ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار متقاطع، هدف از نگارش این گزارش بیان می‌شود و اهمیت انجام آن تشریح می‌شود. با توجه به اینکه کارهای گذشته در مورد ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار متقاطع ناچیز است مطالب مربوط به بخش مروری بر کار گذشتگان در همین فصل گنجانده شده است.

۱-۱- ماشین شار متقاطع یا شار عرضی (TFM[۱])

امروزه ماشین‌های شار متقاطع (TFMs) به دلیل چگالی گشتاور و بازدهی بالا مورد توجه گسترده قرار گرفته‌اند [۱]. از جمله کاربردهای این نوع ماشین‌ها می‌توان به کاربردهای گشتاور بالا در سرعت پایین، همانند ژنراتورهای توربین‌های بادی و موتورهای وسایل نقلیه الکتریکی اشاره کرد [۲]. بر خلاف ماشین‌های متداول، گشتاور الکترومغناطیسی در ماشین‌های شار متقاطع با تعداد قطب‌های ماشین متناسب است [۳]. همین موضوع سبب شده است که بتوان با افزایش تعداد قطب‌ها چگالی گشتاور این ماشین‌ها را تا چندین برابر ماشین‌های متداول افزایش داد. با توجه به این که جرم و حجم ماشین‌های الکتریکی وابسته به گشتاور نامی آن‌ها است، از این قابلیت منحصر به فرد ماشین‌های TFPM در کاربردهای سرعت پایین، از جمله صنایع هوا و فضا، صنایع دریایی و ژنراتورهای نیروگاه-های بادی که در آن‌ها حجم و وزن ماشین از معیارهای محدودکنندهٔ اصلی برای انتخاب نوع ماشین هستند و دسترسی به چگالی گشتاور بالا در آن‌ها با محدودیت مواجه است استفاده می‌شود [۴]. پیشرفت تکنولوژی ساخت آهنرباهای دائم، که امکان استفادهٔ تجاری از موادی نظیر

[۱] Transverse Flux Machine

نئودیوم- آهن- بورون (NdFeB[1]) و ساماریوم- کبالت (SmCo5[2]) را فراهم آورده است، نیز در گسترش توجه به این ماشین‌ها مؤثر بوده است [۴].

مفهوم TFM برای اولین بار در سال ۱۹۸۶ توسط آقای Weh معرفی شد [۵]. بر خلاف ماشین-های متداول، توپولوژی TFM به گونه‌ای است که امکان افزایش تعداد جفت قطب‌ها، بدون کاهش شار پیوندی سیم‌پیچ وجود دارد [۶]. با ثابت ماندن شار پیوندی و افزایش تعداد جفت قطب‌ها (یا همان فرکانس)، نرخ تغییرات شار پیوندی سیم‌پیچ استاتور افزایش می‌یابد و در نتیجه ولتاژ داخلی القایی نیز افزایش می‌یابد. لذا افزایش تعداد جفت قطب‌ها، تا جایی که نشتی شار و ملاحظات مکانیکی اجازه دهد، باعث افزایش ولت- آمپر ماشین می‌شود. این موضوع در مورد ماشین‌های معمول صادق نیست و افزایش تعداد قطب‌ها تأثیری در ریتینگ این ماشین‌ها ندارد. این ویژگی TFM باعث شده است که چگالی توان این نوع ماشین نسبت به ماشین‌های متداول بالاتر باشد. نسبت توان تولیدی قابل دسترس به کل وزن ماشین برای TFM با روتور اکتیو بین ۰/۵ تا ۲ کیلووات بر کیلوگرم است، در حالی که این نسبت برای ماشین‌های متداول در حدود ۰/۲۴ تا ۰/۸ کیلووات بر کیلوگرم گزارش شده است [۷].

به طور کلی می‌توان مزایای توپولوژی TFM نسبت به سایر توپولوژی‌های متداول را به این صورت برشمرد [۴]:

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

۲) مسیر عبور شار و ناحیهٔ سیم‌پیچی در استاتور تقریباً به هم وابسته نیستند. به عبارت دیگر، تغییر در هندسهٔ هر کدام می‌تواند به صورت مستقل صورت گیرد. لذا، درجه آزادی در طراحی بالا

[1] Neodymium-Iron-Boron

[2] Samarium-Cobalt

می‌رود.

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

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

ضریب قدرت پایین و ساختار پیچیده با مسیرهای شار سه‌بعدی از معایب اصلی TFM هستند. استفاده از هستهٔ لایه لایه شده برای ساخت ماشین دشوار است و در نتیجه ناگزیر باید از مواد SMC برای ساخت هسته استفاده شود. این موضوع هزینهٔ تولید این نوع ماشین‌ها را بالا می‌برد [۴].

ماشین‌های شار متقاطع از لحاظ ساختاری به سه دستهٔ کلی تقسیم می‌شوند: ۱) TFM با روتور اکتیو، که در این ساختار سیستم تحریک متشکل از آهنرباهای دائم بر روی روتور قرار می‌گیرد، ۲) TFM با روتور پسیو، که در آن آهنرباهای دائم بر روی استاتور قرار می‌گیرند و ۳) TFM رلوکتانسی که هیچ گونه آهنربای دائمی در آن وجود ندارد. دسته‌های ۱ و ۲ به نام ماشین TFPM[1] مشهورند. ماشین مورد بررسی در این تحقیق از نوع TFPM با روتور اکتیو است.

برای ماشین‌های TFPM ساختارهای متنوعی مطرح شده‌اند که می‌توان آن‌ها را به دو دسته کلی تقسیم نمود [۸]: ۱) ساختارهای دوطرفه با قابلیت تولید توان بالا، اما با ساختار پیچیده و ۲) ساختارهای یک‌طرفه که از قابلیت تولید توان پایین‌تری نسبت به انواع دوطرفه برخوردارند، ولی ساختار ساده‌تری دارند. ساختارهای متعددی برای هر یک از این دسته‌ها مطرح شده‌اند، که در مراجع [۲]، [۴] و [۹] می‌توان اطلاعات بیشتری از این ساختارها به دست آورد. ساختار قطب‌چنگالی ضمن اینکه از سادگی ساختارهای یک‌طرفه بهره می‌برد دارای عملکردی قابل مقایسه با انواع دوطرفه است

[1] Transverse Flux Permanent Magnet