



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

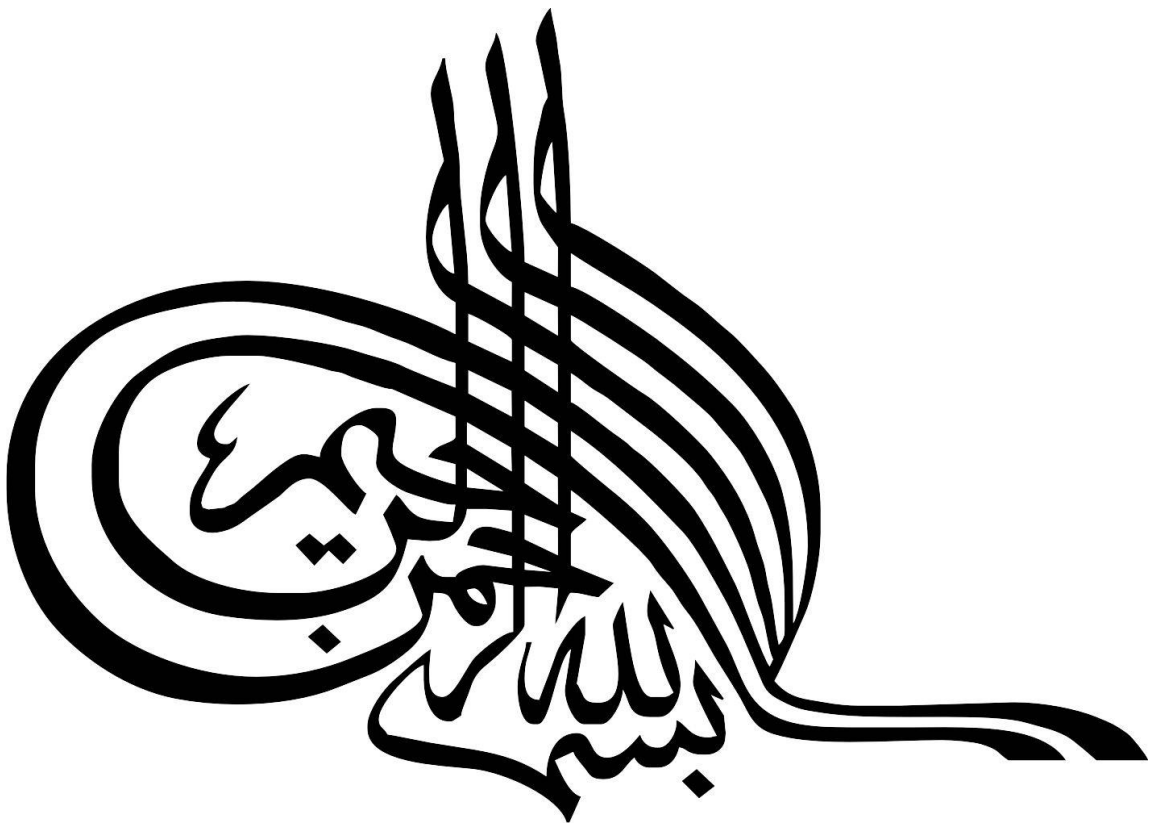
بررسی عوامل ساختاری مؤثر بر روی شکل موج ولتاژ داخلی و تغییرات اندوکتانس سری
یک ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار متقاطع

علی علاءالدینی

استاد راهنما:

دکتر احمد دارابی

بهمن ۱۳۹۲





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



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

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

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

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

☐ مردود	☐ دفاع مجدد	☒ امتیاز (۱۶-۱۷)	قبول (با درجه : عالی)
--------------------------------	------------------------------------	--	-----------------------

۲- بسیار خوب (۱۸-۱۹)

✓ ۱- عالی (۲۰-۱۹)

۴- قابل قبول (۱۵-۱۴)

۳- خوب (۱۷-۱۶)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	احمد رادابی	رئیس	
۲- استاد مشاور	—	—	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	مرتضی رحیمی	استاد	
۴- استاد ممتحن	امیرضا سررشتی	استاد	
۵- استاد ممتحن	علی بدشتانی	استاد	

رئیس دانشکده:

تقدیم به تمامی محققین دوستدار علم و دانش

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

ماهاتما گاندی

تقدیر و تشکر

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

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

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

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

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 سرب قدرت
 دانشکده سرب دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه سرب
 مؤثر بر روی شیطان روح در آفرین دامن و غیرت اندر دامن دکتر احمد دلاور متعهد می شوم .
 سر کیمیا بین سرب 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 تأثیر گذار 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

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.

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 گذرای 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 گذرای محاسبه می‌شود.

کلمات کلیدی:

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

فهرست عناوین

فصل ۱: مقدمه	۱
۱-۱- ماشین شار متقاطع یا شار عرضی (TFM)	۲
۲-۱- اهداف پایان نامه و ضرورت انجام آن	۷
۳-۱- فصل بندی گزارش	۸
فصل ۲: معرفی ماشین TFPM قطب چنگالی و عوامل ساختاری مؤثر در شاخص های عملکردی آن	۹
۱-۲- معرفی ساختار TFPM قطب چنگالی	۱۰
۲-۲- ماشین TFPM قطب چنگالی مورد مطالعه	۱۳
۳-۲- پارامترهای ساختاری مؤثر در عملکرد ماشین	۱۴
۱-۳-۲- فاصله هوایی	۱۵
۲-۳-۲- درصد پوشش روتور توسط دندانه استاتور	۱۵
۳-۳-۲- نحوه قرارگیری فازها کنار هم	۱۶
۴-۳-۲- تعداد قطب ها	۱۶
۵-۳-۲- شکل کفشک قطب استاتور	۱۹
۶-۳-۲- نسبت کمان آهنربای دائم به کمان متمرکزکننده شار روتور	۱۹
۷-۳-۲- مستقیم یا مورب بودن قطب های روتور	۲۰
۸-۳-۲- تغییرات دیگر	۲۰
فصل ۳: محاسبه و بررسی ولتاژ داخلی و تلفات آهن ماشین TFPM قطب چنگالی	۲۱
۱-۳- مقدمه	۲۲
۲-۳- نحوه تولید ولتاژ داخلی دلخواه در فرایند طراحی	۲۳
۳-۳- محاسبه تلفات در ماشین های الکتریکی	۲۵
۴-۳- بررسی تأثیر عوامل ساختاری بر روی ولتاژ داخلی و تلفات آهن	۲۶

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

۶-۴- شبیه‌سازی دینامیکی گذرای به کمک سیمولینک	۵۶
۷-۴- بررسی تأثیر عوامل ساختاری بر روی اندوکتانس و شاخصه‌های عملکردی دینامیکی گذرای	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
فصل ۵: 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 ($m \geq 3$)	۸۷
۵-۳-۱-۲- ماشین ۲ فاز ($m=2$)	۹۰

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

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: یک جفت قطب از یک فاز یک ماشین TFPM قطب چنگالی ۶
- شکل ۲-۱: مسیرهای عبور شار در داخل ماشین TFPM قطب چنگالی ۶
- شکل ۱-۲: 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 ۳-۲: نام‌گذاری ابعاد هندسی ماشین TFPM قطب چنگالی در نماهای دوبعدی یک جفت قطب ۱۲
- شکل ۴-۲: ساختار کامل یک ماشین TFPM قطب چنگالی شش فاز ۱۳
- شکل ۵-۲: 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 ۶-۲: نماهای مختلف پایه استاتور ماشین TFPM قطب چنگالی (الف) نمای سه‌بعدی (ب) نمای جلو (ج) نمای کف ۱۹
- شکل ۷-۲: ساختار یک ماشین TFPM قطب چنگالی با روتور (الف) مستقیم، (ب) مورب ۲۰
- شکل ۱-۳: شکل موج ولتاژ دوزنقه‌ای ۲۴
- شکل ۲-۳: شار ورودی به هر قطب استاتور ۲۵
- شکل ۳-۳: شکل موج ولتاژ داخلی به ازای فاصله هوایی‌های مختلف ۲۶
- شکل ۴-۳: مقادیر عددی تلفات آهن به ازای فاصله هوایی مختلف ۲۷
- شکل ۵-۳: شکل موج ولتاژ داخلی به ازای K_{co} های مختلف ۲۷
- شکل ۶-۳: مقادیر عددی تلفات آهن به ازای K_{co} های مختلف ۲۸
- شکل ۷-۳: 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 ۸-۳: شکل موج ولتاژ داخلی به ازای تعداد قطب‌های مختلف (الف) در سرعت ثابت، (ب) در فرکانس ثابت ۳۰
- شکل ۹-۳: مقادیر عددی تلفات آهن به ازای تعداد قطب‌های مختلف در سرعت ثابت ۳۰
- شکل ۱۰-۳: مقادیر عددی تلفات آهن به ازای تعداد قطب‌های مختلف در فرکانس ثابت ۳۱
- شکل ۱۱-۳: 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) دندان‌های 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 دندان‌های استاتور. ۴۱
- شکل ۳-۲۶: شکل موج ولتاژ داخلی موتور با متمرکز کننده‌های شار روتور و دندان‌های 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) $\theta = 1.5$ ؛ ه) $\theta = 2$ ؛ 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 مدل سازی رابطه گشتاور-سرعت ۶۰
- شکل ۴-۹: شکل موج اندوکتانس به ازای فاصله هوایی های مختلف ۶۱
- شکل ۴-۱۰: شاخص های عملکردی بدست آمده از شبیه سازی دینامیکی گذرایی به ازای فاصله هوایی های مختلف ۶۲
- شکل ۴-۱۱: شکل موج ولتاژ داخلی به ازای K_{co} های مختلف ۶۳
- شکل ۴-۱۲: شاخص های عملکردی بدست آمده از شبیه سازی دینامیکی گذرایی به ازای K_{co} های مختلف ۶۴
- شکل ۴-۱۳: شکل موج اندوکتانس به ازای تعداد قطب های مختلف در سرعت ثابت ۶۵
- شکل ۴-۱۴: شاخص های عملکردی بدست آمده از شبیه سازی دینامیکی گذرایی به ازای تعداد قطب های مختلف در سرعت ثابت ۶۶
- شکل ۴-۱۵: شکل موج اندوکتانس به ازای تعداد قطب های مختلف در فرکانس ثابت ۶۷
- شکل ۴-۱۶: شاخص های عملکردی بدست آمده از شبیه سازی دینامیکی گذرایی به ازای تعداد قطب های مختلف در فرکانس ثابت ۶۸
- شکل ۴-۱۷: شکل موج اندوکتانس به ازای شکل های مختلف کفشک قطب ۶۹
- شکل ۴-۱۸: شاخص های عملکردی بدست آمده از شبیه سازی دینامیکی گذرایی به ازای شکل های مختلف کفشک قطب ۷۰
- شکل ۴-۱۹: شکل موج اندوکتانس به ازای K_m های مختلف ۷۱
- شکل ۴-۲۰: شاخص های عملکردی بدست آمده از شبیه سازی دینامیکی گذرایی به ازای K_m های مختلف ۷۲
- شکل ۴-۲۱: تأثیر مورب ساختن قطب های روتور بر روی شکل موج اندوکتانس ۷۳
- شکل ۴-۲۲: شکل موج اندوکتانس به ازای فرکانس های مختلف ۷۴
- شکل ۴-۲۳: شاخص های عملکردی بدست آمده از شبیه سازی دینامیکی گذرایی به ازای فرکانس های مختلف ۷۵
- شکل ۵-۱: (الف) یک سیکل از گشتاور دندانه ای یک ماشین TFPM، (ب) نمایش اجزای محدود چگالی شار برای گشتاور دندانه ای در موقعیت هم راستایی، (ج) نمایش اجزای محدود چگالی شار برای پیک منفی گشتاور دندانه ای در انحراف از موقعیت هم راستایی به اندازه ۰/۷ درجه مکانیکی، (د) نمایش اجزای محدود چگالی شار برای گشتاور دندانه ای در موقعیت غیر هم راستایی ۸۳
- شکل ۵-۲: تأثیر تعداد فازها بر روی رپیل گشتاور دندانه ای بر حسب پریونیت ۸۴

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

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: مهمترین پارامترهای موتور مورد مطالعه ۱۴
- جدول ۱-۳: پارامترهای و مقادیر نامی موتور مورد مطالعه ۳۶
- جدول ۲-۳: مواد به کار رفته در ساختار موتور مورد مطالعه ۳۶
- جدول ۳-۳: آنالیز هارمونیک ولتاژ داخلی موتور مورد مطالعه ۳۷
- جدول ۴-۳: آنالیز هارمونیک ولتاژ داخلی موتور با متمرکز کننده‌های شار روتور اصلاح شده ۳۹
- جدول ۵-۳: آنالیز هارمونیک ولتاژ داخلی موتور با متمرکز کننده‌های شار روتور و دندانه‌های استاتور اصلاح شده ۴۱
- جدول ۱-۴: شاخص‌های بدست آمده از شبیه‌سازی دینامیکی گذرای برای طراحی‌هایی با روتور مستقیم و مورب ۷۳
- جدول ۱-۵: تأثیر جفت هارمونیک‌های ولتاژ داخلی و جریان فاز بر روی گشتاور الکترومغناطیسی در ماشین‌های m فاز ۹۵
- جدول ۲-۵: هارمونیک‌های ولتاژ داخلی برای فاز 'a' ۹۸
- جدول ۳-۵: هارمونیک‌های اندوکتانس خودی فاز 'a' ۹۸
- جدول ۴-۵: هارمونیک‌های جریان برای فاز 'a' ۹۸
- جدول ۵-۵: مؤلفه‌های هارمونیک 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 نیروگاه‌های بادی که در آن‌ها حجم و وزن ماشین از معیارهای محدودکننده 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 استفاده تجاری از موادی نظیر

^۱ Transverse Flux Machine

نئودیوم- آهن- بورون ($^1\text{NdFeB}$) و ساماریوم- کبالت ($^2\text{SmCo5}$) 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 ماشین‌های 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 ناشی از 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 ناشی اجازه دهد، می‌توان با افزایش تعداد قطب‌ها چگالی توان و گشتاور ماشین را بالا برد.

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

^۱ Neodymium-Iron-Boron

^۲ Samarium-Cobalt

می‌رود.

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

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

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

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

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

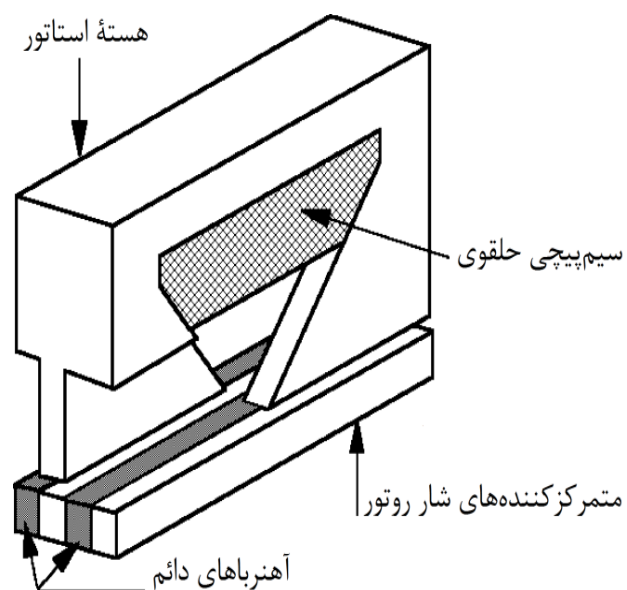
¹ Transverse Flux Permanent Magnet

[۱۰]. مقایسه بین ساختارهای مختلف TFPM در [۲] نشان می‌دهد که چگالی گشتاور ساختار قطب چنگالی از دیگر ساختارهای TFPM بیشتر است به همین دلیل استفاده از ساختار TFPM قطب چنگالی رو به گسترش است. لذا، ساختار قطب چنگالی برای انجام مطالعات مورد نظر این پژوهش انتخاب شده است.

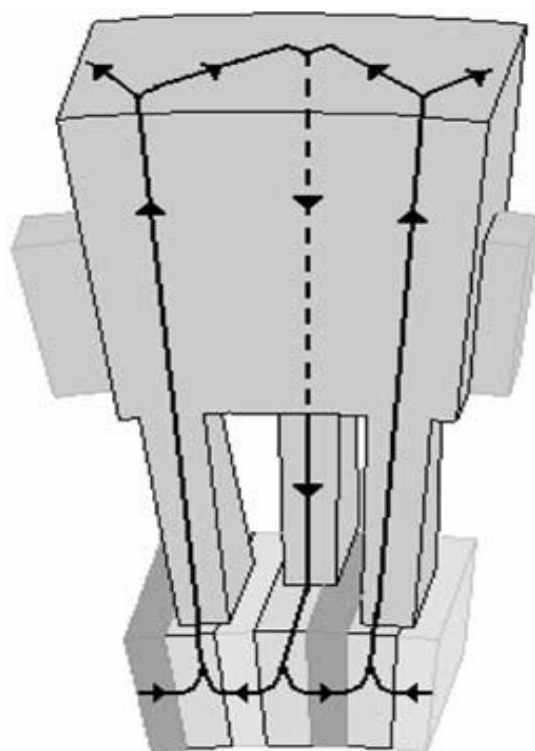
شکل ۱-۱ یک جفت قطب از یک فاز یک ماشین TFPM قطب چنگالی که در این گزارش بررسی خواهد شد را نشان می‌دهد. مسیرهای عبور شار در داخل ماشین در شکل ۱-۲ نمایش داده شده است.

متأسفانه به دلیل نو بودن ساختار قطب چنگالی و پیچیدگی‌های ساختاری و تحلیلی آن، تعداد مراجع معتبری که طراحی و تحلیل این ساختار را مورد توجه قرار داده‌اند بسیار اندک است. اگر چه در مراجع متعدد، از جمله [۱]، [۶] و [۱۱]، به طراحی ماشین‌های TFPM با ساختارهای مختلف (به جز ساختار قطب چنگالی) پرداخته شده است، شاید بتوان [۱۰] را بهترین مرجع در دسترس قلمداد کرد که در مورد الگوریتم طراحی ماشین TFPM با ساختار قطب چنگالی مطالبی را در خود جای داده است. با این حال، با استفاده از روابط تحلیلی و شبیه‌سازی‌های لازم به کمک روش اجزاء محدود (FEM)^۱ می‌توان نشان داد که این الگوریتم دچار اشکالات متعددی است. لذا برای طراحی ماشین TFPM قطب چنگالی، هم با فرض ولتاژ داخلی دوزنقه‌ای و هم با فرض ولتاژ داخلی سینوسی، از الگوریتم جدیدی استفاده شده است. این الگوریتم‌ها به گونه‌ای هستند که به کمک آن می‌توان ماشین با کمترین حجم مواد اکتیو (هسته، سیم‌پیچ و مگنت) را طراحی نمود.

^۱ Finite Element Method



شکل ۱-۱: یک جفت قطب از یک فاز یک ماشین TFPM قطب چنگالی [۱۰]



شکل ۲-۱: مسیرهای عبور شار در داخل ماشین TFPM قطب چنگالی [۱۰]

با توجه به پیچیدگی‌های الگوی شار در ساختار TFPM قطب چنگالی، ساده سازی‌های فراوانی برای یافتن یک مدل تحلیلی مورد نیاز است. همچنین، به علت غیر خطی بودن هسته در اثر اشباع و

تغییرات در نقطه کار آهنرباهای دائم، پیچیدگی‌های یافتن یک مدل تحلیلی دقیق دو چندان می‌شود. از این‌رو، تمامی محاسبات الکتریکی و مغناطیسی ماشین TFPM قطب چنگالی باید به کمک روش اجزاء محدود انجام شود. در مراحل مختلف این تحقیق از نرم‌افزار اجزاء محدود JMAG Designer، که یکی از بهترین نرم‌افزارها در این حوزه است، برای انجام تحلیل‌های اجزاء محدود استفاده شده است. برای اطلاع از قابلیت‌های این نرم‌افزار می‌توان به [۱۲] مراجعه کرد.

۱-۲- اهداف پایان‌نامه و ضرورت انجام آن

عملکرد تمامی ماشین‌های سنکرون به شدت وابسته به ولتاژ داخلی و اندوکتانس‌های آنها می‌باشد. همچنین با توجه به ساختار پیچیده ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم شار متقاطع به خصوص نوع قطب چنگالی، عوامل ساختاری متعددی در شکل و اندازه ولتاژ داخلی و اندوکتانس‌های این ماشین‌ها دخیل هستند. از جمله می‌توان به 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 نام برد. با آگاهی از نحوه تأثیر این عوامل ساختاری بر روی عملکرد ماشین TFPM قطب چنگالی می‌توان فرایند طراحی و بهینه‌سازی این ماشین‌ها را به صورت مؤثر بهبود داد. با توجه به تحقیقات انجام گرفته می‌توان گفت تاکنون در هیچ مرجعی تأثیر این عوامل بر روی عملکرد ماشین‌های TFPM قطب چنگالی به صورت یکجا بررسی نشده است. لذا در فصل‌های آینده تأثیر تک تک این عوامل و عوامل دیگر بر روی ولتاژ داخلی و اندوکتانس‌های ماشین TFPM قطب چنگالی و در نتیجه شاخص‌های عملکردی مختلف آن از جمله ضریب قدرت، زاویه توان، تلفات آهن، شکل موج جریان استاتور و گشتاور خروجی و میزان رپل آن بررسی می‌شود.

۱-۳- فصل بندی گزارش

در فصل ۲ ساختار ماشین مغناطیس دائم شار متقاطع قطب چنگالی به صورت کامل توضیح داده خواهد شد و عوامل ساختاری که نحوه تأثیر آنها بر روی ولتاژ داخلی و اندوکتانس مد نظر است معرفی می‌شود. فصل سوم به بررسی تأثیر این عوامل ساختاری بر روی ولتاژ داخلی اختصاص داده شده است. همچنین در این فصل یک سری روابط تحلیلی برای بیان ارتباط ولتاژ داخلی با پارامترهای هندسی ماشین ارائه شده‌اند. در فصل چهارم نیز ارتباط اندوکتانس‌های ماشین با همان عوامل مورد بررسی در فصل سوم بررسی می‌شود. در انتهای فصل ۴ شاخص‌های عملکردی که در پاراگراف قبل توضیح داده شده‌اند نیز بررسی می‌شوند. با توجه به اهمیت گشتاور خروجی در ماشین‌های TFPM، در فصل پنجم به بررسی اثرات عوامل ساختاری بر روی گشتاور و میزان رپیل آن پرداخته شده است. نتیجه‌گیری‌ها و پیشنهادات در فصل ششم ارائه شده‌اند.

فصل ۲:

معرفی ماشین TFPM قطب چنگالی و

عوامل ساختاری مؤثر در شاخص‌های

عملکردی آن

در فصل قبل بیان شد که در مراجع مختلف، ساختار قطب چنگالی، به عنوان بهترین ساختار در بین ماشین‌های TFPM به لحاظ چگالی توان شناخته شده است. همچنین، بحث‌های مقدماتی در مورد ساختار و ویژگی‌های این ماشین و مزایا و معایب آن ارائه شد. در این فصل پس از یک بحث دقیق‌تر در مورد ساختار ماشین TFPM قطب چنگالی، عوامل ساختاری مؤثر در ولتاژ داخلی و اندوکتانس‌های ماشین به صورت موردی معرفی خواهند شد.

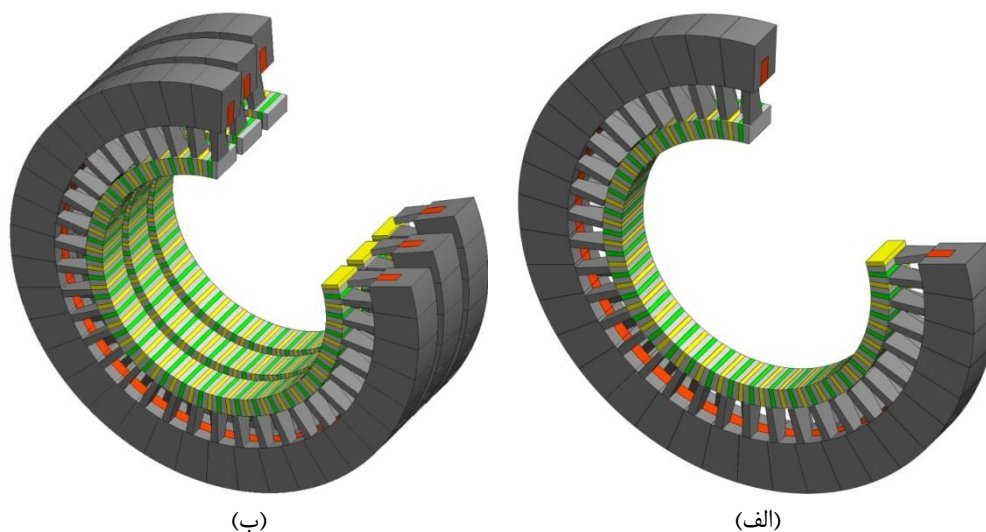
۲-۱- معرفی ساختار TFPM قطب چنگالی

ماشین‌های TFPM قطب چنگالی از خانواده ماشین‌های سنکرون چندفاز هستند. این ماشین‌ها می‌توانند با تعداد فازهای مختلف طراحی و ساخته شوند. بخشی از یک فاز ماشین TFPM قطب چنگالی در شکل ۲-۱-الف آورده شده است. در این شکل، تنها مواد فعال ماشین (شامل هسته، سیم-پیچ و آهنربای دائم) نمایش داده شده‌اند. ساختار چند فاز ماشین TFPM قطب چنگالی از کنار هم قرار گرفتن چند فاز در امتداد محور ماشین حاصل می‌شود. استاتور و یا روتور این فازها نسبت به یکدیگر حول محور ماشین شیفت یافته‌اند. زاویه الکتریکی شیفت فازها برای دو فاز مجاور برابر $360/m$ درجه است، که m تعداد فازها می‌باشد. این شیفت به روتور هر فاز و یا به هسته‌های استاتور هر فاز اعمال می‌شود. می‌توان گفت که انتخاب روتور و یا استاتور برای اعمال شیفت فازها تأثیر چشمگیری در عملکرد ماشین نداشته و تنها در پروسه ساخت و مونتاژ ماشین مؤثر است. در [۱۳] نشان داده است که با افزایش تعداد فازها در ماشین‌های TFPM گشتاور دندانه‌ای کاهش می‌یابد. با این وجود، به دلیل آنکه سیستم‌های سه‌فاز (شبکه‌های قدرت سه‌فاز و همچنین مبدل‌های الکترونیک قدرت سه‌فاز) متداول‌تر هستند، این ماشین‌ها معمولاً به صورت سه‌فاز طراحی می‌شوند. در شکل ۲-۱-ب ساختار سه فاز یک ماشین TFPM قطب‌چنگالی نمایش داده شده است که در آن هسته‌های استاتور فازهای مختلف نسبت به هم شیفت پیدا می‌کنند و روتور همه فازها در یک امتداد در راستای

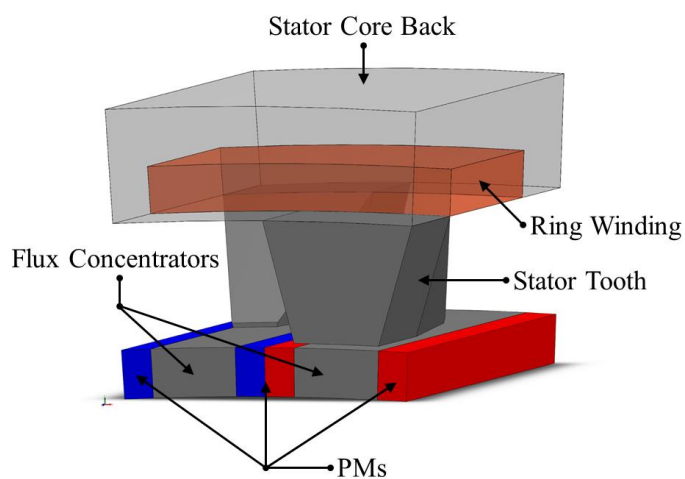
محور ماشین هستند و هیچ شیفتی نسبت به هم ندارند.

همان‌طور که از شکل ۲-۱-ب نیز مشخص است، فازها در اکثر ماشین‌های TFPM قطب چنگالی چند فاز از لحاظ مغناطیسی از یکدیگر مستقل می‌باشند. از اینرو می‌توان تمامی محاسبات الکترومغناطیسی ماشین را بر پایه یک فاز انجام داد. همچنین، هر فاز از کنار هم قرار گرفتن p جفت قطب حول محور ماشین به وجود می‌آید. از آنجا که این جفت قطب‌ها کاملاً مشابه یکدیگرند می‌توان در فرآیند طراحی و تحلیل این ماشین‌ها، با استفاده از شرایط مرزی مناسب تنها یک جفت قطب را در نظر گرفت. در شکل ۲-۲ یک جفت قطب از یک فاز ماشین TFPM قطب چنگالی ارائه شده در شکل ۲-۱ نمایش داده شده است. همان‌طور که از شکل ۲-۲ مشخص است، هسته استاتور یک سیم-پیچ حلقوی ساده را در بر می‌گیرد. مطابق این شکل، ساختار متمرکزکننده شار روتور از کنار هم قرار گرفتن آهنرباهای دائم و متمرکزکننده‌های شار ایجاد شده است. باید توجه داشت که در این ساختار آهنرباها در جهت محیطی مغناطیس شده‌اند. شار تولیدی توسط دو آهنربای مجاور به یک متمرکزکننده شار که در جهت‌های مخالف مغناطیس شده‌اند، وارد این متمرکزکننده شار شده و پس از عبور از فاصله هوایی بین روتور و استاتور وارد دندان استاتور شده و با عبور از یوغ استاتور سیم‌پیچ را دور می‌زنند. این شار از طریق دو دندان مجاور به دندانه‌ای که شار از طریق آن وارد استاتور شده است مجدداً وارد فاصله هوایی شده و بعد از عبور از متمرکزکننده‌های شار به آهنرباها باز می‌گردد. شار تولیدی توسط سیم‌پیچ آرمیچر نیز دارای مسیر مشابهی است. کاملاً مشخص است که مسیر عبور شار در داخل ماشین یک مسیر سه‌بعدی است. بنابراین، نمی‌توان تمام مدار مغناطیسی ماشین TFPM قطب چنگالی را از هسته‌های فرومغناطیس موزق ساخت، بلکه باید از مواد کامپوزیت مغناطیسی نرم (SMC)^۱ برای این منظور استفاده کرد [۱۴ و ۱۵]. ابعاد اساسی ماشین TFPM قطب چنگالی در شکل ۲-۳ نامگذاری شده‌اند.

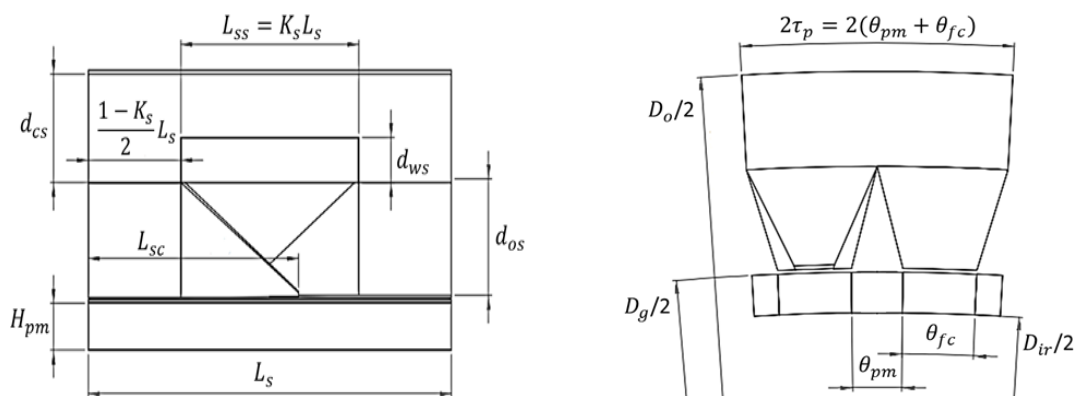
^۱ Soft Magnetic Composite



شکل ۲-۱: ساختار یک ماشین TFPM قطب چنگالی (الف) تک فاز، (ب) سه فاز

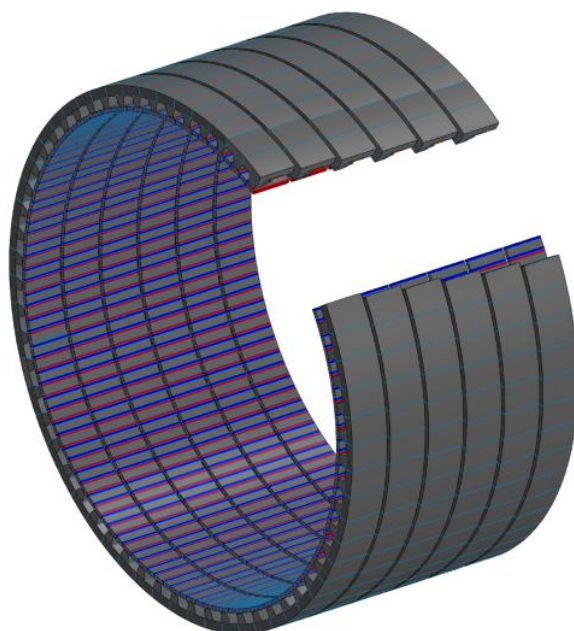


شکل ۲-۲: یک جفت قطب از یک ماشین TFPM قطب چنگالی



شکل ۲-۳: نام‌گذاری ابعاد هندسی ماشین TFPM قطب چنگالی در نماهای دوبعدی یک جفت قطب

گاهی اوقات به دلیل برخی از مسائل فنی، تعداد فازها می‌شود می‌تواند بیش از ۳ در نظر گرفته شود. به عنوان مثال، در شکل ۴-۲ یک ماشین ۶ فاز نشان داده شده است.



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

۲-۲- ماشین TFPM قطب چنگالی مورد مطالعه

آقای مسمودی^۱ یکی از محققانی هستند که در زمینه ماشین‌های TFPM، و مخصوصاً ساختار قطب چنگالی، فعالیت‌های گسترده‌ای داشته‌اند. تقریباً تمام فرمول‌ها و الگوریتم‌های استخراج و تشریح شده در مراجع مورد بررسی برای ساختار قطب چنگالی ماشین TFPM، از کارهای ایشان اقتباس شده است. به هر حال بررسی تحلیلی دقیق این روابط طراحی و مشاهده نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های انجام شده به روش اجزاء محدود، نشان می‌دهد که روابط و روش ارائه شده دارای نواقصی است. لذا برای طراحی ماشین TFPM قطب چنگالی، هم با فرض ولتاژ داخلی دوزنقه‌ای و هم با فرض ولتاژ داخلی سینوسی، الگوریتم‌های جدیدی ارائه شده است. این الگوریتم‌ها به گونه‌ای هستند

^۱ Masmoudi

که به کمک آن می‌توان ماشین با کمترین حجم مواد اکتیو (هسته، سیم‌پیچ و مغنت) را طراحی نمود. با توجه به موضوع این پایان‌نامه، نمی‌توان بحث طراحی موتور مورد نظر را با جزئیات کامل ارائه نمود. لذا، خلاصه‌ای از روال طراحی این موتور بر اساس این الگوریتم‌های جدید در پیوست گزارش ارائه شده است. جنس مواد سازنده موتور به همراه منحنی‌های مشخصه آن‌ها در این پیوست آمده است. مهم‌ترین مشخصات و پارامترهای طرح اولیه موتور مورد مطالعه در این پایان‌نامه در جدول ۱-۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۱-۲: مهم‌ترین پارامترهای موتور مورد مطالعه

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

در فصل‌های آینده با تغییر موارد ۲، ۵ و ۹ و برخی پارامترهای هندسی دیگر به کمک الگوریتم طراحی مجموعه‌ای از طرح‌ها مورد مطالعه قرار می‌گیرد. باید توجه کرد که ابعاد هندسی ماشین ثابت نخواهند ماند.

۳-۲- پارامترهای ساختاری مؤثر در عملکرد ماشین

همان طور که در فصل قبل بیان شد به دلیل ساختار پیچیده ماشین TFPM قطب چنگالی،

پارامترها و عوامل ساختاری متعددی در عملکرد آن مؤثر است. با توجه به اینکه عملکرد یک ماشین سنکرون عمدتاً وابسته به ولتاژ داخلی و اندوکتانس‌های آن می‌باشد، برای بررسی وابستگی عملکرد ماشین به عوامل ساختاری کافی است این دو شاخص، یعنی ولتاژ داخلی و اندوکتانس‌ها، مورد مطالعه قرار گیرند.

در این بخش مهمترین عوامل ساختاری مؤثر در شکل موج ولتاژ داخلی و اندوکتانس‌های ماشین TFPM قطب چنگالی معرفی می‌شود.

۲-۳-۱- فاصله هوایی

فاصله هوایی یکی از مهمترین عوامل مؤثر در عملکرد ماشین‌های الکتریکی می‌باشد. همواره در فرایند طراحی سعی می‌شود با در نظر گرفتن محدودیت‌های مکانیکی و شارهای ناشی کمترین فاصله هوایی ممکن بین روتور و استاتور انتخاب شود. در سه فصل آینده با ازای چندین طول فاصله هوایی با ثابت نگه داشتن بقیه پارامترهای ساختاری ماشین دوباره طراحی می‌شود و ولتاژ داخلی، اندوکتانس‌ها و سایر مشخصه‌ها عملکردی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

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

منظور از درصد پوشش روتور توسط دندانه استاتور همان نسبت سطح مجاور به فاصله هوایی دندانه استاتور به سطح مجاور به فاصله هوایی متمرکزکننده شار روتور می‌باشد. این نسبت نیز به صورت قابل توجهی در ولتاژ داخلی و اندوکتانس‌های ماشین TFPM قطب چنگالی مؤثر است. می‌توان گفت با افزایش این ضریب ولتاژ داخلی افزایش پیدا می‌کند و در عین حال شارهای ناشی نیز بیشتر می‌شوند، که این موضوع باعث تغییر اندوکتانس‌های ماشین خواهد شد.

۲-۳-۳- نحوه قرارگیری فازها کنار هم

همان طور که قبلاً بیان شد به طور معمول فازها در ماشین‌های TFPM از لحاظ مغناطیسی از هم مستقل هستند که این موضوع به خاطر فاصله‌ای است که بین فازها وجود دارد (شکل ۱-۲ را ببینید). به هر حال می‌توان فازها را به طرق مختلف در کنار هم قرار داد:

- استاتورها و روتورها هر فاز از هم مستقل باشند.
 - استاتورهای هر فاز از فازهای دیگر مستقل و روتورهای هر فاز با فازهای دیگر یکپارچه باشند.
 - روتورهای هر فاز از فازهای دیگر مستقل و استاتورهای هر فاز با فازهای دیگر یکپارچه باشند.
 - هم استاتورها و هم روتورهای فازها یکپارچه باشند.
- یکپارچه ساختن استاتورها و روتورها باعث تزویج فازها می‌شود که این موضوع نیز بر روی ولتاژ داخلی و اندوکتانس‌ها و در نتیجه عملکرد ماشین تأثیرگذار است.

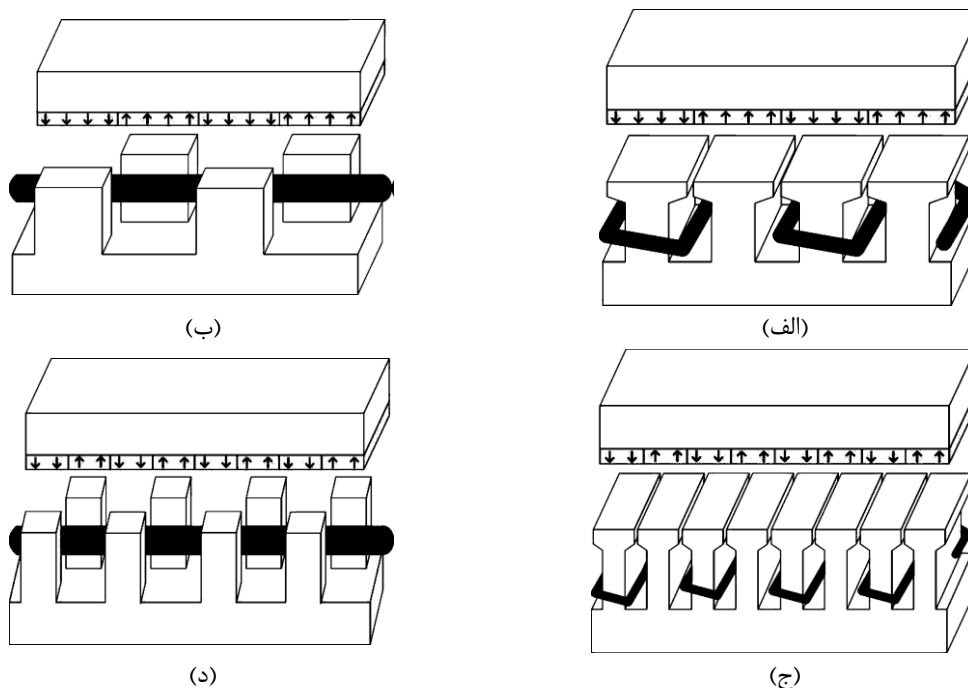
۲-۳-۴- تعداد قطب‌ها

یکی از ویژگی‌های ماشین TFPM قطب چنگالی این است که تعداد قطب‌ها بدون کاهش سطح مقطع سیم پیچ می‌تواند افزایش یابد، که به یک چگالی گشتاور بالا منجر می‌شود. برای درک اثر تغییر تعداد قطب‌ها بر روی گشتاور خروجی یک ماشین الکتریکی، ساختار ماشین معمولی و ماشین TFPM را در شکل ۵-۲ در نظر بگیرید [۱۶]. معادله (۱-۲) روش محاسبه گشتاور را از طریق کوانترژی نشان می‌دهد.

$$T = \frac{\partial W_C}{\partial \theta} \quad (1-2)$$

اگر گشتاور دندانه‌ای در ماشین نادیده گرفته شود، معادله (۱-۲) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$T = i \frac{\partial \lambda}{\partial \theta} \quad (2-2)$$



شکل ۲-۵: اثر تغییر تعداد قطب در ماشین‌های معمولی و TFPM [۱۶] (الف) ۴ قطب از ماشین معمولی، (ب) ۴ قطب از ماشین TFPM، (ج) ۸ قطب از ماشین معمولی، (د) ۸ قطب از ماشین TFPM

ابتدا چهار قطب از ساختار ماشین معمولی در شکل ۲-۵-الف و چهار قطب از ساختار ماشین TFPM در شکل ۲-۵-ب را در نظر بگیرید. به وضوح مشهود است که جابجایی بین میدان تولید شده توسط آهنرباها و دندانه‌های استاتور در یک سرعت ثابت، منجر به تغییر در شار پیوندی سیم پیچ آرمیچر λ نسبت به موقعیت روتور می‌شود. با توجه به معادله (۲-۲) و با فرض اینکه جریان در هر دو ساختار یکسان است، گشتاور تابعی از تغییرات شار پیوندی نسبت به موقعیت روتور می‌باشد. در حالت بعدی فرض می‌شود که تعداد قطب‌های ماشین در هر دو ساختار بدون تغییر در ابعاد ماشین، دو برابر شود که برای ماشین معمولی در شکل ۲-۵-ج و برای ماشین TFPM در شکل ۲-۵-د نشان داده شده است. برای چرخش روتور با همان سرعت حالت قبلی (ساختار ۴ قطب)، میزان تغییر شار پیوندی دو برابر می‌شود. یعنی در صورتی که جریان تغییر نکند، گشتاور دو برابر مقدار قبلی خواهد شد. با این حال، این اثر به دو برابر شدن گشتاور خروجی ماشین معمولی منجر نمی‌گردد. زیرا با دو برابر شدن تعداد قطب‌ها، مساحتی که برای سیم‌پیچ آرمیچر در دسترس است نصف می‌شود. از اینرو با فرض

محدودیت‌های حرارتی یکسان در هر دو حالت و برای جلوگیری از افزایش بیش از حد حرارت بایستی MMF هر قطب نصف شود. در نتیجه گشتاور خروجی ماشین معمولی ۸ قطب با تغییر در تعداد قطب‌ها به طور قابل توجهی تغییر نخواهد کرد. با توجه به ساختار ماشین TFPM، مشهود است که تغییر تعداد قطب‌ها تأثیر مستقیمی بر فضای سیم پیچی آرمیچر نخواهد داشت، بنابراین بار الکتریکی می‌تواند در همان مقدار قبلی باقی بماند. از طرفی بر اثر افزایش تعداد قطب‌ها میزان تغییر شار پیوندی افزایش می‌یابد بنابراین به نظر می‌رسد که گشتاور خروجی ماشین TFPM به طور مستقیم با تعداد قطب‌ها تغییر می‌کند [۱۶].

با این تعریف، از لحاظ تئوری یک ماشین TFPM با توان خروجی بی‌نهایت دست یافتنی خواهد بود. اما از آنجایی که با افزایش تعداد قطب‌ها، فاصله بین دندان‌های مجاور استاتور به مقدار فاصله هوایی که بین استاتور و روتور وجود دارد نزدیک می‌شود، مقداری از شار میدان که بدون دور زدن سیم پیچ آرمیچر نشت می‌کند، کم می‌گردد. بنابراین به دلیل افزایش شار نشتی افزایش تعداد قطب‌ها از لحاظ مغناطیسی محدود می‌باشد [۱۷]. غیر از محدودیت‌های مغناطیسی در افزایش تعداد قطب محدودیت‌های عملی در شرایط ساخت نیز وجود خواهند داشت که حتی از محدودیت‌های مغناطیسی بیشتر می‌باشند.

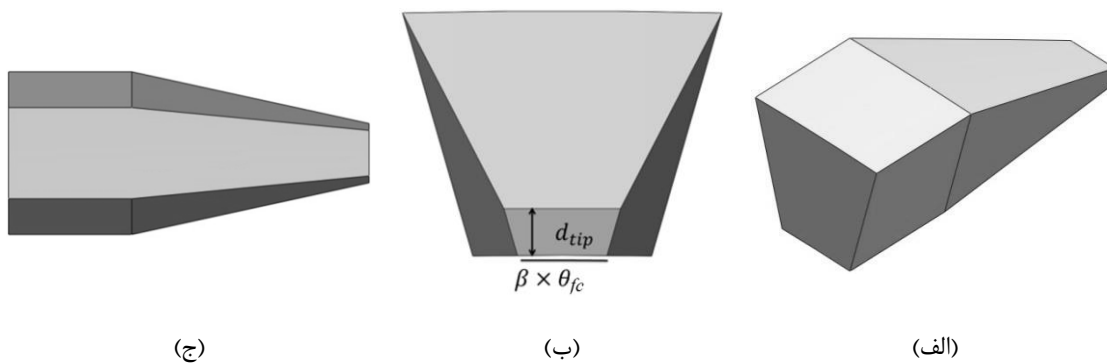
تعداد قطب‌ها از مهمترین پارامترها در عملکرد ماشین‌های TFPM است به طوری که با افزایش تعداد قطب‌ها در این ماشین‌ها چگالی گشتاور ماشین افزایش پیدا می‌کند با این حال به دلیل مشکلات مربوط به شارهای نشتی و محدودیت‌های مکانیکی نمی‌توان تعداد قطب‌ها را بیشتر از یک حد معین انتخاب کرد. در فصل‌های آینده با توجه به رابطه مشهور $n_s = 120 f / P$ تأثیر تغییر تعداد قطب‌ها بر روی عملکرد ماشین در دو حالت زیر بررسی خواهد شد:

- سرعت ثابت باشد و فرکانس تغییر کند.
- فرکانس ثابت باشد و سرعت تغییر کند.

۲-۳-۵- شکل کفشک قطب استاتور

منظور از شکل کفشک قطب استاتور همان شکل سطح مجاور به فاصله هوایی دندان استاتور است. این سطح می‌تواند مستطیلی، مثلثی، دوزنقه‌ای و یا اشکال دیگر باشد. در فصل‌های آینده نشان داده خواهد شد که شکل کفشک قطب استاتور در ولتاژ داخلی و اندوکتانس‌های ماشین تأثیرگذار است.

در شکل ۲-۶ نماهای مختلف از دندان استاتور مورد استفاده در این گزارش نشان داده شده است. همان طور که از نمای کف مشخص است شکل کلی سطح مجاور به فاصله هوایی دندان استاتور دوزنقه‌ای است. در نمای جلوی نشان داده شده مشخص است که نوک کفشک قطب به جای پوشش کامل کمان متمرکزکننده شار، تنها بخشی از آن را که با ضریب β نشان داده شده است، پوشش می‌دهد. اگر $\beta = 1$ باشد، سطح مجاور به فاصله هوایی دندان استاتور مستطیلی شکل و اگر $\beta = 0$ باشد، این سطح متشکل از یک مستطیل و یک مثلث خواهد بود. به ازای هر مقدار $0 < \beta < 1$ این سطح یک دوزنقه خواهد بود. در فصل‌های آینده با تغییر β بین صفر تا یک، ولتاژ داخلی و اندوکتانس‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۲-۶: نماهای مختلف پایه استاتور ماشین TFPM قطب چنگالی (الف) نمای سه‌بعدی (ب) نمای جلو (ج) نمای کف

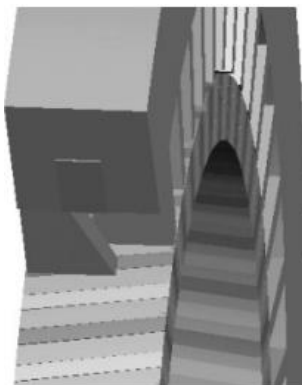
۲-۳-۶- نسبت کمان آهنربای دائم به کمان متمرکزکننده شار روتور

این پارامتر که با K_m نشان داده می‌شود، برابر با نسبت طول محیطی متوسط آهنرباهای دائم به

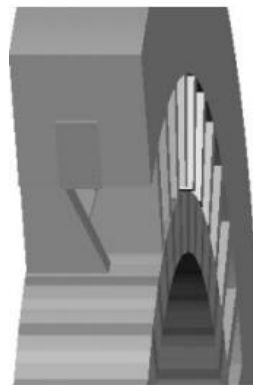
طول محیطی متوسط متمرکزکننده‌های شار روتور می‌باشد. این پارامتر از مهم‌ترین پارامترهای طراحی در ماشین‌های TFPM قطب چنگالی با ساختار متمرکزکننده شار بوده و تأثیر چشمگیری در عملکرد ماشین و شکل موج ولتاژ داخلی و اندوکتانس‌های آن دارد.

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

مانند ماشین‌های القایی در ماشین‌های TFPM قطب چنگالی با روتور متمرکزکننده شار نیز می‌توان به جای هم امتداد قرار دادن متمرکزکننده شار و آهنرباها با محور ماشین، آنها را نسبت به محور ماشین مورب قرار داد (شکل ۷-۲). این کار در عملکرد ماشین و به خصوص در اندازه گشتاور دندانه‌ای مؤثر می‌باشد.



(ب)



(الف)

شکل ۷-۲: ساختار یک ماشین TFPM قطب چنگالی با روتور الف) مستقیم، ب) مورب [(۸)]

۲-۳-۸- تغییرات دیگر

علاوه بر موارد فوق عوامل دیگری نیز در عملکرد ماشین‌های TFPM قطب چنگالی مؤثر هستند که در فصل‌های بعدی این گزارش به آنها می‌پردازیم. مهمترین این عوامل عبارتند از:

- تعداد فازها
- شکل متمرکزکننده شار
- فرکانس داده شده در الگوریتم طراحی
- ...

فصل ۳:

محاسبه و بررسی ولتاژ داخلی و تلفات آهن

ماشین TFPM قطب چنگالی

۳-۱- مقدمه

ماشین مغناطیس دائم شار متقاطع به دو صورت مورد استفاده قرار می‌گیرد:

(۱) ماشین سنکرون مغناطیس دائم (PMSM)^۱: در این حالت ماشین به یک منبع ولتاژ سینوسی (شبکه یا درایو) متصل بوده و ولتاژ داخلی ماشین تقریبی از یک موج سینوسی می‌باشد. در نتیجه واکنش ولتاژ ترمینال و ولتاژ داخلی ماشین یک جریان تقریباً سینوسی در فازها جاری می‌شود.

(۲) ماشین DC بدون جاروبک (BLDC)^۲: در این حالت ولتاژ داخلی ماشین با یک موج دوزنقه‌ای تقریب زده می‌شود. با تنظیم ولتاژ ترمینال یک جریان دوزنقه‌ای یا مستطیلی به صورت هم‌فاز با ولتاژ داخلی در فازها جاری می‌شود.

با توجه به توضیحات فوق اگر قرار باشد یک ماشین مغناطیس دائم شار متقاطع به صورت PMSM مورد استفاده قرار گیرد، در مرحله طراحی سعی می‌شود تا ولتاژ داخلی به یک موج سینوسی خالص نزدیک شود. از طرف دیگر به منظور استفاده از یک ماشین TFPM به صورت BLDC ولتاژ داخلی به صورت دوزنقه‌ای طراحی می‌شود.

پارامترهای هندسی و ساختاری ماشین TFPM در تعیین شکل موج ولتاژ داخلی ماشین نقش اساسی را ایفا می‌کند. به عبارت دیگر طراح با شناخت دقیق از نحوه تأثیر عوامل ساختاری مختلف بر روی ولتاژ داخلی می‌تواند ماشین مناسب را برای استفاده به صورت PMSM یا BLDC طراحی کند. لذا در این فصل به بررسی تأثیر عوامل مختلف بر روی ولتاژ داخلی ماشین مغناطیس دائم شار متقاطع قطب چنگالی پرداخته می‌شود. همچنین تلفات آهن نیز که میتوان یک نوع ارتباط بین آن و ولتاژ داخلی متصور شد در همین فصل مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

¹ Permanent Magnet Synchronous Machine

² Brushless DC

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

همان طور که اشاره شد پارامترهای هندسی ماشین در تعیین شکل موج ولتاژ داخلی نقش اساسی دارند. در این بخش با استفاده از روابط تحلیلی این موضوع بیشتر بررسی می‌شود.

در ابتدا به بحث درباره ولتاژ داخلی دوزنقه‌ای پرداخته می‌شود. شکل ۳-۱ یک نمونه ولتاژ داخلی دوزنقه‌ای را نشان می‌دهد. همان طور که از این شکل مشخص است در ناحیه ۱ ولتاژ با شیب ثابت افزایش پیدا می‌کند، در ناحیه ۲ نسبت به زمان ثابت است و در ناحیه ۳ با همان شیب ثابت ناحیه ۱ کاهش می‌یابد. شبیه‌سازی ماشین‌های TFPM قطب چنگالی مختلف با استفاده از روش اجزای محدود نشان داده است که در صورت پایین بودن شار نشی آهنرباها در روتور زاویه الکتریکی نواحی ۱ و ۳ برابر زاویه الکتریکی کمان آهنربای دائم $(p\theta_{pm})$ می‌باشد. همچنین زاویه الکتریکی ناحیه ۲ برابر $p(\theta_{fc} - \theta_{pm})$ می‌باشد. در این روابط p ، θ_{pm} و θ_{fc} به ترتیب تعداد جفت قطب‌ها، زاویه کمان متوسط آهنربای دائم و زاویه کمان متوسط متمرکزکننده شار می‌باشد (شکل ۳-۲ را ببینید).

از آنجا که ولتاژ داخلی برابر با مشتق شار پیوندی سیم پیچ در حالت مدار باز نسبت به زمان می‌باشد در نتیجه انتگرال‌گیری از شکل موج ولتاژ داخلی نشان داده شده در شکل ۳-۱، شکل موج زمانی شار ورودی به هر قطب استاتور به صورت شکل ۳-۲ بدست می‌آید.

اگر سیم پیچ هر فاز از N_{ph} دور تشکیل شده باشد، شار پیوندی سیم پیچ هر فاز pN_{ph} برابر شار ورودی به هر قطب استاتور می‌باشد. لذا با توجه به قانون فارادی خواهیم داشت:

$$e_t = pN_{ph} \frac{d\varphi_\omega(t)}{dt} = pN_{ph}\omega_e \frac{d\varphi_\omega(\omega_e t)}{d(\omega_e t)} \quad (۱-۳)$$

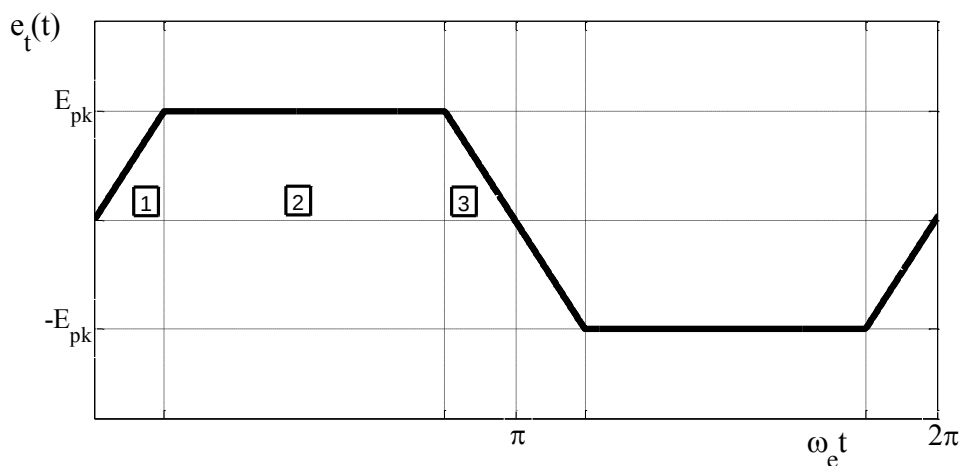
که در این رابطه e_t ولتاژ لحظه‌ای داخلی، $\varphi_\omega(t)$ شار لحظه‌ای ورودی به هر قطب استاتور و ω_e فرکانس زاویه‌ای الکتریکی می‌باشد. با توجه به شکل ۳-۱ و شکل ۳-۲ و با استفاده از انتگرال‌گیری از رابطه فوق رابطه بین ولتاژ داخلی ماکزیمم E_{pk} و شار ماکزیمم ورودی φ_{max} به هر قطب استاتور به

صورت زیر بدست می‌آید:

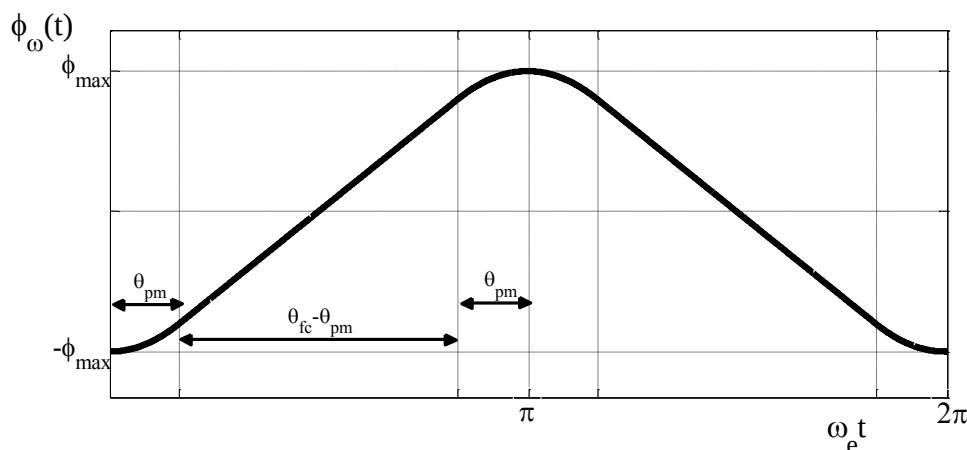
$$E_{pk} = \frac{2\varphi_{\max}(pN_{ph}\omega_e)}{\pi + p\theta_{pm}} \quad (2-3)$$

از رابطه (۲-۳) مشخص است که پارامترهای ساختاری مثل طول کمان آهنربای دائم و تعداد قطب‌ها در ولتاژ داخلی مؤثر می‌باشد. به هر حال برای استخراج رابطه (۲-۳) از یک سری فرضیات ساده کننده (مثلاً صرف نظر کردن از شار نشتی) استفاده شده است و در عمل پارامترهای هندسی بیشتری در ولتاژ داخلی مؤثر می‌باشد که برای بررسی تأثیر آنها باید از روش‌های عددی مثل روش اجزای محدود استفاده کرد.

اگر پارامترهای هندسی به صورت مناسب انتخاب شوند شکل موج شار پیوندی سیم پیچ در بی‌باری و در نتیجه ولتاژ داخلی ماشین به موج‌های سینوسی خالص نزدیک می‌شوند. در این صورت می‌توان ماشین TFPM قطب چنگالی را به صورت PMSM مورد استفاده قرار داد. ماشین مورد بررسی در این گزارش از نوع PMSM می‌باشد و لذا در بحث‌های آتی این فصل ولتاژ داخلی مطلوب به صورت سینوسی می‌باشد.



شکل ۳-۱: شکل موج ولتاژ دوزنقه‌ای



شکل ۳-۲: شار ورودی به هر قطب استاتور

۳-۳- محاسبه تلفات در ماشین‌های الکتریکی

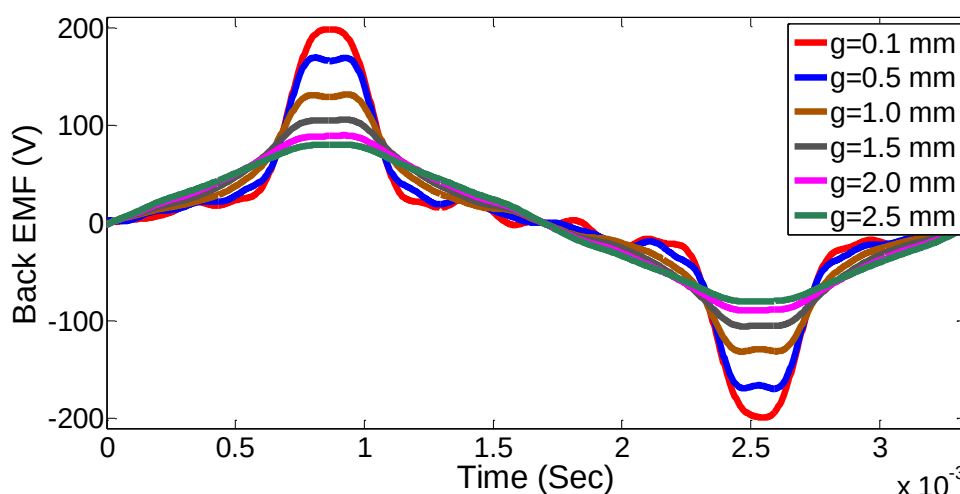
عملکرد ماشین‌های الکتریکی همواره با مقداری تلفات انرژی همراه است. تلفات تحت تأثیر عوامل و پارامترهای متعدد طراحی، محیطی و عملکردی می‌باشند. تلفات ماشین از تلفات هسته، تلفات مکانیکی، تلفات اهمی و غیره تشکیل می‌شود. تلفات در ماشین کار مفیدی انجام نداده و باعث کاهش راندمان ماشین می‌شود. همچنین تلفات باعث افزایش دما در ماشین خواهد شد [۱۸]. در نظر گرفتن توان تلف شده در ماشین‌های الکتریکی به دو دلیل (۱) تأثیر تلفات بر هزینه بهره برداری ماشین‌های الکتریکی (برای مثال ماشین با بازده کم تلفات بیشتر داشته و هزینه بهره برداری بیشتری هم خواهد داشت) و (۲) تأثیر تلفات بر ایجاد حرارت و بالا رفتن دمای ماشین (همچون منابع حرارتی عمل می‌کند که باعث کاهش عمر عایق‌های ماشین می‌شود)، ضروری است.

در ماشین TFPM قطب چنگالی، بخش عمده تلفات را تلفات آهن تشکیل می‌دهد. لذا به عنوان یکی از اهداف مقایسه‌ای مدنظر این پایان نامه، به محاسبه تلفات آهن در ماشین مورد مطالعه پرداخته خواهد شد. همان طور که قبلاً بیان شد، در این پژوهش برای تحلیل‌های الکترومغناطیسی ماشین مورد نظر از روش اجزاء محدود استفاده شده است. بنابراین برای بررسی تأثیر هر کدام از عوامل ساختاری بر روی تلفات آهن ماشین مورد نظر نیز از روش اجزاء محدود استفاده خواهد شد.

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

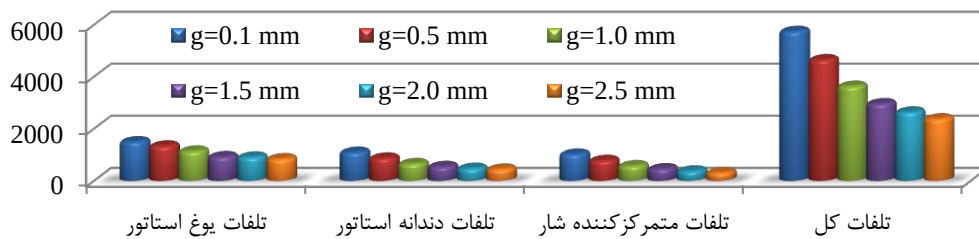
۳-۴-۱- تأثیر فاصله هوایی

شکل ۳-۳ ولتاژ داخلی ماشین TFPM مورد مطالعه را به ازای فاصله هوایی‌های مختلف نشان می‌دهد. باید توجه کرد که در استخراج این شکل فقط طول فاصله هوایی تغییر کرده است و شکل آن به صورت یکنواخت باقی مانده است. همان طور که از این شکل مشخص است با کاهش طول فاصله هوایی دامنه ولتاژ داخلی افزایش پیدا می‌کند در حالی که شکل موج ولتاژ داخلی از موج سینوسی خالص فاصله می‌گیرد.



شکل ۳-۳: شکل موج ولتاژ داخلی به ازای فاصله هوایی‌های مختلف

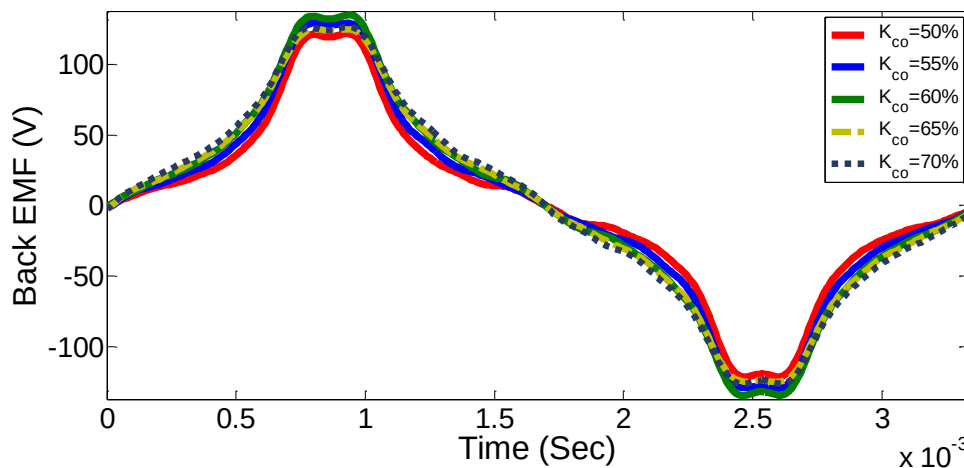
شکل ۳-۴ نیز مقادیر عددی تلفات آهن ماشین TFPM مورد مطالعه را به ازای فاصله هوایی‌های مختلف نشان می‌دهد. همان طور که از این شکل مشخص است با کاهش طول فاصله هوایی تلفات آهن در تمامی قسمت‌های ماشین افزایش می‌یابد. علت این موضوع آن است که با کاهش طول فاصله هوایی مقاومت مغناطیسی در مسیر شار روتور کاهش پیدا کرده است و در نتیجه چگالی شار در هسته افزایش یافته است.



شکل ۳-۴: مقادیر عددی تلفات آهن به ازای فاصله هوایی مختلف

۳-۴-۲- تأثیر درصد یا ضریب پوشش روتور توسط دندانه استاتور

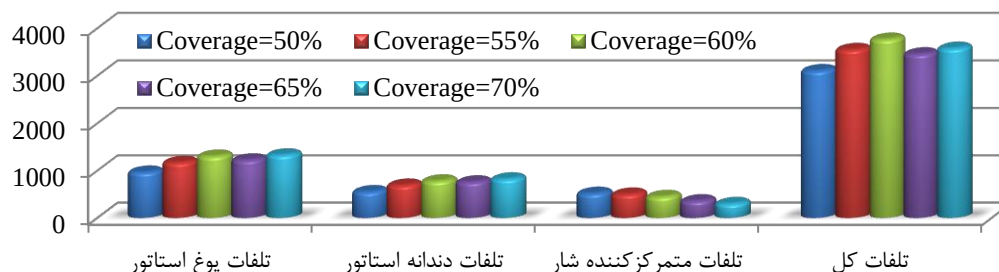
این ضریب با K_{co} نشان داده می‌شود و بیانگر نسبت سطح مجاور به فاصله هوایی دندانه استاتور به سطح مجاور به فاصله هوایی متمرکزکننده شار روتور می‌باشد. شکل موج ولتاژ داخلی به ازای K_{co} های مختلف در شکل ۳-۵ نشان داده شده است. از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش K_{co} دامنه و مقدار مؤثر ولتاژ داخلی افزایش پیدا می‌کند. با این حال نمی‌توان با قاطعیت در مورد تأثیر K_{co} بر روی هارمونیک‌های ولتاژ داخلی نظری داد (تغییر محسوسی در شکل ظاهری ولتاژ داخلی ایجاد نمی‌شود).



شکل ۳-۵: شکل موج ولتاژ داخلی به ازای K_{co} های مختلف

مقادیر عددی تلفات آهن ماشین TFPM مورد نظر در شکل ۳-۶ به ازای K_{co} مختلف نشان داده شده است. همان طور که از این شکل مشخص است با افزایش ضریب K_{co} تلفات آهن در دندانه

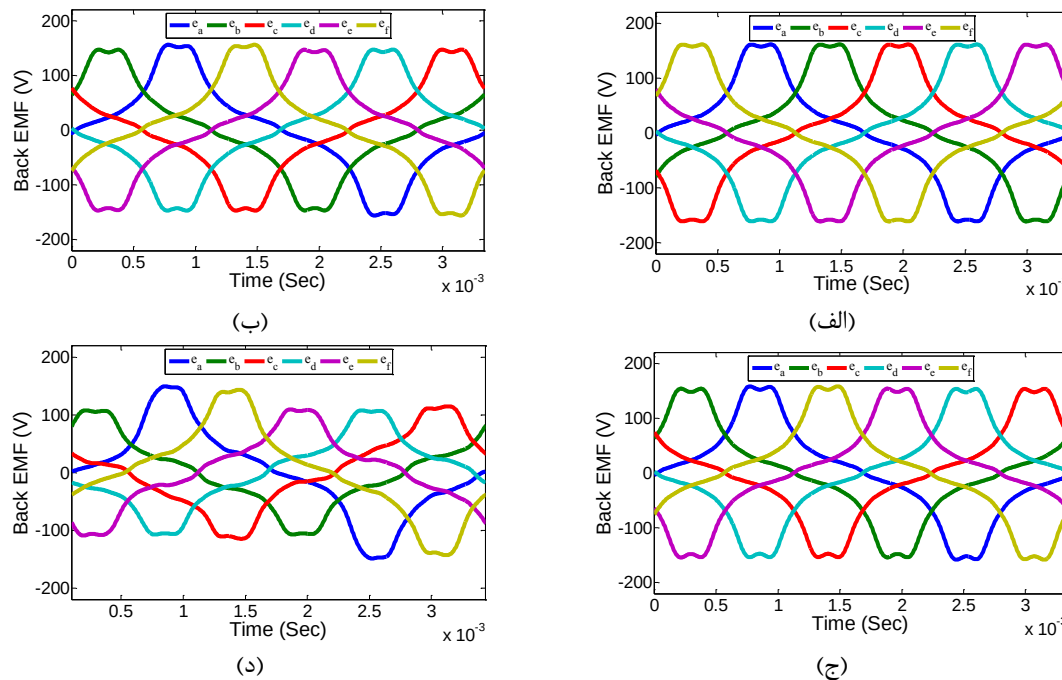
و یوغ استاتور افزایش می‌یابد در حالی که تلفات متمرکزکننده شار روتور کم می‌شود که علت کاهش تلفات متمرکزکننده شار روتور، توزیع یکنواخت‌تر شار در آن می‌باشد.



شکل ۳-۶: مقادیر عددی تلفات آهن به ازای K_{co} های مختلف

۳-۴-۳- تأثیر نحوه قرارگیری فازها کنار هم

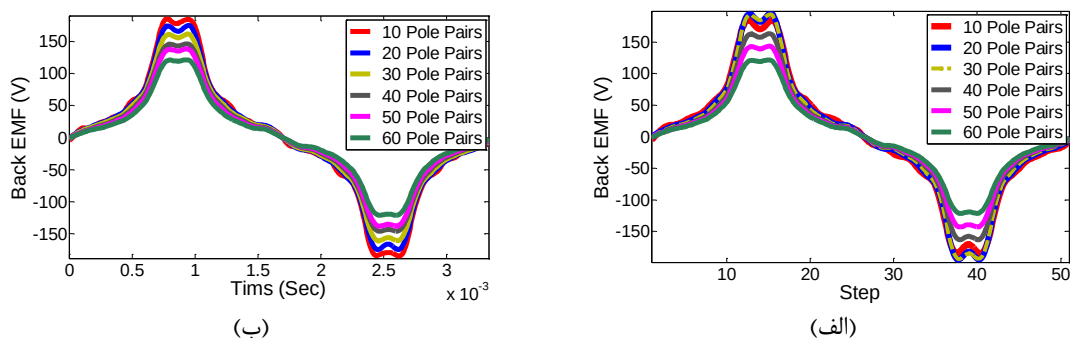
همان طور که در فصل ۲ اشاره شد فازها را می‌توان به طرق مختلف در کنار هم قرار داد. در حالت کلی در ماشین‌های TFPM، فازها به طور معمول از لحاظ مغناطیسی از هم مستقل هستند که این موضوع به خاطر فاصله‌ای است که بین فازها وجود دارد (شکل ۲-۱). در حالت‌های دیگر می‌توان استاتورهای هر فاز را از فازهای دیگر مستقل ساخت در حالی که روتورهای هر فاز با فازهای دیگر به صورت یکپارچه باشند و بالعکس. همچنین می‌توان هم استاتورها و هم روتورهای فازها را به صورت یکپارچه کنار هم قرار داد. یکپارچه ساختن هر کدام از استاتورها یا روتورها، باعث تزویج بین فازها شده که این موضوع می‌تواند بر روی ولتاژ داخلی تأثیرگذار باشد. شکل موج ولتاژ داخلی شش فاز برای هر کدام از حالت‌های اشاره شده در بالا در شکل ۳-۷ نشان داده شده است. با دقت به شکل ۳-۷-د، ساخت یکپارچه استاتورها و روتورهای ماشین TFPM قطب چنگالی مورد مطالعه باعث می‌شود که دامنه و شکل موج ولتاژ داخلی بین فازها یکسان نبوده که این موضوع باعث عدم تعادل در شکل موج ولتاژ داخلی فازهای ماشین خواهد شد. همان طور که مشاهده می‌شود کنار هم قرار دادن فازها در حالت‌های دیگر تأثیر زیادی بر روی شکل موج ولتاژ داخلی نخواهد داشت.



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

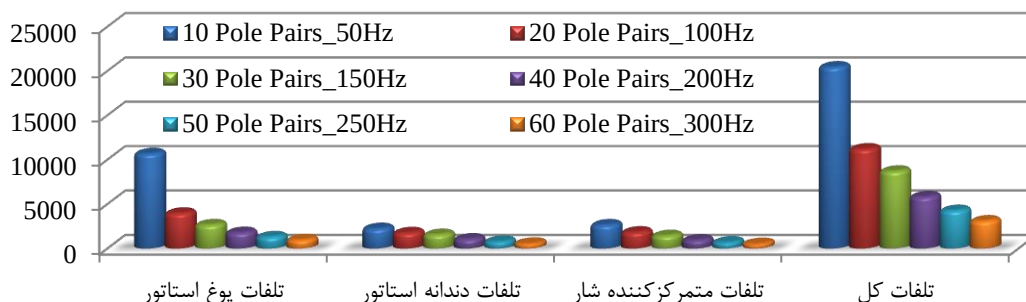
۳-۴-۴- تأثیر تعداد قطبها

همان طور که در فصل قبل بیان شد تأثیر تعداد قطبها در ولتاژ داخلی در دو حالت سرعت ثابت و فرکانس ثابت بررسی می‌شود. اثر تغییر تعداد قطبهای ماشین بر روی ولتاژ داخلی در سرعت ثابت در شکل ۳-۸-الف نشان داده می‌شود. همان طور که از شکل مشخص است با کاهش تعداد قطبها در سرعت ثابت ولتاژ داخلی نوک تیزتر شده که به معنی فاصله گرفتن ولتاژ داخلی از شکل موج سینوسی خالص می‌باشد. اثر تغییر تعداد قطبهای ماشین بر روی ولتاژ داخلی در فرکانس ثابت در شکل ۳-۸-ب نشان داده می‌شود. در اینجا نیز مانند حالت سرعت ثابت، با کاهش تعداد قطبها در فرکانس ثابت ولتاژ داخلی نوک تیزتر می‌شود که به معنی فاصله گرفتن ولتاژ داخلی از شکل موج سینوسی خالص می‌باشد. اما در اینجا نوک تیز شدن شکل موج با شیب کمتری صورت می‌گیرد.

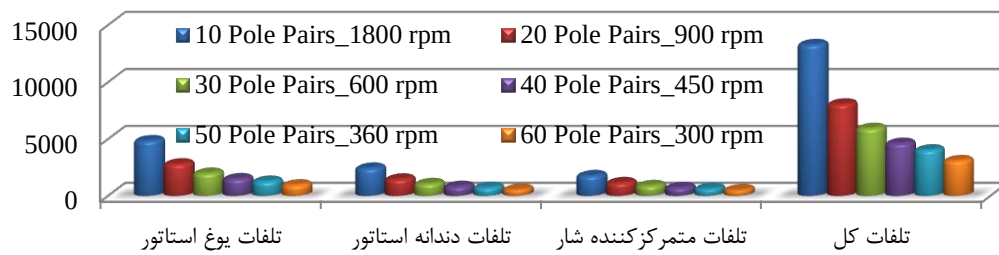


شکل ۳-۸: شکل موج ولتاژ داخلی به ازای تعداد قطب‌های مختلف (الف) در سرعت ثابت، (ب) در فرکانس ثابت

شکل ۳-۹ مقادیر عددی تلفات آهن ماشین TFPM مورد نظر را به ازای تعداد قطب‌های مختلف در سرعت ثابت نشان می‌دهد. با افزایش تعداد قطب‌ها تلفات آهن در تمامی قسمت‌های ماشین کاهش می‌یابد. این موضوع به دلیل ویژگی خاص ماشین TFPM می‌باشد. همان طور که در فصل قبل توضیح داده شد با افزایش تعداد قطب‌ها در ماشین TFPM چگالی گشتاور بالا رفته و به عبارت دیگر حجم مواد اکتیو کاهش می‌یابد. این درحالی است که چگالی شار در تمام حالت‌های طراحی ثابت فرض شده است. از اینرو تلفات آهن کل کاهش می‌یابد. شکل ۳-۱۰ مقادیر عددی تلفات آهن ماشین TFPM مورد نظر را به ازای تعداد قطب‌های مختلف در فرکانس ثابت نشان می‌دهد. با افزایش تعداد قطب‌ها تلفات آهن در تمامی قسمت‌های ماشین کاهش می‌یابد. همانند حالت سرعت ثابت کاهش تلفات به دلیل کاهش حجم مواد اکتیو می‌باشد. علاوه بر این، به علت کاهش سرعت با افزایش تعداد قطب‌ها در فرکانس ثابت نرخ تغییر چگالی شار کاهش می‌یابد و این موضوع نیز خود باعث کاهش تلفات می‌شود.



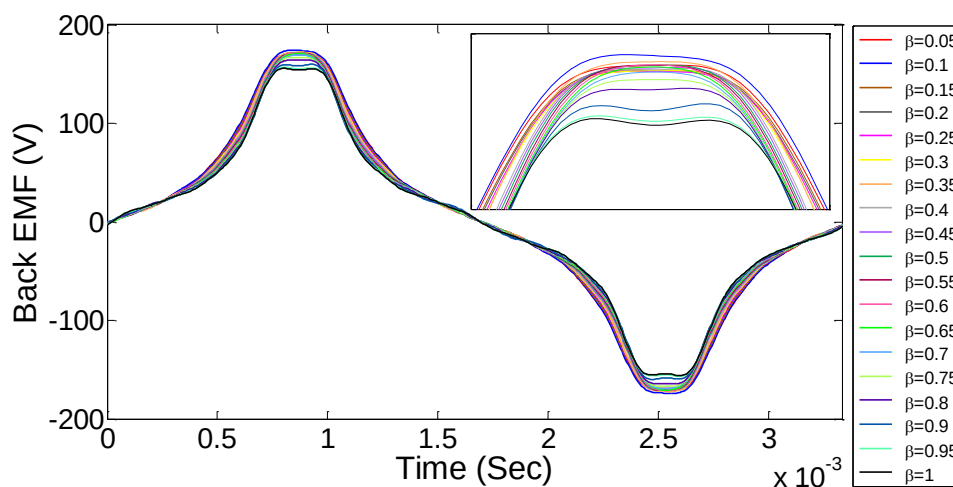
شکل ۳-۹: مقادیر عددی تلفات آهن به ازای تعداد قطب‌های مختلف در سرعت ثابت



شکل ۳-۱۰: مقادیر عددی تلفات آهن به ازای تعداد قطب‌های مختلف در فرکانس ثابت

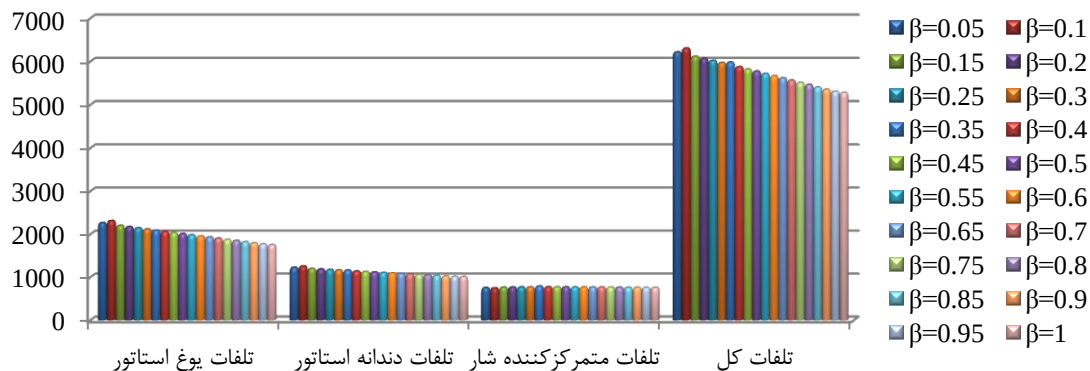
۳-۴-۵- تأثیر شکل کفشک قطب استاتور

همان طور که در شکل ۲-۶ دیده می‌شود با تغییر ضریب β می‌توان شکل سطح مجاور به فاصله هوایی دندانه استاتور را به صورت دلخواه تغییر داد. در شکل ۳-۱۱ نحوه تأثیر شکل سطح مجاور به فاصله هوایی دندانه استاتور بر روی ولتاژ داخلی نشان داده شده است. همچنین برای وضوح بیشتر در این شکل ناحیه مربوط به دامنه‌های ولتاژ داخلی بزرگ نمایشی شده است. در این شکل β از یک تا حدود صفر تغییر کرده است. همان طور که دیده می‌شود که با کاهش β شکل موج ولتاژ داخلی به سینوسی نزدیک می‌شود. اگرچه این تغییرات ولتاژ داخلی خیلی واضح نیست اما در فصل‌های بعد نشان داده خواهد شد که همین تغییرات جزئی باعث بهبود رپل گشتاور ماشین خواهد شد.



شکل ۳-۱۱: شکل موج ولتاژ داخلی به ازای شکل‌های مختلف کفشک قطب

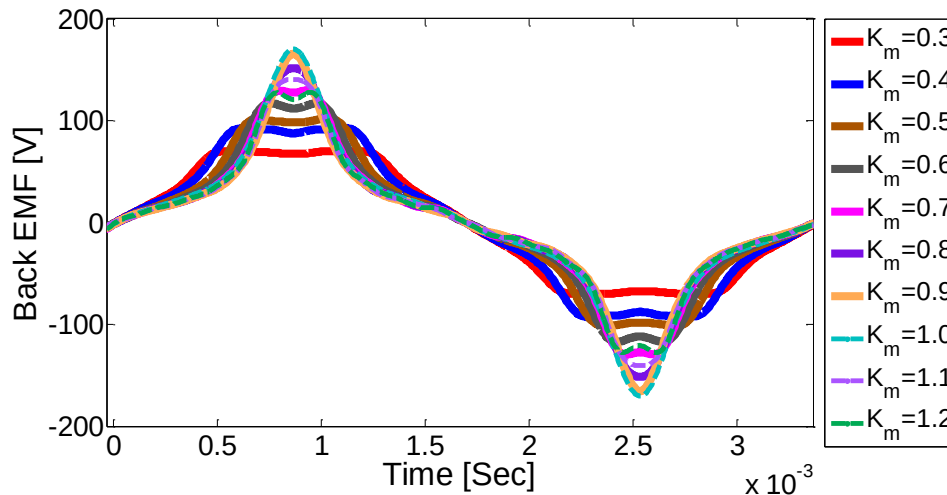
شکل ۳-۱۲ مقادیر عددی تلفات آهن ماشین TFPM مورد نظر را برای شکل‌های مختلف سطح مجاور به فاصله هوایی دندانه استاتور (β های مختلف) نشان می‌دهد. از این شکل مشخص است که با افزایش β تلفات آهن در یوغ و دندانه استاتور مقداری کاهش می‌یابد اما تلفات متمرکزکننده شار تقریباً ثابت می‌ماند.



شکل ۳-۱۲: مقادیر عددی تلفات آهن به ازای شکل‌های مختلف کفشک قطب

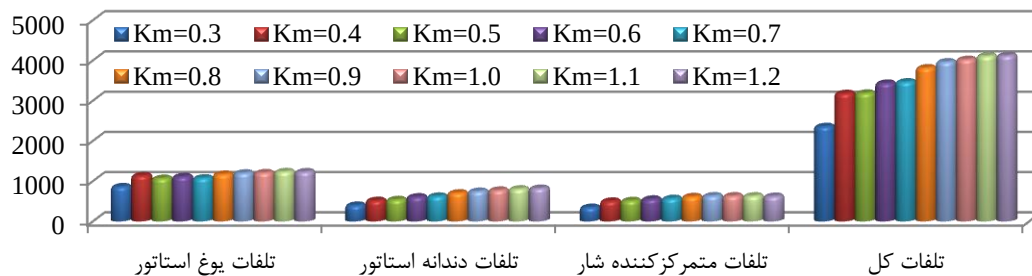
۳-۴-۶- تأثیر نسبت کمان آهنربای دائم به کمان متمرکزکننده شار روتور

این نسبت که با K_m نشان داده می‌شود، مهمترین پارامتر هندسی مؤثر در شکل موج ولتاژ داخلی ماشین TFPM می‌باشد. همان طور که از شکل ۳-۱۳ مشخص است در K_m های کوچک شکل موج ولتاژ داخلی کاملاً دوزنقه‌ای است (این موضوع از شکل ۳-۱ نیز قابل دریافت می‌باشد به طوری که با کاهش K_m ، طول بازه‌ای که ولتاژ داخلی ثابت است بیشتر می‌شود). با افزایش K_m شکل موج ولتاژ داخلی به یک موج سینوسی نزدیک می‌شود و با افزایش بیشتر K_m شکل موج ولتاژ داخلی به موج مثلثی نزدیک می‌شود. همچنین به ازای K_m های بزرگتر از یک با افزایش K_m شکل موج مجدداً از حالت مثلثی به سمت شکل موج دوزنقه‌ای حرکت می‌کند.



شکل ۳-۱۳: شکل موج ولتاژ داخلی به ازای K_m های مختلف

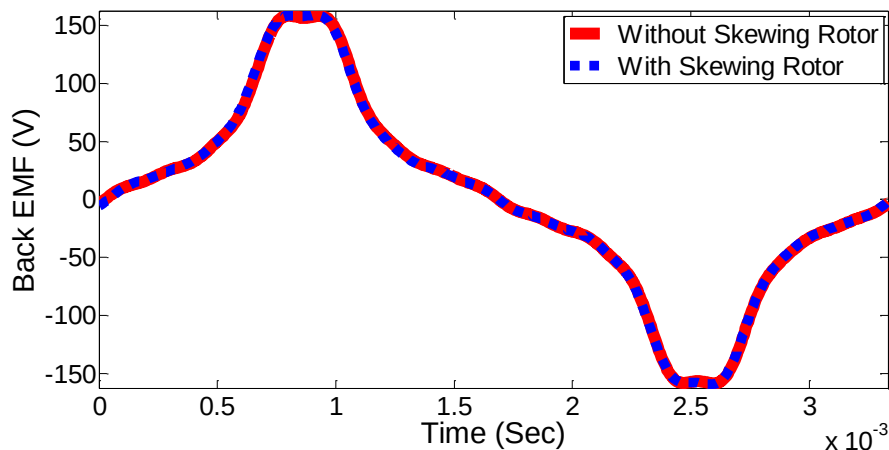
شکل ۳-۱۴: مقادیر عددی تلفات آهن ماشین TFPM مورد نظر را برای شکل‌های مختلف سطح مجاور به فاصله هوایی دندان استاتور (β های مختلف) نشان می‌دهد. از این شکل مشخص است که با افزایش β تلفات آهن در یوغ و دندان استاتور مقداری کاهش می‌یابد اما تلفات متمرکزکننده شار تقریباً ثابت می‌ماند.



شکل ۳-۱۴: مقادیر عددی تلفات آهن به ازای K_m های مختلف

۳-۴-۷- تأثیر مستقیم یا مورب بودن قطب‌های روتور

شکل ۳-۱۵ نشان می‌دهد که مستقیم یا مورب ساختن روتور (متمرکزکننده‌های شار و آهنرباها) در شکل موج ولتاژ داخلی عملاً بی‌تأثیر است. همچنین تلفات آهن مستقل از مستقیم یا مورب بودن روتور بوده و تقریباً برابر با ۴/۵ کیلو وات می‌باشد.

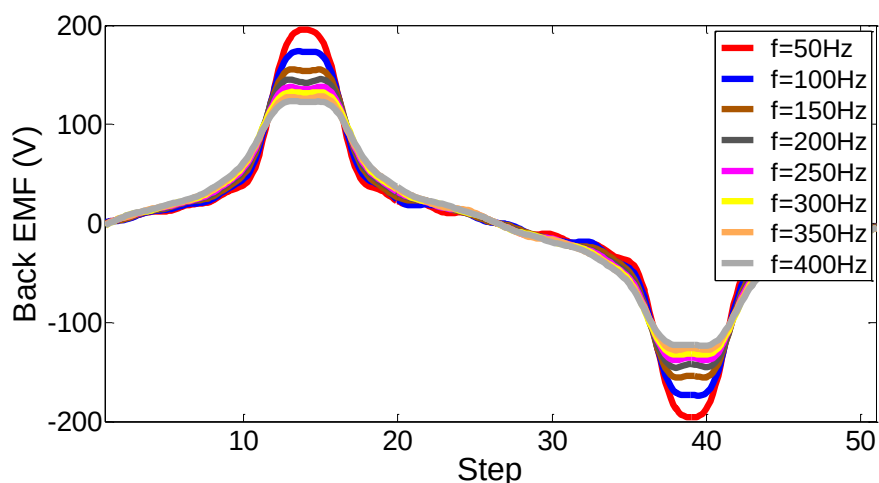


شکل ۳-۱۵: تأثیر مورب ساختن قطب‌های روتور بر روی شکل موج ولتاژ داخلی

۳-۵- عوامل مؤثر دیگر در شکل موج ولتاژ داخلی

۳-۵-۱- تأثیر فرکانس بر روی شکل موج ولتاژ داخلی

یکی از ورودی‌ها در الگوریتم طراحی فرکانس تغذیه می‌باشد. علاوه بر عوامل ساختاری فوق فرکانس داده شده در الگوریتم طراحی نیز در شکل موج ولتاژ داخلی مؤثر است (به دلیل تغییر ابعاد هندسی طراحی شده توسط الگوریتم به ازای فرکانس‌های مختلف). در شکل ۳-۱۶ تأثیر فرکانس داده شده در الگوریتم طراحی در شکل موج ولتاژ داخلی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش فرکانس در الگوریتم طراحی، ولتاژ داخلی به شکل موج سینوسی نزدیکتر می‌شود.



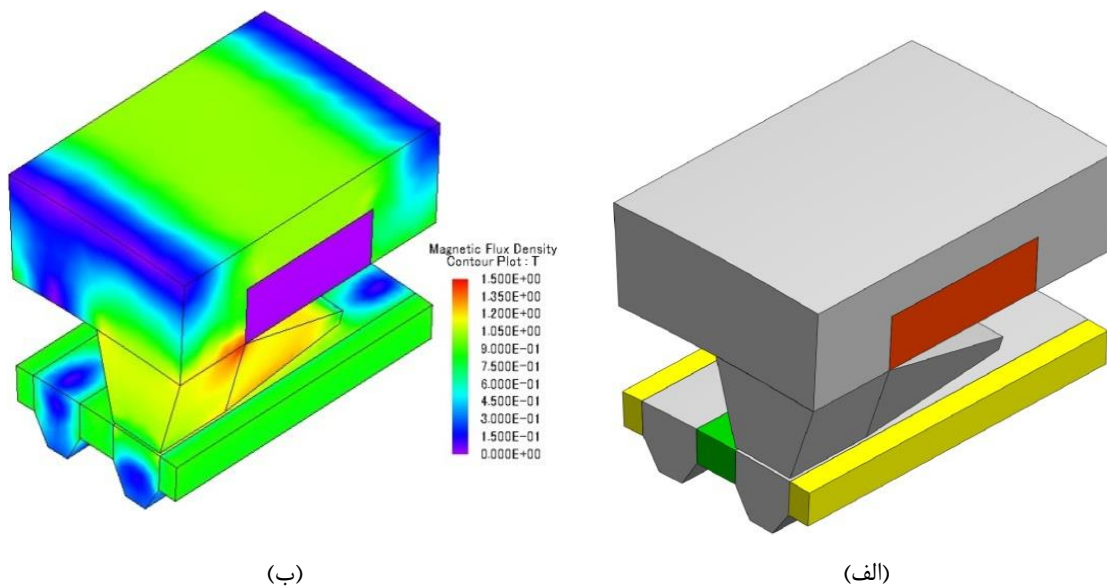
شکل ۳-۱۶: شکل موج ولتاژ داخلی به ازای فرکانس‌های مختلف

۳-۵-۲- گام‌هایی جهت دستیابی به ولتاژ داخلی سینوسی

در این بخش، یک روش جدید برای رسیدن به ولتاژ داخلی تقریباً سینوسی برای ماشین TFPM قطب چنگالی مورد نظر در این پژوهش با استفاده از برخی از تغییرات هندسی مناسب ارائه می‌شود. برای رسیدن به این هدف، به جای در نظر گرفتن یک طول فاصله هوایی ثابت، فاصله هوایی متغیر با موقعیت روتور پیشنهاد شده است. برای رسیدن به فاصله هوایی مطلوب، سطح مقابل فاصله هوایی دندانه‌های استاتور و متمرکزکننده‌های شار روتور بهینه می‌شوند. بر اساس نتایج بدست آمده از روش اجزای محدود تحت شرایط بی‌باری ماشین، شکل صحیح این سطوح تعیین خواهد شد.

۳-۵-۲-۱- ولتاژ داخلی موتور مورد مطالعه

یک جفت قطب از موتور مورد نظر در این بخش در شکل ۳-۱۷-الف و توزیع چگالی شار آن در شرایط مدار باز در شکل ۳-۱۷-ب نشان داده شده است. پارامترهای مهم و مقادیر نامی این موتور نیز در جدول ۳-۱ و مواد به کار رفته در ساختار موتور در جدول ۳-۲ ارائه شده است.



شکل ۳-۱۷: (الف) یک جفت قطب از موتور مورد مطالعه، (ب) توزیع چگالی شار در داخل موتور در شرایط مدار باز

جدول ۱-۳: پارامترهای و مقادیر نامی موتور مورد مطالعه

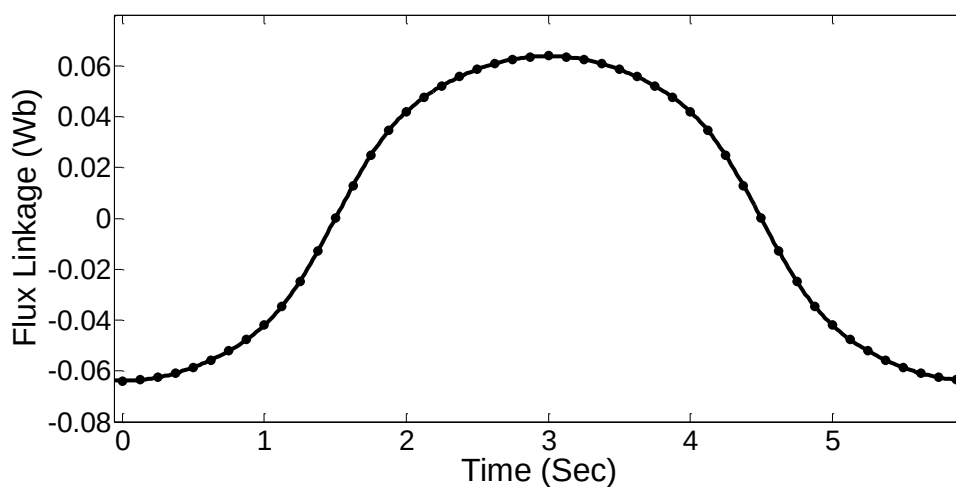
نام پارامتر	نماد	مقدار پارامتر
قطر خارجی هسته استاتور	P_{out}	۱۳۷۷ میلی متر
قطر سطح فاصله هوایی	D_g	۱۳۱۲ میلی متر
عمق شیار	d_{ws}	۴۴ میلی متر
عمق پشت هسته استاتور	d_{cs}	۱۴/۵ میلی متر
ارتفاع مغناطیس‌های دائم	H_{pm}	۱۲ میلی متر
طول محوری هر فاز استاتور	L_s	۱۰۵ میلی متر
طول محوری شیار	L_{ss}	۵۱/۵ میلی متر

جدول ۲-۳: مواد به کار رفته در ساختار موتور مورد مطالعه

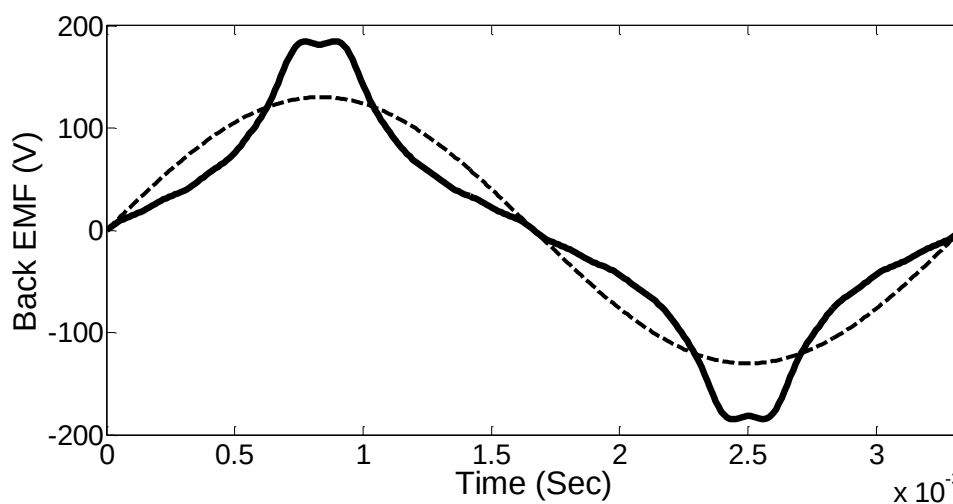
هسته استاتور	Somaloy500+0.5%Kenolube_800MPa
متمرکزکننده‌های شار روتور	Somaloy500+0.5%Kenolube_800MPa
آهنرباهای دائم	NEOMAX-32EH
سیم پیچ	Copper

شکل موج شار پیوندی موتور در شرایط مدار باز در شکل ۱۸-۳ نشان داده شده است. مقادیر شار پیوندی در ۴۸ گام توسط روش اجزای محدود و با استفاده از نرم افزار JMAG بدست آمده است. در نگاه اول به نظر می‌رسد که شکل موج شار پیوندی شبیه به یک شکل موج سینوسی است. در حالی که شامل هارمونیک‌های ناخواسته‌ای است که منجر به اعوجاج در شکل موج ولتاژ داخلی خواهد شد. شکل موج ولتاژ داخلی و مقدار اصلی آن، در شکل ۱۹-۳ نشان داده شده است. از این شکل کاملاً مشخص است که شکل موج ولتاژ داخلی با شکل موج سینوسی خالص فاصله زیادی دارد. نتایج آنالیز هارمونیک ولتاژ داخلی در جدول ۳-۳ ارائه شده است. این نتایج نشان می‌دهد که دامنه هارمونیک‌های سوم و پنجم ولتاژ داخلی به ترتیب در حدود ۳۰٪ و ۱۳٪ از دامنه مقدار اصلی می‌باشد. این هارمونیک‌ها می‌توانند اثر منفی در عملکرد ماشین داشته باشند. بنابراین، تا آنجا که ممکن است از بین بردن این مؤلفه‌های هارمونیک بدون کاهش زیاد در دامنه مقدار اصلی ولتاژ داخلی مطلوب

خواهد بود.



شکل ۳-۱۸: شکل موج شار پیوندی در شرایط مدار باز موتور مورد مطالعه



شکل ۳-۱۹: شکل موج ولتاژ داخلی موتور مورد مطالعه

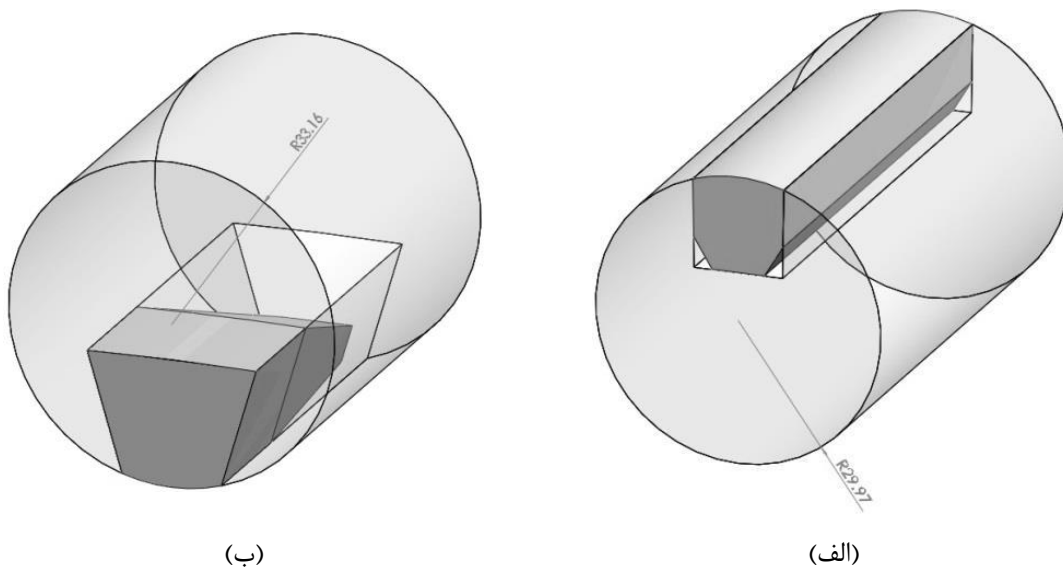
جدول ۳-۳: آنالیز هارمونیک ولتاژ داخلی موتور مورد مطالعه

شماره هارمونیک	۱	۳	۵	۷	۹	۱۱	۱۳
دامنه ولتاژ (ولت)	۱۲۹/۹۴	۳۸/۱۶	۱۶/۹۱	۴/۷۸	۰/۹۳	۱/۵۷	۱/۹۶
فاز (درجه)	-۸۹/۴	-۹۱/۸	-۸۷	۹۴/۲	-۸۴/۶	-۸۳/۴	۹۷/۸
مقدار مؤثر ولتاژ (ولت)	۹۶/۶۰۷۰						
THD %	۳۲/۴۷۳۹						

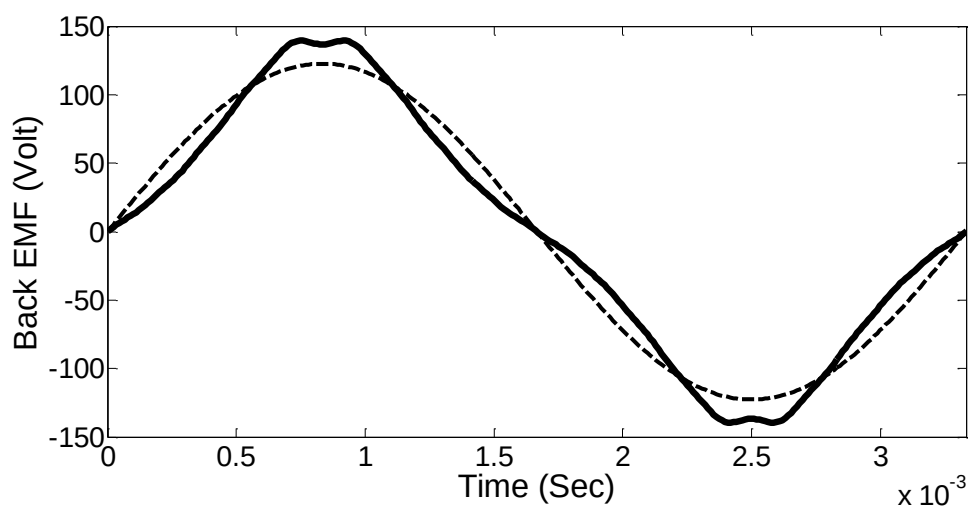
۳-۵-۲-۲- اصلاح شکل موج ولتاژ داخلی موتور مورد مطالعه

در قسمت قبلی، با استفاده از آنالیز هارمونیک موتور مورد مطالعه، نشان داده شد که شکل موج ولتاژ داخلی با شکل موج سینوسی خالص فاصله زیادی دارد. بنابراین هدف در اینجا هر چه سینوسی‌تر کردن شکل موج ولتاژ داخلی است.

برای ماشین سنکرون TFPM قطب چنگالی، دقیقاً شبیه به آنچه که در ماشین‌های سنکرون قطب برجسته انجام می‌شود، با اصلاح مناسب سطح رو به رو به فاصله هوایی قطب‌های روتور (متمرکزکننده‌های شار روتور)، شکل موج ولتاژ داخلی تقریباً سینوسی دست یافتنی خواهد بود. می‌توان نشان داد که با افزایش برجستگی در سطح رو به رو به فاصله هوایی متمرکزکننده‌های شار روتور (شکل ۳-۲۰-الف را مشاهده فرمایید)، THD شکل موج ولتاژ داخلی را کاهش داد. برای مثال اگر از سطح خارجی استوانه‌ای با شعاع ۳۰ میلی متر برای سطح رو به رو به فاصله هوایی متمرکز کننده شار روتور استفاده شود، شکل موج ولتاژ داخلی شبیه به شکل ۳-۲۱ خواهد شد. آنالز هارمونیک مربوط به آن در جدول ۳-۴ ارائه شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که به دلیل بهینه کردن متمرکز کننده شار روتور، دامنه مؤلفه‌های هارمونیک اصلی و دیگر هارمونیک‌های شکل موج ولتاژ داخلی کاهش یافته است. دامنه هارمونیک‌های سوم، پنجم و هفتم به ترتیب به میزان $49/3\%$ ، $99/5\%$ و 85% کاهش یافته است. این در حالی است که دامنه مربوط به هارمونیک اصلی نیز به میزان $5/8\%$ کاهش پیدا می‌کند. بنابراین، THD شکل ولتاژ داخلی در حدود $16/6\%$ بهبود یافته است.



شکل ۳-۲۰: 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.



شکل ۳-۲۱: شکل موج ولتاژ داخلی موتور با متمرکز کننده‌های شار روتور اصلاح شده

جدول ۳-۴: آنالیز هارمونیک ولتاژ داخلی موتور با متمرکز کننده‌های شار روتور اصلاح شده

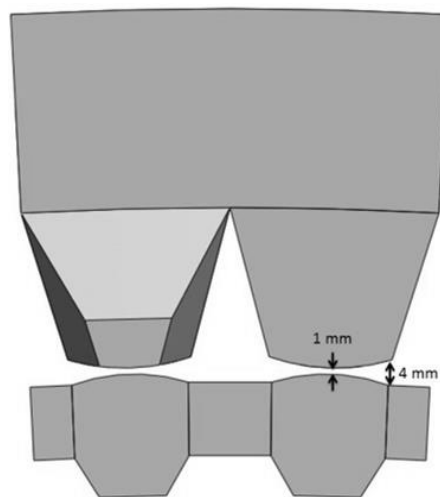
۱۳	۱۱	۹	۷	۵	۳	۱	شماره هارمونیک
۰/۷۶	۰/۸۸	۱/۰۱	۰/۷	۰/۰۹	۱۹/۳۴	۱۲۲/۴۰	دامنه ولتاژ (ولت)
۹۷/۸	-۸۳/۴	۹۵/۴	-۸۵/۸	۹۳	۹۱/۸	-۸۹/۴	فاز (درجه)
۸۷/۶۳۸۱							مقدار مؤثر ولتاژ (ولت)
۱۵/۸۸۶۸							THD %

هر چند که می‌توان با اصلاح کردن متمرکز کننده شار روتور به یک فاصله هوایی متغیر دست یافت، اما این کار برای رسیدن به یک شکل موج ولتاژ داخلی تقریباً سینوسی کافی نخواهد بود. جهت رسیدن به این مطلوب، علاوه بر قطب‌های روتور، سطوح رو به رو به فاصله هوایی قطب‌های استاتور (دندانه‌های استاتور) نیز باید اصلاح شوند (شکل ۳-۲۰-ب را مشاهده فرمایید). ایده اصلی در انتخاب شکل صحیح متمرکز کننده شار روتور و دندانه استاتور بهینه کردن نرخ تغییرات شار پیوندی می‌باشد. شکل ۳-۱۹ نشان می‌دهد که نرخ تغییرات شار پیوندی در پیک ولتاژ داخلی بسیار بالاست، در حالی که این نرخ در نقطه عبور از صفر مقدار بسیار کمی می‌باشد. می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده از تغییرات نشان داده شده در شکل ۳-۲۰، میزان تغییرات شار پیوندی بهبود یافته است. به هر حال، بدست آوردن یک معادله برای تعیین شکل بهینه سطوح رو به رو به فاصله هوایی قطب‌های روتور و استاتور، کار بسیار مشکلی است. بنابراین در اینجا از روش سعی و خطا استفاده شده است. در این فرایند باید دو موضوع مهم در نظر گرفته شود: (۱) باید THD ولتاژ داخلی تا آنجا که ممکن است کاهش یابد و (۲) افت مؤلفه اصلی ولتاژ داخلی تا آنجا که ممکن است مینیمم شود.

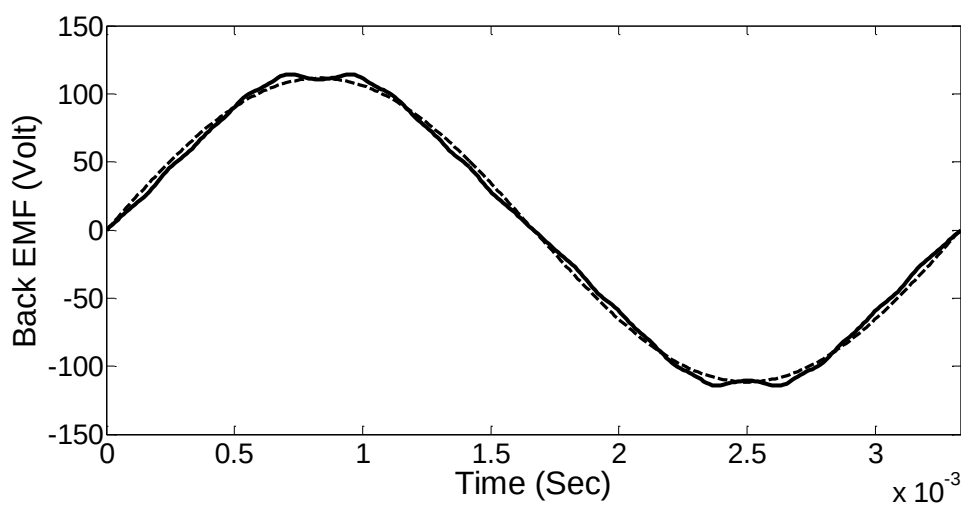
همان طور که در شکل ۳-۲۲ نشان داده شده است، با استفاده از روش اجزای محدود یک فاصله هوایی بهینه برای رسیدن به این اهداف ارائه شده است. با توجه به این شکل، سطوح رو به رو به فاصله هوایی متمرکز کننده‌های شار روتور و دندانه‌های استاتور به گونه‌ای بهینه شده‌اند که طول فاصله هوایی بین مقدار مینیمم ۱ میلی متر و ماکزیمم ۴ میلی متر متغیر باشد. شکل ۳-۲۳ شکل موج ولتاژ داخلی موتور بهینه شده را نشان می‌دهد. از این شکل مشخص است که شکل موج ولتاژ داخلی تقریباً سینوسی می‌باشد. نتایج آنالیز هارمونیک آن در جدول ۳-۵ ارائه شده است. با مقایسه این جدول با جدول ۳-۳ با استفاده از فاصله هوایی بهینه شده:

- افت دامنه مؤلفه اصلی ولتاژ داخلی در حدود ۱۴/۳۴٪ است.
- دامنه هارمونیک‌های سوم، پنجم و هفتم به ترتیب به میزان ۸۶/۱۱٪، ۸۷/۶۴٪ و ۷۶/۷۸٪ کاهش یافته است.

- THD ولتاژ داخلی بیشتر از ۲۷٪ بهبود یافته است.



شکل ۳-۲۲: فاصله هوایی بهینه توسط تغییر سطوح رو به رو به فاصله هوایی متمرکز کننده‌های شار روتور و دندانه‌های استاتور.



شکل ۳-۲۳: شکل موج ولتاژ داخلی موتور با متمرکز کننده‌های شار روتور و دندانه‌های استاتور اصلاح شده

جدول ۳-۵: آنالیز هارمونیک ولتاژ داخلی موتور با متمرکز کننده‌های شار روتور و دندانه‌های استاتور اصلاح شده

۱۳	۱۱	۹	۷	۵	۳	۱	شماره هارمونیک
۰/۴۶	۰/۲۴	۱/۲۹	۱/۱۱	۲/۰۹	۵/۳	۱۱۱/۳	دامنه ولتاژ (ولت)
۹۷/۸	-۸۳/۴	۹۵/۴	-۸۵/۸	۹۳	۹۱/۸	-۸۹/۴	فاز (درجه)
۷۸/۸۱۹							مقدار مؤثر ولتاژ (ولت)
۵/۴۵۵							THD %

به نظر می‌رسد که کاهش دامنه مؤلفه اصلی بسیار کمتر از هارمونیک‌های نامطلوب است. افت ولتاژ داخل دو اثر مهم بر روی عملکرد ماشین سنکرون خواهد داشت: (۱) افزایش زاویه توان که ممکن است منجر به کاهش پایداری شود و (۲) کاهش ضریب توان. اگر چه، بهینه سازی فاصله هوایی باعث کاهش دامنه مؤلفه اصلی ولتاژ داخلی شده است، این موضوع باعث کاهش اندوکتانس ماشین نیز شده است. این کاهش اثر افت ولتاژ داخلی بر روی عملکرد ماشین را کاهش می‌دهد.

فصل ۴:

شبیه سازی، محاسبه و بررسی اندوکتانس

ماشین TFPM قطب چنگالی و رفتار

دینامیکی گذرای

۴-۱- مقدمه

یکی از مهمترین پارامترها در تعیین عملکرد ماشین‌های الکتریکی اندوکتانس سیم پیچی هر فاز می‌باشد [۱۹]. تعیین دقیق و مؤثر آن یکی از عوامل تعیین‌کننده و مهم در طراحی و بهینه‌سازی ماشین‌هایی با عملکرد بالا می‌باشد [۲۰]. این موضوع در ماشین‌های الکتریکی توسعه یافته امروزی با ساختارها و مواد جدید از اهمیت ویژه‌تری برخوردار است. زیرا روش‌های متعارف بر اساس مدار معادل، فرمول‌های تجربی و یا تجربیات گذشته نمی‌توانند محاسبات دقیقی را فراهم آورند. از اینرو مدل کردن صحیح و دقیق ماشین و تحلیل عملکرد آن نیازمند محاسبه صحیح اندوکتانس ماشین می‌باشد. منحنی اندوکتانس در ماشین‌های الکتریکی تابعی از هندسه ماشین، جریان سیم پیچی هر فاز و اشباع هسته مغناطیسی است. آنالیز دینامیکی گذرای دقیق ماشین الکتریکی نیازمند منحنی اندوکتانس‌های خودی و متقابل نسبت به موقعیت مکانیکی روتور است. محاسبه اندوکتانس‌های محور d و محور q نیز، که تأثیر بسیار مهمی بر روی عملکرد دینامیکی و حالت ماندگار و تعیین گشتاور رلوکتانسی ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم دارند، نیازمند محاسبه دقیق اندوکتانس است [۲۱-۲۴]. همچنین جهت تنظیم مناسب حلقه‌های کنترلی، بهبود پاسخ گذرای و پایداری درایوهای الکتریکی باید اندوکتانس را به صورت دقیق پیش بینی کرد [۲۵]. از این رو تعیین دقیق اندوکتانس ماشین زمانی که هسته مغناطیسی در اشباع می‌باشد، موضوع بسیاری از مقالات تاکنون بوده است. امروزه به طور گسترده برای طراحی، بهینه‌سازی و تحلیل ماشین‌های الکتریکی از روش‌های عددی استفاده می‌شود که می‌توان از این روش‌ها نیز در محاسبه اندوکتانس بهره برد. همچون فصل‌های قبل برای محاسبه دقیق اندوکتانس در ماشین TFPM قطب چنگالی مورد بررسی به دلیل ساختار پیچیده و سه بعدی بودن شار آن، از روش اجزای محدود استفاده شده است. روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی اندوکتانس سیم‌پیچ با استفاده از روش اجزای محدود در مقالات استفاده شده است [۱۹ و ۲۶-۲۸].

۴-۲- اندوکتانس ظاهری و دیفرانسیلی

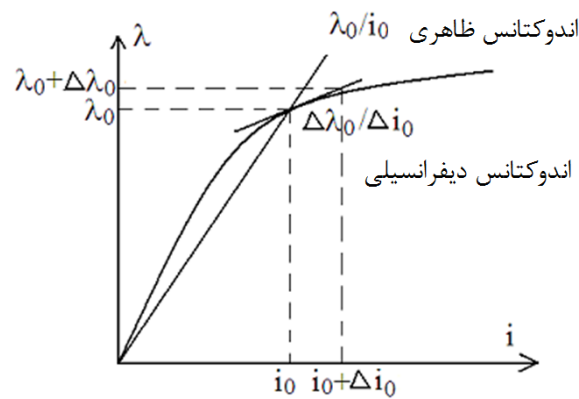
به طور کلی، در بیشتر کاربردها از اندوکتانس ظاهری^۱ که به صورت نسبت شار پیوندی به جریان سیم‌پیچی تعریف می‌شود، جهت تحلیل عملکرد ماشین استفاده می‌شود. این درحالی است که استفاده از اندوکتانس ظاهری در آنالیز دینامیکی که در آن مشخصه غیر خطی هسته مغناطیسی مدنظر است، صحیح نیست بلکه باید در آنالیزهای غیر خطی از اندوکتانس دیفرانسیلی^۲ بهره برد [۲۹]. به طور کلی اندوکتانس خودی هر سیم پیچ استاتور به دو روش متعارف ارزیابی می‌شود:

(۱) روش شار پیوندی

در شکل ۴-۱ نحوه تعیین اندوکتانس ظاهری و اندوکتانس دیفرانسیلی نشان داده شده است [۳۰]. بر اساس این شکل در یک سیستم خطی مغناطیسی، اندوکتانس خودی هر سیم پیچ عبارت است از نسبت شار پیوندی یک سیم پیچ به جریانی که از همان سیم پیچ عبور می‌کند، در حالی که جریان سیم‌پیچ‌های دیگر صفر باشد. اندوکتانس متقابل نیز عبارت است از نسبت شار پیوندی یک سیم‌پیچ به جریانی که از سیم پیچ دوم عبور می‌کند، در شرایطی که جریان سیم‌پیچ‌های دیگر از جمله همان سیم‌پیچی که شار پیوندی برای آن تعیین می‌شود، صفر باشد. در ماشین‌های TFPM قطب چنگالی از آنجا که فازها از نظر مغناطیسی از هم مستقل هستند، شار متقابل بین فازهای استاتور وجود ندارد بنابراین اندوکتانس متقابل بین فازها صفر است.

¹ Apparent or Secant Inductance

² Differential or Incremental Inductance



شکل ۴-۱: نحوه تعیین اندوکتانس ظاهری و اندوکتانس دیفرانسیلی [۳۰]

معادله (۴-۱) اندوکتانس ظاهری ماشین را به روش شار پیوندی نشان می‌دهد:

$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{N\phi}{i} \quad (۴-۱)$$

که در آن λ و i به ترتیب، مقادیر شار پیوندی و جریان سیم‌پیچی در هر فاز ماشین می‌باشد.

همان طور که در بالا اشاره شد در آنالیزهای غیر خطی از اندوکتانس دیفرانسیلی که در واقع شیب خط مماس در نقطه کار است، استفاده می‌شود. به طور کلی عملکرد دینامیکی ماشین برای هر فاز آن توسط معادله زیر بیان می‌شود:

$$u = Ri + \frac{d\lambda}{dt} \quad (۴-۲)$$

که در آن u ، R و i به ترتیب ولتاژ، مقاومت و جریان سیم پیچ می‌باشند. شار پیوندی ایجاد شده توسط جریان استاتور و آهنرباها، با جریان استاتور i و موقعیت روتور θ تغییر می‌کند.

$$\lambda = \lambda(i, i_{m1}, i_{m2}, \dots, i_{mp}, \theta) \quad (۴-۳)$$

که $i_{m1}, i_{m2}, \dots, i_{mp}$ جریان‌های سیم‌پیچ‌های معادل آهنرباها هستند. از جایگزینی (۴-۳) در (۴-۲) و با استفاده از قاعده زنجیره‌ای، معادله (۴-۳) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$u = Ri + \frac{\partial \lambda}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial \lambda}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} = Ri + L_{diff} \frac{di}{dt} + E \quad (4-4)$$

که در آن $L_{diff} = \frac{\partial \lambda}{\partial i}$ اندوکتانس دیفرانسیلی و E ولتاژ داخلی ماشین است. توجه داریم که جریان‌های معادل از سیم‌پیچ‌های آهنرباها ثابت هستند، بنابراین مشتقات آنها صفر می‌باشند.

۲) روش انرژی

در این روش برای سیستم‌های مغناطیسی خطی، از کوانرژی مغناطیسی ذخیره شده که توسط جریان سیم‌پیچی بوجود آمده است، استفاده می‌شود. برای محاسبه اندوکتانس ظاهری به این روش ابتدا ماشین را بدون وجود آهنرباها و با روش اجزای محدود تحلیل کرده و مقدار کوانرژی ذخیره شده در کل ماشین را بدست می‌آوریم و سپس با استفاده از معادله زیر اندوکتانس ظاهری ماشین را بدست می‌آوریم [۳۱]:

$$L = \frac{2W_C}{i^2} \quad (5-4)$$

که در آن W_C مقدار کوانرژی مغناطیسی ذخیره شده در ماشین می‌باشد.

ولی همانطور که در قبل توضیح داده شد از رابطه (۵-۴) فقط در زمانی می‌توان استفاده کرد که از اشباع مغناطیسی در ماشین صرف نظر شده باشد. اما در صورتی که سیستم غیر خطی در نظر گرفته شده باشد باید از اندوکتانس دیفرانسیلی برای محاسبه اندوکتانس بهره برد. برای یک سیستم مغناطیسی غیر خطی و بدون تلفات، مجموع انرژی مغناطیسی W و کوانرژی W_C توسط رابطه زیر نشان داده می‌شود:

$$W + W_C = \lambda i + \lambda_{m1} i_{m1} + \lambda_{m2} i_{m2} + \dots + \lambda_{mp} i_{mp} \quad (6-4)$$

با دیفرانسیل‌گیری از هر دو طرف معادله (۶-۴)، بدست می‌آوریم:

$$dW + dW_C = id\lambda + \lambda di + i_{m1}d\lambda_{m1} + i_{m2}d\lambda_{m2} + \dots + i_{mp}d\lambda_{mp} + \lambda_{m1}di_{m1} + \lambda_{m2}di_{m2} + \dots + \lambda_{mp}di_{mp} \quad (۷-۴)$$

یا

$$dW = id\lambda + i_{m1}d\lambda_{m1} + i_{m2}d\lambda_{m2} + \dots + i_{mp}d\lambda_{mp} \quad (۷-۴-الف)$$

$$dW_C = \lambda di + \lambda_{m1}di_{m1} + \lambda_{m2}di_{m2} + \dots + \lambda_{mp}di_{mp} \quad (۷-۴-ب)$$

همچنین dW_C می تواند به صورت زیر نیز بیان شود:

$$dW_C = \frac{\partial W_C}{\partial i} di + \frac{\partial W_C}{\partial i_{m1}} di_{m1} + \frac{\partial W_C}{\partial i_{m2}} di_{m2} + \dots + \frac{\partial W_C}{\partial i_{mp}} di_{mp} \quad (۹-۴)$$

با مقایسه (۷-۴-ب) و (۹-۴) معادله زیر بدست می آید:

$$\lambda = \frac{\partial W_C}{\partial i} \quad (۱۰-۴)$$

سپس، رابطه اندوکتانس خودی دیفرانسیلی با استفاده از روش تغییرات انرژی-جریان می تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$L_{diff} = \frac{\partial \lambda}{\partial i} = \frac{\partial^2 W_C}{\partial i^2} \quad (۱۱-۴)$$

در ادامه این فصل روش مورد استفاده برای محاسبه اندوکتانس بیشتر توضیح داده خواهد شد.

۴-۳- مؤلفه های شار در ماشین های مغناطیس دائم

۴-۳-۱- مؤلفه مربوط به میدان تحریک روتور

این شار همان شار تولیدی توسط آهنرباهای روتور می باشد که از طریق متمرکز کننده های شار، از مسیری که در فصل ۲ توصیف شد، وارد استاتور می شود و با دور زدن سیم پیچ آرمیچر باعث ایجاد

ولتاژ داخلی می شود.

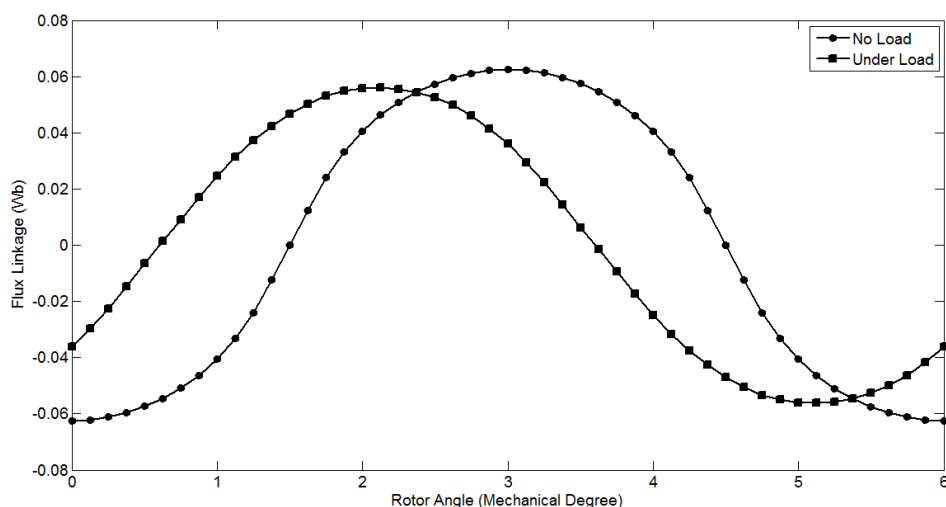
۴-۳-۲- مؤلفه مربوط به عکس العمل آرمیچر

محاسبات مربوط به عکس العمل آرمیچر در ماشین های سنکرون مغناطیس دائم برای پیش بینی عملکرد دینامیکی آن از جمله تولید نیروهای شعاعی، ایجاد نویزهای صوتی، تحلیل مغناطیس زدائی آهنرباها و همچنین در تعیین اندوکتانس های خودی و متقابل بسیار مهم می باشد [۳۲]. هنگامی که روتور یک ماشین سنکرون مغناطیس دائم می چرخد، در سیم پیچ های استاتور آن ولتاژی القاء می شود که باعث کشیده شدن جریانی از منبع در حالت موتوری می شود. این جریان باعث به وجود آمدن یک میدان مغناطیسی می شود که شکل میدان مغناطیسی اصلی روتور را تغییر می دهد. به این اثر نیروی محرکه مغناطیسی آرمیچر بر روی توزیع فضایی شار میدان اصلی در فاصله هوایی، عکس العمل آرمیچر گفته می شود. برهم کنش بین میدان مغناطیس ایجاد شده توسط جریان استاتور و میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط آهنرباها ممکن است باعث اعوجاج شکل موج شار پیوندی کلی ماشین و تغییرات نامطلوب بر روی گشتاور آن شود. میزان اعوجاج شکل موج شار میدان اصلی در فاصله هوایی ماشین ناشی از عکس العمل آرمیچر بستگی به میزان جریان آرمیچر و مشخصات مغناطیسی هسته استاتور دارد. عکس العمل آرمیچر زمانی که موتور در شرایط روتور قفل شده باشد ممکن است تأثیر بسیار نامطلوبی در مغناطیس زدائی آهنرباها داشته باشد به نحوی که اگر جریان آرمیچر از مقدار مشخصی بالاتر رود میدان مغناطیسی آرمیچر آنقدر افزایش خواهد یافت که ممکن است به طور کامل خاصیت مغناطیسی آهنرباها را از بین ببرد. بنابراین در ماشین های سنکرون مغناطیس دائم نباید اجازه افزایش جریان بیش از میزان جریان نامی را داد. عکس العمل آرمیچر دو اثر نامطلوب بر شار میدان اصلی می گذارند که عبارتند از:

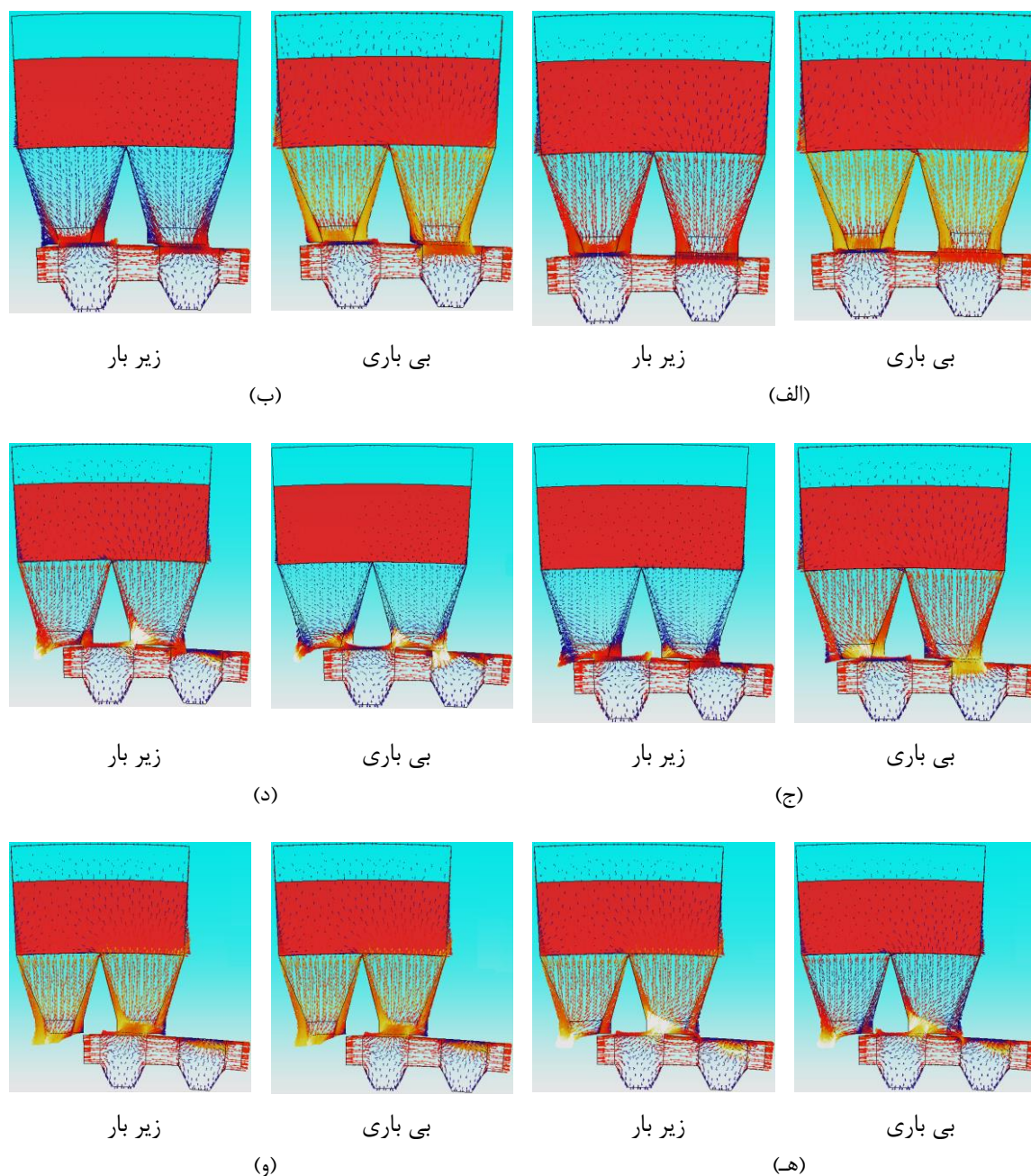
۱. کاهش شار میدان اصلی در هر قطب

۲. ایجاد اعوجاج در شکل موج شار میدان اصلی در فاصله هوایی [۲۰]

در شکل ۲-۴ نمودار شار پیوندی یک ماشین TFPM قطب چنگالی در دو حالت بی‌باری و بار کامل نشان داده شده است. همان طور که در شکل دیده می‌شود برقراری جریان در آرمیچر باعث ایجاد این دو اثر نامطلوب در شکل شار پیوندی شده است. همچنین برای نمایش بهتر اثرات نامطلوب عکس‌العمل آرمیچر، ماشین به روش اجزاء محدود شبیه‌سازی شده است و به ازای موقعیت‌های مختلف روتور در دو حالت مدار باز و بار کامل در شکل ۳-۴ نشان داده شده است. از مقایسه دو حالت مدار باز و بار کامل مشاهده می‌شود که جریان بار شاری را در استاتور ایجاد می‌کند که توزیع چگالی شار در حالت مدار باز را تغییر می‌دهد. این تغییر شار شامل تغییر در اندازه دامنه شار و جهت آن در فاصله هوایی می‌شود. تغییر در دامنه شار مطلوب نبوده اما تغییر در جهت شار فاصله هوایی عامل ایجاد گشتاور متوسط در ماشین می‌شود.



شکل ۲-۴: شار پیوندی در دو حالت بی‌باری و بار کامل



شکل ۳-۴: توزیع برداری چگالی شار در موقعیت الف) $\theta = 0$ ؛ ب) $\theta = 0.5$ ؛ ج) $\theta = 1$ ؛ د) $\theta = 1.5$ ؛ هـ) $\theta = 2$ ؛ و) $\theta = 2.5$

۳-۳-۴ - مؤلفه مربوط به شارهای ناشی

در ماشین‌های الکتریکی چرخان، کل شار تولیدی در تبدیل انرژی الکترومغناطیسی شرکت نمی‌کنند به طوری که مقداری از شاری که در تبدیل انرژی سهمیه هستند را شار میدان اصلی (شار فاصله هوایی) Φ_m می‌نامند و مؤلفه‌هایی از شار که این فرایند را انجام نمی‌دهند شار ناشی Φ_σ

تعریف می‌شوند. این بدان معناست که کل شار تولید شده توسط آهنرباها و آرمیچر در مدار مغناطیسی جاری نشده و قسمتی از این شارها از مسیرهای کوتاه‌تری بسته می‌شوند. از آنجا که یک وظیفه مهم شار اصلی در ماشین ایجاد ارتباط بین روتور و استاتور از لحاظ الکترومغناطیسی است، این شار باید از فاصله هوایی ماشین عبور کند. این در حالی است که شارهای نشتی در استاتور و روتور از تمام طول فاصله هوایی عبور نمی‌کنند. به دلیل وجود شار نشتی در ماشین، مواد مغناطیسی بیشتر و به تبع آن جریان مغناطیس کننده بیشتری نسبت به حالتی که شار نشتی وجود ندارد مورد نیاز خواهد بود. به همین دلیل شار نشتی در ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم به عنوان یک پدیده منفی شناخته می‌شود [۳۳]. هر چند که ارتباط مستقیمی بین شار نشتی و تلفات در ماشین وجود ندارد با این حال غالباً شار نشتی به عنوان یک نوع تلفات در ماشین در نظر گرفته می‌شود. شار نشتی ممکن است مقداری تلفات اضافی در قسمت‌های از ماشین ایجاد کند ولی با این حال در نظر گرفتن ارتباط مستقیم بین تلفات و شار نشتی صحیح نیست [۳۳].

از آنجا که ماشین TFPM قطب چنگالی دارای ساختاری پیچیده بوده و مسیر عبوری شار آن به صورت سه بعدی می‌باشد، محاسبات مربوط به شار نشتی Φ_{σ} ، در این ماشین بسیار سخت و تقریباً ناممکن می‌باشد. شار نشتی ماشین TFPM قطب چنگالی برابر با مجموع شارهای نشتی مختلفی در ماشین می‌باشد که عبارتند از:

- شار نشتی در اطراف سیم‌پیچی در استاتور و در اطراف آهنرباها در روتور
- شار نشتی بین دندانه‌های مجاور هم در استاتور
- شار نشتی بین فازها

برای تحلیل‌های دینامیکی گذرای ماشین متناظر با هر یک از مؤلفه‌های شار در استاتور (شار عکس‌العمل آرمیچر و شار نشتی سیم پیچ استاتور) یک اندوکتانس تعریف می‌شود. در ادامه به این موضوع پرداخته می‌شود.

۴-۴- راکتانس سنکرون

در بخش قبل درباره اثرات عکس‌العمل آرمیچر و شار نشتی در ماشین TFPM قطب چنگالی بحث شد. از آنجا که منبع تغذیه ماشین مورد بررسی سینوسی فرض شده است می‌توان از راکتانس مغناطیس‌کننده و راکتانس نشتی جهت مدل کردن آنها در ماشین استفاده کرد. از آنجا که هر دو شار عکس‌العمل آرمیچر و شار نشتی استاتور با هم ترکیب شده هستند، جدا کردن راکتانس مغناطیس‌کننده X_m و راکتانس نشتی X_σ از یکدیگر بسیار دشوار به نظر می‌رسد. به همین دلیل در مدل کردن ماشین از راکتانس سنکرون که طبق رابطه زیر از مجموع راکتانس‌های مغناطیس‌کننده و راکتانس نشتی بدست می‌آید، استفاده می‌شود.

$$X_s = X_m + X_\sigma \quad (۴-۱۲)$$

می‌توان امپدانس سنکرون به ازای هر فاز را نیز به صورت زیر تعریف کرد:

$$Z_s = R_a + jX_s \quad (۴-۱۳)$$

معمولاً در ماشین‌های سنکرون، راکتانس سنکرون در برابر مقاومت سیم‌پیچی آرمیچر R_a بسیار بزرگتر می‌باشد و به همین دلیل می‌توان با تقریب خوبی از راکتانس سنکرون به جای امپدانس سنکرون استفاده کرد.

۴-۵- روش مورد استفاده برای محاسبه اندوکتانس‌ها

همانطور که در بخش ۴-۲ به تفصیل بیان شد، دو نوع تعریف برای اندوکتانس وجود دارد که عبارتند از: اندوکتانس ظاهری و اندوکتانس دیفرانسیلی. برای محاسبه این دو نوع اندوکتانس می‌توان از دو روش شار پیوندی و یا انرژی استفاده کرد. نتایج استفاده از هر کدام از این روش‌ها یکسان خواهد بود. با این حال به دلیل پیچیدگی محاسباتی بیشتر روش انرژی، در این پژوهش صرفاً از روش شار

پیوندی استفاده شده است. در ادامه این بخش با ارائه روند محاسبه اندوکتانس‌های ظاهری و دیفرانسیلی برای ماشین TFPM قطب چنگالی ارائه شده در جدول ۱-۲، نحوه استفاده از روش شار پیوندی توضیح داده می‌شود.

۴-۵-۱- نحوه محاسبه اندوکتانس ظاهری

برای محاسبه اندوکتانس ظاهری ابتدا باید شار تحریک (آهنرباها) حذف شود. برای این منظور در مدل اجزای محدود ماشین آهنرباهای دائم با هوا جایگزین می‌شود. این موضوع از آن جهت امکان پذیر است که نفوذ پذیری نسبی آهنرباهای دائم بسیار نزدیک به هوا می‌باشد. اکنون با اعمال یک جریان به استاتور به گونه‌ای که توزیع چگالی شاری نزدیک به حالت بار کامل ایجاد کند، شار پیوندی سیم پیچ آرمیچر محاسبه می‌گردد. اندوکتانس ظاهری برابر است با حاصل تقسیم این شار پیوندی بر جریان اعمال شده به استاتور. نتیجه این محاسبات در شکل ۴-۴-الف آمده است که در آن به ازای تمامی موقعیت‌های روتور اندوکتانس ظاهری سیم پیچ آرمیچر نشان داده شده است. از توضیحات فوق مشخص است که محاسبه اندوکتانس ظاهری با روش شار پیوندی چندان پیچیده نیست.

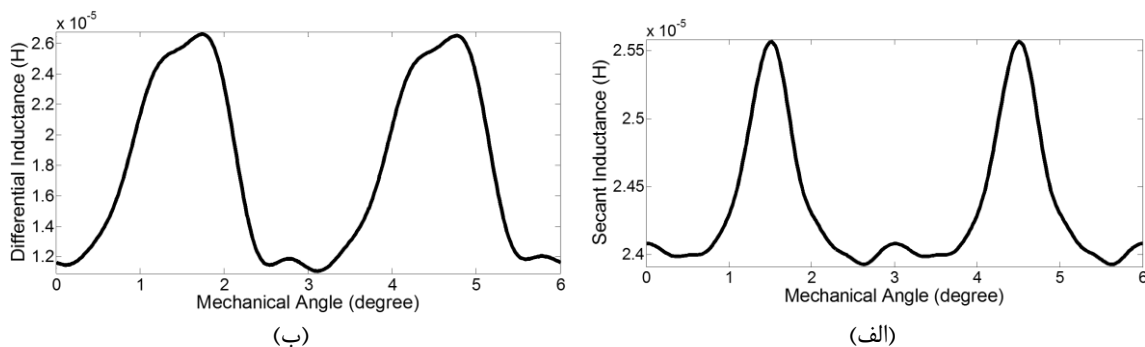
۴-۵-۲- نحوه محاسبه اندوکتانس دیفرانسیلی

در محاسبه این اندوکتانس ابتدا شار پیوندی سیم پیچ ناشی از آهنرباهای دائم به تنهایی محاسبه می‌شود. سپس با اعمال یک جریان دلخواه کوچک به طوری که توزیع چگالی شار را چندان تغییر ندهد، شار پیوندی سیم پیچ ناشی از شار آهنرباها به همراه شار تولیدی توسط این جریان دلخواه محاسبه می‌شود. با تفاضل شار پیوندی در این دو حالت و تقسیم این تفاضل بر جریان کوچک اعمال شده یک اندوکتانس اولیه بدست می‌آید.

در مرحله بعد با استفاده از اندوکتانس اولیه محاسبه شده و به کمک شبیه‌سازی دینامیکی گذرای که در بخش‌های آینده همین فصل توضیح داده خواهد شد، جریان ماشین در بار کامل بدست

می‌آید. اکنون با اعمال این جریان بار به آرمیچر، شار پیوندی کل (ناشی از آهنرباها و جریان اعمالی) سیم پیچ آرمیچر محاسبه می‌شود. این شار پیوندی را شار پیوندی شماره ۱ نام گذاری می‌کنیم. اکنون با اضافه کردن یک جریان کوچک دلخواه به جریان بار مجدداً شار پیوندی کل سیم پیچ آرمیچر محاسبه می‌شود که این شار پیوندی شار پیوندی شماره ۲ نام گذاری می‌شود. با تفاضل شار پیوندی شماره ۱ از شار پیوندی شماره ۲ و تقسیم حاصل بر جریان دلخواه اضافه شده به جریان بار یک اندوکتانس جدید بدست می‌آید.

اگر این اندوکتانس جدید را در شبیه‌سازی دینامیکی گذرای ماشین وارد کنیم، یک جریان بار جدید که به جریان بار واقعی نزدیک‌تر است بدست می‌آید. با تکرار فرآیند فوق اندوکتانس دیگری بدست می‌آید که منجر به جریان باری می‌شود که نسبت به جریان بار مرحله قبل به جریان بار واقعی نزدیک‌تر خواهد بود. به عبارت دیگر با تکرار فرایند فوق به تعداد دفعات کافی اندوکتانس دیفرانسیلی دقیق سیم پیچ آرمیچر بدست می‌آید. دو معیار برای توقف فرآیند تکراری مطرح می‌شود: (۱) با اعمال جریان بار بدست آمده از آخرین تکرار به مدل اجزای محدود ماشین، توان خروجی نامی حاصل شود. (۲) با اعمال جریان بار بدست آمده از آخرین تکرار به مدل اجزای محدود ماشین، ولتاژ ترمینال ماشین دقیقاً برابر با ولتاژی شود که در شبیه‌سازی دینامیکی گذرای ماشین به ترمینال آن متصل شده است. نکته مهم در به کارگیری روش فوق آن است که در محاسبه اندوکتانس طبیعت غیر خطی ماده هسته نیز منظور شده است. در صورتی که هسته ماشین در اشباع نباشد، با یک یا دو تکرار به جواب دقیق خواهیم رسید و اگر اشباع رخ داده باشد تعداد تکرارها برای رسیدن به جواب دقیق بیشتر خواهد بود. شکل ۴-۴-ب اندوکتانس دیفرانسیلی محاسبه شده به روش فوق را برای سیم پیچ آرمیچر بر حسب موقعیت روتور نشان می‌دهد.



شکل ۴-۴: (الف) اندوکتانس ظاهری سیم پیچ آرمیچر بر حسب موقعیت روتور، (ب) اندوکتانس دیفرانسیلی سیم پیچ آرمیچر بر حسب موقعیت روتور

اگر چه اندوکتانس دیفرانسیلی نسبت به اندوکتانس ظاهری منجر به نتایج دقیق تری می شود، ولی محاسبه آن به مراتب پیچیده تر و زمانبرتر است. لذا با توجه به اینکه در این پایان نامه نیاز به محاسبه اندوکتانس برای حالت های متعددی وجود دارد و همچنین با در نظر گرفتن اهداف مقایسه ای مدنظر این پایان نامه، از اینجا به بعد تمامی محاسبات اندوکتانس ها به کمک روش مطرح شده برای اندوکتانس ظاهری انجام خواهد گرفت.

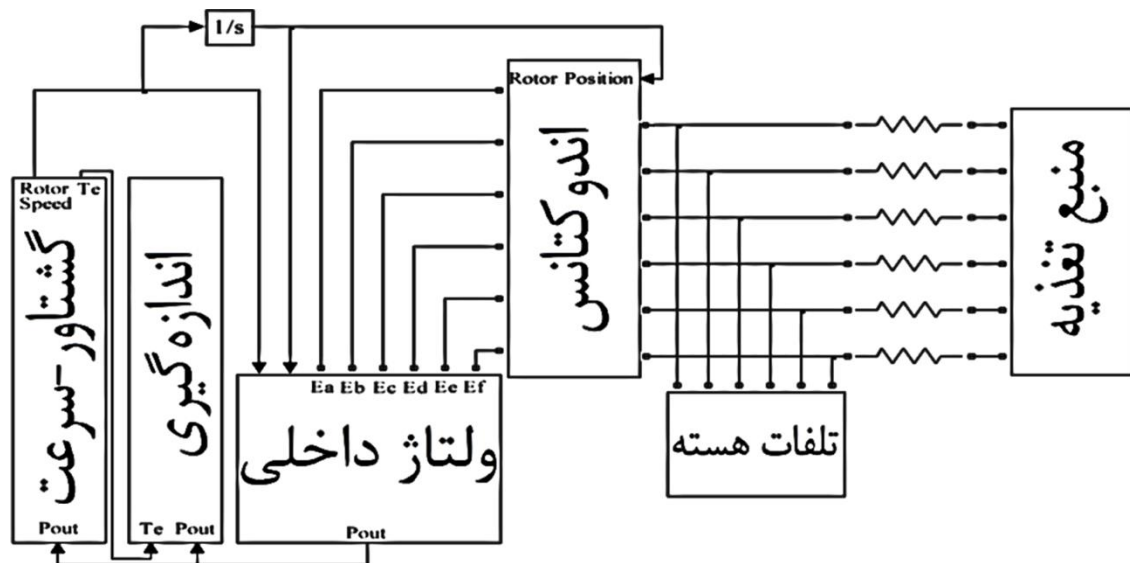
۴-۶- شبیه سازی دینامیکی گذرای به کمک سیمولینک

در هنگام نوشتن الگوریتم اولیه طراحی امکان تعیین دقیق راکتانس سنکرون که در واقع همان لحاظ کردن شار عکس العمل آرمیچر و شار نشتی است وجود ندارد. در هنگام طراحی، گاهی اتفاق می افتد که فرضاً ماشینی برای یک توان مشخص طراحی می شود اما به دلیل اینکه راکتانس سنکرون آن بزرگ می باشد ماشین در عملکرد با ولتاژ و جریان در محدوده اسمی و بدون بکارگیری ادوات گران قیمت جبران کننده، هرگز توانایی تأمین توان مورد نظر را ندارد. چنین طرح ماشینی بخصوص در ماشین های بزرگ اگر با بی توجهی به راکتانس سنکرون در فرایند ساخت قرار گیرد هزینه های گزافی را به دلیل نیاز به تکرار مراحل طراحی و ساخت تحمیل می نماید. برای پرهیز از عواقب نامطلوب این مسئله، لازم است پارامترهای عملکردی ماشین بخصوص راکتانس سنکرون آن قبل از شروع فرآیند

ساخت به هر طریقی محاسبه و یا تخمین زده شوند و صحت طراحی انجام گرفته با مدلسازی رفتار دینامیکی گذرائی ماشین در یکی از نرم افزارهای موجود و با بررسی عملکرد حالت دائمی و دینامیکی در شرایط عملکرد مختلف تایید شود. در صورتی که ماشین توانائی تأمین توان مطلوب را نداشته و یا رفتار رضایت بخشی ارائه ندهد بازبینی در الگوریتم طراحی کاری ضروری و اجتناب ناپذیر است.

امروزه خوشبختانه نرم افزارهای اجزاء محدود امکانات فوق العاده ارزشمندی را در جهت تخمین پارامترهای عملکردی ماشین در اختیار کاربرهای مسلط بر تحلیل های الکترومغناطیسی و تئوری ماشین های الکتریکی قرار می دهند. با مشخص بودن پارامترهای عملکردی ماشین، نرم افزار Matlab/Simulink نیز ابزار بسیار کارآمد برای تحلیل های عملکردی حالت دائمی و گذرا می باشد. در حالت کلی مشخصه های حالت دائمی از اهمیت فوق العاده ای به لحاظ طول دوره عملکرد، بهره، نوسانات حالت دائمی سرعت، لرزش و ... برخوردار است. همچنین مشخصه های دینامیکی گذرای ماشین از قبیل تغییرات سرعت، توان لحظه ای، گشتاور، ولتاژ و جریان در شرایط مختلف سوییچینگ، تغییرات ولتاژ و فرکانس شبکه، بارگذاری، بارزدایی و ... نیز حائز اهمیت هستند.

اکنون با استفاده از مقادیر بدست آمده از ولتاژ داخلی و اندوکتانس از روش اجزای محدود، ماشین طراحی شده را در نرم افزار Matlab شبیه سازی کرده و به بررسی عملکرد حالت دائمی و رفتار دینامیکی گذرای آن در شرایط اتصال مستقیم موتور به شبکه برق چند فاز پرداخته می شود. در این شبیه سازی فرض شده است که موتور مورد نظر در شرایط نامی کار می کند. شکل ۴-۵ شماتیک کلی شبیه سازی یک موتور شش فاز طراحی شده را نشان می دهد.

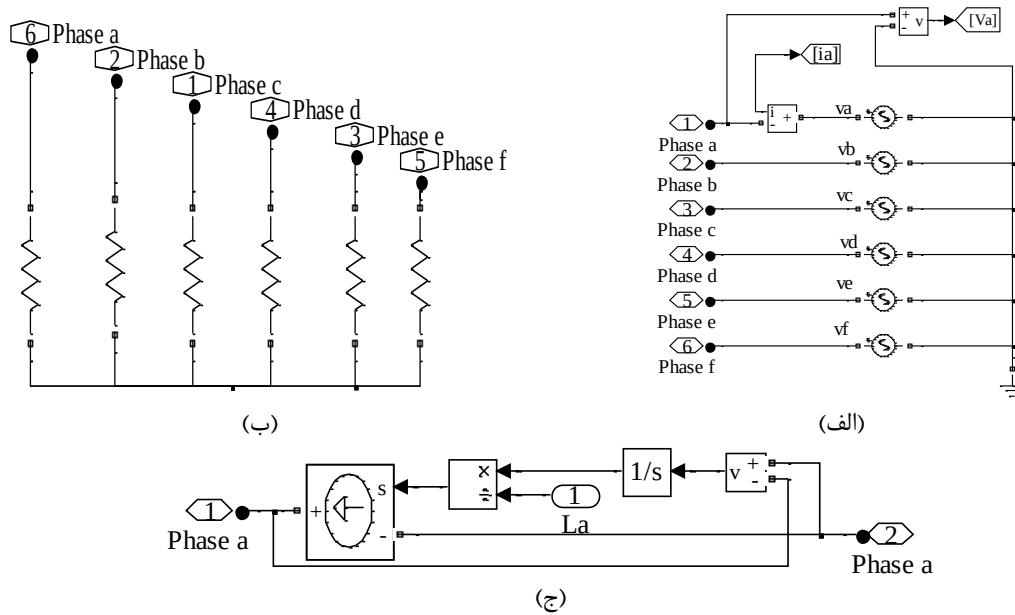


شکل ۴-۵: شماتیک شبیه سازی موتورهای طراحی شده در محیط سیمولینک

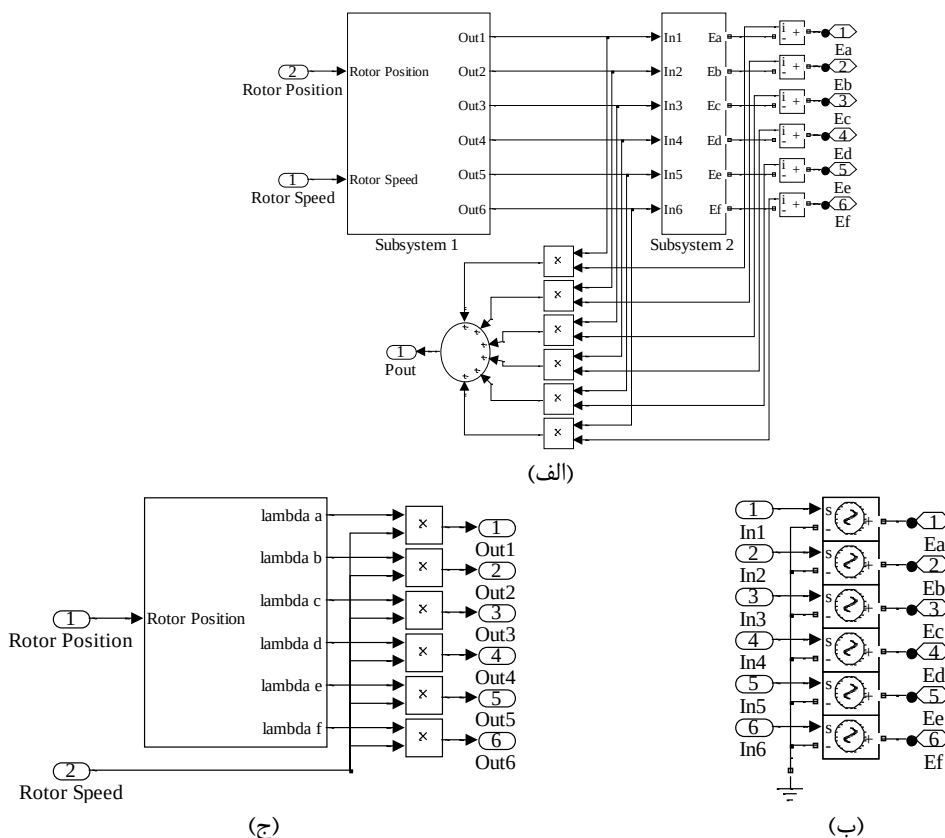
بلوک دیاگرام منبع تغذیه که در شکل ۴-۶ الف نشان داده شده است، شامل شش منبع سینوسی با دامنه 105 V و فرکانس 300 Hz بوده که هر کدام نسبت به یکدیگر 60° درجه الکتریکی اختلاف فاز دارند. بلوک دیاگرام تلفات هسته در شکل ۴-۶ ب نشان داده شده است. بلوک دیاگرام تلفات هسته نشان دهنده تلفات هسته ماشین بوده و شامل شش مقاومت موازی جهت مدل کردن تلفات آهن می باشد. از آنجاییکه اندوکتانس این ماشین متغیر می باشد به سادگی به طور مستقیم نمی توان آنرا در مدار معادل قرار داد. با توجه به معادله (۴-۱۴) جریان عبوری از سلف را می توان از ولتاژ دو سر آن بدست آورد.

$$i_L = \frac{1}{L} \int v_L dt \quad (4-14)$$

بنابراین از ولتاژ دو سر سلف انتگرال گرفته و با تقسیم آن بر مقدار لحظه ای اندوکتانس جریان آنرا بدست می آوریم و آنرا با یک منبع جریان، معادل می کنیم. شکل ۴-۶ ج بلوک دیاگرام اندوکتانس را نشان می دهد. ولتاژ داخلی بدست آمده از روش اجزای محدود را در شبیه سازی دینامیکی گذرای با یک منبع ولتاژ معادل می کنیم که در شکل ۴-۷ بلوک دیاگرام مربوط به آن نشان داده شده است.



شکل ۴-۶: بلوک دیاگرام مورد استفاده برای مدل سازی الف) منبع تغذیه، ب) تلفات هسته و ج) اندوکتانس خودی.



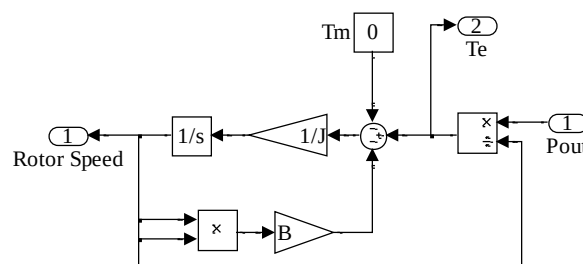
شکل ۴-۷: بلوک دیاگرام مورد استفاده برای مدل سازی ولتاژ داخلی. الف) بلوک دیاگرام کلی، ب) زیر سیستم شماره ۲ (سمت راست) در شکل الف، ج) زیر سیستم شماره ۱ (سمت چپ) در شکل الف

همانطور که می دانیم گشتاور الکترومغناطیسی تولیدی موتور با تقسیم توان لحظه ای خروجی

کل بر سرعت لحظه‌ای مکانیکی روتور بدست می‌آید. معادله دینامیکی بخش گردان یعنی رابطه بین سرعت و گشتاورهای وارد بر روتور به صورت معادله (۴-۱۵) نوشته می‌شود:

$$T_e - T_m = J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r^2 \quad (۴-۱۵)$$

که در آن T_e گشتاور الکترومغناطیسی، T_m گشتاور بار، B ضریب اصطکاک و J ممان اینرسی روتور می‌باشد. در شکل ۴-۸ بلوک دیاگرام گشتاور-سرعت نشان داده شده است.



شکل ۴-۸: بلوک دیاگرام مورد استفاده برای مدل‌سازی رابطه گشتاور-سرعت

در بلوک دیاگرام اندازه‌گیری مقادیر لحظه‌ای توان اکتیو، راکتیو و ظاهری ورودی، توان خروجی، راندمان، ضریب قدرت و زاویه توان موتور بدست می‌آیند. برای محاسبه توان اکتیو و راکتیو ورودی، مقادیر مؤثر ولتاژ و جریان یک فاز را به بلوک active and reactive power که به صورت آماده در سیمولینک متلب موجود است داده و مقادیر توان اکتیو و راکتیو را بدست می‌آوریم. توان خروجی ماشین مطابق معادله (۴-۱۶) بدست می‌آید. راندمان ماشین در تقسیم توان خروجی بر توان ورودی محاسبه می‌شود. همچنین برای محاسبه توان ظاهری مقادیر مؤثر ولتاژ و جریان یک فاز ماشین را در هم ضرب کرده و حاصل را در تعداد فازها ضرب می‌کنیم. ضریب قدرت ماشین از تقسیم توان اکتیو ورودی بر توان ظاهری بدست می‌آید. برای محاسبه زاویه قدرت هارمونیک اول ولتاژ ورودی و ولتاژ داخلی یکی از فازها را گرفته و اختلاف زاویه آن‌ها را بدست می‌آوریم.

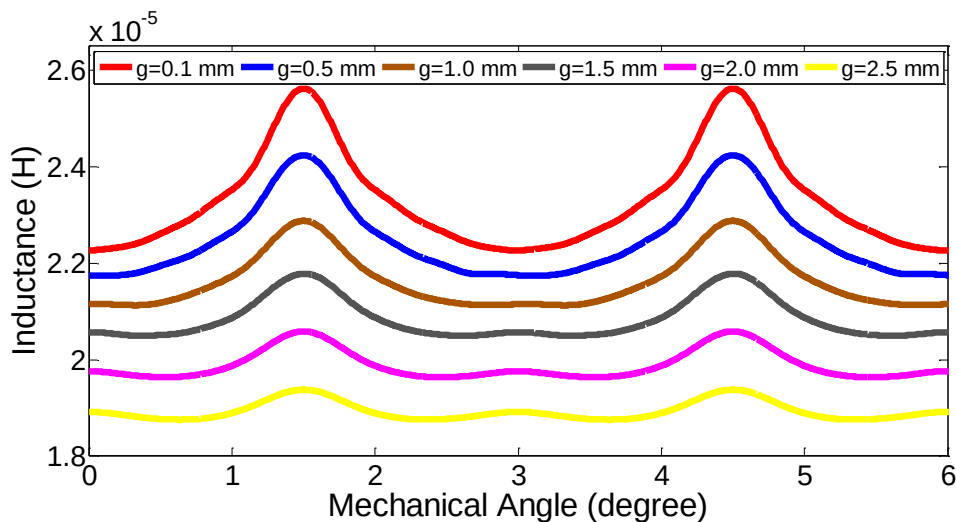
$$P_{out} = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c + e_d i_d + e_e i_e + e_f i_f \quad (۴-۱۶)$$

۴-۷- بررسی تأثیر عوامل ساختاری بر روی اندوکتانس و شاخصه‌های

عملکردی دینامیکی گذرای

۴-۷-۱- تأثیر فاصله هوایی

شکل ۴-۹ نحوه تأثیر طول فاصله هوایی بر روی اندوکتانس سیم پیچ آرمیچر را نشان می‌دهد. همان طور که انتظار می‌رود از این شکل مشخص است که با کاهش طول فاصله هوایی اندوکتانس سیم پیچ آرمیچر بزرگتر می‌شود. دلیل این موضوع آن است که رلوکتانس مسیر عبور شار سیم پیچ استاتور ($\mathcal{R}$) با فاصله هوایی رابطه مستقیم دارد و با کاهش فاصله هوایی کاهش می‌یابد و در نتیجه با توجه به رابطه $L = N^2 / \mathcal{R}$ ، اندوکتانس افزایش پیدا می‌کند. نکته قابل توجه در شکل ۴-۹ آن است که دامنه تغییرات اندوکتانس نیز با کاهش فاصله هوایی افزایش پیدا کرده است و به عبارت دیگر برجستگی قطب‌ها اثر بیشتری خواهد داشت.



شکل ۴-۹: شکل موج اندوکتانس به ازای فاصله هوایی‌های مختلف

در شکل ۴-۱۰ شاخص‌های عملکردی بدست آمده از شبیه‌سازی دینامیکی گذرای به ازای فاصله هوایی‌های مختلف نمایش داده شده است. از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش طول فاصله هوایی:

- ضریب قدرت کاهش پیدا می کند.
- زاویه توان δ افزایش پیدا می کند.
- جریان مؤثر هر فاز افزایش پیدا می کند.
- THD جریان هر فاز کاهش پیدا می کند.

(ب) زاویه توان

(الف) ضریب قدرت

(د) THD جریان هر فاز

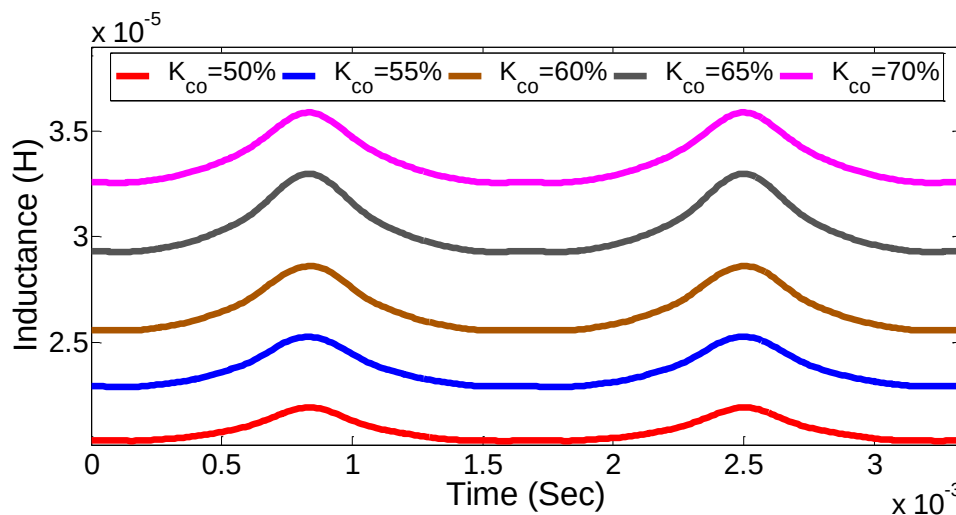
(ج) جریان مؤثر هر فاز

شکل ۴-۱۰: شاخص های عملکردی بدست آمده از شبیه سازی دینامیکی گذرای به ازای فاصله هوایی های مختلف

از نتایج فوق مشخص می شود که افزایش طول فاصله هوایی تنها باعث کاهش THD جریان هر فاز می شود اما بر روی تمام شاخص های عملکردی دیگر تأثیر منفی دارد. از این رو باید سعی شود که در طراحی ماشین TFPM قطب چنگالی فاصله هوایی مینیمم انتخاب شود.

۴-۷-۲- تأثیر درصد یا ضریب پوشش روتور توسط دندانه استاتور

همان طور که قبلاً اشاره شد، این ضریب با K_{co} نشان داده می‌شود و بیانگر نسبت سطح مجاور به فاصله هوایی دندانه استاتور به سطح مجاور به فاصله هوایی متمرکزکننده شار روتور می‌باشد. شکل ۴-۱۱ نحوه تأثیر K_{co} در اندوکتانس ماشین TFPM قطب چنگالی مورد مطالعه را نمایش می‌دهد. از این شکل کاملاً مشخص است که با افزایش K_{co} متوسط و دامنه تغییرات اندوکتانس افزایش می‌یابد که دلیل آن افزایش شار نشتی بین دندانه‌های مجاور استاتور می‌باشد.

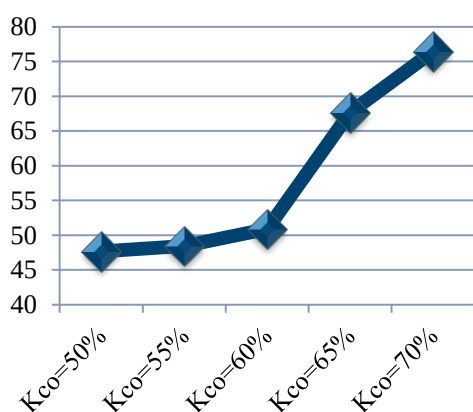


شکل ۴-۱۱: شکل موج ولتاژ داخلی به ازای K_{co} های مختلف

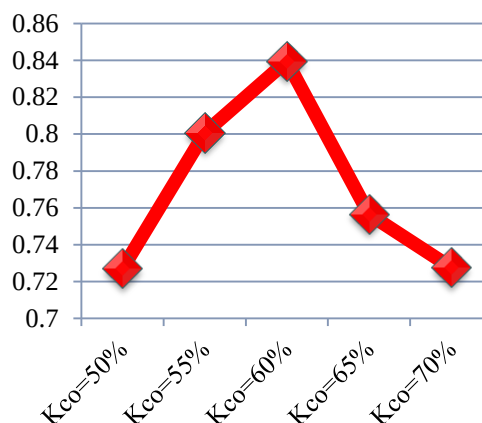
شکل ۴-۱۲ شاخص‌های عملکردی بدست آمده از شبیه‌سازی دینامیکی گذرای به ازای K_{co} های

مختلف را نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ضریب K_{co} :

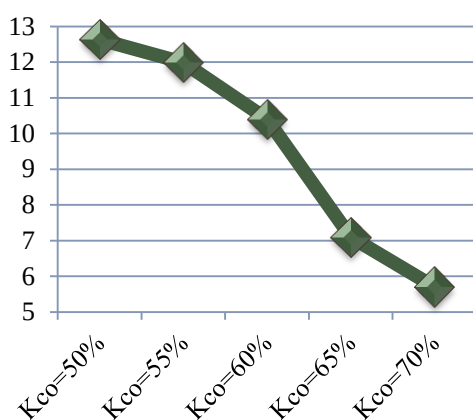
- ضریب قدرت ابتدا افزایش یافته و بعد از $K_{co} = 60\%$ مجدداً کاهش می‌یابد.
- زاویه توان δ افزایش پیدا می‌کند.
- جریان مؤثر ابتدا کاهش یافته و بعد از $K_{co} = 60\%$ مجدداً افزایش می‌یابد.
- THD جریان هر فاز کاهش پیدا می‌کند.



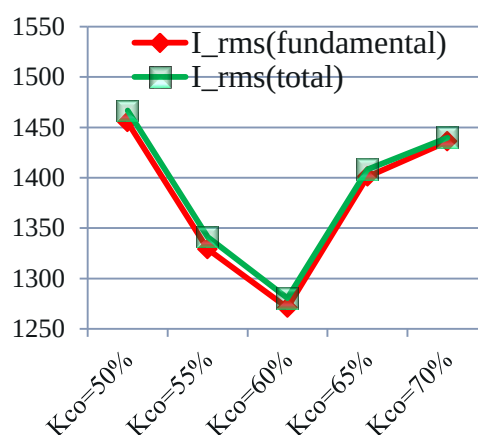
(ب) زاویه توان



(الف) ضریب قدرت



(د) THD جریان هر فاز



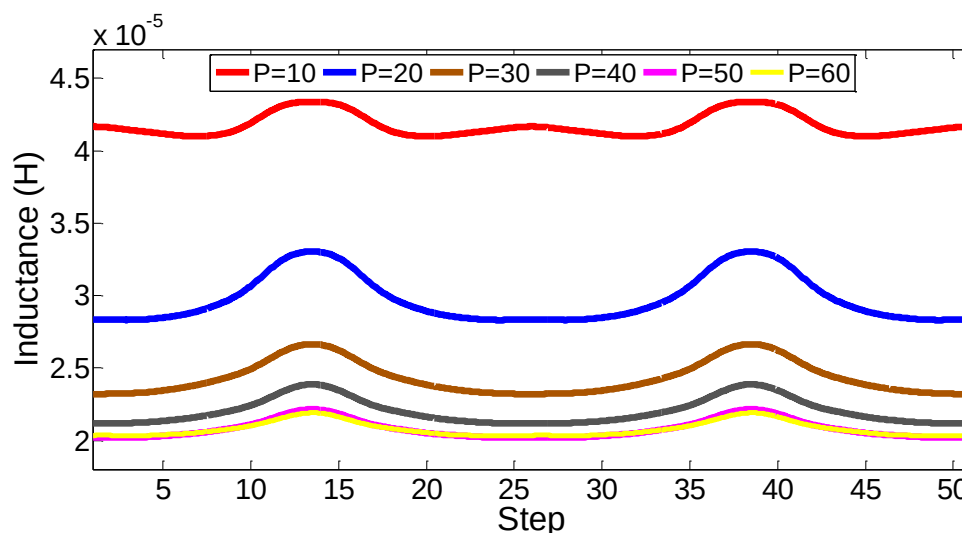
(ج) جریان مؤثر هر فاز

شکل ۴-۱۲: شاخص‌های عملکردی بدست آمده از شبیه‌سازی دینامیکی گذرای به ازای K_{co} های مختلف

۴-۷-۳- تأثیر تعداد قطب‌ها

مشابه ولتاژ داخلی، تأثیر تعداد قطب‌ها در اندوکتانس در دو حالت سرعت ثابت و فرکانس ثابت بررسی شده است. اثر تغییر تعداد قطب‌های ماشین بر روی اندوکتانس در سرعت ثابت در شکل ۴-۱۳ نشان داده می‌شود. همان‌طور که از شکل مشخص است با افزایش تعداد قطب‌ها در سرعت ثابت مقدار متوسط اندوکتانس کاهش پیدا می‌کند. می‌توان گفت که تعداد قطب‌ها از دو طریق بر روی اندوکتانس‌ها تأثیر گذار هستند: (۱) با افزایش تعداد قطب‌ها در ماشین TFPM حجم مواد اکتیو کاهش می‌یابد و با توجه به این که چگالی شار در تمامی طراحی‌ها ثابت فرض شده است رلوکتانس مسیر عبور شار افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه اندوکتانس کاهش خواهد یافت. (۲) با افزایش تعداد

قطب‌ها فاصله بین قطب‌های مجاور کاهش می‌یابد و همین باعث افزایش شارهای ناشی می‌شود. به عبارت دیگر اندوکتانس سیم پیچی افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۴-۱۳ می‌توان گفت که در تعداد قطب‌های پایین اثر کاهش اندوکتانس در نتیجه کاهش حجم بسیار بزرگتر از اثر افزایش اندوکتانس ناشی از شارهای ناشی می‌باشد. اما به ازای تعداد قطب‌های بالاتر این دو اثر به هم نزدیک می‌شوند و با افزایش تعداد قطب‌ها تغییرات اندوکتانس متوسط کوچکتر می‌شود.



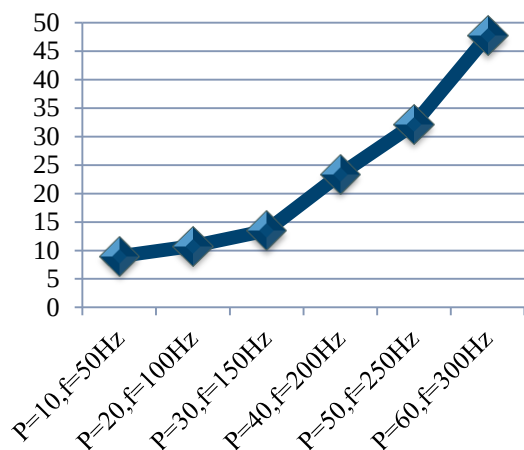
شکل ۴-۱۳: شکل موج اندوکتانس به ازای تعداد قطب‌های مختلف در سرعت ثابت

در شکل ۴-۱۴ شاخص‌های عملکردی بدست آمده از شبیه‌سازی دینامیکی گذرای به ازای تعداد قطب‌های مختلف در سرعت ثابت نمایش داده شده است. از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد قطب‌ها در سرعت ثابت:

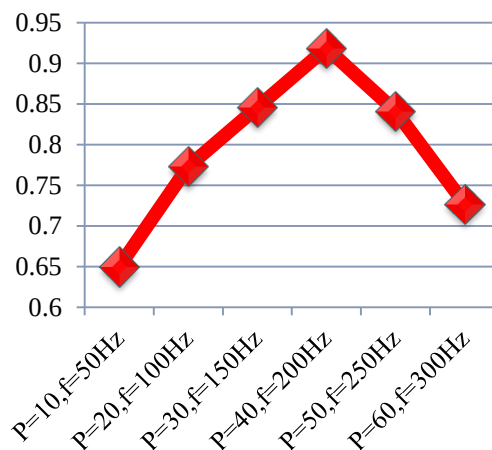
- ضریب قدرت ابتدا افزایش یافته و سپس بعد از یک فرکانس نزدیک ۲۰۰ هرتز (۴۰ جفت قطب) مجدداً کاهش می‌یابد.
- زاویه توان افزایش پیدا می‌کند.
- جریان مؤثر هر فاز ابتدا تا نزدیکی‌های ۱۵۰ هرتز (۳۰ جفت قطب) کاهش می‌یابد و بعد از آن مجدداً افزایش پیدا می‌کند.

• THD جریان هر فاز تا نزدیکی های ۱۵۰ هرتز (۳۰ جفت قطب) تقریباً ثابت است و پس از

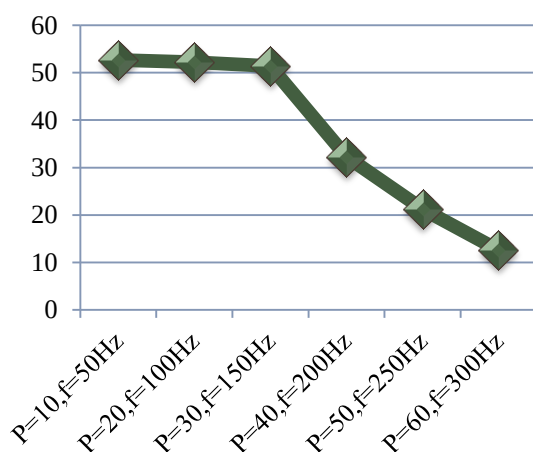
آن شروع به کاهش می کند.



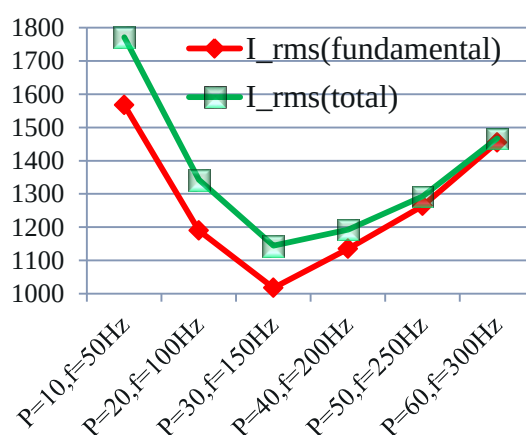
(ب) زاویه توان



(الف) ضریب قدرت



(د) THD جریان هر فاز

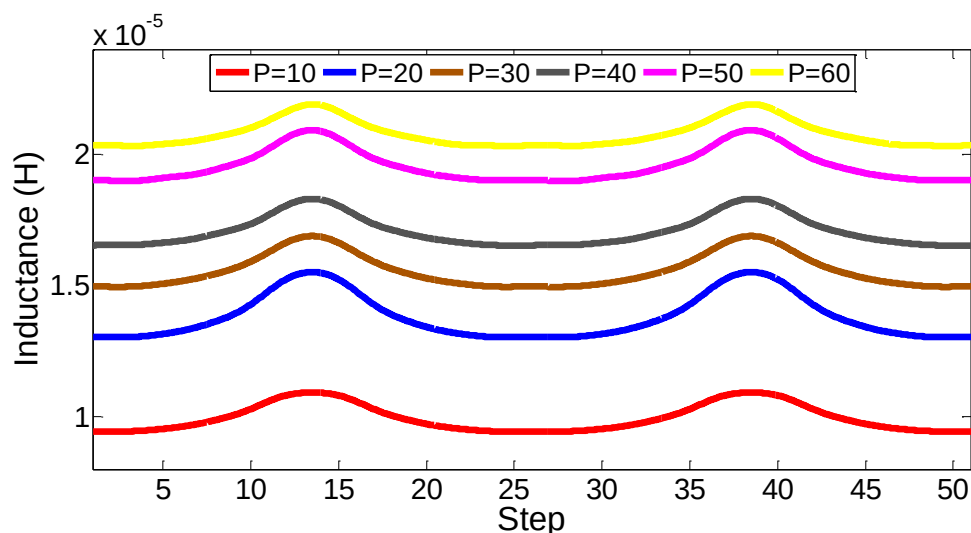


(ج) جریان مؤثر هر فاز

شکل ۴-۱۴: شاخص های عملکردی بدست آمده از شبیه سازی دینامیکی گذرای به ازای تعداد قطب های مختلف در سرعت ثابت

اثر تغییر تعداد قطب ها در فرکانس ثابت بر روی اندوکتانس در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است. در اینجا نیز همان دو اثر ناشی از تغییر تعداد قطب ها قابل طرح هستند. اما نسبت به حالت سرعت ثابت، با توجه به اینکه در این حالت فرکانس در ۳۰۰ هرتز ثابت نگاه داشته شده است، اثر کاهش حجم در اثر افزایش تعداد قطب ها بسیار کمتر می باشد. لذا در حالت فرکانس ثابت اثر افزایش شار ناشی در افزایش اندوکتانس بر اثر کاهش حجم در افزایش اندوکتانس چیره می باشد. بنابراین مشاهده

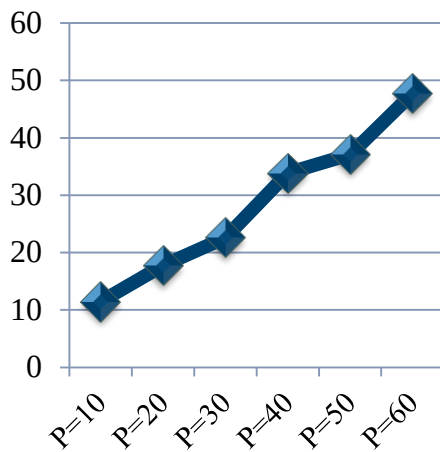
می شود که با افزایش تعداد قطب ها در فرکانس ثابت اندوکتانس متوسط افزایش می یابد. باید توجه کرد که در این حالت نیز مشابه حالت سرعت ثابت فاصله متوسط اندوکتانس ها در تعداد قطب های بالاتر کمتر می باشد.



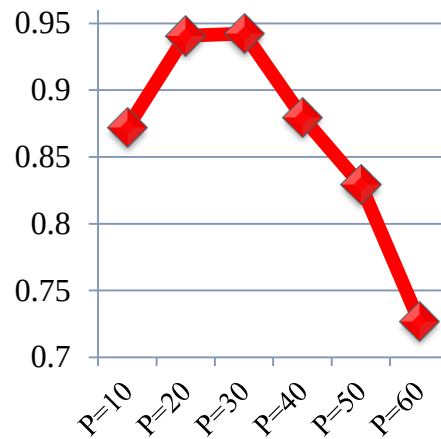
شکل ۴-۱۵: شکل موج اندوکتانس به ازای تعداد قطب های مختلف در فرکانس ثابت

در شکل ۴-۱۶ شاخص های عملکردی بدست آمده از شبیه سازی دینامیکی گذرای به ازای تعداد قطب های مختلف در فرکانس ثابت نمایش داده شده است. از این شکل می توان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد قطب ها در فرکانس ثابت:

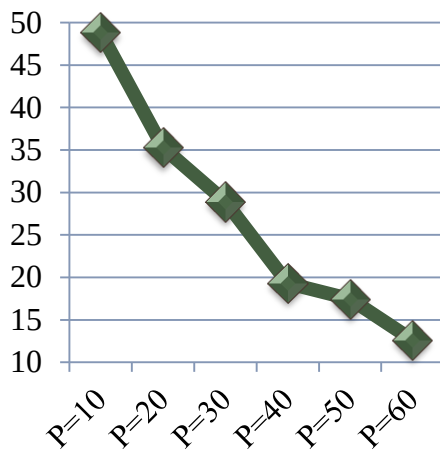
- ضریب قدرت ابتدا افزایش یافته و بعد از حدوداً ۲۰ تا ۳۰ جفت قطب مجدداً کاهش می یابد.
- زاویه توان افزایش پیدا می کند.
- جریان مؤثر هر فاز ابتدا تا نزدیکی های ۳۰ جفت قطب کاهش می یابد و بعد از آن مجدداً افزایش پیدا می کند.
- THD جریان هر فاز کاهش پیدا می کند.



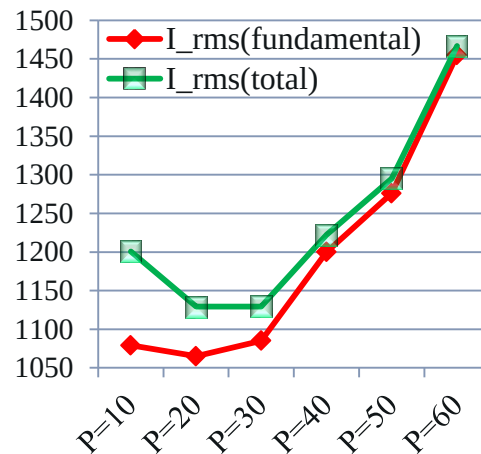
(ب) زاویه توان



(الف) ضریب قدرت



(د) THD جریان هر فاز



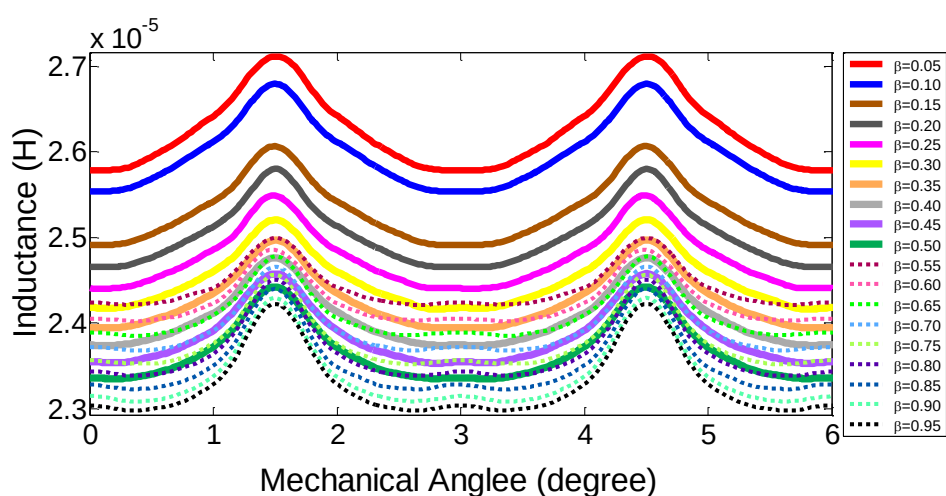
(ج) جریان مؤثر هر فاز

شکل ۴-۱۶: شاخص‌های عملکردی بدست آمده از شبیه‌سازی دینامیکی گذرای به ازای تعداد قطب‌های مختلف در فرکانس ثابت

۴-۷-۴- تأثیر شکل کفشک قطب استاتور

همان طور که در شکل ۲-۶ دیده می‌شود با تغییر ضریب β می‌توان شکل سطح مجاور به فاصله هوایی دندانه استاتور را به صورت دلخواه تغییر داد. در شکل ۴-۱۷ نحوه تأثیر شکل سطح مجاور به فاصله هوایی دندانه استاتور بر روی اندوکتانس نشان داده شده است. در این شکل β از یک تا حدود صفر تغییر کرده است. همان طور که دیده می‌شود با کاهش β (نوک تیز و بلندتر شدن دندانه استاتور) اندوکتانس افزایش پیدا می‌کند که دلیل آن کاهش رلوکتانس مسیر عبور شار و افزایش شار نشتی بین دندانه‌های مجاور استاتور می‌باشد. قابل توجه است که اندوکتانس در مقدار

$\beta = 0.55$ تغییرات شدیدی نسبت به $\beta = 0.5$ نشان می‌دهند و مقدار متوسط اندوکتانس در $\beta = 0.55$ به یکباره افزایش شدیدی نسبت به $\beta = 0.5$ داشته و از آنجا به بعد شاهد کاهش اندوکتانس با افزایش β می‌باشیم. به لحاظ تئوری نمی‌توان تحلیل دقیقی برای این نتیجه ارائه نمود و تنها با استفاده از روش‌های عددی مانند روش اجزای محدود است که می‌توان این نتایج را بدست آورد. همچنین از این نتایج مشخص می‌شود که برای بهینه‌سازی ماشین‌های TFPM قطب چنگالی استفاده از روش‌های عددی الزامی است.

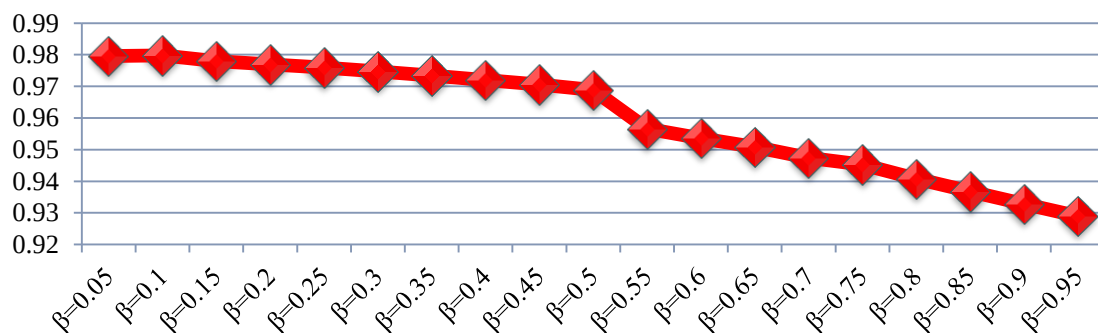


شکل ۴-۱۷: شکل موج اندوکتانس به ازای شکل‌های مختلف کفشک قطب

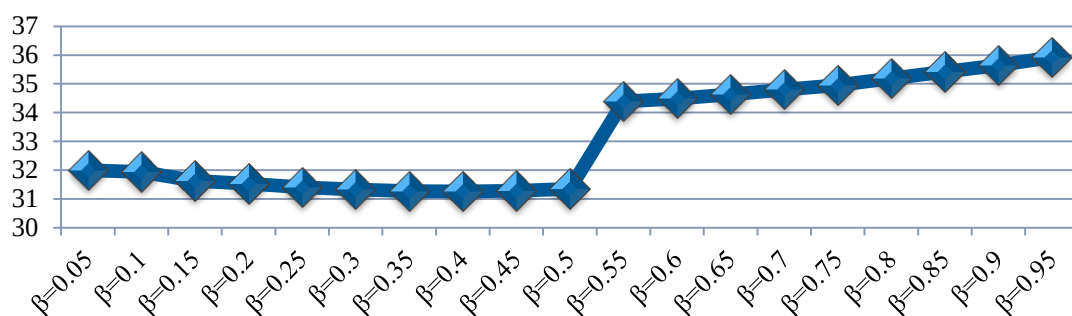
در شکل ۴-۱۸ شاخص‌های عملکردی بدست آمده از شبیه‌سازی دینامیکی گذرای برای β های مختلف (شکل‌های مختلف سطح مجاور به فاصله هوایی دندان استاتور) نمایش داده شده است. از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش β (مستطیلی‌تر شدن دندان استاتور):

- ضریب قدرت کاهش پیدا می‌کند.
- زاویه توان تا $\beta = 0.5$ کاهش می‌یابد و بعد از آن افزایش می‌یابد.
- جریان مؤثر هر فاز افزایش پیدا می‌کند.
- THD جریان هر فاز تا $\beta = 0.5$ افزایش می‌یابد و بعد از آن رو به کاهش می‌گذارد.

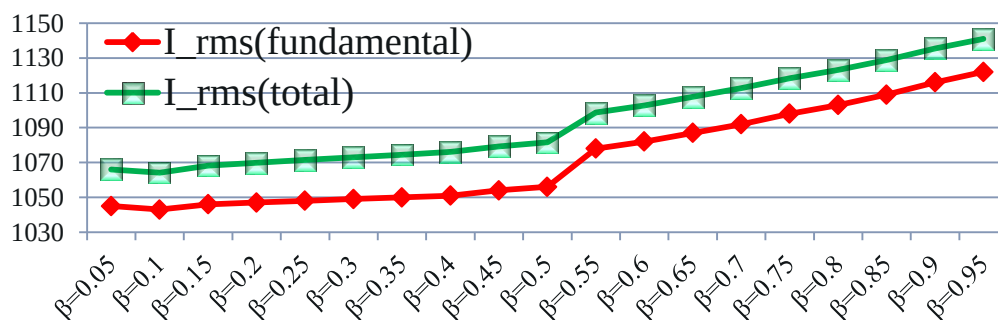
تمامی شاخص‌های فوق در اینجا نیز در مقدار $\beta = 0.55$ تغییرات شدیدی نشان می‌دهند که همچون اندوکتانس نمی‌توان به لحاظ تئوری تحلیل دقیقی برای آنها ارائه کرد.



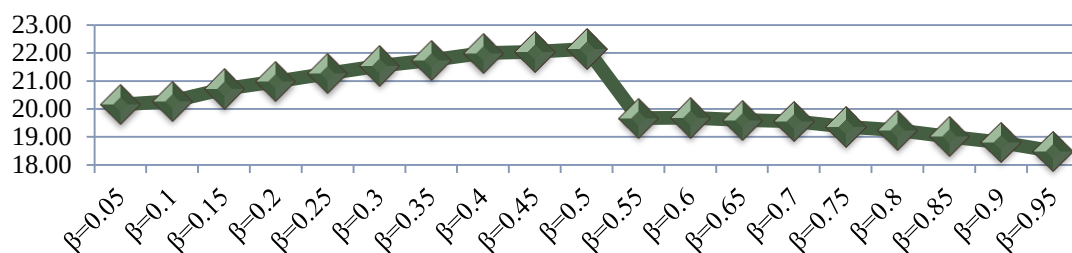
(الف) ضریب قدرت



(ب) زاویه توان



(ج) جریان مؤثر هر فاز

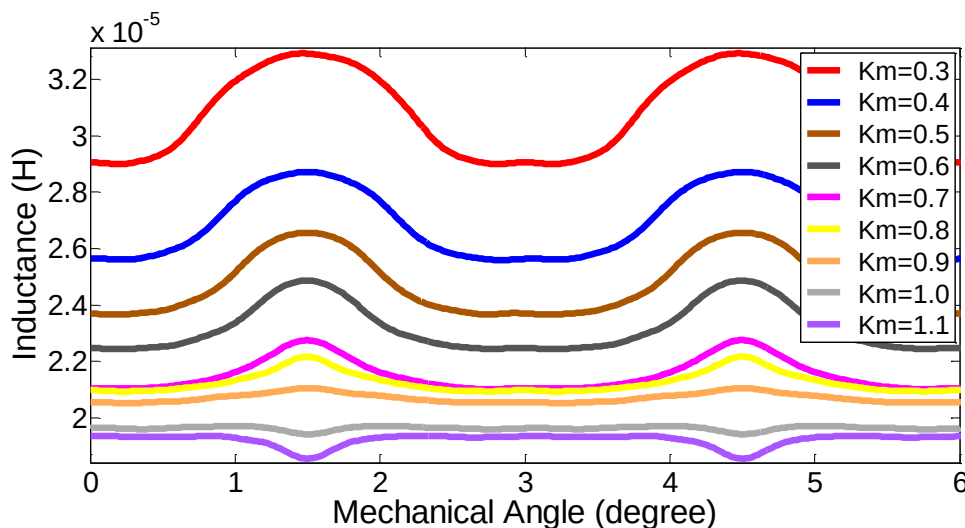


(د) THD جریان هر فاز

شکل ۴-۱۸: شاخص‌های عملکردی بدست آمده از شبیه‌سازی دینامیکی گذرای به ازای شکل‌های مختلف کفشک قطب

۴-۷-۵- تأثیر نسبت کمان آهنربای دائم به کمان متمرکزکننده شار روتور

همان طور که قبلاً اشاره شد، این نسبت که با K_m نشان داده می‌شود، یکی از مهمترین پارامترهای هندسی مؤثر در عملکرد ماشین TFPM می‌باشد. شکل ۴-۱۹ نحوه تأثیر K_m در اندوکتانس ماشین TFPM قطب چنگالی را نمایش می‌دهد. از این شکل کاملاً مشخص است که با افزایش K_m متوسط و دامنه تغییرات اندوکتانس کاهش می‌یابد که دلیل آن همان افزایش مقاومت مغناطیسی در مسیر شار استاتور می‌باشد. نکته جالب در این شکل آن است که از حدود $K_m = 1$ به بعد جهت تغییرات اندوکتانس عکس شده است. این موضوع نیز یکی از نتایج قابل استخراج از روش عددی می‌باشد.

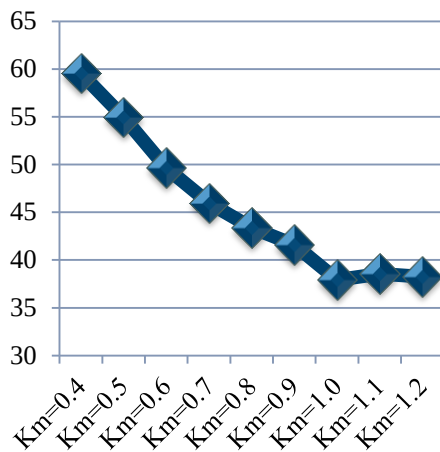


شکل ۴-۱۹: شکل موج اندوکتانس به ازای K_m های مختلف.

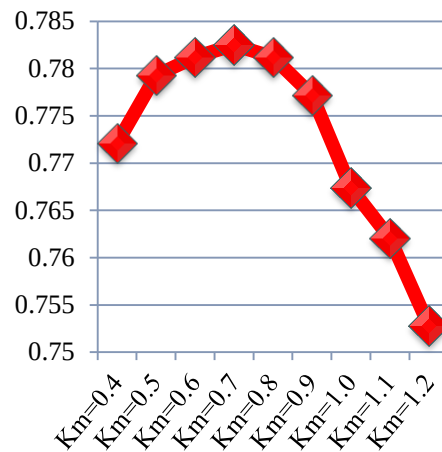
شکل ۴-۲۰ شاخص‌های عملکردی بدست آمده از شبیه‌سازی دینامیکی گذرای به ازای K_m

های مختلف را نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش K_m :

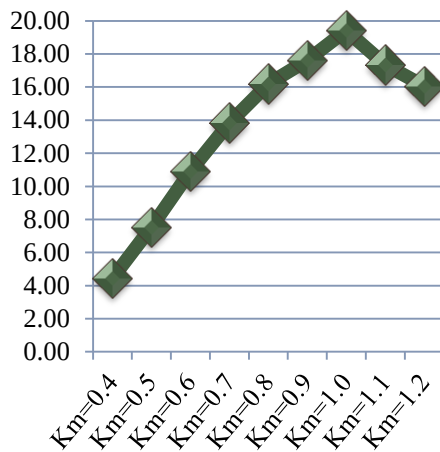
- ضریب قدرت تا حدود $K_m = 0.7$ افزایش یافته و بعد از آن کاهش می‌یابد.
- زاویه توان کاهش پیدا می‌کند.
- جریان مؤثر هر فاز تا نزدیکی‌های $K_m = 0.9$ کاهش یافته و بعد از آن افزایش پیدا می‌کند.
- THD جریان هر فاز $K_m = 1$ افزایش و سپس کاهش پیدا می‌کند.



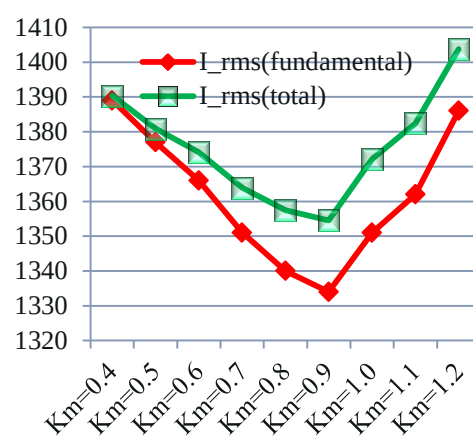
(ب) زاویه توان



(الف) ضریب قدرت



(د) THD جریان هر فاز

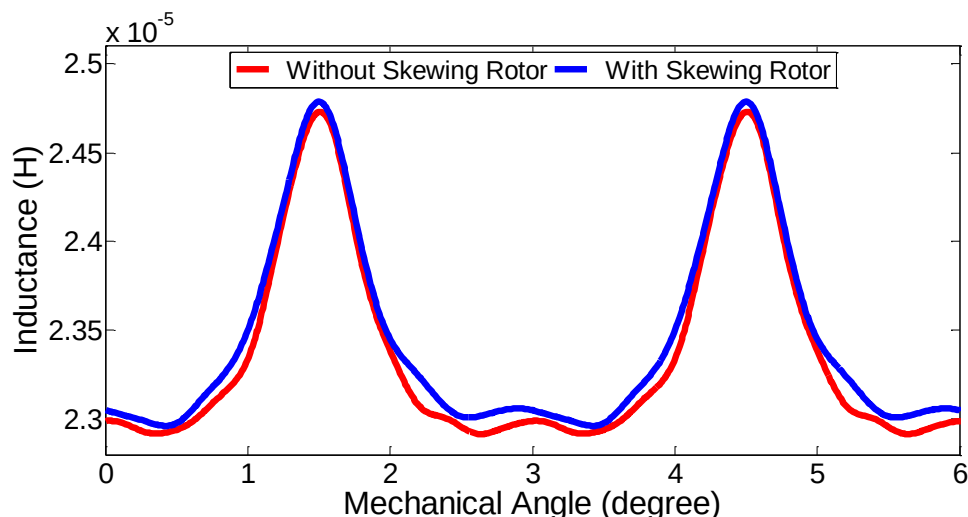


(ج) جریان مؤثر هر فاز

شکل ۴-۲۰: شاخص‌های عملکردی بدست آمده از شبیه‌سازی دینامیکی گذرای به ازای K_m های مختلف.

۴-۷-۶- تأثیر مستقیم یا مورب بودن قطب‌های روتور

همانند ولتاژ داخلی از شکل ۴-۲۱ مشخص است که تأثیر مورب ساختن قطب‌های روتور بر روی تغییرات اندوکتانس ناچیز است و تنها با مورب کردن روتور اندوکتانس متوسط اندکی افزایش پیدا می‌کند. این موضوع را می‌توان به این صورت توجیه کرد که با مورب شدن متمرکزکننده‌های شار در روتور مقاومت مغناطیسی مسیر عبور شار استاتور کمی کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۴-۲۱: تأثیر مورب ساختن قطب‌های روتور بر روی شکل موج اندوکتانس.

جدول ۴-۱ شاخص‌های بدست آمده از شبیه‌سازی دینامیکی گذرای برای طراحی‌هایی با روتور مستقیم و مورب را ارائه می‌دهد. از این نتایج کاملاً مشخص است که مورب کردن روتور در شاخص‌های ارائه شده تأثیر چندانی ندارد.

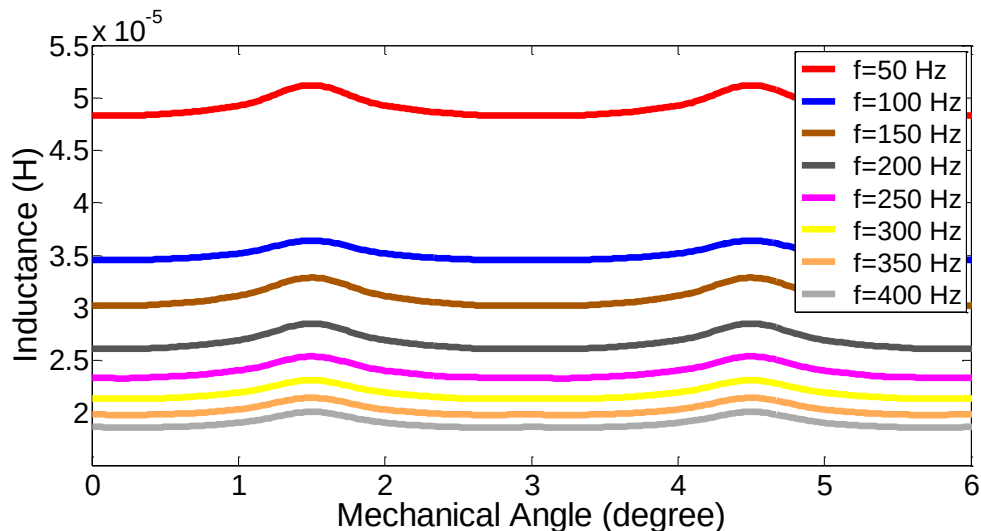
جدول ۴-۱: شاخص‌های بدست آمده از شبیه‌سازی دینامیکی گذرای برای طراحی‌هایی با روتور مستقیم و مورب

طراحی با روتور مورب	طراحی با روتور مستقیم	
۰/۹۳۱۴	۰/۹۳۱۶	ضریب قدرت
۳۶/۱۸	۳۶/۰۵	زاویه توان
۱۱۴۲/۴۷	۱۱۴۲/۳۴	جریان مؤثر هر فاز
۱۱۲۳	۱۱۲۳	مقدار مؤثر موج اصلی جریان
۱۸/۶۴	۱۸/۷۰	THD جریان هر فاز

۴-۸- عوامل مؤثر دیگر در شکل موج اندوکتانس

علاوه بر عوامل ساختاری فوق فرکانس داده شده در الگوریتم طراحی نیز در اندوکتانس مؤثر است (به دلیل تغییر ابعاد هندسی طراحی شده توسط الگوریتم به ازای فرکانس‌های مختلف). در شکل ۴-۲۲ تأثیر فرکانس داده شده در الگوریتم طراحی در شکل اندوکتانس ماشین نشان داده شده

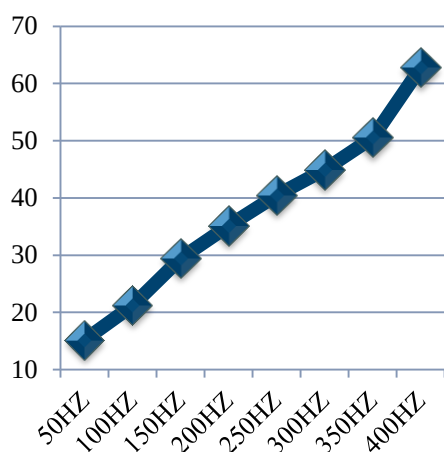
است. مشاهده می شود که با افزایش فرکانس در الگوریتم طراحی، متوسط اندوکتانس کاهش می یابد اما تغییر محسوسی در دامنه تغییرات اندوکتانس ایجاد نمی شود. در اینجا نیز می توان توضیحاتی مشابه آنچه که در بحث تأثیر تعداد قطب ها در اندوکتانس مطرح شد را ارائه نمود.



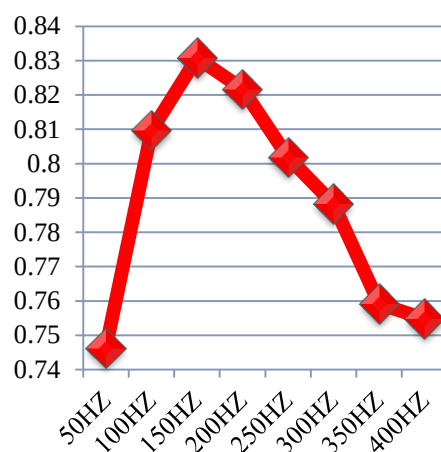
شکل ۴-۲۲: شکل موج اندوکتانس به ازای فرکانس های مختلف

شکل ۴-۲۳ شاخص های عملکردی بدست آمده از شبیه سازی دینامیکی گذرای به ازای فرکانس های مختلف را نشان می دهد. از این شکل می توان نتیجه گرفت که با افزایش فرکانس:

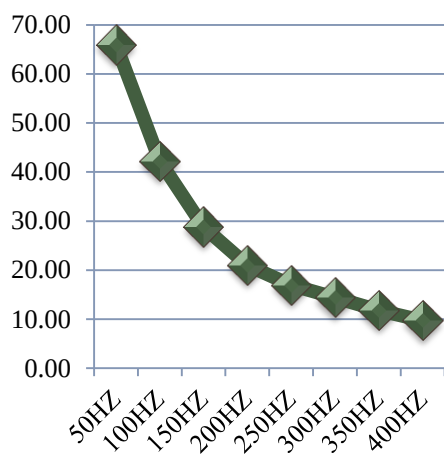
- ضریب قدرت تا حدود فرکانس ۱۵۰ هرتز افزایش یافته و بعد از آن کاهش می یابد.
- زاویه توان افزایش پیدا می کند.
- جریان مؤثر هر فاز تا نزدیکی های ۱۵۰ هرتز کاهش یافته و بعد از آن افزایش پیدا می کند در حالی که مقدار مؤثر موج اصلی جریان هر فاز تا نزدیکی های ۱۰۰ هرتز کاهش می یابد و بعد از آن شروع به افزایش می کند.
- THD جریان هر فاز کاهش پیدا می کند.



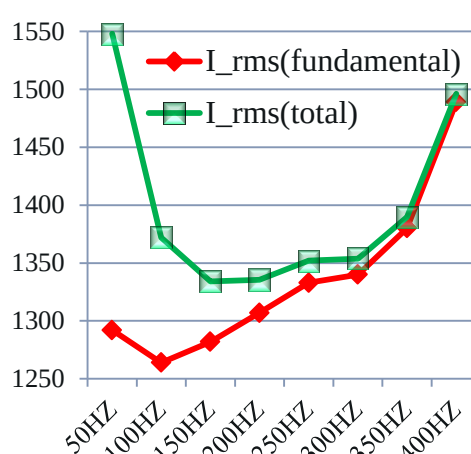
(ب) زاویه توان



(الف) ضریب قدرت



(د) THD جریان هر فاز



(ج) جریان مؤثر هر فاز

شکل ۴-۲۳: شاخص‌های عملکردی بدست آمده از شبیه‌سازی دینامیکی گذرای به ازای فرکانس‌های مختلف

فصل ۵:

گشتاور و ریپل گشتاور ماشین TFPM قطب

چنگالی

۵-۱- مقدمه

یکی از مهمترین ملاک‌های قضاوت در مورد عملکرد ماشین‌های TFPM همان گشتاور خروجی و میزان ریپل آن می‌باشد. اهمیت این موضوع از آن جهت است که ماشین TFPM عمدتاً در کاربردهای سرعت پایین (گشتاور بالا) مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این کاربردها علاوه بر اینکه باید چگالی گشتاور ماشین مورد استفاده بالا باشد، میزان ریپل گشتاور آن نیز باید حداقل باشد. در این فصل پس از معرفی مؤلفه‌های ریپل گشتاور، تأثیر عوامل ساختاری مختلف بر روی گشتاور کل و ریپل‌های آن به صورت موردی بررسی خواهد شد.

۵-۲- مؤلفه‌های ریپل گشتاور

در ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم ریپل گشتاور از سه مؤلفه اصلی تشکیل می‌شود که عبارتند از:

(۱) گشتاور متقابل^۱ ناشی از اثر متقابل میدان روتور و جریان استاتور،

(۲) گشتاور رلوکتانسی^۲ ناشی از برجستگی‌های روتور،

(۳) گشتاور دندانه‌ای^۳ که از اثر متقابل بین آهنرباهای دائم و ساختار شیاردار آهن بوجود می‌آید.

در ادامه این بخش به توضیح این مؤلفه‌های ریپل گشتاور پرداخته می‌شود.

۵-۲-۱- گشتاور متقابل

ماشین‌های TFPM قطب چنگالی در هر فاز دارای استاتوری با سیم پیچی حلقوی همراه با روتور آهنربای دائم می‌باشد. یک نیروی محرکه مغناطیسی سینوسی در فاصله هوایی توسط جریان

^۱ Mutal Torque

^۲ Reluctance Torque

^۳ Cogging Torque

سینوسی در سیم پیچ استاتور تولید می شود. گشتاور الکترومغناطیسی روی شفت توسط اثر متقابل میدان های مغناطیسی استاتور و روتور تولید می شود. گشتاور لحظه ای خروجی برای ماشین سه فاز بدون در نظر گرفتن اشباع مغناطیسی با معادله (۱-۵) ارائه می گردد:

$$T_e = \frac{1}{\omega_r} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \quad (1-5)$$

که در آن e_a ، e_b و e_c ولتاژهای داخلی هر فاز و i_a ، i_b و i_c جریان های مرتبط با هر فاز می باشند و ω_r سرعت زاویه ای مکانیکی است. گشتاور متقابل به علت اغتشاش در توزیع چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی و همچنین اغتشاش در جریان استاتور باعث ایجاد ریپل در گشتاور خروجی خواهد شد. ماشین گشتاور متقابل ثابتی را در هر فاز تنها در صورتی می تواند تولید کند که شار ناشی از میدان روتور که سیم پیچ استاتور را دور می زند، کاملاً سینوسی باشد. از این رو می توان کیفیت گشتاور خروجی را با کاهش گشتاور متقابل که با هارمونیک های شکل موج ولتاژ داخلی و جریان فاز مرتبط می باشد، بهبود بخشید.

۵-۲-۲- گشتاور رلوکتانسی

این گشتاور به آن دلیل ایجاد می شود که شار سیم پیچ استاتور تمایل دارد از مسیری با کمترین مقاومت مغناطیسی عبور کند. برای این منظور گشتاوری به روتور وارد می شود که آن را در موقعیتی قرار دهد که این مسیر با کمترین مقاومت مغناطیسی را برای شار استاتور فراهم کند. گشتاور رلوکتانسی در ماشین هایی که با چرخش روتور تغییرات زیادی در مقاومت مغناطیسی شار استاتور ایجاد می شود قابل توجه است. از آنجا که در ماشین های TFPM قطب چنگالی آهنرباهای دائم که مقاومت مغناطیسی نزدیک به هوا دارند، بخش عمده ای از مسیر شار استاتور در روتور را تشکیل می دهند، با چرخش روتور مقاومت مغناطیسی مسیر عبور شار استاتور تغییر چندانی نکرده و گشتاور رلوکتانسی نسبت به سایر مؤلفه های شار گشتاور ناچیز خواهد بود. لذا در این پایان نامه از گشتاور

رلوکتانسی صرف نظر می‌شود.

۵-۲-۳- گشتاور دندانه‌ای

گشتاور دندانه‌ای ماشین TFPM قطب چنگالی ناشی از تعامل مغناطیسی بین مدار مغناطیسی قطب‌های روتور و دندانه‌های استاتور است [۳۴]. بین آهنرباهای دائم روتور و دندانه‌های استاتور یک نیروی جاذبه مغناطیسی وجود دارد که تلاش می‌کند این دو هم محور باقی بمانند. گشتاوری که از این خاصیت مغناطیسی ناشی می‌شود را گشتاور دندانه‌ای می‌نامند. حتی زمانی که ماشین تغذیه نشده باشد، گشتاور دندانه‌ای خود را به صورت تمایل روتور به همراه ماندن در تعدادی از موقعیت‌های پایدار نشان می‌دهد و گشتاور نوسانی تولید می‌گردد که به گشتاور خروجی متوسط کمک نمی‌کند و سبب کاهش راندمان ماشین می‌شود. همچنین این نوع گشتاور یکی از منابع اصلی ارتعاشات و نویز الکترومغناطیسی در ماشین‌های TFPM قطب چنگالی به شمار می‌رود. با استناد به مراجع [۳۵-۴۳]، می‌توان دریافت که ماشین‌های TFPM (مخصوصاً از نوع روتور با متمرکز کننده شار) دارای گشتاور دندانه‌ای بسیار بالایی می‌باشند.

۵-۲-۳-۱- اصول تولید گشتاور دندانه‌ای

برای سادگی، آرایش خطی و تک فاز یک ماشین TFPM نمونه در اینجا مورد بررسی قرار می‌گیرد. یک سیکل از گشتاور دندانه‌ای وقتی که آهنرباها از چپ به راست (چرخش در جهت عقربه‌های ساعت) حرکت می‌کند به صورت دقیق در شکل ۵-۱-الف به تصویر کشیده شده است. با حرکت روتور، گشتاور دندانه‌ای زمانی که آهنرباها در موقعیت خنثی قرار نداشته باشند تولید می‌شود. موقعیت خنثی موقعیتی است که در آن گشتاور دندانه‌ای حاصل صفر است. در موقعیت خنثی پایدار، همانطور که در شکل ۵-۱-الف-a و شکل ۵-۱-الف-e نشان داده شده است، رلوکتانس فاصله هوایی حداقل است و متمرکزکننده‌های شار روتور و دندانه‌های استاتور همراه هستند. در موقعیت خنثی ناپایدار همانند شکل ۵-۱-الف-c آهنرباهای دائمی با دندانه‌های استاتور همراه می‌باشند. در شکل

۵-۱-الف a که متمرکزکننده‌های شار روتور و دندانه‌های استاتور همراه هستند، روتور در موقعیت خنثی پایدار قرار دارد و همانطور که قبلاً بیان شد گشتاور دندانه‌ای صفر است. در شکل ۵-۱-الف b روتور کمی حرکت کرده و شار مغناطیسی تلاش می‌کند روتور را بر خلاف جهت چرخش آن حرکت دهد (بین موقعیت‌های (a) و (b)) تا روتور را به موقعیت خنثی پایدار برگرداند بنابراین گشتاور دندانه‌ای منفی تولید می‌شود. در شکل ۵-۱-الف c روتور به موقعیت خنثی ناپایدار نزدیک می‌شود که در آن گشتاور دندانه‌ای مجدداً صفر می‌شود. از شکل ۵-۱-الف مشخص است که گشتاور دندانه‌ای در هر موقعیت بین دو حالت (b) و (c) منفی است. بنابراین اگر در موقعیت خنثی ناپایدار روتور به هر دلیلی اندکی به سمت چپ متمایل شود، گشتاور دندانه‌ای منفی تمایل به دور کردن روتور از موقعیت خنثی ناپایدار دارد. با ادامه حرکت روتور پس از نقطه خنثی ناپایدار به سمت راست، گشتاور دندانه‌ای مثبت می‌شود و تمایل دارد روتور را از موقعیت خنثی ناپایدار دور کند. در شکل ۵-۱-الف e گشتاور دندانه‌ای مثبتی تولید می‌شود تا روتور را در جهت چرخش آن حرکت دهد (بین موقعیت‌های (d) و (e)) و روتور در موقعیت خنثی پایدار بعدی قرار گیرد [۴۴].

گشتاور دندانه‌ای نتیجه دو مکانیزم است. اولین مکانیزم مربوط به شاری است که از یوغ استاتور عبور می‌کند و در موقعیتی که دندانه‌های استاتور و متمرکزکننده‌های شار در یک راستا قرار دارند حداکثر است، دومین مکانیزم مربوط به شاری است که از یوغ استاتور عبور نمی‌کند یعنی سیم پیچ استاتور را دور نمی‌زند و به آهنربا بر می‌گردد و در موقعیتی که آهنرباها و دندانه‌های استاتور در یک راستا قرار دارند حداکثر است. بخش زیر این دو مکانیزم را به صورت جداگانه توصیف می‌کند [۱۶].

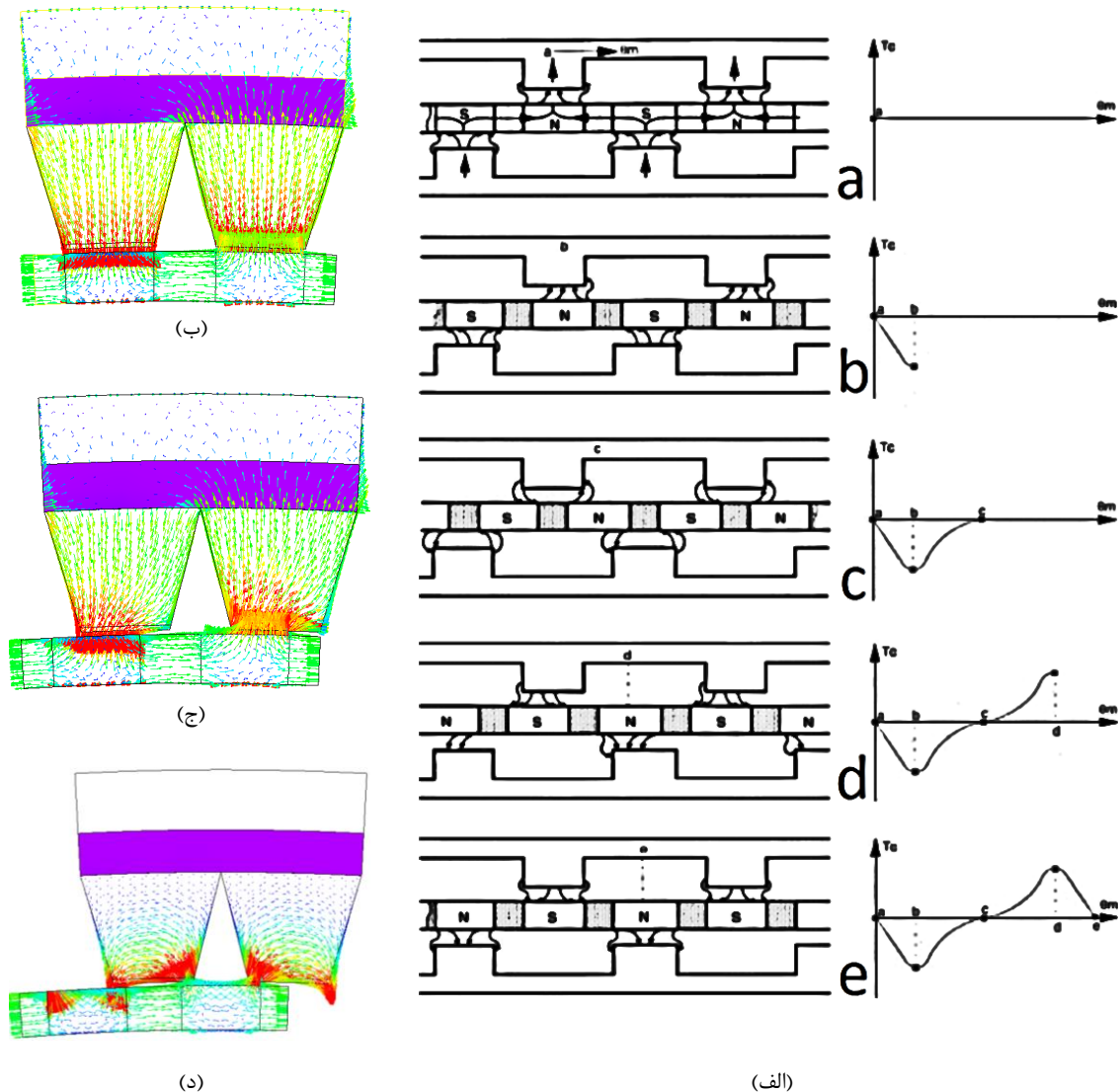
۵-۲-۳-۲- گشتاور دندانه‌ای هم راستا

این گشتاور نتیجه تفاوت رلوکتانس مسیری است که آهنربا در موقعیت‌های مختلف روتور می‌بیند. همان طور که در شکل ۵-۱-ب نشان داده شده است، موقعیتی که دندانه‌های استاتور و متمرکزکننده‌های شار روتور در یک راستا قرار دارند به اصطلاح هم راستا نامیده می‌شوند. در

موقعیت هم راستا، شار از متمرکز کننده شار با عبور از فاصله هوایی در جهت شعاعی وارد دندان استاتور می‌شود و یوغ استاتور و در واقع سیم پیچ استاتور را دور می‌زند و از دندانهای مجاور استاتور سمت دیگر و فاصله هوایی عبور می‌کند و دوباره از طریق متمرکز کننده شار به آهنربا برمی‌گردد. با دور شدن از موقعیت هم راستایی، مساحت سطح فاصله هوایی بین دندانهای استاتور و متمرکز کننده‌های شار روتور کاهش می‌یابد که باعث افزایش رلوکتانس مسیر در سراسر فاصله هوایی می‌گردد.

۵-۲-۳- گشتاور دندانه‌ای غیر هم راستا

هنگامی که روتور از موقعیت هم راستایی به موقعیت غیر هم راستایی جابه‌جا می‌شود، خط مرکزی آهنربا به سمت خط مرکزی دندان استاتور حرکت می‌کند (شکل ۵-۱-ج). موقعیتی که آهنربا و دندان استاتور در یک راستا قرار دارند به اصطلاح موقعیت غیر هم راستایی نامیده می‌شود (شکل ۵-۱-د). وقتی که این اتفاق می‌افتد، شار مسیری را دنبال می‌کند که مثل موقعیت هم راستایی یوغ و سیم پیچ استاتور را دور نمی‌زند اما در عوض از دندان استاتور برای پیمودن عرض آهنربا استفاده می‌کند و به سمت مخالف آهنربا بر می‌گردد. این شار زمانی که خط مرکزی آهنربا بر خط مرکزی دندان استاتور منطبق شود، حداکثر است که نشان دهنده موقعیت غیر هم راستایی می‌باشد.



شکل ۵-۱: الف) یک سیکل از گشتاور دندانه‌ای یک ماشین TFPM [۴۴]، 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 0.7° درجه مکانیکی، د) نمایش اجزای محدود چگالی شار برای گشتاور دندانه‌ای در موقعیت غیر هم راستایی

۵-۲-۳-۴- روش‌های به حداقل رساندن گشتاور دندانه‌ای

روش‌های بسیاری درباره به حداقل رساندن اندازه گشتاور دندانه‌ای ماشین‌های معمولی آهنربای

دائمی در مقالات، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. دو گروه اصلی این روش‌ها عبارتند از:

- ایجاد جریان مناسبی توسط درایو که ریپل گشتاوری مخالف با گشتاور دندانه‌ای تولید کند

[۴۵].

• بهینه‌سازی ابعاد ماشین [۴۶-۴۹].

مهمترین پارامترهای طراحی که به طور مستقیم بر گشتاور دندانه‌ای اثر می‌گذارند، عبارتند از [۸]:

۱. نسبت‌های مختلف تعداد شیار به تعداد قطب

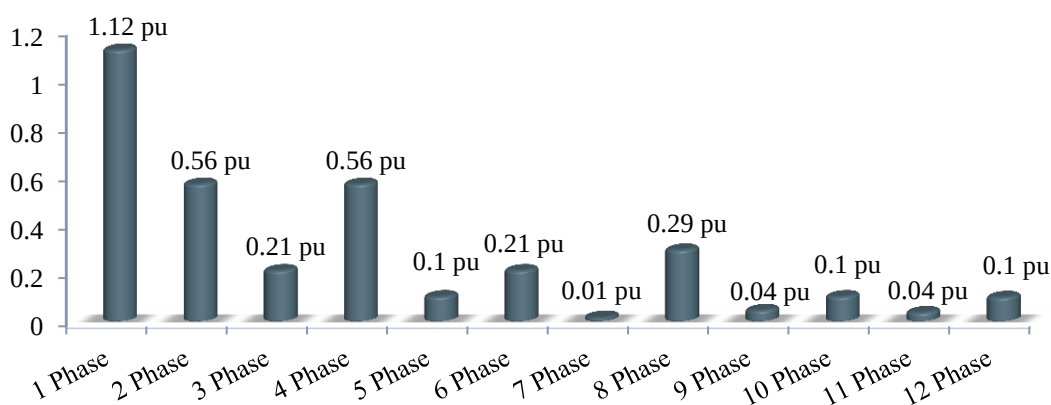
۲. پهنای باز بودن شیارهای استاتور

۳. طول فاصله هوایی شعاعی و ضخامت آهنرباها

۴. نسبت قوس قطب به گام قطب

۵. مورب کردن شیارها در استاتور یا آهنرباها در روتور

با بهره‌گیری از مزیت مستقل بودن فازها از نظر الکترومغناطیسی، می‌توان گشتاور دندانه‌ای را کاهش داد. تأثیر تعداد فازها بر روی گشتاور دندانه‌ای در ماشین TFPM قطب چنگالی مورد مطالعه در شکل ۵-۲ نشان داده شده است. همان طور که از این شکل مشخص است، گشتاور دندانه‌ای در تعداد فازهای فرد نسبت به تعداد فازهای زوج کمتر است.



شکل ۵-۲: تأثیر تعداد فازها بر روی ریپل گشتاور دندانه‌ای بر حسب پریونیت

همچنین، یکی از روش‌هایی بسیار مؤثر در کاهش گشتاور دندانه‌ای در ماشین TFPM قطب چنگالی روش مورب ساختن روتور است. در ادامه، روش مورب کردن بر روی این ماشین اعمال می‌شود. به منظور بررسی اثر روش مورب کردن در کاهش گشتاور دندانه‌ای، دامنه گشتاور دندانه‌ای و

گشتاور خروجی در نظر گرفته می‌شود.

۵-۳- تأثیر تعداد فازها بر روی گشتاور خروجی

در بسیاری از شرایط، ریپل گشتاور الکترومغناطیسی یک مسئله اساسی و مهم در عملکرد ماشین‌های الکتریکی به شمار می‌آید. تلاش‌های گسترده‌ای در زمینه کاهش ریپل گشتاور الکترومغناطیسی برای بهبود عملکرد ماشین‌های الکتریکی صورت گرفته است. ریپل گشتاور الکترومغناطیسی از منابع مهم تولید ارتعاش و نویز در ماشین‌های الکتریکی به شمار می‌آید [۵۰].

وجود هارمونیک‌های در جریان و ولتاژ داخلی هر فاز باعث ایجاد ریپل گشتاور الکترومغناطیسی در ماشین‌های سنکرون می‌شود. بنابراین، طراحی ماشین به نحوی که مؤلفه‌های کمتری از هارمونیک‌های جریان و ولتاژ داخلی در تولید ریپل گشتاور الکترومغناطیسی نقش داشته باشند، مطلوب خواهد بود.

همانطور که در فصل ۱ بیان شد، یکی از کاربردهای مهم ماشین‌های TFPM قطب چنگالی در نیروی پیشران شناورهای زیرسطحی و صنایع دریایی می‌باشد. برای نیروی پیشران این شناورها معمولاً از موتورهای چند فاز سرعت پایین با توانی بیشتر از یک مگاوات استفاده می‌شود. تعداد فازهای بیشتر از سه فاز نه تنها توان مورد نیاز را بین فازهای مختلف تقسیم می‌کند، بلکه منجر به کاهش ریپل گشتاور الکترومغناطیسی خواهد شد. این موضوع باعث شده است که از این ماشین‌ها در سیستم پیشران کشتی‌ها و موتور زیردریایی‌ها به صورت گسترده مورد استفاده قرار گیرد. با این وجود، از آنجا که ریپل گشتاور به وجود آمده از عکس‌العمل بین جریان و هارمونیک‌های ولتاژ داخلی از اهمیت بسیار زیادی در ماشین‌های مغناطیس دائم سرعت پایین برخوردار است، این موضوع باعث پیچیده‌تر شدن فرایند کنترل این سیستم‌ها شده است. همچنین از آنجا که این ماشین‌ها معمولاً در توان‌های بالا ساخته می‌شوند استفاده از ماشین‌های چند فاز باعث توزیع توان در فازهای مختلف

می‌شود.

از آنجا که ماشین‌های TFPM در کاربردهای سرعت پایین و گشتاور بالا کاربرد دارند، باید به گشتاور الکترومغناطیسی این گونه ماشین‌ها در فرایند طراحی و بهینه‌سازی توجه بیشتری شود. پارامترها و عوامل ساختاری متعددی در مقدار متوسط گشتاور الکترومغناطیسی و همچنین ریپل آن در ماشین‌های TFPM قطب چنگالی مؤثر می‌باشند. از میان آنها تعداد فازها نسبت به سایر عوامل تأثیر قابل ملاحظه‌ای در ریپل گشتاور این ماشین‌ها خواهد داشت.

در ماشین‌های TFPM قطب چنگالی، هر فاز به صورت جداگانه طراحی و ساخته می‌شود و سپس، با کنار هم قرار گرفتن این فازهای جداگانه بر روی یک شفت مشترک یک ماشین چند فاز تولید خواهد شد. بنابراین به علت نبود تزویج الکترومغناطیسی بین فازها، شکل موج ولتاژ داخلی هر فاز مستقل از تعداد فازها خواهد بود. اگر چه تعداد فازها تعیین خواهند کرد که کدام یک از هارمونیک‌های ولتاژ داخلی و جریان فاز در ریپل گشتاور الکترومغناطیسی شرکت داشته باشند. بنابراین، تعداد فازهای بهینه در فرایند طراحی باید به گونه‌ای انتخاب شود که از تأثیر هارمونیک‌های مهم ولتاژ داخلی و جریان فاز در ریپل گشتاور الکترومغناطیسی جلوگیری شود.

شکل موج ولتاژ داخلی و به تبع آن مؤلفه‌های هارمونیک آن، به ساختار و مواد سازنده و همچنین میزان اشباع هسته در ماشین بستگی خواهد داشت. هارمونیک‌های ولتاژ داخلی و ولتاژ ترمینال ماشین، مؤلفه‌های هارمونیک جریان فاز را تولید می‌کنند. به علت ماهیت القایی سیم‌پیچ آرمیچر، هارمونیک‌های جریان فاز که توسط هارمونیک‌های ولتاژ داخلی و ولتاژ ترمینال ماشین تولید شده‌اند، به شدت فیلتر خواهند شد. بنابراین، THD جریان فاز معمولاً بسیار کمتر از THD ولتاژ داخلی در هر فاز خواهد شد. در برخی از کاربردها، ماشین‌های TFPM توسط منابع ولتاژ پایین تغذیه می‌شوند. در این شرایط، برای ماشین‌های توان بالا، دامنه هارمونیک‌های ولتاژ داخلی و جریان فاز قابل مقایسه خواهند بود. بنابراین برای بدست آوردن یک رابطه کلی بین تعداد فازها و ریپل گشتاور

الکترومغناطیسی، باید هر دو مؤلفه هارمونیکی ولتاژ داخلی و جریان فاز در نظر گرفته شوند.

۵-۳-۱- گشتاور الکترومغناطیسی در ماشین m فاز

در این قسمت، گشتاور الکترومغناطیسی به صورت تابعی از شکل موج‌های ولتاژ داخلی و جریان فاز با استفاده از سری فوریه بیان شده است. این محاسبات برای کلیه ماشین‌های سنکرون همانند ماشین‌های روتور سیم‌پیچی شده معمولی، ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم و ماشین‌های DC بدون جاروبک معتبر هستند. برای برخی دلایل، ابتدا شکل موج گشتاور الکترومغناطیسی برای ماشین m فاز ($m \geq 3$) مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۵-۳-۱-۱- ماشین m فاز ($m \geq 3$)

برای ماشین m فاز ولتاژ داخلی e_n برای فاز n به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$e_n(\omega_e t) = \sum_{h=1}^{\infty} E_h \cos \left[h\omega_e t - h(n-1)\frac{2\pi}{m} + \theta_{eh} \right] \quad n=1,2,3,\dots,m. \quad (۲-۵)$$

که در آن ω_e ، E_h ، h و θ_{eh} به ترتیب فرکانس زاویه‌ای الکتریکی، شماره هارمونیک ولتاژ داخلی، دامنه هارمونیک h ام ولتاژ داخلی و زاویه فاز هارمونیک h ام ولتاژ داخلی می‌باشند. به طور مشابه، جریان فاز i_n به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$i_n(\omega_e t) = \sum_{k=1}^{\infty} I_k \cos \left[k\omega_e t - k(n-1)\frac{2\pi}{m} + \theta_{ik} \right] \quad n=1,2,3,\dots,m. \quad (۳-۵)$$

که در آن I_k و θ_{ik} به ترتیب شماره هارمونیک جریان فاز، دامنه هارمونیک k ام جریان فاز و زاویه فاز هارمونیک k ام جریان فاز می‌باشند.

گشتاور الکترومغناطیسی لحظه‌ای T_e به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$T_e(\omega_e t) = \frac{\sum_{n=1}^m e_n i_n}{\omega_r}, \quad (4-5)$$

که در آن ω_r سرعت زاویه‌ای روتور بوده و در حالت دائمی، ثابت می‌باشد. برای ماشین‌های سنکرون در حالت دائمی مقدار ω_r برابر با $2\omega_e/p$ است. با قرار دادن روابط (۲-۵) و (۳-۵) در معادله (۴-۵) خواهیم داشت:

$$T_e(\omega_e t) = \frac{1}{\omega_r} \sum_{n=1}^m \left\{ \sum_{h=1}^{\infty} E_h \cos \left[h\omega_e t - h(n-1)\frac{2\pi}{m} + \theta_h \right] \times \sum_{k=1}^{\infty} I_k \cos \left[k\omega_e t - k(n-1)\frac{2\pi}{m} + \theta_{ik} \right] \right\}. \quad (5-5)$$

هارمونیک h ام ولتاژ داخلی و هارمونیک k ام جریان فاز، مؤلفه گشتاور الکترومغناطیسی $T_e^{h,k}$ که در زیر آورده شده است را تولید می‌کنند:

$$T_e^{h,k}(\omega_e t) = \frac{E_h I_k}{\omega_r} \sum_{n=1}^m \left\{ \cos \left[h\omega_e t - h(n-1)\frac{2\pi}{m} + \theta_{eh} \right] \times \cos \left[k\omega_e t - k(n-1)\frac{2\pi}{m} + \theta_{ik} \right] \right\}. \quad (6-5)$$

با تبدیل ضرب به جمع رابطه (۶-۵) تبدیل خواهد شد به

$$T_e^{h,k}(\omega_e t) = \frac{E_h I_k}{\omega_r} \sum_{n=1}^m \left\{ \cos \left[(h-k)\omega_e t - (h-k)(n-1)\frac{2\pi}{m} + (\theta_{eh} - \theta_{ik}) \right] + \cos \left[(h+k)\omega_e t - (h+k)(n-1)\frac{2\pi}{m} + (\theta_{eh} + \theta_{ik}) \right] \right\}. \quad (7-5)$$

معادله (۷-۵) نشان می‌دهد که برای هر جفت هارمونیک ولتاژ داخلی و جریان فاز، گشتاور الکترومغناطیسی تولید شده به دو قسمت تقسیم می‌شود.

$$T_e^{h,k}(\omega_e t) = T_1^{h,k}(\omega_e t) + T_2^{h,k}(\omega_e t), \quad (8-5)$$

که در آن $T_1^{h,k}$ و $T_2^{h,k}$ برابر خواهند بود با:

$$T_1^{h,k}(\omega_e t) = \frac{E_h I_k}{2\omega_r} \sum_{n=1}^m \cos \left[(h-k)\omega_e t - (h-k)(n-1)\frac{2\pi}{m} + (\theta_{eh} - \theta_{ik}) \right], \quad (9-5)$$

$$T_2^{h,k}(\omega_e t) = \frac{E_h I_k}{2\omega_r} \sum_{n=1}^m \cos \left[(h+k)\omega_e t - (h+k)(n-1)\frac{2\pi}{m} + (\theta_{eh} + \theta_{ik}) \right]. \quad (10-5)$$

باید به این نکته توجه داشت که در معادلات (۹-۵) و (۱۰-۵)، هر جفت هارمونیک ولتاژ داخلی و جریان فاز تنها زمانی که $h=k$ باشد، گشتاور متوسط غیر صفر ایجاد خواهند کرد. در غیر این صورت، $T_1^{h,k}$ و $T_2^{h,k}$ هر دو توابع کسینوسی از $\omega_e t$ هستند و مقدار متوسط آنها همیشه برابر با صفر خواهد بود. بنابراین، هارمونیک‌های ولتاژ داخلی و جریان فاز ریپل گشتاور ایجاد می‌کنند که مطلوب نخواهد بود. به هر حال برای تعدادی از هارمونیک‌ها مقدار لحظه‌ای گشتاور الکترومغناطیسی تولید شده برابر با صفر خواهد بود. دو حالت زیر وجود خواهد داشت:

$$h=k=q \quad I$$

(۱) $2q/m$ مقدار صحیح باشد ($q=jm/2, j=1, 2, 3 \dots$).

$$T_1^{q,q}(\omega_e t) = \frac{mE_q I_q}{2\omega_r} \cos(\theta_{eq} - \theta_{iq}), \quad (11-5)$$

$$T_2^{q,q}(\omega_e t) = \frac{mE_q I_q}{2\omega_r} \cos[2q\omega_e t + (\theta_{eq} + \theta_{iq})] \quad (12-5)$$

(۲) $2q/m$ مقدار صحیح نباشد (برای مثال $q=1$ برای $m>2$).

$T_2^{q,q}$ برابر صفر شده و

$$T_1^{q,q}(\omega_e t) = \frac{mE_q I_q}{2\omega_r} \cos(\theta_{eq} - \theta_{iq}). \quad (13-5)$$

$$h \neq k \quad II$$

(۱) اختلاف h و k یک ضریب صحیح از تعداد فازها شود ($|h-k|=ml, l=1, 2, 3 \dots$).

$T_2^{h,k}$ برابر صفر شده و

$$T_1^{h,k}(\omega_e t) = \frac{mE_h I_k}{2\omega_r} \cos[ml\omega_e t + (\theta_{eh} - \theta_{ik})] \quad (14-5)$$

(۲) مجموع h و k یک ضریب صحیح از تعداد فازها شود ($h+k=ml, l=1, 2, 3 \dots$).

$T_1^{h,k}$ برابر صفر شده و

$$T_2^{h,k}(\omega_e t) = \frac{mE_h I_k}{2\omega_r} \cos[ml\omega_e t + (\theta_{eh} + \theta_{ik})] \quad (15-5)$$

(۳) هم مجموع و هم اختلاف h و k ، ضریب صحیحی از تعداد فازها شوند.

$T_1^{h,k}$ و $T_2^{h,k}$ به ترتیب توسط روابط (۱۴-۵) و (۱۵-۵) بدست خواهند آمد.

(۴) در غیر این صورت، $T_1^{h,k}$ و $T_2^{h,k}$ هر دو صفر خواهند شد.

۵-۳-۱-۲- ماشین ۲ فاز ($m=2$)

برای ماشین ۲ فاز، اختلاف فاز بین فازها برابر با ضریبی از π/m در عوض $2\pi/m$ در ماشین‌های m فاز می‌باشد.

$$e_n(\omega_e t) = \sum_{h=1}^{\infty} E_h \cos\left[h\omega_e t - h(n-1)\frac{\pi}{m} + \theta_{eh}\right] \quad n=1,2, \quad (16-5)$$

$$i_n(\omega_e t) = \sum_{k=1}^{\infty} I_k \cos\left[k\omega_e t - k(n-1)\frac{\pi}{m} + \theta_{ik}\right] \quad n=1,2. \quad (17-5)$$

گشتاور الکترومغناطیسی لحظه‌ای T_e به صورت مجموع $T_1^{h,k}$ و $T_2^{h,k}$ برابر خواهد بود با:

$$T_1^{h,k}(\omega_e t) = \frac{E_h I_k}{2\omega_r} \sum_{n=1}^m \cos\left[(h-k)\omega_e t - (h-k)(n-1)\frac{\pi}{m} + (\theta_{eh} - \theta_{ik})\right] \quad (18-5)$$

$$T_2^{h,k}(\omega_e t) = \frac{E_h I_k}{2\omega_r} \sum_{n=1}^m \cos\left[(h+k)\omega_e t - (h+k)(n-1)\frac{\pi}{m} + (\theta_{eh} + \theta_{ik})\right]. \quad (19-5)$$

دوباره در اینجا دو حالت زیر وجود خواهد داشت:

$$h=k=q \quad I$$

(۱) q یک مقدار صحیح و زوج باشد و بنابراین q یک ضریب صحیح از تعداد فازها باشد

$$(q=2j, j=1, 2, 3 \dots)$$

$T_1^{q,q}$ و $T_2^{q,q}$ توسط روابط (۱۱-۵) و (۱۲-۵) بدست خواهند آمد.

(۲) q یک ضریب صحیح از تعداد فازها نباشد.

$T_2^{q,q}$ برابر صفر شده و $T_1^{q,q}$ توسط رابطه (۱۳-۵) بدست خواهد آمد.

$$h \neq k \quad II$$

(۱) اختلاف h و k یک ضریب صحیح زوج از تعداد فازها شود ($|h-k|=4l, l=1, 2, 3 \dots$).

$T_2^{h,k}$ برابر صفر شده و

$$T_1^{h,k}(\omega_e t) = \frac{E_h I_k}{\omega_r} \cos[4l\omega_e t + (\theta_{eh} - \theta_{ik})] \quad (20-5)$$

(۲) مجموع h و k یک ضریب صحیح زوج از تعداد فازها شود ($h+k=4l, l=1, 2, 3 \dots$).

$T_1^{h,k}$ برابر صفر شده و

$$T_2^{h,k}(\omega_e t) = \frac{E_h I_k}{\omega_r} \cos[4l\omega_e t + (\theta_{eh} + \theta_{ik})] \quad (21-5)$$

(۳) هم مجموع و هم اختلاف h و k ضریب صحیح زوجی از تعداد فازها شوند.

$T_1^{h,k}$ و $T_2^{h,k}$ توسط روابط (۲۰-۵) و (۲۱-۵) بدست خواهند آمد.

(۴) در غیر این صورت، $T_1^{h,k}$ و $T_2^{h,k}$ هر دو صفر خواهند شد.

۵-۳-۱- ماشین تک فاز ($m=1$)

برای ماشین تک فاز، گشتاور الکترومغناطیسی لحظه‌ای T_e برابر خواهد بود با:

$$T_e^{h,k}(\omega_e t) = \frac{E_h I_k}{\omega_r} \cos(h\omega_e t + \theta_{eh}) \cos(k\omega_e t + \theta_{ik}), \quad (22-5)$$

که می‌توان به صورت مجموع $T_1^{h,k}$ و $T_2^{h,k}$ به صورت زیر بیان شوند:

$$T_1^{h,k}(\omega_e t) = \frac{E_h I_k}{2\omega_r} \cos[(h-k)\omega_e t + (\theta_{eh} - \theta_{ik})], \quad (23-5)$$

$$T_2^{h,k}(\omega_e t) = \frac{E_h I_k}{2\omega_r} \cos[(h+k)\omega_e t + (\theta_{eh} + \theta_{ik})] \quad (24-5)$$

$$h=k=q \quad I$$

$$T_1^{q,q}(\omega_e t) = \frac{E_q I_q}{2\omega_r} \cos(\theta_{eq} - \theta_{iq}), \quad (25-5)$$

$$T_2^{q,q}(\omega_e t) = \frac{E_q I_q}{2\omega_r} \cos[2q\omega_e t + (\theta_{eq} + \theta_{iq})] \quad (26-5)$$

از معادله (۲۶-۵) جالب توجه است که در ماشین تک فاز حتی مقدار اصلی ولتاژ داخلی و

جریان فاز در تولید ریپل نیز شرکت می‌کنند.

$$h \neq k \quad II$$

$T_1^{h,k}$ و $T_2^{h,k}$ توسط روابط (۲۳-۵) و (۲۴-۵) بدست خواهند آمد.

۵-۳-۲- بحث بر روی ریپل گشتاور

برای اغلب ماشین‌های سنکرون، شکل موج ولتاژ داخلی و جریان فاز شامل تنها هارمونیک‌های

فرد هستند. هارمونیک‌های زوج در ولتاژ داخلی ممکن است در نتیجه (۱) عدم تقارن در ماشین و (۲)

هارمونیک‌های موجود در جریان تحریک ماشین‌های روتور سیم‌پیچی شده، باشد. ماشین‌های TFPM

اغلب متقارن و بدون جریان تحریک می‌باشند. بنابراین برای این ماشین‌ها بهتر است که تنها

هارمونیک‌های فرد ولتاژ داخلی در نظر گرفته شوند. از طرف دیگر، هارمونیک‌های زوج در جریان فازها

نیز می‌توانند توسط هارمونیک‌های زوج در ولتاژ داخلی یا ولتاژ ترمینال و یا وجود هارمونیک‌های فرد

در اندوکتانس سیم‌پیچی ماشین بوجود آید، که در ماشین‌های TFPM این چنین نیست. باید توجه

داشت که اندوکتانس سیم‌پیچی به جای زمان تابعی از موقعیت روتور بوده و یک سیکل آن را برابر با ۳۶۰ درجه الکتریکی در نظر می‌گیریم.

در جدول ۵-۱ نتایج بدست آمده در قسمت قبل به صورت خلاصه نشان داده شده است که در آن فقط هارمونیک‌های فرد ولتاژ داخلی و جریان فاز در نظر گرفته شده است. در این جدول، جفت هارمونیک‌های ولتاژ داخلی و جریان فاز که در ریپل گشتاور الکترومغناطیسی برای ماشین‌های سنکرون m فاز شرکت می‌کنند، با رنگ خاکستری مشخص شده‌اند. همچنین، دایره‌های مشکی جفت هارمونیک‌هایی را که تولید گشتاور الکترومغناطیسی با متوسط غیر صفر می‌کنند، را نشان می‌دهند. نتایج زیر از این جدول قابل برداشت خواهد بود:

(۱) از آنجایی که هارمونیک‌های ولتاژ داخلی و جریان فاز فرد هستند، مجموع و اختلاف آنها همیشه برابر با یک مقدار زوج خواهد بود. بنابراین، بر اساس نتایج بدست آمده در قسمت قبل هارمونیک‌های گشتاور الکترومغناطیسی همیشه زوج خواهند بود.

(۲) برای تعداد فازهای زوج در ماشین‌های m فاز به جز ماشین ۲ فاز، شماره‌های هارمونیک گشتاور الکترومغناطیسی ضرایب صحیحی از m خواهند بود.

(۳) جفت هارمونیک‌هایی که شماره یکسانی دارند، همیشه مؤلفه‌های گشتاوری با متوسط غیر صفر تولید می‌کنند. هر چند که بعضی از این جفت هارمونیک‌ها با توجه به تعداد فازها در تولید ریپل گشتاور نیز دخالت می‌کنند. به طور مثال هارمونیک پنجم ولتاژ داخلی و جریان فاز، تولید ریپل گشتاور در ماشین پنج فاز خواهند کرد درحالی‌که در ماشین سه فاز این جفت هارمونیک‌ها نقشی در تولید ریپل گشتاور نخواهند داشت.

(۴) افزایش تعداد فازها لزوماً تعداد هارمونیک‌ها و یا دامنه آنها را در گشتاور الکترومغناطیسی کاهش نخواهد داد. برای مثال یک ماشین ۵ فاز یا یک ماشین ۷ فاز تعداد هارمونیک کمتری نسبت به ماشین ۸ فاز دارند. البته برای ماشین‌هایی با تعداد فازهای فرد، تعداد

مؤلفه‌های هارمونیک گشتاور الکترومغناطیسی در نتیجه افزایش تعداد فازها کاهش خواهد یافت. به هر حال بدون اطلاعات کافی درباره دامنه و زاویه فاز هارمونیک‌های ولتاژ داخلی و جریان فاز نمی‌توان به صورت دقیق درصد ریپل‌های گشتاور را مشخص نمود.

(۵) تعدادی از سیستم‌های چند فاز را می‌توان توسط یک سیستم چند فاز دیگر و معکوس آن، تولید کرد (برای مثال سیستم‌های ۴ فاز، ۶ فاز و ۱۰ فاز می‌توانند به ترتیب توسط سیستم‌های ۲ فاز، ۳ فاز و ۵ فاز ایجاد شوند). برای یک ماشین با تغذیه با این چنین سیستم‌هایی، هارمونیک‌های گشتاور الکترومغناطیسی با هارمونیک‌های گشتاور الکترومغناطیسی سیستم‌های سازنده یکسان خواهد بود. برای مثال، هارمونیک‌های گشتاور در ماشین ۳ فاز با ماشین ۶ فاز یکسان خواهد بود، درحالی که هارمونیک‌های ماشین ۸ فاز با ماشین ۴ فاز یکسان نخواهد بود زیرا یک سیستم ۸ فاز را نمی‌توان از یک سیستم ۴ فاز ایجاد کرد.

(۶) با دانستن یا حدس زدن دامنه شماره و دامنه هارمونیک‌های ولتاژ داخلی و جریان فاز، تعداد فازهای بهینه را می‌توان در فرایند طراحی بهینه به گونه‌ای تشخیص داد که هارمونیک‌های ولتاژ داخلی و جریان فاز با دامنه بیشتر در تولید ریپل گشتاور شرکت نکنند.

(۷) تعداد فازهای فرد باعث می‌شود که تعداد مؤلفه‌های هارمونیک کمتري از ولتاژ داخلی و جریان فاز در مقایسه با تعداد فازهای زوج در همان رنج در تولید ریپل گشتاور شرکت کنند. برای مثال ماشین‌های ۳ فاز، ۷ فاز و ۱۱ فاز به ترتیب تعداد هارمونیک‌های کمتري نسبت به ماشین‌های ۴ فاز، ۸ فاز و ۱۲ فاز دارند.

۵-۳-۳- تحلیل و بررسی تأثیر تعداد فازها بر روی ماشین مورد مطالعه

شکل موج ولتاژ داخلی ماشین مورد مطالعه با استفاده از روش اجزای محدود بدست آمده است. همان طور که قبلاً بیان شد، ولتاژ داخلی هر فاز از مشتق زمانی شار پیوندی در شرایط مدار باز بدست می‌آید. شکل موج ولتاژ داخلی فاز 'a' در شکل ۳-۵ نشان داده شده است. همان طور که از این شکل پیداست، شکل موج ولتاژ داخلی با شکل موج سینوسی خالص بسیار متفاوت می‌باشد. نتایج DFT^۱ شکل موج ولتاژ داخلی در جدول ۲-۵ نشان داده شده است. در این قسمت، جداول مربوط به آنالیز هارمونیک هر کدام از شکل موجها بر اساس سری فوریه تابع پریودیک $F(x)$ که به صورت زیر بیان می‌شود، مشخص می‌شوند:

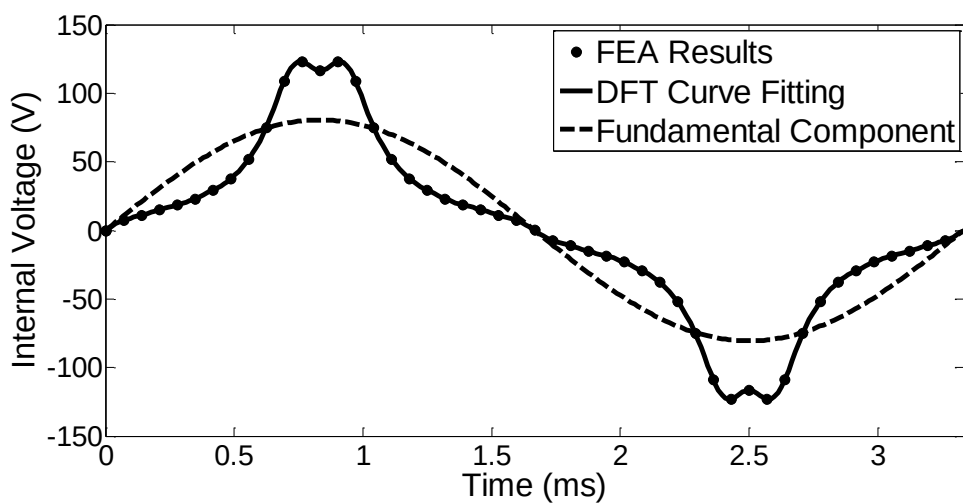
$$F(x) = \sum_{h=1}^{\infty} C_h \cos(hx + \varphi_h), \quad (27-5)$$

که در آن C_h و φ_h دامنه و زاویه فاز مؤلفه هارمونیک h ام تابع F هستند. جدول ۲-۵ نشان می‌دهد که ولتاژ داخلی فقط شامل هارمونیک‌های فرد است. تغییرات اندوکتانس خودی فاز 'a' بر حسب موقعیت روتور در شکل ۴-۵ نشان داده شده است. نتایج DFT شکل موج اندوکتانس خودی در جدول ۳-۵ ارائه شده که شامل یک مقدار متوسط و تنها هارمونیک‌های زوج می‌باشد. به خاطر داشته باشید که اندوکتانس متقابل بین فازها برابر با صفر است. بنابراین مقاومت‌ها، اندوکتانس‌های خودی سیم‌پیچی و ولتاژهای داخلی تنها پارامترها و متغیرهای مورد نیاز برای مدل و آنالیز کردن عملکرد یک ماشین TFPM قطب چنگالی هستند.

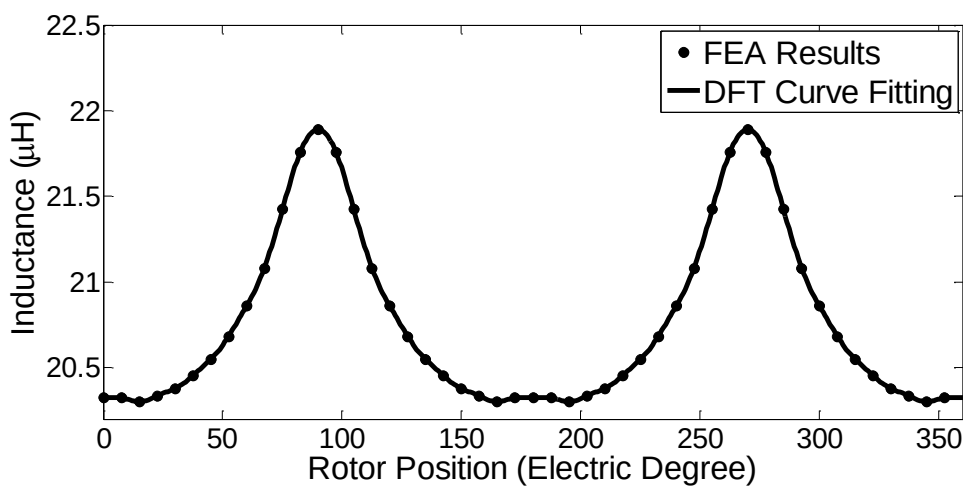
همان طور که در بخش ۴-۶ توضیح داده شد، با داشتن ولتاژ داخلی، اندوکتانس خودی و مقاومت همه فازها، جریان هر کدام از فازها توسط مدل دینامیکی-گذرایبی ماشین TFPM قطب چنگالی بدست می‌آید. جریان فاز 'a' در شرایط حالت دائمی در شکل ۵-۵ نشان و نتایج DFT مربوط به آن در جدول ۴-۵ ارائه شده است. از آنجاییکه ولتاژ داخلی تنها شامل هارمونیک‌های فرد و

¹ Discrete Furrier Transform

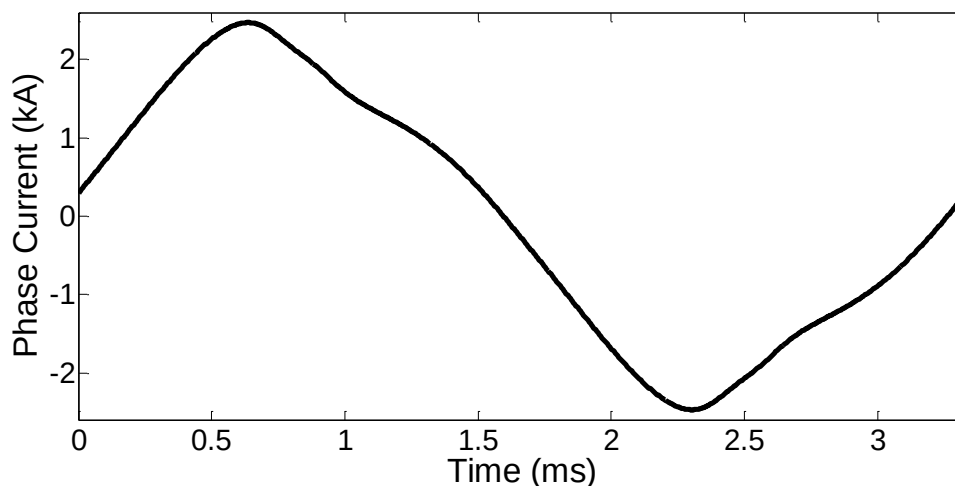
اندوکتانس تنها شامل هارمونیک‌های زوج است، همه مؤلفه‌های هارمونیکی جریان فرد هستند.



شکل ۵-۳: شکل موج ولتاژ داخلی و مقدار اصلی آن برای فاز 'a'



شکل ۵-۴: اندوکتانس خودی فاز 'a' بر حسب موقعیت روتور

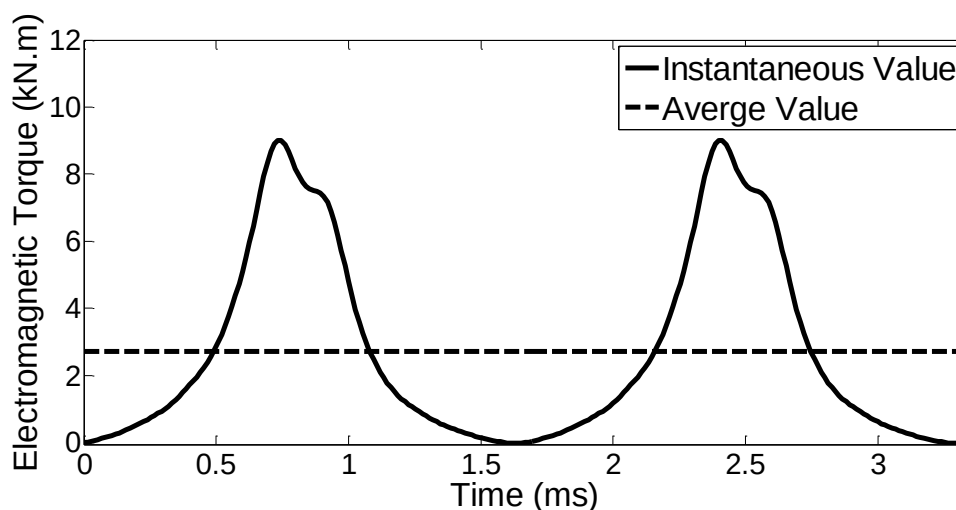


شکل ۵-۵: شکل موج جریان برای فاز 'a'

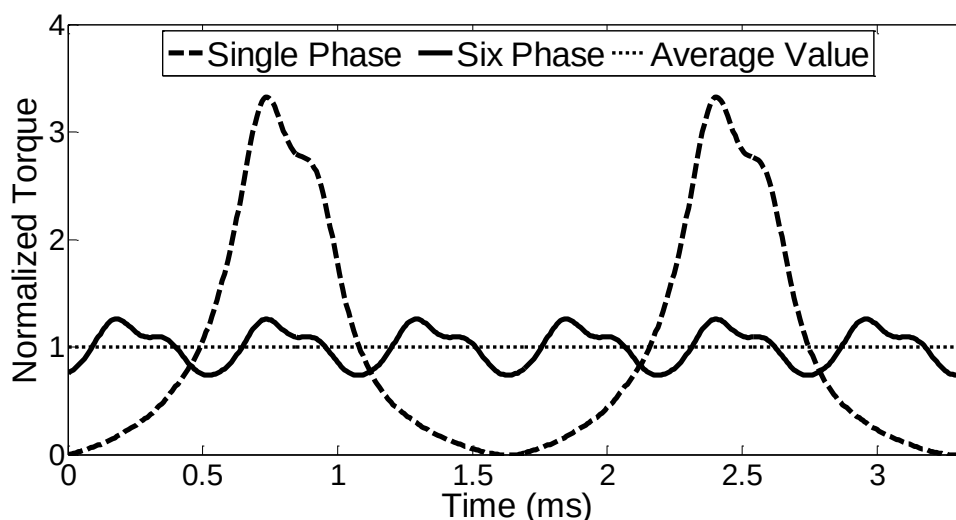
جدول ۴-۵: هارمونیک‌های جریان برای فاز 'a'			جدول ۳-۵: هارمونیک‌های اندوکتانس خودی فاز 'a'			جدول ۲-۵: هارمونیک‌های ولتاژ داخلی برای فاز 'a'		
شماره هارمونیک	دامنه هارمونیک (A)	فاز هارمونیک (deg)	شماره هارمونیک	دامنه هارمونیک (mH)	فاز هارمونیک (deg)	شماره هارمونیک	دامنه هارمونیک (V)	فاز هارمونیک (deg)
۱	۲۱۹۲/۷۲	-۷۷/۳۸	۰	۲۰/۸	۰	۱	۸۰/۵۴	-۹۰
۳	۲۵۱/۷۸	-۱۷۱/۱۷	۲	۰/۶۶۱	۱۸۰	۳	۲۹/۷۰	۹۰
۵	۷۰/۹۷	۱۱/۳۲	۴	۰/۲۷۰	۰	۵	۱۴/۵۸	-۹۰
۷	۱۰/۲۷	-۱۳۵/۸۰	۶	۰/۱۰۴	-۱۸۰	۷	۲/۷۰	۹۰
۹	۵/۱۷	۱۲۷/۳۰	۸	۰/۰۶۱۶	۰	۹	۰/۷۱	-۹۰
۱۱	۷/۵۰	-۱۸/۳۷	۱۰	۰/۰۱۹۵	-۱۸۰	۱۱	۲/۹۳	۹۰
۱۳	۵/۰۴	۱۶۶/۱۱	۱۲	۰/۰۱۱۸	۰	۱۳	۲/۴۴	-۹۰
۱۵	۳/۶۰	-۶/۳۸	۱۴	۰/۰۰۱۷۷	۰	۱۵	۲/۱۳	۹۰
۱۷	۱/۷۷	۱۷۸/۶۱	۱۶	۰/۰۰۲۶۳	۱۸۰	۱۷	۱/۲۴	-۹۰
۱۹	۱/۳۱	-۰/۶۴	۱۸	۰/۰۰۳۶۹	۰	۱۹	۱/۰۶	۹۰
۲۱	۰/۲۲	۱۳۴/۴۸	۲۰	۰/۰۰۲۱۰	-۱۸۰	۲۱	۰/۲۷	-۹۰
۲۳	۰/۲۰	-۵۹/۵۹	۲۲	۰/۰۰۳۹۷	۱۸۰	۲۳	۰/۱۰	۹۰
۲۵	۰/۰۱	-۹۶/۶۷	۲۴	۰/۰۰۱۴۴	۱۸۰	۲۵	۰	۰

با محاسبه گشتاور الکترومغناطیسی لحظه‌ای با استفاده از معادله (۵-۵)، شکل ۵-۶ برای فاز 'a' بدست می‌آید. برای مقایسه ریپل گشتاور ماشین تک فاز با ماشین ۶ فاز، گشتاور لحظه‌ای هر دو ماشین به نسبت مقدار متوسط آنها نرمالیزه شده که در شکل ۵-۷ نمایش داده شده است. از این شکل کاملاً مشخص است که ریپل گشتاور ماشین ۶ فاز همان طور که انتظار می‌رفت بسیار کمتر از ماشین تک فاز می‌باشد. در جدول ۵-۵ نتایج DFT مربوط به گشتاور الکترو مغناطیسی برای هر دو

ماشین تک فاز و ۶ فاز ارائه شده است. این جدول نشان می‌دهد که همه هارمونیک‌های گشتاور الکترومغناطیسی زوج می‌باشند که این نیز به دلیل آن است که همه هارمونیک‌های ولتاژ داخلی و جریان فاز فرد هستند. همچنین با توجه به جدول ۵-۵ و توضیحات داده شده در بخش قبل، شماره هارمونیک‌های گشتاور الکترومغناطیسی برای ماشین تک فاز و ماشین ۶ فاز به ترتیب ضرابی از ۲ و ۶ می‌باشند.



شکل ۵-۶: تغییرات گشتاور الکترومغناطیسی بر حسب زمان برای فاز 'a'



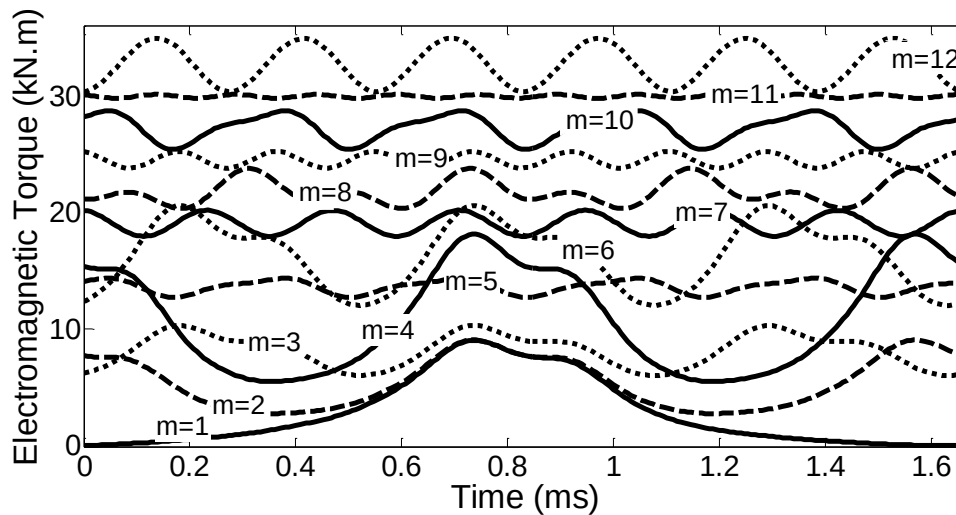
شکل ۵-۷: گشتاور الکترومغناطیسی نرمالیزه شده برای ماشین‌های تک فاز و ۶ فاز

جدول ۵-۵: مؤلفه‌های هارمونیک گشتاور الکترومغناطیسی برای هر دو ماشین تک فاز و ۶ فاز

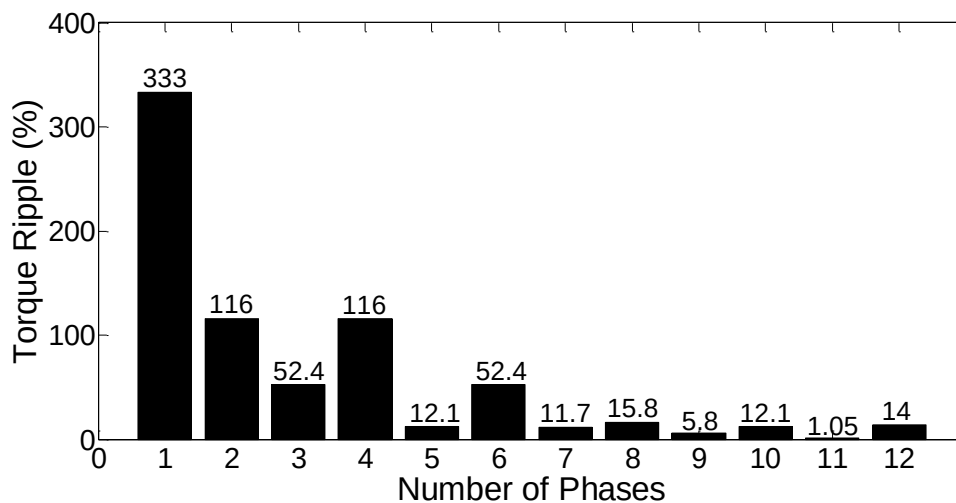
مؤلفه هارمونیک برای ماشین تک فاز		مؤلفه هارمونیک برای ماشین ۶ فاز		
شماره هارمونیک	دامنه هارمونیک (N.m)	فاز هارمونیک (deg)	دامنه هارمونیک (N.m)	فاز هارمونیک (deg)
۰	۲۷۲۱/۱۹	۰/۰۰	۱۶۳۲۷/۱۴	۰
۲	۳۷۴۹/۳۸	-۱۶۹/۵۴	۰	۰
۴	۱۵۲۵/۱۸	۱۹/۷۸	۰	۰
۶	۶۲۴/۳۶	-۱۵۰/۲۶	۳۷۵۵/۱۶	-۱۵۰/۲۶
۸	۱۳۷/۴۶	۷۳/۵۱	۰	۰
۱۰	۱۴۵/۳۶	-۱۷/۱۹	۰	۰
۱۲	۱۸۹/۹۱	-۱۷۶/۷۰	۱۱۴۲/۱۷	-۱۷۶/۷۰
۱۴	۱۵۹/۰۰	۸/۸۳	۰	۰
۱۶	۱۱۶/۸۵	-۱۶۶/۷۰	۰	۰
۱۸	۷۸/۹۷	۱۳/۷۶	۴۷۴/۹۸	۱۳/۷۶
۲۰	۴۷/۱۸	-۱۵۹/۲۱	۰	۰
۲۲	۱۴/۲۸	۳۴/۷۴	۰	۰
۲۴	۴/۲۵	-۱۳۳/۱۳	۲۵/۵۶	-۱۳۳/۱۳
۲۶	۰/۴۶	۱۴۰/۹۷	۰	۰
۲۸	۰/۴۶	۶۶/۶۲	۰	۰
۳۰	۰/۴۸	-۱۰۲/۵۱	۲/۸۸	-۱۰۲/۵۱
۳۲	۰/۳۱	۷۹/۶۰	۰	۰
۳۴	۰/۱۹	-۹۹/۶۸	۰	۰
۳۶	۰/۰۹	۷۹/۳۰	۰/۵۴	۷۹/۳۰
۳۸	۰/۰۴	-۱۰۳/۳۵	۰	۰

همان طور که قبلاً بیان شد، یکی از مهمترین ویژگی‌های ماشین TFPM قطب چنگالی آن است که یک ساختار چند فاز را می‌توان به سادگی از کنار هم قرار دادن تعداد مشخصی از ماشین تک فاز، ساخت. با توجه به شکل ۵-۶ و شکل ۵-۷، مشخص شد که ریپل گشتاور ماشین تک فاز مورد مطالعه نسبت به مقدار متوسط آن بیشتر از ۳۰٪ است، در حالی که با کنار هم قرار دادن ۶ ماشین تک فاز و ساخت یک ماشین ۶ فاز ریپل گشتاور به حدود ۵۰٪ مقدار متوسط گشتاور رسید. از این رو، با صرف نظر کردن از مقدار متوسط توان یا ریپل گشتاور خروجی، می‌توان این نکته را دریافت که با بهینه انتخاب کردن تعداد فازها می‌توان ریپل گشتاور الکترومغناطیسی را به کمترین مقدار خود رساند. شکل ۵-۸ تغییرات گشتاور الکترومغناطیسی حالت دائم برای تعدادی از ماشین‌های چند فاز TFPM قطب چنگالی، که همگی از کنار هم قرار دادن تعداد مشخصی ماشین تک فاز مورد مطالعه تشکیل شده‌اند، را نشان می‌دهد. از این شکل واضح و آشکار است که گشتاور متوسط با افزایش تعداد

فازها افزایش یافته است. درصد ریپل گشتاور الکترومغناطیسی برای ماشین‌های TFPM قطب چنگالی با تعداد فازهای مختلف جهت مقایسه بهتر در شکل ۵-۹ نمایش داده شده است. بر اساس این شکل مقدار بهینه تعداد فازها جهت مینیمم کردن ریپل گشتاور برابر با مقدار ۱۱ خواهد بود. اما این نتیجه یک نتیجه کلی برای همه ماشین‌های TFPM قطب چنگالی نخواهد بود. زیرا درصد ریپل علاوه بر تعداد فازها به مؤلفه‌های هارمونیک ولتاژ داخلی و جریان فاز نیز بستگی دارد که آنها نیز خود به طراحی هر فاز بستگی دارند. جالب است که به این نکته توجه شود که بر اساس مطالب گفته شده در بخش قبل و همان طور که در این شکل مشخص است، ریپل گشتاور برای ماشین ۲ فاز دقیقاً برابر با ماشین ۴ فاز و برای ماشین ۳ فاز دقیقاً برابر با ماشین ۶ فاز است و به همین ترتیب برای حالت‌های دیگر (ماشین‌های ۵ فاز و ۱۰ فاز) نیز این موضوع صادق خواهد بود. از شکل ۵-۹ می‌توان دریافت که درصد ریپل گشتاور برای ماشین‌های ۵ فاز و ۷ فاز تقریباً یکسان است. با نادیده گرفتن هارمونیک‌های جریان فاز و در نظر گرفتن همه هارمونیک‌های ولتاژ داخلی تا هارمونیک ۲۵ام، جدول ۵-۱ و جدول ۵-۲ نشان می‌دهند که برای ماشین ۵ فاز، هارمونیک‌های ۹، ۱۰، ۱۹ و ۲۱ ولتاژ داخلی در تولید ریپل گشتاور نقش دارند. در حالی که برای ماشین ۷ فاز، تنها هارمونیک‌های ۱۳ و ۱۵ ولتاژ داخلی باعث ایجاد ریپل گشتاور می‌شوند. هر چند که تعداد هارمونیک‌های ولتاژ داخلی که در تولید ریپل گشتاور برای ماشین ۵ فاز شرکت می‌کنند بیشتر از ماشین ۷ فاز است، از آنجایی که دامنه هارمونیک‌های ۹، ۱۹ و ۲۱ در ماشین ۵ فاز کمتر از دامنه هارمونیک‌های ۱۳ و ۱۵ در ماشین ۷ فاز می‌باشد، درصد ریپل گشتاور این دو ماشین تقریباً نزدیک به هم است. این نتیجه نشان می‌دهد که افزایش تعداد فازها لزوماً درصد ریپل گشتاور را کاهش نخواهد داد.



شکل ۵-۸: گشتاور الکترومغناطیسی برای ماشین‌های TFPM قطب چنگالی با تعداد فازهای مختلف



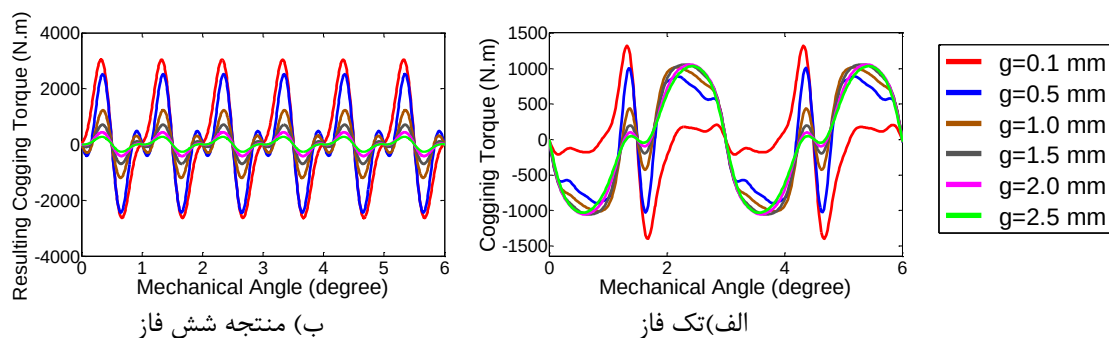
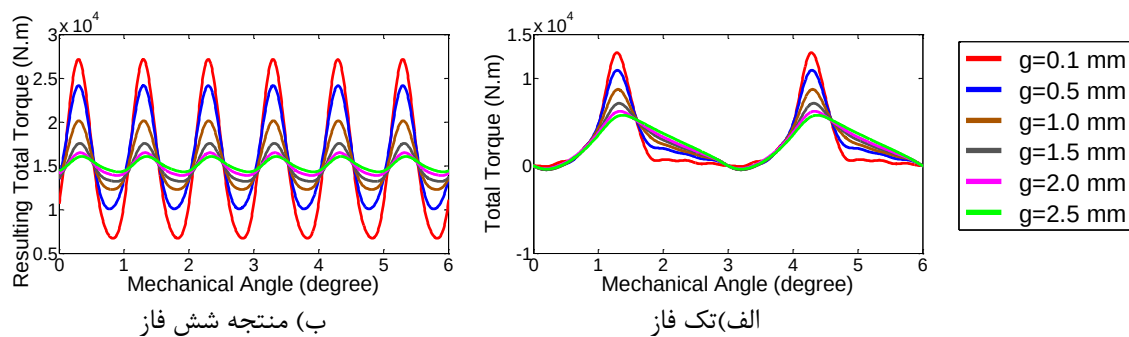
شکل ۵-۹: درصد ریبیل گشتاور الکترومغناطیسی برای ماشین‌های TFPM قطب چنگالی با تعداد فازهای مختلف

۵-۴- بررسی تأثیر عوامل ساختاری بر روی گشتاور خروجی

۵-۴-۱- تأثیر فاصله هوایی

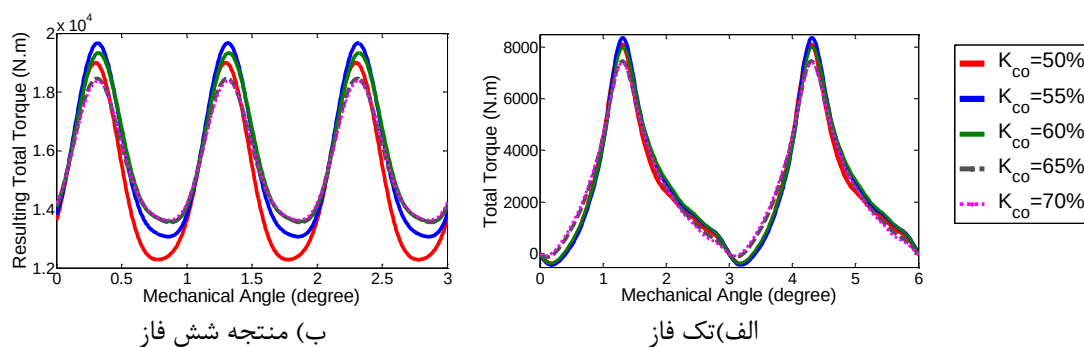
در بخش‌های ۳-۴-۱ و ۴-۷-۱ تأثیر فاصله هوایی بر روی ولتاژ داخلی و اندوکتانس سیم پیچ آرمیچر بر روی ماشین TFPM مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. معلوم شد که کاهش طول فاصله هوایی منجر به (۱) افزایش دامنه ولتاژ داخلی و فاصله گرفتن شکل موج ولتاژ داخلی از موج سینوسی و

(۲) بزرگتر شدن اندوکتانس سیم پیچ آرمیچر و افزایش دامنه تغییرات آن می‌شود. شکل موج گشتاور خروجی به ازای فاصله هوایی‌های مختلف در شکل ۵-۱۰ نشان داده شده است. شکل ۵-۱۰-الف و شکل ۵-۱۰-ب به ترتیب، شکل موج گشتاور خروجی یک فاز و شکل موج منتجه شش فاز از ماشین TFPM قطب چنگالی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همان طور که انتظار می‌رود از این شکل مشخص است که با افزایش طول فاصله هوایی ریپل گشتاور خروجی کاهش چشمگیری داشته است. به طوری که ریپل گشتاور برای ماشین با طول فاصله هوایی ۰/۱ میلی متر برابر با ۱۳۷/۷٪ است در حالی که این مقدار برای طول فاصله هوایی ۲/۵ میلی متر ۱۱/۷٪ می‌باشد. در شکل ۵-۱۱ تأثیر طول فاصله هوایی را بر روی گشتاور دندانه‌ای نشان می‌دهد. در اینجا نیز شکل موج گشتاور دندانه‌ای یک فاز در شکل ۵-۱۱-الف و شکل موج گشتاور دندانه‌ای منتجه شش فاز در شکل ۵-۱۱-ب مشخص شده است. گشتاور دندانه‌ای منتجه شش فاز از مقدار ۶۵۸۱/۵ نیوتن متر برای طول فاصله هوایی ۰/۱ میلی متر به میزان ۵۴۳/۹ نیوتن متر برای طول فاصله هوایی ۲/۵ میلی متر کاهش یافته است.

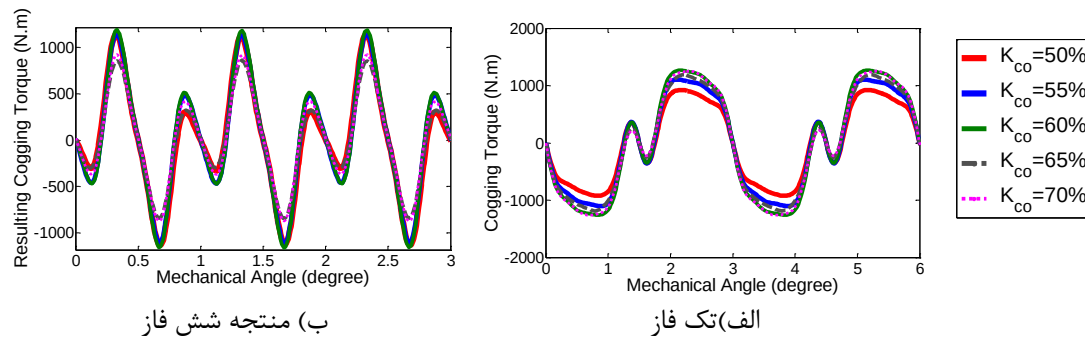


۵-۴-۲- تأثیر درصد پوشش روتور توسط دندانه استاتور

همان طور که قبلاً در بخش‌های ۲-۴-۳ و ۲-۷-۴ اشاره شد، این ضریب با K_{co} نشان داده می‌شود و بیانگر نسبت سطح مجاور به فاصله هوایی دندانه استاتور به سطح مجاور به فاصله هوایی متمرکزکننده شار روتور می‌باشد. در فصل‌های قبل تأثیر این ضریب بر روی ولتاژ داخلی و اندوکتانس سیم پیچ آرمیچر بر روی ماشین TFPM مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد که با افزایش ضریب K_{co} (۱) دامنه و مقدار مؤثر ولتاژ داخلی تقریباً افزایش پیدا می‌کند و (۲) متوسط و دامنه تغییرات اندوکتانس افزایش می‌یابد. شکل موج گشتاور خروجی به ازای K_{co} های مختلف در شکل ۱۲-۵ نشان داده شده است. شکل ۱۲-۵-الف و شکل ۱۲-۵-ب به ترتیب، شکل موج گشتاور خروجی یک فاز و شکل موج منته‌شش فاز از ماشین TFPM قطب چنگالی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان فهمید که با افزایش ضریب K_{co} ریپل گشتاور خروجی کاهش یافته و از مقدار ۴۷/۲٪ برای ماشین با $K_{co} = 50\%$ به مقدار ۳۱/۸٪ برای ماشین با $K_{co} = 75\%$ رسیده است. شکل ۱۳-۵ تأثیر K_{co} های مختلف را بر روی گشتاور دندانه‌ای نشان می‌دهد. در اینجا نیز شکل موج گشتاور دندانه‌ای یک فاز در شکل ۱۳-۵-الف و شکل موج گشتاور دندانه‌ای منته‌شش فاز در شکل ۱۳-۵-ب مشخص شده است. گشتاور دندانه‌ای منته‌شش فاز از مقدار ۲۲۶۴/۸ نیوتن متر برای ماشین با $K_{co} = 50\%$ به مقدار ۱۷۹۴/۹ نیوتن متر برای ماشین با $K_{co} = 75\%$ کاهش پیدا کرده است.



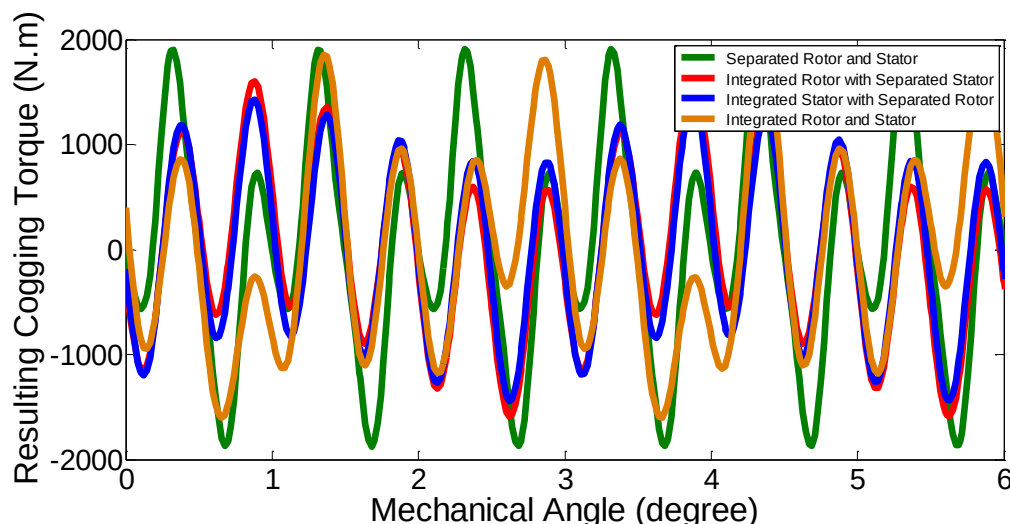
شکل ۱۲-۵: شکل موج گشتاور خروجی به ازای K_{co} های مختلف



شکل ۵-۱۳: شکل موج گشتاور دندانه‌ای به ازای K_{co} های مختلف

۵-۴-۳- تأثیر نحوه قرارگیری فازها کنار هم

همان طور که قبلاً بیان شد فازها را می‌توان به طرق مختلف در کنار هم قرار داد. شکل ۵-۱۴ تأثیر نحوه قرارگیری فازها کنار هم را بر روی گشتاور دندانه‌ای نشان می‌دهد. همان طور که از این شکل مشخص است گشتاور دندانه‌ای در حالتی که استاتورها و روتورهای فازها مستقل هستند با حالتی که استاتورها و روتورهای فازها یکپارچه هستند تقریباً یکسان است. همچنین در دو حالت دیگر (استاتورهای فازها مستقل و روتورهای فازها یکپارچه و یا بالعکس) گشتاور دندانه‌ای از دو حالت دیگر کمتر خواهد شد.



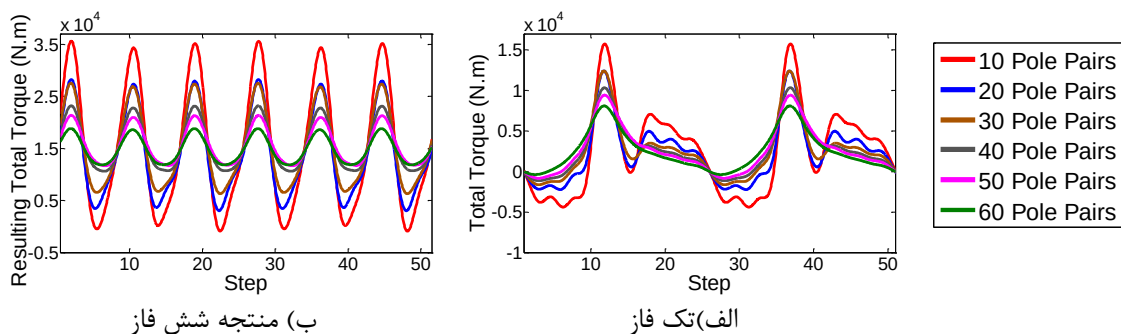
شکل ۵-۱۴: تأثیر نحوه قرارگیری فازها کنار هم بر روی شکل موج گشتاور دندانه‌ای منتجه شش فاز

۵-۴-۴- تأثیر تعداد قطبها

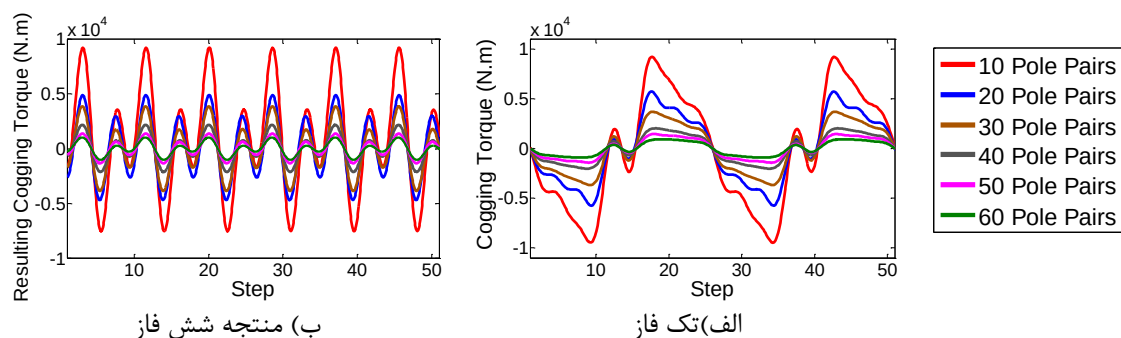
مشابه ولتاژ داخلی و اندوکتانس سیم پیچ آرمیچر در فصلهای سوم و چهارم، تأثیر تعداد قطبها در گشتاور خروجی و گشتاور دندانه‌ای در دو حالت سرعت ثابت و فرکانس ثابت بررسی شده است. در بخشهای ۳-۴-۴ و ۴-۷-۳ اثر تغییر تعداد قطبهای ماشین بر روی ولتاژ داخلی و اندوکتانس سیم پیچ آرمیچر در سرعت و فرکانس ثابت بر روی ماشین TFPM قطب چنگالی مورد مطالعه تحلیل شد. مشخص شد که با کاهش تعداد قطبها:

- در سرعت ثابت، ولتاژ داخلی نوک تیزتر شده که به معنی فاصله گرفتن ولتاژ داخلی از شکل موج سینوسی خالص است و همچنین مقدار متوسط اندوکتانس افزایش پیدا می‌کند.
- در فرکانس ثابت، ولتاژ داخلی نوک تیزتر شده که به معنی فاصله گرفتن ولتاژ داخلی از شکل موج سینوسی خالص است و همچنین مقدار متوسط اندوکتانس کاهش پیدا می‌کند.

شکل موج گشتاور خروجی به ازای تعداد قطبهای مختلف در سرعت ثابت در شکل ۵-۱۵ نشان داده شده است. شکل ۵-۱۵-الف و شکل ۵-۱۵-ب به ترتیب، شکل موج گشتاور خروجی یک فاز و شکل موج منته‌شش فاز از ماشین TFPM قطب چنگالی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. از این شکل مشخص است که با افزایش تعداد قطبهای در سرعت ثابت، ریپل گشتاور خروجی کاهش می‌یابد به طوری که ریپل گشتاور برای ماشین با ۱۰ جفت قطب برابر با ۲۸۱/۸٪ است در حالی که این مقدار برای ماشین با ۶۰ جفت قطب برابر با ۵۴/۷٪ می‌باشد. شکل ۵-۱۶ تأثیر تعداد قطبهای در سرعت ثابت را بر روی گشتاور دندانه‌ای نشان می‌دهد. شکل موج گشتاور دندانه‌ای یک فاز در شکل ۵-۱۶-الف و شکل موج گشتاور دندانه‌ای منته‌شش فاز در شکل ۵-۱۶-ب مشخص شده است. گشتاور دندانه‌ای منته‌شش فاز از مقدار ۲۰۱۷۴ نیوتن متر برای ماشین با ۱۰ جفت قطب به میزان ۲۲۶۴/۹ نیوتن متر برای ماشین با ۶۰ جفت قطب کاهش یافته است.



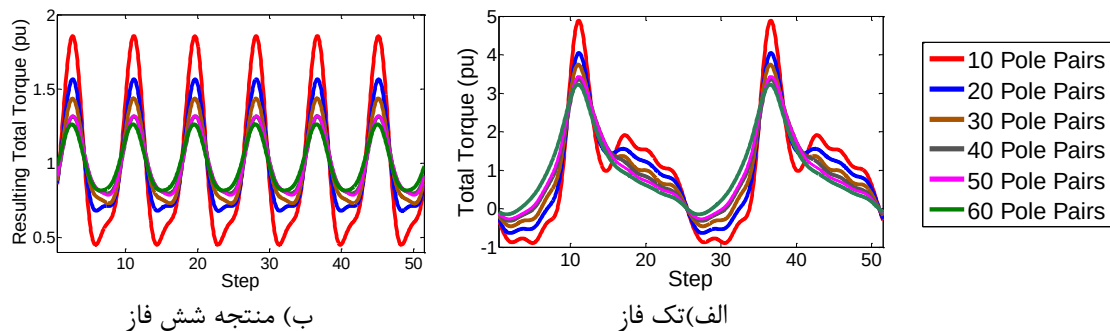
شکل ۵-۱۵: شکل موج گشتاور خروجی به ازای تعداد قطب‌های مختلف در سرعت ثابت



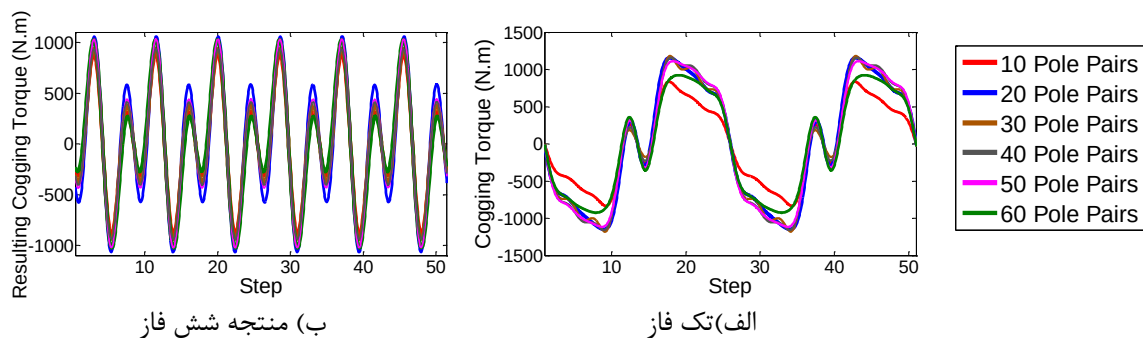
شکل ۵-۱۶: شکل موج گشتاور دندانه‌ای به ازای تعداد قطب‌های مختلف در سرعت ثابت

شکل موج گشتاور خروجی به ازای تعداد قطب‌های مختلف در فرکانس ثابت در شکل ۵-۱۷ نشان داده شده است. شکل ۵-۱۷-الف و شکل ۵-۱۷-ب به ترتیب، شکل موج گشتاور خروجی یک فاز و شکل موج منته‌ج شش فاز را نشان می‌دهد. در اینجا باید به این نکته توجه داشت که از آنجا که در این حالت فرکانس ثابت بوده و تعداد قطب‌ها تغییر کرده است و با توجه به اینکه در فرایند طراحی مقدار توان برای همه حالات ثابت و برابر با ۵۰۰ کیلو وات در نظر گرفته شده است، بنابراین اندازه گشتاور خروجی برای تعداد قطب‌های مختلف در فرکانس ثابت یکسان نخواهد شد. از اینرو برای مقایسه بهتر بین حالات مختلف در این قسمت مقادیر به صورت پریونیت بیان شده‌اند. در شکل ۵-۱۷ مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد قطب‌های در فرکانس ثابت، رپیل گشتاور خروجی کاهش می‌یابد به طوری که رپیل گشتاور از ۱/۵۷ پریونیت برای ماشین با ۱۰ جفت قطب به مقدار ۰/۴۷ پریونیت برای ماشین با ۶۰ جفت قطب می‌رسد. شکل ۵-۱۸ تأثیر تعداد قطب‌های در فرکانس ثابت را بر روی گشتاور دندانه‌ای نشان می‌دهد. شکل ۵-۱۸-الف و شکل ۵-۱۸-ب شکل موج

گشتاور دندانه‌ای منتهی به شش فاز در شکل ۵-۱۸-ب مشخص شده است. همان طور که از این شکل مشخص است تعداد قطب‌ها در فرکانس ثابت، تأثیر زیادی روی گشتاور دندانه‌ای نداشته و در همه حالت‌ها گشتاور دندانه‌ای حدوداً ۲۲۰۰ نیوتن متر می‌باشد.



شکل ۵-۱۷: شکل موج گشتاور خروجی به ازای تعداد قطب‌های مختلف در فرکانس ثابت

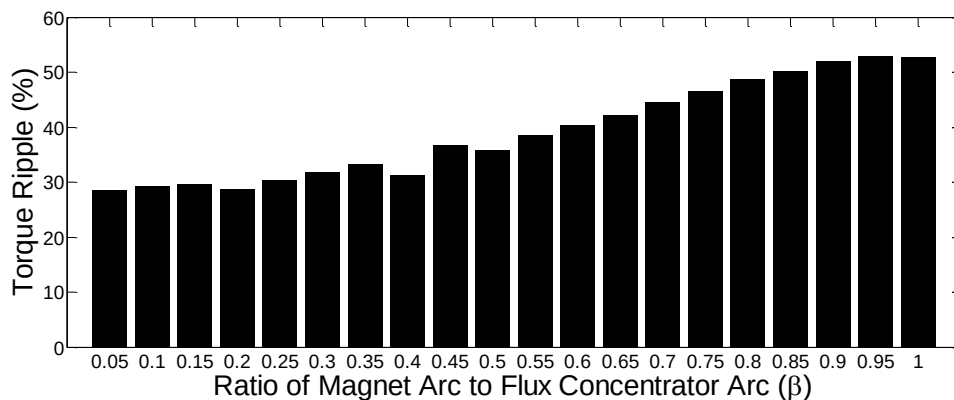


شکل ۵-۱۸: شکل موج گشتاور دندانه‌ای به ازای تعداد قطب‌های مختلف در فرکانس ثابت

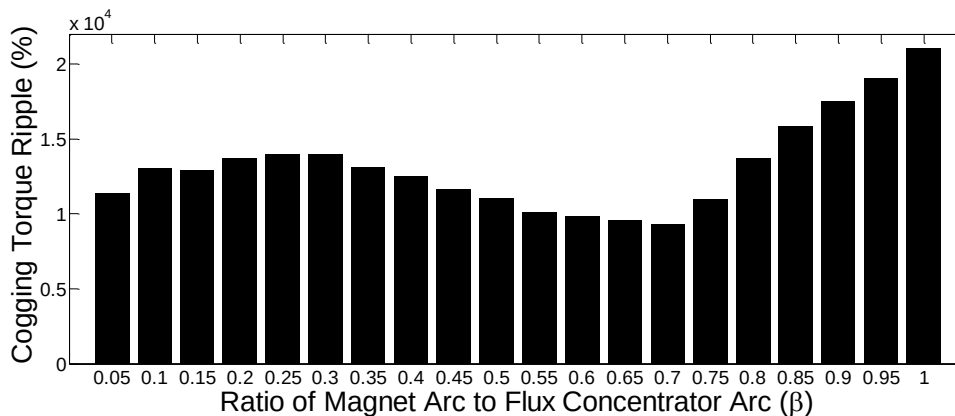
۵-۴-۵- تأثیر شکل کفشک قطب استاتور

همان طور که در فصل دوم دیده شد با تغییر ضریب β می‌توان شکل سطح مجاور به فاصله هوایی دندانه استاتور را به صورت دلخواه تغییر داد. در شکل ۵-۱۹ جهت مقایسه بهتر تأثیر ضریب β بر روی رپل گشتاور، درصد رپل گشتاور الکترومغناطیسی برای ماشین TFPM قطب چنگالی مورد مطالعه، به ازای شکل‌های مختلف کفشک قطب نمایش داده شده است. بر اساس این شکل مقدار بهینه برای ضریب β جهت مینیم کردن رپل گشتاور برابر با مقدار ۱ خواهد بود. همچنین در شکل ۵-۲۰ تأثیر این ضریب بر روی رپل گشتاور دندانه‌ای نشان داده شده است. با توجه به شکل جهت مینیم کردن رپل گشتاور دندانه‌ای باید ضریب β برای ماشین مورد نظر در حدود ۰/۷ انتخاب

شود.



شکل ۵-۱۹: درصد ریبیل گشتاور الکترومغناطیسی به ازای شکل‌های مختلف کفشک قطب

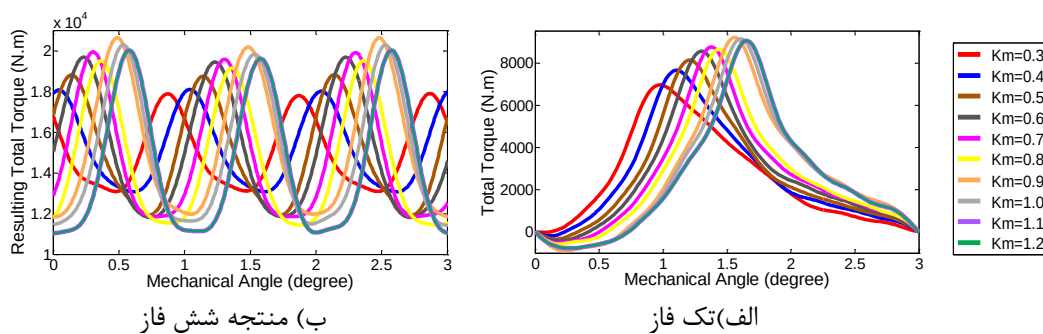


شکل ۵-۲۰: درصد ریبیل گشتاور دندانه‌ای به ازای شکل‌های مختلف کفشک قطب

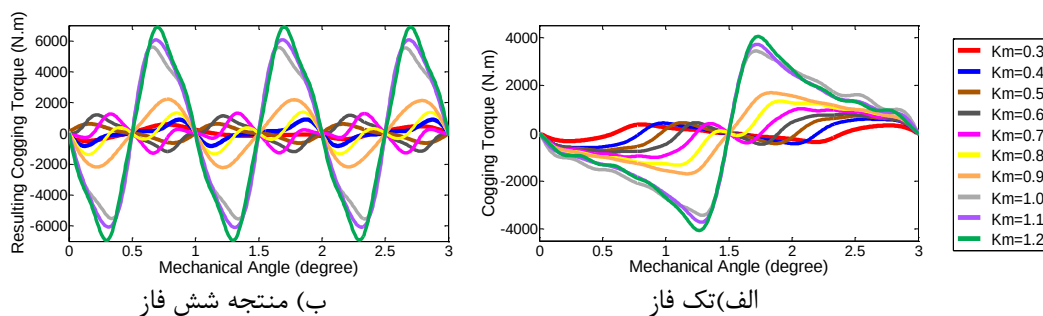
۵-۴-۶- تأثیر نسبت کمان آهنربای دائم به کمان متمرکزکننده شار روتور

همان طور که قبلاً اشاره شد، یکی از مهمترین پارامترهای هندسی مؤثر در عملکرد ماشین TFPM قطب چنگالی، نسبت کمان آهنربای دائم به کمان متمرکزکننده شار روتور است که با K_m نشان داده می‌شود. تأثیر این نسبت بر روی ولتاژ داخلی و اندوکتانس سیم پیچ آرمیچر به ترتیب در بخش‌های ۳-۴-۶ و ۴-۷-۵ بررسی و تحلیل شد. شکل موج گشتاور خروجی به ازای K_m های مختلف در شکل ۵-۲۱ نشان داده شده است. شکل ۵-۲۱-الف و شکل ۵-۲۱-ب به ترتیب، شکل موج گشتاور خروجی یک فاز و شکل موج منته‌ج شش فاز از ماشین TFPM قطب چنگالی مورد مطالعه را نشان

می‌دهد. همان طور که در شکل ۵-۲۱ مشاهده می‌شود که با کاهش نسبت K_m ریپل گشتاور خروجی شروع به کاهش خواهد کرد. ریپل گشتاور برای ماشین با K_m برابر با $۱/۲$ ، $۳/۷۵\%$ است در صورتی که این مقدار برای ماشین با K_m برابر با $۰/۳$ ، به مقدار $۹/۴۱\%$ می‌رسد. در شکل ۵-۲۲ تأثیر نسبت K_m را بر روی گشتاور دندانه‌ای نشان می‌دهد. در اینجا نیز شکل موج گشتاور دندانه‌ای یک فاز در شکل ۵-۲۲-الف و شکل موج گشتاور دندانه‌ای منته‌ج شش فاز در شکل ۵-۲۲-ب مشخص شده است. گشتاور دندانه‌ای منته‌ج شش فاز از مقدار $۳/۱۳۹۸۶$ نیوتن متر برای ماشین با K_m برابر با $۰/۳$ به میزان $۷/۲۱۰۸$ نیوتن متر برای ماشین با K_m برابر با $۱/۲$ کاهش یافته است.



شکل ۵-۲۱: شکل موج گشتاور خروجی به ازای K_m های مختلف

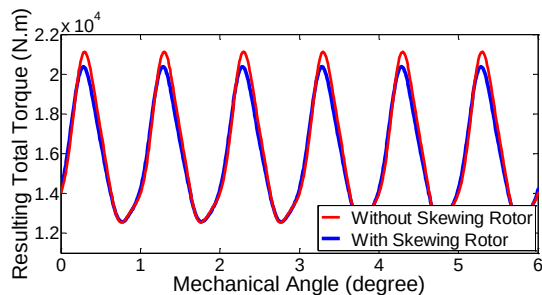


شکل ۵-۲۲: شکل موج گشتاور دندانه‌ای به ازای K_m های مختلف

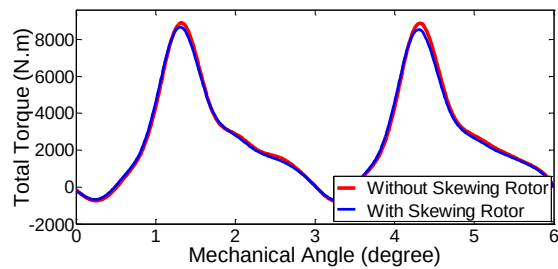
۵-۴-۷- تأثیر مستقیم یا مورب بودن قطب‌های روتور

همان طور که قبلاً اشاره شد، یکی از مهمترین روش‌ها جهت به حداقل رساندن اندازه گشتاور دندانه‌ای در ماشین TFPM قطب چنگالی، روش مورب ساختن روتور می‌باشد. در اینجا به منظور بررسی اثر روش مورب کردن در کاهش گشتاور دندانه‌ای ماشین مورد مطالعه، دامنه گشتاور دندانه‌ای

و گشتاور خروجی در نظر گرفته می‌شود. در فصل‌های قبل نشان داده شد که مستقیم یا مورب ساختن روتور (متمرکزکننده‌های شار و آهنرباها) در شکل موج ولتاژ داخلی عملاً بی تأثیر بوده و تأثیر آن بر روی تغییرات اندوکتانس ناچیز است. شکل موج گشتاور خروجی برای دو حالت روتور مستقیم و روتور مورب در شکل ۲۳-۵ نشان داده شده است. شکل ۲۳-۵ الف و شکل ۲۳-۵ ب به ترتیب، شکل موج گشتاور خروجی یک فاز و شکل موج منته‌شش فاز از ماشین TFPM قطب چنگالی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. ریپل گشتاور برای ماشین با روتور مستقیم ۵۳/۴٪ است در حالی که این مقدار برای ماشین با روتور مورب به مقدار ۴۹/۱٪ رسیده است که میزان ۴/۳ درصد کاهش در ریپل گشتاور خروجی را نشان می‌دهد. در شکل ۲۴-۵ تأثیر مورب ساختن قطب‌های روتور بر روی گشتاور دندانه‌ای نشان داده شده است. شکل موج‌های گشتاور دندانه‌ای یک فاز در شکل ۲۴-۵ الف و منته‌شش فاز در شکل ۲۴-۵ ب مشخص شده‌اند. گشتاور دندانه‌ای منته‌شش فاز برای ماشین با روتور مستقیم ۳۹۶۷/۵ نیوتن متر و برای ماشین با روتور مورب ۲۵۲۲/۱ نیوتن متر است که نشان می‌دهد گشتاور دندانه‌ای به میزان ۳۶/۴٪ کاهش یافته است.

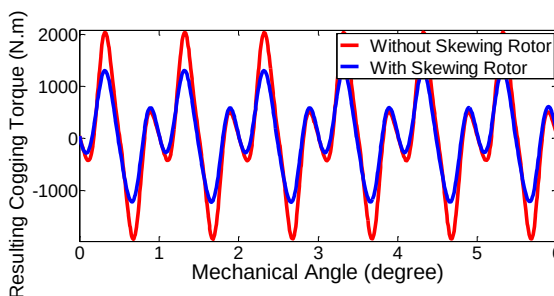


ب) منته‌شش فاز

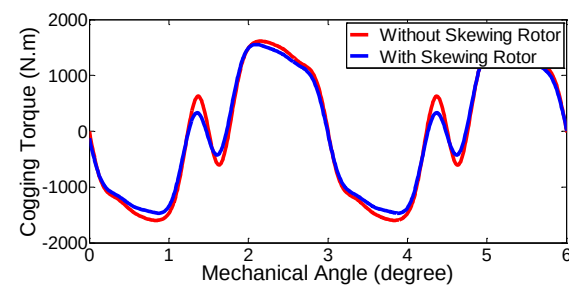


الف) تک فاز

شکل ۲۳-۵: تأثیر مورب ساختن قطب‌های روتور بر روی شکل موج گشتاور خروجی



ب) منته‌شش فاز

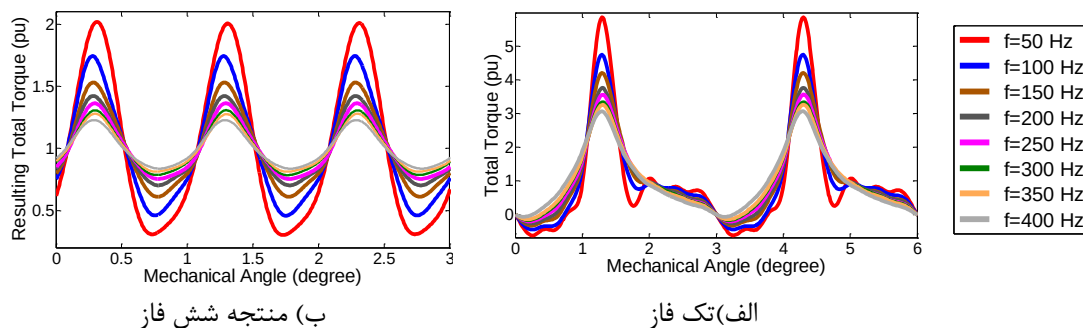


الف) تک فاز

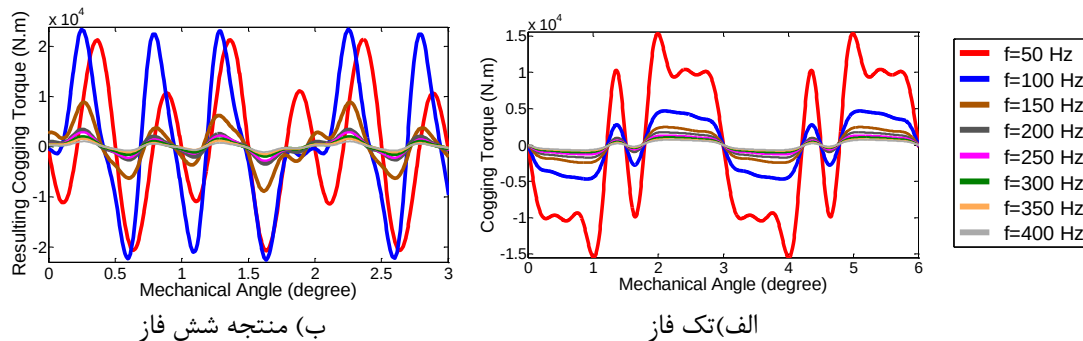
شکل ۲۴-۵: تأثیر مورب ساختن قطب‌های روتور بر روی شکل موج گشتاور دندانه‌ای

۵-۵- عوامل مؤثر دیگر در گشتاور خروجی

همان طور که قبلاً دیدیم، علاوه بر عوامل ساختاری فوق فرکانس داده شده در الگوریتم طراحی نیز به دلیل تغییر ابعاد هندسی طراحی شده توسط الگوریتم به ازای فرکانس‌های مختلف، در شکل موج ولتاژ داخلی و اندوکتانس مؤثر است. نشان داده شد که با افزایش فرکانس در الگوریتم طراحی ولتاژ داخلی به شکل موج سینوسی نزدیکتر شده و متوسط اندوکتانس کاهش می‌یابد اما تغییر محسوسی در دامنه تغییرات اندوکتانس ایجاد نمی‌شود.



شکل ۵-۲۵: شکل موج گشتاور خروجی به ازای فرکانس‌های مختلف



شکل ۵-۲۶: شکل موج گشتاور دندانه‌ای به ازای فرکانس‌های مختلف

فصل ۶:

نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه گیری

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

در این پایان نامه مهمترین عوامل و پارامترهای ساختاری مؤثر بر روی عملکرد این ماشین‌ها مورد بررسی قرار گرفتند که 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. به منظور انجام مطالعات، یک موتور سنکرون مغناطیس دائم شار متقاطع قطب چنگالی ۵۰۰ کیلوواتی، که با سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه به گردش در می‌آید، انتخاب شد. با توجه به پیچیدگی‌های ساختاری و جنس مواد مورد استفاده در ماشین TFPM قطب چنگالی، روش اجزاء محدود به عنوان ابزار اصلی در تحلیل این ماشین معرفی شد.

مهمترین نتایج قابل استخراج از این پایان نامه به شرح زیر می‌باشند:

- (۱) با استفاده از فرم‌دهی مناسب متمرکز کننده‌های شار روتور و کفشک قطب‌های استاتور، می‌توان شکل فاصله هوایی ماشین را به گونه‌ای انتخاب کرد که شکل موج ولتاژ داخلی و تغییرات اندوکتانس سیم پیچی آرمیچر به صورت دلخواه درآیند.
- (۲) با تغییر نسبت کمان آهنربا به کمان متمرکز کننده شار می‌توان شکل موج ولتاژ داخلی را به

صورت دوزنقه‌ای و یا سینوسی درآورد.

- (۳) با توجه به شکل موج‌های ولتاژ داخلی و جریان آرمیچر می‌توان با استفاده از روابط بدست آمده تعداد فازها را به گونه‌ای انتخاب کرد که ریپل گشتاور الکترومغناطیسی حداقل شود.
- (۴) اگرچه مورب ساختن قطب‌های روتور تأثیر بسیار ناچیزی بر روی شکل موج ولتاژ داخلی و تغییرات اندوکتانس سیم پیچی آرمیچر دارد، باعث کاهش شدید گشتاور دندانه‌ای که مضر است، می‌شود.
- (۵) یکپارچه ساختن روتور و استاتور فازها باعث عدم تعادل در ولتاژهای داخلی می‌شود.

۶-۲- پیشنهادات

- با توجه به اهمیت موضوعات مطرح شده در قالب پایان‌نامه حاضر و به منظور پیشرفت سریع‌تر در این حوزه‌ها، پیشنهاداتی برای انجام پژوهش‌های جدید ارائه می‌شود:
- (۱) استخراج روابط ریاضی دقیق برای فرم‌دهی مناسب متمرکز کننده‌های شار روتور و کفشک قطب‌های استاتور به منظور رسیدن به شکل موج ولتاژ داخلی و تغییرات اندوکتانس سیم پیچی آرمیچر مطلوب.
- (۲) تعیین مقادیر پارامترهای ساختاری با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند، نظیر الگوریتم ژنتیک، در کنار تحلیل اجزای محدود جهت رسیدن به عملکرد بهینه.
- (۳) بررسی تأثیر عوامل و پارامترهای ساختاری بر روی عملکرد ماشین‌های TFPM قطب چنگالی با آهنرباهای سطحی.

پیوست: نحوه طراحی موتور TFPM قطب چنگالی مورد مطالعه

الف: انتخاب شکل موج ولتاژ داخلی برای موتور مورد نظر

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

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

^۱ Case Study

به ولتاژ با دامنه بزرگتر را تشدید می‌نماید.

با توجه به توضیحات بالا، طراحی ماشین مورد مطالعه در این پایان‌نامه با فرض ولتاژ داخلی سینوسی انجام خواهد گرفت.

ب: مراحل طراحی موتور مورد مطالعه

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

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

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

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

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

با ولتاژ ورودی محدود به یک مقدار کم، تنها راه برای دستیابی به توان بالا، افزایش نسبت mE_f/X است. ماشین TFPM به نسبت ماشین‌های سنکرون دیگر دارای E_f/X کوچک‌تری است، و این مسئله کار را برای طراحی سخت‌تر می‌کند. تجربیات طراحی و شبیه‌سازی مکرر و روابط تحلیلی

قابل اثبات نشان می‌دهند که با افزایش تعداد قطب‌ها (و در نتیجه افزایش فرکانس)، چگالی شار ماکزیمم هسته و طول کمان خارجی آهنرباهای دائم، می‌توان نسبت E_f/X را افزایش داد، در حالیکه با افزایش تعداد دور سیم‌پیچی نسبت کاهش می‌یابد. همچنین این تجربیات نشان می‌دهند که برای طراحی ماشین مورد نظر باید تعداد فازها را زیاد در نظر گرفت. لذا پس از بررسی‌های زیاد، تعداد فازها و پارامترهای دیگر به صورت جدول پ-۱ انتخاب شدند.

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

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

در ادامه مراحل طراحی به ترتیب بیان می‌شوند.

گام ۱ پارامترهای اصلی خواسته شده و محدودیت‌های اصلی پیش رو مشخص می‌شوند. جدول پ-۲ این اطلاعات را ارائه می‌دهد.

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

ردیف	نام پارامتر	نماد	مقدار پارامتر
۱	توان خروجی	P_{out}	۵۰۰ کیلووات
۲	سرعت چرخش	n_s	۳۰۰ دور در دقیقه
۳	ولتاژ تغذیه dc	V_{dc}	۲۲۰ ولت
۴	مقدار موثر ولتاژ فاز	V_{in}	۷۴/۲۴ ولت
۵	حداکثر قطر خارجی مجاز موتور به همراه متعلقات آن	$D_{o,max}$	۱/۸ متر

گام ۲ انتخاب مواد سازنده برای ماشین

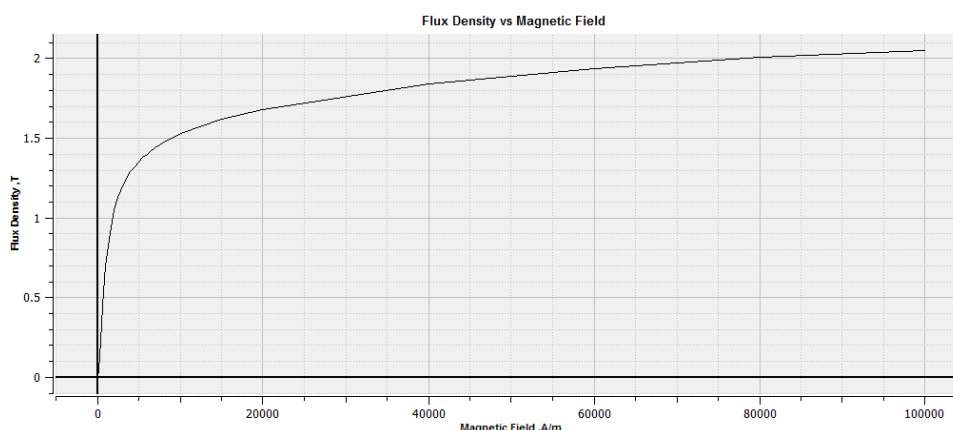
هسته از جنس Somaloy500+0.5%Kenolube-800MPa انتخاب می‌شود، که منحنی B-H

آن در شکل پ-۱ نشان داده شده است. دسته منحنی‌های تلفات این ماده بر حسب چگالی شار در

فرکانس‌های مختلف نیز در پ-۲ نشان داده شده‌اند.

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

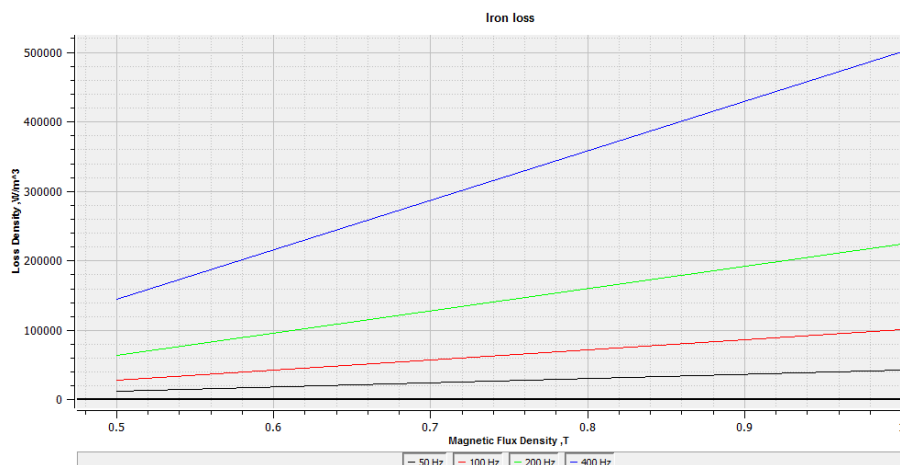
$$B_r = 1 \text{ T} , \quad H_c = 757250 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$



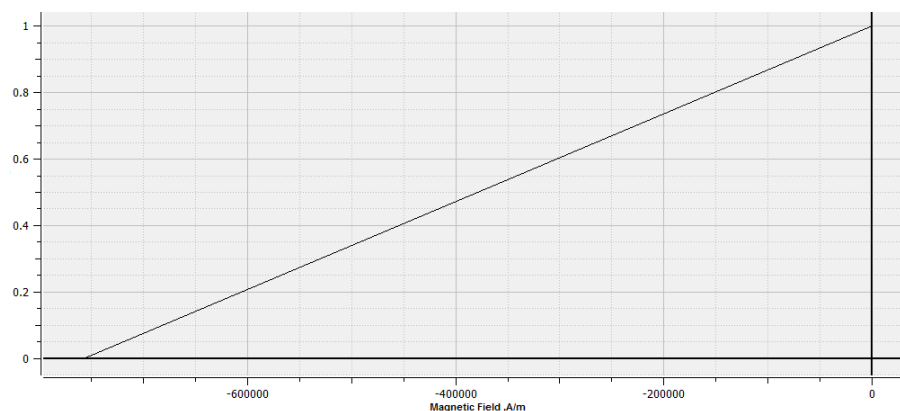
شکل پ-۱: منحنی B-H هسته‌های استاتور و روتور موتور مورد نظر [۱۲]

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

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



شکل پ-۲: دسته منحنی‌های تلفات هسته بر حسب وات بر متر مکعب برای هسته موتور مورد نظر [۱۲]



شکل پ-۳: منحنی B-H آهنربای دائم در ربع دوم [۱۲]

جدول پ-۳: پارامترهای انتخابی و پارامترهای به دست آمده از روش اجزاء محدود برای طراحی موتور

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

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

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

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

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

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

جدول پ-۶: ابعاد هندسی موتور طراحی شده

ردیف	نام پارامتر	نماد	مقدار پارامتر
۱	قطر داخلی روتور	D_{ir}	۱۲۳۶ میلی‌متر
۲	طول شعاعی آهنربای دائم	H_{pm}	۱۱ میلی‌متر
۳	قطر داخلی استاتور	D_g	۱۲۶۰ میلی‌متر
۴	طول شعاعی پایه (دندانه) استاتور	d_{os}	۲۶ میلی‌متر
۵	طول شعاعی شیار استاتور	d_{ws}	۱۸ میلی‌متر
۶	طول شعاعی یوغ استاتور (عمق هسته پشت سیم‌پیچ)	d_{cs}	۱۴/۵ میلی‌متر
۷	طول محوری هر فاز استاتور	L_s	۱۰۵ میلی‌متر
۸	طول محوری شیار استاتور	L_{ss}	۵۱/۵ میلی‌متر
۹	قطر خارجی هسته استاتور	D_o	۱۳۷۷ میلی‌متر

[1] A. Masmoudi and A. Elantably, "An Approach to sizing high power density TFPM intended for hybrid bus electric propulsion," *Electric Machines and Power Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 341-354, April 2000.

[۲] حسین آذرین فر، "مدل سازی، الگوریتم طراحی اولیه و بهینه سازی موتور شار متقاطع مغناطیس دائم،" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۰.

[3] J. F. Gieras, M. Wing, "Permanent Magnet Motort Technology, Design and Applications," Third edition, Marcel Dekker, Inc., 2010.

[4] J. S. D. Garcia, M. V. Ferreira da Luz, J. P. A. Bastos, and N. Sadowski, "Transverse Flux Machines: What for?," *IEEE MULTIDISCIPLINARY ENGINEERING EDUCATION MAGAZINE*, VOL. 2, NO. 1, MARCH 2007.

[5] H. Weh and H. May, "Achievable force densities for permanent magnet excited machines in new configuration," in *International Conference on Electrical Machines – ICEM*, Munchen, Sept. 1986.

[6] W. M. Arshad, T. Backstrom, and C. Sadarangani, "Analytical Design and Analysis Procedure for A Transverse Flux Machine," *IEEE International Electric Machines and Drives Conference - IEMDC*, 2001.

[7] I. Boldea, "Variable Speed Generators," Taylor & Francis Group, 2006.

[8] A. Masmoudi, A. Njeh, and A. Elantably, "On the analysis and reduction of the cogging torque of a claw pole transverse flux permanent magnet machine," *Euro. Trans. Electr. Power* vol. 15, pp.513 -526 NOV 2005.

[9] M.R. Dubois, "Optimized permanent magnet generator topologies for direct-drive wind turbines," Ph.D dissertation, Department of Electrical Engineering, Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 2004.

[10] A. Masmoudi, A. Njeh, A. Mansouri, H. Trabelsi, and A. Elantably, "Optimizing the Overlap Between the Stator Teeth of a Claw Pole Transverse-Flux Permanent-Magnet Machine," *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, VOL. 40, NO. 3, MAY 2004.

[11] S. Huang, J. Luo and T.A. Lipo, "Evaluation of the transverse flux circumferential current machine by the use of sizing equations", *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, 1997.

[12] JMAG Designer Ver. 10.5 Online Help, 2011.

[13] Bao G. Q., Wang J. K., Zhang D. and Jiang J. Z., "An Investigation of Multi-Phase Transverse Flux Permanent Magnet Machine," IPEMC'06, 14-16, vol.2: 1-4, Aug 2006.

[14] Y. G. Guo, J. G. Zhu, P. A. Watterson, and W. Wu, "Development of a PM transverse flux motor with soft magnetic composite core," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 2, pp.426 -434 2006.

[15] N. Dehlinger, and M. R. Dubois, "Clawpole Transverse Flux Machine with Amorphous Stator cores," in Int. Conf. on Elec. Mach. - ICEM, Sept. 2008, Vilamoura, Portugal.

[16] E. Pinguey, "On the Design and Construction of Modulated Pole Machines," PhD Thesis, University of Newcastle Upon Tyne, School of Electrical, Electronic and Computer Engineering, 2010.

[17] S. Lundmark, "Application of 3-D Computation of Magnetic Fields to the Design of Claw Pole Motors," PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Department of Energy and Environment Division of Electric Power Engineering, 2005, Göteborg, Sweden.

[۱۸] حامد طحانیان، "محاسبه توزیع تلفات و دمای ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار متقاطع TFPM با استفاده از روش اجزاء محدود"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۱.

[19] Y. G. Guo, J. G. Zhu, Z. W. Lin, H. Y. Lu, X. L. Wang, and J. X. Chen, "Influence of inductance variation on performance of a permanent magnet claw pole soft magnetic composite motor," Journal of Applied Physics, vol. 103, no. 7, pp. 07F118-1-3, 1 Apr. 2008.

[20] Y. Guo, J. Zhu, H. Lu, and J. Jin, "Computation of incremental inductances for nonlinear dynamic analysis of a PM Claw Pole SMC motor," APSAEM06 Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2007.

[21] Y. S. Chen, Z. Q. Zhu and D. Howe, "Calculation of d- and q-axis inductances of PM brushless AC machines accounting for skew," IEEE Trans. Magn., vol. 41, no. 10, pp.3940-3942, 2005.

[22] B. J. Chalmers, S. A. Hamed, and G. D. Baines, "Parameters and performance of a high-field permanent magnet synchronous motor for variable-frequency operation," Proc. Inst. Elect. Eng.—B, vol. 132, pp. 117–124, 1985.

[23] R. Dutta and M. F. Rahman, "A comparative analysis of two test methods of measuring d- and q-axes inductances of interior permanent-magnet machine," IEEE Trans. Magn., vol. 42, no. 11, pp. 3712–3718, Nov. 2006.

- [24] K. J. Meessen, P. Thelin, J. Soulard, and E. A. Lomonova, "Inductance calculations of permanent magnet synchronous machines including flux change and self and cross saturation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 39, no. 5, pp. 1264-1271, 2003.
- [25] R. Bargallo, J. Llaverias, A. De Blas, H. Martín, and R. Piqué, "Main inductance determination in rotating machines," *Analytical and Numerical calculation: A didactical approach*.
- [26] L. Chang, "An improved FE inductance calculation for electrical machines," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 32, no. 4, pp. 3237-3245, Jul. 1996.
- [27] T. W. Nehl, F. A. Fouad, and N. A. Demerdash, "Determination of saturated values of rotating machinery incremental and apparent inductances by an energy perturbation method," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 101, no. 12, pp. 4441-4451, Dec. 1982.
- [28] D. Pavlik, V. K. Garg, J. R. Repp, and J. Weiss, "A finite elemental technique for calculating the magnet sizes and inductances of permanent magnet machines," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 3, no. 1, pp. 116-122, Mar. 1988.
- [29] L. Haiwei, Z. Jianguo, and G. Youguang, "Calculation of differential inductances of a tubular linear pm actuator," *Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 15, 2007.
- [30] G. Youguang, G. Z. Jian, L. Haiwei, C. Ram, and J. Jianxun, "Determination of Winding Inductance in a Claw Pole Permanent Magnet Motor with SMC Core," *Proc. Inter. Conf. on Electrical Machines*, vol. 3, pp. 1457-1460, Espoo, Finland, August 2000.
- [31] M. Gyimesi and D. Ostergaard, "Inductance computation by incremental finite element analysis," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 35, no. 3, pp. 1119-1122, 1999.
- [32] H. Ping-lin, and H. Qian-sheng, "Analytical Prediction of the Armature-Reaction of Permanent Magnet Brushless DC Motor with Concentrated Coils," *ICEMS Electrical Machines and Systems*, vol. 1, pp. 422-425, Sept., 2005.
- [33] J. Pyrhonen, T. Jokinen, and V. Hrabovcova, "Design of Rotating Electrical Machines," First edition, John Wiley & Sons, Ltd, 2009.
- [34] A. Njeh, A. Masmoudi, and A. Elantably, "3D FEA based investigation of the cogging torque of a transverse flux permanent magnet machine," *IEEE Int. Electric Machines and Drives Conf.*, 2003.
- [35] E. Muljadi and J. Green, "Cogging Torque Reduction in a Permanent Magnet Wind Turbine Generator," *Proceedings of 21st American Society of Mechanical Wind Energy Symposium*, Reno, Nevada, January 2002.

- [36] G. Q. Bao, D. Zhang, J. H. Shi, and J. Z. Jiang, "Optimal design for cogging torque reduction of transverse flux permanent motor using particle swarm optimization algorithm," Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC. The 4th International, Vol. 1, 2004.
- [37] G. Kastinger, "Design of a novel transverse flux machine," CD-ROM Inter. Conf. Electrical Machines, Bruges, Belgium, August 2002.
- [38] M.R. Harris, G.H. Pajooman, and S.M. Abu Sharkh, "Performance and design optimisation of electric motors with heteropolar surface magnets and homopolar windings," IEE Proc. Electrical Power Applications, vol. 143, no. 6, pp. 429-436, November 1996.
- [39] J. Y. Lee , J. H. Chang , D. H. Kang , S. I. Kim and J. P. Hong, "Tooth shape optimization for cogging torque reduction of transverse flux rotary motor using design of experiment and response surface methodology," IEEE Trans. Magn., vol. 43, no. 4, pp.1817 -1820 2007.
- [40] E. Padurariu, K. Hameyer, I. A. Viorel, and L.Somesan, "Permanent magnet transverse flux motor (PMTFM) for a ship propulsion drive system", Buletinul AGIR, International Symposium on Electrical Engineering and Energy Converters - ELS 2011, Anul XVI, Nr. 4, octombrie - decembrie 2011, Suceava, Romania, Editura AGIR, ISSN 1224-7928.
- [41] S. Baserrah, and B. Orlik, "Comparison study of permanent magnet transverse flux motors (PMTFMs) for in-wheel applications", Proc. Int. Conf. Power Electron Drive Syst., pp.96 -101 2009.
- [42] Y. G. Guo, J. G. Zhu, and V. S. Ramsden, "Calculation of Cogging Torque in Claw Pole Permanent Magnet Motors", in Proceedings of Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC'99), Darwin, Northern Territory, Australia, 26-29 September 1999, pp. 343-347.
- [43] K. Sato, J. Shin, T. Koseki and Y. Aoyama, "Basic Experiments for High-Torque, Low-Speed Permanent Magnet Synchronous Motor and a Technique for Reducing Cogging Torque," International Conference on Electrical Machines, Roma, Italy, 2010.
- [44] A. Masmoudi and A. Elantably, "A simple assessment of the cogging torque in a transverse flux permanent magnet machine," IEEE Int. Electric Machines and Drives Conf., 2001.
- [45] E. Favre, L. Cardoletti, and M.Jufer, "Permanent-magnet synchronous motor: a comprehensive approach to cogging torque suppression," IEEE Transactions on Industry Applications, pp.1141–1149, 1993
- [46] J. D. L. Ree, and N.Boules, "Torque production in permanent-magnet synchronous motors," IEEE Transactions on Industry Applications, pp. 107–112, 1989.

- [47] A. Keyhani, C. Studer, T. Sebastian, and S. Murthy, "Study of cogging torque in permanent magnet machines," *Electrical Machines and Power System*, pp. 665-678, 1999.
- [48] Z. Zhu, and D. Howe, "Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines," *IEEE Transactions on Energy conversion*, pp. 407-412, 2000.
- [49] S. Huang, J. Luo, and T. Lipo, "Analysis and evaluation of the transverse flux circumferential current machine," *Proceedings of IEEE IAS Annual Meeting*, New Orleans, USA, pp. 241-247, 1997.
- [50] R. Islam and I. Husain, "Analytical model for predicting noise and vibration in permanent-magnet synchronous motors," *IEEE T IND APPL*, vol. 46, no. 6, pp. 2346-2354, Dec. 2010.

Abstract

In this thesis, influence of structural factors and parameters (involved in) dominated in design process of a Claw Pole Transverse Flux Permanent Magnet (TFPM) machine on its performance are studied. These parameters include number of phases, number of poles, shape and length of air gap, ratio of magnet arc to flux concentrator arc in each pole of rotor, shape of pole shoe of stator, shape of flux concentrator of rotor, area of rotor pole covered by stator pole, the way that stators and/or rotors of different phases are put together, and skewing of rotor flux concentrators. The criteria used for evaluating the machine performance consist of an electromagnetic torque, cogging torque, iron losses and the dynamic transient performance characteristics. Due to their calculation, the internal voltage waveform and the armature winding inductance current are obtained by finite element analysis. In addition, the armature current waveform is calculated at different operating conditions through the simulation.

Keywords— Claw Pole Transverse Flux Permanent Magnet machine, finite element analysis, internal voltage waveform, armature winding inductance, dynamic performance, electromagnetic torque, cogging torque



Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical & Robotic Engineering

Power Engineering Department

Thesis Submitted for the Degree of Master of Science

**Investigation of Structural Factors Affecting Internal Voltage
Waveform and Series Inductance Variation of Transverse Flux
Permanent Magnet Synchronous Machine**

Ali Alaeddini

**Supervisor:
Dr. Ahmad Darabi**

February 2014