

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و ریاتیک
رساله دکتری مهندسی الکترونیک قدرت و ماشین‌های الکتریکی

تعیین پارامترهای اختیاری و طراحی بهینه موتور شار محوری مغناطیس دائم چند لایه

نگارنده: رضا میرزاحسینی

استاد راهنما

دکتر احمد دارابی

استاد مشاور

دکتر محسن اصیلی

مهر ۱۳۹۹

در این صفحه صورت جلسه دفاع را قرار دهید. لازم است پس از صحافی این صفحه مجدداً توسط دانشکده مهر گردد و استاد راهنما با امضای خود اصلاحات پایان نامه را تایید کند.

تقدیم اثر

تقدیم به

پدر و مادر عزیز و مهربانم

که در تمام لحظات زندگی همواره یآوری دلسوز و فداکار

و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بوده‌اند.

تشکر و قدردانی

پروردگار را سپاسگزارم که بار دیگر به من فرصت آموختن داد. از پدر و مادر عزیز و مهربانم به خاطر زحماتی که در طول زندگی همواره

برای پیروزی و شادکامی من به جان خریدند تشکر می‌کنم. بر خود واجب می‌دانم از استاد فرزانه جناب آقای دکتر احمد اربابی که به

عنوان استاد راهنما و جناب آقای دکتر محسن اصیلی که به عنوان استاد مشاور در مراحل مختلف این رساله همواره با سه صدر و کوشاده رویی در

کنار من بودند و در طول مدت تحصیل از راهنمایی‌های اخلاقی و علمی ایشان بهره‌جسته‌ام تشکر و قدردانی نمایم.

تعهد نامه

اینجانب رضا میرزاحسینی دانشجوی دوره دکتری رشته برق دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله تعیین پارامترهای اختیاری و طراحی بهینه موتور شار محوری مغناطیس دائم چند لایه تحت راهنمایی دکتر احمد دارابی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این رساله 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 رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

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 رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

در فرآیند طراحی ماشین‌های الکتریکی تعداد مجهولات از معادلات در دسترس بیشتر می‌باشد. بنابراین مقدار برخی از پارامترها باید توسط طراح مشخص شود. به این پارامترها، پارامترهای اختیاری طراحی ماشین می‌گویند. تعداد پارامترهای اختیاری در هر مسئله طراحی ماشین متفاوت می‌باشد. در فرآیند طراحی ماشین‌های متداول مقدار ولتاژ و فرکانس تغذیه با توجه به شبکه در دسترس مشخص می‌باشد. اما ماشین‌های آهنربای دائم توسط سیستم درایو تغذیه می‌شود. بنابراین در فرآیند طراحی این نوع ماشین‌ها فرکانس و ولتاژ تغذیه نیز جزء پارامترهای اختیاری می‌باشد. نامشخص بودن مقدار پارامترهای اختیاری در ابتدای فرآیند طراحی می‌تواند منجر به سردرگمی طراحان ماشین شود. نحوه انتخاب پارامترهای اختیاری تاثیر بسزائی بر روی مشخصه‌های عملکردی ماشین دارد. از طرفی در مسائل طراحی ماشین معمولاً دستیابی به حداکثر بازده، حداکثر چگالی توان، حداقل هارمونیک‌های ولتاژ القایی، حداقل ریپل گشتاور و ... جزء اهداف طراحی می‌باشد. بنابراین در این رساله بر اساس روش‌های تحلیلی الگوریتم طراحی دقیقی برای طراحی بهینه یک ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار پیشنهاد می‌شود. همچنین روش‌هایی برای انتخاب بهینه ولتاژ و فرکانس تغذیه، کاهش هارمونیک‌های ولتاژ القایی و ریپل گشتاور ماشین ارائه می‌شود. بر اساس الگوریتم طراحی پیشنهادی یک ماشین نمونه با توان $3/7 \text{ kW}$ و سرعت 1400 rpm طراحی و ساخته می‌شود. به کمک شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود و نتایج آزمایشگاهی صحت الگوریتم طراحی و موثر بودن روش‌های پیشنهادی در انتخاب بهینه ولتاژ و فرکانس تغذیه، کاهش هارمونیک‌های ولتاژ القایی و ریپل گشتاور ماشین مورد تأیید قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی: ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار، پارامترهای اختیاری، الگوریتم طراحی، ولتاژ القایی سینوسی، کاهش ریپل گشتاور

لیست مقالات مستخرج از رساله

- 1- Ahmad Darabi, Mohammadreza Baghayipour, and Reza Mirzahosseini, "An extended analytical algorithm for optimal designing of a TORUS-type non-slotted axial-flux permanent magnet motor," Journal of Control, Automation and Electrical Systems, vol. 28, no. 6, pp. 748-761, 2017.
- 2- Reza Mirzahosseini, Ahmad Darabi, and Mohsen Assili, "An analytical approach and finite element evaluation of leakage fluxes of the PMs in a non-slotted axial flux permanent magnet machine," COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, vol. 37, no. 3, pp. 1085-1098, 2018.
- 3- Reza Mirzahosseini, Ahmad Darabi, and Mohsen Assili, "An analytical formula for selecting the feeding voltage and frequency in a TORUS-type non-slotted axial flux permanent magnet machine design," Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, vol. 27, no. 3, pp. 2295-2308, 2019.
- 4- Reza Mirzahosseini, Ahmad Darabi, and Mohsen Assili, "Magnet shifting for back EMF improvement and torque ripple reduction of a TORUS-type non-slotted axial flux permanent magnet machine," International Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 30, no. 4, pp. 1-14, 2019.
- 5- Reza Mirzahosseini, Ahmad Darabi, and Mohsen Assili, "Analytical and experimental analysis of Back EMF waveform of a TORUS-type non-slotted axial flux permanent

magnet synchronous machine with shifted rotor,” Measurement, vol. 156, no. 107620, pp. 1-10, 2020.

۶- رضا میرزاحسینی، احمد دارابی و محسن اصیلی، "تعیین مقدار بهینه فرکانس در طراحی ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار با در نظر گرفتن محاسبات توزیع دما" سی و دومین کنفرانس بین‌المللی برق (PSC 2017)، ۱-۳ آبان ۱۳۹۶.

۷- رضا میرزاحسینی، احمد دارابی و محسن اصیلی، "بررسی تاثیر فرکانس و تعداد جفت قطبها بر روی بازده و چگالی توان ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار" بیست و ششمین کنفرانس مهندسی برق ایران (ICEE 2018)، ۲۰-۱۸ اردیبهشت ۱۳۹۷.

فهرست مطالب

۱	فصل ۱: مقدمه
۲	۱-۱ مقدمه فصل.....
۲	۲-۱ معرفی ماشین‌های آهنربای دائم شار محوری.....
۵	۳-۱ انتخاب ساختار.....
۶	۴-۱ تعریف مسئله.....
۷	۵-۱ اهداف.....
۸	۶-۱ موانع و محدودیت‌های موجود.....
۸	۷-۱ روش انجام رساله.....
۹	۸-۱ نتیجه‌گیری فصل.....
۱۱	فصل ۲: مطالعه و طبقه‌بندی مراجع موجود
۱۲	۱-۲ مقدمه فصل.....
۱۲	۲-۲ روابط ابعادی و الگوریتم طراحی.....
۱۶	۳-۲ مدلسازی به کمک مدار معادل مغناطیسی.....
۲۰	۴-۲ بهبود مشخصه‌های عملکردی.....
۲۹	۵-۲ نتیجه‌گیری فصل.....
۳۱	فصل ۳: استخراج روابط طراحی و الگوریتم طراحی پیشنهادی برای ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار
۳۲	۱-۳ مقدمه فصل.....

- ۳-۲ فرآیند کلی طراحی ماشین ۳۲
- ۳-۳ پارامترهای نامی و محدودیت‌های طراحی ۳۵
- ۳-۴ پارامترهای انتخابی ثابت ۳۵
- ۳-۴-۱ تعداد فازها ۳۵
- ۳-۴-۲ نوع اتصال سیم‌پیچی‌های استاتور ۳۵
- ۳-۴-۳ حداکثر ولتاژ موثر هر فاز موتور ۳۶
- ۳-۴-۴ حداقل ولتاژ موثر هر فاز موتور ۳۷
- ۳-۴-۵ تعداد رشته‌های هر سیم ۳۷
- ۳-۴-۶ مقاومت ویژه هادی ۳۸
- ۳-۴-۷ ضریب سیم‌پیچی ۳۸
- ۳-۴-۸ ضریب پر شونگی مس ۳۸
- ۳-۴-۹ طول فاصله هوایی ۳۹
- ۳-۴-۱۰ چگالی شار پسماند آهنربای دائم ۴۰
- ۳-۴-۱۱ شدت میدان مغناطیس‌زدای آهنربای دائم ۴۰
- ۳-۴-۱۲ ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی آهنربای دائم ۴۱
- ۳-۴-۱۳ حداکثر چگالی شار در هسته روتور ۴۱
- ۳-۵ انتخاب مقادیر اولیه پارامترهای تصحیح‌پذیر ۴۲
- ۳-۵-۱ بازده ۴۲
- ۳-۵-۲ ضریب قدرت ۴۳

- ۴۳ ۳-۵-۳ ضریب نشت شار
- ۴۴ ۶-۳ تعیین مقادیر پارامترهای انتخابی بهینه‌پذیر
- ۴۴ ۳-۶-۱ فرکانس تغذیه استاتور
- ۴۴ ۳-۶-۲ مقدار موثر ولتاژ تغذیه هر فاز ماشین
- ۴۴ ۳-۶-۳ مقدار ولتاژ القایی هر فاز
- ۴۵ ۳-۶-۴ چگالی جریان سیم‌پیچی‌های استاتور
- ۴۵ ۳-۶-۵ دامنه چگالی شار فاصله هوایی
- ۴۵ ۳-۶-۶ نسبت قوس قطب به گام قطب
- ۴۶ ۳-۶-۷ حداکثر چگالی شار در هسته استاتور
- ۴۷ ۳-۶-۸ بارگذاری الکتریکی ویژه
- ۴۷ ۳-۶-۹ نسبت قطر داخلی به قطر خارجی هسته استاتور
- ۴۸ ۳-۷-۱ تعیین مقادیر پارامترهای محاسباتی
- ۴۸ ۳-۷-۱ تعداد جفت قطب‌های روتور
- ۴۸ ۳-۷-۲ تخمین اولیه جریان موثر هر فاز
- ۴۹ ۳-۷-۳ مقدار جریان در هر رشته سیم
- ۴۹ ۳-۷-۴ سطح مقطع هادی
- ۴۹ ۳-۷-۵ تعداد دور سیم‌پیچی هر فاز
- ۴۹ ۳-۷-۶ تعداد دور سیم‌پیچی بر فاز بر قطب
- ۵۰ ۳-۷-۷ قطر متوسط هسته استاتور

۵۰	۸-۷-۳ قطر خارجی هسته استاتور.....
۵۰	۹-۷-۳ قطر داخلی هسته استاتور.....
۵۱	۱۰-۷-۳ عرض گام قطب در قطر متوسط.....
۵۱	۱۱-۷-۳ عرض آهنربا در قطر متوسط.....
۵۱	۱۲-۷-۳ فاصله بین آهنرباهای دائم در قطر متوسط.....
۵۱	۱۳-۷-۳ طول شعاعی آهنربای دائم.....
۵۱	۱۴-۷-۳ تعداد لایه‌های سیم‌پیچی.....
۵۲	۱۵-۷-۳ ضخامت سیم‌پیچی.....
۵۴	۱۶-۷-۳ مقدار متوسط چگالی شار فاصله هوایی.....
۵۵	۱۷-۷-۳ مقدار چگالی شار روی سطح آهنربای دائم.....
۵۶	۱۸-۷-۳ طول محوری هسته استاتور.....
۵۶	۱۹-۷-۳ طول محوری استاتور.....
۵۶	۲۰-۷-۳ طول محوری هسته روتور.....
۵۷	۲۱-۷-۳ ضخامت آهنربای دائم.....
۵۷	۲۲-۷-۳ طول محوری روتور.....
۵۸	۲۳-۷-۳ طول محوری کل ماشین.....
۵۸	۲۴-۷-۳ طول متوسط یک دور سیم‌پیچی.....
۵۸	۲۵-۷-۳ طول سیم مورد نیاز.....
۵۸	۲۶-۷-۳ مقاومت سیم‌پیچی هر فاز استاتور.....

۳-۷-۲۷ راکتانس سنکرون ماشین..... ۵۹

۳-۷-۲۸ زاویه قدرت ماشین..... ۵۹

۳-۷-۲۹ محاسبه فازور جریان هر فاز..... ۵۹

۳-۷-۳۰ تصحیح مقدار موثر جریان هر فاز..... ۵۹

۳-۷-۳۱ تصحیح ضریب قدرت ماشین..... ۶۰

۳-۷-۳۲ تلفات اهمی سیم پیچی..... ۶۰

۳-۷-۳۳ تلفات هسته استاتور..... ۶۰

۳-۷-۳۴ تلفات بادخوری..... ۶۰

۳-۷-۳۵ تلفات یاتاقان ها..... ۶۱

۳-۷-۳۶ تصحیح بازده..... ۶۱

۳-۷-۳۷ تصحیح ضریب نشت شار..... ۶۱

۳-۸ نحوه ملاحظه تابع هدف و قیود طراحی..... ۷۰

۳-۹ طراحی ماشین مورد نظر به کمک الگوریتم طراحی..... ۷۱

۳-۱۰ نتیجه گیری فصل..... ۷۳

فصل ۴ : ارزیابی الگوریتم طراحی پیشنهادی به کمک شبیه سازی به روش اجزاء محدود و

نتایج آزمایشگاهی..... ۷۵

۴-۱ مقدمه فصل..... ۷۶

۴-۲ شبیه سازی به روش اجزاء محدود..... ۷۶

۴-۲-۱ ترسیم ساختار ماشین..... ۷۶

۴-۲-۲ تعیین جنس بخش های مختلف موتور..... ۷۷

۷۷	۳-۲-۴ تغذیه موتور
۷۸	۴-۲-۴ اعمال شرایط مرزی
۷۹	۵-۲-۴ معرفی حرکت روتور
۷۹	۶-۲-۴ مش بندی
۸۰	۷-۲-۴ نتایج شبیه سازی
۹۳	۳-۴ بررسی عملکرد ماشین در محیط آزمایشگاه
۱۰۰	۴-۴ نتیجه گیری فصل
۱۰۱	فصل ۵: استخراج روابط تحلیلی پیشنهادی برای طراحی بهینه ماشین
۱۰۲	۱-۵ مقدمه فصل
۱۰۲	۲-۵ انتخاب بهینه فرکانس و ولتاژ تغذیه ماشین
۱۰۳	۱-۲-۵ بررسی تاثیر فرکانس بر عملکرد ماشین
۱۰۶	۲-۲-۵ راهکار پیشنهادی برای انتخاب فرکانس، تعداد قطب ها و ولتاژ تغذیه
۱۱۰	۳-۲-۵ ارزیابی به کمک نتایج شبیه سازی و اندازه گیری های آزمایشگاهی
۱۱۲	۳-۵ بهبود ولتاژ القایی و ریپل گشتاور ماشین
۱۱۳	۱-۳-۵ شیف دادن آهنرباهای دائم روتور
۱۲۸	۲-۳-۵ شیف دادن دیسک های روتور
۱۴۱	۴-۵ نتیجه گیری فصل
۱۴۳	فصل ۶: نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۴۴	۱-۶ نتیجه گیری
۱۴۶	۲-۶ پیشنهادات

فهرست جداول

- جدول (۱-۲) - بررسی مطالعات انجام شده در زمینه الگوریتم طراحی ماشین آهنربای دائم شار محوری و استخراج نواقص آنها ۱۵
- جدول (۲-۲) - بررسی مطالعات انجام شده در زمینه مدار معادل مغناطیسی ماشین آهنربای دائم شار محوری و استخراج نواقص آنها ۱۹
- جدول (۳-۲) - ریپل گشتاور ماشین به ازای آهنرباها با شکل‌های هندسی مختلف ۲۵
- جدول (۴-۲) - بررسی مطالعات انجام شده در زمینه بهبود مشخصات عملکردی ماشین آهنربای دائم شار محوری و استخراج نواقص آنها ۲۸
- جدول (۱-۳) - مشخصات ماشین طراحی شده به کمک الگوریتم پیشنهادی ۷۱
- جدول (۱-۴) - جنس بخش‌های مختلف موتور ۷۷
- جدول (۲-۴) - مشخصات ژنراتور DC مورد استفاده به عنوان بار موتور ۹۸
- جدول (۳-۴) - مقایسه پارامترهای ماشین بدست آمده از الگوریتم طراحی، نرم‌افزار اجزاء محدود و اندازه‌گیری ۹۹
- جدول (۱-۵) - مشخصات ماشین‌های بررسی شده ۱۱۱
- جدول (۲-۵) - مقادیر بازده ماشین‌های مورد بررسی ۱۱۲
- جدول (۳-۵) - تحلیل هارمونیک ولتاژ القایی ۱۲۰
- جدول (۴-۵) - ریپل گشتاور ماشین برای مقادیر مختلف زاویه شیفت آهنربا ۱۲۷
- جدول (۵-۵) - مقایسه مشخصه‌های عملکردی ماشین برای دو زاویه مختلف شیفت آهنربا ۱۲۷
- جدول (۶-۵) - مقدار THD ولتاژ القایی برای برخی از زوایای شیفت روتور ۱۳۵
- جدول (۷-۵) - دامنه هارمونیک اول و مقدار THD ولتاژ القایی ۱۳۹

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) - ساختار ماشین آهنربای دائم شار محوری یک طرفه ۳
- شکل (۲-۱) - شماتیک دو بعدی ماشین بدون شیار ۴
- شکل (۳-۱) - شماتیک دو بعدی ماشین شیاردار الف) نوع NS ب) نوع NN ۴
- شکل (۴-۱) - شماتیک دو بعدی ماشین بدون هسته ۴
- شکل (۵-۱) - شماتیک دو بعدی ماشین چند طبقه ۵
- شکل (۱-۲) - شماتیک ساده شده الگوریتم طراحی پیشنهادی در مرجع ۱۳
- شکل (۲-۲) - شارهای ناشی زیگزاگ در یک ماشین آهنربای دائم الف) شار ناشی اتصال کوتاه شده توسط یک دندانه ب) شار ناشی پیوندی با بخشی از سیم‌پیچی یک فاز ج) شار ناشی بین دو دندانه ۱۸
- شکل (۳-۲) - گشتاور ماشین آهنربای دائم شار محوری شیاردار الف) ساختار متداول ب) ساختار با آهنرباهای مورب ۲۰
- شکل (۴-۲) - تغییرات نسبت ریپل گشتاور ماشین به مقدار متوسط آن بر حسب زاویه مورب کردن و نسبت قوس قطب به گام قطب ۲۱
- شکل (۵-۲) - روش‌های مختلف مورب کردن آهنرباهای روتور الف) روش متداول ب) بصورت مثلثی ج) بصورت وجه موازی د) بصورت دوزنقه‌ای ه) بصورت دو طرفه ۲۲
- شکل (۶-۲) - گروه‌بندی آهنرباهای روتور الف) هر قطب به عنوان یک واحد تکرار ب) هر دو قطب به عنوان یک واحد تکرار ج) هر چهار قطب به عنوان یک واحد تکرار ۲۳
- شکل (۷-۲) - تحلیل هارمونیک گشتاور ماشین با آهنرباهای بدون شیفت و شیفت یافته ۲۳
- شکل (۸-۲) - شکل‌های هندسی مختلف در نظر گرفته شده برای آهنرباهای روتور ۲۵

- شکل (۲-۹)- شیفیت دادن دندانهای استاتور ۲۶
- شکل (۲-۱۰)- تاثیر شیفیت دادن دندانهای استاتور بر روی شکل موج گشتاور ماشین ۲۷
- شکل (۲-۱۱)- تاثیر شیفیت دادن دندانهای استاتور بر روی شکل موج ولتاژ القایی ماشین ۲۷
- شکل (۳-۱)- فلوچارت فرآیند طراحی ماشین ۳۴
- شکل (۳-۲)- تغییرات چگالی شار بر حسب شدت میدان آهنربا ۴۱
- شکل (۳-۳)- منحنی مغناطیسی ماده مورد استفاده برای هسته روتور ۴۲
- شکل (۳-۴)- منحنی مغناطیسی ماده مورد استفاده برای هسته استاتور ۴۶
- شکل (۳-۵)- الگوریتم تعیین تعداد لایه‌ها و ضخامت سیم‌پیچی ۵۳
- شکل (۳-۶)- نحوه توزیع چگالی شار در داخل ماشین ۵۵
- شکل (۳-۷)- تغییرات چگالی شار در سه ناحیه مشخص شده در شکل (۳-۶) ۵۵
- شکل (۳-۸)- مسیر شارهای مغناطیسی در داخل ماشین ۶۲
- شکل (۳-۹)- شارهای ناشی بین دو آهنربای مجاور ۶۳
- شکل (۳-۱۰)- شارهای ناشی بین آهنربا و هسته روتور در لبه داخلی آهنربا ۶۳
- شکل (۳-۱۱)- تقسیم‌بندی آهنربا به بخش‌های کوچکتر ۶۴
- شکل (۳-۱۲)- شار ناشی بین یک بخش کوچک آهنربا و هسته روتور ۶۴
- شکل (۳-۱۳)- شارهای ناشی بین آهنربا و هسته روتور در قطر خارجی آهنربا ۶۶
- شکل (۳-۱۴)- شکستگی شار آهنربا ۶۷
- شکل (۳-۱۵)- مدار معادل مغناطیسی پیشنهادی برای ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار ۶۸
- شکل (۳-۱۶)- مدار معادل مغناطیسی ساده شده ۶۸
- شکل (۴-۱)- ساختار دو بعدی یک جفت قطب ماشین ۷۷
- شکل (۴-۲)- مدار تغذیه ماشین ۷۸

- شکل (۳-۴) - مش‌بندی یک جفت قطب ماشین ۸۰
- شکل (۴-۴) - توزیع چگالی شار در داخل موتور در حالت مدار باز ۸۰
- شکل (۵-۴) - شار پیوندی یک فاز سیم‌پیچ استاتور ۸۱
- شکل (۶-۴) - شکل موج ولتاژ القایی یک فاز حاصل از مشتق‌گیری از شار پیوندی ۸۱
- شکل (۷-۴) - مدار معادل الکتریکی هر فاز ماشین ۸۲
- شکل (۸-۴) - شماتیک شبیه‌سازی مدار معادل الکتریکی ماشین در متلب ۸۲
- شکل (۹-۴) - توان اکتیو ورودی لحظه‌ای موتور در ولتاژ تغذیه نامی و بارهای مختلف ۸۴
- شکل (۱۰-۴) - توان خروجی لحظه‌ای موتور در ولتاژ تغذیه نامی و بارهای مختلف ۸۴
- شکل (۱۱-۴) - گشتاور الکترومغناطیسی لحظه‌ای موتور در ولتاژ تغذیه نامی و بارهای مختلف ۸۴
- شکل (۱۲-۴) - تغییرات سرعت مکانیکی موتور در ولتاژ تغذیه نامی و بارهای مختلف ۸۵
- شکل (۱۳-۴) - راه‌اندازی موتور طراحی شده به کمک سیستم درایو به روش کنترل میدان جهت‌دار ۸۶
- شکل (۱۴-۴) - مدار پیاده‌سازی شده در بلوک Block 1 ۸۷
- شکل (۱۵-۴) - مدار پیاده‌سازی شده در بلوک Block 2 ۸۷
- شکل (۱۶-۴) - منتقل کردن جریان‌ها از دستگاه ساکن سه فاز abc به دستگاه چرخان dq ۸۸
- شکل (۱۷-۴) - مدار پیاده‌سازی شده در بلوک Decoupling ۸۸
- شکل (۱۸-۴) - جریان محور q موتور تغذیه شده توسط درایو ۸۹
- شکل (۱۹-۴) - جریان محور d موتور تغذیه شده توسط درایو ۸۹
- شکل (۲۰-۴) - ضریب توان موتور تغذیه شده توسط درایو ۹۰
- شکل (۲۱-۴) - بازده موتور تغذیه شده توسط درایو ۹۰
- شکل (۲۲-۴) - سرعت مکانیکی موتور تغذیه شده توسط درایو ۹۰
- شکل (۲۳-۴) - زاویه قدرت موتور تغذیه شده توسط درایو ۹۱
- شکل (۲۴-۴) - توان ورودی موتور تغذیه شده توسط درایو ۹۱

- شکل (۴-۲۵)- توان خروجی موتور تغذیه شده توسط درایو ۹۲
- شکل (۴-۲۶)- سرعت خطی ماشین بر حسب زمان ۹۳
- شکل (۴-۲۷)- نیروی وارد شده بر روتور بر حسب زمان ۹۳
- شکل (۴-۲۸)- جریان ماشین بر حسب زمان ۹۳
- شکل (۴-۲۹)- ساختار استاتور ماشین الف- هسته رول شده استاتور ب- استاتور سیم‌پیچی شده . ۹۵
- شکل (۴-۳۰)- ساختار روتور ماشین الف- آهنربای دائم ب- ساختار نهایی روتور ۹۵
- شکل (۴-۳۱)- ساختار نهایی ماشین ساخته شده ۹۵
- شکل (۴-۳۲)- تجهیزات آزمایشگاهی برای راه‌اندازی ماشین ساخته شده ۹۷
- شکل (۴-۳۳)- شکل موج ولتاژ القایی ماشین ساخته شده ۹۸
- شکل (۴-۳۴)- ولتاژ خروجی ژنراتور DC اندازه‌گیری شده توسط اسیلوسکوپ با پروب $a \times 10$ ۹۸
- شکل (۴-۳۵)- جریان خروجی ژنراتور DC اندازه‌گیری شده توسط سنسور اثر هال با نسبت $1/20$ و اسیلوسکوپ با پروب $a \times 10$ ۹۹
- شکل (۴-۳۶)- جریان یک فاز موتور بدست آمده از اندازه‌گیری در محیط آزمایشگاه ۹۹
- شکل (۵-۱)- الگوریتم طراحی ماشین با فرکانس‌های مختلف ۱۰۴
- شکل (۵-۲)- تغییرات ضریب نشت شار بر حسب فرکانس ۱۰۵
- شکل (۵-۳)- تغییرات ضخامت آهنربای دائم بر حسب فرکانس ۱۰۵
- شکل (۵-۴)- تغییرات بازده بر حسب فرکانس ۱۰۵
- شکل (۵-۵)- تغییرات چگالی توان بر حسب فرکانس ۱۰۶
- شکل (۵-۶)- تغییرات بازده ماشین بر حسب فرکانس ۱۰۷
- شکل (۵-۷)- تغییرات بازده ماشین بر حسب تعداد جفت قطب‌ها ۱۰۷
- شکل (۵-۸)- تغییرات بازده ماشین بر حسب توان خروجی ۱۰۷
- شکل (۵-۹)- تغییرات بازده ماشین بر حسب ولتاژ تغذیه ۱۰۸

- شکل (۵-۱۰) - تغییرات چگالی توان ماشین بر حسب فرکانس ۱۰۸
- شکل (۵-۱۱) - تغییرات چگالی توان ماشین بر حسب تعداد جفت قطب‌ها ۱۰۸
- شکل (۵-۱۲) - تغییرات چگالی توان ماشین بر حسب توان خروجی ۱۰۹
- شکل (۵-۱۳) - تغییرات چگالی توان ماشین بر حسب ولتاژ تغذیه ۱۰۹
- شکل (۵-۱۴) - ماشین‌های ساخته شده مورد بررسی الف) ماشین ۶۰۰ وات ب) ماشین ۱ کیلووات ۱۱۲
- شکل (۵-۱۵) - ساختار ماشین مورد مطالعه با آهنرباهای شیفت یافته ۱۱۳
- شکل (۵-۱۶) - تقسیم کردن ساختار ماشین مورد مطالعه به دو ساختار سری با هم ۱۱۴
- شکل (۵-۱۷) - ولتاژ القایی ماشین ۱ بدست آمده از الف- روش اجزاء محدود ب- فرمول تحلیلی ۱۱۷
- شکل (۵-۱۸) - ولتاژ القایی ماشین ۲ بدست آمده از الف- روش اجزاء محدود ب- فرمول تحلیلی ۱۱۸
- شکل (۵-۱۹) - ولتاژ القایی ماشین اصلی بدست آمده از روش اجزاء محدود و فرمول تحلیلی ۱۱۸
- شکل (۵-۲۰) - توزیع چگالی شار مغناطیسی در داخل ماشین در حالت مدار باز الف- بخش استاتور ب- بخش روتور ۱۱۹
- شکل (۵-۲۱) - شکل موج ولتاژ القایی ماشین به ازای مقادیر مختلف زاویه شیفت آهنربا ۱۲۰
- شکل (۵-۲۲) - ساختار روتور ماشین با آهنربای شیفت یافته ۱۲۱
- شکل (۵-۲۳) - شکل موج ولتاژ القایی ماشین ساخته شده با آهنرباهای شیفت یافته به مقدار ۱۲ درجه ۱۲۱
- شکل (۵-۲۴) - گشتاور لحظه‌ای ماشین با آهنربای شیفت یافته ۱۲۲
- شکل (۵-۲۵) - الگوریتم پیشنهادی برای تعیین مقدار بهینه زاویه شیفت آهنربا ۱۲۴
- شکل (۵-۲۶) - تحلیل سری فوریه شکل موج گشتاور ماشین در حالت بدون شیفت ۱۲۵
- شکل (۵-۲۷) - تحلیل سری فوریه شکل موج گشتاور الف- ماشین ۱ ب- ماشین ۲ ۱۲۵
- شکل (۵-۲۸) - تحلیل سری فوریه شکل موج ولتاژ القایی ماشین در حالت بدون شیفت ۱۲۶

- شکل (۵-۲۹) - تحلیل سری فوریه شکل موج گشتاور ماشین با آهنرباهای شیفت یافته به مقدار ۱۲ درجه..... ۱۲۶
- شکل (۵-۳۰) - ساختار ماشین با روتور شیفت یافته ۱۲۸
- شکل (۵-۳۱) - مسیرهای شار در داخل ماشین ۱۲۹
- شکل (۵-۳۲) - سطح مقطع دو بعدی از یک جفت قطب ماشین ۱۲۹
- شکل (۵-۳۳) - شکل موج ولتاژ القایی بدست آمده از روش اجزاء محدود و فرمول تحلیلی ۱۳۴
- شکل (۵-۳۴) - شکل موج ولتاژ القایی ماشین با روتور شیفت یافته..... ۱۳۴
- شکل (۵-۳۵) - گشتاور الکترومغناطیسی لحظه‌ای ماشین با روتور شیفت یافته..... ۱۳۵
- شکل (۵-۳۶) - الگوریتم پیشنهادی برای تعیین مقدار بهینه زاویه شیفت روتور ۱۳۸
- شکل (۵-۳۷) - تحلیل سری فوریه شکل موج ولتاژ القایی ماشین با روتور شیفت یافته به مقدار ۲۰ درجه..... ۱۳۸
- شکل (۵-۳۸) - تحلیل سری فوریه شکل موج ولتاژ القایی ماشین با روتور شیفت یافته به مقدار ۱۲ درجه..... ۱۳۹
- شکل (۵-۳۹) - ساختار روتور الف- هسته روتور ب- قاب نگهدارنده آهنرباهای دائم ۱۴۰
- شکل (۵-۴۰) - شکل موج ولتاژ القایی ماشین با روتور شیفت یافته به اندازه ۱۲ درجه اندازه‌گیری شده توسط اسیلوسکوپ با پروب $10 \times a$ ۱۴۱
- شکل (۵-۴۱) - تحلیل سری فوریه شکل موج ولتاژ القایی ماشین با روتور شیفت یافته به اندازه ۱۲ درجه بدست آمده از روش تحلیلی و با اندازه‌گیری در محیط آزمایشگاه ۱۴۱

فهرست علائم

پارامتر	متغیر
توان خروجی ماشین	P_{out}
توان ورودی ماشین	P_{in}
سرعت نامی ماشین بر حسب دور بر دقیقه	n_s
تعداد فازهای ماشین	m
حداکثر ولتاژ موثر هر فاز موتور	$V_{ph_rms_max}$
حداقل ولتاژ موثر هر فاز موتور	$V_{ph_rms_min}$
تعداد رشته‌های موازی هر سیم	a_p
مقاومت ویژه هادی	ρ_{cu}
ضریب سیم‌پیچی	K_w
ضریب پر شوندگی مس	K_{cu}
طول فاصله هوایی	g
چگالی شار پسماند آهنربای دائم	B_r
شدت میدان مغناطیس‌زدای آهنربای دائم	H_c
چگالی شار روی سطح بالای آهنربا	B_u
ضریب نفوذپذیری مغناطیسی آهنربای دائم	μ_{pm}
ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی آهنربای دائم	μ_{rpm}
ضریب نفوذپذیری مغناطیسی خلاء	μ_0
حداکثر چگالی شار در هسته روتور	B_{cr}
بازده	η
شار خارج شونده از سطح مجاور به فاصله هوایی	Φ_p
آهنربا	
شار وارد شونده به آهنربا از سطح مجاور به هسته روتور	Φ_{pm0}

K_d	ضریب نشت شار
f	فرکانس تغذیه استاتور
V_{ph_rms}	مقدار موثر ولتاژ تغذیه هر فاز ماشین
E_p	دامنه ولتاژ القایی هر فاز
J_s	چگالی جریان سیم‌پیچی‌های استاتور
B_g	دامنه چگالی شار فاصله هوایی
α_i	نسبت قوس قطب به گام قطب
B_{cs}	حداکثر چگالی شار در هسته استاتور
A	بارگذاری الکتریکی ویژه
D_i	قطر داخلی استاتور
D_o	قطر خارجی استاتور
λ	نسبت قطر داخلی به قطر خارجی استاتور
p	تعداد جفت قطب‌های روتور
I_{rms}	جریان موثر هر فاز استاتور
I_{con}	مقدار جریان در هر رشته سیم
S_{str}	سطح مقطع هادی
N_s	تعداد دور سیم‌پیچی هر فاز
q	تعداد دور سیم‌پیچی بر فاز بر قطب
D_g	قطر متوسط هسته استاتور
W_{pg}	عرض گام قطب در قطر متوسط
W_{1pmg}	عرض آهنربا در قطر متوسط
W_{2pmg}	فاصله بین آهنرباهای دائم در قطر متوسط
l_i	طول شعاعی آهنربای دائم
N_{layer}	تعداد لایه‌های سیم‌پیچی
l_w	ضخامت سیم‌پیچی
H_{wire}	طول هادی مستطیلی
W_{wire}	عرض هادی مستطیلی
$H_{insulator}$	طول عایق سیم

$W_{insulator}$	عرض عایق سیم
$N_{Turnslayer}$	تعداد دور در هر لایه سیم پیچی
B_{avg}	متوسط چگالی شار فاصله هوایی
B_{u1}	چگالی شار روی سطح مجاور به فاصله هوایی آهنربای دائم
Φ_{pm1}	کل شار عبوری از سطح معادل با یک گام قطب استاتور
l_{cs}	طول محوری هسته استاتور
l_s	طول محوری استاتور
l_{cr}	طول محوری هسته روتور
l_{pm}	ضخامت آهنربای دائم
l_r	طول محوری روتور
l_e	طول محوری کل ماشین
l_{lav}	طول متوسط یک دور سیم پیچی
$L_{winding}$	طول سیم مورد نیاز
R_{ph}	مقاومت سیم پیچی هر فاز استاتور
L_s	اندوکتانس سنکرون ماشین
X_s	راکتانس سنکرون ماشین
$\mathfrak{R}_g$	رلوکتانس فاصله هوایی
δ	زاویه قدرت ماشین
$\bar{I}$	فازور جریان هر فاز
P_{cu_loss}	تلفات اهمی سیم پیچی
P_{iron_loss}	تلفات هسته استاتور
ζ	ضخامت ورقه های استاتور بر حسب میلی متر
$\mathfrak{R}_{mm}$	رلوکتانس مسیر شار نشتی بین دو آهنربای مجاور
$\mathfrak{R}_{mr}$	رلوکتانس مسیر شار نشتی بین آهنربا و هسته روتور در لبه کناری آهنربا

$\mathfrak{R}_{\text{mrin}}$	رلوکتانس مسیر شار نشتی بین آهنربا و هسته روتور در قطر داخلی آهنربا
$\mathfrak{R}_{\text{mrout}}$	رلوکتانس مسیر شار نشتی بین آهنربا و هسته روتور در قطر خارجی آهنربا
P_{fredge}	پرمیانس شار پراکندگی در لبه کناری آهنربای دائم
P_{frouit}	پرمیانس شار پراکندگی در قطر خارجی آهنربای دائم
P_{frin}	پرمیانس شار پراکندگی در قطر داخلی آهنربای دائم
$\mathfrak{R}_{\text{pm}}$	رلوکتانس آهنربای دائم
$V_{\text{ph}}(t)$	مقدار لحظه‌ای ولتاژ ترمینال هر فاز
$E_{\text{PHmain}}(t)$	مقدار لحظه‌ای ولتاژ القایی هر فاز
T_e	گشتاور الکترومغناطیسی
T_m	گشتاور مقاوم بار
J	ممان اینرسی کل بخش گردان
ω_m	سرعت مکانیکی روتور بر حسب رادیان بر ثانیه
B	ضریب گشتاور اصطکاکی
V_{linear}	سرعت خطی حرکت روتور
F_{linear}	نیروی وارد بر بخش روتور در راستای حرکت خطی
φ	شار میدان ژنراتور DC
E_a	ولتاژ القاء شده در آرمیچر ژنراتور DC
$i_a(t)$	مقدار لحظه‌ای جریان آرمیچر
τ_m	گشتاور وارد بر محور ژنراتور DC
$V_T(t)$	مقدار لحظه‌ای ولتاژ ترمینال ژنراتور DC
Δx_{ij}	فاصله افقی بین هادی واقع شده در ستون i و لایه z و مرکز سیم‌پیچی

Δy_{ij}	فاصله عمودی بین هادی واقع شده در ستون i و لایه z و مرکز سیم پیچی
T_{ripple}	ریپل گشتاور ماشین
T_{max}	حداکثر مقدار گشتاور لحظه‌ای ماشین
T_{min}	حداقل مقدار گشتاور لحظه‌ای ماشین
T_{avg}	مقدار متوسط گشتاور ماشین
h	شماره هارمونیک
$MMF_{cs}(x_0)$	افت MMF بر روی هسته استاتور در موقعیت x_0
$MMF_{cr}(x_0)$	افت MMF بر روی هسته روتور در موقعیت x_0
$M'_y(x)$	بردار مغناطیس شونده
ρ	چگالی ویژه مربوط به سیستم خنک کننده
R_{out}	شعاع خارجی دیسک روتور
R_{sh}	شعاع شفت
P_{wind}	تلفات بادخوری
μ	ویسکوزیته هوا
k_{fb}	ضریب ثابت محاسبه تلفات یاتاقان
m_r	جرم روتور
m_{sh}	جرم شفت
P_{fr}	تلفات یاتاقان‌ها

فصل ۱ : مقدمه

۱-۱ مقدمه فصل

ماشین‌های آهنربای دائم شار محوری به دلیل ساختار خاص و ویژگی‌های منحصر به فردی که دارند مورد توجه محققین و صنایع مختلف قرار گرفته‌اند. تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در رابطه با این نوع ماشین‌ها انجام شده و ساختارهای مختلفی برای آنها ارائه شده است. در این فصل ابتدا ساختارهای ماشین‌های آهنربای دائم شار محوری معرفی و مزایا و معایب آنها بیان می‌شود. سپس ساختار مورد نظر برای انجام این رساله انتخاب می‌شود. در نهایت بر روی ساختار انتخاب شده تعریف مسئله، روش انجام آن، محدودیت‌های موجود و اهداف رساله ارائه می‌گردد.

۱-۲ معرفی ماشین‌های آهنربای دائم شار محوری

ماشین‌های آهنربای دائم شار محوری (AFPM)^۱ به دلیل ساختار دیسکی شکل و چگالی توان بالا جایگزین مناسبی برای ماشین‌های آهنربای دائم شار شعاعی (RFPM)^۲ می‌باشند. ماشین‌های آهنربای دائم شار محوری برای استفاده در بسیاری از صنایع بخصوص در خودروهای الکتریکی، پمپ‌ها، سانتریفیوژها، ژنراتورهای بادی، ربات‌ها، سیستم‌های رانش کشتی‌ها و زیردریایی‌ها و تجهیزات صنعتی مناسب می‌باشند [۱]–[۴]. این ماشین‌ها می‌توانند به صورت ماشین‌های دارای یک یا چند فاصله هوایی، با استاتور شیاردار یا بدون شیار و یا بدون هسته آهنی استاتور طراحی شوند.

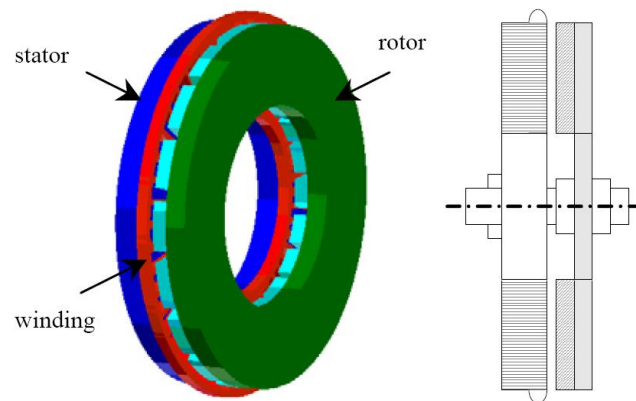
با توجه به نوع و تعداد دیسک‌های روتور و استاتور و نحوه قرار گرفتن آنها در کنار هم ساختارهای مختلفی برای ماشین‌های آهنربای دائم شار محوری معرفی شده است که متداول‌ترین آنها عبارتند از [۴]:

❖ ماشین‌های آهنربای دائم شار محوری یک طرفه:

¹ Axial Flux Permanent Magnet

² Radial Flux Permanent Magnet

ساده‌ترین ساختار ماشین شار محوری ساختاری است که تنها از یک دیسک استاتور و یک دیسک روتور تشکیل شده است. این نوع ساختار در شکل (۱-۰) نشان داده شده است. در این نوع ماشین نیروی محوری نامتعادل بین روتور و استاتور وجود دارد و در مقایسه با دیگر ساختارها گشتاور نسبتاً پایین تولید می‌کند. به همین دلیل این نوع ساختار خیلی رواج پیدا نکرده است [۵]-[۷].

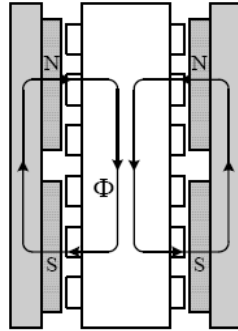


شکل (۱-۰) - ساختار ماشین آهنربای دائم شار محوری یک طرفه [۷]

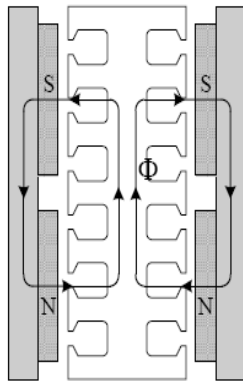
❖ ماشین‌های آهنربای دائم شار محوری دو طرفه:

همان طور که بیان شد مشکل ساختار یک طرفه وجود نیروی محوری نامتعادل بین روتور و استاتور می‌باشد. این نیروی محوری را می‌توان با استفاده از استاتور (روتور) دوم که به صورت قرینه اولی قرار می‌گیرد متعادل کرد. بنابراین این ساختار درواقع از یک بخش استاتور در وسط و دو بخش روتور در طرفین آن و یا یک بخش روتور در وسط و دو بخش استاتور در دو طرف آن تشکیل شده است. چنین ساختاری را ساختار آهنربای دائم شار محوری دو طرفه می‌نامند. در ساختار دو طرفه با یک بخش استاتور و دو بخش روتور، هسته استاتور می‌تواند بصورت شیاردار، بدون شیار و یا بصورت غیرمغناطیسی ساخته شود. در شکل‌های (۱-۲)، (۱-۳) و (۱-۴) به ترتیب شماتیک دو بعدی ساختار دو طرفه با هسته استاتور بدون شیار، با هسته استاتور شیاردار و بدون هسته آهنی استاتور نشان داده شده است. با توجه به مسیرهای شار در ماشین نوع سیم‌پیچی نیز متفاوت می‌باشد. بعنوان مثال در ساختار دو طرفه نشان داده شده در شکل (۲-۰) از سیم‌پیچی نوع تروئیدال استفاده می‌شود. در ساختار شیاردار می‌توان

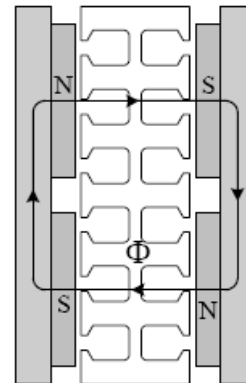
استاتور را بصورت تروئیدال و یا مشابه ماشین‌های متداول سیم‌پیچی کرد. همچنین آهنرباهای دائم روتور نیز می‌توانند بصورت سطحی و یا داخلی بر روی هسته روتور نصب شوند [۵]، [۷] و [۸].



شکل (۲-۰) - شماتیک دو بعدی ماشین بدون شیار [۷]

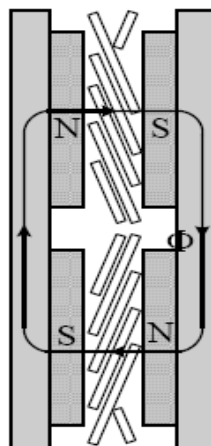


(ب)



(الف)

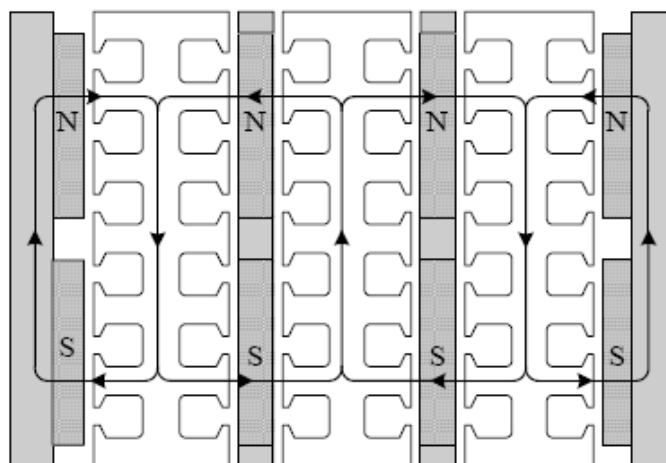
شکل (۳-۰) - شماتیک دو بعدی ماشین شیاردار (الف) نوع NS (ب) نوع NN [۷]



شکل (۴-۰) - شماتیک دو بعدی ماشین بدون هسته [۷]

❖ ماشین‌های آهنربای دائم شار محوری چند طبقه:

گشتاور الکترومغناطیسی ماشین‌های شار محوری تابعی از قطر خارجی می‌باشد. اگر ماشین با قطر خارجی کوچک طراحی شود، گشتاور مورد نیاز می‌تواند با استفاده از آرایش چند طبقه تامین شود. در شکل (۵-۰) شماتیک دوبعدی ماشین چند طبقه نشان داده شده است. درواقع ساختار چند طبقه از کنار هم قرار گرفتن تعدادی ساختار دو طرفه تشکیل شده است. نحوه انتخاب تعداد طبقات در ماشین‌های چند طبقه بسیار مهم است زیرا انتخاب نادرست تعداد طبقات می‌تواند منجر به کاهش بازده و چگالی توان ماشین شود. همچنین نحوه اتصال سیم‌پیچی طبقات و تغذیه آنها نیز بر روی عملکرد ماشین تاثیر بسزائی دارد [۵] و [۷].



شکل (۵-۰) - شماتیک دوبعدی ماشین چند طبقه [۷]

۳-۱ انتخاب ساختار

در انتخاب ساختار معمولاً محدودیت‌های ابعادی، شرایط محیط کار ماشین و خواسته‌های طراحی تاثیرگذار می‌باشد. از جمله موارد حائز اهمیت در این رساله دستیابی به بازده بالا، چگالی توان بالا و سطح ارتعاشات و نویز کم می‌باشد. همچنین با توجه به امکانات و تجهیزات آزمایشگاهی بسیار محدود باید ساختاری انتخاب شود که امکان ساخت آن متناسب با تجهیزات در دسترس وجود داشته باشد. بر اساس توضیحات ارائه شده ماشین آهنربای دائم شار محوری دو طرفه با هسته استاتور بدون شیار به

عنوان ساختار مورد مطالعه در این رساله انتخاب می‌شود. این ماشین همه خواسته‌های مورد نظر از جمله بازده بالا، ساختار فشرده، سطح ارتعاشات و نویز پایین و راحتی ساخت را دارا می‌باشد.

۴-۱ تعریف مسئله

در فرآیند طراحی ماشین تعداد مجهولات بیشتر از تعداد معادلات می‌باشد. بنابراین تنها به کمک روابط در دسترس امکان طراحی ماشین وجود ندارد. برای رفع این مشکل برخی از پارامترهای طراحی توسط خود طراح انتخاب می‌شود. به این پارامترها که توسط طراح انتخاب می‌شود پارامترهای اختیاری می‌گویند. از طرفی ماشین‌های آهنربای دائم شار محوری برخلاف ساختارهای متداول توسط درایو راه‌اندازی می‌شود. بنابراین ولتاژ و فرکانس تغذیه نیز جزء پارامترهای اختیاری می‌باشد. نحوه انتخاب پارامترهای اختیاری تاثیر بسزایی بر روی ابعاد و مشخصات عملکردی ماشین دارد. از این رو مقدار این پارامترها باید به طور صحیح و بهینه انتخاب شود. از طرفی برای طراحی ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار نیاز به یک الگوریتم دقیق می‌باشد. الگوریتمی که به راحتی پارامترهای نامی ماشین و محدودیت‌ها را دریافت کند و بطور مستقل از نرم‌افزار اجزاء محدود ماشین مورد نظر را طراحی کند. دقت این الگوریتم باید به گونه‌ای باشد که در نتایج بدست آمده از آن محدودیت‌های ساخت ماشین بخصوص سیم‌پیچی لحاظ شده باشد. از طرف دیگر ساختار آهنربای دائم شار محوری بدون شیار با وجود مزایای بسیاری که برای آن بیان شد در داخل کشور کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین امکان‌سنجی ساخت آن در داخل کشور نیز باید بررسی شود. بطور کلی در این رساله به پرسش‌های زیر در مورد ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار پاسخ داده می‌شود:

- انواع پارامترهای اختیاری ماشین کدامند؟

- نحوه تعیین پارامترهای اختیاری ماشین چیست؟

- آیا الگوریتم طراحی دقیقی برای طراحی ماشین وجود دارد؟

- در ابتدای فرآیند طراحی ماشین چگونه مقدار ولتاژ و فرکانس تغذیه را بطور صحیح انتخاب کنیم؟

- چگونه ماشینی طراحی کنیم که ولتاژ القایی آن تا حد امکان سینوسی باشد؟
- چگونه می‌توان ریپل گشتاور ماشین را تا حد امکان کاهش داد؟
- آیا امکان ساخت ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار با توجه به امکانات و مواد موجود در کشور وجود دارد؟

۵-۱ اهداف

برخی از اهداف مورد نظر در انجام این رساله عبارتند از:

- ۱- تدوین الگوریتم طراحی برای طراحی ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار:
این الگوریتم باید به گونه‌ای باشد که پارامترهای نامی ماشین و محدودیت‌های موجود را دریافت کرده و پس از طراحی ماشین مورد نظر ابعاد بخش‌های مختلف آن و همچنین برخی مشخصات عملکردی آنرا به عنوان خروجی تحویل دهد.
- ۲- ارائه روشی برای تعیین پارامترهای اختیاری ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار:
به کمک روش پیشنهادی باید پارامترهای اختیاری ماشین به صورت بهینه انتخاب شود.
- ۳- طراحی بهینه ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار بر اساس روابط تحلیلی:
از جمله اهداف انجام این رساله طراحی بهینه ماشین می‌باشد. برای این منظور متناسب با تابع هدف طراحی که می‌تواند حداکثر کردن بازده، حداقل کردن ریپل گشتاور، حداقل کردن THD ولتاژ القایی ... باشد روش‌هایی برای طراحی بهینه ارائه می‌شود.
- ۴- طراحی و ساخت یک نمونه ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار متناسب با تجهیزات و امکانات موجود در کشور:
بررسی‌ها نشان می‌دهد که ساختار مورد مطالعه در کشور کمتر مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به مزایای زیاد این نوع ساختار یکی از اهداف این رساله ساخت و تست یک نمونه متناسب با امکانات

موجود می‌باشد تا مشکلات ساخت این نوع ساختار مشخص شده و این مشکلات در حد امکان برطرف شده و دانش ساخت این نوع ماشین بومی‌سازی شود.

۶-۱ موانع و محدودیت‌های موجود

یکی از مشکلات عمده در انجام رساله کمبود تجهیزات و همچنین قیمت بالای مواد آهنربای دائم می‌باشد. همچنین امکان تهیه آهنرباهای کمانی شکل با هر ضخامتی و هر گریدی در داخل کشور وجود ندارد.

۷-۱ روش انجام رساله

بطور کلی مراحل انجام رساله بصورت زیر خلاصه می‌شود:

۱- مطالعه مراجع و طبقه‌بندی آنها:

در فصل دوم مراجع موجود در زمینه استخراج روابط ابعادی، تدوین الگوریتم طراحی، طراحی بهینه، بهبود مشخصات عملکردی ماشین آهنربای دائم شار محوری مورد نقد و بررسی قرار می‌گیرد.

۲- استخراج روابط ابعادی ماشین، تدوین الگوریتم طراحی و طراحی ماشین مورد نظر:

در فصل سوم پارامترهای اختیاری ماشین طبقه‌بندی می‌شود. سپس بر اساس روش‌های تحلیلی روابط ابعادی ماشین مورد مطالعه استخراج می‌شود. به کمک روش‌های بهینه‌سازی الگوریتم طراحی برای طراحی بهینه ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار پیشنهاد می‌شود. الگوریتم مورد نظر در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی می‌گردد. به کمک این الگوریتم یک ماشین نمونه با توان $3/7 \text{ kW}$ و سرعت 1400 rpm طراحی و مشخصات ابعادی آن تعیین می‌شود.

۳- ارزیابی صحت الگوریتم طراحی پیشنهادی به کمک نرم‌افزار اجزاء محدود و نتایج ساخت:

در فصل چهارم به کمک نرم افزار اجزاء محدود عملکرد ماشین طراحی شده مورد ارزیابی قرار می گیرد. برای این منظور عملکرد ماشین تحت بی باری و بار کامل بررسی می شود. همچنین ماشین مورد نظر ساخته شده و عملکرد آن در محیط آزمایشگاه بررسی می شود.

۴- ارائه روابط تحلیلی برای بهبود عملکرد و طراحی بهینه ماشین:

در فصل پنجم تاثیر ولتاژ و فرکانس تغذیه بر روی مشخصه های عملکردی ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار بررسی می شود. سپس روشی برای انتخاب صحیح مقدار ولتاژ و فرکانس تغذیه به منظور دستیابی به حداکثر بازده ارائه می شود. همچنین با توجه به ساختار خاص ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار از روش شیفت دادن برای بهبود شکل موج ولتاژ القایی و رپیل گشتاور ماشین استفاده می شود. برای این منظور از روش های تحلیلی استفاده شده و روابطی نیز برای تعیین زاویه شیفت بهینه استخراج می شود. در نهایت به کمک شبیه سازی به روش اجزاء محدود و نتایج ساخت صحت روابط پیشنهادی مورد ارزیابی قرار می گیرد.

۵- نتیجه گیری و پیشنهادات:

در فصل ششم نتیجه گیری های بدست آمده از انجام موضوع رساله و پیشنهادات برای ادامه کار ارائه می گردد.

۱-۸ نتیجه گیری فصل

در این فصل ساختارهای مختلف ماشین آهنربای دائم شار محوری مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به محدودیت ها و خواسته های طراحی، ساختار آهنربای دائم شار محوری بدون شیار به عنوان ساختار مورد مطالعه انتخاب شد. سپس بر روی ساختار انتخاب شده مسئله مورد نظر تعریف شد.

فصل ۲ : مطالعه و طبقه‌بندی

مراجع موجود

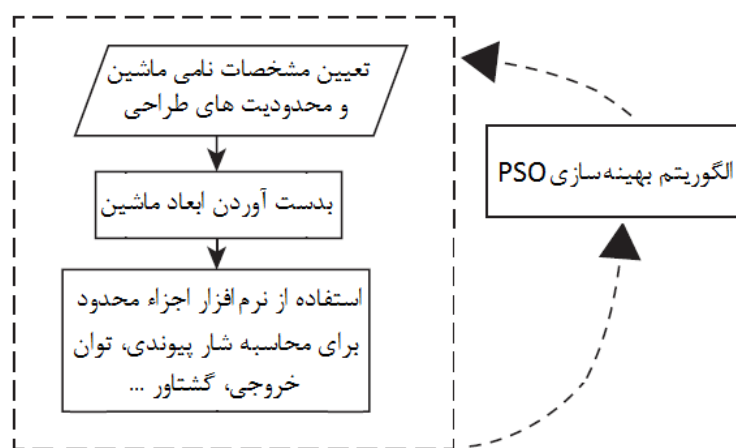
۲-۱ مقدمه فصل

تاریخچه ماشین‌های الکتریکی نشان می‌دهد که اولین ماشین شار محوری توسط آقای فارادی در سال ۱۸۲۱ معرفی شد [۹]. با این وجود ساختار آهنربای دائم شار محوری به دلیل قیمت بالای مواد مغناطیس دائم، مشکلات ساخت مانند ایجاد شیار در هسته‌های موری استاتور، حفظ یکنواختی فاصله هوایی و مونتاژ اجزاء ماشین برای سال‌ها کنار گذاشته شد. کاهش قیمت مواد مغناطیس دائم و توسعه تجهیزات الکترونیک قدرت و مزایای فراوان ماشین‌های آهنربای دائم شار محوری از قبیل چگالی گشتاور بالا، بازده بالا و ارتعاشات و نویز کم سبب شد که این نوع ماشین‌ها مجدداً مورد توجه طراحان ماشین قرار بگیرند [۱۱]-[۴] و [۷]. تاکنون مراجع مختلفی در زمینه طراحی، مدلسازی، بهبود عملکرد و ساخت ماشین‌های آهنربای دائم شار محوری چاپ شده است. در این فصل مراجع مرتبط با موضوع رساله بررسی و طبقه‌بندی می‌شود. بدین منظور مراجع در سه دسته روابط ابعادی و الگوریتم طراحی، مدلسازی به کمک مدار معادل مغناطیسی و بهبود عملکرد ماشین بخصوص با استفاده از روش شیفت دادن طبقه‌بندی خواهند شد.

۲-۲ روابط ابعادی و الگوریتم طراحی

محققین مختلف برخی از روابط ابعادی ماشین آهنربای دائم شار محوری را استخراج کرده‌اند [۸]-[۲۳]. بر اساس این روابط ابعادی استخراجی، برخی از مراجع مانند [۱۳]، [۱۴] و [۲۰] یک الگوریتم طراحی اولیه ارائه کرده‌اند. اما روش طراحی ارائه شده توسط آنها یا خیلی پیچیده می‌باشد [۱۴] و یا از تعداد زیادی روش تکرارپذیر به همراه شبیه‌سازی اجزاء محدود در فرآیند طراحی خود استفاده کرده‌اند [۱۳] و [۲۰]. همچنین این روش‌های طراحی علاوه بر زمانبر بودن لزوماً ماشین را بصورت بهینه طراحی نمی‌کنند. در برخی از مراجع علاوه بر ارائه روابط طراحی، عملکرد ساختارهای مختلف نیز با یکدیگر مقایسه شده است اما الگوریتم طراحی ماشین‌های طراحی شده در این مراجع ارائه نشده است [۸]-

[۱۲] و [۲۴]. در [۲۵]-[۲۸] از الگوریتم‌های مختلف در ترکیب با شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود برای طراحی ماشین استفاده شده است. برای مثال در [۲۵] از ترکیب روش تاگوچی و روش اجزاء محدود سه بعدی برای طراحی بهینه یک ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون هسته به منظور حداقل کردن ریپل گشتاور استفاده شده است. در [۲۶] به طراحی بهینه یک ژنراتور آهنربای دائم شار محوری بدون هسته پرداخته شده است. در این طراحی بهینه دستیابی به ساختار فشرده، وزن کم و بازده بالا به عنوان تابع هدف بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است و با تغییر متغیرهای طراحی، ماشین به صورت بهینه طراحی شده است. در این مرجع در فرآیند طراحی از روش اجزاء محدود سه بعدی برای بدست آوردن برخی از مشخصات عملکردی ماشین مانند توزیع دما، تنش‌های مکانیکی و ... استفاده شده است. در [۲۷] از ترکیب روابط ابعادی، روش اجزاء محدود سه بعدی و روش‌های بهینه‌سازی برای طراحی بهینه یک ژنراتور آهنربای دائم شار محوری شیاردار استفاده شده است. الگوریتم بکار رفته در این مرجع در شکل (۱-۲) نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود پس از محاسبه ابعاد ماشین به کمک روابط ابعادی از شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود برای بدست آوردن مشخصات عملکردی ماشین استفاده می‌شود.



شکل (۱-۲) - شماتیک ساده شده الگوریتم طراحی پیشنهادی در مرجع [۲۷]

استفاده از روش اجزاء محدود منجر به افزایش چشمگیر زمان طراحی می‌شود. برخی از محققین روشی را پیشنهاد داده‌اند که در آن ابتدا پارامترهای طراحی با استفاده از آنالیز حساسیت و مدار معادل

مغناطیسی انتخاب می‌شوند [۲۹] و [۳۰]. این روش معمولاً زمانبر است زیرا به آنالیز حساسیت اولیه نیاز دارد. در [۳۱] از ترکیب روش اجزاء محدود و تحلیل حالت دائمی مدار معادل الکتریکی ماشین و روابط ابعادی برای طراحی ماشین آهنربای دائم شار محوری استفاده شده است. در [۳۲] از روش اجزاء محدود دوبعدی استاتیک و الگوریتم ژنتیک برای طراحی بهینه یک ژنراتور آهنربای دائم شار محوری بدون هسته استفاده شده است. در [۳۳]-[۴۰] با استفاده از روش بهینه‌سازی ژنتیک و به کمک روابط ابعادی پیشنهاد شده در [۸]، [۱۰]-[۱۲]، [۱۵]-[۱۷]، [۱۹] و [۲۰] الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای طراحی ماشین‌های شار محوری ارائه شده است. اما آنها مقادیر برخی از پارامترها مانند طول محوری آهنربا، قطرهای داخلی و خارجی ماشین ... را ثابت در نظر گرفته‌اند و به این نکته توجه نکرده‌اند که طرح بهینه می‌تواند تنها با در نظر گرفتن تمام پارامترهای طراحی با هم بدست آید. در [۴۰] با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک و ازدحام ذرات و روابط ابعادی، یک ژنراتور آهنربای دائم شار محوری بدون هسته به صورت بهینه طراحی شده است. دقت تمام روش‌های بررسی شده در مراجع به روابط ابعادی مورد استفاده در الگوریتم‌های طراحی آنها بستگی دارد.

متأسفانه روابط ابعادی و الگوریتم‌های طراحی استفاده شده در مراجع قبلی دارای برخی نواقص می‌باشد. به عنوان مثال محاسبه راکتانس سنکرون و برخی پارامترهای عملکردی حالت دائمی مانند جریان آرمیچر، ضریب قدرت و ... در این الگوریتم‌ها در نظر گرفته نشده‌اند. علاوه بر این نحوه محاسبه برخی ضرایب مانند ضریب نشت شار و نسبت مقدار متوسط چگالی شار به حداکثر مقدار چگالی شار فاصله هوایی نیز بصورت واضح بیان نشده است. نتایج بدست آمده از چنین الگوریتم‌های طراحی معمولاً نیاز به فرآیند رفت و برگشتی به کمک نرم‌افزار اجزاء محدود و اصلاح متغیرها دارد که یک فرآیند زمانبر می‌باشد.

بنابراین یک الگوریتم طراحی بهینه‌سازی که بتواند تمام ابعاد و پارامترهای طراحی ماشین آهنربای دائم شار محوری را بطور مستقل از روش اجزاء محدود محاسبه کند مورد نیاز می‌باشد. در این زمینه تنها یک مرجع چاپ شده برای طراحی ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون هسته وجود دارد که بر اساس

بررسی‌های تحلیلی انجام شده در [۴۱] و [۴۲] ارائه شده است اما این مرجع نیز همچنان دارای برخی از نواقص مطرح شده می‌باشد [۴۳]. به منظور مقایسه بهتر، خلاصه‌ای از کارهای انجام شده در مراجع و نواقص آنها در جدول (۲-۱) ارائه شده است. با توجه به نواقص موجود در مراجع و بررسی‌های انجام شده، در زمینه طراحی ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار الگوریتم طراحی دقیقی وجود ندارد. بنابراین از جمله اهداف این رساله ارائه الگوریتمی برای طراحی بهینه این ماشین می‌باشد.

جدول (۲-۱)- بررسی مطالعات انجام شده در زمینه الگوریتم طراحی ماشین آهنربای دائم شار محوری و استخراج

نواقص آنها

شماره مرجع	سال انتشار	مطالعه انجام شده	نواقص
۸	۲۰۰۰	ارائه روابط ابعادی، مقایسه ساختارهای مختلف ماشین آهنربای دائم شار محوری	عدم ارائه بسیاری از روابط ابعادی، عدم ارائه الگوریتم طراحی، صرفنظر کردن از شارهای ناشی
۱۱	۲۰۰۱	ارائه روابط ابعادی برای ماشین AFIR شیاردار و بدون شیار	عدم ارائه رابطه تعداد دور سیم‌پیچی با توجه به ولتاژ القایی هارمونیک، عدم ارائه الگوریتم طراحی، صرفنظر کردن از شارهای ناشی
۱۰	۲۰۰۱	ارائه روابط ابعادی ماشین نوع Torus شیاردار و بدون شیار	عدم ارائه رابطه ضریب ولتاژ القایی، عدم ارائه الگوریتم طراحی، صرفنظر کردن از شارهای ناشی، عدم ارائه رابطه بین مقدار متوسط و ماکزیمم چگالی شار فاصله هوایی
۱۹	۲۰۱۲	ارائه روابط ابعادی ماشین Torus شیاردار	صرفنظر از اندوکتانس ناشی و مقاومت استاتور در روابط ابعادی
۲۰	۲۰۱۱	ارائه الگوریتم طراحی ماشین آهنربای دائم شار محوری شیاردار	صرفنظر کردن از شارهای ناشی بین دو قطب مجاور و بین هر قطب و آهن روتور، استفاده از تعداد زیادی روش تکرارپذیر به همراه شبیه‌سازی اجزاء محدود سه بعدی در الگوریتم طراحی
۱۳	۲۰۱۵		
۱۸	۲۰۱۴	طراحی اولیه یک ژنراتور آهنربای دائم شار محوری شیاردار	صرفنظر از شارهای ناشی و هارمونیک‌های چگالی شار فاصله هوایی
۲۶	۲۰۱۲	طراحی بهینه یک ژنراتور آهنربای دائم شار محوری بدون هسته	زمانبر بودن به دلیل استفاده از روش اجزاء محدود سه بعدی در الگوریتم طراحی

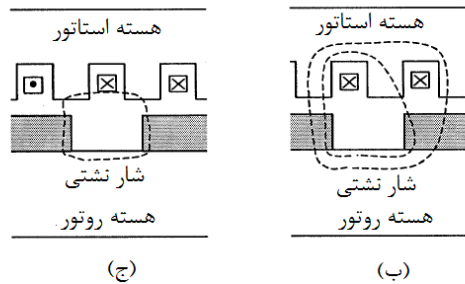
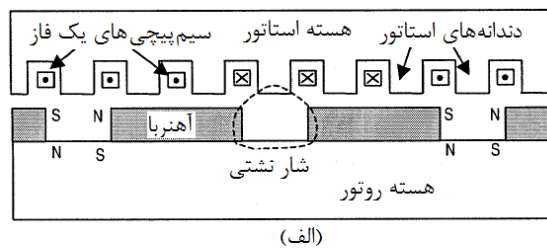
زمانبر بودن به دلیل استفاده از روش اجزاء محدود سه بعدی در الگوریتم طراحی	ترکیب روابط ابعادی، روش اجزاء محدود سه بعدی و روش‌های بهینه‌سازی برای طراحی بهینه یک ژنراتور آهنربای دائم شار محوری شیاردار	۲۰۱۵	۲۷
این روش معمولاً زمانبر است و به آنالیز حساسیت اولیه نیاز دارد.	استفاده از آنالیز حساسیت و مدار معادل مغناطیسی در طراحی و کنترل یک ماشین شار محوری بدون شیار	۲۰۰۴	۲۹
		۲۰۰۴	۳۰
زمانبر بودن به دلیل استفاده از روش اجزاء محدود در الگوریتم طراحی	ترکیب روش اجزاء محدود و تحلیل حالت دائمی مدار معادل الکتریکی ماشین و روابط ابعادی برای طراحی ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون هسته	۲۰۰۵	۳۱
صرفنظر کردن از هارمونیک‌های ولتاژ القایی، استفاده از روش اجزاء محدود سه بعدی در الگوریتم طراحی برای محاسبه اندوکتانس‌ها و برخی از ضرایب	طراحی بهینه یک ژنراتور آهنربای دائم شار محوری بدون هسته چند طبقه با استفاده از الگوریتم ژنتیک	۲۰۱۶	۳۲
صرفنظر کردن از شارهای ناشی، صرفنظر کردن از هارمونیک‌های ولتاژ القایی	ارائه روابط ابعادی و طراحی بهینه یک ماشین شار محوری شیاردار	۲۰۱۱	۳۳
صرفنظر از اندوکتانس ناشی و مقاومت استاتور در روابط ابعادی، عدم ارائه رابطه ضریب ولتاژ القایی	طراحی بهینه یک ژنراتور آهنربای دائم شار محوری بدون هسته به کمک الگوریتم ژنتیک	۲۰۱۶	۴۰

۲-۳ مدل‌سازی به کمک مدار معادل مغناطیسی

اگرچه برخی از مراجع شارهای ناشی را در الگوریتم‌های طراحی خود در نظر گرفته‌اند اما بررسی‌های ما نشان می‌دهد که رابطه تحلیلی برای محاسبه شارهای ناشی ارائه نکرده‌اند [۲]، [۷]، [۱۷] و [۴۴]. به کمک روش‌های مختلفی از قبیل روش‌های تحلیلی، روش‌های اجزاء محدود دو بعدی و سه بعدی و روش مدار معادل مغناطیسی می‌توان شارهای ناشی را محاسبه کرد. در مراجع معمولاً از روش اجزاء

محدود برای محاسبه شارهای ناشی استفاده کرده‌اند. شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود دو بعدی در قطر متوسط ماشین انجام می‌شود که این کار باعث کاهش دقت نتایج می‌گردد. در شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود سه بعدی شارهای ناشی با دقت بالایی محاسبه می‌شوند اما این روش زمانبر می‌باشد و بدلیل زیاد بودن حجم محاسبات نیاز به رایانه با حافظه بالایی دارد [۴۵]. در روش مدار معادل مغناطیسی مصالحه‌ای بین زمان محاسبات و دقت نتایج وجود دارد [۴۶] و [۴۷]. در این روش می‌توان شارهای ناشی را در بخش‌های مختلف ماشین بدست آورد.

شارهای ناشی در ماشین آهنربای دائم شامل شار ناشی بین دو آهنربای مجاور (دو قطب)، شار ناشی بین آهنربا و هسته روتور در لبه داخلی آهنربا، شار ناشی بین آهنربا و هسته روتور در قطر داخلی آهنربا و شار ناشی بین آهنربا و هسته روتور در قطر خارجی آهنربا می‌باشد [۴۶]، [۴۸] و [۴۹]. شارهای ناشی تاثیر بسزایی بر روی چگالی شار فاصله هوایی و در نتیجه گشتاور ماشین دارند. بنابراین ضروری است که روابطی برای محاسبه شارهای ناشی بر حسب ابعاد ماشین استخراج شود. در [۴۶] یک مدار معادل مغناطیسی برای ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون هسته با آرمیچر بخش‌بخش پیشنهاد شده است. در این مدار معادل رلوکتانس آهنربا، رلوکتانس فاصله هوایی و نشت شار بین دو قطب در نظر گرفته شده است. سپس با استفاده از این مدار معادل مغناطیسی و یک الگوریتم پیشنهادی چگالی شار فاصله هوایی، ولتاژ القایی و مقدار متوسط گشتاور ماشین محاسبه شده است. در این مرجع از شارهای ناشی بین آهنربا و هسته روتور صرف‌نظر شده است. در [۴۸] شار ناشی فاصله هوایی و شار ناشی زیگزاگ در یک ماشین آهنربای دائم با آهنرباهای سطحی مدل شده است. در شکل (۲-۲) شارهای ناشی زیگزاگ نشان داده شده‌اند. در این مرجع شارهای ناشی فاصله هوایی و شار ناشی زیگزاگ برای یک ماشین نمونه با استفاده از مدل تحلیلی پیشنهادی و تحلیل اجزاء محدود دو بعدی محاسبه و سپس نتایج با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در این مرجع از شارهای ناشی بین آهنربا و هسته روتور در قطرهای خارجی و داخلی آهنربا صرف‌نظر شده است. همچنین مسیر شاری که در این مرجع برای شار ناشی بین آهنربا و آهن روتور در لبه داخلی آهنربا فرض شده است خیلی دقیق نمی‌باشد.



شکل (۲-۲) - شارهای نشتی زیگزاگ در یک ماشین آهنربای دائم (الف) شار نشتی اتصال کوتاه شده توسط یک دندانه

(ب) شار نشتی پیوندی با بخشی از سیم‌پیچی یک فاز (ج) شار نشتی بین دو دندانه [۴۸]

در [۴۹] مدار معادلی برای یک ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار با سیم‌پیچی تروئیدال ارائه شده است که در آن رلوکتانس مسیر نشت شار بین آهنربا و آهن روتور در لبه داخلی و قطرهای داخلی و خارجی آهنربا در نظر گرفته شده است اما از شکستگی شار صرف‌نظر شده است. در [۵۰] یک مدار معادل مغناطیسی برای ژنراتور آهنربای دائم شار محوری بدون هسته ارائه شده است. در این مرجع نیز شکستگی شار در نظر گرفته نشده است. در [۵۱] به مدلسازی و طراحی یک موتور آهنربای دائم شار محوری بدون هسته پرداخته شده است. در این مرجع مدار معادلی برای موتور مورد مطالعه پیشنهاد شده است. سپس به کمک این مدار معادل پیشنهادی چگالی شار مغناطیسی را در بخش‌های مختلف محاسبه کرده و در روابط طراحی ماشین استفاده کرده است. در این مدار معادل مغناطیسی از شارهای نشتی بین آهنربا و هسته روتور در لبه‌های مختلف آهنربا صرف‌نظر شده است. در [۵۲] روشی برای محاسبه چگالی شار بخش‌های مختلف یک ماشین آهنربای دائم شار محوری شیاردار ارائه شده است. در این روش به کمک معادلات ماکسول منابع شار مدل شده است. همچنین هر یک از بخش‌های ماشین با یک رلوکتانس مدل شده است. بعد از محاسبه تمام رلوکتانس‌ها و منابع شار، چگالی شار در بخش‌های مختلف با استفاده از قوانین کیرشهف بدست می‌آید. در این مرجع از شکستگی شار و شارهای نشتی بین

آهنربا و هسته روتور صرفنظر شده است. در [۵۳] مدار معادلی برای موتور آهنربای دائم شار محوری که هسته آن از پودر مغناطیسی (SMC)^۱ ساخته شده، پیشنهاد شده است. در این مرجع شارهای ناشی بین آهنرباهای مجاور، شکستگی شار و شار ناشی بین آهنربا و هسته روتور در نظر گرفته نشده است. در [۵۴] مدار معادلی برای یک موتور آهنربای دائم با آهنرباهای سطحی پیشنهاد شده است. در این مدار معادل از شارهای ناشی بین آهنربا و هسته روتور در قطره‌های داخلی و خارجی آهنربا و همچنین از شکستگی شار صرفنظر شده است. به منظور مقایسه بهتر، کارهای انجام شده در مراجع مربوطه و نواقص آنها در جدول (۲-۲) ارائه شده است.

جدول (۲-۲)- بررسی مطالعات انجام شده در زمینه مدار معادل مغناطیسی ماشین آهنربای دائم شار محوری و

استخراج نواقص آنها

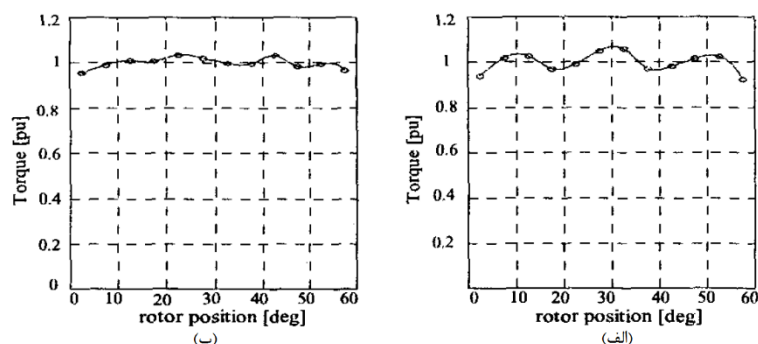
شماره مرجع	سال انتشار	مطالعه انجام شده	نواقص
۴۶	۲۰۱۴	ارائه مدار معادل مغناطیسی برای ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون هسته با آرمیچر بخش‌بخش	صرفنظر کردن از شارهای ناشی بین آهنربا و هسته روتور
۴۸	۲۰۰۴	محاسبه شار ناشی فاصله هوایی و شار ناشی زیگزاگ در یک ماشین آهنربای دائم با آهنرباهای سطحی	صرفنظر کردن از شارهای ناشی بین آهنربا و هسته روتور در قطره‌های خارجی و داخلی آهنربا، دقیق نبودن مسیر در نظر گرفته شده برای شار ناشی بین آهنربا و آهن روتور در لبه داخلی آهنربا
۴۹	۱۹۹۵	ارائه مدار معادلی برای ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار با سیم-پیچی تروئیدال	صرفنظر کردن از شکستگی شار
۵۰	۲۰۱۶	ارائه مدار معادل مغناطیسی برای ژنراتور آهنربای دائم شار محوری بدون هسته	صرفنظر کردن از شکستگی شار
۵۱	۲۰۱۶	ارائه مدار معادل مغناطیسی برای موتور آهنربای دائم شار محوری بدون هسته و محاسبه چگالی شار مغناطیسی در بخش‌های مختلف موتور	صرفنظر کردن از شارهای ناشی بین آهنربا و هسته روتور در لبه‌های مختلف آهنربا

¹ Soft Magnetic Composite

۵۲	۲۰۱۴	ترکیب معادلات ماکسول و مدار معادل مغناطیسی برای محاسبه چگالی شار در بخش‌های مختلف یک ماشین آهنربای دائم شار محوری شیاردار	صرفنظر کردن از شکستگی شار و شارهای نشستی بین آهنربا و هسته روتور
۵۳	۲۰۱۴	ارائه مدار معادلی برای موتور آهنربای دائم شار محوری با هسته ساخته شده از پودر مغناطیسی	صرفنظر کردن از شارهای نشستی بین آهنربا-های مجاور، شکستگی شار و شار نشستی بین آهنربا و هسته روتور
۵۴	۲۰۱۵	ارائه مدار معادلی برای یک موتور آهنربای دائم با آهنرباهای سطحی	صرفنظر کردن از شارهای نشستی بین آهنربا و هسته روتور در قطرهای داخلی و خارجی آهنربا و همچنین شکستگی شار

۲-۴ بهبود مشخصه‌های عملکردی

تاکنون در مراجع روش‌های مختلفی برای بهبود مشخصات عملکردی ماشین‌های آهنربای دائم بخصوص شکل موج ولتاژ القایی و گشتاور ماشین پیشنهاد شده است. در [۱۰] از روش مورب کردن آهنرباهای دائم برای کاهش ریزل گشتاور یک ماشین آهنربای دائم شار محوری شیاردار استفاده کرده است. در شکل (۲-۳) گشتاور ماشین برای ساختار متداول و ساختار با آهنرباهای مورب نشان داده شده است. در این مرجع به کمک مورب کردن آهنرباهای روتور ریزل گشتاور ماشین از ۰/۱۲٪ پریونیت به ۰/۰۴۶٪ پریونیت کاهش پیدا کرده است.

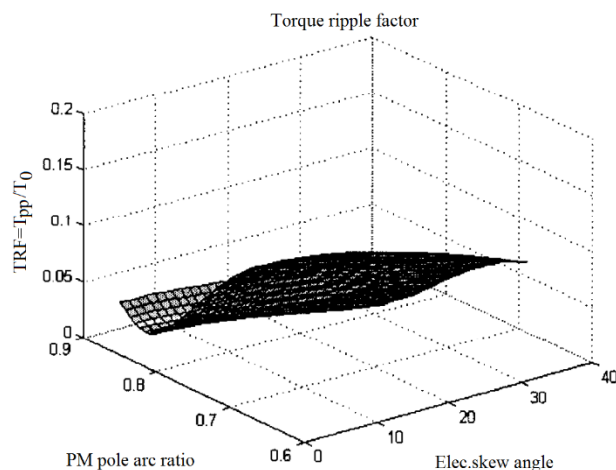


شکل (۲-۳) - گشتاور ماشین آهنربای دائم شار محوری شیاردار (الف) ساختار متداول (ب) ساختار با آهنرباهای مورب

[۱۰]

در [۸] از ترکیب روش مورب کردن آهنرباهای روتور و تغییر نسبت قوس قطب به گام قطب برای کاهش ریزل گشتاور یک ماشین آهنربای دائم شار محوری شیاردار استفاده شده است. در شکل (۲-۴) تاثیر

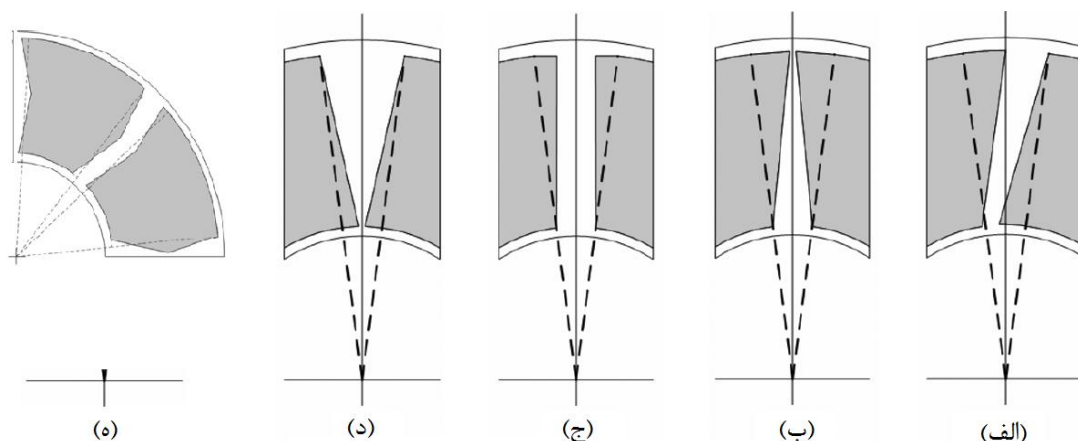
این دو پارامتر بر روی رپل گشتاور ماشین نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می شود به ازای مورب کردن آهنرباها به اندازه ۳۰ درجه و انتخاب نسبت قوس قطب به گام قطب برابر با ۰/۸ نسبت رپل گشتاور ماشین به مقدار متوسط آن حداقل می شود.



شکل (۲-۴) - تغییرات نسبت رپل گشتاور ماشین به مقدار متوسط آن بر حسب زاویه مورب کردن و نسبت قوس

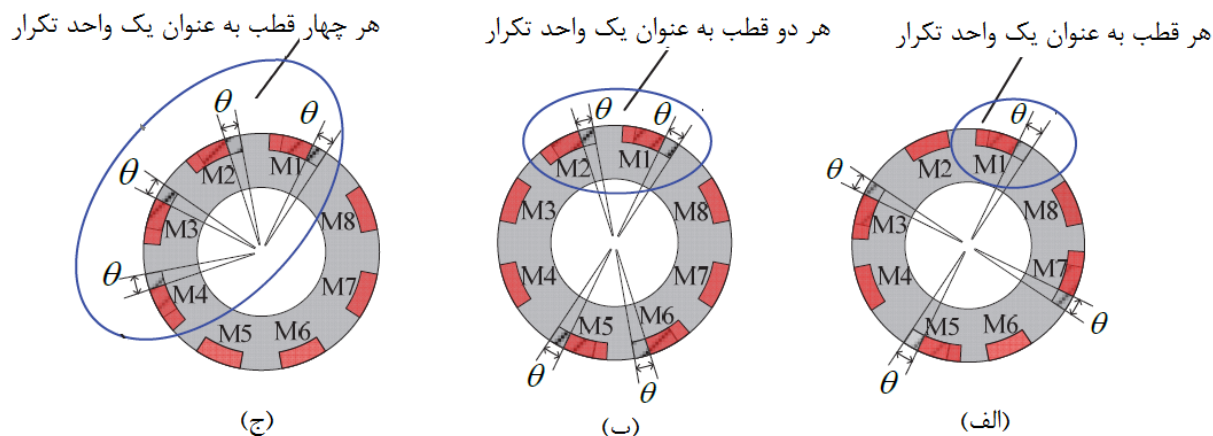
قطب به گام قطب [۸]

در [۲۴] به بررسی تاثیر روش های مختلف مورب کردن آهنرباهای روتور بر روی گشتاور دندانه ای یک ماشین آهنربای دائم شار محوری پرداخته شده است. مطابق شکل (۵-۲) در این مرجع از چهار روش مختلف برای مورب کردن آهنرباهای دائم استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان می دهد که به کمک مورب کردن به روش مثلثی گشتاور دندانه ای ماشین حدود ۸۴٪ کاهش پیدا می کند. در روش وجه موازی گشتاور دندانه ای ۳۴٪ و در روش دوزنقه ای ۶۲٪ کاهش پیدا می کند. همچنین در صورت مورب کردن آهنرباهای روتور بصورت دو طرفه گشتاور دندانه ای حدود ۶۳٪ کاهش پیدا می کند.



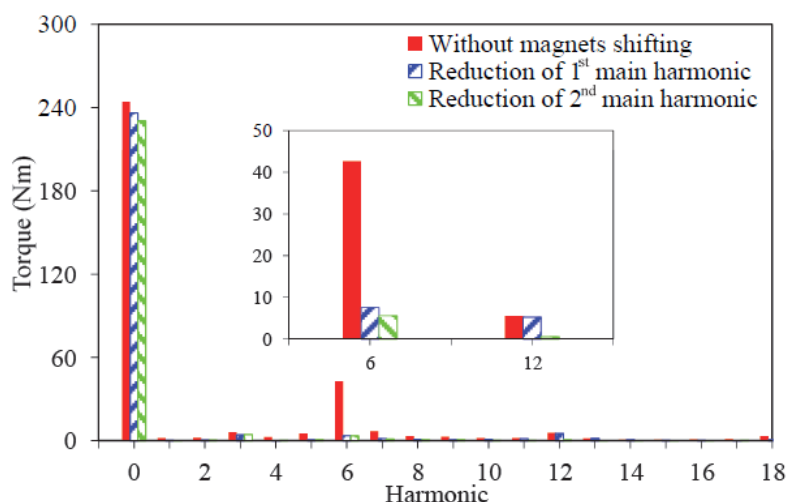
شکل (۲-۵) - روش‌های مختلف مورب کردن آهنرباهای روتور (الف) روش متداول (ب) بصورت مثلثی (ج) بصورت وجه موازی (د) بصورت دوزنقه‌ای (ه) بصورت دو طرفه [۲۴]

شیفت دادن آهنرباهای روتور یکی از روش‌های موثری است که در چندین مرجع برای کاهش هارمونیک‌های ولتاژ القایی و ریپل گشتاور ماشین‌های آهنربای دائم ارائه شده است. در [۵۵] با گروه-بندی آهنرباهای روتور اثر شیفت دادن آهنربا بر روی ولتاژ القایی و ریپل گشتاور یک ماشین آهنربای دائم داخلی بررسی شده است. در این مرجع مطابق شکل (۶-۲) سه نوع گروه‌بندی بصورت هر قطب بعنوان یک واحد تکرار، هر دو قطب بعنوان یک واحد تکرار و هر چهار قطب بعنوان یک واحد تکرار در نظر گرفته شده است. مقایسه بین نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که انتخاب هر دو قطب بعنوان یک واحد تکرار منجر به دستیابی به بهترین نتیجه می‌شود. در شکل (۷-۲) هارمونیک‌های گشتاور ماشین در حالت بدون شیفت و در حالتی که هر دو قطب به عنوان یک واحد تکرار شیفت داده شده‌اند نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود هارمونیک‌های گشتاور ماشین با آهنرباهای شیفت یافته کاهش پیدا کرده‌اند. همچنین زاویه شیفت نیز تاثیر بسزائی بر روی مقدار هارمونیک‌های گشتاور دارد.



شکل (۲-۶) - گروه‌بندی آهنرباهای روتور (الف) هر قطب به عنوان یک واحد تکرار (ب) هر دو قطب به عنوان یک واحد تکرار (ج) هر چهار قطب به عنوان یک واحد

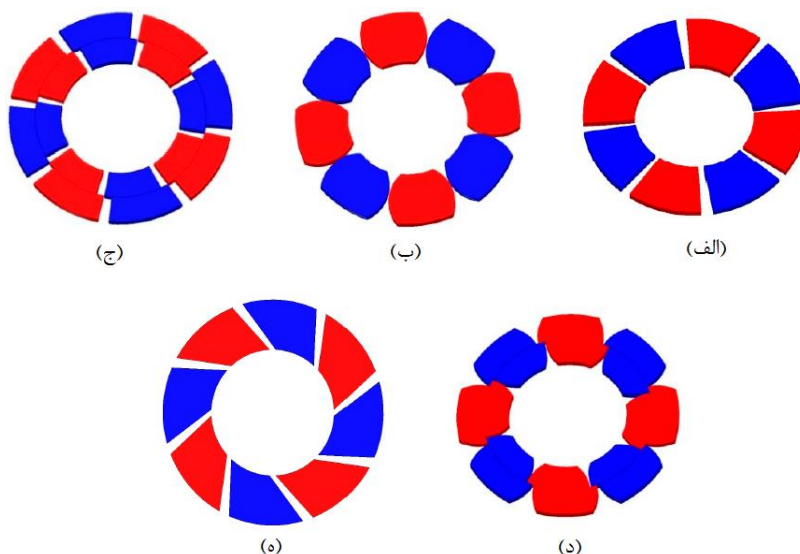
تکرار (ج) هر چهار قطب به عنوان یک واحد تکرار [۵۵]



شکل (۲-۷) - تحلیل هارمونیک گشتاور ماشین با آهنرباهای بدون شیف و شیف یافته [۵۵]

در [۵۶] گشتاور دندانه‌ای و هارمونیک‌های ولتاژ القایی یک ماشین آهنربای دائم شار شعاعی به کمک روش‌های شیف دادن آهنربا و بهینه‌سازی قوس آهنربا کاهش داده شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که THD ولتاژ القایی حدود ۴٪ کاهش پیدا می‌کند در صورتی که دامنه آن با تغییر ابعاد آهنربا ثابت می‌ماند. در [۵۷] اثر شیف دادن آهنربا بر روی هارمونیک‌های ولتاژ القایی و رپل نیروی یک موتور آهنربای دائم خطی با آهنرباهای داخلی و سطحی بررسی شده است. با توجه به نتایج ارائه شده رپل نیرو برای موتورهای ۴ قطب، ۶ قطب و ۸ قطب به ترتیب ۶۵٪/۶۰٪، ۸۰٪ و ۹۰٪ کاهش پیدا کرده است. در [۵۸] اثر شیف دادن آهنرباها و تعداد آنها بر روی گشتاور دندانه‌ای یک ژنراتور آهنربای دائم

بررسی شده است. همچنین مقدار بهینه تعداد آهنرباها نیز برای ماشین مورد مطالعه تعیین شده است. در [۵۹] تاثیر عرض آهنربا و شیفت دادن جفت قطبها بر روی گشتاور دندانه‌ای و ریپل گشتاور ناشی از کموتاسیون در یک ماشین آهنربای دائم شار شعاعی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که تغییر عرض آهنربا نمی‌تواند گشتاور دندانه‌ای و ریپل گشتاور ناشی از کموتاسیون را با هم کاهش دهد. اما می‌توان هر دوی آنها را با استفاده از ترکیب دو روش تغییر عرض آهنربا و شیفت دادن جفت قطبها کاهش داد. در [۶۰] به بررسی تاثیر مورب کردن، گروه‌بندی و شیفت دادن آهنرباهای روتور بر روی گشتاور دندانه‌ای یک موتور آهنربای دائم شار محوری دوطرفه شیاردار پرداخته شده است. در این مرجع یک موتور نمونه با ساختار متداول، با آهنرباهای مورب و با آهنرباهای شیفت یافته به کمک روش اجزاء محدود سه بعدی شبیه‌سازی شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مقدار گشتاور دندانه‌ای موتور با ساختار متداول تقریباً برابر با موتور با آهنرباهای مورب مثلثی شکل می‌باشد اما به کمک گروه‌بندی و شیفت دادن آهنرباها ریپل گشتاور در مقایسه با ساختار متداول حدود ۹۷/۵٪ کاهش پیدا می‌کند. در [۶۱] به کمک شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود اثر شکل هندسی آهنرباهای دائم روتور بر روی ریپل گشتاور یک ماشین آهنربای دائم شار محوری شیاردار مطالعه شده است. در شکل (۸-۲) ساختارهای در نظر گرفته شده برای آهنرباهای روتور نشان داده شده است. در جدول (۳-۲) نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی ارائه شده است. چنانچه مشاهده می‌شود ریپل گشتاور ماشین در حالتی که آهنرباهای روتور نسبت به یکدیگر شیفت داده شده‌اند نسبت به سایر روش‌ها کمتر می‌باشد. همچنین به کمک نرم‌افزار اجزاء محدود مقدار بهینه زاویه شیفت برای حداقل کردن ریپل گشتاور مشخص شده است.



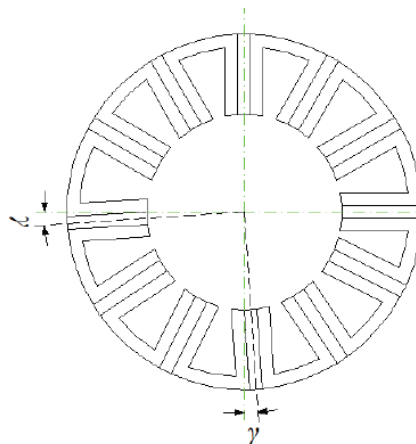
شکل (۸-۲) - شکل‌های هندسی مختلف در نظر گرفته شده برای آهنرباهای روتور [۶۱]

جدول (۳-۲) - ریپل گشتاور ماشین به ازای آهنرباها با شکل‌های هندسی مختلف [۶۱]

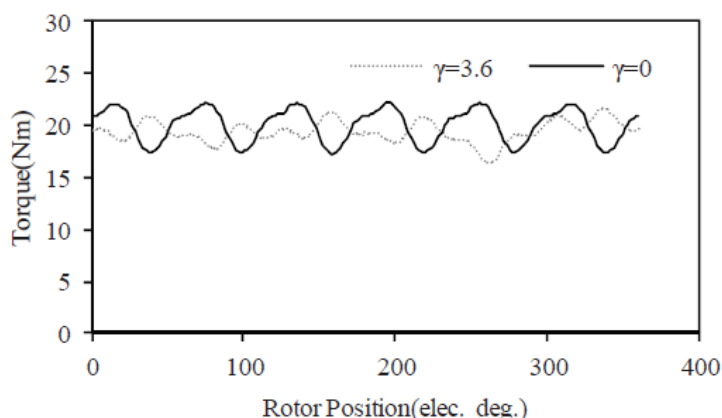
ریپل گشتاور (%)	ساختار
۵/۷۴	(الف)
۳/۹۳	(ب)
۲/۱۵	(ج)
۵/۴۵	(د)
۳/۲۶	(ه)

در [۶۲] با انتخاب صحیح مقدار عرض آهنربا و تعداد شیارهای بر فاز بر قطب یک ماشین آهنربای دائم با آهنرباهای سطحی، مقدار THD ولتاژ القایی از ۴/۸٪ به ۰/۰۲۷٪ کاهش پیدا کرده است. در [۶۳] با معرفی ساختار دندانه‌های استاتور نامتقارن در یک ماشین آهنربای دائم با آهنرباهای داخلی مقدار THD ولتاژ القایی حدود ۷۰٪ نسبت به ماشین با دندانه‌های استاتور متقارن کاهش پیدا کرده است. در [۶۴] تاثیر ارتفاع کمان دهانه شیار یک ماشین آهنربای دائم بر روی هارمونیک‌های ولتاژ القایی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که با طراحی بهینه ارتفاع کمان دهانه شیار مقدار THD ولتاژ القایی از ۱۳/۵٪ به ۵/۶۹٪ کاهش پیدا می‌کند. در [۶۵] روابطی برای مطالعه تاثیر گام کلاف و ترکیب شیار-قطب بر

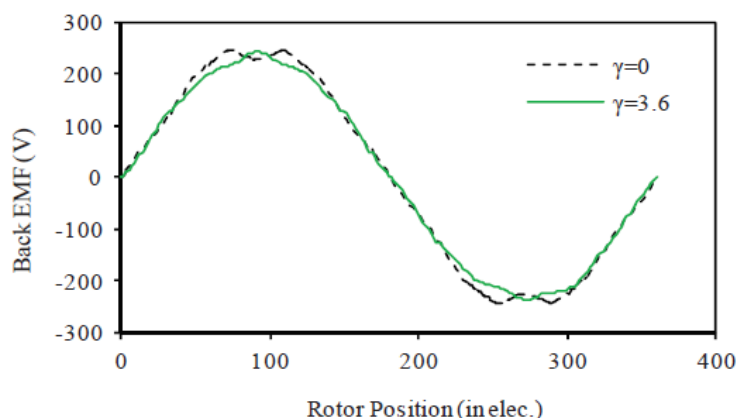
روی هارمونیک‌های ولتاژ القایی یک ماشین آهنربای دائم شار برگشتی استخراج شده است. دقت روابط بدست آمده به کمک شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود بررسی شده است. سپس مقدار بهینه گام کلاف برای حداکثر کردن هارمونیک اول ولتاژ القایی محاسبه شده است. در [۶۶] برای کاهش هارمونیک‌های ولتاژ القایی یک ماشین آهنربای دائم داخلی ساختار جدیدی با روتور $\nabla+U$ شکل پیشنهاد شده است. همچنین ولتاژ القایی این نوع ساختار با ماشین آهنربای دائم داخلی با روتورهای V و ∇ شکل مقایسه شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که چگالی شار فاصله هوایی و ولتاژ القایی ساختار $\nabla+U$ شکل سینوسی‌تر می‌باشد. در [۶۷] با استفاده از روش شیفت دادن دندانه‌های استاتور مقدار THD ولتاژ القایی و رپل گشتاور یک ماشین آهنربای دائم شار سوئیچینگ بهبود داده شده است. برای این منظور مطابق شکل (۲-۹) دندانه استاتور به اندازه زاویه γ شیفت داده می‌شود. در شکل (۲-۱۰) گشتاور ماشین در دو حالت بدون شیفت و شیفت یافته نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود شیفت دادن دندانه‌های استاتور باعث کاهش رپل گشتاور ماشین شده است. همچنین در شکل (۲-۱۱) ولتاژ القایی ماشین نشان داده شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که در اثر شیفت دادن دندانه‌های استاتور THD ولتاژ القایی از ۵/۲۱٪ به ۲/۷۱٪ کاهش داده شده است.



شکل (۲-۹) - شیفت دادن دندانه‌های استاتور [۶۷]



شکل (۲-۱۰)- تاثیر شیفیت دادن دندانه‌های استاتور بر روی شکل موج گشتاور ماشین [۶۷]



شکل (۲-۱۱)- تاثیر شیفیت دادن دندانه‌های استاتور بر روی شکل موج ولتاژ القایی ماشین [۶۷]

در [۶۸] آهنرباهای دائم یک موتور آهنربای دائم سطحی در راستای محور ماشین به دو بخش تقسیم شده است. سپس از طریق شیفیت دادن یکی از بخش‌ها نسبت به بخش دیگر مقدار THD ولتاژ القایی حدود ۶۸٪ کاهش داده شده است. در [۶۹] سیم‌پیچی‌های استاتور یک ژنراتور آهنربای دائم شار محوری بدون هسته به ازای زوایای مختلف شیفیت داده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که مقدار موثر ولتاژ القایی با افزایش زاویه شیفیت کاهش پیدا می‌کند. در [۷۰] دیسک‌های استاتور یک ماشین آهنربای دائم شار محوری شیاردار دو طرفه با دو دیسک استاتور و یک دیسک روتور نسبت به یکدیگر شیفیت داده شده‌اند. بررسی نتایج نشان می‌دهد که ولتاژ القایی ماشین با استاتور شیفیت یافته نسبت به ماشین متداول سینوسی‌تر می‌باشد. در [۷۱] دیسک‌های روتور یک ماشین آهنربای دائم شار محوری شیاردار دو طرفه نسبت به یکدیگر شیفیت داده شده‌اند. بررسی نتایج نشان می‌دهد که شیفیت دادن روتور باعث کاهش

هارمونیک‌های سوم و پنجم ولتاژ القایی ماشین شده است. به منظور بررسی بهتر، در جدول (۴-۲) مطالعات انجام شده و نواقص مقالات بررسی شده ارائه شده است.

جدول (۴-۲)- بررسی مطالعات انجام شده در زمینه بهبود مشخصات عملکردی ماشین آهنربای دائم شار محوری و

استخراج نواقص آنها

شماره مرجع	سال انتشار	مطالعه انجام شده	نواقص
۱۰	۲۰۰۱	کاهش ریپل گشتاور یک ماشین آهنربای دائم شار محوری شیاردار به کمک مورب کردن آهنرباهای دائم	عدم ارائه رابطه تحلیلی برای محاسبه مقدار بهینه زاویه مورب کردن آهنرباها
۸	۲۰۰۰	حداقل کردن نسبت ریپل گشتاور به مقدار متوسط آن در یک ماشین آهنربای دائم شار محوری با ترکیب روش مورب کردن آهنرباهای روتور و تغییر نسبت قوس قطب به گام قطب	عدم ارائه رابطه تحلیلی برای تعیین مقدار بهینه زاویه مورب کردن و نسبت قوس قطب به گام قطب
۲۴	۲۰۰۷	بررسی تاثیر روش‌های مختلف مورب کردن آهنرباهای روتور شامل روش مثلثی، وجه موازی، دوزنقه‌ای و روش مورب کردن دو طرفه بر روی گشتاور دندانه‌ای یک ماشین آهنربای دائم شار محوری	عدم ارائه رابطه تحلیلی برای نشان دادن ارتباط بین زاویه مورب کردن و گشتاور دندانه‌ای در روش‌های مورب کردن پیشنهادی
۵۵	۲۰۱۶	بررسی تاثیر روش‌های مختلف گروه‌بندی و شیفت دادن آهنرباهای روتور بر روی ولتاژ القایی و ریپل گشتاور یک ماشین آهنربای دائم داخلی	عدم ارائه رابطه تحلیلی برای محاسبه ولتاژ القایی ماشین با آهنرباهای شیفت یافته، عدم ارائه رابطه‌ای برای تعیین مقدار بهینه زاویه شیفت آهنرباها
۵۶	۲۰۰۷	کاهش گشتاور دندانه‌ای و هارمونیک‌های ولتاژ القایی یک ماشین آهنربای دائم شار شعاعی به کمک روش‌های شیفت دادن آهنربا و تغییر قوس آهنربا	عدم ارائه رابطه تحلیلی برای محاسبه ولتاژ القایی ماشین با آهنرباهای شیفت یافته، عدم ارائه رابطه‌ای برای تعیین مقدار بهینه زاویه شیفت آهنرباها
۵۸	۲۰۱۷	بررسی اثر شیفت دادن آهنرباها و تعداد آنها بر روی گشتاور دندانه‌ای یک ژنراتور آهنربای دائم شار شعاعی، تعیین مقدار بهینه تعداد آهنرباها به کمک شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود	عدم ارائه رابطه تحلیلی برای محاسبه مقدار بهینه زاویه شیفت و تعداد آهنرباهای دائم
۶۰	۲۰۱۲	بررسی تاثیر مورب کردن، گروه‌بندی و شیفت دادن آهنرباهای روتور بر روی گشتاور دندانه‌ای یک موتور آهنربای دائم شار محوری دوطرفه شیاردار به کمک شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود سه بعدی	عدم ارائه روابط تحلیلی برای بررسی تاثیر مقدار مورب کردن و شیفت دادن آهنرباها، عدم تعیین مقدار بهینه زاویه مورب کردن و شیفت دادن آهنرباها

۶۱	۲۰۱۸	بررسی تاثیر شکل قطب بر روی ریپل گشتاور و ولتاژ القایی یک ماشین آهنربای دائم شار محوری شیاردار به کمک شبیه سازی به روش اجزاء محدود	عدم ارائه روابط تحلیلی برای محاسبه ولتاژ القایی ماشین به ازای شکل قطب های مختلف، عدم ارائه روابط تحلیلی برای تعیین مقدار بهینه زاویه شیفیت آهنربا
۶۳	۲۰۱۷	کاهش THD ولتاژ القایی یک ماشین آهنربای دائم با آهنرباهای داخلی به کمک دندانه های استاتور نامتقارن	عدم ارائه روابط تحلیلی برای محاسبه ولتاژ القایی ماشین با دندانه های نامتقارن
۶۷	۲۰۱۶	کاهش مقدار THD ولتاژ القایی و ریپل گشتاور یک ماشین آهنربای دائم شار سوئیچینگ با استفاده از روش شیفیت دادن دندانه های استاتور	عدم ارائه رابطه ای تحلیلی برای تعیین مقدار بهینه زاویه شیفیت دندانه های استاتور
۷۰	۲۰۱۳	بررسی تاثیر شیفیت دادن دیسک های استاتور یک ماشین آهنربای دائم شار محوری شیاردار دو طرفه با دو دیسک استاتور و یک دیسک روتور نسبت به یکدیگر بر روی ولتاژ القایی ماشین	عدم ارائه روابط تحلیلی برای محاسبه ولتاژ القایی ماشین و مقدار بهینه زاویه شیفیت استاتور
۷۱	۲۰۰۴	بررسی تاثیر شیفیت دادن دیسک های روتور یک ماشین آهنربای دائم شار محوری شیاردار دو طرفه نسبت به یکدیگر بر روی ولتاژ القایی ماشین	عدم ارائه روابط تحلیلی برای محاسبه ولتاژ القایی ماشین و مقدار بهینه زاویه شیفیت روتور

۲-۵ نتیجه گیری فصل

در این فصل مراجع مختلف مرتبط با موضوع رساله مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور مراجع در سه دسته روابط ابعادی و الگوریتم طراحی، مدلسازی به کمک مدار معادل مغناطیسی و بهبود مشخصه های عملکردی طبقه بندی شد. برخی از نتایج بدست آمده از بررسی مراجع عبارتند از:

- مدار معادل مغناطیسی نسبتاً دقیقی برای ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار که در آن تمام رلوکتانس ها و شارهای ناشی در نظر گرفته شده باشد، وجود ندارد.
- الگوریتم طراحی نسبتاً دقیقی برای طراحی بهینه ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار که مستقل از روش اجزاء محدود تمام ابعاد، پارامترها و مشخصات عملکردی ماشین را مشخص کند، وجود ندارد.

- تاکنون رابطه‌ای تحلیلی برای محاسبه ولتاژ و فرکانس تغذیه در ابتدای فرآیند طراحی ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار ارائه نشده است.

- تاکنون روش شیفت دادن آهنرباهای دائم بر روی ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار اعمال نشده است. همچنین رابطه‌ای برای محاسبه ولتاژ القایی ماشین با آهنرباهای شیفت یافته ارائه نشده است. الگوریتمی هم برای تعیین مقدار بهینه زاویه شیفت آهنربا برای حداقل کردن ریپل گشتاور وجود ندارد.

- تاکنون روش شیفت دادن دیسک‌های روتور بر روی ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار اعمال نشده است. همچنین رابطه تحلیلی برای محاسبه ولتاژ القایی ماشین با روتور شیفت یافته ارائه نشده است. الگوریتم و رابطه‌ای نیز برای تعیین مقدار بهینه زاویه شیفت روتور برای حداقل کردن THD ولتاژ القایی ارائه نشده است.

بنابراین در فصل‌های بعد نواقص مطرح شده بر روی ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار برطرف خواهد شد.

فصل ۳ : استخراج روابط طراحی

والگوریتم طراحی پیشنهادی برای ماشین

آهنربای دائم شار محوری بدون شیار

۳-۱ مقدمه فصل

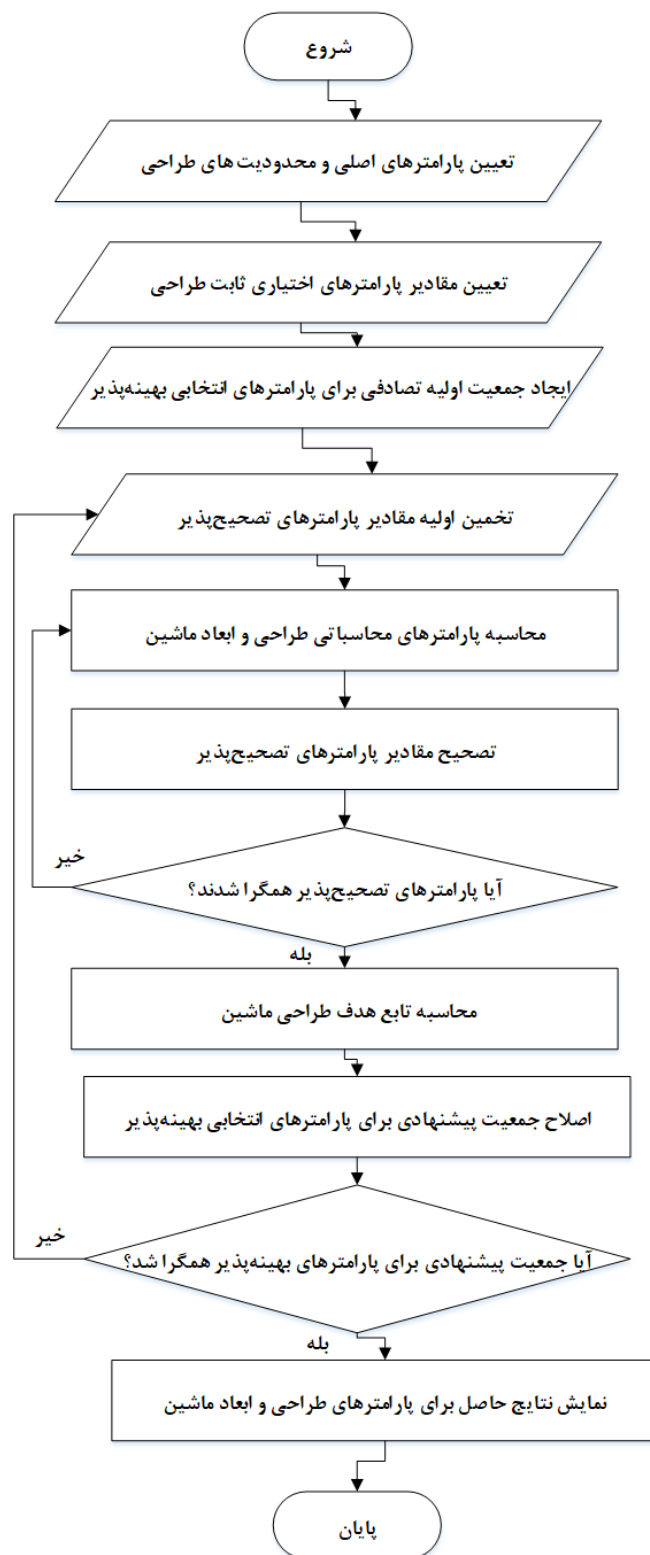
در این فصل ابتدا پارامترهای طراحی ماشین طبقه‌بندی می‌شوند. با توجه به طبقه‌بندی انجام شده نحوه تعیین مقدار هر یک از این پارامترها بطور مفصل شرح داده می‌شود. سپس یک الگوریتم طراحی برای طراحی بهینه ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار پیشنهاد می‌شود. در نهایت به کمک الگوریتم پیشنهادی یک نمونه ماشین طراحی می‌گردد.

۳-۲ فرآیند کلی طراحی ماشین

در ابتدای فرآیند طراحی ماشین معمولاً پارامترهای نامی، خواسته‌های طراحی و محدودیت‌های موجود مشخص می‌شود. همچنین در روند طراحی هر ماشین مجموعه‌ای از متغیرها با مقادیر نامشخص وجود دارد که به عنوان پارامترهای طراحی ماشین نامیده می‌شود. از آنجاییکه در فرآیند طراحی همیشه تعداد مجهولات از معادلات بیشتر است، برخی از پارامترها تحت عنوان پارامترهای اختیاری مشخص می‌شوند و مقدار سایر پارامترها با توجه به پارامترهای اختیاری محاسبه می‌گردند. بنابراین پس از مشخص شدن مقادیر پارامترهای نامی و محدودیت‌ها باید مقادیر پارامترهای اختیاری به صورت مستقل از سایر پارامترها تعیین شود. تعیین بهینه مقدار پارامترهای اختیاری همیشه یکی از موارد مهم در فرآیند طراحی ماشین می‌باشد. مقدار پارامترهای اختیاری باید طوری انتخاب شود که خواسته‌های اصلی و محدودیت‌های طراحی و مقدار بهینه تابع هدف طراحی ماشین را برآورده کند. با توجه به توضیحات ارائه شده فرآیند طراحی ماشین مورد مطالعه به صورت یک مسئله بهینه‌سازی با تابع هدف و محدودیت‌های مشخص در نظر گرفته می‌شود که در این فرآیند بهینه‌سازی پارامترهای اختیاری به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری می‌باشند. برای این منظور پارامترهای اختیاری ماشین به سه دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول پارامترهای اختیاری هستند که مقدار آنها بدون نیاز به الگوریتم بهینه‌سازی و تنها بر مبنای دانش قبلی مشخص می‌شود و این مقدار تا پایان فرآیند طراحی ثابت می‌باشد. این دسته از

پارامترهای اختیاری به عنوان پارامترهای اختیاری ثابت نامگذاری می‌شوند. دسته دوم شامل پارامترهایی هستند که مقدار آنها در ابتدای فرآیند طراحی نامشخص می‌باشد. بنابراین برای شروع فرآیند طراحی مقداری برای آنها انتخاب شده و مقادیر واقعی آنها در طول فرآیند طراحی محاسبه می‌شود. این دسته تحت عنوان پارامترهای تصحیح‌پذیر نامگذاری می‌شوند. ضریب نشت، ضریب قدرت و ... جزء پارامترهای اختیاری تصحیح‌پذیر می‌باشد. سایر پارامترهای اختیاری تحت عنوان پارامترهای اختیاری بهینه‌پذیر شناخته می‌شوند و مقدار آنها توسط الگوریتم بهینه‌سازی گروهی ذرات (PSO)¹ تعیین می‌گردد. در مرحله بعد به کمک روابط طراحی در دسترس مقدار پارامترهای محاسباتی محاسبه می‌شود. پس از تعیین همه متغیرهای طراحی ممکن است که مقدار اولیه فرض شده برای پارامترهای تصحیح‌پذیر نیاز به اصلاح داشته باشد. بنابراین مقدار این پارامترها در صورت لزوم اصلاح شده و مجدداً با توجه به مقادیر تصحیح شده جدید محاسبات طراحی تکرار می‌گردد. این فرآیند تا آنجا ادامه می‌یابد که درصد تغییرات مقادیر متغیرهای تصحیح‌پذیر در دو تکرار متوالی از عدد ثابتی کوچکتر گردد. در شکل (۱-۳) فلوچارت پیشنهادی برای طراحی ماشین مورد مطالعه نشان داده شده است. در بخش‌های بعد مشخصات نامی و محدودیت‌های طراحی ماشین مورد مطالعه تعیین می‌گردد. سپس روابط طراحی مورد استفاده ارائه شده و به کمک این روابط و بر اساس فلوچارت نشان داده شده ماشین مورد مطالعه طراحی می‌شود.

¹ Particle Swarm Optimization



شکل (۳-۱) - فلوچارت فرآیند طراحی ماشین

۳-۳ پارامترهای نامی و محدودیت‌های طراحی

ماشین مورد نظر برای طراحی در این رساله یک ماشین با کاربرد در سیستم حمل و نقل است. مشخصات

نامی و محدودیت‌های طراحی این ماشین که توسط کارفرما مشخص شده‌اند به شرح زیر می‌باشد:

- سرعت چرخش نامی موتور بر حسب دور بر دقیقه ۱۴۰۰ rpm
- توان خروجی (مکانیکی) کل ۳/۷ kW
- محدودیت حداکثر سطح ولتاژ بانک باتری (ورودی درایو ماشین) ۳۳۰ V
- محدودیت حداقل سطح ولتاژ بانک باتری (ورودی درایو ماشین) ۲۷۰ V
- محدودیت حداکثر قطر خارجی ماشین ۳۳۰ mm
- محدودیت حداکثر طول محوری ماشین ۱۴۰ mm
- محدودیت در حداقل بازده ماشین ۹۴ %
- دمای محیط کار ماشین ۵۵ °C

۳-۴ پارامترهای انتخابی ثابت

۳-۴-۱ تعداد فازها

موتور طراحی شده در این رساله توسط یک منبع تغذیه اینورتری تغذیه می‌شود. بنابراین تعداد فازهای موتور می‌تواند اختیاری باشد. اما به دلیل استفاده از استانداردهای موجود طراحی، ساخت، بهره‌برداری و حفاظت موتورهای صنعتی سه فاز، موتور مورد نظر بصورت سه فاز طراحی می‌شود.

۳-۴-۲ نوع اتصال سیم‌پیچی‌های استاتور

اتصال سیم‌پیچی استاتور می‌تواند بصورت ستاره و یا مثلث انتخاب شود. اما باید توجه کرد که نوع اتصال سیم‌پیچی‌های استاتور تأثیر چشمگیری بر روی ابعاد کلی موتور ندارد. اگر نوع اتصال سیم‌پیچی‌های استاتور بصورت ستاره انتخاب شود دامنه ولتاژ اعمال شده به هر یک از سیم‌پیچی‌های استاتور کاهش

پیدا می‌کند اما جریانی که از سیم‌پیچی‌های هر فاز می‌گذرد افزایش می‌یابد. اگر ولتاژ اعمال شده به سیم‌پیچی‌ها کاهش یابد ولتاژ القایی و در نتیجه تعداد دور سیم‌پیچی کاهش می‌یابد. کاهش تعداد دور سیم‌پیچی سبب کاهش ضخامت سیم‌پیچی می‌شود. اما با افزایش جریان عبوری از سیم‌پیچی قطر سیم و در نتیجه ضخامت سیم‌پیچی افزایش می‌یابد. بنابراین در کل می‌توان گفت که نحوه اتصال سیم‌پیچی استاتور تاثیر چندانی بر ضخامت سیم‌پیچی و سایر ابعاد موتور ندارد. با توجه به مطالب ارائه شده نوع اتصال سیم‌پیچی‌های استاتور بصورت ستاره در نظر گرفته می‌شود.

۳-۴-۳ حداکثر ولتاژ موثر هر فاز موتور

در این رساله مقدار مشخصی برای ولتاژ تغذیه موتور تعیین نشده است. بنابراین ولتاژ ترمینال ورودی موتور با در نظر گرفتن سایر محدودیت‌های طراحی مشخص می‌شود. برای این منظور باید محدوده تغییرات ولتاژ تغذیه موتور با توجه به سیستم درایو مشخص شود. ملاحظات سیستم درایو به روش کنترل میدان جهتدار (FOC)^۱ عبارتند از:

- بازه مجاز ولتاژ ورودی درایو (لینک DC) V ۲۷۰ تا V ۳۳۰ می‌باشد.
- مقدار دامنه ولتاژ خروجی درایو برابر با نصف مقدار ولتاژ DC ورودی می‌باشد.
- اگر مقدار ولتاژ DC ورودی درایو برابر با دو برابر دامنه ولتاژ AC اسمی خروجی آن و یا بیشتر باشد، سیستم درایو به راحتی می‌تواند دامنه ولتاژ AC اسمی خروجی مورد نیاز را همواره تامین کند.
- با در نظر گرفتن ملاحظات فوق مقدار حداکثر دامنه ولتاژ AC اسمی مناسب برای تغذیه موتور برابر با نصف مقدار حداقل ولتاژ DC ورودی به درایو است. باید توجه کرد که ولتاژ DC باتری هیچگاه از مقدار حداقل آن کمتر نمی‌شود. همچنین اگر ولتاژ DC بیشتر از مقدار حداقل آن باشد دامنه ولتاژ AC خروجی درایو به راحتی در مقدار اسمی خود تنظیم خواهد شد. بنابراین حداکثر مقدار مجاز ولتاژ موثر

¹ Field Oriented Control

فازی نامی تغذیه موتور (۹۵/۴۶ ولت) به عنوان محدوده بالا برای مقدار موثر ولتاژ هر فاز موتور در فرآیند بهینه‌سازی ماشین در نظر گرفته می‌شود.

۳-۴-۴ حداقل ولتاژ موثر هر فاز موتور

در ولتاژهای بسیار پایین جریان عبوری از سیم‌پیچی‌ها بطور قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند. افزایش جریان عبوری از سیم‌پیچی باعث افزایش قطر هادی مورد استفاده می‌شود. با توجه به اینکه سیم‌پیچی موتور بصورت تروئیدال است پیچیدن سیم با قطر زیاد به دور هسته استاتور بسیار مشکل می‌باشد. به همین منظور و برای کم کردن تعداد جستجوی مسئله بهینه‌سازی، مقدار حداقل ولتاژ فاز تغذیه موتور ۷ ولت کمتر از مقدار حداکثر آن در نظر گرفته شده است.

۳-۴-۵ تعداد رشته‌های هر سیم

تعداد رشته‌های هر سیم اثر چشمگیری بر روی ابعاد موتور ندارد. با افزایش تعداد رشته‌های سیم، کل جریان بین رشته‌ها تقسیم شده و مقدار جریان عبوری از هر رشته کاهش می‌یابد. پس افزایش تعداد رشته‌ها منجر به کاهش سطح مقطع هادی‌های هر رشته می‌شود. باید توجه کرد که با افزایش تعداد رشته‌های موازی ممکن است به دلیل افزایش فضای عایقی و یا تهی بین رشته‌ها ضخامت کلی به مقدار بسیار ناچیزی افزایش یابد. بنابراین با افزایش تعداد انشعابات جریان، ضخامت کلی سیم‌پیچی و سایر ابعاد ماشین بطور چشمگیر تغییر نمی‌کند. در واقع، تعداد رشته‌ها تنها با توجه به امکان تهیه هادی مورد نظر از بازار و نیز سهولت سیم‌پیچی تعیین می‌گردد. بنابراین با سطح جریان مورد انتظار و امکان تهیه سیم با سطح مقطع بدست آمده از طراحی، تعداد رشته‌های هر سیم برابر با یک انتخاب می‌شود.

۳-۴-۶ مقاومت ویژه هادی

مقاومت ویژه مس وابسته به دمای آن می باشد بنابراین باید مقدار مقاومت ویژه سیم پیچی ها با توجه به دمای آن محاسبه شود. با توجه به دمای محیط (55°C)، دمای سیم پیچی ها در حدود 70°C در نظر گرفته می شود و مقاومت ویژه مس در دمای 70°C با کمک رابطه (۱-۳) تعیین می گردد. در این رابطه ρ_{cu0} مقاومت ویژه مس در دمای محیط ($\theta_0 = 20^{\circ}\text{C}$) بوده و α_{cu} ضریب دمایی ویژه مس و برابر با $0.0039/^{\circ}\text{C}$ می باشد [۴].

$$\begin{aligned}\rho_{cu} &= \rho_{cu0}(1 + \alpha_{cu}\Delta\theta) = \rho_{cu0}(1 + \alpha_{cu}(\theta - \theta_0)) \\ &= 1.678 \times 10^{-8} (1 + 0.0039 \times (70 - 20)) = 2.0052 \times 10^{-8} \Omega.m\end{aligned}\quad (1-3)$$

۳-۴-۷ ضریب سیم پیچی

استاتور ماشین مورد مطالعه بدون شیار بوده و سیم پیچ بصورت تروئیدال بر روی هسته استاتور پیچیده می شود. به همین دلیل فاصله هوایی موثر ماشین نسبتا بزرگ می باشد. بنابراین در صورت سیم پیچی استاتور با گام کوتاه هارمونیک های ولتاژ و جریان ماشین بطور فاحش کاهش پیدا نمی کند. علاوه بر این سیم پیچی ماشین بصورت گام کسری باعث کاهش هارمونیک اصلی ولتاژ القایی می گردد. بنابراین گام کلاف ماشین مورد مطالعه بصورت کامل و مقدار ضریب سیم پیچی هارمونیک اصلی برابر با یک در نظر گرفته می شود.

۳-۴-۸ ضریب پر شونده گی مس

هنگام سیم پیچی با هادی های با مقطع دایره ای، مقداری فضای بلااستفاده ایجاد می شود. به بیان دیگر در سیم پیچی هادی ها با مقطع دایره ای، فضای سیم پیچی بطور کامل پر نمی شود بلکه محیط اطراف سیم دایره ای بصورت فضای خالی باقی می ماند. در واقع ضریب پر شونده گی مس نشان دهنده میزان استفاده از فضای سیم پیچی توسط هادی ها است. در صورت سیم پیچی با هادی با مقطع تخت تقریبا فضای سیم پیچی بطور کامل پر می شود بنابراین ضریب پر شونده گی مس برای هادی با مقطع تخت

بیشتر از هادی دایره‌ای است و می‌توان مقدار آن را تقریباً برابر با یک در نظر گرفت [۴]. در ساختار مورد مطالعه از هادی با مقطع تخت استفاده می‌شود بنابراین مقدار ضریب پیرشوندگی مس برابر با یک فرض می‌شود.

۳-۴-۹ طول فاصله هوایی

یکی از مهمترین پارامترهای طراحی طول فاصله هوایی می‌باشد که بر روی مشخصه‌های عملکردی ماشین تاثیر بسزائی می‌گذارد. تاکنون توصیه‌های مختلفی برای تعیین فاصله هوایی ماشین‌های استوانه‌ای متداول ارائه شده است. اندازه فاصله هوایی بستگی به ابعاد ماشین، نوع یاتاقان‌ها و تلورانس ساخت دارد. فاصله هوایی یک ماشین القایی و یا سنکرون متداول هم اندازه با موتور مورد طراحی این رساله کمتر از ۱ mm می‌باشد. اما برای ماشین‌های شار محوری به دلیل خاص بودن ساختار آنها توصیه خاصی برای تعیین فاصله هوایی ارائه نشده است. باید توجه کرد که در ماشین‌های آهنربای دائم شار محوری قطر ماشین بسیار بزرگتر از طول آن می‌باشد و نیروهای محوری بین روتور و استاتور باعث لرزش ماشین می‌شوند. بنابراین برای جلوگیری از برخورد روتور و استاتور به یکدیگر به اجبار باید طول فاصله هوایی بزرگتر از معمول در نظر گرفته شود. در ساختار مورد مطالعه که هسته استاتور بدون شیار می‌باشد فضای سیم‌پیچی نیز بخشی از فاصله هوایی موثر می‌باشد. همچنین آهنرباهای دائم قرار گرفته بر روی سطح هسته روتور مانند فاصله هوایی در مقابل عکس‌العمل آرمیچر عمل می‌نمایند. بنابراین در ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار فاصله هوایی موثر بسیار بزرگتر از ماشین‌های استوانه‌ای متداول است [۴]. بطور خلاصه در ساختار مورد مطالعه به غیر از فاصله هوایی فیزیکی بین استاتور و روتور ضخامت قابل توجه سیم‌پیچی و آهنرباهای دائم نیز بخشی از فاصله هوایی موثر ماشین می‌باشد. با در نظر گرفتن مطالب فوق و محدودیت‌های ساخت طول فاصله هوایی ماشین مورد طراحی ۳/۵ mm در نظر گرفته

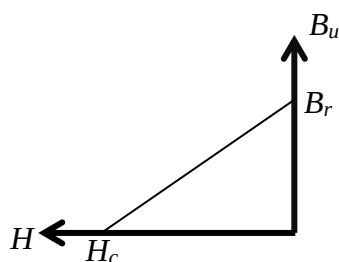
می‌شود. اگرچه فاصله هوایی فیزیکی در نظر گرفته شده در مقایسه با ماشین‌های استوانه‌ای بزرگ می‌باشد ولی این فاصله هوایی نسبتاً بزرگ در مقایسه با فاصله هوایی موثر ماشین مورد مطالعه بسیار کوچک می‌باشد.

۳-۴-۱۰ چگالی شار پسماند آهنربای دائم

این پارامتر مقدار چگالی شار تولید شده توسط آهنربا هنگامی که رلوکتانس مسیر شار آهنربا صفر باشد را نشان می‌دهد. اما در حالت واقعی رلوکتانس مسیر شار آهنربا صفر نمی‌باشد و مقدار چگالی شار روی سطح آهنربا از چگالی شار پسماند کمتر خواهد بود (همواره $B_u < B_r$). برای موتور مورد طراحی این رساله از آهنربای نئودیمیوم-آهن-بور با گرید N45H استفاده شده است که چگالی شار پسماند آن برابر با $1/3$ تسلا می‌باشد.

۳-۴-۱۱ شدت میدان مغناطیس‌زدای آهنربای دائم

هنگامی که مسیر شار آهنربا بصورت طولانی و در داخل هوا یا خلاء بسته شود مقدار شدت میدان آهنربا تقریباً برابر با شدت میدان مغناطیس‌زدا است. در این صورت افت نیروی محرکه مغناطیسی بر روی مسیر شار مربوطه تقریباً با نیروی محرکه مغناطیسی تولیدی آهنربا برابر بوده و چگالی شار نیز تقریباً برابر با صفر می‌باشد. منحنی تغییرات چگالی شار روی سطح آهنربا بر حسب شدت میدان در شکل (۳-۲) نشان داده شده است. با توجه به این منحنی اگر شدت میدانی برابر با شدت میدان مغناطیس‌زدا و در خلاف جهت میدان آهنربا اعمال شود چگالی شار صفر می‌شود [۴] و [۷۲]. با در نظر گرفتن توضیحات فوق و با توجه به منحنی مربوط به آهنربای دائم انتخاب شده (N45H) مقدار H_c برابر با 955000 A/m می‌باشد.



شکل (۲-۳) - تغییرات چگالی شار بر حسب شدت میدان آهنربا [۴]

۳-۴-۱۲ ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی آهنربای دائم

شیب منحنی شکل (۳-۲) ضریب نفوذپذیری مغناطیسی آهنربای دائم می‌باشد. ضریب نفوذپذیری مغناطیسی آهنربای دائم و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی آن به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۴] و [۷۲]:

$$\mu_{pm} = \frac{B_r}{H_c} = \mu_{rpm} \mu_0 \quad (۲-۳)$$

$$\mu_{rpm} = \frac{B_r}{\mu_0 H_c} \quad (۳-۳)$$

ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی آهنربای مورد استفاده در فرآیند طراحی (N45H) برابر است با:

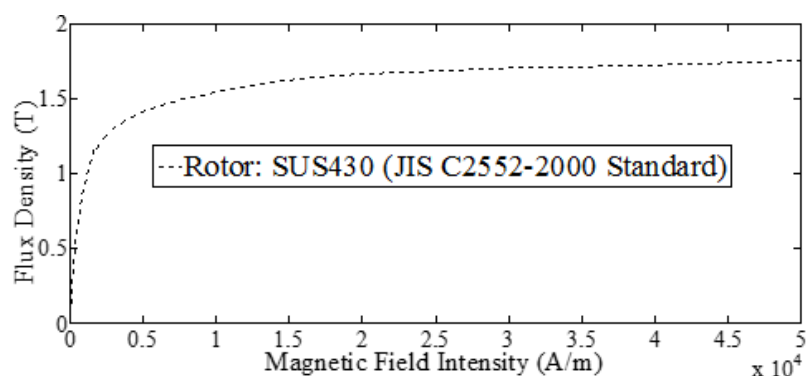
$$\mu_{rpm} = \frac{B_r}{\mu_0 H_c} = \frac{1.3}{(4\pi \times 10^{-7})(955000)} = 1.083 \quad (۴-۳)$$

چنانچه مشاهده می‌شود ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی بدست آمده برای آهنربا تقریباً مشابه با هوا می‌باشد بنابراین ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار مشابه یک ماشین قطب صاف عمل می‌نماید.

۳-۴-۱۳ حداکثر چگالی شار در هسته روتور

مقدار این پارامتر با توجه به منحنی مغناطیسی ماده بکار رفته برای هسته روتور مشخص می‌شود. مقدار حداکثر چگالی شار هسته روتور بر روی طول محوری روتور و در نتیجه ابعاد کلی ماشین تأثیرگذار است. در نظر گرفتن مقادیر کوچک برای چگالی شار هسته روتور منجر به افزایش طول محوری آن می‌شود.

همچنین انتخاب مقادیر بزرگ برای چگالی شار هسته روتور باعث کاهش طول محوری روتور و حتی به اشباع رفتن آن می‌شود. بنابراین باید مقدار حداکثر چگالی شار هسته روتور بصورت درست اختیار شود. برای طراحی و ساخت هسته روتور از آهن یکپارچه تحت عنوان آهن سیاه (SUS430) استفاده می‌شود. منحنی مغناطیسی این ماده در شکل (۳-۳) نشان داده شده است. مطابق شکل چگالی شار اشباع این ماده در حدود $1/8 \text{ T}$ است. بدلیل اینکه تلفات آهن در هسته روتور بسیار ناچیز است می‌توان نقطه کار روتور را نزدیک به محدوده اشباع انتخاب کرد. بنابراین مقدار حداکثر چگالی شار هسته روتور برای موتور مورد طراحی برابر با $1/8 \text{ T}$ انتخاب می‌شود.



شکل (۳-۳) - منحنی مغناطیسی ماده مورد استفاده برای هسته روتور

۳-۵ انتخاب مقادیر اولیه پارامترهای تصحیح‌پذیر

بازده، ضریب قدرت و ضریب نشت شار پارامترهای تصحیح‌پذیر در الگوریتم طراحی ماشین آهنربای دائم شار محوری می‌باشند. در ابتدای فرآیند طراحی مقادیر اولیه‌ای برای این سه پارامتر در نظر گرفته می‌شود. سپس در طول فرآیند طراحی مقدار این سه پارامتر اصلاح می‌شود. در ادامه نحوه انتخاب مقادیر اولیه این سه پارامتر شرح داده می‌شود.

۳-۵-۱ بازده

بازده ماشین الکتریکی در حالت موتوری به صورت نسبت توان مکانیکی خروجی ماشین به توان الکتریکی ورودی آن تعریف می‌گردد. با توجه به محدودیت در نظر گرفته شده برای حداقل بازده مجاز، مقدار

اولیه این پارامتر عددی در بازه ۰/۹۴ تا ۱ انتخاب شده و طراحی ماشین بر مبنای این مقدار صورت می‌گیرد. سپس مقادیر تلفات ماشین محاسبه شده و مقدار بازده آن اصلاح می‌گردد تا به عدد ثابتی در بازه فوق همگرا شود.

۳-۵-۲ ضریب قدرت

بدلیل اینکه ضریب قدرت نامی ماشین آهنربای دائم بالا و به ندرت از ۰/۹ کمتر می‌باشد مقدار اولیه این پارامتر عددی بین ۰/۹ و ۱ انتخاب می‌شود. بعد از بدست آوردن مقدار جریان استاتور، مقدار ضریب قدرت اصلاح شده و این فرآیند تا زمانی ادامه دارد که به مقدار ثابتی در بازه ۰/۹ و ۱ همگرا شود.

۳-۵-۳ ضریب نشت شار

به دلیل وجود نشت شار بین قطب‌های (آهنرباهای) مجاور و بین آهنربا و هسته روتور، مقدار شار خارج شونده از سطح مجاور به فاصله هوایی آهنربا با مقدار کل شار وارد شونده به آهنربا از سطح مجاور به هسته روتور برابر نمی‌باشد. به عبارت دیگر بخش کوچکی از شار آهنربا مسیر خود را از طریق آهنرباهای مجاور و یا هسته روتور می‌بندد و وارد بخش استاتور نمی‌شود. ضریب نشت شار در واقع از تقسیم این دو پارامتر مطابق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$K_d = \frac{\varphi_p}{\varphi_{pm0}} \quad (3-5)$$

ضریب نشت یکی از پارامترهای تصحیح‌پذیر الگوریتم طراحی می‌باشد. بر اساس تجربه مقدار این پارامتر عددی بین ۰/۷۵ و ۰/۹ است. بنابراین در ابتدای فرآیند طراحی مقدار اولیه این پارامتر عددی در بازه مذکور انتخاب می‌شود. پس از محاسبه ابعاد بخش‌های مختلف ماشین مقدار این پارامتر اصلاح می‌شود.

۳-۶ تعیین مقادیر پارامترهای انتخابی بهینه‌پذیر

۳-۶-۱ فرکانس تغذیه استاتور

در فرآیند طراحی موتورهای متداول فرکانس طراحی معلوم بوده و برابر با فرکانس منبع تغذیه در دسترس در نظر گرفته می‌شود. اما برای موتور آهنربای دائم شار محوری بدون شیار که توسط درایو تغذیه می‌شود مقدار فرکانس تغذیه مشخص نبوده و جزء پارامترهای اختیاری می‌باشد. در این رساله بررسی‌های مفصلی برای انتخاب فرکانس تغذیه ماشین در یک بازه وسیع از فرکانس صورت گرفته است که در فصل‌های بعد ارائه خواهد شد.

۳-۶-۲ مقدار موثر ولتاژ تغذیه هر فاز ماشین

بدلیل تغذیه موتور توسط درایو ولتاژ تغذیه نیز جزء پارامترهای اختیاری می‌باشد. با توجه به مقادیر حداکثر و حداقل در نظر گرفته شده در بخش‌های قبل ولتاژ تغذیه نیز عددی در بازه ۸۸/۴۶ تا ۹۵/۴۶ ولت انتخاب می‌شود.

۳-۶-۳ مقدار ولتاژ القایی هر فاز

مقدار ولتاژ القایی هر فاز باید به گونه‌ای تعیین شود که کمترین میزان جریان از سیم‌پیچی‌های استاتور عبور کند. در ماشین آهنربای دائم بدون شیار به دلیل فاصله هوایی موثر بزرگ معمولاً مقدار مقاومت سیم‌پیچی‌های استاتور در مقایسه با راکتانس سنکرون قابل توجه می‌باشد. بنابراین در این نوع ساختار معمولاً مقدار بهینه ولتاژ القایی اندکی کمتر از ۱ پریونیت است. بر این اساس محدوده مجاز برای ولتاژ القایی ماشین بین ۰/۹ و ۱/۱ پریونیت در نظر گرفته می‌شود.

۳-۶-۴ چگالی جریان سیم پیچی های استاتور

مقدار چگالی جریان تاثیر بسزائی بر روی تلفات ماشین دارد. کاهش مقدار چگالی جریان باعث افزایش قطر سیم و کاهش تلفات اهمی ماشین می شود. افزایش قطر سیم باعث افزایش حجم مس مورد استفاده، ضخامت سیم پیچی، ضخامت آهنرباهای دائم و طول محوری ماشین می شود. از طرفی افزایش چگالی جریان باعث کاهش قطر سیم و افزایش تلفات ماشین می گردد. مقدار چگالی جریان در هادی های موتور بر اساس توان اسمی موتور، دما و نحوه خنک سازی تعیین می شود. برای طراحی موتور مورد نظر بازه تغییرات مجاز $2 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ تا $10 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ در نظر گرفته شده و به کمک الگوریتم بهینه سازی مقدار بهینه چگالی جریان محاسبه می شود.

۳-۶-۵ دامنه چگالی شار فاصله هوایی

این پارامتر حداکثر مقدار چگالی شار را در فاصله هوایی نشان می دهد. دامنه چگالی شار فاصله هوایی به ابعاد و جنس آهنرباهای دائم بستگی دارد. از این پارامتر در تعیین تعداد دور سیم پیچی ها، ضخامت سیم پیچی و ... استفاده می شود. بنابراین باید دامنه چگالی شار فاصله هوایی به صورت بهینه انتخاب شود. در ماشین آهنربای دائم بدون شیار در مقایسه با ساختارهای دیگر فاصله هوایی بزرگ می باشد بنابراین دامنه چگالی شار فاصله هوایی در این نوع ماشین نسبتاً کم است [۴]. با توجه به این موضوع بازه مجاز 0.3 تا 0.7 تسلا برای دامنه چگالی شار فاصله هوایی در نظر گرفته می شود.

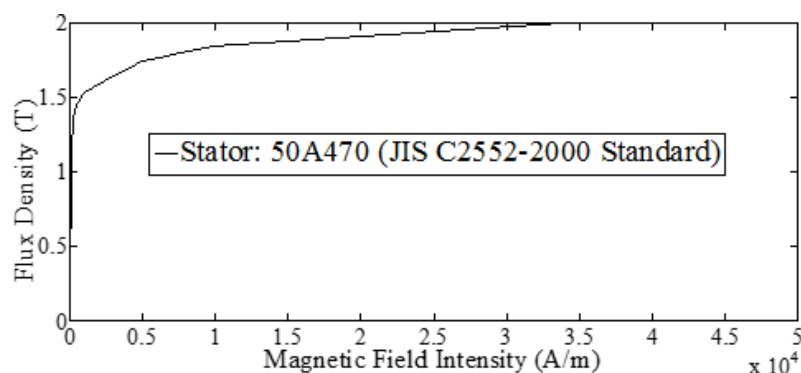
۳-۶-۶ نسبت قوس قطب به گام قطب

این پارامتر مشخص می کند که چه نسبتی از گام قطب توسط آهنربای دائم اشغال شده است. مقدار این پارامتر تاثیر چشمگیری بر روی شکل موج ولتاژ القایی ماشین دارد. با کاهش نسبت قوس قطب به گام قطب شکل موج ولتاژ القایی سینوسی تر می شود اما دامنه ولتاژ القایی نیز کاهش پیدا می کند. از طرفی کاهش بیش از حد این پارامتر باعث می شود که شکل موج ولتاژ از حالت سینوسی فاصله بگیرد. همچنین افزایش بیش از حد این پارامتر باعث می شود که شکل موج ولتاژ به حالت دوزنقه ای نزدیکتر

شود. بنابراین مقدار این پارامتر باید به درستی انتخاب شود تا ولتاژ القایی ماشین تا حد ممکن سینوسی باشد. نتایج شبیه‌سازی‌های متعدد نشان می‌دهد که در صورت انتخاب این پارامتر در محدوده ۰/۶ تا ۰/۷ شکل موج ولتاژ به تابع سینوسی بسیار نزدیک می‌باشد. بنابراین همین بازه به عنوان بازه مجاز این پارامتر انتخاب شده و مقدار بهینه آن از طریق الگوریتم بهینه‌سازی مشخص می‌شود.

۳-۶-۷ حداکثر چگالی شار در هسته استاتور

مقدار این پارامتر نیز باید بر اساس منحنی مغناطیسی ماده مورد استفاده برای هسته استاتور مشخص شود. اما چگالی شار در هسته استاتور با زمان تغییر می‌کند بنابراین دیگر نمی‌توان مقدار این پارامتر را نزدیک به محدوده اشباع انتخاب کرد. انتخاب مقادیر بزرگ برای این پارامتر باعث کاهش طول محوری استاتور، کاهش تلفات اهمی و افزایش تلفات هسته می‌شود. همچنین مقادیر بزرگ چگالی شار باعث به اشباع رفتن هسته و ایجاد اعوجاج در ولتاژ القایی ماشین می‌شود. از طرفی انتخاب مقادیر کوچک برای این پارامتر باعث افزایش بیش از حد طول محوری هسته استاتور و تلفات اهمی می‌شود. در شکل (۳-۳) منحنی مغناطیسی ماده مورد استفاده برای هسته استاتور (50A470) نشان داده شده است. با توجه به این شکل حداکثر چگالی شار مجاز $1/8 \text{ T}$ در نظر گرفته می‌شود. همچنین حد پایین مجاز این پارامتر برابر 1 T انتخاب می‌شود. مقدار بهینه این پارامتر از الگوریتم بهینه‌سازی محاسبه می‌شود.



شکل (۳-۴) - منحنی مغناطیسی ماده مورد استفاده برای هسته استاتور

۳-۶-۸ بارگذاری الکتریکی ویژه

بارگذاری الکتریکی ویژه از تقسیم آمپرهادی بر واحد طول محیطی استاتور بدست می‌آید. این پارامتر در قطر متوسط فاصله هوایی ماشین آهنربای دائم شار محوری محاسبه می‌شود. در هنگام طراحی ماشین اتخاذ مقادیر بزرگ برای این پارامتر منجر به کاهش قطر خارجی ماشین می‌شود. بنابراین مقدار این پارامتر با میزان گرمای تولید شده در ماشین ارتباط دارد به گونه‌ای که با افزایش این پارامتر به سیستم خنک‌ساز قوی‌تری نیاز می‌باشد [۱۶] و [۱۷]. هر چقدر توان و جریان ماشین الکتریکی بیشتر باشد مقدار بارگذاری الکتریکی ویژه آن نیز بیشتر خواهد بود. مقدار این پارامتر نیز باید بصورت بهینه انتخاب شود. با در نظر گرفتن توان نامی نسبتاً کم ماشین محدوده مجاز برای انتخاب بارگذاری الکتریکی ویژه بین 10000 A/m و 40000 A/m انتخاب می‌شود و مقدار بهینه بارگذاری الکتریکی توسط الگوریتم بهینه‌سازی در این بازه مشخص می‌شود.

۳-۶-۹ نسبت قطر داخلی به قطر خارجی هسته استاتور

این پارامتر از تقسیم قطر داخلی بر قطر خارجی هسته استاتور بصورت زیر بدست می‌آید [۴]:

$$\lambda = \frac{D_i}{D_o} \quad (3-6)$$

مقدار این پارامتر بین عدد ۰ و ۱ می‌باشد و از جمله پارامترهای بسیار موثر بر عملکرد موتور است. افزایش این پارامتر منجر به کاهش سطح رخ قطب می‌شود بنابراین برای دستیابی به ولتاژ القایی مورد نظر باید تعداد دورهای سیم‌پیچی افزایش پیدا کند. افزایش تعداد دور سیم‌پیچی باعث افزایش ضخامت سیم‌پیچی و در نتیجه طول محوری ماشین می‌شود. از طرفی با افزایش مقدار λ قطر داخلی ماشین زیاد شده و بنابراین فضای در دسترس برای هادی‌ها افزایش می‌یابد و تعداد لایه‌ها و ضخامت سیم‌پیچی کاهش پیدا می‌کند. بنابراین باید مقدار بهینه این پارامتر به کمک الگوریتم بهینه‌سازی تعیین شود. با توجه به مراجع موجود محدوده مجاز برای این پارامتر بین $0/5$ و $0/65$ در نظر گرفته می‌شود.

۷-۳ تعیین مقادیر پارامترهای محاسباتی

با توجه به مطالب ارائه شده در ابتدای الگوریتم طراحی مقدار صحیح پارامترهای بهینه‌پذیر و تصحیح-پذیر نامشخص می‌باشد و توسط الگوریتم بهینه‌سازی بدست می‌آید. بنابراین قبل از تعیین این پارامترها نمی‌توان مقدار پارامترهای محاسباتی را مشخص کرد. در این بخش روابط مورد نیاز برای تعیین پارامترهای محاسباتی ارائه می‌شود.

۱-۷-۳ تعداد جفت قطب‌های روتور

تعداد جفت قطب‌های روتور با توجه به سرعت اسمی موتور و فرکانس منبع تغذیه مشخص می‌شود. بر این اساس برای محاسبه تعداد جفت قطب‌ها از رابطه زیر استفاده می‌شود [۴]:

$$p = \frac{60f}{n_s} \quad (۷-۳)$$

۲-۷-۳ تخمین اولیه جریان موثر هر فاز

در حالت اتصال ستاره جریان موثر هر فاز با جریان خط برابر است و بصورت زیر بدست می‌آید:

$$I_{rms} = \frac{P_{out}}{\eta m V_{ph_rms} \cos \varphi} \quad (۸-۳)$$

در ابتدای الگوریتم طراحی مقدار دقیق بازده و ضریب قدرت نامشخص می‌باشد بنابراین مقدار اولیه جریان از رابطه فوق و بر اساس مقادیر اولیه در نظر گرفته شده برای بازده و ضریب قدرت بدست می‌آید. سپس مقدار بازده و ضریب قدرت توسط روابط موجود تصحیح می‌شود و جریان هر فاز توسط رابطه فوق و بر اساس مقادیر جدید بازده و ضریب قدرت محاسبه می‌گردد. این فرآیند آنقدر تکرار می‌شود تا مقادیر جریان، بازده و ضریب قدرت همگرا شوند.

۳-۷-۳ مقدار جریان در هر رشته سیم

مطابق رابطه زیر مقدار جریان در هر رشته سیم از تقسیم جریان هر فاز بر تعداد رشته‌های موازی بدست می‌آید:

$$I_{con} = \frac{I_{rms}}{a_p} \quad (۹-۳)$$

لازم به ذکر است که در این رساله تعداد رشته سیم‌ها برابر با یک در نظر گرفته شده است.

۴-۷-۳ سطح مقطع هادی

در این رساله از سیم با سطح مقطع مستطیلی برای سیم‌پیچی استاتور استفاده می‌شود. مقدار سطح مقطع این سیم با توجه به مقدار موثر جریان عبوری از آن و مقدار چگالی جریان در نظر گرفته شده بصورت زیر بدست می‌آید:

$$S_{str} = \frac{I_{con}}{J_s} = \frac{I_{rms}}{a_p J_s} \quad (۱۰-۳)$$

۵-۷-۳ تعداد دور سیم‌پیچی هر فاز

تعداد دور سیم‌پیچی هر فاز تاثیر بسزائی بر روی مقدار ولتاژ القایی ماشین دارد. مقدار این پارامتر با توجه به مقادیر بارگذاری الکتریکی ویژه، چگالی شار فاصله هوایی، فرکانس و ولتاژ القایی مورد نظر برای هر فاز توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$N_s = \frac{120E_p}{\pi K_w n_s B_g D_o^2 (1 - \lambda^2)} = \sqrt[3]{\frac{30\sqrt{2}\pi E_{pu} V_{ph_rms} A^2 (1 + \lambda)}{K_w n_s B_g (ma_p I_{con})^2 (1 - \lambda)}} \quad (۱۱-۳)$$

۶-۷-۳ تعداد دور سیم‌پیچی بر فاز بر قطب

این پارامتر بیانگر تعداد دور سیم‌پیچی در زیر هر قطب متعلق به هر فاز می‌باشد و توسط رابطه زیر تعیین می‌شود [۴]:

$$q = \frac{N_s}{2p} \quad (12-3)$$

لازم به ذکر است که تعداد هادی‌های زیر هر قطب دو برابر مقدار فوق (یعنی $2q$) است. با توجه به وجود تقارن در ساختار ماشین مورد مطالعه می‌توان تمام تحلیل‌ها را برای نصف ماشین شامل یک روتور و نصف استاتور انجام و نتایج را به کل ماشین تعمیم داد. در این صورت تعداد هادی‌های زیر هر قطب برابر با q خواهد بود. باید توجه کرد که مقدار بدست آمده برای تعداد دور سیم‌پیچی ممکن است عدد صحیحی نباشد. در این صورت عدد بدست آمده برای q به بالا گرد شده و سپس مقدار تعداد دور سیم‌پیچی مجدداً از روی مقدار q و به کمک رابطه فوق محاسبه می‌شود.

۷-۷-۳ قطر متوسط هسته استاتور

با توجه به مقادیر جریان استاتور، بارگذاری الکتریکی ویژه و تعداد دور سیم‌پیچی مقدار قطر متوسط هسته استاتور از رابطه زیر بدست می‌آید [۴]:

$$D_g = \frac{mN_s a_p I_{con}}{\pi A} \quad (13-3)$$

۸-۷-۳ قطر خارجی هسته استاتور

پس از محاسبه مقدار قطر متوسط، قطر خارجی هسته استاتور توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود [۴]:

$$D_o = \frac{2D_g}{1+\lambda} \quad (14-3)$$

۹-۷-۳ قطر داخلی هسته استاتور

قطر داخلی هسته استاتور با توجه به مقادیر قطر خارجی هسته استاتور و λ ، با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید [۴]:

$$D_i = \lambda D_o \quad (15-3)$$

۳-۷-۱۰ عرض گام قطب در قطر متوسط

بسیاری از شبیه‌سازی‌های انجام شده در محیط نرم‌افزار اجزاء محدود دو بعدی می‌باشد. بنابراین برای ترسیم ماشین نیاز به محاسبه عرض گام قطب است. این پارامتر در قطر متوسط ماشین بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$W_{pg} = \frac{\pi}{2p} D_g \quad (۱۶-۳)$$

۳-۷-۱۱ عرض آهنربا در قطر متوسط

در تحلیل اجزاء محدود دو بعدی باید عرض آهنربا در قطر متوسط مشخص باشد. برای این منظور از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$W_{1pmg} = \frac{\pi}{2p} \alpha_i D_g \quad (۱۷-۳)$$

۳-۷-۱۲ فاصله بین آهنرباهای دائم در قطر متوسط

مقدار این پارامتر نیز برای شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود دوبعدی نیاز است. این پارامتر توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$W_{2pmg} = \frac{\pi}{2p} (1 - \alpha_i) D_g \quad (۱۸-۳)$$

۳-۷-۱۳ طول شعاعی آهنربای دائم

این پارامتر توسط رابطه زیر بدست می‌آید [۴]:

$$l_i = \frac{D_o - D_i}{2} = \frac{D_o (1 - \lambda)}{2} \quad (۱۹-۳)$$

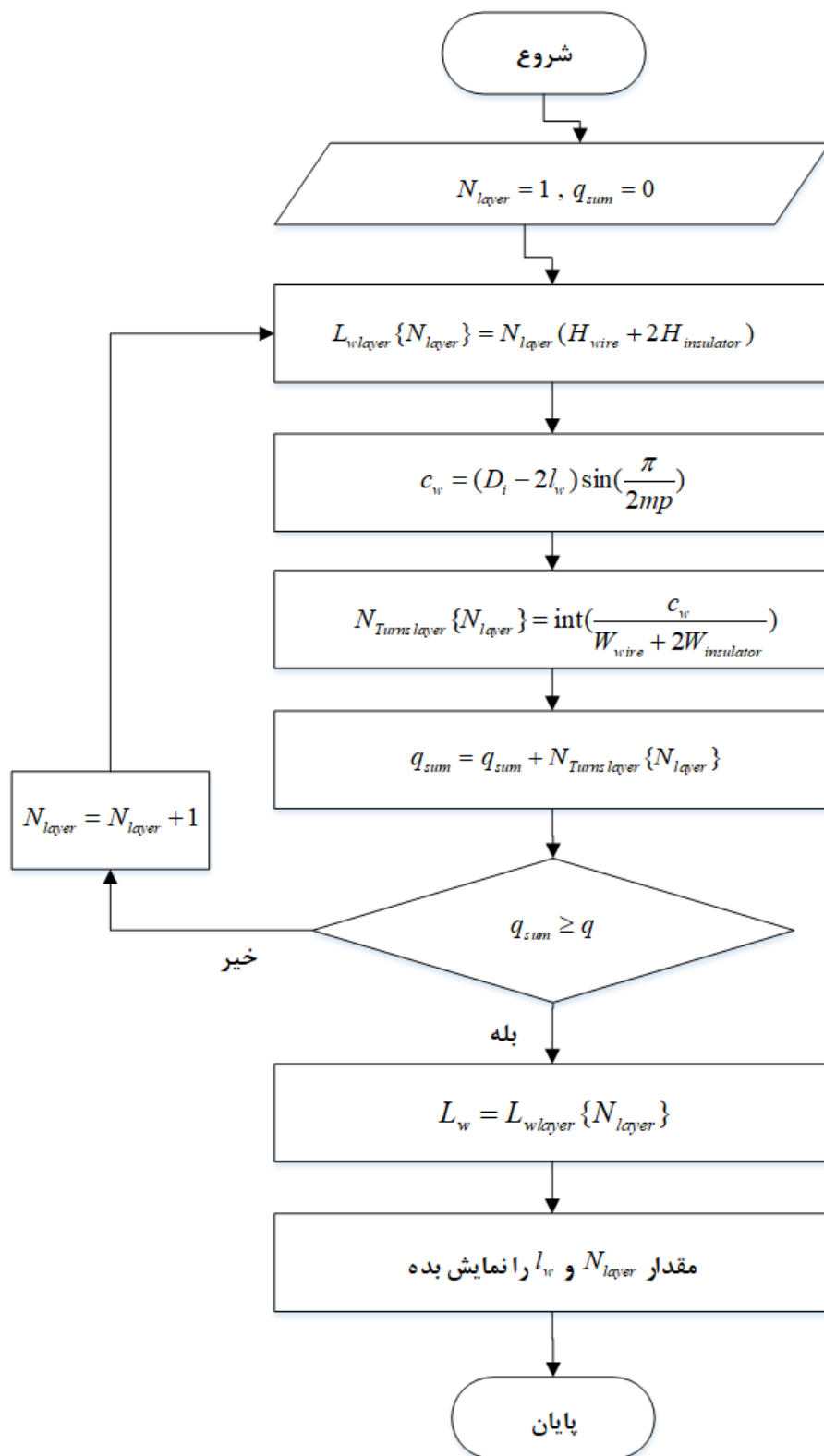
۳-۷-۱۴ تعداد لایه‌های سیم‌پیچی

با توجه به سیم‌پیچی خاص این نوع ساختار قطر داخلی استاتور در واقع فضای در دسترس برای سیم-پیچی را مشخص می‌کند. اگر فضای کافی برای قرار گرفتن تمام هادی‌های هر کلاف در یک لایه وجود

نداشته باشد به ناچار سیم پیچی ماشین بصورت چند لایه انجام می شود. با توجه به تعداد دور سیم پیچی در هر فاز، ابعاد سیم مورد استفاده و قطر داخلی هسته استاتور تعداد لایه های سیم پیچی توسط الگوریتم نشان داده شده در شکل (۳-۵) بدست می آید.

۳-۷-۱۵ ضخامت سیم پیچی

ضخامت سیم پیچی با توجه به تعداد لایه های سیم پیچی، ضخامت هادی ها و عایق سیم مطابق با الگوریتم نشان داده شده در شکل (۳-۵) محاسبه می شود.



شکل (۳-۵) - الگوریتم تعیین تعداد لایه‌ها و ضخامت سیم پیچی

۳-۷-۱۶ مقدار متوسط چگالی شار فاصله هوایی

نحوه توزیع چگالی شار برای یک گام قطب ماشین در شکل (۳-۶) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در ناحیه بین آهنربا و هسته استاتور سه ناحیه مشخص شده است. این سه ناحیه عبارتند از:

- ناحیه ۱: ناحیه روی سطح آهنربای دائم

- ناحیه ۲: ناحیه واقع در وسط سیم‌پیچی

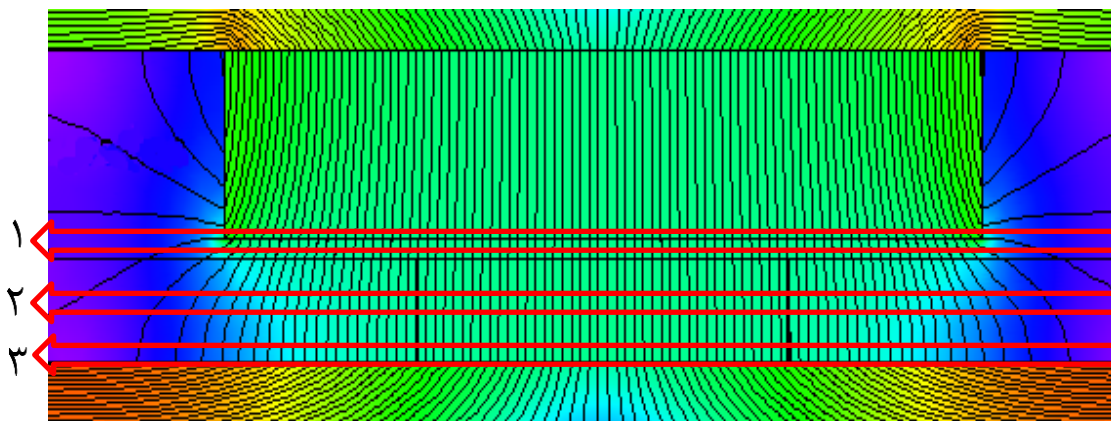
- ناحیه ۳: ناحیه روی سطح استاتور

در شکل (۳-۷) تغییرات چگالی شار فاصله هوایی در این سه ناحیه نشان داده شده است. با توجه به این شکل مقدار چگالی شار در ناحیه ۱ و در وسط قطب تقریباً ثابت و برابر با مقدار ماکزیمم B_{ul} می‌باشد. در این ناحیه، با حرکت از وسط قطب به سمت طرفین مقدار چگالی شار کاهش می‌یابد. در ناحیه ۲ (وسط سیم‌پیچی) شکل موج چگالی شار به شکل موج سینوسی نزدیک‌تر می‌باشد. مقدار متوسط چگالی شار با متوسط‌گیری از این شکل موج در یک گام قطب بدست می‌آید. با نزدیک شدن به سطح استاتور (ناحیه ۳) منحنی تغییرات چگالی شار مجدداً از حالت سینوسی فاصله می‌گیرد. در حالت کلی، شکل موج چگالی شار فاصله هوایی در وسط سیم‌پیچی نیز غیرسینوسی می‌باشد. اما برحسب تجربه اگر مقدار نسبت قوس قطب به گام قطب تقریباً برابر $0/6$ انتخاب شود، شکل موج چگالی شار فاصله هوایی به یک تابع سینوسی نزدیک خواهد شد. در این صورت نسبت مقدار متوسط چگالی شار به مقدار حداکثر آن تقریباً برابر با $2/\pi$ می‌باشد.

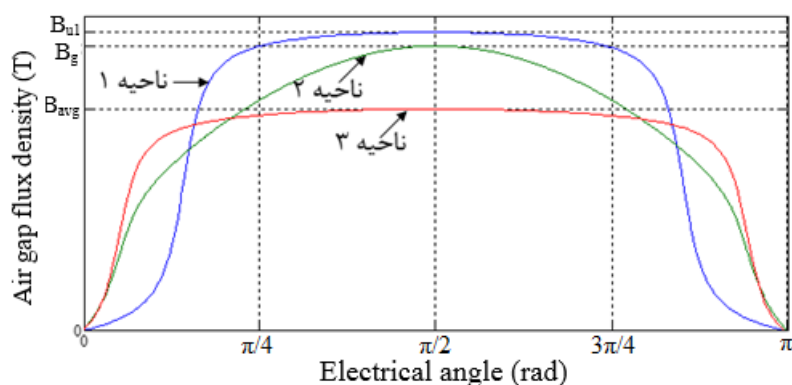
همچنین به ازای افزایش مقدار α_i از $0/6$ ، مقدار نسبت فوق بیشتر از $2/\pi$ خواهد شد. جهت محاسبه مقدار اولیه چگالی شار متوسط از رابطه تقریبی زیر استفاده می‌شود:

$$B_{avg} = \frac{2}{\pi} B_g \quad (20-3)$$

در حالت کلی رابطه فوق کاملاً دقیق و صحیح نیست و مقدار دقیق‌تر این پارامتر در مراحل بعد به کمک مدار معادل مغناطیسی محاسبه می‌شود.



شکل (۳-۶) - نحوه توزیع چگالی شار در داخل ماشین



شکل (۳-۷) - تغییرات چگالی شار در سه ناحیه مشخص شده در شکل (۳-۶)

۳-۷-۱۷ مقدار چگالی شار روی سطح آهنربای دائم

با توجه به اینکه شار عبوری از سطح استاتور معادل با یک گام قطب برابر با شار خروجی از سطح پایین

آهنربا می‌باشد می‌توان مقدار چگالی شار روی سطح آهنربای دائم را بصورت زیر محاسبه کرد:

$$\varphi_{pm1} = \varphi_p \Rightarrow B_{u1} A_{pm} = B_{avg} A_p \Rightarrow B_{u1} = \frac{A_p}{A_{pm}} B_{avg} \Rightarrow B_{u1} = \frac{B_{avg}}{\alpha_i} \quad (۳-۲۱)$$

در رابطه (۳-۲۱) نمادهای A_p و A_{pm} به ترتیب مساحت سطح آهنربای دائم و سطح معادل با یک گام

قطب استاتور می‌باشد.

۳-۷-۱۸ طول محوری هسته استاتور

با توجه به شکل (۳-۷) مقدار چگالی شار روی سطح مجاور به فاصله هوایی استاتور در یک گام قطب تقریباً برابر با چگالی شار متوسط فاصله هوایی می‌باشد و در هنگام عبور از سطح مقطع هسته استاتور در مرز بین دو قطب مجاور برابر با B_{cs} می‌باشد. بنابراین با مساوی قرار دادن شار بر قطب یک طرف استاتور در فاصله هوایی با شار گذرنده از هسته استاتور در جهت محیطی طول محوری استاتور بصورت زیر بدست می‌آید [۴]:

$$l_{cs} = \frac{\pi B_{avg} D_o (1 + \lambda)}{4 p B_{cs}} \quad (۳-۲۲)$$

۳-۷-۱۹ طول محوری استاتور

با مشخص شدن مقادیر طول محوری هسته استاتور و ضخامت سیم‌پیچی، طول محوری کل استاتور از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$l_s = l_{cs} + 2l_w \quad (۳-۲۳)$$

در رابطه فوق به دلیل وجود سیم‌پیچی در دو طرف هسته استاتور یک ضریب 2 در l_w ضرب می‌شود.

۳-۷-۲۰ طول محوری هسته روتور

عبور نصف شار بر قطب از هسته روتور در یک جهت باعث حداکثر شدن چگالی شار در مرز بین دو قطب در هسته روتور می‌گردد. با در نظر گرفتن این نکته طول محوری هسته روتور محاسبه می‌شود [۴]. بنابراین با برابر قرار دادن شار گذرنده از هسته روتور در مرز مشترک دو قطب با نصف شار عبوری از سطح بالای آهنربای دائم طول محوری هسته روتور بصورت زیر بدست می‌آید:

$$l_{cr} = \frac{\pi B_{u0} \alpha_i D_o (1 + \lambda)}{8 p B_{cr}} = \frac{\pi B_{avg} D_o (1 + \lambda)}{8 p K_d B_{cr}} \quad (۳-۲۴)$$

با مقایسه رابطه فوق با رابطه ارائه شده برای محاسبه طول محوری هسته استاتور مشاهده می‌شود که عدد ثابت مخرج دو رابطه به اندازه یک ضریب دو با یکدیگر اختلاف دارد. باید توجه کرد که شار وارد

شده به هسته استاتور ناشی از قطب‌های هر دو روتور می‌باشد در حالی که شار عبوری از هر یک از هسته‌های روتور فقط ناشی از قطب همان روتور می‌باشد.

۲۱-۷-۳ ضخامت آهنربای دائم

با برابر قرار دادن نیروی محرکه مغناطیسی تولیدی توسط آهنربا با افت نیروی محرکه مغناطیسی مسیر شار، ضخامت آهنربای دائم بدست می‌آید [۴]. طول فاصله هوایی موثر برابر با $g+l_w$ است بنابراین افت نیروی محرکه مغناطیسی بر روی آن برابر با $\frac{B_{avg}}{\mu_0}(g+l_w)$ می‌باشد. از طرف دیگر اگر چگالی شار بر روی سطح بالای آهنربا برابر با B_{u0} باشد، نیروی محرکه تولید شده توسط آهنربا برابر با $H_c l_{pm}(1 - \frac{B_{u0}}{B_r})$ خواهد بود. اگر از افت نیروی محرکه مغناطیسی در هسته‌ها صرف‌نظر شود با برابر قرار دادن دو رابطه فوق، ضخامت آهنربای دائم به صورت زیر بدست می‌آید:

$$l_{pm} = \frac{2K_l B_{avg}(g+l_w)}{\mu_0 H_c (1+\alpha_i)(1-\frac{B_{u0}}{B_r})} = \frac{2K_l \mu_{rpm} B_{avg}(g+l_w)}{(1+\alpha_i)(B_r - B_{u0})} \quad (25-3)$$

برای در نظر گرفتن افت نیروی محرکه مغناطیسی بر روی هسته‌های استاتور و روتور ضریب K_l عددی بزرگتر از یک انتخاب می‌شود. به عبارت دیگر، بدلیل اینکه در هنگام محاسبه ضخامت آهنربای دائم از افت نیروی محرکه مغناطیسی بر روی هسته‌ها صرف‌نظر شده است به کمک ضریب K_l در رابطه فوق، طول آهنربای دائم اندکی افزایش داده می‌شود تا افت نیروی محرکه مغناطیسی بر روی هسته‌ها در نظر گرفته شود. مقدار این ضریب از طریق مقایسه با نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود برابر $1/2$ انتخاب شده است.

۲۲-۷-۳ طول محوری روتور

طول محوری بخش روتور که شامل هسته روتور و آهنرباهای دائم است از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$l_r = l_{cr} + l_{pm} \quad (26-3)$$

۳-۷-۲۳ طول محوری کل ماشین

از مجموع طول محوری استاتور، فواصل هوایی و طول محوری روتور، طول محوری کل ماشین بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$l_e = l_s + 2l_r + 2g \quad (۲۷-۳)$$

۳-۷-۲۴ طول متوسط یک دور سیم‌پیچی

طول هر دور سیم‌پیچی در راستای شعاعی برابر با $2l_i$ و در راستای محوری برابر با $2l_s$ می‌باشد بنابراین طول متوسط یک دور سیم‌پیچی با یک دقت قابل قبول از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$l_{1av} = 2(l_i + l_s) \times 1.05 \quad (۲۸-۳)$$

در این رابطه ضریب $۱/۰۵$ برای لحاظ کردن افزایش طول سیم در لایه‌های دوم و بالاتر در سیم‌پیچی چند لایه است.

۳-۷-۲۵ طول سیم مورد نیاز

پس از مشخص کردن طول یک دور سیم‌پیچی طول مورد نیاز برای سیم‌پیچی کل ماشین توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$L_{winding} = m a_p N_s l_{1av} \quad (۲۹-۳)$$

۳-۷-۲۶ مقاومت سیم‌پیچی هر فاز استاتور

با در اختیار داشتن طول متوسط هر دور سیم‌پیچی و سطح مقطع سیم، مقدار مقاومت سیم‌پیچی هر فاز استاتور با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۴]:

$$R_{ph} = \frac{\rho_{cu} l_{1av} N_s}{a_p s_{str}} \quad (۳۰-۳)$$

۲۷-۷-۳ راکتانس سنکرون ماشین

برای بدست آوردن اندوکتانس سنکرون ماشین از رابطه زیر استفاده می شود:

$$L_s = \frac{l_i \pi D_g N_s^2}{6 p^2 (l_{pm} + g + l_w)} \quad (31-3)$$

از حاصلضرب اندوکتانس بدست آمده در ضریب $2\pi f$ مقدار راکتانس سنکرون ماشین مطابق رابطه زیر

محاسبه می شود:

$$X_s = (2\pi f) L_s = \frac{f l_i \pi^2 D_g N_s^2}{3 p^2 (l_{pm} + g + l_w)} \quad (32-3)$$

۲۸-۷-۳ زاویه قدرت ماشین

پس از بدست آوردن مقادیر مقاومت سیم پیچی و راکتانس سنکرون ماشین، مقدار زاویه قدرت آن بر

حسب رادیان توسط رابطه زیر تعیین می شود:

$$\delta = \text{Arc cos} \left(\frac{P_{out} \sqrt{(R_{ph}^2 + X_s^2)}}{m V_{ph_rms}^2 E_{pu}} + \frac{R_{ph} E_{pu} V_{ph_rms}}{V_{ph_rms} \sqrt{(R_{ph}^2 + X_s^2)}} \right) - \text{Arc tan} \left(\frac{X_s}{R_{ph}} \right) \quad (33-3)$$

با توجه به اینکه ماشین مورد نظر پس از طراحی و ساخت بصورت موتوری مورد استفاده قرار می گیرد

زاویه قدرت بدست آمده از رابطه فوق باید عددی منفی باشد.

۲۹-۷-۳ محاسبه فازور جریان هر فاز

فازور جریان هر فاز استاتور با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\bar{I} = (V_{ph_rms}) \frac{1 - E_{pu} (\cos \delta + j \sin \delta)}{R_{ph} + j X_s} \quad (34-3)$$

۳۰-۷-۳ تصحیح مقدار موثر جریان هر فاز

با توجه به رابطه بدست آمده برای محاسبه فازور جریان مقدار موثر جریان هر فاز استاتور باید اصلاح

شود. برای این منظور مقدار موثر جریان هر فاز مجدداً بصورت زیر محاسبه و اصلاح می شود:

$$I_{rms2} = |\bar{I}| = \left| (V_{ph_rms}) \frac{1 - E_{pu} (\cos \delta + j \sin \delta)}{R_{ph} + jX_s} \right| \quad (35-3)$$

۳-۷-۳۱ تصحیح ضریب قدرت ماشین

پس از محاسبه فازور جریان، مقدار ضریب قدرت ماشین توسط رابطه زیر مجدداً محاسبه و اصلاح می‌شود:

$$\cos \varphi_2 = \cos(\angle |\bar{I}|) \quad (36-3)$$

در این رابطه نماد $\angle$ نشان‌دهنده زاویه بر حسب رادیان می‌باشد.

۳-۷-۳۲ تلفات اهمی سیم‌پیچی

با مشخص شدن مقادیر مقاومت سیم‌پیچی و جریان موثر هر فاز، تلفات اهمی سیم‌پیچی توسط رابطه زیر بدست می‌آید:

$$P_{cu_loss} = m R_{ph} I_{rms2}^2 \quad (37-3)$$

۳-۷-۳۳ تلفات هسته استاتور

برای محاسبه تلفات هسته استاتور چگالی حجمی تلفات هسته در حجم هسته استاتور ضرب می‌شود. برای این منظور از رابطه زیر استفاده می‌شود [۷۳]:

$$P_{iron_loss} = 1925 \left(7.164 \times 10^{-6} \zeta^2 B_{cs}^2 f^2 + 0.0377 B_{cs}^{1.7427} f^{0.996} \right) \pi (D_o^2 - D_i^2) l_{cs} \quad (38-3)$$

۳-۷-۳۴ تلفات بادخوری

برای محاسبه تلفات بادخوری از رابطه زیر استفاده شده است:

$$P_{wind} = \frac{1}{2} c_f \rho (2\pi n_s)^3 (R_{out}^5 - R_{sh}^5) \quad (39-3)$$

که در این رابطه:

$$R_e = \rho \frac{2\pi n_s R_{out}^2}{\mu} \quad (40-3)$$

$$c_f = \frac{3.87}{\sqrt{R_e}} \quad (41-3)$$

در روابط بالا μ ویسکوزیته هوا می باشد.

۳-۷-۳۵ تلفات یاتاقان ها

برای محاسبه تلفات یاتاقان ها از رابطه زیر استفاده شده است:

$$P_{fr} = 0.06k_{pb}(m_r + m_{sh})n_m \quad (42-3)$$

برای ماشین مورد مطالعه از بلبرینگ SKF 6014-Z استفاده شده است.

۳-۷-۳۶ تصحیح بازده

پس از محاسبه تلفات بازده ماشین توسط رابطه زیر محاسبه و اصلاح می شود:

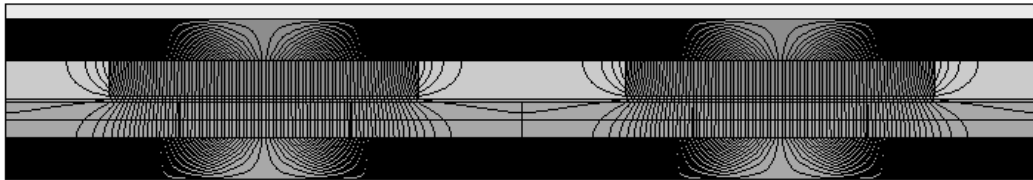
$$\begin{aligned} \eta_2 = \frac{P_{out}}{P_{in}} &= \frac{P_{out}/\eta - P_{cu_loss} - P_{iron_loss} - P_{wind} - P_{fr}}{P_{out}/\eta} \\ &= 1 - \eta \frac{P_{cu_loss} + P_{iron_loss} + P_{wind} + P_{fr}}{P_{out}} \end{aligned} \quad (43-3)$$

پس از محاسبه بازده از این رابطه مقدار آن جایگزین مقدار تخمین زده شده اولیه می گردد.

۳-۷-۳۷ تصحیح ضریب نشت شار

با توجه به ابعاد ماشین طراحی شده باید مقدار ضریب نشت شار تصحیح شود. در نظر گرفتن شارهای نشتی در فرآیند طراحی ماشین باعث تعیین دقیقتر ابعاد و مشخصه های عملکردی آن می شود. روش مدار معادل مغناطیسی معمولاً در طراحی و بهینه سازی ماشین های آهنربای دائم شار محوری استفاده می شود. در روش مدار معادل مغناطیسی از رلوکتانس ها برای مدل کردن بخش های مختلف ماشین استفاده می شود. بنابراین در این بخش از طریق محاسبه رلوکتانس بخش های مختلف، یک مدار معادل مغناطیسی برای ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار پیشنهاد می شود. برای استخراج مدار معادل پیشنهادی ابتدا باید مسیرهای شار در داخل ماشین مشخص شود. در شکل (۸-۳) مسیر شارهای

مغناطیسی در داخل ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار نشان داده شده است. با توجه به این مسیرهای شار در ادامه مدلی برای محاسبه شارهای ناشی بخش‌های مختلف ماشین ارائه می‌شود.



شکل (۸-۳) - مسیر شارهای مغناطیسی در داخل ماشین

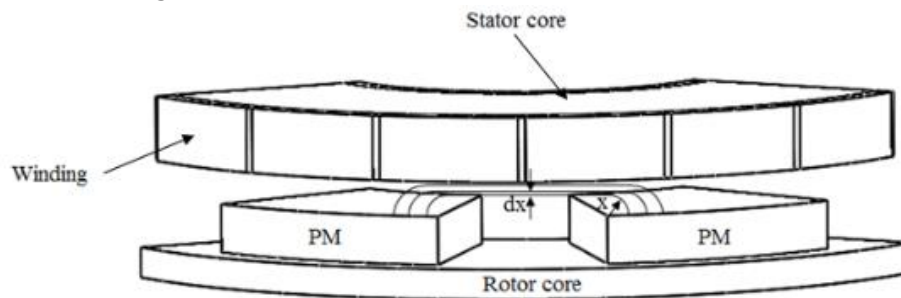
۱-۳۷-۷-۳ محاسبه رلوکتانس مسیر شار ناشی بین دو آهنربای مجاور

شارهای ناشی بین دو آهنربای مجاور در شکل (۳-۹) نشان داده شده است. تاثیر این شارهای ناشی در فرآیند طراحی ماشین توسط یک رلوکتانس در نظر گرفته می‌شود. با توجه به مسیرهای شار ناشی در شکل (۳-۹) و روابط موجود برای محاسبه محیط بیضی در [۷۴]، پرمیانس مسیر شار بین دو آهنربای مجاور توسط رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\begin{aligned}
 P_{mm} &= \sum \frac{\mu_0 (D_o - D_i)}{2k_5} (dx) \\
 k_1 &= \sqrt{\left[\frac{(\pi+1)}{2} \left[\frac{2x}{W_{pmg}} + \frac{W_{pmg}}{2x} \right] \right] + 4} \\
 k_2 &= \sqrt{\frac{1}{2} + k_1} \\
 k_3 &= \left[\frac{2x}{W_{pmg}} + \frac{W_{pmg}}{2x} \right] + \pi k_2 \\
 k_4 &= 1 - \frac{\pi-3}{k_3} \\
 k_5 &= \frac{\frac{\pi W_{pmg}}{2} x + k_4 \left(x - \frac{W_{pmg}}{2} \right)^2}{\left(x + \frac{W_{pmg}}{2} \right)}
 \end{aligned} \tag{۴۴-۳}$$

با توجه به اینکه پرمیانس و رلوکتانس با یکدیگر رابطه عکس دارند بنابراین رابطه زیر برای محاسبه رلوکتانس مسیر شار ناشی بین دو آهنربای مجاور پیشنهاد می‌شود:

$$\mathfrak{R}_{mm} = \frac{1}{\sum \frac{\mu_0 (D_o - D_i)}{2k_5} (dx)} \quad (45-3)$$



شکل (۹-۳) - شارهای ناشی بین دو آهنربای مجاور

۲-۳۷-۷-۳ محاسبه رلوکتانس مسیر شار ناشی بین آهنربا و هسته روتور

شارهای ناشی بین آهنربا و هسته روتور عبارتند از:

- شار ناشی بین آهنربا و هسته روتور در لبه کناری (داخلی) آهنربا

- شار ناشی بین آهنربا و هسته روتور در قطر خارجی آهنربا

- شار ناشی بین آهنربا و هسته روتور در قطر داخلی آهنربا

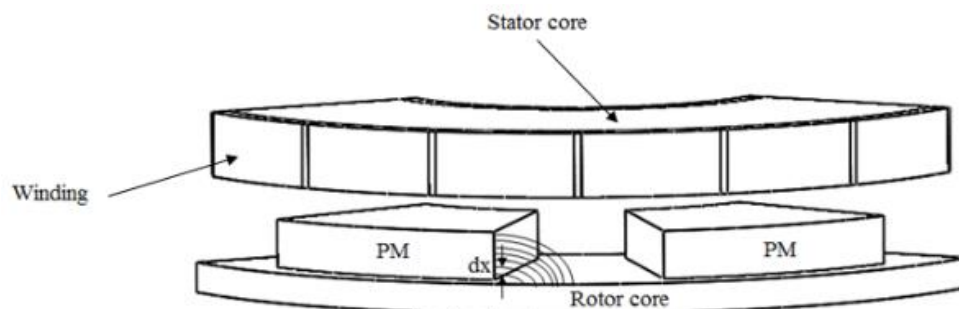
در شکل (۳-۱۰) شار ناشی بین آهنربا و هسته روتور در لبه داخلی آهنربا نشان داده شده است. برای

محاسبه این شار ابتدا آهنربا در راستای مغناطش آن به تعداد زیادی بخش‌های کوچکتر تقسیم می‌شود.

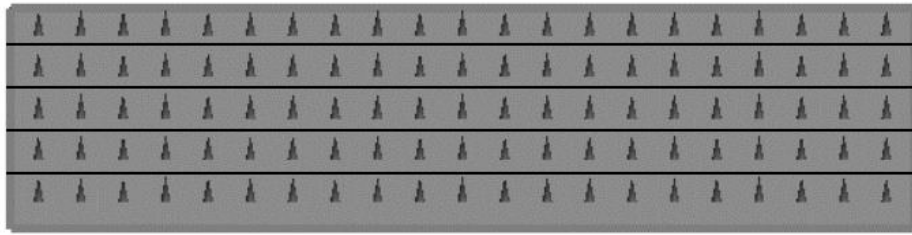
در شکل (۳-۱۱) نحوه این نوع تقسیم‌بندی نشان داده شده است. هر یک از این بخش‌ها را می‌توان یک

آهنربای کوچک در نظر گرفت. در این صورت با تقریب خوبی می‌توان فرض کرد که شار ناشی بین هر

یک از این آهنرباهای کوچک و روتور مطابق شکل (۳-۱۲) است.



شکل (۱۰-۳) - شارهای ناشی بین آهنربا و هسته روتور در لبه داخلی آهنربا



شکل (۱۱-۳) - تقسیم‌بندی آهنربا به بخش‌های کوچکتر



شکل (۱۲-۳) - شار نشتی بین یک بخش کوچک آهنربا و هسته روتور

شارهای نشتی مربوط به هر بخش را می‌توان توسط یک رلوکتانس مدل کرد. با محاسبه پرمیانس مسیر شار نشتی می‌توان مقدار رلوکتانس را بدست آورد. با توجه به روابط ارائه شده در [۷۴] برای محاسبه محیط بیضی رابطه زیر برای محاسبه پرمیانس مسیر شار نشتی بین لبه کناری هر بخش کوچک آهنربا و آهن روتور پیشنهاد می‌شود:

$$P_{mr} = \sum_y \sum_x \frac{\mu_0 (D_o - D_i)}{2 k_{10}} (dx)$$

$$k_6 = \sqrt{\left[\frac{(\pi+1)}{2} \left[\frac{y}{x} + \frac{x}{y} \right] \right] + 4}$$

$$k_7 = \sqrt{\frac{1}{2} + k_6}$$

$$k_8 = \left[\frac{y}{x} + \frac{x}{y} \right] + \pi k_7$$

$$k_9 = 1 - \frac{\pi - 3}{k_8}$$

$$k_{10} = \frac{\pi xy + k_9 (y - x)^2}{(y + x)}$$

(۴۶-۳)

که در این رابطه x و y شعاع‌های بیضی در راستای محورهای x و y می‌باشد. در این صورت رابطه پیشنهادی برای محاسبه رلوکتانس مسیر شار نشتی از عکس رابطه (۴۶-۳) و بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\mathfrak{R}_{mr} = \frac{1}{\sum_y \sum_x \frac{\mu_0(D_o - D_i)}{2k_{10}}(dx)} \quad (47-3)$$

شکل (۳-۱۳) شارهای نشتی بین آهنربا و آهن روتور در قطر خارجی آهنربا را نشان می‌دهد. مشابه روش پیشنهادی برای محاسبه رلوکتانس مسیرهای شارهای نشتی در لبه کناری آهنربا، شارهای نشتی بین آهنربا و آهن روتور در قطر خارجی آهنربا مدل می‌شود. در این صورت پرمیانس مسیر شار توسط رابطه پیشنهادی زیر بدست می‌آید:

$$P_{mrout} = \sum_y \sum_x \frac{\mu_0 \pi \alpha_i D_o}{2pk_{15}}(dx)$$

$$k_{11} = \sqrt{\left[\frac{(\pi+1)}{2} \left[\frac{y}{x} + \frac{x}{y} \right] \right] + 4}$$

$$k_{12} = \sqrt{\frac{1}{2} + k_{11}} \quad (48-3)$$

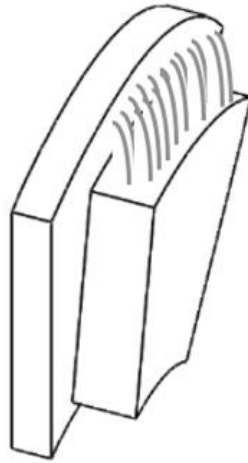
$$k_{13} = \left[\frac{y}{x} + \frac{x}{y} \right] + \pi k_{12}$$

$$k_{14} = 1 - \frac{\pi - 3}{k_{13}}$$

$$k_{15} = \frac{\pi xy + k_{14}(y-x)^2}{(y+x)}$$

همچنین x و y شعاع‌های هر منحنی بیضی شکل می‌باشد. بنابراین رابطه پیشنهادی برای محاسبه رلوکتانس مسیر شار نشتی بین آهنربا و آهن پشته برابر است با:

$$\mathfrak{R}_{mrout} = \frac{1}{\sum_y \sum_x \frac{\mu_0 \pi \alpha_i D_o}{2pk_{15}}(dx)} \quad (49-3)$$



شکل (۳-۱۳) - شارهای ناشی بین آهنربا و هسته روتور در قطر خارجی آهنربا

به روشی مشابه پرمیانس بین آهنربا و آهن روتور در قطر داخلی آهنربا P_{mrin} برابر است با:

$$P_{mrin} = \sum_y \sum_x \frac{\mu_0 \pi \alpha_i D_i}{2 p k_{16}} (dx) \quad (۵۰-۳)$$

در این صورت رابطه پیشنهادی برای محاسبه این رلوکتانس بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\mathfrak{R}_{mrin} = \frac{1}{\sum_y \sum_x \frac{\mu_0 \pi \alpha_i D_i}{2 p k_{16}} (dx)} \quad (۵۱-۳)$$

ضریب k_{16} نیز مشابه روش استفاده شده برای k_{15} محاسبه می‌شود.

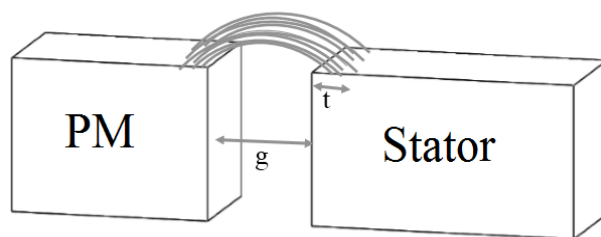
با توجه به پارامترهای g و t نشان داده شده در شکل (۳-۱۴) پرمیانس مسیر شارهای شکفته شده در

لبه داخلی، قطرهای خارجی و داخلی آهنربا بصورت زیر محاسبه می‌شود [۷۵]:

$$P_{fredge} = \mu_0 \mu_r \frac{(D_o - D_i)}{2 \pi \text{Ln}(1 + 2(\frac{t + t^2 + tg}{g})^{0.5})} \quad (۵۲-۳)$$

$$P_{frout} = \mu_0 \mu_r \frac{\pi D_o}{p \alpha_i 2 \pi \text{Ln}(1 + 2(\frac{t + t^2 + tg}{g})^{0.5})} \quad (۵۳-۳)$$

$$P_{frin} = \mu_0 \mu_r \frac{\pi D_i}{p \alpha_i 2 \pi \text{Ln}(1 + 2(\frac{t + t^2 + tg}{g})^{0.5})} \quad (۵۴-۳)$$



شکل (۳-۱۴) - شکستگی شار آهنربا [۷۵]

۳-۳۷-۷-۳ محاسبه رلوکتانس آهنربا

رلوکتانس آهنربای دائم توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\mathfrak{R}_{pm} = \frac{8pl_{pm}}{\mu_0\mu_{rpm}\pi\alpha_i(D_o^2 - D_i^2)} \quad (۳-۵۵)$$

۳-۳۷-۷-۴ محاسبه رلوکتانس فاصله هوایی موثر

رلوکتانس فاصله هوایی موثر توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\mathfrak{R}_g = \frac{8p(g + l_w)}{\mu_0\pi\alpha_i(D_o^2 - D_i^2)} \quad (۳-۵۶)$$

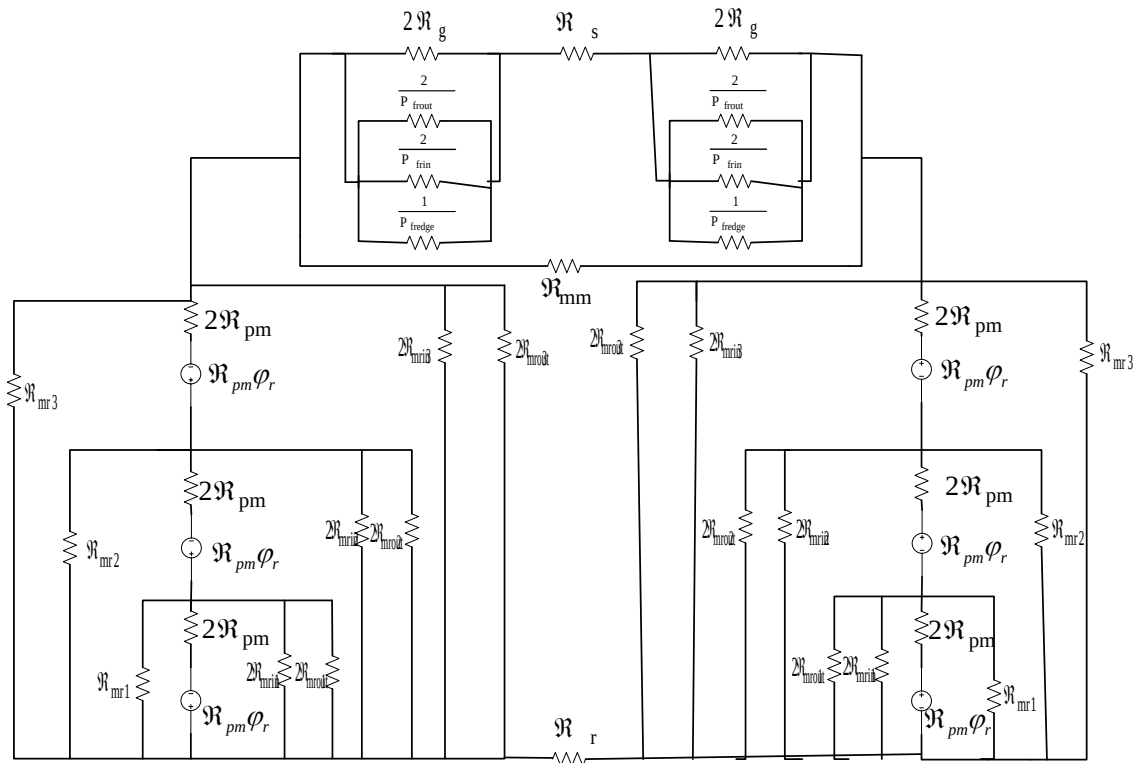
۳-۳۷-۷-۵ مدار معادل مغناطیسی پیشنهادی برای ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون

شیار

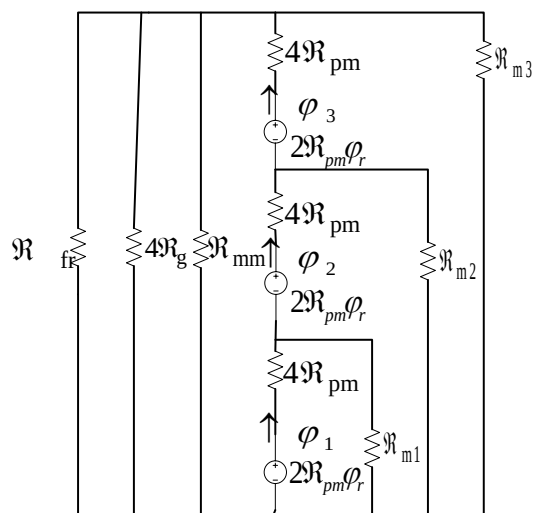
با کنار هم قرار دادن رلوکتانس بخش‌های مختلف و منابع شار، مدار معادل مغناطیسی مطابق شکل (۳-۱۵) برای ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار پیشنهاد می‌شود. لازم به ذکر است که در مدار معادل مغناطیسی پیشنهادی آهنربا به تعداد بخش‌های زیادی تقسیم شده است و هر بخش و مسیرهای شار آن (شامل شار اصلی و شارهای نشتی) در این مدار معادل مدل شده است. اما در شکل (۳-۱۵) برای راحتی ترسیم آهنربا تنها به سه بخش تقسیم شده است. همچنین در این مدار معادل مغناطیسی از روابط پیشنهادی برای محاسبه رلوکتانس بخش‌های مختلف که در قسمت‌های قبل ارائه شد استفاده شده است. در این مدار معادل $\mathfrak{R}_s$ و $\mathfrak{R}_r$ به ترتیب رلوکتانس هسته استاتور و هسته روتور می‌باشند. در محاسبات از این دو رلوکتانس صرف‌نظر شده است زیرا مقدار آنها در مقایسه با سایر

رلوکتانس‌ها بسیار کم می‌باشد. با انجام برخی ساده‌سازی‌ها مدار معادل شکل (۳-۱۵) بصورت شکل

(۳-۱۶) بدست می‌آید.



شکل (۳-۱۵)- مدار معادل مغناطیسی پیشنهادی برای ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار



شکل (۳-۱۶)- مدار معادل مغناطیسی ساده شده

متغیرهای نشان داده شده در مدار معادل شکل (۳-۱۶) برابر است با:

$$\Re_{mi} = 2\Re_{mri} \parallel 4\Re_{mrouti} \parallel 4\Re_{mrini} \quad , i = 1, 2, \dots, n \quad (57-3)$$

$$\Re_{fr} = \frac{2}{P_{fredge}} \parallel \frac{4}{P_{frou}} \parallel \frac{4}{P_{frin}} \quad (58-3)$$

با توجه به مدار معادل های فوق داریم:

$$\Re_{gequ} = \Re_{fr} \parallel 4\Re_g \quad (59-3)$$

$$\Re'_g = 0.5(\Re_{mm} \parallel \Re_{\Re_{gequ}}) \quad (60-3)$$

۳-۷-۳۷-۶ محاسبه ضریب نشت شار

به کمک مدار معادل مغناطیسی پیشنهادی ضریب نشت شار محاسبه می شود. برای هر یک از حلقه های

نشان داده شده در شکل (۳-۱۵) می توان قانون KVL کیرشهف را استفاده کرد. در این صورت خواهیم

داشت:

$$\begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_{n-1} \\ \phi_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\Re_{pm} + 0.5\Re_1 & -0.5\Re_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.5\Re_1 & 2\Re_{pm} + 0.5\Re_1 + 0.5\Re_2 & -0.5\Re_2 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & -0.5\Re_{n-2} & 2\Re_{pm} + 0.5\Re_{n-2} + 0.5\Re_{n-1} & -0.5\Re_{n-1} \\ 2\Re_{pm} & 2\Re_{pm} & 2\Re_{pm} & 2\Re_{pm} & 2\Re_{pm} & \Re'_g \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \Re_{pm}\phi_r \\ \Re_{pm}\phi_r \\ \vdots \\ \Re_{pm}\phi_r \\ (n-1)\Re_{pm}\phi_r \end{bmatrix} \quad (61)$$

که در این رابطه n تعداد بخش های آهنربا است.

با استفاده از قانون تقسیم شار، شار فاصله هوایی برابر است با:

$$\phi_g = \frac{\left(\frac{1}{\Re_{gequ}}\right)}{\left(\frac{1}{\Re_{gequ}}\right) + \left(\frac{1}{\Re_{mm}}\right)} \phi_n \quad (62-3)$$

همچنین شاری که آهنربا تولید می کند برابر است با:

$$\phi_{pm0} = \phi_1 \quad (63-3)$$

ϕ_1 شاری است که از اولین بخش آهنربا خارج می شود. با تقسیم ϕ_g بر ϕ_{pm0} ضریب نشت شار فاصله

هوایی برابر است با:

$$K_{Lg} = \frac{\phi_g}{\phi_{pm0}} \quad (64-3)$$

همچنین متوسط چگالی شار فاصله هوایی برابر است با:

$$B_{avg} = \frac{\varphi_g}{\left(\frac{\pi}{8p}(D_o^2 - D_i^2)\right)} \quad (3-65)$$

تا اینجا نحوه محاسبه مقادیر پارامترهای محاسباتی و اصلاح پارامترهای تصحیح‌پذیر بررسی شد. با توجه به فلوچارت شکل (۳-۱)، مقادیر جدید اصلاح شده پارامترهای تصحیح‌پذیر در فرآیند اجرای الگوریتم جایگزین مقادیر اولیه اتخاذ شده می‌گردد و این روند تا زمانی که مقادیر پارامترهای تصحیح‌پذیر همگرا شود به صورت متوالی تکرار می‌شود. سپس مقدار تابع هدف با توجه به مقادیر پارامترهای محاسباتی و انتخابی محاسبه می‌شود که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۸ نحوه ملاحظه تابع هدف و قیود طراحی

برای طراحی بهینه ماشین می‌توان توابع هدف مختلفی را متناسب با نیاز کارفرما و محدودیت‌های موجود در نظر گرفت. معمولاً در مسائل طراحی بهینه ماشین حداکثر کردن بازده و یا چگالی توان بعنوان تابع هدف انتخاب می‌شود. در این رساله حداکثر کردن بازده بعنوان تابع هدف الگوریتم بهینه‌سازی اتخاذ شده است. قیدهای الگوریتم بهینه‌سازی شامل کران‌های بالا و پایین برای پارامترهای انتخابی بهینه‌پذیر و سایر محدودیت‌های موجود مانند قطر خارجی و طول محوری ماشین می‌باشد. ملاحظه این قیود باید به نحوی در تابع هدف طراحی ماشین انجام شود. برای در نظر گرفتن محدودیت‌های ابعادی، در ابتدا قبل از محاسبه تابع هدف قطر خارجی و طول محوری ماشین با مقادیر حداکثر مجاز آنها مقایسه می‌شود. چنانچه هر یک از این دو پارامتر از حداکثر مقدار مجاز آن بیشتر باشد طرح مربوطه حذف می‌شود. بنابراین مقدار تابع هدف فقط برای طرح‌هایی بدست می‌آید که محدودیت‌های طراحی در آنها رعایت شده باشد.

۹-۳ طراحی ماشین مورد نظر به کمک الگوریتم طراحی

تاکنون روابط مورد نیاز و مراحل الگوریتم طراحی ماشین مورد مطالعه بررسی شد. به منظور طراحی بهینه ماشین از الگوریتم بهینه‌سازی PSO استفاده شده است. الگوریتم ارائه شده برای پیشنهادهای مختلف در نظر گرفته شده برای مقادیر پارامترهای انتخابی بهینه‌پذیر بطور پیوسته تکرار می‌شود و در هر مرحله، مقدار تابع هدف به ازای پیشنهادهای ارائه شده تعیین می‌شود. این روند تا زمانی تکرار می‌شود که اعضای جمعیت پیشنهادی توسط الگوریتم PSO برای پارامترهای بهینه‌پذیر به پیشنهادهای ثابتی همگرا شود. به کمک الگوریتم فوق یک ماشین نمونه با توان $3/7 \text{ kW}$ و سرعت 1400 rpm طراحی می‌شود. مشخصات ماشین طراحی شده در جدول (۳-۱) داده شده است.

جدول (۳-۱)- مشخصات ماشین طراحی شده به کمک الگوریتم پیشنهادی

پارامتر	واحد	مقدار
توان نامی	[kW]	۳/۷
سرعت نامی	[rpm]	۱۴۰۰
تعداد فازها	-	۳
تعداد لایه‌های موتور	-	۱
فرکانس نامی	[Hz]	۷۰
ولتاژ مؤثر نامی هر فاز	[V]	۶۵/۲۲
ولتاژ القایی داخلی هر فاز ماشین	[V]	۶۴/۱۴
تعداد رشته‌های موازی سیم	-	۱
بارگذاری الکتریکی ویژه	[A/m]	۱۵۷۳۰
دامنه چگالی شار فاصله هوایی	[T]	۰/۵۰۸
متوسط چگالی شار فاصله هوایی	[T]	۰/۳۰۳
حداکثر چگالی شار در هسته استاتور	[T]	۱/۷۴۳
حداکثر چگالی شار در هسته روتور	[T]	۱/۶۳۳
فاصله هوایی بین سطح آهنربای دائم و سیم‌پیچی	[mm]	۳/۵

۰/۶	-	نسبت قوس قطب مغناطیس دائم به گام قطب
۰/۵۱۶	-	نسبت قطر داخلی به قطر خارجی هسته استاتور
۲۲۰	[mm]	قطر خارجی هسته استاتور
۱۱۳/۶	[mm]	قطر داخلی هسته استاتور
۴/۴۲	[A/mm ²]	چگالی جریان در سیم پیچی
۴/۵	[mm ²]	سطح مقطع هادی سیم پیچی
۰/۱۵	[mm]	ضخامت عایق سیم پیچی
۱۳۸	-	تعداد دور سیم پیچی سری استاتور در هر فاز
۲۳	-	تعداد دور سیم پیچی در هر فاز زیر هر قطب
۷	-	تعداد طبقات سیم پیچی
۹/۰۲	[mm]	ضخامت کلی سیم پیچی
۱۵/۲	[mm]	طول محوری هسته استاتور
۱۰	[mm]	طول محوری هسته روتور
۹/۲	[mm]	طول محوری آهنربای دائم
۰/۰۹۹	[Ω]	مقاومت هر فاز سیم پیچی استاتور
۱۱۶/۲	[W]	تلفات مسی سیم پیچ استاتور
۲۲/۳۹	[W]	تلفات آهنی هسته استاتور
۰/۹۵	[W]	تلفات بادخوری
۲۲/۵	[W]	تلفات یاتاقان ها
۲۰۸/۵	[mΩ]	راکتانس سنکرون ماشین
۱۹/۸	[A]	جریان مؤثر سیم پیچی در هر فاز استاتور
-۳/۹۳	°	زاویه قدرت
۰/۸۱۱	-	ضریب نشت شار
۰/۹۸۶	-	ضریب قدرت
۹۶	%	راندمان

۳-۱۰ نتیجه‌گیری فصل

در این فصل ابتدا پارامترهای طراحی ماشین دسته‌بندی شدند. بر اساس دسته‌بندی انجام شده نحوه تعیین مقدار هر یک از این پارامترها شرح داده شد. برای محاسبه برخی از پارامترهای طراحی مانند ولتاژ القایی، تعداد لایه‌های سیم‌پیچی، ضخامت سیم‌پیچی و ... روابط و الگوریتم جدیدی پیشنهاد شد. همچنین برای محاسبه ضریب نشت شار و متوسط چگالی شار فاصله هوایی از یک مدار معادل مغناطیسی پیشنهادی استفاده شد. برای محاسبه المان‌های این مدار معادل نیز روابط جدیدی استخراج شده و در مدار معادل بکار گرفته شد. بر اساس طبقه‌بندی انجام شده و روابط بدست آمده یک الگوریتم طراحی برای طراحی بهینه ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار پیشنهاد شد. در نهایت با استفاده از الگوریتم پیشنهادی یک نمونه ماشین طراحی شد.

فصل ۴ : ارزیابی الگوریتم

طراحی پیشنهادی به کمک شبیه سازی به

روش اجزاء محدود و نتایج آزمایشگاهی

۴-۱ مقدمه فصل

در فصل قبل روابط ابعادی و الگوریتم طراحی ماشین آهنربای دائم شار محوری ارائه شد. سپس به کمک الگوریتم پیشنهادی یک ماشین نمونه طراحی شد. در این فصل برای بررسی عملکرد ماشین طراحی شده و در نتیجه صحت الگوریتم طراحی از نتایج شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود و اندازه‌گیری در محیط آزمایشگاه استفاده می‌شود. بدین منظور ابتدا عملکرد ماشین توسط شبیه‌سازی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و سپس نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری در محیط آزمایشگاه ارائه می‌شود.

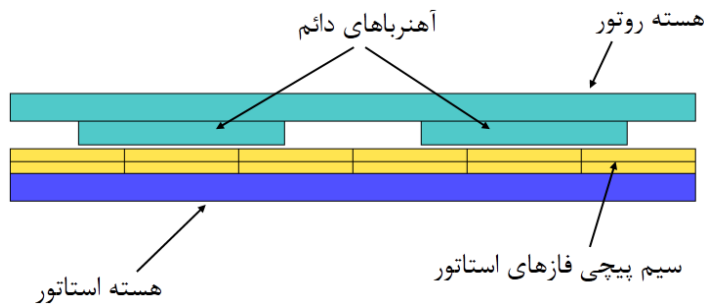
۴-۲ شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود

برای شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود از نرم‌افزار اجزاء محدود JMag Designer استفاده می‌شود. به کمک این نرم‌افزار صحت طراحی انجام شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بدین منظور ابتدا مراحل مدلسازی و شبیه‌سازی موتور طراحی شده در نرم‌افزار مربوطه شرح داده می‌شود. سپس نتایج بدست آمده نقد و بررسی می‌شود.

۴-۲-۱ ترسیم ساختار ماشین

اولین مرحله در شبیه‌سازی به کمک روش اجزاء محدود، ترسیم ساختار ماشین مورد نظر است. برای این کار می‌توان از امکانات ترسیمی خود نرم‌افزار استفاده کرد و یا اینکه می‌توان این کار را به کمک نرم‌افزارهای تخصصی ترسیم مانند Solidworks، انجام داد. لازم به ذکر است که یکی از قابلیت‌های مهم نرم‌افزار JAMG، امکان لینک شدن آن با نرم‌افزار Solidworks است. همچنین یکی دیگر از قابلیت‌های کلیدی این نرم‌افزار این است که می‌توان در ساختارهای متقارن تنها بخشی از ساختار را مدل کرده و سپس نتایج بدست آمده را به کل ساختار تعمیم داد. اهمیت این قابلیت در شبیه‌سازی ساختارهای سه بعدی و تحلیل‌های دینامیکی دو چندان می‌شود. در ساختار ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار نیز تقارن وجود دارد. در واقع این ساختار از کنار هم قرار گرفتن تعدادی جفت قطب

تشکیل شده است. بنابراین می‌توان با شبیه‌سازی تنها یک جفت قطب عملکرد ماشین را در محیط نرم‌افزار بررسی کرد. شکل (۴-۱) ساختار یک جفت قطب ماشین را نشان می‌دهد. با پیاده‌سازی این ساختار در محیط نرم‌افزار اجزاء محدود عملکرد ماشین بررسی می‌شود.



شکل (۴-۱) - ساختار دو بعدی یک جفت قطب ماشین

۲-۲-۴ تعیین جنس بخش‌های مختلف موتور

پس از ترسیم ساختار ماشین باید جنس بخش‌های مختلف آن مشخص شود. جنس بخش‌های مختلف ماشین در جدول (۴-۱) داده شده است.

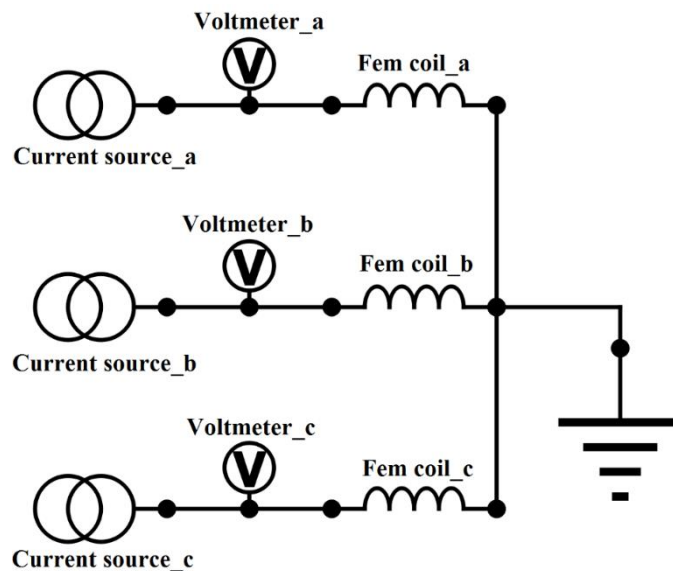
جدول (۴-۱) - جنس بخش‌های مختلف موتور

جنس	بخش
50A470	هسته استاتور
SUS430	هسته روتور
NdFeB	آهنربا
مس	سیم‌پیچ

۳-۲-۴ تغذیه موتور

مطابق شکل (۴-۲) از یک مدار الکتریکی برای تغذیه ماشین استفاده شده است. در هنگام اجرای برنامه معادلات این مدار همزمان با معادلات میدان حل می‌شود. به منبع جریان نشان داده شده در شکل (۴-۲) می‌توان هر شکل موج دلخواهی اعمال کرد. به منظور شبیه‌سازی شرایط عملکردی مختلف مقدار این منبع جریان را می‌توان تنظیم کرد. به عنوان مثال در حالت مدار باز مقدار منبع جریان صفر در نظر

گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که می‌توان به جای منبع جریان از منبع ولتاژ استفاده و ماشین را راه‌اندازی کرد.



شکل (۴-۲) - مدار تغذیه ماشین

۴-۲-۴ اعمال شرایط مرزی

- تعریف شرط مرزی مربوط به تقارن

اگر در ساختار مورد مطالعه تقارن وجود داشته باشد از این شرط استفاده می‌شود. به عنوان مثال ساختار ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار از کنار هم قرار گرفتن تعدادی جفت قطب تشکیل شده است. همچنین ساختار مربوطه در راستای محوری نسبت به وسط استاتور نیز متقارن است. در این صورت نرم افزار می‌تواند با شبیه‌سازی تنها یک جفت قطب از نیمی از ماشین، عملکرد ماشین را از نظر الکترومغناطیسی تحلیل کرده و نتایج را ارائه کند. استفاده از این شرط مرزی باعث کاهش زمان اجرای برنامه و حجم محاسبات می‌شود. بخصوص در شبیه‌سازی دینامیکی تعریف این شرط مرزی بسیار مفید می‌باشد.

- تعریف شرط مرزی مربوط به عایق مغناطیسی

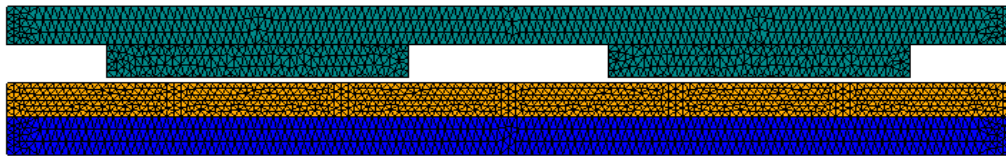
اگر بخواهیم نشت شار به بیرون از ساختار موتور را نیز مشاهده کنیم از شرط مرزی عایق مغناطیسی استفاده می‌کنیم. به کمک این شرط مشخص می‌کنیم که محاسبات الکترومغناطیسی تا چه فاصله‌ای در محیط اطراف ماشین انجام شود. این شرط مرزی با یک فاصله هوایی بر روی سطحی که ساختار ماشین را در بر گرفته اعمال می‌شود. در این صورت نرم‌افزار مولفه عمودی شار را بر روی این سطح صفر در نظر می‌گیرد و فرض می‌کند که شار مماس بر این سطح است و از آن خارج نمی‌شود.

۴-۲-۵ معرفی حرکت روتور

به منظور بررسی عملکرد ماشین در حالت دائمی باید بخش‌های متحرک آن با سرعت ثابت بچرخند. برای این منظور هسته روتور و آهنرباهای دائم توسط قابلیت موجود در نرم‌افزار با سرعت ثابت ۱۴۰۰ دور بر دقیقه چرخانده می‌شوند.

۴-۲-۶ مش‌بندی

مش‌بندی یکی از مهم‌ترین بخش‌های فرآیند شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود می‌باشد. نحوه مش‌بندی تأثیر قابل توجهی بر روی دقت نتایج دارد. در حالت کلی مش‌بندی بزرگ باعث کاهش دقت نتایج می‌شود. از طرف دیگر مش‌بندی با مش‌های کوچک باعث افزایش زمان اجرای برنامه می‌شود. با داشتن درک صحیح از نحوه توزیع چگالی شار در داخل ماشین می‌توان مش‌بندی مناسبی انجام داد. در بخش‌هایی از ماشین که اندازه یا جهت شار دارای تغییرات کمی است مش‌بندی بصورت درشت و در بخش‌هایی که تغییرات زیاد است مش‌بندی بصورت ریز انجام می‌شود. به عنوان مثال بخش‌هایی از روتور و استاتور که مجاور به فاصله هوایی هستند باید دارای مش ریز باشند. در شکل (۳-۴) یک نمونه مش‌بندی انجام شده بر روی ساختار مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل (۴-۳) - مش‌بندی یک جفت قطب ماشین

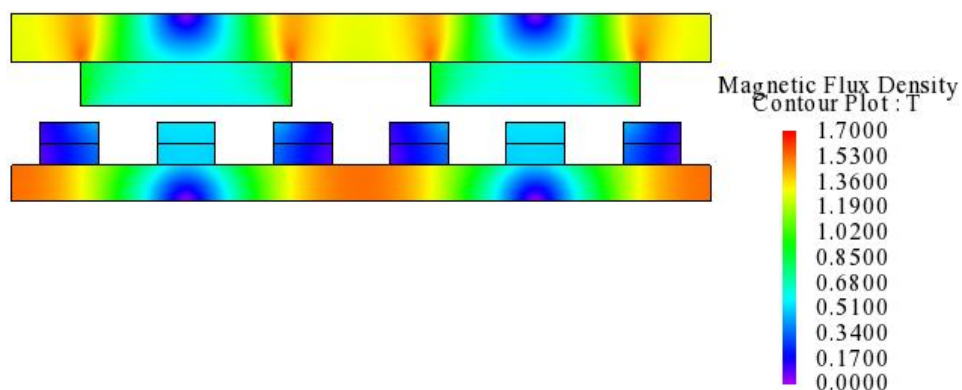
پس از انجام تنظیمات مربوط به زمان اجرا و تعداد گام‌ها شبیه‌سازی اجرا شده و نتایج استخراج می‌شود. باید دقت کرد که تعداد گام‌های کم در یک سیکل باعث کاهش دقت و ایجاد شکستگی در شکل نمودارها می‌شود و از طرفی تعداد گام‌های زیاد باعث افزایش زمان اجرای برنامه می‌گردد.

۴-۲-۷ نتایج شبیه‌سازی

برای بررسی عملکرد ماشین طراحی شده راه‌اندازی ماشین در دو حالت مدار باز و تحت بار نامی انجام می‌شود.

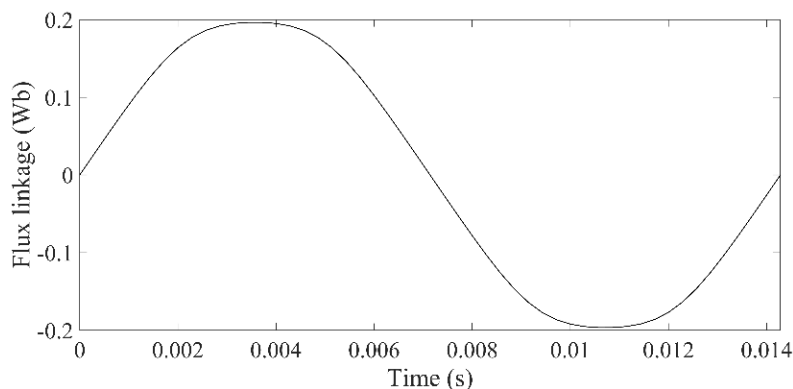
۴-۲-۷-۱ راه‌اندازی ماشین در حالت مدار باز

در حالت مدار باز شار تولیدی در داخل ماشین فقط ناشی از آهنرباهای دائم می‌باشد. در شکل (۴-۴) توزیع چگالی شار در داخل ماشین بصورت یک نقشه رنگی (Contour Plot) نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود حداکثر چگالی شار در هسته روتور و استاتور با آنچه در الگوریتم طراحی در نظر گرفته شده است مطابقت دارد.

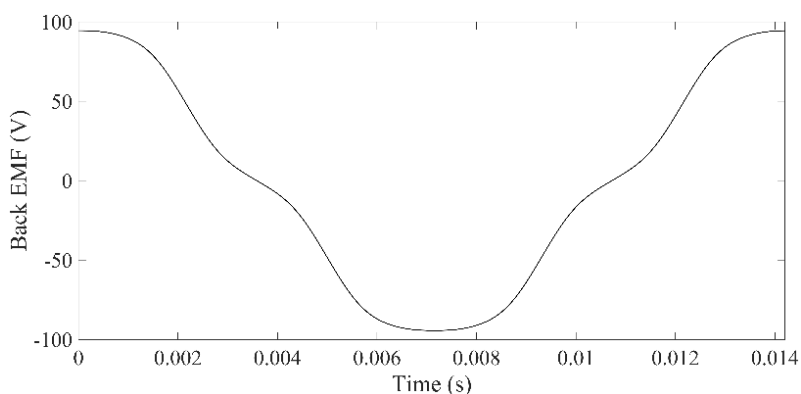


شکل (۴-۴) - توزیع چگالی شار در داخل موتور در حالت مدار باز

شارهای پیوندی سیم‌پیچی‌ها باعث القای ولتاژ در داخل آنها می‌شود. در شکل (۴-۵) شار پیوندی یکی از فازهای ماشین نشان داده شده است. ولتاژ القاء شده در این فاز با مشتق‌گیری از این شار پیوندی بدست می‌آید. در شکل (۴-۶) ولتاژ القاء شده در این فاز نشان داده شده است. توجه شود که مشتق‌گیری نسبت به خطا حساس می‌باشد و لذا هر بی‌دقتی کوچکی در محاسبه شار پیوندی مانند عدم استفاده از مش‌های کوچک و ... می‌تواند منجر به خطای بزرگی در ولتاژ القایی ماشین شود. با توجه به شکل (۴-۶) مشاهده می‌شود که ولتاژ القایی ماشین یک موج سینوسی خالص نمی‌باشد. لازم به ذکر است در هر طراحی امکان دستیابی به شکل موج ولتاژ القایی کاملاً سینوسی و یا دوزنقه‌ای تقریباً غیر ممکن است اما با رعایت نکاتی می‌توان شکل موج ولتاژ را به سینوسی خالص نزدیک کرد. در فصل بعد روش‌هایی جهت دستیابی به ولتاژ سینوسی‌تر پیشنهاد می‌شود.



شکل (۴-۵) - شار پیوندی یک فاز سیم‌پیچ استاتور

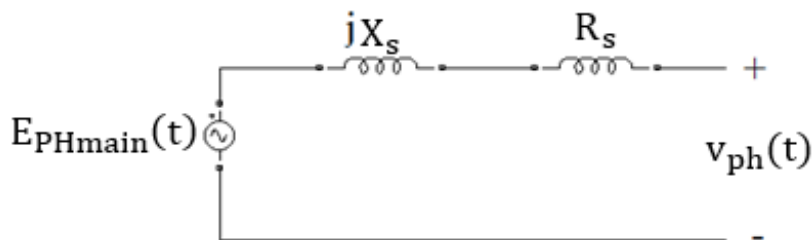


شکل (۴-۶) - شکل موج ولتاژ القایی یک فاز حاصل از مشتق‌گیری از شار پیوندی

۲-۷-۲-۴ راه‌اندازی ماشین تحت بار نامی

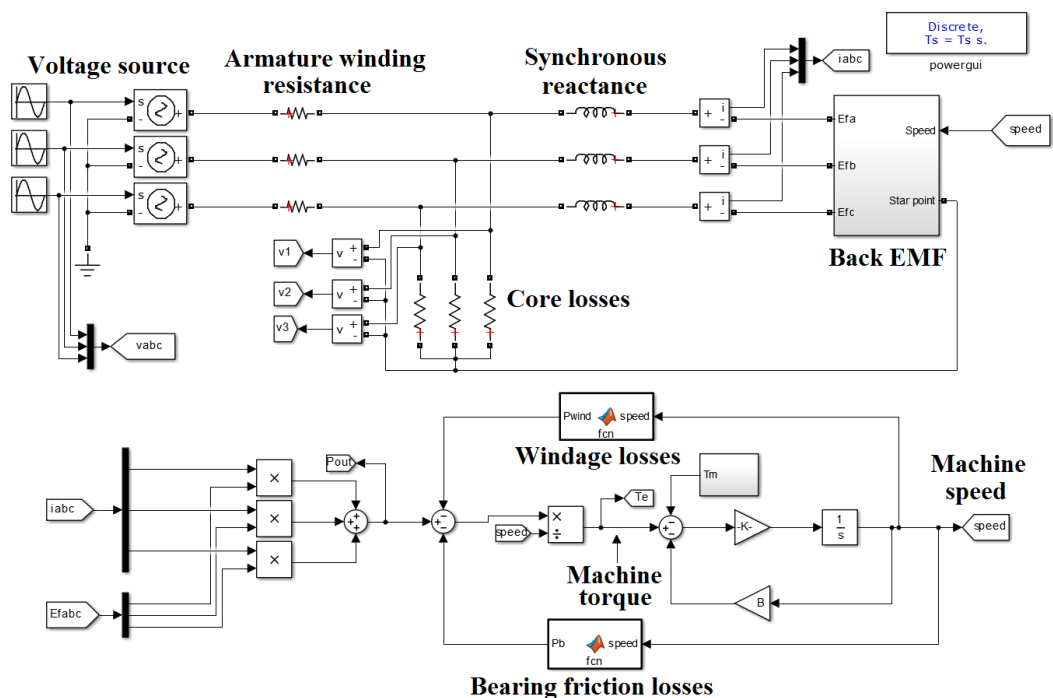
برای بررسی عملکرد ماشین تحت بار نامی از روش‌های مختلفی استفاده شده است که عبارتند از:

- ۱- برای مدل‌سازی رفتار دینامیکی ماشین مقادیر شار پیوندی و اندوکتانس سه فاز ماشین از نرم‌افزار اجزاء محدود بدست آمده است. سپس مدار معادل نشان داده شده در شکل (۴-۷) در محیط نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی شد. مقادیر بدست آمده از نرم‌افزار اجزاء محدود نیز در داخل مدار معادل اعمال شده است. سپس با اعمال یک منبع ولتاژ سینوسی به این مدار معادل عملکرد آن تحت سرعت نامی بررسی شده است.



شکل (۴-۷) - مدار معادل الکتریکی هر فاز ماشین

در شکل (۴-۸) مدار معادل پیاده‌سازی شده در نرم‌افزار متلب نشان داده شده است.



شکل (۴-۸) - شماتیک شبیه‌سازی مدار معادل الکتریکی ماشین در متلب

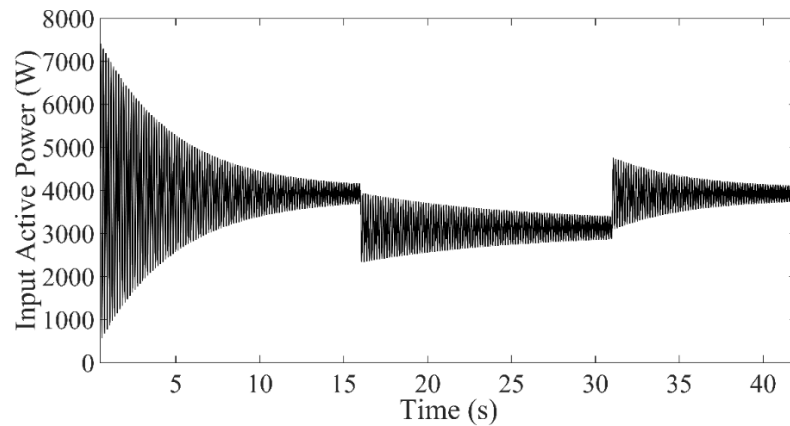
حاصل ضرب لحظه‌ای ولتاژ القایی و جریان هر فاز، توان لحظه‌ای خروجی هر فاز را نشان می‌دهد و با جمع توان فازها در هر لحظه، توان لحظه‌ای کل خروجی بدست می‌آید. مقدار گشتاور الکترومغناطیسی تولیدی موتور با تقسیم توان لحظه‌ای کل بر سرعت مکانیکی بدست می‌آید. گشتاور اصطکاکی به صورت متناسب با سرعت مدل شده و در مدار شکل (۸-۴) با استفاده از معادلات دینامیکی زیر منظور می‌شود:

$$T_e - T_m = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (۱-۴)$$

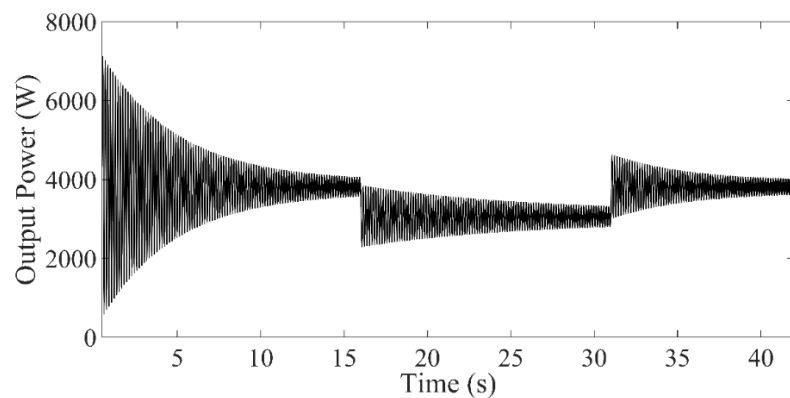
$$d\omega_m = \frac{1}{J} \int (T_e - T_m - B\omega_m) dt \quad (۲-۴)$$

در روابط فوق مقدار ضریب اصطکاک B از تقسیم توان بر مجذور سرعت مکانیکی ماشین بر حسب رادیان بر ثانیه بدست می‌آید. در واقع فرض شده است که بار ماشین از نوع اصطکاکی باشد. همچنین مقدار ممان اینرسی J در واقع ممان اینرسی بخش متحرک ماشین شامل آهنرباهای دائم، هسته روتور و شفت می‌باشد. یکی از قابلیت‌های نرم‌افزارهای ترسیم (Catia، Solidworks و ...) محاسبه جرم، حجم و ممان اینرسی هر شکل هندسی می‌باشد. بنابراین به کمک قابلیت مربوطه ممان اینرسی بار محاسبه و برابر با 0.24 kg/m^2 بدست آمد. ممان اینرسی بدست آمده در کلیه شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شد. در این شبیه‌سازی مقادیر اولیه پارامترهای خروجی نزدیک مقادیر پاسخ حالت دائمی انتخاب شده است تا پاسخ حالت دائمی سیستم سریعاً بدست آمده و در شکل‌ها و نمودارهای حاصل از شبیه‌سازی قابل مشاهده باشند. در شبیه‌سازی انجام شده ابتدا موتور تحت شرایط نامی راه‌اندازی شده و به حالت دائمی خود می‌رسد. در زمان $t = 16 \text{ (s)}$ بار فرضی موتور از طریق کاهش ضریب اصطکاک به صورت ناگهانی به ۸۰ درصد مقدار نامی کاهش می‌یابد. بعد از رسیدن موتور به حالت دائمی در ۸۰ درصد بار نامی، در زمان $t = 31 \text{ (s)}$ بار موتور از ۸۰ درصد بار نامی بطور ناگهانی به مقدار نامی خود افزایش می‌یابد. برای این شبیه‌سازی یک ولتاژ سینوسی سه فاز با فرکانس ۷۰ Hz و دامنه ولتاژ فاز ۹۱ V به ترمینال ماشین اعمال شده است. در شکل (۹-۴) توان اکتیو ورودی ماشین نشان داده شده است. توان لحظه‌ای خروجی ماشین در شکل (۱۰-۴) و گشتاور لحظه‌ای آن در شکل (۱۱-۴)، در شرایط بار کامل و ۸۰ درصد بار

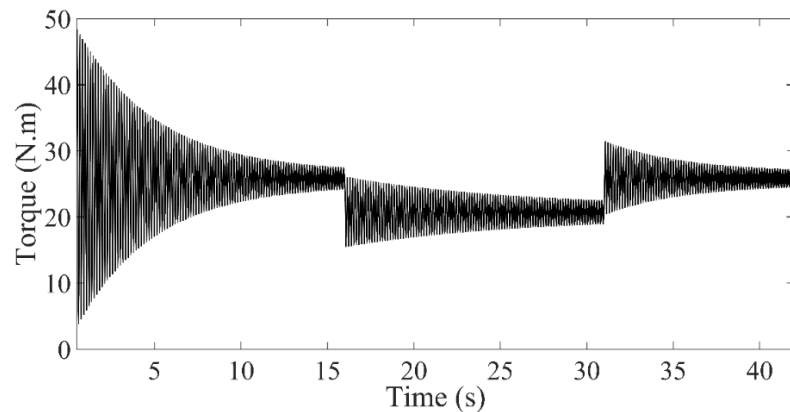
کامل نشان داده شده است. ماشین ابتدا در شرایط دائمی و با بار نامی کار می‌کند سپس با کاهش آنی بار، توان و گشتاور ماشین با اندکی نوسانات به ۸۰ درصد مقادیر نامی کاهش می‌یابد. با افزایش مجدد بار، توان و گشتاور خروجی نیز پس از اندکی نوسان به مقادیر نامی خود باز می‌گردند.



شکل (۹-۴)- توان اکتیو ورودی لحظه‌ای موتور در ولتاژ تغذیه نامی و بارهای مختلف

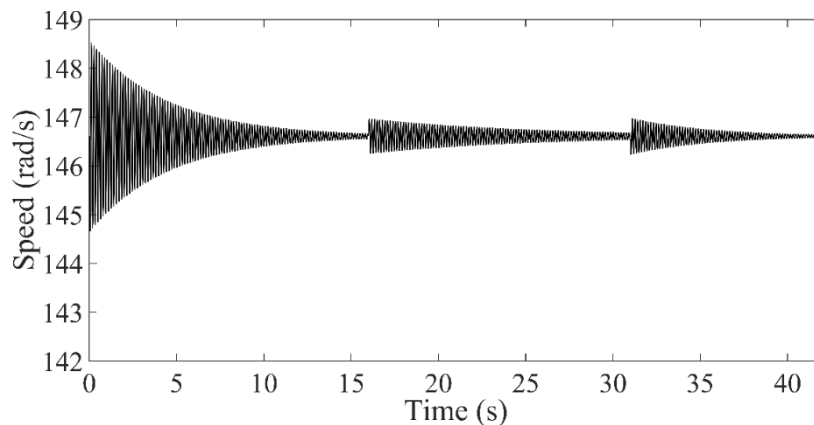


شکل (۱۰-۴)- توان خروجی لحظه‌ای موتور در ولتاژ تغذیه نامی و بارهای مختلف



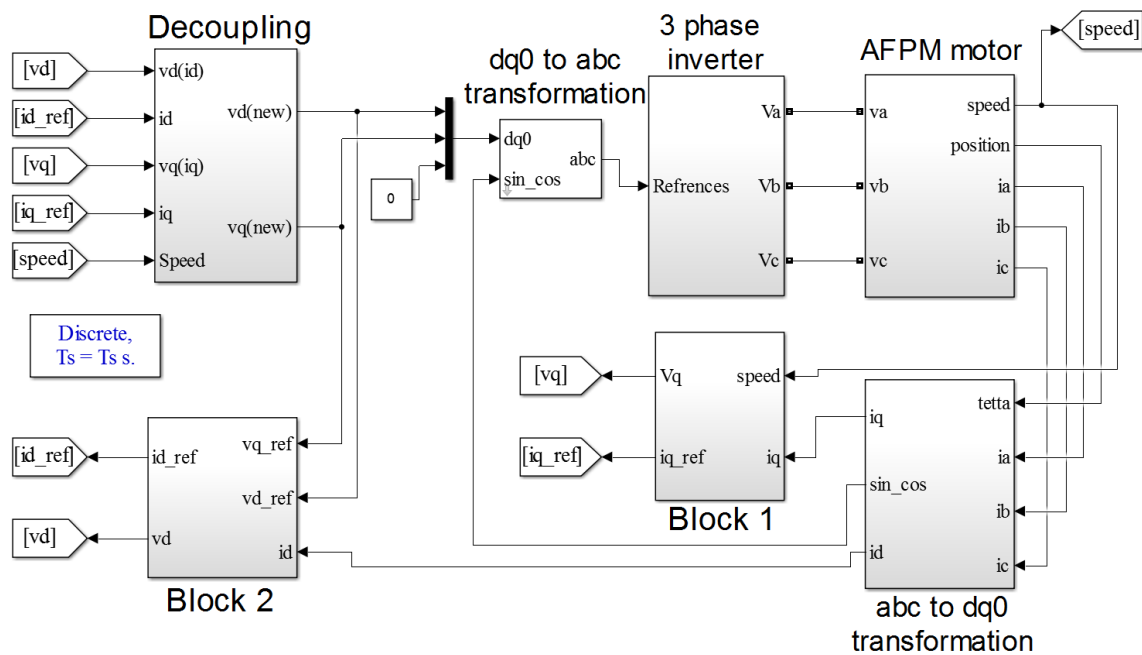
شکل (۱۱-۴)- گشتاور الکترومغناطیسی لحظه‌ای موتور در ولتاژ تغذیه نامی و بارهای مختلف

تغییرات سرعت مکانیکی روتور در شکل (۴-۱۲) در بار نامی و ۸۰ درصد بار نامی نشان داده شده است. وقتی موتور با بار نامی کار می‌کند با برداشتن بار ابتدا روتور اندکی سرعت می‌گیرد و پس از مدت کوتاهی به مقدار سنکرون بر می‌گردد. برعکس حالت بارزدایی، با افزایش بار ابتدا سرعت روتور اندکی کاهش می‌یابد و پس از مدتی به مقدار سنکرون بر می‌گردد.



شکل (۴-۱۲)- تغییرات سرعت مکانیکی موتور در ولتاژ تغذیه نامی و بارهای مختلف

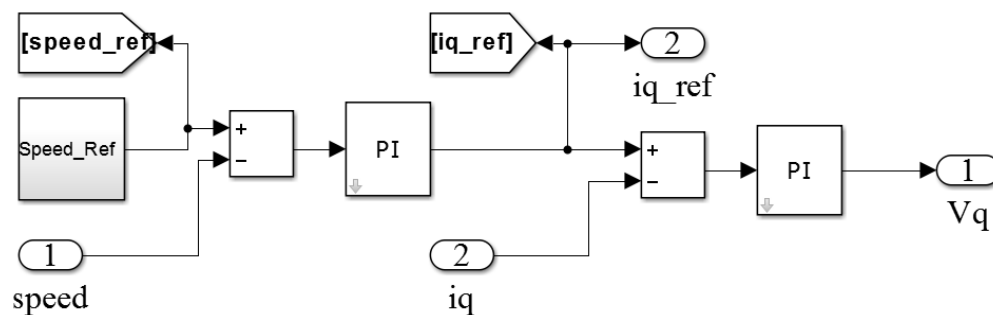
۲- در روش دوم نیز مدار معادل ماشین در محیط نرم‌افزار پیاده‌سازی می‌شود. در این روش به جای استفاده از منبع سینوسی برای تغذیه ماشین از سیستم درایو استفاده می‌شود. بعبارت دیگر با پیاده‌سازی سیستم درایو به روش کنترل میدان جهتدار در محیط متلب ماشین به کمک این سیستم راه‌اندازی شده و عملکرد آن بررسی شده است. در شکل (۴-۱۳) مدار پیاده‌سازی شده به منظور تغذیه ماشین با سیستم درایو نشان داده شده است.



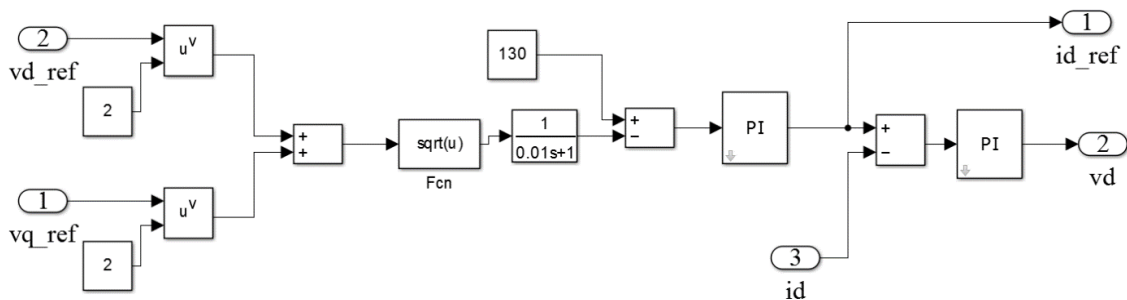
شکل (۴-۱۳) - راهاندازی موتور طراحی شده به کمک سیستم درایو به روش کنترل میدان جهتدار

نحوه عملکرد سیستم به این صورت است که با توجه به شکل (۴-۱۴) پس از نمونه‌گیری از سرعت مکانیکی روتور، این مقدار با مرجع سرعت به صورت پیوسته از زمان مقایسه می‌شود. سیگنال مقایسه شده خطای حاصل از عدم مطابقت سرعت واقعی و مرجع موتور می‌باشد که برای کنترل و حداقل کردن آن، این سیگنال وارد PI کنترلر مربوط به سرعت مکانیکی موتور می‌شود. خروجی این کنترلر مقدار مرجع جریان محور q را می‌سازد. همچنین به کمک مدار نشان داده شده در شکل (۴-۱۵) مقدار مرجع جریان محور d بدست می‌آید. حال مطابق شکل (۴-۱۶) پس از نمونه‌گیری از جریان سه فاز آرمیچر و منتقل کردن این جریان‌ها از دستگاه ساکن سه فاز abc به دستگاه چرخان dq مقادیر واقعی جریان‌های d و q حاصل می‌شوند. با مقایسه این مقادیر واقعی با مقدار مرجع جریان‌های d و q سیگنال خطای مربوط به هر جریان ساخته شده و برای حداقل کردن آنها این سیگنال‌ها وارد کنترلرهای مربوط به هر جریان می‌شوند. خروجی کنترلر جریان محور d مقدار مرجع ولتاژ محور d و به همین ترتیب خروجی کنترلر جریان محور q مقدار مرجع ولتاژ محور q را می‌سازد که این ولتاژها به منظور کنترل صحیح و

مناسب i_d و i_q وارد بلوک جداکننده^۱ می‌شوند. در شکل (۴-۱۷) مدار پیاده‌سازی شده در بلوک جداکننده نشان داده شده است. ولتاژهای خروجی این بلوک با استفاده از تبدیل دستگاه گردان dq به دستگاه ساکن abc، ولتاژهای سه فاز مرجع را تولید کرده که به منبع تولید کننده فرمان گیت کلیدهای قدرت اعمال می‌شوند. با اعمال فرمان گیت کلیدهای قدرت ولتاژ مورد نیاز موتور با عمل کلیدزنی اینورتر تولید می‌گردد.

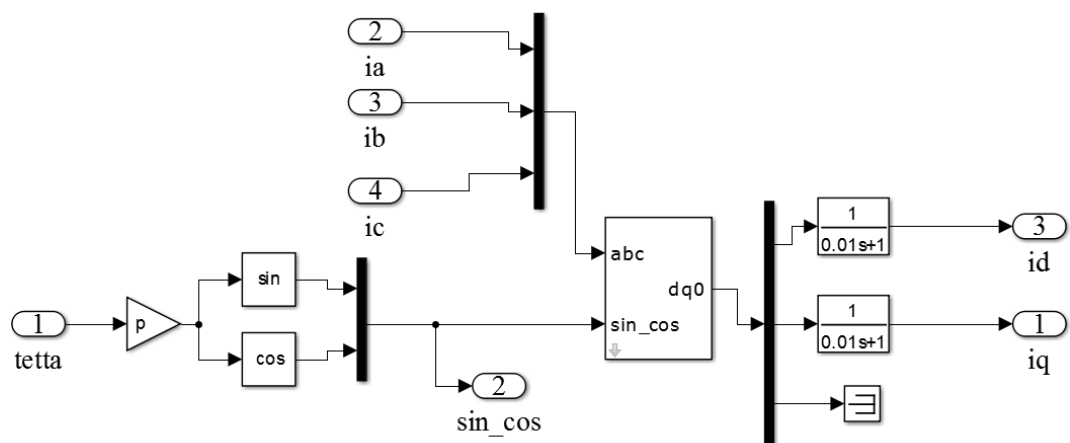


شکل (۴-۱۴) - مدار پیاده‌سازی شده در بلوک Block 1

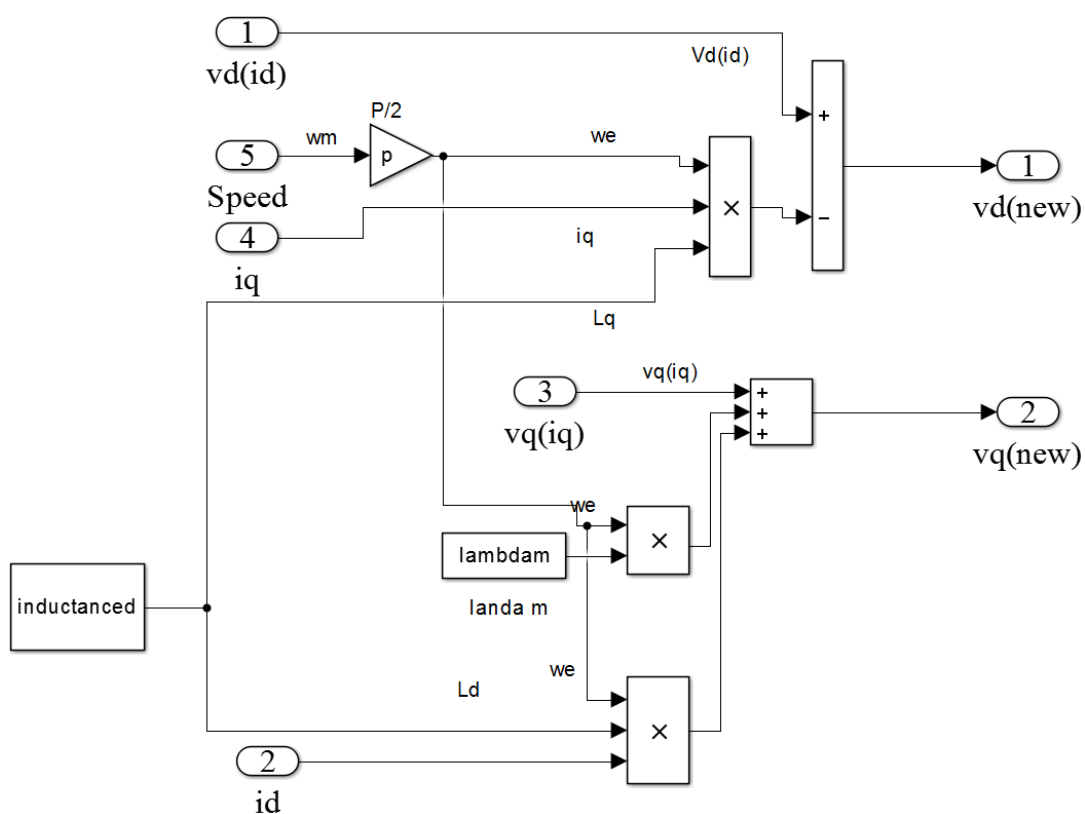


شکل (۴-۱۵) - مدار پیاده‌سازی شده در بلوک Block 2

¹ Decoupling



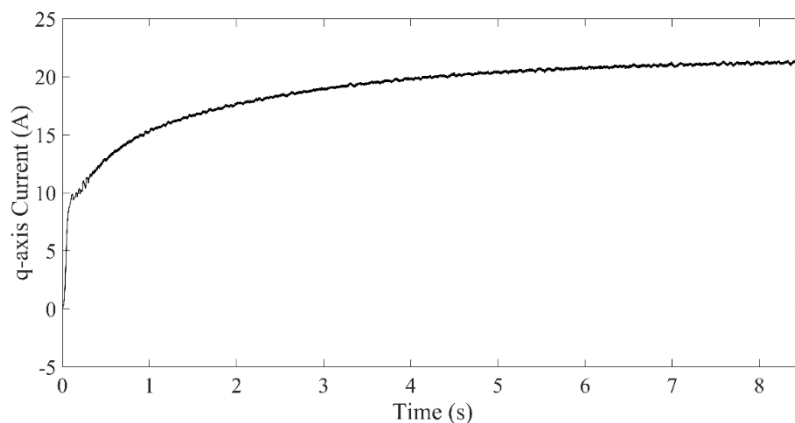
شکل (۴-۱۶) - منتقل کردن جریان‌ها از دستگاه ساکن سه فاز abc به دستگاه چرخان dq



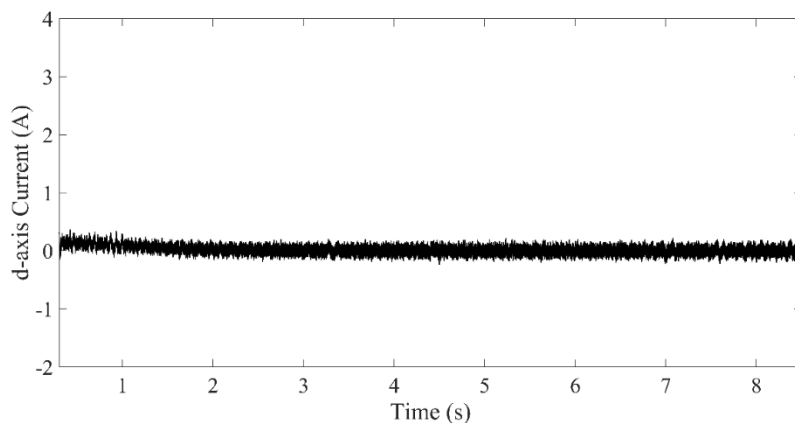
شکل (۴-۱۷) - مدار پیاده‌سازی شده در بلوک Decoupling

برخی از نتایج شبیه‌سازی موتور در این بخش ارائه خواهند شد. شبیه‌سازی طوری انجام شده است که با تغییرات سرعت، توان نیز متناسب با آن تغییر کند. برخی از نتایج حاصل از شبیه‌سازی موتور طراحی شده به شرح زیر است:

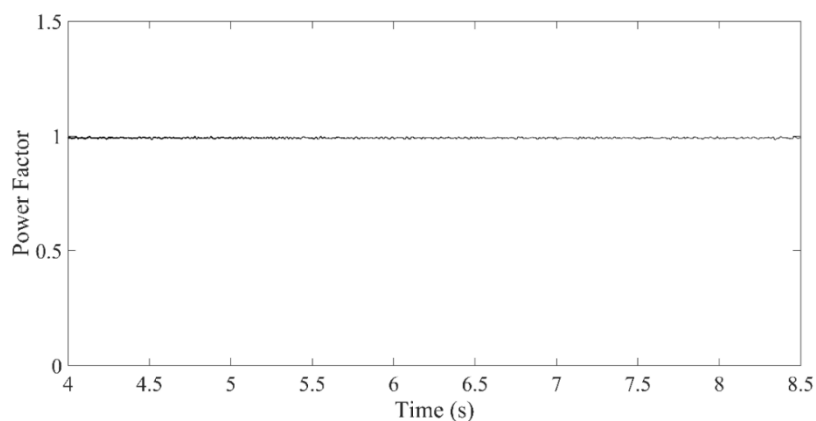
در شکل (۴-۱۸) جریان محور q نشان داده شده است. همچنین جریان محور d در شکل (۴-۱۹) نمایش داده شده است. در طراحی سیستم کنترلی سعی شده که تا حد امکان گشتاور مورد نیاز موتور از طریق جریان محور q تامین شود. با این کار جریان آرمیچر با ولتاژ القایی هر فاز هم فاز شده و چون موتور در زوایای قدرت پایین کار می‌کند، اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان ترمینال بسیار کوچک خواهد شد و نتیجتاً موتور در ضریب توان بالا عمل خواهد کرد. در شکل (۴-۲۰) ضریب توان موتور نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود ضریب توان ماشین نزدیک ۱ می‌باشد. همچنین بازده ماشین در شکل (۴-۲۱) نشان داده شده است. مقدار بازده ماشین طراحی شده بالا بوده و با الگوریتم طراحی مطابقت دارد. در شکل (۴-۲۲) تغییرات سرعت ماشین بر حسب زمان نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود ماشین از حالت سکون شروع به حرکت کرده و به سرعت نامی خود می‌رسد.



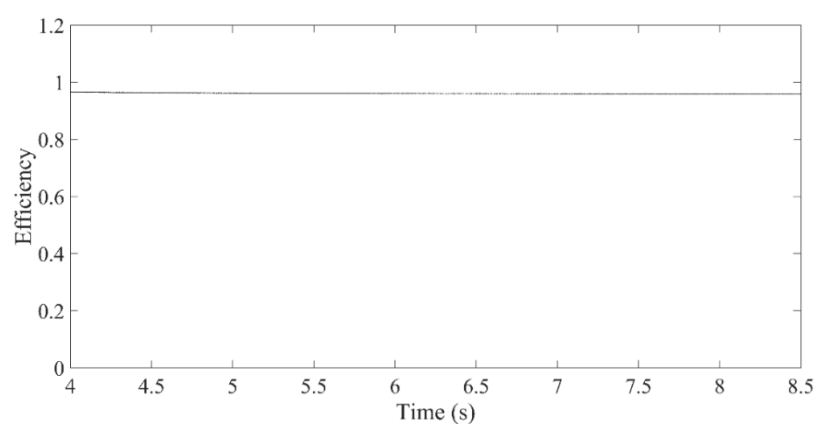
شکل (۴-۱۸)- جریان محور q موتور تغذیه شده توسط درایو



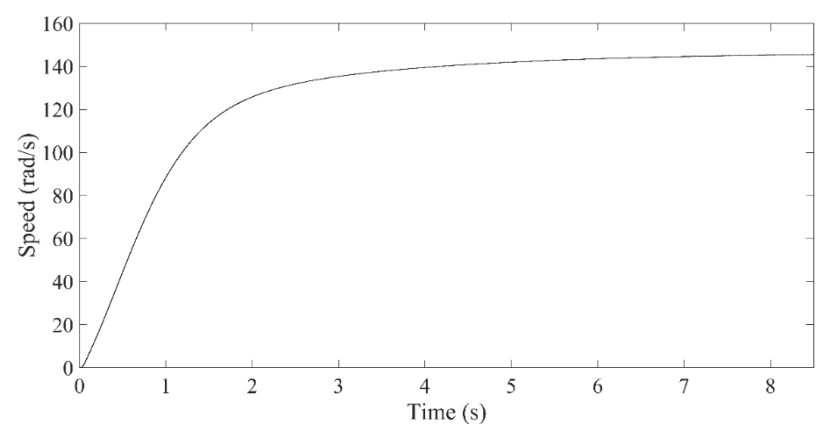
شکل (۴-۱۹)- جریان محور d موتور تغذیه شده توسط درایو



شکل (۴-۲۰) - ضریب توان موتور تغذیه شده توسط درایو



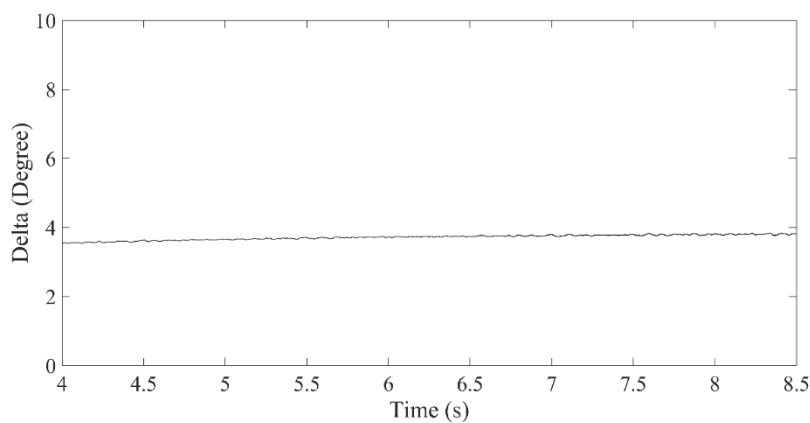
شکل (۴-۲۱) - بازده موتور تغذیه شده توسط درایو



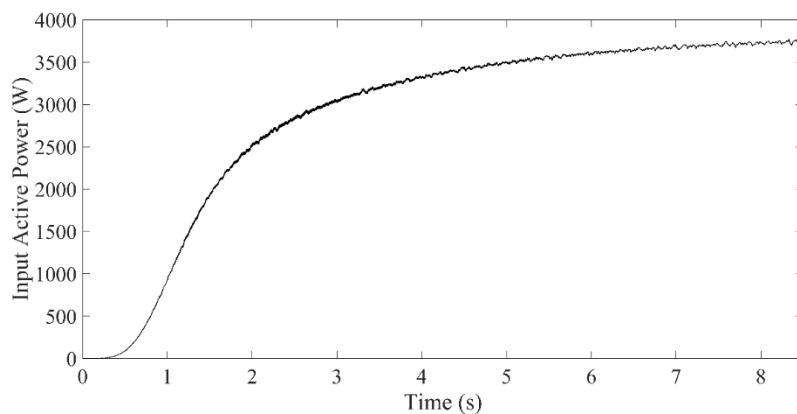
شکل (۴-۲۲) - سرعت مکانیکی موتور تغذیه شده توسط درایو

در شکل (۲۳-۴) زاویه قدرت موتور طراحی شده نشان داده شده است. در شبیه‌سازی‌های این فصل ولتاژها و جریان‌ها غیر سینوسی می‌باشند و برای محاسبه اختلاف فازها، زاویه قدرت و ضریب توان باید دقت و توجه بیشتری نمود. روش بکار رفته برای محاسبه ضریب توان به این صورت است که با استفاده

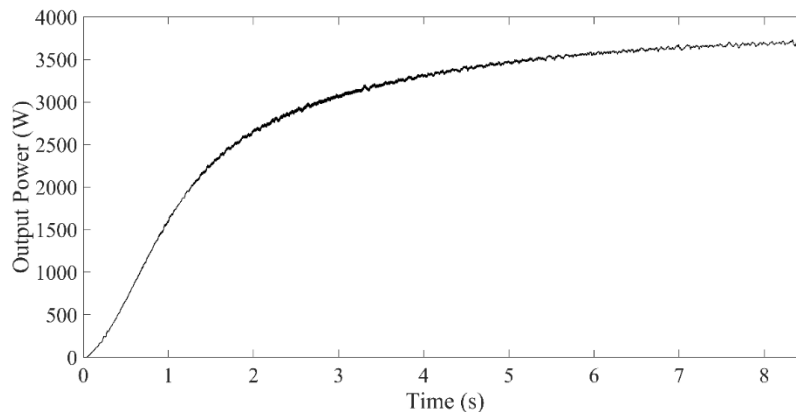
از مقادیر لحظه‌ای ولتاژها و جریان‌ها ابتدا توان اکتیو محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از مقادیر موثر ولتاژها و جریان‌ها توان ظاهری از رابطه $S = V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c$ بدست می‌آید. از تقسیم توان اکتیو به توان ظاهری مقدار ضریب توان محاسبه می‌گردد. برای محاسبه زاویه قدرت نیز روابط و منطق مشابهی بکار برده شد. لازم به ذکر است که در شبیه‌سازی، هارمونیک‌های اول در روابط محاسبه ضریب توان و زاویه قدرت در نظر گرفته شده‌اند. توان ورودی در شکل (۴-۲۴) نمایش داده شده است. همچنین توان خروجی ماشین در شکل (۴-۲۵) نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود توان خروجی ماشین متناسب با افزایش سرعت افزایش پیدا کرده و به مقدار نامی خود می‌رسد.



شکل (۴-۲۳) - زاویه قدرت موتور تغذیه شده توسط درایو



شکل (۴-۲۴) - توان ورودی موتور تغذیه شده توسط درایو



شکل (۴-۲۵) - توان خروجی موتور تغذیه شده توسط درایو

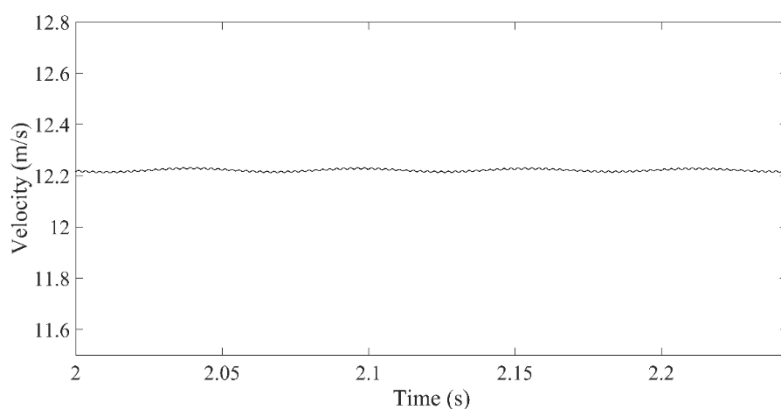
۳- در روش سوم از امکانات موجود در خود نرم افزار اجزاء محدود استفاده شده است. در این روش در قسمت مداری نرم افزار اجزاء محدود بجای منبع جریان از سیستم درایو استفاده می شود. سپس ماشین تحت بار نامی از حالت سکون راه اندازی شده و سرعت آن به تدریج افزایش یافته و به سرعت نامی می رسد. لازم به ذکر است که این روش بسیار زمانبر بوده و گاهی اوقات ممکن است تا چند روز طول بکشد. برای بررسی بهتر سرعت خطی و نیروی وارد شده بر بخش روتور موتور ساخته شده به کمک روش اجزاء محدود دو بعدی محاسبه شده است. در شکل (۴-۲۶) سرعت خطی موتور نشان داده شده است. از طرفی رابطه زیر بین سرعت خطی و سرعت دورانی ماشین بر حسب دور بر دقیقه برقرار است:

$$\omega_m = \frac{60}{\pi D_g} V_{linear} = 114.5 \times 12.23 = 1400 \quad (۴-۳)$$

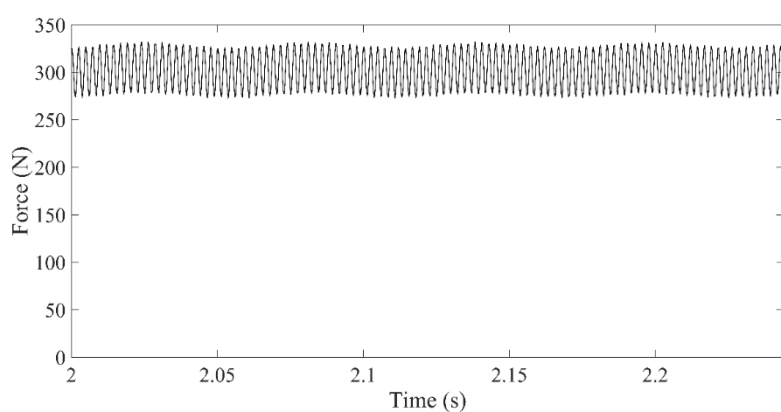
در شکل (۴-۲۷) نیروی وارد بر بخش روتور در حالت دائمی نشان داده شده است. گشتاور ماشین نیز از روی مقدار نیرو توسط رابطه زیر محاسبه می شود:

$$T = \frac{D_g}{2} F_{linear} = 0.0834 \times 304 = 25.3 \quad (۴-۴)$$

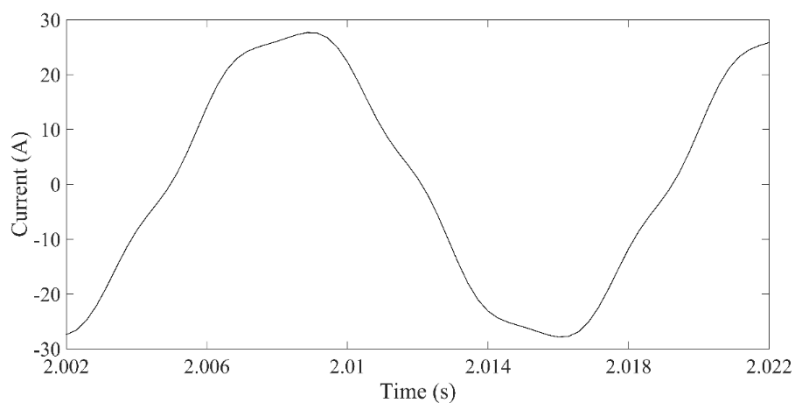
همچنین جریان نامی موتور ساخته شده در محیط نرم افزار اجزاء محدود بدست آمده است. در شکل (۴-۲۸) جریان ماشین نشان داده شده است. مقدار دامنه جریان بدست آمده برابر با ۲۸ آمپر می باشد که با مقدار موثر بدست آمده از الگوریتم طراحی مطابقت دارد.



شکل (۴-۲۶) - سرعت خطی ماشین بر حسب زمان



شکل (۴-۲۷) - نیروی وارد شده بر روتور بر حسب زمان



شکل (۴-۲۸) - جریان ماشین بر حسب زمان

۳-۴ بررسی عملکرد ماشین در محیط آزمایشگاه

در این بخش به کمک اندازه‌گیری در محیط آزمایشگاه دقت الگوریتم طراحی پیشنهادی بررسی می‌شود. برای این منظور ماشین طراحی شده در فصل قبل، ساخته و در محیط آزمایشگاه تست می‌شود. در

شکل (۲۹-۴)-الف ساختار استاتور ماشین نشان داده شده است. برای ساخت هسته استاتور از ورق سیلیکون با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر استفاده شده است. برای این منظور هسته استاتور توسط روش خاصی رول می‌شود. پس از عایق‌کاری هسته استاتور سیم‌پیچی بصورت تروئیدال بر روی آن انجام شده است. برای این کار از سیم‌پیچی با سطح مقطع مستطیلی استفاده شده است. در شکل (۲۹-۴)-ب ساختار نهایی استاتور پس از سیم‌پیچی و سربندی نشان داده شده است. در زیر هر جفت قطب ماشین مورد مطالعه ۶ سیم‌پیچ با توالی A, C', B, A', C و B' وجود دارد. هر یک از سیم‌پیچ‌ها در فضای در دسترس بطور مستقل بدور هسته استاتور پیچیده می‌شود. اگر فضای کافی برای قرار گرفتن تمام دورهای سیم‌پیچی در یک لایه وجود نداشته باشد سیم‌پیچی ماشین بصورت چند لایه اجرا می‌شود. تعداد لایه‌های سیم‌پیچی استاتور به تعداد دور سیم‌پیچی هر فاز، سطح مقطع سیم و قطر داخلی هسته استاتور بستگی دارد. همچنین با افزایش لایه‌های سیم‌پیچی فضای در دسترس برای هر سیم‌پیچ کاهش پیدا می‌کند. تعداد لایه‌های سیم‌پیچی بر روی ضخامت سیم‌پیچی و در نتیجه طول محوری آهنرباهای دائم موثر است. بنابراین یک روش دقیق برای تعیین تعداد لایه‌های سیم‌پیچی نیاز است. در فصل قبل الگوریتمی برای تعیین تعداد لایه‌های سیم‌پیچی استاتور پیشنهاد شده است. به کمک این الگوریتم تعداد لایه‌های سیم‌پیچی ماشین مورد مطالعه مشخص شده است. سیم‌پیچی ماشین مورد مطالعه بصورت ۷ لایه انجام شده است. همچنین از اپوکسی رزین برای محکم کردن سیم‌پیچی‌ها استفاده شده است. در شکل (۲۹-۴) الف آهنربای مورد استفاده برای ساخت ماشین نشان داده شده است. به کمک چسب آهنرباهای دائم بر روی هسته روتور محکم می‌شوند. برای ساخت هسته روتور از آهن سیاه استفاده شده است. علاوه بر این از یک قاب آلومینیومی برای ثابت نگه داشتن آهنرباهای دائم بر روی هسته روتور استفاده شده است. در شکل (۳۰-۴)-ب ساختار نهایی روتور ماشین نشان داده شده است. پس از ساخت و مونتاژ تمام بخش‌های ماشین ساختار نهایی آن مطابق شکل (۳۱-۴) شده است.



(ب)



(الف)

شکل (۴-۲۹) - ساختار استاتور ماشین الف- هسته رول شده استاتور ب- استاتور سیم‌پیچی شده



(ب)



(الف)

شکل (۴-۳۰) - ساختار روتور ماشین الف- آهنربای دائم ب- ساختار نهایی روتور



شکل (۴-۳۱) - ساختار نهایی ماشین ساخته شده

ماشین مورد مطالعه در محیط آزمایشگاه مورد تست قرار گرفت. نحوه آزمایش ماشین در شکل (۴-۳۲) نشان داده شده است. با توجه به این شکل شفت ماشین مربوطه با یک موتور روتور سیم‌پیچی شده kW ۵ کوپل شده است. از این موتور به عنوان موتور محرک استفاده شده است. همچنین از یک درایو فرکانس متغیر برای تغذیه موتور محرک استفاده می‌شود. به کمک این منبع تغذیه موتور با سرعت rpm ۱۴۰۰ راه‌اندازی می‌شود. به منظور اندازه‌گیری ولتاژ القایی، ماشین ساخته شده تحت شرایط مدار باز آزمایش می‌شود. ولتاژ القایی یک فاز ماشین در شکل (۴-۳۳) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود ولتاژ بدست آمده از آزمایش مشابه شکل موج ولتاژ بدست آمده از روش اجزاء محدود می‌باشد. عملکرد ماشین ساخته شده تحت بار کامل بصورت موتوری مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور از درایو فرکانس متغیر برای تغذیه موتور استفاده شده است. همچنین از یک ژنراتور DC تحریک مستقل با مشخصات داده شده در جدول (۴-۲) به عنوان بار موتور استفاده شده است. ولتاژ خروجی این ژنراتور در سرعت rpm ۱۴۰۰ برابر با $186/7 \text{ V}$ می‌باشد. برای اندازه‌گیری ولتاژ و جریان خروجی ژنراتور DC از یک اسیلوسکوپ دیجیتال و سنسور اثر هال استفاده شده است. در شکل (۴-۳۴) ولتاژ خروجی ژنراتور DC نشان داده شده است. همچنین جریان کشیده شده از ژنراتور DC در شکل (۴-۳۵) نشان داده شده است.

ولتاژ القایی و گشتاور ماشین DC توسط روابط زیر بدست می‌آید:

$$E_a = K\phi\omega_m \quad (۵-۴)$$

$$\tau_m = K\phi i_a \quad (۶-۴)$$

که در این روابط K ضریب ثابت می‌باشد. با صرف‌نظر از افت ولتاژ بر روی مقاومت داخلی ژنراتور DC می‌توان ولتاژ ترمینال V_T را با E_a برابر گرفت. در این صورت عبارت $K\phi$ با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده که در جدول (۴-۲) ارائه شده است، بصورت زیر بدست می‌آید:

$$K\phi = \frac{E_a}{\omega_m} \approx \frac{V_T}{\omega_m} = \frac{V_T}{2\pi\left(\frac{nm}{60}\right)} = \frac{60 \times 186.7}{2\pi \times 1400} = 1.273 \quad (۷-۴)$$

که در این رابطه n_m سرعت چرخش شفت بر حسب دور بر دقیقه می‌باشد. سرعت و گشتاور لحظه‌ای با

توجه به مقادیر لحظه‌ای ولتاژ ترمینال و جریان آرمیچر بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$n_m(t) = \frac{60 \times V_T(t)}{2\pi \times K\phi} = \frac{60 \times V_T(t)}{2\pi \times 1.273} = 7.5V_T(t) \quad (8-4)$$

$$\tau_m(t) = K\phi i_a(t) = 1.273i_a(t) \quad (9-4)$$

با توجه به روابط بالا با ضرب نمودارهای نشان داده شده در شکل‌های (۴-۳۴) و (۴-۳۵) در ضرایب

۷/۵ و ۱/۲۷۳ می‌توان سرعت و گشتاور موتور را بدست آورد. با توجه به این شکل‌ها مقدار متوسط

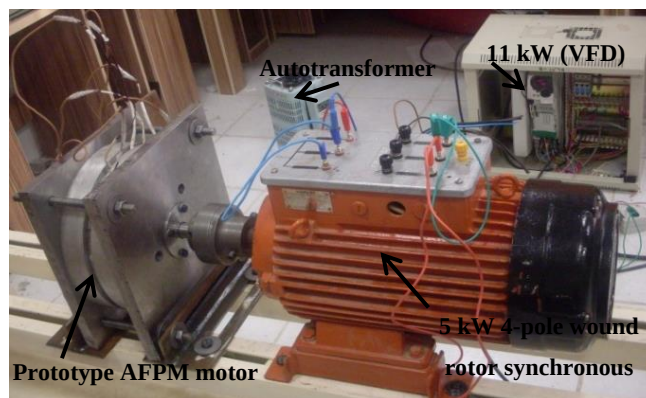
سرعت و گشتاور موتور برابر است با ۱۴۰۰ rpm و ۲۵/۳ N.m که معادل با توان خروجی ۳/۷ kW

می‌باشد. همچنین مقدار نامی جریان در محیط آزمایشگاه اندازه‌گیری شده است. در شکل (۴-۳۶)

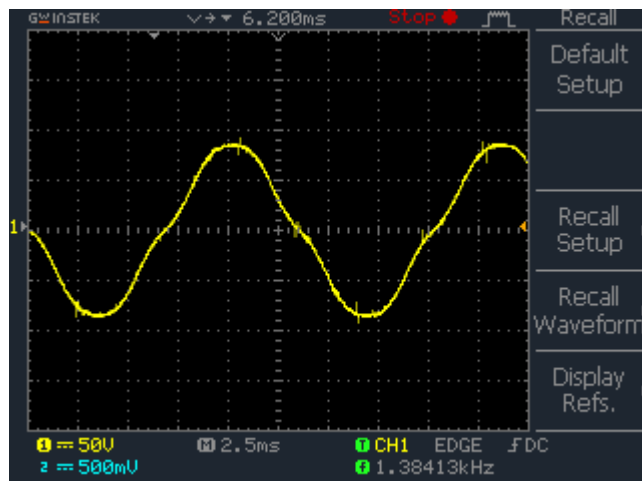
جریان نامی بدست آمده نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود شکل جریان با جریان بدست

آمده از روش اجزاء محدود مطابقت دارد. به منظور مقایسه بهتر برخی از نتایج بدست آمده از الگوریتم

طراحی، روش اجزاء محدود و اندازه‌گیری در محیط آزمایشگاه در جدول (۴-۳) داده شده است.



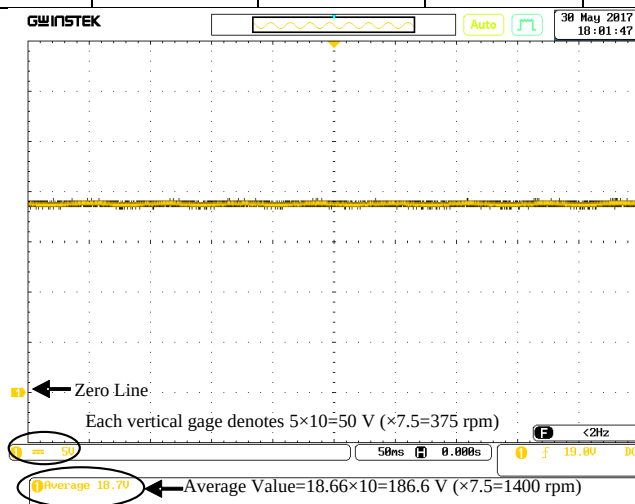
شکل (۴-۳۲) - تجهیزات آزمایشگاهی برای راه‌اندازی ماشین ساخته شده



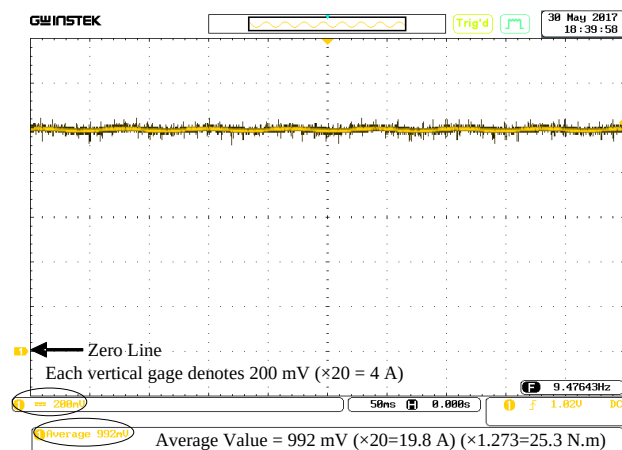
شکل (۴-۳۳)- شکل موج ولتاژ القایی ماشین ساخته شده

جدول (۴-۲)- مشخصات ژنراتور DC مورد استفاده به عنوان بار موتور

پارامتر	ولتاژ میدان (V)	ولتاژ خروجی (V)	جریان خروجی (A)	سرعت شفت (rpm)	گشتاور شفت (N.m)	توان خروجی (kW)
مقدار نامی	۲۰۰	۲۰۰	۳۶	۱۵۰۰	۴۵/۸	۷/۲
مقدار اندازه-گیری شده	۲۰۰	۱۸۶/۷	۱۹/۸	۱۴۰۰	۲۵/۳	۳/۷



شکل (۴-۳۴)- ولتاژ خروجی ژنراتور DC اندازه گیری شده توسط اسیلوسکوپ با پروب $10 \times a$



شکل (۴-۳۵)- جریان خروجی ژنراتور DC اندازه‌گیری شده توسط سنسور اثر هال با نسبت ۱/۲۰ و اسیلوسکوپ با

پروب $a \times 10$



شکل (۴-۳۶)- جریان یک فاز موتور بدست آمده از اندازه‌گیری در محیط آزمایشگاه

جدول (۴-۳)- مقایسه پارامترهای ماشین بدست آمده از الگوریتم طراحی، نرم‌افزار اجزاء محدود و اندازه‌گیری

پارامتر	واحد	الگوریتم طراحی	نرم‌افزار اجزاء محدود	ساخت
دامنه ولتاژ القایی	[V]	۹۱/۱۷	۹۱/۶۱	۹۰
مقدار موثر ولتاژ القایی	[V]	۶۴/۱۴	۶۳/۹۷	۶۳/۶۴
دامنه ولتاژ هر فاز	[V]	۹۱	۹۱	۹۱
مقدار موثر ولتاژ هر فاز	[V]	۶۴/۳۵	۶۴/۳۵	۶۴/۳۵
دامنه جریان هر فاز	[A]	۲۸	۲۷/۹	۲۸
مقدار موثر جریان هر فاز	[A]	۱۹/۸	۱۹/۷	۱۹/۸

توان ورودی	[W]	۳۸۲۲	۳۸۰۳	۳۸۲۲
توان خروجی	[W]	۳۷۰۰	۳۷۰۰	۳۶۹۰
بازده	-	۰/۹۶	۰/۹۷۳	۰/۹۴۶
چگالی توان (توان بر حجم)	[kW/m ³]	۴۴/۵۷۸	۴۴/۵۷۸	۴۴/۴۵۸
چگالی توان (توان بر جرم)	[kW/kg]	۰/۰۸۲۲	۰/۰۸۲۲	۰/۰۸۲۰

۴-۴ نتیجه گیری فصل

در این فصل صحت الگوریتم پیشنهادی به کمک نرم افزار اجزاء محدود و اندازه گیری در محیط آزمایشگاه مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور عملکرد ماشین طراحی شده توسط این الگوریتم در دو حالت بی باری و تحت بار بررسی شد. برخی از نتایج بدست آمده از شبیه سازی عبارتند از:

- مقادیر بدست آمده از شبیه سازی با مقادیر در نظر گرفته شده در الگوریتم طراحی مطابقت دارد.
- توزیع چگالی شار در داخل ماشین تقریباً بصورت یکنواخت بوده و هیچ نقطه ای به اشباع نرفته است.
- ولتاژ القایی و جریان ماشین بدست آمده از شبیه سازی به روش اجزاء محدود و اندازه گیری در محیط آزمایشگاه با یکدیگر مطابقت دارند.

بنابراین نتایج بدست آمده صحت الگوریتم طراحی پیشنهادی را تأیید می کند.

فصل ۵ : استخراج روابط تحلیلی

پیشنهادی برای طراحی بهینه ماشین

۵-۱ مقدمه فصل

ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار می‌تواند در دو حالت موتوری و ژنراتوری مورد استفاده قرار بگیرد. بدون شک دستیابی به حداکثر بازده، حداقل ریپل گشتاور، حداقل هارمونیک جریان، ولتاژ خروجی سینوسی ژنراتور از جمله اهداف مهم در طراحی یک ماشین آهنربای دائم می‌باشد. با انتخاب مناسب پارامترهای طراحی می‌توان به اهداف مورد نظر دست یافت. همچنین با ایجاد تغییرات ساختاری نیز می‌توان اهداف مورد نظر را محقق کرد. در این فصل نحوه انتخاب فرکانس و ولتاژ طراحی به منظور حداکثر کردن بازده ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار ارائه می‌شود. همچنین برخی تغییرات ساختاری به منظور حداقل کردن ریپل گشتاور ماشین و دستیابی به ولتاژ خروجی سینوسی پیشنهاد می‌شود. روش‌های مربوطه به کمک نرم‌افزار اجزاء محدود و نتایج ساخت ارزیابی می‌شود.

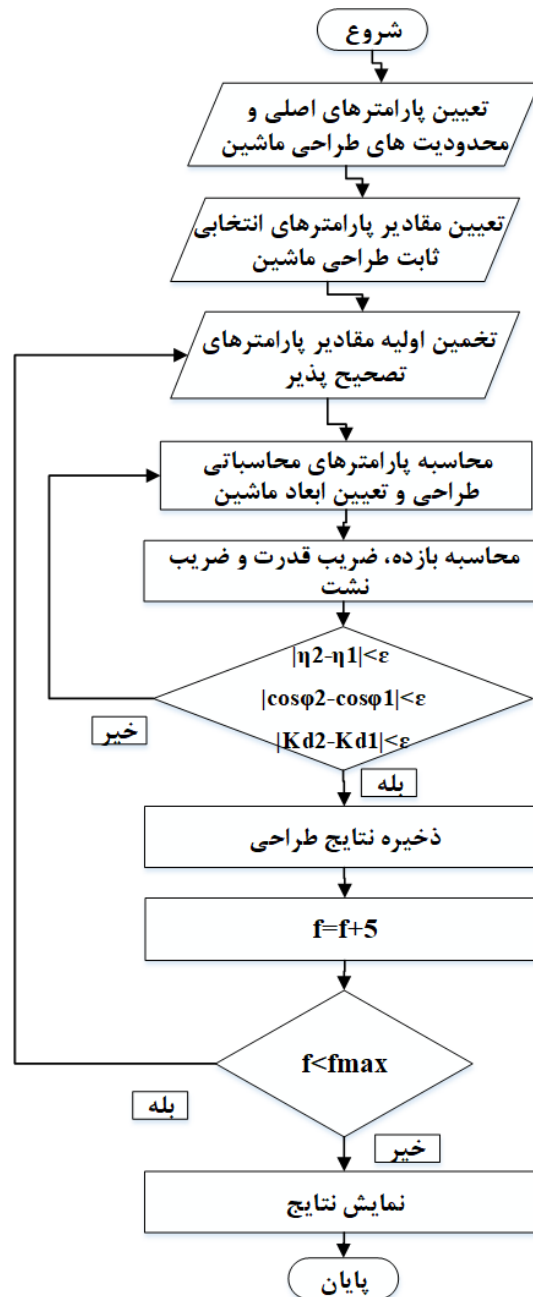
۵-۲ انتخاب بهینه فرکانس و ولتاژ تغذیه ماشین

برای راه‌اندازی ماشین‌های آهنربای دائم معمولاً از سیستم درایو استفاده می‌شود؛ بنابراین همانطور که در فصل سوم بیان شد در فرآیند طراحی این نوع ماشین‌ها فرکانس و ولتاژ تغذیه نیز جزء پارامترهای اختیاری می‌باشد. فرکانس و تعداد جفت قطب‌های ماشین با توجه به سرعت نامی آن تعیین می‌گردد. مقدار فرکانس، تعداد جفت قطب‌ها و ولتاژ تغذیه بر روی ابعاد و مشخصه‌های عملکردی ماشین تاثیر می‌گذارد. بنابراین در ابتدای فرآیند طراحی ماشین باید معیاری برای انتخاب این پارامترها وجود داشته باشد. برای این منظور ابتدا الگوریتمی برای طراحی ماشین با فرکانس، تعداد جفت قطب‌ها، ولتاژ تغذیه و توان خروجی مختلف ارائه می‌شود. سپس به کمک این الگوریتم تاثیر این پارامترها بر روی بازده و چگالی توان بررسی می‌گردد. در نهایت معیاری برای انتخاب فرکانس، تعداد جفت قطب‌ها و ولتاژ تغذیه ماشین پیشنهاد می‌شود.

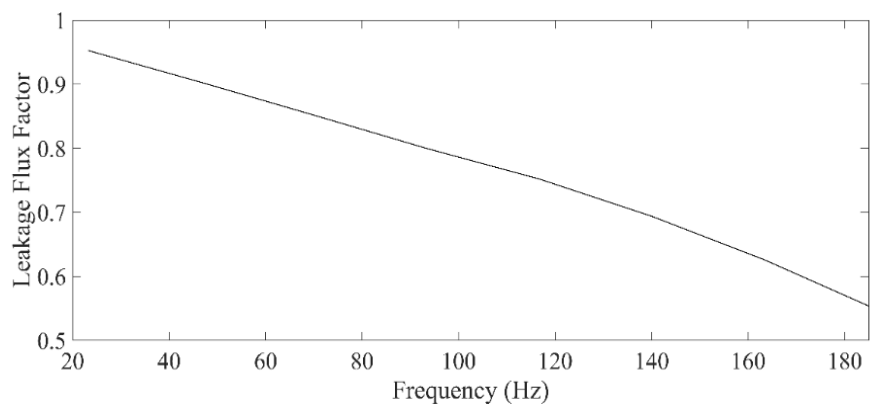
۵-۲-۱ بررسی تاثیر فرکانس بر عملکرد ماشین

در ابتدای فرآیند طراحی ماشین معمولاً مقادیر توان خروجی، سرعت نامی و حداقل بازده مورد انتظار مشخص می‌باشد. در یک سرعت مشخص با افزایش و یا کاهش فرکانس، تعداد جفت قطب‌های ماشین نیز افزایش و یا کاهش می‌یابد. بنابراین در فرآیند طراحی ماشین با سرعت مشخص باید تغییرات هر دو عامل را در نظر گرفت. تغییر فرکانس تغذیه و در نتیجه تعداد جفت قطب‌ها بر روی مشخصه‌های عملکردی ماشین مانند بازده، چگالی توان و چگالی شار در بخش‌های مختلف تاثیرگذار است. برای بررسی اثر فرکانس بر روی مشخصه‌های عملکردی ماشین، ماشین با مشخصات نامی داده شده در فصل سوم به ازای فرکانس‌های مختلف طراحی می‌شود. برای این منظور الگوریتمی مطابق شکل (۵-۱) پیشنهاد می‌شود. به کمک این الگوریتم ماشین مربوطه برای فرکانس‌های مختلف در محدوده ۵ تا ۲۰۰ هرتز طراحی می‌شود. لازم به ذکر است که در کلیه طراحی‌های انجام شده برای ایجاد شرایط یکسان مقدار برخی از پارامترها مانند نسبت قوس قطب به گام قطب، نسبت قطر داخلی به قطر خارجی استاتور، چگالی شار فاصله هوایی، ولتاژ تغذیه، ولتاژ القایی و ... ثابت فرض می‌شود. تغییرات ضریب نشت شار بر حسب فرکانس در شکل (۵-۲) نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود افزایش فرکانس باعث کاهش ضریب نشت شار و در نتیجه افزایش شار نشتی می‌شود. به علت ثابت بودن سرعت ماشین با افزایش فرکانس تعداد جفت قطب‌ها نیز افزایش پیدا می‌کند؛ بنابراین شار نشتی بین قطب‌های مجاور نیز افزایش می‌یابد. تغییرات ضخامت آهنربای دائم بر حسب فرکانس در شکل (۵-۳) نشان داده شده است. افزایش شار نشتی باعث کاهش چگالی شار فاصله هوایی می‌گردد. بنابراین برای دستیابی به چگالی شار فاصله هوایی مورد نظر باید ضخامت آهنربای دائم افزایش یابد. تغییرات بازده ماشین بر حسب فرکانس در شکل (۵-۴) نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود با افزایش فرکانس تا حدود ۷۰ هرتز بازده ماشین هم افزایش می‌یابد اما افزایش بیشتر فرکانس باعث کاهش بازده ماشین می‌گردد.

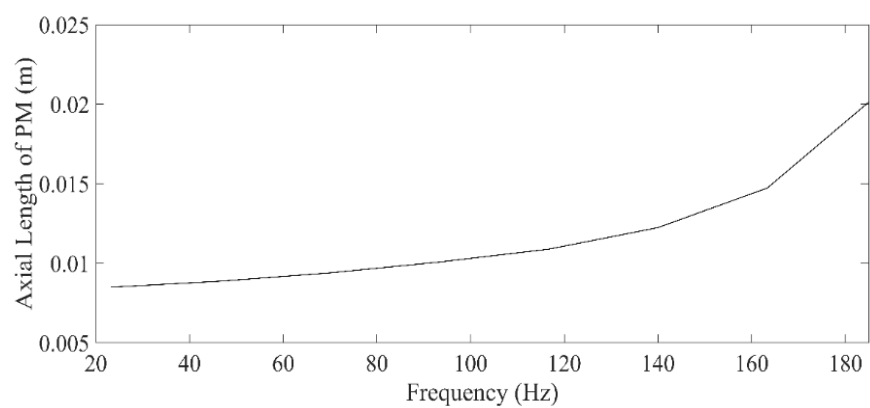
در شکل (۵-۵) تغییرات چگالی توان ماشین بر حسب فرکانس نمایش داده شده است. با توجه به این شکل با افزایش فرکانس چگالی توان ماشین نیز افزایش می‌یابد. اما با افزایش بیش از حد فرکانس به دلیل افزایش ابعاد ماشین از قبیل ضخامت آهنربای دائم چگالی توان ماشین کاهش می‌یابد.



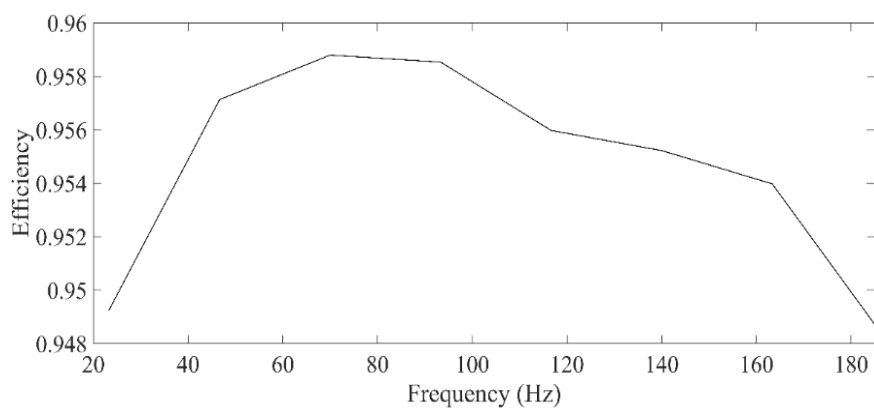
شکل (۵-۱) - الگوریتم طراحی ماشین با فرکانس‌های مختلف



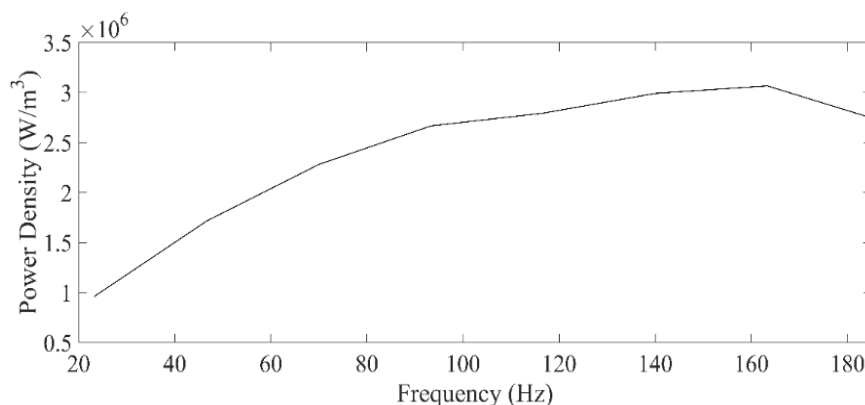
شکل (۵-۲) - تغییرات ضریب نشت شار بر حسب فرکانس



شکل (۵-۳) - تغییرات ضخامت آهنربای دائم بر حسب فرکانس



شکل (۵-۴) - تغییرات بازده بر حسب فرکانس



شکل (۵-۵) - تغییرات چگالی توان بر حسب فرکانس

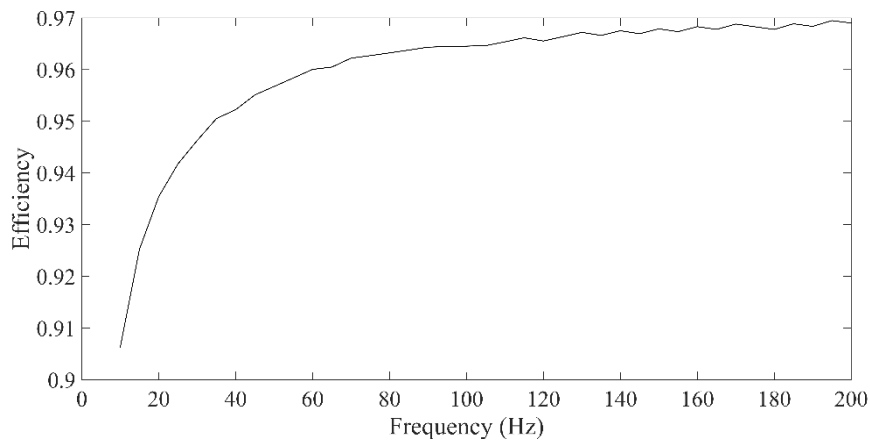
۵-۲-۲ راهکار پیشنهادی برای انتخاب فرکانس، تعداد قطب‌ها و ولتاژ

تغذیه

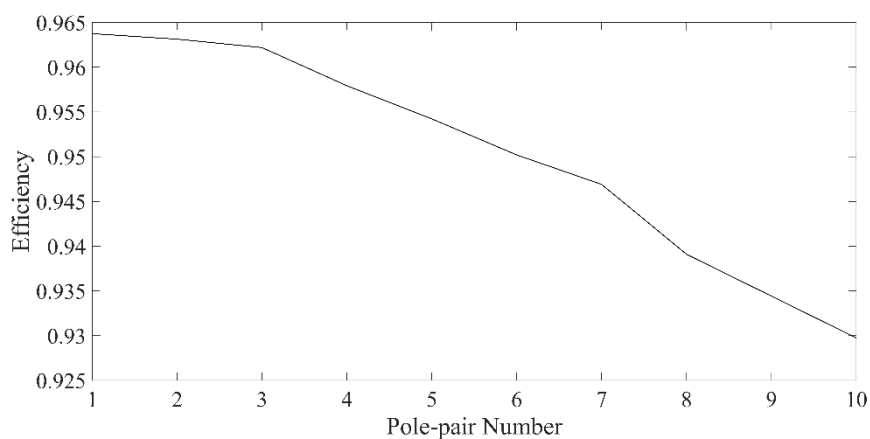
همانطور که نشان داده شد فرکانس تغذیه تاثیر بسزایی بر روی ابعاد و مشخصه‌های عملکردی ماشین دارد. مقدار ولتاژ تغذیه و تعداد جفت قطب‌ها نیز بر روی عملکرد ماشین تاثیرگذار است. اما بررسی‌های ما نشان می‌دهد که تاکنون معیاری برای انتخاب این پارامترها در ابتدای فرآیند طراحی ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار ارائه نشده است. این امر می‌تواند باعث سردرگمی طراح ماشین در انتخاب این پارامترها شود. دو پارامتر بازده و چگالی توان معمولا جزء مشخصه‌های عملکردی مهم در طراحی هر ماشین الکتریکی می‌باشد. توان خروجی، سرعت چرخش و ولتاژ تغذیه ماشین از جمله پارامترهای موثر بر روی بازده و چگالی توان ماشین می‌باشد. از طرف دیگر سرعت ماشین به فرکانس و تعداد جفت قطب‌ها وابسته است. بنابراین برای بدست آوردن معیاری جهت انتخاب این پارامترها باید تاثیر تغییرات هر چهار پارامتر توان خروجی، تعداد جفت قطب‌ها، فرکانس و ولتاژ تغذیه ماشین در نظر گرفته شود. برای دستیابی به این هدف در هر لحظه سه پارامتر ثابت در نظر گرفته شده و با تغییر پارامتر چهارم ماشین‌های مختلفی طراحی می‌شود.

برای این منظور از الگوریتم شکل (۵-۱) استفاده می‌شود. در شکل‌های (۵-۶)، (۵-۷)، (۵-۸) و (۵-۹) به ترتیب تغییرات بازده ماشین بر حسب فرکانس، تعداد جفت قطب‌ها، توان خروجی و ولتاژ تغذیه

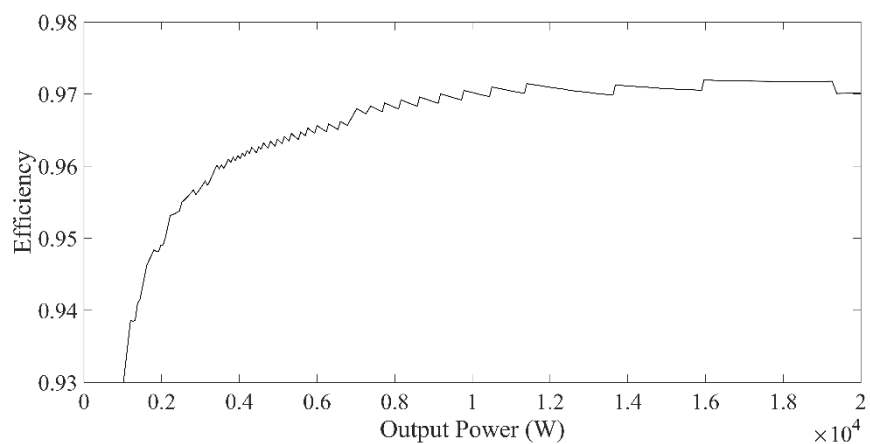
نمایش داده شده است. در شکل‌های (۵-۱۰)، (۵-۱۱)، (۵-۱۲) و (۵-۱۳) به ترتیب تغییرات چگالی توان ماشین بر حسب فرکانس، تعداد جفت قطب‌ها، توان خروجی و ولتاژ تغذیه نشان داده شده است.



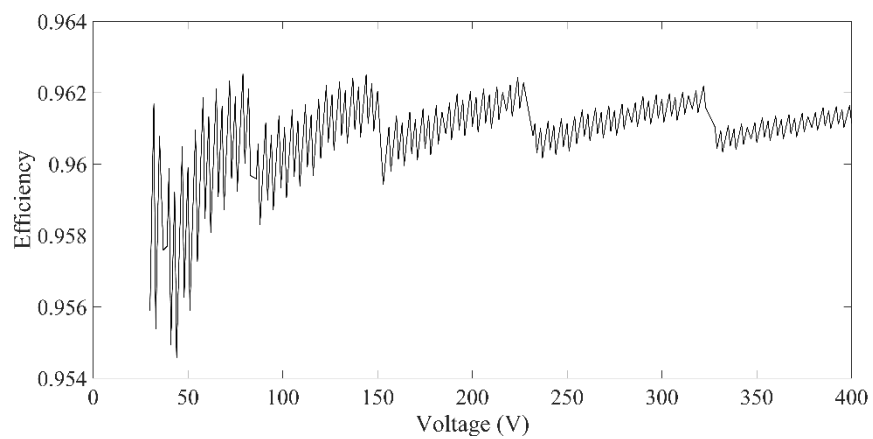
شکل (۵-۶) - تغییرات بازده ماشین بر حسب فرکانس



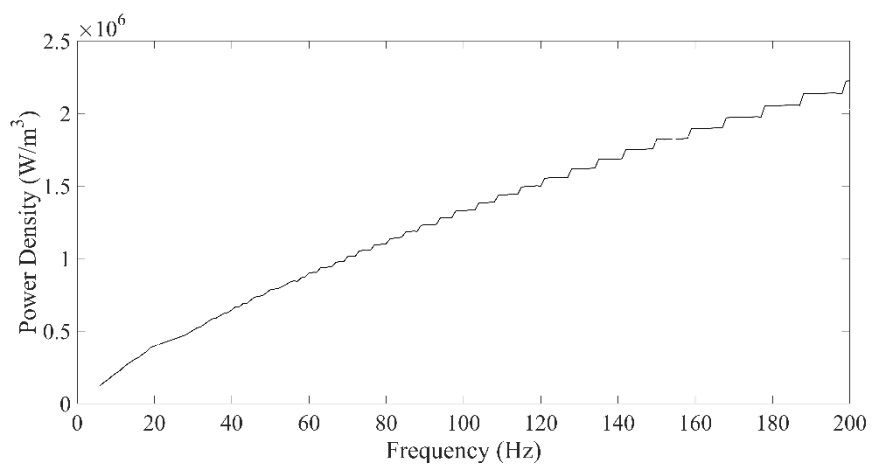
شکل (۵-۷) - تغییرات بازده ماشین بر حسب تعداد جفت قطب‌ها



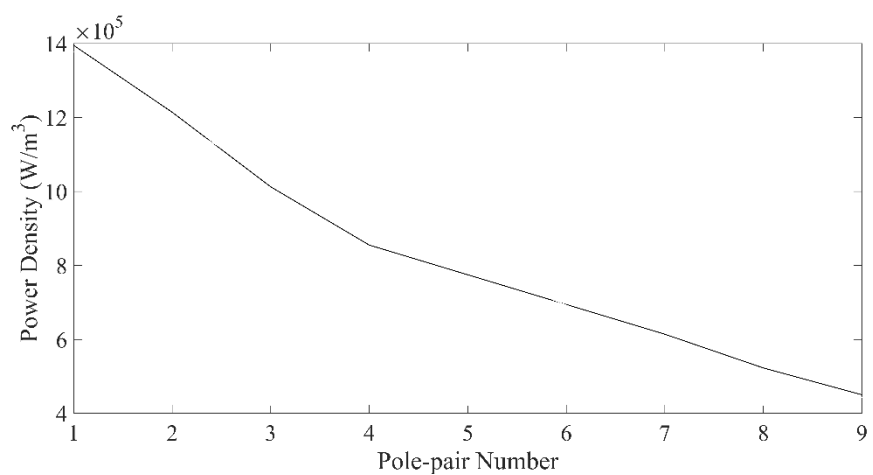
شکل (۵-۸) - تغییرات بازده ماشین بر حسب توان خروجی



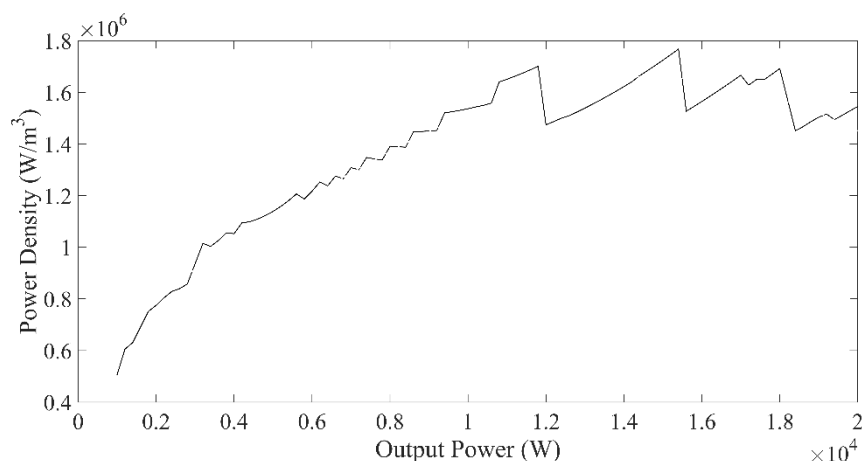
شکل (۵-۹) - تغییرات بازده ماشین بر حسب ولتاژ تغذیه



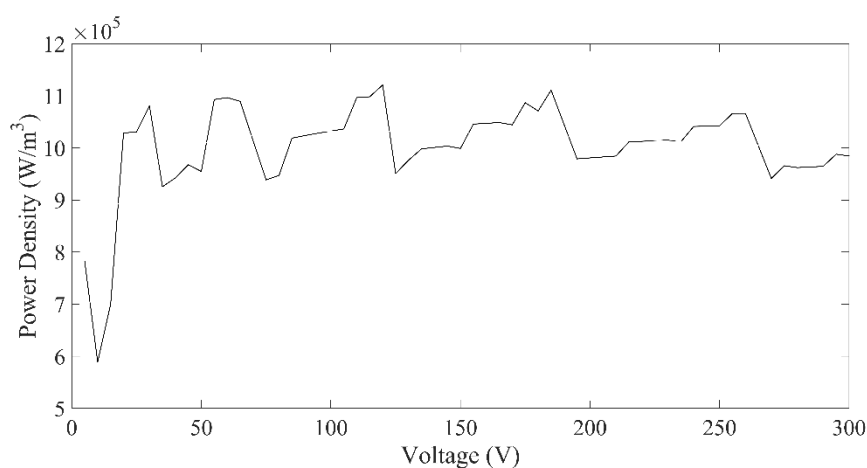
شکل (۵-۱۰) - تغییرات چگالی توان ماشین بر حسب فرکانس



شکل (۵-۱۱) - تغییرات چگالی توان ماشین بر حسب تعداد جفت قطبها



شکل (۵-۱۲)- تغییرات چگالی توان ماشین بر حسب توان خروجی



شکل (۵-۱۳)- تغییرات چگالی توان ماشین بر حسب ولتاژ تغذیه

در ابتدای فرآیند طراحی یک ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار با سرعت و توان خروجی مشخص (در صورتی که توان خروجی داده شده در بازه توانی نمودارهای بدست آمده باشد) با استفاده از نمودارهای فوق می‌توان به ازای تعداد جفت قطب‌ها، فرکانس‌ها و ولتاژ تغذیه مختلف بازده و یا چگالی توان ماشین را بدست آورد. در نهایت تعداد جفت قطب، فرکانس و ولتاژی که به ازای آن حداکثر بازده یا چگالی توان بدست می‌آید را انتخاب کرد. سپس با این ولتاژ تغذیه و فرکانس ماشین مورد نظر را طراحی نمود. همچنین می‌توان برای راحتی کار با استفاده از قابلیت برازش منحنی^۱ نرم افزار متلب

^۱ Curve Fitting

رابطه‌ای تحلیلی برای چگالی توان و یا بازده بر حسب پارامترهای تاثیرگذار که در اینجا بررسی شد بدست آورد. به کمک این روش رابطه زیر برای محاسبه بازده ماشین پیشنهاد می‌شود:

$$\eta = K_1(f^{K_2})(e^{-K_3f^{K_4}})(p^{K_5})(e^{-K_6p^{K_7}})(P_{out}^{K_8})(e^{-K_9P_{out}^{K_{10}}}) \times (V_{ph_rms}^{K_{11}})(e^{-K_{12}v^{K_{13}}}) \quad (1-5)$$

که در این رابطه:

$$\begin{aligned} K_1 &= 2.1388 & K_2 &= 0.1373 & K_3 &= 0.5408 & K_4 &= 0.1306 \\ K_5 &= 0.1212 & K_6 &= 0.6277 & K_7 &= 0.1752 & K_8 &= 0.0561 & K_9 &= 0.03378 & K_{10} &= 0.212 \\ K_{11} &= 0.02727 & K_{12} &= 0.1417 & K_{13} &= 0.1062 \end{aligned}$$

سپس به کمک این رابطه می‌توان با در نظر گرفتن فرکانس‌ها، تعداد جفت قطب‌ها و ولتاژهای مختلف مقادیر این پارامترها که بازده یا چگالی توان حداکثر می‌گردد را انتخاب نمود.

۵-۲-۳ ارزیابی به کمک نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌های

آزمایشگاهی

به منظور نشان دادن کاربرد نمودارهای بدست آمده و رابطه استخراج شده سه ماشین با توان‌های و سرعت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این سه ماشین شامل ماشین طراحی شده در فصل سوم و دو ماشین با مشخصات داده شده در جدول (۵-۱) می‌باشد. این دو ماشین نیز بر اساس روابط ارائه شده در فصل سوم طراحی و ساخته شده‌اند. در شکل (۵-۱۴) ماشین‌های ساخته شده نشان داده شده است. با شبیه‌سازی هر یک از این ماشین‌ها در محیط نرم‌افزار اجزاء محدود مشخصه‌های عملکردی آنها تحت شرایط عملکردی مختلف استخراج شده است. همچنین مشخصات این ماشین‌ها پس از ساخت نیز در محیط آزمایشگاه استخراج شده و با نتایج شبیه‌سازی‌ها مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نیز صحت روابط ابعادی و الگوریتم طراحی ارائه شده در فصل سوم را تأیید کرد. بازده این سه ماشین با استفاده از اندازه‌گیری در محیط آزمایشگاه و همچنین رابطه (۵-۱) محاسبه شد. مقادیر بدست آمده در جدول (۵-۲) ارائه شده است. با توجه به این جدول مشاهده می‌شود که رابطه پیشنهادی

برای محاسبه بازده از دقت قابل قبولی برخوردار است. بنابراین می توان با در اختیار داشتن نمودارهای حاصله و یا این رابطه در ابتدای فرآیند طراحی ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار، مقادیر فرکانس، تعداد جفت قطب ها و ولتاژ تغذیه ماشین را بگونه ای انتخاب کرد که حداکثر بازده بدست آید.

جدول (۵-۱) - مشخصات ماشین های بررسی شده

پارامتر	واحد	ماشین شماره ۱	ماشین شماره ۲
توان نامی	[kW]	۰/۶	۱
تعداد فازها	-	۳	۳
مقدار موثر ولتاژ نامی	[V]	۴۴	۳۳
فرکانس نامی	[Hz]	۵۰	۲۱/۵
تعداد جفت قطب ها	-	۲	۳
قطر خارجی هسته استاتور	[mm]	۱۵۱	۲۱۸
قطر داخلی هسته استاتور	[mm]	۷۵/۵	۱۱۱
طول فاصله هوایی	[mm]	۱/۵	۲
ضخامت کلی سیم پیچی	[mm]	۷/۸	۹/۲
طول محوری ماشین	[mm]	۵۱	۷۶



(الف)



(ب)

شکل (۵-۱۴) - ماشین‌های ساخته شده مورد بررسی (الف) ماشین ۶۰۰ وات (ب) ماشین ۱ کیلووات

جدول (۵-۲) - مقادیر بازده ماشین‌های مورد بررسی

بازده (%)		ماشین مورد بررسی
رابطه	اندازه‌گیری	
۸۹/۴	۹۲	۰/۶ کیلووات
۸۸	۸۵	۱ کیلووات
۹۳/۷	۹۴/۶	۳/۷ کیلووات

۳-۵ بهبود ولتاژ القایی و ریپل گشتاور ماشین

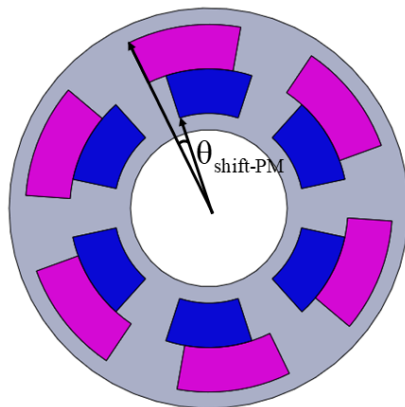
در این بخش دو روش مختلف برای بهبود ولتاژ القایی و ریپل گشتاور ماشین مورد مطالعه ارائه می‌شود. همچنین از روش‌های تحلیلی، آنالیز اجزاء محدود و اندازه‌گیری در محیط آزمایشگاه برای بررسی تاثیر روش‌های پیشنهادی در بهبود ولتاژ القایی و ریپل گشتاور ماشین استفاده می‌شود.

۵-۳-۱ شیفت دادن آهنرباهای دائم روتور

در این روش با برش و شیفت دادن آهنرباهای دائم روتور تاثیر آن بر روی ولتاژ القایی ماشین بررسی می‌شود.

۵-۳-۱-۱ ساختار ماشین آهنربای دائم بدون شیار با آهنرباهای شیفت یافته

با برش دادن هر یک از آهنرباهای دائم در قطر متوسط، هر یک از آنها به دو قسمت تقسیم می‌شود. در این صورت با شیفت دادن قسمت بالای آهنرباها نسبت به بخش پایین، ساختار روتور مشابه شکل (۵-۱۵) خواهد بود. مطابق شکل آهنرباهای بالایی به اندازه $\theta_{\text{shift-PM}}$ نسبت به آهنرباهای پایین شیفت داده شده است. لازم به ذکر است که هیچ تغییری در ساختار سایر بخش‌های ماشین یعنی استاتور، سیم‌پیچ‌ها و ... اعمال نمی‌شود.



شکل (۵-۱۵) - ساختار ماشین مورد مطالعه با آهنرباهای شیفت یافته

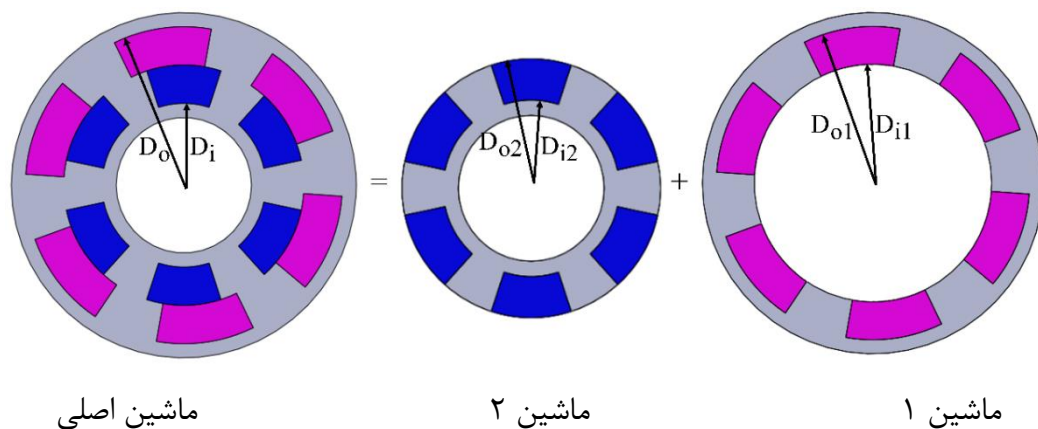
۵-۳-۲ محاسبه ولتاژ القایی و رپل گشتاور ماشین

در این بخش فرمول‌های تحلیلی برای بررسی تاثیر شیفت دادن آهنرباهای دائم روتور بر روی ولتاژ القایی و رپل گشتاور ماشین مورد مطالعه ارائه می‌شود.

الف- روابط پیشنهادی برای محاسبه ولتاژ القایی ماشین

برای محاسبه ولتاژ القایی ماشین به ازای مقادیر مختلف $\theta_{\text{shift-PM}}$ فرض می‌کنیم ساختار ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار از کنار هم قرار گرفتن دو ساختار دیگر تشکیل شده است. روتور این دو

ساختار در شکل (۵-۱۶) نشان داده شده است. فرض کنید قطر داخلی و خارجی آهنرباهای ماشین مورد مطالعه به ترتیب با D_i و D_o نشان داده شود. همچنین با توجه به شکل (۵-۱۶) قطر داخلی و خارجی ماشین‌های ۱ و ۲ به ترتیب با D_{i1} ، D_{o1} و D_{i2} و D_{o2} نشان داده شده است. در این صورت قطر خارجی آهنرباهای ماشین ۱ برابر با D_o و قطر داخلی ماشین ۲ برابر با D_i می‌باشد. همچنین قطر خارجی ماشین ۲ و قطر داخلی ماشین ۱ برابر با قطر متوسط آهنرباهای ماشین اصلی مورد مطالعه می‌باشد. درواقع می‌توان فرض کرد که ماشین‌های ۱ و ۲ بصورت سری به یکدیگر متصل شده‌اند.



شکل (۵-۱۶) - تقسیم کردن ساختار ماشین مورد مطالعه به دو ساختار سری با هم

با حل معادلات ماکسول برای ماشین‌های ۱ و ۲، فرمول مورد نیاز برای محاسبه ولتاژ القایی ماشین اصلی مورد مطالعه بدست می‌آید. برای دستیابی به این هدف تمام محاسبات برای ساختار دوبعدی ماشین و در قطر متوسط انجام شده است. در ماشین‌های شار محوری آهنربای دائم قطر داخلی و خارجی آهنرباهای دائم با قطر داخلی و خارجی هسته استاتور برابر می‌باشد. قطر خارجی هسته استاتور معمولاً از روی رابطه توان خروجی ماشین بدست می‌آید. قطر داخلی هسته استاتور نیز با یک نسبت مشخصی از روی قطر خارجی استاتور مشخص می‌شود. قطر داخلی و خارجی آهنرباهای ماشین ۱ برابر است با:

$$D_{o1} = D_o \quad (۲-۵)$$

$$D_{i1} = (D_i + D_o)/2 = (1 + \lambda)D_o/2 \quad (۳-۵)$$

همچنین قطر داخلی و خارجی آهنرباهای ماشین ۲ برابر است با:

$$D_{o2} = (1 + \lambda)D_o / 2 \quad (۴-۵)$$

$$D_{i2} = D_i \quad (۵-۵)$$

با توجه به رابطه ارائه شده در مرجع [۷۶] و روابط بالا، ولتاژ القایی ماشین ۱ بصورت زیر بدست می‌آید:

$$E_{PH1}(t) = \left(\frac{((1 + \lambda)^2 - 4\lambda^2)D_o^2 p \omega_m(t)}{16a_p} \right) \times \sum_{i=1}^{N_{layer}} \sum_{j=1}^{N_{Turnlayer}\{i\}} \sum_{h=1,3,5,\dots}^{\infty} \left(A_h'' \frac{e^{K_1} + e^{K_2}}{1 - e^{K_3}} \times \right. \\ \left. (1 - e^{K_4}) \cos(h[p\theta_m(t) - \theta_{PH} - \frac{8p\pi\Delta x_{ij}}{\pi(3\lambda + 1)D_o}]) \right) \quad (۶-۵)$$

$$K_1 = \frac{8ph\pi(-g - 0.5l_w + \Delta y_{ij})}{\pi(3\lambda + 1)D_o} \quad K_2 = \frac{-8ph\pi(g + 1.5l_w + \Delta y_{ij})}{\pi(3\lambda + 1)D_o}$$

$$K_3 = \frac{-16ph\pi(g + l_w + l_{pm})}{\pi(3\lambda + 1)D_o} \quad K_4 = \frac{-16ph\pi l_{pm}}{\pi(3\lambda + 1)D_o}$$

همچنین ولتاژ القایی ماشین ۲ بصورت زیر بدست می‌آید:

$$E_{PH2}(t) = \left(\frac{(4 - (1 + \lambda)^2)D_o^2 p \omega_m(t)}{16a_p} \right) \times \sum_{i=1}^{N_{layer}} \sum_{j=1}^{N_{Turnlayer}\{i\}} \sum_{h=1,3,5,\dots}^{\infty} \left(A_h' \frac{e^{K_5} + e^{K_6}}{1 - e^{K_7}} \times \right. \\ \left. (1 - e^{K_8}) \cos(h[p\theta_m(t) - p\theta_{shift-PM} - \theta_{PH} - \frac{8p\pi\Delta x_{ij}}{\pi(3 + \lambda)D_o}]) \right) \quad (۷-۵)$$

$$K_5 = \frac{8ph\pi(-g - 0.5l_w + \Delta y_{ij})}{\pi(3 + \lambda)D_o} \quad K_6 = \frac{-8ph\pi(g + 1.5l_w + \Delta y_{ij})}{\pi(3 + \lambda)D_o}$$

$$K_7 = \frac{-16ph\pi(g + l_w + l_{pm})}{\pi(3 + \lambda)D_o} \quad K_8 = \frac{-16ph\pi l_{pm}}{\pi(3 + \lambda)D_o}$$

با جمع کردن روابط (۵-۶) و (۵-۷) رابطه‌ای برای محاسبه ولتاژ القایی ماشین اصلی که در واقع از

اتصال سری ماشین‌های ۱ و ۲ تشکیل شده است، بصورت زیر بدست می‌آید:

$$E_{PHmain}(t) = \left(\frac{D_o^2 p \omega_m(t)}{16a_p} \right) \times \left(\begin{aligned} &(((1+\lambda)^2 - 4\lambda^2) \times (A_h'' \frac{e^{K_1} + e^{K_2}}{1 - e^{K_3}} \times \\ &(1 - e^{K_4}) \cos(h[p\theta_m(t) - \theta_{PH} - \frac{8p\pi\Delta x_{ij}}{\pi(3\lambda+1)D_o}])))) + \\ &(((4 - (1+\lambda)^2) \times (A_h' \frac{e^{K_5} + e^{K_6}}{1 - e^{K_7}} \times \\ &(1 - e^{K_8}) \cos(h[p\theta_m(t) - p\theta_{shift-PM} - \theta_{PH} - \frac{8p\pi\Delta x_{ij}}{\pi(3+\lambda)D_o}])))) \end{aligned} \right) \quad (8-5)$$

ب- محاسبه ریپل گشتاور

توان لحظه‌ای خروجی ماشین از ضرب مقادیر لحظه‌ای ولتاژ القایی و جریان بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{out}(t) = (E_{PHmain_a}(t)i_a(t) + E_{PHmain_b}(t)i_b(t) + E_{PHmain_c}(t)i_c(t)) \quad (9-5)$$

که در این رابطه $E_{PHmain_a}(t)$ ، $E_{PHmain_b}(t)$ و $E_{PHmain_c}(t)$ به ترتیب مقادیر لحظه‌ای ولتاژهای القایی فازهای A، B و C می‌باشد. مقادیر ولتاژ القایی سه فاز به کمک رابطه (8-5) محاسبه می‌شود. برای این منظور زاویه فاز θ_{PH} در رابطه (8-5) برای فازهای A، B و C به ترتیب برابر با 0° ، $2\pi/3$ و $4\pi/3$ - در نظر گرفته می‌شود. همچنین $i_a(t)$ و $i_b(t)$ به ترتیب مقادیر لحظه‌ای جریان فازهای A، B و C می‌باشد. از تقسیم توان خروجی بر سرعت چرخش روتور، گشتاور الکترومغناطیسی ماشین بصورت زیر بدست می‌آید:

$$T_e = \frac{P_{out}}{\omega_m} \quad (10-5)$$

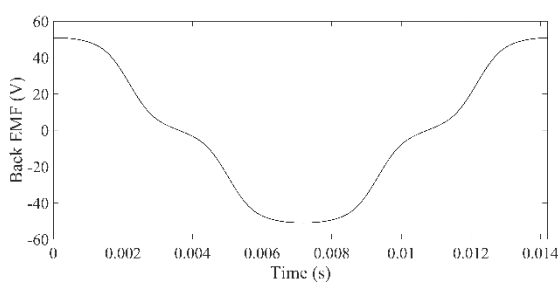
سپس گشتاور الکترومغناطیسی بدست آمده در رابطه (1-4) اعمال می‌شود. در این صورت ریپل گشتاور

ماشین برابر است با:

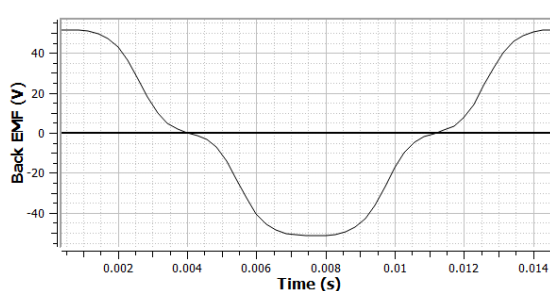
$$T_{ripple} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{avg}} \times 100 \quad (11-5)$$

۳-۱-۳-۵ ارزیابی رابطه پیشنهادی

به منظور ارزیابی دقت رابطه پیشنهادی برای ولتاژ القایی، ماشین $3/7 \text{ kW}$ و 1400 rpm طراحی شده در فصل‌های قبل به عنوان ماشین مورد مطالعه در نظر گرفته می‌شود. این ماشین بر اساس روابط مطرح شده در فصل‌های قبل طراحی شده و مشخصات آن نیز در فصل ۳ ارائه شده است. از شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود سه بعدی برای ارزیابی عملکرد ماشین استفاده شده است. بدلیل وجود تقارن در ساختار ماشین تنها یک جفت قطب از یک لایه ماشین در نظر گرفته می‌شود تا حجم محاسبات و زمان اجرای شبیه‌سازی کاهش پیدا کند. شکل موج ولتاژ القایی ماشین ۱ بدست آمده به کمک فرمول تحلیلی و از طریق شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود در شکل (۵-۱۷) نشان داده شده است. همچنین شکل موج ولتاژ القایی ماشین ۲ در شکل (۵-۱۸) نشان داده شده است. اختلاف جزئی بین نتایج بدست آمده از فرمول‌های تحلیلی و روش اجزاء محدود دقت فرمول‌ها را تأیید می‌کند. ولتاژ القایی ماشین اصلی که از دو روش مذکور بدست آمده است در شکل (۵-۱۹) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نتایج دو روش اختلاف بسیار کمی با یکدیگر دارند. اختلاف بین دو روش کمتر از ۳٪ می‌باشد. بنابراین فرمول تحلیلی پیشنهادی برای محاسبه ولتاژ القایی ماشین با آهنرباهای دائم شیفت یافته دارای دقت بالایی می‌باشد.

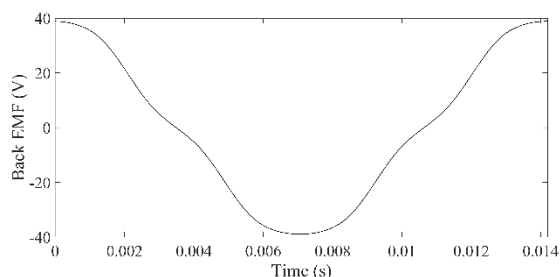


(ب)

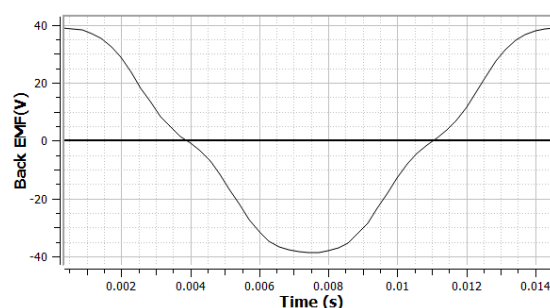


(الف)

شکل (۵-۱۷)- ولتاژ القایی ماشین ۱ بدست آمده از الف- روش اجزاء محدود ب- فرمول تحلیلی

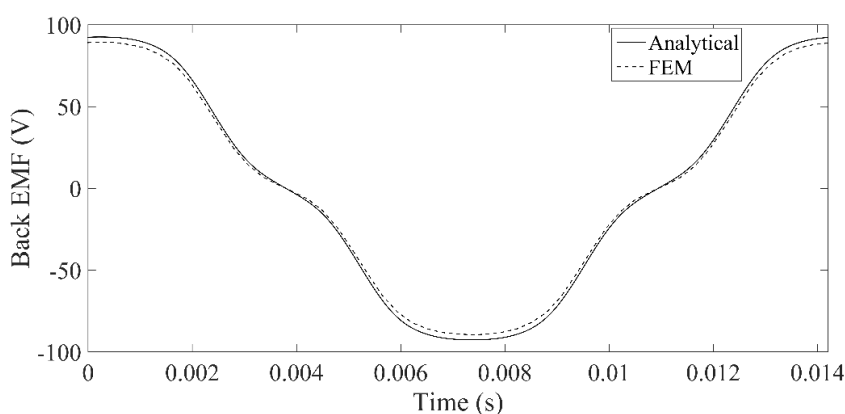


(ب)



(الف)

شکل (۵-۱۸) - ولتاژ القایی ماشین ۲ بدست آمده از الف- روش اجزاء محدود ب- فرمول تحلیلی

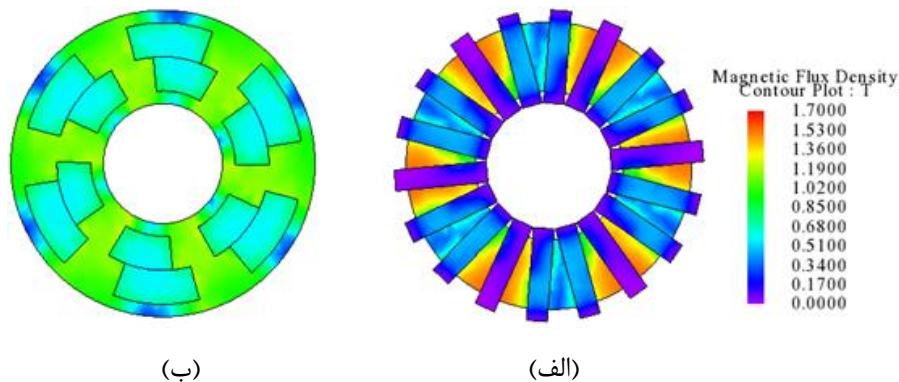


شکل (۵-۱۹) - ولتاژ القایی ماشین اصلی بدست آمده از روش اجزاء محدود و فرمول تحلیلی

۵-۳-۱-۴ بررسی تاثیر مقدار زاویه شیفت دادن آهنربا بر روی ولتاژ القایی ماشین

به منظور بررسی تاثیر شیفت دادن آهنرباهای دائم بر روی ولتاژ القایی ماشین، آهنرباهای روتور به ازای مقادیر مختلف شیفت داده می‌شود و ولتاژ القایی ماشین محاسبه می‌شود. برای این منظور شکل موج ولتاژ القایی ماشین را برای مقادیر مختلف زوایای شیفت می‌توان توسط روش اجزاء محدود، فرمول تحلیلی پیشنهادی و با اندازه‌گیری در محیط آزمایشگاه بدست آورد. به کمک روش اجزاء محدود چگالی شار در داخل ماشین، شار پیوندی سیم‌پیچ‌ها و شکل موج ولتاژ القایی ماشین به راحتی محاسبه می‌شود. بعنوان مثال چگالی شار در داخل روتور و استاتور ماشین با آهنرباهای شیفت یافته به مقدار ۱۲ درجه در شکل (۲۰-۵) نشان داده شده است. از آنجایی که بخش اعظم شار در داخل ماشین ناشی از آهنرباهای دائم می‌باشد چگالی شار در داخل ماشین تحت شرایط مدار باز بدست آمده است. چنانچه از شکل (۵-۵)

(۲۰) مشاهده می‌شود پدیده اشباع در داخل هسته‌های ماشین رخ نداده است. تاثیر زاویه شیفت دادن آهنرباهای روتور بر روی شکل موج ولتاژ القایی ماشین توسط هر سه روش مذکور بررسی شده است. اما در اینجا تنها نتایج بدست آمده از روش تحلیلی و اندازه‌گیری در آزمایشگاه ارائه می‌شود.

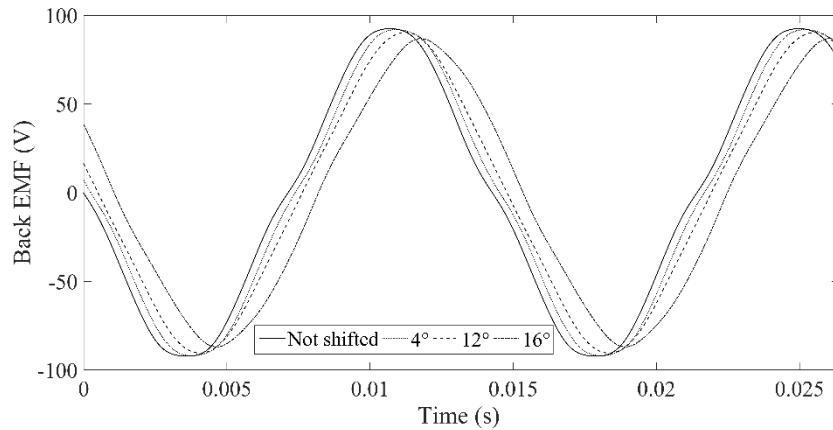


شکل (۲۰-۵)- توزیع چگالی شار مغناطیسی در داخل ماشین در حالت مدار باز الف- بخش استاتور ب- بخش روتور

الف- فرمول تحلیلی

شکل موج ولتاژ القایی ماشین به ازای مقادیر زوایای مختلف شیفت آهنربای دائم توسط رابطه تحلیلی پیشنهادی محاسبه شده است. شکل موج ولتاژ القایی ماشین برای برخی از زوایای شیفت در شکل (۵-۲۱) نشان داده شده است. هنگامی که قسمت بالای آهنرباهای روتور به اندازه $\theta_{\text{shift-PM}}$ نسبت به آهنرباهای بخش پایین شیفت داده می‌شود ولتاژ القاء شده در سیم‌پیچی‌های بخش بالای ماشین به اندازه $\theta_{\text{shift-PM}}$ شیفت پیدا می‌کند. کل ولتاژ القاء شده در هر سیم‌پیچ از جمع ولتاژ القایی ناشی از قسمت‌های بالا و پایین آهنرباهای دائم بدست می‌آید. بنابراین شیفت دادن آهنرباهای دائم بر روی شکل موج ولتاژ القایی ماشین اصلی تاثیر می‌گذارد. همانطور که در شکل (۲۱-۵) نیز مشاهده می‌شود با تغییر مقدار زاویه شیفت اعوجاج شکل موج ولتاژ نیز تغییر می‌کند. مقایسه بین شکل موج‌ها نشان می‌دهد که شکل موج ولتاژ القایی ماشین در حالتی که آهنرباها به اندازه ۱۲ درجه شیفت داده شده‌اند سینوسی‌تر می‌باشد. برای بررسی دقیق‌تر به کمک آنالیز FFT مقدار THD ولتاژ القایی برای مقادیر مختلف زاویه شیفت بدست آمده است. مقدار THD ولتاژهای القایی در جدول (۳-۵) داده شده است. با توجه به مقادیر داده شده در این جدول مقدار THD ولتاژ القایی ماشین با آهنرباهای شیفت یافته به

اندازه ۱۲ درجه حداقل می‌باشد. در مقایسه با ماشین با آهنرباهای بدون شیف، مقدار THD ولتاژ القایی در حدود ۵٪ کمتر می‌باشد.



شکل (۵-۲۱) - شکل موج ولتاژ القایی ماشین به ازای مقادیر مختلف زاویه شیف آهنربا

جدول (۵-۳) - تحلیل هارمونیک ولتاژ القایی

THD ولتاژ القایی (%)	زاویه شیف آهنربا (درجه)
۱۱/۵	۰
۱۱/۲	۲
۱۰/۶	۴
۹/۷	۶
۸/۶	۸
۶/۵	۱۰
۵/۸	۱۲

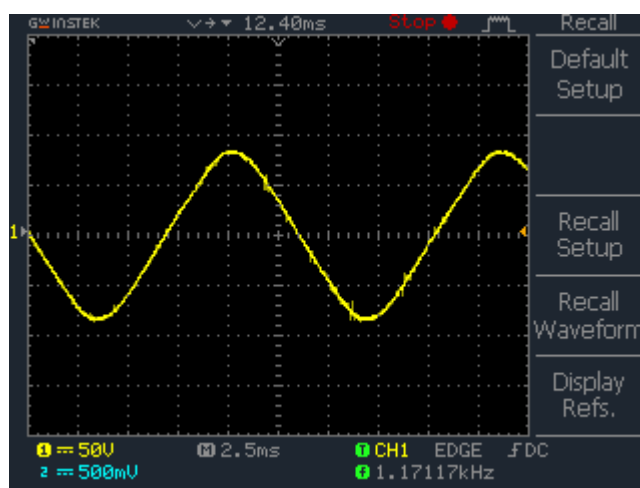
ب- نتایج آزمایشگاهی

در این بخش به کمک اندازه‌گیری در محیط آزمایشگاه دقت فرمول تحلیلی پیشنهادی و اثر شیف دادن آهنربا بر روی عملکرد ماشین بررسی می‌شود. ساختار روتور ماشین در شکل (۲۲-۵) نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود آهنرباهای ماشین نسبت به یکدیگر شیف داده شده‌اند. لازم به ذکر است که تغییری در سایر بخش‌های ماشین داده نمی‌شود.



شکل (۵-۲۲) - ساختار روتور ماشین با آهنربای شیفته

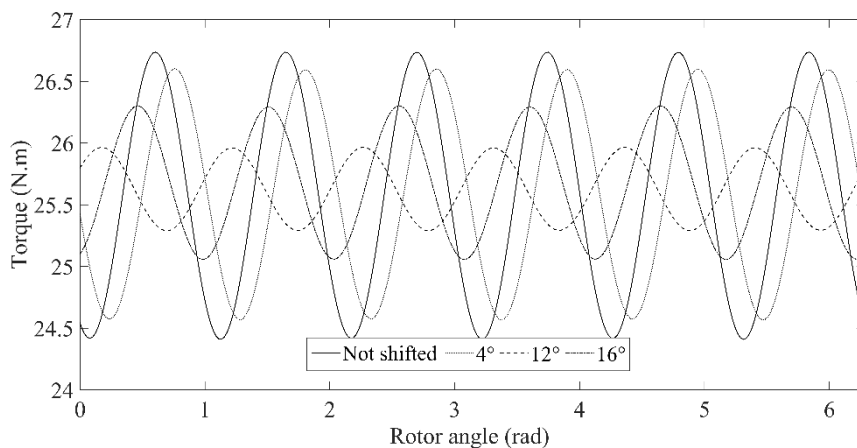
ماشین مورد مطالعه در محیط آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفت. به منظور اندازه‌گیری ولتاژ القایی، ماشین ساخته شده تحت شرایط مدار باز آزمایش می‌شود. در شکل (۵-۲۳) شکل موج ولتاژ القایی ماشین با آهنرباهای شیفته به مقدار ۱۲ درجه نشان داده شده است. مقایسه این شکل موج با شکل موج ولتاژ شکل (۵-۲۱) نشان می‌دهد که نتایج بدست آمده از دو روش بسیار به هم نزدیک می‌باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که اختلاف بین دو روش کمتر از ۴/۵٪ می‌باشد. همچنین شکل موج ولتاژ القایی ماشین ساخته شده با آهنرباهای شیفته به مقدار ۱۲ درجه نسبت به ماشین بدون شیفته سینوسی‌تر است.



شکل (۵-۲۳) - شکل موج ولتاژ القایی ماشین ساخته شده با آهنرباهای شیفته به مقدار ۱۲ درجه

۵-۳-۱-۵ بررسی تاثیر مقدار زاویه شیفت دادن آهنربا بر روی ریپل گشتاور ماشین

به منظور بررسی تاثیر شیفت دادن آهنرباهای دائم بر روی ریپل گشتاور، ماشین مورد مطالعه تحت بار کامل و به کمک روابط (۴-۱)، (۴-۲)، (۵-۹) و (۵-۱۰) و مدار معادل شکل (۴-۸) شبیه‌سازی می‌شود. همچنین یک منبع ولتاژ سه فاز با دامنه فاز ۹۱ V و فرکانس ۷۰ Hz به ترمینال موتور اعمال می‌شود. گشتاور لحظه‌ای ماشین برای مقادیر مختلف زوایای شیفت آهنربا در شکل (۵-۲۴) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۵-۲۴)، ریپل گشتاور ماشین با افزایش مقدار زاویه شیفت می‌تواند کاهش و یا افزایش پیدا کند. بنابراین ضروری است که روشی برای تعیین مقدار بهینه زاویه شیفت به منظور حداقل کردن ریپل گشتاور ماشین ارائه شود.



شکل (۵-۲۴) - گشتاور لحظه‌ای ماشین با آهنربای شیفت یافته

۵-۳-۱-۶ تعیین مقدار بهینه زاویه شیفت

هر یک از هارمونیک‌های گشتاور هر فاز ماشین بصورت زیر متناسب با حاصلضرب هارمونیک‌های ولتاژ القایی و جریان آن فاز می‌باشد:

$$\begin{aligned}
 T_h(t) &\propto E_{PHmain_h''}(t) \times i_{h'}(t) \\
 &= T_h' \left[\cos \left((h'' + h')2\pi ft + (\theta_{h''} + \varphi_{h'}) \right) \right. \\
 &\quad \left. + \cos \left((h'' - h')2\pi ft + (\theta_{h''} - \varphi_{h'}) \right) \right]
 \end{aligned}
 \tag{۵-۱۲}$$

به منظور حذف هارمونیک h ام گشتاور ماشین باید بررسی شود که این هارمونیک از تاثیر کدام هارمونیک‌های ولتاژ القایی و جریان بوجود آمده است. به عنوان مثال هارمونیک ششم گشتاور می‌تواند در نتیجه تاثیر هارمونیک‌های اول، سوم، پنجم و هفتم ولتاژ القایی و جریان ماشین بدست آید. هارمونیک h ام شکل موج ولتاژ القایی ماشین با آهنرباهای شیفت یافته بصورت زیر محاسبه می‌شود:

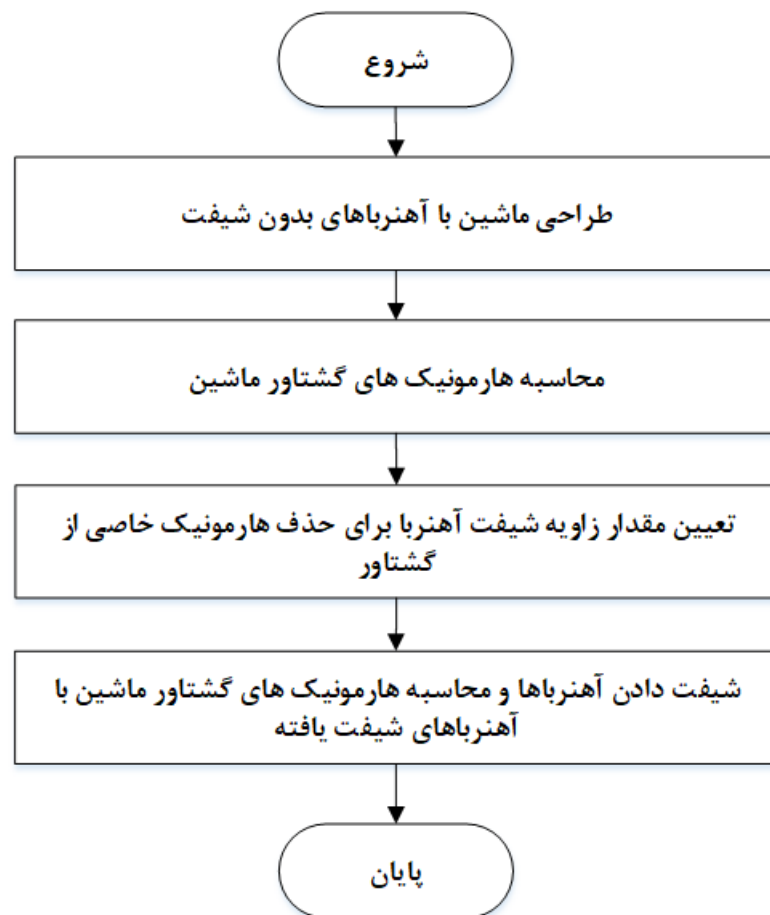
$$E_{PHmain_h}(t) = (K_h'') \cos(2\pi h'' ft + \theta_h'') + (L_h'') \cos(2\pi h'' ft + \theta_h'' + ph'' \theta_{shift-PM}) \quad (13-5)$$

با توجه به رابطه (۵-۱۳) برای کاهش h امین هارمونیک شکل موج ولتاژ القایی ماشین مقدار زاویه شیفت $\theta_{shift-PM}$ باید برابر باشد با:

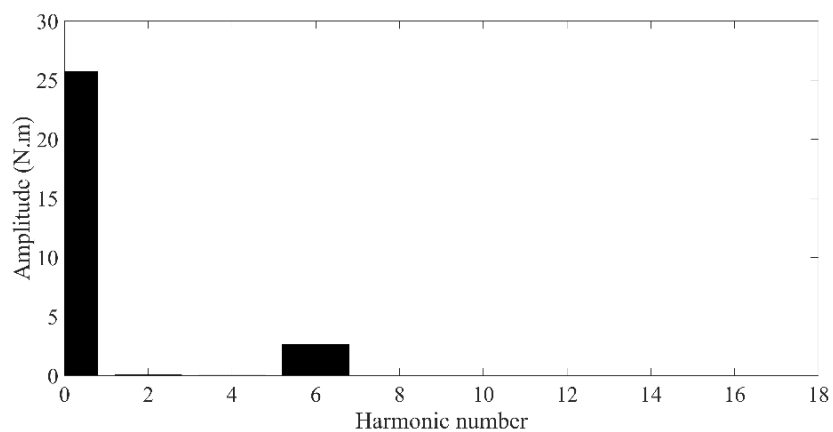
$$\theta_{shift-PM} = \pi / (ph'') \quad (14-5)$$

با در نظر گرفتن روابط فوق الگوریتمی مطابق شکل (۵-۲۵) برای تعیین مقدار بهینه زاویه شیفت آهنرباها پیشنهاد می‌شود. براساس این الگوریتم ابتدا شکل موج گشتاور ماشین در حالت بدون شیفت بدست می‌آید. سپس به کمک تبدیل سری فوریه مولفه‌های هارمونیکی گشتاور ماشین محاسبه می‌شود. مولفه‌ای که بیشترین دامنه را دارد گزینه مناسبی برای حذف شدن می‌باشد. بنابراین باید بررسی کرد که این مولفه گشتاور ناشی از کدام هارمونیک‌های ولتاژ القایی و جریان بوجود آمده است. سپس با استفاده از رابطه (۵-۱۴) مقدار زاویه شیفت آهنرباها برای حذف و یا کاهش اثر این مولفه تعیین می‌شود. مولفه‌های هارمونیکی شکل موج گشتاور ماشین مورد مطالعه در حالت بدون شیفت در شکل (۵-۲۶) ارائه شده است. با توجه به این شکل هارمونیک ششم گشتاور دارای بیشترین دامنه می‌باشد. بنابراین با توجه به تاثیر چشمگیر هارمونیک ششم بر روی مقدار THD گشتاور، این هارمونیک گزینه مناسبی برای تعیین مقدار زاویه شیفت آهنرباها می‌باشد. با برش آهنرباهای ماشین مورد مطالعه و شبیه‌سازی ماشین‌های ۱ و ۲ مولفه‌های هارمونیکی شکل موج گشتاور این دو ماشین بدست می‌آید. در شکل (۵-۲۷) نتایج تحلیل سری فوریه ارائه شده است. چنانچه مشاهده می‌شود دامنه هارمونیک ششم شکل موج‌های گشتاور قابل توجه می‌باشد. از جمع گشتاور این دو ماشین گشتاور اصلی نشان داده

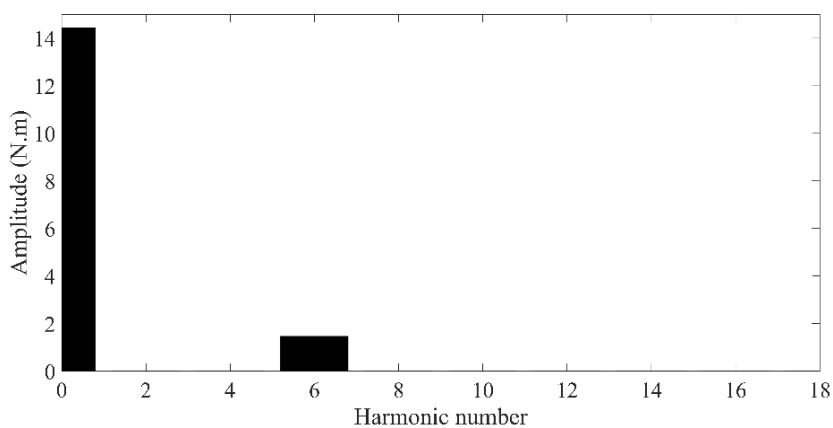
شده در شکل (۵-۲۶) بدست آمده است. در شکل (۵-۲۸) تحلیل سری فوریه شکل موج ولتاژ القایی ماشین در حالت بدون شیفیت نشان داده شده است. با بررسی شکل موج ولتاژ القایی ماشین دامنه هارمونیک‌های سوم و پنجم نسبت به سایر هارمونیک‌ها بیشتر می‌باشد. بنابراین این دو هارمونیک گزینه مناسبی برای تعیین زاویه شیفیت می‌باشند. با شیفیت دادن آهنرباها برای حذف هر یک از این دو هارمونیک مشاهده می‌شود که هارمونیک پنجم گزینه مناسب‌تری برای حذف کردن می‌باشد. با توجه به رابطه (۵-۱۴) مقدار زاویه شیفیت آهنرباها برای حذف هارمونیک پنجم ولتاژ القایی برابر با ۱۲ درجه بدست می‌آید. با شبیه‌سازی ماشین اصلی با آهنرباهای شیفیت یافته به مقدار ۱۲ درجه نتایج تحلیل سری فوریه گشتاور مطابق شکل (۵-۲۹) بدست می‌آید. چنانچه مشاهده می‌شود دامنه هارمونیک ششم گشتاور بطور چشمگیری کاهش پیدا کرده است.



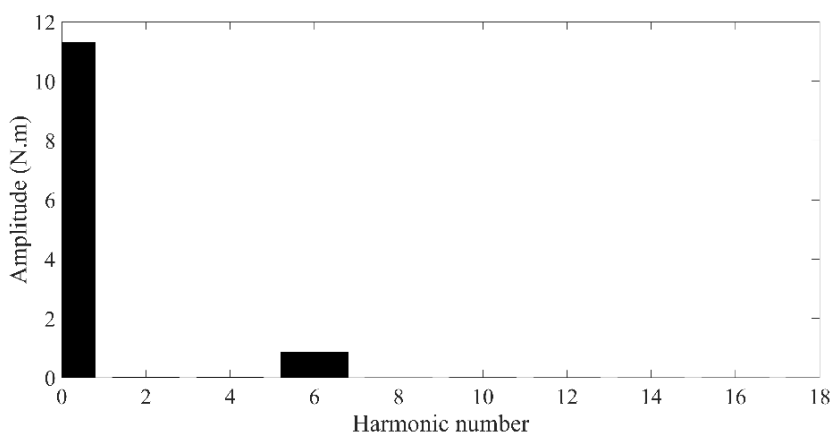
شکل (۵-۲۵) - الگوریتم پیشنهادی برای تعیین مقدار بهینه زاویه شیفیت آهنربا



شکل (۵-۲۶) - تحلیل سری فوریه شکل موج گشتاور ماشین در حالت بدون شیف

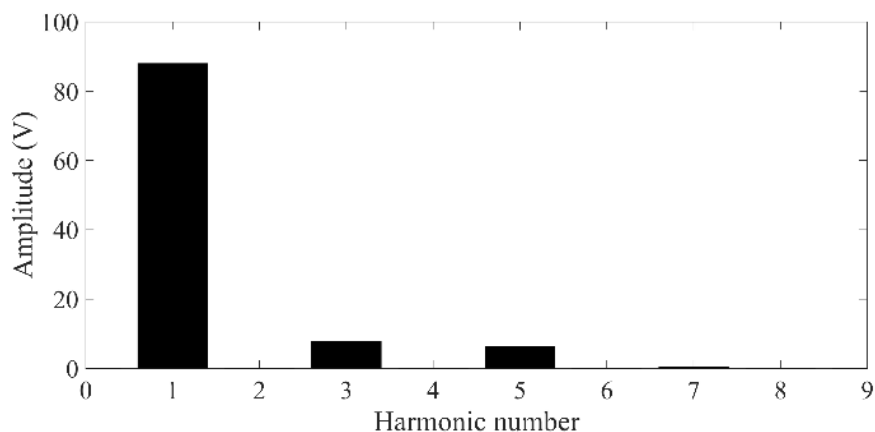


(الف)

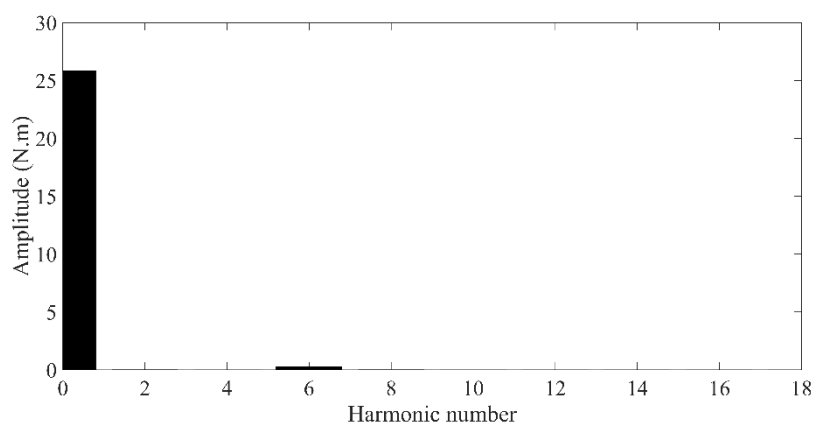


(ب)

شکل (۵-۲۷) - تحلیل سری فوریه شکل موج گشتاور الف - ماشین ۱ ب - ماشین ۲



شکل (۵-۲۸) - تحلیل سری فوریه شکل موج ولتاژ القایی ماشین در حالت بدون شیفت



شکل (۵-۲۹) - تحلیل سری فوریه شکل موج گشتاور ماشین با آهنرباهای شیفت یافته به مقدار ۱۲ درجه

برای مقایسه بهتر مقدار زاویه شیفت بین ۰ تا ۲۰ درجه با گام ۲ درجه تغییر داده شده و مقادیر ریپل گشتاور ماشین محاسبه شده است. در جدول (۵-۴) مقادیر ریپل گشتاور بدست آمده داده شده است. با توجه به این جدول ریپل گشتاور ماشین با افزایش زاویه شیفت به تدریج کاهش پیدا می کند و نهایتاً به مقدار حداقل خود به ازای زاویه شیفت برابر با ۱۲ درجه می رسد. پس از آن افزایش بیشتر زاویه شیفت منجر به افزایش ریپل گشتاور ماشین می شود.

جدول (۴-۵) - ریپل گشتاور ماشین برای مقادیر مختلف زاویه شیفت آهنربا

ریپل گشتاور (%)	زاویه شیفت آهنربا (درجه)
۸/۵	۰
۷/۲	۲
۶/۶	۴
۵/۵	۶
۴/۲	۸
۲/۴	۱۰
۲	۱۲
۲/۹	۱۴
۳/۵	۱۶
۴/۶	۱۸
۵/۷	۲۰

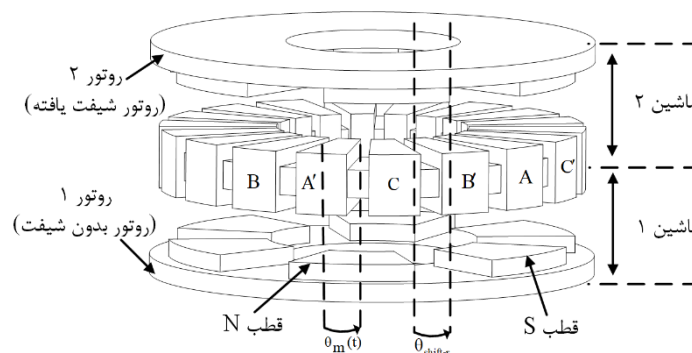
تغییر زاویه شیفت آهنرباها ممکن است بر روی سایر مشخصه‌های عملکردی ماشین تاثیر بگذارد. بنابراین ضروری است که تاثیر زاویه شیفت بر روی مشخصه‌های عملکردی بااهمیت بررسی شود. در جدول (۵-۵) برخی از مشخصه‌های مهم ماشین شامل زاویه قدرت، بازده و ضریب توان ماشین‌های بدون شیفت و ماشین با ۱۲ درجه شیفت داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود شیفت دادن آهنرباهای دائم تاثیر چشمگیری بر روی مشخصات عملکردی مهم ماشین ندارد.

جدول (۵-۵) - مقایسه مشخصه‌های عملکردی ماشین برای دو زاویه مختلف شیفت آهنربا

پارامتر	ماشین با آهنرباهای بدون شیفت	ماشین با آهنرباهای شیفت یافته به اندازه ۱۲ درجه
زاویه قدرت (درجه)	۳/۹۳-	۴/۵-
بازده (%)	۹۶/۸	۹۴/۴
ضریب توان	۰/۹۹	۰/۹۸

۵-۳-۲ شیفت دادن دیسک‌های روتور

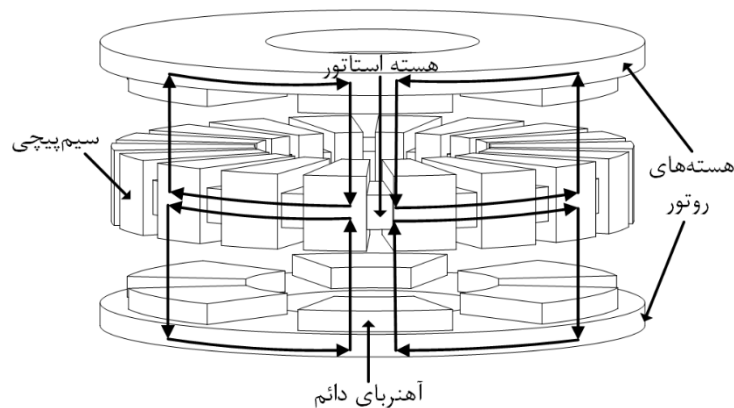
با توجه به ساختار خاص ماشین آهنربای دائم شار محوری دو روتوره می‌توان یکی از دیسک‌های روتور را نسبت به دیسک دیگر شیفت داد. ساختار ماشین با روتور شیفت داده شده در شکل (۵-۳۰) نشان داده شده است. با توجه به شکل زاویه شیفت با $\theta_{\text{shift-r}}$ نشان داده شده است. فرض شده است که روتور ۲ نسبت به روتور ۱ به اندازه $\theta_{\text{shift-r}}$ شیفت یافته است. همچنین لازم به ذکر است که هیچ تغییری در سایر بخش‌های ماشین اعمال نمی‌شود.



شکل (۵-۳۰) - ساختار ماشین با روتور شیفت یافته

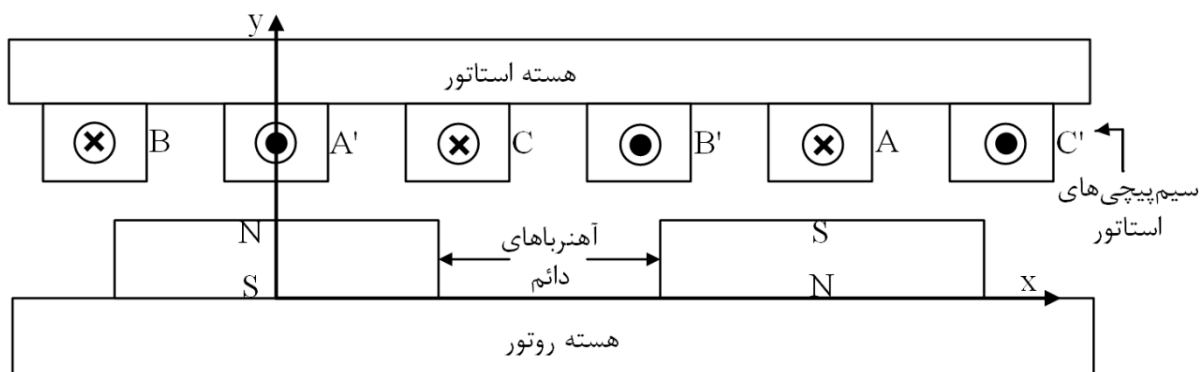
۵-۳-۱ فرمول پیشنهادی برای محاسبه ولتاژ القایی ماشین با روتور شیفت یافته

در شکل (۵-۳۱) مسیرهای شار مغناطیسی در داخل ماشین نشان داده شده است. با توجه به این شکل شار آهنرباهای هر یک از روتورها وارد هسته استاتور شده و پس از دور زدن هسته استاتور مجدداً به همان روتور برمی‌گردد. بعبارت دیگر شار ناشی از آهنرباهای یک روتور وارد روتور دیگر نمی‌شود. بنابراین می‌توان هسته استاتور را از وسط برش زده و ساختار ماشین را به صورت دو ساختار یک طرفه مستقل در نظر گرفت. در این صورت می‌توان فرض کرد که ساختار ماشین دوطرفه با روتور شیفت یافته نیز از دو ساختار یک طرفه مشابه تشکیل شده است که روتور آنها نسبت به هم شیفت دارد. با توجه به شکل (۵-۳۰) ساختار با روتور بدون شیفت ماشین ۱ نامگذاری شده است. همچنین ساختار با روتور شیفت یافته تحت عنوان "ماشین ۲" نامیده شده است. در اینجا نیز تمام محاسبات برای ماشین‌های ۱ و ۲ بصورت مستقل انجام شده و در نهایت به ماشین کلی تعمیم داده می‌شود.



شکل (۵-۳۱) - مسیرهای شار در داخل ماشین

در شکل (۵-۳۲) نمای دوبعدی ماشین نشان داده شده است. این ساختار در قطر متوسط ماشین ترسیم شده است.



شکل (۵-۳۲) - سطح مقطع دو بعدی از یک جفت قطب ماشین [۷۶]

با توجه به شکل (۵-۳۲) چگالی شار پسماند آهنربای دائم را می توان بصورت زیر بدست آورد [۷۶]:

$$B'_r(x_0) = B_r [1 - (MMF_{cs}(x_0) + MMF_{cr}(x_0)) / (2H_{cb}l_{pm})] \quad (۱۵-۵)$$

مقدار x_0 در بازه 0 تا $\pi/2$ انتخاب می شود. با استفاده از رابطه فوق مقادیر چگالی شار پسماند آهنربا به ازای مقادیر مختلف x_0 در بازه مربوطه بدست می آید. سپس به کمک نرم افزار متلب سری فوریه زیر بر روی مقادیر بدست آمده اعمال می شود [۷۶]:

$$B'_r(x_0) = a_0 + a_1 \cos(\Omega x_0 + \delta_1) + a_2 \cos(2\Omega x_0 + \delta_2) \quad (۱۶-۵)$$

که در این رابطه a_0 ، a_1 ، Ω ، δ_1 و δ_2 از تکنیک برازش منحنی نرم افزار متلب بدست می آید.

با توجه به شکل (۵-۳۲) بردار مغناطیس شونده برای مقادیر y بین ۰ و l_{pm} را می‌توان بصورت زیر مدل کرد [۷۶]:

$$M'_y(x) = \sum_{h=1,3,5,\dots}^{\infty} ((A'_h/\mu_0)\cos(h\pi x/\tau_p))$$

$$= \begin{cases} \pm B_r/\mu_0 & \text{in PM materials} \\ 0 & \text{in air - gap between PMs} \end{cases} \quad (۱۷-۵)$$

که در این رابطه مقادیر A'_h بصورت زیر بدست می‌آید [۷۶]:

$$A'_h = (4a_0/(h\pi))\sin(\alpha h\pi/2) - (4a_1\Omega\tau_p/(\Omega^2\tau_p^2 - h^2\pi^2))\sin\delta_1$$

$$- (8a_2\Omega\tau_p/(4\Omega^2\tau_p^2 - h^2\pi^2))\sin\delta_2 + (2a_1/(\Omega\tau_p$$

$$+ h\pi))\sin((\alpha(\Omega\tau_p + h\pi)/2) + \delta_1) + (2a_1/(\Omega\tau_p$$

$$- h\pi))\sin((\alpha(\Omega\tau_p - h\pi)/2) + \delta_1) + (2a_2/(2\Omega\tau_p$$

$$+ h\pi))\sin((\alpha(2\Omega\tau_p + h\pi)/2) + \delta_2) + (2a_2/(2\Omega\tau_p$$

$$- h\pi))\sin((\alpha(2\Omega\tau_p - h\pi)/2) + \delta_2) \quad (۱۸-۵)$$

در مراجع [۷۶] و [۷۷] روابط زیر برای محاسبه مولفه عمودی چگالی شار در بازه $l_{pm}+g < y < l_{pm}+g+l_w$ ارائه شده است:

$$B_{yt}(x,y,t) = \sum_{h=1,3,5,\dots}^{\infty} (A'_h/2)(1 - e^{K_1})/(1 - e^{K_2}) \times (e^{K_3}$$

$$+ e^{K_4})\cos(h((4px/((1 + \lambda)D_o)) - p\theta_m(t))) \quad (۱۹-۵)$$

$$K_2 = (-8ph(g + l_w + l_{pm}))/((1 + \lambda)D_o) \quad K_1 = (-8phl_{pm})/((1 + \lambda)D_o)$$

$$\lambda)D_o)$$

$$K_3 = 4ph(l_{pm} - y)/(1 + \lambda)D_o \quad K_4$$

$$= (-4ph(2g + 2l_w + l_{pm} - y))/((1 + \lambda)D_o)$$

همانطور که در شکل (۵-۳۰) نشان داده شده است $\theta_m(t)$ موقعیت زاویه‌ای مرکز قطب N روتور بدون شیفیت نسبت به مرکز سیم‌پیچ A' استاتور می‌باشد. در این صورت شار پیوندی یک فاز ماشین ۱ بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned}
\varphi_{PH_PM}(t) &= (p(1-\lambda)D_o/2a_p) \\
&\times \sum_{i=1}^{N_{layer}} \sum_{j=1}^{N_{Turnlayer}\{i\}} \int_{((\tau_p\theta_{PH}/\pi)+\Delta x_{ij})}^{((\tau_p\theta_{PH}/\pi)+\Delta x_{ij}+\tau_p)} B_{yI}(x.l_{pm} + g \\
&+ 0.5l_w - \Delta y_{ij}.t)dt \\
&= ((1+\lambda)D_o/(4a_p)) \\
&\times \sum_{i=1}^{N_{layer}} \sum_{j=1}^{N_{Turnlayer}\{i\}} \sum_{h=1,3,5,\dots}^{\infty} ((A'_h(1-\lambda)D_o/2h)(e^{K_5} \\
&+ e^{K_6})/(1 \\
&- e^{K_2}) \\
&\times (1 - e^{K_1})\sin(h(p\theta_m(t) - \theta_{PH} \\
&- ((4p\Delta x_{ij})/((1+\lambda)D_o)))) \\
&K_5 = (4ph(-g - 0.5l_w + \Delta y_{qj}))/((1+\lambda)D_o) \quad K_6 = (-4ph(g + 1.5l_w + \Delta y_{qj})) \\
&\quad /((1+\lambda)D_o)
\end{aligned} \tag{۲۰-۵}$$

که در این رابطه $\varphi_{PH_PM}(t)$ شار پیوندی یک فاز ماشین ۱ می باشد. با مشتق گیری از شکل موج شار پیوندی، شکل موج ولتاژ القایی ماشین ۱ بصورت زیر بدست می آید:

$$\begin{aligned}
E_{PH1}(t) &= (((1-\lambda^2)D_o^2p\omega_m(t))/(8a_p)) \\
&\times \sum_{i=1}^{N_{layer}} \sum_{j=1}^{N_{Turnlayer}\{i\}} \sum_{h=1,3,5,\dots}^{\infty} (A'_h(e^{K_5} + e^{K_6})/(1 \\
&- e^{K_2}) \\
&\times (1 - e^{K_1})\cos(h(p\theta_m(t) - \theta_{PH} \\
&- ((4p\Delta x_{ij})/((1+\lambda)D_o)))) \\
&\tag{۲۱-۵}
\end{aligned}$$

ولتاژ القایی ماشین ۲ نیز به روش مشابهی بدست می آید. اما باید توجه کرد که ولتاژ القایی بدست آمده برای ماشین ۲ به اندازه $\theta_{shift-r}$ نسبت به ماشین ۱ شیفت دارد. بنابراین ولتاژ فاز ماشین ۲ برابر است با:

$$\begin{aligned}
E_{PH2}(t) = & \left(\frac{(1 - \lambda^2) D_o^2 p \omega_m(t)}{8a_p} \right) \\
& \times \sum_{i=1}^{N_{layer}} \sum_{j=1}^{N_{Turnlayer}\{i\}} \sum_{h=1,3,5,\dots}^{\infty} \left(\frac{A'_h(e^{K_5} + e^{K_6})}{1 - e^{K_2}} \right) \\
& \times (1 \\
& - e^{K_1}) \cos \left(h \left(p\theta_m(t) - p\theta_{shift-r} - \theta_{PH} \right. \right. \\
& \left. \left. - \left(\frac{4p\Delta x_{ij}}{(1 + \lambda)D_o} \right) \right) \right) \quad (22-5)
\end{aligned}$$

به منظور محاسبه ولتاژ القایی ماشین اصلی با روتور شیفته، روابط (۵-۲۱) و (۵-۲۲) با یکدیگر جمع می‌شود. در این صورت رابطه (۵-۲۳) برای محاسبه ولتاژ القایی ماشین اصلی پیشنهاد می‌شود:

$$\begin{aligned}
E_{PHmain}(t) = & ((1 - \lambda^2) D_o^2 p \omega_m(t)) / (8a_p) \\
& \times \sum_{i=1}^{N_{layer}} \sum_{j=1}^{N_{Turnlayer}\{i\}} \sum_{h=1,3,5,\dots}^{\infty} \left(A'_h(e^{K_5} + e^{K_6}) / (1 \right. \\
& - e^{K_2}) \\
& \times (1 \\
& - e^{K_1}) (\cos (h(p\theta_m(t) - \theta_{PH} - ((4p\Delta x_{ij}) / ((1 + \lambda)D_o))) \\
& + \cos (h(p\theta_m(t) - p\theta_{shift-r} - \theta_{PH} \\
& - ((4p\Delta x_{ij}) / ((1 + \lambda)D_o))) \quad (23-5)
\end{aligned}$$

در رابطه (۵-۲۳) تمام مولفه‌های هارمونیکی ولتاژ القایی در نظر گرفته شده است.

۵-۲-۳-۲ نتایج شبیه‌سازی

ابتدا باید صحت رابطه بدست آمده برای ولتاژ القایی ماشین مورد ارزیابی قرار بگیرد. برای این منظور از نرم‌افزار اجزاء محدود استفاده می‌شود. ولتاژ القایی ماشین به کمک نرم‌افزار اجزاء محدود بدست می‌آید. همچنین با استفاده از رابطه پیشنهادی نیز ولتاژ القایی محاسبه می‌شود. نتایج بدست آمده از دو روش در شکل (۵-۳۳) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود شکل موج‌های بدست آمده مطابقت خوبی با یکدیگر دارند. برای محاسبه اختلاف بین دو شکل موج از روش NRMSE استفاده می‌شود.

مقدار NRMSE بین نتایج دو روش تقریباً ۳٪ درصد می‌باشد. بنابراین رابطه پیشنهادی برای محاسبه ولتاژ القایی ماشین دارای دقت نسبتاً بالایی می‌باشد. در این صورت می‌توان از فرمول پیشنهادی برای بررسی تاثیر شیف دادن روتور بر روی شکل موج ولتاژ القایی ماشین استفاده کرد. به کمک فرمول پیشنهادی ولتاژ القایی ماشین با روتور شیف یافته به ازای مقادیر مختلف زاویه شیف استخراج شده است. نتایج بدست آمده برای برخی از مقادیر شیف در شکل (۳۴-۵) نشان داده شده است. با توجه به شکل با تغییر زاویه شیف روتور مقدار THD ولتاژ القایی نیز تغییر می‌کند. برای مقایسه بهتر مقدار THD ولتاژ القایی برای زوایای مختلف شیف در

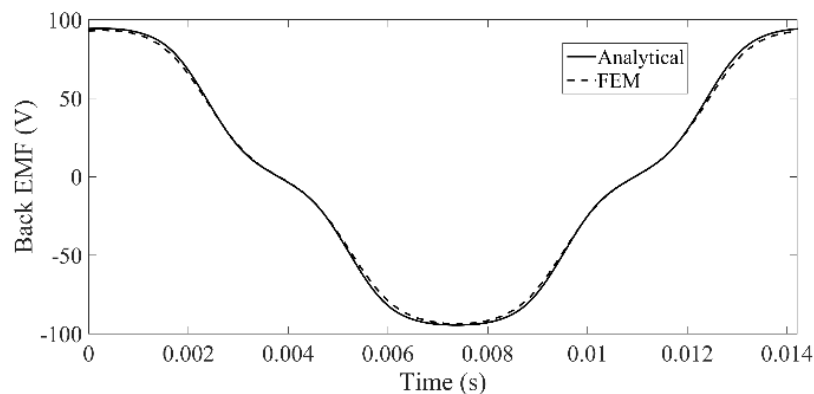
جدول (۵-۶) ارائه شده است. با توجه به

جدول (۵-۶) به ازای مقادیر شیف کمتر از ۱۲ درجه مقدار THD با افزایش زاویه شیف روتور کاهش می‌یابد. اما برای مقادیر شیف بیشتر از ۱۲ درجه با افزایش زاویه شیف مقدار THD ولتاژ القایی افزایش پیدا می‌کند. در ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار مقدار راکتانس سنکرون ثابت می‌باشد. مقادیر هارمونیک‌های شکل موج ولتاژ القایی بصورت مستقیم بر روی مشخصه‌های عملکردی ماشین از قبیل جریان آرمیچر، ریپل گشتاور و ... تاثیر می‌گذارد. اگر ماشین بصورت موتوری راه‌اندازی شود جریان آرمیچر هر فاز آن بصورت زیر محاسبه می‌شود:

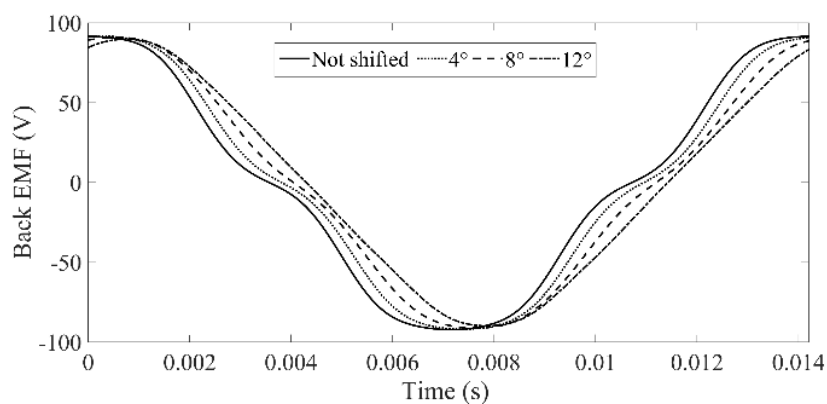
$$i(t) = (v_{ph}(t) - E_{PHmain}(t))/Z_s \quad (۵-۲۴)$$

با توجه به روابط (۵-۹) و (۵-۱۰) مقدار لحظه‌ای توان و در نتیجه مقدار لحظه‌ای گشتاور از مقادیر لحظه‌ای ولتاژ القایی و جریان بدست می‌آید بنابراین شکل موج ولتاژ القایی بر روی ریپل گشتاور ماشین تاثیر گذار می‌باشد. به منظور بررسی بهتر، ماشین مورد مطالعه بصورت موتوری شبیه‌سازی شده است. برای این منظور ماشین توسط یک منبع ولتاژ سه فاز با مقدار موثر ۱۱۱/۵ V و فرکانس ۷۰ Hz تحت شرایط عملکردی بار کامل تغذیه می‌شود. لازم به ذکر است که به منظور بررسی تاثیر تنها هارمونیک‌های ولتاژ القایی بر روی ریپل گشتاور، ماشین توسط یک منبع ولتاژ سینوسی خالص تغذیه می‌شود. به کمک این شبیه‌سازی گشتاور لحظه‌ای ماشین برای مقادیر مختلف زوایای شیف روتور بدست می‌آید. در

شکل (۵-۳۵) نتایج بدست آمده به ازای برخی از زوایای شیفت نشان داده شده است. با توجه به این شکل ریل گشتاور ماشین با تغییر زاویه شیفت روتور تغییر می‌کند. بعنوان مثال ریل گشتاور ماشین با روتور بدون شیفت حدود $8/5\%$ می‌باشد. زمانی که یکی از دیسک‌های روتور به اندازه 12° درجه نسبت به دیسک دیگر شیفت داده می‌شود ریل گشتاور ماشین از $8/5\%$ به $1/7\%$ کاهش پیدا می‌کند. به منظور بررسی تاثیر مقدار زاویه شیفت روتور بر روی شکل موج ولتاژ القایی، باید به ازای مقادیر مختلف زاویه شیفت ساختار ماشین در محیط نرم‌افزارهای مربوطه کشیده شود و سپس تنظیمات لازم در محیط نرم‌افزار اجزاء محدود انجام شود. بنابراین شبیه‌سازی ماشین به ازای مقادیر مختلف زاویه شیفت یک فرآیند زمانبر می‌باشد. اما به کمک فرمول پیشنهادی ولتاژ القایی ماشین برای مقادیر مختلف زاویه شیفت به راحتی قابل محاسبه می‌باشد.



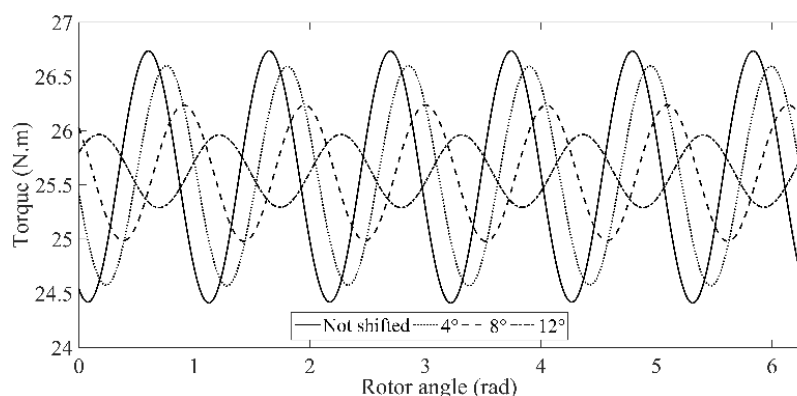
شکل (۵-۳۳) - شکل موج ولتاژ القایی بدست آمده از روش اجزاء محدود و فرمول تحلیلی



شکل (۵-۳۴) - شکل موج ولتاژ القایی ماشین با روتور شیفت یافته

جدول (۵-۶) - مقدار THD ولتاژ القایی برای برخی از زوایای شیفت روتور

مقدار THD ولتاژ القایی (%)	زاویه شیفت روتور (درجه)
۱۱/۵	۰
۱۰/۶	۴
۸/۵	۸
۵	۱۲
۶/۴	۱۶
۷/۱	۲۰



شکل (۵-۳۵) - گشتاور الکترومغناطیسی لحظه‌ای ماشین با روتور شیفت یافته

۳-۲-۳-۵ تعیین مقدار بهینه زاویه شیفت روتور

با توجه به جدول (۵-۶) واضح است که شکل موج ولتاژ القایی ماشین با روتور بدون شیفت هارمونیک می‌باشد. همچنین مقدار زاویه شیفت تاثیر بسزایی بر روی مقدار THD ولتاژ القایی دارد. بنابراین ضروری است که مقدار بهینه زاویه شیفت برای دستیابی به ولتاژ تقریباً سینوسی مشخص شود. برای این منظور الگوریتمی مطابق شکل (۳۶-۵) پیشنهاد می‌شود. با توجه به این الگوریتم ابتدا با استفاده از تبدیل سری فوریه مقادیر هارمونیک‌های شکل موج ولتاژ القایی ماشین با روتور بدون شیفت بدست می‌آید. هر یک از مولفه‌های هارمونیک که بیشترین دامنه را داشته باشد می‌تواند گزینه مناسبی برای تعیین

مقدار بهینه زاویه شیف و در نتیجه کاهش چشمگیر مقدار THD و لتاز القایی باشد. در واقع با انتخاب مناسب زاویه شیف روتور هارمونیک مربوطه حذف می‌شود. فرض کنید شکل موج و لتاز القایی ماشین اصلی توسط رابطه زیر بدست می‌آید:

$$E_{PHmain}(t) = \sum_{h=1,3,5,\dots}^{\infty} K_h \cos(2\pi f_h t + \theta_h) \quad (25-5)$$

این شکل موج و لتاز از جمع شکل موج و لتاز ماشین‌های ۱ و ۲ بصورت زیر بدست آمده است:

$$E_{PHmain}(t) = E_{PH1}(t) + E_{PH2}(t) \quad (26-5)$$

در این صورت هارمونیک h ام شکل موج و لتاز القایی ماشین با روتور شیف یافته بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E_{PHmain_h}(t) = (K_h/2)\cos(2\pi f_h t + \theta_h) + (K_h/2)\cos(2\pi f_h t + \theta_h + ph\theta_{shift-r}) \quad (27-5)$$

با توجه به رابطه (۵-۲۷) برای حذف h امین هارمونیک شکل موج و لتاز القایی ماشین اصلی مقدار زاویه شیف $\theta_{shift-r}$ باید برابر باشد با:

$$\theta_{shift-r} = \pi/(ph) \quad (28-5)$$

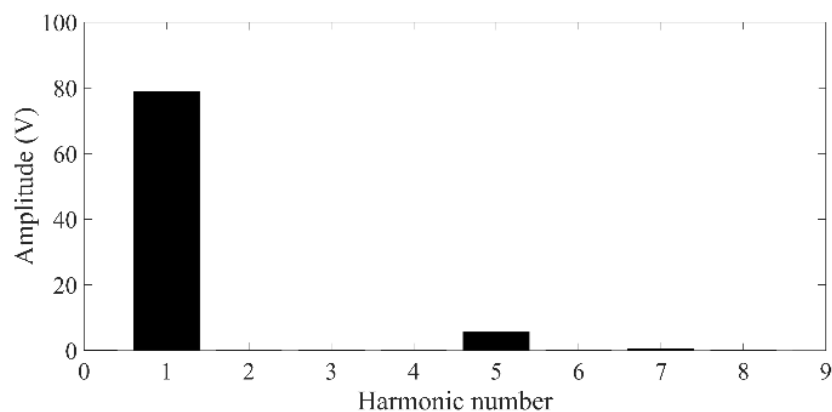
بنابراین با استفاده از رابطه (۵-۲۸) به راحتی می‌توان مولفه هارمونیکی خاصی از و لتاز القایی ماشین را حذف کرد. باید توجه کرد که حذف مولفه هارمونیکی که بیشترین دامنه را دارد الزاما منجر به حداقل شدن THD و لتاز القایی نمی‌شود. به عبارت دیگر باید تمام مولفه‌های هارمونیکی که دارای دامنه چشمگیر هستند در نظر گرفته شوند. سپس مقدار زاویه شیف روتور برای حذف هر هارمونیک خاص مشخص شود. در مرحله بعد به کمک رابطه (۵-۲۳) شکل موج و لتاز القایی ماشین برای هر زاویه شیف روتور محاسبه می‌شود. سپس به کمک تبدیل سری فوریه مقدار THD و لتاز القایی برای هر زاویه شیف بدست می‌آید. هر زاویه شیف که منجر به حداقل شدن مقدار THD و لتاز القایی ماشین شود به عنوان مقدار بهینه زاویه شیف روتور انتخاب می‌شود. روش پیشنهادی برای حداقل کردن مقدار THD شکل موج و لتاز القایی ماشین مورد مطالعه بکار گرفته شد. نتیجه تحلیل سری فوریه شکل موج و لتاز القایی ماشین در حالت بدون شیف در شکل (۵-۲۸) نشان داده شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در این

شکل دامنه هارمونیک ۳ و ۵ به ترتیب برابر با ۹٪ و ۷٪ دامنه هارمونیک اول ولتاژ القایی می‌باشد. این مولفه‌های هارمونیکی نسبت به سایر هارمونیک‌ها تاثیر بیشتری بر روی THD ولتاژ القایی دارند. بنابراین بهتر است که دامنه این مولفه‌های هارمونیک تا حد ممکن کاهش یابد. برای این منظور مقدار زاویه شیفت با استفاده از رابطه (۵-۲۸) محاسبه می‌شود. در این صورت مقدار زاویه شیفت برای حذف هارمونیک سوم برابر با ۲۰ درجه بدست می‌آید. با شیفت دادن یکی از دیسک‌های روتور به اندازه ۲۰ درجه نسبت به دیسک دیگر شکل موج ولتاژ القایی ماشین به کمک رابطه (۵-۲۳) محاسبه می‌شود. نتیجه تحلیل سری فوریه شکل موج ولتاژ القایی ماشین با روتور شیفت یافته به اندازه ۲۰ درجه در شکل (۵-۳۷) نشان داده شده است. با توجه به این شکل هارمونیک سوم ولتاژ القایی ماشین در اثر شیفت دادن روتور به اندازه ۲۰ درجه حذف شده است. با استفاده از همین روش مقدار زاویه شیفت روتور برای حذف هارمونیک پنجم برابر با ۱۲ درجه بدست می‌آید. همچنین نتایج تحلیل سری فوریه ولتاژ القایی ماشین با روتور شیفت یافته به اندازه ۱۲ درجه در شکل (۵-۳۸) نشان داده شده است. چنانچه واضح است هارمونیک پنجم ولتاژ القایی ماشین حذف شده است. مقادیر THD ولتاژ القایی ماشین با روتور بدون شیفت، با ۱۲ درجه شیفت و ۲۰ درجه شیفت در جدول (۵-۷) ارائه شده است. با توجه به نتایج داده شده در این جدول مقدار THD ولتاژ القایی ماشین با روتور شیفت یافته به اندازه ۱۲ درجه حداقل می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود اگرچه دامنه هارمونیک سوم از بقیه هارمونیک‌ها بیشتر بود و این هارمونیک از طریق شیفت دادن روتور به اندازه ۲۰ درجه حذف شد اما در این حالت THD ولتاژ القایی ماشین حداقل نشد. باید توجه کرد که شیفت دادن روتور برای حذف هارمونیک خاصی می‌تواند منجر به تغییر دامنه هارمونیک‌های دیگر شود. از طرفی دامنه همه هارمونیک‌ها نیز بر روی مقدار THD ولتاژ القایی ماشین تاثیرگذار است. بنابراین با شیفت دادن روتور به اندازه ۱۲ درجه علاوه بر اینکه هارمونیک پنجم حذف می‌شود دامنه برخی از هارمونیک‌های دیگر نیز کاهش پیدا می‌کند. بنابراین مقدار THD ولتاژ القایی ماشین با روتور شیفت یافته به اندازه ۱۲ درجه حداقل می‌شود. مقدار زاویه شیفت بر روی دامنه هارمونیک اول ولتاژ القایی تاثیر می‌گذارد. بنابراین ضروری است که تغییرات

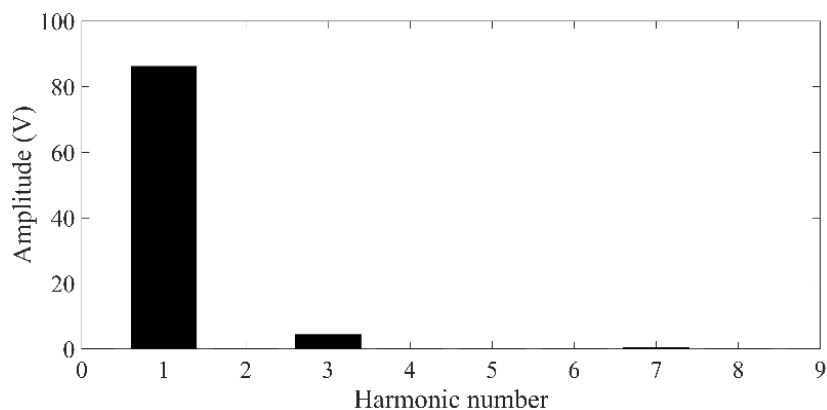
هارمونیک اول ولتاژ القایی نیز بررسی شود. دامنه هارمونیک اول ولتاژ القایی در جدول (۵-۷) داده شده است. واضح است که دامنه هارمونیک اول ولتاژ القایی ماشین با ۱۲ درجه شیفت نسبت به ماشین بدون شیفت تغییر چشمگیری نکرده است.



شکل (۵-۳۶) - الگوریتم پیشنهادی برای تعیین مقدار بهینه زاویه شیفت روتور



شکل (۵-۳۷) - تحلیل سری فوریه شکل موج ولتاژ القایی ماشین با روتور شیفت یافته به مقدار ۲۰ درجه



شکل (۵-۳۸)- تحلیل سری فوریه شکل موج ولتاژ القایی ماشین با روتور شیفت یافته به مقدار ۱۲ درجه

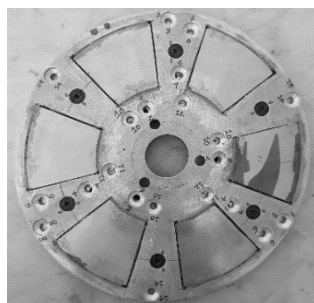
جدول (۵-۷)- دامنه هارمونیک اول و مقدار THD ولتاژ القایی

ماشین مورد مطالعه	دامنه هارمونیک اول ولتاژ القایی (V)	THD ولتاژ القایی (%)
ماشین با روتور بدون شیفت	۸۹/۸	۱۱/۵
ماشین با روتور شیفت یافته به مقدار ۱۲ درجه	۸۷/۲	۵
ماشین با روتور شیفت یافته به مقدار ۲۰ درجه	۷۸/۸	۷/۱

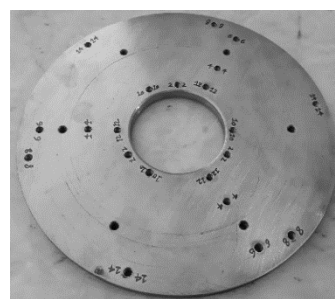
۵-۳-۲-۴ نتایج آزمایشگاهی

برای ارزیابی دقت فرمول پیشنهادی، ماشین مورد مطالعه ساخته شده و ولتاژ القایی آن در محیط آزمایشگاه اندازه‌گیری شده است. ساختار روتور در شکل (۵-۳۹) نشان داده شده است. در شکل (۵-۳۹) الف هسته روتور نشان داده شده است. از یک قاب آلومینیومی برای نگه‌داشتن آهنرباهای دائم و شیفت دادن دیسک‌های روتور استفاده می‌شود. این قاب آلومینیومی در شکل (۵-۳۹) ب نشان داده شده است. چنانچه در این شکل نیز مشاهده می‌شود تعدادی سوراخ بر روی قاب آلومینیومی ایجاد شده است. این سوراخ‌های با شماره ۰ تا ۱۴ نامگذاری شده‌اند که برای تنظیم کردن موقعیت روتور دوم نسبت به روتور اول بکار می‌رود. لازم به ذکر است که در سایر بخش‌های ماشین از قبیل هسته استاتور، سیم‌پیچی‌ها، آهنرباهای دائم ... تغییری ایجاد نمی‌شود. همچنین ابعاد کلیه بخش‌های ماشین بدون

شیفت و ماشین با روتور شیفت یافته یکسان می‌باشد. مقدار زاویه شیفت توسط الگوریتم شکل (۳۶-۵) بدست آمده است. برای محاسبه ولتاژ القایی، ماشین مورد مطالعه بصورت مدار باز و بصورت ژنراتوری مورد آزمایش قرار می‌گیرد و محور آن با سرعت ۱۴۰۰ دور بر دقیقه چرخانده می‌شود. به منظور نشان دادن موثر بودن شیفت دادن روتور بر روی شکل موج ولتاژ القایی، ماشین ساخته شده برای مقادیر مختلف زاویه شیفت مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان داد که مقدار زاویه شیفت تاثیر بسزایی بر روی شکل موج ولتاژ القایی ماشین دارد. به عنوان نمونه ولتاژ القایی ماشین با روتور شیفت یافته به اندازه ۱۲ درجه در شکل (۴۰-۵) نشان داده شده است. مقایسه ولتاژ نشان داده شده در شکل (۴۰-۵) با شکل موج ولتاژ ماشین در حالت بدون شیفت ثابت می‌کند که ولتاژ ماشین با روتور شیفت یافته به اندازه ۱۲ درجه نسبت به ماشین بدون شیفت سینوسی‌تر می‌باشد. همچنین شکل موج ولتاژ القایی ماشین با ۱۲ درجه شیفت که در شکل‌های (۴۰-۵) و (۴۱-۵) نشان داده شده است بسیار به یکدیگر نزدیک می‌باشند. در شکل (۴۱-۵) مولفه‌های هارمونیکی ولتاژ القایی ماشین نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود نتایج بدست آمده از تبدیل سری فوریه برای روش تحلیلی و اندازه‌گیری دارای اختلاف بسیار کمی می‌باشد. بنابراین فرمول پیشنهادی برای محاسبه ولتاژ القایی ماشین با روتور شیفت یافته دارای دقت بالایی است. بنابراین طراحان ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار می‌توانند از روش شیفت دادن روتور و فرمول‌های پیشنهادی برای محاسبه ولتاژ القایی ماشین و محاسبه زاویه شیفت بهینه برای بدست آوردن ولتاژ القایی تقریباً سینوسی استفاده کنند.

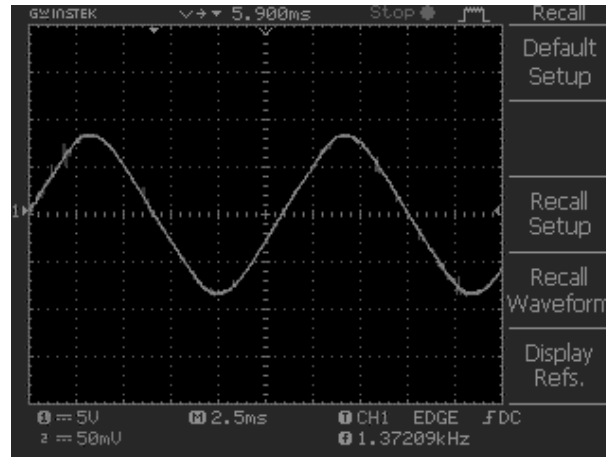


(ب)



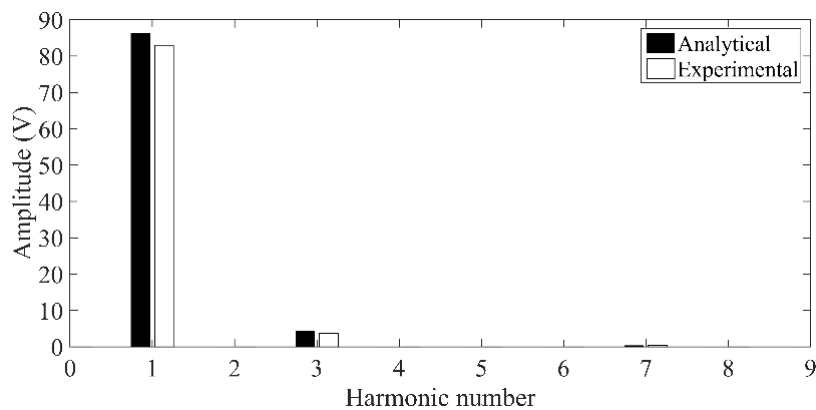
(الف)

شکل (۳۹-۵) - ساختار روتور الف - هسته روتور ب - قاب نگهدارنده آهنرباهای دائم



شکل (۴۰-۵)- شکل موج ولتاژ القایی ماشین با روتور شیفته به اندازه ۱۲ درجه اندازه‌گیری شده توسط

اسیلوسکوپ با پروب $\times 10$



شکل (۴۱-۵)- تحلیل سری فوریه شکل موج ولتاژ القایی ماشین با روتور شیفته به اندازه ۱۲ درجه بدست آمده

از روش تحلیلی و با اندازه‌گیری در محیط آزمایشگاه

۴-۵ نتیجه‌گیری فصل

بررسی‌های ما نشان می‌دهد که تاکنون رابطه‌ای برای انتخاب ولتاژ و فرکانس تغذیه ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار در ابتدای فرآیند طراحی ارائه نشده است. همچنین تاکنون روش شیفته دادن آهنرباهای دائم و دیسک‌های روتور بر روی این نوع ساختار اعمال نشده است بنابراین در این فصل:

- رابطه‌ای تحلیلی برای تعیین ولتاژ و فرکانس تغذیه در ابتدای فرآیند طراحی ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار پیشنهاد شد.

- روش شیفت دادن آهنرباهای دائم بر روی ساختار آهنربای دائم شار محوری بدون شیار اعمال شد. رابطه‌ای تحلیلی برای محاسبه ولتاژ القایی ماشین با آهنرباهای شیفت یافته پیشنهاد شد. همچنین الگوریتم و رابطه‌ای تحلیلی برای تعیین مقدار بهینه زاویه شیفت آهنربا برای حداقل کردن ریبیل گشتاور ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار پیشنهاد شد.
- روش شیفت دادن دیسک‌های روتور بر روی ساختار آهنربای دائم شار محوری بدون شیار اعمال شد. رابطه‌ای تحلیلی برای محاسبه ولتاژ القایی ماشین با روتور شیفت یافته پیشنهاد شد. همچنین الگوریتم و رابطه‌ای تحلیلی برای تعیین مقدار بهینه زاویه شیفت روتور برای حداقل کردن THD ولتاژ القایی ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار پیشنهاد شد.
- دقت روابط پیشنهادی و موثر بودن روش شیفت دادن بر روی عملکرد ماشین مورد مطالعه توسط نرم‌افزار اجزاء محدود و نتایج ساخت مورد تأیید قرار گرفت.

فصل ۶ : نتیجه گیری و

پیشهادات

۶-۱ نتیجه گیری

در این رساله به کمک روابط ابعادی استخراجی و روش بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO) الگوریتمی برای طراحی ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار تدوین شد. به کمک این الگوریتم پارامترهای اختیاری ماشین به منظور دستیابی به حداکثر بازده بصورت بهینه انتخاب می شوند. با استفاده از این الگوریتم یک نمونه ماشین طراحی و ساخته شد. صحت عملکرد ماشین طراحی شده به کمک نرم افزار اجزاء محدود و اندازه گیری در محیط آزمایشگاه بررسی شد و نتایج زیر بدست آمد:

- مقادیر بدست آمده از شبیه سازی با مقادیر بدست آمده از الگوریتم طراحی مطابقت دارد.
- مقادیر چگالی شار در بخش های مختلف ماشین بدست آمده از شبیه سازی با مقادیر بدست آمده از مدار معادل مغناطیسی مطابقت دارد..

- ماشین طراحی شده قابلیت توان دهی را دارد.
- نتایج بدست آمده از اندازه گیری در محیط آزمایشگاه با نتایج شبیه سازی ها و مقادیر بدست آمده از الگوریتم طراحی مطابقت دارد.

بنابراین نتایج بدست آمده از شبیه سازی ها و اندازه گیری در محیط آزمایشگاه صحت الگوریتم طراحی پیشنهادی را تأیید می کند.

در فرآیند طراحی ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار ولتاژ و فرکانس تغذیه این ماشین جزء پارامترهای اختیاری طراحی می باشد. بنابراین در این رساله نمودارهایی استخراج شد که به کمک این نمودارها می توان مقدار ولتاژ و فرکانس تغذیه و تعداد جفت قطب های ماشین را به منظور بدست آوردن حداکثر بازده تعیین کرد. همچنین رابطه ای تحلیلی برای تعیین ولتاژ و فرکانس تغذیه و تعداد جفت قطب های ماشین در ابتدای فرآیند طراحی ارائه شد. لازم به ذکر است که این نمودارها و روابط برای ماشین های توان پایین و با ولتاژ تغذیه کم قابل استفاده است.

در این رساله از روش شیفت دادن برای حداقل کردن THD ولتاژ القایی و رپیل گشتاور استفاده شده است. برای این منظور با توجه به ساختار خاص ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار از دو روش

شیفت دادن متفاوت استفاده شده است. در روش اول آهنرباهای روتور نسبت به یکدیگر شیفت داده شده‌اند. در این روش رابطه‌ای تحلیلی برای محاسبه ولتاژ القایی ماشین با آهنرباهای شیفت یافته ارائه شد. صحت روابط به کمک شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود مورد بررسی قرار گرفت. اختلاف بین ولتاژ القایی بدست آمده از رابطه تحلیلی و شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود حدود ۳٪ می‌باشد. همچنین الگوریتم و رابطه‌ای تحلیلی نیز برای حداقل کردن ریپل گشتاور ماشین به کمک روش شیفت دادن آهنرباهای دائم ارائه گردید. به کمک الگوریتم و رابطه پیشنهادی مقدار بهینه زاویه شیفت برابر با ۱۲ درجه بدست آمد. صحت روش پیشنهادی به کمک نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری در محیط آزمایشگاه مورد تأیید واقع شد. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی نشان داد که در صورت شیفت دادن آهنرباهای روتور به اندازه ۱۲ درجه مقدار ریپل گشتاور ماشین از ۸/۵٪ به ۲٪ کاهش پیدا می‌کند. همچنین ولتاژ القایی ماشین با آهنرباهای شیفت یافته به اندازه ۱۲ درجه از شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود و با اندازه‌گیری در محیط آزمایشگاه بدست آمد. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مقدار THD ولتاژ القایی ماشین از ۱۱/۵٪ به ۵/۸٪ کاهش می‌یابد. ولتاژ القایی ماشین با آهنرباهای شیفت یافته به اندازه ۱۲ درجه بدست آمده از شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود و با اندازه‌گیری در محیط آزمایشگاه از نظر دامنه و شکل ظاهری کاملاً با یکدیگر مطابقت دارند. اختلاف بین نتایج بدست آمده از دو روش حدود ۴/۵٪ است.

در روش دوم از شیفت دادن دیسک‌های روتور نسبت به یکدیگر استفاده شد. در این روش نیز روابط تحلیلی برای محاسبه ولتاژ القایی ماشین و مقدار بهینه زاویه شیفت ارائه شد. سپس دقت روابط ارائه شده به کمک نتایج شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود و نتایج ساخت تأیید شد. در این روش مقدار بهینه زاویه شیفت دیسک روتور برابر با ۱۲ درجه بدست آمد. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری در محیط آزمایشگاه نشان می‌دهد که به کمک شیفت دادن دیسک‌های روتور به اندازه ۱۲ درجه مقدار THD ولتاژ القایی از ۱۱/۵٪ به ۵٪ کاهش پیدا می‌کند.

با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که روش شیفت دادن در بهبود ولتاژ القایی و ریپل

گشتاور ماشین آهنربای دائم شار محوری بدون شیار موثر می‌باشد.

۶-۲ پیشنهادات

برخی از مطالعات تکمیلی که می‌توان در راستای موضوع رساله انجام داد عبارتند از:

- استفاده از معادلات ماکسول در الگوریتم طراحی به جای استفاده از روش اجزاء محدود برای تأیید

صحت طراحی انجام شده و استخراج برخی مشخصات عملکردی ماشین

- استفاده از مدار معادل مغناطیسی در الگوریتم طراحی به منظور استخراج مشخصات دینامیکی گذرائی

ماشین

- مطالعه تأثیر درایو بر روی مشخصه‌های عملکردی ماشین و تعیین روشی برای انتخاب بهینه سیستم

تغذیه ماشین

- بررسی تأثیر شیفت دادن سیم‌پیچی‌های استاتور بر روی مشخصات عملکردی آن

- [1] Bellara A., Amara Y., Barakat G. and Reghem P., (2010) “Analytical Modeling of the Magnetic Field in Axial Flux Permanent Magnet Machines with Semi-Closed Slots at No Load”, ICEM, P 1-6, Rome, Italy
- [2] Marignetti F., Tomassi G., Cancelliere P., Delli Colli V., Di Stefano R. and Scarano M., (2006) “Electromagnetic and Mechanical design of a Fractional-slot-windings Axial-flux PM synchronous machine with Soft Magnetic Compound Stator”, Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting, P 62-69, Tampa, FL, USA
- [3] Parviainen A., Pyrhönen J. and Niemelä M., (2001) “Axial Flux Interior Permanent Magnet Synchronous Motor with Sinusoidally Shaped Magnets”, ISEF, P 1-6, Cracow, Poland
- [4] Gieras J. F., Wang R. and J. Kamper M. (2008), “**Axial flux permanent magnet brushless machines**”, 2nd ed, Springer: New York.
- [5] **Sahin F., (2001), PhD. thesis, “Design and Development of a High-Speed Axial-Flux Permanent-Magnet Machine”, Technische Universiteit Eindhoven.**
- [6] Krishnan R. and Lee Sh. (1997) “PM Brushless DC Motor Drive with A New Power-converter Topology” **IEEE T IND APPL.**, **33, 4**, pp **973-982**.
- [7] Aydin M., Huang S. and Lipo T. A., (2004) “Axial Flux Permanent Magnet Disc Machines: A Review”, SPEEDAM, P 61-71, Capri, Italy
- [8] Huang S., Aydin M. and Lipo T. A., (2000) “Comparison of (Non-Slotted and Slotted) Surface Mounted PM Motors and Axial Flux Motors for Submarine ship Drives”, Third Nav. Symp. Electr. Mach., P 1-10, Philadelphia
- [9] Chan C.C. (1987) “Axial-field electrical machines-design and applications” **IEEE T ENERGY CONVER., EC-2, 2**, pp **294-300**.
- [10] Aydin M., Huang S. and Lipo T. A., (2001) “Design and 3D electromagnetic field analysis of non-slotted and slotted TORUS type axial flux surface mounted permanent magnet disc machines”, IEMDC, P 645-651, Cambridge, MA, USA, USA
- [11] Aydin M., Huang S. and Lipo T. A., (2001) “Optimum design and 3D finite element analysis of non-slotted and slotted internal rotor type axial flux PM disc machines”,

Power Engineering Society Summer Meeting, P 1409-1416, Vancouver, BC, Canada, Canada

[12] Huang S., Aydin M. and Lipo T. A., (2001) “Low noise and smooth torque permanent magnet propulsion motors: comparison of nonslotted and slotted radial and axial flux topologies”, International Aegean conference on electrical machines and power electronics, P 1-8

[13] Bendib M., Belhouchat K. and Hachemi M., (2015) “3D finite element analyses and design optimization of AFPM for flywheel energy storage system”, CEIT, P 1–6, Tlemcen, Algeria

[14] Campbell P., Rosenberg D. J. and Stanton D. P. (1981) “The computer design and optimization of axial-field permanent magnet motors” **IEEE T POWER AP SYST., PAS–100, 4**, pp **1490–1497**.

[15] Huang S., Luo J., Leonardi F. and Lipo T.A., (1996) “A general approach to sizing and power density equations for comparison of electrical machines”, IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting, P 836–842, San Diego, CA, USA, USA

[16] Huang S., Luo J., Leonardi F. and Lipo T.A. (1998) “A general approach to sizing and power density equations for comparison of electrical machines” **IEEE T IND APPL., 34, 1**, pp **92–97**.

[17] Huang S., Luo J., Leonardi F. and Lipo T.A. (1999) “A comparison of power density for axial flux machines based on general purpose sizing equations” **IEEE T ENERGY CONVER., 14, 2**, pp **185–192**.

[18] Jin J., Charpentier J. F. and Tang T. (2014) “Preliminary design of A Torus type axial flux generator for direct-driven tidal current turbine”, ICGE, P 20-25, Sfax, Tunisia

[19] Mahmoudi A., Rahim N. A. and Ping H. W. (2012) “Axial-flux permanent-magnet motor design for electric vehicle direct drive using sizing equation and finite element analysis” **PROG ELECTROMAGN RES., 122**, pp **467–496**.

[20] Nguyen T. D., Tseng K. J., Zhang Sh. and Nguyen H. Th. (2011) “A novel axial flux permanent-magnet machine for flywheel energy storage system: Design and analysis” **IEEE T IND ELECTRON., 58, 9**, pp **3784–3794**.

[21] Campbell P. (1974) “Principles of a permanent magnet axial-field D.C. machine” **P I ELECTR ENG., 121, 12**, pp **1489–1494**.

- [22] Campbell P., (1979) “Axial-field permanent magnet traction motors: Optimization of efficiency and power density”, 14th. Inter soc. Energy Conv. Engineering Conf, P 1-11, Boston
- [23] Di Gerlando A., Foglia G. M., Perini R. and Ubaldini M. (2007) “Permanent magnet synchronous machines with concentrated coil armature windings: Analysis and test validation of single stator–double rotor, axial flux machines” **ELECTR ENG**, **90**, **1**, pp **65–77**.
- [24] Aydin M., Zhu Z. Q., Lipo T. A., Howe D. (2007) “Minimization of cogging torque in axial-flux permanent-magnet machines: Design concepts” **IEEE T MAGN.**, **43**, **9**, pp **3614–3622**.
- [25] Hwang C., Li P., Chuang F. C., Liu C. and Huang K. (2009) “Optimization for reduction of torque ripple in an axial flux permanent magnet machine” **IEEE T MAGN.**, **45**, **3**, pp **1760–1763**.
- [26] Lee J., Koo D., Moon S. and Han C. (2012) “Design of an axial flux permanent magnet generator for a portable hand crank generating system” **IEEE T MAGN.**, **48**, **11**, pp **2977–2980**.
- [27] Wang R. J., Brönn L., Gerber S. and Tlali P. (2015) “An axial flux magnetically geared permanent magnet wind generator” **IEEJ T ELECTR ELECTR.**, **10**, **s1**, pp **S123–S132**.
- [28] Zhao S., Liang J. and Zhao Y. (2014) “Optimization design and direct torque control of a flux concentrating axial flux permanent magnet motor optimization design and direct torque control of a flux concentrating axial flux permanent” **ELECTR POW COMPO SYS.**, **42**, **14**, pp **1517–1529**.
- [29] Yang Y., Luh Y. and Cheung C. (2004) “Design and control of axial-flux brushless DC wheel motors for electric vehicles—Part I: Multiobjective optimal design and analysis” **IEEE T MAGN.**, **40**, **4**, pp **1873–1882**.
- [30] Yang Y., Wang J., Wu S. and Luh Y. (2004) “Design and control of axial-flux brushless DC wheel motors for electric vehicles—Part II: Optimal current waveforms and performance test” **IEEE T MAGN.**, **40**, **4**, pp **1883–1891**.
- [31] Wang R., Kamper M.J., Westhuizen K. and Gieras J.F. (2005) “Optimal design of a coreless stator axial flux permanent-magnet generator” **IEEE T MAGN.**, **41**, **1**, pp **55–64**.

- [32] Zhang Z., Nilssen R., Muyeen S. M., Nysveen A. and Al-Durra A. (2016) "Design optimization of ironless multi-stage axial-flux permanent magnet generators for offshore wind turbines" **ENG OPTIMIZ.**, **49**, 5, pp 815-827.
- [33] Gholamian S. As., Ardebili M., Abbaszadeh K. and Gholamian S. Ak. (2011) "Optimum design of slotted axial flux internal stator motor using genetic algorithm for electric vehicle" **IJSEA**, **2**, 3, pp 79-93.
- [34] Kahourzade S., Mahmoudi A., Gandomkar A., Rahim N. A., Ping H. W. and Uddin M. N. (2013) "Design optimization and analysis of AFPM synchronous machine incorporating power density, thermal analysis, and back-EMF THD" **PROG ELECTROMAGN RES.**, **136**, pp 327-367.
- [35] Mahmoudi A., Kahourzade S., Abd Rahim N. and Ping H. W. (2013) "Design, analysis, and prototyping of an axial-flux permanent magnet motor based on genetic algorithm and finite-element analysis" **IEEE T MAGN.**, **49**, 4, pp 1479-1492.
- [36] Mahmoudi A., Kahourzade S., Abd Rahim N., Ping H. W. and Nasir Uddin M. (2013) "Design and prototyping of an optimised axial-flux permanent-magnet synchronous machine" **IET ELECTR POWER APP.**, **7**, 5, pp 338-349.
- [37] Rostami N., Feyzi M. R., Pyrhonen J., Parviainen A. and Behjat V. (2012) "Genetic algorithm approach for improved design of a variable speed axial-flux permanent-magnet synchronous generator" **IEEE T MAGN.**, **48**, 12, pp 4860-4865.
- [38] Taran N. and Ardebili M., (2014) "A novel approach for efficiency and power density optimization of an axial flux permanent magnet generator through genetic algorithm and finite element analysis", ISIE, P 709-714, Istanbul, Turkey
- [39] Yousefi B., Noori Shirazi A., Soleymani S. and Gholamian S. As. (2012) "Genetic algorithm application for optimum design of three phases disk type PM motor" **IJCSA**, **2**, 6, pp 1-7.
- [40] Lok C. L., Vengadaesvaran B. and Ramesh, S. (2016) "Implementation of hybrid pattern search-genetic algorithm into optimizing axial flux permanent magnet coreless generator (AFPMG)" **ELECTR ENG.**, **99**, 2, pp 751-761.
- [41] Virtic P., Pisek P., Marcic T., Hadziselimovic M. and Stumberger B. (2008) "Analytical analysis of magnetic field and back electromotive force calculation of an axial-flux permanent magnet synchronous generator with coreless stator" **IEEE T MAGN.**, **44**, 11, pp 4333-4336.

- [42] Virtic P., Pisek P., Marcic T., Hadziselimovic M. and Stumberger B. (2009) "Torque analysis of an axial flux permanent magnet synchronous machine by using analytical magnetic field calculation" **IEEE T MAGN.**, **45**, **3**, pp **1036–1039**.
- [43] Virtic P., Vrazic M. and Papa G. (2015) "Design of an axial flux permanent magnet synchronous machine using analytical method and evolutionary optimization" **IEEE T ENERGY CONVER.**, **31**, **1**, pp **1–9**.
- [44] Choi J. Y., Lee S. H., Ko K. J. and Jang S. M. (2011) "Improved analytical model for electromagnetic analysis of axial flux machines with double sided permanent magnet rotor and coreless stator windings" **IEEE T MAGN.**, **47**, **10**, pp **2760-2763**.
- [45] Daghigh A., Javadi H. and Javadi A. (2017) "Improved Analytical Modeling of Permanent Magnet Leakage Flux in Design of the Coreless Axial Flux Permanent Magnet Generator" **CAN J ELECT COMPUT E.**, **40**, **1**, pp **3-11**.
- [46] Yunkai H., Tao Zh., Jianning D., Heyun L., Yang H. and Cheng M. (2014) "Magnetic Equivalent Circuit Modeling of Yokeless Axial Flux Permanent Magnet Machine with Segmented Armature" **IEEE T MAGN.**, **50**, **11**, pp **1-4**.
- [47] Hlioui S., Nedjar B., Vido L., Amara Y. and Gabsi M., (2014) "2D-3D Magnetic equivalent circuit of the flux focusing permanent magnets synchronous machine", CISTEM, P 1-7, Tunis, Tunisia
- [48] Qu R. and Lipo T.A., (2002) "Analysis and Modeling of Airgap & Zigzag Leakage Fluxes in a Surface-Mounted-PM Machine", IEEE Industry Applications Conference 37th IAS Annual Meeting, P 2507-2513, Pittsburgh, PA, USA, USA
- [49] Wu W., Spooner E. and Chalmers B.J. (1995) "Design of slotless torus generators with reduced voltage regulation" **IEE P-ELECT POW APPL.**, **142**, **5**, pp **337-343**.
- [50] Daghigh A., Javadi H. and Torkaman H. (2016) "Design Optimization of Direct-Coupled Ironless Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Wind Generator with Low Cost and High Annual Energy Yield" **IEEE T MAGN.**, **52**, **9**, pp **1-10**.
- [51] Aydin M., Gulec M., Demir Y., Akyuz B. and Yolacan E., (2016) "Design and Validation of a 24-Pole Coreless Axial Flux Permanent Magnet Motor for A Solar Powered Vehicle", ICEM, P 1493-1498, Lausanne, Switzerland
- [52] Hemeida A. and Sergeant P. (2014) "Analytical Modeling of Surface PMSM Using a Combined Solution of Maxwell's Equations and Magnetic Equivalent Circuit (MEC)" **IEEE T MAGN.**, **50**, **12**, pp **1-13**.

- [53] Maloberti O., Figueredo R., Marchand C., Choua Y., Condamin D., Kobylanski L. and Bomme E. (2014) "3D-2D Dynamic Magnetic Modeling of an Axial Flux PM Motor with Soft Magnetic Composites for Hybrid Electric Vehicles" **IEEE T MAGN.**, **50**, **6**, pp **1-10**.
- [54] Yeo H.K., Lim D.K., Woo D.K., Ro J.S. and Jung H.K. (2015) "Magnetic Equivalent Circuit Model Considering Overhang Structure of a Surface-Mounted Permanent-Magnet Motor" **IEEE T MAGN.**, **51**, **3**, pp **1-4**.
- [55] Liu G., Du X., Zhao W. and Chen Q. (2017) "Reduction of torque ripple in inset permanent magnet synchronous motor by magnets shifting" **IEEE T MAGN.**, **53**, **2**, pp **1259-1265**.
- [56] Dosiek L. and Pillay P. (2007) "Cogging torque reduction in permanent magnet machines" **IEEE T IND APPL.**, **43**, **6**, pp **1565-1571**.
- [57] Bianchi N., Bolognani S. and Cappello A., (2004) "Back EMF improvement and force ripple reduction in PM linear motor drives", 35th Power Electronics Specialists Conference, P 3372-3377, Aachen, Germany
- [58] Ose-Zala B. and Pugachov V. (2017) "Methods to reduce cogging torque of permanent magnet synchronous generator used in wind power plants" **Elektron Elektrotech.**, **23**, **1**, pp **43-48**.
- [59] Ishikawa T. and Slemon GR. (1993) "A method of reducing ripple torque in permanent magnet motors without skewing" **IEEE T MAGN.**, **29**, **2**, pp **2028-2031**.
- [60] Gulec M. and Aydin M., (2012) "Influence of Magnet Grouping in Reduction of Cogging Torque for a Slotted Double-Rotor Axial-Flux PM Motors", SPEEDAM, P 812-817, Sorrento, Italy
- [61] Cetin E, and Daldaban F. (2018) "Analyzing the profile effects of the various magnet shapes in axial flux PM motors by means of 3D-FEA" **ELECTRONICS.**, **7**, **2**, pp **13**.
- [62] Laksar J. and Veg L., (2018) "Influence of the machine winding and PM configuration on the back-EMF waveform of PMSM", ICEM, P 2483-2489, Alexandroupoli, Greece
- [63] Kim H.M., Kim Y. J. and Jung S. Y., (2017) "Torque ripple and back EMF harmonic reduction of IPMSM with asymmetrical stator design", ICEMS, P 1-4, Sydney, NSW, Australia
- [64] Lian G., Li H., Ban F. and Chen B., (2018) "Optimization design of cogging torque and back EMF waveform for PMSM", ASEMD, P 1-2, Tianjin, China

- [65] Hua W., Zhu X. and Wu Z. (2018) "Influence of coil pitch and stator-slot/rotor-pole combination on back EMF harmonics in flux-reversal permanent magnet machines" **IEEE T ENERGY CONVER.**, **33**, **3**, pp 1330–1341.
- [66] Hu Y., Zhu S., Liu C. and Wang K. (2018) "Electromagnetic performance analysis of interior PM machines for electric vehicle applications" **IEEE T ENERGY CONVER.**, **33**, **1**, pp 199–208.
- [67] Zhu X. and Hua W., (2016) "Back-EMF waveform optimization of flux-switching permanent magnet machines", ICEM, P 2419-2425, Lausanne, Switzerland
- [68] Zon B. and Wegiel T., (2018) "Analysis of cogging torque reduction method effectiveness on the example of a surface mounted permanent magnet synchronous motor model", SME, P 7-12, Andrychów, Poland
- [69] Capponi F.G., Terrigi R., Caricchi F. and Del Ferraro L. (2009) "Active output voltage regulation for an ironless axial-flux PM automotive alternator with electromechanical flux weakening" **IEEE T IND APPL.**, **45**, **5**, pp 1785–1793.
- [70] Zhao B. K. W. and Lipo TH., (2013) "Design and analysis of a novel dual stator axial flux spoke-type ferrite permanent magnet machine", IECON 2013, P 2714-2719, Vienna, Austria
- [71] Caricchi F., GiuliiCapponi F.G., Crescimbin F. and Solero L. (2004) "Experimental study on reducing cogging torque and no-load power loss in axial-flux permanent magnet machines with slotted winding" **IEEE T IND APPL.**, **40**, **4**, pp 1066–1075.
- [72] Cullity B. D. and Graham C. D. (2009), "Introduction to Magnetic Materials", 2nd ed, John Wiley & Sons, New York.
- [73] بقایبی پور م، (۱۳۹۶)، رساله دکتری: "مدلسازی ارتعاشات و نویز صوتی و طراحی بهینه موتور مغناطیس دائم شار محوری"، دانشکده مهندسی برق و رباتیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [74] Stanislav S., Extra B., Via R.S., Castano P. (2007) "Advances in Approximations of Ellipse Perimeters and of the Complete Elliptic Integral" **Stan's Library**, **2**, pp 1.
- [75] Parker R.J. (1994), "Advances in Permanent Magnetism", John Wiley and Sons, New York.
- [76] Baghayipour M., Darabi A. and Dastfan A. (2018) "An analytical model of harmonic content no-load magnetic fields and Back EMF in axial flux PM machines regarding the iron saturation and winding distribution" **COMPEL.**, **37**, **1**, pp 54-76.

[77] Zhu Z. Q., (1991), PhD. thesis, “The Electromagnetic Performance of Brushless Permanent Magnet DC Motors-with Particular Reference to Noise and Vibration”, University of Sheffield.

Abstract

In the process of electrical machines design, the number of unknown parameters is more than available equations. Therefore, the value of some parameters must be determined by the designer. These parameters are called optional parameters of the machine design. The number of optional parameters in each machine design problem is different. In the design process of conventional machines, the value of feeding voltage and frequency is determined according to the available network. However, the permanent magnet machines are fed by the drive system. Therefore, in the design process of these types of machines, the frequency and voltage are also optional parameters. The unknown values of optional parameters at the beginning of the design process can lead to confuse machine designers. The way of choosing optional parameters has a significant effect on the performance characteristics of the machine. On the other hand, in machine design problems, achieving maximum efficiency, maximum power density, minimum Back EMF harmonics, minimum torque ripple, etc. are usually the design objectives. Therefore, in this thesis, based on analytical methods, a comprehensive design algorithm for the optimal design of a nonslotted axial flux permanent magnet (AFPM) machine is suggested. In addition, some methods for selecting the optimum values of feeding voltage and frequency, reducing the harmonics of Back EMF and the torque ripple of the machine are presented. Based on the proposed design algorithm, a sample machine with power of 3.7 kW and speed of 1400 rpm is designed and constructed. With the help of Finite Element (FE) simulation and experimental results the accuracy of the design algorithm and the effectiveness of the proposed methods for optimal selection of feeding voltage and frequency, reduction of Back EMF harmonics and torque ripple of machine are confirmed.

Keywords: nonslotted axial flux permanent magnet machine, optional parameters, design algorithm, sinusoidal Back EMF, reducing torque ripple



Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical and Robotics Engineering

Ph.D. Thesis in Power Electronic and Machine Engineering

**Determination of optional parameters and optimal design of
multilayer axial flux permanent magnet motor**

By: Reza Mirzahosseini

Supervisor:

Dr. Ahmad Darabi

Advisor:

Dr. Mohsen Assili

October 2020