

تدوین دانش فنی طراحی و ساخت یک نمونه موتور رلوکتانسی و درایو برای کاربرد در خودرو برقی دو چرخ



مدیر پروژه: رضا نصیری زرنندی

مجری: ایمان صادقی محلی

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تدوین دانش فنی طراحی و ساخت یک نمونه موتور رلوکتانسی و درایو
برای کاربرد در خودرو برقی دو چرخ

مدیر پروژه: رضا نصیری زرنندی

مجری: ایمان صادقی محلی

کد گزارش: NRI-ER-922-PEMPN19-00-L

DOI: 10.30503/nripress.2020.352

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. گروه پژوهشی ماشین‌های الکتریکی دوار
تدوین دانش فنی طراحی و ساخت یک نمونه موتور رلواکتانسی و درایو برای کاربرد در خودرو
برقی دو چرخ/ مدیر پروژه: رضا نصیری زرنندی. کارفرما: پژوهشگاه نیرو، ۱۴۰۱.

۱۷۷ ص: مصور، نمودار، جدول

۱. صادقی محلی، ایمان، مجری.



انتشارات پژوهشگاه نیرو

گروه پژوهشی ماشین‌های الکتریکی دوار

کلیه حقوق قانونی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

نشانی: تهران، شهرک غرب، انتهای بلوار شهید دادمان، پژوهشگاه نیرو، کد پستی: ۱۴۶۸۶۱۳۱۱۳

تلفن: ۸۸۰۷۹۴۰۱-۹

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه: www.nri.ac.ir

پست الکترونیک انتشارات: publications@nri.ac.ir

فرم تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب رضا نصیری زرنندی متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این گزارش حاصل کار پژوهشی اینجانب و همکاران به شرح زیر است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است. کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

همکاران :

۱. علی جمالی فرد

۲. احمد رضا کرمی شهنانی

به نام خدا

پژوهشگاه نیرو

نام گزارش: تدوین دانش فنی طراحی و ساخت یک نمونه موتور رلوکتانسی و
درایو برای کاربرد در خودرو برقی دو چرخ

کد گزارش - ویرایش: PEMPN19

عنوان پروژه: کاربرد ماشینهای الکتریکی در سیستمهای حمل و نقل
الکتریکی

مدیر پروژه: رضا نصیری زرنندی

مجری پروژه: ایمان صادقی محلی

کارفرما: پژوهشگاه نیرو

تهیه کننده: گروه پژوهشی ماشینهای الکتریکی

پیشگفتار

اولین تلاش ها برای ساخت دوچرخه برقی به اوایل قرن بیستم بر می گردد اما بدلیل نبود باتری مناسب پیشرفت چندانی حاصل نشد. با توسعه باتری ها و پیدایش باتری های سبک با چگالی انرژی مبحث تولید دوچرخه برقی دوباره مورد توجه قرار گرفت. امروزه انواع مختلفی از دوچرخه های برقی موجود است که مقادیر نامی توان و سرعت آن ها در کشورهای مختلف متفاوت است.

علاوه بر مشخصات طراحی مانند حداکثر سرعت، حداکثر وزن متحرک، حداکثر شیب مسیر، سیستم چرخ دنده و تغییر سرعت، و مشخصات چرخه رانندگی، دو عامل دیگر نیز بر ساختار موتور الکتریکی دوچرخه الکتریکی تاثیر گذارند که اولین عامل، نحوه استفاده از توان حاصل از موتور الکتریکی در دوچرخه و عامل دیگر محل قرار گرفتن موتور است. از نظر نحوه کاربرد توان الکتریکی، دوچرخه را می توان به دو دسته تقسیم نمود. در دسته اول، همراه با پدال زدن دوچرخه سوار، موتور الکتریکی به حرکت در می آید و نقش کمک کننده برای دوچرخه سوار را به عهده می گیرد. در این دوچرخه ها که با نام Pedelec شناخته می شوند، با شروع پدال زنی موتور شروع به کار می کند و با قطع آن، موتور نیز خاموش می گردد. نکته مهم دیگر در مورد این دوچرخه ها این است که با نزدیک شدن دوچرخه به حداکثر سرعت (که بسته به استاندارد و کشور مورد استفاده بین ۲۰ تا ۳۲ کیلومتر بر ساعت است)، توان تولیدی موتور الکتریکی کاهش می یابد، به طوری که در سرعت های بالاتر از این مقدار، موتور خاموش می شود. در این دوچرخه ها می توان به منظور ساده سازی روند طراحی، ضریبی را به عنوان ضریب کمک کندگی دوچرخه سوار در نظر گرفت که این ضریب بصورت نسبت بین قدرت دوچرخه سوار به قدرت موتور تعریف می گردد. در دسته دیگر دوچرخه های الکتریکی، مکانیزم کنترل توان بسیار ساده تر می باشد و با استفاده از پیچ تنظیم توان، توان الکتریکی دوچرخه همانند موتور سیکلت کنترل می شود. در این نوع دوچرخه، دوچرخه سوار می تواند بدون پدال زدن از توان الکتریکی استفاده نماید.

به منظور انتخاب و طراحی موتور دوچرخه الکتریکی ابتدا باید به مهمترین مشخصه هایی که از این موتورها انتظار می رود توجه نمود. این مشخصه ها در ادامه بررسی شده است.

- **کاهش قیمت:** با توجه به اینکه هزینه موتور، بخش قابل توجهی از هزینه دوچرخه برقی را شامل می شود و با در نظر گرفتن رقابت تنگاتنگی که بین تولید کنندگان این محصولات وجود دارد، کاهش هزینه یکی از اصلی ترین معیارهای طراحی موتور دوچرخه الکتریکی می باشد.
- **وزن و حجم موتور:** در دوچرخه الکتریکی، وزن و حجم موتور از چند منظر حائز اهمیت می باشد. اول اینکه در بسیاری از کشورها محدودیت وزن برای دوچرخه وجود دارد و باید آن را رعایت نمود. علاوه

بر این، استحکام مکانیکی دوچرخه و محدودیت فضای آن بویژه در موتورهای هاب درایو، و همچنین نیاز به نیرو و در نتیجه توان بالاتر برای به حرکت در آوردن دوچرخه ای سنگین تر، همگی به اهمیت کاهش وزن و حجم موتور اشاره دارند.

• **کاهش ریپل گشتاور:** به دلیل وزن کم و کم بودن اینرسی، ریپل گشتاور موتور در دوچرخه الکتریکی توسط سرنشینان احساس می شود و باید حتی الامکان آن را کاهش داد.

برای برآورده کردن الزامات دوچرخه الکتریکی ۵۰۰ وات در ۲۱۰ دور در دقیقه، یک PMSynRM با PM های خاکی کمیاب N35 و سه مانع شار در هر قطب به عنوان ساختار پایه انتخاب شده است. برای جستجوی بهترین تعداد موانع شار از جمله PMS، تجزیه و تحلیل گشتاور خروجی توسط آنالیز FEA انجام شده و نتایج گزارش شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، طراحی مانع سه شار با شکافهایی که به طور کامل توسط PMS در امتداد محور q اشغال شده اند، می تواند الزامات میانگین گشتاور و موج گشتاور را از طریق PM های تجاری N35 خاکی کمیاب برآورده کند. بنابراین، به عنوان ساختار پایه، یک روتور بیرونی PMSynRM با یک استاتور اریب و یک روتور با سه مانع شار پر شده توسط PMS به عنوان یک انتخاب مناسب برای طراحی انتخاب می شود.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل ۱ مقدمه ای بر انواع موتور های الکتریکی قابل استفاده در خودرو برقی دو چرخ و انتخاب موتور مناسب	۱
۱-۱ دوچرخه برقی	۲
۱-۱-۱ تاریخچه	۲
۱-۱-۲ توان موتور الکتریکی	۲
۱-۱-۳ محدودیت ها	۳
۱-۲ محل قرار گیری	۴
۱-۲-۱ ویژگی های مورد انتظار	۵
۱-۲-۲ نمونه های صنعتی خارجی و داخلی	۶
۱-۳ موتورهای سنکرون رلوکتانسی	۷
۱-۴ موتورهای سنکرون رلوکتانسی تقویت شده با آهنربا	۸
۱-۵ موتورهای سنکرون مغناطیس دائم	۸
۱-۶ مقایسه موتورهای مغناطیس دائم و سنکرون رلوکتانسی	۹
۱-۷ انتخاب موتور الکتریکی به منظور کاربرد در دوچرخه الکتریکی	۱۱
۱-۷-۱ موتورهای ساخته شده توسط کارخانه گلدن موتور	۱۱
۱-۷-۲ طراحی و آنالیز حساسیت موتور دوچرخه الکتریکی	۱۳
۱-۷-۲-۱ آنالیز حساسیت و طراحی گام به گام روتور	۱۴
۱-۷-۲-۲ موتور سنکرون رلوکتانس با یک فاصله هوایی	۱۴
۱-۷-۲-۳ موتور سنکرون رلوکتانس فربتی	۱۸
۱-۷-۲-۴ موتور سنکرون رلوکتانس با آهنربای ترکیبی	۲۰
۱-۷-۲-۵ بررسی تاثیر شکل سدهای هوایی بر عملکرد موتور	۲۲
۱-۷-۲-۶ بررسی تاثیر ساختار دارای دو سد هوایی	۲۳
۱-۷-۳ بررسی استفاده از موتورهای رلوکتانسی در دوچرخه برقی	۳۷
۱-۷-۳-۱ انواع موتورهای رلوکتانسی	۳۷
۱-۷-۳-۲ توپولوژی های شار شعاعی	۳۸
۱-۷-۳-۳ انواع سیم پیچی های موتورهای سنکرون رلوکتانسی	۳۸
۱-۷-۴ ساختار پیشنهادی از نوع رلوکتانسی	۴۰
۱-۷-۴-۱ توپولوژی موتور	۴۰
۱-۷-۴-۲ ملاحظات طراحی استاتور	۴۰

۴۱.....	۱-۷-۴-۳ ملاحظات طراحی روتور.....
۴۳.....	۱-۷-۴-۴ انتخاب تعداد موانع شار حاوی مگنت.....
۴۳.....	۱-۷-۴-۵ بهینه سازی روتور.....
۴۶.....	۱-۷-۵ موتور های سنکرون رلوکتانسی.....
۴۷.....	۱-۷-۵-۱ انواع ساختار رتور موتورهای سنکرون رلوکتانسی.....
۴۸.....	۱-۷-۵-۲ گشتاور در SYRM.....
۴۸.....	۱-۷-۵-۳ نتیجه گیری.....
۴۹....	فصل ۲ انواع روش های مدل سازی موتور های رلوکتانس و مدلسازی و تحلیل موتور رلوکتانس به روش MEC.....
۵۰.....	۲-۱ مقدمه.....
۵۰.....	۲-۲ روش FRM.....
۵۰.....	۲-۲-۱ معرفی روش FRM.....
۵۳.....	۲-۲-۲ محاسبه تلفات.....
۵۳.....	۲-۲-۳ محاسبه گشتاور ماشین.....
۵۴.....	۲-۲-۴ امکانات محاسباتی روش FRM.....
۵۴.....	۲-۳ ایرادات روش FRM.....
۵۴.....	۲-۴ مدلسازی موتور سنکرون رلوکتانسی به کمک روش مدار معادل مغناطیسی (MEC).....
۵۵.....	۲-۴-۱ پرمانس های شبکه.....
۵۵.....	۲-۴-۱-۱ پرمانس های ثابت.....
۵۵.....	۲-۴-۱-۲ پرمانس های غیر خطی پارامتریک.....
۵۹.....	۲-۴-۲ شبیه سازی موتور سنکرون رلوکتانسی به روش MEC.....
۵۹.....	۲-۴-۲-۱ طرح ۱.....
۶۴.....	۲-۴-۲-۲ طرح ۲.....
۶۹.....	۲-۵ نتیجه گیری.....
۷۰.....	فصل ۳ طراحی و شبیه سازی یک نمونه موتور رلوکتانسی جهت استفاده در دوچرخه برقی.....
۷۱.....	۳-۱ مقدمه.....
۷۱.....	۳-۲ گشتاور استاتیکی.....
۷۳.....	۳-۲-۱ جداسازی گشتاور رلوکتانسی از گشتاور ناشی از آهنرباها.....
۷۳.....	۳-۳ حلقه تبدیل انرژی.....
۷۴.....	۳-۴ نقشه گشتاور.....
۷۵.....	۳-۵ منحنی گشتاور سرعت.....
۷۵.....	۳-۶ نقشه بازدهی.....
۷۶.....	۳-۷ توسعه نرم افزار.....
۷۶.....	۳-۷-۱ روند طراحی.....

۳-۷-۱-۱	تنظیم مقادیر نامی موتور.....	۷۶
۳-۷-۱-۲	انتخاب متغیرهای گسسته.....	۷۷
۳-۷-۱-۳	تنظیم نوع ورق.....	۷۹
۳-۷-۱-۴	جستجوی مینیمم ماکزیمم.....	۷۹
۳-۷-۱-۵	تحلیل المان محدود.....	۸۱
۳-۷-۱-۶	صحه سنجی نهایی نتایج با نرم افزار Maxwell.....	۸۲
۳-۸	شبیه سازی و نتایج.....	۸۳
۳-۸-۱	مقادیر نامی موتور هدف.....	۸۳
۳-۸-۲	مواد، هندسه و مش بندی.....	۸۳
۳-۸-۳	گشتاور استاتیکی.....	۸۵
۳-۸-۴	حلقه تبدیل انرژی.....	۸۷
۳-۸-۵	نقشه گشتاور.....	۸۸
۳-۸-۶	شبیه سازی حالت دائم.....	۹۰
۳-۸-۷	نتیجه گیری و پیشنهاد برای طرح نهایی.....	۹۳
۴	فصل ۴ انتخاب طرح نهایی، مقایسه بین طرح ها، تحلیل و شبیه سازی.....	۹۷
۴-۱	مقدمه.....	۹۸
۴-۲	طرح های در نظر گرفته شده.....	۹۸
۴-۳	طرح دو مانع شار.....	۹۸
۴-۳-۱	گشتاور استاتیکی.....	۹۹
۴-۳-۲	شبیه سازی حالت دائم.....	۹۹
۴-۴	طرح سه مانع شار.....	۱۰۰
۴-۴-۱	گشتاور استاتیکی.....	۱۰۱
۴-۴-۲	شبیه سازی حالت دائم.....	۱۰۱
۴-۵	نتایج.....	۱۰۲
۴-۶	انتخاب طرح جهت ساخت.....	۱۰۳
۴-۶-۱	مقادیر نامی موتور هدف.....	۱۰۴
۴-۶-۲	مواد مصرفی.....	۱۰۴
۵	فصل ۵ طراحی و ساخت نمونه آزمایشگاهی.....	۱۰۵
۵-۱	مقدمه.....	۱۰۶
۵-۲	نقشه گسترده.....	۱۰۶
۵-۳	طراحی و ساخت استاتور.....	۱۰۶
۵-۴	سیم پیچی استاتور.....	۱۱۲
۵-۵	طراحی و ساخت روتور.....	۱۱۳

۱۱۷.....	۵-۶ طراحی و ساخت شفت.....
۱۱۸.....	۵-۷ طراحی و ساخت درپوش.....
۱۲۰.....	۵-۸ طراحی و ساخت هولدر استاتور.....
۱۲۰.....	۵-۹ بلبرینگ ها.....
۱۲۱.....	۵-۱۰ نحوه خارج کردن ترمینال های سیم پیچی.....
۱۲۲.....	۵-۱۱ FEA ، ساخت و اعتبار سنجی تجربی برای PMASYNRM که در نهایت طراحی شده است.....
۱۲۶.....	فصل ۶ ارزیابی عملکرد و نتیجه گیری.....
۱۲۷.....	۶-۱ مقدمه.....
۱۲۷.....	۶-۲ معرفی قطعات محفظه نگهدارنده.....
۱۲۸.....	۶-۲-۱ مجموعه نگهدارنده روتور.....
۱۲۹.....	۶-۲-۲ مجموعه نگهدارنده استاتور.....
۱۲۹.....	۶-۲-۳ نگهدارنده های استاتور.....
۱۳۰.....	۶-۲-۴ درپوش.....
۱۳۰.....	۶-۲-۵ شفت.....
۱۳۱.....	۶-۳ مراحل مونتاژ.....
۱۳۱.....	۶-۳-۱ اتصال روتور و درپوش.....
۱۳۲.....	۶-۳-۲ اتصال استاتور و نگه دارنده داخلی.....
۱۳۴.....	۶-۳-۳ اتصال شفت به نگهدارنده داخلی.....
۱۳۴.....	۶-۳-۴ اتصال بلبرینگ ها به قالباق و شفت.....
۱۳۵.....	۶-۴ سیستم اندازه گیری و تست Back emf.....
۱۳۵.....	۶-۴-۱ آماده سازی مجموعه تست.....
۱۳۷.....	۶-۴-۲ Back-Emf تست نتایج.....
۱۳۶.....	۶-۴-۳ مقایسه Back-Emf در سرعت های مختلف.....
۱۴۶.....	۶-۵ مقایسه عملکرد تجربی بین BLDCM تجاری و PMASYNRM طراحی شده.....
۱۴۸.....	۶-۶ نتیجه گیری.....
۱۵۰.....	مراجع.....
۱۵۳.....	جزئیات موتور طراحی نهایی.....

فهرست اشکال

صفحه	عنوان
شکل ۱-۱: نمودار توان - سرعت دوچرخه های Pedelec	۲
شکل ۱-۲: سرعت و هزینه نمونه دوچرخه الکترونیکی موجود به ازای قدرت موتور الکتریکی.....	۴
شکل ۳-۱: موتور نصب شده در چرخ، با و بدون گیربکس	۴
شکل ۴-۱: موتور نصب شده در رکاب.....	۵
شکل ۱-۵: افزایش مقدار گشتاور ناشی از آهنربا در موتورهای مختلف	۹
شکل ۶-۱: ساختار ساده سنکرون رلوکتانس اولیه	۱۴
شکل ۷-۱: اثر هر پارامتر بر متوسط و رپل گشتاور	۱۵
شکل ۱-۸: اثر پارامترها بر عملکرد موتور سنکرون رلوکتانس با تغییر دو به دوی آنها	۱۷
شکل ۱-۹: گشتاور موتور سنکرون رلوکتانس بدون آهنربا	۱۸
شکل ۱-۱۰: شکل موتور سنکرون رلوکتانس بدون آهنربا.....	۱۸
شکل ۱-۱۱: تاثیر پارامترها بر عملکرد سنکرون رلوکتانس فریتی	۱۹
شکل ۱-۱۲: گشتاور موتور فریتی	۲۰
شکل ۱-۱۳: روش های مختلف اضافه نمودن آهنربا به نئودیمیومی	۲۰
شکل ۱-۱۴: مقایسه گشتاور موتورهای مختلف با ساختارهای فوق.....	۲۱
شکل ۱-۱۵: ساختار انتخابی برای بررسی	۲۱
شکل ۱-۱۶: مشخصات عملکردی برای حالت پایه	۲۲
شکل ۱-۱۷: شکل موج گشتاور برای حالت پایه.....	۲۲
شکل ۱-۱۸: حالت پایه با مگنت استوانه ای.....	۲۳
شکل ۱-۱۹: مقایسه گشتاور مگنت مربعی و استوانه ای.....	۲۳
شکل ۱-۲۰: ساختار دو لایه با مگنت نئودیمیومی بالا و فریتی پایین.....	۲۴
شکل ۱-۲۱: شبیه سازی ساختار دو لایه با مگنت نئودیمیومی بالا و فریتی پایین	۲۵
شکل ۱-۲۲: ساختار دو لایه با مگنت نئودیمیومی پایین و فریتی بالا	۲۵
شکل ۱-۲۳: شبیه سازی ساختار دو لایه با مگنت نئودیمیومی پایین و فریتی بالا	۲۶

- شکل ۲۴-۱: ساختار دو لایه با مگنت نئودیمیومی در کناره ها و فریتی وسط ۲۷
- شکل ۲۵-۱: شبیه سازی ساختار دو لایه با مگنت نئودیمیومی در کناره ها و فریتی وسط ۲۷
- شکل ۲۶-۱: ساختار دو لایه با مگنت فریتی در کناره ها و نئودیمیومی وسط ۲۹
- شکل ۲۷-۱: نتایج شبیه سازی ساختار دو لایه با مگنت فریتی در کناره ها و نئودیمیومی وسط ۲۸
- شکل ۲۸-۱: ساختار دو لایه با مگنت مستطیلی نئودیمیومی در کناره ها و فریتی وسط ۲۹
- شکل ۲۹-۱: نتایج شبیه سازی ساختار دو لایه با مگنت مستطیلی نئودیمیومی در کناره ها و فریتی وسط ۳۰
- شکل ۳۰-۱: تغییر شکل قطب های مجاور نسبت به یکدیگر ۳۱
- شکل ۳۱-۱: نتایج شبیه سازی تغییر شکل قطب های مجاور نسبت به یکدیگر ۳۱
- شکل ۳۲-۱: ایجاد ناچ بر استاتور ۳۲
- شکل ۳۳-۱: شبیه سازی ناچ بر استاتور ۳۳
- شکل ۳۴-۱: شکل ناچ بهینه ۳۳
- شکل ۳۵-۱: تفاوت گشتاور با ناچ (منحنی آبی رنگ) و بدون ناچ (قرمز رنگ) ۳۴
- شکل ۳۶-۱: ساختارهای مختلف انتخاب شده برای مقایسه با یکدیگر ۳۴
- شکل ۳۷-۱: طول موتورها برای رسیدن به گشتاور یکسان ۳۴
- شکل ۳۸-۱: رپیل گشتاور موتورهای شکل قبل ۳۵
- شکل ۳۹-۱: رپیل گشتاور طرح تک شیاره پس از روش slot opening shift ۳۵
- شکل ۴۰-۱: مشخصات گشتاور حالت پایدار SynRM با تعداد موانع شار متفاوت و استاتور غیر اریب یکسان ۳۶
- شکل ۴۱-۱: یک قطب از PMaSynRM های مورد بررسی با تعداد PM های مختلف و پروفیل های گشتاور مربوطه ۳۷
- شکل ۴۲-۱: انواع توپولوژی های شار شعاعی موتورهای رلکتانسی ۳۸
- شکل ۴۳-۱: هسته استاتور ۳۹
- شکل ۴۴-۱: میدان مغناطیسی تولید شده ۳۹
- شکل ۴۵-۱: توپولوژی موتور ارائه شده جهت طراحی ۴۰
- شکل ۴۶-۱: هندسه روتور پیشنهادی ۴۱
- شکل ۴۷-۱: متغیر های ابعادی روتور ۴۲
- شکل ۴۸-۱: طراحی های مختلف بر اساس تعداد آهنرباهای مورد استفاده در هر قطب ۴۰
- شکل ۴۹-۱: گشتاور خروجی برای طرح های مطالعه شده در [۵] ۴۰
- شکل ۵۰-۱: رتور SYRM ۴۷
- شکل ۵۱-۱: انواع رتور در SYRM ۴۷
- شکل ۵۲-۱: نمودار فازوری SYRM ۴۸
- شکل ۲-۱: چگالی شار نرمال DFIG به دو روش FEM و FRM ۵۲
- شکل ۲-۲: چگالی شار مماسی DFIG به دو روش FEM و FRM ۵۲

- شکل ۳-۲: تلفات هسته در DFIG به دو روش FEM و FRM ۵۳
- شکل ۴-۲: پرمئانس بین دندانه استاتور و رتور ۵۶
- شکل ۵-۲: پرمئانس بین دندانه استاتور و رتور در حالتی که اندازه هایشان برابر نباشد ۵۸
- شکل ۶-۲: طرح ۱ SYRM ۵۹
- شکل ۷-۲: شبکه پرمئانسی طرح ۱ SYRM ۶۱
- شکل ۸-۲: گشتاور طرح ۱ SYRM ۶۲
- شکل ۹-۲: توزیع میدان در طرح ۱ SYRM با شبیه سازی FEM ۶۳
- شکل ۱۰-۲: توزیع میدان در طرح ۱ SYRM با شبیه سازی MEC ۶۳
- شکل ۱۱-۲: طرح ۲ SYRM ۶۴
- شکل ۱۲-۲: گره های مغناطیسی در طرح ۲ SYRM ۶۵
- شکل ۱۳-۲: پرمئانس میان دندانه یک استاتور و دندانه های رتور ۶۷
- شکل ۱۴-۲: پرمئانس میان دندانه دو استاتور و دندانه های رتور ۶۷
- شکل ۱۵-۲: پرمئانس میان دندانه سه استاتور و دندانه های رتور ۶۷
- شکل ۱۶-۲: مقاومت های معادل مانع شار رتور ۶۸
- شکل ۱۷-۲: گشتاور ماشین طرح ۲ ۶۹
- شکل ۱-۳: نمودار فازوری موتور سنکرون رلکتانس ۷۱
- شکل ۲-۳: ضریب توان به صورت تابعی از نسبت برجستگی ۷۲
- شکل ۳-۳: نمودار فازوری موتور سنکرون رلکتانسی تقویت شده با آهنربا ۷۳
- شکل ۴-۳: حلقه تبدیل انرژی برای SynRM و PMaSynRM ۷۴
- شکل ۵-۳: نقشه گشتاور در موتورهای سنکرون رلکتانس ۷۴
- شکل ۶-۳: منحنی گشتاور-سرعت ۷۵
- شکل ۷-۳: نرم افزار توسعه داده شده جهت طراحی موتور پیشنهادی ۷۶
- شکل ۸-۳: تنظیم مقادیر نامی موتور ۷۷
- شکل ۹-۳: توزیع MMF در فاصله هوایی ناشی از سیم پیچی سه فاز توزیع شده ۷۸
- شکل ۱۰-۳: MMF سه فاز پس از تعیین اسپن کوئل ۷۸
- شکل ۱۱-۳: تنظیم نوع ورق رتور و استاتور ۷۹
- شکل ۱۲-۳: طرح های معتبر پس از جستجوی مینیمم ماکزیمم ۸۰
- شکل ۱۳-۳: انتخاب یک طرح جهت بررسی بیشتر ۸۰
- شکل ۱۴-۳: گزینه های موجود در Design Advisor ۸۱
- شکل ۱۵-۳: گزینه های موجود برای تحلیل المان محدود موتور ۸۲
- شکل ۱۶-۳: ایجاد مدل در نرم افزار Maxwell به صورت خودکار ۸۲
- شکل ۱۷-۳: هندسه طرح نهایی جهت تحلیل ۸۳
- شکل ۱۸-۳: مش بندی ایجاد شده توسط EMDLAB جهت تحلیل ۸۴

- شکل ۱۹-۳: هندسه SynRM ایجاد شده در ANSYS Maxwell ۸۴
- شکل ۲۰-۳: هندسه PMaSynRM ایجاد شده در نرم افزار ANSYS Maxwell ۸۵
- شکل ۲۱-۳: گشتاور استاتیکی SynRM محاسبه شده به کمک EMDLAB ۸۵
- شکل ۲۲-۳: گشتاور استاتیکی SynRM محاسبه شده به کمک ANSYS Maxwell ۸۶
- شکل ۲۳-۳: گشتاور استاتیکی PMaSynRM محاسبه شده به کمک EMDLAB ۸۶
- شکل ۲۴-۳: گشتاور استاتیکی PMaSynRM محاسبه شده به کمک ANSYS Maxwell ۸۷
- شکل ۲۵-۳: حلقه تبدیل انرژی SynRM ۸۷
- شکل ۲۶-۳: حلقه تبدیل انرژی PMaSynRM ۸۸
- شکل ۲۷-۳: نقشه گشتاور برای SynRM ۸۹
- شکل ۲۸-۳: نقشه گشتاور برای PMaSynRM ۹۰
- شکل ۲۹-۳: نتایج حاصل از شبیه سازی حالت دائم SynRM ۹۱
- شکل ۳۰-۳: نتایج حاصل از شبیه سازی PMaSynRM ۹۲
- شکل ۳۱-۳: BLDCM تجاری که روی دوچرخه الکترونیکی در آزمایشگاه با محدودیت‌های ابعادی مرتبط نصب شده است ۹۴
- شکل ۳۲-۳: پیاده سازی فرآیند طراحی PMaSynRM مبتنی بر FE و مراحل آن ۹۴
- شکل ۱-۴: طرح های در نظر گرفته شده جهت مطالعه نهایی ۹۸
- شکل ۲-۴: طرح حاوی دو مانع شار ۹۹
- شکل ۳-۴: گشتاور استاتیکی مربوط به طرح های روتور حاوی دو مانع شار ۹۹
- شکل ۴-۴: گشتاور حالت دائم برای طرح روتور حاوی دو مانع شار برای حالتی که استاتور اسکیو نشده است ۱۰۰
- شکل ۵-۴: گشتاور حالت دائم برای طرح روتور حاوی دو مانع شار برای حالتی که استاتور اسکیو شده است ۱۰۰
- شکل ۶-۴: طرح دارای سه مانع شار ۱۰۱
- شکل ۷-۴: گشتاور استاتیکی مربوط به طرح های روتور حاوی سه مانع شار ۱۰۱
- شکل ۸-۴: گشتاور حالت دائم برای طرح روتور حاوی سه مانع شار برای حالتی که استاتور اسکیو نشده است ۱۰۲
- شکل ۹-۴: گشتاور حالت دائم برای طرح روتور حاوی سه مانع شار برای حالتی که استاتور اسکیو شده است ۱۰۲
- شکل ۱۰-۴: مدل طرح نهایی آماده شده در سالیدورک ۱۰۳
- شکل ۱۱-۴: طرح های مطالعه شده ۱۰۴
- شکل ۱-۵: نقشه گسترده موتور ۱۰۶
- شکل ۲-۵: ابعاد مختلف مربوط به هسته آهنی استاتور ۱۰۷
- شکل ۳-۵: ورق الکتریکی برش خورده مربوط به هسته استاتور ۱۰۸

- شکل ۴-۵: نیم سوراخ های در نظر گرفته شده در سطح داخلی استاتور جهت اسکیو کردن ۱۰۸
- شکل ۵-۵: قالب اسکیو شماره ۱ ۱۰۹
- شکل ۶-۵: سعی در ساخت هسته مورب استاتور به کمک قالب اسکیو شماره ۱ ۱۰۹
- شکل ۷-۵: فرآیند مورب کردن هسته استاتور ۱۱۰
- شکل ۸-۵: هسته استاتور قبل از قرار گرفتن در کوره ۱۱۱
- شکل ۹-۵: هسته استاتور ۱۱۱
- شکل ۱۰-۵: قالب آماده شده جهت تولید کوئل ها ۱۱۲
- شکل ۱۱-۵: هسته استاتور در حال سیم پیچی ۱۱۲
- شکل ۱۲-۵: مسیرهای موازی جریان در سیم پیچی استاتور ۱۱۳
- شکل ۱۳-۵: هسته استاتور پس از اتمام سیم پیچی ۱۱۳
- شکل ۱۴-۵: ابعاد مختلف مربوط به هسته آهنی روتور ۱۱۴
- شکل ۱۵-۵: ورق الکتریکی برش خورده مربوط به روتور ۱۱۵
- شکل ۱۶-۵: یک نمونه ورق الکتریکی معیوب مربوط به روتور ۱۱۵
- شکل ۱۷-۵: مرتب کردن آهنرباها قبل از جایگذاری در روتور ۱۱۶
- شکل ۱۸-۵: فیکسچر آماده شده برای ساخت هسته روتور ۱۱۶
- شکل ۱۹-۵: هسته روتور پس از خارج سازی از کوره ۱۱۷
- شکل ۲۰-۵: فاصله بین دوشاخ چرخ عقب ۱۱۷
- شکل ۲۱-۵: کمترین فاصله بین دوشاخ در بیشترین قطر موتور ۱۱۸
- شکل ۲۲-۵: ابعاد مربوط به شفت روتور ۱۱۸
- شکل ۲۳-۵: درپوش ها و نحوه اتصال آنها به روتور ۱۱۹
- شکل ۲۴-۵: استفاده از پیچ متری جهت یکپارچه سازی درپوش ها و هسته آهنی روتور ۱۱۹
- شکل ۲۵-۵: سطح برش خورده درپوش ها، جای در نظر گرفته شده برای بلبرینگ و جای خار ۱۲۰
- شکل ۲۶-۵: هولدر هسته استاتور ۱۲۰
- شکل ۲۷-۵: بلبرینگ های در نظر گرفته شده برای قرار دهی روتور بر روی شفت ۱۲۱
- شکل ۲۸-۵: شیار در نظر گرفته شده بر روی روتور ۱۲۱
- شکل ۲۹-۵: شیار در نظر گرفته شده برای خارج کردن ترمینالهای سیم پیچی در اسمبلی کامل ... ۱۲۲
- شکل ۳۰-۵: طراحی نهایی . PMSynRM ۱۲۲
- شکل ۳۱-۵: بخش های مختلف نمونه اولیه . PMSynRM ۱۲۳
- شکل ۳۲-۵: تنظیم آزمایش برای اعتبارسنجی عملکرد PMSynRM ۱۲۴
- شکل ۳۳-۵: تست در مقابل شبیه سازی FEA ۱۲۵
- شکل ۳۴-۵: گشتاورهای متوسط در مقابل جریان های خط ۱۲۵
- شکل ۱-۶: نمای انفجاری از قطعات موتور ۱۲۸

- شکل ۲-۶: الف) منحنی مغناطیس شونده گی ورق فولادی باکد M530-50A ب) چسب ایپکسی برند UHU ۱۲۸
- شکل ۳-۶: الف) نمایی از آهنربای NdFeB ب) نمایی از رتور ساخته شده به همراه مونتاژ آهنرباها ج) هندسه بریر رتور ۱۲۹
- شکل ۴-۶: الف) ورقه های استاتور ب) نمای بالا از استاتور سیم پیچی شده ج) نمای کناری استاتور ۱۲۹
- شکل ۵-۶: نگهدارنده های استاتور ۱۳۰
- شکل ۶-۶: نمای داخل و بیرون درپوش ها ۱۳۰
- شکل ۷-۶: شفت و بلبرینگ ۱۳۱
- شکل ۸-۶: الف) تمیز کردن چسب های باقیمانده روی بدنه روتور ب) تمیز کردن براده های آهن باقیمانده روی روتور ۱۳۱
- شکل ۹-۶: روتور فیکس شده داخل درپوش ۱۳۲
- شکل ۱۰-۶: الف) روتور حرارت داده شده در کوره ۷۰ درجه ب) نگهدارنده در حال سرد شدن با یخ خشک ۱۳۳
- شکل ۱۱-۶: الف) قرار دادن ۴ قطعه نگهدارنده زیر استاتور برای جلوگیری از آسیب دیدن سیم پیچی بر اثر ضربه ب) استفاده از چکش نرم برای زدن ضربه به منظور جا رفتن نگهدارنده ۱۳۳
- شکل ۱۲-۶: الف) نمای داخلی باز شدن ورقه های استاتور زیر پرس ب) مجموعه استاتور زیر پرس ج) نمای بیرونی باز شدن ورقه های استاتور ۱۳۳
- شکل ۱۳-۶: الف) شفت داخل استاتور ب) سمباده زدن شفت به منظور کاهش قطر بیرونی ۱۳۴
- شکل ۱۴-۶: لایه برداری از قطر داخلی درپوش ۱۳۴
- شکل ۱۵-۶: مجموعه آماده شده جهت تست ۱۳۵
- شکل ۱۶-۶: الف) پلاک مشخصات موتور القایی ب) مجموعه تست Back-Emf ۱۳۶
- شکل ۱۷-۶: شکل موج ولتاژ Back-Emf موتور در سرعت ۶۰ دور در دقیقه ۱۳۷
- شکل ۱۸-۶: شکل موج پالس سرعت سنج ۱۳۷
- شکل ۱۹-۶: شکل موج ولتاژ Back-Emf موتور در سرعت ۶۰ دور در دقیقه ۱۳۸
- شکل ۲۰-۶: شکل موج پالس سرعت سنج ۱۳۸
- شکل ۲۱-۶: شکل موج ولتاژ Back-Emf موتور در سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه ۱۳۸
- شکل ۲۲-۶: شکل موج پالس سرعت سنج ۱۳۹
- شکل ۲۳-۶: شکل موج ولتاژ Back-Emf موتور در سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه ۱۳۹
- شکل ۲۴-۶: شکل موج پالس سرعت سنج ۱۳۹
- شکل ۲۵-۶: شکل موج ولتاژ Back-Emf موتور در سرعت ۱۲۰ دور در دقیقه ۱۴۰
- شکل ۲۶-۶: شکل موج پالس سرعت سنج ۱۴۰
- شکل ۲۷-۶: شکل موج ولتاژ Back-Emf موتور در سرعت ۱۲۰ دور در دقیقه ۱۴۰
- شکل ۲۸-۶: شکل موج پالس سرعت سنج ۱۴۱

- شکل ۶-۲۹: شکل موج ولتاژ Back-Emf موتور در سرعت ۱۸۰ دور در دقیقه ۱۴۱
- شکل ۶-۳۰: شکل موج پالس سرعت سنج ۱۴۱
- شکل ۶-۳۱: شکل موج ولتاژ Back-Emf موتور در سرعت ۱۸۰ دور در دقیقه ۱۴۲
- شکل ۶-۳۲: شکل موج پالس سرعت سنج ۱۴۲
- شکل ۶-۳۳: شکل موج ولتاژ Back-Emf موتور در سرعت ۲۰۰ دور در دقیقه ۱۴۲
- شکل ۶-۳۴: شکل موج پالس سرعت سنج ۱۴۳
- شکل ۶-۳۵: شکل موج ولتاژ Back-Emf موتور در سرعت ۲۰۰ دور در دقیقه ۱۴۳
- شکل ۶-۳۶: شکل موج پالس سرعت سنج ۱۴۳
- شکل ۶-۳۷: شکل موج ولتاژ Back-Emf موتور در سرعت ۲۴۰ دور در دقیقه ۱۴۴
- شکل ۶-۳۸: شکل موج ولتاژ Back-Emf موتور در سرعت ۲۴۰ دور در دقیقه ۱۴۴
- شکل ۶-۳۹: شکل موج پالس سرعت سنج ۱۴۴
- شکل ۶-۴۰: نمودار ولتاژ Back-Emf در سه سرعت مختلف ۱۴۵
- شکل ۶-۴۱: BLDCM تجاری و PMaSynRM آزمایش شده است ۱۴۶
- شکل ۶-۴۲: گشتاورهای گیره‌ای اندازه‌گیری شده برای PMaSynRM طراحی شده و BLDCM تجاری ۱۴۷
- شکل ۶-۴۳: پاسخ‌های گشتاور و سرعت آنی برای PMaSynRM آزمایش شده و BLDCM تجاری ۱۴۸

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۱: محدودیت های اعمالی به دوچرخه های برقی در کشورهای مختلف	۳
جدول ۱-۲: انواع دوچرخه های موجود در بازار ساخت خارج	۶
جدول ۱-۳: انواع دوچرخه های برقی ساخت داخل	۶
جدول ۱-۴: مزایا و معایب موتورهای سنکرون رلکتانسی	۷
جدول ۱-۵: مزایا و معایب موتورهای سنکرون رلکتانسی تقویت شده با آهنربا	۸
جدول ۱-۶: مزایا و معایب موتورهای سنکرون مغناطیس دائم	۹
جدول ۱-۷: نمونه های دوچرخه الکتریکی ساخت شرکت گلدن موتور	۱۲
جدول ۱-۸: نمونه موتورهای الکتریکی ساخت شرکت گلدن موتور برای کاربرد در داخل چرخ	۱۲
جدول ۱-۹: باتری های ساخته شده توسط شرکت گلدن موتور	۱۳
جدول ۱-۱۰: ثوابت در نظر گرفته شده برای طراحی	۱۳
جدول ۱-۱۱: مشخصات استاتور	۱۴
جدول ۱-۱۲: مقادیر انتخابی برای هر پارامتر سنکرون رلکتانس	۱۶
جدول ۱-۱۳: پارامترهای انتخابی برای موتور سنکرون رلکتانس با شبیه سازی دو به دو	۱۷
جدول ۱-۱۴: پارامترهای انتخابی برای موتور سنکرون رلکتانس فریتی	۱۹
جدول ۱-۱۵: نقطه بهینه برای حالت پایه	۲۲
جدول ۱-۱۶: پارامترهای ساختار دو لایه	۲۴
جدول ۱-۱۷: پارامترهای انتخابی ساختار دو لایه با مگنت نفودمیومی بالا و فریتی پایین	۲۵
جدول ۱-۱۸: پارامترهای منتخب ساختار دو لایه با مگنت نفودمیومی پایین و فریتی بالا	۲۶
جدول ۱-۱۹: نتایج بهینه ساختار دو لایه با مگنت نفودمیومی در کناره ها و فریتی وسط	۲۷
جدول ۱-۲۰: حالت بهینه ساختار دو لایه با مگنت فریتی در کناره ها و نفودمیومی وسط	۲۹
جدول ۱-۲۱: حالت بهینه ساختار دو لایه با مگنت مستطیلی نفودمیومی در کناره و فریتی وسط	۳۰
جدول ۱-۲۲: پارامترهای بهینه تغییر شکل قطب های مجاور نسبت به یکدیگر	۳۲

جدول ۱-۲۳ : توان مورد نیاز دوچرخه برقی در شرایط مختلف.....	۳۳
جدول ۱-۲۴ : گشتاورهای متوسط، امواج گشتاور و ضرایب قدرت برای SYNRM های مختلف.....	۳۶
جدول ۲-۱ : مشخصات ماشین طرح ۱.....	۶۰
جدول ۲-۲ : مشخصات ماشین طرح ۲.....	۶۴
جدول ۳-۱ : موتورهای طراحی شده با مقادیر نامی مختلف.....	۹۳
جدول ۳-۲ : مشخصات و ابعاد مورد نظر موتور.....	۹۴
جدول ۳-۳ : ویژگی های سه طرح PMASYNRM معتبر قابل اجرا.....	۹۵
جدول ۳-۴ : پارامترهای نهایی برای ساختار موتور PMASYNRM طراحی شده.....	۹۶
جدول ۴-۱ : نتایج نهایی طرح.....	۱۰۳
جدول ۶-۱ : مشخصات طراحی یک موتور سنکرون رلکتانسی تقویت شده با آهنربای دائم.....	۱۲۷
جدول ۶-۲ : سرعت موتور ها و فرکانس اینورتر.....	۱۳۶
جدول ۶-۳ : نتایج محاسبات سرعت از روی نمودار های بدست آمده.....	۱۴۵
جدول ۶-۴ : خلاصه مقایسه بین BLDCM و PMASYNRM.....	۱۴۷

فصل ۱ مقدمه ای بر انواع موتور های الکتریکی قابل استفاده در خودرو برقی دو چرخ و انتخاب موتور مناسب

۱-۱ دوچرخه برقی

۱-۱-۱ تاریخچه

اولین تلاش ها برای ساخت دوچرخه برقی به اوایل قرن بیستم بر می گردد اما بدلیل نبود باتری مناسب پیشرفت چندانی حاصل نشد [۱]. با توسعه باتری ها و پیدایش باتری های سبک با چگالی انرژی مبحث تولید دوچرخه برقی دوباره مورد توجه قرار گرفت. امروزه انواع مختلفی از دوچرخه های برقی موجود است که مقادیر نامی توان و سرعت آن ها در کشورهای مختلف متفاوت است.

۱-۱-۲ توان موتور الکتریکی

علاوه بر مشخصات طراحی مانند حداکثر سرعت، حداکثر وزن متحرک، حداکثر شیب مسیر، سیستم چرخ دنده و تغییر سرعت، و مشخصات چرخه رانندگی، دو عامل دیگر نیز بر ساختار موتور الکتریکی دوچرخه الکتریکی تاثیر گذارند که اولین عامل، نحوه استفاده از توان حاصل از موتور الکتریکی در دوچرخه و عامل دیگر محل قرار گرفتن موتور است. در این بخش به بررسی هر یک از این عوامل پرداخته می شود.

از نظر نحوه کاربرد توان الکتریکی، دوچرخه را می توان به دو دسته تقسیم نمود. در دسته اول، همراه با پدال زدن دوچرخه سوار، موتور الکتریکی به حرکت در می آید و نقش کمک کننده برای دوچرخه سوار را به عهده می گیرد. در این دوچرخه ها که با نام Pedelec شناخته می شوند، با شروع پدال زنی موتور شروع به کار می کند و با قطع آن، موتور نیز خاموش می گردد. نکته مهم دیگر در مورد این دوچرخه ها این است که مطابق شکل ۱-۱ با نزدیک شدن دوچرخه به حداکثر سرعت (که بسته به استاندارد و کشور مورد استفاده بین ۲۰ تا ۳۲ کیلومتر بر ساعت است)، توان تولیدی موتور الکتریکی کاهش می یابد، بطوری که در سرعت های بالاتر از این مقدار، موتور خاموش می شود. در این دوچرخه ها می توان به منظور ساده سازی روند طراحی، ضریبی را به عنوان ضریب کمک کندی دوچرخه سوار در نظر گرفت که این ضریب بصورت نسبت بین قدرت دوچرخه سوار به قدرت موتور تعریف می گردد.



شکل ۱-۱: نمودار توان - سرعت دوچرخه های Pedelec

در دسته دیگر دوچرخه های الکتریکی، مکانیزم کنترل توان بسیار ساده تر می باشد و با استفاده از پیچ تنظیم توان، توان الکتریکی دوچرخه همانند موتور سیکلت کنترل می شود. در این نوع دوچرخه، دوچرخه سوار می تواند بدون پدال زدن از توان الکتریکی استفاده نماید.

۳-۱-۱ محدودیت ها

علاوه بر محدودیت سرعت که برای دوچرخه های الکتریکی در برخی از کشورها اعمال می شود، محدودیت های دیگری نیز مانند محدودیت حداکثر توان موتور و وزن دوچرخه نیز وجود دارند که در جدول ۱-۱ به آنها اشاره شده است.

جدول ۱-۱ محدودیت های اعمالی به دوچرخه های برقی در کشورهای مختلف

Location	Motor Power Limit (W)	Speed Limit (km/h)	Weight Limit (kg)	Other Limitations
European Union	250	25 ^a	No	Pedal assist ^a
United Kingdom	200 ^b	25 ^c	40 ^d	Must have pedals and on/off switch
Canada	500 ^e	32	No	Must have pedals and less than 4 wheels and on/off switch
Taiwan	No ^f	30	40	
Japan	No ^g	24	No	
China	240	20	No	Must have pedals
United States	750	32.2 ^h	No	Must have pedals and less than 4 wheels

^a Motor power is progressively reduced as speed increases to 25 km/h at which speed motor power must be zero.

^b 250 W for tricycles.

^c Maximum with motor power applied.

^d 60 kg for tricycles.

^e Motor power zero for speeds less than 3 km/h.

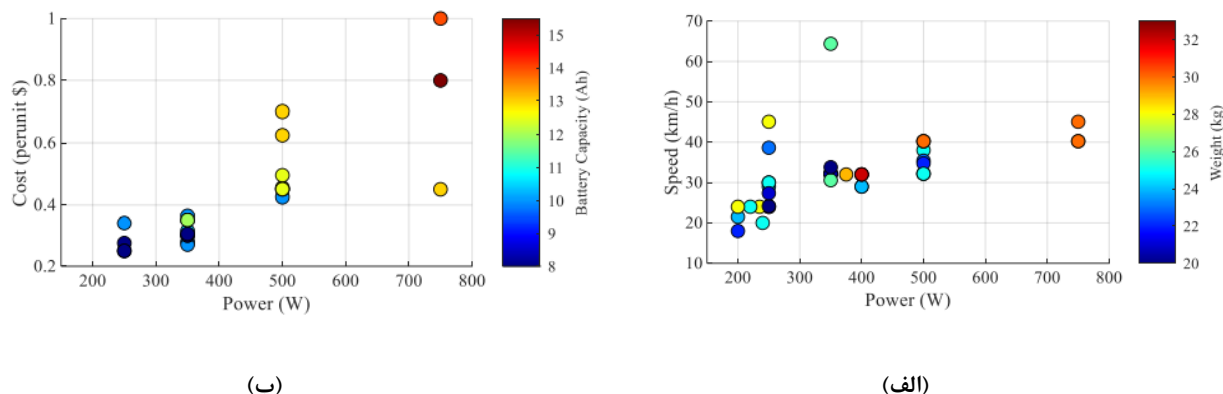
^f Power only engages during pedaling.

^g Motor power equals pedal power up to 20 km/h, thereafter progressively reducing to zero at 24 km/h.

^h When the operator weighs 170 lb or less.

Source: From Jamerson [4].

در شکل ۱-۲ (الف) قدرت خروجی، وزن و حداکثر سرعت برای نمونه دوچرخه های الکترونیکی تجاری موجود در بازار جمع آوری و ارائه شده است. قیمت یک دوچرخه الکترونیکی علاوه بر موتور الکتریکی به باتری و واحد کنترل نیز بستگی دارد. در شکل ۱-۲ (ب) هزینه های هر واحد بر اساس گران ترین دوچرخه های الکترونیکی مورد مطالعه بر اساس توان و ظرفیت باتری آن ها ارائه شده است.



شکل ۲-۱: (الف) حداکثر سرعت و توزیع وزن (ب) هزینه هر واحد و ظرفیت باتری نمونه دوچرخه های الکترونیکی تجاری موجود به ازای قدرت موتور الکتریکی

همانطور که مشاهده می شود ترکیب های مختلفی از قدرت، وزن و حداکثر سرعت برای دوچرخه های الکترونیکی مختلف وجود دارد و هر کدام بسته به کاربردها و قوانین ممکن است مورد استفاده قرار گیرند.

۲-۱ محل قرار گیری

از نقطه نظر محل قرار گرفتن موتور، موتور الکتریکی دوچرخه برقی می تواند یا در کنار پدال قرار گیرد و یا در داخل چرخ تعبیه گردد.

هنگامی که موتور الکتریکی درون چرخ قرار داده می شود، وزن اضافی تحمیل شده از آن می تواند باعث تضعیف قابلیت مانور دوچرخه در زمین های ناهموار گردد. به این دوچرخه ها، هاب درایو می گویند. در این ساختار هم امکان استفاده از موتورهای گیربکس دار که با سرعت تا ۳۰۰۰ دور بر دقیقه می چرخند وجود دارد و هم امکان استفاده از موتورهای بدون گیربکس که با سرعتی تا ۲۰۰ دور بر دقیقه می چرخند، وجود خواهد داشت. موتورهای الکتریکی گیربکس دار، دارای وزن کمتری می باشند، اما به دلیل بالا بودن تعداد قطعات متحرک در آنها، نرخ خرابی آنها بیشتر از موتورهای بدون گیربکس است. موتورهای بدون گیربکس معمولاً بصورت موتور با روتور خارجی ساخته می شوند که روتور آنها توسط پره به لاستیک دوچرخه متصل می شود. شکل زیر نشان دهنده ساختار بدون گیربکس و گیربکس دار در این دوچرخه ها می باشد.



شکل ۳-۱: موتور نصب شده در چرخ، با و بدون گیربکس

در دوچرخه های الکتریکی که موتور الکتریکی در کنار پدال قرار می گیرد، وزن موتور به شکل مناسب تری بین چرخ ها تقسیم می گردد که باعث عملکرد بهتر موتور در مسیرهای کوهستانی می شود. به این دوچرخه ها، مید درایو گفته می شود. مزیت دیگر این ساختار این است که به علت فضای بیشتر، امکان استفاده از گیربکس راحت تر می باشد ضمن اینکه سیستم انتقال توان دوچرخه نیز به افزایش بیشتر سرعت کار موتور و کاهش حجم آن کمک می کند. در شکل زیر نمونه هایی از این ساختار نشان داده شده است.



شکل ۴-۱: موتور نصب شده در رکاب

بر اساس شکل ۱-۲، اکثر دوچرخه های الکتریکی تجاری متعلق به نوع یک یا دو، دارای پیکربندی درایو متوسط با گیربکس هستند و توان خروجی آنها تنها به ۲۵۰ وات محدود شده است. استفاده از گیربکس باعث افزایش تلفات نگهداری و انتقال و کاهش قابلیت اطمینان دوچرخه های الکتریکی می شود. علاوه بر این، پیچیدگی ساختار میانی درایو آن ها را نسبت به دو نوع دیگر گران تر می کند.

۱-۲-۱ ویژگی های مورد انتظار

به منظور انتخاب و طراحی موتور دوچرخه الکتریکی ابتدا باید به مهمترین مشخصه هایی که از این موتورها انتظار می رود توجه نمود. این مشخصه ها در ادامه بررسی شده است.

- **کاهش قیمت:** با توجه به اینکه هزینه موتور، بخش قابل توجهی از هزینه دوچرخه برقی را شامل می شود و با در نظر گرفتن رقابت تنگاتنگی که بین تولید کنندگان این محصولات وجود دارد، کاهش هزینه یکی از اصلی ترین معیارهای طراحی موتور دوچرخه الکتریکی می باشد.
- **وزن و حجم موتور:** در دوچرخه الکتریکی، وزن و حجم موتور از چند منظر حائز اهمیت می باشد. اول اینکه در بسیاری از کشورها محدودیت وزن برای دوچرخه وجود دارد و باید آن را رعایت نمود. علاوه بر این، استحکام مکانیکی دوچرخه و محدودیت فضای آن بویژه در موتورهای هاب درایو، و همچنین نیاز به نیرو و در نتیجه توان بالاتر برای به حرکت در آوردن دوچرخه ای سنگین تر، همگی به اهمیت کاهش وزن و حجم موتور اشاره دارند.
- **کاهش ریبیل گشتاور:** به دلیل وزن کم و کم بودن اینرسی، ریبیل گشتاور موتور در دوچرخه الکتریکی توسط سرنشینان احساس می شود و باید حتی الامکان آن را کاهش داد.

۲-۲-۱ نمونه های صنعتی خارجی و داخلی

پیش از بررسی موتورهای الکتریکی رلوکتانسی و ساختارهای پیشنهادی آنها برای دوچرخه های برقی، لازم است که محدوده توان و مشخصات موتورهای استفاده شده در نمونه های صنعتی مورد بررسی قرار گیرد. در جدول زیر تعدادی از این دوچرخه های تولید شده در کشورهای دیگر، مورد بررسی قرار گرفته اند.

جدول ۲-۱: انواع دوچرخه های برقی موجود در بازار ساخت خارج

مدل دوچرخه و سازنده	نوع دوچرخه	توان موتور	حداکثر سرعت	وزن
Procycle - Electron II	EAB	250	24	24
Renaut – Equation	EAB	250	24	33
Think mobility – Think bike Fun	EAB	400	32	33
Think mobility – Think Traveller	EAB	250	29	24
Yamaha – PAS XPC 26	EAB	235	24	28
Zap – Bianchi	EPB	400	29	24
Zap – Diamondback	EPB	200	21.5	24
Zap – Smith & Wesson	EPB	400	29	24
Aero Vironment – Charger	EAB	375	32	29
EPS – Amigo	Bi Modal	400	32	24
EV Global motors -24v	EPB	400	32	32
EV Global motors -36v	EPB	400	32	32
Honda – Racoon compo	EAB	200	18	22
Honda – Grand Racoon	EAB	220	24	25
Peugeot – Velectron	EAB	200	24	28

به منظور بررسی توانایی های تولید داخل، در جدول ۳-۱ دوچرخه های الکتریکی تولید داخل کشور مورد بررسی قرار گرفته اند.

جدول ۳-۱: انواع دوچرخه های برقی ساخت داخل

مدل دوچرخه و سازنده	نوع دوچرخه	توان موتور	حداکثر سرعت	وزن
تاشو – آسانران	-	۲۵۰	۳۰	۲۲
کوهستان – آسانران	-	۲۵۰	۳۰	۲۵
کوهستان – آسانران	-	۵۰۰	۳۸	۲۵
تاشو – ایران دوچرخ	-	۲۴۰	۲۰	۲۵

با توجه به جداول فوق می توان نتیجه گرفت که توان دوچرخه برخی غالباً کمتر از ۵۰۰ وات، سرعت آن کمتر از ۳۰ کیلومتر بر ساعت و وزن آن کمتر از ۳۰ کیلوگرم می باشد.

۱-۲ موتورهای سنکرون رلکتانسی

به دلیل مزایای متعدد، موتورهای سنکرون رلکتانسی در دهه اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته اند [۲]. در این موتورها روتور فاقد آهنربا بوده که منجر به کاهش هزینه موتور می گردد. البته هزینه ماشینکاری ورق های روتور در این موتورها به دلیل ساختار پیچیده کمی بالاتر از موتورهای رایج است. به دلیل هزینه بالا سوخته های فسیلی و همچنین مسائل مربوط به آلودگی محیط زیست، الکتریکی کردن وسایل حمل و نقل از اهمیت بالایی برخوردار شده است [۳]. امروزه به دلیل چگالی گشتاور موتورهای الکتریکی، از موتورهای درون چرخ^۱ در کاربردهای متعددی همچون دوچرخه برقی، موتور سیکلت برقی و اسکوترها استفاده می شود [۳]. در اینگونه موتورها عمدتاً از موتورهای مغناطیس دائم سطحی استفاده میشود [۴]. برای بالا نگه داشتن چگالی گشتاور در موتورهای مغناطیس دائم سطحی باید از آهنرباهای با چگالی انرژی بالا استفاده کرد. این آهنرباها معمولاً از جنس نئودیمیوم بوده و هزینه بالایی دارند. در این پژوهش هدف طراحی SynRM و یا PMSynRM برای امکان سنجی جایگزینی موتورهای مغناطیس دائم سطحی می باشد.

در جدول ۱-۴ مزایا و معایب SynRM بیان شده است [۴]. در SynRM روتور فاقد هرگونه سیم پیچی و یا آهنربا بوده و گشتاور تنها از جنس رلکتانسی است.

جدول ۱-۴: مزایا و معایب موتورهای سنکرون رلکتانسی [۴]

مزایا	محدودیت ها
عدم وجود مگنت هزینه نهایی موتور را کاهش می دهد	بازدهی، چگالی گشتاور و توان و ضریب توان به نسبت موتورهای مغناطیس دائم سنکرون کوچک تر است
بدلیل عدم وجود مگنت در حالت خطای اتصال کوتاه جریانی در سیم پیچی های استاتور القا نمی شود	تا هنگامی که نسبت برجستگی کمتر از ۷ باشد مشخصه های عملکردی جذابیت خاصی ندارند
با افزایش نسبت برجستگی می توان شاخصهای عملکردی موتور مثل ضریب توان و بازدهی را بهبود بخشید	دستیابی به گشتاور رلکتانسی قابل ملاحظه مستلزم این است که حداقل سه مانع شار ^۲ در هر قطب استفاده شود. این موضوع ساخت رتور را پیچیده می کند
به کمک برجستگی مغناطیسی روتور می توان موقعیت روتور در سرعت صفر را پیدا کرد	گشتاور تابعی غیر خطی از اندازه جریان استاتور می باشد
محدودیتی روی اضافه بار ضربه ای ندارد چرا که خطر مغناطیس زدایی مگنتها وجود ندارد	تلفات آهن در روتورهایی که به صورت محوری موزن هستند می تواند در سرعت های بالا قابل ملاحظه باشد
نسبت برجستگی موتورهای که به صورت محوری موزن ^۳ هستند را می توان به عددی بیشتر از ۱۰ رساند	

1 In wheel motors
2 Barrier
3 Axially laminated

۳-۱ موتورهای سنکرون رلکتانسی تقویت شده با آهنربا

دو محدودیت مهم در SynRM پایین بودن ضریب توان و چگالی گشتاور می باشد. پایین بودن ضریب توان منجر به افزایش توان درایو می گردد. بنابراین اگر سیستم موتور و درایو را با هم نگاه کنیم، هر چند در مقایسه با PMSM می توان هزینه موتور را با جایگزینی آن با SynRM کاهش داد ولی در مقابل، هزینه درایو افزایش می یابد. برای برطرف کردن این محدودیت ها PMSynRM معرفی شده است [۴]. در این موتورها با قرار دادن مقداری آهنربا در روتور، هدف کاهش جریان مغناطیس کنندگی و به طبع افزایش ضریب توان و افزایش گشتاور تولیدی میسر می شود. مزایا و معایب PMSynRM در جدول ۵-۱ آورده شده است.

جدول ۱-۱ مزایا و معایب موتورهای سنکرون رلکتانسی تقویت شده با آهنربا [۴]

مزایا	محدودیت ها
چگالی گشتاور و توان بالا	عدم امکان قطع جریانهای ناشی از خطای اتصال کوتاه در جریانهای غیر صفر
بازدهی بالا	برای کاربردهای سرعت بالا نیاز است ملاحظات خاصی برای نگه داری مگنتها در نظر گرفته شود
طراحی موتور می تواند به گونه ای انجام شود که نسبت دلخواهی از گشتاور رلکتانسی و گشتاور مگنتها در گشتاور کل دخیل باشند	عدم امکان قطع جریانهای ناشی از خطای اتصال کوتاه در جریانهای غیر صفر
جاگذاری مگنتها داخل روتور یک نوع حفاظت مکانیکی برای مگنتها است	بدلیل وجود گشتاور رلکتانسی کنترل گشتاور موتور پیچیده است
به کمک برجستگی مغناطیسی روتور می توان موقعیت روتور در سرعت صفر را پیدا کرد	برای افزایش نسبت برجستگی باید تعداد موانع شار در هر قطب روتور را بالا در نظر گرفت که این ساخت روتور را پیچیده می کند

۳-۱ موتورهای سنکرون مغناطیس دائم

موتورهای مغناطیس دائم سطحی به دلیل داشتن چگالی توان و گشتاور بالا از جذابیت خاصی در کاربردهای حمل و نقل برخوردار است. برای طراحی یک موتور مغناطیس دائم با هدف کم بودن وزن آن باید از آهنرباهای با چگالی انرژی بالا استفاده کرد. نوع رایج مورد استفاده آهنرباهای نئودیمیوم می باشد که هزینه بالایی دارند. این امر منجر به افزایش قیمت تمام شده موتور می گردد. همچنین آهنرباهای نئودیمیومی به دلیل وابستگی حرارتی که دارند، دارای محدودیتهایی می باشند. تلاشهای متعددی برای جایگزینی آهنرباهای فریتی به جای

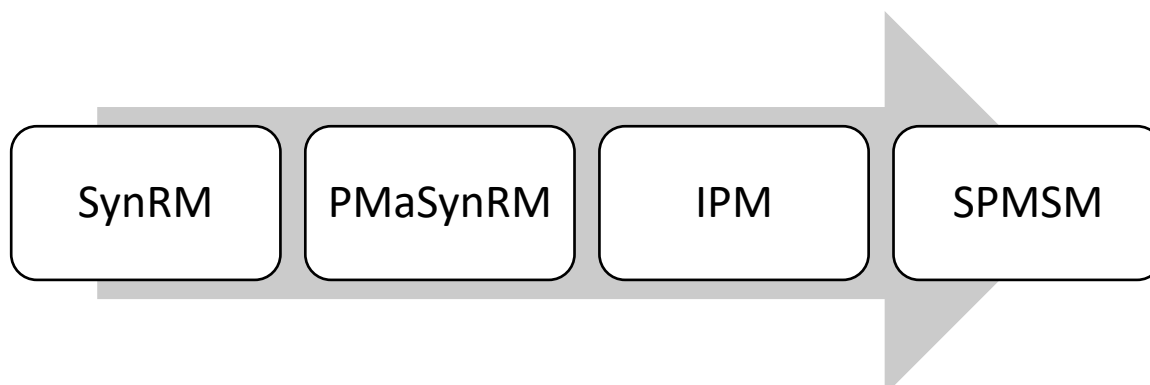
آهنرباهای نئودیمیومی صورت گرفته است. به دلیل شار پسماند کم آهنرباهای فریتی ابعاد موتور افزایش می یابد. همچنین در این موتورها باید ملاحظات خاصی صورت گیرد تا ریسک مغناطیس زدایی^۴ کاهش یابد جدول ۱-۶ مزایا و معایب موتورهای مغناطیس دائم سطحی را نشان می دهد.

جدول ۱-۶ مزایا و معایب موتورهای سنکرون مغناطیس دائم [۴]

مزایا	محدودیت ها
چگالی گشتاور و توان بالا	نیاز به نگهدارنده برای مگنتها در کاربردهای سرعت بالا
بازدهی بالا	ممکن است برای کاهش تلفات جریان گردابی در مگنتها نیاز به طراحی تکه تکه ^۵ باشد
کنترل آسان، گشتاور تابعی خطی از I_q است	عدم امکان قطع جریانهای ناشی از خطای اتصال کوتاه در جریانهای غیر صفر
	به دلیل اینکه گشتاور تولیدی مستقیماً تابعی از حجم مگنت ها است باید از مگنتهای با چگالی گشتاور بالا استفاده کرد که معمولاً گران قیمت هستند

۱-۴ مقایسه موتورهای مغناطیس دائم و سنکرون رلکتانسی

شکل ۰- مقایسه ای از مقدار سهم گشتاور ناشی از آهنرباها در گشتاور کل در موتورهای مختلف را نشان می دهد. در SynRM گشتاور تماماً از نوع رلکتانسی است. در PMSynRM سهم گشتاور رلکتانسی در گشتاور کل از گشتاور ناشی از آهنرباها بیشتر است. در IPM این موضوع عکس بوده و سهم گشتاور ناشی از آهنرباها در گشتاور کل بیشتر می باشد. در SPMSM گشتاور تماماً توسط آهنرباها تولید می شود.



شکل ۰-۱: افزایش مقدار گشتاور ناشی از آهنربا در موتورهای مختلف

در پاراگراف قبل چهار نوع موتور بر اساس نوع گشتاور تولیدی مقایسه شد. در ادامه مقایسه آنها بر اساس وزن و به طبع قیمت نهایی ساخت، بررسی می شود. هزینه برشکاری ورقهای روتور در SynRM و PMSynRM بیشتر از IPM و SPMSM است. در مقابل هزینه مگنتها در IPM و SPMSM بیشتر از SynRM و PMSynRM می باشد. توان نامی درایو در SynRM و PMSynRM بیشتر از IPM و SPMSM است. بنابراین وقتی میخواهیم از نظر کاربردی این موتورها را مقایسه کنیم باید کل مجموعه موتور و درایو را در نظر بگیریم [۴]

ماشینهای آهنربای دائمی (PM) به دلیل نقاط قوت قابل توجهی که دارند مانند امکان کار در محدوده سرعت گسترده، اغلب در کاربردهای برق الکتریکی استفاده می شوند. موتورهای DC بدون جاروبک (BLDCM)، به عنوان زیرمجموعه ماشینهای PM، به عنوان یک گزینه معمول برای پیشرفت و عرضه دوچرخه الکتریکی مطابق با استانداردهای مختلف تجاری شده اند. دلیل اصلی محبوبیت BLDCM ها، سادگی سیستم های کنترل و درایو آنها است. با این حال، برای ارضای نیازهای قدرت و چگالی گشتاور بالا، PM های خاکی کمیاب گران قیمت مانند آهنرباهای (NdFeB) معمولاً در ساختار موتور استفاده می شوند. اثرات زیانبار زیست محیطی ذرات معلق خاک کمیاب و همچنین محدودیت در دسترسی به آن ها باعث افزایش هزینه محصول نهایی می شود. بعلاوه، BLDCM ها ممکن است در مقایسه با ماشینهای AC معمولی، به دلیل جابجایی ها و شکل دوزنقه ای شکل موج back-EMF، دارای توان کمتر و موج گشتاور بالاتری باشند.

از نظر هزینه و در دسترس بودن مواد می دانیم که قیمت موتور الکتریکی تاثیر قابل توجهی بر هزینه کلی دوچرخه برقی دارد. بنابراین با توجه به رقابت بین تولید کنندگان، استفاده از یک موتور ارزان قیمت ساخته شده از مواد موجود در بازار، اهمیت بیشتری دارد. گشتاور بالا عامل آزاردهنده ای است که ممکن است یک دوچرخه سوار به دلیل اینرسی و وزن کم دوچرخه های الکترونیکی احساس کند. بنابراین، رپل گشتاور موتور باید تا حد امکان کاهش یابد. راندمان موتور الکتریکی نقش مهمی در استفاده از باتری ایفا می کند لذا بازده کلی سیستم یکی از عوامل مهم در طول عمر و عملکرد باتری است.

همانطور که گفته شد BLDCM ها با تعداد قطب های روتور بالا به دلیل مزایایی مانند تراکم گشتاور و روش های کنترل و محرک ساده، رایج ترین نوع موتور برای خودروهای الکتریکی سبک وزن تجاری هستند. با این حال استفاده از PM های گران قیمت در ساختار BLDCM ها، قابلیت حرارتی، خطرات مغناطیس زدایی، ساخت پیچیده و مسائل ارتعاشی از معایب این نوع ساختار به شمار می رود. برای رفع این معایب، موتورهای رلکتانسی (RMs) به طور گسترده در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته اند. روتور این نوع موتور باعث می شود RM ارزان تر و از نظر زیست محیطی پایدارتر در مقایسه با ماشین های مبتنی بر PM باشد. RM ها به سه دسته اصلی طبقه بندی می شوند: موتورهای رلکتانس سوئیچ (SRMs)، موتورهای رلکتانس سنکرون (SynRMs) و موتورهای رلکتانس سنکرون به کمک آهنربای دائم (PMSynRMs). SRM ها با توجه به ساختار ساده و انعطاف پذیری بالا در برابر خطاها، از معمول ترین موتورها برای EV ها هستند. از معایب SRM ها می توان رپل گشتاور بالا و نویز را نام برد که آن ها را با کاربرد های الکتریکی سبک وزن مانند

دوچرخه های الکترونیکی ناسازگار می کنند. در SynRMs، موانع شار با افزایش فاصله بین مقادیر اندوکتانس محور d و محور q، گشتاور رلوکتانس را فراهم می کنند. اگرچه SynRM ها مانند SRM ها از استحکام در برابر تنش ها و خطاهای مکانیکی بهره می برند، اما به دلیل اشباع مغناطیسی دارای ضریب توان، چگالی گشتاور و قابلیت اضافه بار هستند. این اشکالات کاربرد آن ها را در خودروهای برقی محدود می کند.

برای بهبود چگالی گشتاور کم و ضریب توان در SynRM، افزودن PMs به ساختار روتور ماشین و تبدیل آن به PMSynRM کمک می کند. در این مقاله پیکربندی یک روتور بیرونی PMSynRM با قدرت ۵۰۰ وات، ۲۱۰ دور در دقیقه برای یک دوچرخه الکتریکی نوع دو درون هاب بررسی می شود تا از مزایای آن مانند ساختار ساده و سفت، عملیات بدون خطر و هزینه کم بهره مند شود. بیش از نیمی از گشتاور کل PMSynRM طراحی شده توسط مولفه رلوکتانس تامین می شود و حجم کل دستگاه و همچنین مقدار PM های استفاده شده از طریق روش طراحی به حداقل می رسد تا چگالی گشتاور، رپیل گشتاور و هزینه ها بهبود یابد. پس از شرح مفصل روش طراحی به کار گرفته شده، شبیه سازی ها و آزمایش های آزمایشگاهی بر روی یک نمونه اولیه برای مقایسه ویژگی های عملکرد و ابعاد فیزیکی PMSynRM طراحی شده با BLDCM مورد استفاده در یک دوچرخه الکتریکی تجاری موجود ارائه می شوند. نتایج بدست آمده راه حل پیشنهادی را به عنوان یک گزینه نوآورانه و امکان پذیر برای ارتقای دوچرخه های الکتریکی تایید می کند و دستورالعمل هایی را برای انطباق فناوری مشابه با سایر رتبه بندی ها ارائه می دهد.

۷-۱ انتخاب موتور الکتریکی به منظور کاربرد در دوچرخه الکتریکی

۷-۱-۱ موتورهای ساخته شده توسط کارخانه گلدن موتور

با توجه به گستردگی محصولات کارخانه گلدن موتور در بازار دوچرخه الکتریکی، در این پروژه به بررسی این محصولات به عنوان نمونه ای از نیاز صنعت دوچرخه سازی پرداخته شده است. با توجه به وارداتی بودن این موتور، ساخت نمونه های مشابه، با هزینه پایینتر، اهمیتی دوچندان می یابد. این بخش به دو دسته دوچرخه های الکتریکی آماده و موتورهای قابل نصب بر دوچرخه های معمولی تقسیم می شود.

در جدول زیر، نمونه های دوچرخه الکتریکی ساخت شرکت گلدن موتور با مشخصات آنها آورده شده است.

جدول ۳-۰ نمونه های دوچرخه الکتریکی ساخت شرکت گلدن موتور

مدل دوچرخه	طول موتور	وزن	طول موتور	ولتاژ باتری	قطر	طول موتور	قیمت
SEB-350D	2×750	49	چرخ جلو و عقب	48	45	26"	2250 \$
SEB-350L	1000	41	چرخ عقب	48	45	26"	1680 \$
FEB-600F	400	32	چرخ عقب	36	25	20"	1490 \$
LEB-300	750	41	چرخ عقب	36	35	26"	1450 \$
JoyEbike	750	27	چرخ عقب	36	35	26"	1290 \$
MT-2009	750	27	چرخ عقب	36	35	26"	1380 \$
CRUZ2009	250	26	چرخ عقب	36	25	26"	1450 \$

در جدول زیر نیز، نمونه های موتورهای الکتریکی ساخت شرکت گلدن موتور که برای کاربرد در داخل چرخ دوچرخه های الکتریکی طراحی شده اند، با مشخصات آنها آورده شده است.

جدول ۸-۱ نمونه های موتورهای الکتریکی ساخت شرکت گلدن موتور که برای کاربرد در داخل چرخ

مدل موتور	طول موتور	وزن	ولتاژ باتری	قطر	طول موتور	قیمت
Magic Pie	1000 w	7.5 kg	36-48 v	300 mm	133 mm	133 \$
Smart Pie	400 w	4.6 kg	24-36-48 v	188 mm	130 mm	125 \$
Magic Pie Edge	500 w	5.5 kg	-	-	-	278 \$

باتری دوچرخه الکتریکی، جزئی دیگر از آن است که باید مورد توجه قرار گیرد. در جدول زیر مشخصات باتری های ساخته شده توسط شرکت گلدن موتور آورده شده است.

جدول ۹-۱: باتری های ساخته شده توسط شرکت گلدن موتور

مدل	ولتاژ/ جریان	مدل سل	ساختار	حداکثر دشارژ	جریان شارژ	ابعاد	نوع	قیمت
DLP-01	36V/11.6Ah 48V/11.6Ah	18650GA 3450mAh	10S4P	15-25A	2-3A	375*90*83	LiFe	\$280 \$338
DLP-02	36V/11.6Ah 48V/11.6Ah	18650GA 3450mAh	13S4P	15-25A	2-3A	340*86*130	LiFe	\$290 \$348
WBB	36V/8Ah 24V/10Ah 24V/8Ah	-	-	-	-	-	LiMn	\$215 \$198 \$179
LFP / LBC	24V/10Ah 36V/10Ah	-	-	-	-	-	LiFePO4	\$269 \$198
LFP / LBC	24V/20Ah 36V/10Ah 36V/12Ah 48V/10Ah	-	-	20-30A	-	240*240*390	LiFePO4	\$349 - \$316 \$398
EP- 4815P	48V/15Ah	-	-	-	-	250*150*130	LiFePO4	\$568

۲-۷-۱ طراحی و آنالیز حساسیت موتور دوچرخه الکتریکی

قدم اول در طراحی موتور دوچرخه، طراحی استاتور آن می باشد. برای این منظور، با توجه به مراجع طراحی موتور، ثوابت زیر برای طراحی در نظر گرفته شده اند. قابل توجه است که از آنجاییکه ساختار موتور مدلسازی دقیقی به جز به روش اجزای محدود ندارد، این ثوابت تقریبی می باشند.

جدول ۱۰-۱: ثوابت در نظر گرفته شده برای طراحی

توان	۷۵۰ وات	بازده	۷۰ درصد
ضریب قدرت	۷۰ درصد	بارگذاری الکتریکی	۱۵۰۰۰
Bav	۰.۴	سرعت	۲۰۰ rpm
پیک ولتاژ	۳۴ ولت	اتصال	مثلث

قطب ها	موازی	چگالی جریان	۴ آمپر بر میلیمتر مربع
چگالی شار دندانه	۱.۱ تسلا	چگالی شار یوغ	۱ تسلا
ضریب پر شدگی شیار	۰.۶	نسبت طول به قطب	۲

با توجه به این مقادیر و با استفاده از روابط طراحی، می توان مشخصات زیر را برای استاتور این موتور بدست آورد.

جدول ۱۱-۱: مشخصات استاتور

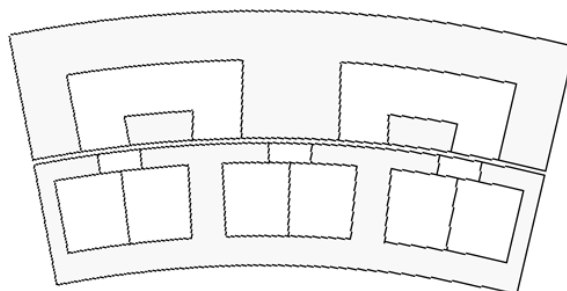
تعداد دور	۱۴۴۰	شعاع داخلی استاتور	۲۲۶.۴ میلیمتر
ابعاد شیار	۷.۵*۱۲.۷۲ میلیمتر	فاصله دو wedge	۳.۵ میلیمتر
عرض دندانه	۳.۵ میلیمتر	ضخامت یوغ	۳ میلیمتر

۱-۷-۲-۱ آنالیز حساسیت و طراحی گام به گام روتور

برای بررسی دقیقتر تاثیر هر یک از عوامل روتور بر گشتاور الکترومغناطیس، در این پروژه مسیری گام به گام در پیش گرفته شده است. به اینصورت که طراحی از ساده به پیچیده انجام می پذیرد. از آنجاییکه ساده ترین طراحی ممکن موتور سنکرون رلوکتانس با یک سد هوایی می باشد، این طرح در مرحله اول بررسی می شود.

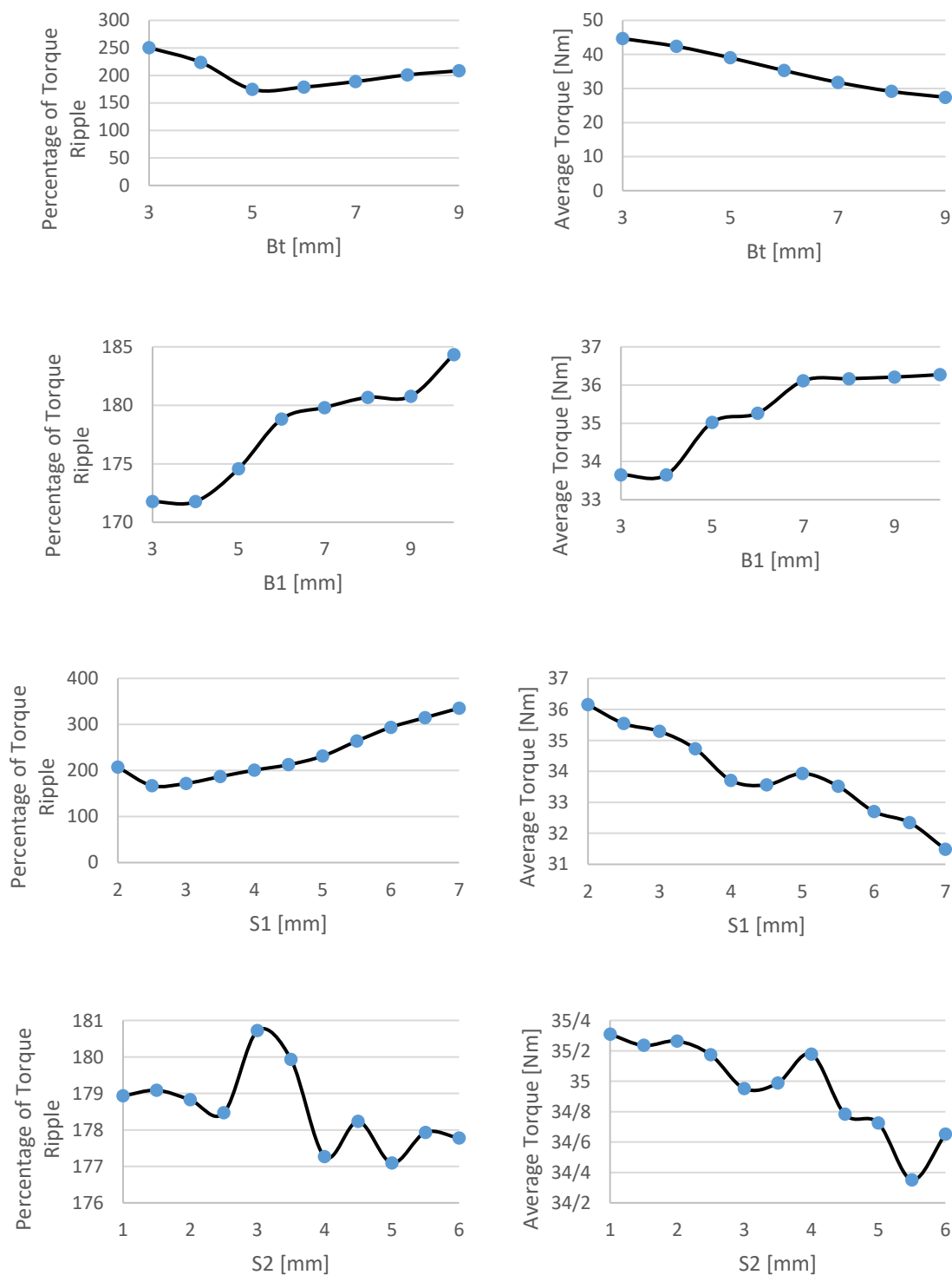
۱-۷-۲-۲ موتور سنکرون رلوکتانس با یک فاصله هوایی

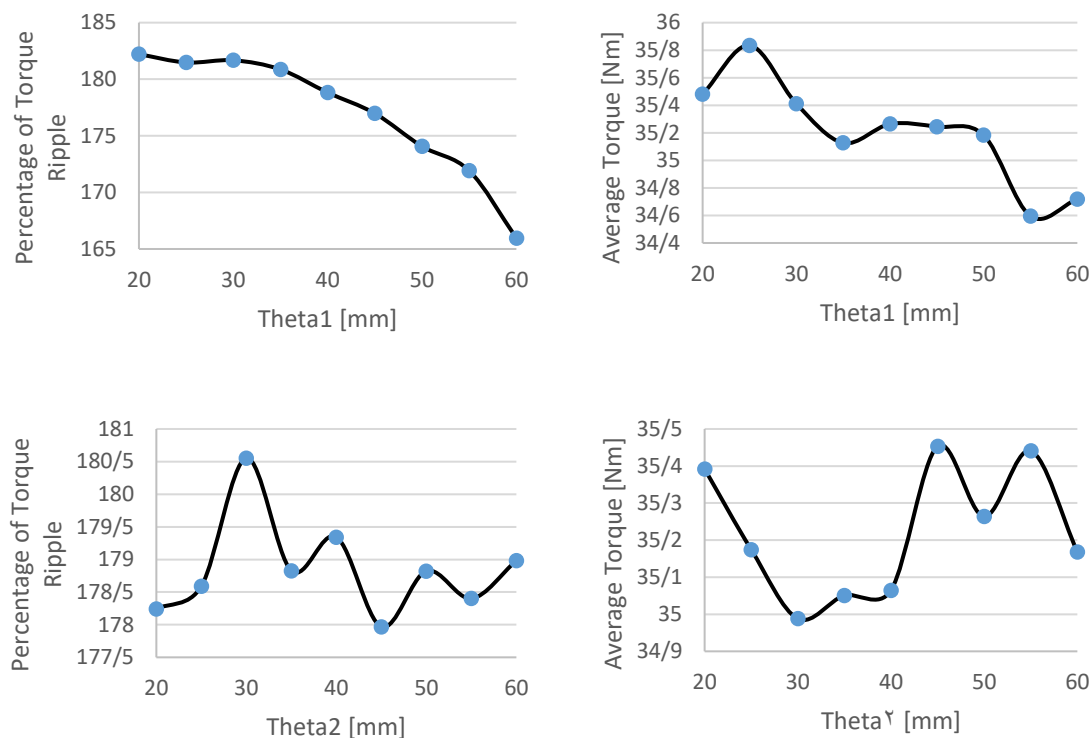
قطاع موتور بررسی شده در اولین گام در شکل زیر نشان داده شده است. در این بررسی، عرض قطاع آهنی اول از سمت راست، با S_1 ، عرض سد هوایی در راستای مماسی با B_{t1} ، عرض فاصله هوایی در راستای شعاع با B_1 ، ارتفاع قطعه آهنی وسط با S_2 ، زاویه ضلع سمت بیرونی سد هوایی با θ_1 و زاویه ضلع داخلی سد هوایی با راستای شعاع با θ_2 نشان داده می شود.



شکل ۲-۰: ساختار ساده سنکرون رلوکتانس اولیه

در قدم اول به منظور تعیین نقطه اولیه برای آنالیز حساسیت، پارامترهای مذکور بصورت تک بعدی تغییر داده می شوند و در هر شبیه سازی تنها یک پارامتر تغییر می یابد. نتایج این شبیه سازی ها در شکل های زیر نشان داده شده است.





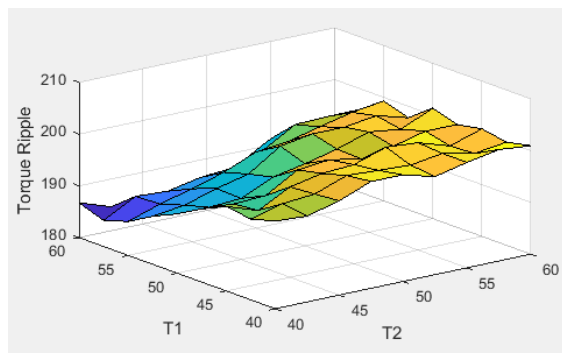
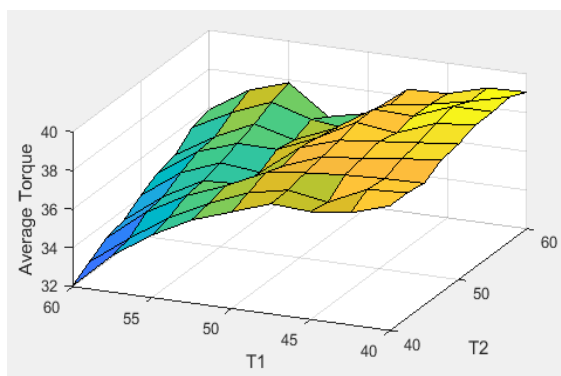
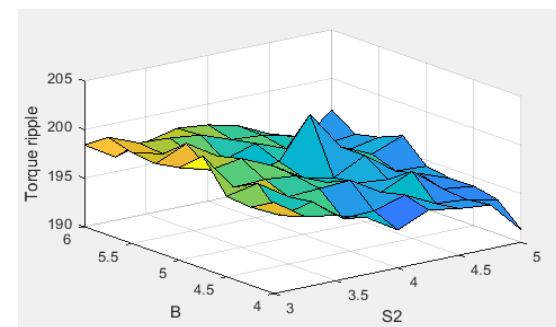
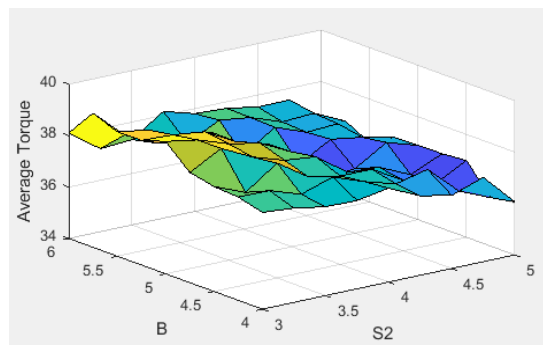
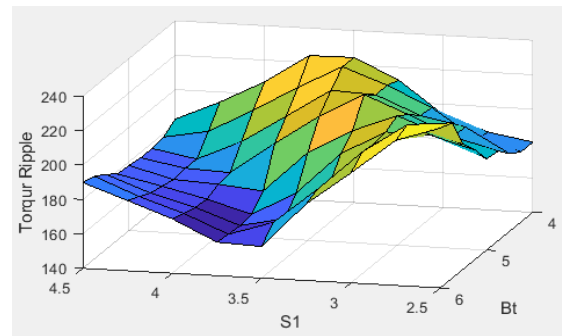
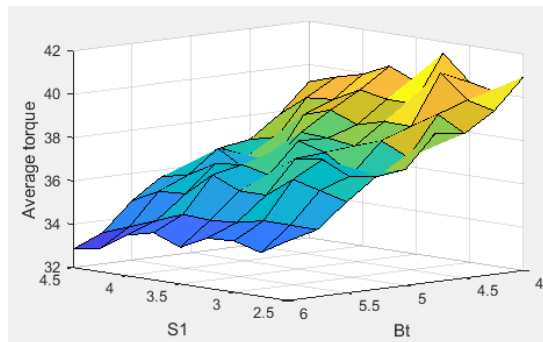
شکل ۱-۰: اثر هر پارامتر بر متوسط و ریبیل گشتاور

با توجه به نمودارهای فوق، جدول زیر به عنوان بهترین مقادیر برای پارامترها در این مرحله، انتخاب گردیده اند.

جدول ۱-۰: مقادیر انتخابی برای هر پارامتر سنکرون رلوتکناسی

B1	6mm	Bt	5mm
S2	4mm	S1	2.5mm
Theta2	45deg	Theta1	50deg

در مرحله بعد این مقادیر به عنوان نقطه اولیه برای شبیه سازی دو بعدی که در آن دو متغیر در آن واحد تغییر داده می شوند استفاده شده اند. از این شبیه سازی ها، نتایج زیر حاصل شده است.



شکل ۱-۰: اثر پارامترها بر عملکرد موتور سنکرون رلوتکناس با تغییر دو به دوی آنها

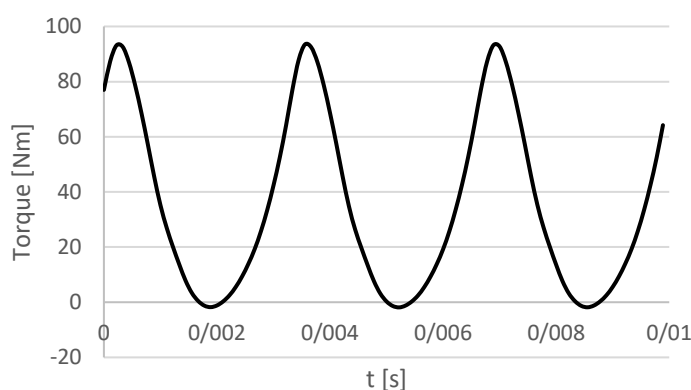
با انجام این شبیه سازی ها، مقادیر زیر برای پارامترهای مدل سازی انتخاب می شوند.

جدول ۱۳-۱: پارامترهای انتخابی برای موتور سنکرون رلوتکناس با شبیه سازی دو به دو

B1	4mm
S2	5mm
Theta2	60deg

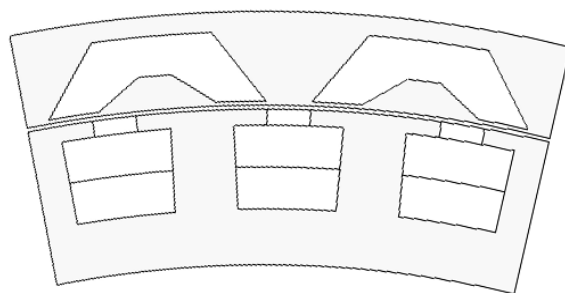
Bt	5mm
S1	3.75mm
Theta1	42.5deg

در مرحله آخر شبیه سازی موتور سنکرون رلوکتانس بدون آهنربا، اثر پل های موجود در روتور که به منظور استحکام مکانیکی روتور بکار می روند بررسی شده است. از آنجاییکه ساختار موتور بصورت روتور خارجی می باشد و دارای تعداد قطب های بالا و در نتیجه قطعات آهن کوچکی می باشد که با سرعت کم چرخش می کنند، پل های آهنی به ضخامت ۰.۵ میلیمتر انتخاب شده اند. نمودار گشتاور موتور در این حالت در شکل زیر نشان داده شده است. موضوعی که این طرح را غیر عملی می کند، علاوه بر رپیل گشتاور بسیار بالای موتور، چگالی گشتاور بسیار پایین موتور است که باعث افزایش طول موتور به ۵۴ سانتیمتر شده است. به این معنی که باید چگالی گشتاور موتور بیش از ۱۵ برابر گردد تا موتور قابل استفاده شود. این مساله اجباری بودن کاربرد آهنربا در آن را نشان می دهد.



شکل ۹-۱: گشتاور موتور سنکرون رلوکتانس بدون آهنربا

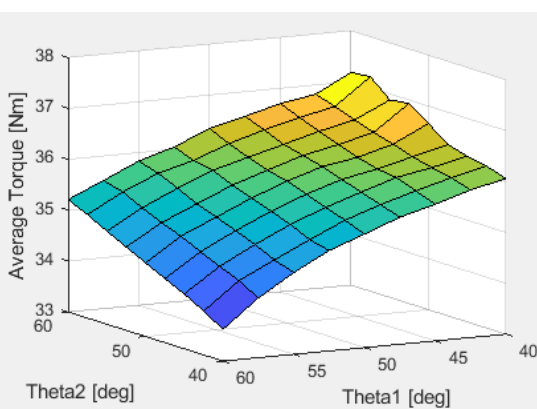
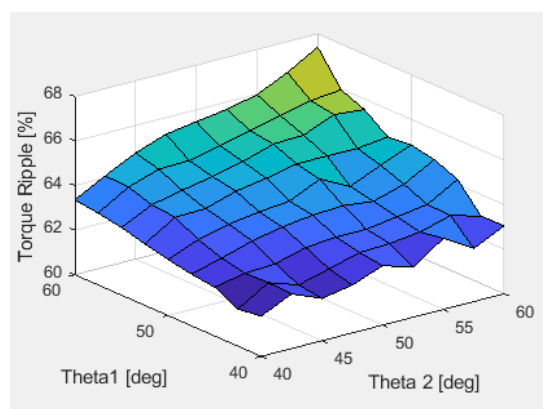
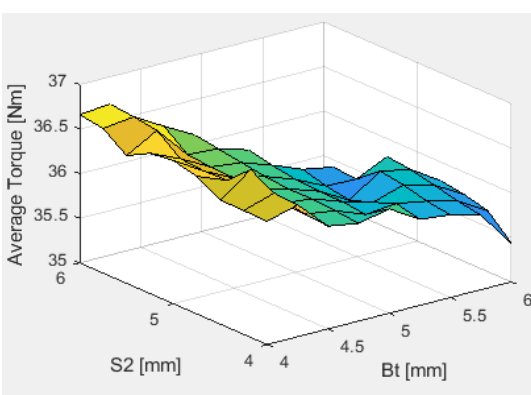
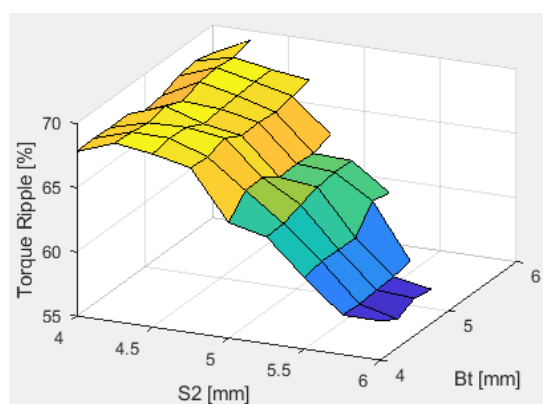
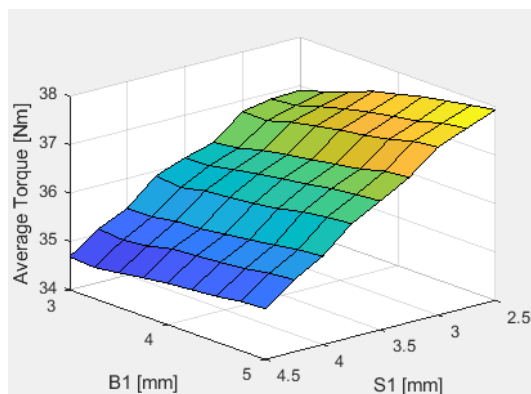
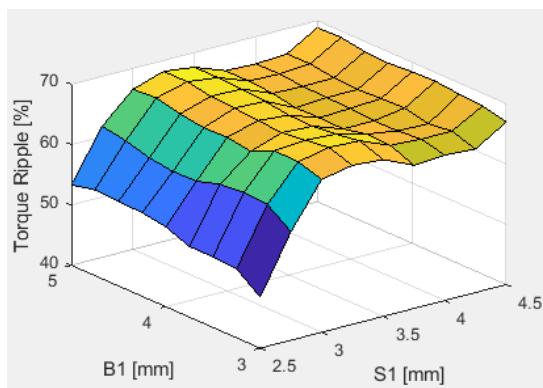
شکل زیر نشان دهنده موتور در این وضعیت می باشد.



شکل ۱۰-۱: شکل موتور سنکرون رلوکتانس بدون آهنربا

۳-۲-۷-۱ موتور سنکرون رلوکتانس فریتی

به منظور بررسی اثر اضافه نمودن فریت به موتور، در مرحله بعد سدهای هوایی با فریتی که در راستای شعاع مغناطیسی شده اند پر شده است. و بهینه سازی تکرار گردیده است. شکل زیر نشان دهنده نتایج شبیه سازی های این مرحله می باشد.



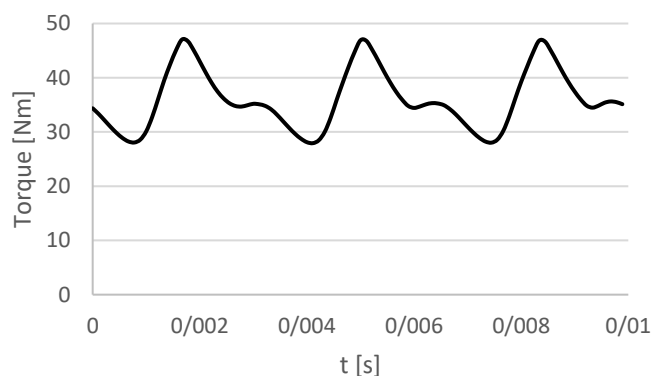
شکل ۱۱-۱: تاثیر پارامترها بر عملکرد سنکرون رلوکتانس فریتی

با توجه به نتایج فوق، می توان نقاط بهینه طراح را در این حالت بصورت جدول زیر انتخاب نمود.

جدول ۱۴-۱: پارامترهای انتخابی برای موتور سنکرون رلوکتانس فریتی

B1	5mm	Bt	6mm
S2	4.25mm	S1	2.5mm
Theta2	60deg	Theta1	40deg

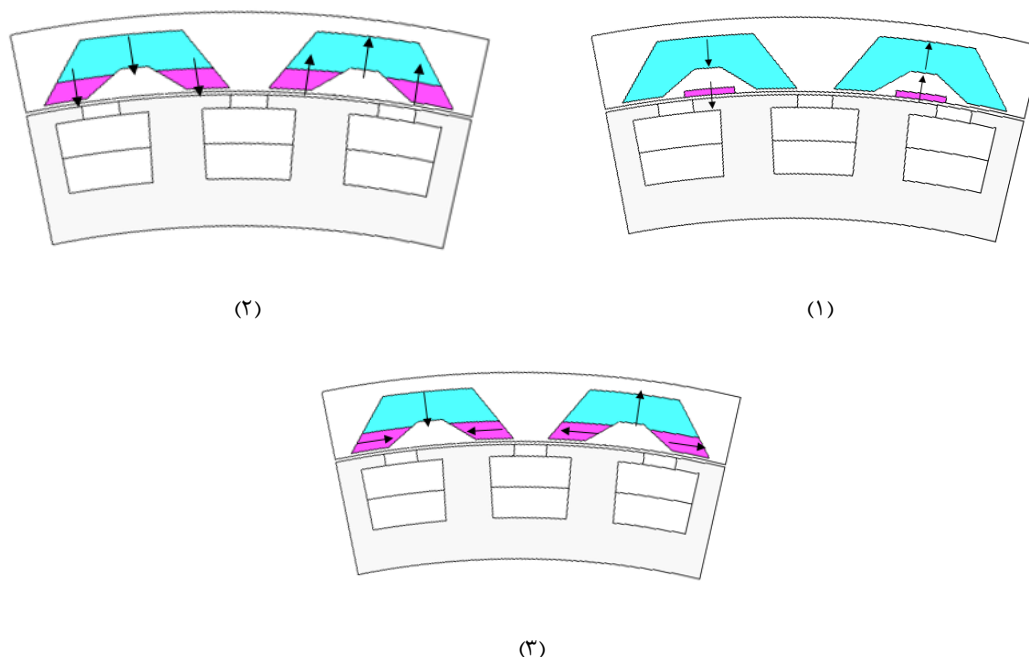
در این حالت، چگالی گشتاور موتور بطور چشمگیری بهبود می یابد و در نتیجه آن می توان طول موتور را به ۵۶.۴ میلیمتر کاهش داد. نمودار گشتاور موتور در این حالت در شکل زیر نشان داده شده است. با توجه به این شکل، رپل گشتاور موتور بسیار کم شده و به حدود ۶۰ درصد رسیده است.



شکل ۱۲-۱: گشتاور موتور فریتی

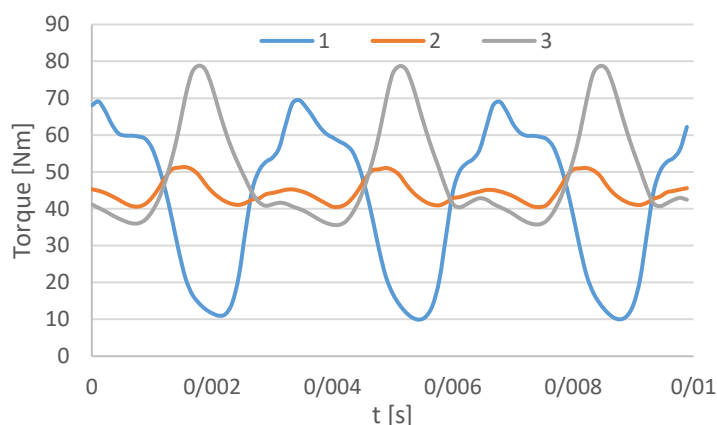
۴-۲-۷-۱ موتور سنکرون رلوکتانس با آهنربای ترکیبی

به منظور بهبود بیشتر عملکرد موتور و افزایش چگالی گشتاور آن، در ادامه استفاده ترکیبی از آهنرباهای نئودیمیومی و فریتی مورد بررسی قرار می گیرد. برای این منظور، در ابتدا ساختار کنار هم قرار گرفتن این آهنرباها مورد بررسی قرار می گیرند. در شکل زیر سه ساختار مختلف در نظر گرفته شده اند. در این شکل ها، قطعات سبز رنگ آهنربای فریتی و قطعات قرمز رنگ آهنربای نئودیمیومی هستند.



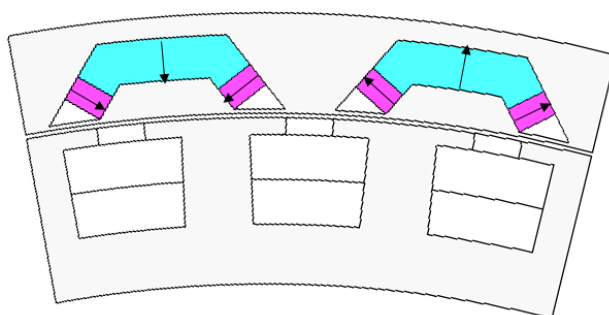
شکل ۱۳-۱: روش های مختلف اضافه نمودن آهنربای نئودیمیومی

گشتاور این طرح ها در شکل زیر نشان داده شده است. مطابق این شکل، حالت سوم از حالات دیگر دارای گشتاور متوسط بالاتری می باشد (حدود ۵۰ نیوتن متر). و از اینرو این طرح انتخاب می گردد. مساله اصلی این طرح، رپل گشتاور بسیار بالای آن است که باید در طراحی حداقل گردد.



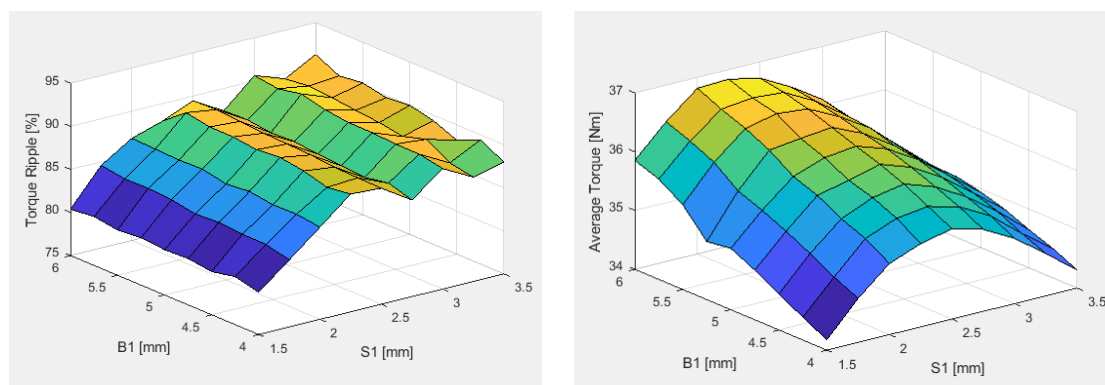
شکل ۱۴-۱: مقایسه گشتاور موتورهای مختلف با ساختارهای فوق

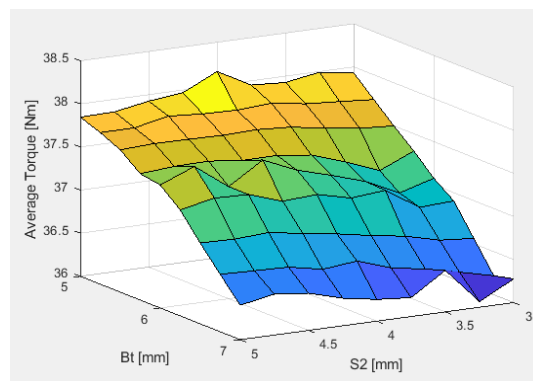
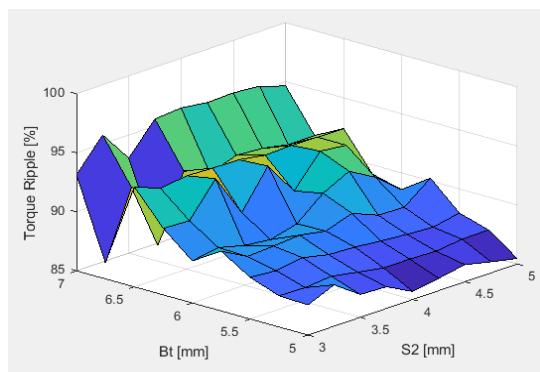
مشکل دیگری که طرح ۳ دارا می باشد، شکل پیچیده آهنربای نئودیمیومی است. از آنجاییکه این آهنرباها بصورت پیش ساخته و مکعبی شکل می باشند، باید آهنربای طراحی شده نیز دارای این شکل باشد. به همین منظور طرح فوق بصورت شکل زیر اصلاح می گردد.



شکل ۱۵-۱: ساختار انتخابی برای بررسی

نتایج شبیه سازی های بهینه سازی طرح فوق در شکل زیر آورده شده است.





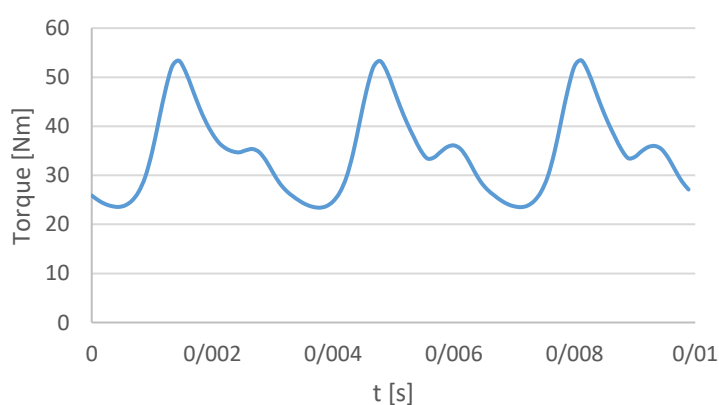
شکل ۱۶-۱: مشخصات عملکردی برای حالت پایه

با توجه به این شبیه سازی ها، پارامترهای زیر برای موتور در نظر گرفته شده اند.

جدول ۱۵-۱: نقطه بهینه برای حالت پایه

B1	6mm	Bt	5mm
S2	4 mm	S1	2.5mm
Theta2	40deg	Theta1	40deg

در این طرح، طول موتور به ۳۶ میلیمتر کاهش یافته است که مقدار بسیار مطلوبی می باشد. شکل گشتاور این موتور نیز در شکل زیر نشان داده شده است. مشکل این طرح رپل گشتاور بالای آن است (حدود ۸۰ درصد) که در ادامه به منظور کم نمودن آن تلاش می شود.

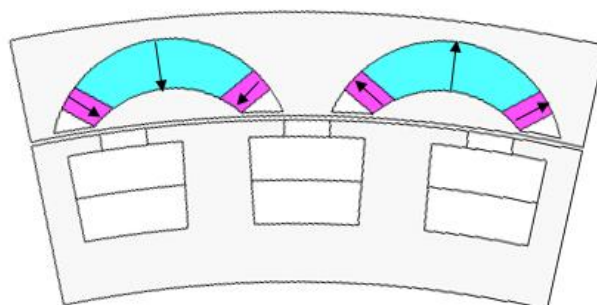


شکل ۱۷-۱: شکل موج گشتاور برای حالت پایه

۵-۲-۷-۱ بررسی تاثیر شکل سدهای هوایی بر عملکرد موتور

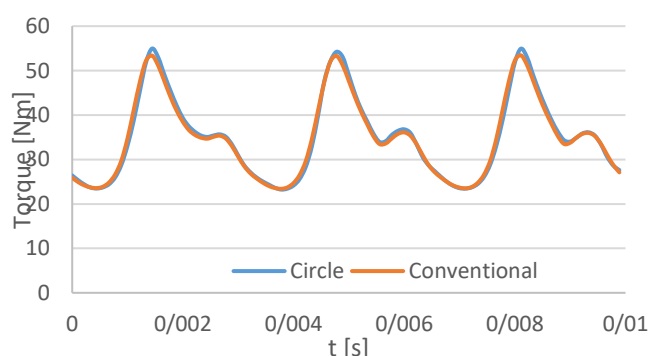
اگر چه اشکال مختلفی برای موتور سنکرون رلکتانس پیشنهاد شده است، شکل هایی که قابلیت کاربرد مگنت در آنها وجود داشته باشد و شکل مگنت دارای سطح مقطع مستطیل شکل باشد بسیار محدود هستند. به

منظور اثر شکل سدهای هوایی بر گشتاور موتور، پس از بررسی اشکال مختلف ارائه شده در مراجع، شکل قطاع دایره ای شکل نشان داده شده در شکل زیر برای بررسی دقیقتر انتخاب گردید. ابعاد دواپر در این شکل به گونه ای انتخاب شده اند که مطابق یا شکل شیار در ساختار قبلی باشند.



شکل ۱۸-۱: حالت پایه با مگنت استوانه ای

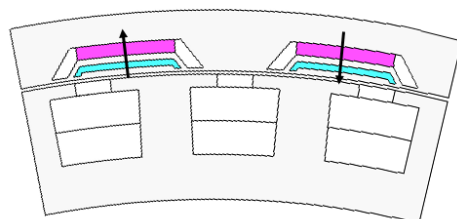
نمودار گشتاور ساختار فوق در شکل زیر نشان داده شده است. مطابق شکل زیر، تغییر شکل شیار دارای اثری بسیار کم می باشد. دلیل این امر، قابلیت تطابق و انعطاف پذیری بالای ساختار قبل می باشد. با توجه به این شبیه سازی، ساختار قبل به عنوان ساختار منتخب برای یک سد هوایی انتخاب می شود.



شکل ۱۹-۱: مقایسه گشتاور مگنت مربعی و استوانه ای

۶-۲-۷-۱ بررسی تاثیر ساختار دارای دو سد هوایی

به منظور کاهش رپل گشتاور و افزایش گشتاور رلوکتانسی موتور، بهتر است که تعداد سدهای هوایی در هر قطب بالاتر باشد، با این وجود بالا بودن تعداد سدهای هوایی باعث سخت تر شدن ساخت، بالا رفتن تعداد قطعات آهنربا، کوچک تر شدن ابعاد سدهای هوایی و سخت تر شدن برش و جاسازی آهنربا در آنها، می گردد. با توجه به این مشکلات، تعداد سدهای هوایی ۲ در نظر گرفته شده است که در ادامه به بررسی آن پرداخته می شود. شکل زیر نشان دهنده این موتور می باشد. در اولین ساختار فرض شده است که آهنربای نئودیمیومی در ردیف بالا و آهنربای فریتی در ردیف پایین قرار دارد.



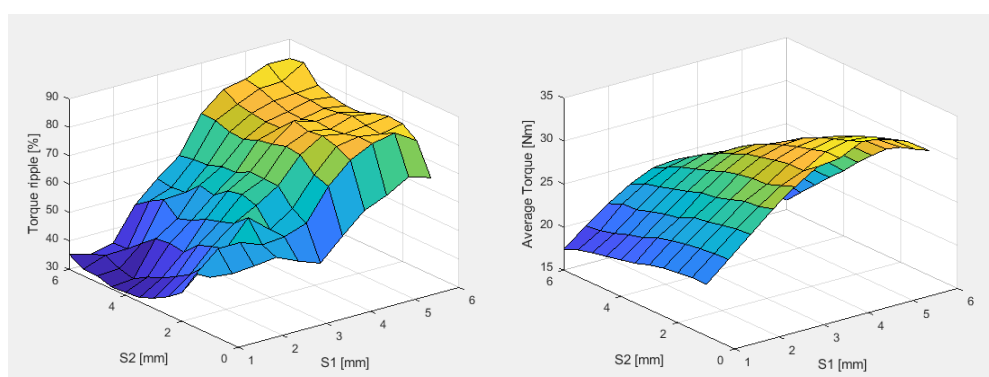
شکل ۲۰-۱: ساختار دو لایه با مغنت نفوذمیومی بالا و فریتی پایین

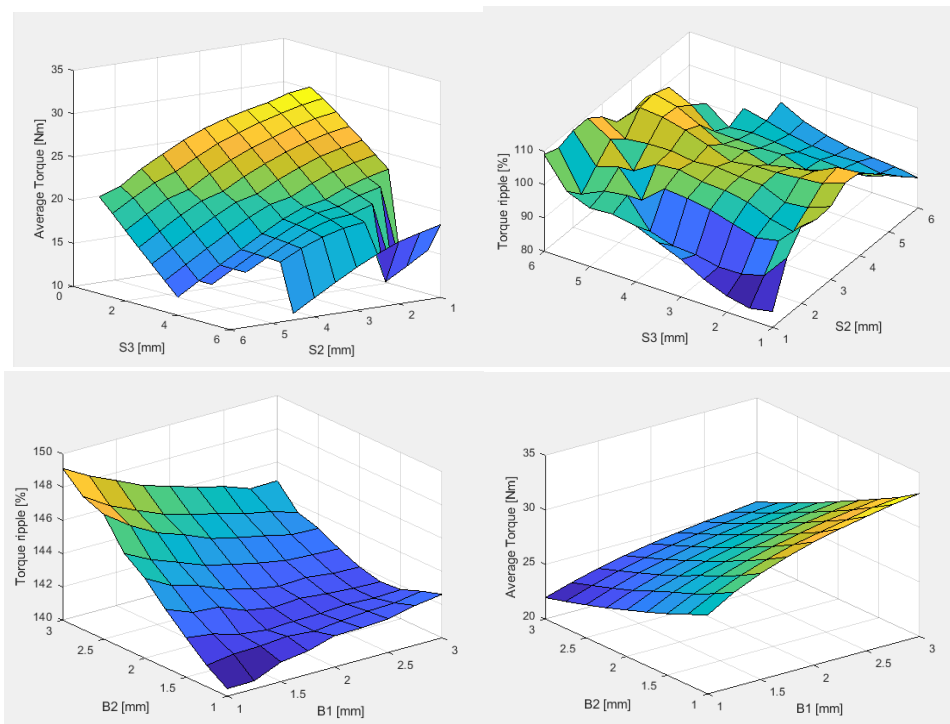
پارامترهای این شکل در جدول زیر توضیح داده شده اند.

جدول ۱۶-۱: پارامترهای ساختار دو لایه

نصف عرض قسمت آهنی بین دو قطب	S_1
عرض قسمت آهنی بین دو سد هوایی	S_2
ارتفاع داخلی ترین قسمت آهنی	S_3
عرض سد هوایی بیرونی در راستای محیطی	B_{t1}
عرض سد هوایی درونی در راستای محیطی	B_{t2}
ارتفاع سد هوایی بیرونی در راستای شعاع	B_1
ارتفاع سد هوایی درونی در راستای شعاع	B_2

با توجه به پارامترهای فوق، نتایج زیر از تحلیل حساسیت آنها بدست آمده است.





شکل ۲۱-۱: شبیه سازی ساختار دو لایه با مغنت نئودیمیومی بالا و فریتی پایین

بر اساس شبیه سازی های فوق، مقادیر زیر به عنوان بهترین حالت در نظر گرفته می شود.

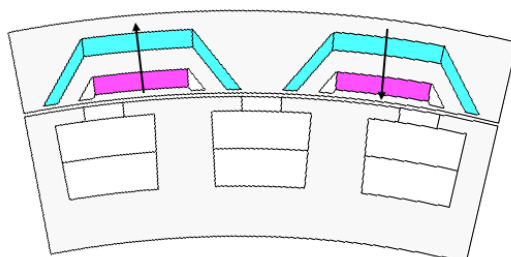
جدول ۱۷-۱: پارامترهای انتخابی ساختار دو لایه با مغنت نئودیمیومی بالا و فریتی پایین

S ₁	۴.۵	B _{t2}	۱
S ₂	۱	B ₁	۳
S ₃	۱	B ₂	۱
B _{t1}	۲.۵		

در این حالت مقدار گشتاور و ریپل گشتاور به ترتیب برابر ۳۲.۵ نیوتن متر و ۷۹ درصد می شود.

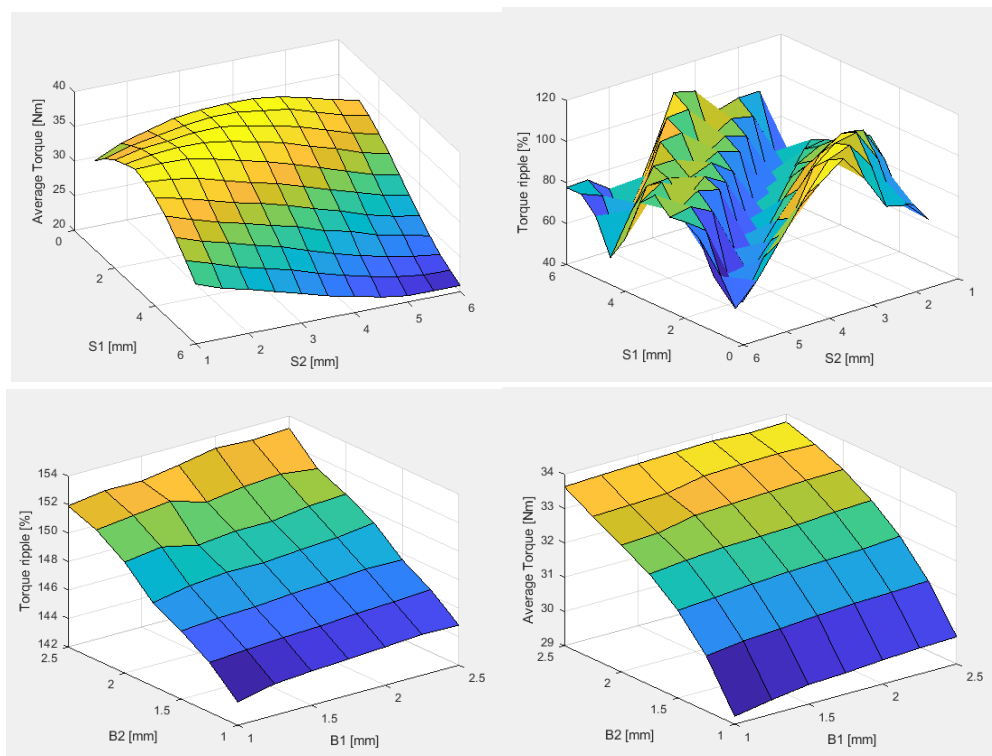
در قدم بعد، فرض شده است که همانند شکل زیر آهنربای نئودیمیومی در شیار پایین و آهنربای فریتی در

شیار بالایی قرار گرفته اند.



شکل ۲۲-۱: ساختار دو لایه با مغنت نئودیمیومی پایین و فریتی بالا

این وضعیت از وضعیت قبل که در آن آهنرباهای نئودیمیومی بالا بودند از این نظر که حجم آهنرباهای نئودیمیومی کمتر از فریتی خواهد شد مناسب تر است. نتایج این شبیه سازی در شکل زیر نشان داده شده است.



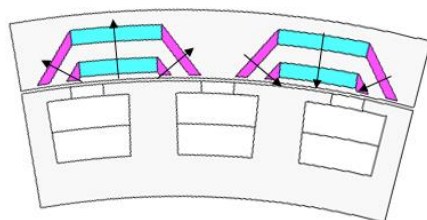
شکل ۲۳-۱: شبیه سازی ساختار دو لایه با مغنت نئودیمیومی پایین و فریتی بالا

بر اساس شبیه سازی های فوق، مقادیر زیر به عنوان بهترین حالت در نظر گرفته می شود.

جدول ۱۸-۱: پارامترهای منتخب ساختار دو لایه با مغنت نئودیمیومی پایین و فریتی بالا

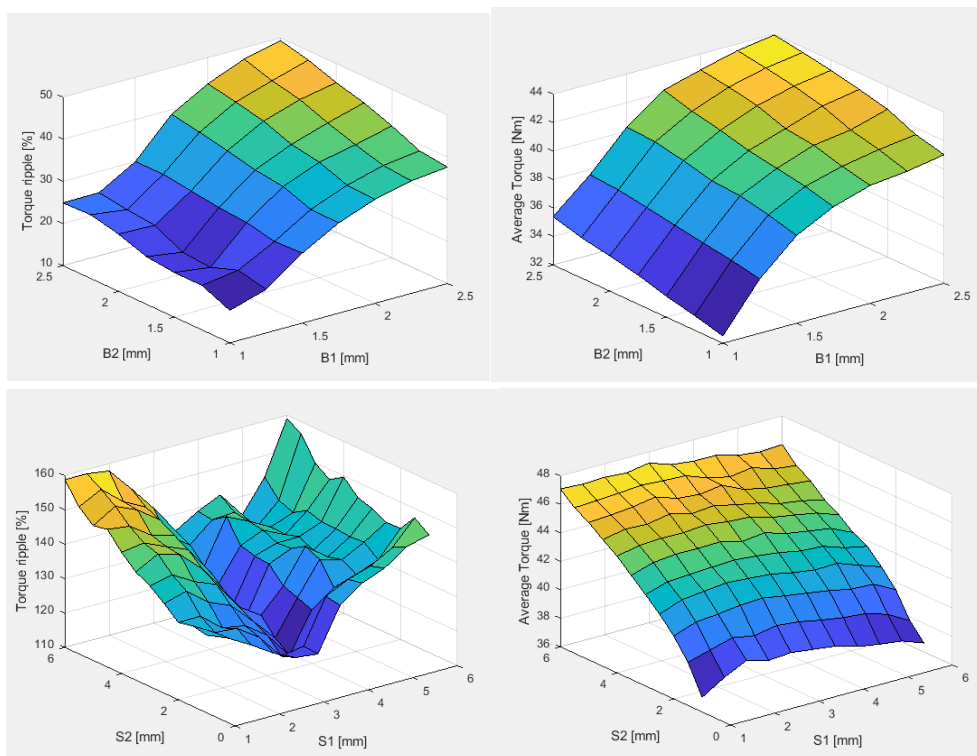
S ₁	۲	B _{t2}	۲
S ₂	۳	B ₁	۲.۵
S ₃	۱	B ₂	۲.۵
B _{t1}	۲		

در این حالت مقدار گشتاور و ریپل گشتاور به ترتیب برابر ۳۷.۴ نیوتن متر و ۹۱ درصد می شود. به منظور بررسی بیشتر، در قدم بعد فرض شده است که هر دو نوع آهنربا بخشی از هر یک از شیارها را اشغال می نمایند. در این حالت، در اولین حالت شکل زیر برای شبیه سازی در نظر گرفته شده است.



شکل ۲۴-۱: ساختار دو لایه با مغنت نئودیمیومی در کناره ها و فریتی وسط

نتایج شبیه سازی این حالت در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۲۵-۱: شبیه سازی ساختار دو لایه با مغنت نئودیمیومی در کناره ها و فریتی وسط

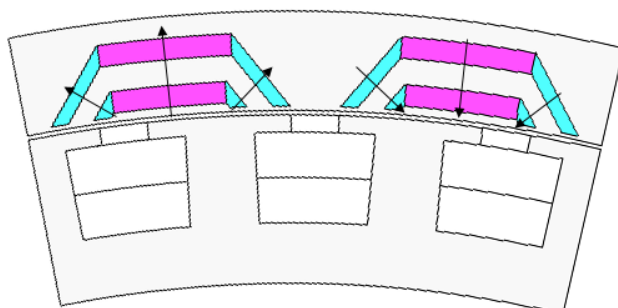
بر اساس شبیه سازی های فوق، مقادیر زیر به عنوان بهترین حالت در نظر گرفته می شود.

جدول ۱۹-۱: نتایج بهینه ساختار دو لایه با مغنت نئودیمیومی در کناره ها و فریتی وسط

S_1	۶	B_{t2}	۲
S_2	۳	B_1	۲.۵
S_3	۱	B_2	۲.۵
B_{t1}	۲		

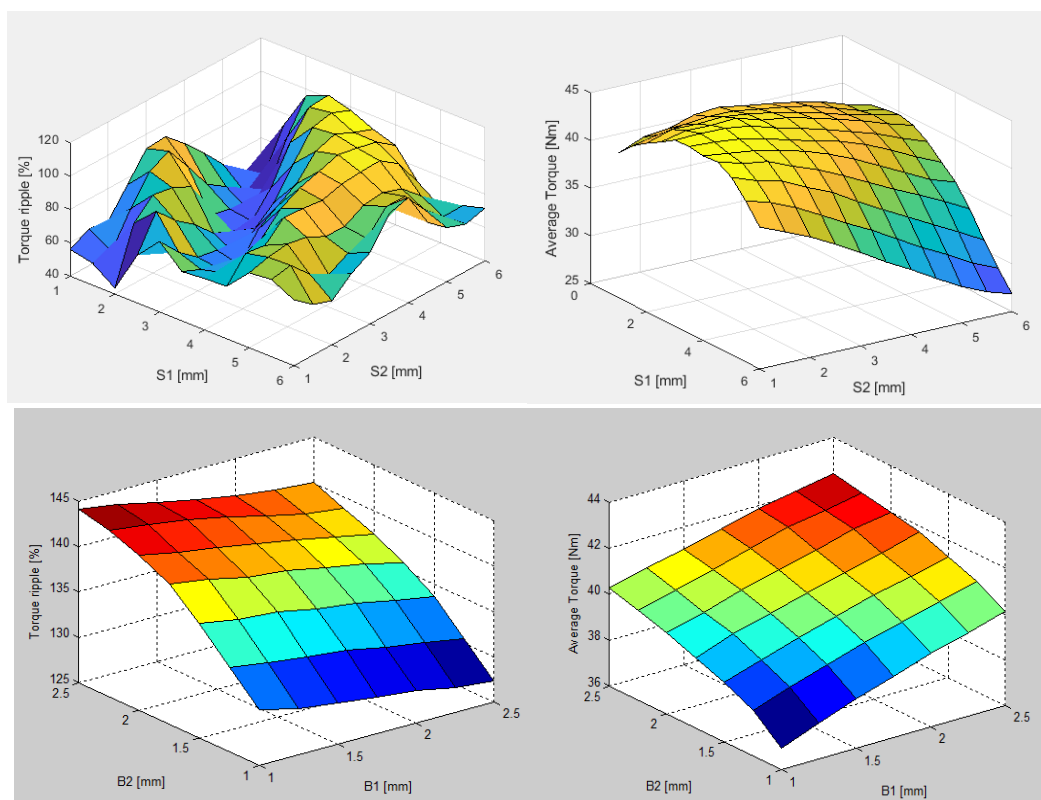
در این حالت مقدار گشتاور و ریپل گشتاور به ترتیب برابر ۴۷.۴ نیوتن متر و ۱۳۰ درصد می شود.

به منظور بررسی بیشتر، در حالت دوم، جای آهنرباها با یکدیگر عوض می شوند. در این حالت، شکل زیر برای شبیه سازی در نظر گرفته شده است.



شکل ۲۶-۱: ساختار دو لایه با مغنت فریتی در کناره ها و نئودیمیومی وسط

نتایج شبیه سازی این حالت در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۲۷-۱: نتایج شبیه سازی ساختار دو لایه با مغنت فریتی در کناره ها و نئودیمیومی وسط

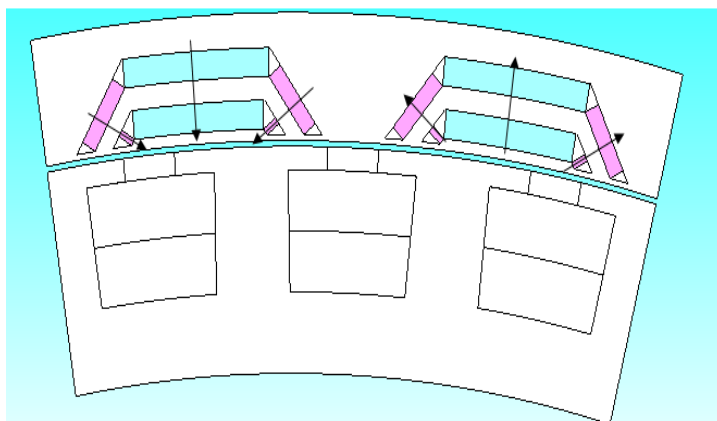
بر اساس شبیه سازی های فوق، مقادیر زیر به عنوان بهترین حالت در نظر گرفته می شود.

جدول ۲۰-۱: حالت بهینه ساختار دو لایه با مگنت فریتی در کنارها و نئودیمیومی وسط

S_1	۲	B_{t2}	۲
S_2	۲	B_1	۲.۵
S_3	۱	B_2	۲.۵
B_{t1}	۲		

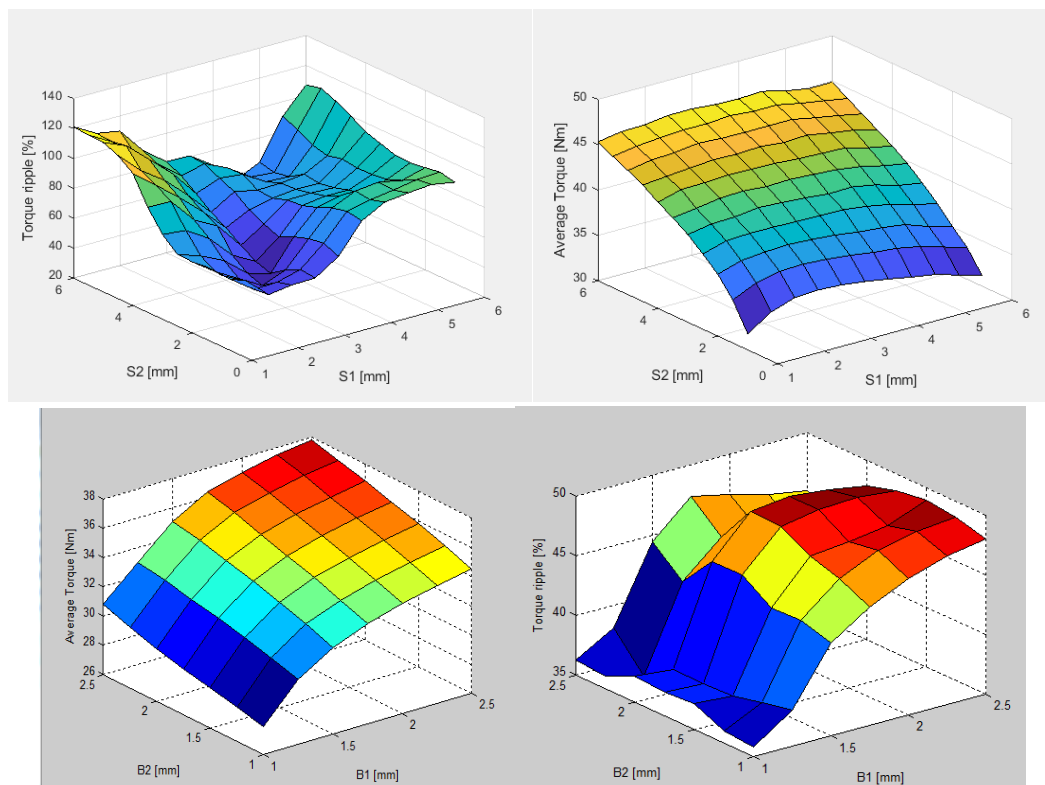
در این حالت مقدار گشتاور و ریپل گشتاور به ترتیب برابر ۴۴.۵ نیوتن متر و ۶۱ درصد می شود. با توجه به شکل های فوق، در این حالت، ساختاری که در آن آهنربای نئودیمیومی در اطراف قرار دارد نه تنها دارای گشتاور بیشتری است بلکه مقدار آهنربای نئودیمیومی آن نیز کمتر است. از اینرو این ساختار انتخاب می گردد. باید متذکر شد که گشتاور متوسط با بالارفتن اندازه آهنربای نئودیمیومی بالا می رود و از آنجا که در این پروژه فرض شده است که اندازه آهنربای فریتی باید بیشتر از آهنربای نئودیمیومی باشد، اندازه S_2 برابر ۳ میلیمتر در نظر گرفته می شود. و برابر ۶ در نظر گرفته نمی شود.

به منظور کاربردی تر شدن ساختار، شکل آهنرباهای نئودیمیومی به شکل مستطیل طراحی می گردند. شکل زیر نشان دهنده این ساختار می باشد.



شکل ۲۸-۱: ساختار دو لایه با مگنت مستطیلی نئودیمیومی در کنارها و فریتی وسط

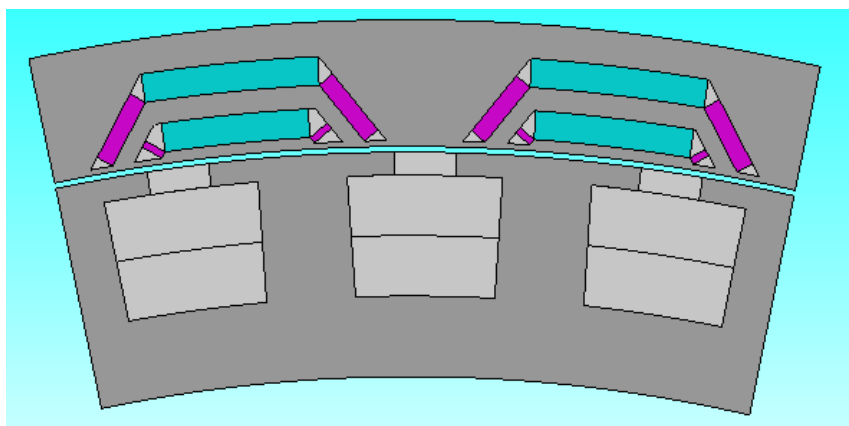
نتایج تغییر پارامترهای این ساختار در شکل های زیر نشان داده شده است.



شکل ۲۹-۱: نتایج شبیه سازی ساختار دو لایه با مغنت مستطیلی نئودیمیومی در کناره ها و فیرتی وسط
بر اساس شبیه سازی های فوق، مقادیر زیر به عنوان بهترین حالت در نظر گرفته می شود.
جدول ۲۱-۱: حالت بهینه ساختار دو لایه با مغنت مستطیلی نئودیمیومی در کناره ها و فیرتی وسط

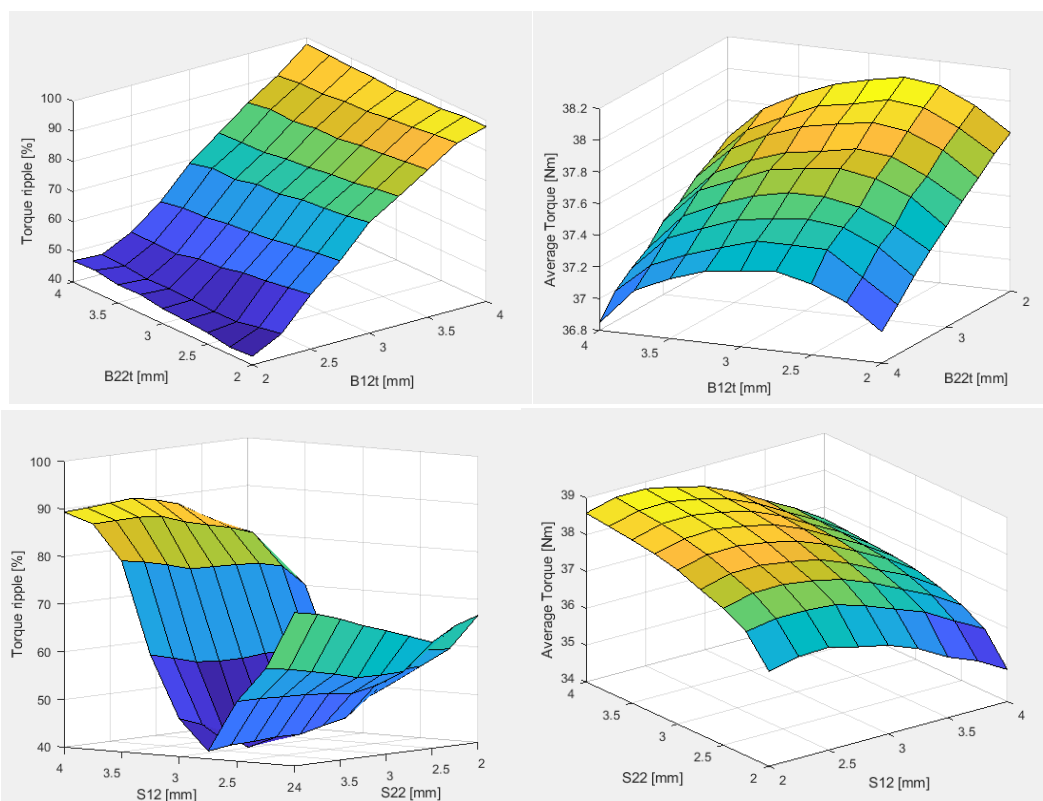
S ₁	۳	B _{t2}	۲
S ₂	۲	B ₁	۲.۵
S ₃	۱	B ₂	۲.۵
B _{t1}	۲		

در این حالت مقدار گشتاور و ریپل گشتاور به ترتیب برابر ۳۷.۸ نیوتن متر و ۴۷ درصد می شود.
در گام بعد به منظور کاهش ریپل گشتاور، تغییر شکل قطب ها نسبت به یکدیگر بررسی شده است. شکل
زیر نشان دهنده این حالت می باشد.



شکل ۳۰-۱: تغییر شکل قطب های مجاور نسبت به یکدیگر

نتایج شبیه سازی در شکلهای زیر آورده شده است.



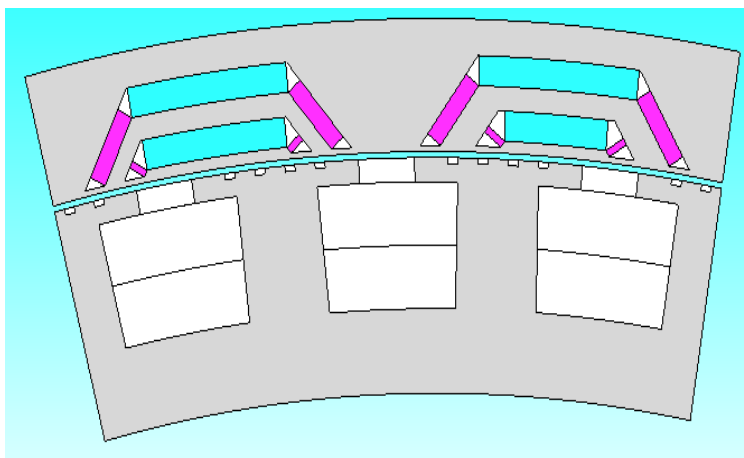
شکل ۳۱-۱: نتایج شبیه سازی تغییر شکل قطب های مجاور نسبت به یکدیگر

مطابق شکل های فوق، تاثیر این کار بر رپل گشتاور بسیار محدود می باشد. بهترین حالت مطابق شکل فوق بصورت زیر انتخاب می گردد. بر اساس این جدول، اندازه یکی از بریر ها در راستای مماسی برابر ۲ و دیگری برابر ۲.۵ انتخاب می شود. در این حالت، رپل گشتاور ۴۰ درصد می شود.

جدول ۲۲-۱: پارامترهای بهینه تغییر شکل قطب های مجاور نسبت به یکدیگر

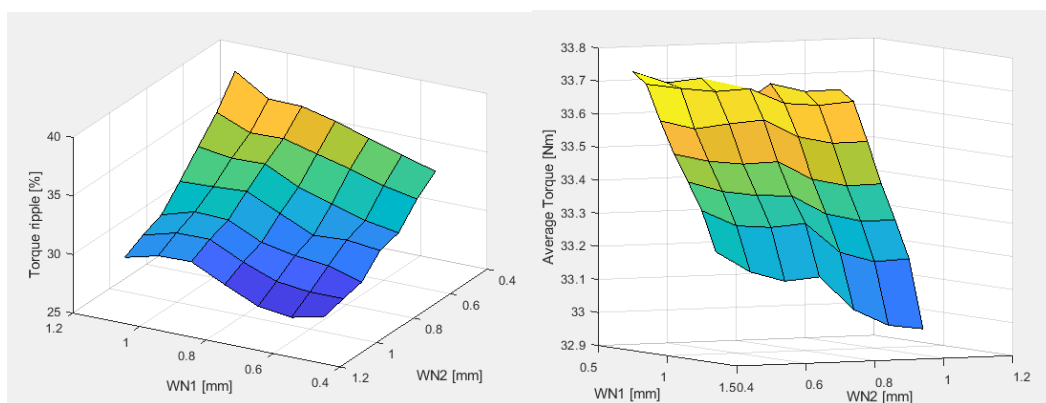
S_1	۳	B_{t22}	۲.۵
S_2	۲	B_{t12}	۲
S_3	۱	B_1	۲.۵
B_{t1}	۲	B_2	۲.۵

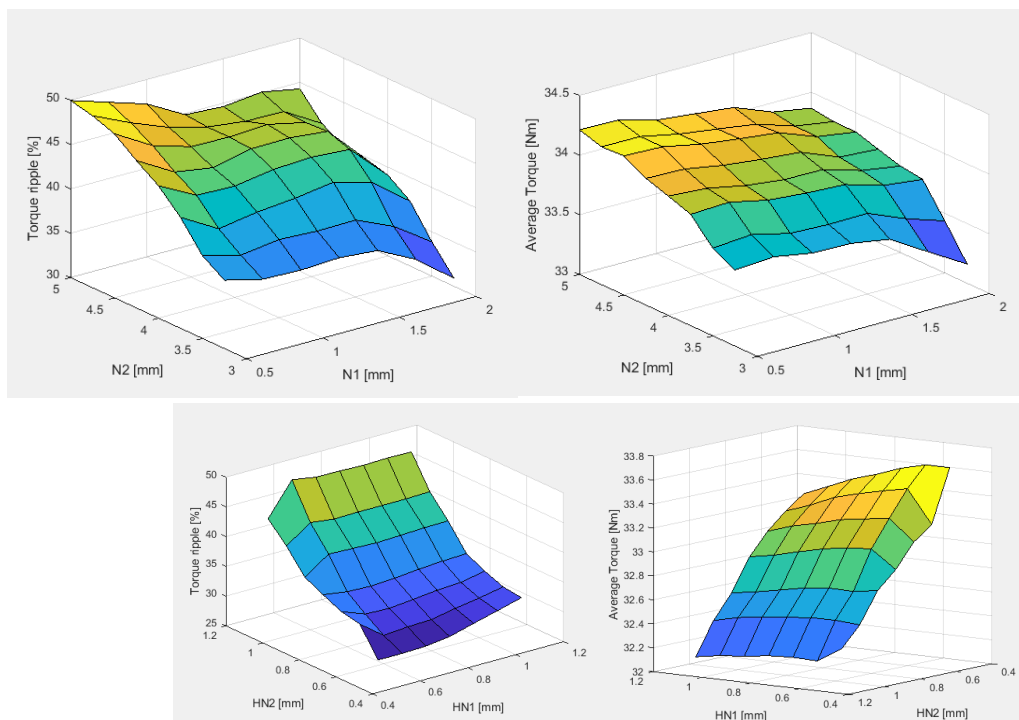
در گام بعد اثر ایجاد شکاف های کوچک یا ناچ بر روی استاتور بررسی شده است. از آنجاییکه فضای روتور به دلیل بریرها محدود است، اثر ناچ بر استاتور مورد بررسی قرار گرفته است. شکل این ساختار در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۳۲-۱: ایجاد ناچ بر استاتور

نتایج شبیه سازی در شکل زیر آورده شده است. مطابق این شکل ها، WN نشان دهنده عرض ناچ ها، HN نشان دهنده ارتفاع ناچ ها می باشد. همچنین ۱ نشان دهنده ناچ های داخلی و ۲ نشان دهنده ناچ های خارجی می باشند. به علاوه N1 فاصله ناچ های داخلی از مرکز دندانه و N2 فاصله ناچ های بیرونی از ناچ های داخلی می باشد.

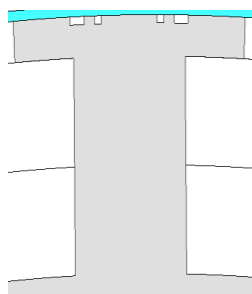




شکل ۳۳-۱: شبیه سازی ناچ بر استاتور

بر اساس نتایج فوق، ابعاد پارامترهای فوق مطابق جدول زیر انتخاب می گردند. و شکل ناچ نیز مطابق زیر

می گردد.



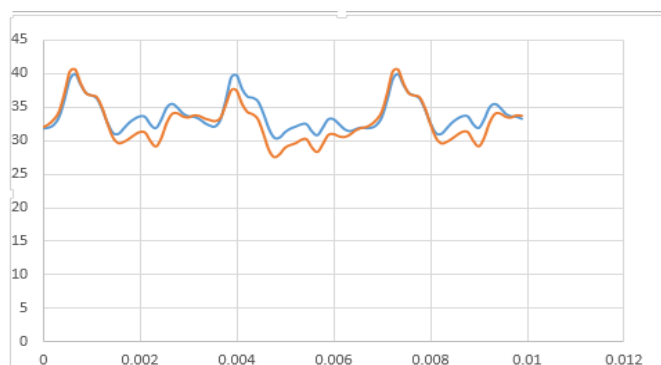
شکل ۳۴-۱: شکل ناچ بهینه

جدول ۲۳-۱: توان مورد نیاز دوچرخه برقی در شرایط مختلف

	WN	HN	N
1	۰.۵	۰.۴	۲
2	۱	۰.۴	۳.۲۵

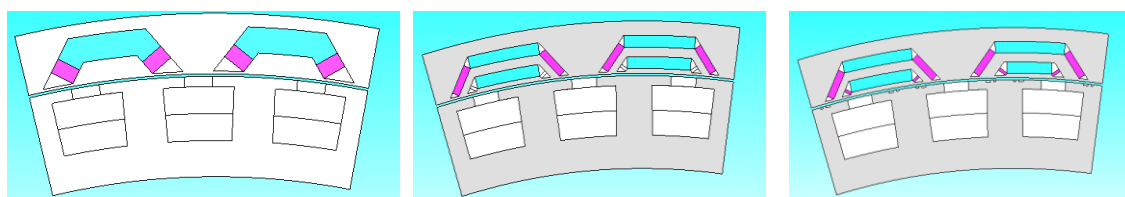
شکل فوق شکل ساختار نهایی دو لایه را نشان می دهد با این وجود به دلیل اینکه اندازه آهنرباهای نئودیمیومی در لایه داخلی بسیار کوچکی باشد، این آهنرباها حذف می گردند. مقایسه گشتاور تولیدی در این

دو حالت، در نمودار زیر آورده شده است. مطابق این شکل، حذف آهنربا تاثیر بسیار کمی بر عملکرد موتور گذاشته است.



شکل ۳۵-۱: تفاوت گشتاور با ناچ (منحنی آبی رنگ) و بدون ناچ (قرمز رنگ)

در قدم بعد، اسکيو نمودن استاتور مورد بررسی قرار گرفته است. نتايج اسكيو بر موتورهای مختلف در شکل زیر نشان داده شده است. از نظر چگالی گشتاور، موتور دو شاره ساده با اسكيو بهترین عملکرد را دارد اما از نظر رپل گشتاور، موتور تک شاره بهترین عملکرد را دارد. زاویه اسكيو در این شبیه سازی ها برابر نصف گام شیار انتخاب شده است.

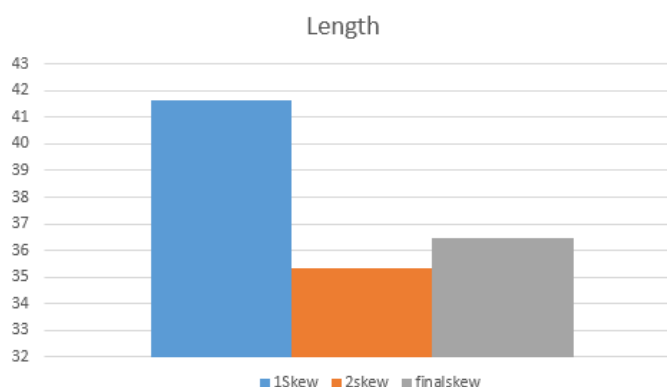


(ج)

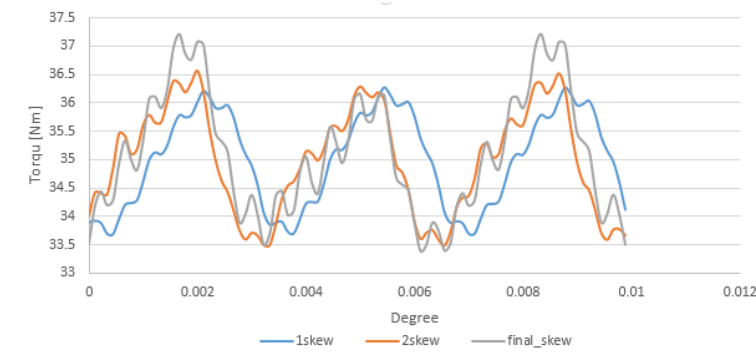
(ب)

(آ)

شکل ۳۶-۱: ساختارهای مختلف انتخاب شده برای مقایسه با یکدیگر آ: دو شیاره با ناچ و اسكيو و تغییر شکل قطب ها. ب: دو شیاره ساده با اسكيو و ج: تک شیاره با اسكيو

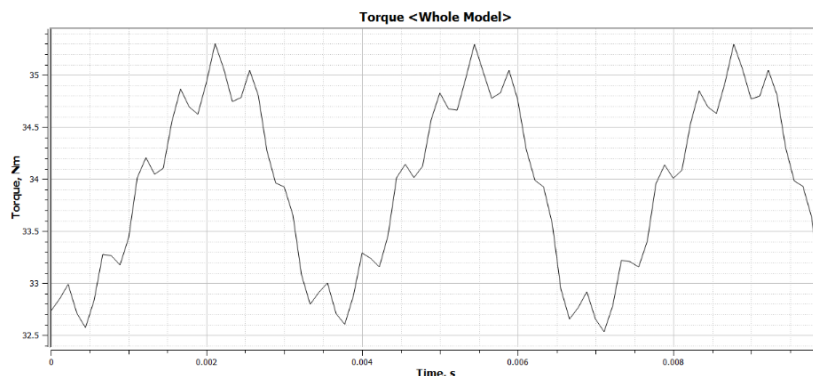


شکل ۳۷-۱: طول موتورها برای رسیدن به گشتاور یکسان



شکل ۳۸-۱: رپیل گشتاور موتورهای شکل قبل

به عنوان قدم آخر، اثر slot opening shift بررسی شده است. زاویه شیفت برابر نصف گام شیار در نظر گرفته شده است. طول موتور در این شبیه سازی برابر ۴۰ میلیمتر می باشد. به منظور یکسان سازی گشتاور با حالت قبل، طول باید برابر ۴۱.۲ میلیمتر گردد. این مساله نشان دهنده این است که اسکيو و slot opening shift چگالی گشتاورهای یکسانی را خواهند داشت. از لحاظ رپیل گشتاور نیز با توجه به شکل های ارائه شده، تفاوت چندانی بین این دو روش وجود ندارد. از اینرو به دلیل ساخت آسانتر طبیعی است که اسکيو به عنوان طرح منتخب انتخاب می گردد.



شکل ۳۹-۱: رپیل گشتاور طرح تک شیاره پس از روش slot opening shift

ضریب قدرت پایین و چگالی گشتاور SynRM ها منجر به تقاضای توان بالاتر برای کنترل موتور می شود. بنابراین از دیدگاه سطح سیستم، دوچرخه الکترونیکی مبتنی بر SynRM می تواند گران تر از موتور سنکرون PM (PMSM) باشد. PMSynRM از هر دو بخش رلوکتانس و گشتاور مغناطیسی به طور همزمان بهره می برد. این توپولوژی به PM های کمتری نسبت به PMSM ها نیاز دارد زیرا بخش قابل توجهی از گشتاور ناشی از مولفه رلوکتانس است. بر اساس اهداف و محدودیت های خاص ذکر شده در بخش اول، یک طراحی PMSynRM مناسب می تواند راه حلی برای کاهش هزینه PM BLDCM و PMSM و غلبه بر چگالی گشتاور پایین (حجم و وزن بالا) و رپیل گشتاور بالا SRMs و SynRMs باشد.

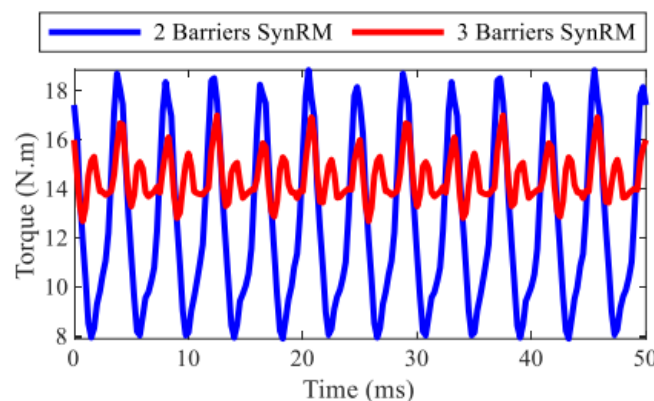
به منظور ارزیابی اولیه کیفی، نتایج مقایسه ای مبتنی بر FE در جدول ۲۴-۱ برای نمونه ای ۵۰۰ وات، ۲۱۰ دور در دقیقه، روتور بیرونی (PMSynRM) در ناحیه حداکثر گشتاور در آمپر با فرض کج بودن/غیر اریب

ارائه شده است. استاتور کج، دو یا سه روتور مانع شار با و بدون آهنربا. در این جدول، به ترتیب میانگین گشتاور الکترومغناطیسی و ریبیل گشتاور نشان داده شده است. مقایسه نشان می‌دهد که موج گشتاور و گشتاور متوسط در PMaSynRM اریب با PMهای خاکی کمیاب می‌تواند به ترتیب ۳۵ درصد کمتر و ۵۸ درصد بیشتر از SynRM باشد. همچنین، نشان می‌دهد که استفاده از PM می‌تواند ضریب توان (PF) را ۱۹٪-۳۵٪ بهبود بخشد.

جدول ۲۴-۱: گشتاورهای متوسط، امواج گشتاور و ضرایب قدرت برای SYNRMهای مختلف (PMA)

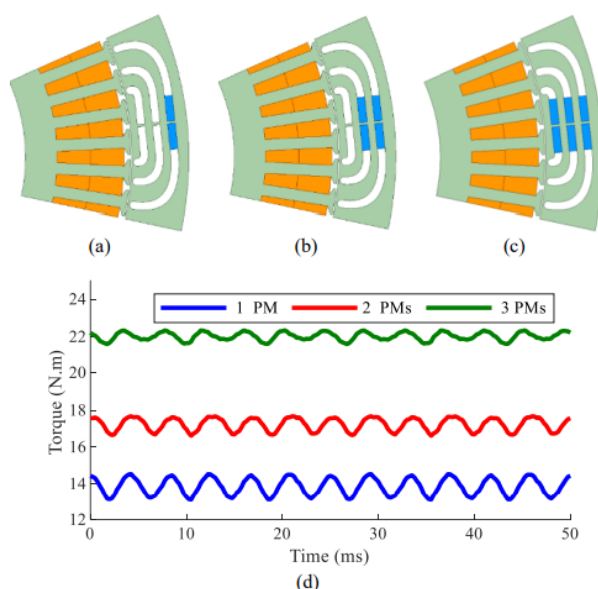
PM Type	Two Flux Barriers [T_{avg} (N.m), T_{ripple} (%), PF]		Three Flux Barriers [T_{avg} (N.m), T_{ripple} (%), PF]	
	Non-Skewed	Skewed	Non-Skewed	Skewed
None (SynRM)	[12.5, 87, 0.63]	[11.7, 18, 0.64]	[14.0, 31, 0.67]	[13.9, 5.2, 0.66]
Rare-earth	[17.2, 104, 0.83]	[16.8, 11, 0.89]	[22.3, 35, 0.87]	[22.0, 3.4, 0.88]
Non-Rare Earth	[17.1, 76, 0.75]	[16.1, 11, 0.76]	[19.6, 25, 0.80]	[18.9, 5.2, 0.79]

مطالعه اولیه نشان می‌دهد که مدل‌های دارای استاتور غیر اریب دارای مقادیر ریبیل گشتاور بالایی هستند که آنها را برای موتور دوچرخه الکترونیکی غیرقابل استفاده می‌کند. علاوه بر این، می‌توان استنباط کرد که با افزایش تعداد موانع شار، میانگین گشتاور و ریبیل گشتاور افزایش می‌یابد. شکل ۴۰-۱ پروفیل‌های گشتاور حالت پایدار را برای SynRMها با روتورهای مانع شار دو و سه نشان می‌دهد. میانگین گشتاور و مقادیر ریبیل گشتاور ۱۲.۵ نیوتن متر و ۸۷ درصد برای دو روتور مانع شار و ۱۴ نیوتن متر و ۳۱ درصد برای روتور مانع سه شار است. علاوه بر این، با افزایش تعداد موانع شار، نسبت برجستگی نیز افزایش می‌یابد که منجر به بهبود عملکرد موتور می‌شود. شایان ذکر است که تعداد موانع شار به دلیل محدودیت‌های مکانیکی به سه محدود است.



شکل ۴۰-۱: مشخصات گشتاور حالت پایدار SynRMها با تعداد موانع شار متفاوت و استاتور غیر اریب یکسان.

برای برآورده کردن الزامات دوچرخه الکتریکی ۵۰۰ وات در ۲۱۰ دور در دقیقه، یک PMSynRM با PM های خاکی کمیاب N35 و سه مانع شار در هر قطب به عنوان ساختار پایه انتخاب شده است. برای جستجوی بهترین تعداد موانع شار از جمله PMS، تجزیه و تحلیل گشتاور خروجی توسط آنالیز FE (FEA) انجام شده و نتایج در شکل ۴۱-۱ گزارش شده است. یکی از قطب های PMSynRM پیشنهادی با پیکربندی های مختلف PM به تصویر کشیده شده است. همانطور که نتایج نشان می دهد، طراحی مانع سه شار با شکاف هایی که به طور کامل توسط PMS در امتداد محور q اشغال شده اند، می تواند الزامات میانگین گشتاور و موج گشتاور را از طریق PM های تجاری N35 خاکی کمیاب برآورده کند. بنابراین، به عنوان ساختار پایه، یک موتور بیرونی PMSynRM با یک استاتور اریب و یک روتور با سه مانع شار پر شده توسط PMS به عنوان یک انتخاب مناسب برای طراحی انتخاب می شود.



شکل ۴۱-۱: یک قطب از PMSynRM های مورد بررسی با تعداد PM های مختلف و پروفیل های گشتاور مربوطه

۳-۷-۱ بررسی استفاده از موتور های رلوکتانسی در دوچرخه برقی

۱-۷-۳-۱ انواع موتورهای رلکتانسی

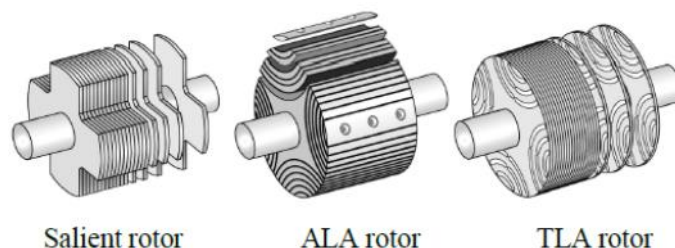
موتورهای رلکتانسی به دو دسته موتورهای سوئیچ رلکتانس^۶ و موتورهای سنکرون رلکتانس تقسیم می شوند. می توان در ساختار موتورهای رلکتانسی از آهنربا جهت تقویت شار فاصله هوایی استفاده کرد. این موتورها را موتورهای سنکرون رلکتانسی تقویت شده با آهنربا می نامند. تفاوت بین موتورهای سوئیچ رلکتانس و موتورهای

سنکرون رلکتانس در نحوه تغییرات رلکتانس فاصله هوایی است. در این موتورها اندوکتانسهای خودی و متقابل فازها به صورت تابعی از زاویه روتور می باشد. با توجه به اینکه نحوه تغییرات رلکتانس متفاوت است، نحوه درایو آنها نیز با یکدیگر تفاوت دارد.

توپولوژی های شار شعاعی و شار محوری و همچنین خطی برای این موتورها وجود دارد. در این پژوهش هدف طراحی یک نمونه موتور شار شعاعی می باشد.

۲-۳-۷-۱ توپولوژی های شار شعاعی

شکل ۴۱-۱ انواع توپولوژی های شار شعاعی برای موتورهای رلکتانسی را نشان می دهد. ساختار اول به صورت قطب برجسته بوده و در موتورهای سوئیچ رلکتانس از این ساختار استفاده می شود. از ساختارهای دوم و سوم در موتورهای سنکرون رلکتانسی استفاده می شود. در توپولوژی ALA^7 جهت تورق روتور در جهت محوری می باشد. در این توپولوژی نسبت برجستگی بالا است، ولی در مقابل تلفات جریان گردابی نیز بالا است. پیشنهاد می شود برابر بهبود عملکرد، در این ساختار برای ساخت روتور از فولاد SMC^8 استفاده شود تا تلفات روتور کاهش یابد. در ساختار TLA^9 جهت تورق شعاعی می باشد.



شکل ۴۲-۱: انواع توپولوژی های شار شعاعی موتورهای رلکتانسی

در ساختارهای فوق، موتورهای قطب برجسته دارای کمترین نسبت اندوکتانس بوده و از اینرو کارایی کمتری نسبت به دو طرح دیگر دارند. دو ALA و TLA دارای نسبت برجستگی مشابه می باشند با این تفاوت که هزینه تولید موتورهای ورقه شده عرضی بسیار کمتر می باشد. از اینرو طرحی که غالباً برای موتورهای سنکرون رلوکتانس انتخاب می گردد طرح TLA می باشد.

۳-۳-۷-۱ انواع سیم پیچی های موتورهای سنکرون رلکتانسی

همانطور که در شکل نشان داده شده است، بطور کلی دو ساختار متمرکز و پراکنده برای سیم پیچی موتورهای رلوکتانسی مطرح است. در ساختار متمرکز، سیم پیچی هر فاز در هر قطب تنها به دور یک دندان پیچیده می شود، اما در ساختار پراکنده بین هر کلاف سیم پیچ به اندازه تقریباً یک گام قطب فاصله است. مزایای ساختار متمرکز ضریب پرشدگی شیار بهتر، افزایش هدایت گرمایی شیار، کاهش سیم پیچ های انتهایی

7 Axially laminated anisotropy

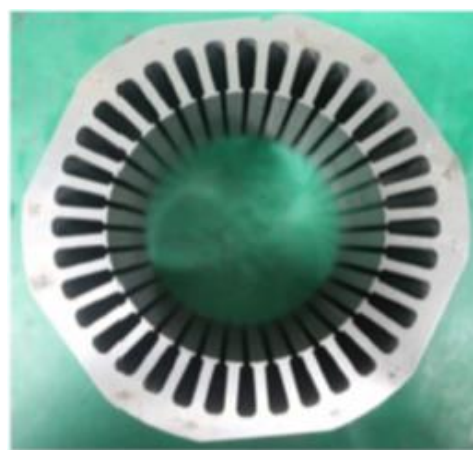
8 Soft magnetic composite

9 Transversally laminated anisotropy

و در نتیجه کاهش تلفات مسی، ساخت تکه تکه و آسانتر استاتور است. اما این ساختار دارای مشکلاتی نیز می باشد [۱۳].



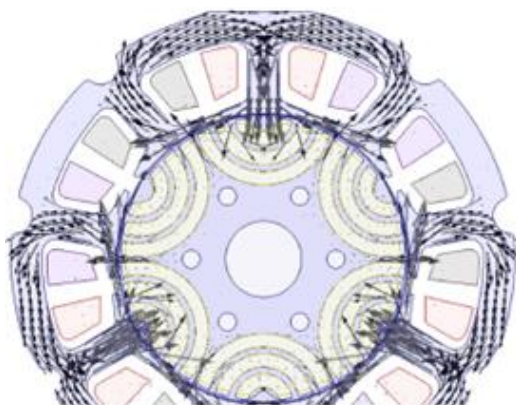
ب



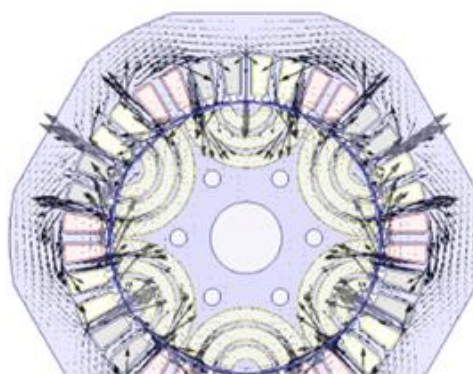
الف

شکل ۴۳-۱: هسته استاتور برای الف) سیم پیچی توزیع شده ب) سیم پیچی متمرکز

شکل زیر مسیر شار و توزیع چگالی شار در فاصله هوایی را برای دو ساختار متمرکز و پراکنده نشان داده است. همانطور که مشاهده می شود، در ساختار پراکنده توزیع میدان بسیار یکنواخت تر از ساختار متمرکز می باشد. این مساله باعث می شود تا در ساختار متمرکز، رپیل گشتاور و تلفات آهنی ناشی از هارمونیک های شار، افزایش یابند و به دلیل افزایش شار ناشی، راکتانس ناشی و در نتیجه نسبت برجستگی و ضریب قدرت ماشین کاهش یابد [۱۳] مشکل اساسی دیگری که ساختار متمرکز خصوصاً در موتورهای PMaSynRM دارد، تمرکز شار بصورت موضعی می باشد که ممکن است باعث مغناطیس زدایی از آهنرباهای لایه اول روتور گردد. به دلیل این مشکلات، استفاده از ساختار سیم پیچی متمرکز در موتورهای PMaSynRM تا کنون توجیه نشده است.



ب



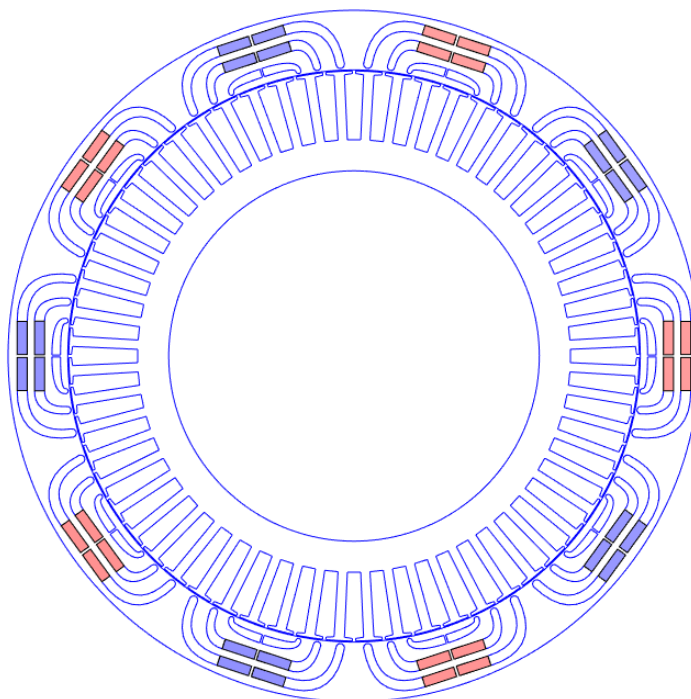
الف

شکل ۴۴-۱: میدان مغناطیسی تولید شده توسط الف) سیم پیچی توزیع شده ب) سیم پیچی متمرکز

۱-۷-۴ ساختار پیشنهادی از نوع رلکتانسی

۱-۷-۴-۱ توپولوژی موتور

شکل توپولوژی موتور را نشان می دهد. تعداد موانع شار روتور در این توپولوژی سه عدد در نظر گرفته شده است. در موتورهای مغناطیس دائم داخلی تعداد موانع شار پایین می باشد. با افزایش تعداد موانع شار نسبت برجستگی افزایش می یابد. در موتورهای سنکرون رلکتانسی تقویت شده با آهنربا، برای افزایش بهبود عملکرد باید تعداد موانع شار افزایش یابد. حداقل تعداد مناسب ۳ عدد ذکر شده است. در ساختار در نظر گرفته شده، در دو مانع شار بیرونی فضایی برای جا دادن مگنت های مکعبی شکل در نظر گرفته شده است. این طرح جهت مطالعه می باشد و در طرح های نهایی پس از بررسی نتایج نهایی در تمامی موانع شار آهنربا قرار گرفته است.



شکل ۱-۴۵ : توپولوژی موتور ارائه شده شده جهت طراحی

۱-۷-۴-۲ ملاحظات طراحی استاتور

طراحی استاتور در این موتور همانند موتور القایی صورت می گیرد. استاتور شامل هسته مورق و سیم پیچی توزیع شده است. به دلیل پایین بودن سرعت موتورهای الکتریکی نصب شده در چرخ، گشتاور آنها بالا می باشد. بدین منظور باید تعداد قطب های موتور را افزایش داد.

$$T_e = \frac{3}{2} p (L_d - L_q) i_d i_q + \frac{3}{2} p \Lambda_m i_d \quad (1-1)$$

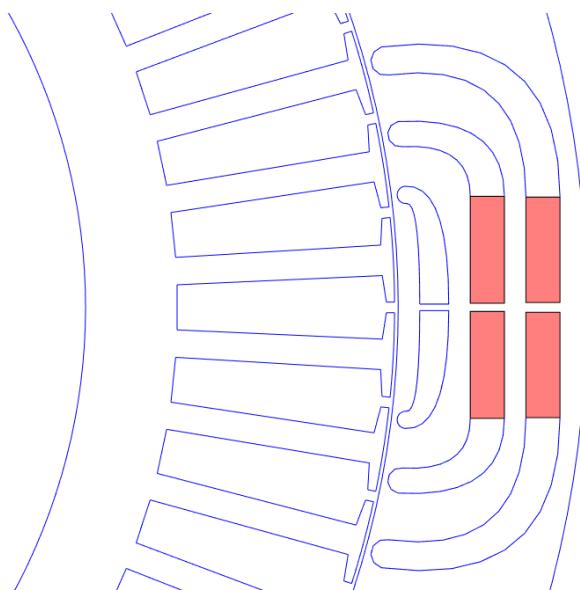
با افزایش تعداد قطب ها نسبت برجستگی کم می شود و در نتیجه نمی توان عملکرد مناسبی برای موتور متصور شد. از طرفی به دلیل توزیع شده بودن سیم پیچی تعداد دندانهای استاتور بالا است. تعداد شیار به ازای قطب به ازای هر فاز برابر است با:

$$q = \frac{N_s}{m \times p} \quad (1-2)$$

بنابراین باید ملاحظه بین ترکیب تعداد شیارها و تعداد قطب ها صورت گیرد.

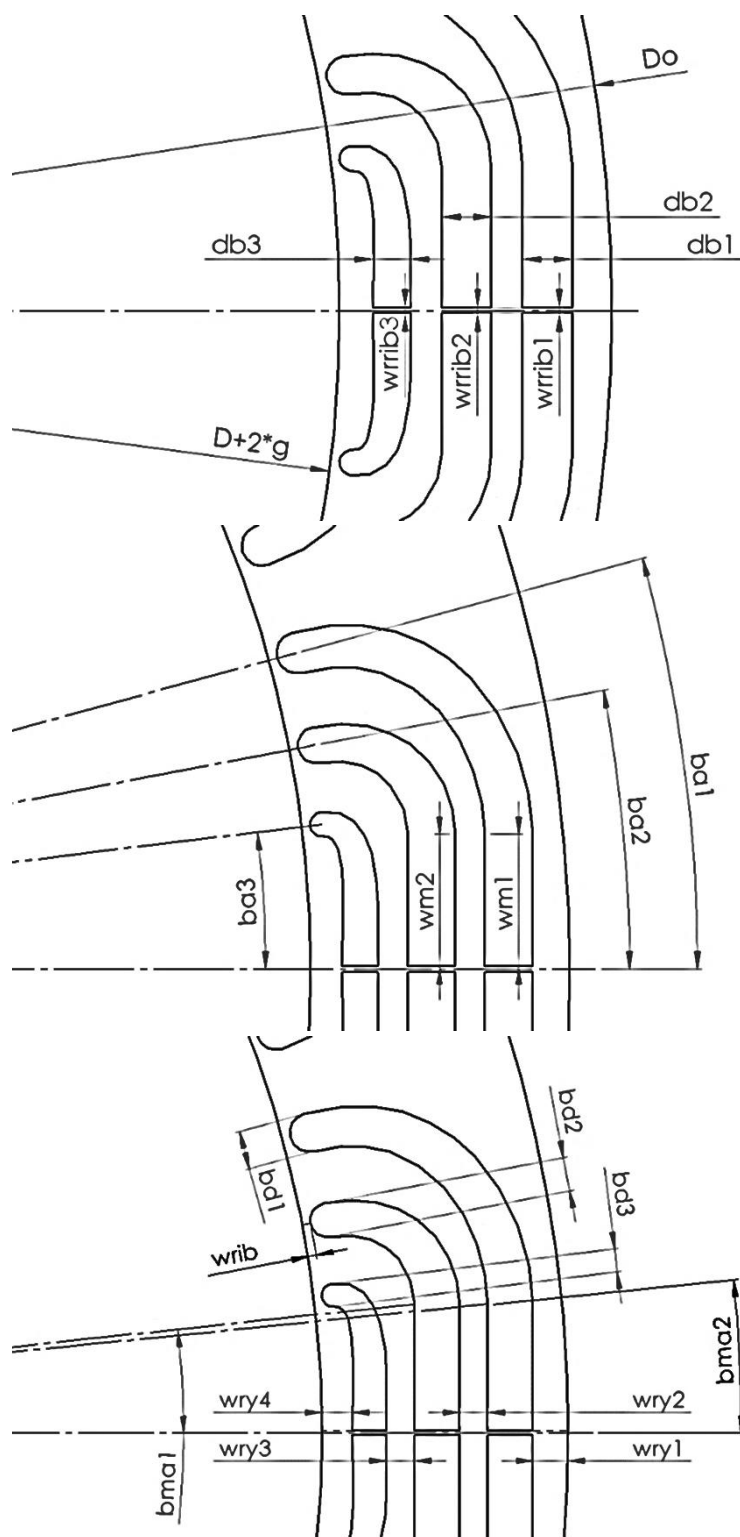
۳-۴-۷-۱ ملاحظات طراحی روتور

با توجه به هندسه خاص روتور موتورهای سنکرون رلکتانسی، برای طراحی روتور در اینگونه موتورها باید ملاحظات خاصی صورت گیرد. تعداد متغیرهای ابعادی طراحی روتور بالا بوده و این موضوع بهینه سازی هندسه روتور را پیچیده میکند. شکل هندسه روتور پیشنهادی را نشان می دهد. با توجه به بالا بودن تعداد متغیرهای طراحی در روتور از روش پریونیت کردن استفاده کرده ایم. مزیت پریونیت کردن دانستن مقدار حدودی متغیرهای ابعادی و گذاشتن قيود ماکزیمم و مینیمم بر روی آنها جهت امر بهینه سازی است.



شکل ۴۶-۱: هندسه روتور پیشنهادی

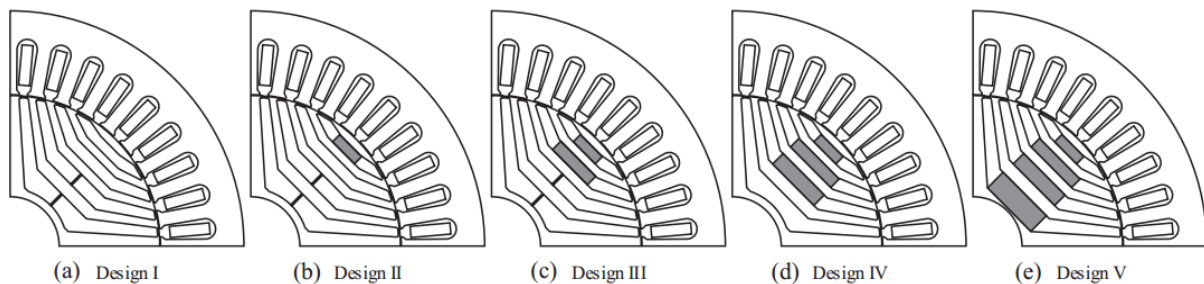
در ادامه به تعریف متغیرهای ابعادی مربوط به روتور پرداخته ایم. این متغیرها در شکل نشان داده شده اند.



شکل ۴۷-۱: متغیرهای ابعادی روتور

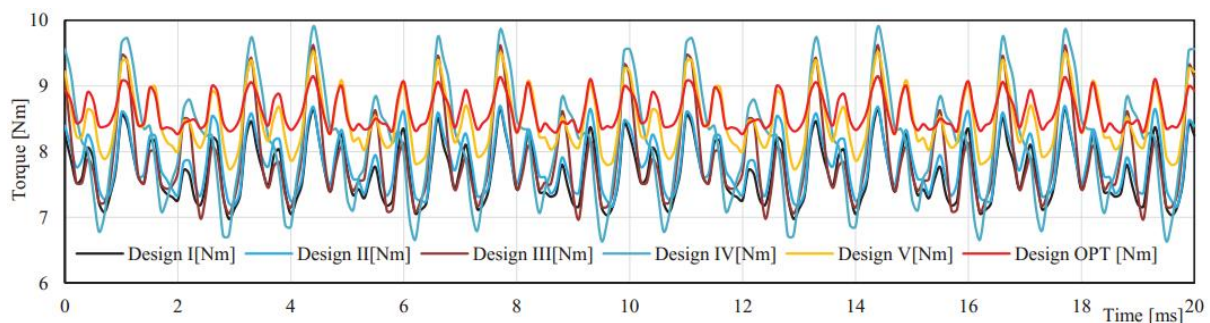
۴-۷-۱-۴ انتخاب تعداد موانع شار حاوی مگنت

همانطور که ذکر شد در طرح پیشنهادی در هر قطب روتور سه عدد مانع شار وجود دارد. برای جایگذاری آهنرباها در موانع شار، انتخاب های متعددی وجود دارد. می توان تنها در یک مانع شار آهنربا گذاشت و یا در تمامی موانع شار آهنربا قرار داد. در [۱۴] این موضوع بررسی شده است. شکل طراحی های مختلف به ازای تعداد آهنرباهای مورد استفاده در هر قطب را نشان می دهد.



شکل ۴۸: طراحی های مختلف بر اساس تعداد آهنرباهای مورد استفاده در هر قطب

طرح ۱ موتور سنکرون رلکتانسی خالص و در طرح ۵ تمامی موانع شار حاوی آهنربا هستند. شکل گشتاور خروجی برای طرح های مطالعه شده را نشان می دهد. همانطور که دیده می شود با افزایش تعداد آهنربا میانگین گشتاور افزایش یافته و به طور همزمان ریبیل گشتاور کاهش می یابد.



شکل ۴۹-۱: گشتاور خروجی برای طرح های مطالعه شده در [۵]

۵-۷-۱-۴ بهینه سازی روتور

برای بهینه سازی روتور می توان توابع هدف مختلفی را در نظر گرفت. برخی از این توابع هدف عبارتند از:

- ماکزیمم کردن گشتاور
 - ماکزیمم کردن نسب برجستگی L_d / L_q
 - ماکزیمم کردن تفاضل اندوکتانس هم محوری و اندوکتانس متعامد $L_d - L_q$
- متغیرهای هندسی روتور به شرح زیر می باشند:

$$\begin{aligned}
 & \{w_{ry1}, w_{ry2}, w_{ry3}, w_{ry4}\} \\
 & \{d_{b1}, d_{b2}, d_{b3}\} \\
 & \{w_{rib}, w_{rrib1}, w_{rrib2}, w_{rrib3}\} \\
 & \{w_{m1}, w_{m2}\} \equiv \{b_{ma1}, b_{ma2}\} \\
 & \{b_{a1}, b_{a2}, b_{a3}\} \\
 & \{b_{d1}, b_{d2}, b_{d3}\} \\
 & \{b_{ta1}, b_{ta2}, b_{ta3}\} \\
 & \{D_i, D_o\}
 \end{aligned} \tag{۱-۳}$$

همانطور که دیده می شود هندسه روتور ۲۴ متغیر ابعادی دارد که باید تعیین شوند. اگر بخواهیم برای بهینه سازی روتور تابع هدف را بر اساس متغیرهای فوق بنویسیم کار دشوار خواهد شد. باید سعی شود از قیود و محدودیت ها بیشترین استفاده شود. بنابراین برای تسهیل امر بهینه سازی از تکنیک پریونیت کردن استفاده کرده ایم. به جای متغیرهای بالا از متغیرهای زیر استفاده خواهیم کرد:

$$\begin{aligned}
 & \{B_{ry}, \gamma_{wry2}, \gamma_{wry3}, \gamma_{wry4}\} \\
 & \{k_{air}, \gamma_{db2}, \gamma_{db3}\} \\
 & \{w_{rib}, w_{rrib1}, w_{rrib2}, w_{rrib3}\} \\
 & \{\gamma_{bma1}, \gamma_{bma2}\} \\
 & \{\gamma_{ba1}, \gamma_{ba2}, \gamma_{ba3}\} \\
 & \{\gamma_{bd1}, \gamma_{bd2}, \gamma_{bd3}\} \\
 & \{\gamma_{bta1}, \gamma_{bta2}, \gamma_{bta3}\} \\
 & \{D_i, D_o\}
 \end{aligned} \tag{۱-۴}$$

همانطور که دیده می شود تعداد متغیرهای ورودی در این حالت نیز برابر ۲۴ عدد است. در این حالت حدس اولیه خوبی از مقدار متغیرها داریم که در تعریف تابع بهینه سازی بسیار کمک کننده خواهد بود. تعاریف این متغیرهای بهینه سازی به شرح زیر است:

$$\begin{aligned}
 & \left\{ B_{ry}, \gamma_{wry2} = \frac{w_{ry2}}{w_{ry1}}, \gamma_{wry3} = \frac{w_{ry3}}{w_{ry1}}, \gamma_{wry4} = \frac{w_{ry4}}{w_{ry1}} \right\} \\
 & \left\{ k_{air} = \frac{\sum_{i=1}^3 d_{bi}}{\sum_{i=1}^3 d_{bi} + \sum_{i=1}^4 w_{ryi}}, \gamma_{db2} = \frac{d_{b2}}{d_{b1}}, \gamma_{db3} = \frac{d_{b3}}{d_{b1}} \right\} \\
 & \{ w_{rib}, w_{rrib1}, w_{rrib2}, w_{rrib3} \} \\
 & \left\{ \gamma_{bma1} = \frac{b_{ma1}}{b_{a1}}, \gamma_{bma2} = \frac{b_{ma2}}{b_{a2}} \right\} \\
 & \left\{ \gamma_{ba1} = \frac{b_{a1}}{\pi / p}, \gamma_{ba2} = \frac{b_{a2}}{b_{a1}}, \gamma_{ba3} = \frac{b_{a3}}{b_{a2}} \right\} \\
 & \left\{ \gamma_{bd1} = \frac{b_{d1}}{d_{b1}}, \gamma_{bd2} = \frac{b_{d2}}{d_{b2}}, \gamma_{bd3} = \frac{b_{d3}}{d_{b3}} \right\} \\
 & \left\{ \gamma_{bta1} = \frac{b_{ta1}}{b_{a1}}, \gamma_{bta2} = \frac{b_{ta2}}{b_{a2}}, \gamma_{bta3} = \frac{b_{ta3}}{b_{a3}} \right\} \\
 & \{ D_i, D_o \}
 \end{aligned} \tag{۱-۵}$$

برای هندسه روتور ۲۴ متغیر طراحی تعریف کرده ایم. حال باید قیود و محدودیت ها را بررسی کنیم. قید اول مقدار ماکزیمم چگالی شار در روتور است. همانطور که در توپولوژی دیده می شود ماکزیمم شار در وسط هسته رخ می دهد. بنابراین می توان رابطه زیر را نوشت:

$$\frac{\phi_p}{2} = B_{ry} \times (w_{ry1} + w_{ry2} + w_{ry3} + w_{ry4}) \times L_{stk} \tag{۱-۶}$$

ضریب k_{air} بیانگر نسبت عرض هوا به عرض آهن در وسط هر قطب روتور است. این نسب یک ضریب مهم در موتورهای سنکرون رلکتانسی می باشد. با توجه به این ضریب می توان برخی از پارامترها در رابطه زیر را محاسبه کرد:

$$w_{ry1} + w_{ry2} + w_{ry3} + w_{ry4} + d_{b1} + d_{b2} + b_{b3} = \frac{D_o}{2} - \frac{D_i}{2} \tag{۱-۷}$$

دو رابطه فوق از نظر بهینه سازی قیود تساوی هستند. از دیگر قیود تساوی قطر داخلی روتور است. قطر داخلی روتور توسط معادلات ابعادی محاسبه می شود.

$$D_i = D + 2 \times g \tag{۱-۸}$$

حال به بیان قیود نامساوی می پردازیم. اولین قید روی قطر خارجی روتور می باشد

$$D_o \leq D_{o,max} \quad (9-1)$$

قیود زیر را می توان برای متغیرهای پریونیت در نظر گرفت

$$\begin{aligned} & \{\gamma_{wry2} \leq 1, \gamma_{wry3} \leq 1, \gamma_{wry4} \leq 1\} \\ & \{k_{air} \leq 1, \gamma_{db2} \leq 1, \gamma_{db3} \leq 1\} \\ & \{w_{rib}, w_{rrib1}, w_{rrib2}, w_{rrib3}\} \\ & \{\gamma_{bma1} \leq 1, \gamma_{bma2} \leq 1\} \\ & \{\gamma_{ba1} \leq 1, \gamma_{ba2} \leq 1, \gamma_{ba3} \leq 1\} \\ & \{\gamma_{bd1} \leq 1, \gamma_{bd2} \leq 1, \gamma_{bd3} \leq 1\} \\ & \{\gamma_{bta1} \leq 1, \gamma_{bta2} \leq 1, \gamma_{bta3} \leq 1\} \\ & \{D_i, D_o\} \end{aligned} \quad (10-1)$$

با داشتن دید اولیه می توان قیود فوق را محدود تر کرد و مقادیر مینیمم و ماکزیمم در نظر گرفت.

۵-۷-۱ موتورهای سنکرون رلوکتانسی

موتورهای رلوکتانسی نوعی از موتورهای هستند که مواد مغناطیس دائم در آنها به کار نرفته است و گشتاور ایجاد شده در آنها ناشی از تمایل به کاهش رلوکتانس می باشد. در یک موتور رلوکتانسی معمولاً روتور فاقد سیم پیچ و مواد مغناطیس دائم است بنابراین، این ماشین ها دارای ساختاری بسیار ساده مقاوم و ارزان هستند. این ویژگیها موجب گشته تا این نوع از موتورها در سالهای اخیر بیشتر مورد توجه قرار گیرند. یکی از انواع موتورهای رلوکتانسی موتور سنکرون رلوکتانسی می باشد.

موتورهای سنکرون رلوکتانسی دارای استاتوری مشابه موتورهای القایی و روتوری با ساختاری خاص می باشند که رلوکتانس آن ناهمگون و غیر یکنواخت می باشد و این ناهمگونی در رلوکتانس موجب تولید گشتاور می گردد. موتورهای رلوکتانسی سنکرون مزایای موتورهای القایی و مغناطیس دائم بدون جاروبک را با هم دارا می باشند. این موتورها از لحاظ استحکام مانند موتورهای القایی می باشند و در عین حال در سرعت سنکرون عمل می کنند و از لحاظ حجم و بازده در حد موتورهای مغناطیس دائم می باشند. استاتور این موتورها شبیه موتورهای القایی یا موتورهای مغناطیس دائم با سیم پیچ توزیع شده می باشد. روتور این موتورها دارای نوعی ساختار است که در یک جهت دارای کمترین رلوکتانس بوده و در جهت محور عمود دارای بیشترین رلوکتانس می باشد. برای ایجاد یک روتور با رلوکتانس غیر یکنواخت هسته را به صورت لایه هایی با آرایش خاص به صورت محوری و یا عرضی طراحی می کنند. با توجه به تعداد و آرایش خاص

این لایه ها و نیز تعداد موانعی که بر سر راه شار مغناطیسی قرار می گیرد، روتور دارای اندوکتانس های متفاوتی در جهات مختلف می باشد. در شکل ۵۰-۱ یک ساختار مربوط به روتور یک موتور سنکرون رلوکتانسی می باشد که دارای بیشترین اندوکتانس در جهت محور d و کمترین اندوکتانس در جهت محور q می باشند.

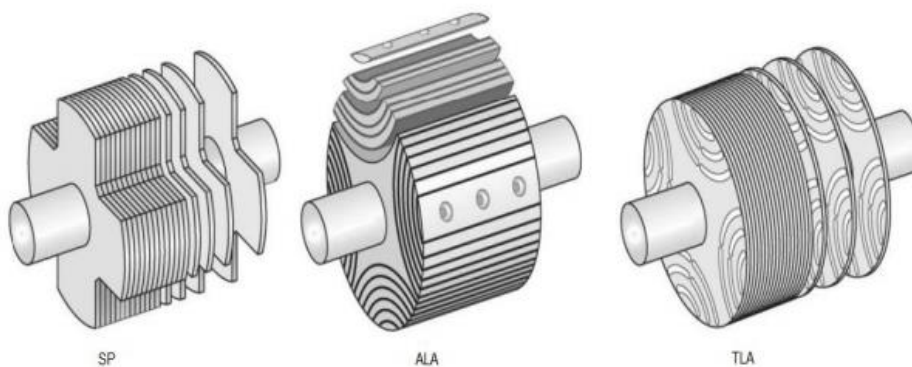


شکل ۵۰-۱: رتور SYRM

۱-۵-۷-۱ انواع ساختار رتور موتورهای سنکرون رلوکتانسی

روتور موتورهای رلوکتانسی سنکرون معمولاً به سه شکل رایج زیر ساخته می شود.

- ۱- روتور قطب برجسته ساده (SP)
- ۲- روتور ناهمگون با ورقه های قرار گرفته در راستای محور (ALA)
- ۳- روتور ناهمگون با ورقه های قرار گرفته در عرض (TLA)



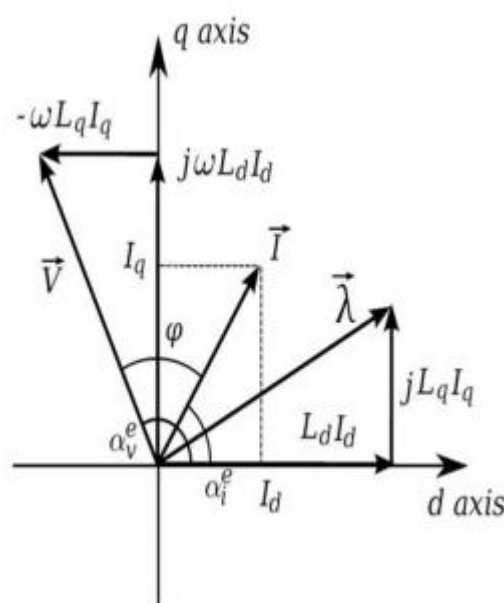
شکل ۵۱-۱: انواع رتور در SYRM

۲-۵-۷-۱ گشتاور در SYRM

در یک موتور سنکرون رلوکتانسی ، تنها یک گشتاور تولیدی گشتاور رلوکتانسی می باشد که از رابطه ۱۱-۱ بدست می آید.

$$T = \frac{3}{2}p(\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (1-11)$$

نمودار فازوری مربوط به موتور سنکرون رلوکتانسی نیز در شکل ۵۲-۱ نشان داده شده است [۱۵].



شکل ۵۲-۱ : نمودار فازوری SYRM

۳-۵-۷-۱ نتیجه گیری

موتورهای سنکرون رلوکتانسی از جمله موتورهای پرکاربرد و با ساختاری ساده می باشند که در گستره وسیعی از صنایع می توانند مورد استفاده قرار گیرند. پایین بودن چگالی گشتاور و ضریب توان ، از جمله مهمترین مشکلات در این دسته از موتورها می باشد که با اضافه نمودن مقداری آهنربا دائم به ساختار آن ها ، می توان این مشکلات را بهبود بخشید.

فصل ۲ انواع روش های مدل سازی موتور های رلوکتانس و مدل سازی و تحلیل موتور رلوکتانس به روش MEC

۲-۱ مقدمه

از جمله روش های طراحی و تحلیل ماشین های الکتریکی استفاده از روابط تجربی و پارامترهای فشرده می باشد که عمدتاً مبتنی بر تجربه طراح ماشین استوار می باشد. تحلیل و طراحی بر پایه FEM نیز از جمله پرکاربردترین روش ها می باشد. با وجود اینکه روش مبتنی بر FEM بسیار دقیق می باشد، اما حجم و زمان محاسباتی زیاد مهم ترین ایراد این روش می باشد. لذا به منظور کاهش زمان محاسبات می بایست به فکر روش های جایگزین باشیم. روش هایی به مانند تابع سیم پیچی^{۱۱} WFM، مدار معادل مغناطیسی^{۱۲} MEC، شبکه رلوتانسی^{۱۳} RN موجود می باشند. در روش WFM به دلیل صرف نظر از اثر هسته مغناطیسی دقت محاسبات به صورت قابل توجهی کاهش می یابد [۵]. از این رو این روش مناسب به کارگیری در تحلیل و طراحی دقیق نمی باشد. با توجه به ساختار خاص ماشین سنکرون رلوتانسی روش های مدار معادل مغناطیسی و شبکه رلوتانسی در تحلیل آن از دقت کافی بهره مند نمی باشند. لذا می بایست از روشی استفاده نمود که علاوه بر دارا بودن دقت کافی، زمان محاسبه کمی هم داشته باشد. روش بازسازی میدان^{۱۴} FRM روشی است که دارای ویژگی های مذکور می باشد. از این رو در ادامه این فصل به بررسی این روش خواهیم پرداخت.

۲-۲ روش FRM

روش FRM از جمله روش های تحلیل الکترومغناطیسی می باشد که در کاربردهای مهندسی پزشکی [۶]، پردازش تصویر [۷]، تحلیل و طراحی ماشین های الکتریکی و... استفاده می شود.

۲-۲-۱ معرفی روش FRM

FRM از جمله روش های تحلیلی ماشین های الکتریکی باشد. در این روش با فرض این که ماشین در ناحیه عملکرد خطی خود باشد (به اشباع نرفته باشد)، توزیع چگالی میدان در فاصله هوایی تخمین زده می شود که از دقت بسیار بالایی نیز برخوردار است. در این روش چگالی شار نرمال و مماسی به صورت زیر تعریف خواهد شد [۸]

$$B_n = B_{nsa} + B_{nsb} + B_{nsc} + B_{nra} + B_{nr b} + B_{nrc} \quad (2-1)$$

$$(2-2)$$

$$B_t = B_{tsa} + B_{tsb} + B_{tsc} + B_{tra} + B_{trb} + B_{trc}$$

11 Winding Function Method
12 Magnetic Equivalent Circuit
13 Reluctance Network
14 Field Reconstruction Method

که در روابط فوق $B_{nsa}, B_{nsb}, B_{nsc}, B_{nra}, B_{nr b}, B_{nrc}$ اجزا نرمال چگالی شار حاصل از جریان های سه فاز استاتور و رتور می باشند. $B_{tsa}, B_{tsb}, B_{tsc}, B_{tra}, B_{trb}, B_{trc}$ نیز بیانگر اجزای مماسی چگالی شار حاصل از جریان های استاتور و رتور می باشد. از طرفی B_{nas}, B_{tas} را می توان به صورت زیر تعریف نمود

$$B_{nas} = I_{as} f_{ns}(r, \varphi_{sm})$$

(۲-۴)

$$B_{tas} = I_{as} f_{ts}(r, \varphi_{sm})$$

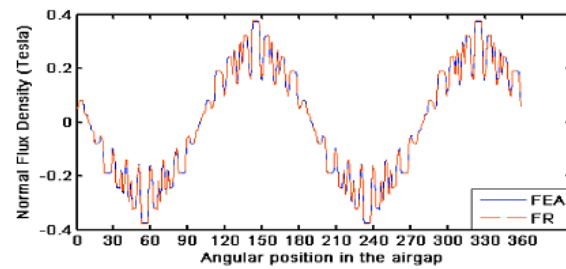
که در روابط فوق $f_{ns}(r, \varphi_{sm}), f_{ts}(r, \varphi_{sm})$ توابع پایه ای می باشند که وابسته به ساختار هندسی ماشین می باشند که در این توابع r و φ_{sm} به ترتیب شعاع و زاویه نسبت به محور استاتور می باشند. با توجه به تقارن در استاتور، اجزا استاتور را می توان به صورت زیر نوشت:

$$B_{ns} = I_{as} f_{ns}(r, \varphi_{sm}) + I_{bs} f_{ns}(r, \varphi_{sm} - 120/P) + I_{cs} f_{ns}(r, \varphi_{sm} - 240/P) \quad (۲-۵)$$

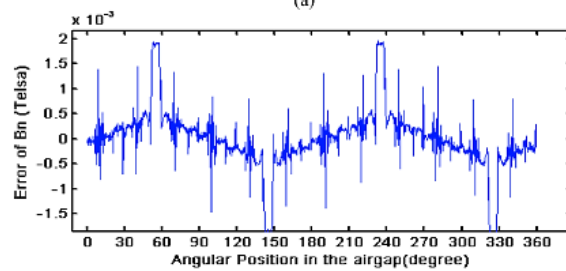
$$B_{ts} = I_{as} f_{ts}(r, \varphi_{sm}) + I_{bs} f_{ts}(r, \varphi_{sm} - 120/P) + I_{cs} f_{ts}(r, \varphi_{sm} - 240/P) \quad (۲-۶)$$

در روابط (۲-۵) و (۲-۶)، P برابر با تعداد جفت قطب می باشد [۸].

به منظور محاسبه توابع پایه ای از شبیه سازی magneto static المان محدود استفاده می شود. در شرایطی که $I_{as} = 1A$ و سایر فازها مدار باز باشند، توابع پایه ای $f_{ns}(r, \varphi_{sm})$ و $f_{ts}(r, \varphi_{sm})$ محاسبه می شوند. به منظور محاسبه توابع پایه ای رتور نیز از روش فوق استفاده می شود. در شکل های و ، چگالی شار نرمال و مماسی محاسبه شده یک ژنراتور القایی دوسوتغذیه به دو روش FEA و FRM در شرایطی که جریان فازهای A,B,C استاتور و رتور به ترتیب $3A, -1.5A, -1.5A$ می باشد، نشان داده شده است [۸].

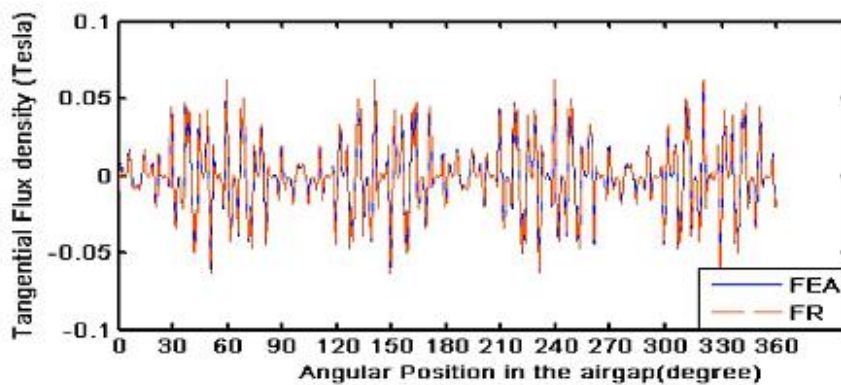


(a)

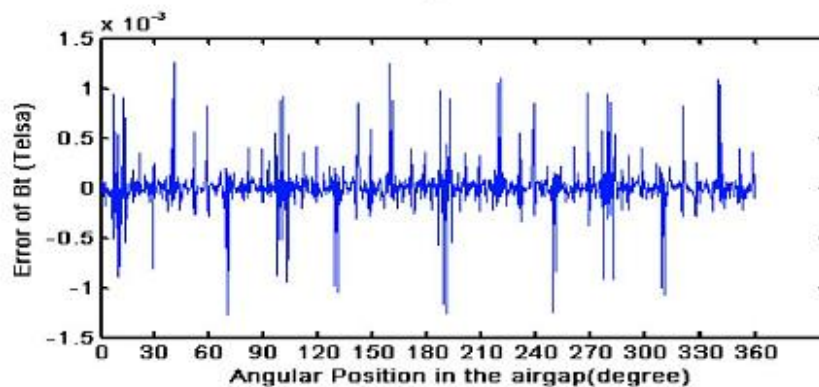


(b)

شکل ۱-۲: (a) چگالی شار نرمال DFIG به دو روش FEM و FRM؛ (b) اختلاف میان دو روش محاسبه



(a)



(b)

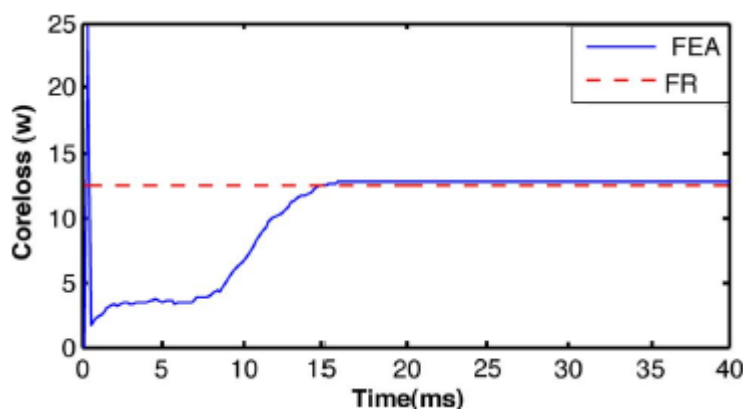
شکل ۲-۱: (a) چگالی شار مماسی DFIG به دو روش FEM و FRM؛ (b) اختلاف میان دو روش محاسبه

۲-۲-۲ محاسبه تلفات

با توجه به توضیحات قبلی، چگالی شار ماشین را می توان محاسبه نمود. لذا با معلوم بودن روابط حاکم بر تلفات آهنی در ماشین های الکتریکی، این تلفات را می توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$P_v = k_h f B_m^2 + k_c (f B_m)^2 + k_e (f B_m)^{1.5} \quad (2-7)$$

که در رابطه، k_h, k_c, k_e به ترتیب، ضرایب تلفات هیستریزس، فوکو و اضافی می باشند. تلفات مسی را نیز با توجه به روابط حاکم بر پارامترهای فشرده ماشین می توان محاسبه نمود. در شکل تلفات هسته ماشین ذکر شده در بخش ۲-۲-۱ به دو روش FEM و FRM محاسبه شده است.



شکل ۲-۳: تلفات هسته در DFIG به دو روش FEM و FRM

همان گونه که مشاهده می شود مقادیر محاسبه شده توسط روش FRM از دقت بسیار بالایی برخوردار می باشد و اختلاف میان محاسبات FRM و FEM کمتر از ۰.۵ درصد می باشد. شایان ذکر می باشد که با توجه به این که در روش FEM، شکل موج چگالی شار در یک سیکل می بایست در هر نقطه محاسبه گردد، باعث به وجود آمدن حالت گذرا در شکل فوق شده است [۸].

۲-۲-۳ محاسبه گشتاور ماشین

از روش ^{۱۵} MST برای محاسبه توزیع نیروها در فاصله هوایی و گشتاور رتور استفاده می شود که

$$f_n = (B_n^2 - B_t^2) / 2\mu_0 \quad (2-8)$$

$$f_t = B_n B_t / \mu_0 \quad (2-9)$$

$$T = \int_0^{2\pi} L_z R^2 f_t(\theta_{sm}) d\theta_{sm} \quad (2-10)$$

که B_n و B_t چگالی شار نرمال و مماسی، L_z طول ماشین و R شعاع انتگرال گیری می باشد [۸].

۲-۲-۴ امکانات محاسباتی روش FRM

از جمله مهم ترین کارهایی که در این روش می توان انجام داد، انتخاب ولتاژ ترمینال به عنوان ورودی های ماشین است که موجب نزدیکی هر چه بیشتر مدل به شرایط واقعی می گردد [۹]. محاسبه نیروهای وارد بر ماشین نیز از جمله مهم ترین محاسبات این روش می باشد [۱۰] و [۱۱]. افزودن الگوریتم طراحی و بهینه سازی به روش تحلیل FRM نیز در مراجع [۸] و [۱۲] انجام شده است.

۲-۳ ایرادات روش FRM

با وجود تمام ویژگی هایی که از روش FRM در قسمت های فوق یاد شد، در صورت به کار گیری این روش در ماشین سنکرون رلکتانسی، به دلیل ثابت نبودن رلکتانس ماشین، تعداد دفعاتی که می بایست FEM به صورت استاتیک اجرا شود، بسیار زیاد خواهد بود که زمان محاسبه را به شدت افزایش داده و عملاً استفاده از این روش را بی فایده خواهد نمود.

۲-۴ مدلسازی موتور سنکرون رلکتانسی به کمک روش مدار معادل مغناطیسی (MEC)

روش مدار معادل مغناطیسی^{۱۶} (MEC) یک روش تحلیل برای ماشین های الکتریکی می باشد. این روش با استفاده از رسم مدار معادل مغناطیسی ماشین در هر لحظه و حل معادلات حاکم بر مدار، ماشین را در هر لحظه تحلیل می کند. این روش پس از روش اجزای محدود^{۱۷} (FEA)، دقیق ترین روش تحلیل ماشین های الکتریکی می باشد. اما به لحاظ سرعت محاسبات، نسبت به روش FEA حداقل ۴ برابر سریع تر است و نیاز به سیستم کامپیوتر گران قیمت و پیشرفته ندارد. این مساله در ماشین هایی که دارای مسیر شار سه بعدی هستند مانند ماشین شار محوری قوت می گیرد. چرا که در این ماشین ها امکان اعمال روش FEA به صورت دو بعدی وجود ندارد و ناچار به استفاده از مدل سه بعدی خواهیم بود که موجب افزایش چشم گیر مش بندی و زمان پردازش می گردد. بنابراین روش MEC می تواند به عنوان جایگزین احتمالی روش FEA حداقل در ماشین های با مسیر شار سه بعدی شناخته شود که در انتهای این فصل به مقایسه نتایج حاصل از این دو روش به لحاظ دقت و زمان بری خواهیم پرداخت. روش مدار معادل مغناطیسی در مرجع [۱۶] روی یک ماشین خطی PMSM اعمال شده است. همچنین در مراجع [۱۷] و [۱۸] یک ماشین القایی توسط MEC دوبعدی و سه بعدی مدل

16 Magnetic Equivalent Circuit
17 Finite Elements Analysis

و مقایسه شده است. هم چنین در مرجع [۱۹] روش MEC سه بعدی روی یک ماشین سنکرون شارمحوری با موفقیت اعمال شده و نتایج قابل قبولی حاصل شد.

۲-۴-۱-۲ پرمانس های شبکه

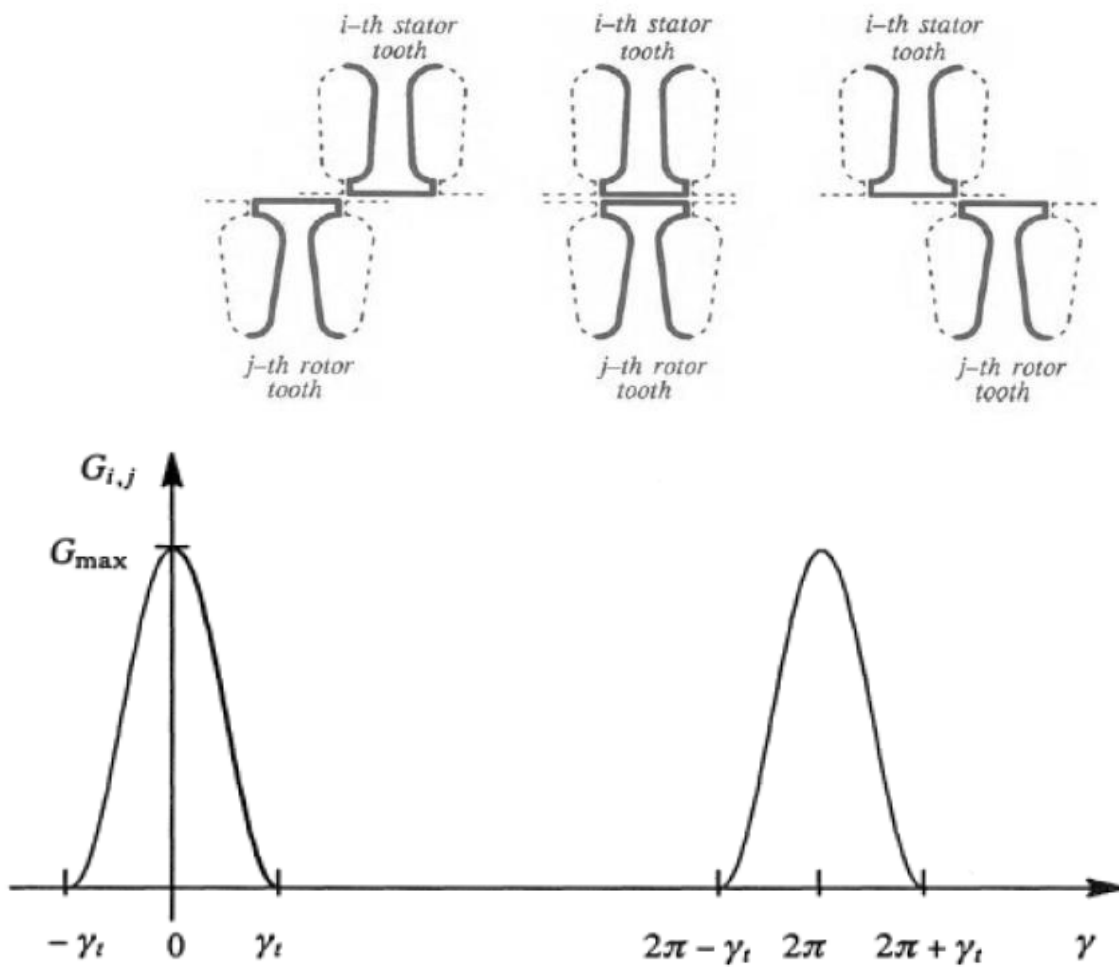
اولین گام در روش MEC تشکیل شبکه پرمانسی ماشین می باشد. پرمانس های ماشین به سه دسته ی پرمانس های ثابت ، غیر خطی پارامتریک و غیر خطی ذاتی تقسیم می شوند که با توجه به این که در این مرحله از مدلسازی ، از غیر خطی بودن هسته صرف نظر نموده ایم ، لذا به توضیح پرمانس های ثابت و غیر خطی پارامتریک خواهیم پرداخت.

۲-۴-۱-۱ پرمانس های ثابت

این پرمانس ها همواره مقدار ثابتی دارند و با گردش روتور مقدار آنها تغییر نمی کند. این پرمانس ها همان پرمانس های ناشی مانند پرمانس ناشی شیار روتور و استاتور و ... می باشند.

۲-۴-۱-۲ پرمانس های غیر خطی پارامتریک

پرمانس پارامتریک غیر خطی درواقع به پرمانس های بین دندانهای روتور و استاتور گفته می شود که با حرکت روتور به صورت پارامتریک و غیر خطی تغییر می کند . در مدلسازی ماشین ، مدلسازی درست این پرمانس ها حیاتی است . بیشترین تاثیر در شکل موج و خروجی های ماشین ناشی از مدلسازی این دسته از پرمانس ها می باشد. هنگامی که دو دندان روتور و استاتور از هم دور هستند ، پرمانس بین این دو ناچیز بوده و صفر در نظر گرفته می شود. وقتی با حرکت روتور ، این دو به هم نزدیک می شوند رفته رفته پرمانس بین آنها افزایش یافته و وقتی دقیقاً روبروی هم قرار می گیرند پرمانس بین آنها به حداقل می رسد. و با حرکت بیشتر روتور ، دوباره از هم دور شده و پرمانس کاهش می یابد تا به صفر برسد. طبیعتاً پرمانس بین این دو دندان به هر دور گردش روتور تکرار می شود. بنابراین باتوجه به شکل ۲-۴ (توجه داشته باشید که در این حالت عرض دندان روتور و استاتور برابر فرض شده است) می توان شکل پرمانس بین این دو را در یک دور چرخش روتور را بصورت شکل ۲-۴ رسم کرد . معادلات حاکم بر آن به صورت زیر خواهد بود.

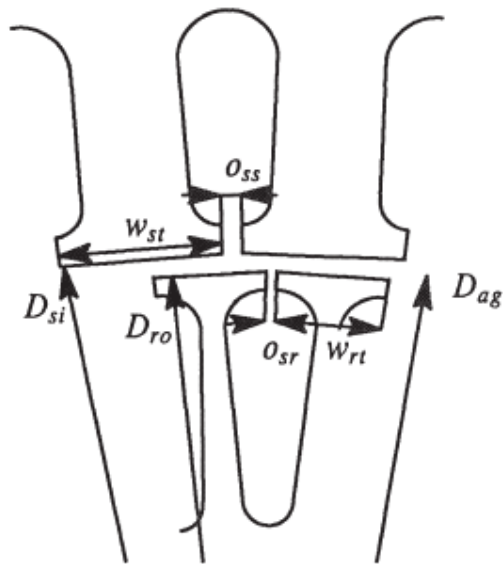


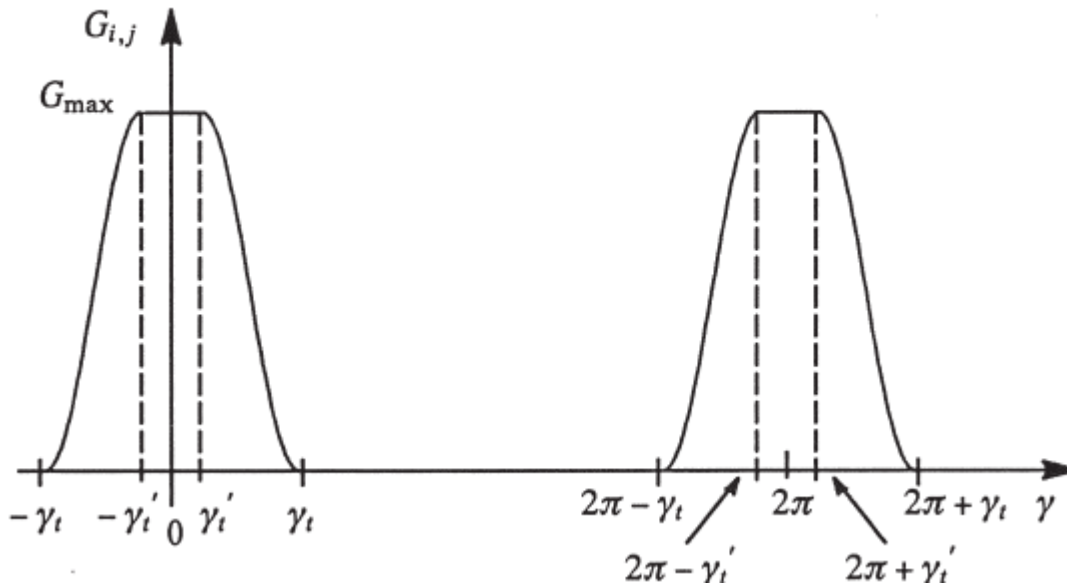
شکل ۴-۲: پرمئانس بین دندانه استاتور و رتور

$$G_{i,j} = \begin{cases} G_{\max} \frac{1 + \cos \frac{\pi}{\gamma_t} \gamma}{2} & \text{for } 0 \leq \gamma \leq \gamma_t \\ 0 & \text{for } \gamma_t \leq \gamma \leq 2\pi - \gamma_t \\ G_{\max} \frac{1 + \cos \frac{\pi}{\gamma_t} (\gamma - 2\pi)}{2} & \text{for } 2\pi - \gamma_t \leq \gamma \leq 2\pi \end{cases}$$

$$G_{\max} = \mu_0 \frac{lw_t}{\delta} \quad (2-11)$$

به ترتیب عرض دندانه استاتور و روتور می باشند که در اینجا باهم برابر اند و مساوی W_t می باشند. L طول دندانه و دلتا طول فاصله هوایی می باشد. O_{ss} و O_{sr} به ترتیب عرض شیار استاتور و روتور می باشد. و D_{ag} قطر ماشین در مرکز فاصله هوایی می باشد. این روابط و شکل ۲-۴ برای حالتی است که عرض دندانه روتور و استاتور برابر باشند. در حالتی که عرض این دو برابر نباشد، پرمانس به صورت زیر خواهد بود:





شکل ۵-۲: پرمئانس بین دندانه استاتور و رتور در حالتی که اندازه هایشان برابر نباشد

$$G_{i,j} = \begin{cases} G_{\max} & \text{for } 0 \leq \gamma \leq \gamma'_t \text{ and } 2\pi - \gamma'_t \leq \gamma \leq 2\pi \\ G_{\max} \frac{1 + \cos \pi \frac{\gamma - \gamma'_t}{\gamma_t - \gamma'_t}}{2} & \text{for } \gamma'_t \leq \gamma \leq \gamma_t \\ G_{\max} \frac{1 + \cos \pi \frac{\gamma - 2\pi + \gamma'_t}{\gamma_t - \gamma'_t}}{2} & \text{for } 2\pi - \gamma_t \leq \gamma \leq 2\pi - \gamma'_t \\ 0 & \text{for } \gamma_t \leq \gamma \leq 2\pi - \gamma_t \end{cases}$$

$$\gamma'_t = \frac{|w_{st} - w_{rt}|}{D_{ag}}$$

$$\gamma_t = \frac{w_{st} + w_{rt} + o_{ss} + o_{sr}}{D_{ag}}$$

$$D_{ag} = \frac{D_{si} + D_{ro}}{2}$$

$$w_{\min} = \min(w_{st}, w_{rt})$$

$$G_{\max} = \mu_0 \frac{l w_{\min}}{\delta}$$

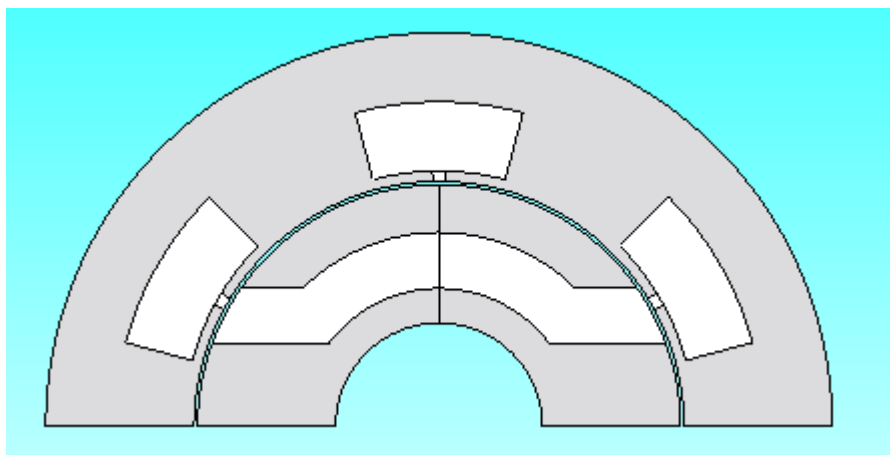
(۲-۱۲)

۲-۴-۲ شبیه سازی موتور سنکرون رلوکتانسی به روش MEC

با توجه به روند طراحی ، طرح های متفاوتی از SYRM ارائه شده است که در این بخش به مدلسازی آن ها خواهیم پرداخت.

۲-۴-۲-۱ طرح ۱

با توجه به توضیحات ارائه شده در گزارش مبنی بر اصول عملکرد ، ساختار و تولید گشتاور در موتور سنکرون رلوکتانسی ، ابتدایی ترین طرح ممکن برای موتور سنکرون رلوکتانسی در شکل ۲-۶ نشان داده شده است.



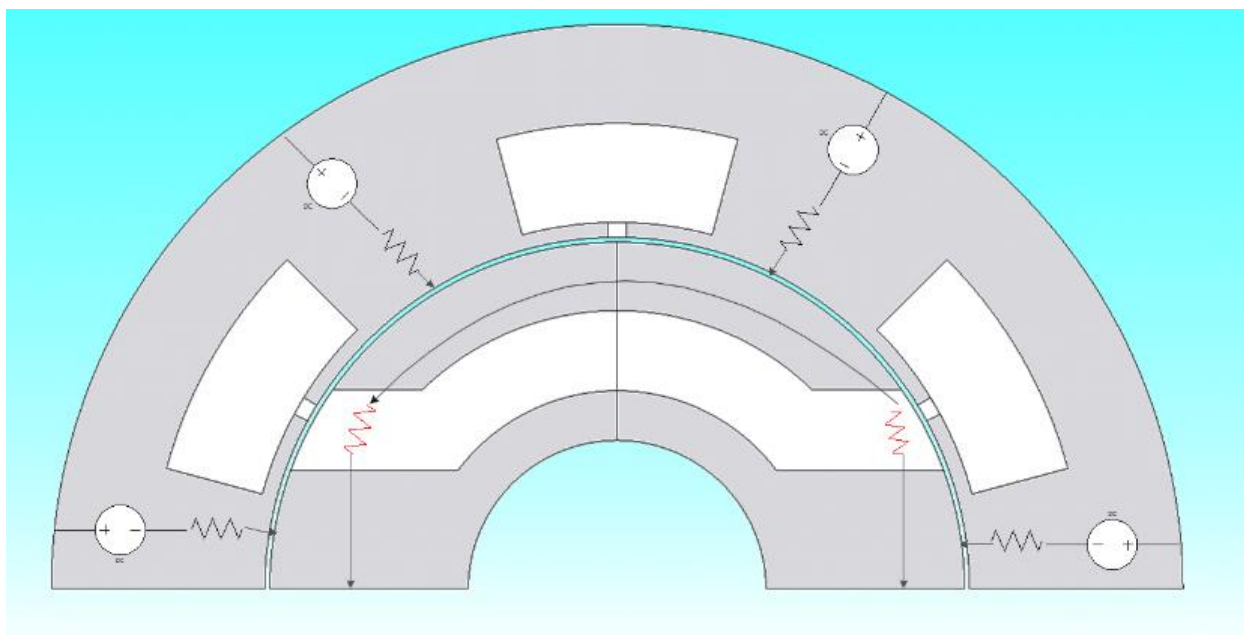
شکل ۲-۶: طرح ۱ SYRM

ماشین نشان داده شده در شکل ۲-۶ دارای ۶ شیار در استاتور می باشد و این بدان معناست که در سیم پیچی ماشین توزیع شدگی لحاظ نشده و سیم پیچ استاتور به صورت متمرکز قرار دارد. رتور موتور نشان داده شده دارای ۲ مانع شار می باشد. به منظور سادگی در معادلات گره و افزایش زمان حل معادلات ، از مقاومت های مغناطیسی یوغ استاتور و رتور صرف نظر نمودیم و میان هر دندانه استاتور و هر دندانه رتور یک پرمئانس بین دندانه ای در نظر گرفتیم . از این رو مدار معادل مغناطیسی این موتور به صورت شکل ۲-۷ می باشد. نکته بسیار مهم در مدلسازی ماشین فوق ، تقسیم بندی رتور می باشد زیرا ساختار رتور در ماشین سنکرون رلوکتانسی

با ساختارهای رتور قطب برجسته مرسوم که همراه با دندانه های برآمده و مساوی هستند ، متفاوت می باشد. لذا در رتور ماشین سنکرون رلوکتانسی فرض ما بر این استوار است که آهن های میان و زیر موانع شار عملکردی به مانند دندانه ها در رتور قطب برجسته مرسوم دارند. با توجه به این که هسته رتور به دو دسته هسته زیر مانع شار و هسته میان موانع شار تقسیم می شوند و طول و عرض متفاوتی نیز دارند ، لذا مجموعه روابط ذکر شده برای هر کدام از این دو قسمت متفاوت خواهد بود. به بیان ساده تر گویی دندانه های استاتور دو دسته دندانه مجزا را در رتور می بینند. حال با این فرض شروع به شبیه سازی ماشین طرح ۱ خواهیم نمود. مشخصات ماشین شبیه سازی شده (طرح ۱) در جدول ۱-۲ آمده است.

جدول ۱-۲ : مشخصات ماشین طرح ۱

Number of stator teeth	6
Number of rotor teeth (first group)	2
Number of rotor teeth (second group)	2
Stator tooth width	35.31(mm)
Stator slot opening	1.858(mm)
Stator tooth length	1.49(mm)
Stator body length	10(mm)
Stator body width	19.15(mm)
Rotor tooth width (first group)	2* 33.59(mm)
Rotor tooth width (second group)	2* 12.21(mm)
Barrier width	8.1044(mm)
Barrier length	66.64(mm)
Coil turns	70
The length of machine	100(mm)



شکل ۷-۲: شبکه پرمئانسی طرح ۱ SYRM

در شکل فوق مقاومتهای سیاه رنگ مربوط به قسمت های آهنی و مقاومت های قرمز رنگ مربوط به مقاومت های فاصله هوایی می باشد. در این مطالعه پرمئانس های مربوط به موانع شار در رتور ، دندان های استاتور و بین دندانه های استاتور به ترتیب با g_r ، g و g_d نشان داده شده اند که هر کدام به صورت زیر محاسبه می گردند.

$$g_d = (\mu_0 * L / \pi) * \ln(1 + ((\pi * w_t) / (2 * w_0)))$$

(۲-۱۳) tooth top leakage permeance

$$R_1 = l_1 / \mu_0 * \mu_r * w_1 * L$$

(۲-۱۴) reluctance % first part of stator tooth

$$R_3 = l_3 / \mu_0 * \mu_r * w_2 * L$$

(۲-۱۵) reluctance % second part of stator tooth

$$R_R = R_1 + R_3;$$

(۲-۱۶) % stator teeth reluctance

$$g = 1 / R_R;$$

(۲-۱۷) % stator teeth permeance

$$R_r = ((w_b) / (\mu_0 * ((l_{avg}) * L)));$$

(۲-۱۸) % barrier reluctance

$$g_r = 1 / R_r;$$

(۲-۱۹) % barrier permeance

که در روابط فوق w_0 ، w_1 ، w_2 ، l_{avg} و w_b به ترتیب برابر طول ماشین ، عرض دندانه استاتور ، دهانه میان شیار استاتور^{۱۸} عرض دندانه استاتور ، عرض بدنه دندانه استاتور ، طول متوسط مانع شار و عرض مانع شار می باشند.

همان گونه که می دانیم شبکه ی الکتریکی ایی به مانند فوق را می توان به دو صورت معادلات گره و مش حل نمود ، که در این مطالعه ما شبکه پرمئانسی موتور سنکرون رلکتانسی را با روش معادلات گره حل خواهیم نمود. معادله

ماتریسی در این روش به صورت $A.U=MMF$ می باشد که در این رابطه A ، U و MMF به ترتیب ماتریس های پرمئانس، پتانسیل مغناطیسی و منبع mmf می باشند که ماتریس پرمئانس و ماتریس MMF در رابطه فوق به صورت زیر می باشد.

$$A=[g+g_{11}+g_{12}+g_{13}+g_{14}+2*gd,-gd,gd,-g_{12}+g_{14};... \\ -gd,g+g_{21}+g_{22}+g_{23}+g_{24}+2*gd,-gd,-g_{22}+g_{24};... \\ gd,-gd,g+g_{31}+g_{32}+g_{33}+g_{34}+2*gd,-g_{32}+g_{34};... \\ -g_{12}+g_{42},-g_{22}+g_{52},-g_{32}+g_{62},g_{12}+g_{22}+g_{32}+g_{42}+g_{52}+g_{62}+2*gr]; \quad (2-20)$$

پیش از محاسبه ماتریس MMF ، ذکر این نکته ضروری می باشد که به دلیل این که از آنالیز گره استفاده می نماییم می بایست از مدار معادل نورتن شبکه پرمئانسی استفاده نماییم.

$$(2-21) MMF1=(-(N*ia)-(N*ib)+(N*ic));$$

$$(2-22) MMF2=(+(N*ia)-(N*ib)+(N*ic));$$

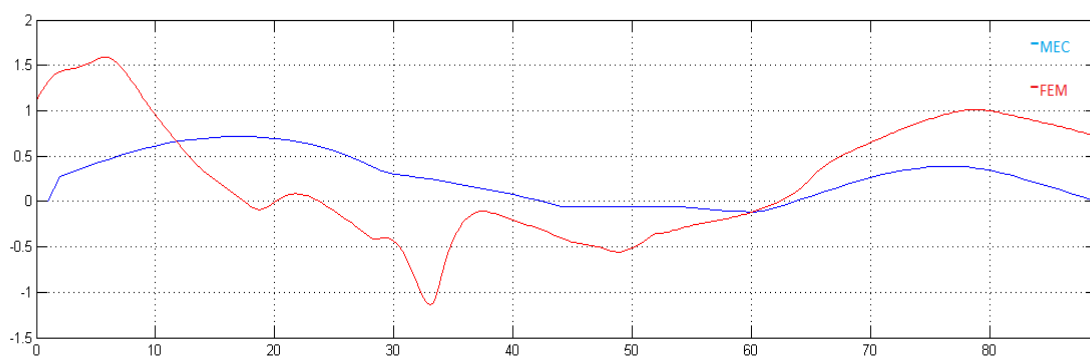
$$(2-23) MMF3=(+(N*ia)-(N*ib)-(N*ic));$$

$$(2-24) B=[g*MMF1;g*MMF2;g*MMF3;0];$$

حال با معلوم بودن مقادیر ماتریس A و MMF ، پتانسیل های مغناطیسی مربوط به هر یک از دندان های رتور و استاتور قابل محاسبه می باشد. در شبیه سازی موتورهای الکتریکی، محاسبه گشتاور الکترومغناطیسی و مقدار متوسط آن، از جمله مهم ترین اهداف به شمار می آید که در روش MEC گشتاور الکترومغناطیسی به کمک تغییرات پرمئانس بر حسب زاویه و پتانسیل مغناطیسی دندان های استاتور و رتور به صورت زیر محاسبه می شود.

$$T = \frac{1}{2\pi} \left(\sum_{i=1}^{n_s} \sum_{j=1}^{n_r} F_{ij} \frac{G_{ij}^{(1)} - G_{ij}^{(0)}}{\delta_1 - \delta_0} \right) \quad (2-25)$$

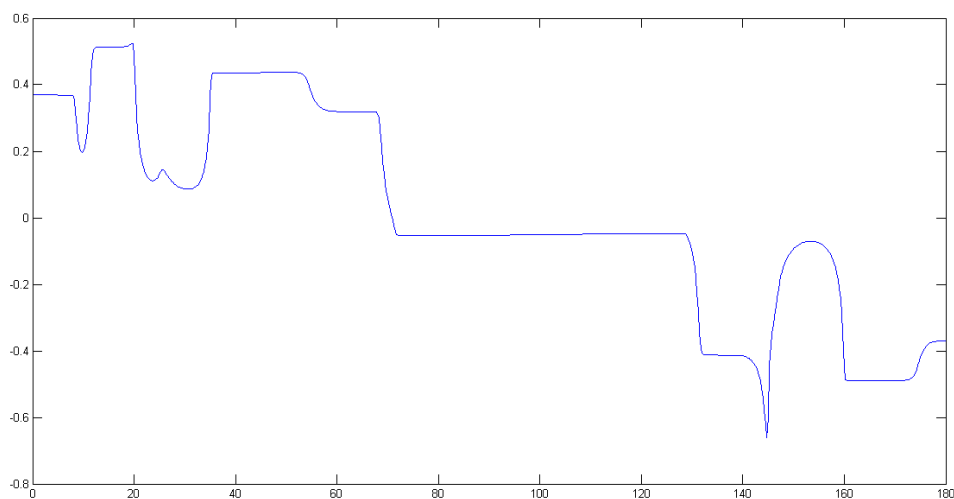
شکل ۸-۲ نشان دهنده گشتاور الکترومغناطیسی ماشین می باشد.



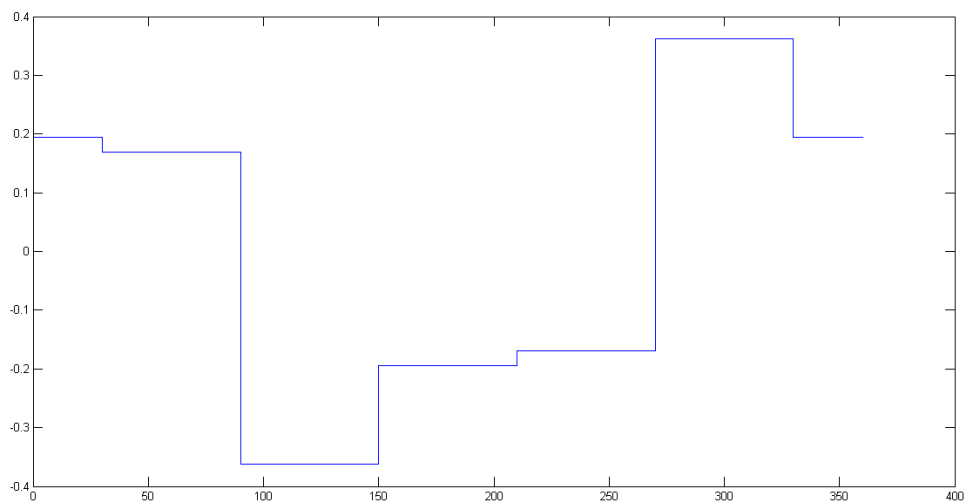
شکل ۸-۲: گشتاور طرح ۱ SYRM

همان گونه که از شکل ۸-۲ پیداست، نمودارهای قرمز و آبی رنگ به ترتیب گشتاور محاسبه شده به روش FEM و MEC می باشد. مقدار متوسط گشتاور محاسبه شده با روش FEM برابر با ۰/۲۶۰۶ نیوتون متر می باشد در حالی که

مقدار محاسبه شده در روش MEC برابر 0.2213 نیوتون متر می باشد که ۱۴ درصد با مقدار محاسبه شده با روش FEM فاصله دارد. شکل های ۲-۹ و ۲-۱۰ نیز بیان گر شکل موج های میدان در وضعیت استاتیک می باشند.



شکل ۲-۹: توزیع میدان در طرح ۱ SYRM با شبیه سازی FEM

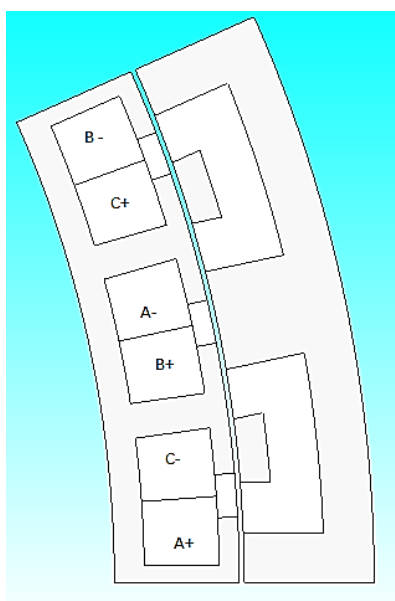


شکل ۲-۱۰: توزیع میدان در طرح ۱ SYRM با شبیه سازی MEC

تفاوت در شکل های مربوط به FEM و MEC به دلیل تفاوت در زاویه اولیه رتور می باشد. همان گونه که از نتایج شبیه سازی ها پیداست ، ساختار ارائه شده به هیچ وجه مناسب بکارگیری در دوچرخه برقی نمی باشد. لذا با افزایش تعداد قطب و تغییر نحوه سیم پیچی در طرح ۲ ، به سوی بهبود عملکرد موتور خواهیم رفت.

۲-۴-۲-۲ طرح ۲

در این طرح با افزایش تعداد قطب و تغییر نحوه سیم پیچی ، به سوی بهبود عملکرد موتور خواهیم رفت.
شکل ۲-۱۱ نشان دهنده یک قطب از طرح ارائه شده می باشد.



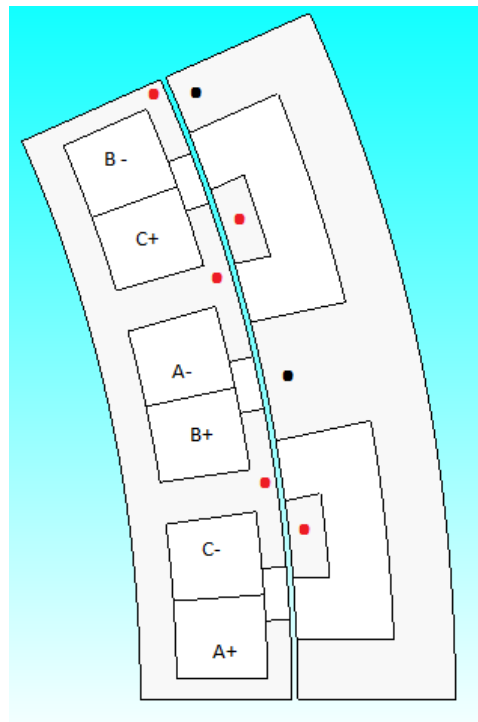
شکل ۲-۱۱: طرح ۲ SYRM

در این طرح تعداد ۴۵ شیار در استاتور و ۳۰ مانع شار در رتور طراحی شده است و سیم بندی نیز به صورتی که در شکل نشان داده شده است ، می باشد. به منظور مدلسازی MEC ماشین فوق ، هر دندانه استاتور و رتور را دارای یک پتانسیل مغناطیسی مجزا به مانند شکل ۲-۱۲ در نظر گرفتیم . هم چنین مشخصات ماشین طرح ۲ در جدول ۲-۲ موجود می باشد.

جدول ۲-۱: مشخصات ماشین طرح ۲

Number of stator teeth	45
Number of rotor teeth (first group) per pole	2
Number of rotor teeth (second group) per pole	2
Number of barriers	30
Stator tooth width	13.163 (mm)
Stator slot opening	4.38 (mm)

Stator tooth length	1.99 (mm)
Stator body length	7.5 (mm)
Stator body width	3.5(mm)
Rotor tooth width (first group)	6.41 (mm)
Rotor tooth width (second group)	10.0026 (mm)
Barrier width	5.0088(mm)
Barrier mean length	11.7933(mm)
Coil turns	96
The length of machine	26(mm)



شکل ۱۲-۲: گره های مغناطیسی در طرح ۲ SYRM

در شکل فوق نقاط قرمز رنگ دارای پتانسیل مغناطیسی غیر صفر و نقاط سیاه رنگ دارای پتانسیل مغناطیسی صفر می باشند اما با این وجود اثر دندانه های استاتور با نقاط سیاه رنگ نیز در نظر گرفته شده است . توابع پرمئانس مربوط

همان گونه که در ابتدا فصل مطرح شد، مدل سازی دقیق پرمئانس های فاصله هوایی از اهمیت ویژه ای در دقت شبیه سازی برخوردار می باشد. قدم اول در ارتباط با مدلسازی پرمئانس های فاصله هوایی تعیین موقعیت آن ها نسبت به یکدیگر می باشد. در شکل ۱۲-۲ شماره دندان ها در استاتور و رتور به ترتیب از بالا به پایین می باشد. هم چنین با انتخاب پرمئانس میان دندان یک استاتور و رتور به عنوان مرجع، به محاسبه سایر پرمئانس ها خواهیم پرداخت. لذا روابط حاکم بر پرمئانس های میان دندان یک استاتور و دندان های رتور به صورت زیر می باشد.

$$(2-26) = x_{11}$$

$$(2-27) = x_{11} + (\pi / (2 * P)) x_{12}$$

$$(2-28) = x_{12} + (\pi / (2 * P)) x_{13}$$

$$(2-29) = x_{13} + (\pi / (2 * P)) x_{14}$$

همان گونه که در روابط (۲-۲۶) الی (۲-۲۹) مشهود می باشد، گره مربوط به هر دندان رتور به اندازه $\frac{\pi}{2}$ الکتریکی و $\frac{\pi}{2 * P}$ مکانیکی با گره مجاور خود فاصله دارد. به منظور تعیین موقعیت پرمئانس های میان دندان های دو و سه استاتور با دندان های رتور، (۲-۲۶) الی (۲-۲۹) را به اندازه $(2 * \pi / N_s)$ شیفت می دهیم، از این رو روابط (۲-۳۰) الی (۲-۳۳) بدست می آیند.

$$(2-30) = x_{11} - (2 * \pi / N_s); x_{21}$$

$$(2-31) = x_{12} - (2 * \pi / N_s); x_{22}$$

$$(2-32) = x_{13} - (2 * \pi / N_s); x_{23}$$

$$(2-33) = x_{14} - (2 * \pi / N_s); x_{24}$$

روابط فوق مربوط به پرمئانس های میان دندان ۲ استاتور و دندان های رتور می باشد. به همین طریق روابط حاکم بر موقعیت پرمئانس های میان دندان ۳ استاتور و دندان های رتور به صورت زیر می باشد.

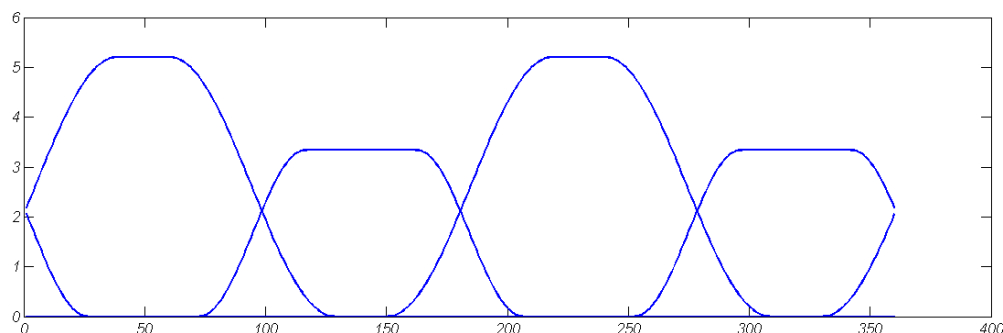
$$(2-34) = x_{21} - (2 * \pi / N_s); x_{31}$$

$$(2-35) = x_{22} - (2 * \pi / N_s); x_{32}$$

$$(2-36) = x_{23} - (2 * \pi / N_s); x_{33}$$

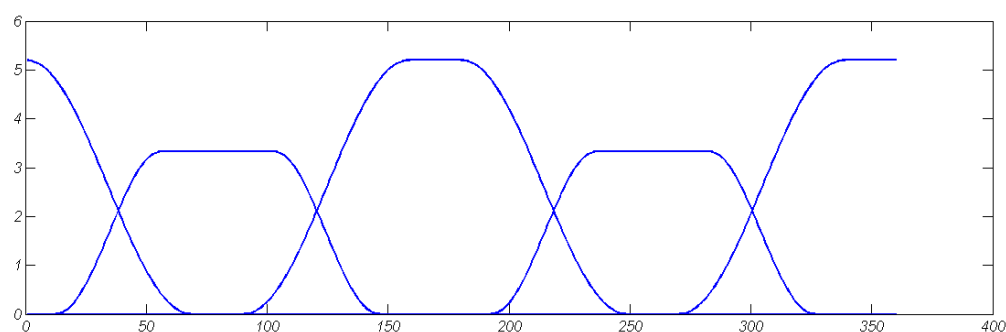
$$(2-37) = x_{24} - (2 * \pi / N_s); x_{34}$$

از روابط فوق در می یابیم که گره مربوط به هر دندان استاتور به اندازه $2 * \pi / N_s$ مکانیکی با گره مربوط به دندان مجاور خود فاصله دارد. حال شکل پرمئانس های مربوط به دندان یک استاتور و دندان های رتور به صورت شکل زیر می باشد.

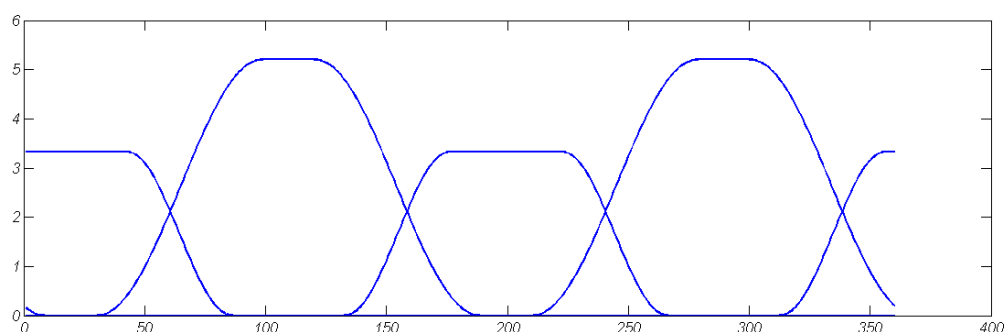


شکل ۲-۱۳: پرمئانس میان دندانه یک استاتور و دندانه های رتور

همان گونه که در شکل ۲-۱۳ مشاهده می شود اندازه G_{max} در هر دسته از دندانه های رتور متفاوت می باشد که تصدیق بر فرض ما بر تقسیم بندی دندانه های رتور می باشد. هم چنین پرمئانس های مربوط به دندانه ۲ و ۳ استاتور با دندانه های رتور به ترتیب در شکل های ۲-۱۴ و ۲-۱۵ رسم شده است.



شکل ۲-۱۴: پرمئانس میان دندانه دو استاتور و دندانه های رتور



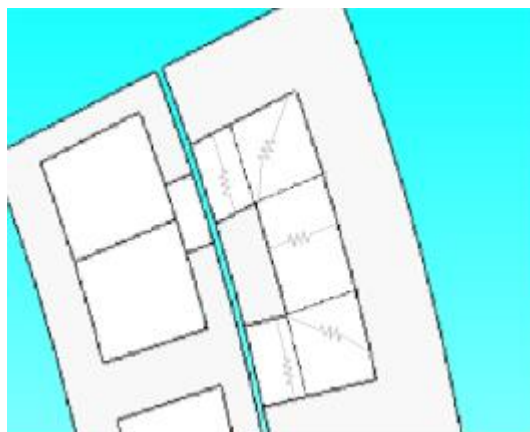
شکل ۲-۱۵: پرمئانس میان دندانه سه استاتور و دندانه های رتور

از مقایسه شکل های ۲-۱۴ و ۲-۱۵ با شکل ۲-۱۳ اختلاف زاویه ای به اندازه $(2*\pi/Ns)$ میان گره های مربوط به هر دندانه استاتور مشهود می باشد. در ادامه به تشکیل ماتریس شبکه پرمئانسی خواهیم پرداخت. این ماتریس به صورت زیر می باشد:

$$A=[2*g_d+g+g_{11}+g_{12}+g_{13}+g_{14},-g_d,-g_d,-g_{12},-g_{14};..$$

$$\begin{aligned} & -gd, 2*gd+g+g21+g22+g23+g24, -gd, -g22, -g24; \dots \\ & -gd, -gd, 2*gd+g+g31+g32+g33+g34, -g32, -g34; \dots \\ & -g12, -g22, -g32, 2*gr+g12+g22+g32, 0; \dots \\ & -g14, -g24, -g34, 0, 2*gr+g14+g24+g34]; \end{aligned} \quad (2-38)$$

در رابطه ۲-۳۸، gd و g به مانند روابط بالاتر محاسبه می گردند. اما با توجه به لزوم دقت بسیار بالا در مدلسازی مانع شار، هر مانع شار را به سه قسمت به مانند آن چه در شکل نشان داده شده است، تقسیم می نماییم. هر یک از قسمت های نشان داده شده دارای مقاومت مغناطیسی منحصر بفردی می باشند که پس از محاسبه هر یک، مقاومت معادل آن ها را محاسبه می نماییم. شایان ذکر می باشد که با توجه به برابری پتانسیل های مغناطیسی دو سر هر یک از مقاومت های مذکور، این سه مقاومت با یکدیگر موازی می باشند.



شکل ۱۶-۲: مقاومت های معادل مانع شار رتور

به منظور محاسبه پتانسیل های مغناطیسی گره های ماشین، از آنالیز گره به صورت $A.U=MMF$ استفاده می نماییم که با توجه به نحوه سیم بندی ماشین که در شکل ۲-۱۲ نشان داده شده است، MMF های مربوط به هر دندان به صورت زیر محاسبه می گردد.

$$(2-39) MMF1 = N * (+ib - ic + ia);$$

$$(2-40) MMF2 = N * (ib + ic - ia);$$

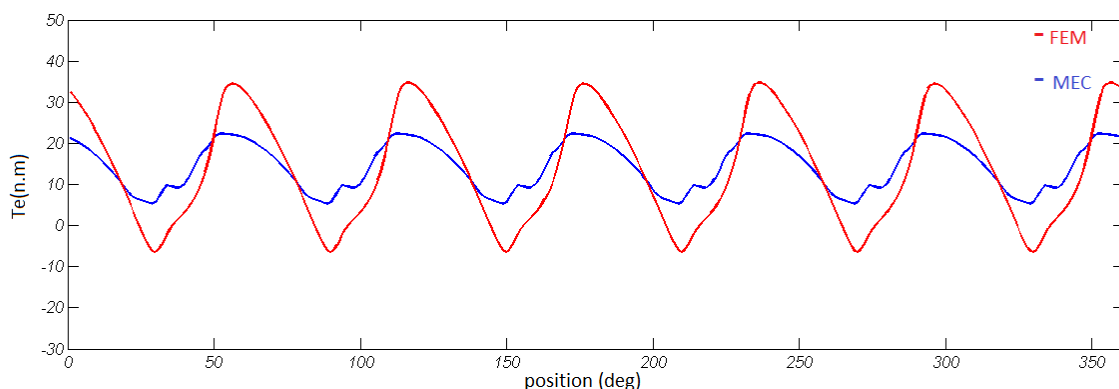
$$(2-41) MMF3 = N * (-ib + ic + ia);$$

از آن جایی که در آنالیز گره تمامی منابع موجود در مدار می بایست، منبع جریان باشند، لذا مدار معادل نورتن شبکه پرمثانسی ماشین را بدست می آوریم و با توجه به آن ماتریس منابع یا همان ماتریس MMF به صورت زیر خواهد بود:

$$(2-42) B = [g * MMF1; g * MMF2; g * MMF3; 0; 0];$$

در مدار معادل نورتن ماشین، منابع MMF به گره های دندان ۱، ۲ و ۳ استاتور وارد شده است لذا مقادیر آن به صورت درایه های (۱،۱)، (۲،۱) و (۳،۱) در ماتریس MMF می باشد. با توجه به این که منبع MMF ای در رتور موجود نمی باشد، لذا درایه های (۴،۱) و (۵،۱) در ماتریس MMF برابر با صفر می باشند. حال با معلوم بودن ماتریس

های پرمئانس و MMF، پتانسیل های مغناطیسی گره های ماشین قابل محاسبه می باشند. پس از محاسبه پتانسیل های مغناطیسی، گشتاور ماشین با توجه به رابطه ۲-۳۶ قابل محاسبه خواهد بود که گشتاور محاسبه شده مربوط به ماشین ارائه شده در طرح مذکور به صورت شکل ۲-۲۷ می باشد.



شکل ۱۷-۲: گشتاور ماشین طرح ۲

در شکل فوق، مقدار متوسط گشتاور محاسبه شده ماشین با روش FEA برابر با ۱۳.۹۲ نیوتون متر می باشد که این مقدار در آنالیز به روش MEC برابر با ۱۴.۳۰ می باشد که اختلاف میان این دو مقدار برابر با ۲.۷٪ می باشد.

۵-۲ نتیجه گیری

روش MEC از جمله روش های پرکاربرد در تحلیل ماشین های الکتریکی می باشد. همانگونه که در قسمت قبل بیان شد، با در نظر گرفتن فرضیات ارائه شده، مقدار متوسط گشتاور حاصل از تحلیل MEC دارای دقت مناسبی می باشد اما در محاسبه رپل گشتاور کارایی لازم را ندارد. به این منظور می بایست از فرضیات ارائه شده صرف نظر نموده و شبکه پرمئانسی را دقیق تر نمود.

فصل ۳ طراحی و شبیه سازی یک نمونه موتور رلوکتانسی جهت استفاده در دوچرخه برقی

۳-۱ مقدمه

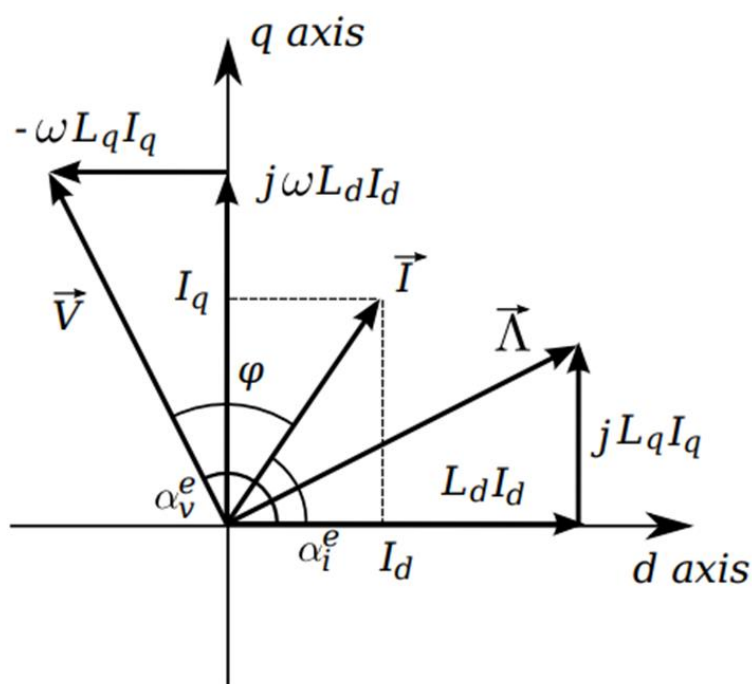
در این فصل به تشریح مشخصات موتورهای سنکرون رلکتانسی پرداخته شده است. این مشخصات بیانگر کارکرد موتور به ازای مقادیر ولتاژ و جریان‌های مختلف می‌باشند. از این مشخصات برای اهداف کنترلی موتور استفاده می‌شود.

۳-۲ گشتاور استاتیکی

مشخصه گشتاور استاتیکی در موتورهای سنکرون رلکتانسی، مقدار گشتاور تولیدی موتور به ازای جریان نامی سیم پیچی استاتور در زوایه‌های الکتریکی مختلف فازور جریان استاتور می‌باشد. گشتاور خروجی موتور برابر است با:

$$T_e = \frac{3}{2} p (L_d - L_q) i_d i_q + \frac{3}{2} p \Lambda_m i_d \quad (3-1)$$

همانطور که دیده می‌شود گشتاور تولیدی تابعی از تفاضل مقدار اندوکتانس محور مستقیم و اندوکتانس محور متعامد است. جمله دوم ناشی از شار مگنت‌ها می‌باشد.

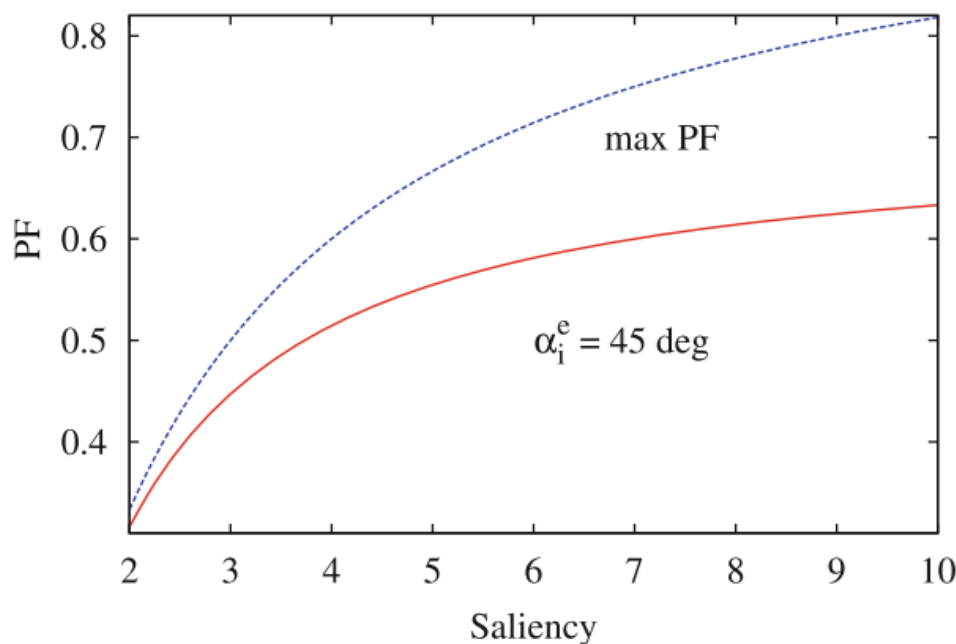


شکل ۳-۳: نمودار فازوری موتور سنکرون رلکتانس [۴]

اگر از اشباع آهن صرف‌نظر کنیم، بیشتر گشتاور هنگامی رخ می‌دهد که زاویه فازور جریان استاتور ۴۵ درجه باشد. همانطور که در شکل دیده می‌شود، ضریب توان موتور سنکرون رلکتانسی پایین می‌باشد و این یکی از محدودیت‌های این موتور است. نسبت برجستگی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\xi = \frac{L_d}{L_q} \quad (2-3)$$

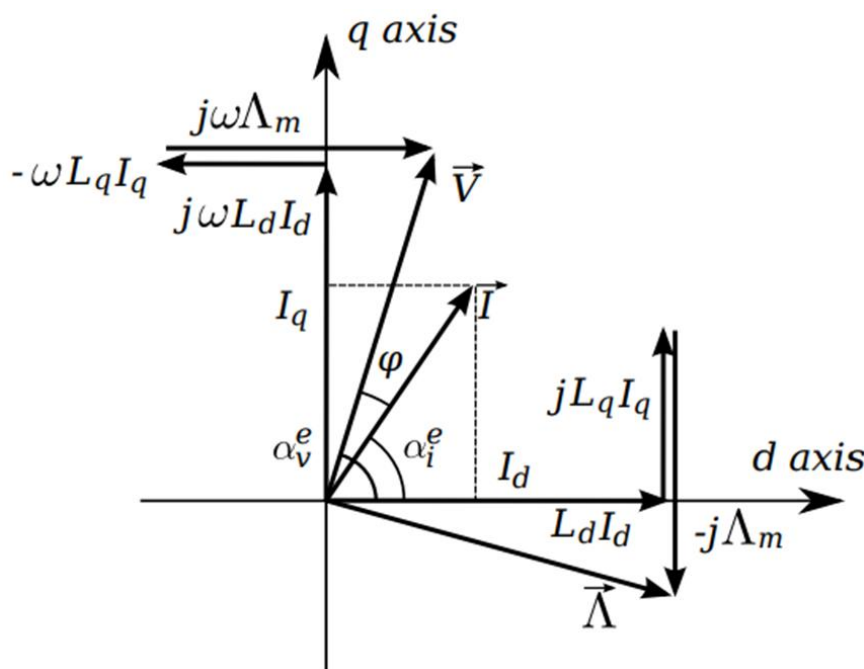
با افزایش نسبت برجستگی می توان عملکرد موتور را بهبود بخشید. شکل ۱-۰ ضریب توان را به صورت تابعی از نسبت برجستگی برای موتورهای سنکرون رلکتانسی نشان می دهد. در این شکل آهن موتور ایده آل و از اشباع صرف نظر شده است.



شکل ۱-۰: ضریب توان به صورت تابعی از نسبت برجستگی [۱۸]

در این شکل دو نمودار وجود دارد. نمودار ممتدد مربوط به حالتی است که موتور را بر اساس ماکزیمم گشتاور درایو کنیم و نمودار خط چین برای حالتی است که موتور را بر اساس قید ماکزیمم ضریب توان درایو کنیم. همانطور که دیده می شود هنگامی که مقدار نسبت برجستگی کم است، ضریب توان بسیار پایین می باشد. بنابراین برای بهبود ضریب توان لازم است روتور بهینه سازی شود. نکته قابل ذکر این است که حتی در بهترین حالت ضریب توان این موتور محدود به ۰.۸ است.

محدودیت ضریب توان را می توان به جایگذاری تعدادی آهنربا در روتور مرتفع کرد. شکل نمودار فازوری موتور سنکرون رلکتانسی تقویت شده با آهنربا را نشان می دهد.



شکل ۳-۳: نمودار فازوری موتور سنکرون رلکتانسی تقویت شده با آهنربا [۱۸]

همانطور که در شکل دیده می شود اضافه کردن آهنربا باعث تقویت شار فاصله هوایی شده و جریان مغناطیس کننده را کم میکند. این امر باعث افزایش ضریب توان می گردد.

۳-۲-۱ جداسازی گشتاور رلکتانسی از گشتاور ناشی از آهنرباها

پس از طراحی موتور سنکرون رلکتانسی تقویت شده با آهنربا لازم است محاسبه کنیم چند درصد از کل گشتاور خروجی رلکتانسی و چند درصد از آن ناشی از آهنرباها می باشد. گشتاور خروجی را می توان به صورت تابعی از I_d و I_q محاسبه کرد. گشتاور رلکتانسی برابر است با [4]:

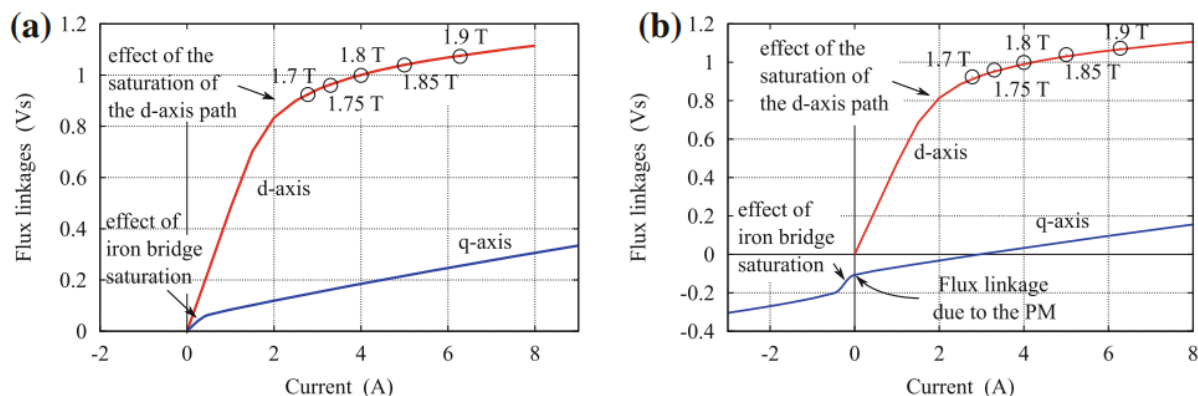
$$T_{em} = \frac{1}{2} \left(T_e(I_d, I_q) - T_e(I_d, -I_q) \right) \quad (3-3)$$

همچنین گشتاور ناشی از مگنت ها را به کمک رابطه زیر می توان محاسبه کرد [۱۸]:

$$T_{em} = \frac{1}{2} \left(T_e(I_d, I_q) + T_e(I_d, -I_q) \right) \quad (3-4)$$

۳-۳ حلقه تبدیل انرژی

شکل حلقه تبدیل انرژی را برای موتورهای سنکرون رلکتانسی نشان می دهد. نمودار سمت چپ برای SynRM و نمودار سمت راست برای PMSynRM می باشد. برای داشتن بهترین عملکرد باید این حلقه بیشتر مساحت را دارا باشد یا به عبارت دیگر نسبت برجستگی موتور بالا باشد.

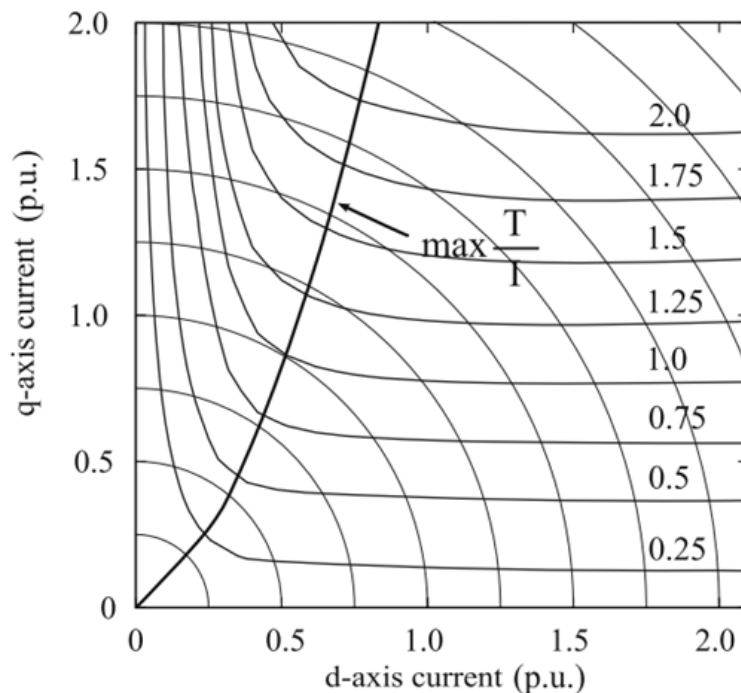


شکل ۴-۳: حلقه تبدیل انرژی برای PMSynRM و SynRM [۱۸]

۳-۴ نقشه گشتاور

نقشه گشتاور^۱ رسم کانتورهای گشتاور به ازای مقادیر مختلف جریانهای I_d و I_q می باشد. شکل یک نمونه نقشه گشتاور را نشان می دهد. در این شکل خط ماکزیمم گشتاور به جریان نیز ترسیم شده است. همانطور که دیده می شود در حالتی که موتور هنوز به اشباع نرفته است بیشترین گشتاور به ازای یک جریان خاص در زاویه ۴۵ درجه رخ

می دهد. هر چه موتور به سمت اشباع پیش می رود جریان این زاویه افزایش می یابد.

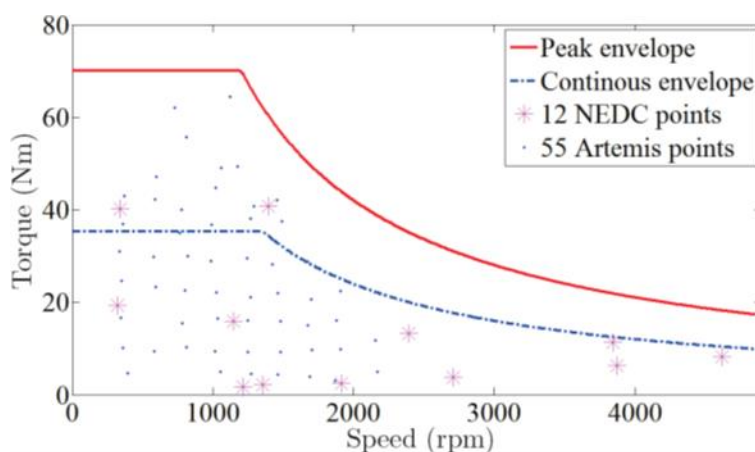


شکل ۵-۳: نقشه گشتاور در موتورهای سنکرون رلکتانس

۳-۵ منحنی گشتاور سرعت

هنگام طراحی موتور الکتریکی برای کاربرد در وسایل حمل و نقل، یکی از مهمترین نکات، تطابق موتور با وسیله مورد نظر می باشد. برای این منظور، پس از شناخت وسیله از نظر مشخصات تاثیرگذار بر محرکه، اولین قدم تعیین سرعت و نیرویی است که وسیله نقلیه در آنها بهره برداری می شود. با داشتن مشخصات وسیله، می توان نیرو و سرعت وسیله را به گشتاور و سرعت چرخشی موتور تبدیل نمود.

شکل منحنی گشتاور-سرعت را نشان می دهد. از آنجاییکه تعداد نقاط کارکرد موتور زیاد است و مدت زمان کارکرد در هر نقطه با نقاط دیگر متفاوت است، باید با توجه به انرژی که موتور در نقاط کاری مختلف تبدیل می کند، تعداد این نقاط را کاهش داد و تنها موثرترین آنها را انتخاب نمود [۲۰]



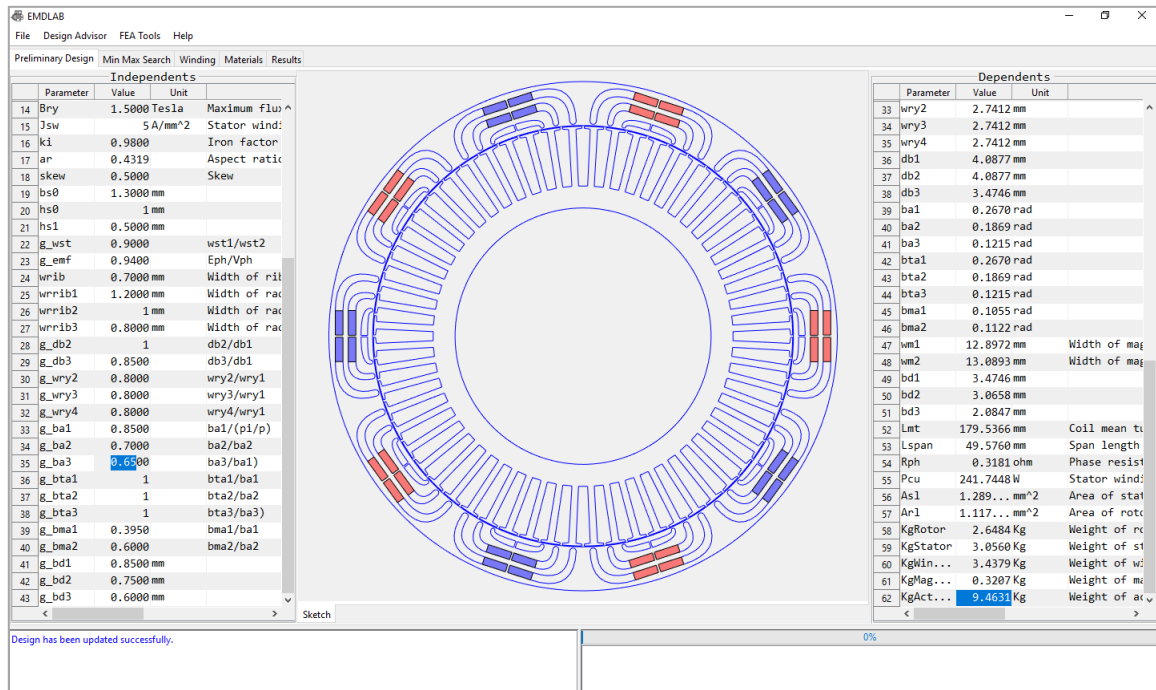
شکل ۳-۶: منحنی گشتاور-سرعت

۳-۶ نقشه بازدهی

نقشه بازدهی^۲ بیانگر بازدهی موتور در نقاط کاری مختلف است. موتور باید به گونه ای طراحی شود که بیشترین نقاط کاری موتور در کانتور بیشترین بازدهی قرار گیرند.

۳-۷ توسعه نرم افزار

در طول این پژوهش یک نرم افزار جهت طراحی موتور توسعه داده شد. روند طراحی بدین صورت است که ابتدا طراحی تحلیلی صورت می گیرد. **Error! Reference source not found.** نرم افزار توسعه داده شده جهت طراحی موتور را نشان می دهد.



شکل ۳-۷: نرم افزار توسعه داده شده جهت طراحی موتور پیشنهادی

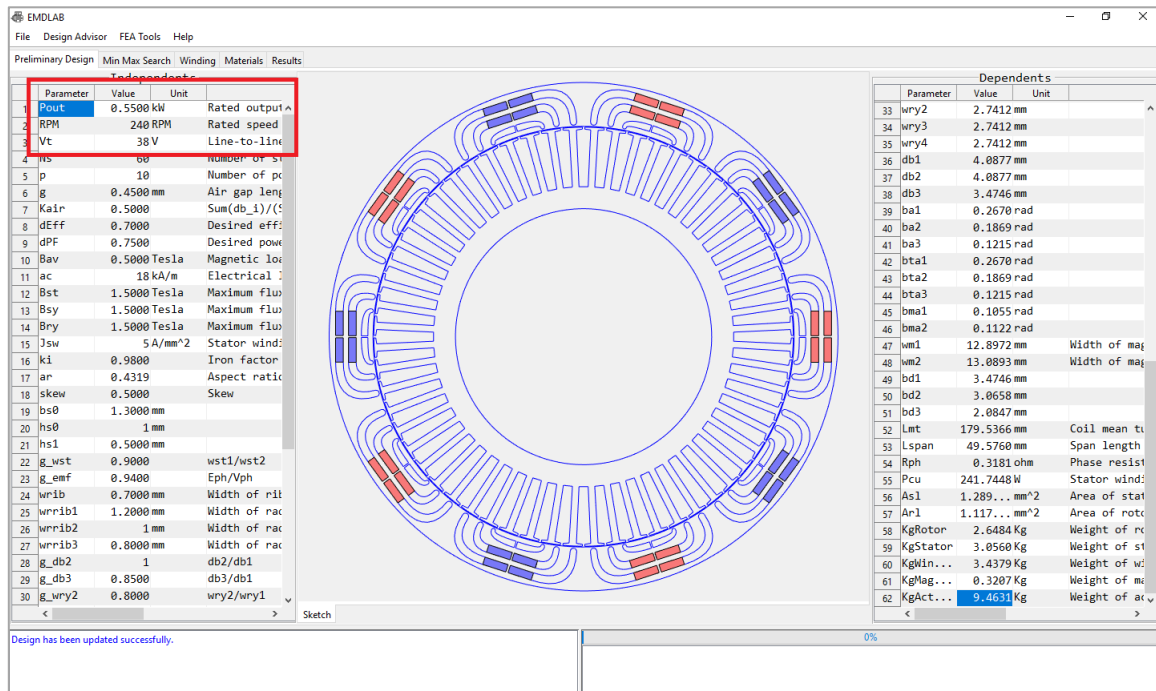
همانطور که دیده می شود متغیرهای طراحی به دو دسته مستقل و وابسته تقسیم بندی شده اند. متغیرهای مستقل باید به گونه ای تنظیم شوند که قیود طراحی برآورده شود. قیود طراحی قیودی هستند که بر روی متغیرهای وابسته اعمال می شوند. به عنوان مثال وزن قسمت های اکتیو موتور و یا تلفات مسی.

۳-۷-۱ روند طراحی

در ادامه به بیان مرحله به مرحله روند طراحی پرداخته ایم.

۳-۷-۱-۱ تنظیم مقادیر نامی موتور

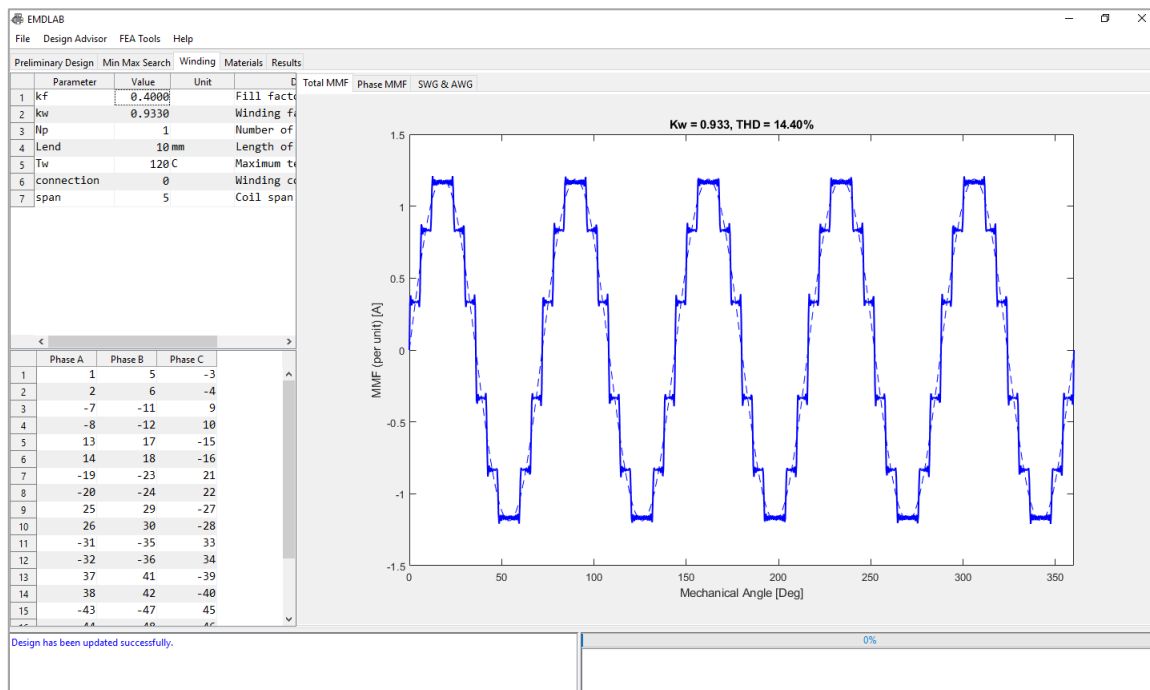
اولین مرحله تنظیم مقادیر نامی موتور هدف می باشد. توان، سرعت، ولتاژ تغذیه از جمله مشخصه های ثابت موتور می باشد. شکل جایگاه تنظیم مقادیر نامی را نشان می دهد.



شکل ۸-۳: تنظیم مقادیر نامی موتور

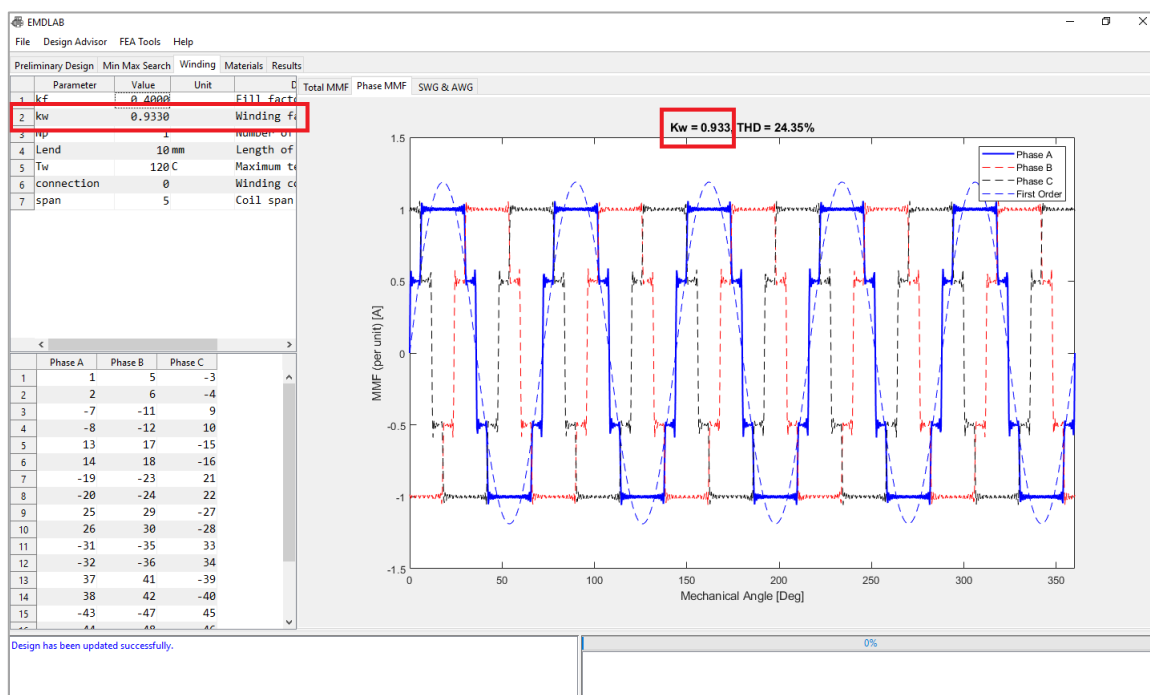
۲-۱-۷-۳ انتخاب متغیرهای گسسته

در متغیرهای مستقل طراحی متغیرهای گسسته و پیوسته وجود دارد. این موضوع امر بهینه سازی را دشوار میکند. نیاز از برای متغیرهای گسسته جداول ایجاد شود و به ازای هر کدام از آنها یک طرح بهینه ارائه گردد. از جمله متغیرهای گسسته می توان به تعداد دندانهای استاتور و تعداد قطب ها استفاده نام برد. در این مرحله باید این مقادیر تنظیم شوند. ترکیب تعداد قطب و شیار انتخاب مهمی بوده که وزن موتور و گشتاور تولیدی به آن وابسته است. پس از انتخاب تعداد قطب و شیار باید سیم پیچی تنظیم شود. پس از تنظیم تعداد قطب و شیار نرم افزار یک سیم پیچی ارائه می دهد. شکل ۲-۰ MMF منتهی ناشی از تحریک سه فاز موتور در فاصله هوایی را نشان می دهد. این مقدار پریونیت شده است.



شکل ۲-۰: توزیع MMF در فاصله هوایی ناشی از سیم پیچی سه فاز توزیع شده

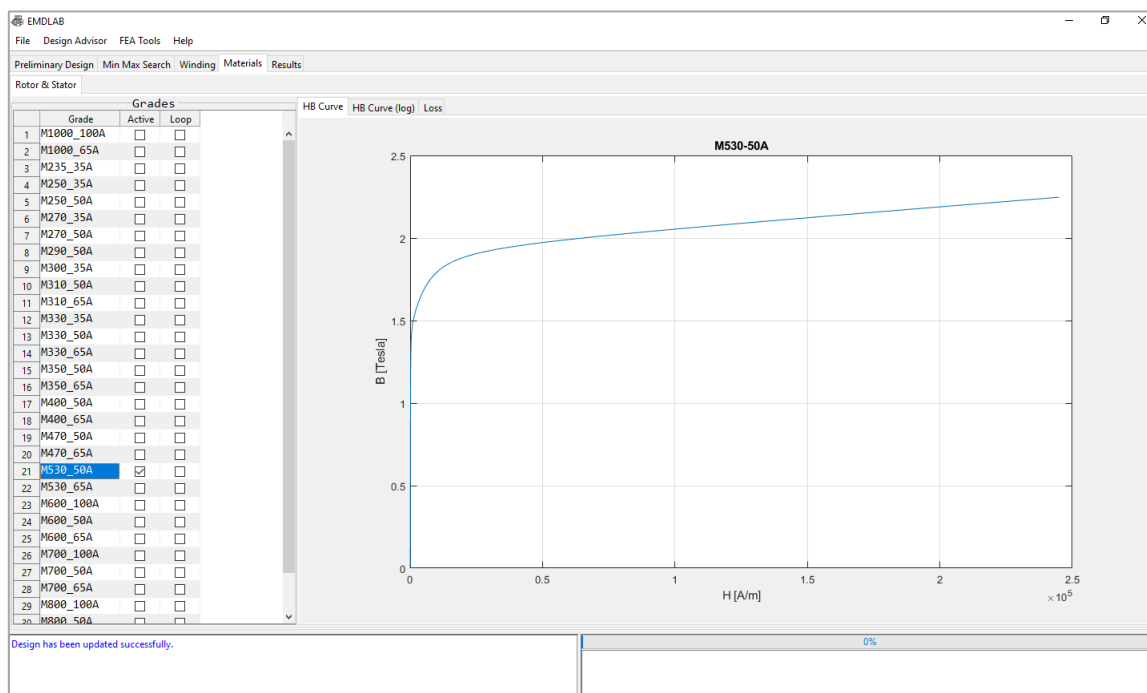
در این مرحله اسپین کوایل باید توسط کاربر تعیین شود. پس از تعیین اسپین کوایل نرم افزار ضریب سیم پیچی و THD را محاسبه می کند. شکل MMF سه فاز سیم پیچی پس از تعیین اسپین کوایل را نشان میدهد. در این مرحله باید مقدار ضریب سیم پیچی محاسبه شده درون جدول کنار قرار گیرد. سپس باید بقیه پارامترها مربوط به سیم پیچی موتور مثل ضریب پرشدگی و دمای ماکزیمم مجاز تعیین شود.



شکل ۱۰-۳: MMF سه فاز پس از تعیین اسپین کوایل

۳-۷-۱-۳ تنظیم نوع ورق

در این مرحله باید نوع ورق مورد استفاده برای ساخت روتور و استاتور تعیین گردد. همانطور که دیده می شود ورق در نظر گرفته شده M530-50A می باشد.



شکل ۱۱-۳: تنظیم نوع ورق روتور و استاتور

۳-۷-۱-۴ جستجوی مینیمم ماکزیمم

پس از تنظیمات قبل باید جستجوی مینیمم ماکزیمم را انجام دهیم. در این جستجو باید متغیرهای مستقل مورد نظر که تخمین خوبی از اندازه آنها داریم در یک بازه تغییر دهیم و تمامی حالات ممکن را بررسی کنیم. با توجه به قیود در نظر گرفته شده نرم افزار طرح های احتمالی را جدا می کند.

EMDLAB

File

Design Advisor

FEA Tools

Help

Preliminary Design

Min Max Search

Winding

Materials

Results

Min Max Independents

Parameter	Min Value	Max Value	Counts	Enable
1 g	0.3000	0.6000	3	☐
2 Kair	0.2000	0.8000	3	☒
3 dEff	0.9000	0.9200	3	☐
4 dPF	0.7000	0.8000	3	☐
5 Bav	0.4000	0.6000	3	☒
6 ac	15	25	3	☒
7 Bst	1.3000	1.9000	3	☐
8 Bsy	1.3000	1.9000	3	☐
9 Bry	1.3000	1.9000	3	☐
10 Jsw	3	5	3	☒
11 ar	1.5000	5	3	☐
12 g_wst	1	2	3	☐
13 g_emf	0.9500	0.9900	3	☐
14 g_db2	0.7000	1	3	☐
15 g_db3	0.7000	1	3	☐

Min Max Dependents

Parameter	Min Value	Max Value	Impose
1 It	0	9	☐
2 Lstk	0	45	☒
3 Do	0	270	☒
4 Di	10	Inf	☐
5 db1	2	Inf	☐
6 db2	2	Inf	☐
7 db3	2	Inf	☐
8 wm1	0	0	☐
9 wm2	0	0	☐

Valid Designs

	Pout	RPM	Vt	Nz	p	g	Kair	dEff	dPF	B
1	0.5500	240	38	60	10	0.4500	0.2000	0.7000	0.7500	1
2	0.5500	240	38	60	10	0.4500	0.2000	0.7000	0.7500	1
3	0.5500	240	38	60	10	0.4500	0.2000	0.7000	0.7500	1
4	0.5500	240	38	60	10	0.4500	0.2000	0.7000	0.7500	1
5	0.5500	240	38	60	10	0.4500	0.5000	0.7000	0.7500	1
6	0.5500	240	38	60	10	0.4500	0.2000	0.7000	0.7500	1
7	0.5500	240	38	60	10	0.4500	0.5000	0.7000	0.7500	1
8	0.5500	240	38	60	10	0.4500	0.2000	0.7000	0.7500	1
9	0.5500	240	38	60	10	0.4500	0.5000	0.7000	0.7500	1
10	0.5500	240	38	60	10	0.4500	0.2000	0.7000	0.7500	1
11	0.5500	240	38	60	10	0.4500	0.5000	0.7000	0.7500	1
12	0.5500	240	38	60	10	0.4500	0.2000	0.7000	0.7500	1
13	0.5500	240	38	60	10	0.4500	0.5000	0.7000	0.7500	1
14	0.5500	240	38	60	10	0.4500	0.2000	0.7000	0.7500	1
15	0.5500	240	38	60	10	0.4500	0.2000	0.7000	0.7500	1
16	0.5500	240	38	60	10	0.4500	0.2000	0.7000	0.7500	1
17	0.5500	240	38	60	10	0.4500	0.2000	0.7000	0.7500	1
18	0.5500	240	38	60	10	0.4500	0.5000	0.7000	0.7500	1
19	0.5500	240	38	60	10	0.4500	0.2000	0.7000	0.7500	1
20	0.5500	240	38	60	10	0.4500	0.5000	0.7000	0.7500	1
21	0.5500	240	38	60	10	0.4500	0.2000	0.7000	0.7500	1
22	0.5500	240	38	60	10	0.4500	0.5000	0.7000	0.7500	1
23	0.5500	240	38	60	10	0.4500	0.2000	0.7000	0.7500	1
24	0.5500	240	38	60	10	0.4500	0.5000	0.7000	0.7500	1
25	0.5500	240	38	60	10	0.4500	0.2000	0.7000	0.7500	1
26	0.5500	240	38	60	10	0.4500	0.5000	0.7000	0.7500	1
27	0.5500	240	38	60	10	0.4500	0.2000	0.7000	0.7500	1
28	0.5500	240	38	60	10	0.4500	0.2000	0.7000	0.7500	1
29	0.5500	240	38	60	10	0.4500	0.2000	0.7000	0.7500	1
30	0.5500	240	38	60	10	0.4500	0.2000	0.7000	0.7500	1

Design has been updated successfully.

100%

شکل ۱۲-۳: طرح های معتبر پس از جستجوی مینیمم ماکزیمم

Error! Reference source not found.

این طرح ها را جهت بررسی بیشتر انتخاب کرد. هر ستون از جدول نشان داده شده مربوط به یک متغیر از ماشین است. می توان سطرها را بر اساس یک متغیر انتخابی مرتب کرد و در نهایت طرح مورد نظر جهت بررسی بیشتر را انتخاب کرد.

EMDLAB

File Design Advisor FEA Tools Help

Preliminary Design

Min Max Search Winding Materials Results

Min Max Independents

Parameter	Min Value	Max Value	Counts	Enable
1 g	0.3000	0.6000	3	☐
2 Kair	0.2000	0.8000	3	☒
3 dEff	0.9000	0.9200	3	☐
4 dPF	0.7000	0.8000	3	☐
5 Bav	0.4000	0.6000	3	☒
6 ac	15	25	3	☒
7 Bst	1.3000	1.9000	3	☐
8 Bsy	1.3000	1.9000	3	☐
9 Bry	1.3000	1.9000	3	☐
10 Jsw	3	5	3	☒
11 ar	1.5000	5	3	☐
12 g_wst	1	2	3	☐
13 g_emf	0.9500	0.9900	3	☐
14 g_db2	0.7000	1	3	☐
15 g_db3	0.7000	1	3	☐

Min Max Dependents

Parameter	Min Value	Max Value	Impose
1 It	0	9	☐
2 Lstk	0	45	☒
3 Do	0	270	☒
4 Di	10	Inf	☐
5 db1	2	Inf	☐
6 db2	2	Inf	☐
7 db3	2	Inf	☐
8 wm1	0	0	☐
9 wm2	0	0	☐

Valid Designs

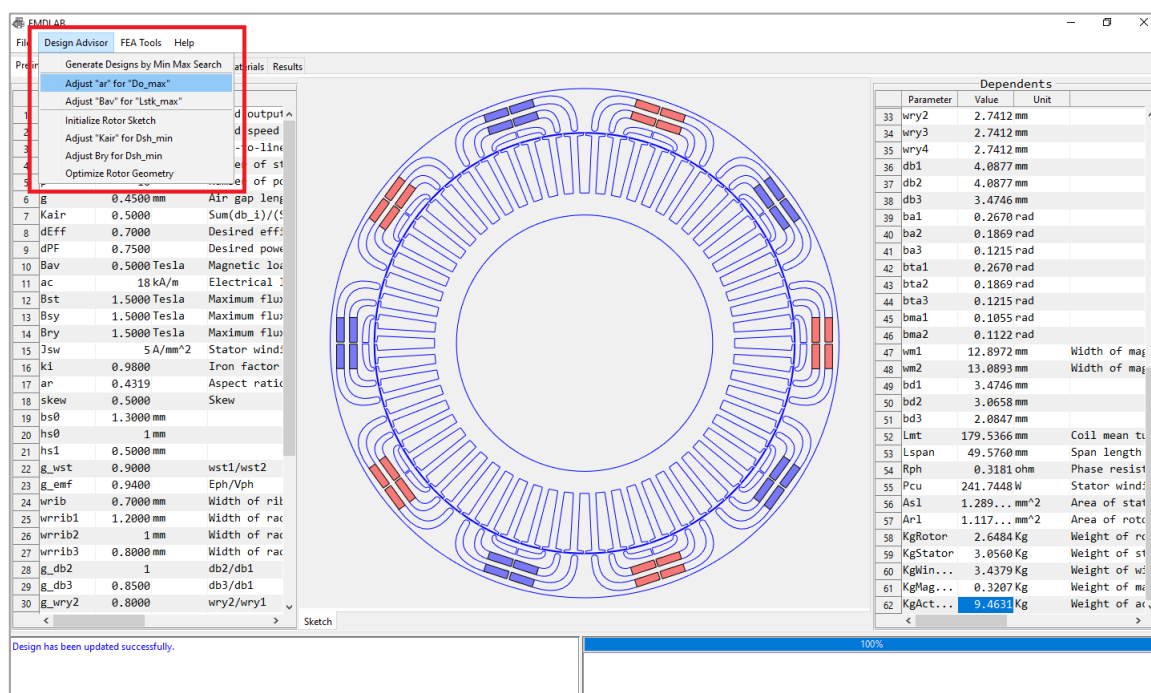
	h	Pcu	Asl	Arl	KgRotor	KgStator	KgWinding	KgMagnets	KgActiveParts	span
1	0.1708	129.7939	1.6986e+04	1.0583e+04	2.6654	4.2781	5.1273	0.0931	12.1638	5
2	0.1403	106.6310	2.1038e+04	1.1330e+04	2.6854	4.9862	4.2123	0.0942	11.9781	5
3	0.2053	156.0079	1.5810e+04	8.0547e+03	1.9855	3.8972	6.1628	0.0688	12.1143	5
4	0.1680	127.6705	1.5227e+04	8.7436e+03	2.0008	3.4844	5.0434	0.0696	10.5982	5
5	0.1680	127.6705	1.5227e+04	1.0425e+04	2.3855	3.4844	5.0434	0.2883	11.2016	5
6	0.1486	112.9551	1.2690e+04	9.3618e+03	2.0160	2.7327	4.4621	0.0704	9.2812	5
7	0.1486	112.9551	1.2690e+04	1.0996e+04	2.3678	2.7327	4.4621	0.2935	9.8561	5
8	0.2029	154.2300	1.0681e+04	6.9462e+03	1.5895	2.4440	6.0926	0.0549	10.1810	5
9	0.2029	154.2300	1.0681e+04	8.4141e+03	1.9254	2.4440	6.0926	0.2258	10.6879	5
10	0.1744	132.5856	7.6634e+03	7.5407e+03	1.6019	1.6279	5.2376	0.0555	8.5228	5
11	0.1744	132.5856	7.6634e+03	9.0001e+03	1.9119	1.6279	5.2376	0.2299	9.0072	5
12	0.1542	117.2018	5.4630e+03	8.0741e+03	1.6140	1.0921	4.6299	0.0561	7.3921	5
13	0.1542	117.2018	5.4630e+03	9.4942e+03	1.8979	1.0921	4.6299	0.2340	7.8350	5
14	0.2386	181.3405	1.4377e+04	1.0583e+04	2.6654	3.6211	4.0295	0.0931	10.1356	5
15	0.2067	157.0707	1.6767e+04	1.1330e+04	2.6854	3.9739	3.4902	0.0942	9.7499	5
16	0.2973	225.9896	1.2413e+04	8.0547e+03	1.9855	3.0597	5.0216	0.0688	10.1356	5
17	0.2456	186.6892	1.5431e+04	8.7436e+03	2.0008	3.5312	4.1483	0.0696	9.7499	5
18	0.2456	186.6892	1.5431e+04	1.0425e+04	2.3855	3.5312	4.1483	0.2883	10.3533	5
19	0.2059	156.5257	1.6482e+04	9.3618e+03	2.0160	3.5491	3.4781	0.0704	9.1135	5
20	0.2059	156.5257	1.6482e+04	1.0996e+04	2.3678	3.5491	3.4781	0.2935	9.6885	5
21	0.2949	224.1466	1.3946e+04	6.9462e+03	1.5895	3.1912	4.9807	0.0549	9.8163	5
22	0.2949	224.1466	1.3946e+04	8.4141e+03	1.9254	3.1912	4.9807	0.2258	10.3232	5
23	0.2433	184.8866	1.2970e+04	7.5407e+03	1.6019	2.7552	4.1083	0.0555	8.5208	5
24	0.2433	184.8866	1.2970e+04	9.0001e+03	1.9119	2.7552	4.1083	0.2299	9.0053	5
25	0.2153	163.6695	1.0780e+04	8.0741e+03	1.6140	2.1550	3.6368	0.0561	7.4620	5
26	0.2153	163.6695	1.0780e+04	9.4942e+03	1.8979	2.1550	3.6368	0.2340	7.9238	5
27	0.3045	231.4399	1.3177e+04	1.0583e+04	2.6654	3.3189	3.2913	0.0931	9.3687	5
28	0.2668	202.7695	1.4822e+04	1.1330e+04	2.6854	3.5129	2.8836	0.0942	9.1761	5
29	0.3827	290.8833	1.1144e+04	8.0547e+03	1.9855	2.7471	4.1367	0.0688	8.9381	5
30	0.3243	246.4643	1.2954e+04	8.7436e+03	2.0008	2.9644	3.5050	0.0696	8.5398	5

Design has been updated successfully.

100%

شکل ۱۳-۳: انتخاب یک طرح جهت بررسی بیشتر

پس از انتخاب طرح مورد نظر به صفحه Preliminary design بر می گردیم. در این قسمت جهت بهینه سازی موتور می توان از Design Advisor بهره گرفت. گزینه هایی همچون تنظیم نسبت کشیدگی^۱، بهینه ساز روتور و ... در این تب وجود دارند.

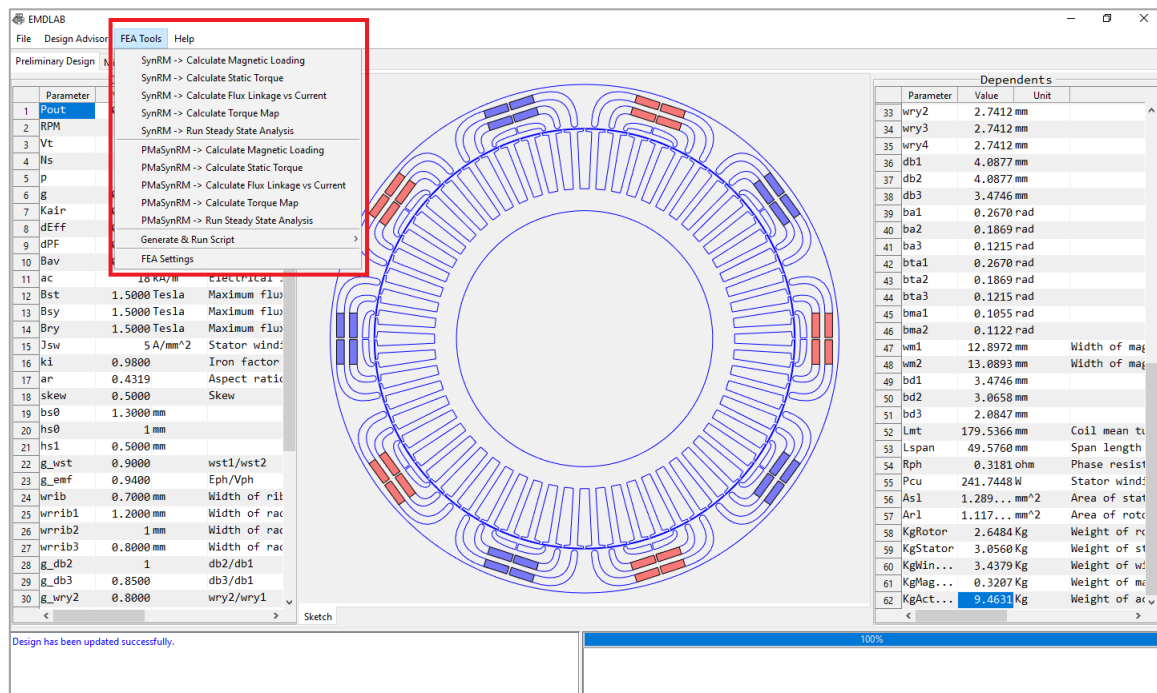


شکل ۱۴-۳: گزینه های موجود در Design Advisor

۵-۱-۷-۳ تحلیل المان محدود

پس از بهینه سازی طرح باید تحلیل المان محدود انجام داد تا مشخصه های موتور استخراج گردد. نرم افزار از دو حلگر المان محدود استفاده می کند. حلگر داخلی نوشته شده به کمک نرم افزار EMDLAB و حلگر دیگر نرم افزار ANSYS Maxwell است.

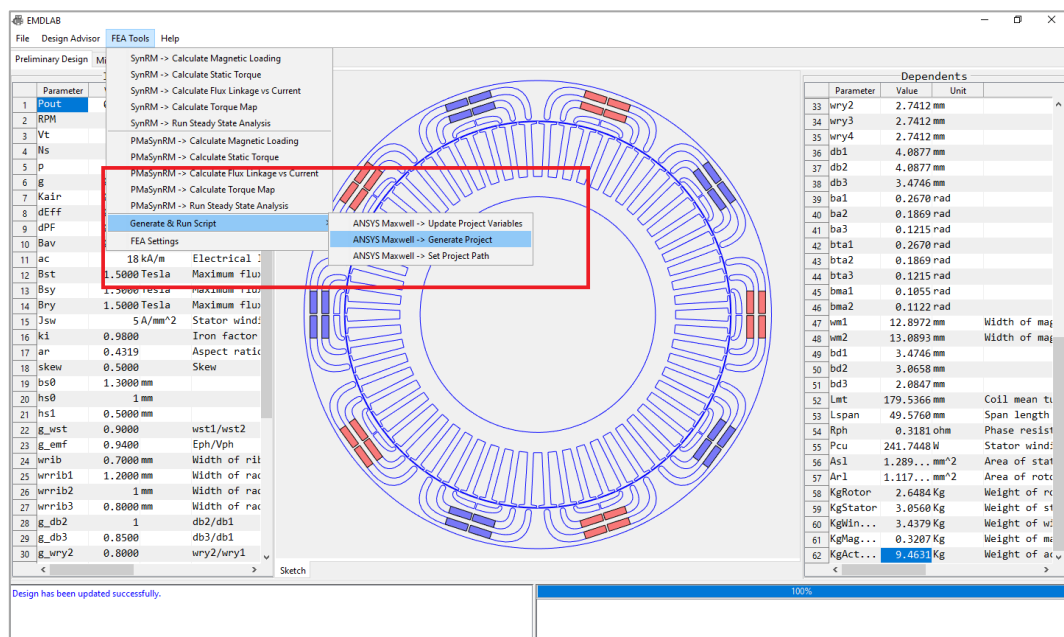
شکل گزینه های موجود جهت تحلیل المان محدود موتور را نشان می دهد. در نرم افزار، تحلیل المان محدود دو موتور سنکرون رلکتانس و سنکرون رلکتانس تقویت شده با آهنربا گنجانده شده است. بنابراین می توان همزمان مشخصات این دو نوع موتور را استخراج کرد و مورد مقایسه قرار داد.



شکل ۱۵-۳: گزینه های موجود برای تحلیل المان محدود موتور

۳-۷-۱-۶ صحنه سنجی نهایی نتایج با نرم افزار Maxwell

پس از انجام شبیه سازی ها و تحلیل های مورد نظر توسط حلگر داخلی نرم افزار، برای صحنه سنجی نهایی می توان شبیه سازیهای متناظری در نرم افزار Maxwell انجام داد. در درون نرم افزار برنامه ای نوشته شده است که به کمک اجرای آن می توان مدل موتور را در نرم افزار Maxwell ایجاد کرد.



شکل ۱۶-۳: ایجاد مدل در نرم افزار Maxwell به صورت خودکار

۳-۸ شبیه سازی و نتایج

در این بخش روند شبیه سازی جهت استخراج مشخصات موتور توضیح داده شده است. نتایج مربوط به موتورهای طراحی شده آورده شده و تحلیل و مقایسه صورت گرفته شده است. در این پژوهش تعدادی موتور با مقادیر نامی مختلف در نظر گرفته شد و برای هر کدام از آنها یک طرح مناسب ارائه گردید.

۳-۸-۱ مقادیر نامی موتور هدف

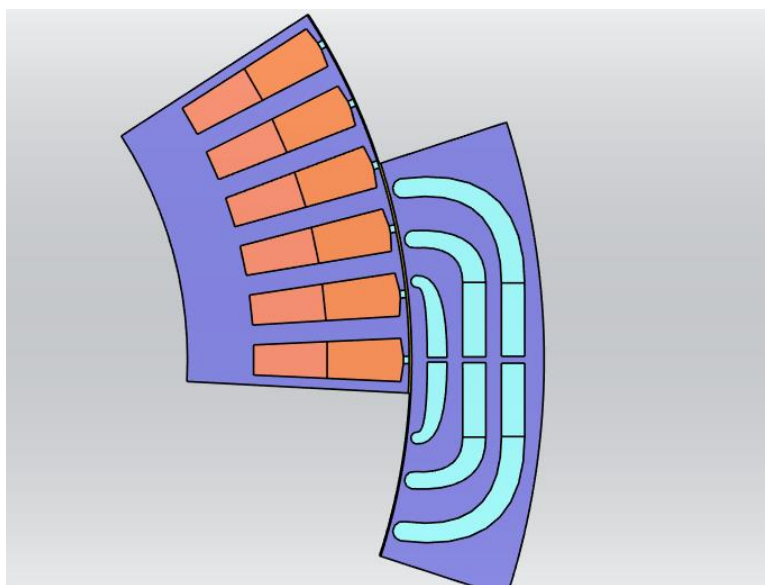
مقادیر نامی موتور هدف به این شرح زیر است:

- توان نامی: ۵۵۰ وات
- ولتاژ باتری: ۴۸ ولت
- سرعت نامی: ۲۴ کیلومتر بر ساعت

در ادامه نتایج مربوط به موتور طراحی شده ارائه شده است. در هر بخش دو نتیجه ذکر شده است که یکی مربوط به SynRM و دیگری مربوط به PMSynRM می باشد.

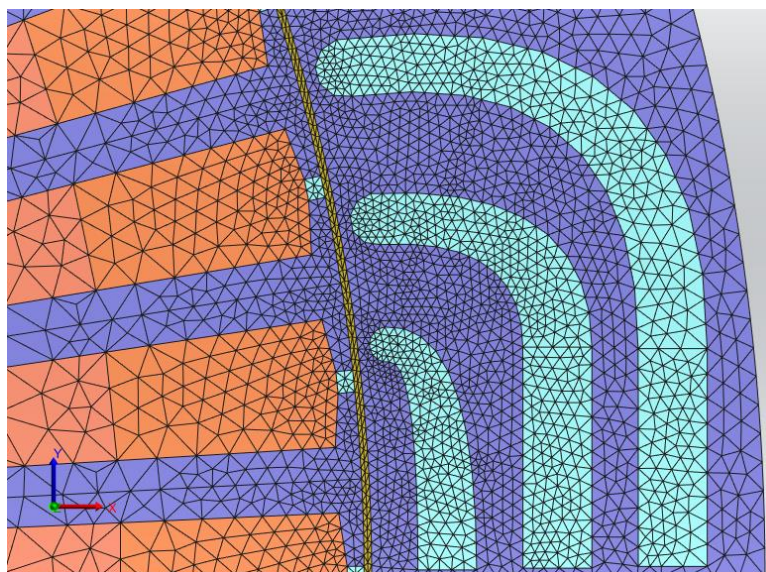
۳-۸-۲ مواد، هندسه و مش بندی

با توجه به موجود بودن گرید ورق در ایران، گرید M530-50A برای شبیه سازی ها در نظر گرفته شد. همچنین نوع آهنربای فریتی در نظر گرفته شده Y30BH می باشد. **Error! Reference source not found.** هندسه مربوط به طرح نهایی را نشان می دهد.



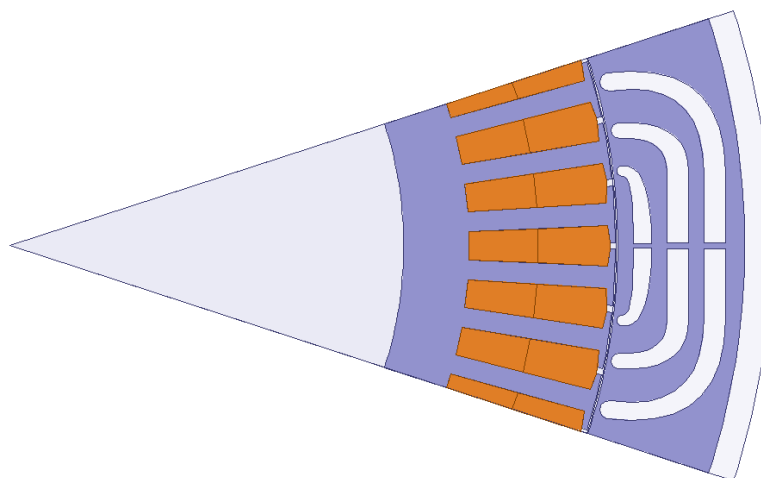
شکل ۳-۱۷: هندسه طرح نهایی جهت تحلیل

شکل مش بندی ایجاد شده جهت تحلیل طرح نهایی را نشان می دهد. با توجه به اشباع محلی مش بندی در نواحی ای که ضخامت آهن نازک است باید به صورت مناسب صورت گیرد.

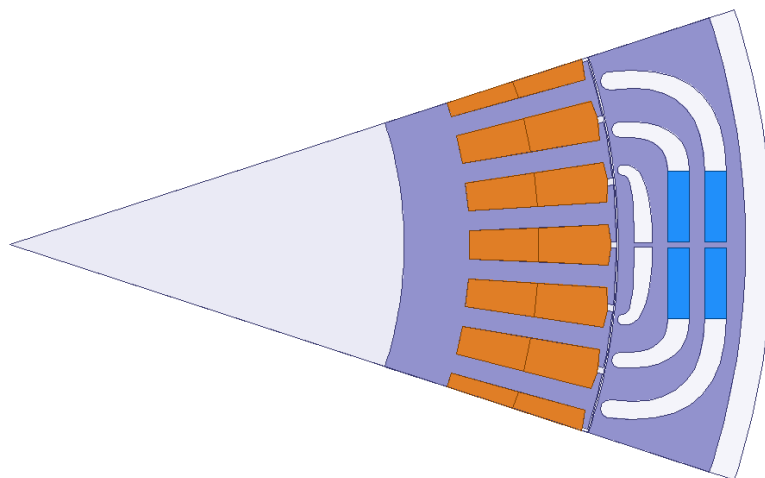


شکل ۱۸-۳: مش بندی ایجاد شده توسط EMDLAB جهت تحلیل

شکل ۳-۰ و شکل هندسه های ایجاد شده در نرم افزار ANSYS Maxwell را نشان می دهند.



شکل ۳-۰: هندسه SynRM ایجاد شده در ANSYS Maxwell

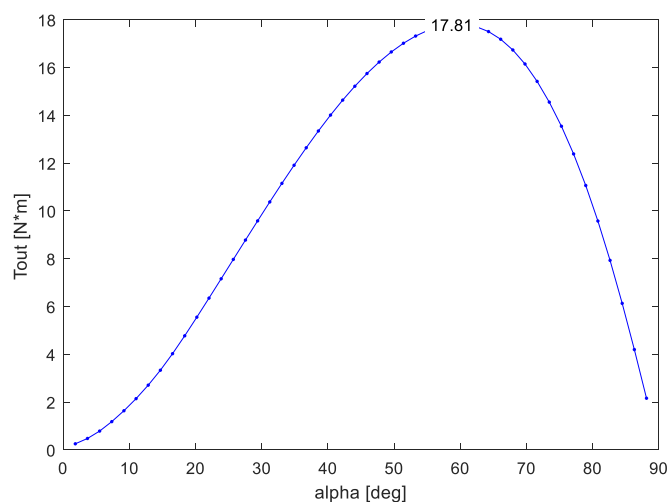


شکل ۳-۲۰: هندسه PMaSynRM ایجاد شده در نرم افزار ANSYS Maxwell

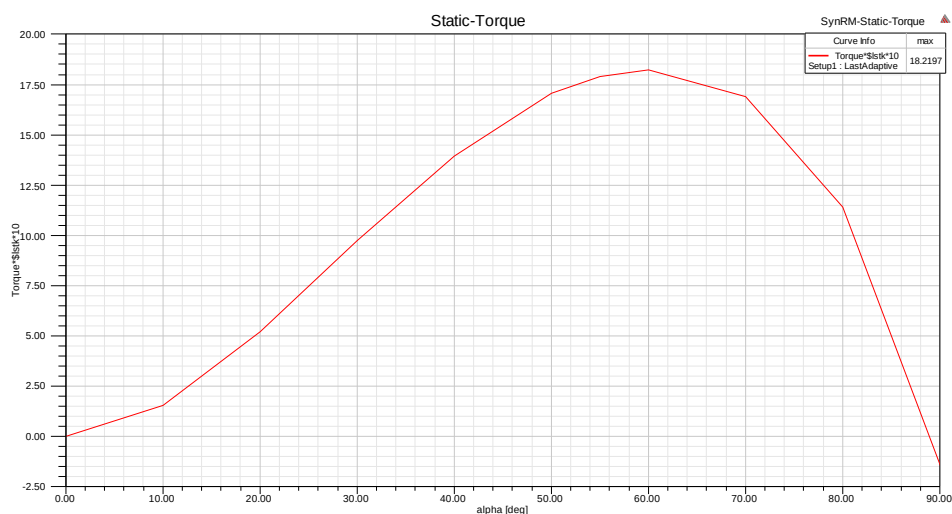
۳-۸-۳ گشتاور استاتیکی

Error! Reference source not found. گشتاور استاتیکی محاسبه شده به کمک نرم افزار

EMDLAB را نشان می دهد. همچنین شکل صحنه سنجی این نمودار به کمک نرم افزار ANSYS Maxwell را نشان می دهد. همانطور که دیده می شود ماکزیمم گشتاور حدود ۱۸ نیوتن متر می باشد.

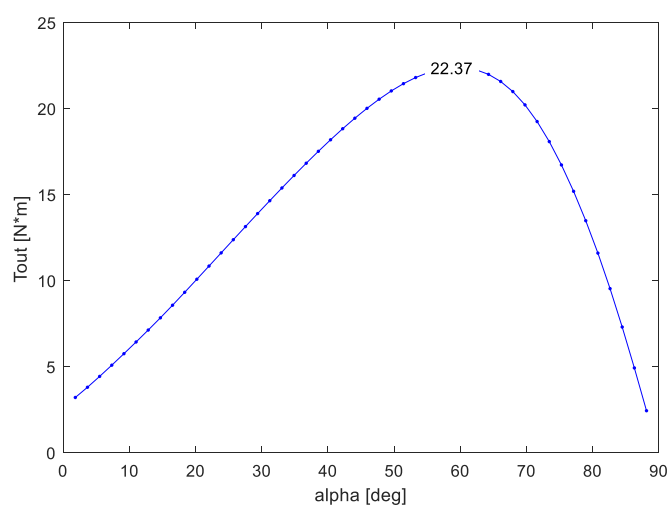


شکل ۳-۲۱: گشتاور استاتیکی SynRM محاسبه شده به کمک EMDLAB

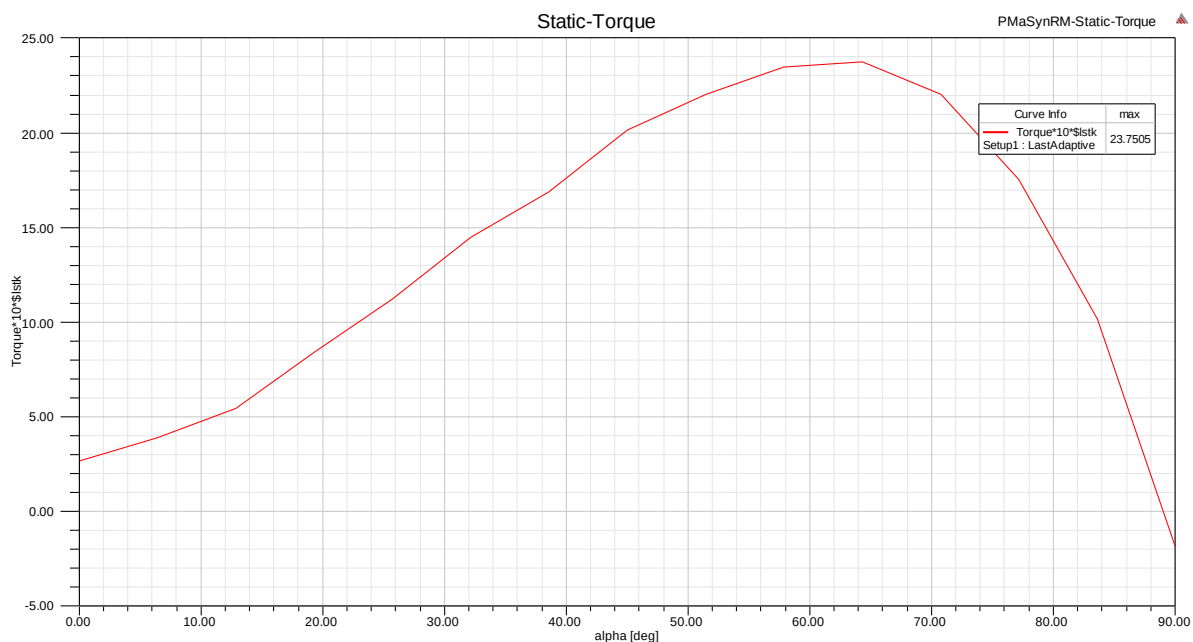


شکل ۲۲-۳: گشتاور استاتیکی SynRM محاسبه شده به کمک ANSYS Maxwell

شکل و **Error! Reference source not found.** گشتاور استاتیکی محاسبه شده برای طرح نهایی به کمک EMDLAB و ANSYS Maxwell را به ترتیب نشان می دهند. همانطور که دیده می شود. گشتاور بیشینه حدود ۲۳ نیوتن متر است که مقدار گشتاور نامی مورد نیاز را تامین می کند.



شکل ۲۳-۳: گشتاور استاتیکی PMaSynRM محاسبه شده به کمک EMDLAB

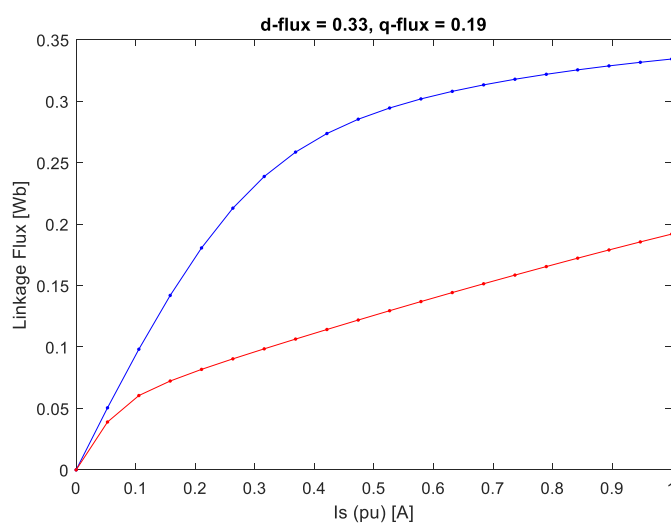


شکل ۲۴-۳: گشتاور استاتیکی PMSynRM محاسبه شده به کمک ANSYS Maxwell

۳-۸-۴ حلقه تبدیل انرژی

شکل حلقه تبدیل انرژی محاسبه شده برای SynRM را نشان می دهد. برای این شبیه سازی زاویه روتور در حالت هم محوری و غیر هم محوری قرار داده شده و با تزریق جریان به سیم پیچی ها این مشخصه را می توان محاسبه کرد. به کمک این مشخصه می توان نسبت برجستگی را محاسبه کرد. نسبت برجستگی محاسبه شده برای SynRM برابر است با:

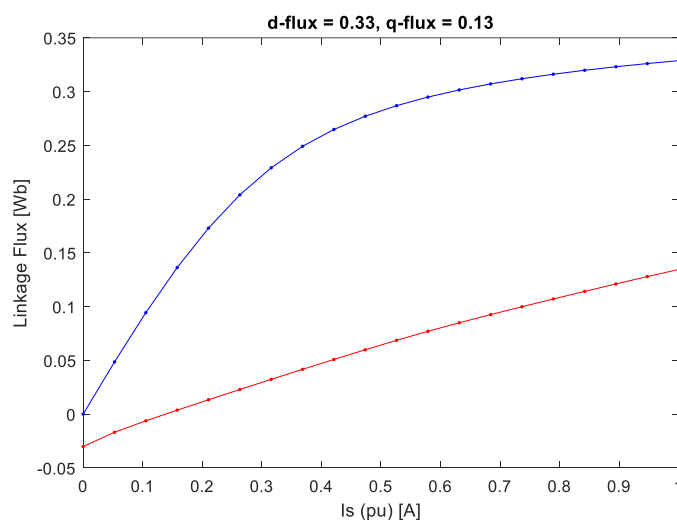
$$\eta_{SynRM} = \frac{0.33}{0.19} = 1.74 \quad (3-5)$$



شکل ۲۵-۳: حلقه تبدیل انرژی SynRM

شکل حلقه تبدیل انرژی محاسبه شده برای PMSynRM را نشان می دهد. همانطور که دیده می شود اضافه کردن آهنرباها باعث کاهش شار محور q می شود. این امر باعث افزایش مساحت حلقه تبدیل انرژی می گردد. نسبت برجستگی در این حالت برابر است با:

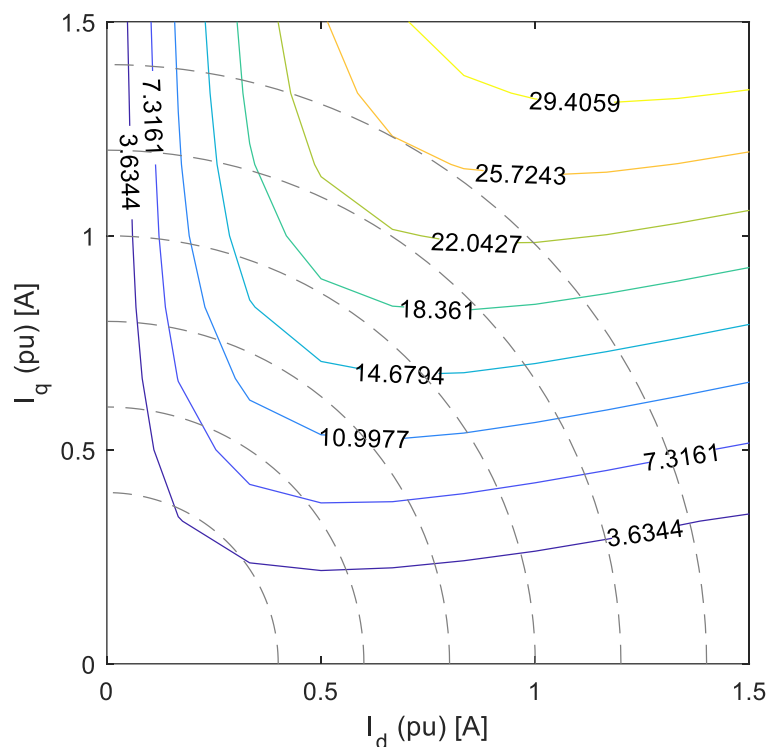
$$\eta_{SynRM} = \frac{0.33}{0.13} = 2.53 \quad (3-6)$$



شکل ۲۶-۳: حلقه تبدیل انرژی PMSynRM

۵-۸-۳ نقشه گشتاور

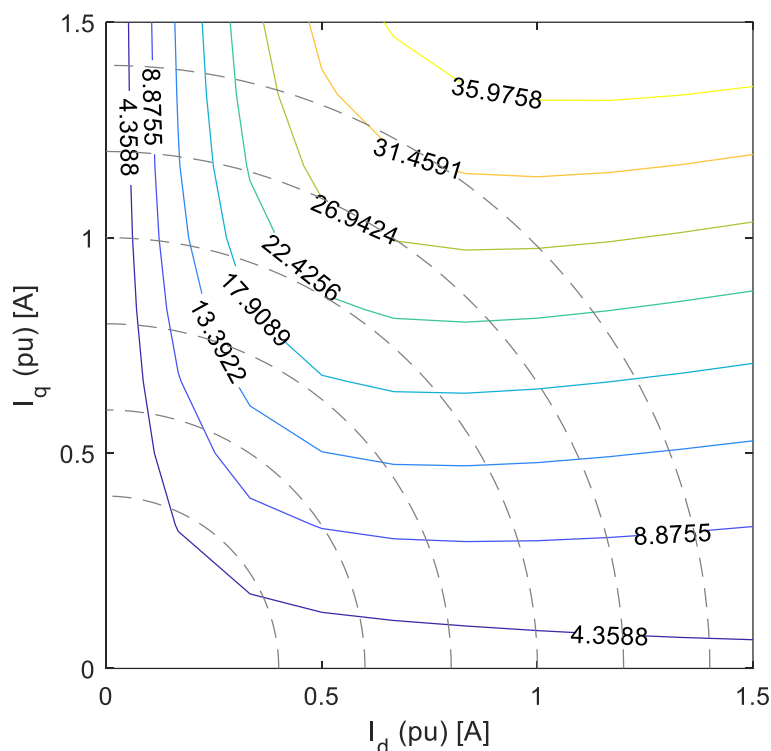
شکل نقشه گشتاور محاسبه شده برای SynRM را نشان می دهد. جریانها در این شکل به صورت پریونیت هستند. همانطور که دیده می شود این موتور با افزایش گشتاور جریان به سمت محور q کشیده می شود. این امر باعث کاهش ضریب توان می گردد.



شکل ۲۷-۳: نقشه گشتاور برای SynRM

شکل نقشه گشتاور برای موتور PMSynRM را نشان می دهد. اثر اضافه کردن آهنربا در این شکل مشهود است. همانطور که دیده می شود با اضافه کردن آهنربا کانتورهای گشتاور به سمت محور d کشیده می شوند. این امر باعث افزایش ضریب توان و گشتاور می گردد.

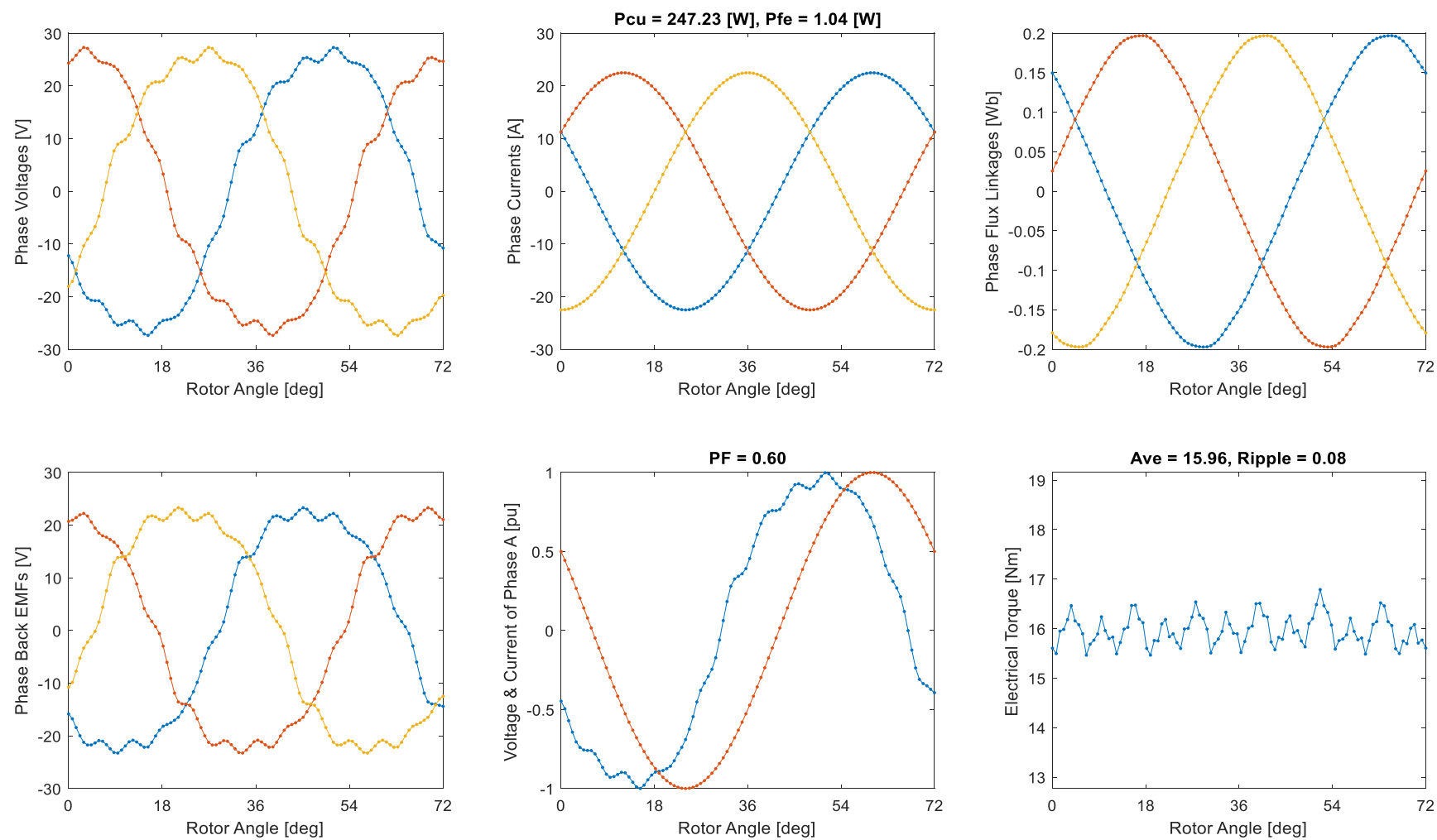
گشتاور نامی موتور هدف در این پژوهش ۲۲ نیوتن متر است. با توجه به شکل دیده می شود که این مقدار گشتاور در جریان نامی ۱ پریونت قابل استحصال است.



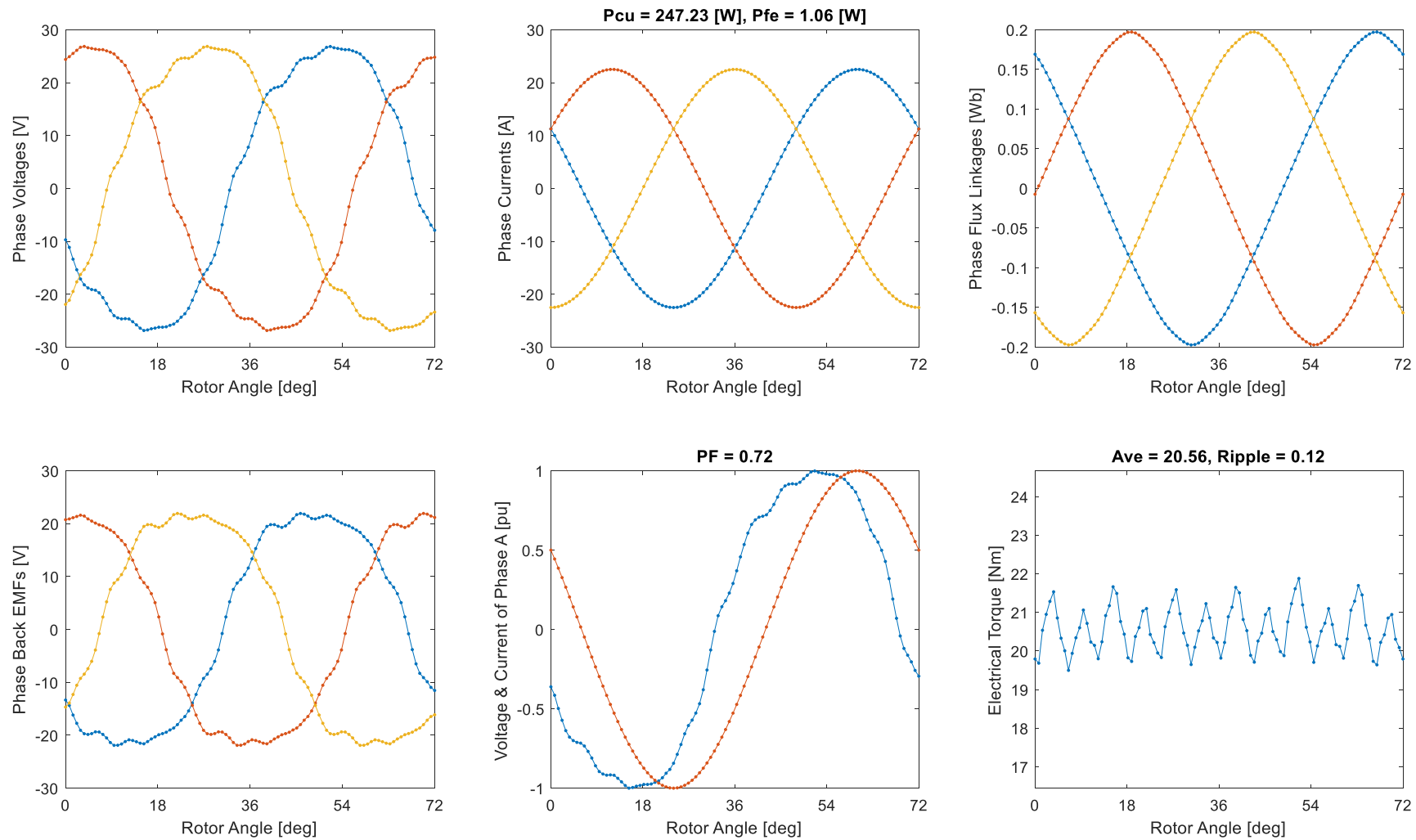
شکل ۲۸-۳: نقشه گشتاور برای PMaSynRM

۳-۸-۶ شبیه سازی حالت دائم

از شبیه سازی حالت دائم برای محاسبه مشخصات نامی موتور استفاده شد. در این شبیه سازی روتور را با سرعت ثابت چرخانده و جریانهای سه فاز به سیم پیچی ها تزریق گردید. شکل نتایج حاصل از شبیه سازی حالت دائم SynRM را نشان می دهد. همانطور که دیده می شود میانگین گشتاور خروجی ۱۶ نیوتن متر است و رپل گشتاور حدود ۸ درصد است. همچنین ضریب توان این موتور برابر ۰.۶ می باشد. شکل نتایج حاصل از شبیه سازی PMaSynRM را نشان می دهد. میانگین گشتاور ۲۰.۵ نیوتن متر و رپل گشتاور برابر ۱۲ درصد است. همچنین ضریب توان در حالت برابر ۰.۷۲ می باشد. با توجه به نتایج دیده می شود که اضافه کردن آهنربا به باعث افزایش ضریب توان و گشتاور میانگین می شود. همچنین اضافه کردن آهنربا باعث افزایش رپل گشتاور نیز می گردد. در این شبیه سازی ها فرض شده که هسته استاتور به اندازه نصف زاویه شیار اسکيو^۲ شده است.



شکل ۲۹-۳: نتایج حاصل از شبیه سازی حالت دائم SynRM



شکل ۳۰-۳: نتایج حاصل از شبیه سازی PMSynRM

۷-۸-۳ نتیجه گیری و پیشنهاد برای طرح نهایی

در این پژوهش روند طراحی موتور سنکرون رلکتانس تقویت شده با آهنربا بحث گردید. در این راستا یک نرم افزار تحت نرم افزار متلب جهت طراحی و تحلیل طرح پیشنهادی توسعه داده شد. نتایج مربوط به طرح نهایی مورد تحلیل صورت گرفت و شبیه سازیهای متناظری در نرم افزار ANSYS Maxwell جهت صحت سنجی نتایج صورت گرفت.

موتورهای مختلفی با مقادیر نامی مختلف در این پژوهش مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت جدول ۱-۳ موتورهای طراحی شده به همراه مشخصات آنها را نشان می دهد. در طراحی موتورهای سعی شده است که نسبت گشتاور رلکتانسی به گشتاور ناشی از آهنرباها بیشتر از سه به یک باشد.

Independents				Dependents								
Pout-Rated [W]	Speed [RPM]	Do [mm]	Lstk [mm]	Efficiency [%]	Power Factor	T-desired [N*m]	T-Reluctance		T-Magnets		KgActiveParts [Kg]	Pcu [W]
							[N*m]	[%]	[N*m]	[%]		
350	200	260	25	60.61%	0.76	16.71	12.6	75.40%	4.11	24.60%	7.7	217
350	220	260	23	61.03%	0.75	15.19	11.9	78.33%	3.29	21.67%	7.2	213
350	240	260	21	61.57%	0.75	13.93	10.8	77.55%	3.13	22.45%	6.8	208
450	200	265	32	63.69%	0.74	21.49	17.2	80.05%	4.29	19.95%	9.35	243
450	220	265	45	64.42%	0.73	19.53	15.6	79.87%	3.93	20.13%	8.7	235
450	240	265	26.6	64.98%	0.73	17.90	14.3	79.87%	3.60	20.13%	8.2	229
550	200	270	37.5	66.07%	0.72	26.26	21.3	81.11%	4.96	18.89%	10.9	266
550	220	270	33	67.20%	0.72	23.87	19.5	81.68%	4.37	18.32%	10	252
550	240	270	30	67.86%	0.71	21.88	17.8	81.34%	4.08	18.66%	9.4	244
650	200	275	40	68.67%	0.71	31.04	25.5	82.16%	5.54	17.84%	12.2	277
650	220	275	36	69.41%	0.71	28.21	23.1	81.87%	5.11	18.13%	11.4	267
650	240	275	33	70.01%	0.7	25.86	21.2	81.97%	4.66	18.03%	10.6	259
750	200	280	44	70.06%	0.71	35.81	29.2	81.54%	6.61	18.46%	13.7	298
750	220	280	40	70.79%	0.7	32.55	26.5	81.40%	6.05	18.60%	12.7	287
750	240	280	36.8	71.39%	0.7	29.84	24.3	81.43%	5.54	18.57%	11.9	278

جدول ۱-۳: موتورهای طراحی شده با مقادیر نامی مختلف

با توجه به معیار وزن یکی از موتورهای جهت ساخت و تست انتخاب شد. وزن قسمت های اکتیو^۱ موتور در نظر گرفته شده برابر ۹.۵ کیلوگرم می باشد. جزئیات مشخصات مربوط به موتور طراحی شده در پیوست آورده شده است.

در انتها به طور خلاصه برای فرآیند طراحی و ساختار روتور نهایی برای PMASYNRM بر اساس انتخاب های اولیه طراحی که در بخش های قبلی مورد بحث قرار گرفت، ابعاد PMSynRM به منظور به حداقل رساندن کل حجم فعال دستگاه و PM ها و همچنین ریپل گشتاور و هزینه کل و در عین حال افزایش چگالی گشتاور بررسی می شوند.

برخی از پارامترهای طراحی با توجه به نوع دوچرخه ای که برای کاربرد نهایی انتخاب شده است، محدود می شود. شکل ۳۱-۳ دوچرخه الکترونیکی را نشان می دهد که موتور MP2 BLDCM را به عنوان موتور محرکه نصب می کند که امتیازات و داده های طراحی قابل توجهی برای آن در جدول ۲-۳ ارائه شده است.

حداکثر فضای موجود برای نصب موتور شامل قطر بیرونی (D_{max}) و طول پشته (L_{stk}) در شکل ۳-۳۱ نشان داده شده است. سایر مشخصات مورد نظر نیز برای PMSynRM در جدول ۳-۲ آمده است.

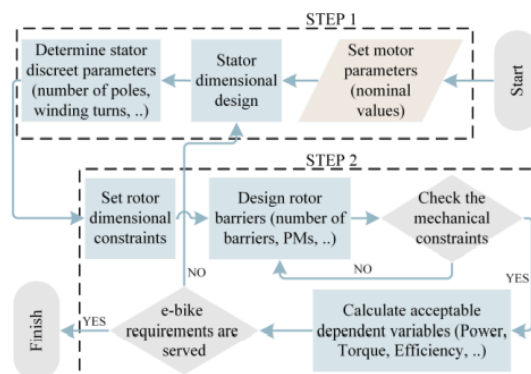


شکل ۳-۳۱: BLDCM تجاری که روی دوچرخه الکترونیکی در آزمایشگاه با محدودیت‌های ابعادی مرتبط نصب شده است.

جدول ۳-۲: مشخصات و ابعاد مورد نظر موتور

Parameter	Symbol	Unit	Value
Rated Power	P	W	500
Battery Voltage	V	V	48
Rated Speed	N	rpm	200
Efficiency	η	%	65-70
Torque Ripple	-	%	≤ 10
Stack Length	L_{stk}	mm	≤ 30
Rotor Outer Diameter	D_o	mm	≤ 270

استفاده از FEA یکی از دقیق‌ترین روش‌ها برای تحلیل و مدل‌سازی است، به ویژه زمانی که روتور اشباع‌های محلی را تجربه می‌کند. فرآیند طراحی دو مرحله‌ای PMSynRM پیاده‌سازی شده در شکل ۳-۳۲ از FEA برای محاسبه توان، گشتاور، بازده و غیره استفاده می‌کند.



شکل ۳-۳۲: پیاده‌سازی فرآیند طراحی PMSynRM مبتنی بر FE و مراحل آن

در مرحله اول، فرآیند طراحی استاتور انجام می شود. در این مرحله، پارامترهای رتبه بندی شده ثابت می شوند. سپس، متغیرهای گسسته برای پارامترهای طراحی، یعنی تعداد قطبها و شکافهای استاتور، با در نظر گرفتن نرخ گشتاور مورد نیاز و محدودیت مکانیکی مشخص (وزن و حجم) تعیین می شوند. در مرحله بعد، پیکربندی سیم پیچ شامل دهانه سیم پیچ، ضریب پر شدن و دمای مجاز تعیین می شود.

در مرحله دوم فرآیند طراحی روتور انجام می شود. جزئیات پارامترهای طراحی روتور در پاراگراف های بعدی ارائه شده است. در پایان، متغیرهای وابسته مانند بازده، ضریب توان و گشتاور با استفاده از FEA با توجه به محدودیتها و محدوده مجاز متغیرهای مستقل محاسبه می شوند. به این ترتیب طرح های معتبری تولید می شود که همه طرح ها در محدوده مورد نظر باشند.

تمامی طرح های معتبر بر اساس الزامات فیزیکی و مکانیکی دوچرخه الکترونیکی انتخاب شده اند. سه مورد از مناسب ترین طرح های متناسب با کاربرد دوچرخه الکترونیکی در جدول ۳-۳ ارائه شده اند که در نهایت طرح انتخاب شده در ردیف سوم جدول ۳-۳ ارائه شده است زیرا دارای ۹٪ و ۵٪ تراکم گشتاور بالاتری نسبت به دو مورد دیگر در ردیفها است. به ترتیب یک و دو در جدول ۲، ρT ، T ، $P.F.$ ، $Eff.$ به ترتیب نشان دهنده راندمان محاسبه شده مبتنی بر FEA، ضریب توان، گشتاور و چگالی گشتاور هستند.

جدول ۳-۳: ویژگی های سه طرح PMASYNRM معتبر قابل اجرا

Independent Variables				Dependent Variables			
P [W]	N [rpm]	D_o [mm]	L_{stk} [mm]	$Eff.$ [%]	$P.F.$	T [N.m]	ρT [N/m ³]
500	200	270	37.5	66.07	0.72	26.26	12.2
550	220	270	33	67.20	0.72	23.87	12.6
500	210	270	30	67.86	0.71	22.80	13.3

اهداف مختلفی در طول فرآیند طراحی را می توان برای داشتن ساختار روتور قابل اجرا در نظر گرفت، مانند به حداکثر رساندن گشتاور، به حداکثر رساندن نسبت برجستگی، یا به حداکثر رساندن تفاوت بین L_d و L_q . برای PMaSynRM طراحی شده در این مقاله، به حداکثر رساندن تفاوت بین L_d و L_q ، به حداکثر رساندن حجم فعال کل و حداقل استفاده از PM به عنوان اهداف به حداکثر رساندن چگالی گشتاور و به حداکثر رساندن ریپل گشتاور و هزینه ها در نظر گرفته شده است. با استفاده از کدهای اختصاصی، هندسه های مختلف روتور به طور خودکار تولید می شوند و از FEA برای محاسبه عملکرد موتور استفاده می شود.

با استفاده از روش بهینه سازی برنامه نویسی درجه دوم متوالی (SQP)، مقادیر طراحی نهایی محاسبه و در جدول ۳-۴ ارائه شده است. با در نظر گرفتن مقادیر طراحی به دست آمده در جدول ۳-۳ و جدول ۳-۴،

یک طرح نهایی برای PMSynRM ایجاد شده است. برای تایید دقت طراحی و بررسی عملکرد ماشین، یک مطالعه مبتنی بر FEA همراه با نتایج آزمایش واقعی در بخش‌های زیر ارائه شده است.

جدول ۴-۳: پارامترهای نهایی برای ساختار موتور PMSYNRM طراحی شده

Parameter	Unit	Value
$\{w_{r1}, w_{r2}, w_{r3}, w_{r4}\}$	mm	{3.43, 2.74, 2.74, 2.74}
$\{d_{b1}, d_{b2}, d_{b3}\}$	mm	{4.09, 4.09, 3.47}
$\{w_{m1}, w_{m2}, w_{m3}\}$	mm	{10, 13.09, 12.9}
$\{w_{t1}, w_{t2}, w_{t3}\}$	mm	{1.5, 1.5, 1.5}
$\{b_{a1}, b_{a2}, b_{a3}\}$	rad	{0.12, 0.19, 0.27}
$\{w_{b1}, w_{b2}, w_{b3}\}$	mm	{2.08, 3.07, 3.47}

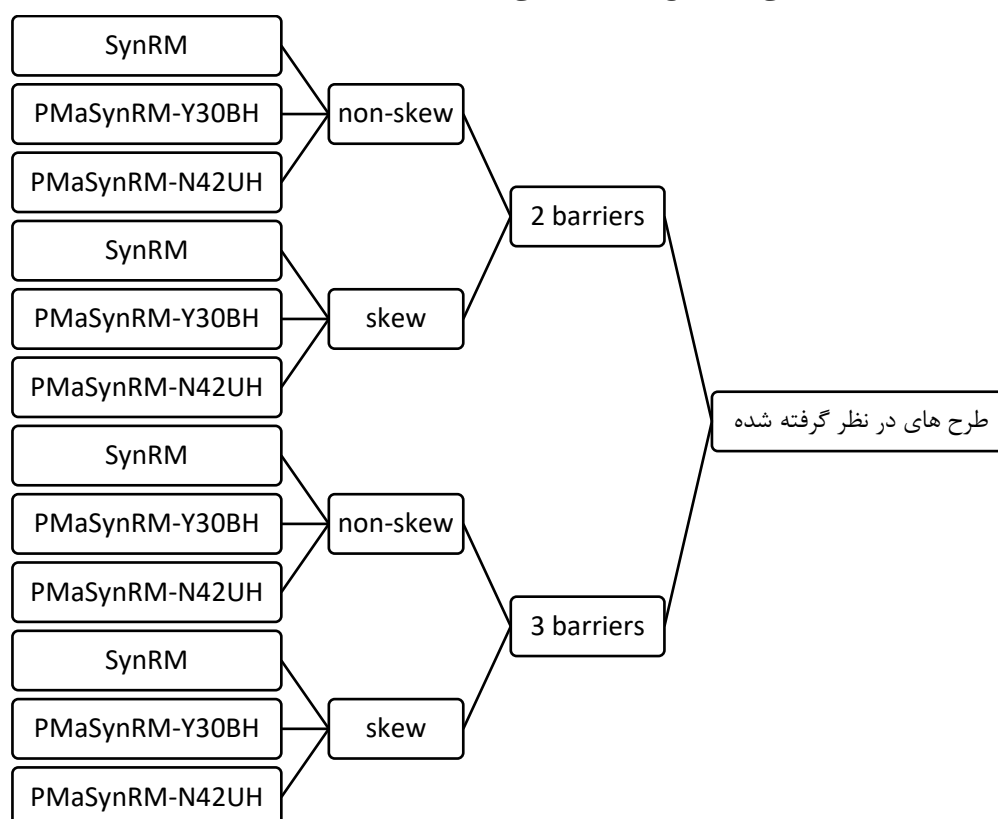
فصل ۴ انتخاب طرح نهایی، مقایسه بین طرح ها، تحلیل و شبیه سازی

۴-۱ مقدمه

با توجه به نکات گفته شده در فصل قبل یک نمونه موتور 550W با سرعت 240RPM جهت مطالعه نهایی انتخاب گردید.

۴-۲ طرح های در نظر گرفته شده

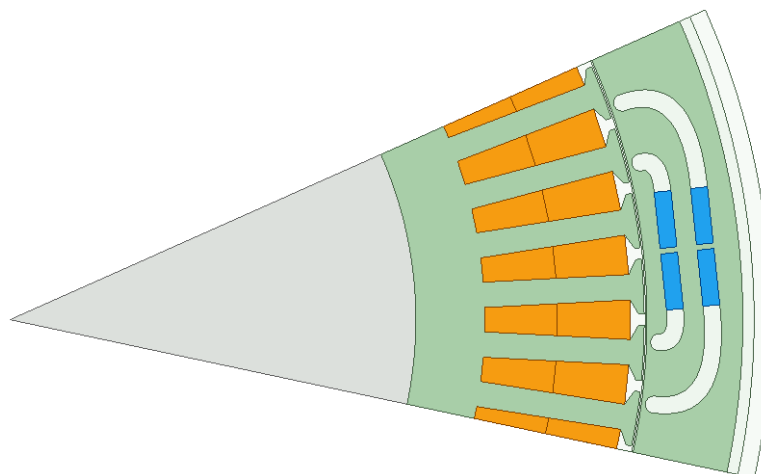
در این فصل ۱۲ طرح در نظر گرفته شده است. شکل این طرح ها را نشان می دهد. قابل ذکر است که استاتور در نظر گرفته شده در تمامی این طرح ها یکسان می باشد.



شکل ۴-۱: طرح های در نظر گرفته شده جهت مطالعه نهایی

۴-۳ طرح دو مانع شار

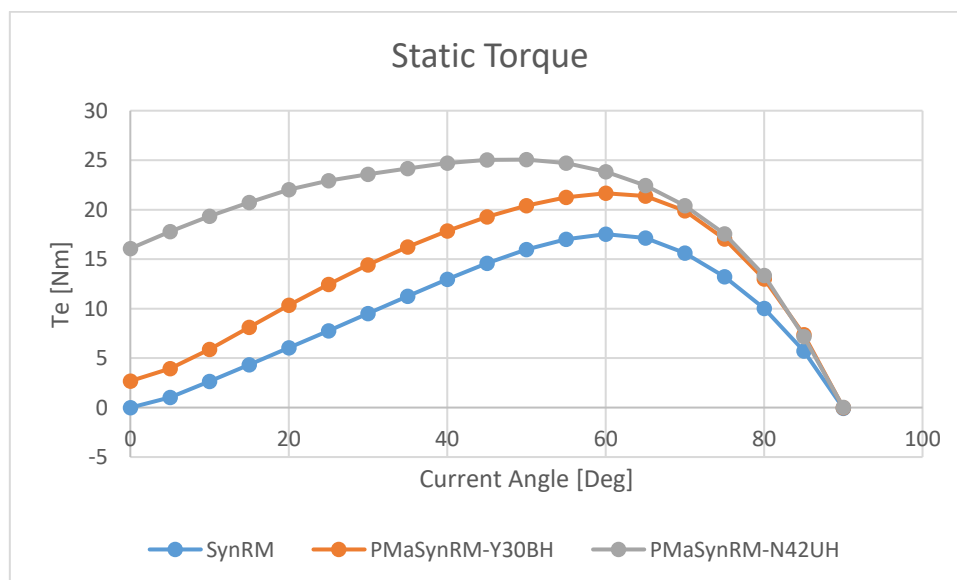
شکل طرح حاوی دو مانع شار را نشان می دهد.



شکل ۲-۴: طرح حاوی دو مانع شار

۴-۳-۱ گشتاور استاتیکی

شکل گشتاور استاتیکی محاسبه شده مربوط به طرح های روتور حاوی دو مانع شار را نشان می دهد. همانطور که دیده می شود موتور سنکرون رلکتانس خالص دارای کمترین گشتاور ماکزیمم است. موتور حاوی مگنت فریتی دارای گشتاور ماکزیمم بالاتر است. استفاده از مگنت نئودیم نه تنها باعث افزایش گشتاور ماکزیمم می شود بلکه ضریب توان را نیز بهبود می بخشد.

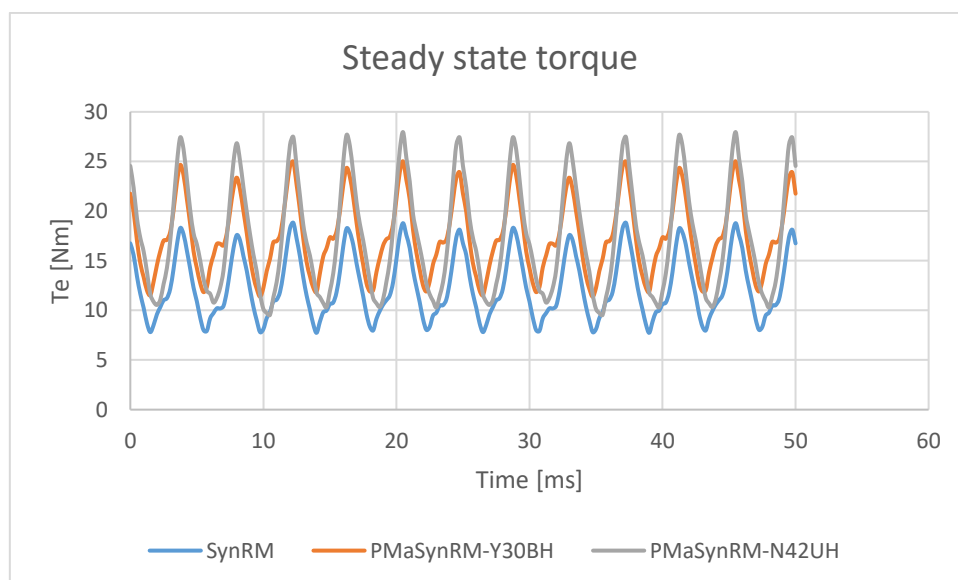


شکل ۳-۴: گشتاور استاتیکی مربوط به طرح های روتور حاوی دو مانع شار

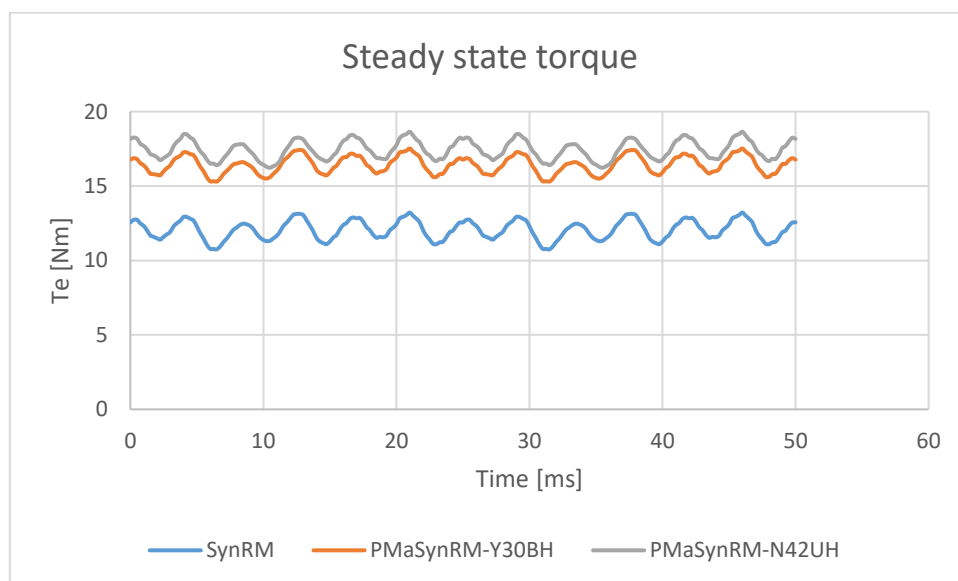
۴-۳-۲ شبیه سازی حالت دائم

شکل ۱-۰ و شکل گشتاور الکتریکی حاصل از شبیه سازی حالت دائم را نشان می دهد. شکل اول مربوط به حالتی است که استاتور اسکيو نشده است و شکل دوم مربوط به حالتی است که استاتور اسکيو شده است.

همانطور که دیده می شود در حالت غیر اسکيو رپيل گشتاور زياد است. همچنين گشتاور ميانيگين در اين طرح ها كمتر از مقدار ۲۱ نيوتن متر است.



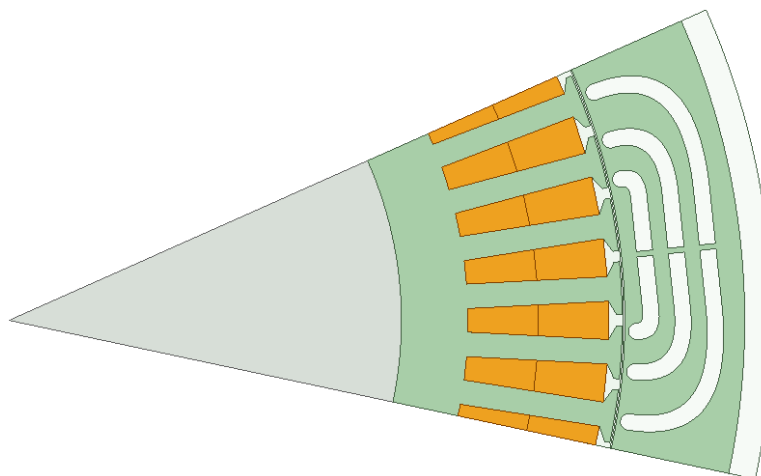
شكل ۱-۰: گشتاور دائم برای طرح روتور حاوی دو مانع شار برای حالتی که استاتور اسکيو نشده است



شكل ۴-۵: گشتاور دائم برای طرح روتور حاوی دو مانع شار برای حالتی که استاتور اسکيو شده است

۴-۴ طرح سه مانع شار

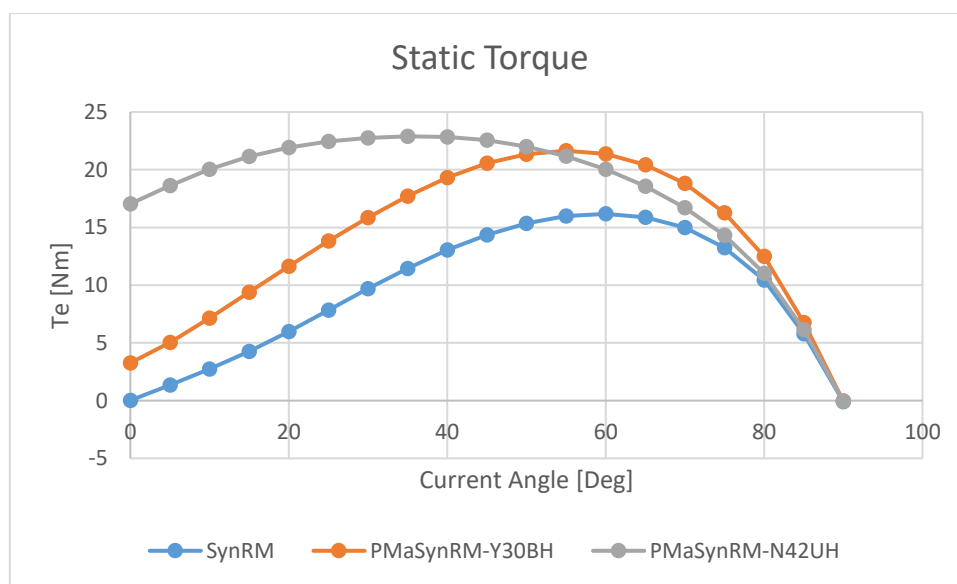
شكل طرح حاوی سه مانع شار را نشان می دهد.



شکل ۴-۶: طرح دارای سه مانع شار

۴-۴-۱ گشتاور استاتیکی

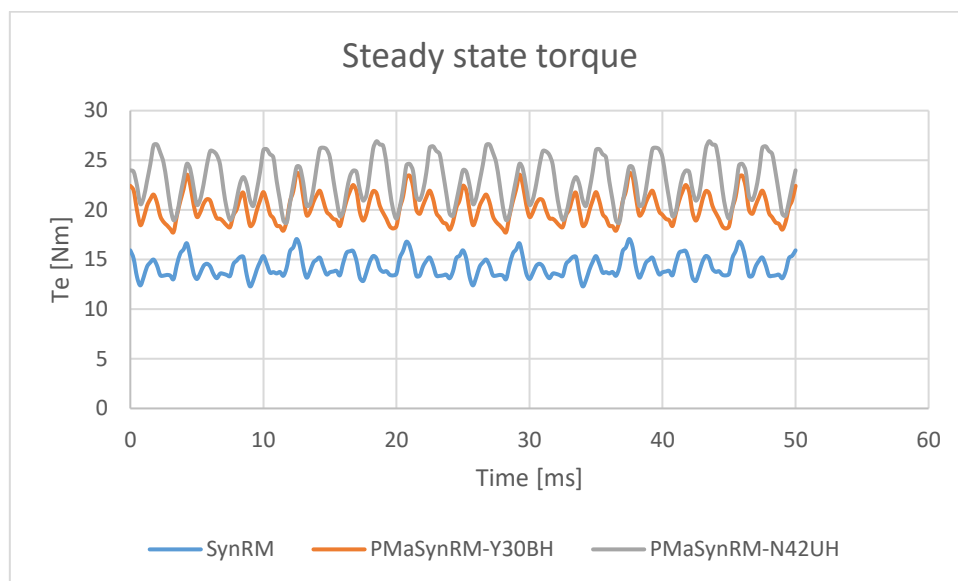
شکل گشتاور استاتیکی مربوط به طرح حاوی سه مانع شار را نشان می دهد. همانند طرح قبل دیده می شود با اضافه کردن مگنت فریتی گشتاور ماکزیمم افزایش می یابد و با اضافه کردن مگنت نئودیمی ضریب توان نیز اصلاح خوبی پیدا می کند.



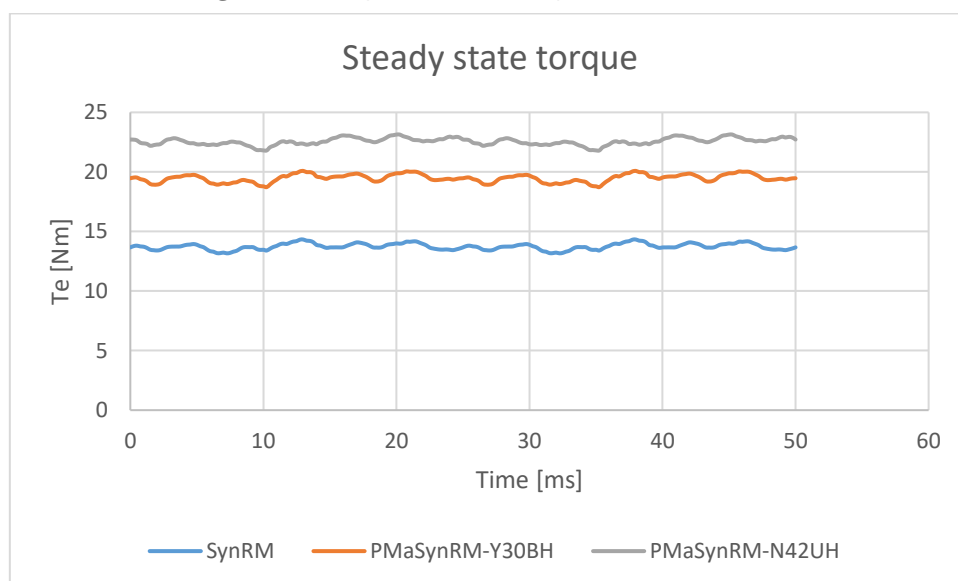
شکل ۴-۷: گشتاور استاتیکی مربوط به طرح های روتور حاوی سه مانع شار

۴-۴-۲ شبیه سازی حالت دائم

شکل و شکل گشتاور الکتریکی محاسبه شده در شبیه سازی حالت دائم را نشان می دهد. همانطور که دیده می شود در حالت غیر اسکيو رپل گشتاور بالا و با اسکيو کردن این رپل کاهش می یابد.



شکل ۴-۸: گشتاور حالت دائم برای طرح روتور حاوی سه مانع شار برای حالتی که استاتور اسکيو نشده است



شکل ۴-۹: گشتاور حالت دائم برای طرح روتور حاوی سه مانع شار برای حالتی که استاتور اسکيو شده است

طرح مربوط به روتور حاوی سه مانع شار و حاوی مگنت نتودیم جوابگوی کاربرد مورد نظر در این پژوهش می باشد. با توجه به شکل در حالت اسکيو شده گشتاور میانگین بالاتر از ۲۱ نیوتن متر بوده و رپیل گشتاور حدود ۵ درصد است.

۴-۵ نتایج

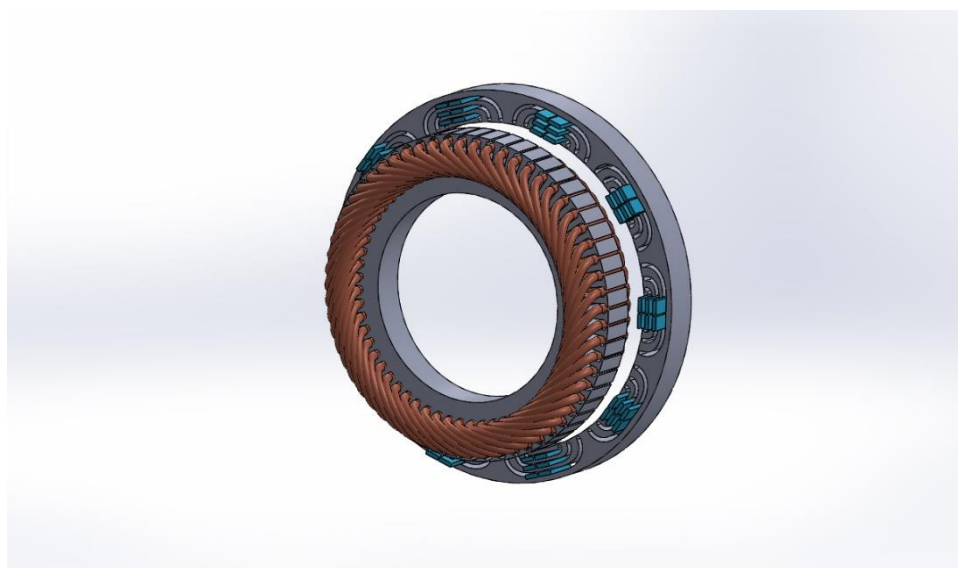
جدول ۴-۱ را نشان می دهد. همانطور که دیده می شود نسبت برجستگی در طرح حاوی سه مانع شار بیشتر از طرح حاوی دو مانع شار می باشد. در طرح های که روتور حاوی دو مانع شار است گشتاور میانگین به مقدار مورد نظر نمی رسد. در طرح های غیر اسکيو رپیل گشتاور بالا است. طرح انتخابی نهایی حاوی سه مانع

شار با مگنت نئودیمی می باشد. در این طرح گشتاور میانگین ۲۲.۵ نیوتن متر و رپل گشتاور کمتر از ۶ درصد می باشد. همچنین ضریب توان در این حالت برابر ۰.۸۸ می باشد.

جدول ۱-۴: نتایج نهایی طرح

	Saliency ratio		non-skew			skew		
			Tave	Ripple	PF	Tave	Ripple	PF
2 barriers	2.37	SynRM	12.80	92%	0.63	12	20.0%	0.64
		PMaSynRM-Y30BH	17.40	78%	0.75	16.4	13.5%	0.76
		PMaSynRM-N42UH	17.30	100%	0.83	17.4	13.8%	0.89
3 barriers	2.65	SynRM	14.30	33%	0.67	13.7	8.4%	0.66
		PMaSynRM-Y30BH	20.20	30%	0.80	19.5	6.9%	0.79
		PMaSynRM-N42UH	22.90	35%	0.87	22.5	5.9%	0.88

شکل زیر مدل سه بعدی مربوط به طرح نهائی را نشان می دهد.



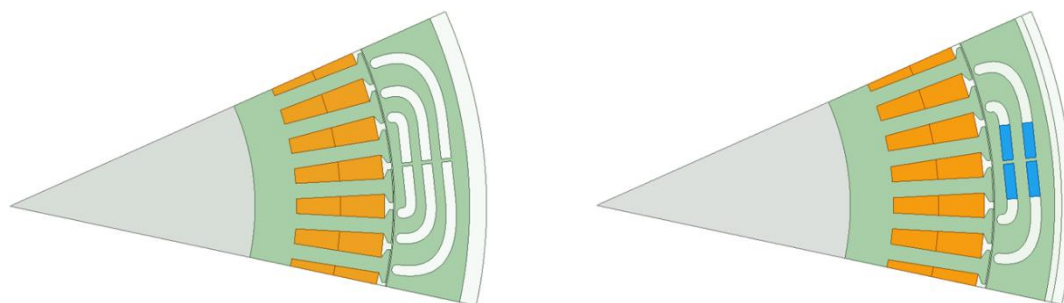
شکل ۱۰-۴: مدل طرح نهائی آماده شده در سالیدورک

۴-۶ انتخاب طرح جهت ساخت

در پژوهش قبل توپولوژی‌های مختلف موتورهای سنکرون رلکتانسی جهت کاربرد دوچرخه برقی مورد بررسی قرار گرفت. از این میان دو طرح جهت مطالع بیشتر انتخاب شد. این طرح‌ها عبارتند از:

- طرح ۱: طرح حاوی دو مانع شار
- طرح ۲: طرح حاوی سه مانع شار

این طرح‌ها در شکل نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۱-۴: طرح‌های مطالعه شده

همانطور که دیده می‌شود در این طرح‌ها جهت بهبود عملکرد موتور از آهنرباها استفاده شده است. این آهنرباها به صورت مکعبی بوده و جهت تسهیل در فرآیند ساخت ابعاد آنها مشابه در نظر گرفته شد. در طرح‌های دو مانع شار و سه مانع شار در هر قطب به ترتیب چهار و شش آهنربا استفاده می‌شود.

۴-۶-۱ مقادیر نامی موتور هدف

مقادیر نامی موتور هدف به این شرح زیر است:

- توان نامی: ۵۵۰ وات
- ولتاژ باتری: ۴۸ ولت
- سرعت نامی: ۲۴ کیلومتر بر ساعت

در ادامه نتایج مربوط به موتورهای طراحی شده ارائه شده است. در هر بخش دو نتیجه ذکر شده است که یکی مربوط به SynRM و دیگری مربوط به PMaSynRM می‌باشد.

۴-۶-۲ مواد مصرفی

با توجه به موجود بودن گرید ورق در ایران، گرید M530-50A برای شبیه سازی ها در نظر گرفته شد. همچنین گرید آهنربای در نظر گرفته شده نئودیم می‌باشد.

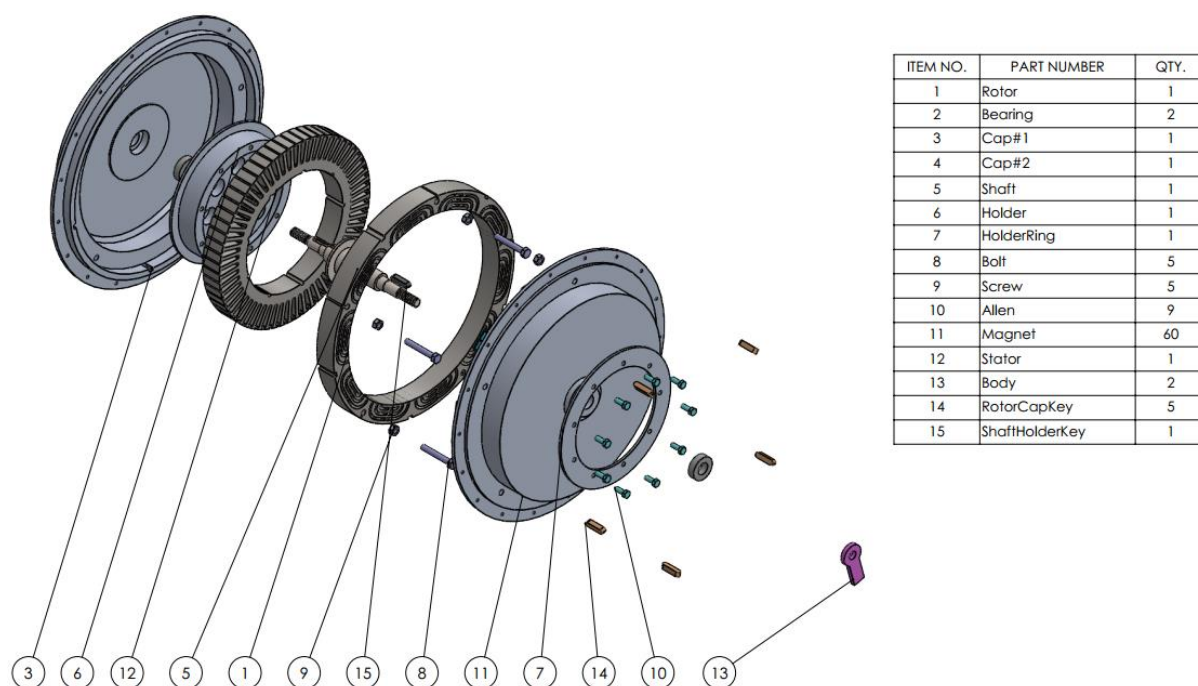
فصل ۵ طراحی و ساخت نمونه آزمایشگاهی

۵-۱ مقدمه

در این فصل به ارایه جزئیات مربوط به طراحی مکانیکی و ساخت قطعات طراحی شده موتور پرداخته شده است.

۵-۲ نقشه گسترده

با توجه اینکه از دیدگاه ساخت، علاقه‌مندی در جهتی است که تعداد قطعات کمینه باشد، در این طرح سعی شد که با وجود تمام پیچیدگی‌ها تعداد قطعات کمترین حالت باشد. شکل نقشه گسترده موتور را نشان می‌دهد.

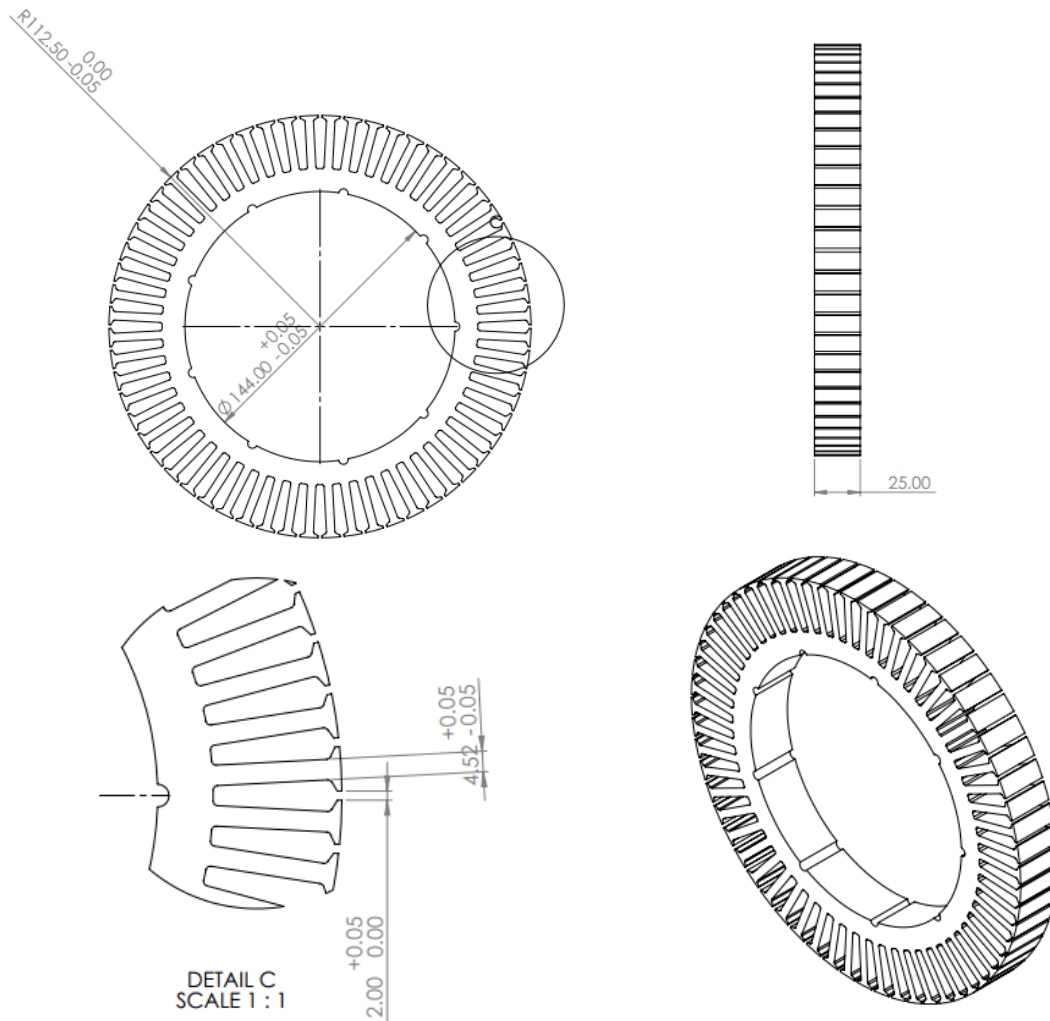


شکل ۵-۱: نقشه گسترده موتور

در ادامه به جزئیات مربوط به هر کدام از طرح‌ها پرداخته شده است.

۵-۳ طراحی و ساخت استاتور

هسته شیاردار استاتور به صورت مورق بوده و از قرار دادن تعداد ۵۰ لمینشن با ضخامت ۰.۵ میلی متر ساخته می‌شود. تعداد شیارها برابر ۶۰ عدد می‌باشد که سیم پیچی توزیع شده درون آنها قرار می‌گیرد. شکل ۵-۲ ابعاد مختلف مربوط به هسته آهنی استاتور را نشان می‌دهد.



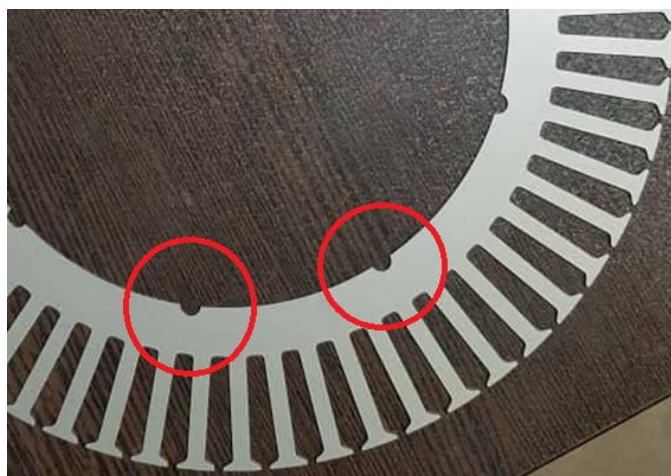
شکل ۲-۵: ابعاد مختلف مربوط به هسته آهنی استاتور

همانطور که دیده می‌شود قطر داخلی استاتور برابر با 114mm و قطر خارجی آن برابر با 112.5mm می‌باشد. طول استک (طول محوری) هسته استاتور نیز برابر با 25mm است. در این پژوهش برای تولید ورق‌های روتور و استاتور از برش لیزر استفاده شد.



شکل ۳-۵: ورق الکتریکی برش خورده مربوط به هسته استاتور

یکی از نکات مهم در رابطه با هسته استاتور اسکيو بودن و يا مورب بودن آن است. همانطور كه در فصل قبل ذكر شد، هدف از اسكيو كردن كاهش ريپل گشتاور است. زاويه اسكيو به اندازه يك گام شيار استاتور است. براي ساخت هسته استاتور اسكيو شده يك قالب با پرينتر سه بعدي طراحی شد. بدین منظور نیم سوراخ‌هایی داخل هسته استاتور در نظر گرفته شد كه توسط قالب طراحی شده بتوان حالت اسكيو را به هسته استاتور اعمال كرد.



شکل ۴-۵: نیم سوراخ‌های در نظر گرفته شده در سطح داخلی استاتور جهت اسكيو كردن

در فرآیند ساخت دو قالب اسکيو توسط پرینتر سه بعدی آماده شد. شکل ۱-۰ قالب اسکيو شماره ۱ را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۰: قالب اسکيو شماره ۱

پس از ساخت قالب اسکيو شماره ۱ و سعی در ساخت استاتور با مشکلات زیر رو به رو شدیم (شکل):

- بالا بودن تولرانس قالب (باید در نظر داشت که تولرانس پرینتر سه بعدی صفر است)
- کم بودن ارتفاع (ارتفاع قالب اسکيو باید بزرگتر از طول استک باشد)
- نداشتن کفی (قالب اسکيو باید کفی داشته باشد که هسته استاتور روی آن بنشیند)



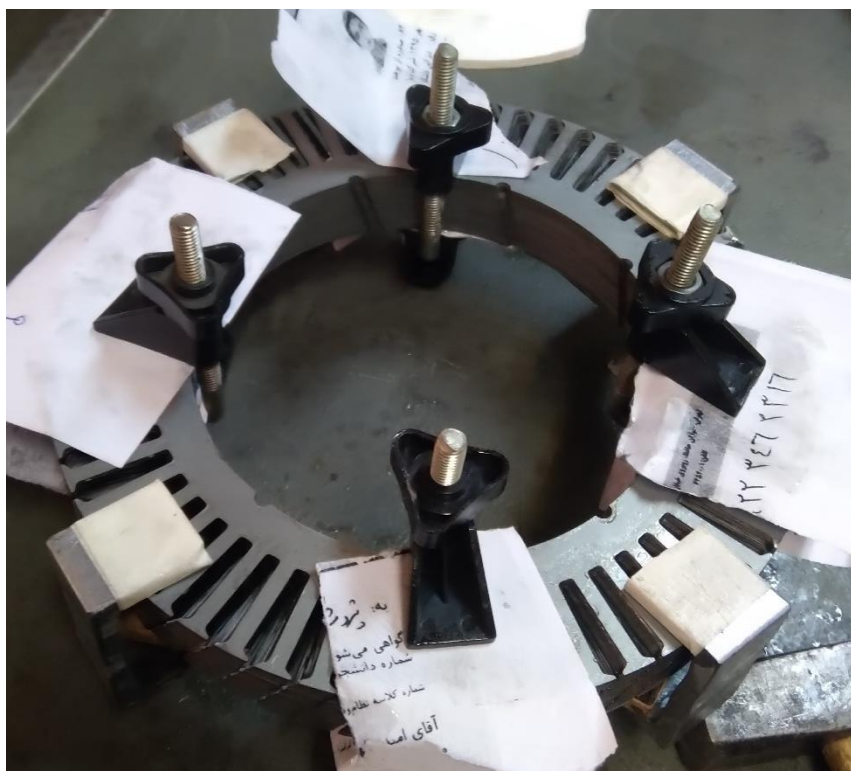
شکل ۶-۵: سعی در ساخت هسته مورب استاتور به کمک قالب اسکيو شماره ۱

با توجه به معایب گفته شده برای قالب اسکيو شماره ۱، یک قالب اسکيو دیگر طراحی شد. شکل فرآیند ساخت هسته استاتور مورب به همراه قالب اسکيو شماره ۲ را نشان می‌دهد. برای چسباندن ورق‌های آهن به

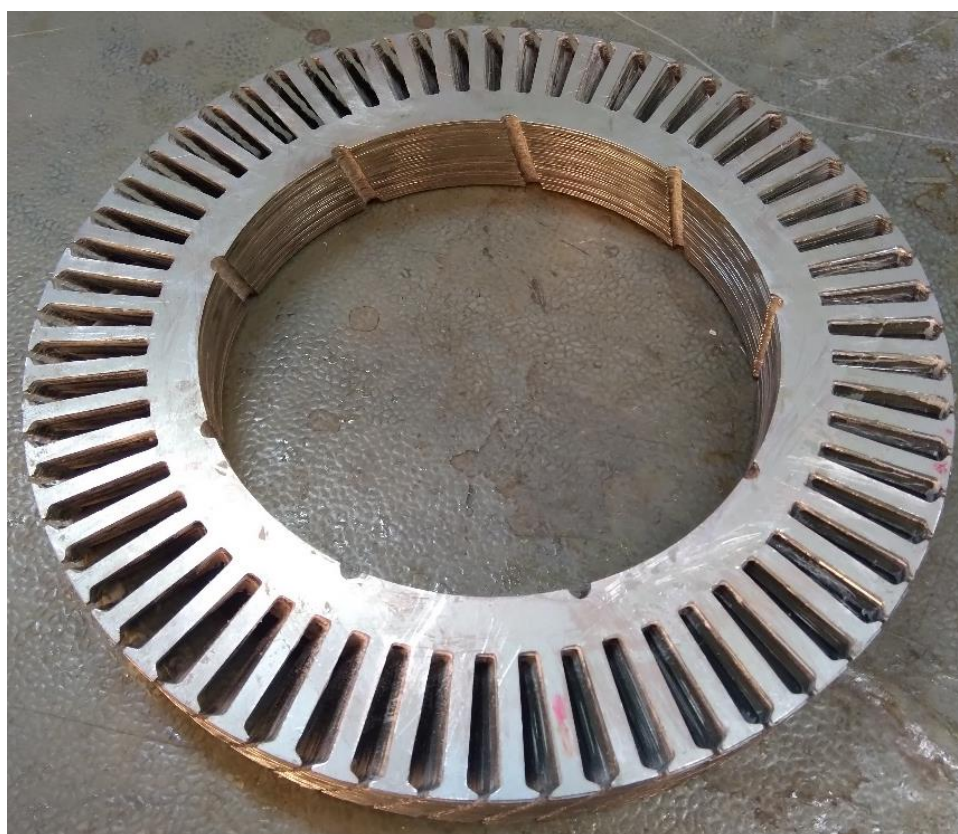
یکدیگر از چسب استفاده شد. پس از یکپارچه کردن برای خشک شدن چسب، هسته استاتور به مدت ۲ ساعت در کوره با دمای ۷۰ درجه قرار گرفت. شکل هسته استاتور قبل از قرار گرفتن در کوره را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود از ۶ عدد گیره برای توزیع فشار یکنواخت استفاده شده است. شکل هسته استاتور نهایی را پس از خارج کردن از کوره و پاک سازی نشان می‌دهد.



شکل ۷-۵: فرآیند مورب کردن هسته استاتور



شکل ۸-۵: هسته استاتور قبل از قرار گرفتن در کوره



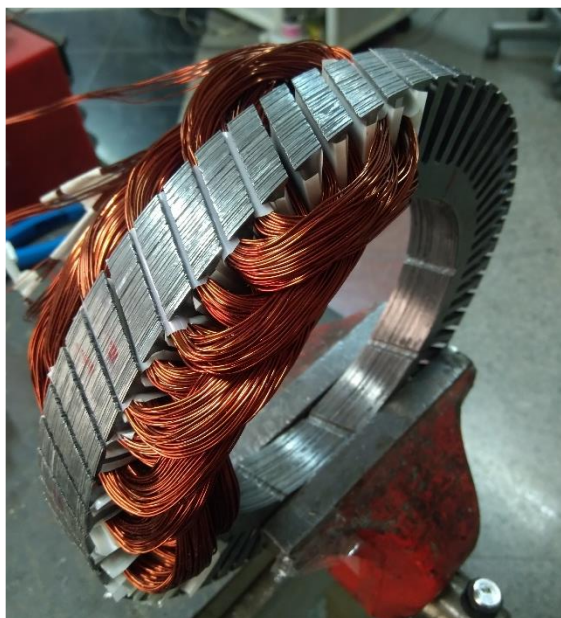
شکل ۹-۵: هسته استاتور

۴-۵ سیم پیچی استاتور

سیم پیچی استاتور به صورت توزیع شده، دولایه و سه فاز است. تعداد کل کلافها برابر ۶۰ عدد می باشد. تعداد کلافها در هر فاز برابر ۲۰ عدد می باشد. تعداد قطبها برابر ۱۰ است و بنابراین گام کامل سیم پیچی ۶ است. در این طرح جهت کاهش هارمونیکهای شار در فاصله هوایی از گام کوئل برابر ۵ شیار در نظر گرفته شد. با توجه به مورب بودن شیارها ابتدا یک قالب مناسب جهت تولید کوئلها آماده شد. این قالب در شکل نشان داده شده است. شکل هسته استاتور در حال سیم پیچی را نشان می دهد.



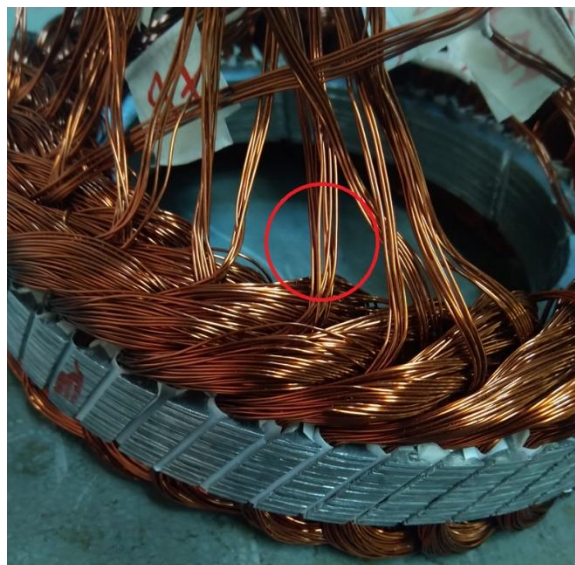
شکل ۱۰-۵: قالب آماده شده جهت تولید کوئلها



شکل ۱۱-۵: هسته استاتور در حال سیم پیچی

قابل ذکر است جهت سیم پیچی استاتور ابتدا از سیم با قطر 1.6mm استفاده شد. پس از سعی در انجام سیم پیچی ملاحظه گردید با توجه به طول استک کم هسته استاتور سیم پیچی دشوار بوده و حتی در صورت امکان ضریب پرشدگی کم و طول سیم پیچ انتهایی بالا خواهد بود. بدین منظور جهت تسهیل در فرآیند سیم

پیچی و کم نگه داشتن طول سیم پیچ انتهایی برای هر مسیر جریان از ۶ هادی با قطر 0.6mm به صورت موازی استفاده شد. شکل مسیرهای موازی جریان در سیم پیچی استاتور را نشان می‌دهد. شکل ۰- نیز هسته استاتور پس از اتمام سیم پیچی را نشان می‌دهد.



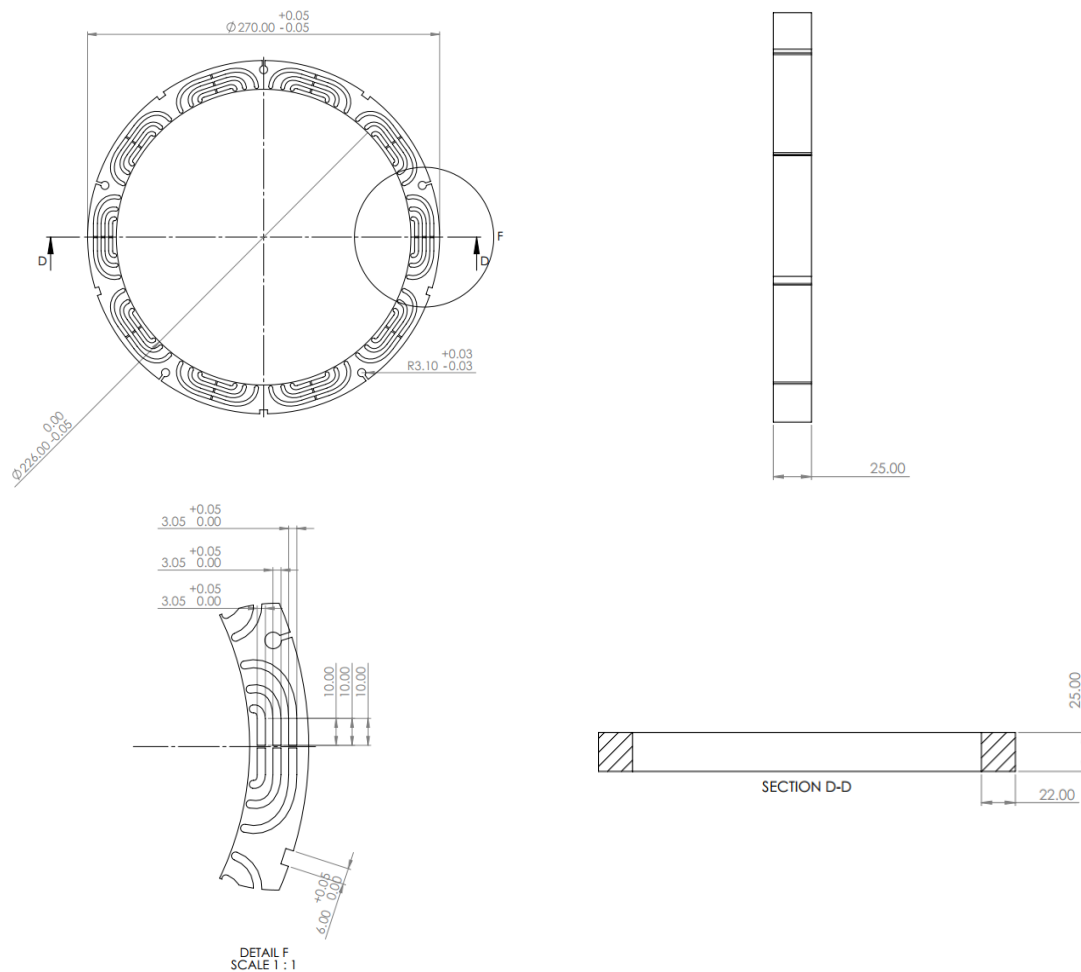
شکل ۱۲-۵: مسیرهای موازی جریان در سیم پیچی استاتور



شکل ۵-۰: هسته استاتور پس از اتمام سیم پیچی

۵-۵ طراحی و ساخت روتور

هسته روتور نیز همانند استاتور به صورت مورق بوده و از ۵۰ عدد ورق با ضخامت 0.5mm تشکیل می‌شود. روتور حاوی ده قطب می‌باشد که در هر قطب سه مانع شار وجود دارد. ابعاد مربوط به هسته آهنی روتور در شکل نشان داده شده است.



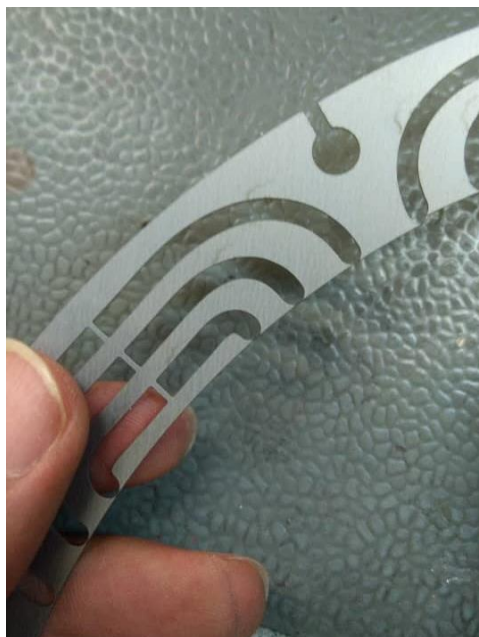
شکل ۱۴-۵: ابعاد مختلف مربوط به هسته آهنی روتور

قابل ذکر است بر روی ورق روتور ۵ عدد جای پیچ متری و ۵ عدد جای خار در نظر گرفته شد. هدف از در نظر گرفتن پیچ‌های متری یکپارچه کردن هسته روتور و دو درپوش و علت تعبیه خارها، جهت انتقال گشتاور تولیدی موتور به چرخ می باشد. برای ساخت ورق‌های روتور نیز از برش لیزر استفاده شد. شکل یک نمونه ورق الکتریکی برش خورده مربوط به هسته روتور را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵-۵: ورق الکتریکی برش خورده مربوط به روتور

یکی از حساسیت‌ها جهت ساخت ورق‌های روتور نازک بودن موانع شار است. اگر ضخامت این موانع خیلی کم در نظر گرفته شود، با توجه به تolerانس‌های دستگاه برش ممکن است نواحی مربوط به موانع شار بسیار ضعیف و شکننده شوند. شکل یک نمونه ورق الکتریکی معیوب مربوط به روتور را نشان می‌دهد. با توجه به نکات مکانیکی بررسی شده، حداقل ضخامت موانع شار باید بزرگتر از دو برابر ضخامت ورق آهن باشد.



شکل ۱۶-۵: یک نمونه ورق الکتریکی معیوب مربوط به روتور

یکی از نکات مهم جهت ساخت روتور در نظر گرفتن توالانس مناسب جهت جایگذاری آهنرباها می باشد. بدین منظور ضخامت محل قرار گیری آهنرباها روی ورق کمی بزرگتر از ضخامت آهنرباها در نظر گرفته شد. قابل ذکر است که آهنرباها همزمان با استک کردن روتور در آن جایگذاری شده اند. شکل مرتب کردن آهنرباها را قبل از جایگذاری در روتور نشان می دهد. شکل فیکسچر آماده شده برای ساخت هسته روتور به همراه جا زدن یک نمونه آهنربا در یکی از موانع شار روتور را نشان می دهد.



شکل ۱۷-۵: مرتب کردن آهنرباها قبل از جایگذاری در روتور



شکل ۱۸-۵: فیکسچر آماده شده برای ساخت هسته روتور

همانند استاتور، پس از آماده شدن روتور، آنرا به مدت ۲ ساعت درون کوره با دمای ۷۰ درجه قرار دادیم. شکل هسته روتور پس از خارج سازی از کوره را نشان می دهد.



شکل ۱۹-۵: هسته موتور پس از خارج سازی از کوره

۵-۶ طراحی و ساخت شفت

شفت موتور روی دو شاخ چرخ عقب دوچرخه قرار گرفته و استاتور و موتور روی آن نصب می‌شوند. بدین منظور باید ابعاد دوشاخ عقبی چرخ اندازه گیری شود تا ابعاد کلی موتور با در نظر گرفتن محدودیت‌های ابعادی بدست آید. شکل فاصله بین دوشاخ چرخ عقب را نشان می‌دهد. این فاصله برابر با 135mm می‌باشد.



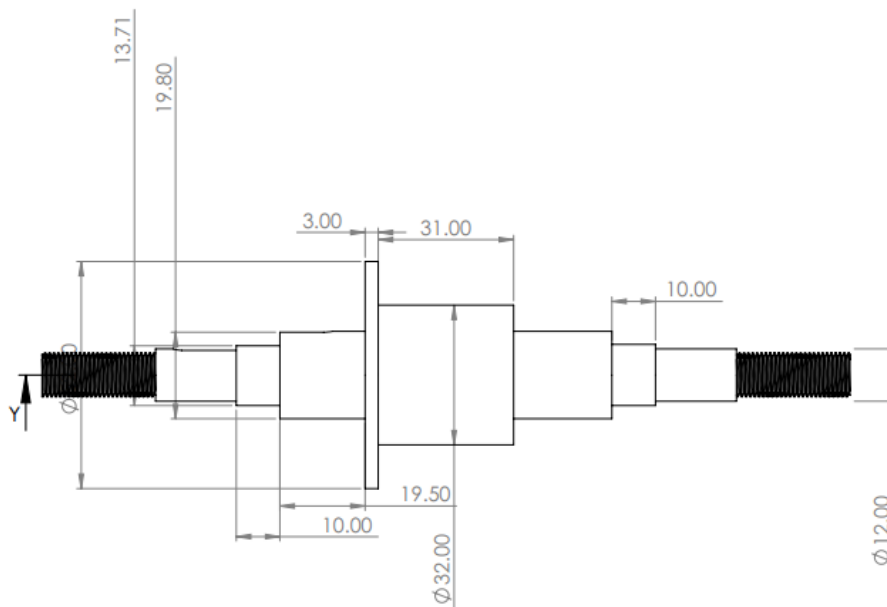
شکل ۲۰-۵: فاصله بین دوشاخ چرخ عقب

با نزدیک شدن به سطح تایر فاصله دوشاخ کم می‌شود و بنابراین برای محاسبه طول محوری ماکزیمم باید کمترین فاصله بین دوشاخ در بیشترین قطر موتور را اندازه گرفت. شکل کمترین فاصله بین دوشاخ در بیشترین قطر موتور را نشان می‌دهد. این مقدار برابر با 85mm است. بنابراین اگر بخواهیم از هر دو طرف یک سانتی متر فضای خالی در نظر بگیریم باید فاصله بین دو سطح خارجی درپوش‌ها از 65mm تجاوز نکنند.



شکل ۲۱-۵: کمترین فاصله بین دوشاخ در بیشترین قطر موتور

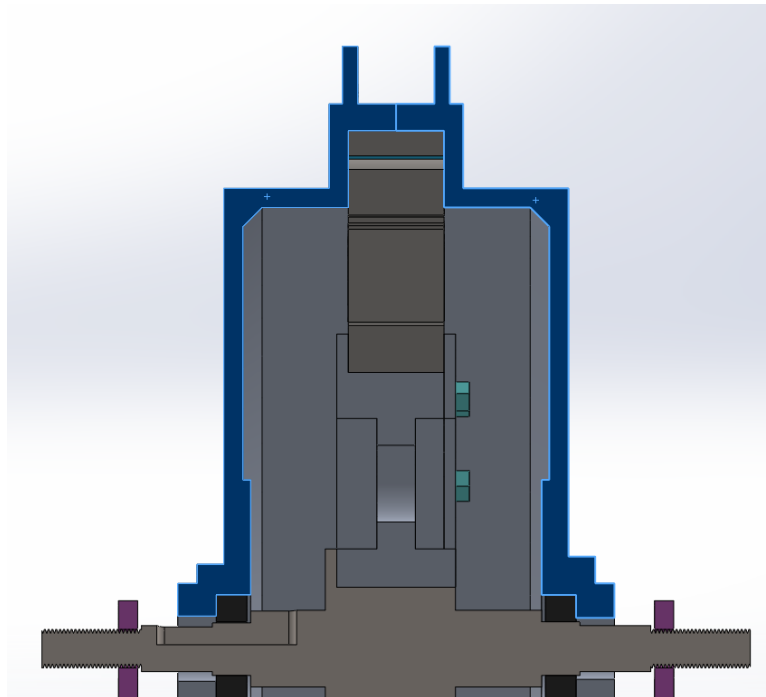
شکل ابعاد مربوط به شفت روتور را نشان می‌دهد.



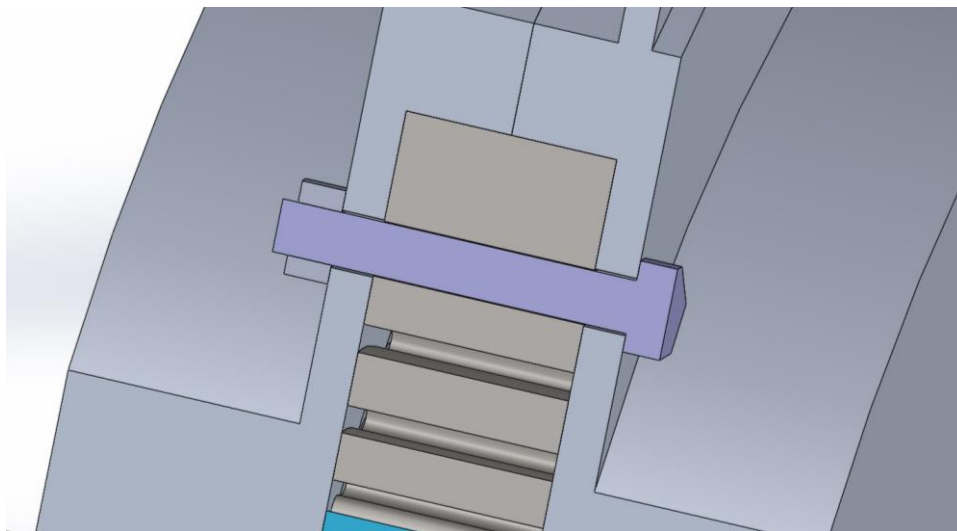
شکل ۲۲-۵: ابعاد مربوط به شفت روتور

۵-۷ طراحی و ساخت درپوش‌ها

موتور حاوی دو درپوش بوده که از هر دو طرف روتور را مهار می‌کنند. درپوش‌ها و هسته آهنی روتور به کمک پیچ‌های متری به یکدیگر متصل شده‌اند. شکل درپوش‌ها و نحوه اتصال آنها به روتور و شکل نحوه یکپارچه‌سازی درپوش‌ها و روتور را نشان می‌دهد.

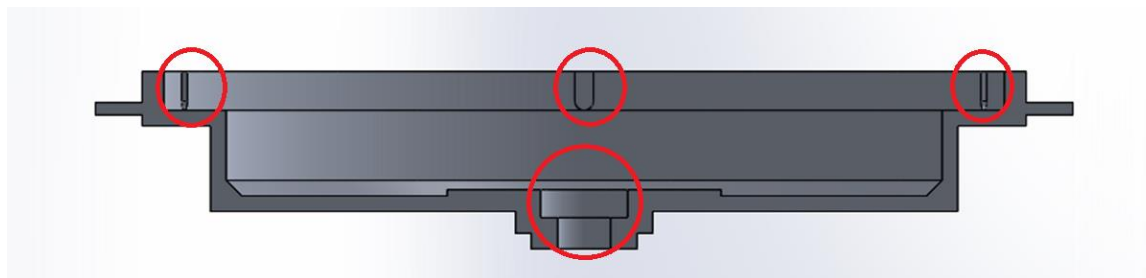


شکل ۲۳-۵: درپوش‌ها و نحوه اتصال آنها به روتور



شکل ۲۴-۵: استفاده از پیچ متری جهت یکپارچه سازی درپوش‌ها و هسته آهنی روتور

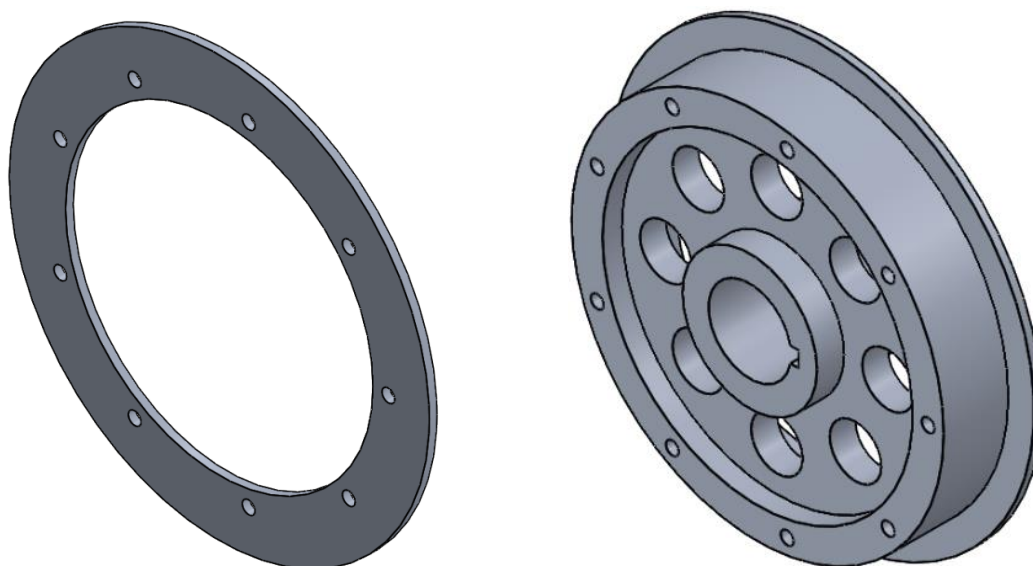
شکل سطح برش خورده درپوش‌ها را نشان می‌دهد. جاهای مربوط به جایگذاری بلبرینگ و خارها در این شکل دیده می‌شود.



شکل ۲۵-۵: سطح برش خورده درپوش‌ها، جاهای در نظر گرفته شده برای قرار دهی بلبرینگ و جای خار در شکل نشان داده شده‌است

۵-۸ طراحی و ساخت هولدر استاتور

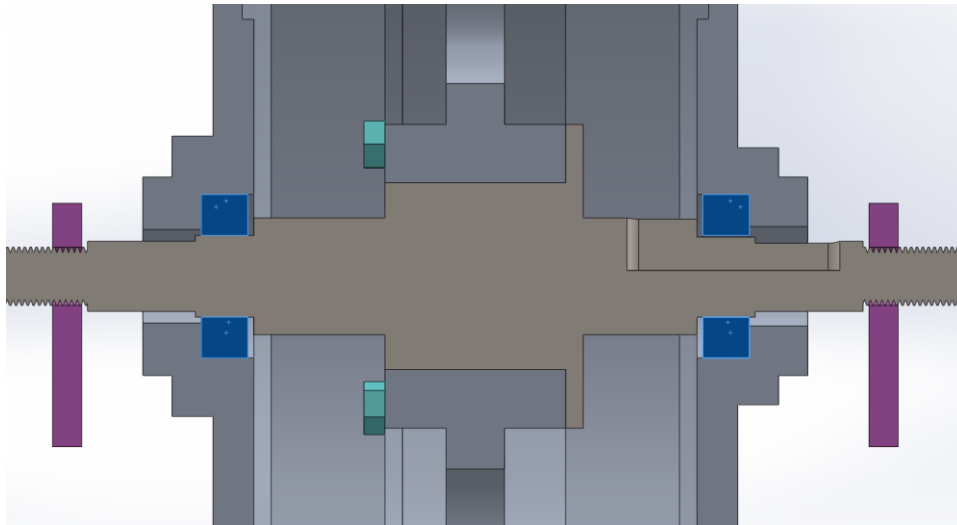
هولدر هسته استاتور از دو قسمت تشکیل شده‌است. این دو قسمت در شکل نشان داده شده‌است. این دو قسمت به کمک ۹ عدد پیچ آلن به یکدیگر متصل می‌شوند. هسته آهنی استاتور بین این دو قسمت قرار گرفته و از حرکت محوری آن جلوگیری می‌شود.



شکل ۲۶-۵: هولدر هسته استاتور

۵-۹ بلبرینگ‌ها

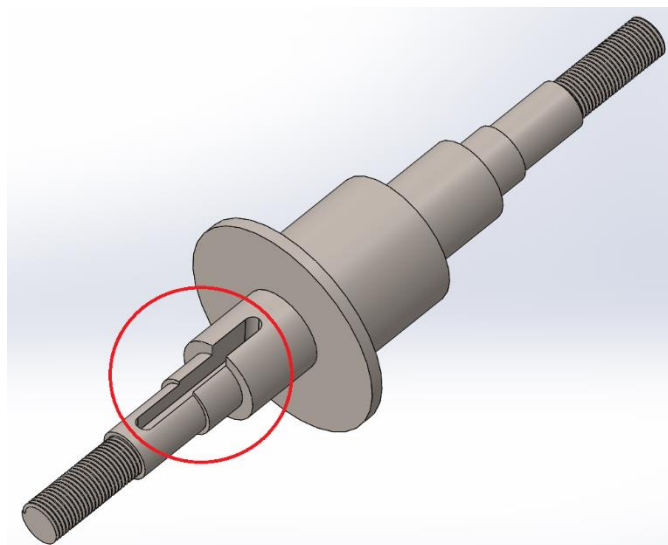
موتور مورد بررسی در این پژوهش یک موتور روتور خارجی است. بنابراین قسمت ثابت درون موتور و قسمت چرخنده در خارج از موتور قرار دارد. بنابراین باید طراحی مناسبی صورت گیرد تا بتوان روتور را روی شفت قرار داد. بدین منظور از دو عدد بلبرینگ $14\text{mm} \times 28\text{mm}$ با ضخامت 8mm استفاده شد. شکل بلبرینگ‌های در نظر گرفته شده برای قراردادی روتور روی شفت را نشان می‌دهد. یک میلی‌متر فضای خالی محوری برای بلبرینگ‌ها در طراحی در نظر گرفته شد.



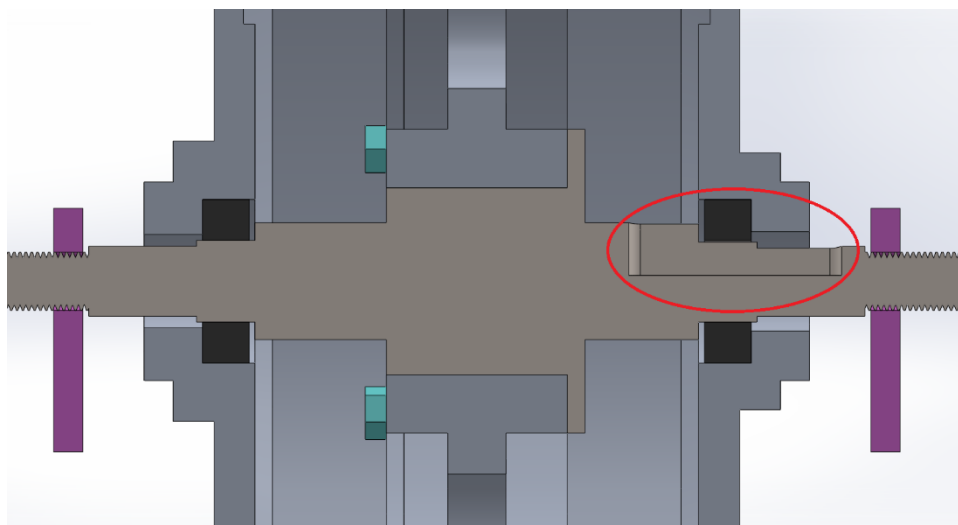
شکل ۲۷-۵: بلبرینگ‌های در نظر گرفته شده برای قرار دهی روتور بر روی شفت

۵-۱۰ نحوه خارج کردن ترمینال‌های سیم پیچی

برای خارج کردن ترمینال‌های سیم پیچی از داخل موتور باید شیار مناسبی روی شفت تعبیه گردد. شکل این شیار را نشان می‌دهد.



شکل ۲۸-۵: شیار در نظر گرفته شده بر روی روتور

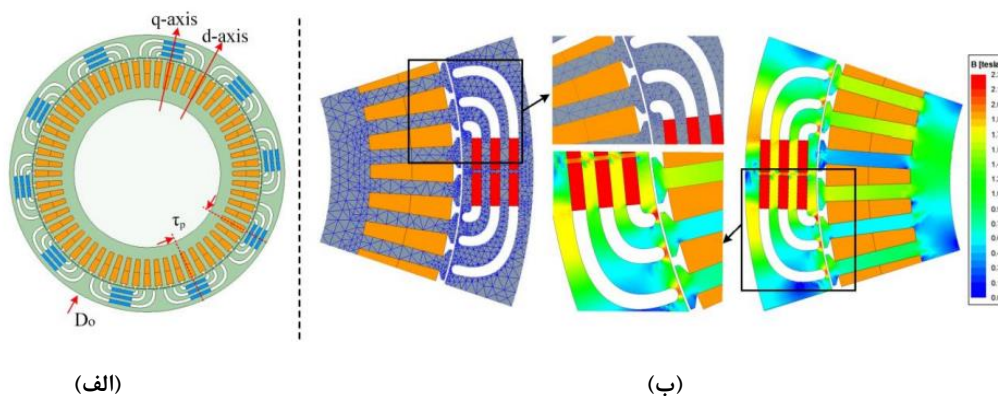


شکل ۲۹-۵: شیار در نظر گرفته شده برای خارج کردن ترمینال‌های سیم پیچی در اسمبلی کامل

۱۱-۵. FEA، ساخت و اعتبار سنجی تجربی برای PMaSynRM که در نهایت طراحی شده

است

طراحی نهایی PMaSynRM با استفاده از یک بسته نرم افزار تجاری مبتنی بر FEA تجزیه و تحلیل می شود. ساختار طراحی نهایی در شکل ۳۰-۵ (الف) نشان داده شده است. طراحی PMaSynRM الزامات مکانیکی دوچرخه الکتریکی در نظر گرفته شده مانند قطر بیرونی و داخلی را برآورده می کند. به دلیل اشباع موضعی، توری باید در قسمت های کوچک مانند دنده ها نسبت به مناطق دیگر ظریف تر باشد. شکل ۳۰-۵ (ب) توزیع چگالی مش و شار مغناطیسی را از یک شبیه سازی مغناطیسی با جریان فاز ۱۶ آمپر برای یک قطب PMaSynRM نشان می دهد. با بررسی و اعتبارسنجی دقت طراحی مغناطیسی عملکرد حالت عبوری، و پارامترهای خروجی مهم مانند EMF برگشتی و گشتاور متوسط از مراحل پس از پردازش استخراج شده و در بحث های زیر ارائه می شود.



شکل ۳۰-۵: طراحی نهایی PMaSynRM. (الف) نمای بالای PMaSynRM طراحی شده با جهت محورهای dq و زمین قطب. (ب) شبکه مشبک و توزیع چگالی شار یک قطب برای سازه طراحی شده.

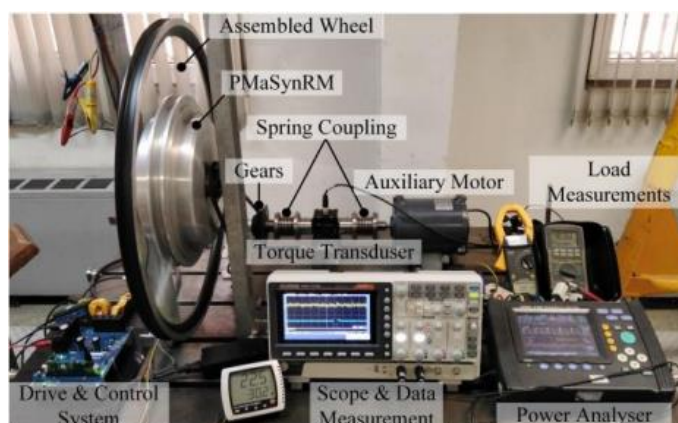
برای اعتبارسنجی عملکرد ماشین، پارامترهای استخراج شده با نتایج تجربی برای ماشین نمونه اولیه مقایسه می‌شوند. قسمت‌های مختلف موتور ساخته شده در شکل ۳۱-۵ نشان داده شده است. لایه‌های استاتور و روتور از فولاد سیلیکونی M470 ساخته شده‌اند. لمینیت‌های استاتور با فرآیند برش لیزری تولید شده و به شکل اریب نهایی با فیکسچر قالب کج مونتاژ می‌شوند. زاویه انحراف استاتور ۶ درجه مکانیکی است. روتور دارای ۱۰ قطب است که هر قطب دارای سه مانع شار است که توسط N35 PM پر شده است. یک نگهدارنده آلومینیومی استاتور را روی یک شفت فولادی مونتاژ می‌کند. لازم به ذکر است برای سهولت در سیم‌کشی از ۷ سیم موازی AWG 22 به جای ۱ هادی AWG 14 استفاده می‌شود. هر یک از فازهای استاتور نهایی شامل ۲۰ سیم پیچ و مقاومت در هر فاز ۰.۴۸ اهم است. استاتور نهایی شده روی نگهدارنده استاتور درون چرخ با تحمل مکانیکی بسته‌بندی می‌شود تا از هرگونه لرزش جلوگیری شود.

ورقه‌های روتور توسط فرآیند سیم‌برش تولید می‌شوند تا دقت اندازه‌گیری موانع شار حفظ شود. پس از مونتاژ ورقه‌های نهایی روتور، PM ها با یک ماده چسبنده قوی به موانع شار وارد می‌شوند. استاتور و روتور نهایی شده در داخل کلاهک‌های طراحی شده توسط شفت ثابت مونتاژ می‌شوند. نمونه اولیه اولیه PMaSynRM همانطور که در شکل ۳۲-۵ نشان داده شده است به یک چرخ واقعی نصب شده بر روی تنظیمات آزمایشی ارائه شده متصل می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود، چرخ مونتاژ شده از طریق یک دنده عقب و زنجیر به یک بار متصل می‌شود تا شرایط رانندگی واقعی را تکرار کند.

یک BLDCM سه فاز ۵۰۰ W به عنوان بار در حالت ژنراتور استفاده می‌شود. با اتصال پایانه‌های خروجی ژنراتور به بارهای مقاومتی، شرایط عملیاتی مختلف برای آزمایش و اعتبارسنجی عملکرد PMaSynRM فراهم می‌شود.



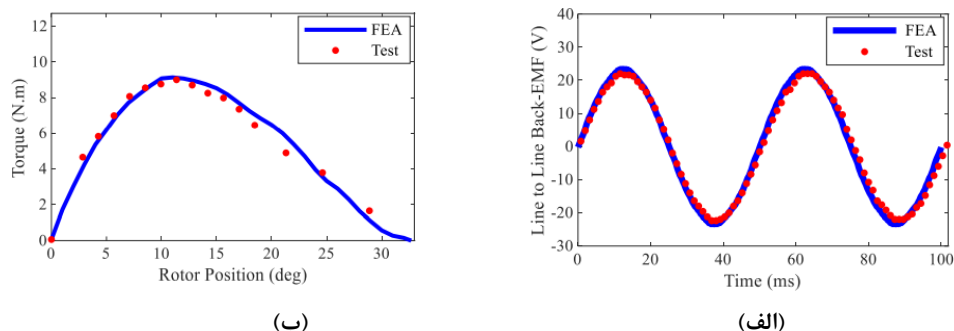
شکل ۳۱-۵: بخش‌های مختلف نمونه اولیه PMaSynRM.



شکل ۳۲-۵: تنظیم آزمایش برای اعتبارسنجی عملکرد PMSynRM

به منظور استخراج مشخصات خروجی نمونه اولیه PMSynRM، یک مبدل دقیق به سیستم انتقال و بار از طریق یک جفت کوپلینگ فنری متصل می‌شود تا شفت‌های حساس گشتاور سنچ را از عدم تعادل مکانیکی حفظ کند. PMSynRM توسط یک برد ارزیابی TI DRV8301-69M هدایت و کنترل می‌شود. با استفاده از این برد، نمونه اولیه PMSynRM در طیف گسترده‌ای از سرعت‌ها و گشتاورها با روش رانندگی بدون سنسور آزمایش می‌شود. یک آنالایزر قدرت برای مشاهده و اندازه‌گیری ولتاژ، جریان و توان ورودی موتور استفاده می‌شود. تمام سیگنال‌های اندازه‌گیری شده توسط یک اسیلوسکوپ ۴ کاناله دیجیتال و سیستم جمع‌آوری داده ذخیره و رسم می‌شوند. برای اندازه‌گیری پارامترهای بار از یک ولت متر و آمپر متر اضافی استفاده می‌شود. شایان ذکر است که از همان تنظیمات آزمایشی برای آزمایش BLDCM MP2 موتور در بخش بعدی مقاله نیز استفاده شده است.

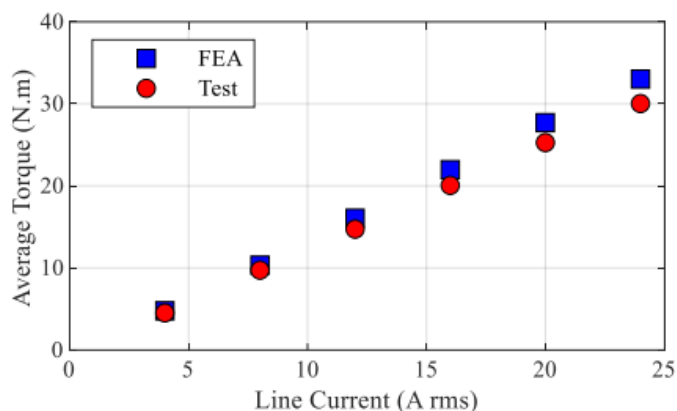
شکل ۳۳-۵ (الف) ولتاژهای خط به خط back-EMF شبیه‌سازی شده و تجربی PMSynRM طراحی شده را در ۲۰۰ دور در دقیقه نشان می‌دهد. موتور نمونه اولیه برای دستیابی به ولتاژ ۲۴ ولت در سرعت پایه ۲۰۰ دور در دقیقه طراحی شده است. همانطور که مشاهده شد، شکل موج ولتاژ پایانه خط به خط استخراج شده به طور قابل قبولی به نتایج FEA نزدیک است و حداکثر اختلاف بین مقادیر FEA و اندازه‌گیری‌ها کمتر از ۱ ولت است. از آزمایش‌ها، مقدار پیک پیوند شار PM به صورت $\lambda_{PM} = 0.35$ محاسبه می‌شود. $W_b = 0.37$ و شبیه‌سازی $W_b = 0.37$ است، بنابراین کمتر از ۵.۵٪ اختلاف بین پیش‌بینی‌ها و نتایج آزمایش در پیوند شار PM وجود دارد که عمدتاً به دلیل چگالی شار مغناطیسی کمتر در شرایط آزمایش و مواد واقعی است. ارزیابی استاندارد گشتاور استاتیکی می‌تواند طراحی الکتریکی را تایید کند. گشتاورهای استاتیکی در موقعیت‌های مختلف روتور در شکل ۳۳-۵ (ب) ارائه شده است. برای اندازه‌گیری گشتاورهای استاتیکی، فاز A به قطب مثبت و هر دو فاز B و C به موازات قطب منفی منبع ولتاژ DC قابل تنظیم ۱۰.۸ ولت متصل می‌شوند. همانطور که مشاهده می‌شود، حداکثر گشتاور نزدیک به ۸ درجه مکانیکی (۴۰ درجه الکتریکی) به دست می‌آید.



شکل ۳۳- ۵: تست در مقابل شبیه سازی FEA (الف) EMF پشت خطی. (ب) گشتاور استاتیکی.

همانطور که موتور برای تولید حداکثر گشتاور در هر شرایط بارگذاری کار می کند، اندازه گیری های اضافی نزدیک به نقطه حداکثر گشتاور گرفته می شود. تطابق بین اندازه گیری و پیش بینی رضایت بخش است و خطاها می توانند مربوط به سیستم انتقال مکانیکی، یعنی چرخ دنده ها و زنجیرها باشند.

میانگین تغییرات گشتاور در مقابل بارگذاری در شکل ۳۴- ۵ نشان داده شده است. این شکل قابلیت مورد انتظار PMSynRM را از نظر گشتاور الکترومغناطیسی تایید می کند، با حداکثر خطای مشاهده شده بین گشتاورهای پیش بینی شده و گشتاورهای واقعی در شرایط بارگذاری مختلف کمتر از ۳-۴٪.



شکل ۳۴- ۵: گشتاورهای متوسط در مقابل جریان های خط

فصل ۶ ارزیابی عملکرد و نتیجه گیری

۶-۱ مقدمه

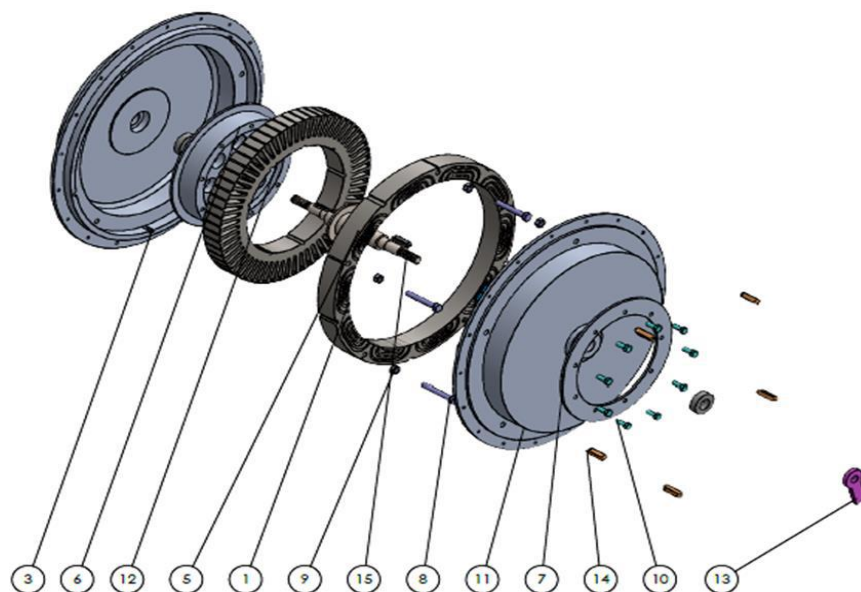
گزارش حاضر، گزارش مونتاژ قطعات یک موتور سنکرون رلوکتانسی تقویت شده با آهنربای دائم می باشد که مشخصات طراحی آن در جدول ۶-۱ و طبق شماره های درج شده در شکل ۶-۱ ارائه شده است. این گزارش در تاریخ ۱۰ تیرماه ۱۴۰۰ آماده سازی شده است. در این گزارش روند مونتاژ مجموعه استاتور و رتور که طی فرآیندی آماده شده بودند در محفظه نگهدارنده طراحی شده انجام شد که مراحل آن با جزئیات در ادامه ارائه خواهد شد. همچنین مراحل بعد از مونتاژ که شامل آماده سازی سیستم تست و استخراج نتایج می باشد به ترتیب در بخش های بعد ارائه می شود.

جدول ۶-۱: مشخصات طراحی یک موتور سنکرون رلوکتانسی تقویت شده با آهنربای دائم

ITE M NO.	PART NAME	TY
1	Rotor	.
2	Bearing	
3	Cap#1	
4	Cap#2	
5	Shaft	
6	Holder	
7	HolderRing	
8	Bolt	
9	Screw	
10	Allen	
11	Magnet	0
12	Stator	
13	Body	
14	RotorCapKey	
15	ShaftHolderKey	

۶-۲ معرفی قطعات محفظه نگهدارنده

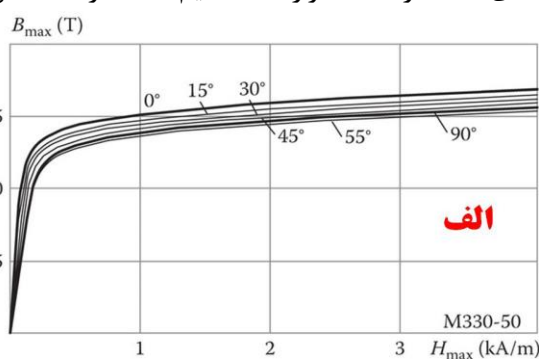
در شکل ۶-۱ نمای انفجاری از قطعات موتور قابل مشاهده است. همانگونه که مشاهده می شود مجموعه موتور از بخشهای مختلف تشکیل شده است که شامل هسته استاتور، روتور، درپوش ها، شفت و نگهدارنده می باشد. شایان ذکر است که مجموعه استاتور به همراه سیم پیچ طراحی شده طی فرآیندی از قبل آماده سازی شده و در این گزارش نحوه مونتاژ مجموعه استاتور در قطعات نگهدارنده و شفت ارائه خواهد شد. مجموعه روتور نیز که شامل ورقه های ساخته شده و آهنربا ها می باشد طی فرآیندی آماده شده و در این بخش گزارش مونتاژ این مجموعه در درپوش ها ارائه خواهد شد.



شکل ۱-۶: نمای انفجاری از قطعات موتور

۶-۲-۱ مجموعه نگهدارنده روتور

روتور از ورقه های فولادی سیلیس دار با کد M530-50A و به قطر 0.5 mm ساخته شده است. منحنی مغناطیس شوندگی این نوع ورق در شکل ۲-۶-الف قابل مشاهده است. با توجه به این منحنی، ورقه ها در دمای 45°C درجه سانتی گراد به ازای میدان مغناطیسی 2000 آمپر بر متر توان تولید چگالی شار حداکثری 1.5 تسلا را دارند که برای هدایت مطلوب شار در موتور بسیار مناسب هستند. این ورقه ها با چسب اپوکسی با برند UHU که تصویر آن در شکل ۲-۶-ب قابل مشاهده است به هم چسبیده اند. این چسب قادر است فشار 300 کیلوگرم را در دمای 20°C تا حرارت مستقیم 200 درجه سانتی گراد تحمل کند.



شکل ۲-۶-الف: منحنی مغناطیس شوندگی ورق فولادی با کد M530-50A (ب) چسب اپوکسی برند UHU

موتور طراحی شده دارای 10 قطب است و با توجه به نوع بریر طراحی شده از 60 عدد آهنربای نئودیمیم (NdFeB) برای القای میدان در روتور استفاده شده است. هندسه بریر و محل قرار گیری آهنربا ها در شکل ۳-۶ قابل مشاهده است.



شکل ۳-۶: الف) نمایی از آهنربای NdFeB ب) نمایی از رتور ساخته شده به همراه مونتاژ آهنرباها ج) هندسه بریر رتور

۶-۲-۲ مجموعه نگهدارنده استاتور

استاتور هم به مانند رتور از ورقه های فولادی سیلیس دار با کد M530-5A به قطر ۰.۵ mm که با چسب اپوکسی با برند UHU به هم متصل شده اند، ساخته شده است. سیم پیچی استاتور دارای ۳۰ کلاف است که به صورت ستاره بسته شده است. در شکل ۴-۶ استاتور سیم پیچی شده و ورقه های استاتور قابل مشاهده است.



شکل ۴-۶: الف) ورقه های استاتور ب) نمای بالا از استاتور سیم پیچی شده ج) نمای کناری استاتور

۶-۲-۳ نگهدارنده های استاتور

استاتور دارای دو نگهدارنده است که در شکل شماره ۵-۶ قابل مشاهده اند. با توجه به ایجاد حرارت بالا داخل رتور هنگام چرخش، قطعات نگهدارنده از جنس آلومینیوم ساخته می شوند تا انتقال حرارت به بیرون رتور بهتر انجام شود. نگهدارنده شکل ۵-۶-الف نگهدارنده داخلی استاتور و رابط استاتور و شفت است و به منظور ایجاد مسیر برای عبور هوا برای خنک کردن مجموعه استاتور و همچنین کاهش وزن، در داخل آن سوراخ هایی تعبیه شده است. نگهدارنده شکل ۵-۶-ب هم برای جلوگیری از حرکت استاتور در راستای محور چرخش در نظر گرفته شده است. قطر خارجی نگهدارنده داخلی دارای ۰.۱ mm و قطر داخلی آن دارای ۰.۰۵ mm تلرانس جذب هستند.



شکل ۵-۶: نگهدارنده های استاتور

۴-۲-۶ درپوش

درپوش ها نقش محافظتی دارند و به منظور انتقال حرارت بهتر از داخل موتور به بیرون از جنس آلومینیوم ساخته می شوند و مجموعه روتور و استاتور داخل آنها قرار می گیرند. محل قرارگیری روتور داخل درپوش دارای $0.5 \pm \text{mm}$ و محل قرارگیری بلبرینگ ها داخل درپوش دارای $0.5 \pm \text{mm}$ تلرانس جذب هستند.



شکل ۶-۶: نمای داخل و بیرون درپوش ها

۵-۲-۶ شفت

از جنس آهن ساخته شده و داخل نگهدارنده سوراخ دار استاتور قرار می گیرد و به وسیله دو بلبرینگ به درپوش ها متصل می شود. محل قرارگرفتن بلبرینگ ها روی شفت $0.1 \pm \text{mm}$ و محل قرارگرفتن نگهدارنده استاتور روی شفت دارای $0.5 \pm \text{mm}$ تلرانس جذب هستند.



شکل ۶-۷: شفت و بلبرینگ

۳-۶ مراحل مونتاژ

موتور طراحی شده از نوع سنکرون رلوکتانس با آهنربای دائم و از نوع روتور بیرونی است که دارای دو قسمت اصلی روتور و استاتور است. روتور از ورقه های فولادی مونتاژ شده بر روی هم و آهنربا تشکیل شده و استاتور هم به مانند روتور از ورقه های فولادی مونتاژ شده بر روی هم و یک سیم پیچی تشکیل شده است و از یک نگهدارنده آلومینیومی که داخل استاتور قرار می گیرد برای نگه داشتن آن استفاده می شود. با توجه به اینکه مونتاژ قطعات برای نمونه آزمایشگاهی و به صورت دستی ساخته شده اند، صیقلی شدن قطعات دقیق نیست. در این شرایط برای جا زدن قطعات داخل یکدیگر از روشهایی مانند: تراشکاری، لایه برداری، صیقل دادن با سنگ و..... استفاده می شود تا ابعاد قطعات به اندازه مورد نظر رسیده و داخل هم قرار بگیرند.

۱-۳-۶ اتصال روتور و درپوش

ابتدا چسب های بیرون زده از لای ورق های روتور را در قسمت داخلی و خارجی با استفاده از سمباده نرم تمیز می کنیم تا بدنه روتور صاف و صیقلی شود. سپس براده های باقی مانده روی بدنه روتور را بوسیله یک دستمال مرطوب تمیز می کنیم.



شکل ۸-۶: (الف) تمیز کردن چسب های باقیمانده روی بدنه روتور (ب) تمیز کردن براده های آهن باقیمانده روی روتور

با توجه به اینکه مجموعه دوار است اتصال روتور و درپوش باید به صورت جذب یا جذب و روان (در صورت نیاز به باز شدن و انجام تغییرات ساختاری در راستای طراحی بهینه مشکلی برای قطعات به وجود نیاید) انجام شود در غیر این صورت ممکن است با گرم شدن مجموعه و با توجه به این که ضریب انبساط آلومینیوم بیشتر است، روتور هرز بچرخد.

با توجه به توضیحات بالا و محدودیت استفاده از روش های یاد شده از روش shrink fit استفاده می کنیم. در این روش درپوش آلومینیومی را که ضریب انبساط بیشتری دارد در کوره حرارتی تا دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد به مدت حدود یک ساعت گرم می کنیم. دما را بیشتر از ۱۲۰ درجه تنظیم نمی کنیم تا سبب نرم شدن درپوش نشود. چون دمای ایده آل کاری برای آهنربا های به کار رفته در روتور حدود ۸۰ درجه است و با توجه به این که آهنربا ها در دمای بالاتر از ۱۰۰ درجه خاصیت مغناطیسی خود را از دست می دهند پس از خارج کردن درپوش از کوره چند دقیقه صبر می کنیم تا دمای درپوش تا حدود ۷۰ درجه کاهش پیدا کند. سپس رتور را داخل درپوش جا می زنیم. بعد از این مرحله با استفاده از ۵ پیچ که جای آن ها روی روتور و درپوش قبلا تعبیه شده است دو قطعه را به هم فیکس می کنیم. با گذشت زمان و سرد شدن درپوش، روتور داخل آن فیکس می شود.



شکل ۹-۶: روتور فیکس شده داخل درپوش

۲-۳-۶ اتصال استاتور و نگه دارنده داخلی

در این مرحله هم با توجه به اینکه جنس استاتور ورقه های فولادی و جنس نگهدارنده آلومینیومی است برای جا زدن نگهدارنده داخل استاتور از روش shrink fit استفاده می کنیم. ابتدا استاتور را به مدت ۱۵ دقیقه داخل کوره حرارتی با دمای ۷۰ درجه سانتی گراد قرار می دهیم. دمای کوره را نمیتوان بیشتر از ۷۰ درجه تنظیم کرد زیرا گرمای بیشتر موجب آسیب رسیدن به سیم پیچی استاتور می شود. سپس نگهدارنده را با یخ خشک (کپسول آتش خاموش کن پودری) سرد می کنیم. دمای نگهدارنده زمانی که یخ خشک روی آن قرار دارد حدود ۱۰۰ درجه زیر صفر قرار دارد. بعد از خارج کردن استاتور از کوره و سرد شدن نگهدارنده با ضربه چکش سعی می کنیم نگهدارنده را در استاتور جا بزنیم برای این که ضربات وارده آسیبی به سیم پیچی استاتور وارد نکند استاتور را روی چهار قطعه مناسب قرار می دهیم.



شکل ۱۰= ۶: الف) روتور حرارت داده شده در کوره ۷۰ درجه ب) نگهدارنده در حال سرد شدن با یخ خشک



شکل ۱۱= ۶: الف) قرار دادن ۴ قطعه نگهدارنده زیر استاتور برای جلوگیری از آسیب دیدن سیم پیچی بر اثر ضربه ب) استفاده از چکش نرم برای زدن ضربه به منظور جا رفتن نگهدارنده

در این مرحله با توجه به دقیق نبودن ابعاد نگهدارنده داخل استاتور به طور ناقص جا می گیرد برای تکمیل این مرحله از پرس پنج تنی مکانیکی به صورت دستی استفاده می کنیم. با توجه به اینکه بدنه داخلی استاتور به طور کامل صیقلی نشده است حین انجام پرس تعدادی از ورقه های استاتور از هم باز می شوند که با اعمال نا متقارن نیرو بوسیله پرس ورقه ها به حالت قبل باز می گردند و نگهدارنده به طور کامل داخل استاتور قرار می گیرد.



شکل ۱۲= ۶: الف) نمای داخلی باز شدن ورقه های استاتور زیر پرس ب) مجموعه استاتور زیر پرس ج) نمای بیرونی باز شدن ورقه های استاتور

۳-۳-۶ اتصال شفت به نگهدارنده داخلی

در اینجا برای اتصال شفت و نگهدارنده استاتور قطر بیرونی شفت را با استفاده از یک سمباده کم می کنیم تا بتوان شفت را در نگهدارنده جا زد. برای این کار شفت را با یک رابط به دریل وصل کرده دریل را در پایه نگهدارنده میز قرار می دهیم. با روشن شدن دریل یک سمباده را دور بدنه شفت نگه میداریم تا لایه برداری کند. حین انجام کار با خیس کردن سمباده از داغ شدن بیش از حد مجموعه جلوگیری می کنیم.



شکل ۱۳-۶: الف) شفت داخل استاتور جا رفته است ب) سمباده زدن شفت به منظور کاهش قطر بیرونی

۴-۳-۶ اتصال بلبرینگ ها به قالباق و شفت

با توجه به اینکه قطر داخلی قالباق ها و قطر خارجی بلبرینگ ها دارای تolerانس جذب متفاوتی هستند هر دو سطح را با سمباده لایه برداری می کنیم تا بلبرینگ ها در جای خود قرار بگیرند.



شکل ۱۴-۶: لایه برداری از قطر داخلی درپوش



شکل ۱۵-۶: مجموعه آماده شده جهت تست

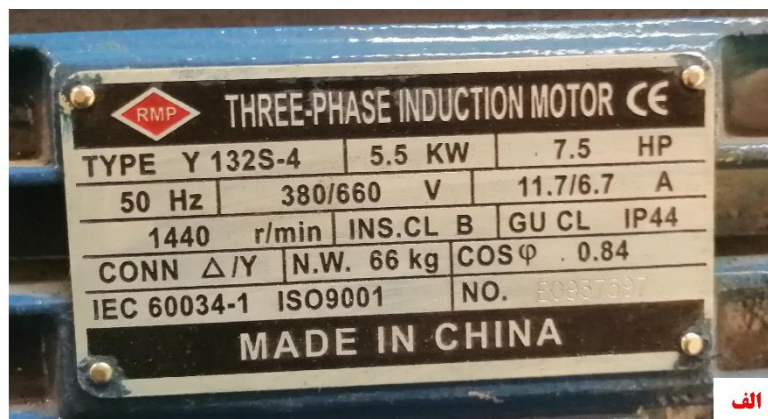
۶-۴ سیستم اندازه گیری و تست Back emf

۶-۴-۱ آماده سازی مجموعه تست

برای اندازه گیری Back emf باید موتور را به صورت یک ژنراتور بهره برداری کرد. در این حالت با چرخاندن موتور ولتاژ القاء شده در پایانه های موتور در یک اسیلوسکوپ قابل مشاهده است. قبل از انجام تست مورد نظر با اعمال یک ولتاژ DC چرخش موتور را بررسی می کنیم. اگر موتور مانعی برای چرخیدن نداشته باشد به دلیل وجود آهنربا در روتور با اعمال یک ولتاژ DC و عبور جریان از سیم پیچ استاتور قطب های ماشین سعی می کنند در جهت قطب آهنربا ها بایستند که این امر سبب چرخش موتور به میزان کمی خواهد شد. در اینجا برای چرخاندن موتور اصلی از یک موتور القایی ۵.۵ کیلو واتی استفاده می کنیم. (پلاک مشخصات موتور در شکل ۱۶-۶ الف قابل مشاهده است). به علت بالا بودن سرعت موتور القایی نسبت به سرعت موتور اصلی بوسیله گیربکس سرعت شفت موتور القایی را با نسبت ۱ به ۴ کم می کنیم. بوسیله یک محور یک چرخ دنده را به خروجی گیربکس وصل می کنیم. با یک زنجیر چرخ دنده تعبیه شده روی درپوش موتور اصلی را به چرخ دنده متصل شده به موتور القایی را وصل می کنیم. برای راه اندازی و تنظیم سرعت موتور القایی از یک اینورتر کمک می گیریم و پایانه های موتور القایی را به اینورتر وصل می کنیم. پایانه های موتور اصلی را به یک اسیلوسکوپ و اسیلوسکوپ را به منظور ثبت داده ها به کامپیوتر متصل می کنیم. برای اندازه گیری سرعت موتور اصلی از یک سرعت سنج نوری استفاده می کنیم. سرعت سنج حساس به عبور یک برچسب است که روی بدنه موتور قرار می گیرد. سرعت سنج با هر بار عبور برچسب از جلوی آن یک پالس ۲۴ ولتی تولید می کند. با استفاده از یک مقسم ولتاژ مقاومتی پالس دریافتی را به صورت یک پالس ۵ ولتی و از طریق یک پروب X1 به اسیلوسکوپ می دهیم. مجموعه آماده شده برای تست بر روی میز تی نات قرار می گیرد و در شکل ۱۶-۶ ب قابل مشاهده است.



ب



الف

شکل ۱۶-۶: الف) پلاک مشخصات موتور القایی ب) مجموعه تست Back-Emf

پس از آماده شدن مجموعه برای تست ابتدا مشخصات موتور القایی را طبق دیتاشیت اینورتر در آن ذخیره می کنیم. سپس با تغییر فرکانس اینورتر می توان سرعت موتور القایی و بالطبع آن سرعت موتور اصلی را تغییر داد.

ابتدا موتور را با سرعت کم راه اندازی می کنیم، در این مرحله فرکانس اینورتر را روی ۵ هرتز تنظیم می کنیم.

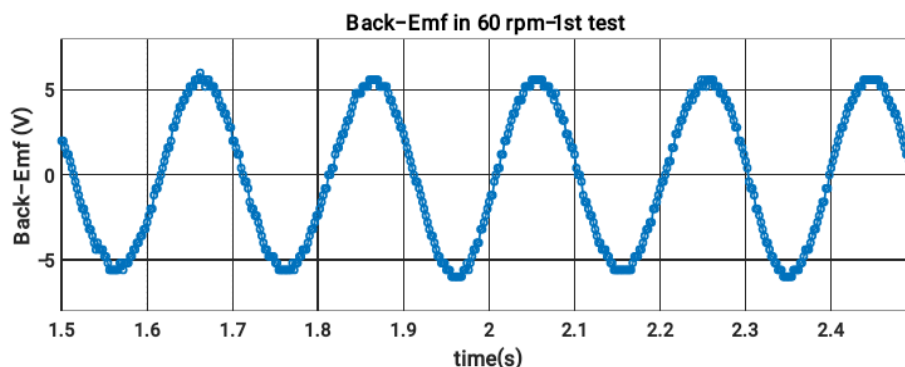
با افزایش فرکانس اینورتر مشاهده می شود که سرعت موتور افزایش می یابد. سرعت موتور در فرکانس ۱۱ هرتز به ۱۰۰ دور در دقیقه می رسد. با توجه به اینکه تمام عوامل تبدیل سرعت در مجموعه تست به صورت خطی عمل می کنند میتوان از یک نسبت تبدیل برای تنظیم فرکانس اینورتر استفاده کرد. سرعت موتور ها و فرکانس اینورتر در جدول زیر قابل مشاهده است. برای سنجش سرعت موتور القایی هم از یک سرعت سنج دیجیتالی استفاده می کنیم.

26.	22	19.	13.	11	6.6	فرکانس اینورتر
4		8	2			
80	66	60	40	33	20	سرعت موتور القایی
0	5	0	2	8	6	
20	16	15	10	84.	51.	سرعت گیربکس
0	6.25	0	0.5	5	5	
24	20	18	12	10	60	سرعت موتور اصلی
0	0	0	0	0		

جدول ۲-۶: سرعت موتور ها و فرکانس اینورتر

۶-۴-۲ نتایج تست Back-Emf

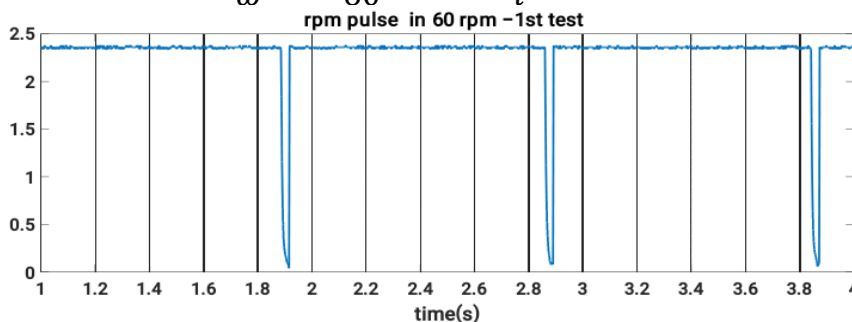
نمودار شبیه سازی دیتا های ثبت شده در کامپیوتر توسط اسیلوسکوپ به صورت زیر است:
نتیجه آزمایش اول سرعت ۶۰ دور در دقیقه: شکل موج ولتاژ Back-Emf موتور در سرعت ۶۰ دور در دقیقه مانند شکل ۶-۱۷ است. با توجه نمودار مقدار بیشینه این ولتاژ در حدود ۶ ولت است.



شکل ۶-۱۷: شکل موج ولتاژ Back-Emf موتور در سرعت ۶۰ دور در دقیقه

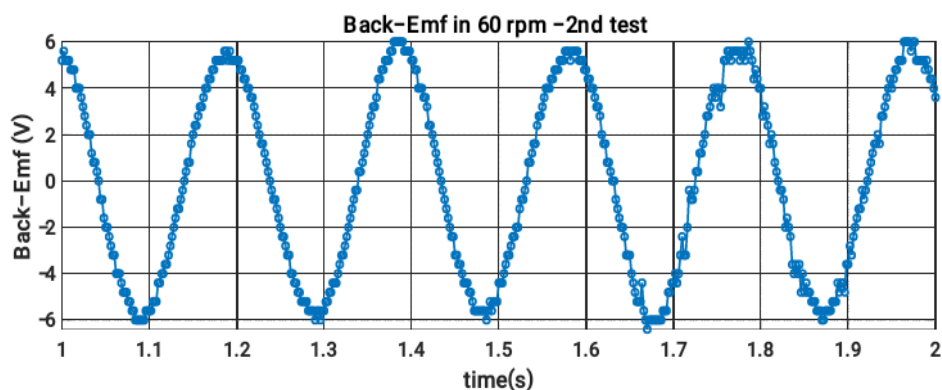
شکل موج پالس سرعت سنج به صورت شکل ۱۶-ب است. برای به دست آوردن سرعت موتور عرض پالس (τ) را از روی نمودار به دست می آوریم، برای این کار زمان را از ابتدا (انتها) یک پالس تا ابتدا (انتها) پالس بعدی اندازه گیری می کنیم. سپس با تقسیم ۶۰ به عرض پالس سرعت موتور بر حسب دور در دقیقه به دست می آید.

$$\frac{1 \text{ turn}}{\omega} = \frac{\tau}{60} \rightarrow \omega = \frac{60}{\tau} \quad (*)$$



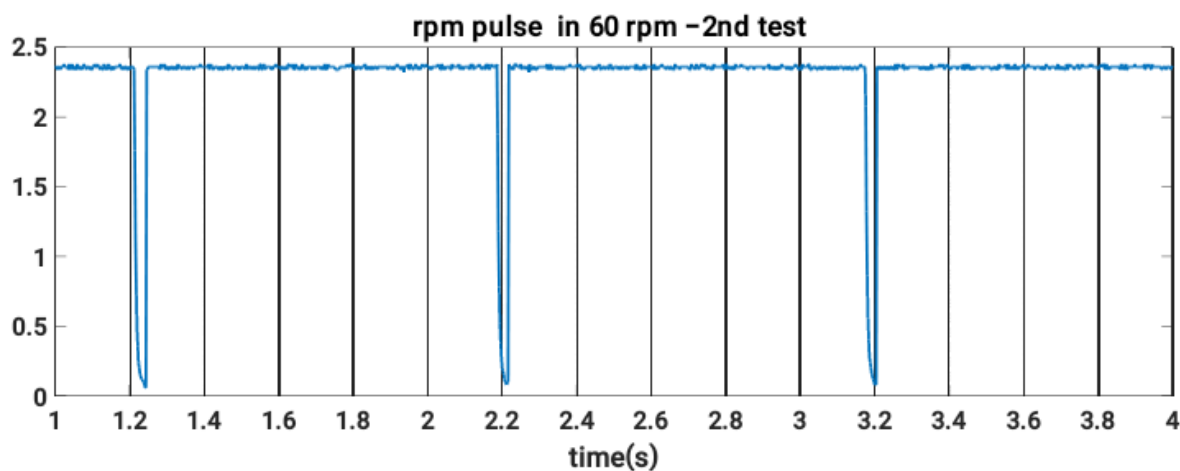
شکل ۶-۱۸: شکل موج پالس سرعت سنج

نتیجه آزمایش دوم سرعت ۶۰ دور در دقیقه: شکل موج ولتاژ Back-Emf موتور در سرعت ۶۰ دور در دقیقه مانند شکل ۶-۱۸ است. با توجه نمودار مقدار بیشینه این ولتاژ هم به مانند آزمایش اول در حدود ۶ ولت است.



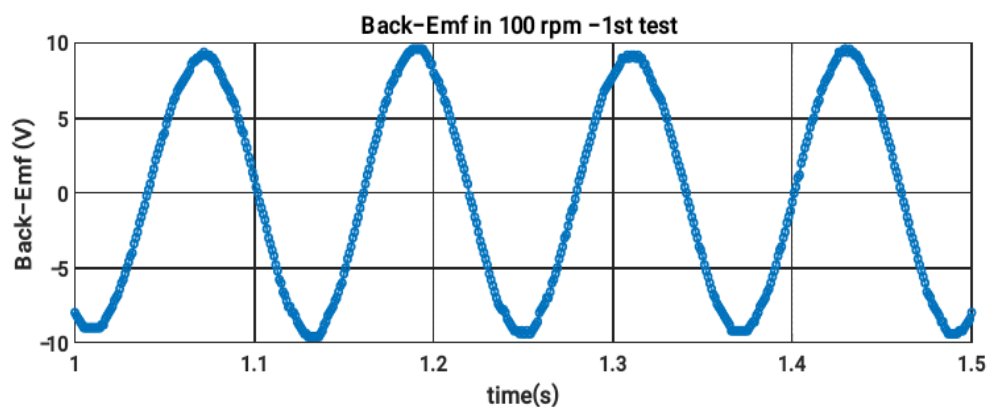
شکل ۱۹-۶: شکل موج ولتاژ Back-Emf موتور در سرعت ۶۰ دور در دقیقه

شکل موج پالس سرعت سنچ به صورت شکل ۲۰-۶ است. برای به دست آوردن سرعت موتور همانطور که توضیح داده شد از رابطه (*) استفاده می کنیم.



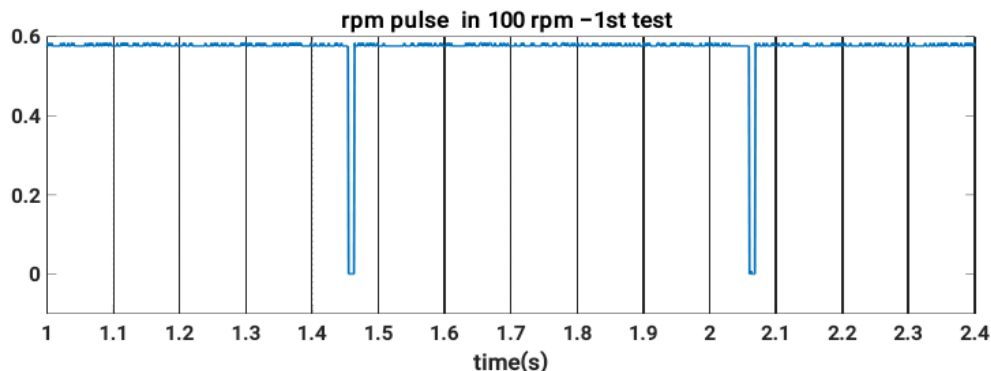
شکل ۲۰-۶: شکل موج پالس سرعت سنچ

نتیجه آزمایش اول سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه: شکل موج ولتاژ Back-Emf موتور در سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه مانند شکل شماره ۲۱-۶ است. با توجه نمودار مقدار بیشینه این ولتاژ در حدود ۱۰ ولت است.



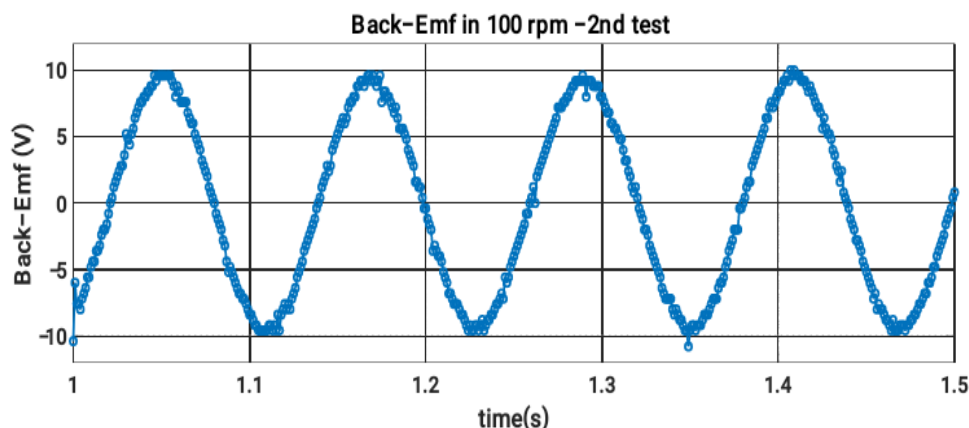
شکل ۲۱-۶: شکل موج ولتاژ Back-Emf موتور در سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه

شکل موج پالس سرعت سنج به صورت شکل ۶-۲۲ است. برای به دست آوردن سرعت موتور همانطور که توضیح داده شد از رابطه (*) استفاده می کنیم.



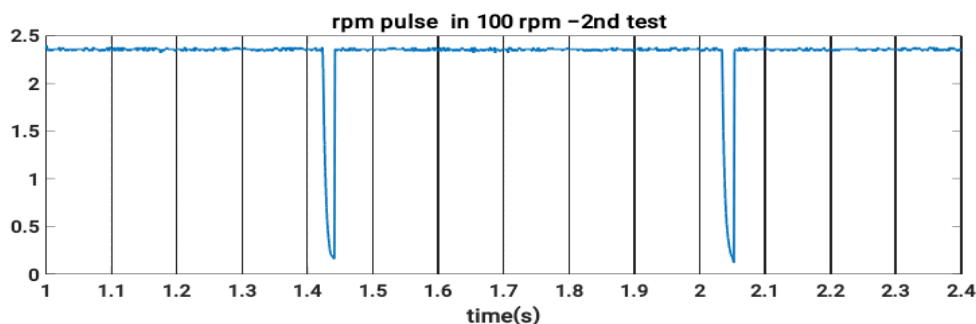
شکل ۶-۲۲: شکل موج پالس سرعت سنج

نتیجه آزمایش دوم سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه: شکل موج ولتاژ Back-Emf موتور در سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه مانند شکل شماره ۶-۲۳ است. با توجه نمودار مقدار بیشینه این ولتاژ هم به مانند آزمایش اول در حدود ۱۰ ولت است.



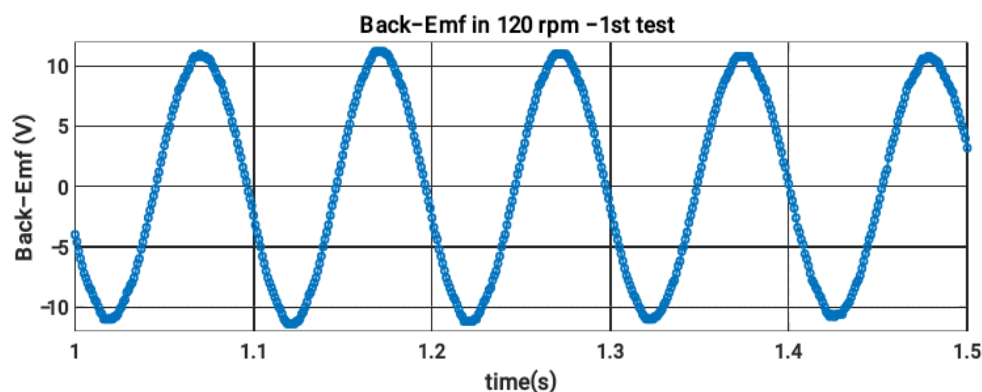
شکل ۶-۲۳: شکل موج ولتاژ Back-Emf موتور در سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه

شکل موج پالس سرعت سنج به صورت شکل ۶-۲۴ است. برای به دست آوردن سرعت موتور همانطور که توضیح داده شد از رابطه (*) استفاده می کنیم.



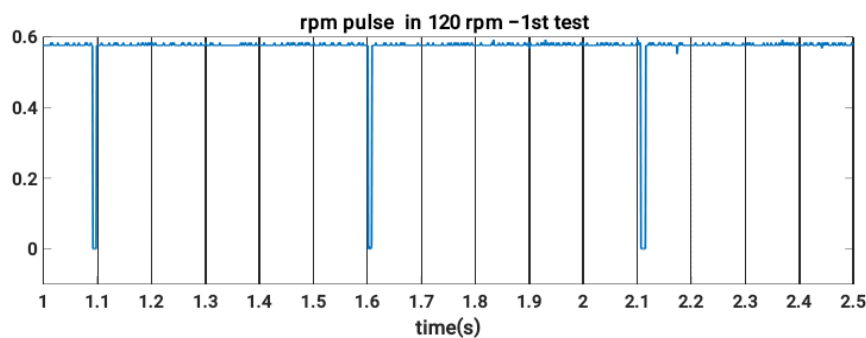
شکل ۶-۲۴: شکل موج پالس سرعت سنج

نتیجه آزمایش اول سرعت ۱۲۰ دور در دقیقه: شکل موج ولتاژ Back-Emf موتور در سرعت ۱۲۰ دور در دقیقه مانند شکل شماره ۶-۲۵ است. با توجه نمودار مقدار بیشینه این ولتاژ در حدود ۱۱ ولت است.



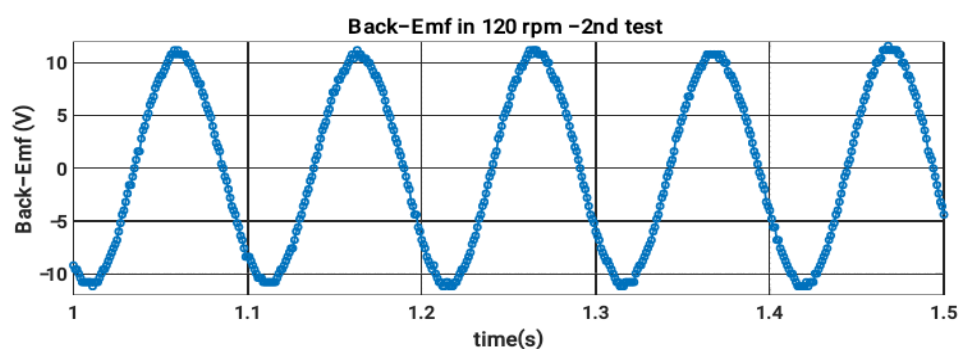
شکل ۲۵-۶: شکل موج ولتاژ **Back-Emf** موتور در سرعت ۱۲۰ دور در دقیقه

شکل موج پالس سرعت سنچ به صورت شکل ۲۶-۶ است. برای به دست آوردن سرعت موتور همانطور که توضیح داده شد از رابطه (*) استفاده می کنیم.



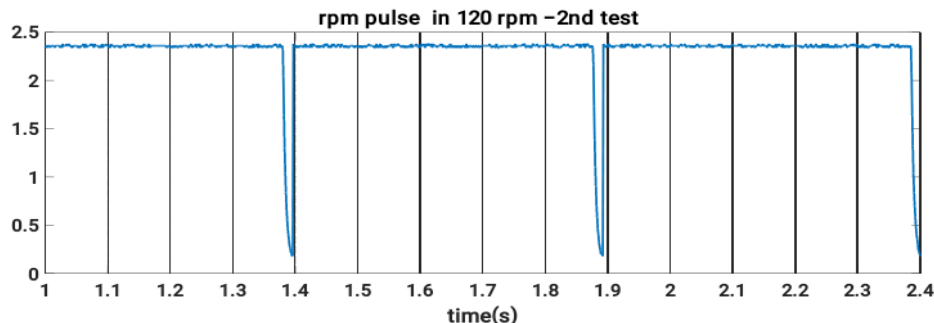
شکل ۲۶-۶: شکل موج پالس سرعت سنچ

نتیجه آزمایش دوم سرعت ۱۲۰ دور در دقیقه: شکل موج ولتاژ **Back-Emf** موتور در سرعت ۱۲۰ دور در دقیقه مانند شکل شماره ۲۷-۶ است. با توجه نمودار مقدار بیشینه این ولتاژ هم به مانند آزمایش اول در حدود ۱۱ ولت است.



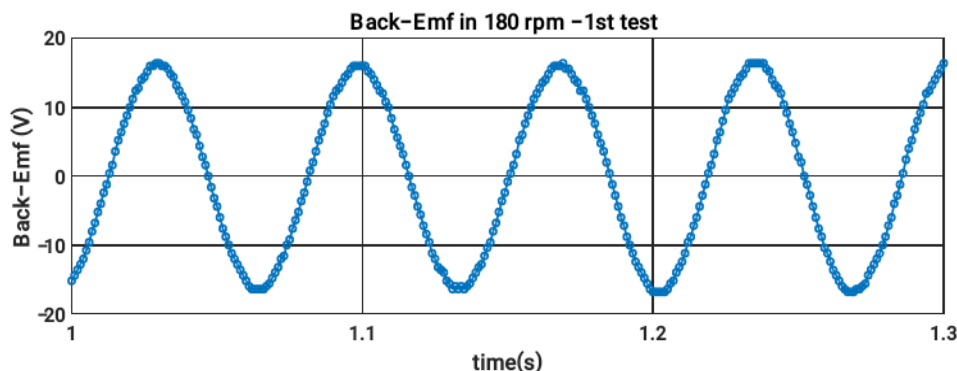
شکل ۲۷-۶: شکل موج ولتاژ **Back-Emf** موتور در سرعت ۱۲۰ دور در دقیقه

شکل موج پالس سرعت سنچ به صورت شکل ۶-۲۸ است. برای به آوردن سرعت موتور همانطور که توضیح داده شد از رابطه (*) استفاده می کنیم.



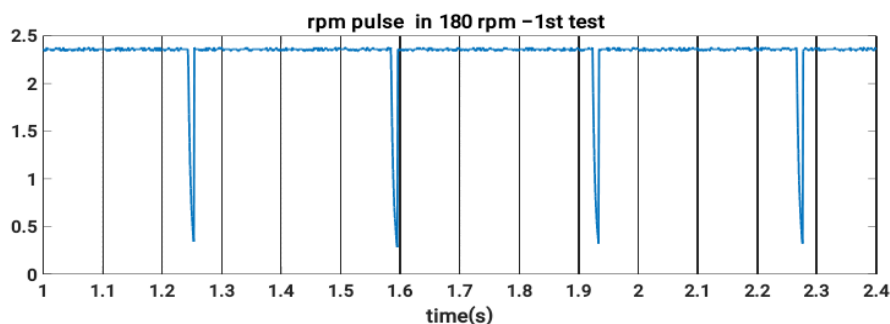
شکل ۶-۲۸: شکل موج پالس سرعت سنچ

نتیجه آزمایش اول سرعت ۱۸۰ دور در دقیقه: شکل موج ولتاژ Back-Emf موتور در سرعت ۱۸۰ دور در دقیقه مانند شکل شماره ۶-۲۹ است. با توجه نمودار مقدار بیشینه این ولتاژ در حدود ۱۷ ولت است.



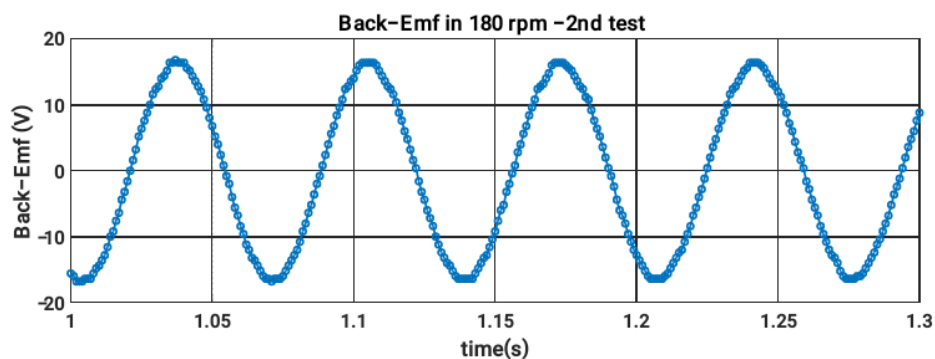
شکل ۶-۲۹: شکل موج ولتاژ Back-Emf موتور در سرعت ۱۸۰ دور در دقیقه

شکل موج پالس سرعت سنچ به صورت شکل ۶-۳۰ است. برای به آوردن سرعت موتور همانطور که توضیح داده شد از رابطه (*) استفاده می کنیم.



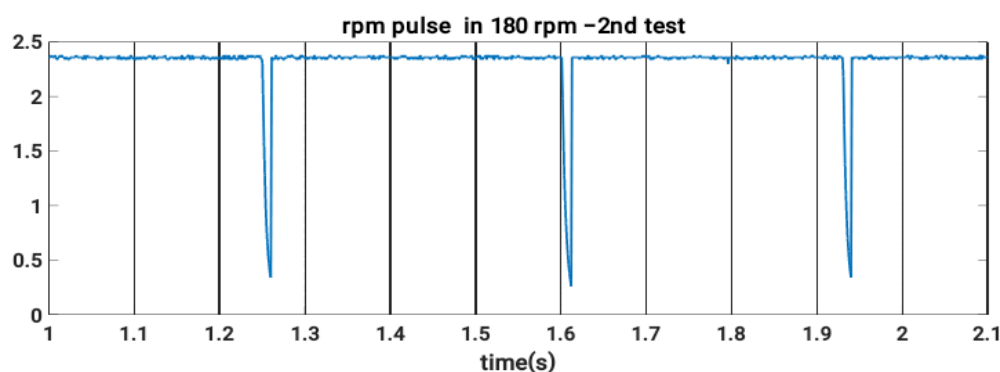
شکل ۶-۳۰: شکل موج پالس سرعت سنچ

نتیجه آزمایش دوم سرعت ۱۸۰ دور در دقیقه: شکل موج ولتاژ Back-Emf موتور در سرعت ۱۸۰ دور در دقیقه مانند شکل شماره ۶-۳۱ است. با توجه نمودار مقدار بیشینه این ولتاژ هم به مانند آزمایش اول در حدود ۱۷ ولت است.



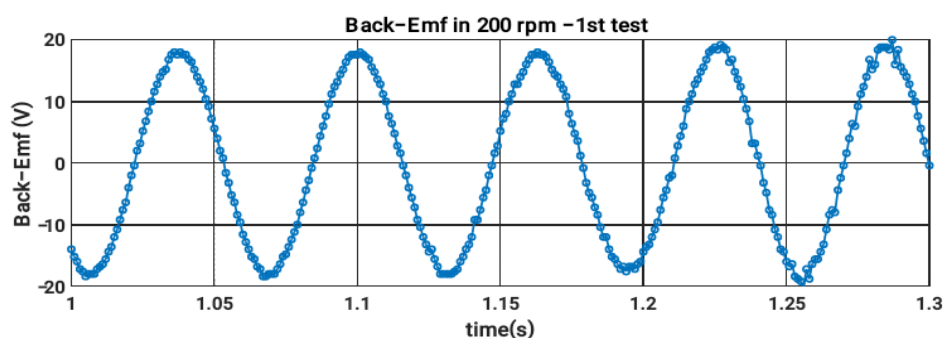
شکل ۳۱-۶: شکل موج ولتاژ Back-Emf موتور در سرعت ۱۸۰ دور در دقیقه

شکل موج پالس سرعت سنچ به صورت شکل ۳۲-۶ است. برای به دست آوردن سرعت موتور همانطور که توضیح داده شد از رابطه (*) استفاده می کنیم.



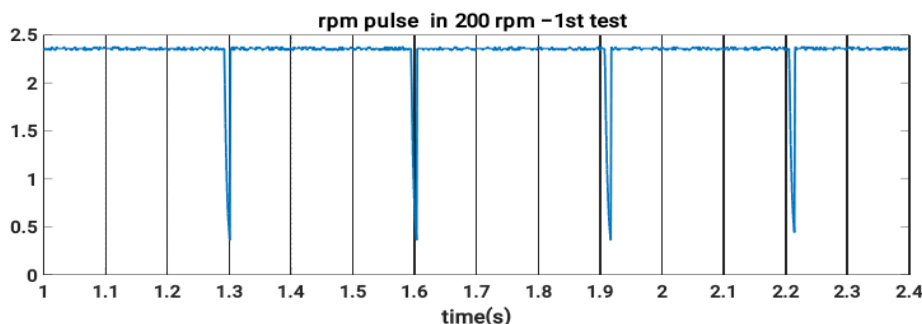
شکل ۳۲-۶: شکل موج پالس سرعت سنچ

نتیجه آزمایش اول سرعت ۲۰۰ دور در دقیقه: شکل موج ولتاژ Back-Emf موتور در سرعت ۲۰۰ دور در دقیقه مانند شکل ۳۳-۶ است. با توجه نمودار مقدار بیشینه این ولتاژ در حدود ۱۸ ولت است.



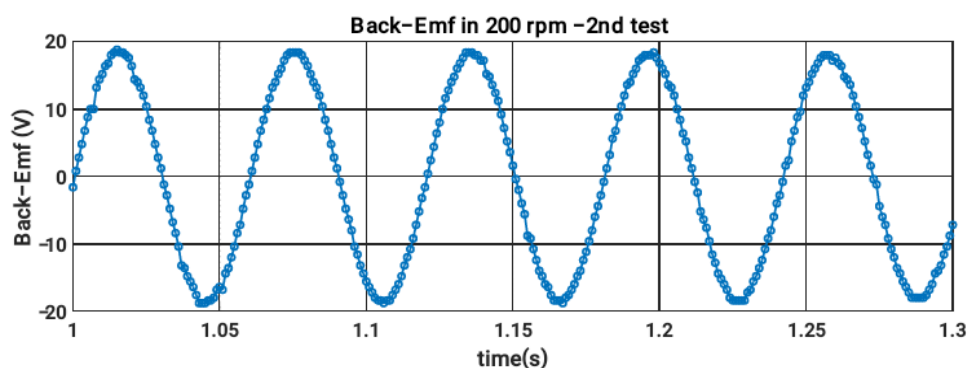
شکل ۳۳-۶: شکل موج ولتاژ Back-Emf موتور در سرعت ۲۰۰ دور در دقیقه

شکل موج پالس سرعت سنچ به صورت شکل ۳۴-۶ است. برای به آوردن سرعت موتور همانطور که توضیح داده شد از رابطه (*) استفاده می کنیم.



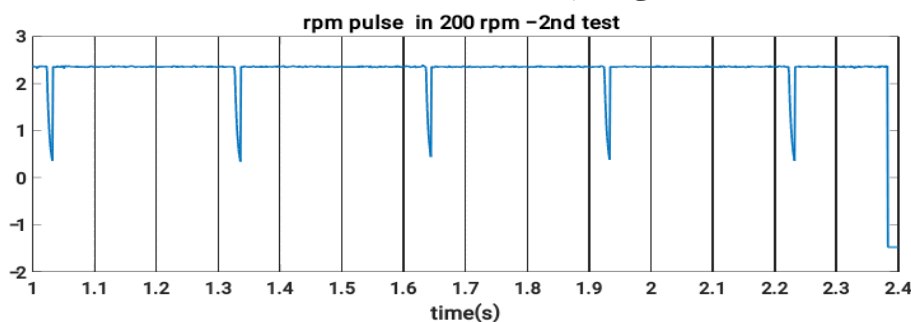
شکل ۳۴-۶: شکل موج پالس سرعت سنچ

نتیجه آزمایش دوم سرعت ۲۰۰ دور در دقیقه: شکل موج ولتاژ Back-Emf موتور در سرعت ۲۰۰ دور در دقیقه مانند شکل ۳۵-۶ است. با توجه نمودار مقدار بیشینه این ولتاژ هم به مانند آزمایش اول در حدود ۱۸ ولت است.



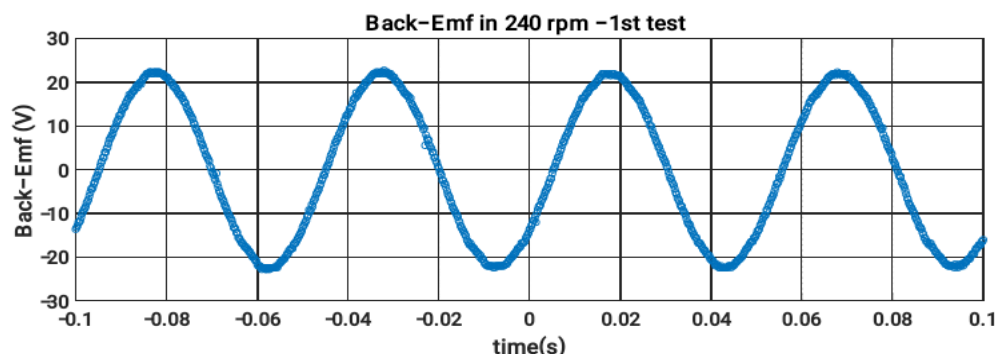
شکل ۳۵-۶: شکل موج ولتاژ Back-Emf موتور در سرعت ۲۰۰ دور در دقیقه

شکل موج پالس سرعت سنچ به صورت شکل ۳۶-۶ است. برای به آوردن سرعت موتور همانطور که توضیح داده شد از رابطه (*) استفاده می کنیم.



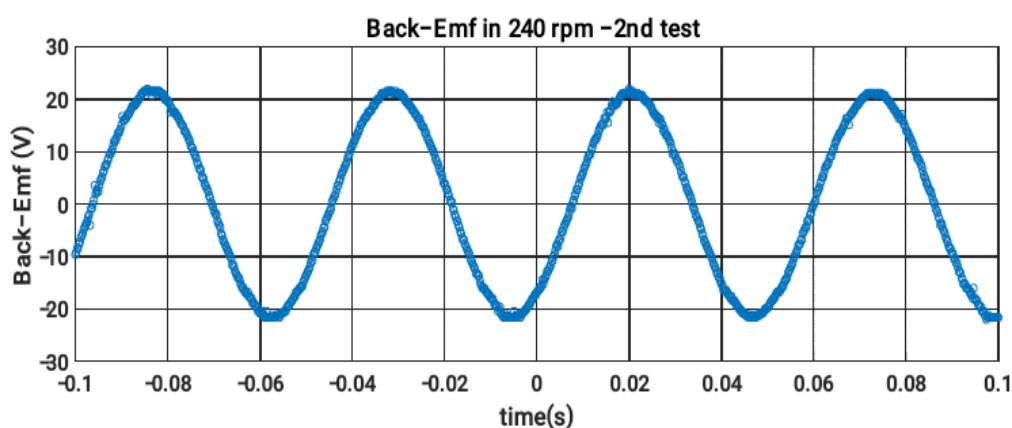
شکل ۳۶-۶: شکل موج پالس سرعت سنچ

نتیجه آزمایش اول سرعت ۲۴۰ دور در دقیقه: شکل موج ولتاژ Back-Emf موتور در سرعت ۲۴۰ دور در دقیقه مانند شکل ۳۷-۶ است. با توجه نمودار مقدار بیشینه این ولتاژ در حدود ۲۳ ولت است.



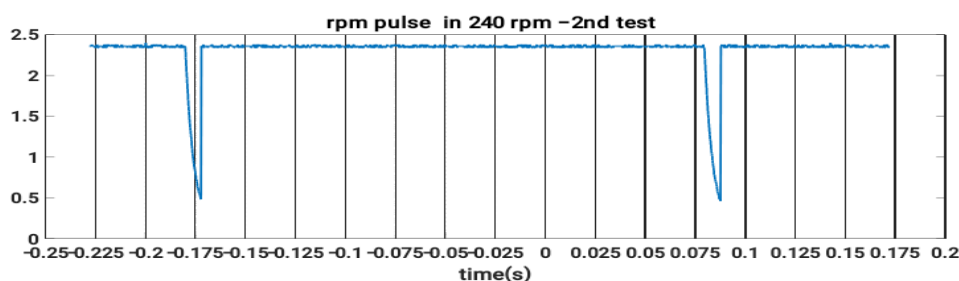
شکل ۳۷-۶: شکل موج ولتاژ Back-Emf موتور در سرعت ۲۴۰ دور در دقیقه

نتیجه آزمایش دوم سرعت ۲۴۰ دور در دقیقه: شکل موج ولتاژ Back-Emf موتور در سرعت ۲۴۰ دور در دقیقه مانند شکل شماره ۳۸-۶ است. با توجه نمودار مقدار بیشینه این ولتاژ هم به مانند آزمایش اول در حدود ۲۳ ولت است.



شکل ۳۸-۶: شکل موج ولتاژ Back-Emf موتور در سرعت ۲۴۰ دور در دقیقه

شکل موج پالس سرعت سنچ به صورت شکل ۳۹-۶ است. برای به آوردن سرعت موتور همانطور که توضیح داده شد از رابطه (*) استفاده می کنیم.



شکل ۳۹-۶: شکل موج پالس سرعت سنچ

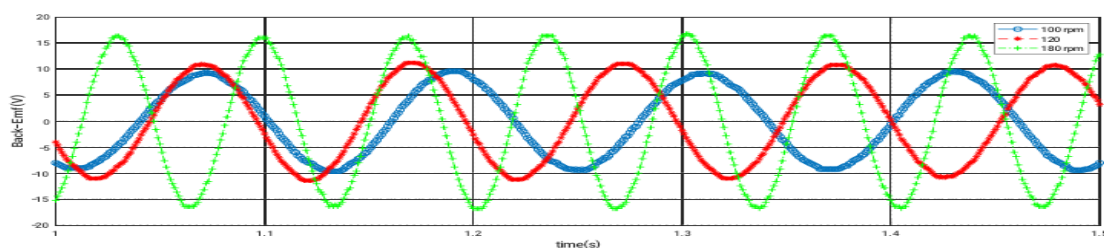
نتایج محاسبات سرعت از روی نمودار های بدست آمده و طبق رابطه (*) در جدول ۳-۶ آمده است:

جدول ۳-۶: نتایج محاسبات سرعت از روی نمودار های بدست آمده

سرعت تنظیم شده	سرعت به دست آمده از نتایج تست اول	سرعت به دست آمده از نتایج تست دوم
60 rpm	$\frac{60}{2.9 - 1.9} = 60 \text{ rpm}$	$\frac{60}{3.2 - 2.2} = 60 \text{ rpm}$
100 rpm	$\frac{60}{2.05 - 1.45} = 100 \text{ rpm}$	$\frac{60}{2.04 - 1.45} = 100 \text{ rpm}$
120 rpm	$\frac{60}{2.1 - 1.6} = 120 \text{ rpm}$	$\frac{60}{1.9 - 1.4} = 120 \text{ rpm}$
180 rpm	$\frac{60}{1.93 - 1.6} = 181.81 \text{ rpm}$	$\frac{60}{1.6 - 1.27} = 181.81 \text{ rpm}$
200 rpm	$\frac{60}{1.6 - 1.3} = 200 \text{ rpm}$	$\frac{60}{1.65 - 1.35} = 200 \text{ rpm}$
240 rpm	—	$\frac{60}{0.075 - (-0.175)} = 240 \text{ rpm}$

۳-۴-۶ مقایسه Back-Emf در سرعت های مختلف

در این قسمت ولتاژ Back-Emf را در سه سرعت ۱۰۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دور در دقیقه را با هم مقایسه می کنیم. در شکل ۴۰-۶ نمودار این سه ولتاژ قابل مشاهده است.

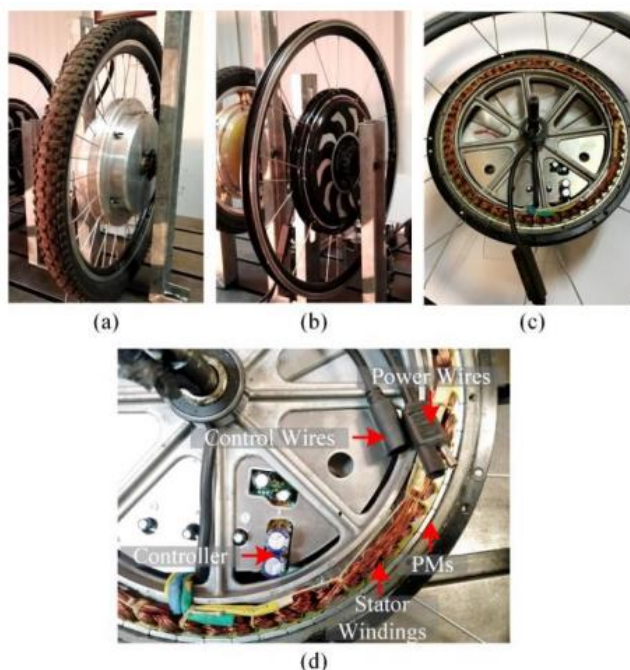


شکل ۴۰-۶: نمودار ولتاژ Back-Emf در سه سرعت مختلف

۵-۶ مقایسه عملکرد تجربی بین BLDCM تجاری و PMA SynRM طراحی شده

برای داشتن یک تصویر بهتر در مورد مزایا و کاستی های PMA SynRM پیشنهادی برای موتور دوچرخه الکترونیکی، مقایسه تجربی بین BLDCM تجاری و PMA SynRM نمونه اولیه در این بخش ارائه شده است. برای این منظور، MP2 BLDCM تجاری ۵۰۰ وات، ۲۰۰ دور در دقیقه از محصولات گلدن موتور با سیستم محرک داخلی انتخاب شده است.

هر دو موتور روی یک چرخ مونتاژ می شوند و در شکل ۴۱-۶ (الف) و (ب) نشان داده شده اند. نمای داخلی BLDCM با درپوش جلویی باز شده، پیکربندی سیم پیچ و آرایش PM در شکل ۴۱-۶ (ج) و (د) ارائه شده است. خلاصه مقایسه ها از نظر حجم، چگالی توان و هزینه کل PM در جدول ۴-۶ آورده شده است. همانطور که در جدول ۴-۶ مشاهده می شود، ۴۰٪ مقدار آهنربا بیشتری در BLDCM در مقایسه با PMA SynRM طراحی شده استفاده شده است که آن را گرانتتر می کند. علاوه بر این، کل حجم فعال PMA SynRM طراحی شده ۲۳٪ کوچکتر از BLDCM تجاری است که باعث می شود چگالی گشتاور PMA SynRM طراحی شده و آزمایش شده حدود ۲۸٪ بزرگتر از BLDCM باشد. گشتاور چرخشی بالاتر باعث ایجاد موج گشتاور خروجی بالاتری می شود که می تواند منجر به سر و صدا به خصوص در سرعت های پایین شود که در آن اینرسی نمی تواند به اندازه کافی مشخصات گشتاور خروجی را مانند دوچرخه های الکترونیکی صاف کند. از آنجایی که دوچرخه سوار بدون هیچ گونه اقدامی برای کاهش صدای صوتی به موتور الکتریکی بسیار نزدیک است، ارزیابی و کاهش گشتاور چرخش در کاربردهای دوچرخه الکترونیکی مهم است.

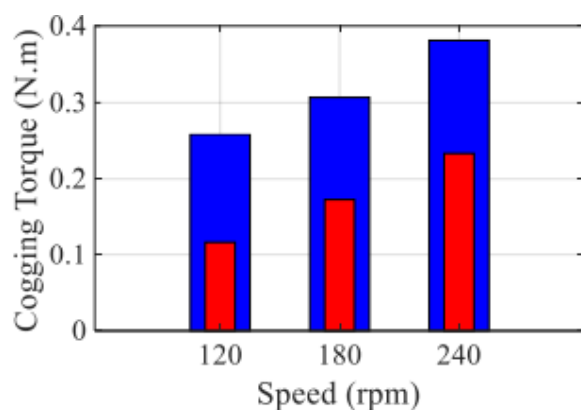


شکل ۴۱-۶: BLDCM تجاری و PMA SynRM آزمایش شده است. (الف) نمونه اولیه PMA SynRM در چرخ. (ب) BLDCM در چرخ. (ج) BLDCM با درپوش فونت باز. (د) اجزای BLDCM

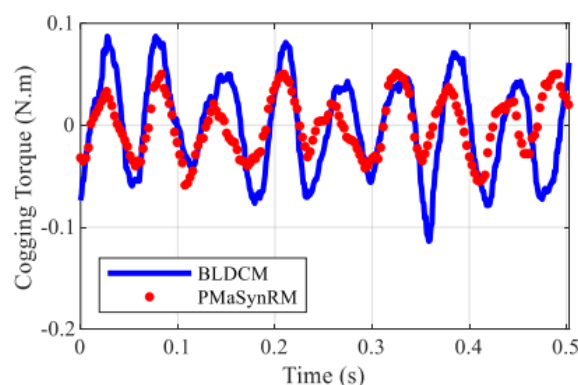
جدول ۴-۶: خلاصه مقایسه بین BLDCM و PMaSynRM

Parameter	Unit	PMaSynRM	BLDCM
Overall volume	L	3.13	4.02
Power density	W/L	159.74	124.38
PM volume	mm ³	45000	63000
PM cost ^a	\$	25.65	35.91

گشتاورهای گیره ای اندازه گیری شده برای PMaSynRM و BLDCM طراحی شده در ۶۰ دور در دقیقه (۲۸ درصد سرعت اسمی) در شکل ۴۲-۶ (الف) نشان داده شده است. مقادیر گشتاور پیک به پیک برای PMaSynRM و BLDCM به ترتیب ۰.۱ و ۰.۲ نیوتن متر است. مقادیر گشتاور چرخشی پیک به اوج در برخی از نمونه های سرعت بالاتر در شکل ۴۲-۶ (ب) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، PMaSynRM دارای گشتاور گیره پایین تری در تمام سرعت ها است.



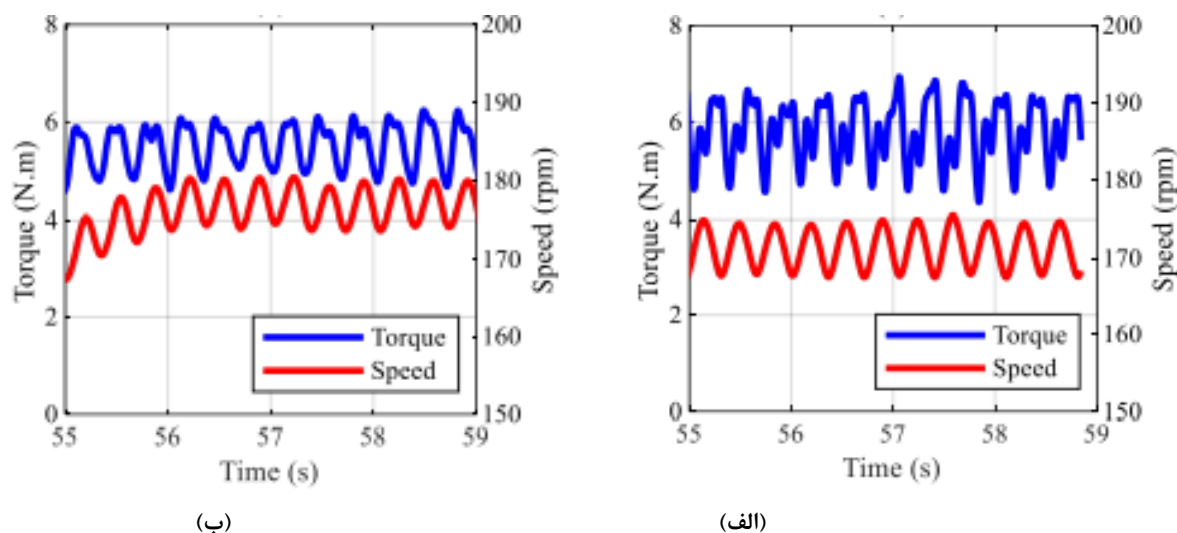
(ب)



(الف)

شکل ۴۲-۶: گشتاورهای گیره ای اندازه گیری شده برای PMaSynRM طراحی شده و BLDCM تجاری. (الف) گشتاورهای چرخشی آنی در ۶۰ دور در دقیقه. (ب) گشتاورهای پیک به پیک در سرعت های مختلف.

گشتاور و پاسخ های سرعت لحظه ای اندازه گیری شده برای PMaSynRM طراحی شده و BLDCM تجاری در سرعت های کاری مختلف و شرایط بارگذاری در شکل ۴۳-۶ نشان داده شده است. همانطور که تقریباً در میانگین گشتاور و سرعت یکسان مشاهده می شود، گشتاور و نوسانات سرعت برای PMaSynRM طراحی شده کمتر از BLDCM است. نوسانات سرعت برای PMaSynRM طراحی شده و BLDCM تجاری به ترتیب ۱.۴٪ و ۲٪ و نوسانات گشتاور ۱۴٪ و ۲۲٪ می باشد. به عبارت دیگر، فرآیند راه اندازی با PMaSynRM طراحی شده نسبت به BLDCM روان تر خواهد بود.



شکل ۴۳-۶: پاسخ‌های گشتاور و سرعت آنی برای PMaSynRM آزمایش‌شده و BLDCM تجاری.

(الف) در پاسخ‌ها برای BLDCM بزرگنمایی شده است. (ب) در پاسخ‌ها برای PMaSynRM بزرگنمایی شده است.

۶-۶ نتیجه گیری

با توجه به بررسی‌های انجام شده در این پروژه، می‌توان نتیجه گرفت که ساختار تک شیاره با آهنرباهای فریتی که در قسمت افقی شیار قرار گرفته‌اند و آهنرباهای نفودمیومی‌ای که در کناره‌های آن قرار گرفته‌اند، هنگامی که استاتور آن اسکیو شود، دارای عملکردی مناسب می‌باشد و به عنوان ساختار منتخب انتخاب شده است.

در این پروژه، ساختار دو شیاره نیز بطور کامل بررسی گردید و این نتیجه حاصل شد که اگرچه افزایش تعداد شیارها می‌تواند باعث کاهش ریپل گشتاور شود، این عمل نمی‌تواند جایگزین اسکیوی استاتور شود. به علاوه افزایش چگالی گشتاور ناشی از افزایش تعداد شیارها به قدری نیست که توجیه‌کننده هزینه و ساخت مشکل‌تر ساختار شود.

روش‌هایی مانند ناچ و تغییر شکل قطب‌های استاتور نیز اگرچه باعث کاهش ریپل گشتاور می‌شوند، نمی‌توان آنها را جایگزین اسکیوی استاتور نمود.

روش slot opening shift نیز تفاوت‌چندانی با روش اسکیو ندارد و از اینرو به دلیل ساخت آسان‌تر روش اسکیو برای کاهش ریپل گشتاور انتخاب می‌شود.

هدف اصلی در مرحله طراحی، داشتن حجم کمتری از PM در ساختار PMSynRM برای کاهش هزینه، موج گشتاور و مسائل زیست محیطی معمول ماشین‌های PM بود. کاهش PM با ارائه حدود نیمی از گشتاور کل در PMSynRM از طریق جزء گشتاور رلکتانس ممکن شده است. چگالی گشتاور کلی PMSynRM با کاهش کل حجم فعال دستگاه در مقایسه با ابعاد موجود BLDCM افزایش یافته است. تجزیه و تحلیل مکانیکی نشان می‌دهد که حداکثر تغییر شکل کل کمتر از ۰.۰۴۸٪ طول شکاف هوا و حداکثر تنش معادل (فون میز) ۱۱.۵۲ مگاپاسکال در حداکثر سرعت ممکن ۱۸۰۰ دور در دقیقه است که بسیار کمتر از مقاومت تسلیم فولاد سیلیکونی M470 است. لمینیت مورد استفاده در ساختار روتور که بین ۳۵۰-۳۰۰ مگاپاسکال است. از طریق شبیه‌سازی‌ها و ارزیابی عملکرد تجربی دو ماشین، نشان داده شد که PMSynRM طراحی شده می‌تواند چگالی گشتاور را تا ۲۸ درصد افزایش دهد، گشتاور چرخشی و ریپل گشتاور را به ترتیب ۵۰ درصد و ۸ درصد کاهش دهد و مصرف PM و متناظر را کاهش دهد. هزینه ۴۰٪ در مقایسه با BLDCM تجاری. نقطه ضعف کارایی نسبتاً پایین تر به دلیل حجم قابل توجه کمتر PM های استفاده شده است.

مراجع

- [۱] “R. A. Inte and F. N. Jurca, "A novel synchronous reluctance motor with outer rotor for an electric bike," 2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE), Iasi, 2016, pp. 213-218.”.
- [۲] H. Shao, S. Li and T. G. Habetler, "Analytical Calculation of the Air-gap “Flux Density and Magnetizing Inductance of Synchronous Reluctance Machines," 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Portland, OR, 2018, pp. 5408-5413.”.
- [۳] R. A. Inte, F. N. Jurca and C. Marțiș, "Design and Analysis of Outer Rotor “Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machine with Concentrated Winding for Small Electric Propulsion," 2019 AEIT International Annual Conference (AEIT), Florence, Italy”.
- [۴] Gianmario Pellegrino, Thomas M. Jahns, Nicola Bianchi, Wen L. Soong, “Francesco Cupertino, The Rediscovery of Synchronous Reluctance and Ferrite Permanent Magnet Motors, 2016 Springer.”.
- [5] M. Nourmohammadpour, M. Khalilzadeh, K. Abbaszadeh, “Accurate modeling of switched reluctance motor by using improved winding function method”, The 22nd Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE 2014), May 20-22, 2014, Shahid Beheshti University
- [6] G. D. Finlayson, D. Connah, M. S. Drew, "Lookup-table-based gradient field reconstruction", *IEEE Trans. on Image Processing*, vol. 20, no. 10, pp. 2827-2836, 2011..
- [7] H. Saito, R. Kusaba, M. Nakajima, S. Yuta, "Magnetic Field Imaging by CT Technique", *IEEE Transaction on Magnetics*, vol. Mag-23, no. 5, pp. 2587-2589, Sept. 1987.
- [8] W. Wang, M. Kiani, B. Fahimi, "Optimal design of doubly fed induction generators using field reconstruction method", *IEE Trans. Mag.*, vol. 46, no. 8, pp. 3453-3456, 2008.
- [9] D. Wu, S. D. Pekarek, B. Fahimi, "A voltage-input-based field reconstruction technique for efficient modeling of the fields and forces within induction machines", *IEEE Trans. Ind. Electronic*
- [10] D. Wu, S. D. Pekarek, , and B. Fahimi, “A Field Reconstruction Technique for Efficient Modeling of the Fields and Forces Within Induction Machines”, IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 24, NO. 2, JUNE 2009.

- [11] D. Torregrossa, A. Khoobroo, B. Fahimi, "Prediction of Acoustic Noise and Torque Pulsation in PM Synchronous Machines With Static Eccentricity and Partial Demagnetization Using Field Reconstruction Method", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 59, NO. 2, FEBRUARY 2012
- [12] B. Deken', S. Pekarek, B. Fahimi, "An Enhanced Field Reconstruction Method for Design of Permanent Magnet Synchronous Machines", [IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference](#), P.P 169 – 174, 2007
- [۱۳] C. M. Spargo, B. C. Mecrow and J. D. Widmer, "Application of fractional " slot concentrated windings to synchronous reluctance machines," 2013 Drives Conference, Chicago, IL, 2013, pp. & International Electric Machines 618-625, doi: 10.1109/IEMDC.2013.65561".
- [۱۴] T. Mohanarajah, M. Nagrial, J. Rizk and A. Hellany, "Permanent Magnet " Optimization in PM Assisted Synchronous Reluctance Machines," 2018 IEEE 27th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Cairns, QLD, 2018, pp. 1347-1351.".
- [۱۵]: ماشین های الکتریکی مدرن ، موتورهای رلوکتانسی ، دکتر علی اکبر دامکی ، ، دانشکده مهندسی برق ، دانشگاه یزد پاییز ۱۳۹۵
- [16] B. Sheikh-Ghalavand, S. Vaez-Zadeh, and A. H. Isfahani, "An improved magnetic equivalent circuit model for iron-core linear permanent-magnet synchronous motors," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 46, no. 5, pp. 552-524, 2454
- [17] M. Yilmaz and P. T. Krein, "Capabilities of finite element analysis and magnetic equivalent circuits for electrical machine analysis and design," in Power Electronics Specialists Conference, 2443. PESC 2443. IEEE, 2443, pp. 4423-4499: IEEE
- [18] M. Amrhein and P. T. Krein, "Induction machine modeling approach based on 9-D magnetic equivalent circuit framework," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 21, no. 2, pp. 993-943, 2454
- [19] R.-B. Mignot, C. Espanet, D. Chamagne, and T. Martin, "Modeling of an axial flux pm motor using a 3d magnetic equivalent circuit," in Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2454 IEEE, 2454, pp. 5-3: IEEE
- [۲۰] L. Chen, X. Chen, J. Wang and P. Lazari, "A computationally efficient " multi-physics optimization technique for permanent magnet machines in

- electric vehicle traction applications," 2015 IEEE International Electric Drives Conference (IEMDC), Coe". & Machines
- [۲۱] K. Kim, J. S. Ahn, S. H. Won, J. Hong and J. Lee, "A Study on the Optimal " Design of SynRM for the High Torque and Power Factor," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 43, no. 6, pp. 2543-2545, June 2007."
- [۲۲] D. Jung, Y. Kwak, J. Lee and C. Jin, "Study on the Optimal Design of PMa-" SynRM Loading Ratio for Achievement of Ultrapremium Efficiency," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 53, no. 6, pp. 1-4, June 2017, Art no. 8001904."
- [۲۳] N. Bianchi, E. Fornasiero and W. Soong, "Selection of PM Flux Linkage " for Maximum Low-Speed Torque Rating in a PM-Assisted Synchronous Reluctance Machine," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 5, pp. 3600-3608, Sept.-Oct. 2015."
- [۲۴] S. S. Maroufian and P. Pillay, "PM assisted synchronous reluctance " machine design using AlNiCo magnets," 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), Miami, FL, 2017, pp. 1-6."
- [۲۵] S. S. Maroufian and P. Pillay, "Design and Analysis of a Novel PM-" Assisted Synchronous Reluctance Machine Topology With AlNiCo Magnets," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, no. 5, pp. 4733-4742, Sept.-Oct. 2019."
- [۲۶] S. S. R. Bonthu, M. T. B. Tarek and S. Choi, "Optimal Torque Ripple " Reduction Technique for Outer Rotor Permanent Magnet Synchronous Reluctance Motors," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 33, no. 3, pp. 1184-1192, Sept. 2018."
- [۲۷] M. N. Ibrahim, P. Sergeant and E. M. Rashad, "Influence of rotor flux-" barrier geometry on torque and torque ripple of permanent-magnet-assisted synchronous reluctance motors," 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Lausanne, 2017."
- [۲۸] Y. Wang, G. Bacco and N. Bianchi, "Geometry Analysis and Optimization " of PM-Assisted Reluctance Motors," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 5, pp. 4338-4347, Sept.-Oct. 2017."

جزئیات موتور طراحی نهایی

EMDLAB

Design ID: SynRM_PMaSynRM_205031

11-Jul-2020

Parameter	Unit	Value	Description
Pout	kW	0.55	Rated output power
RPM	RPM	240.00	Rated speed
Vt	V	38.00	Line-to-line terminal voltage
Ns		60.00	Number of stator slots
p		10.00	Number of poles
g	mm	0.45	Air gap length
Kair		0.50	$\text{Sum}(\text{db}_i)/(\text{Sum}(\text{db}_i) + \text{Sum}(\text{wry}_i))$
dEff		0.70	Desired efficiency
dPF		0.75	Desired power factor
Bav	Tesla	0.50	Magnetic loading
ac	kA/m	18.00	Electrical loading
Bst	Tesla	1.50	Maximum flux density in stator tooth
Bsy	Tesla	1.50	Maximum flux density in stator yoke
Bry	Tesla	1.50	Maximum flux density in rotor yoke
Jsw	A/mm ²	5.00	Stator winding current density
kf		0.45	Fill factor
kw		0.93	Winding factor
Np		1.00	Number of parallel path
Lend	mm	10.00	Length of coil before bending
Tw	C	120.00	Maximum temperatue of winding
ki		0.98	Iron factor
connection		0.00	Winding connection: 0 for Star and 1 for Delta
ar		0.43	Aspect ratio

skew		0.50	Skew
bs0	mm	1.70	
hs0	mm	1.00	
hs1	mm	0.50	
g_wst		0.90	wst1/wst2
g_emf		0.94	Eph/Vph
wrib	mm	0.70	Width of rib
wrrib1	mm	1.20	Width of radial rib 1
wrrib2	mm	1.00	Width of radial rib 2
wrrib3	mm	0.80	Width of radial rib 3
g_db2		1.00	db2/db1
g_db3		0.85	db3/db1
g_wry2		0.80	wry2/wry1
g_wry3		0.80	wry3/wry1
g_wry4		0.80	wry4/wry1
g_ba1		0.85	ba1/(pi/p)
g_ba2		0.70	ba2/ba2
g_ba3		0.65	ba3/ba1)
g_bta1		0.50	bta1/ba1
g_bta2		0.30	bta2/ba2
g_bta3		0.60	bta3/ba3)
g_bma1		0.40	bma1/ba1
g_bma2		0.60	bma2/ba2
g_bd1	mm	0.85	
g_bd2	mm	0.75	
g_bd3	mm	0.60	
Pin	kW	0.79	Input Power
It	A	15.92	Terminal current
Tout	Nm	21.88	Rated output torque

wry1	mm	3.43	
wry2	mm	2.74	
wry3	mm	2.74	
wry4	mm	2.74	
db1	mm	4.09	
db2	mm	4.09	
db3	mm	3.47	
ba1	rad	0.27	
ba2	rad	0.19	
ba3	rad	0.12	
bta1	rad	0.13	
bta2	rad	0.06	
bta3	rad	0.07	
bma1	rad	0.11	
bma2	rad	0.11	
wm1	mm	12.90	Width of magnet 1
wm2	mm	13.09	Width of magnet 2
bd1	mm	3.47	
bd2	mm	3.07	
bd3	mm	2.08	
Lmt	mm	181.78	Coil mean turn length
Lspan	mm	50.70	Span length
Rph	ohm	0.32	Phase resistance
Pcu	W	244.76	Stator winding copper loss
Asl	mm ²	12230.83	Area of stator lamination
Arl	mm ²	11449.21	Area of rotor lamination
KgRotor	Kg	2.71	Weight of rotor core
KgStator	Kg	2.90	Weight of stator core

KgWinding	Kg	3.48	Weight of winding copper
KgMagnets	Kg	0.32	Weight of magnets
KgActiveParts	Kg	9.41	Weight of active parts
span		5.00	Coil span