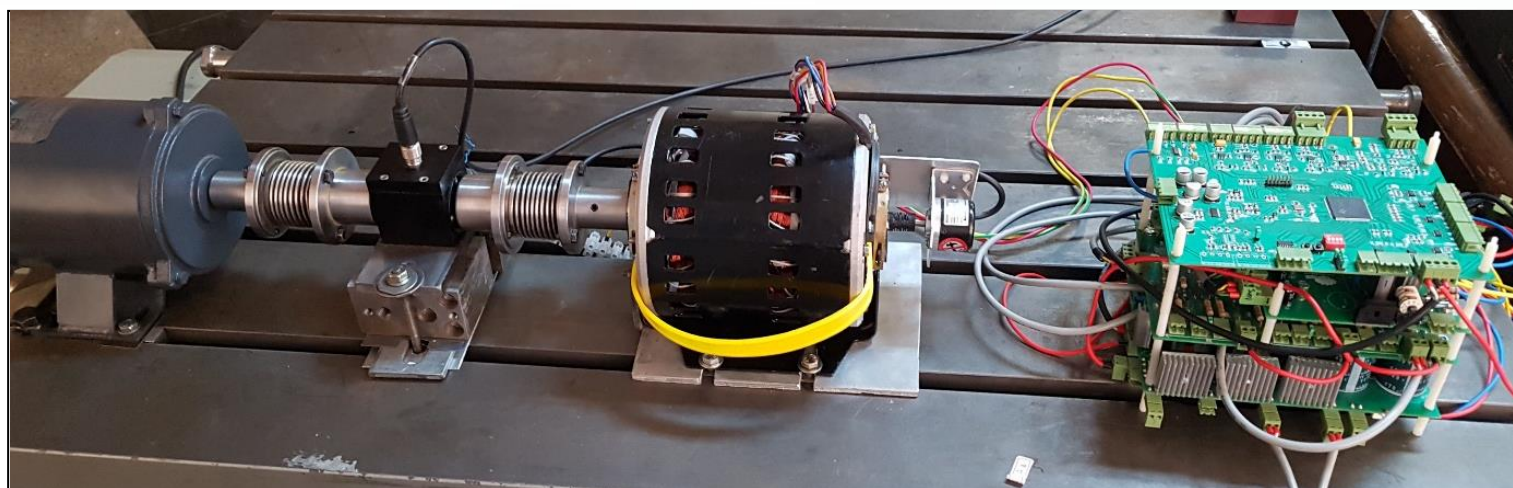


طراحی و ساخت موتور سنکرون رلوکتانسی با آهن ربای کمکی جهت به کارگیری در کولر آبی با احتساب بهینه سازی بازده



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



طراحی و ساخت موتور سنکرون رلوکتانسی با آهن ربای کمکی جهت به کارگیری در کولر آبی با احتساب بهینه سازی بازده

مدیر پروژه: حمیدرضا پیرودین نبی

مجری: ایمان صادقی

انتشارات پژوهشگاه نیرو

۱۴۰۱

DOI: 10.30503/nripress.2020.345

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. گروه/مرکز پژوهشی ماشین‌های الکتریکی دوار
طراحی و ساخت موتور سنکرون رلوکتانسی با آهن‌ربای کمکی جهت به‌کارگیری در کولر آبی با احتساب بهینه‌سازی بازده
کارفرما: پژوهشگاه نیرو، ۱۴۰۱.
۱۳۴ ص: مصور، نمودار، جدول

۱. حمیدرضا پیرو دین نبی ۲. مهدی علی احمدی ۳. الکترونیک قدرت و ماشین‌های الکتریکی
۴. طراحی ماشین‌های الکتریکی و درایو



انتشارات پژوهشگاه نیرو

گروه ماشین‌های الکتریکی دوار

کلیه حقوق قانونی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

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

تلفن: ۸۸۰۷۹۴۰۱-۹

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه: www.nri.ac.ir

پست الکترونیک انتشارات: publications@nri.ac.ir

فرم تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب حمید رضا پیرو دین نبی 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. مهدی علی احمدی

به نام خدا

پژوهشگاه نیرو

نام گزارش: طراحی و ساخت موتور سنکرون رلوکتانسی با آهن ربای کمکی جهت به کارگیری در کولر آبی با احتساب

بهینه سازی بازده

کد گزارش: PETPN12-4/T1-T7

واحد مجری طرح/پروژه: طرح انتقال و توسعه دانش و فناوری الکتروموتورهای سنکرون رلوکتانسی و ابررسانا

مدیر واحد مجری طرح/پروژه: سهراب امینی ولاشانی

مجری طرح/پروژه: ایمان صادقی

مدیر طرح/پروژه: حمیدرضا پیرو دین نبی

تاریخ: اردیبهشت ۱۴۰۱

پیشگفتار

گزارش حاضر مربوط به پروژه "طراحی و ساخت موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی جهت به کارگیری در کولر آبی با احتساب بهینه سازی بازده" بوده که به طراحی و تحلیل الکترومغناطیسی، تحلیل حرارتی و تحلیل مکانیکی موتور سنکرون رلوکتانسی و موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی و همچنین طراحی درایو و ساخت این مجموعه می پردازد.

در کولرهای آبی موجود، از موتورهای القایی تکفاز و یا از موتورهای آهنربای دائم استفاده می گردد. موتورهای القایی تکفاز که از آن ها بیشتر در کولرهای آبی استفاده می شوند، بازده انرژی کمی داشته و در نتیجه، مصرف انرژی الکتریکی آن ها زیاد است و در مجموع، کولرهای آبی نصب شده در کشور، دیماند قابل توجهی را نیاز دارند که این مساله، به خصوص در فصل گرم سال، موجب مشکلات زیاد برای تامین انرژی الکتریکی مورد نیاز شبکه برق می شود. از طرفی، قیمت بالای آهنربای دائم باعث افزایش قیمت تمام شده موتورهای آهنربای دائم شده است که استفاده از آن ها را پرهزینه می نماید. ضمناً، به دلیل استفاده از آهنرباهای کمیاب خاکی در ساختار این موتورها، با توجه به تک منبع بودن این آهنرباها، ریسک اتکا به این محصول برای تامین نیازهای کشور زیاد است و لذا، بررسی موارد ممکن برای جایگزینی این موتورها، امری ضروری است.

بازده انرژی موتورهای سنکرون رلوکتانسی با/بدون آهنربای دائم کمکی، به موتورهای آهنربای دائم نزدیک است و همچنین، به دلیل عدم استفاده یا استفاده کمتر از آهنربا در ساختار آن ها، هزینه تمام شده ساخت آن ها از موتورهای آهنربای دائم کمتر است. موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی از افزودن حجم کمی از آهنربای دائم به موانع شار موجود در روتور موتورهای سنکرون رلوکتانسی (جهت بهبود عملکرد) ساخته می شوند. این مزایا، موجب شده است تا این موتورها، گزینه مناسبی برای استفاده در تجهیزات خانگی، مخصوصاً در کولرهای آبی باشند.

هدف از انجام این پروژه امکانسنجی بکارگیری موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی جهت بکارگیری در کولرهای آبی و همچنین طراحی و ساخت یک نمونه آزمایشگاهی از مجموعه موتور و درایو سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی با توان یک دوم اسب بخار می باشد. مرحله اول این پروژه به تحلیل الکترومغناطیسی، مرحله دوم به تحلیل حرارتی و مکانیکی و مرحله سوم به تحلیل درایو موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی می پردازد. در مراحل چهارم و پنجم، روند ساخت موتور و درایو و همچنین تست مجموعه موتور و درایو ارائه می گردد.

گزارش حاضر توسط آقایان حمیدرضا پیرودین و مهدی علی احمدی تهیه شده و توسط جناب آقای دکتر محمدرضا علیزاده پهلوانی داوری شده است.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
پیشگفتار.....	ز
مقدمه.....	۱
۱- فصل اول: طراحی و تحلیل الکترومغناطیسی موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۱-۲- طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی.....	۲
۱-۲-۱- مساله طراحی.....	۲
۱-۲-۲- عوامل غیرایده آل کننده.....	۲
۱-۲-۳- پارامترها و متغیرهای طراحی.....	۴
۱-۲-۴- ملاحظات طراحی.....	۷
۱-۲-۵- مراحل طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی.....	۹
۱-۳- استفاده از آهنربای دائم در ماشین سنکرون رلوکتانسی.....	۱۰
۱-۴- طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی جهت استفاده در کولر آبی.....	۱۳
۱-۵- طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی جهت استفاده در کولر آبی.....	۱۸
۲- فصل دوم: تحلیل حرارتی موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی.....	۲۳
۲-۱- مقدمه.....	۲۴
۲-۲- تعریف مسئله.....	۲۴
۲-۳- روش های انتقال حرارت.....	۲۴
۲-۴- مدل سازی در نرم افزار.....	۲۶
۲-۴-۱- تحلیل حرارتی.....	۲۷
۲-۵- تحلیل مدل بدون آهنربا.....	۲۹
۲-۶- تحلیل مدل دارای آهنربا.....	۳۴
۳- فصل سوم: تحلیل مکانیکی موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی.....	۴۱
۳-۱- مقدمه.....	۴۲
۳-۲- تعریف مسئله.....	۴۲
۳-۳- حالت های خرابی.....	۴۳
۳-۴- مدل سازی در آباکوس.....	۴۳
۳-۵- تحلیل استاتیک.....	۴۵
۳-۶- تحلیل فرکانسی.....	۴۹
۳-۷- نتایج تحلیل استاتیک.....	۵۱
۳-۸- نتایج تحلیل فرکانسی.....	۵۷
۳-۹- آنالیز کمانش.....	۶۳
۴- فصل چهارم: مدلسازی و طراحی درایو موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی.....	۶۸
۴-۱- مقدمه.....	۶۹
۴-۲- مدلسازی موتورهای سنکرون.....	۶۹

۶۹	۴-۲-۱- اعمال ماتریس تبدیل.....
۷۰	۴-۲-۲- تبدیل گردان.....
۷۰	۴-۲-۳- معادلات دینامیکی موتور سنکرون مغناطیس دائم.....
۷۱	۴-۳- انواع روش های مدولاسیون.....
۷۲	۴-۳-۱- مدولاسیون پهنای پالس مبتنی بر موج حامل.....
۷۴	۴-۳-۲- مدولاسیون بردار فضایی.....
۷۶	۴-۳-۳- کنترل کننده های غیرخطی از نوع قطع و وصلی.....
۷۹	۴-۴- روش های کنترل موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی و موتور های سنکرون مغناطیس دائم.....
۷۹	۴-۴-۱- روش زاویه گشتاور ثابت($\delta = 90$).....
۷۹	۴-۴-۲- روش ضریب توان واحد.....
۸۰	۴-۴-۳- روش شار پیوندی ثابت.....
۸۱	۴-۴-۴- روش کنترل حداکثر نسبت گشتاور به جریان.....
۸۱	۴-۴-۵- روش کنترل تلفات.....
۸۳	۴-۴-۶- نتایج شبیه سازی کنترل در سیستم موتورهای سنکرون رلوکتانسی و سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی ..
۸۷	۵- فصل پنجم: ساخت، مونتاژ و تست درایو و موتور سنکرون رلوکتانسی با و بدون آهنربای کمکی.....
۸۸	۵-۱- ساخت موتورهای سنکرون رلوکتانس با/بدون آهنربای دائم.....
۸۸	۵-۱-۱- مقدمه.....
۸۸	۵-۱-۲- سیم پیچی استاتور.....
۸۹	۵-۱-۳- ساخت روتور.....
۹۳	۵-۲- سیستم آزمایشگاهی درایو موتور سنکرون رلوکتانسی.....
۹۳	۵-۲-۱- مقدمه.....
۹۳	۵-۲-۲- مدار قدرت.....
۹۴	۵-۲-۳- مدار تغذیه.....
۹۵	۵-۲-۳- مدار کنترل.....
۹۵	۵-۲-۳- مدار درایو IGBT.....
۹۶	۵-۲-۳- سیستم ثبت دادههای آزمایشگاهی.....
۹۷	۵-۳- تست های عملکردی موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی.....
۹۷	۵-۳-۱- تست تغییرات سرعت در شرایط تحت بار.....
۹۹	۵-۳-۲- تست تغییرات سرعت در شرایط بی بار.....
۱۰۰	۵-۳-۳- تست اعمال بار پله به موتور.....
۱۰۱	۵-۳-۴- تست موتور تحت بار کولر آبی.....
۱۰۳	۵-۳-۵- بررسی راندمان موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی.....
۱۰۵	۵-۴- تست های عملکردی موتور سنکرون رلوکتانسی بدون آهنربا.....
۱۰۵	۵-۴-۱- تست تغییرات سرعت در شرایط تحت بار.....
۱۰۶	۵-۴-۲- تست تغییرات سرعت در شرایط بی بار.....
۱۰۷	۵-۴-۳- تست اعمال بار پله به موتور.....

- ۱۰۹.....۵-۴-۴- تست موتور تحت بار کولر آبی
- ۱۱۰.....۵-۴-۵- بررسی راندمان موتور سنکرون رلوکتانسی
- ۱۱۴.....۶- نتیجه گیری
- ۱۱۵.....۷- مراجع

فهرست اشکال

<u>عنوان</u>	<u>صفحه</u>
شکل ۱-۱: ساختار روتور ماشین سنکرون رلوکتانسی.....	۴
شکل ۱-۲: فرایند طراحی ماشین سنکرون رلوکتانسی [۱۰].....	۵
شکل ۱-۳: مدار معادل موتور سنکرون رلوکتانس و نمودار فازوری آن.....	۱۱
شکل ۱-۴: مدار معادل موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی و نمودار فازوری آن.....	۱۱
شکل ۱-۵: مدار معادل موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی و نمودار فازوری آن در شرایط $\lambda PM > Lqi0$	۱۲
شکل ۱-۶: روتور موتور سنکرون رلوکتانسی که با توجه به مفروضات مساله و توضیحات ارائه شده، طراحی شد.....	۱۴
شکل ۱-۷: هندسه و روش سیم بندی استاتور موتور سنکرون رلوکتانسی جهت استفاده در کولر آبی.....	۱۵
شکل ۱-۸: (الف) ساختار روتور و استاتور موتور سنکرون رلوکتانسی پیاده سازی شده در محیط نرم افزار FLUX؛ (ب) هندسه مش خورده جهت شبیه سازی عملکرد؛ (ج) توزیع شار مغناطیسی و (د) توزیع چگالی شار مغناطیسی در موتور در شرایط مانا.....	۱۶
شکل ۱-۹: پروفیل گشتاور الکترومغناطیسی در شبیه سازی موتور سنکرون رلوکتانسی طراحی شده برای کولر آبی.....	۱۶
شکل ۱-۱۰: شکل موج ولتاژ فاز ترمینال موتور سنکرون رلوکتانس طراحی شده جهت استفاده در کولر آبی.....	۱۷
شکل ۱-۱۱: توزیع مولفه نرمال چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی موتور سنکرون رلوکتانسی.....	۱۷
شکل ۱-۱۲: روتور موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی که با توجه به مفروضات مساله و توضیحات ارائه شده، طراحی شد.....	۱۹
شکل ۱-۱۳: (الف) ساختار روتور و استاتور موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی، پیاده سازی شده در محیط نرم افزار FLUX؛ (ب) هندسه مش بندی شده جهت شبیه سازی عملکرد؛ (ج) توزیع شار مغناطیسی و (د) توزیع چگالی شار مغناطیسی در موتور در شرایط مانا.....	۲۰
شکل ۱-۱۴: پروفیل گشتاور الکترومغناطیسی در شبیه سازی موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی طراحی شده برای کولر آبی.....	۲۰
شکل ۱-۱۵: شکل موج ولتاژ فاز ترمینال موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی، طراحی شده جهت استفاده در کولر آبی.....	۲۱
شکل ۱-۱۶: توزیع مولفه نرمال چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی.....	۲۲
شکل ۲-۱: (الف) هندسه سطح مقطع روتور بدون آهنربا: ۱- پوسته موتور ۲- استاتور ۳- لایه عایق ۴- سیم پیچ مسی ۵- هوا ۶- شفت روتور ۷- روتور؛ (ب) هندسه موتور الکتریکی بدون آهنربا: ۱- شفت موتور، ۲- درپوش پوسته آلومینیومی، ۳- هوا، ۴- استاتور، ۵- سیم پیچ مسی، ۶- عایق سیمپیچ، ۷- روتور، ۸- پوسته آهنی موتور.....	۲۵
شکل ۲-۲: (الف) هندسه سطح مقطع روتور دارای آهنربا: ۱- پوسته موتور ۲- استاتور ۳- لایه عایق ۴- سیم پیچ مسی ۵- هوا ۶- روتور ۷- آهنربا ۸- شفت روتور؛ (ب) هندسه موتور الکتریکی دارای آهنربا: ۱- شفت موتور ۲- درپوش پوسته آلومینیومی موتور ۳- هوا ۴- آهنربا، ۵- استاتور ۶- سیم پیچ مسی ۷- عایق حرارتی سیم پیچ ۸- روتور ۹- پوسته آهنی.....	۲۶
شکل ۲-۳: مدل موتور الکتریکی در نرم افزار.....	۲۷
شکل ۲-۴: انتخاب حلگر تحلیل حرارتی.....	۲۸
شکل ۲-۵: تعیین شرایط انتقال حرارت همرفتی.....	۲۸
شکل ۲-۶: اختصاص دمای اولیه به مدل.....	۲۸
شکل ۲-۷: مشزنی مدل موتور الکتریکی.....	۲۹
شکل ۲-۸: توزیع حرارت در موتور الکتریکی بدون آهنربا، دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد.....	۳۰
شکل ۲-۹: توزیع حرارت در اطراف روتور و استاتور، دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد.....	۳۰

- شکل ۲-۱۰: توزیع حرارت در اطراف سیم پیچ مسی، دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد..... ۳۰
- شکل ۲-۱۱: توزیع حرارت در سیم پیچ های مسی، دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد..... ۳۱
- شکل ۲-۱۲: توزیع حرارت در استاتور، دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد..... ۳۱
- شکل ۲-۱۳: توزیع حرارت در روتور، دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد..... ۳۱
- شکل ۲-۱۴: توزیع حرارت در پوسته موتور، دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد..... ۳۲
- شکل ۲-۱۵: توزیع حرارت در موتور الکتریکی بدون آهنربا، دمای اولیه ۴۰ درجه سانتیگراد..... ۳۲
- شکل ۲-۱۶: توزیع حرارت در اطراف روتور و استاتور، دمای اولیه ۴۰ درجه سانتیگراد..... ۳۲
- شکل ۲-۱۷: توزیع حرارت در اطراف سیم پیچ مسی، دمای اولیه ۴۰ درجه سانتیگراد..... ۳۳
- شکل ۲-۱۸: توزیع حرارت در سیم پیچ های مسی، دمای اولیه ۴۰ درجه سانتیگراد..... ۳۳
- شکل ۲-۱۹: توزیع حرارت در استاتور، دمای اولیه ۴۰ درجه سانتیگراد..... ۳۳
- شکل ۲-۲۰: توزیع حرارت در روتور، دمای اولیه ۴۰ درجه سانتیگراد..... ۳۴
- شکل ۲-۲۱: توزیع حرارت در پوسته موتور، دمای اولیه ۴۰ درجه سانتیگراد..... ۳۴
- شکل ۲-۲۲: توزیع حرارت در موتور دارای آهنربا، دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد..... ۳۵
- شکل ۲-۲۳: توزیع حرارت در اطراف روتور و استاتور، دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد..... ۳۵
- شکل ۲-۲۴: توزیع حرارت در اطراف سیم پیچ مسی، دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد..... ۳۵
- شکل ۲-۲۵: توزیع حرارت در سیم پیچهای مسی، دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد..... ۳۵
- شکل ۲-۲۶: توزیع حرارت در استاتور، دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد..... ۳۶
- شکل ۲-۲۷: توزیع حرارت در روتور، دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد..... ۳۶
- شکل ۲-۲۸: توزیع حرارت در پوسته موتور، دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد..... ۳۶
- شکل ۲-۲۹: توزیع حرارت در موتور دارای آهنربا، دمای اولیه ۴۰ درجه سانتیگراد..... ۳۷
- شکل ۲-۳۰: توزیع حرارت در اطراف روتور و استاتور، دمای اولیه ۴۰ درجه سانتیگراد..... ۳۷
- شکل ۲-۳۱: توزیع حرارت در اطراف سیم پیچ مسی، دمای اولیه ۴۰ درجه سانتیگراد..... ۳۷
- شکل ۲-۳۲: توزیع حرارت در سیم پیچ های مسی، دمای اولیه ۴۰ درجه سانتیگراد..... ۳۸
- شکل ۲-۳۳: توزیع حرارت در استاتور، دمای اولیه ۴۰ درجه سانتیگراد..... ۳۸
- شکل ۲-۳۴: توزیع حرارت در روتور، دمای اولیه ۴۰ درجه سانتیگراد..... ۳۸
- شکل ۲-۳۵: توزیع حرارت در پوسته موتور، دمای اولیه ۴۰ درجه سانتیگراد..... ۳۹
- شکل ۳-۱: (الف) هندسه سطح مقطع روتور بدون آهنربا؛ (ب) هندسه سطح مقطع روتور دارای آهنربا..... ۴۲
- شکل ۳-۲: (الف) روتور دارای آهنربا با ضخامت یک میلیمتر؛ (ب) روتور دارای آهنربا با ضخامت سی میلیمتر..... ۴۳
- شکل ۳-۳: (الف) روتور بدون آهنربا با ضخامت یک میلیمتر؛ (ب) روتور بدون آهنربا با ضخامت چهل میلیمتر..... ۴۴
- شکل ۳-۴: اعمال خواص فولاد و آهنربا به روتور..... ۴۴
- شکل ۳-۵: ورود قطعه به ماژول Assembly..... ۴۵
- شکل ۳-۶: انتخاب حلگر تحلیل استاتیک..... ۴۶
- شکل ۳-۷: تنظیمات حلگر استاتیک..... ۴۶
- شکل ۳-۸: ایجاد Reference Point در مرکز هندسی روتور..... ۴۷
- شکل ۳-۹: اعمال قید coupling به referenec point..... ۴۷
- شکل ۳-۱۰: اعمال نیروی گریز از مرکز..... ۴۸
- شکل ۳-۱۱: اعمال گشتاور به مدل..... ۴۸
- شکل ۳-۱۲: اعمال شرط مرزی روی مدل..... ۴۸

شکل ۳-۱۳: مش اعمال شده به مدل.....	۴۹
شکل ۳-۱۴: انتخاب حلگر فرکانس در نرمافزار.....	۵۰
شکل ۳-۱۵: انتخاب حلگر کماتش در نرمافزار.....	۵۰
شکل ۳-۱۶: اعمال نیروی گریز از مرکز در حلگر استاتیک.....	۵۱
شکل ۳-۱۷: اعمال نیروی گشتاور در حلگر کماتش.....	۵۱
شکل ۳-۱۸: توزیع تنش مایسز در روتور بدون آهنربا (ضخامت یک میلیمتر).....	۵۲
شکل ۳-۱۹: ناحیه دارای بیشترین تنش در مدل بدون آهنربا.....	۵۲
شکل ۳-۲۰: بیشترین تنش در مدل با المانهای ریزتر.....	۵۲
شکل ۳-۲۱: توزیع تنش در مدل بدون آهنربا با ضخامت ۴۰ میلیمتر.....	۵۳
شکل ۳-۲۲: محل بیشترین تنش در مدل بدون آهنربا با ضخامت ۴۰ میلیمتر.....	۵۳
شکل ۳-۲۳: نحوه تغییرات تنش در راستای طول در مدل بدون آهنربا.....	۵۳
شکل ۳-۲۴: جابه جایی شعاعی در روتور بدون آهنربا با ضخامت ۱ میلیمتر.....	۵۴
شکل ۳-۲۵: جابه جایی شعاعی در روتور بدون آهنربا با ضخامت ۴۰ میلیمتر.....	۵۴
شکل ۳-۲۶: توزیع تنش در مدل دارای آهنربا با ضخامت یک میلیمتر.....	۵۵
شکل ۳-۲۷: محل بیشترین تنش در نمونه دارای آهنربا.....	۵۵
شکل ۳-۲۸: توزیع تنش در مدل دارای آهنربا و با ضخامت ۳۰ میلیمتر.....	۵۵
شکل ۳-۲۹: محل بیشترین تنش در مدل دارای آهنربا و با ضخامت ۳۰ میلیمتر.....	۵۶
شکل ۳-۳۰: تغییرات تنش در راستای ضخامت در مدل دارای آهنربا.....	۵۶
شکل ۳-۳۱: جابه جایی در مدل دارای آهنربا با ضخامت یک میلیمتر.....	۵۶
شکل ۳-۳۲: جابه جایی در مدل دارای آهنربا با ضخامت سی میلیمتر.....	۵۷
شکل ۳-۳۳: ده مود اول ارتعاش طبیعی در روتور بدون آهنربا با ضخامت یک میلیمتر.....	۵۸
شکل ۳-۳۴: ده فرکانس طبیعی اول برای روتور بدون آهنربا با ضخامت یک میلیمتر.....	۵۸
شکل ۳-۳۵: ده ارتعاش طبیعی اول برای مدل بدون آهنربا با ضخامت چهل میلیمتر.....	۵۹
شکل ۳-۳۶: نمودار ده فرکانس طبیعی اول برای مدل بدون روتور با ضخامت چهل میلیمتر.....	۶۰
شکل ۳-۳۷: ده ارتعاش طبیعی اول برای مدل دارای آهنربا با ضخامت یک میلیمتر.....	۶۰
شکل ۳-۳۸: نمودار ده فرکانس طبیعی اول برای مدل دارای آهنربا با ضخامت یک میلیمتر.....	۶۱
شکل ۳-۳۹: ده مود ارتعاش طبیعی اول برای مدل دارای آهنربا و با ضخامت سی میلیمتر.....	۶۲
شکل ۳-۴۰: نمودار ده فرکانس طبیعی اول برای مدل دارای آهنربا و با ضخامت سی میلیمتر.....	۶۳
شکل ۳-۴۱: ده مود کماتشی برای حالت سرعت دورانی بحرانی در مدل بدون آهنربا و با ضخامت یک میلیمتر.....	۶۴
شکل ۳-۴۲: ده مود کماتشی برای حالت گشتاور دورانی بحرانی در مدل بدون آهنربا و با ضخامت یک میلیمتر.....	۶۵
شکل ۳-۴۳: ده مود کماتشی برای حالت سرعت دورانی بحرانی در مدل دارای آهنربا و با ضخامت یک میلیمتر.....	۶۶
شکل ۳-۴۴: ده مود کماتشی برای حالت گشتاور دورانی بحرانی در مدل دارای آهنربا و با ضخامت یک میلیمتر.....	۶۷
شکل ۴-۱: ولتاژ خروجی اینورتر منبع ولتاژ برحسب ضریب مدولاسیون.....	۷۱
شکل ۴-۲: بلوک دیاگرام مدولاسیون پهنای پالس مبتنی بر موج حامل.....	۷۲
شکل ۴-۳: شکل موجهای مربوط به مدولاسیون پهنای پالس مبتنی بر موج حامل.....	۷۳
شکل ۴-۴: مدولاسیون پهنای پالس مبتنی بر موج حامل با سیگنال مؤلفه صفر.....	۷۴
شکل ۴-۵: اساس مدولاسیون بردار فضایی.....	۷۵
شکل ۴-۶: بلوک دیاگرام مربوط به مدولاسیون بردار فضایی [۱۸].....	۷۵

شکل ۷-۴: محدود کردن فرکانس کلیدزنی با استفاده از باند هیستریزیس.....	۷۶
شکل ۸-۴: محدود کردن فرکانس کلیدزنی با محدود کردن فرکانس نمونه برداری [۱۹].....	۷۷
شکل ۹-۴: کنترل کننده های جریان هیستریزیس.....	۷۷
شکل ۱۰-۴: اساس کار کنترل کننده هیستریزیس.....	۷۸
شکل ۱۱-۴: بلوک دیاگرام کنترل کننده دلتا.....	۷۸
شکل ۱۲-۴: بلوک دیاگرام مربوط به روش کنترل تلفات [۳۲].....	۸۲
شکل ۱۳-۴: کنترل موتور سنکرون رلوکتانسی در شرایط تغییر سرعت مرجع.....	۸۴
(الف) جریان محور d و جریان محور q (پ) سرعت (ت) جریان فاز a موتور.....	۸۴
شکل ۱۴-۴: کنترل موتور سنکرون رلوکتانسی در شرایط اعمال بار.....	۸۴
(الف) جریان محور d و جریان محور q (پ) سرعت (ت) جریان فاز a موتور.....	۸۴
شکل ۱۵-۴: کنترل موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی در شرایط تغییر سرعت مرجع.....	۸۵
(الف) جریان محور d و جریان محور q (پ) سرعت (ت) جریان فاز a موتور.....	۸۵
شکل ۱۶-۴: کنترل موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی در شرایط اعمال بار.....	۸۶
(الف) جریان محور d و جریان محور q (پ) سرعت (ت) جریان فاز a موتور.....	۸۶
شکل ۱-۵: (الف) ساخت کلاف های سیم پیچ استاتور به کمک دستگاه کلاف پیچ؛ (ب) استاتور سیم پیچی شده مربوط به موتور با آهنربای کمکی.....	۸۸
شکل ۲-۵: (الف) ورق روتور با آهنربای دائم کمکی؛ (ب) ورق روتور بدون آهنربای دائم کمکی (پ) روتور موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای دائم کمکی؛ (ت) روتور موتور سنکرون رلوکتانسی بدون آهنربای دائم کمکی.....	۸۹
شکل ۳-۵: (الف) آهنرباهای دائم مورد استفاده در روتور موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی؛ (ب) روتور موتور با آهنربای کمکی (پس از روی هم چیدن و چسباندن ورق ها، قرار دادن آهنرباها در موانع شار روتور و نصب صفحات فولادی جهت استحکام روتور)؛ (پ) روتور موتور سنکرون رلوکتانسی بدون آهنربای کمکی (پس از روی هم چیدن و چسباندن ورق ها و نصب صفحات فولادی جهت استحکام روتور).....	۹۰
شکل ۴-۵: (الف) نصب شفت روتور توسط پرس هیدرولیکی؛ (ب) قرار دادن روتور در داخل کوره پس از جا زدن شفت.....	۹۱
شکل ۵-۵: (الف) روتور با آهنربای کمکی پس از فرایند سنگ زدن و بالانس؛ (ب) روتور و استاتور موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی که برای مونتاژ نهایی آماده شده اند؛ (ج) موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی آماده برای تست.....	۹۲
شکل ۶-۵: روتور بدون آهنربای دائم (الف) قبل و (ب) پس از فرایند سنگ زدن و بالانس؛ (ج) روتور و استاتور موتور سنکرون رلوکتانسی بدون آهنربای کمکی که برای مونتاژ نهایی آماده شده اند.....	۹۲
شکل ۷-۵: سیستم آزمایشگاهی درایو موتور سنکرون رلوکتانسی.....	۹۳
شکل ۸-۵: مدار قدرت.....	۹۴
شکل ۹-۵: مدار تغذیه.....	۹۴
شکل ۱۰-۵: مدار کنترل.....	۹۵
شکل ۱۱-۵: مدار درایور IGBT.....	۹۶
شکل ۱۲-۵: دستگاه گشتاور سنج.....	۹۶
شکل ۱۳-۵: دستگاه آنالیزور توان.....	۹۷
شکل ۱۴-۵: سرعت، جریان محورهای d و q، جریان فاز a، ولتاژ خط خروجی درایو و گشتاور موتور در تست تغییرات سرعت تحت بار.....	۹۸
شکل ۱۵-۵: سرعت، جریان محورهای d و q، جریان فاز a، ولتاژ خط خروجی درایو و گشتاور موتور در تست تغییرات سرعت در شرایط بی بار.....	۱۰۰

شکل ۱۶-۵: سرعت، جریان محورهای d و q، جریان فاز a، ولتاژ خط خروجی درایو و گشتاور موتور در تست اعمال بار پله ۱۰۱
 شکل ۱۷-۵: سیستم آزمایشگاهی تست موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی بر روی کولر آبی..... ۱۰۲
 شکل ۱۸-۵: سرعت، جریان محورهای d و q، جریان فاز a، ولتاژ خط خروجی درایو در تست تغییرات سرعت تحت بار کولر آبی
 ۱۰۲
 شکل ۱۹-۵: جریان های سه فاز موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی در سرعت و گشتاور نامی (خروجی دستگاه آنالیزور
 توان)..... ۱۰۳
 شکل ۲۰-۵: نمایش برداری ولتاژ و جریان های سه فاز ورودی موتور (خروجی دستگاه آنالیزور توان)..... ۱۰۵
 شکل ۲۱-۵: سرعت، جریان محورهای d و q، جریان فاز a و ولتاژ خط خروجی درایو موتور سنکرون رلوکتانسی در تست تغییرات
 سرعت تحت بار..... ۱۰۶
 شکل ۲۲-۵: سرعت، جریان محورهای d و q، جریان فاز a و ولتاژ خط خروجی درایو موتور سنکرون رلوکتانسی در تست تغییرات
 سرعت در شرایط بیبار..... ۱۰۷
 شکل ۲۳-۵: سرعت، جریان محورهای d و q، جریان فاز a، ولتاژ خط خروجی درایو و گشتاور موتور در تست اعمال بار پله ۱۰۸
 شکل ۲۴-۵: سرعت، جریان محورهای d و q، جریان فاز a، ولتاژ خط خروجی درایو موتور سنکرون رلوکتانسی در تست تغییرات
 سرعت تحت بار کولر آبی..... ۱۰۹
 شکل ۲۵-۵: جریان های سه فاز موتور سنکرون رلوکتانسی در سرعت نامی و گشتاور ۲.۳ نیوتن متر (خروجی دستگاه آنالیزور
 توان)..... ۱۱۰
 شکل ۲۶-۵: نمایش برداری ولتاژ و جریان های سه فاز ورودی موتور سنکرون رلوکتانسی با اتصال مثلث (خروجی دستگاه آنالیزور
 توان)..... ۱۱۲

فهرست جداول

<u>عنوان</u>	<u>صفحه</u>
جدول ۱-۱: مفروضات مساله طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی جهت استفاده در کولر آبی.....	۱۳
جدول ۱-۲: مشخصات نهایی موتور سنکرون رلوکتانسی طراحی شده جهت استفاده در کولر آبی.....	۱۸
جدول ۱-۳: مشخصات نهایی موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی، طراحی شده جهت استفاده در کولر آبی.....	۲۱
جدول ۲-۱: خواص حرارتی مواد استفاده شده در تحلیل های حرارتی.....	۲۴
جدول ۲-۲: ضریب انتقال حرارت همرفت در دو دمای ۲۰ و ۴۰ درجه سانتیگراد.....	۲۵
جدول ۳-۱: خواص عمومی فولاد.....	۴۲
جدول ۳-۲: خواص آهنربا.....	۴۲
جدول ۳-۳: ده فرکانس طبیعی اول برای روتور بدون آهنربا با ضخامت یک میلیمتر.....	۵۸
جدول ۳-۴: ده فرکانس طبیعی اول برای مدل بدون روتور با ضخامت چهل میلیمتر.....	۵۹
جدول ۳-۵: ده فرکانس طبیعی اول برای مدل دارای آهنربا با ضخامت یک میلیمتر.....	۶۱
جدول ۳-۶: ده فرکانس طبیعی اول برای مدل دارای آهنربا و با ضخامت سی میلیمتر.....	۶۲
جدول ۳-۷: سرعت بحرانی دورانی برای ده مود اول کمانشی مدل بدون آهنربا.....	۶۴
جدول ۳-۸: گشتاور بحرانی دورانی برای ده مود اول کمانشی مدل بدون آهنربا.....	۶۵
جدول ۳-۹: سرعت دورانی بحرانی در مدل دارای آهنربا و با ضخامت یک میلیمتر.....	۶۶
جدول ۳-۱۰: گشتاور دورانی بحرانی در مدل دارای آهنربا و با ضخامت یک میلیمتر.....	۶۷
جدول ۴-۱: ولتاژهای مابین سه فاز خروجی و هر یک از نقاط خنثی و نقطه سر وسط لینک dc.....	۷۵
جدول ۴-۲: پارامترهای موتورها.....	۸۳
جدول ۵-۱: طیف هارمونیک جریانی فاز 'a' موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی در سرعت و گشتاور نامی (خروجی دستگاه آنالیزور توان).....	۱۰۴
جدول ۵-۲: توان ورودی، ضریب توان و THD جریان ورودی سه فاز موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی در سرعت نامی و گشتاور ۲.۳ نیوتن متر (خروجی دستگاه آنالیزور توان).....	۱۰۴
جدول ۵-۳: توان ورودی تکفاز ورودی یکسوساز و ضریب توان (خروجی دستگاه آنالیزور توان).....	۱۰۵
جدول ۵-۴: راندمان موتور، درایو و مجموعه درایو و موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی در سرعت و گشتاور نامی.....	۱۰۵
جدول ۵-۵: طیف هارمونیک جریانی فاز 'a' موتور سنکرون رلوکتانسی در سرعت و گشتاور نامی (خروجی دستگاه آنالیزور توان).....	۱۱۰
جدول ۵-۶: توان ورودی، ضریب توان و THD جریان ورودی سه فاز موتور سنکرون رلوکتانسی در سرعت نامی و گشتاور ۲.۳۳ نیوتن متر (خروجی دستگاه آنالیزور توان).....	۱۱۲
جدول ۵-۷: توان ورودی تکفاز ورودی یکسوساز و ضریب توان (خروجی دستگاه آنالیزور توان).....	۱۱۳
جدول ۵-۸: راندمان موتور، درایو و مجموعه درایو و موتور سنکرون رلوکتانسی در سرعت و گشتاور نامی.....	۱۱۳

مقدمه

در این پروژه، ابتدا به طراحی الکترومغناطیسی موتور سنکرون رلوکتانسی پرداخته که در آن، پس از بیان ملاحظات طراحی موتورهای سنکرون رلوکتانسی، طراحی دو نمونه موتور سنکرون رلوکتانسی با/بدون آهنربا جهت استفاده در کولرهای آبی انجام می‌گردد. سپس به شبیه‌سازی و تحلیل عملکرد موتور طراحی شده پرداخته خواهد شد. پس از طراحی موتور و شبیه‌سازی عملکرد آن در محیط نرم‌افزار اجزا محدود، تحلیل حرارتی و همچنین تحلیل مکانیکی این موتور مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

همچنین در بخش طراحی و ساخت نمونه آزمایشگاهی درایو موتور سنکرون رلوکتانسی، ابتدا مدل دینامیکی این موتور را ارائه شده و سپس روش‌های مدولاسیون و همچنین روش‌های کنترل موتورهای سنکرون رلوکتانسی بیان گردیده و عملکرد روش انتخاب شده در شرایط مختلف با استفاده از نرم‌افزار MATLAB/Simulink بررسی می‌گردد.

در مرحله بعد، روند ساخت موتور شامل مراحل سیم‌پیچی استاتور، برش و چینش ورقه‌ها، جا زدن شفت رتور، سنگ‌زدن، بالانس رتور و مونتاژ نهایی موتور و همچنین ساخت درایو شامل برد کنترل، برد درایور، برد قدرت و برد تغذیه بیان شده و تست‌های عملکردی روی مجموعه ارائه می‌گردد.

فصل اول: طراحی و تحلیل الکترومغناطیسی موتور سنکرون رلوکتانسی با آهن-
ربای کمکی

۱-۱- مقدمه

در این فصل طراحی و تحلیل الکترومغناطیسی موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی در کاربرد کولرهای آبی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. در این راستا دو موتور سنکرون رلوکتانسی با/بدون آهنربای کمکی با توان نیم اسب بخار جهت استفاده در کولرهای آبی طراحی و عملکرد آنها به کمک نرم افزار المان محدود بررسی شده است. از آنجا که موضوع استفاده از موتور سنکرون رلوکتانسی در کولرهای آبی در پروژه دیگری با عنوان "تحقیق در زمینه ماشینهای الکتریکی سنکرون رلوکتانسی و ساخت یک نمونه آزمایشگاهی برای استفاده در کولرهای آبی" در گروه پژوهشی ماشینهای الکتریکی پژوهشگاه نیرو مورد بررسی قرار گرفته است، مطالب ارائه شده در این فصل، منحصر به طراحی و تحلیل دو موتور سنکرون رلوکتانسی با/بدون آهنربای کمکی اختصاص داشته و پیشنهاد می گردد جهت مطالعه مباحث مرتبط با مبانی و اصول عملکرد این موتورها به [۱۳] مراجعه شود.

۱-۲- طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی

۱-۲-۱- مساله طراحی

در طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی لازم است ساختار روتور به گونه ای باشد که از عبور شار محور q ممانعت شود، در حالی که این ممانعت، کمترین تاثیر را بر شار محور d داشته باشد. از این رو استفاده از موانع شار (عایق مغناطیسی) ضروری خواهد بود. اما این سوال مطرح است که توزیع موانع شار در ساختار روتور، جهت رسیدن به عملکرد مطلوب، چگونه باید باشد. به نظر می رسد، چنانچه هندسه موانع شار به گونه ای باشد که شار محور d با کمترین مقاومت مغناطیسی و شار محور q با بیشترین مقاومت مغناطیسی مواجه بوده و همچنین، شار یک محور تاثیری بر شار محور دیگر نداشته باشد، ماشین سنکرون رلوکتانسی عملکرد مطلوبی خواهد داشت [۶]. این موضوع باعث شده است، هندسه های مختلفی از موانع شار پیشنهاد گردد که می توان آنها را در دو ساختار کلی دسته بندی نمود: موانع شار با خطوط مستقیم و موانع شار با خطوط منحنی که عمدتاً به صورت دایره یا خطوط سیال گونه هستند.

پس از مشخص شدن ساختار کلی موانع شار، لازم است ابعاد آنها جهت دستیابی به عملکرد مطلوب مشخص شود. پارامترهای مرتبط با اطلاعات ابعادی موانع شار می توانند با توجه به هندسه آنها متفاوت باشند. اما در حالت کلی، این پارامترها مواردی از قبیل ضخامت موانع شار و سگمنت ها در راستای محور q ، طول موانع شار و سگمنت ها در راستای محور d و همچنین موقعیت نقاط انتهایی موانع شار در سطح روتور (مجاور فاصله هوایی) را شامل می شوند. علاوه بر این، در برخی از مراجع، کل طول موانع شار در راستای محور q (کل طول ناحیه هوا در این راستا) [۱] و در برخی دیگر، نسبت کل طول موانع شار (هوا) به کل طول آهن در راستای محور q به عنوان یک پارامتر مرتبط با اطلاعات ابعادی مدنظر قرار گرفته است [۴]. این دو پارامتر، در حالت کلی مشابه بوده و از یک مفهوم بهره می برند.

با توجه به توضیحات فوق، در این مرحله باید به دنبال معادلاتی بود که ارتباط بین اطلاعات ابعادی را نشان دهند. این هدف از طریق مدل سازی تحلیلی و بهینه سازی ماشین میسر خواهد شد. اما باید توجه داشت در مدل سازی ماشینهای الکتریکی، عوامل غیرایده آل کننده وجود دارند که لحاظ نمودن آنها می تواند به افزایش دقت کمک کند. در موتور سنکرون رلوکتانسی، عوامل غیرایده آل کننده عبارتند از: اثر اشباع آهن، اثر Cross Coupling، اثر شیارهای استاتور و نیز اثر افت mmf در بخش های آهنی (بی نهایت فرض نکردن نفوذپذیری مغناطیسی بخش های آهنی).

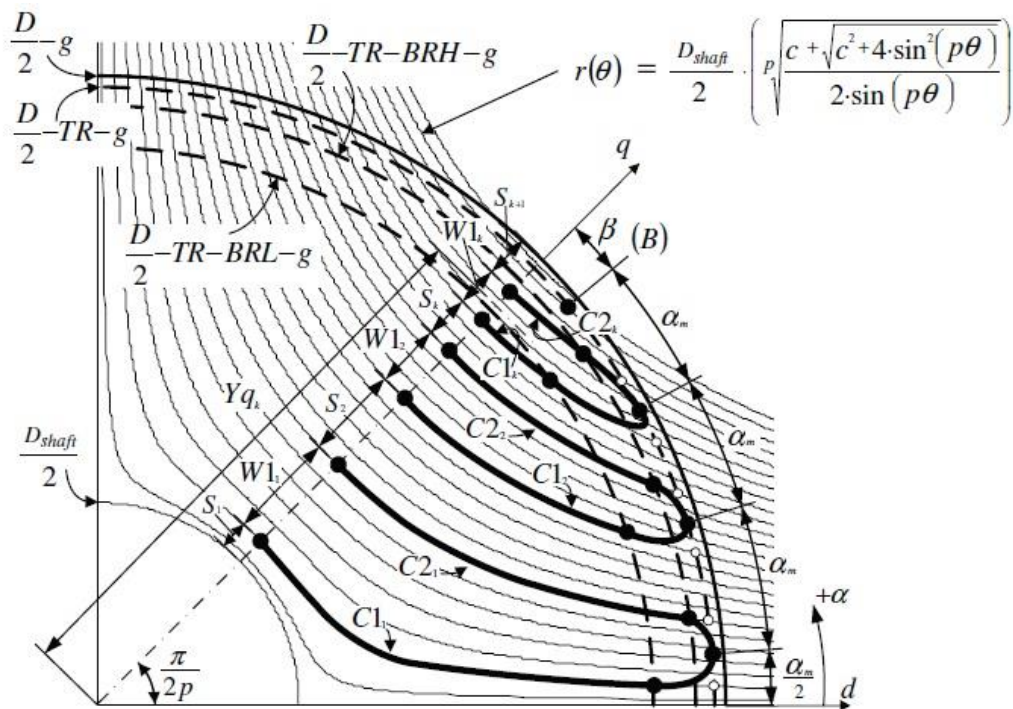
۱-۲-۲- عوامل غیرایده آل کننده

اثر اشباع: در ماشین سنکرون رلوکتانسی، پدیده اشباع تاثیر قابل توجهی بر شار محور d دارد. وقوع اشباع باعث کاهش اندوکتانس محور d می شود. همچنین، اشباع تاثیر قابل توجهی بر نسبت گشتاور به جریان و نسبت گشتاور به kVA دارد؛ اما تاثیر آن بر نسبت گشتاور به ولتاژ اندک است [۶]. بر اثر اشباع، حداکثر نسبت گشتاور به جریان در زاویه جریان $\theta > 45^\circ$ رخ می دهد [۶]. این امر به دلیل تاثیر اشباع بر L_d بوده که باعث می شود با کاهش جریان محور d از طریق افزایش θ جبران شود.

اثر Cross Coupling: در ماشین سنکرون رلوکتانسی، وابستگی شار یک محور به جریان محور دیگر را Cross Coupling یا Cross Magnetization می گویند [۶]. این پدیده به دلیل وجود مسیرهای عبور شار بین محور d و محور q است. وجود این مسیرها (Rib های عمودی و مماسی) باعث افزایش شار محور q و کاهش شار محور d می شود. تاثیر جریان محور q بر شار محور d (که در واقع، به صورت مغناطیس زدایی است) همان اثر عکس العمل آرمیچر در این ماشین است. نکته دیگر آنکه، اثر Cross Coupling تاثیر قابل توجهی بر کنترل بدون حسگر موتور سنکرون رلوکتانسی دارد. از این رو چنانچه کنترل بدون حسگر این موتور مدنظر باشد، لازم است اثر Cross Coupling در مدل موتور لحاظ گردد [۶]. چنانچه از اثر Cross saturation صرف نظر شود، خطوط شار محورهای d و q برهم عمود خواهند بود [۹].

اثر شیارهای استاتور: چنانچه استاتور بدون شیار باشد، اندوکتانس های مغناطیس شوندگی L_{mq} و L_{md} به موقعیت روتور (θ) وابسته نخواهند بود. اما وجود شیارهای استاتور باعث می شود اندوکتانس های مذکور به موقعیت روتور وابسته باشند. زمانی که دندانه های استاتور مقابل سگمنت های روتور قرار می گیرند، اندوکتانس L_{md} حداکثر بوده و زمانی که دندانه های استاتور و سگمنت های روتور مقابل هم نیستند، اندوکتانس L_{md} حداقل است. همانند آنچه برای L_{md} بیان شد، اندوکتانس L_{mq} نیز با جابجایی سگمنت های روتور از مقابل دندانه های استاتور، تغییر می کند [۶]. هنگامی که روتور در موقعیتی قرار می گیرد که بخشی از سگمنت های روتور مقابل دندانه ها و بخشی مقابل شیارها قرار داشته باشند، هم شار محور d و هم شار محور q وجود خواهد داشت که interconnection بین اندوکتانس های محور d و q نامیده می شود [۶]. وجود شیارهای استاتور و در نتیجه، تغییرات اندوکتانس های L_q و L_d باعث ظهور هارمونیک های مکانی در شکل موج میدان مغناطیسی فاصله هوایی و در نتیجه، تولید ریبیل در گشتاور الکترومغناطیسی خواهد شد. علاوه بر این، تغییرات اندوکتانس های L_q و L_d نسبت به موقعیت روتور، باعث تغییر شار عبوری از سگمنت های روتور شده که تلفات هسته روتور را به دنبال خواهند داشت [۶].

برای کاهش ریبیل گشتاور ناشی از شیارهای استاتور می توان از Skew کردن استفاده کرد. باید توجه نمود، به دلیل interconnection بین اندوکتانس های L_q و L_d ، این روش، ریبیل گشتاور را به طور کامل حذف نمی کند [۶]. از آنجاکه گام شیار روتور در موتور سنکرون رلوکتانس تاثیر قابل توجهی بر ریبیل گشتاور دارد، نکته مهم در حداقل بودن ریبیل گشتاور آنست که گام شیار روتور ثابت باشد و همچنین ساختار روتور، آنیزوتروپیک همگن باشد (برابر بودن پرمیانس موانع شار) [۶]. از این نکته می توان جهت استخراج رابطه ای برای محاسبه عرض موانع شار استفاده نمود که در بخش های بعدی به جزئیات آن اشاره خواهد شد. اما علاوه بر موارد مذکور، روش های دیگری نیز برای کاهش ریبیل گشتاور مطرح شده اند. در [۳] به این نکته اشاره شده است که برای حداقل بودن ریبیل گشتاور لازم است رابطه بین تعداد شیارهای استاتور و شیارهای روتور و همچنین گام شیار روتور، مقداری ثابت باشد. در [۶] روش دیگری برای به حداقل رساندن ریبیل گشتاور مطرح شده است. ایده ای اصلی این روش آن است که مطابق شکل ۱-۱ گام شیار روتور در راستای محور d ثابت باشد و اجازه دهیم زاویه β تغییر کند. در این حالت، گام شیار روتور در راستای محور q می تواند اندکی تغییر کند. البته در این روش، گام شیار روتور در درصد بیشتری از سطح روتور ثابت است و تنها در راستای محور q اندکی متفاوت خواهد بود. مزیت این روش آن است که ارتباط بین ریبیل گشتاور و تعداد موانع شار حذف می شود و می توان با هر تعداد شیار استاتور و هر تعداد مانع شار، با تغییر β ، زاویه α_m را برای داشتن حداقل ریبیل گشتاور محاسبه نمود [۶].



شکل ۱-۱: ساختار روتور ماشین سنکرون رلوکتانسی

۱-۲-۳- پارامترها و متغیرهای طراحی

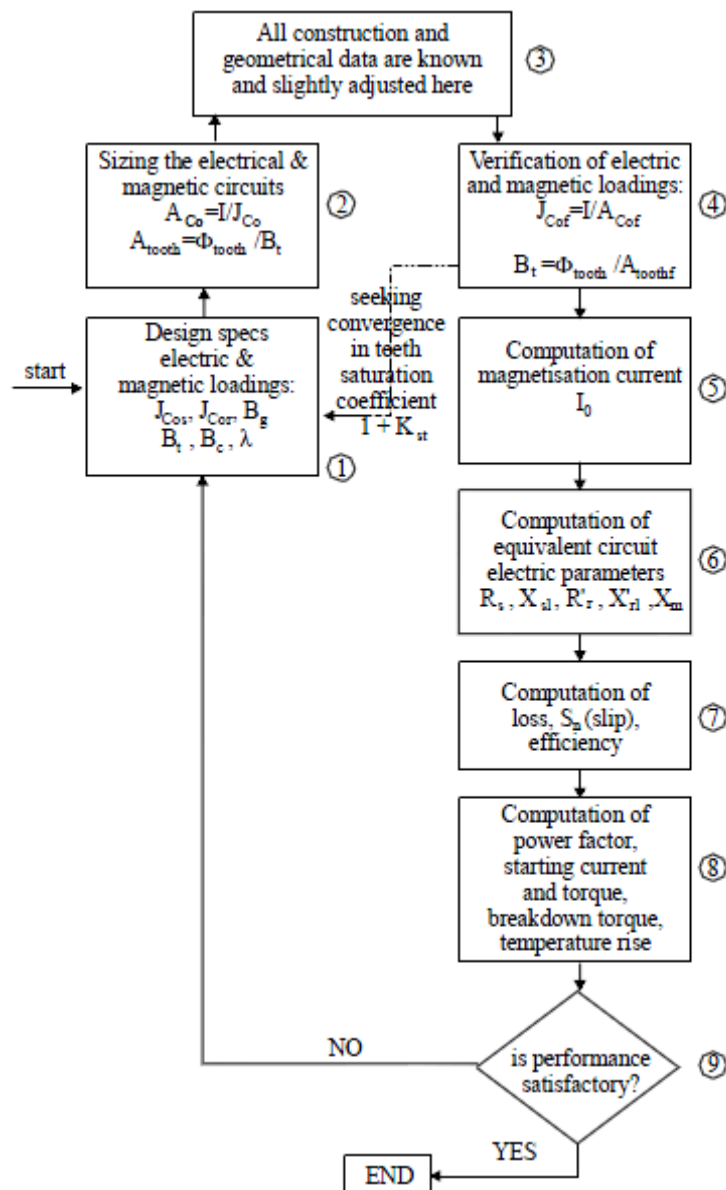
پارامترهای طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی شامل: توان نامی خروجی، سرعت سنکرون، ولتاژ خط به خط تغذیه، فرکانس تغذیه، تعداد فازها، نوع اتصال سیم‌پیچ، ضریب توان، بازدهی، کلاس عایقی، خیز دما، درجه حفاظت (IP)، ضریب سرویس^۱، شرایط محیطی (ارتفاع از سطح دریا)، شرایط قرارگیری (افقی یا عمودی) و ... در ابتدای طراحی معلوم بوده و هدف طراحی‌اند. اما در مقابل، مقداری از قبیل بارگیری الکتریکی و مغناطیسی، چگالی جریان، ضریب‌ها و نسبت‌های مختلف، تعداد قطب‌ها، تعداد موانع شار و سگمنت‌ها، نسبت عایقی موانع شار (نسبت هوا به آهن)، ریب‌های شعاعی و مماسی و همچنین طول فاصله هوایی، پارامترهایی هستند که در ابتدای طراحی، مقداری مناسب برای آنها لحاظ می‌شود. اما برای آنکه این کار آگاهانه انجام شود، لازم است تاثیر هر پارامتر بر گشتاور متوسط، ریب گشتاور، تلفات، ضریب توان، اندوکتانس‌های محور d و q ، نسبت برجستگی، بازدهی، چگالی گشتاور/توان، نسبت گشتاور به جریان و ... در نظر گرفته شود تا بر اساس آن بتوان مقدار اولیه‌ی مناسبی برای پارامترهای طراحی در نظر گرفت.

با انتخاب مقادیر اولیه برای پارامترهای فوق، ابعاد مختلف مغناطیسی و الکتریکی با استفاده از روش‌های تئوری و نیز روابط تجربی محاسبه می‌شوند و مقداری مانند سطح مقطع سیم، قطر خارجی استاتور، ... بر اساس مقادیر استاندارد به دست می‌آیند. سپس مقادیر جدید بارگیری مغناطیسی، بارگیری الکتریکی، چگالی جریان و چگالی شار مغناطیسی در نواحی مختلف (مانند: دندانه‌ها، یوغ و ...) محاسبه می‌شوند. با به دست آمدن ابعاد مغناطیسی و الکتریکی، می‌توان ماشین طراحی شده را تحلیل نمود تا مشخص گردد آیا اهداف طراحی حاصل شده‌اند یا خیر. اگر اهداف مورد نظر حاصل نشده باشند، لازم است پارامترهایی که در مرحله اول، مقداری برای آنها در نظر گرفته شده بود، تغییر داده شوند تا بتوان به طرح مطلوب رسید. پس از محاسبه و تعیین متغیرهای طراحی،

¹ Service factor

لازم است جهت رسیدن به خروجی‌های مطلوب، طرح به‌دست آمده بهینه شود. خروجی‌های مطلوب می‌توانند شامل موارد زیر باشند:

گشتاور متوسط، ریپل گشتاور، تلفات، ضریب توان، اندوکتانس‌های محور d و q ، نسبت برجستگی، بازدهی، چگالی گشتاور/توان، نسبت گشتاور به جریان، دمای بخش‌های مختلف (از جمله دمای نقطه داغ) و ...
بنابراین مطابق توضیحات ارائه شده، فرایند طراحی از دو حلقه مطابق شکل ۱-۲ تشکیل شده است.



شکل ۱-۲: فرایند طراحی ماشین سنکرون رلوکتانسی [۱۰]

موقعیت نقاط انتهایی موانع شار: موقعیت نقاط انتهایی موانع شار تاثیر مستقیم بر ریپل گشتاور دارد. این تاثیر در راستای محور d زیاد و در مجاورت محور q کم است [۶]. در واقع، شیارهایی از روتور که بیشتر در معرض شار محور d قرار دارند، تاثیر بیشتری در ریپل گشتاور داشته و لازم است شرط ثابت بودن گام شیار روتور (فاصله بین دو نقطه انتهایی موانع شار) برای آنها

رعایت شود. بهترین حالت برای نقاط انتهایی موانع شار، شرایطی است که گام شیار روتور یکسان باشد. براین اساس، دو روش در مراجع برای تعیین موقعیت نقاط انتهایی ارائه شده است:

روش اول برای تعیین موقعیت این نقاط آن است که گام شیار روتور (یا همان فاصله بین نقاط انتهایی موانع شار) برای تمام نقاط انتهایی یکسان باشد به جز نزدیک ترین نقطه به محور q که فاصله این نقطه تا محور q به عنوان یکی از پارامترهای طراحی منظور شده و اندازه آن برای رسیدن به حداقل ریپل گشتاور تعیین می شود [۴]. بدین ترتیب، فاصله بین نقاط انتهایی موانع شار (α_m) برابر خواهد بود با:

$$\alpha_m = \frac{\frac{\pi}{2p} - \beta}{k + \frac{1}{2}} \quad (1-1)$$

که p تعداد زوج قطب، k تعداد موانع شار و β زاویه بین آخرین نقطه انتهایی و محور q است (شکل ۱-۱).

روش دیگری نیز برای تعیین موقعیت نقاط انتهایی موانع شار در [۷] ارائه شده است. مبنای این روش، استفاده از رابطه زیر است:

$$n_s - n_r = \pm 4 \quad (1-2)$$

که n_s و n_r به ترتیب تعداد شیارهای استاتور و روتور در هر زوج قطب است. باید توجه شود که $n_s - n_r$ نباید مساوی صفر یا دو باشد [۸].

محاسبه عرض هر سگمنت در راستای محور q (S): با توجه به آنکه شار محور d از سگمنت ها عبور می کند، برای محاسبه عرض سگمنت ها باید از MMF محور d (MMF_d) استفاده نمود. برای این منظور، فرض می شود عرض هر سگمنت با MMF_d مربوط به هر سگمنت متناسب باشد؛ به گونه ای که همه سگمنت ها به یک نسبت از MMF_d بهره ببرند. بدین ترتیب، وضعیت اشباع (یا چگالی شار) سگمنت ها یکسان (مشابه هم) خواهد بود [۴].

$$\frac{S_k}{S_h} = \frac{MMF_{dk}}{MMF_{dh}} \quad (1-3)$$

نکته ای که باید توجه نمود آن است که از رابطه فوق $k-1$ معادله به دست می آید. از آنجاکه یک معادله دیگر هم نیاز است، می توان این معادله را از تعریف نسبت عایقی به دست آورد که در [۴] این نسبت به صورت $K_{wq} = \frac{Air}{iron}$ تعریف شده است. با انتخاب مقدار مناسبی برای K_{wq} می توان عرض هر سگمنت در راستای محور q را به دست آورد.

محاسبه عرض موانع شار در راستای محور q (W_1): با توجه به آنکه شار محور q به صورت عمودی از موانع شار و سگمنت ها (در راستای محور q) عبور می کند، برای محاسبه عرض موانع شار در راستای محور q می توان از MMF محور q (MMF_q) استفاده نمود. در این حالت، با توجه به افت MMF محور q (MMF_q) روی سگمنت ها، اختلاف MMF_q دو سگمنت مجاور برابر افت MMF_q روی یک مانع شار است (ΔMMF_{qk}). از سوی دیگر، در [۱] اثبات شده است برای استفاده بهینه از کل طول موانع شار در راستای محور q (l_a) رابطه زیر قابل استفاده است:

$$\frac{W_{1k}}{W_{1h}} = \frac{\Delta f_k}{\Delta f_h} \sqrt{\frac{S_{bk}}{S_{bh}}} \quad (1-4)$$

که زیرنویس های k و h شماره های موانع شار، W_1 عرض مانع شار در راستای محور q ، S_b نیز نصف طول مانع شار و Δf اختلاف mmf روی هر مانع شار است که از اختلاف mmf سگمنت های مجاور بدست می آید [۶]. در [۷] به جای S_{bk} از نصف طول زاویه ای مانع شار (θ_{bk}) استفاده شده است. با فرض آنکه پرمیانس هر مانع شار به صورت $P_k = \frac{S_{bk}}{W_{1k}}$ باشد و با فرض آنکه پرمیانس موانع شار، مقداری ثابت و باهم برابر باشند، به رابطه زیر خواهیم رسید [۴، ۶]:

$$\frac{W_{1h}}{W_{1h+1}} = \left(\frac{\Delta f_h}{\Delta f_{h+1}} \right)^2 \quad h = 1, \dots, k-1 \quad (1-5)$$

البته رابطه فوق با فرض مذکور است؛ اما اگر در حالت واقعی پرمیانس موانع شار با هم ثابت و برابر نباشند، نمی‌توان از رابطه فوق استفاده کرد و لازم است از رابطه قبل آن استفاده شود. بدین ترتیب $k-1$ معادله و k مجهول داریم که مطابق بخش قبل، از رابطه مربوط به نسبت عایقی K_{Wq} می‌توان به عنوان معادله k ام استفاده کرد. با توجه به محاسبه عرض موانع شار و همچنین عرض سگمنت‌ها، می‌توان موقعیت مرکز هر مانع شار را تعیین نمود.

محاسبه عرض موانع شار در راستای عمود بر محور d: با توجه به شکل موانع شار، لازم است عرض این موانع در راستای عمود بر محور d نیز محاسبه شود. برای این منظور در [۴] فرض شده است عرض موانع شار در راستای محور q با عرض موانع شار در راستای عمود بر محور d متناسب باشد. بنابراین:

$$\frac{W_{1h}}{W_{1h+1}} = \frac{W_{hd}}{W_{(h+1)d}} \quad h = 1, \dots, k-1 \quad (1-6)$$

که W_{hd} عرض مانع شار h ام در راستای عمود بر محور d و W_{1h} عرض مانع شار h ام در راستای محور q است. بدین ترتیب، k معادله و $k+1$ مجهول خواهیم داشت که با تعریف نسبت عایقی در راستای محور d (K_{Wd}) همانند نسبت عایقی K_{Wq} می‌توان به یک معادله دیگر رسید که در نتیجه، می‌توان عرض موانع شار در راستای عمود بر محور d را محاسبه نمود.

۴-۲-۱- ملاحظات طراحی

۴-۲-۱-۱- ساختار استاتور

ساختار استاتور موتور سنکرون رلوکتانسی، در حالت کلی شبیه استاتور موتور القایی است که مهمترین پارامترهای هندسی آن در طراحی عبارتند از: قطر خارجی، قطر داخلی، تعداد شیار، طول دندانه استاتور (عمق شیار)، عرض دندانه استاتور و split ratio (نسبت قطر روتور به قطر استاتور) [۸]. طول دندانه استاتور (عمق شیار) و عرض دندانه استاتور با split ratio (نسبت قطر روتور به قطر استاتور) رابطه مستقیم دارند که این نسبت برای یک موتور ۴ قطب، $0.5 < x < 0.65$ است [۸]. تعداد شیارهای استاتور با گشتاور متوسط و رپیل گشتاور مرتبط است؛ به گونه‌ای که افزایش تعداد شیارهای استاتور باعث افزایش گشتاور متوسط، کاهش رپیل گشتاور و بهبود انتقال حرارت می‌شود. اما در مقابل، افزایش تعداد شیارها موجب پیچیده‌تر شدن سیم‌پیچ شده که کاهش استحکام مکانیکی استاتور را به دنبال خواهد داشت [۸]. هارمونیک‌های شیار نیز بر عملکرد ماشین تاثیر دارند که جهت کاهش اثر آنها می‌توان از skew کردن استاتور و یا روتور استفاده نمود [۱].

۴-۲-۱-۱-۱- ساختار روتور

با توجه به بررسی مراجع مختلف در زمینه طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی، در ادامه به برخی از ملاحظات طراحی روتور این ماشین اشاره شده است:

نسبت L_{cq}/L_{md} مطابق رابطه (۱-۷) به تعداد قطب‌ها بستگی نداشته اما با افزایش تعداد سگمنت‌ها (مسیرهای عبور شار)، این نسبت کاهش می‌یابد [۲].

$$\frac{L_{cq}}{L_{md}} \cong \frac{\pi^2}{12n_r^2} \quad (1-7)$$

که n_r تعداد شیارهای روتور در هر قطب بوده که لازم است عددی زوج باشد [۳]. در واقع، n_r با تعداد سگمنت‌ها (یا با تعداد موانع شار) رابطه مستقیم دارد. همچنین مطابق رابطه (۱-۸) نسبت L_{fq}/L_{md} به تعداد سگمنت‌ها بستگی نداشته، اما با تعداد قطب‌ها رابطه مستقیم دارد [۲].

$$\frac{L_{fq}}{L_{md}} \cong \text{const.} P \frac{g}{l_a} \quad (1-8)$$

که g طول فاصله هوایی، l_a کل طول غیرمغناطیسی در راستای محور q روتور و P تعداد زوج-قطب است. بنابراین به منظور دستیابی به نسبت برجستگی زیاد، لازم است تعداد سگمنت‌ها زیاد و تعداد قطب‌ها کم باشد. اما ملاحظات مکانیکی باعث می‌شود نتوان تعداد سگمنت‌ها را بیش از حد افزایش داد. از سوی دیگر، محدود شدن تعداد سگمنت‌ها باعث می‌شود کاهش شارهای چرخشی محدود شود. از این رو باید شار عمودی محور q را کاهش داد که به معنی افزایش عرض موانع شار است. بنابراین می‌توان عرض موانع شار را به تدریج از راستای محور d به سمت راستای محور q افزایش داد. زیرا هدف، افزایش عرض موانع شار در راستای محور q است و نه راستای محور d . بدین ترتیب، عرض سگمنت‌ها در راستای محور d کم نخواهد شد که کاهش L_d را به دنبال داشته باشد [۴].

به منظور انتخاب تعداد موانع شار، می‌توان با توجه به تعداد شیارهای استاتور، تعداد شیارهای روتور یک موتور القایی متناظر را در نظر گرفت و با توجه به آن موانع شار متناظر را بدست آورد [۴]. در [۴] اشاره شده است که افزایش تعداد موانع شار روتور، تقریباً تاثیری بر L_d ندارد. در خصوص L_q نیز اگر تعداد موانع شار بسیار کم باشد، افزایش آن باعث کاهش سریع L_q خواهد شد؛ اما با افزایش بیشتر موانع شار، L_q نیز تغییری نخواهد داشت. در این تحقیق، یک تخمین اولیه برای طراحی روتور مطرح شده است. بدین ترتیب که تعداد موانع شار در هر قطب از تعداد شیار استاتور در فاز در قطب، بیشتر انتخاب شود. همچنین نسبت عایقی (نسبت هوا به آهن) در راستای محور q (k_{wq}) می‌تواند عددی بین 0.2 تا 0.6 انتخاب شود و سپس با تحلیل اجزای محدود، مقدار دقیق k_{wq} را بدست آورد.

در [۳] اشاره شده است که با افزایش تعداد segment ها، به دلیل مشکلات ساخت، لازم است از segment های کنار محور q کم شود. در این حالت بازهم هارمونیک های مکانی $kn_r \pm 1$ را خواهیم داشت (n_r تعداد نقاط لبه های موانع شار در پیرامون روتور). هارمونیک های $kn_r \pm 1$ مربوط به موانع شار روتور بوده و جدا از هارمونیک مکانی ناشی از توزیع mmf و هارمونیک های شیار هستند. اگر فرض شود توزیع mmf ناشی از سیم پیچ استاتور، توزیع سینوسی داشته و استاتور هم بدون شیار باشد، رپیل گشتاوری نخواهیم داشت. اما با وجود سیم پیچ واقعی (mmf غیر سینوسی) و وجود شیارهای استاتور، برهم کنش هارمونیک های استاتور و هارمونیک های $kn_r \pm 1$ روتور باعث تولید رپیل گشتاور خواهد شد. از این رو، با در نظر گرفتن رپیل گشتاور، انتخاب n_r باید با توجه به تعداد شیارهای استاتور n_s انجام شود [۳].

در [۴] اثر طول فاصله هوایی بر اندوکتانس های ماشین رلوکتانسی سنکرون مورد بررسی قرار گرفته است. طول فاصله هوایی تاثیر قابل توجهی بر L_d داشته اما بر L_q تاثیری ندارد. دلیل این امر آنست که L_d با معکوس g (طول فاصله هوایی) و L_q با معکوس $g + l_a$ (l_a کل طول موانع شار در راستای محور q است) متناسب اند. از آنجاکه $l_a \gg g$ است، تغییرات g تاثیری بر L_q نداشته اما تاثیر قابل توجهی بر L_d دارد. هر چه طول فاصله هوایی کوچکتر باشد، گشتاور متوسط بیشتر خواهد بود؛ اما کاهش طول فاصله هوایی باعث افزایش رپیل گشتاور، افزایش تلفات آهن و همچنین افزایش شار چرخشی در ناحیه انتهایی سگمنت‌ها خواهد شد.

یکی از نکات قابل توجه در موتور سنکرون رلوکتانسی، تلفات آهن روتور است که در [۴] به این موضوع اشاره شده است. علی‌رغم آنکه روتور در سرعت سنکرون می‌چرخد، دو عامل باعث اغتشاش در شکل موج چگالی شار مغناطیسی در روتور خواهند شد: اول، هارمونیک های فضایی ناشی از شیارهای استاتور؛ دوم، هارمونیک های ناشی از برهم کنش ساختار آنیزوتروپیک روتور با هارمونیک های شیار استاتور. نکته قابل توجه در مورد موتور سنکرون رلوکتانسی آنست که تغییر شار در سگمنت‌ها (در زمان چرخش روتور)، کل سگمنت را تحت تاثیر قرار می‌دهد. حال آنکه در سایر موتورها، این تغییر فقط در ناحیه نزدیک به شکاف هوایی رخ می‌دهد. در واقع، تلفات آهن روتور در موتور سنکرون رلوکتانسی با توجه به هارمونیک ها می‌تواند به سطحی برسد که با تلفات آهن استاتور قابل مقایسه باشد. در [۶] به ارتباط تلفات آهن و رپیل گشتاور در ماشین سنکرون رلوکتانس اشاره شده و اینکه حداقل رپیل گشتاور و حداقل تلفات هسته بطور همزمان حاصل نمی‌شوند.

۵-۲-۱- مراحل طراحی روتور موتور سنکرون رلوکتانسی

مراحل طراحی روتور در موتور سنکرون رلوکتانسی را می‌توان به صورت زیر بیان نمود [۶]:

- الف- تعیین تعداد موانع شار در هر قطب
- ب- محاسبه موقعیت نقاط انتهایی موانع شار (گام شیار روتور) با در نظر گرفتن ثابت بودن گام شیار روتور (مقدار زاویه β برای داشتن حداقل رپیل گشتاور بهینه خواهد شد).
- ج- تعیین مقدار اولیه برای نسبت‌های عایقی در راستای محور d و q (به‌ویژه در راستای محور q). نسبت‌های عایقی برای رسیدن به حداکثر گشتاور، بهینه خواهند شد.
- د- با تعیین تعداد موانع شار و نیز نسبت‌های عایقی، عرض موانع شار و سگمنت‌ها تعیین می‌شوند. سپس می‌توان با شبیه‌سازی در محیط اجزای محدود، اندازه دقیق نسبت عایقی در راستای محور q را بدست آورد.
- ه- تغییر زاویه β برای رسیدن به حداقل رپیل گشتاور (با ثابت نگهداشتن نسبت‌های عایقی).
- و- تغییر نسبت‌های عایقی k_{wq} و k_{wd} برای رسیدن به حداکثر گشتاور متوسط (با ثابت بودن β)
- ز- در صورت جابجا شدن موقعیت نقاط انتهایی، می‌توان با تغییر پارامتر Y_{qk} (فاصله مرکز روتور از مرکز هر مانع شار در راستای محور q) موقعیت نقاط انتهایی موانع شار را در مکان محاسبه شده برای داشتن گام شیار ثابت و حداقل رپیل گشتاور قرار داد.

مراحل طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی بر اساس استفاده از موانع شار با منحنی‌های سیال گونه (ساختار شکل ۱-۱) [۶]:

- الف- انتخاب تعداد موانع شار
- ب- انتخاب مقدار اولیه برای زاویه β . این مقدار می‌تواند به گونه‌ای باشد که در تمامی شیارهای روتور گام شیار روتور ثابت باشد؛ یعنی $\beta = \frac{\alpha_m}{2}$.
- ج- محاسبه زاویه α_m و در نتیجه، تعیین موقعیت نقاط انتهایی موانع شار در سطح روتور (رابطه (۱-۱))
- د- انتخاب مقدار اولیه برای نسبت عایقی K_{wq} (نسبت کل طول عایق به کل طول آهن در راستای محور q) (می‌توان مقداری بین 0.1 تا 1 انتخاب نمود؛ به عنوان مثال $K_{wq} = 0.5$).
- ه- محاسبه عرض موانع شار و سگمنت‌ها در راستای محور q . بدین منظور، برای محاسبه عرض سگمنت‌ها می‌توان از روابط زیر استفاده نمود:

$$\frac{2S_1}{S_2} = \frac{MMF_{d1}}{MMF_{d2}} \quad \& \quad \frac{S_h}{S_{h+1}} = \frac{MMF_{dh}}{MMF_{d\ h+1}} \quad h = 2, \dots, k \quad (۱-۹)$$

$$\sum_{h=1}^{h=k+1} S_h = \frac{\frac{D}{2} - \frac{D_{shaft}}{2} - g}{1 + K_{wq}} \quad (۱-۱۰)$$

بدین ترتیب، عرض هر سگمنت محاسبه خواهد شد. در حالت کلی، عرض هر سگمنت بر حسب K_{wq} و بطور غیرمستقیم بر حسب β و k به دست می‌آید. برای محاسبه عرض موانع شار نیز می‌توان از روابط زیر استفاده کرد:

$$\frac{W_{1h}}{W_{1h+1}} = \left(\frac{\Delta f_h}{\Delta f_{h+1}} \right)^2 \quad h = 1, \dots, k-1 \quad (1-11)$$

$$\sum_{h=1}^k W_{1h} = \frac{\frac{D}{2} - \frac{D_{shaft}}{2} - g}{1 + \frac{1}{K_{wq}}} \quad (1-12)$$

در حالت کلی، عرض هر مانع شار بر حسب K_{wq} و بطور غیرمستقیم بر حسب β و k به دست می آید. و- با محاسبه عرض موانع شار و سگمنت ها در راستای محور q ، موقعیت آنها در راستای این محور مشخص می شود. در نتیجه، مختصات مرزهای هر مانع شار در راستای محور q بدست می آید و می توان با توجه به رابطه منحنی های سیال گونه، شکل موانع شار را رسم کرد. لازم به ذکر است، در این روش، نیازی به استفاده از نسبت عایقی راستای محور d (K_{wd}) نخواهد بود.

ز- محاسبه فاصله مرکز هر مانع شار از مرکز روتور (Y_{qk})

ح- تنظیم موقعیت نقاط انتهایی موانع شار نسبت به موقعیت موانع شار از طریق تغییر پارامتر Y_{qk} (مربوط به هر مانع شار). به عبارت دیگر، در صورت جابجا شدن موقعیت نقاط انتهایی، می توان با تغییر پارامتر Y_{qk} (فاصله مرکز روتور از مرکز هر مانع شار در راستای محور q) موقعیت نقاط انتهایی موانع شار را در مکان محاسبه شده برای داشتن گام سیار ثابت و حداقل رپل گشتاور قرار داد.

ط- تنظیم زاویه β برای داشتن حداقل رپل گشتاور با ثابت نگهداشتن نسبت K_{wq} . بازای هر β لازم است عرض موانع شار، سگمنت ها و پارامتر Y_{qk} محاسبه شوند. سپس با ثابت نگهداشتن عرض موانع شار و سگمنت ها، پارامتر Y_q برای هر مانع شار تغییر داده می شود تا نقاط انتهایی موانع شار با توجه به β و α_m محاسبه شده، تنظیم شوند. بدین ترتیب با مقدار β بهینه، موقعیت نهایی موانع شار، سگمنت ها و همچنین شکل نهایی موانع شار در این مرحله مشخص خواهند شد.

ی- تنظیم نسبت عایقی K_{wq} برای داشتن حداکثر گشتاور متوسط و همچنین حداکثر ضریب توان با ثابت نگهداشتن زاویه β

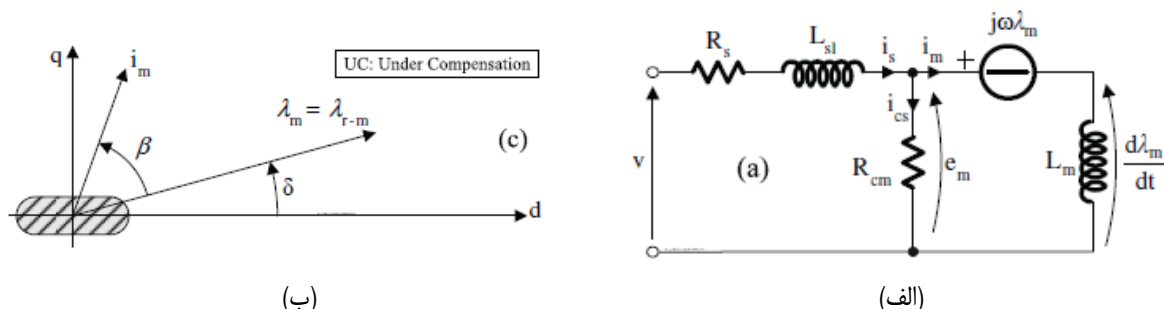
۱-۳- استفاده از آهن ربای دائم در ماشین سنکرون رلوکتانسی

در موتور سنکرون رلوکتانسی اگر زاویه جریان برای رسیدن به حداکثر گشتاور خروجی، تعیین شود (استراتژی Maximum torque per ampere)، بازدهی موتور افزایش خواهد یافت؛ اما در مقابل، ضریب توان موتور ماکزیمم نخواهد بود. براساس استراتژی Maximum torque per KVA، ضریب توان در شرایط $\tan(\theta) = \sqrt{\xi}$ ماکزیمم مقدار خود را خواهد داشت که برابر $\frac{\xi-1}{\xi+1}$ است. در این روابط، θ زاویه جریان و ξ نسبت برجستگی هستند. کم بودن مقدار ضریب توان، kVA نامی درایو را افزایش می دهد. جهت رفع این مشکل می توان در روتور موتور سنکرون رلوکتانسی از آهن ربای دائم استفاده نمود [۶]. چنانچه پیش از اضافه کردن آهن ربا، ماشین سنکرون رلوکتانسی برای داشتن بیشترین ضریب برجستگی طراحی شود، مقدار آهن ربا برای رسیدن به عملکرد مطلوب، حداقل خواهد بود. زیرا گشتاور رلوکتانسی در بیشترین مقدار قرار دارد.

در ماشین سنکرون رلوکتانسی با آهن ربای کمکی، آهن ربا نقشی در شار محور d ندارد (حالت ایده آل). شار محور d توسط جریان سیم پیچ استاتور تامین می شود. در این ماشین، آهن ربا به گونه ای قرار می گیرد که شار آن در راستای محور q و در جهت مخالف آن باشد. فوران-دور ناشی از آهن ربا را می توان به گونه ای انتخاب نمود که شار محور q را خنثی کند و بدین ترتیب باعث افزایش ضریب توان ماشین شود. به چنین شرایطی در ماشین سنکرون رلوکتانسی با آهن ربای کمکی، جبران سازی طبیعی گفته می شود. در این حالت، رابطه زیر را می توان برای شار آهن ربا نوشت [۶]:

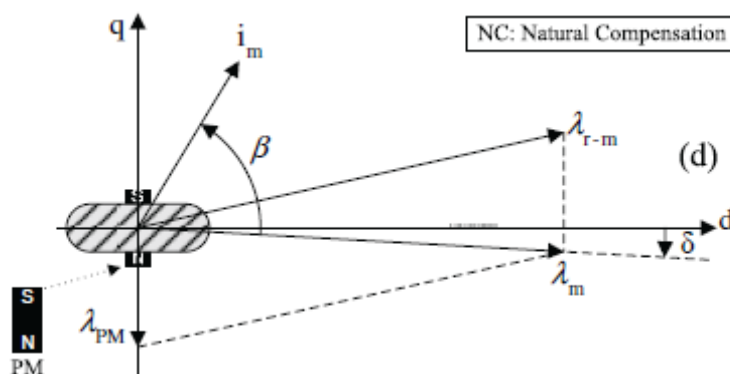
$$\lambda_{PM} = -L_q i_0 \quad (۱-۱۳)$$

که λ_{PM} شار آهنربا، L_q اندوکتانس محور q ، و i_0 جریان نامی ماشین است. بر اساس رابطه فوق، هرچه مقدار L_q کوچکتر (نسبت برجستگی بزرگتر) باشد، به ازای جریان ثابت، آهنربای کوچکتری برای جبران شار محور q نیاز خواهد بود.



شکل ۳-۱: مدار معادل موتور سنکرون رلوکتانسی و نمودار فیزیوری آن

شکل ۳-۱، مدار معادل یک موتور سنکرون رلوکتانسی و نمودار فیزیوری آن را نشان می‌دهد. این نمودار فیزیوری مربوط به شرایطی است که از آهنربای دائم استفاده نشده و بر اساس استراتژی MTPA، زاویه جریان (زاویه $\beta + \delta$) برای داشتن حداکثر گشتاور تنظیم شده است. در این شرایط، همانطور که ذکر شد، ضریب توان از مقدار نامی کمتر است. حال اگر آهنربای دائم به روتور اضافه شود، به گونه‌ای که رابطه $\lambda_{PM} = -L_q i_0$ برقرار باشد، نمودار فیزیوری موتور به صورت شکل ۳-۴ خواهد بود [۶]. در این شکل، شار پیوندی برآیند در فاصله هوایی بوده که از دو مولفه تشکیل شده است. مولفه اول، λ_{PM} یا همان شار آهنربا (که جهت آن در خلاف جهت مثبت محور q است) و مولفه دوم، λ_{r-m} که برآیند شارهای پیوندی λ_d و λ_q بوده و ناشی از تغییر رلوکتانس در مدار مغناطیسی است.

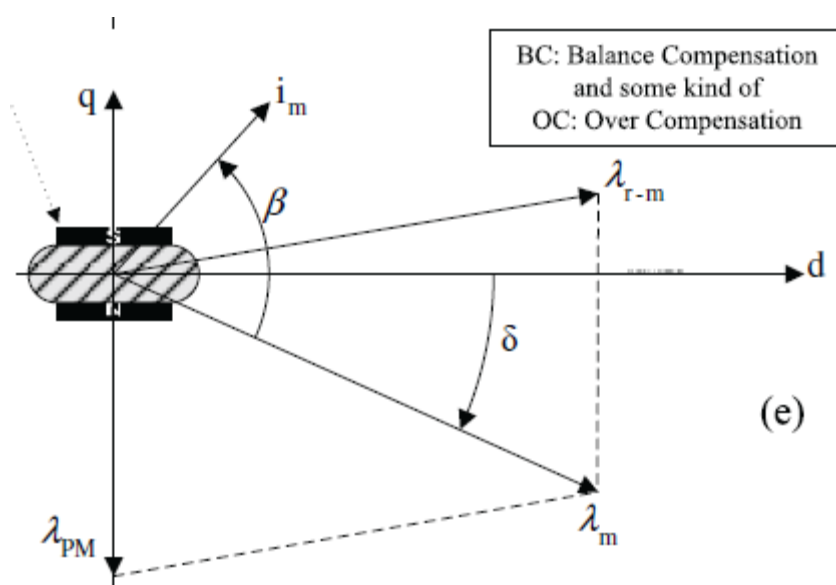


شکل ۳-۴: مدار معادل موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی و نمودار فیزیوری آن

در دو حالت، با آهنربا و بدون آهنربا، دامنه جریان ثابت است. با مقایسه دو نمودار فیزیوری در دو حالت با و بدون آهنربا، مشاهده می‌شود زاویه β بزرگتر شده و از آنجاکه ضریب توان برابر $\sin\beta$ است، بنابراین با اضافه کردن آهنربا، ضریب توان افزایش می‌یابد. علاوه بر این، با توجه به آنکه شار آهنربا در خلاف جهت شار محور q است، نسبت برجستگی افزایش و در نتیجه، گشتاور رلوکتانسی نیز افزایش می‌یابد.

اضافه کردن آهنربا به روتور باعث تامین شار مورد نیاز برای به اشباع رفتن ریبها می‌شود که این امر کاهش شار محور q و کاهش تاثیر منفی این شار بر شار محور d (اثر cross coupling) را به دنبال خواهد داشت و در نتیجه، نسبت برجستگی افزایش می‌یابد. بنابراین، مولفه رلوکتانسی شار فاصله هوایی افزایش می‌یابد. این توضیحات تا زمانی معتبر است که شار آهنربا، تاثیری بر شار محور d و مسیر این شار نداشته باشد. اما اگر میزان و نوع آهنربای اضافه شده به روتور به گونه‌ای باشد که رابطه $\lambda_{PM} = -L_q i_0$ برقرار نبوده و $\lambda_{PM} > -L_q i_0$ باشد، در این صورت با استراتژی MTPA (تنظیم زاویه جریان در مقداری که

گشتاور حداکثر شود؛ که در این مقدار، ضریب توان حداکثر نیست)، نمودار فیزیوری موتور به صورت شکل ۵-۱ خواهد شد [۶]. از آنجاکه در این حالت، شار آهن‌ریا از شار محور q بیشتر است، شار آهن‌ریا بر شار محور d تاثیر گذاشته و مسیرهای آهنی عبور شار در روتور و استاتور، توسط شار آهن‌ریا تحریک می‌شوند که این امر، باعث کاهش شار رلوکتانسی فاصله هوایی می‌شود و بنابراین، شار برآیند در فاصله هوایی، بیشتر ناشی از شار آهن‌ریا است. این نکته در شکل ۵-۱، با تغییر شار برآیند در فاصله هوایی (λ_m) و بزرگتر شدن زاویه δ و زاویه β کاملاً مشهود است که افزایش ضریب توان و گشتاور را در مقایسه با حالت قبل نشان می‌دهد. اما در این حالت، موتور ماهیت آهن‌ریایی داشته و ماهیت رلوکتانسی ندارد.



شکل ۵-۱: مدار معادل موتور سنکرون رلوکتانسی با آهن‌ریای کمی و نمودار فیزیوری آن در شرایط $\lambda_{PM} > L_q i_0$

به عبارت دیگر، در موتور سنکرون رلوکتانسی با آهن‌ریای کمی، گشتاور از دو مولفه تشکیل شده است؛ مولفه ناشی از آنیزوتروپیک بودن روتور (گشتاور رلوکتانسی) و مولفه ناشی از شار آهن‌ریای دائم. در این موتور، مولفه رلوکتانسی گشتاور بر مولفه ناشی از شار آهن‌ریا غالب است. بنابراین، سه حالت در اضافه کردن آهن‌ریا به روتور وجود دارد [۶]:

$ \lambda_{PM} < L_q i_0$	Under compensation
$ \lambda_{PM} \cong L_q i_0$	Normal compensation
$ \lambda_{PM} > L_q i_0$	Over compensation

در طراحی آهن‌ریای دائم برای موتور سنکرون رلوکتانسی، شار آهن‌ریای دائم مهم است. این شار به حاصل ضرب چگالی فوران پسماند آهن‌ریا (B_{rem}) و سطح مقطع آهن‌ریا در راستای عمود بر جهت مغناطیس‌شوندگی بستگی دارد. طراحی آهن‌ریای دائم می‌تواند به گونه‌ای انجام شود که یکی از این دو پارامتر و یا هر دوی آنها برای رسیدن به عملکرد مورد نظر، بهینه شوند. در [۱۱] طراحی آهن‌ریا و بررسی عملکرد ماشین PMaSynRe در شرایطی انجام شده است که ابعاد آهن‌ریا ثابت فرض شده و عملکرد ماشین بر حسب B_{rem} های مختلف بررسی شده است. علاوه بر این، در این تحقیق تاثیر تغییر حجم آهن‌ریا نیز بررسی شده و نشان داده شده است که تغییر تعداد دور داخل شیار برای بدست آوردن حجم بهینه‌ی آهن‌ریا ضروری است. همچنین در [۱۲] به این نکته اشاره شده است که اگر جنبه تحمل‌پذیر بودن در برابر خطا مدنظر باشد، لازم است میزان آهن‌ریای اضافه شده به روتور، حداقل مقدار را داشته باشد که back-emf، جریان اتصال کوتاه و گشتاور ترمزی مقدار کمی داشته باشند.

۱-۴- طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی جهت استفاده در کولر آبی

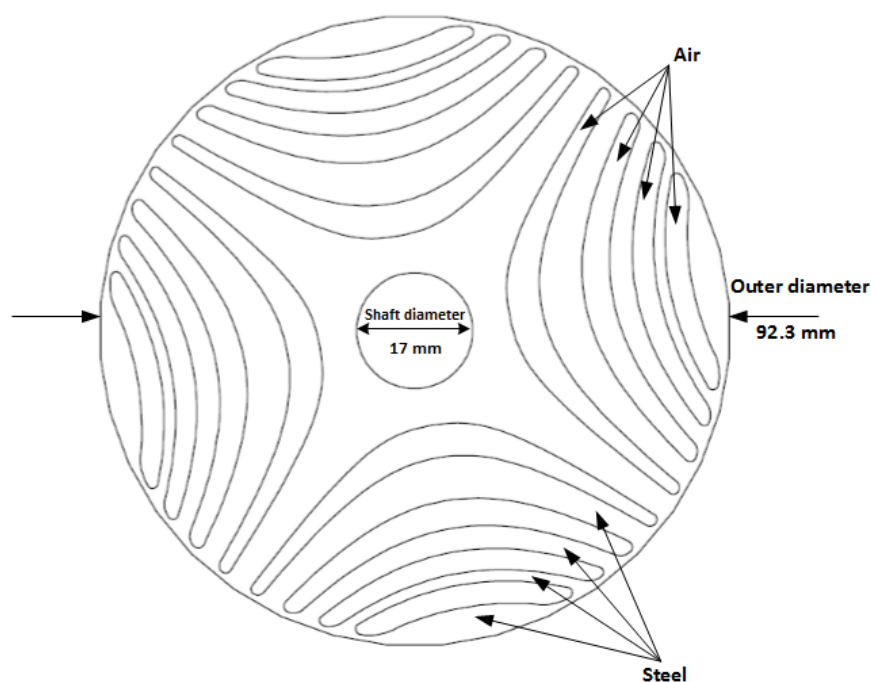
در این بخش توضیحات لازم پیرامون طراحی یک موتور سنکرون رلوکتانسی جهت استفاده در کولر آبی ارائه خواهد شد. با توجه به موتورهای مورد استفاده در کولرهای آبی، موتوری با توان نیم اسب بخار مدنظر قرار گرفت. اگرچه موتورهای القایی تک فاز مورد استفاده در کولرهای آبی، دو سرعته هستند، اما موتورهای سنکرون رلوکتانسی به دلیل استفاده از درایو، می توانند در سرعت های مختلف (تا سرعت نامی) کار کنند.

همانطور که اشاره شد، طراحی موتور برای استفاده در کولر آبی انجام می شود و علاوه بر این، با توجه به واگذاری مرحله ساخت این موتور به شرکت کیا الکتروموتور پارت، مقرر گردید از استاتور موتورهای کولر تولید شده توسط این شرکت استفاده شود. بدین ترتیب تعداد و هندسه شیارهای استاتور و همچنین قطر داخلی و خارجی استاتور، معلوم بوده و مساله طراحی، شامل طراحی روتور، سیم پیچ استاتور و طول محوری موتور خواهد بود. با توجه به این توضیحات، مفروضات مساله طراحی را می توان مطابق جدول ۱-۱ بیان نمود.

جدول ۱-۱: مفروضات مساله طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی جهت استفاده در کولر آبی

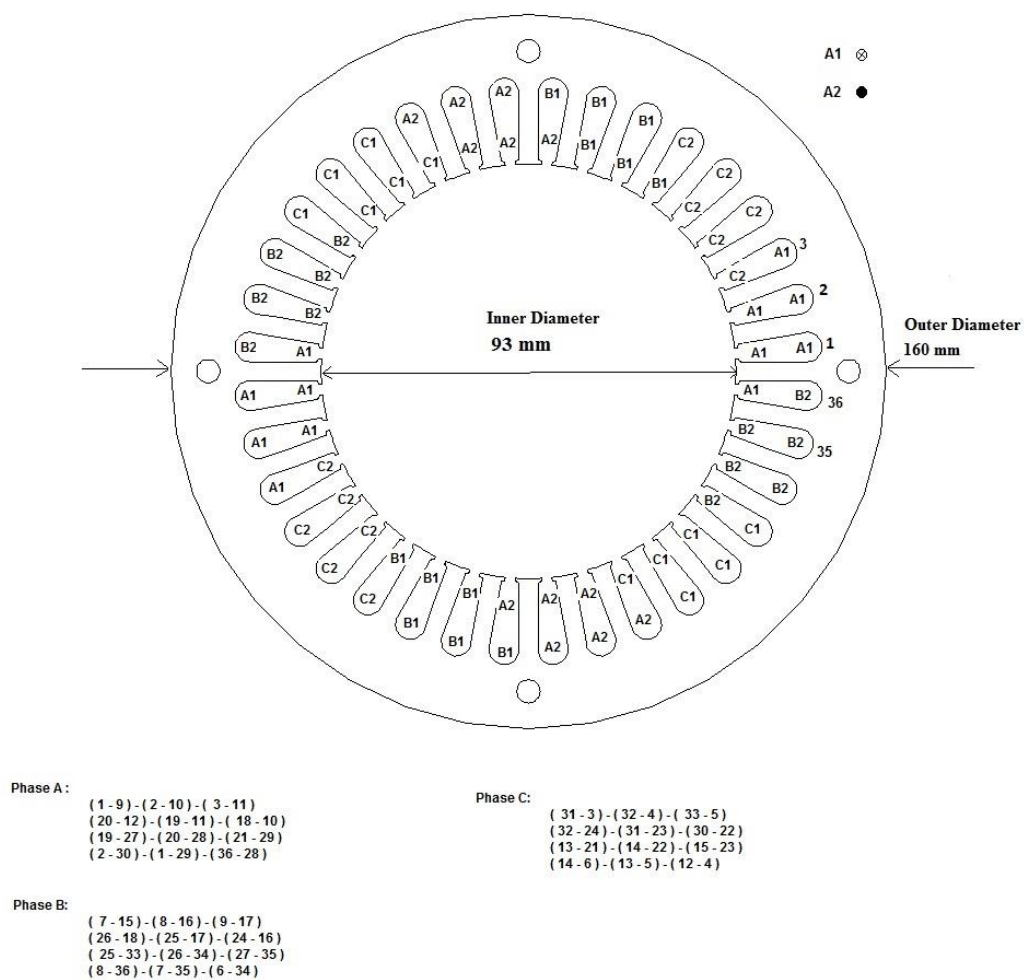
0.35 mm	طول شکاف هوایی	1500 rpm	سرعت نامی	0.5 hp	توان خروجی
معلوم	هندسه شیارهای استاتور	36	تعداد شیارهای استاتور	3	تعداد فاز
برق تکفاز	ولتاژ تغذیه سیستم درایو	160 mm	قطر خارجی استاتور	4	تعداد قطب
17 mm	قطر شفت	93 mm	قطر داخلی استاتور	50 Hz	فرکانس
				120°C	حداکثر دمای سیم پیچ

با توجه به مفروضات مساله و همچنین مطابق توضیحات ارائه شده در بخش قبل در خصوص طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی، طراحی روتور با موانع شار سیال گونه انجام شد که ساختار آن در شکل ۶-۱ نشان داده شده است. مطابق توضیحات بخش قبل، با استفاده از موانع شار سیال گونه می توان به نسبت برجستگی بالایی در موتور سنکرون رلوکتانسی رسید که در نتیجه، گشتاور و ضریب توان بالایی را به دنبال خواهد داشت.

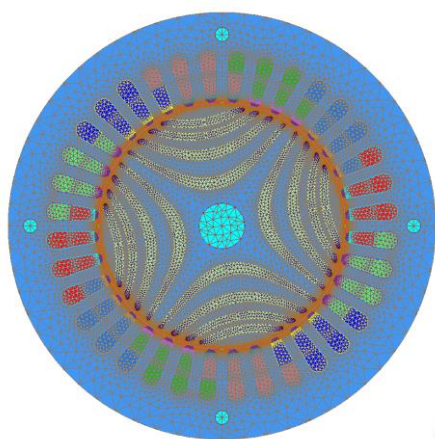


شکل ۶-۱: روتور موتور سنکرون رلوکتانسی که با توجه به مفروضات مساله و توضیحات ارائه شده، طراحی شد

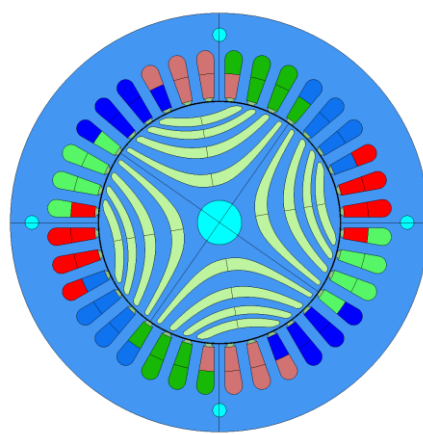
با توجه به آنکه یکی از چالش‌های موتورهای سنکرون رلوکتانسی، ریپل گشتاور است، از این رو سیم‌بندی استاتور از نوع توزیع‌شده، گام کسری و دولایه در نظر گرفته شد. شکل ۷-۱ هندسه استاتور و ساختار سیم‌بندی آن را نشان می‌دهد. موتور سنکرون رلوکتانسی طراحی شده برای استفاده در کولر آبی، توسط نرم‌افزار المان محدود FLUX شبیه‌سازی شده و مورد تحلیل قرار گرفت. ساختار پیاده‌سازی شده در محیط نرم‌افزار FLUX و هندسه مش خورده آن در شکل ۸-۱ (الف) و (ب) نشان داده شده‌اند. جهت شبیه‌سازی و بررسی عملکرد این موتور، از روش Multi-Static استفاده شده است. بدین ترتیب که تحلیل از نوع Magnetostatic بوده و موقعیت زاویه‌ای روتور تغییر می‌کند. از آنجاکه موتور از نوع سنکرون است، زاویه جریان اعمالی به سیم‌پیچ استاتور باید با موقعیت روتور متناسب باشد. بدین ترتیب با تغییر موقعیت روتور می‌توان عملکرد موتور را در شرایط مانا شبیه‌سازی نمود. نتایج این شبیه‌سازی، توزیع شار مغناطیسی و نیز چگالی شار مغناطیسی در بخش‌های مختلف موتور است که در شکل ۸-۱ (ج) و (د) نشان داده شده‌اند. یکی دیگر از خروجی‌های شبیه‌سازی انجام شده، پروفیل گشتاور الکترومغناطیسی است که با توجه به آن می‌توان ریپل گشتاور را که در موتورهای رلوکتانسی حائز اهمیت است و همچنین توان خروجی موتور را محاسبه نمود.



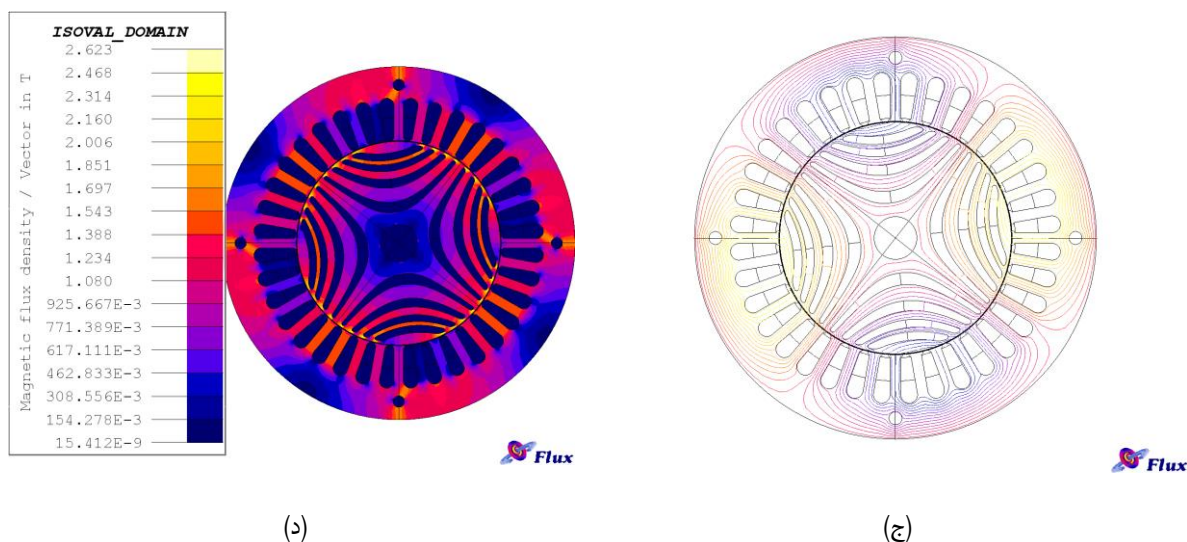
شکل ۷-۱: هندسه و روش سیم بندی استاتور موتور سنکرون رلوکتانسی جهت استفاده در کولر آبی



(ب)



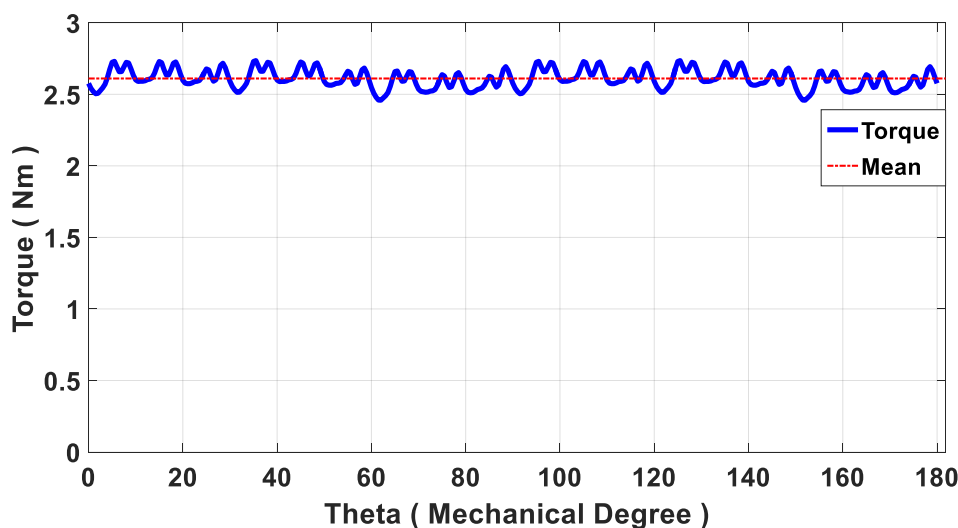
(الف)



شکل ۸-۱: (الف) ساختار روتور و استاتور موتور سنکرون رلوکتانسی پیاده سازی شده در محیط نرم افزار FLUX؛ (ب) هندسه مش خورده جهت شبیه سازی عملکرد؛ (ج) توزیع شار مغناطیسی و (د) توزیع چگالی شار مغناطیسی در موتور در شرایط مانا

شکل ۹-۱: پروفیل گشتاور الکترومغناطیسی در بار نامی را نشان می دهد که از شبیه سازی المان محدود موتور سنکرون رلوکتانسی طراحی شده برای کولر آبی بدست آمده است. مقدار متوسط این گشتاور برابر 2.61 Nm بوده و ریبیل گشتاور نیز 10.6% است. با توجه به ریبیل گشتاور موتورهای القایی تک فاز مورد استفاده در کولرهای آبی، ریبیل گشتاور موتور طراحی شده مقدار مناسبی است. لازم به ذکر است، جهت محاسبه ریبیل گشتاور از رابطه (۱۴-۱) استفاده شده است.

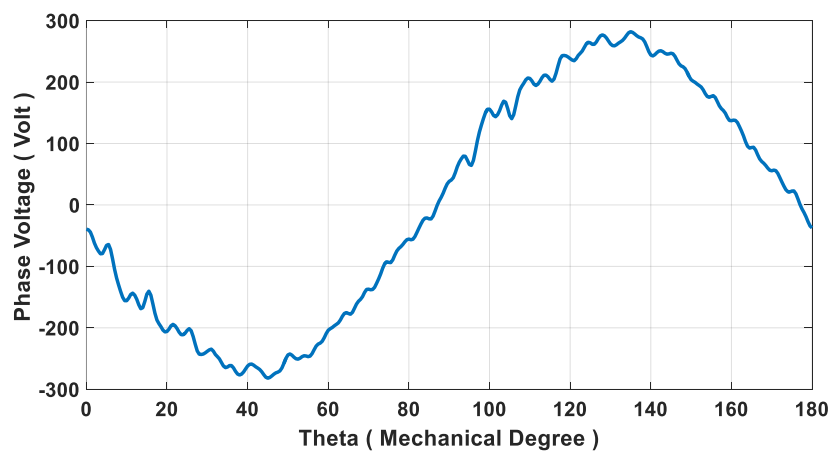
$$\text{Torque ripple\%} = \frac{(T_{\max} - T_{\min})}{T_{\text{ave}}} \times 100 \quad (14-1)$$



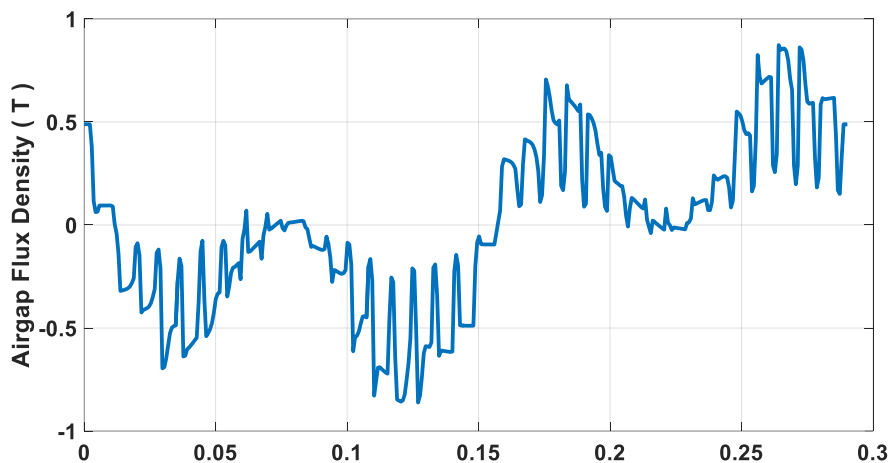
شکل ۹-۱: پروفیل گشتاور الکترومغناطیسی در شبیه سازی موتور سنکرون رلوکتانسی طراحی شده برای کولر آبی

با توجه به آنکه شبیه سازی انجام شده از نوع Magnetostatic است نمی توان ولتاژ ترمینال های موتور را در محیط نرم افزار المان محدود مشاهده کرد. از این رو جهت محاسبه ولتاژ ترمینال موتور طراحی شده، می توان با توجه به شبیه سازی انجام شده در محیط

نرم افزار المان محدود، شارپیوندی یک کلاف از یک فاز سیم پیچ استاتور را بدست آورده و سپس با محاسبه شار پیوندی یک فاز و نیز در نظر گرفتن مدار معادل موتور سنکرون رلوکتانسی (شکل ۳-۱-الف)، ولتاژ فاز موتور را محاسبه نمود. بدین ترتیب ضریب توان موتور نیز قابل محاسبه است. شکل ۱۰-۱ شکل موج ولتاژ فاز ترمینال موتور سنکرون رلوکتانسی طراحی شده جهت استفاده در کولر آبی را نشان می دهد که مطابق توضیحات ارائه شده و با استفاده از شکل موج شارپیوندی حاصل از شبیه سازی به روش المان محدود بدست آمده است. توزیع مولفه نرمال چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی موتور نیز در شکل ۱۱-۱ آمده است. یکی از پارامترهای مهم در ماشین های سنکرون رلوکتانسی، نسبت برجستگی است که به صورت نسبت اندوکتانس محور d به اندوکتانس محور q تعریف می شود. جهت محاسبه نسبت برجستگی موتور طراحی شده لازم است اندوکتانس های محورهای d و q محاسبه شوند. بدین منظور با استفاده از شار پیوندی هر فاز سیم پیچ استاتور که از شبیه سازی به روش المان محدود بدست آمده است، می توان شار پیوندی و جریان های محورهای d و q را مطابق روابط (۱۵-۱) تا (۱۸-۱) بدست آورد.



شکل ۱۰-۱: شکل موج ولتاژ فاز ترمینال موتور سنکرون رلوکتانسی طراحی شده جهت استفاده در کولر آبی



شکل ۱۱-۱: توزیع مولفه نرمال چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی موتور سنکرون رلوکتانسی

$$\lambda_d = \frac{2}{3} \left[\lambda_a \cos(\theta_e) + \lambda_b \cos\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) + \lambda_c \cos\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) \right] \quad (15-1)$$

$$\lambda_q = -\frac{2}{3} \left[\lambda_a \sin(\theta_e) + \lambda_b \sin\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) + \lambda_c \sin\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) \right] \quad (1-16)$$

$$I_d = \frac{2}{3} \left[I_a \cos(\theta_e) + I_b \cos\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) + I_c \cos\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) \right] \quad (1-17)$$

$$I_q = -\frac{2}{3} \left[I_a \sin(\theta_e) + I_b \sin\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) + I_c \sin\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) \right] \quad (1-18)$$

بدین ترتیب اندوکتانس‌های محوره‌های d و q بصورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$L_d = \frac{\lambda_d}{I_d} + L_{leak-ew} \quad (1-19)$$

$$L_q = \frac{\lambda_q}{I_q} + L_{leak-ew} \quad (1-20)$$

که $L_{leak-ew}$ اندوکتانس ناشی ناحیه اورهنگ سیم‌پیچ استاتور است که به دلیل دویعدی بودن شبیه‌سازی المان محدود، شارهای ناشی این ناحیه در محاسبه شارپیوندی لحاظ نشده بودند. بدین ترتیب نسبت برجستگی برابر خواهد با:

$$\xi = \frac{L_d}{L_q} \quad (1-21)$$

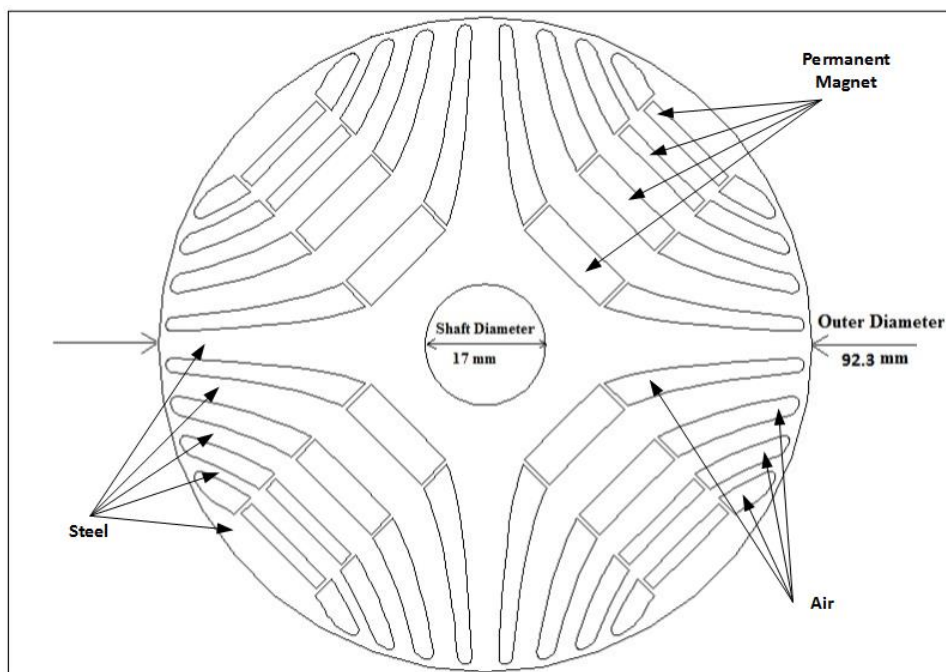
با توجه به توضیحات ارائه شده و نتایج شبیه‌سازی، مشخصات نهایی موتور سنکرون رلوکتانسی طراحی شده جهت استفاده در کولر آبی در جدول ۱-۲ آمده است.

جدول ۱-۲: مشخصات نهایی موتور سنکرون رلوکتانسی طراحی شده جهت استفاده در کولر آبی

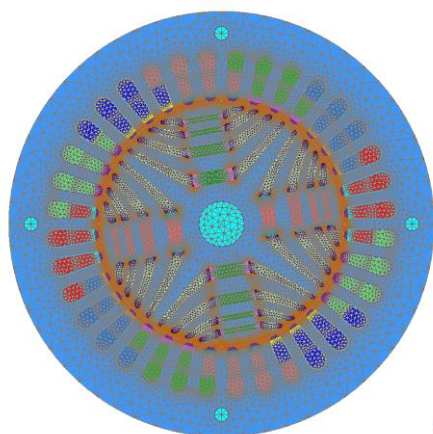
40 mm	طول محوری	0.68 H	Ld	400 Watt	توان خروجی
100	تعداد دور در هر کلاف	0.1286 H	Lq	188.6 Volt	ولتاژ موثر فاز
26	شماره سیم (SWG)	5.29	نسبت برجستگی	1.3 A (rms)	جریان نامی فاز
11.8	مقاومت اهمی فاز (اهم)	2.61 Nm	گشتاور الکترومغناطیسی	0.70	ضریب توان
		10.6 %	ریپل گشتاور	78.3 %	بازدهی

۱-۵- طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی جهت استفاده در کولر آبی

همانطور که در بخش‌های گذشته اشاره شد، استفاده از آهنربای دائم در موتور سنکرون رلوکتانسی می‌تواند به بهبود گشتاور متوسط و ضریب توان کمک کند. پس از طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی بدون آهنربای دائم، با توجه به مفروضات ارائه شده در جدول ۱-۱، طراحی موتور با آهنربای کمکی انجام شد. در این طرح، هندسه موانع شار روتور همانند حالت قبل، موانع شار سیال گونه است که آهنرباهای دائم به شکل مکعب مستطیل، مطابق شکل ۱۲-۱ داخل موانع شار قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است، با توجه به محدودیت‌های موجود در بازار، از آهنرباهای موجود بدین منظور استفاده شد. در این طرح نیز با توجه به استفاده از استاتور موتور کولر شرکت کیا الکتروموتور پارت، هندسه و تعداد شیارهای استاتور و نیز قطر داخلی و خارجی آن همانند طرح قبلی (بدون آهنربای دائم) است. نحوه سیم‌بندی استاتور نیز مشابه طرح قبل (شکل ۷-۱) است.

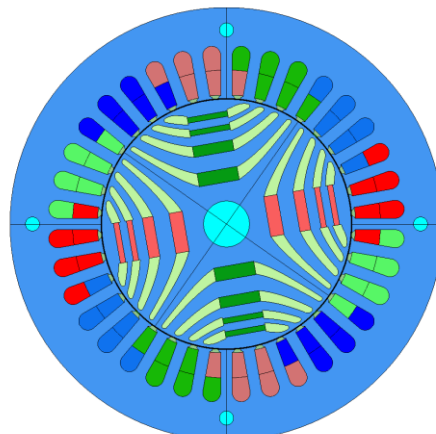


شکل ۱۲-۱: روتور موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی که با توجه به مفروضات مساله و توضیحات ارائه شده، طراحی شد. شبیه‌سازی موتور طراحی شده همانند حالت قبل در محیط نرم‌افزار المان محدود FLUX و به صورت Multi-Static انجام شد. شکل ۱۳-۱-الف وب هندسه پیاده‌سازی شده در محیط نرم‌افزار و ساختار مش‌بندی شده را نشان می‌دهد. توزیع شار مغناطیسی و نیز چگالی شار مغناطیسی در بخش‌های مختلف موتور نیز که از شبیه‌سازی موتور در بار نامی و حالت مانا بدست آمده در شکل ۱۳-۱-ج و د نشان داده شده است. در تحلیل Multi-Static می‌توان پروفیل گشتاور الکترومغناطیسی موتور را نیز مشاهده نمود و از این طریق، متوسط گشتاور و نیز ریبیل گشتاور را بدست آورد.



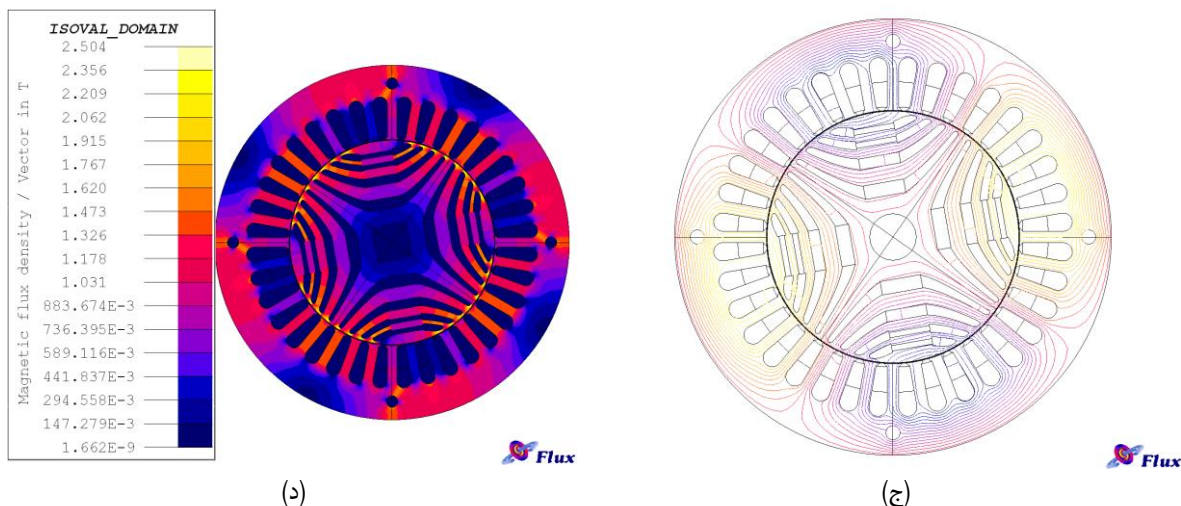
(ب)

Flux

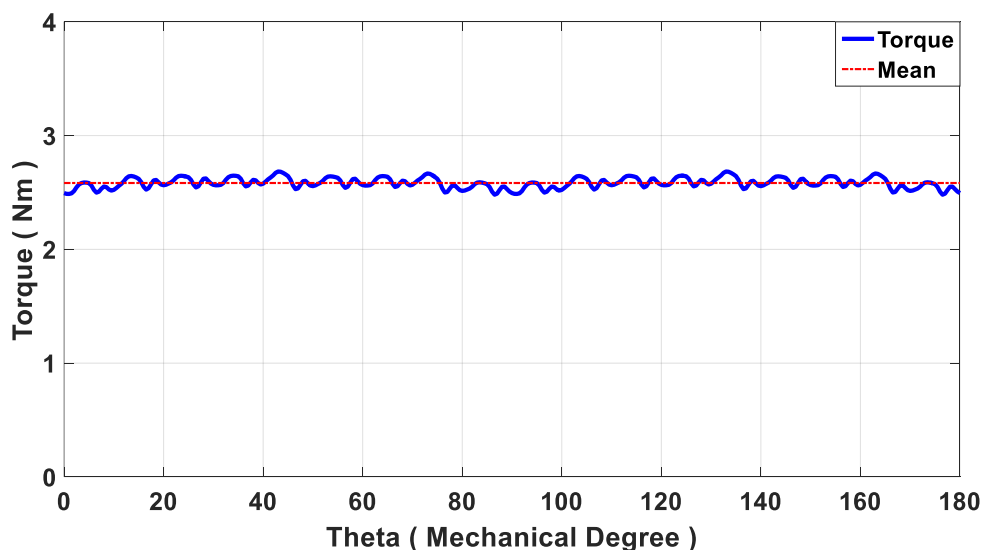


(الف)

Flux



شکل ۱۳-۱: (الف) ساختار روتور و استاتور موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی، پیاده سازی شده در محیط نرم افزار FLUX؛ (ب) هندسه مش بندی شده جهت شبیه سازی عملکرد؛ (ج) توزیع شار مغناطیسی و (د) توزیع چگالی شار مغناطیسی در موتور در شرایط مانا

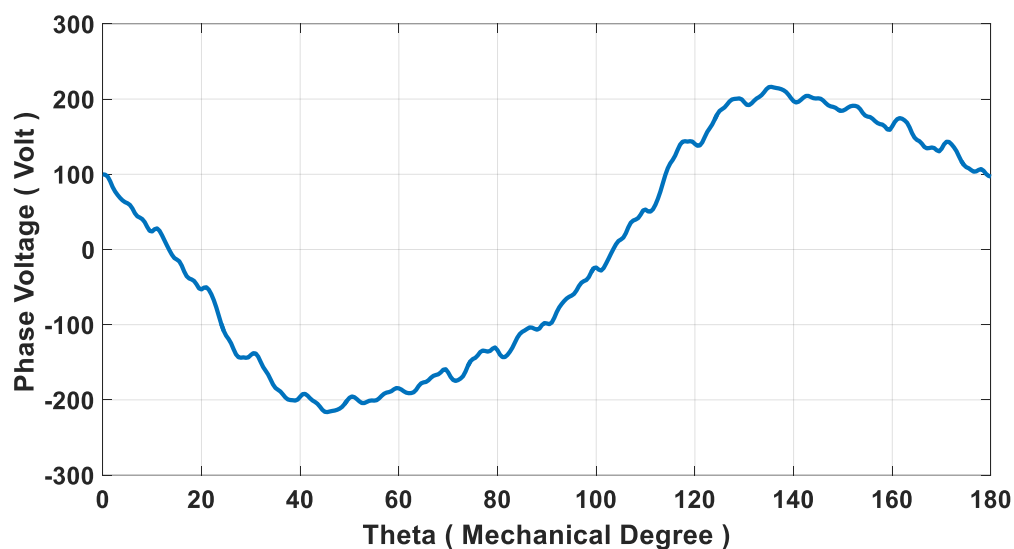


شکل ۱۴-۱: پروفیل گشتاور الکترومغناطیسی در شبیه سازی موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی طراحی شده برای کولر آبی

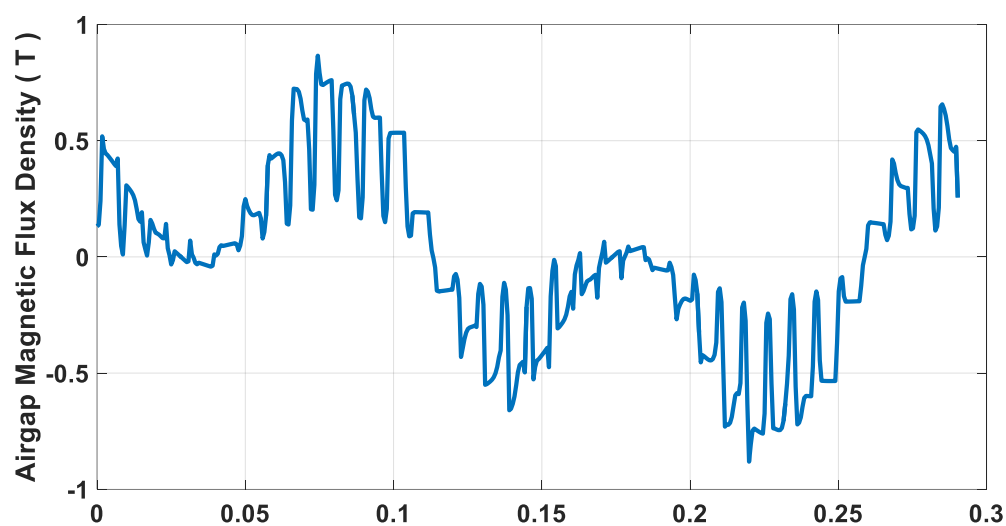
شکل ۱۴-۱ گشتاور الکترومغناطیسی موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی را نشان می دهد. مقدار متوسط این گشتاور برابر 2.58 Nm و رپیل گشتاور مطابق رابطه (۱۴-۱) برابر 7.9 % است. جهت بدست آوردن شکل موج ولتاژ ترمینال موتور، مطابق توضیحات ارائه شده در بخش قبل، می توان از شار پیوندی یک فاز سیم پیچ استاتور استفاده نمود که از شبیه سازی به روش المان محدود بدست آمده است. بدین ترتیب ولتاژ فاز ترمینال موتور به صورت نشان داده شده در شکل ۱۵-۱ خواهد بود. توزیع مولفه نرمال چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی موتور نیز در شکل ۱۶-۱ آمده است. با توجه به توضیحات ارائه شده و نتایج شبیه سازی، مشخصات نهایی موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی که جهت استفاده در کولر آبی طراحی شده است در جدول ۳-۱ آمده است.

جدول ۳-۱: مشخصات نهایی موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی، طراحی شده جهت استفاده در کولر آبی

توان خروجی	397 Watt	گشتاور الکترومغناطیسی	2.58 Nm	مقاومت اهمی فاز (اهم)	11.2
ولتاژ موثر فاز	148.3 Volt	ریپل گشتاور	7.9 %		
جریان نامی فاز	1.2 A (rms)	طول محوری	30 mm		
ضریب توان	0.91	تعداد دور در هر کلاف	100		
بازدهی	81.7 %	شماره سیم (SWG)	26		



شکل ۱۵-۱: شکل موج ولتاژ فاز ترمینال موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی، طراحی شده جهت استفاده در کولر آبی



شکل ۱۶-۱: توزیع مولفه نرمال چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی موتور سنکرون رلکتانسی با آهنربای کمکی

فصل دوم: تحلیل حرارتی موتور سنکرون رلوکتانسی با آهن ربای کمکی

۲-۱- مقدمه

استفاده از روش‌های عددی جهت طراحی سیستم‌های مکانیکی به عنوان ابزاری قدرتمند در صنعت شناخته شده است. این روش‌ها امکان بررسی شرایط نهایی سیستم را قبل از ساخت فراهم کرده و به بهبود طراحی و رفع عیوب موجود در آن کمک می‌کنند.

۲-۲- تعریف مسئله

در این تحقیق، هدف تحلیل حرارتی موتور الکتریکی است. اهمیت این تحلیل در آن است که طراح را از وجود حرارت بیش از حد در موتور آگاه می‌سازد. منبع ایجاد حرارت در موتور، عبور جریان الکتریکی از سیم‌پیچ مسی استاتور و مقاومت الکتریکی در برابر جریان القا شده در روتور است که باعث بالا رفتن دمای سیم‌پیچ‌ها و روتور می‌شود. در صورتی که انتقال حرارت به محیط پیرامونی در موتور الکتریکی به درستی انجام نشود، سیم‌پیچ‌ها در اثر حرارت آسیب می‌بینند.

تحلیل انتقال حرارت برای دو مدل روتور صورت گرفته است. در مدل اول روتور بدون آهنربا است و در مدل دوم، روتور دارای آهنربا است. برای هر دو حالت شبیه‌سازی‌ها با در نظر گرفتن دماهای ۲۵ و ۴۰ درجه سانتیگراد برای محیط انجام شده است. طول هسته استاتور و روتور در مدل بدون آهنربا ۴۰ میلی‌متر و در مدل دارای آهنربا ۳۰ میلی‌متر است. طول پوسته موتور ۱۵۰ میلی‌متر و ضخامت درپوش آلومینیومی پوسته موتور ۵ میلی‌متر است. شفت موتور از یک سمت به اندازه ۴۰ میلی‌متر بیرون آمده است. بین سیم‌پیچ و هسته استاتور عایق حرارتی به نام Nomex با ضخامت ۰.۳ میلی‌متر وجود دارد و سیم‌پیچ مسی در هر دو مدل به اندازه ۲۰ میلی‌متر از هسته استاتور طویل‌تر است (ناحیه Overhang). خواص حرارتی مواد استفاده شده در مدل‌سازی موتورهای در جدول ۲-۱ مشاهده می‌شوند. برای مدل‌سازی انتقال حرارت همرفتی از ضریب هدایت حرارتی مطابق با جدول ۲-۲ استفاده شده است. در شکل ۲-۱ الف استاتور و محل قرارگیری سیم‌پیچ‌ها و در شکل ۲-۱ ب مدل کامل موتور بدون آهنربا نشان داده شده‌اند. همچنین در شکل ۲-۲ الف و شکل ۲-۲ ب هندسه موتور دارای آهنربا آمده است.

جدول ۲-۱: خواص حرارتی مواد استفاده شده در تحلیل‌های حرارتی

گرمای ویژه ($\frac{J}{kgK}$)	ضریب هدایت گرمایی (W/mK)	چگالی ($\frac{kg}{m^3}$)	
۴۶۰	۳۶	۷۷۸۰	فولاد M700
۳۷۶	۲۸۷	۸۸۰۰	مس (مفتول شده)
۱۲۰۰	۰.۱۳	۱۳۸۰	عایق Nomex
۴۵۰	۹۴	۷۷۸۰	آهن
۹۲۰	۲۴۰	۲۷۰۰	آلومینیوم
۵۱۰	۵۴	۷۸۰۰	فولاد
۱۰۰۰	۰.۰۲۶۲۴	۱.۲۲۵	هوا
۴۶۰	۷.۶	۷۳۰۰	آهنربای NdFeB

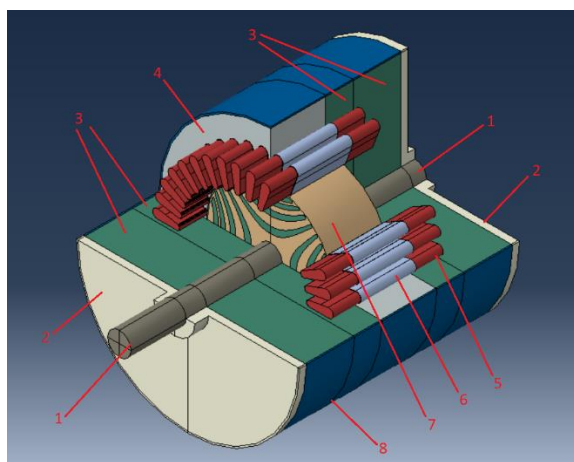
۲-۳- روش‌های انتقال حرارت

انتقال حرارت (Heat Transfer) به حرکت حرارت از دمای بالا به دمای پایین گفته می‌شود. زمانی که بین دو نقطه گرادیان دمایی (اختلاف دما) وجود داشته باشد، بین آنها انتقال حرارت صورت می‌گیرد. به طور کلی حرارت به سه صورت هدایت، جابجایی و تابش منتقل می‌شود. انتقال حرارت هدایتی نیاز به محیط مادی داشته و در جامدات و سیالات رخ می‌دهد. انتقال حرارت جابه‌جایی نیز نیاز به محیط مادی داشته و زمانی رخ می‌دهد که یک سیال بر روی یک سطح حرکت کند. انتقال حرارت تشعشعی نیاز به محیط مادی نداشته و همیشه بین اجسامی که اختلاف دما دارند روی می‌دهد ولی در دماهای پایین مقدار انتقال حرارت تشعشعی پایین است و می‌توان از آن صرف نظر کرد.

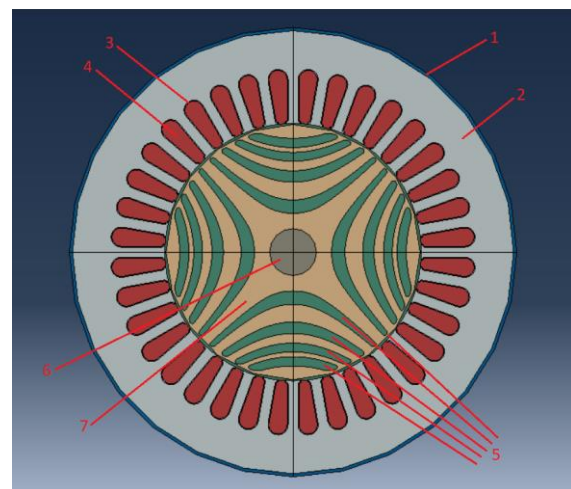
انتقال حرارت هدایتی در اثر تماس فیزیکی جسم سرد با جسم گرم تر رخ می‌دهد. در مقیاس میکروسکوپی، انتقال حرارت به یک جسم، باعث افزایش دامنه‌ی ارتعاش مولکول‌ها و اتم‌های آن می‌شود. انتقال حرارت هدایتی نیز در اثر ارتعاش اتم‌ها و مولکول‌های پرنرژی‌تر و برخورد آنها با اتم‌ها و مولکول‌های کم انرژی‌تر و در نتیجه انتقال بخشی از انرژی به آنها، رخ می‌دهد.

جدول ۲-۲: ضریب انتقال حرارت همرفت در دو دمای ۲۰ و ۴۰ درجه سانتیگراد

۴۰		۲۰	
h (W/m^2K)	دما ($^{\circ}C$)	h (W/m^2K)	دما ($^{\circ}C$)
۰.۱۴	۳۹.۸۵	۰.۱۴	۱۹.۸۵
۶.۹۵	۴۹.۸۵	۷.۹	۲۹.۸۵
۸.۴۹	۵۹.۸۵	۸.۶۶	۳۹.۸۵
۹.۵۶	۶۹.۸۵	۹.۷۵	۴۹.۸۵
۱۰.۴	۷۹.۸۵	۱۰.۶۱	۵۹.۸۵
۱۱.۱۱	۸۹.۸۵	۱۱.۳۳	۶۹.۸۵
۱۱.۷۳	۹۹.۸۵	۱۱.۹۶	۷۹.۸۵
۱۲.۲۸	۱۰۹.۸۵	۱۲.۵۲	۸۹.۸۵
۱۲.۷۸	۱۱۹.۸۵	۱۳.۰۳	۹۹.۸۵
۱۳.۲۴	۱۲۹.۸۵	۱۳.۵	۱۰۹.۸۵
۱۳.۶۶	۱۳۹.۸۵	۱۳.۹۳	۱۱۹.۸۵
۱۴.۰۶	۱۴۹.۸۵	۱۴.۳۴	۱۲۹.۸۵
۱۴.۴۳	۱۵۹.۸۵	۱۴.۷۲	۱۳۹.۸۵
۱۴.۷۸	۱۶۹.۸۵	۱۵.۰۸	۱۴۹.۸۵
۱۵.۱۱	۱۷۹.۸۵	۱۵.۴۲	۱۵۹.۸۵
۱۵.۴۳	۱۸۹.۸۵	۱۵.۷۴	۱۶۹.۸۵
۱۵.۷۳	۱۹۹.۸۵	۱۶.۰۵	۱۷۹.۸۵
۱۶.۰۲	۲۰۹.۸۵	۱۶.۳۵	۱۸۹.۸۵

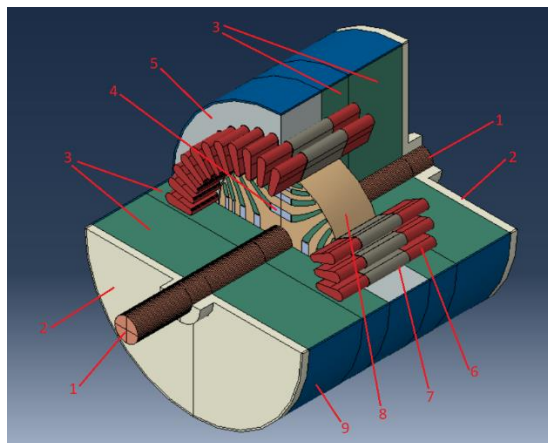


(ب)

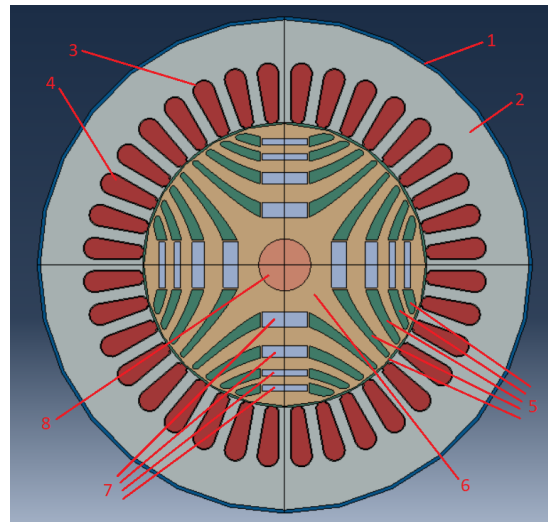


(الف)

شکل ۲-۱: (الف) هندسه سطح مقطع روتور بدون آهنربا: ۱- پوسته موتور ۲- استاتور ۳- لایه عایق ۴- سیم پیچ مسی ۵- هوا ۶- شفت روتور ۷- روتور؛ (ب) هندسه موتور الکتریکی بدون آهنربا: ۱- شفت موتور، ۲- درپوش پوسته آلومینیومی، ۳- هوا، ۴- استاتور، ۵- سیم پیچ مسی، ۶- عایق سیم پیچ، ۷- روتور، ۸- پوسته آهنی موتور



(ب)



(الف)

شکل ۲-۲: (الف) هندسه سطح مقطع روتور دارای آهنربا: ۱- پوسته موتور ۲- استاتور ۳- لایه عایق ۴- سیم پیچ مسی ۵- هوا ۶- روتور ۷- آهنربا ۸- شفت روتور؛ (ب) هندسه موتور الکتریکی دارای آهنربا: ۱- شفت موتور ۲- درپوش پوسته آلومینیومی موتور ۳- هوا ۴- آهنربا، ۵- استاتور ۶- سیم پیچ مسی ۷- عایق حرارتی سیم پیچ ۸- روتور ۹- پوسته آهنی

این نوع انتقال حرارت بیشتر درون اجسام صلب یا بین اجسام صلبی که با هم در تماس هستند رخ داده و کمتر در مورد سیالات (به خصوص گازها) اتفاق می‌افتد. هدایت در سیالات از طریق برخورد و نفوذ مولکول‌های پراثرتری تر به مولکول‌های کم انرژی تر رخ می‌دهد. اما در جامدات، به صورت ترکیبی از ارتعاش مولکول‌ها و انتقال الکترون‌های آزاد بین آنها رخ می‌دهد. در شروع هدایت، از آنجا که گرادیان دمایی قابل توجه است، دمای جسم به صورت تابعی از زمان تغییر می‌کند. به این بخش از هدایت، هدایت گذرا می‌گویند. اما با گذشت زمان، گرادیان دمایی کاهش می‌یابد و در نتیجه سیستم به حالت تعادل می‌رسد. در حالت تعادل، انرژی حرارتی خروجی از یک المان جسم یا سطح، دقیقاً برابر با انرژی ورودی به آن است. به این بخش از هدایت، هدایت پایا می‌گویند.

انتقال حرارت جابه‌جایی یا همرفت، شکلی از انتقال انرژی بین یک سطح جامد و مایع یا گاز متحرک موجود در مجاورت آن است که ترکیبی از اثرات هدایت و حرکت سیال را در خود دارد. در واقع، انتقال حرارت همرفتی، جابه‌جا شدن حرارت از یک مکان به مکان دیگر در اثر حرکت سیال، یا به عبارت دیگر، در اثر جابه‌جا شدن جرم رخ می‌دهد. هرچه حرکت سیال سریع‌تر باشد، نرخ انتقال حرارت بیشتر است. اگر یک سطح خنک شونده با جریان هوا را در نظر بگیریم، در ابتدا انرژی سطح از طریق هدایت به لایه‌ی هوای مجاور منتقل شده و پس از آن، این انرژی توسط جابه‌جایی مولکول‌ها از سطح دور می‌شود. در واقع، این نوع انتقال حرارت با ترکیبی از هدایت و حرکت توده‌ای یا میکروسکوپی ذرات سیال که لایه‌ی مجاور را از سطح دور کرده و آن را با هوای خنک‌تر جایگزین می‌کند، روی می‌دهد.

تشعشع، انرژی ساطع شده از سطح جسم به صورت امواج الکترومغناطیس و به دلیل تغییرات الکتریکی اتم‌ها و مولکول‌ها است. برخلاف هدایت و جابه‌جایی، انتقال حرارت تشعشعی نیازی به محیط مادی ندارد. این انرژی با سرعت نور انتقال یافته و در محیط خلأ نیز منتشر می‌شود. تشعشع یک فرایند حجمی است و تمام جامدات، مایعات و گازها، جذب و ساطع کردن انرژی را انجام می‌دهند. اما تشعشع را برای جامدات غیر شفاف مانند سنگ و چوب که امواج ساطع شده از بخش‌های درونی آنها، به سطحشان نمی‌رسد، معمولاً به عنوان یک پدیده‌ی سطحی در نظر می‌گیرند. در این اجسام، تشعشع جذب شده نیز تنها تا عمق چند میکرون از سطح آنان اثر گذار است.

۲-۴- مدل سازی در نرم افزار

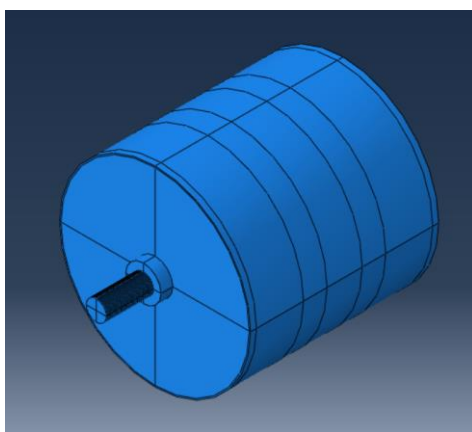
در تحلیل حرارتی موتور الکتریکی، در اثر عبور جریان الکتریکی، در سیم‌پیچ‌ها و هسته استاتور، حرارت ایجاد می‌شود. این حرارت به دو روش به اطراف منتقل می‌شود. روش اول، هدایت گرما به سایر اجزای موتور الکتریکی از جمله روتور و پوسته موتور و هوای

محبوس شده در داخل موتور است. روش دوم، انتقال گرما به هوای اطراف موتور است. در این روش تمام سطوحی که با هوای اطراف موتور ارتباط دارند در انتقال حرارت شرکت می کنند. در تحقیق پیش رو، فرضیات زیر برای مدل سازی در نظر گرفته شده است.

- ۱- ضریب انتقال حرارت همرفتی با تغییرات دمای سطوح تغییر می کند.
- ۲- انتقال حرارت در فاصله هوایی بین روتور و استاتور به روش هدایت از طریق هوای موجود صورت می گیرد.
- ۳- انتقال حرارت بین سطوح داخلی موتور و هوای محبوس شده در موتور به روش هدایت است.
- ۴- از اثرات تغییر خواص حرارتی مواد در اثر تغییر دما صرف نظر شده است.
- ۵- به دلیل دمای پایین، از انتقال حرارت تشعشی صرف نظر شده است.
- ۶- اتلاف حرارتی در سیم پیچ ها و هسته استاتور به صورت یکنواخت در آنها توزیع شده است

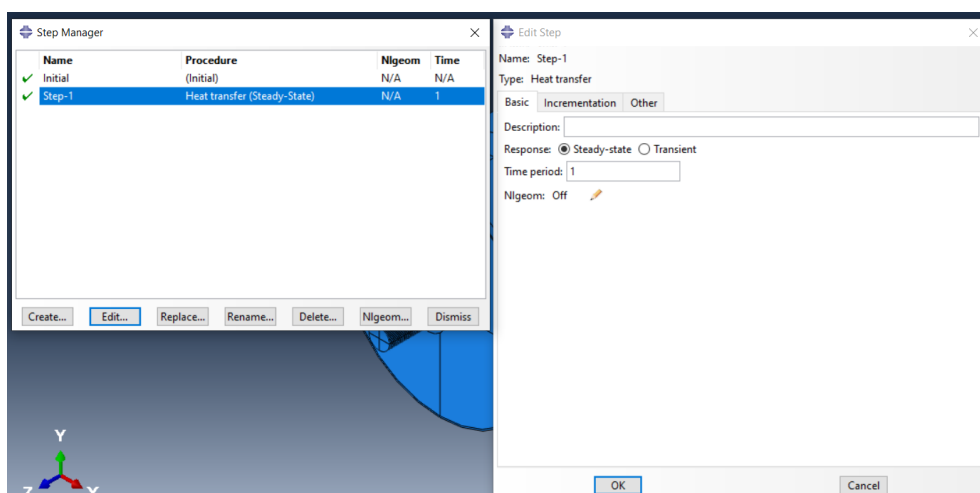
۱-۴-۲- تحلیل حرارتی

مدل سازی مطابق شکل ۲-۱ و شکل ۲-۲ در محیط نرم افزار Abaqus انجام شده است. در شکل ۲-۳ مدل کامل موتور الکتریکی مشاهده می شود. پس از ایجاد مدل هندسی، تمام مواد با توجه به خواص حرارتی ارائه شده در جدول ۲-۱ تعریف و به قسمت های مربوطه اعمال می شوند. در این شبیه سازی از حلگر^۲ انتقال حرارت مطابق شکل ۲-۴ استفاده شده است. در این تحلیل دو گزینه برای حل وجود دارد. گزینه transient که مربوط به انتقال حرارت حالت گذرا بوده و گزینه steady state که مربوط به حالت پایدار حرارتی است. در مدل موتور الکتریکی، در صورت انتخاب حالت transient، بعد از گذشت زمان مشخصی، سیستم به حالت تعادل می رسد و نتایج تحلیل حالت گذرا و حالت پایدار با هم برابر می شوند. بنابراین در این تحقیق از حالت پایدار حلگر استفاده شده است. همان طور که در فصل اول اشاره شد، تمام سطوح آزاد مدل که با هوای اطراف در ارتباط هستند، دارای انتقال حرارت همرفتی با هوای اطراف هستند. در این تحقیق، مقدار ضریب همرفتی به عنوان تابعی از درجه حرارت در نظر گرفته شده است که در شکل ۲-۵ مشاهده می شود. تعیین دمای حرارت محیط (sink temperature) نیز در همین قسمت انجام می شود که با توجه به شکل ۲-۵ برابر با ۴۰ درجه سانتیگراد است. دمای اولیه مدل نیز مطابق با شکل ۲-۶ برابر با ۴۰ درجه سانتیگراد است.

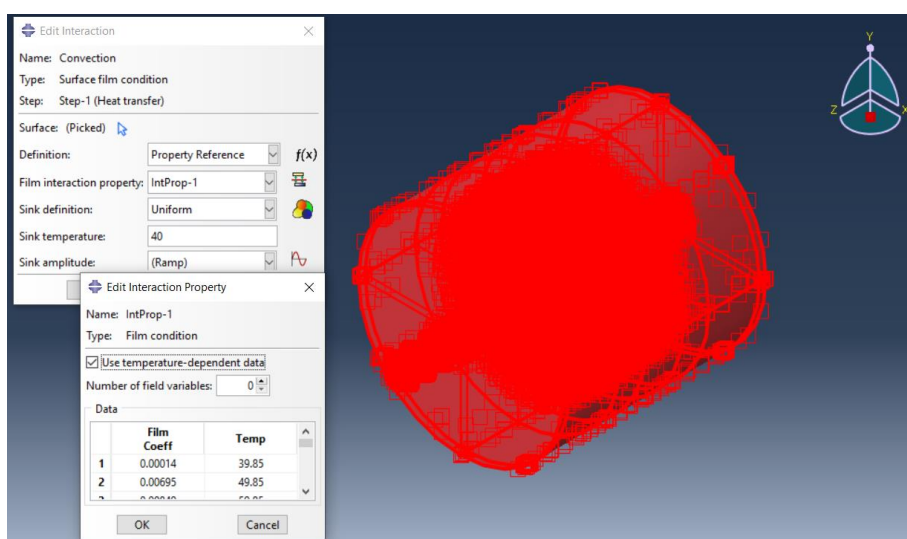


شکل ۲-۳: مدل موتور الکتریکی در نرم افزار

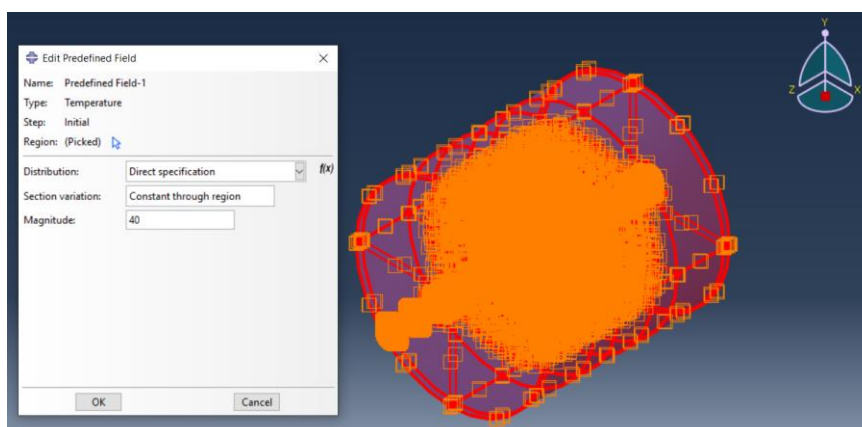
² Solver



شکل ۴-۲: انتخاب حلگر تحلیل حرارتی

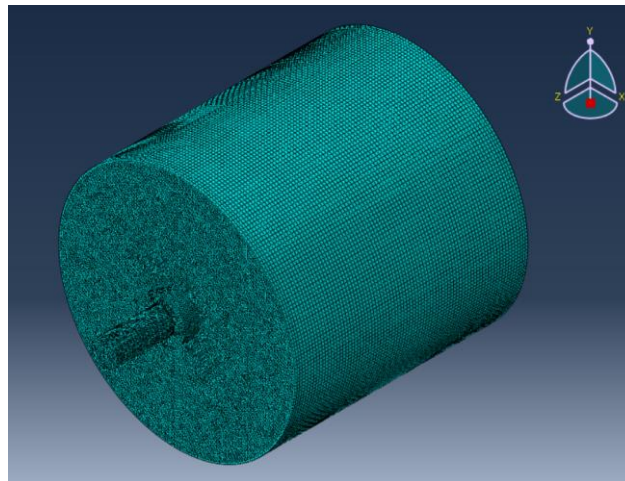


شکل ۵-۲: تعیین شرایط انتقال حرارت همرفتی



شکل ۶-۲: اختصاص دمای اولیه به مدل

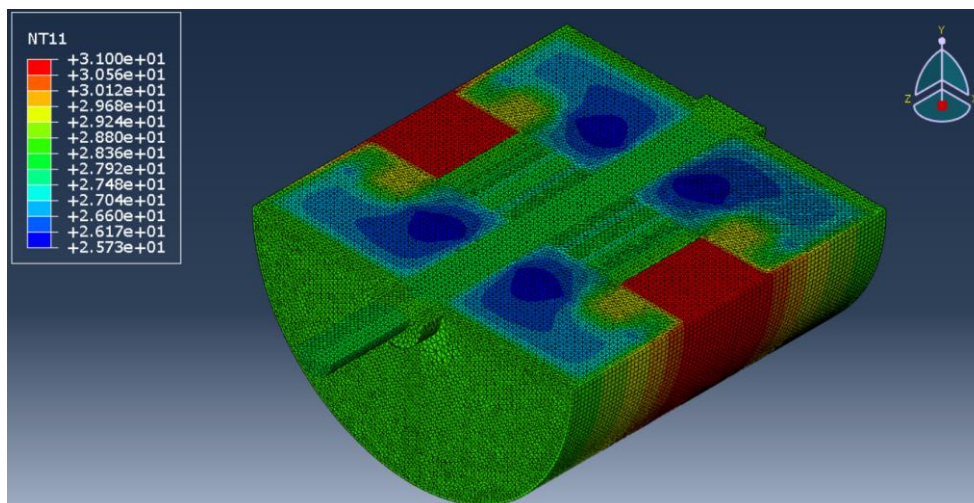
شکل ۷-۲ مدل مش خورده را نمایش می‌دهد. با توجه به هندسه پیچیده مدل، تعداد کل المان‌ها در مدل زیاد بوده و در نتیجه، زمان تحلیل طولانی است و حافظه زیادی برای حل مسئله نیاز خواهد بود. تعداد کل المان‌ها در مدل بدون آهنربا برابر با ۳۸۸۲۸۰۴ و در مدل دارای آهنربا برابر با ۴۵۲۰۵۴۵ المان است. از المان‌های DC3D4 و DC3D8 برای شبیه‌سازی استفاده شده است. برای شبیه‌سازی حرارت در مدل، از زیربرنامه hetval استفاده شده است. به کمک این زیربرنامه می‌توان انرژی حرارتی تولید شده در واحد حجم را به قسمت‌های مورد نظر اختصاص داد. مقدار انرژی حرارتی تولید شده برابر با انرژی حرارتی کل در هر قسمت تقسیم بر حجم هر قسمت در نظر گرفته شده است. این زیربرنامه برای مدل بدون آهنربا در پیوست اول مشاهده می‌شود.



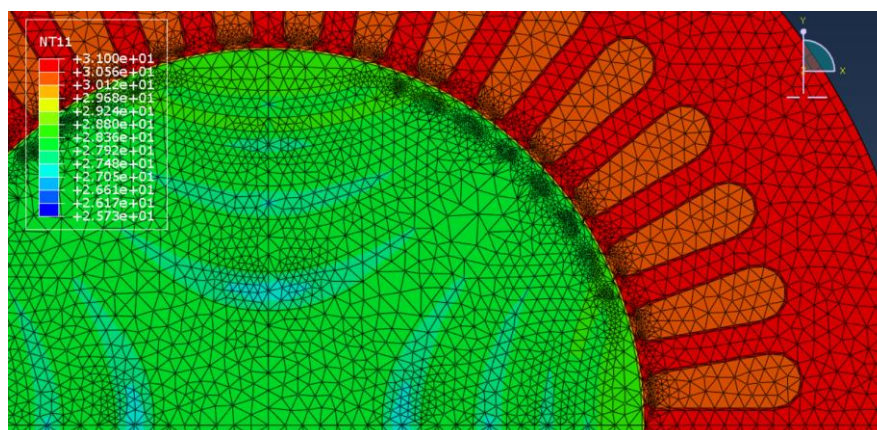
شکل ۷-۲: مدل مش‌زنی موتور الکتریکی

۲-۵- تحلیل مدل بدون آهنربا

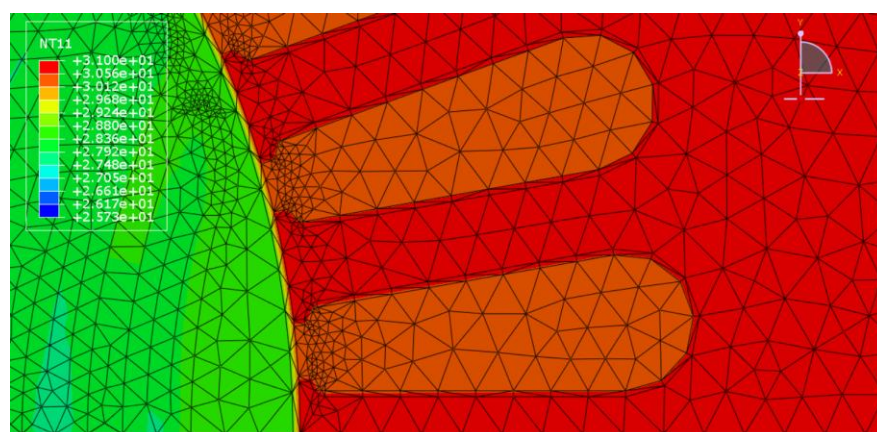
در شکل ۸-۲ تا شکل ۱۴-۲ نتایج توزیع حرارت در موتور بدون آهنربا با فرض دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد مشاهده می‌شوند. شکل ۸-۲ توزیع حرارت را در مدل برش خورده موتور نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین حرارت در ناحیه استاتور وجود دارد. به دلیل تماس استاتور با پوسته، بیشتر این حرارت از طریق پوسته مجاور با استاتور به محیط اطراف منتقل می‌شود. هوای محبوس در موتور نیز کمترین دما را دارد. شکل ۹-۲ و شکل ۱۰-۲ تصویری دقیق‌تر از حرارت ناحیه روتور و استاتور ارائه می‌کنند. به طور کلی دمای هسته استاتور از دمای سیم‌پیچ‌ها بالاتر است. مطابق با شکل ۱۰-۲ مقداری از حرارت سیم‌پیچ‌ها و استاتور توسط لایه هوایی بین استاتور و روتور، به روتور منتقل می‌شود. شکل ۱۱-۲ و شکل ۱۲-۲ توزیع حرارت را در سیم‌پیچ‌ها و استاتور نشان می‌دهند. اندکی اختلاف دما در توزیع حرارت در سیم‌پیچ‌ها مشاهده می‌شود و سیم‌پیچ‌هایی که در قسمت روتور رو به روی آنها، شیار هوا وجود ندارد دمای پایین‌تری دارند. توزیع حرارت در شکل ۱۳-۲ نیز نشان می‌دهد که در نواحی دورتر از شیار هوا در روتور، دما اندکی پایین‌تر است. توزیع حرارت در پوسته موتور، در شرایطی که دمای محیط ۲۵ درجه سانتیگراد باشد نیز در شکل ۱۴-۲ نشان داده شده است.



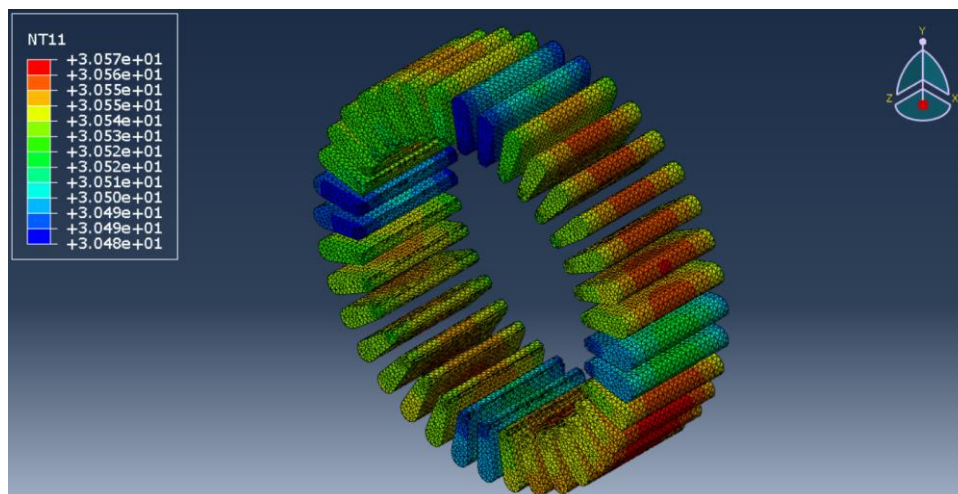
شکل ۸-۲: توزیع حرارت در موتور الکتریکی بدون آهنربا، دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد



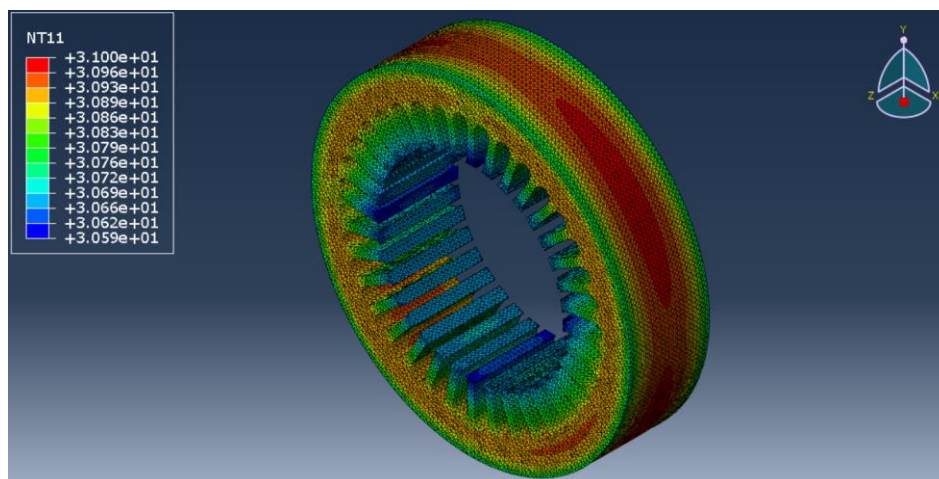
شکل ۹-۲: توزیع حرارت در اطراف روتور و استاتور، دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد



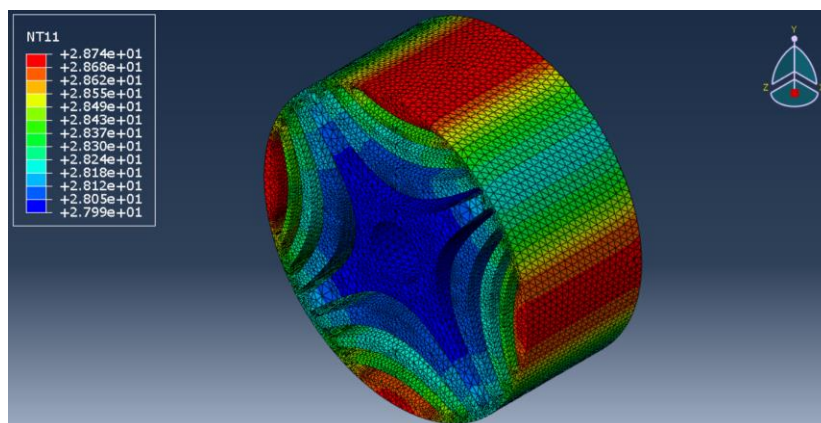
شکل ۱۰-۲: توزیع حرارت در اطراف سیم پیچ مسی، دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد



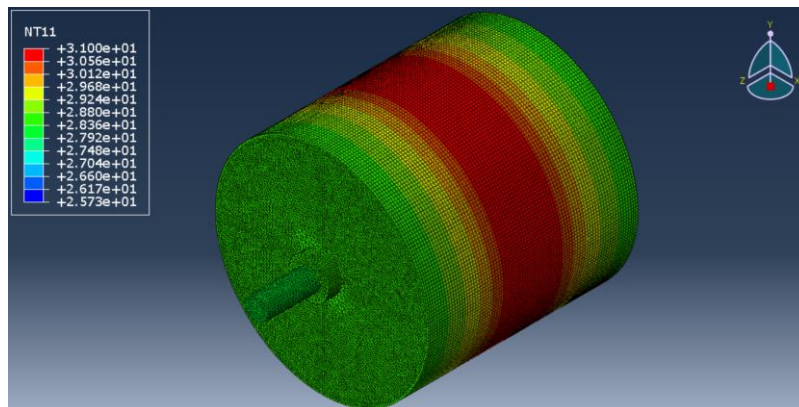
شکل ۱۱-۲: توزیع حرارت در سیم پیچ‌های مسی، دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد



شکل ۱۲-۲: توزیع حرارت در استاتور، دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد

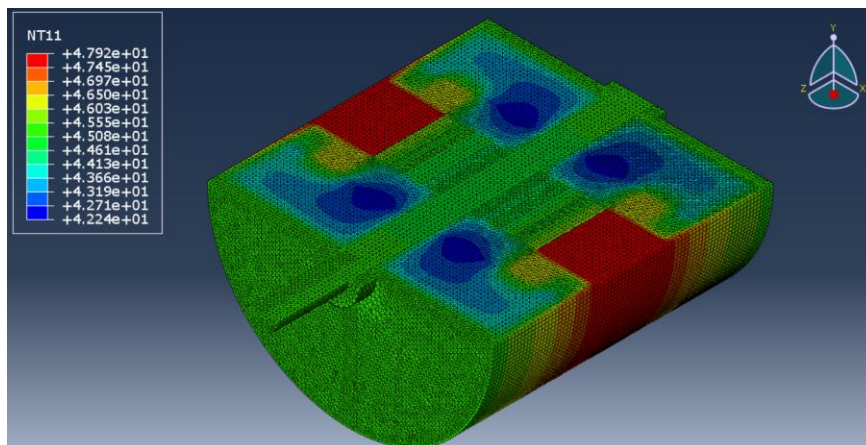


شکل ۱۳-۲: توزیع حرارت در روتور، دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد

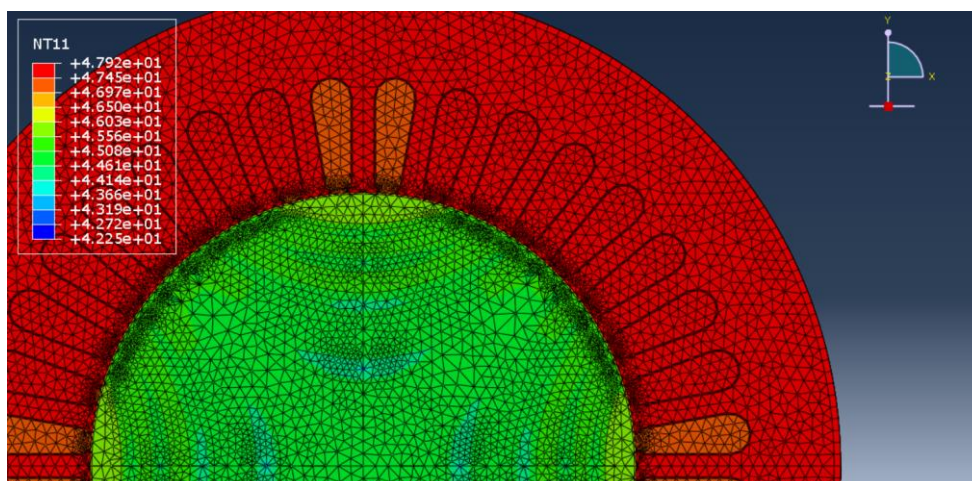


شکل ۲-۱۴: توزیع حرارت در پوسته موتور، دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد

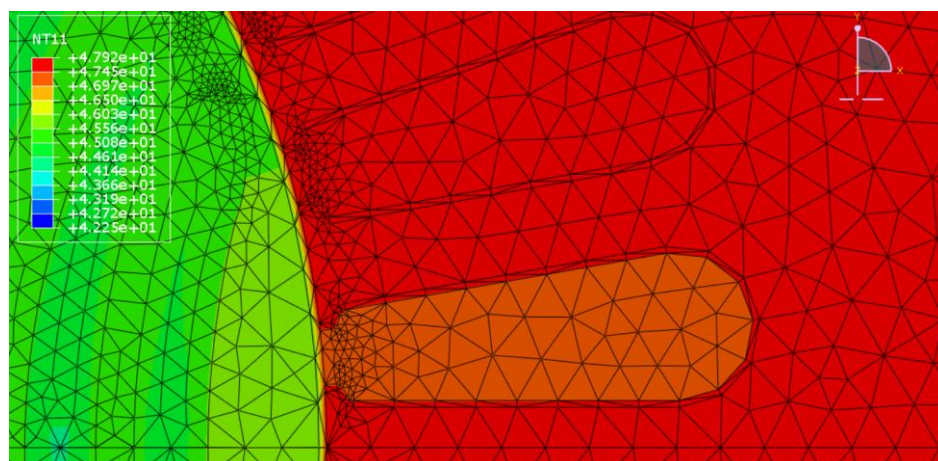
در شکل ۲-۱۵ تا شکل ۲-۲۱ توزیع دما در مدل بدون آهنربا با فرض دمای محیط برابر ۴۰ درجه مشاهده می‌شود. توزیع حرارت در مدل مشابه توزیع حرارت در مدل با دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد است. ناحیه اطراف استاتور بیشترین دما و هوای محبوس در مدل کمترین دما را دارند. همچنین همانند مدل قبلی، اندکی اختلاف در دمای سیم‌پیچ‌ها مشاهده می‌شود و سیم‌پیچ‌هایی که در ناحیه روتور روبه‌روی آنها، هوای کمتری وجود دارد، دمای کمتری دارند. هرچند که این اختلاف دما بسیار کم بوده و با چرخش روتور از بین می‌رود.



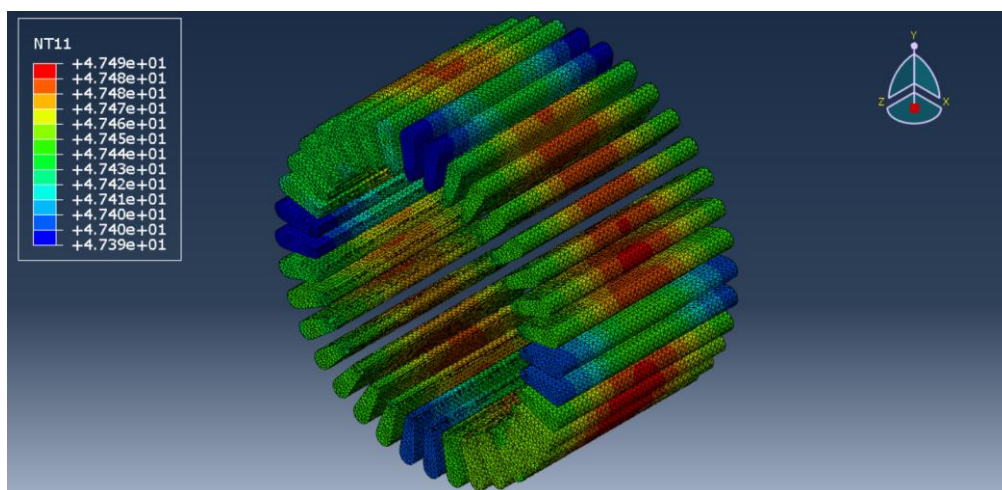
شکل ۲-۱۵: توزیع حرارت در موتور الکتریکی بدون آهنربا، دمای اولیه ۴۰ درجه سانتیگراد



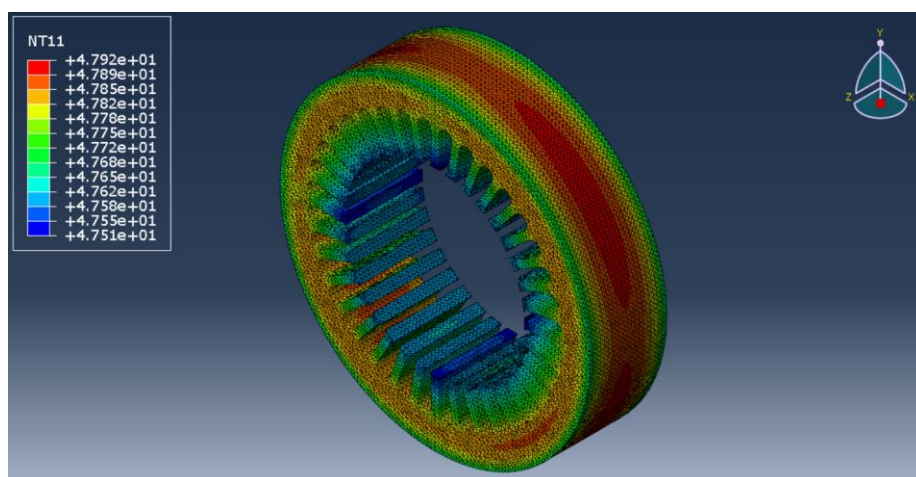
شکل ۲-۱۶: توزیع حرارت در اطراف روتور و استاتور، دمای اولیه ۴۰ درجه سانتیگراد



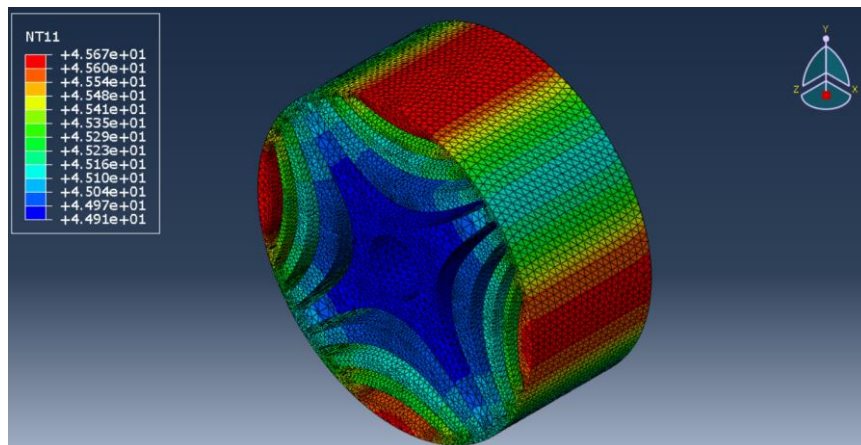
شکل ۱۷-۲: توزیع حرارت در اطراف سیم پیچ مسی، دمای اولیه 40°C سانتیگراد



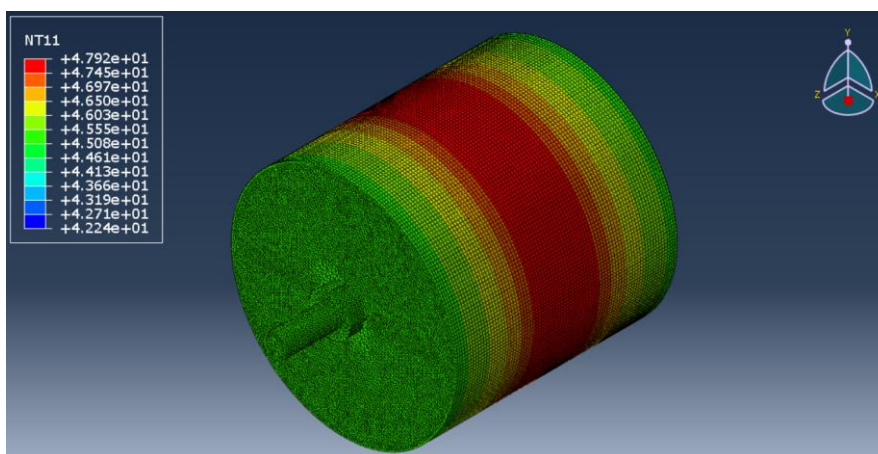
شکل ۱۸-۲: توزیع حرارت در سیم پیچ‌های مسی، دمای اولیه 40°C سانتیگراد



شکل ۱۹-۲: توزیع حرارت در استاتور، دمای اولیه 40°C سانتیگراد



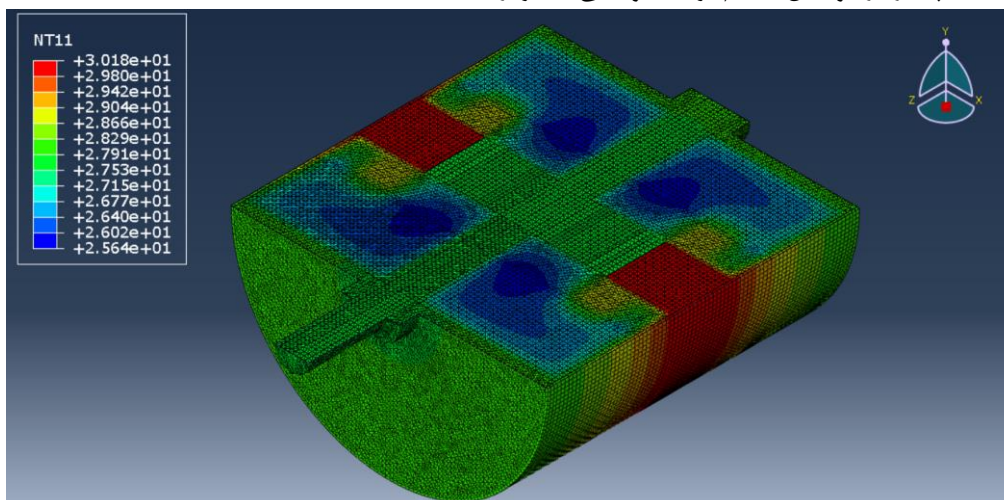
شکل ۲۰-۲: توزیع حرارت در روتور، دمای اولیه ۴۰ درجه سانتیگراد



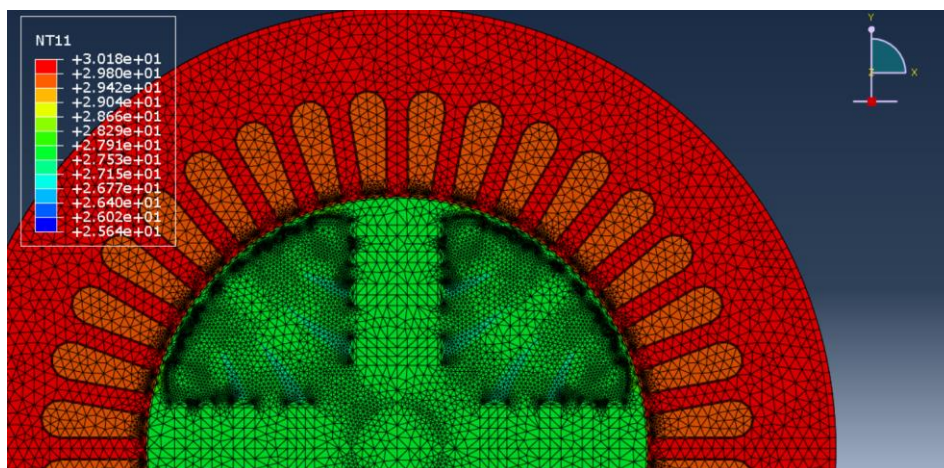
شکل ۲۱-۲: توزیع حرارت در پوسته موتور، دمای اولیه ۴۰ درجه سانتیگراد

۲-۶- تحلیل مدل دارای آهنربا

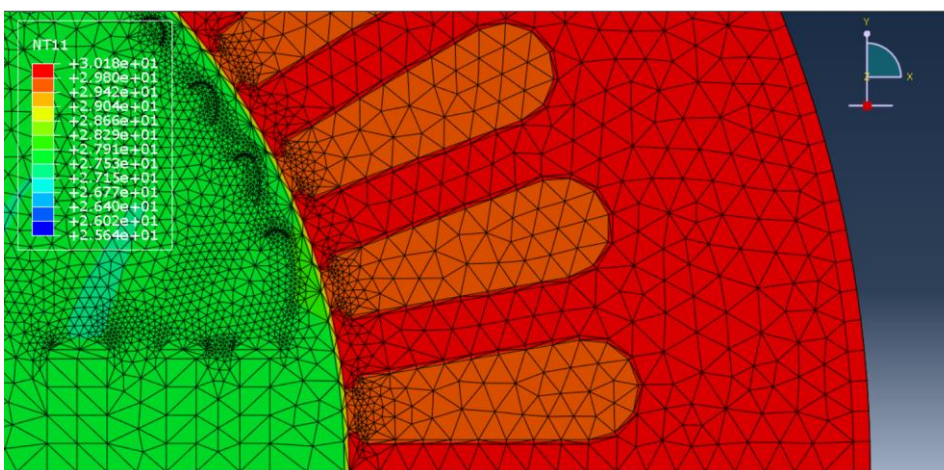
توزیع حرارت در مدل دارای آهنربا در شکل ۲۲-۲ تا شکل ۳۵-۲ برای دو دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد و ۴۰ درجه سانتیگراد مشاهده می‌شود. الگوی توزیع حرارتی در این مدل تفاوت چندانی با مدل بدون آهنربا ندارد و با وجود اختلاف در اتلاف حرارتی، مقدار دمای حالت پایدار در دو مدل به هم نزدیک و کمی بالاتر از دمای محیط است.



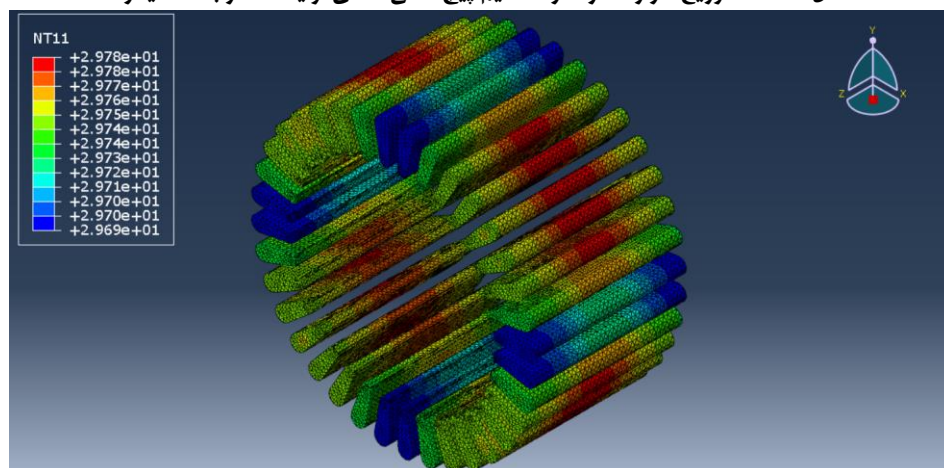
شکل ۲۲-۲: توزیع حرارت در موتور دارای آهنربا، دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد



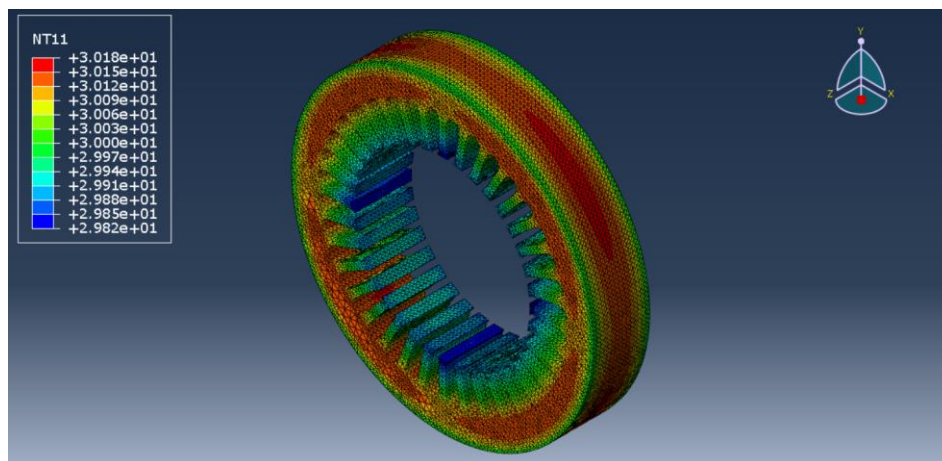
شکل ۲۳-۲: توزیع حرارت در اطراف روتور و استاتور، دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد



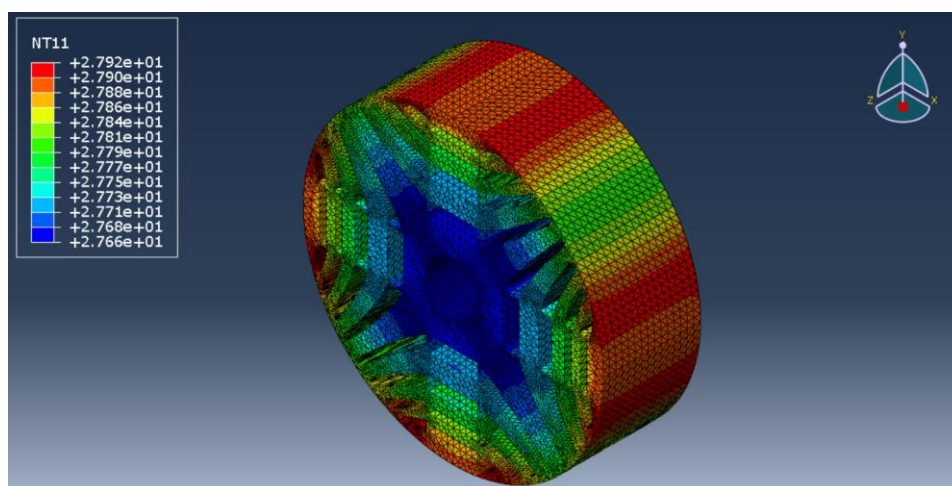
شکل ۲۴-۲: توزیع حرارت در اطراف سیم پیچ مسی، دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد



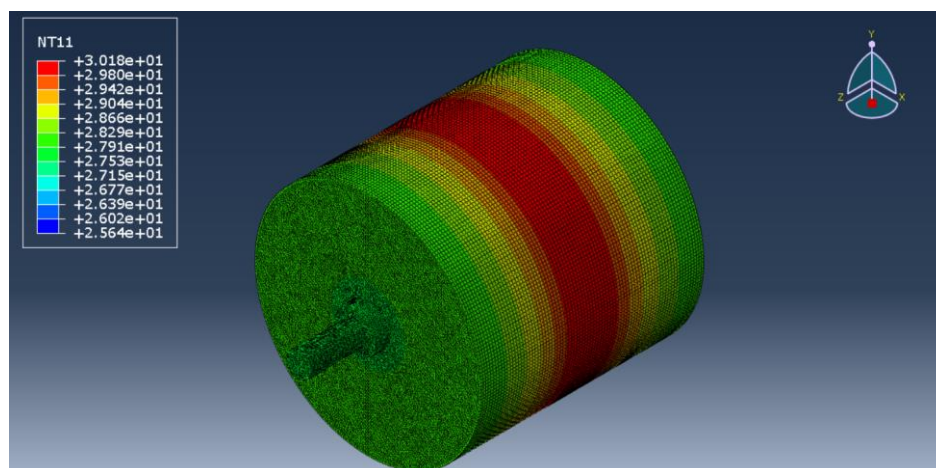
شکل ۲۵-۲: توزیع حرارت در سیم پیچ‌های مسی، دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد



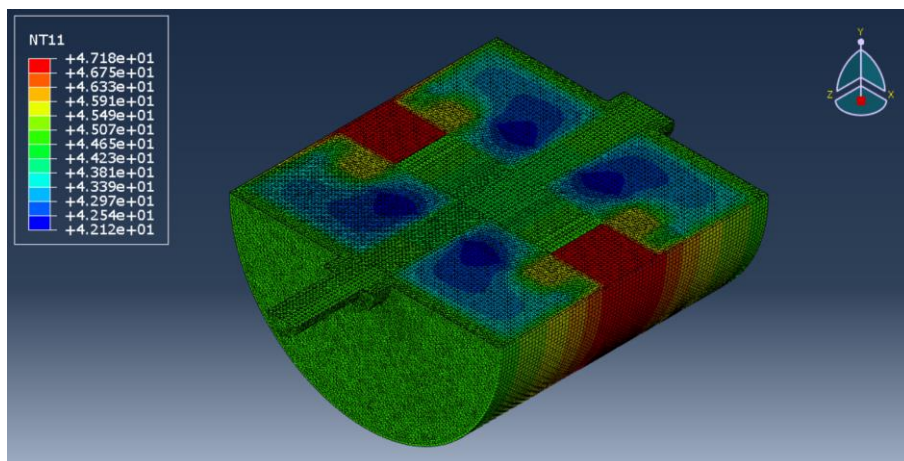
شکل ۲۶-۲: توزیع حرارت در استاتور، دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد



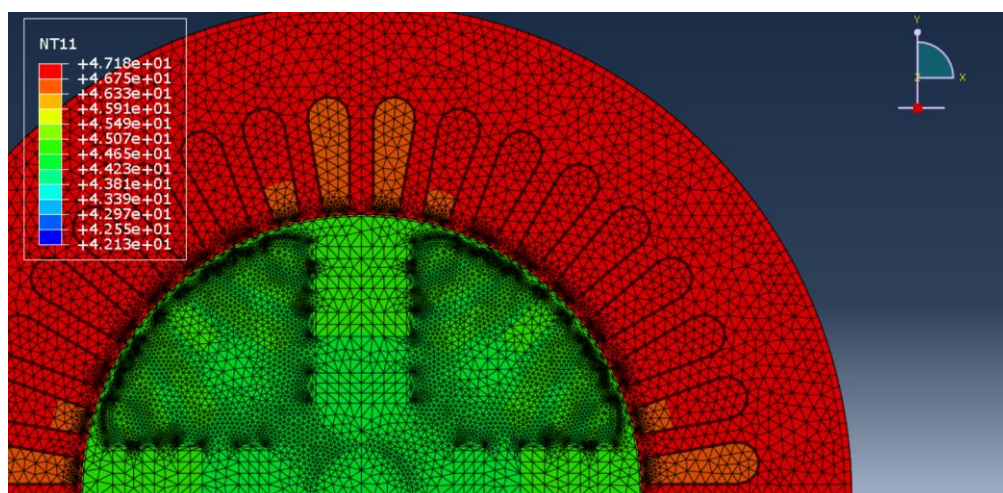
شکل ۲۷-۲: توزیع حرارت در روتور، دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد



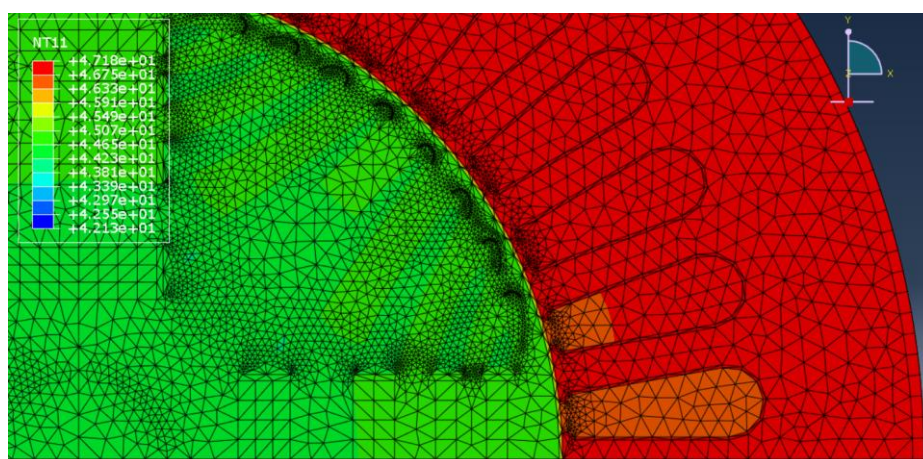
شکل ۲۸-۲: توزیع حرارت در پوسته موتور، دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد



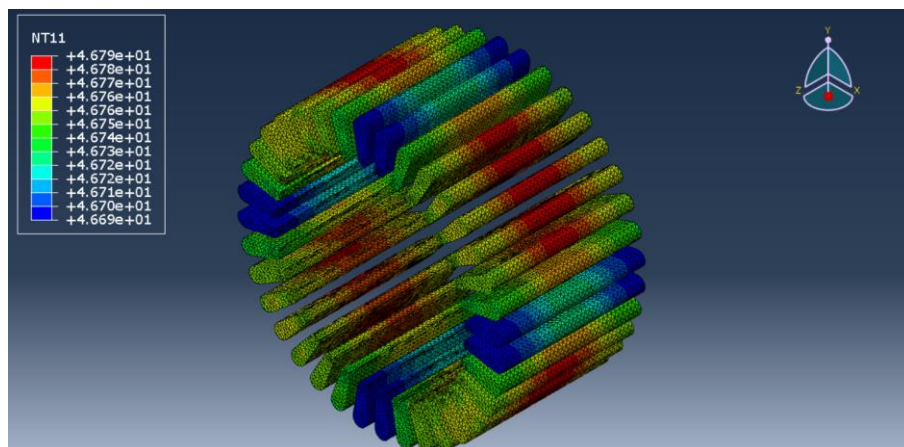
شکل ۲۹-۲: توزیع حرارت در موتور دارای آهنربا، دمای اولیه 40°C درجه سانتیگراد



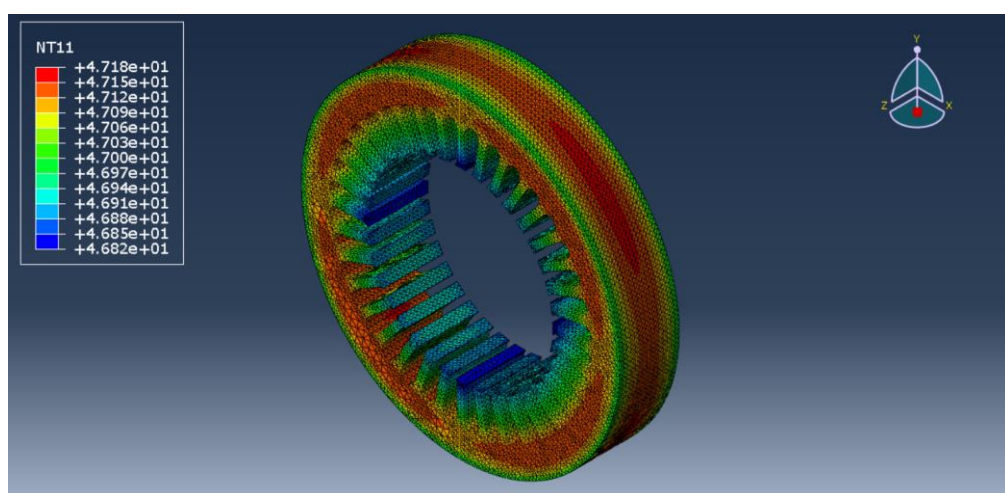
شکل ۳۰-۲: توزیع حرارت در اطراف روتور و استاتور، دمای اولیه 40°C درجه سانتیگراد



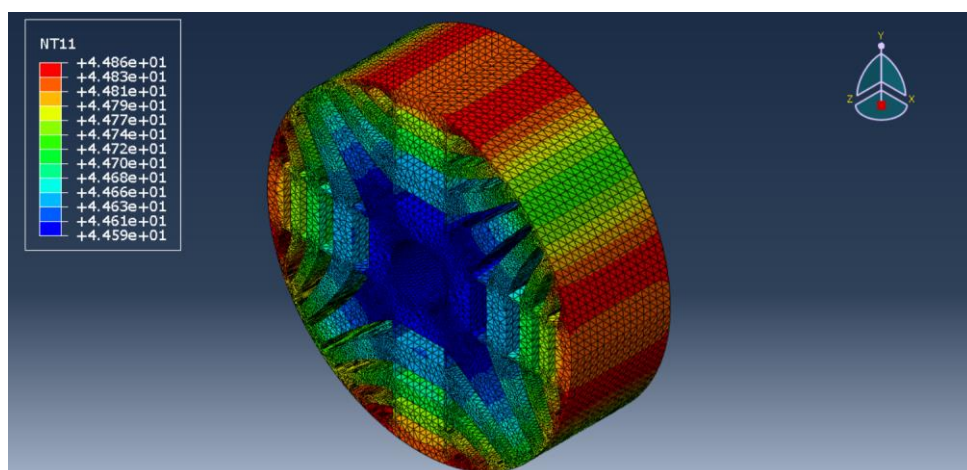
شکل ۳۱-۲: توزیع حرارت در اطراف سیم پیچ مسی، دمای اولیه 40°C درجه سانتیگراد



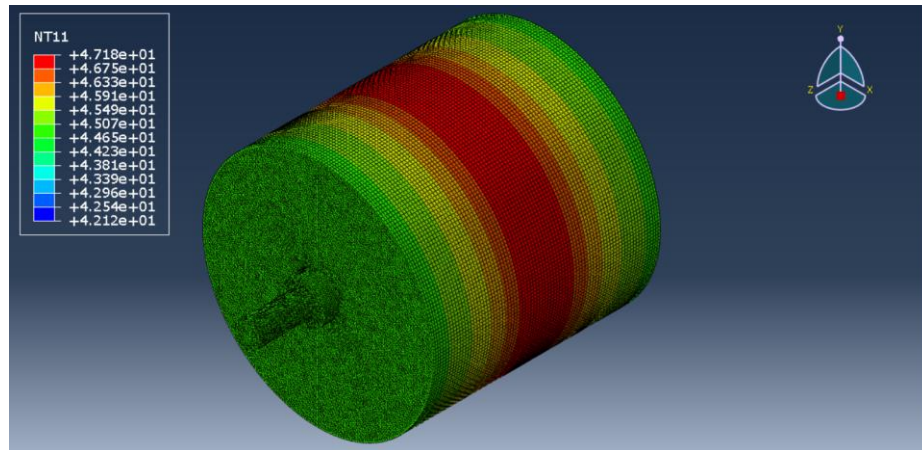
شکل ۳۲-۲: توزیع حرارت در سیم پیچ‌های مسی، دمای اولیه ۴۰ درجه سانتیگراد



شکل ۳۳-۲: توزیع حرارت در استاتور، دمای اولیه ۴۰ درجه سانتیگراد



شکل ۳۴-۲: توزیع حرارت در روتور، دمای اولیه ۴۰ درجه سانتیگراد



شکل ۳۵-۲: توزیع حرارت در پوسته موتور، دمای اولیه ۴۰ درجه سانتیگراد

پیوست

```

SUBROUTINE HETVAL (CMNAME, TEMP, TIME, DTIME, STATEV, FLUX,
1 PREDEF, DPRED)
C
C   INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'
C
C   CHARACTER*80 CMNAME
C
C   DIMENSION TEMP(2), STATEV(*), PREDEF(*), TIME(2), FLUX(2),
1 DPRED(*)

  if (CMNAME == 'Copper') then
    FLUX(1) = 0.33775693
    FLUX(2) = 0.0
  else if (CMNAME == 'M700') then
    FLUX(1) = 0.05544483
    FLUX(2) = 0.0
  end if

RETURN
END

```


فصل سوم: تحلیل مکانیکی موتور سنکرون رلوکتانسی با آهن ربای کمکی

۳-۱- مقدمه

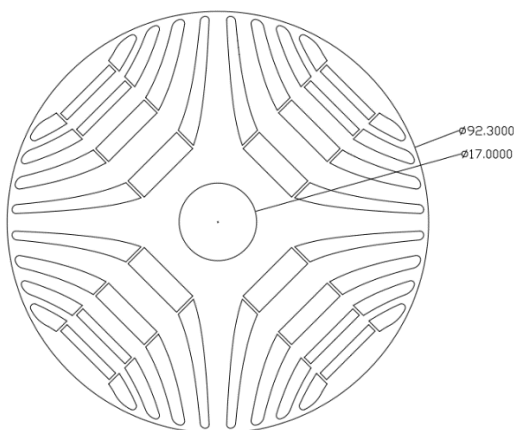
استفاده از روش‌های عددی جهت طراحی سیستم‌های مکانیکی به عنوان ابزاری قدرتمند در صنعت شناخته شده است. این روش‌ها امکان بررسی شرایط نهایی سیستم را قبل از ساخت فراهم کرده و به بهبود طراحی و رفع عیوب موجود در آن کمک می‌کنند.

۳-۲- تعریف مسئله

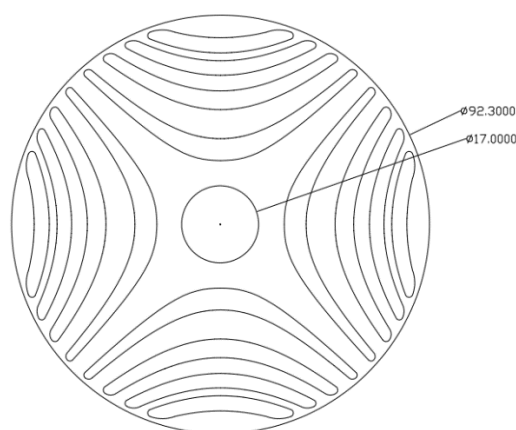
در این تحقیق، هدف بررسی مقاومت و پایداری روتور یک موتور مغناطیسی است که تحت اثر دوران و گشتاور مغناطیسی قرار دارد. دو نوع طرح متفاوت برای روتور وجود دارد که در یکی از این طرح‌ها، از آهنربای دائمی استفاده شده است. طول این روتور در امتداد شفت موتور برابر با ۴۰ در طرح بدون آهنربا و ۳۰ میلیمتر در طرح دارای آهنربا است. با توجه به این که این روتور از کنار هم قرار دادن دیسک‌های بریده شده از ورق فلزی با ضخامت ۰.۵ میلیمتر ساخته می‌شود، مدل‌سازی یک‌بار با فرض یکپارچه بودن روتور انجام شده است و همچنین تحلیل یکی از این دیسک‌ها به صورت جداگانه برای هر یک از طرح‌های متفاوت روتور انجام شده است. در شکل ۳-۱ الف و ب هندسه سطح مقطع این روتورها مشاهده می‌شوند. به منظور مدل‌سازی، خواص عمومی فولاد به عنوان خواص مکانیکی برای روتور در نظر گرفته شده است که این خواص در جدول ۳-۱ مشاهده می‌شوند. مکانیکی آهنربا نیز در جدول ۳-۲ مشاهده می‌شود.

جدول ۳-۱: خواص عمومی فولاد

ویژگی	مقدار	واحد
چگالی	۷۸۲۰	kg/m^3
مدول الاستیک	۲۰۰	GPa
ضریب پواسون	۰.۲۹	—



(ب)



(الف)

شکل ۳-۱: (الف) هندسه سطح مقطع روتور بدون آهنربا؛ (ب) هندسه سطح مقطع روتور دارای آهنربا

جدول ۳-۲: خواص آهنربا

ویژگی	مقدار	واحد
چگالی	۷۵۰۰	kg/m^3
مدول الاستیک	۱۶۰	GPa
ضریب پواسون	۰.۲۴	—

۳-۳- حالت های خرابی

با توجه به شرایط هندسی و عملکردی مدل، سه حالت خرابی برای آن وجود دارد که هر یک از آن‌ها باید به صورت جداگانه تحلیل و نتایج آن‌ها بررسی شوند.

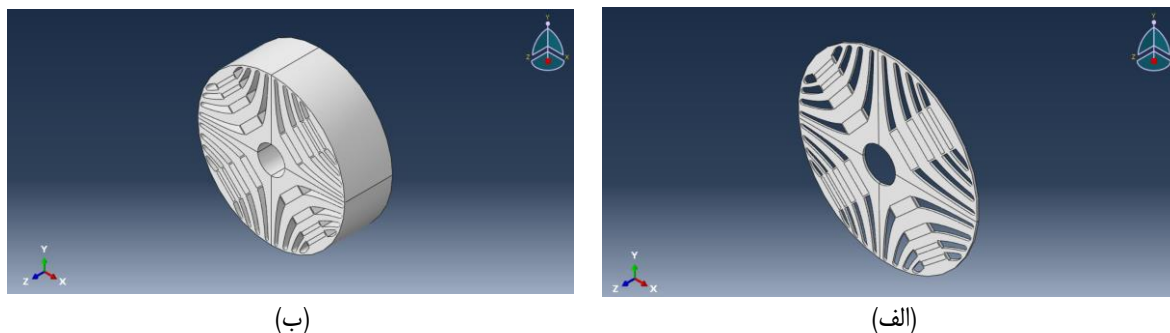
حالت خرابی اول، خروج روتور از ناحیه الاستیک و ورود آن به منطقه پلاستیک و در نتیجه تغییر شکل دائمی آن است. این تغییر شکل دائمی ممکن است علاوه بر ایجاد تغییر در هندسه و توزیع میدان مغناطیسی، باعث ایجاد نامیزانی دوار (عدم بالانس) و برخورد لبه روتور به قطعات مجاور شود. در تحلیل الاستیک می‌توان با وارد کردن تنش پلاستیک در نرم‌افزار یا مقایسه توسط کاربر، خروج قطعه از حالت الاستیک را بررسی کرد. در این تحلیل هدف آن است که مقدار تنش مایسز در قطعه از مقدار تنش تسلیم (کوچکترین تنشی که به ازای آن قطعه وارد حالت پلاستیک می‌شود) کوچکتر باشد.

حالت خرابی دوم ناشی از کمانش است. کمانش در مواقعی اتفاق می‌افتد که سیستم تحت تنش فشاری باشد و به اندازه کافی نازک یا لاغر باشد. در این صورت تحت اثر تنش فشاری، قطعه یا قسمتی از آن دچار حرکت در جهتی عمود بر جهت تنش فشاری می‌شود. این حالت به خصوص در ستون‌ها که از نظر هندسی لاغر و باریک هستند و تحت تنش فشاری قرار دارند اهمیت دارد. در تحلیل کمانش هدف یافتن بار بحرانی است که به ازای آن بار و مقادیر بیشتر از آن کمانش در قطعه روی می‌دهد. در این تحقیق با توجه به این که نیروی گریز از مرکز در مدل بدون آهنربا بار فشاری ایجاد می‌کند و ضخامت ورق نیز نسبت به سایر ابعاد آن کوچک‌تر است، بررسی کمانش اهمیت دارد.

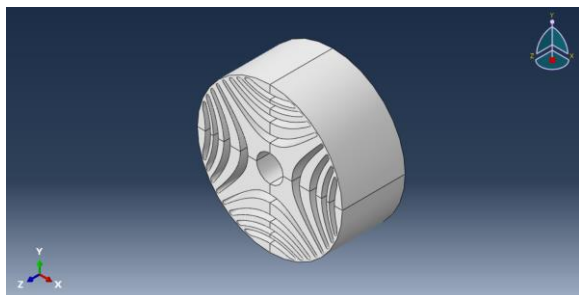
حالت خرابی سوم که بر خلاف دو حالت قبلی، یک حالت خرابی دینامیکی است، تحریک سیستم با فرکانسی برابر با فرکانس‌های طبیعی آن است. فرکانس طبیعی هر سیستم مکانیکی از ویژگی‌های ساختاری آن سیستم است که شناسایی آن در طراحی سیستم‌های دینامیکی بسیار با اهمیت است. در صورتی که یک سیستم مکانیکی با فرکانسی معادل با فرکانس طبیعی تحریک شود، به دلیل اثر مخرب پدیده تشدید دچار آسیب می‌شود. هدف از تحلیل فرکانسی، شناسایی فرکانس‌های طبیعی سیستم و اجتناب از کارکرد قطعه در آن فرکانس‌ها و فرکانس‌های نزدیک به آن است.

۳-۴- مدل سازی در آباکوس

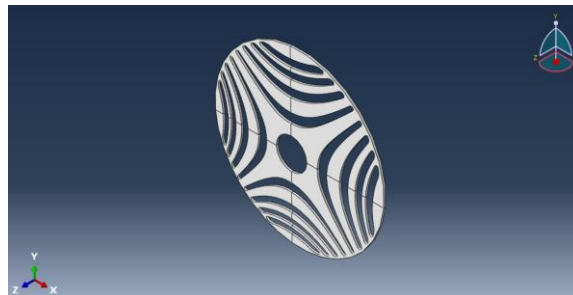
پس از وارد کردن هندسه سطح مقطع به نرم‌افزار، ضخامت مورد نظر در آن ایجاد شده و مدل سه بعدی به دست می‌آید. در این تحلیل سه ضخامت مختلف یک، سی و چهل میلیمتر برای دو طرح مختلف روتور مدنظر قرار می‌گیرد که در شکل ۳-۲ و شکل ۳-۳ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۳-۲: (الف) روتور دارای آهنربا با ضخامت یک میلیمتر؛ (ب) روتور دارای آهنربا با ضخامت سی میلیمتر



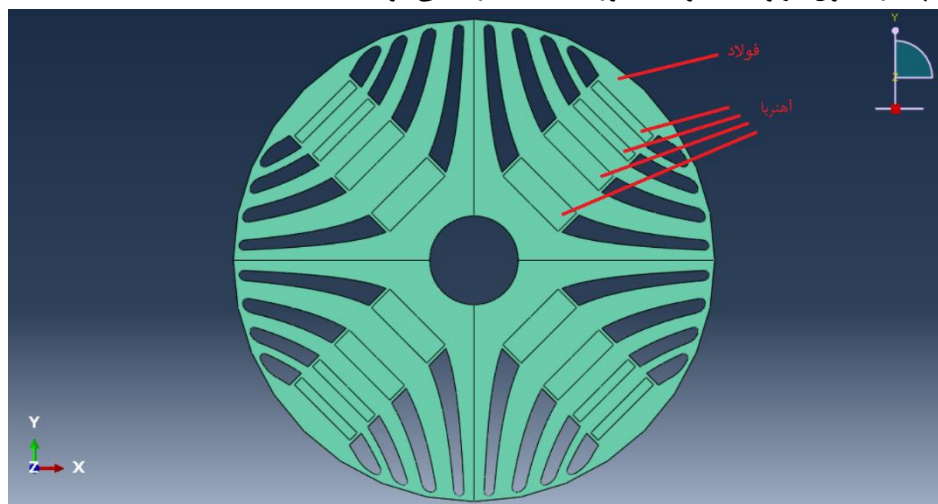
(ب)



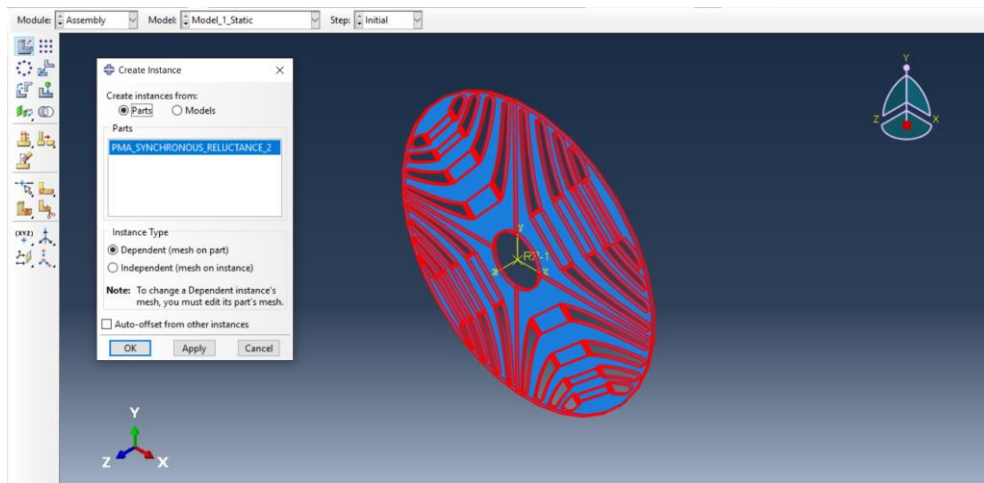
(الف)

شکل ۳-۳: (الف) روتور بدون آهنربا با ضخامت یک میلیمتر؛ (ب) روتور بدون آهنربا با ضخامت چهار میلیمتر

سپس در مرحله بعد ابتدا خواص مکانیکی فولاد و آهنربا وارد نرم‌افزار شده و سپس هر کدام از خواص به ناحیه هندسی مربوط به خود اعمال می‌شوند. به طور مثال در شکل ۳-۴ هر خاصیت به ناحیه هندسی مربوطه اعمال شده است. در نهایت، همانند شکل ۳-۵، در مائول Assembly، قطعه به صورت dependent یا independent (در این مدل تفاوتی بین این دو حالت وجود ندارد) وارد محیط کاری می‌شود. با انجام این مرحله، مدل برای تعیین نوع تحلیل و اجرای شرایط مرزی و بارگذاری آماده است که هر کدام از آنها در فصول مربوط به خود به صورت جداگانه ارائه می‌شوند.



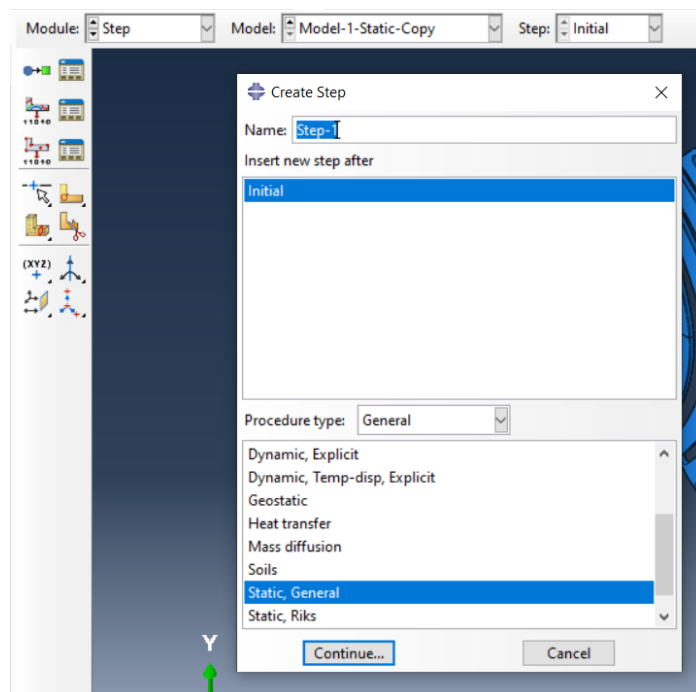
شکل ۳-۴: اعمال خواص فولاد و آهنربا به روتور



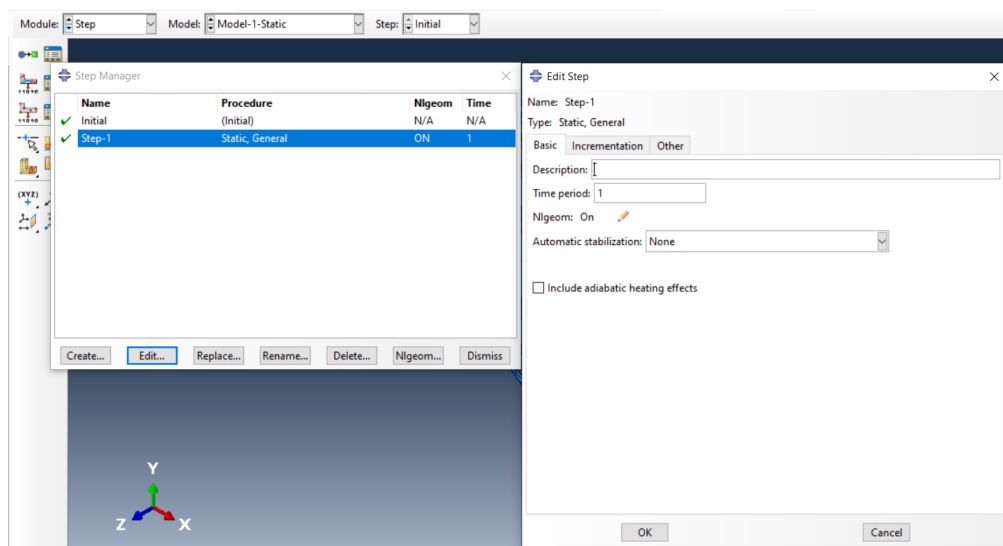
شکل ۳-۵: ورود قطعه به ماژول Assembly

۳-۵- تحلیل استاتیکی

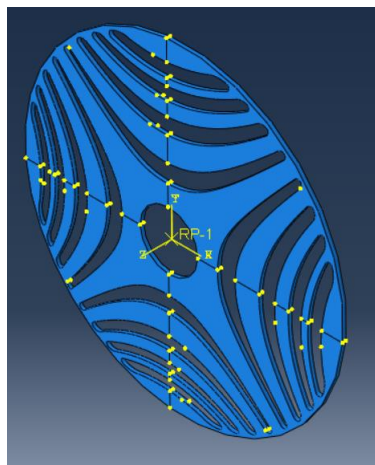
در تحلیل استاتیکی، از اثرات شتاب در مسئله صرف نظر می‌شود و بنابراین، نیروی اینرسی در معادلات وجود ندارد. این تحلیل برای حل مسائلی که در حالت پایدار قرار دارند یا سرعت‌های در آنها ناچیز است می‌توان استفاده کرد. در مسئله پیش‌رو، هدف از انجام تحلیل استاتیکی، بررسی مقاومت روتور در برابر نیروهای وارده است. دو نیرو در حالتی که روتور در سرعت نهایی خود دوران می‌کند به آن وارد می‌شوند. نیروی اول گشتاور ناشی از میدان الکترومغناطیس است که باعث دوران روتور می‌شود. گشتاور نهایی روتور مجموع گشتاور هر یک از دیسک‌های تشکیل دهنده روتور است. نیروی گریز از مرکز که در اثر دوران به وجود می‌آید، دومین نیرویی است که به روتور وارد می‌شود و هر اندازه که سرعت دورانی بیشتر شود، مقدار نیروی گریز از مرکز نیز بیشتر می‌شود. برای انجام تحلیل استاتیکی، بعد از مدل‌سازی در محیط نرم‌آزار یا وارد کردن مدل روتور به آن، مطابق با شکل ۳-۶ و شکل ۳-۷، در ماژول Step حلگر استاتیک انتخاب می‌شود. با فرض آن که گشتاور وارد بر روتور به طور کامل به لبه بیرونی آن وارد می‌شود، در ماژول Interaction باید یک Reference Point همانند شکل ۳-۸ و شکل ۳-۹ به لبه بیرونی روتور کوپل شود تا از طریق آن، گشتاور به لبه بیرونی وارد شود.



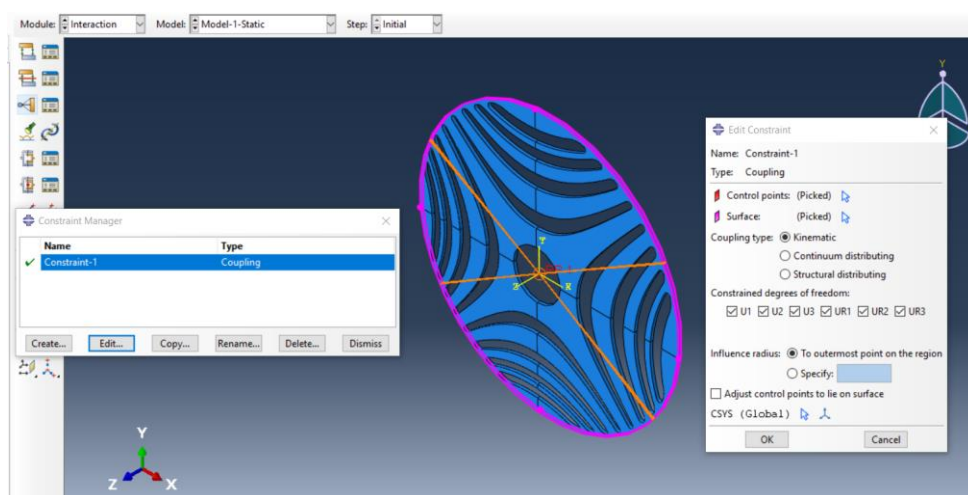
شکل ۳-۶: انتخاب حلگر تحلیل استاتیکی



شکل ۳-۷: تنظیمات حلگر استاتیکی

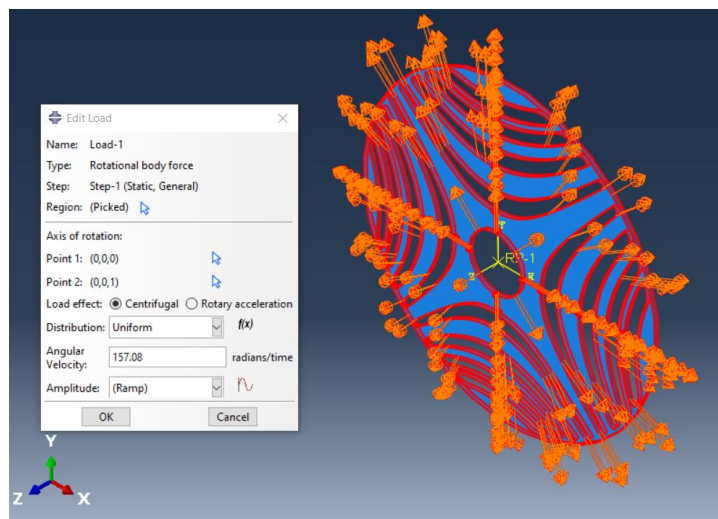


شکل ۸-۳: ایجاد Reference Point در مرکز هندسی روتور

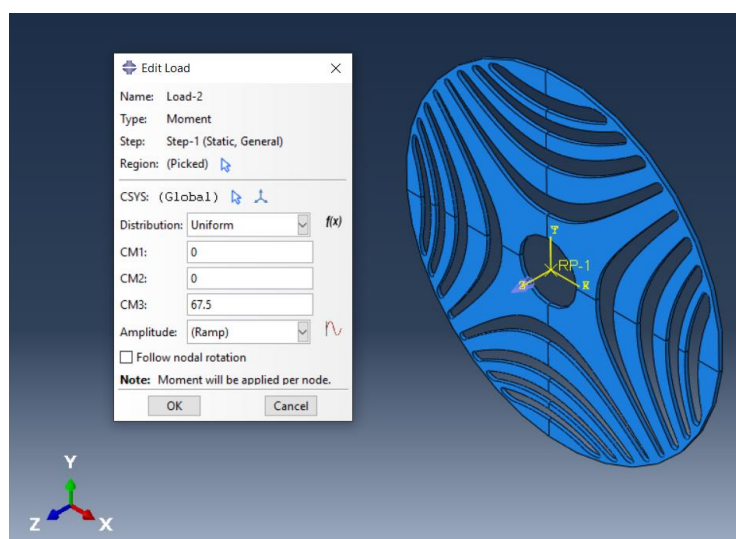


شکل ۹-۳: اعمال قید coupling به referenec point

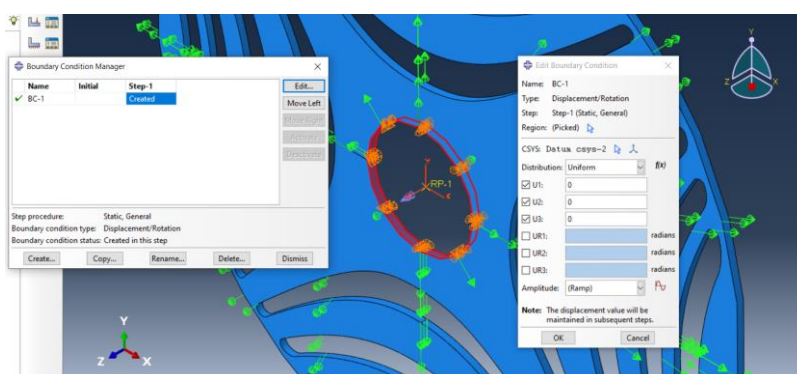
در ادامه شرایط بارگذاری و مرزی مرحله در مازول Load اجرا می‌شوند. برای اعمال بارگذاری بر گزینه Create Load کلیک کرده و نیروهای مورد نظر را وارد می‌کنیم. برای اعمال بارگذاری نیروی گریز از مرکز، گزینه Rotational Body Force را انتخاب کرده و پس از تعیین محور دوران، مقدار دوران را که در اینجا برابر با ۱۵۷۰۰۸ رادیان بر ثانیه است را وارد می‌کنیم. شکل ۱۰-۳ اعمال نیروی گریز از مرکز به مدل را نمایش می‌دهد. برای اعمال گشتاور از گزینه moment استفاده کرده و پس از انتخاب Reference Point که در قسمت Interaction ایجاد شده بود، بردار گشتاور را وارد می‌کنیم. در اینجا با توجه به این که محور دوران را در راستای محور Z در نظر گرفته شده است، بردار گشتاور تنها دارای مولفه سوم است و باقی مولفه‌ها صفر هستند. مقدار گشتاور وارد شده بر هر دیسک از تقسیم گشتاور کلی بر تعداد دیسک‌ها به دست می‌آید که برابر با ۶۷.۵ نیوتن میلیمتر است. شکل ۱۱-۳ اعمال نیروی گشتاور به مدل را نشان می‌دهد. تنها شرط مرزی موجود در این سیستم جلوگیری از حرکت محل اتصال دیسک به شفت است که توسط گزینه create boundary condition مطابق با شکل ۱۲-۳ ایجاد می‌شود.



شکل ۳-۱۰: اعمال نیروی گریز از مرکز

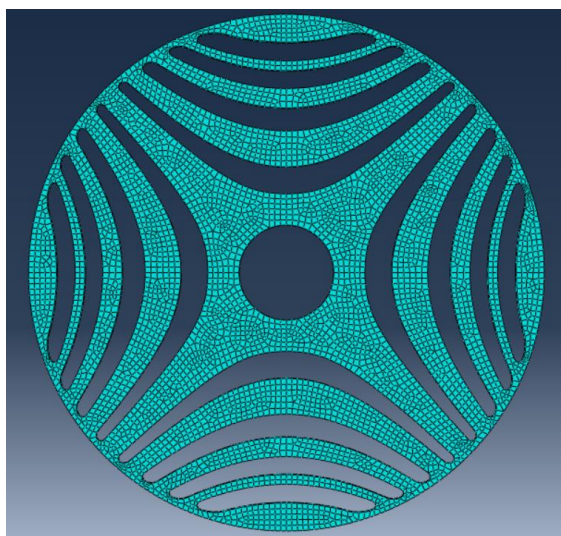


شکل ۳-۱۱: اعمال گشتاور به مدل



شکل ۳-۱۲: اعمال شرط مرزی روی مدل

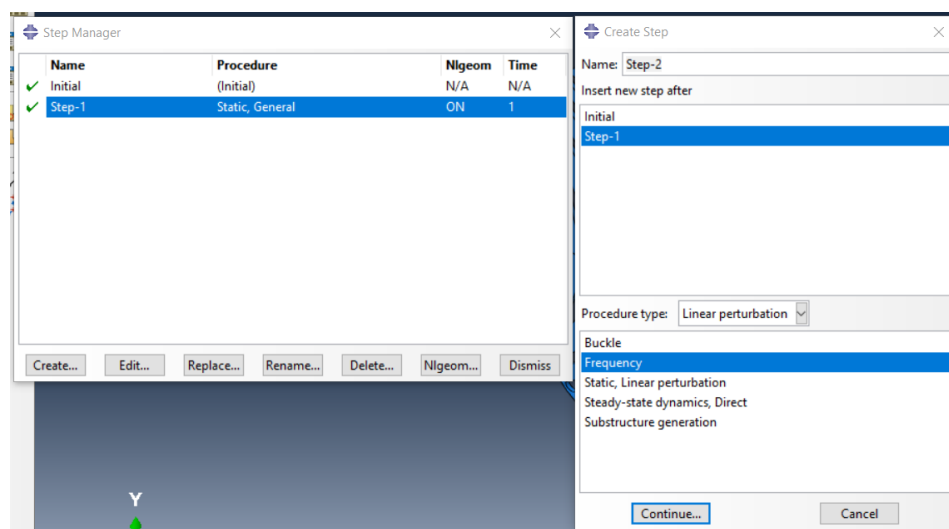
مرحله نهایی در مدل سازی، مش بندی مدل است. برای این منظور نوع مش انتخاب شده C3D8R است که برای انجام تحلیل های استاتیکی و دینامیکی مناسب است. این المان از نوع مکعبی با هشت گره است. نتایج مش زنی روی مدل در شکل ۱۳-۳ مشاهده می شود.



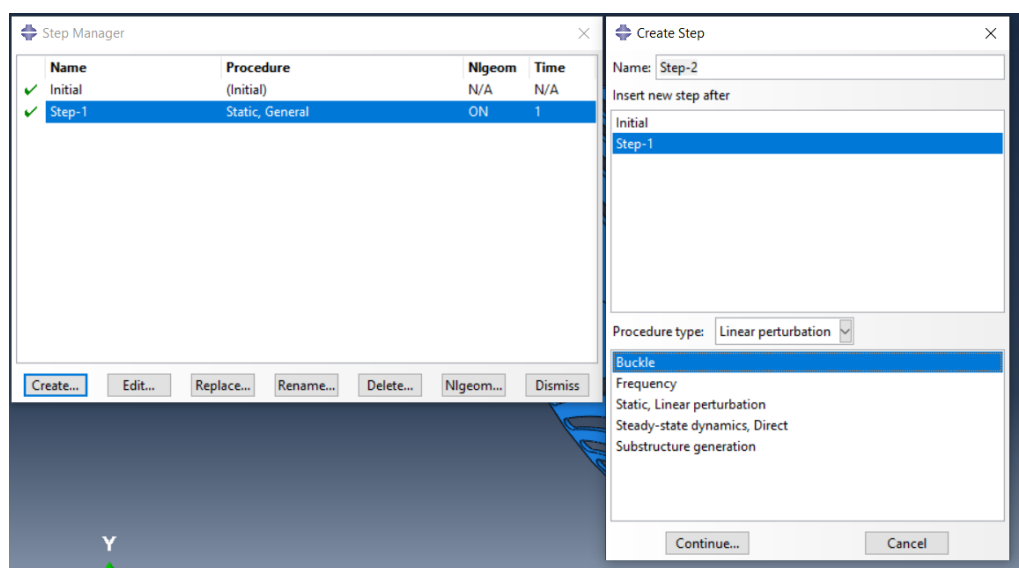
شکل ۱۳-۳: مش اعمال شده به مدل

۳-۶- تحلیل فرکانسی

در این بخش به بررسی مدل سازی جهت تحلیل فرکانس های طبیعی سیستم پرداخته می شود. با توجه به این که سیستم در حالت بارگذاری ناشی از دوران و گشتاور قرار دارد، تحلیل فرکانسی باید با در نظر گرفتن اثرات این نیروها باشد. برای به دست آوردن فرکانس های طبیعی سیستم، بعد از انجام تحلیل استاتیکی بر روی مدل به جهت به دست آوردن توزیع تنش، حلگر frequency از قسمت linear perturbation مطابق با شکل ۱۴-۳ انتخاب می شود. سپس در قسمت value ده فرکانس طبیعی اول سیستم از نرم افزار درخواست می شود. لازم به ذکر است که این مراحل بعد از انجام مدل سازی استاتیکی که در قسمت قبلی تشریح شد انجام می شود و تغییر دیگری در مدل نیاز نیست. برای انجام تحلیل کماتش نیز، همانند تحلیل فرکانسی، ابتدا تحلیل استاتیکی روی سیستم انجام می شود تا شرایط سیستم تحت دوران ایجاد شود. خروجی این تحلیل، مود کماتش و بار بحرانی مربوط به آن بار است که به شکل ضربی از بارگذاری کماتش اعمال شده به نرم افزار، گزارش می شود. مطابق با شکل ۱۵-۳، برای انجام تحلیل کماتش بعد از ایجاد مدل استاتیکی از قسمت step، حلگر buckle از قسمت linear perturbation انتخاب می شود. در پنجره تنظیمات حلگر کماتش نیز مقدار ۱۰ مود (مقدار ویژه) اول از نرم افزار درخواست می شود. در این تحلیل برای به دست آوردن بار بحرانی کماتش، دو حالت در نظر گرفته شده است. در حالت اول نیروی گریز از مرکز ناشی از دوران به عنوان پیش بار در تحلیل استاتیک اعمال می شود و سپس در تحلیل کماتش، مقدار گشتاور بحرانی به دست می آید. به همین ترتیب در حالت دوم ابتدا گشتاور به عنوان پیش بار در تحلیل استاتیکی اعمال شده و سپس در تحلیل کماتش، سرعت دورانی بحرانی محاسبه می شود.

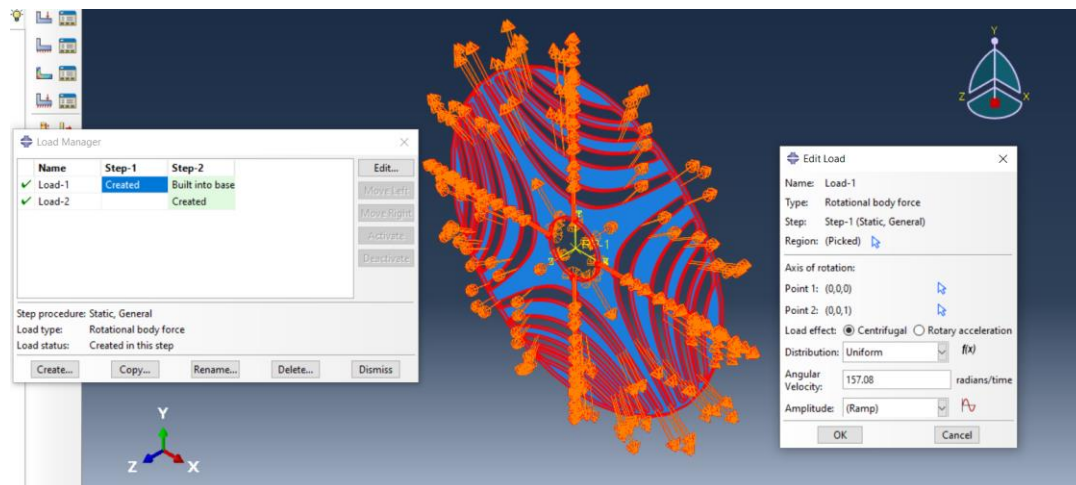


شکل ۱۴-۳: انتخاب حلگر فرکانس در نرم افزار

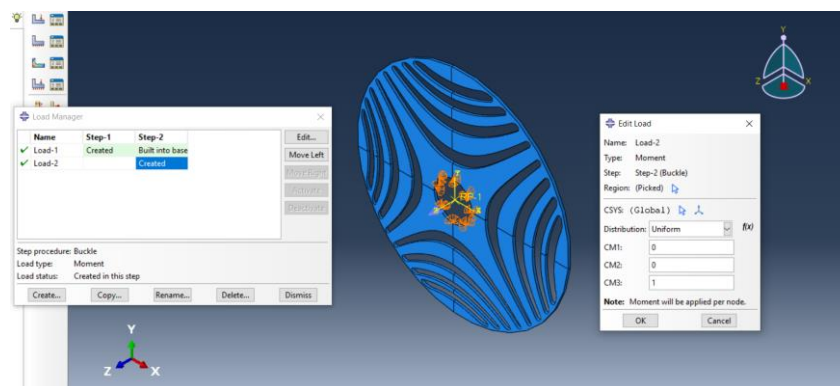


شکل ۱۵-۳: انتخاب حلگر کماتش در نرم افزار

به طور مثال، برای به دست آوردن گشتاور بحرانی کماتش، مطابق با شکل ۱۶-۳ مقدار نیروی گریز از مرکز در مرحله اول (حلگر استاتیکی) به مدل اعمال شده است. سپس مطابق با شکل ۱۷-۳، در مرحله دوم (حلگر کماتش) مقدار گشتاوری برابر با یک واحد به مدل اعمال شده است. در این حالت نتایج خروجی حلگر کماتش که برابر با ضریبی از نیروی اعمال شده در حلگر کماتش است، برابر با مقدار واقعی بار بحرانی کماتش خواهد بود.



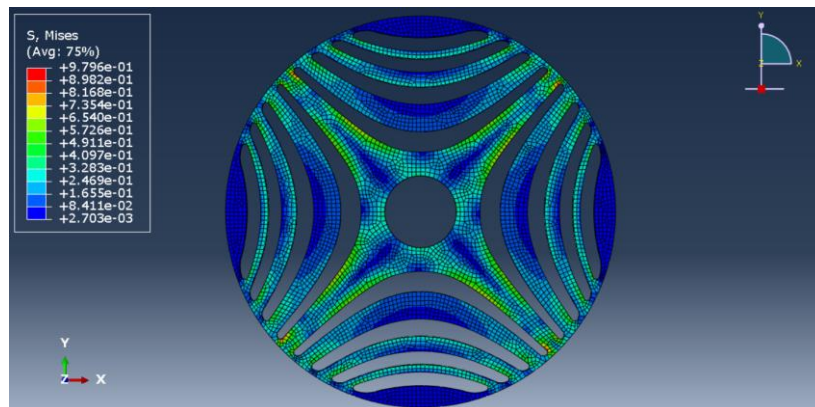
شکل ۱۶-۳: اعمال نیروی گریز از مرکز در حلگر استاتیک



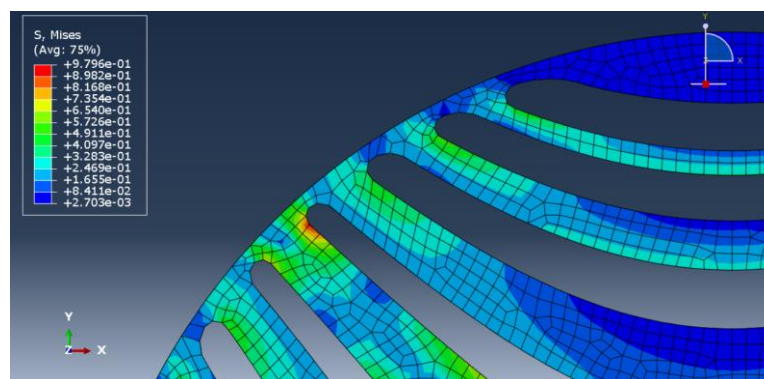
شکل ۱۷-۳: اعمال نیروی گشتاور در حلگر کماتش

۳-۷- نتایج تحلیل استاتیک

شکل ۱۸-۳ توزیع تنش را در روتور بدون آهنربا و با ضخامت یک میلیمتر تحت اثر گشتاور خمشی و نیروی گریز از مرکز ناشی از دوران نمایش می‌دهد. با توجه به کانتور تنش، بیشترین مقدار تنش ناشی از دوران کمتر از یک مگاپاسکال است که از تنش تسلیم فولاد (تنشی که به ازای آن فولاد دچار تغییر شکل دائمی می‌شود) بسیار کمتر است. در شکل ۱۹-۳ محل وقوع بیشترین تنش مشاهده می‌شود. برای بررسی عدم وابستگی مقدار تنش به اندازه مش، اندازه المان‌ها برابر با نصف اندازه المان‌های قبلی در نظر گرفته شد و تحلیل استاتیکی دیگری انجام شد.

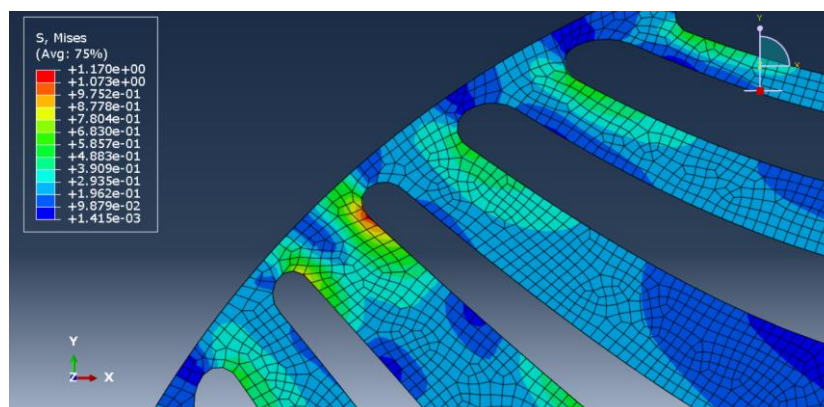


شکل ۱۸-۳: توزیع تنش مایسز در روتور بدون آهنربا (ضخامت یک میلیمتر)

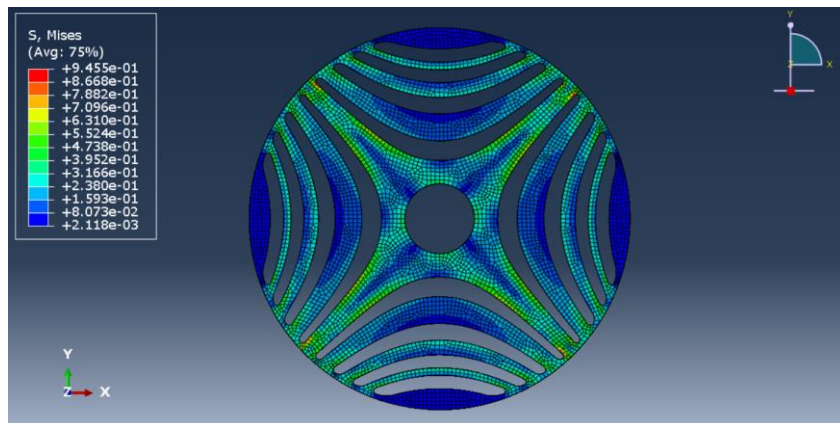


شکل ۱۹-۳: ناحیه دارای بیشترین تنش در مدل بدون آهنربا

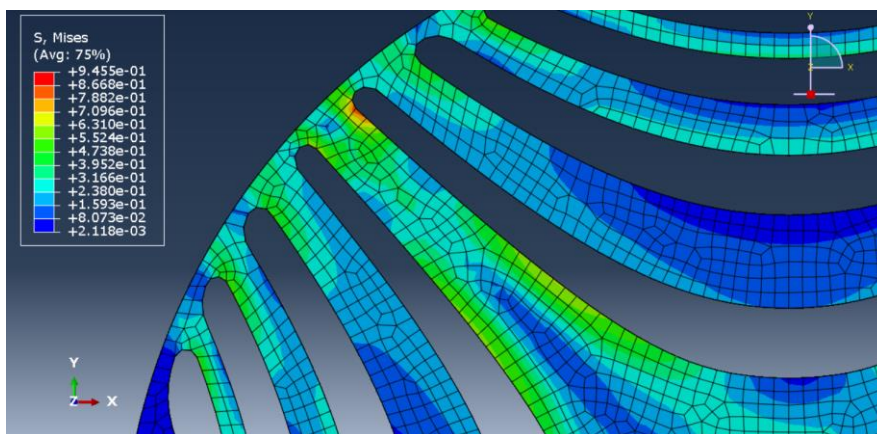
همان طور که در شکل ۳-۲۰ مشاهده می شود، اختلاف اندکی بین دو تنش بیشینه مشاهده می شود و بنابر این، اندازه مش بندی مدل اول برای تحلیل کفایت می کند و نیازی به مش کوچکتر وجود ندارد. لازم به ذکر است که استفاده از مش کوچکتر هزینه محاسباتی را بالاتر می برد و تنها در صورت نیاز باید از مش های بسیار ریز استفاده کرد. شکل ۳-۲۰ تا شکل ۳-۲۳ نتایج تحلیل روی مدل با ضخامت ۴۰ میلیمتر را نمایش می دهند. همان طور که مشاهده می شود، نتایج توزیع تنش و محل بیشینه تنش ها تطابق خوبی با مدل یک میلیمتری دارد. به علاوه با توجه به شکل ۳-۲۳ مشخص می شود که توزیع تنش تابعیت کمی از ضخامت دارد و تنها مقدار تنش در ابتدا و انتهای طول روتور به دلیل شرایط مرزی متفاوت با سایر نقاط اندکی متفاوت است.



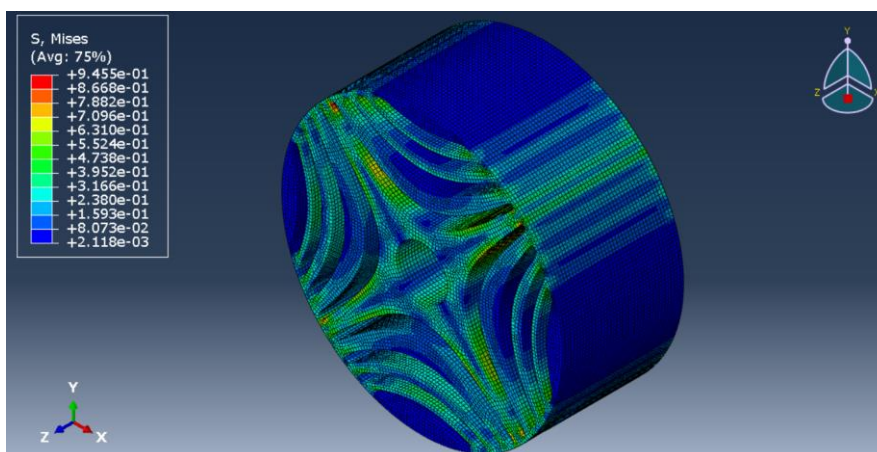
شکل ۲۰-۳: بیشترین تنش در مدل با المان های ریزتر



شکل ۳-۲۱: توزیع تنش در مدل بدون آهنربا با ضخامت ± 4 میلیمتر



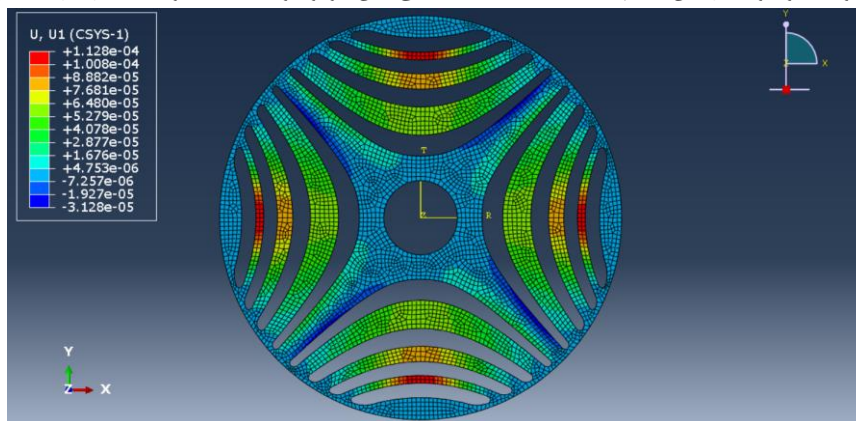
شکل ۳-۲۲: محل بیشترین تنش در مدل بدون آهنربا با ضخامت ± 4 میلیمتر



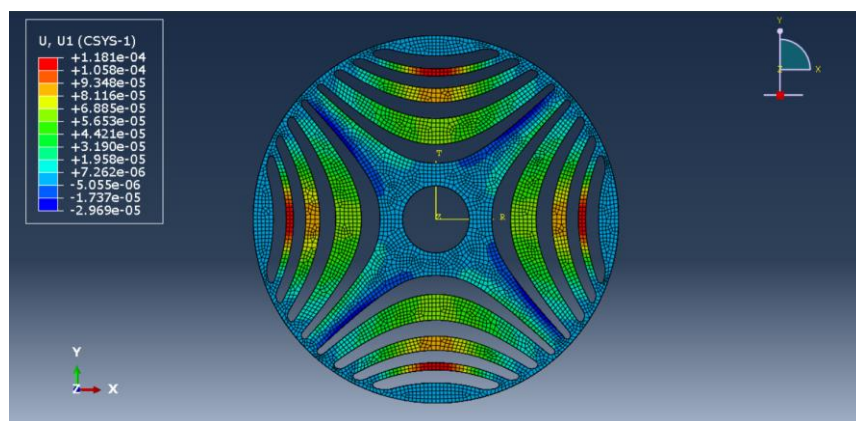
شکل ۳-۲۳: نحوه تغییرات تنش در راستای طول در مدل بدون آهنربا

شکل ۳-۲۴ و شکل ۳-۲۵ جابه‌جایی هر یک از گره‌ها را در راستای شعاعی برای دو مدل با ضخامت‌های مختلف نمایش می‌دهند. این جابه‌جایی از آن جهت اهمیت دارد که اگر مقدار آن زیاد باشد، ممکن است باعث برخورد روتور به قطعات مجاور شود. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار جابه‌جایی شعاعی در حدود 1.128×10^{-4} میلیمتر است که بسیار

ناچیز است. میزان جابه‌جایی در لبه بیرونی دیسک نیز برابر با 0.5×10^{-6} میلیمتر است. بنابر این در صورتی که قطعات مجاور با دیسک فاصله ای بیش از این مقدار داشته باشند امکان برخورد دیسک با آن‌ها وجود ندارد. البته لازم به ذکر است که در مدل واقعی به دلیل وجود شرایطی مانند لقی بین شفت و یاتاقان‌ها و همچنین نامیزانی دوار مجموعه روتور و شفت، میزان جابه‌جایی لبه روتور بیش از این مقدار خواهد بود و بنابر این لازم است که فاصله مناسبی بین روتور و قطعه مجاور در نظر گرفته شود.

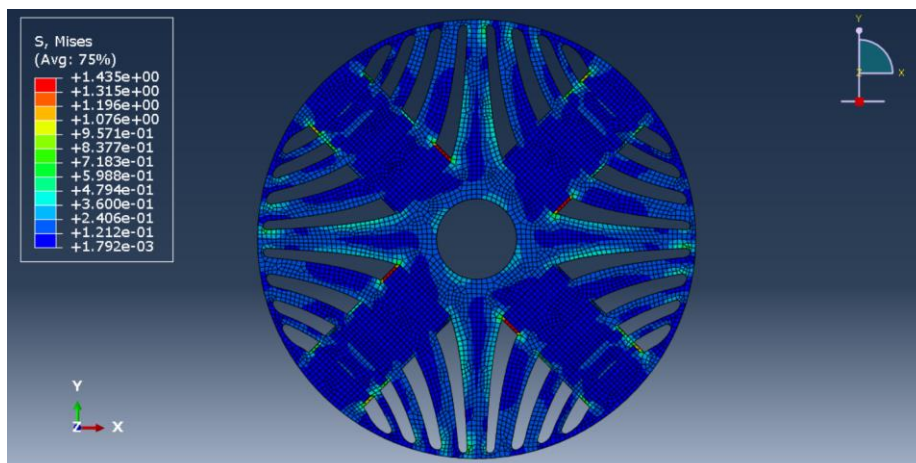


شکل ۳-۲۴: جابه‌جایی شعاعی در روتور بدون آهنربا با ضخامت ۱ میلیمتر

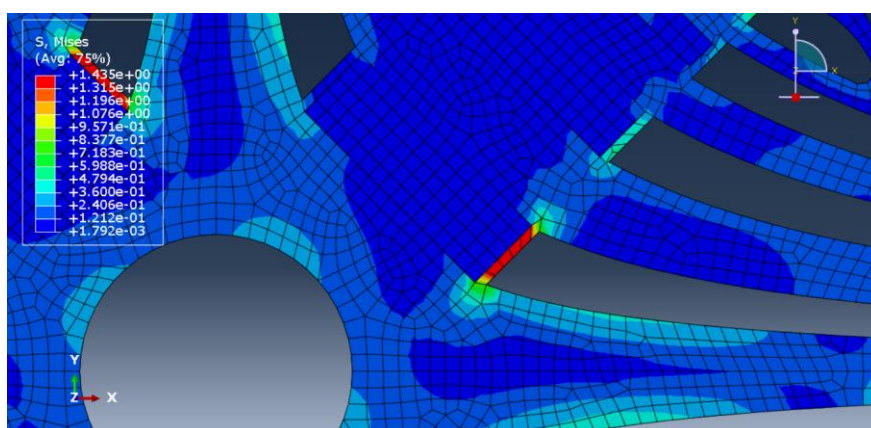


شکل ۳-۲۵: جابه‌جایی شعاعی در روتور بدون آهنربا با ضخامت ۴۰ میلیمتر

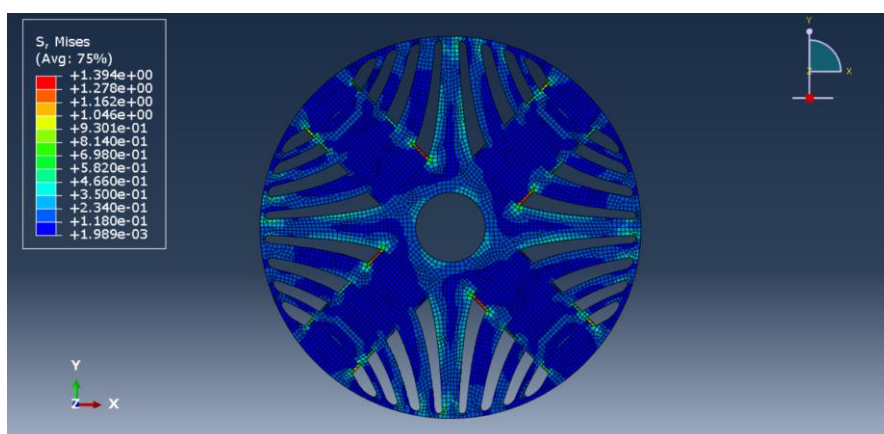
توزیع تنش در مدل دارای آهنربا با ضخامت یک میلیمتر در شکل ۳-۲۶ مشاهده می‌شود. با توجه به کانتور توزیع تنش، ضعیف‌ترین قسمت دیسک در این مدل در لبه نگه‌دارنده نزدیک‌ترین آهنربا به مرکز دوران روی می‌دهد که در شکل ۳-۲۷ مشاهده می‌شود. با توجه به دوران قطعه، بیشینه تنش فقط در یکی از لبه‌های نگه‌دارنده آهنربا اتفاق می‌افتد چون فقط این لبه به آهنربا نیرو وارد می‌کند و لبه دیگر به دلیل دوران نیروی تماسی به آهنربا وارد نمی‌کند. در شکل ۳-۲۸ و شکل ۳-۲۹ نیز نتایج تحلیل استاتیکی برای ضخامت ۳۰ میلیمتر مشاهده می‌شود. همانند مدل بدون آهنربا، تفاوت محسوسی در توزیع تنش بین مدل یک میلیمتری و سی میلیمتری وجود ندارد.



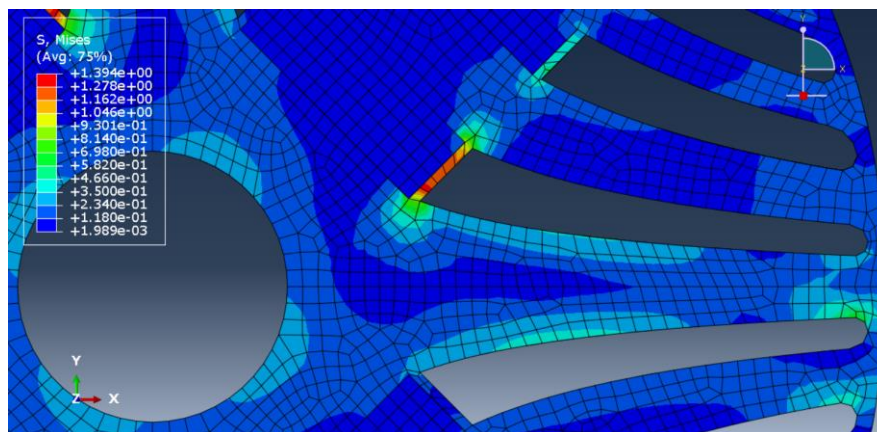
شکل ۳-۲۶: توزیع تنش در مدل دارای آهنربا با ضخامت یک میلیمتر



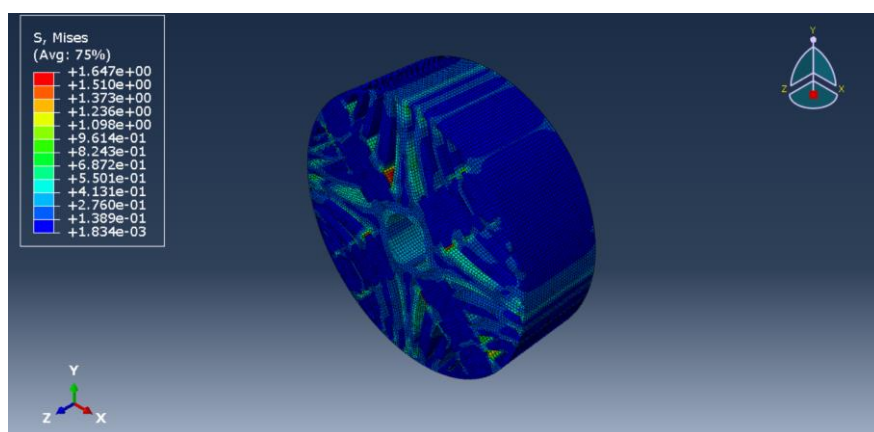
شکل ۳-۲۷: محل بیشترین تنش در نمونه دارای آهنربا



شکل ۳-۲۸: توزیع تنش در مدل دارای آهنربا و با ضخامت ۳۰ میلیمتر

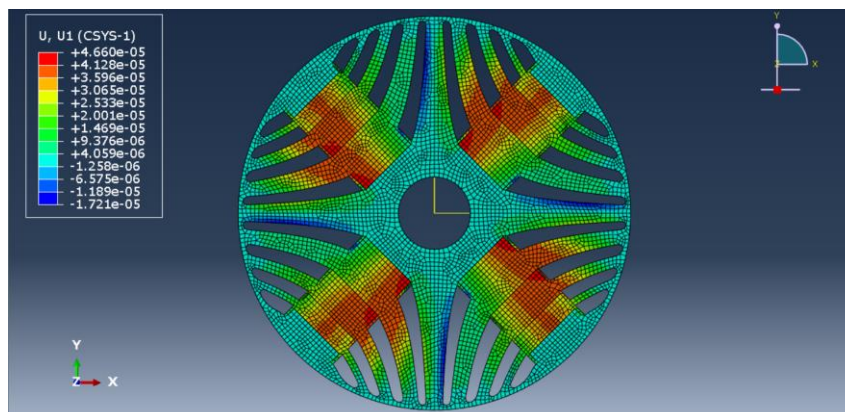


شکل ۲۹-۳: محل بیشترین تنش در مدل دارای آهنربا و با ضخامت ۳۰ میلیمتر

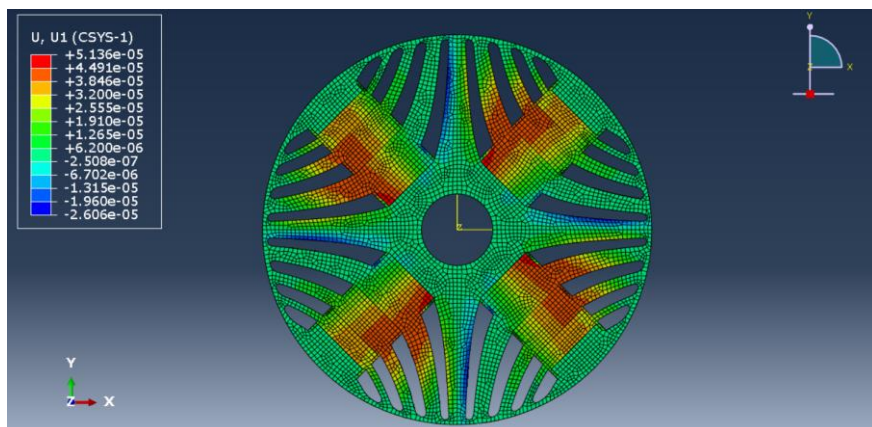


شکل ۳۰-۳: تغییرات تنش در راستای ضخامت در مدل دارای آهنربا

در شکل ۳۱-۳ و شکل ۳۲-۳ جابه‌جایی در راستای شعاعی برای مدل‌های دارای آهنربا و دو ضخامت متفاوت مشاهده می‌شوند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این مدل‌ها بیشترین جابه‌جایی شعاعی مربوط به آهنرباهای سوار شده روی روتور است. در خود آهنرباها نیز یک لبه جابه‌جایی بیشتری نسبت به لبه دیگر دارد که این به دلیل جهت چرخش روتور (پادساعتگرد یا در جهت مثبت محور Z) است.



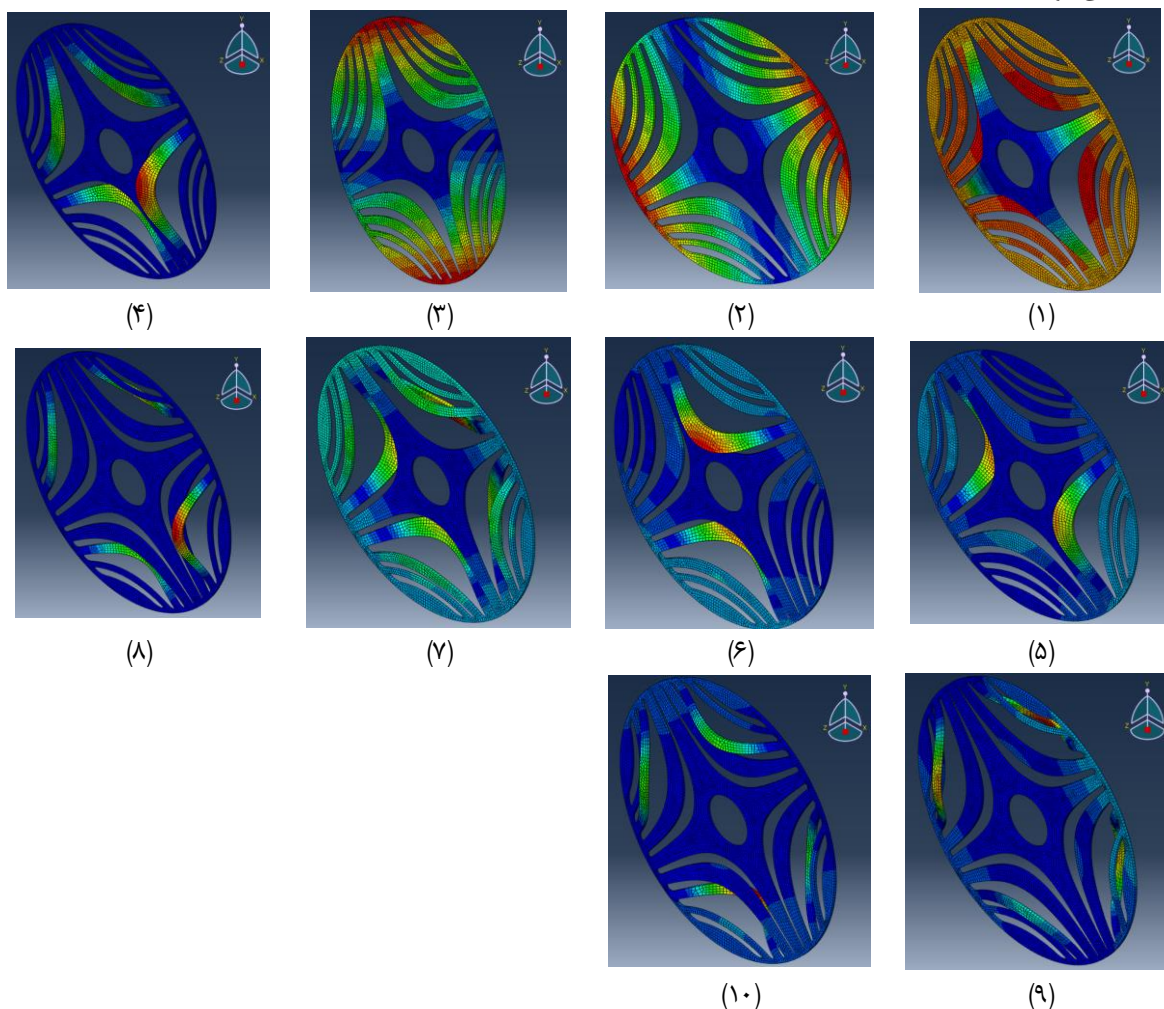
شکل ۳۱-۳: جابه‌جایی در مدل دارای آهنربا با ضخامت یک میلیمتر



شکل ۳-۳۲: جابه‌جایی در مدل دارای آهنربا با ضخامت سی میلی‌متر

۳-۸- نتایج تحلیل فرکانسی

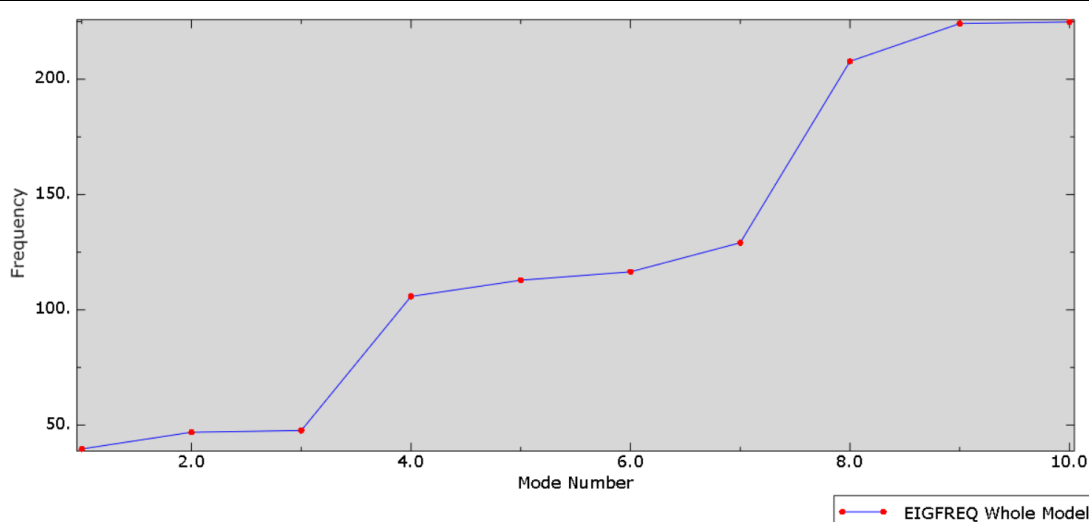
در این قسمت نتایج حاصل از تحلیل ده مود اول ارتعاشی و فرکانس‌های طبیعی مربوط به آن‌ها ارائه می‌شود. در صورتی که این فرکانس‌های طبیعی در محدوده کاری روتور قرار داشته باشند، روتور نباید در محدوده این فرکانس‌ها فعالیت داشته باشد و تنها می‌تواند از آن‌ها بدون توقف عبور و به سرعت عبور کند. در شکل ۳-۳۳ شکل ده مود اول ارتعاش طبیعی برای روتور بدون آهنربا مشاهده می‌شود. در جدول ۳-۳ و در نمودار شکل ۳-۳۴ نیز مقدار فرکانس‌های طبیعی مرتبط با این ده مود ارتعاشی مشاهده می‌شوند.



شکل ۳-۳: ده مود اول ارتعاش طبیعی در روتور بدون آهنربا با ضخامت یک میلیمتر

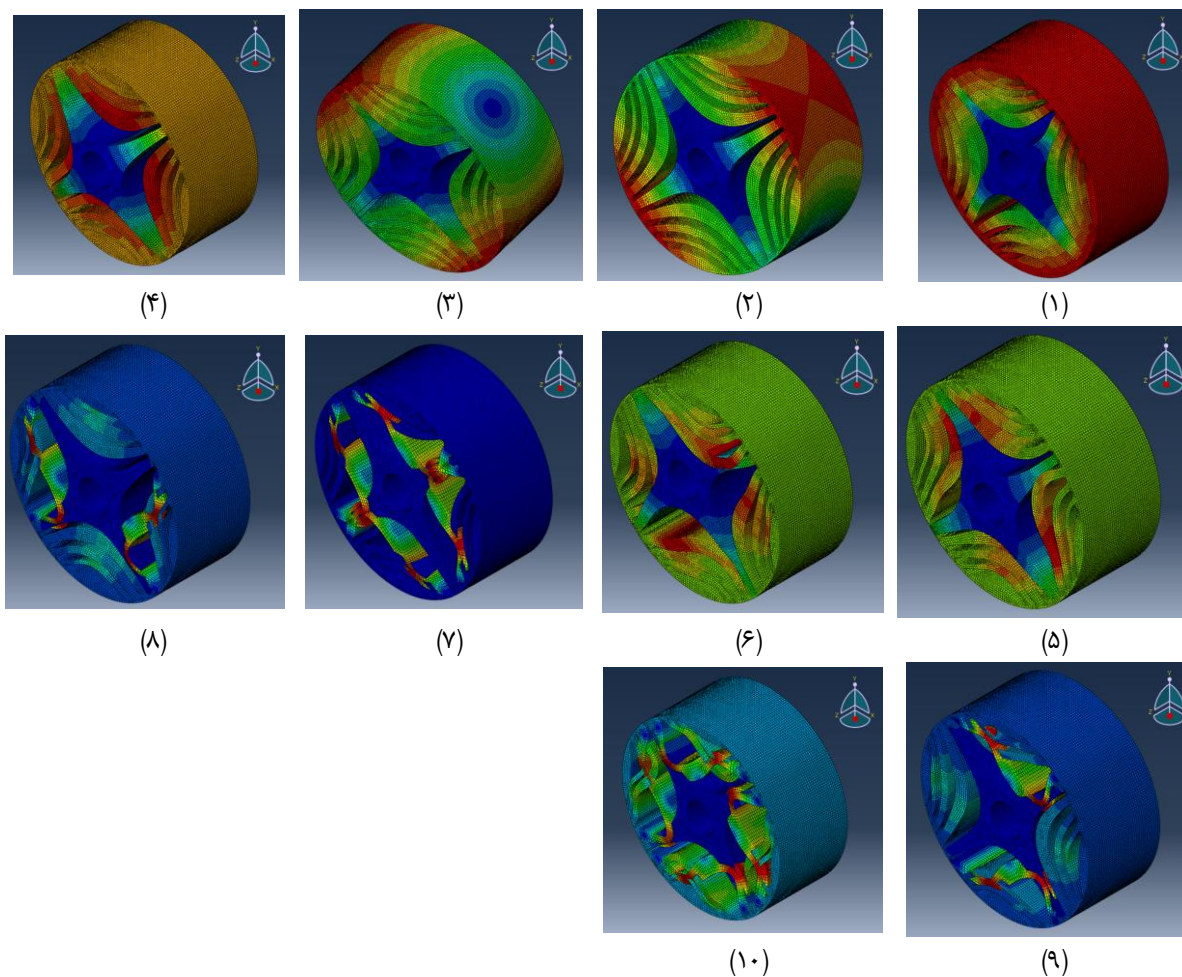
جدول ۳-۳: ده فرکانس طبیعی اول برای روتور بدون آهنربا با ضخامت یک میلیمتر

شماره مود	فرکانس طبیعی (هرتز)	شماره مود	فرکانس طبیعی (هرتز)
۱	۳۹.۶۴۳	۶	۱۱۶.۴۸
۲	۴۶.۸۹۹	۷	۱۲۹.۰۸۳
۳	۴۷.۶۲۴۵	۸	۲۰۷.۷۷۱
۴	۱۰۵.۸۰۵	۹	۲۲۴.۱۳۸
۵	۱۱۲.۸۲۷	۱۰	۲۲۴.۸۷۲



شکل ۳-۴: ده فرکانس طبیعی اول برای روتور بدون آهنربا با ضخامت یک میلیمتر

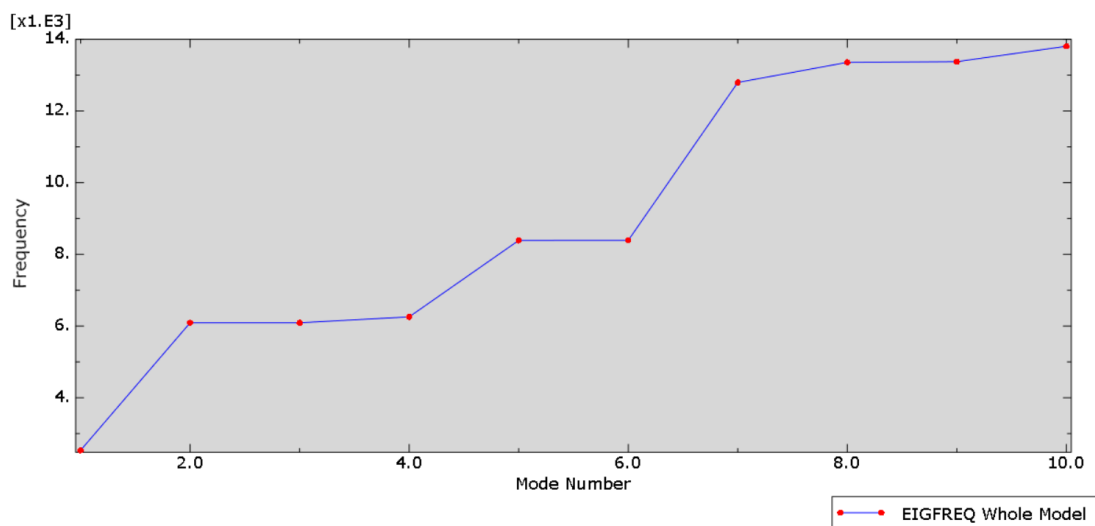
در شکل ۳-۳۵ ده مود اول ارتعاش طبیعی برای مدل بدون آهنربا و با ضخامت ۴۰ میلیمتر مشاهده می‌شوند. همچنین در جدول ۳-۴ و شکل ۳-۳۶ نیز مقدار فرکانس‌های طبیعی مرتبط با این ده مود مشاهده می‌شوند. مقایسه بین نتایج این مدل و مدل با ضخامت یک میلیمتر نشان می‌دهد که برای رسیدن به ارتعاش در مدل ضخیم‌تر به فرکانس‌های تحریک بسیار بالاتری نیاز است و به عبارت دیگر، به رزونانس رساندن مدل ضخیم‌تر نسبت به مدل نازک‌تر سخت‌تر دارد. با توجه به این که فرکانس طبیعی به جنس و هندسه مرتبط است، می‌توان نتیجه گرفت که هندسه ضخیم‌تر مقاومت بیشتری نسبت به ارتعاش از خود نشان داده است. شکل ۳-۳۷ و شکل ۳-۳۸ و جدول ۳-۵ ده مود اول ارتعاشی روتور دارای آهنربا و با ضخامت یک میلیمتر را مشخص می‌کنند. فرکانس‌های طبیعی در این روتور نسبت به روتور بدون آهنربا و با ضخامت مشابه با سرعت بیشتری رشد می‌کنند و تعداد مودهای کمتری در محدوده کاری روتور قرار می‌گیرند. در شکل ۳-۳۹ و شکل ۳-۴۰ و جدول ۳-۶ مودهای ارتعاشی برای روتور دارای آهنربا و با ضخامت ۳۰ میلیمتر مشاهده می‌شوند. این مدل در مقایسه با هر سه مدل قبلی بیشترین مقاومت را در برابر پدیده رزونانس را از خود نشان می‌دهد.



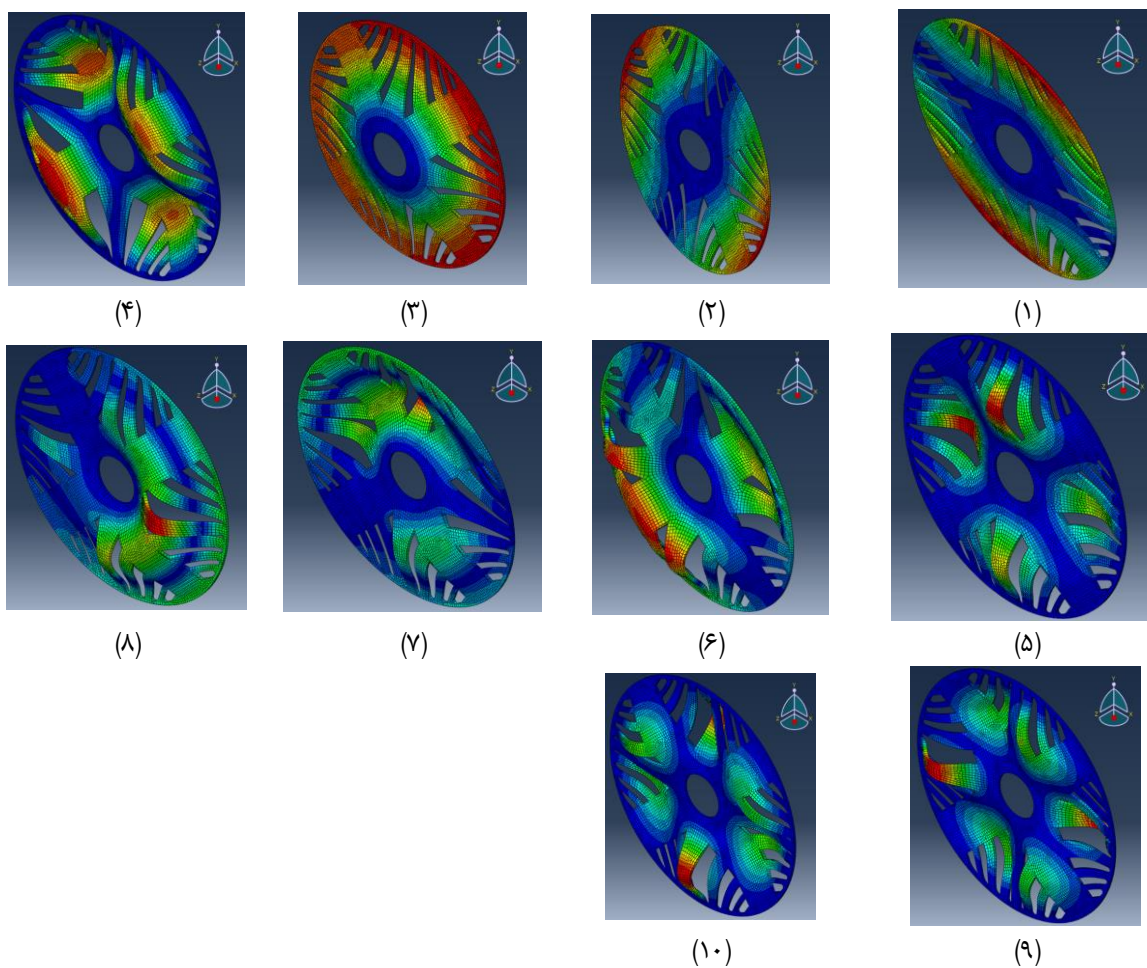
شکل ۳-۳۵: ده ارتعاش طبیعی اول برای مدل بدون آهنربا با ضخامت چهل میلیمتر

جدول ۳-۴: ده فرکانس طبیعی اول برای مدل بدون روتور با ضخامت چهل میلیمتر

شماره مود	فرکانس طبیعی (هرتز)	شماره مود	فرکانس طبیعی (هرتز)
۱	۲۵۳۱.۷۶	۶	۸۳۹۰.۲۴
۲	۶۰۸۹.۷۳	۷	۱۲۷۹۵.۲
۳	۶۰۹۰.۱۵	۸	۱۳۳۵۷
۴	۶۲۵۵.۱۸	۹	۱۳۳۷۵.۷
۵	۸۳۸۸.۰۱	۱۰	۱۳۸۰۶



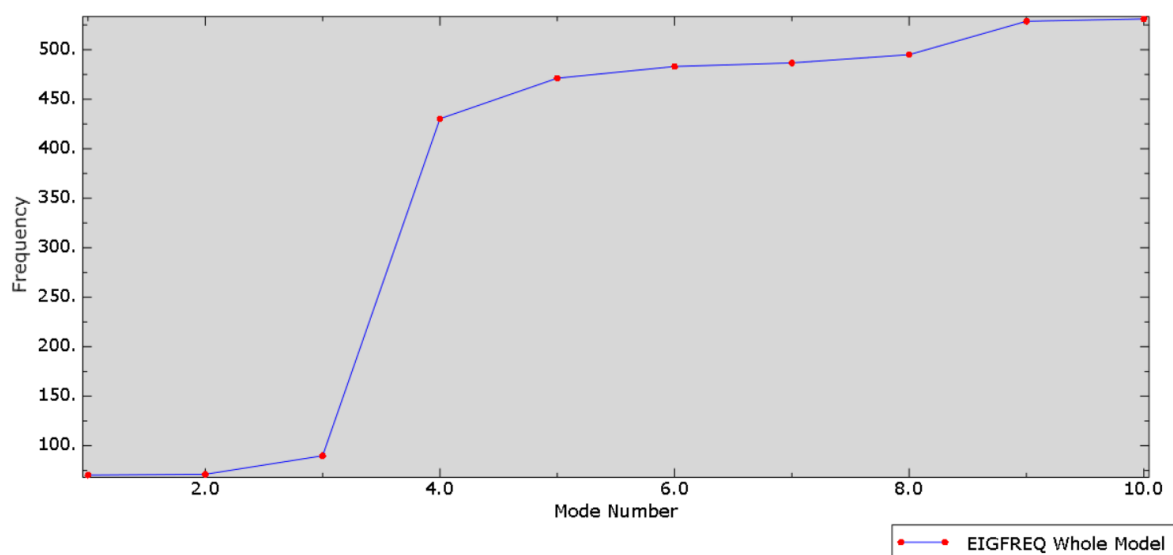
شکل ۳۶-۳: نمودار ده فرکانس طبیعی اول برای مدل بدون روتور با ضخامت چهل میلیمتر



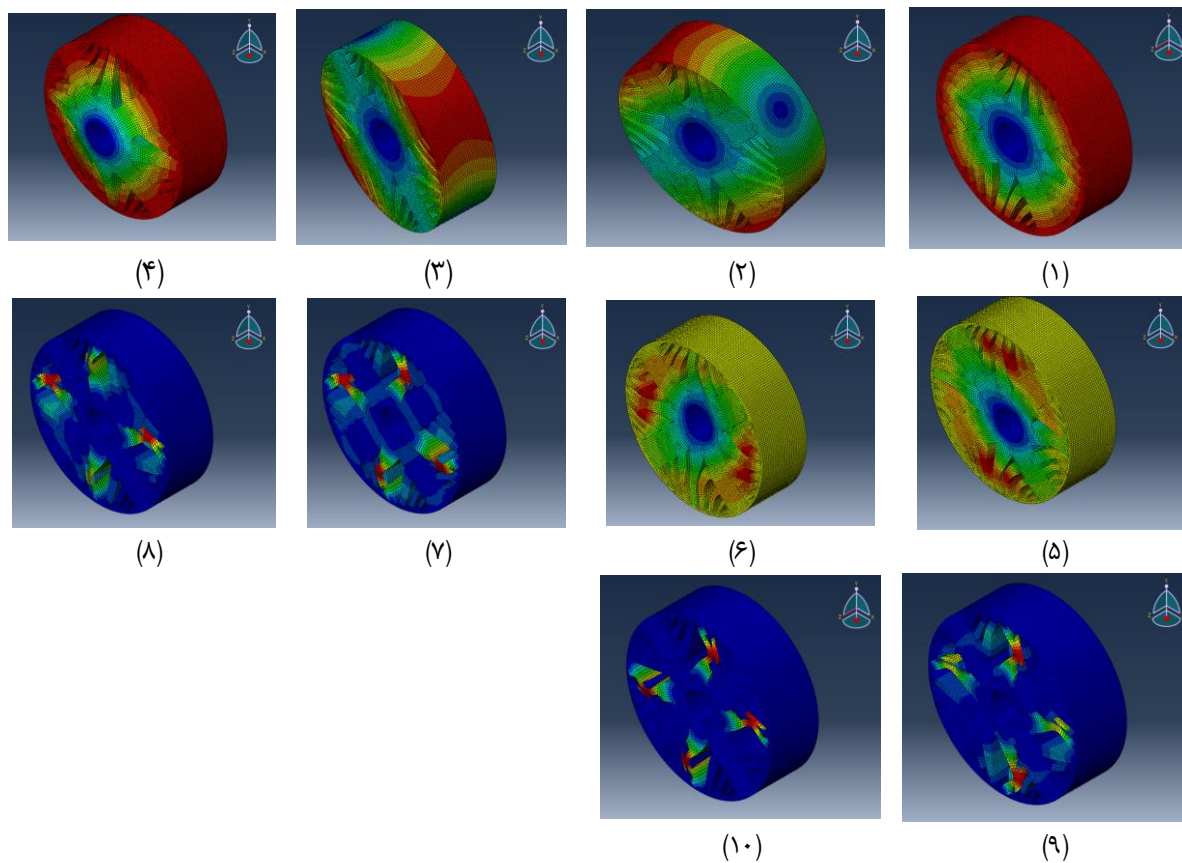
شکل ۳۷-۳: ده ارتعاش طبیعی اول برای مدل دارای آهنربا با ضخامت یک میلیمتر

جدول ۵-۳: ده فرکانس طبیعی اول برای مدل دارای آهنربا با ضخامت یک میلیمتر

شماره مود	فرکانس طبیعی (هرتز)	شماره مود	فرکانس طبیعی (هرتز)
۱	۷۰.۲۹۸	۶	۴۸۲.۹۹۹
۲	۷۱.۰۹۰۳	۷	۴۸۶.۶۳۸
۳	۸۹.۷۸۹۷	۸	۴۹۴.۹۶۵
۴	۴۳۰.۲۴	۹	۵۲۸.۷۰۷
۵	۴۷۱.۱۸۴	۱۰	۵۳۱.۰۸۱



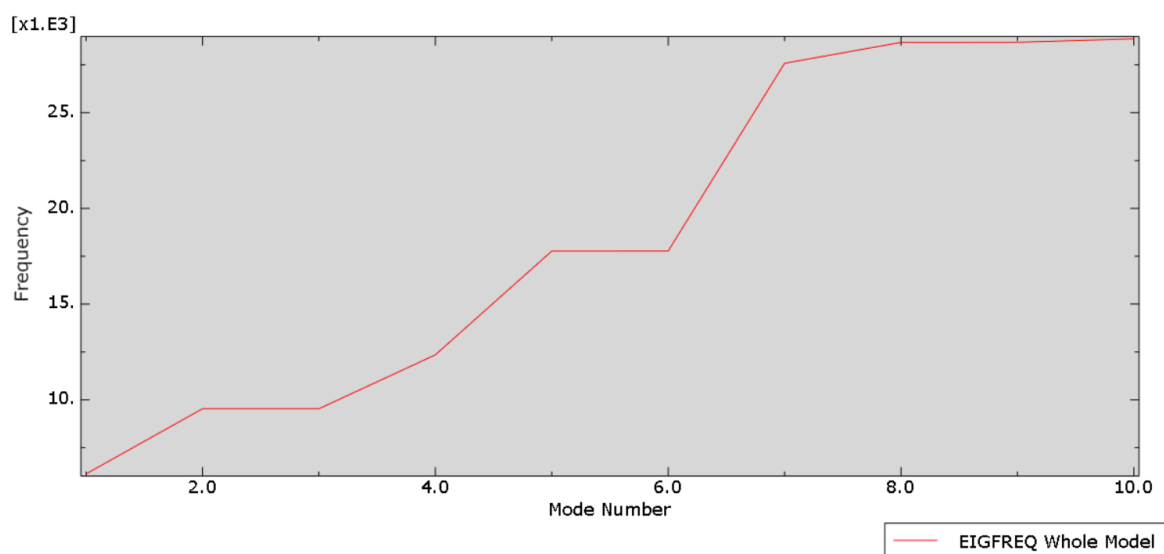
شکل ۳-۳۸: نمودار ده فرکانس طبیعی اول برای مدل دارای آهنربا با ضخامت یک میلیمتر



شکل ۳-۳۹: ده مود ارتعاش طبیعی اول برای مدل دارای آهنربا و با ضخامت سی میلیمتر

جدول ۳-۶: ده فرکانس طبیعی اول برای مدل دارای آهنربا و با ضخامت سی میلیمتر

شماره مود	فرکانس طبیعی (هرتز)	شماره مود	فرکانس طبیعی (هرتز)
۱	۶۱۳۲.۵	۶	۱۷۷۷۲
۲	۹۵۳۳.۷	۷	۲۷۵۷۸
۳	۹۵۳۴.۰	۸	۲۸۶۷۱
۴	۱۲۳۴۹	۹	۲۸۶۷۶
۵	۱۷۷۶۹	۱۰	۲۸۸۵۸

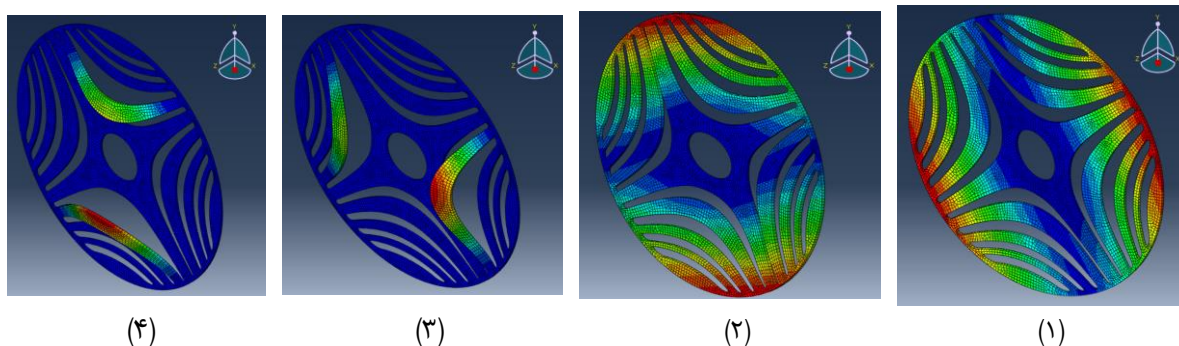


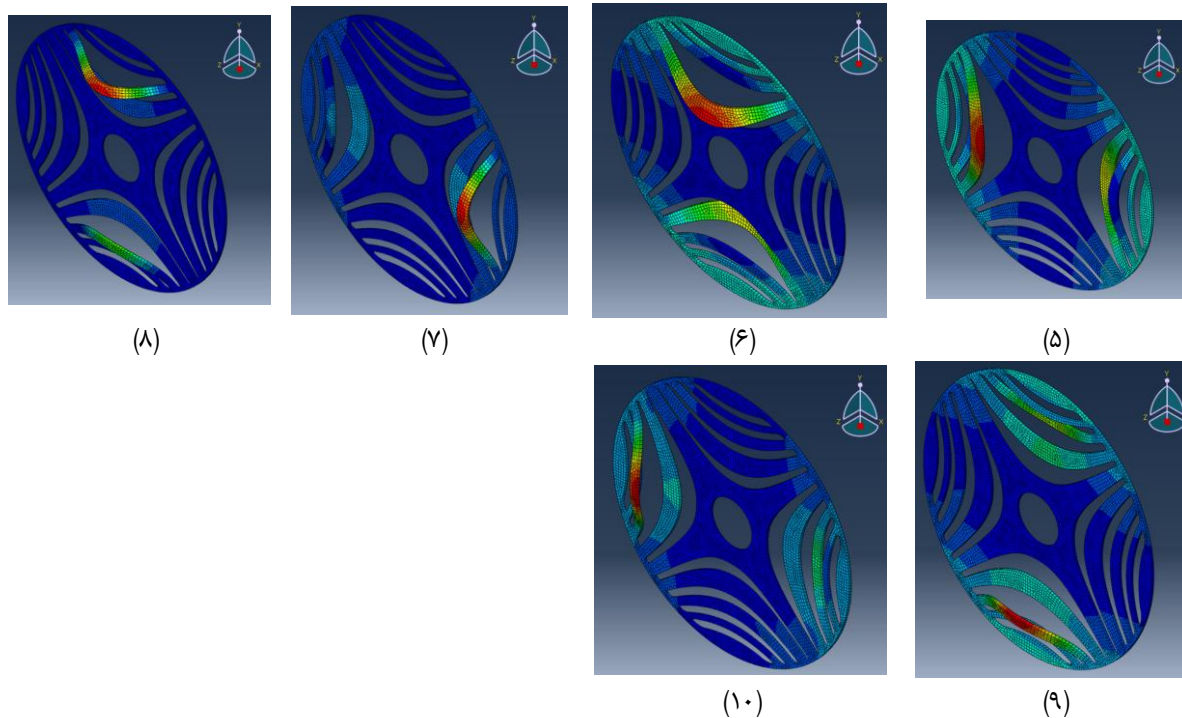
شکل ۴۰-۳: نمودار ده فرکانس طبیعی اول برای مدل دارای آهنربا و با ضخامت سی میلیمتر

۳-۹- آنالیز کمانش

همان‌طور که در فصل قبل اشاره شد، آنالیز کمانش با در نظر دو حالت مختلف انجام شده است. با در نظر گرفتن این دو حالت، بار بحرانی کمانش و گشتاور بحرانی کمانش به صورت جداگانه محاسبه شده‌اند. در شکل ۴۱-۳ ده مود کمانشی اول برای حالت سرعت بحرانی دورانی مشاهده می‌شود. در این حالت تمامی گشتاور وارد به قطعه به آن اعمال شده است و در مرحله کمانش، سرعت دورانی بحرانی که نیروی گریز از مرکزی ایجاد می‌کند که باعث ایجاد کمانش می‌شود محاسبه شده است. همچنین جدول ۷-۳ سرعت بحرانی مرتبط با این ده مود کمانشی را نمایش می‌دهد. با توجه به این جدول تمام سرعت‌های دورانی بحرانی از سرعت دوران روتور بالاتر هستند.

در شکل ۴۲-۳ ده مود کمانشی اول برای حالت گشتاور بحرانی دورانی مشاهده می‌شوند. در این حالت سرعت دورانی به طور کامل به مدل اعمال شده است و گشتاور مورد نیاز برای کمانش محاسبه شده است. در جدول ۸-۳ مقدار این گشتاورها ارائه شده‌اند. این گشتاورها از گشتاور وارد شده به روتور بسیار بیشتر هستند. لازم به ذکر است که مقدار منفی در برخی از این داده‌ها تنها بیانگر تغییر جهت در بردار گشتاور است و در طول بردار گشتاور تاثیری ندارد.

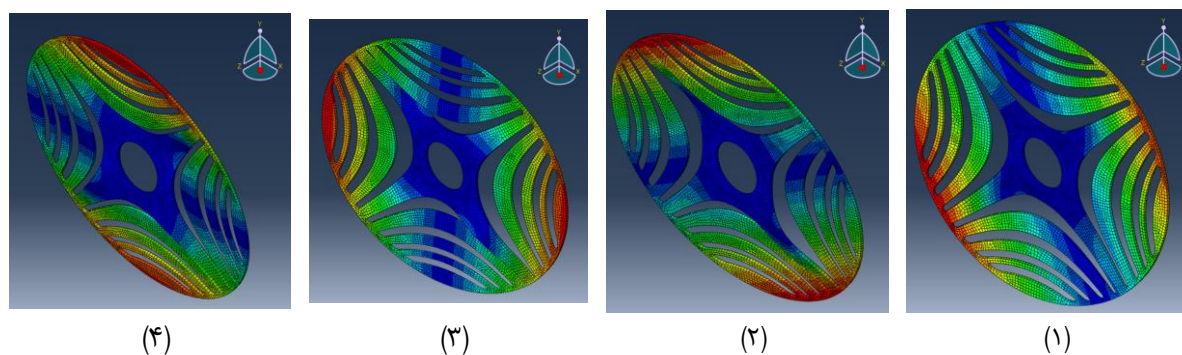


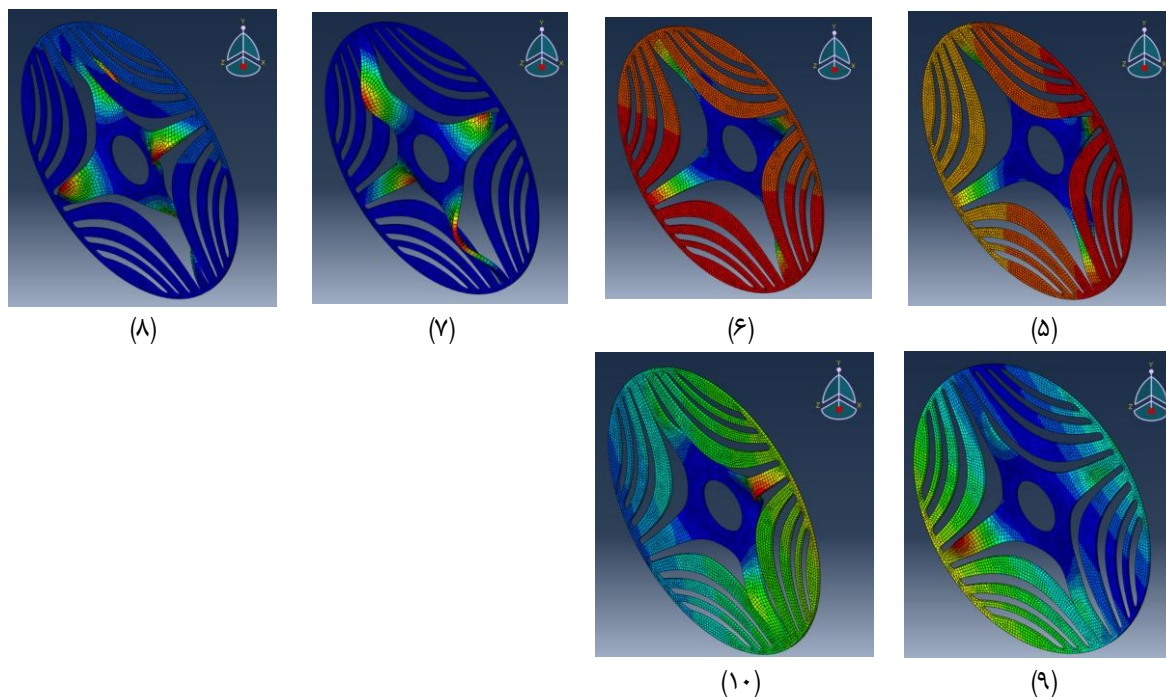


شکل ۴۱-۳: ده مود کمانشی برای حالت سرعت دورانی بحرانی در مدل بدون آهنربا و با ضخامت یک میلیمتر

جدول ۷-۳: سرعت دورانی بحرانی برای ده مود اول کمانشی مدل بدون آهنربا

شماره مود	سرعت دورانی بحرانی (رادیان بر ثانیه)	شماره مود	سرعت دورانی بحرانی (رادیان بر ثانیه)
۱	۹۵۹۷۳	۶	۲۶۴۵۸۱
۲	۹۹۸۲۷	۷	۳۲۵۱۳۳
۳	۲۱۲۶۲۰	۸	۳۳۴۴۴۱
۴	۲۲۵۸۲۷	۹	۳۶۲۵۹۴
۵	۲۵۱۴۰۱	۱۰	۳۶۶۴۹۰



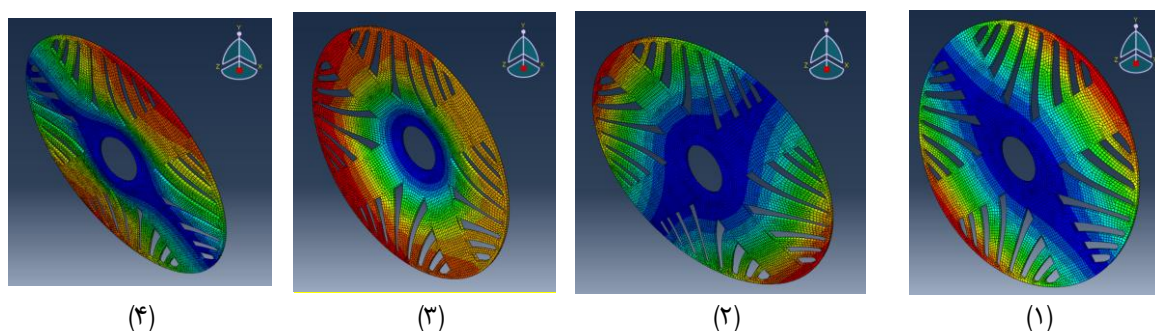


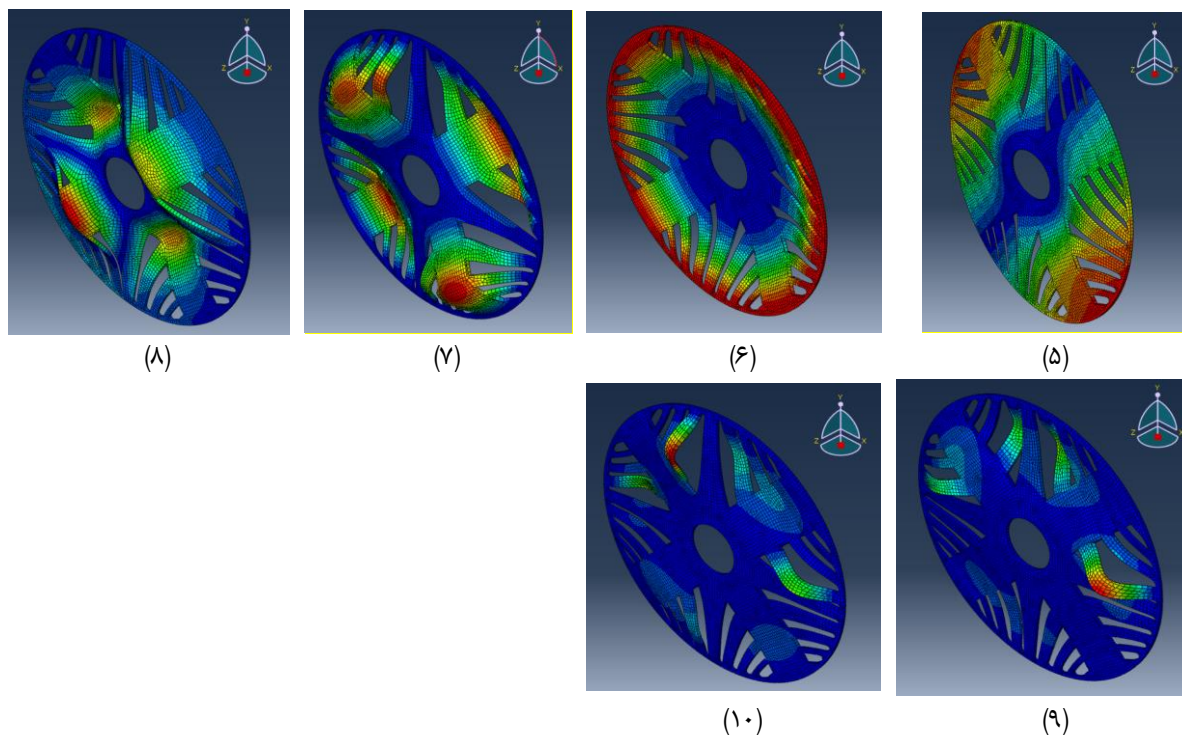
شکل ۴۲-۳: ده مود کمانشی برای حالت گشتاور دورانی بحرانی در مدل بدون آهنربا و با ضخامت یک میلیمتر

جدول ۸-۳: گشتاور بحرانی دورانی برای ده مود اول کمانشی مدل بدون آهنربا

گشتاور بحرانی (نیوتن بر میلیمتر)	شماره مود	گشتاور بحرانی (نیوتن بر میلیمتر)	شماره مود
-۴۰۹۳.۵	۶	۳۵۱۶.۳	۱
۵۳۷۰.۵	۷	۳۶۰۸.۷	۲
-۵۴۸۴.۰	۸	-۳۶۱۷.۷	۳
-۶۶۷۸.۸	۹	-۳۶۳۴.۸	۴
-۶۸۴۹.۶	۱۰	۳۹۷۶.۵	۵

در شکل ۴۳-۳ ده مود اول کمانشی برای مدل دارای آهنربا برای حالت سرعت دورانی بحرانی مشاهده می‌شوند. در جدول ۹-۳ نیز مقدار این سرعت‌های دورانی مشاهده می‌شوند. سرعت‌های بحرانی دورانی در این مدل نسبت به مدل دارای آهنربا بسیار بالاتر هستند که این امر نشان دهنده آن است که مدل دارای آهنربا نسبت به کمانش بسیار مقاوم‌تر است. علت این مقاوت بالاتر وجود لبه‌های نگهدارنده آهنرباها در این روتور است که بروز کمانش را به تاخیر می‌اندازند.



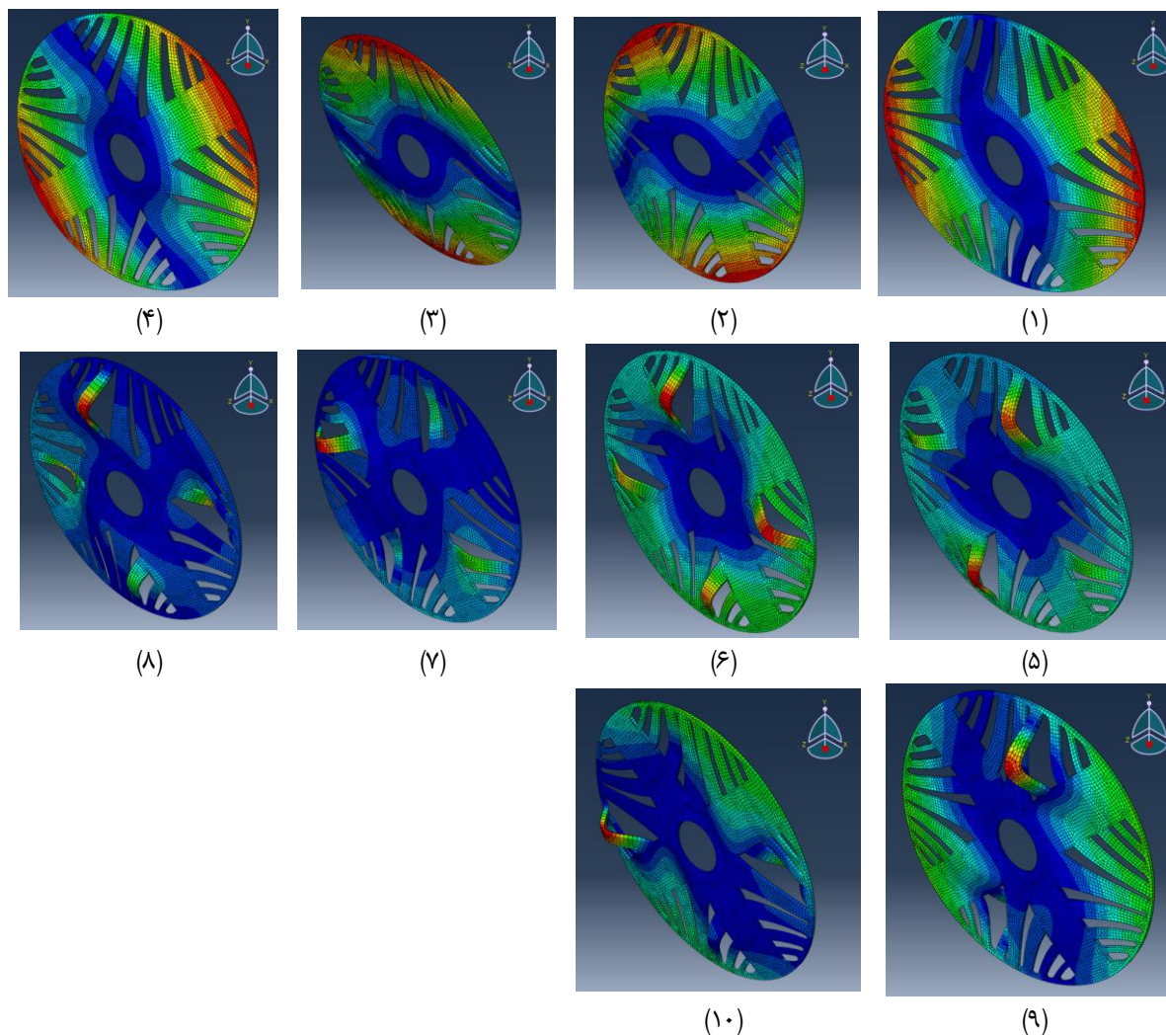


شکل ۳-۴۳: ده مود کمانشی برای حالت سرعت دورانی بحرانی در مدل دارای آهنربا و با ضخامت یک میلیمتر

جدول ۳-۹: سرعت دورانی بحرانی در مدل دارای آهنربا و با ضخامت یک میلیمتر

شماره مود	سرعت دورانی بحرانی (رادیان بر ثانیه)	شماره مود	سرعت دورانی بحرانی (رادیان بر ثانیه)
۱	۶۴۰۲۶۷	۶	۲۲۰۷۳۸
۲	۶۴۶۸۸۶	۷	۵۴۱۵۲۳
۳	-۱۳۶۶۱۹	۸	-۵۵۲۹۷۸
۴	-۲۰۲۹۸۱	۹	۵۶۵۵۵۱
۵	-۲۰۹۳۷۴	۱۰	۵۶۹۹۱۵

شکل ۳-۴۴: ده مود کمانشی اول برای حالت گشتاور بحرانی در روتور دارای آهنربا را نمایش می‌دهد. جدول ۳-۱۰ نیز مقدار گشتاور بحرانی متناظر با این ده مود را نمایش می‌دهد. همانند حالت سرعت دورانی، گشتاور بحرانی نیز در این مدل نسبت به مدل بدون آهنربا بالاتر هستند. به طور کلی می‌توان نتیجه گیری کرد که روتور دارای آهنربا نسبت به روتور بدون آهنربا مقاومت بیشتری نسبت به کمانش دارد، هرچند که برای هر دو روتور محدوده کاری هم از لحاظ گشتاور و هم از لحاظ سرعت بحرانی پایین‌تر از مقدار بحرانی هستند. با توجه به ابعاد ضخیم مدل‌های ۳۰ و ۴۰ میلیمتری، بروز کمانش برای این حالت از روتورها روی نمی‌دهد و نرم‌افزار جواب فیزیکی قابل قبولی برای این حالت از تحلیل ارائه نمی‌کند. بنابر این، تحلیل کمانش در این تحقیق تنها برای روتورهای یک میلیمتری ارائه شده است.



شکل ۴۴-۳: ده مود کماتشی برای حالت گشتاور دورانی بحرانی در مدل دارای آهنربا و با ضخامت یک میلیمتر

جدول ۱۰-۳: گشتاور دورانی بحرانی در مدل دارای آهنربا و با ضخامت یک میلیمتر

شماره مود	گشتاور بحرانی (نیوتن بر میلیمتر)	شماره مود	گشتاور بحرانی (نیوتن بر میلیمتر)
۱	-۱۲۸۹۶	۶	۱۸۴۸۴
۲	۱۳۰۷۵	۷	-۱۹۱۲۵
۳	-۱۳۳۱۴	۸	۱۹۱۶۵
۴	۱۳۲۸۱	۹	-۱۹۷۵۵
۵	-۱۸۷۴۱	۱۰	۲۰۰۸۲

فصل چهارم: مدلسازی و طراحی درایو موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی

۴-۱- مقدمه

در این فصل، ابتدا مدلسازی موتورهای سنکرون مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس با استفاده از مدل دینامیکی ماشین سنکرون، مدل دینامیکی موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی و موتور سنکرون رلوکتانسی استخراج می‌گردد. پس از آن به بررسی روش‌های کنترل پرداخته و نتایج شبیه‌سازی مربوط به موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی و موتور سنکرون رلوکتانسی ارائه می‌شود. در انتها گزارش ساخت درایو ساخته مربوط به این موتورها بیان می‌گردد.

۴-۲- مدل‌سازی موتورهای سنکرون

در بررسی حالت پایدار ماشین معمولاً از مدار معادل تکفاز استفاده می‌شود، ولی وقتی هدف بررسی مسائلی مانند کنترل سرعت باشد، باید به عملکرد دینامیکی توجه شود. در حالت دینامیکی اثر کوپلاژ بین فازهای رتور و استاتور مطرح می‌باشد، خصوصاً با توجه به اینکه ضرایب کوپلاژ متناسب با وضعیت رتور بوده و در طول زمان تغییر خواهد کرد. در نتیجه با معادلات دیفرانسیلی که تغییرپذیر با زمان هستند مواجه خواهیم بود. برای رفع این مشکل می‌توان از مدل‌های دینامیکی با بکارگیری تئوری محورهاهای qd استفاده کرد و بدینوسیله پارامترهای متغیر با زمان را حذف کرد [۱۴ و ۱۵].

در این بخش ابتدا مدل‌سازی موتورهای سنکرون در شرایط کلی ارائه می‌گردد. روابط ولتاژ رتور و استاتور و همچنین روابط شار پیوندی به صورت زیر می‌باشند:

$$\underline{v}^s = \underline{R}_s \underline{i}^s + \frac{d\underline{\psi}^s}{dt}, \quad \underline{\psi}^s = \underline{L}_s \underline{i}^s + \underline{L}_{sr} \underline{i}^r \quad (۴-۱)$$

$$\underline{v}^s = \underline{R}_s \underline{i}^s + \frac{d\underline{\psi}^s}{dt}, \quad \underline{\psi}^s = \underline{L}_s \underline{i}^s + \underline{L}_{sr} \underline{i}^r \quad (۴-۲)$$

پارامترهای تعریف شده در روابط (۴-۱) و (۴-۲) به صورت زیر می‌باشند:

$$\underline{i}^s = [i_{1s} \ i_{2s} \ i_{3s}]^T \quad \underline{v}^s = [v_{1s} \ v_{2s} \ v_{3s}]^T \quad (۴-۳)$$

$$\underline{\psi}^s = [\psi_{1s} \ \psi_{2s} \ \psi_{3s}]^T \quad (۴-۴)$$

$$\underline{R}_s = \text{diag}(R_s \ R_s \ R_s) \quad (۴-۵)$$

$$\underline{R}_r = \text{diag}(R_g \ R_{kq} \ R_f \ R_{kd})$$

۴-۲-۱- اعمال ماتریس تبدیل

تبدیلات مورد نظر با استفاده از روابط زیر انجام می‌پذیرد:

$$\underline{v}_{\alpha\beta}^s = \underline{C} \underline{v}^s, \quad \underline{i}_{\alpha\beta}^s = \underline{C} \underline{i}^s, \quad \underline{\psi}_{\alpha\beta}^s = \underline{C} \underline{\psi}^s \quad (۴-۶)$$

ماتریس تبدیل C در رابطه (۴-۷) نشان داده شده است که این ماتریس به اصطلاح حافظ توان می‌باشد:

$$C = \beta \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \cos \alpha & \cos 2\alpha \\ 0 & \sin \alpha & \sin 2\alpha \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (۴-۷)$$

۴-۲-۲- تبدیل گردان

تبدیل گردان باید به مؤلفه های $\alpha - \beta$ اعمال گردد. ماتریس تبدیل گردان استاتور به صورت زیر می-باشد: [۱۴]

$$\underline{D}_s = \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \sin \theta_s \\ -\sin \theta_s & \cos \theta_s \\ & & 1 \end{bmatrix} \quad \underline{D}_s^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_s & -\sin \theta_s \\ \sin \theta_s & \cos \theta_s \\ & & 1 \end{bmatrix} \quad (۴-۸)$$

در رابطه بالا θ_s زاویه لحظه‌ای محور d را نسبت به محور مغناطیسی فاز ۱ استاتور نشان می‌دهد. به این ترتیب این یک قاب مرجع قراردادی است که در آن $\theta_s = \int \omega_r dt$ می‌باشد. با اعمال ماتریس تبدیل بر روابط مربوطه، معادلات ولتاژ استاتور و رتور به صورت زیر خواهد شد:

$$\begin{aligned} v_{ds} &= R_s i_{ds} - \omega_r \psi_{qs} + p \psi_{ds} \\ v_f &= R_f i_f + p \psi_f \\ v_{qs} &= R_s i_{qs} + \omega_r \psi_{ds} + p \psi_{qs} \\ v_{0s} &= R_s i_{0s} + p \psi_{0s} \end{aligned} \quad (۴-۹)$$

که در این روابط $p \equiv \frac{d}{dt}$ می‌باشد. روابط شار نیز به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned} \psi_{ds} &= L_d i_{ds} + L_{md} i_f, \quad \psi_f = L_{md} i_d + L_f i_f \\ \psi_{qs} &= L_q i_{qs} \\ \psi_{0s} &= L_{ls} i_{0s} \end{aligned} \quad (۴-۱۰)$$

همچنین رابطه گشتاور به صورت زیر خواهد شد:

$$\begin{aligned} T_e &= P[\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}] = P[L_{md} (i_{ds} + i_f) i_{qs} - L_{mq} (i_{qs}) i_{ds}] \\ &= P[L_{md} (i_f) i_{qs}] + P[(L_{md} - L_{mq}) i_{ds} i_{qs}] \end{aligned} \quad (۴-۱۱)$$

۴-۲-۳- معادلات دینامیکی موتور سنکرون مغناطیس دائم

از آنجا که در ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم، سیم‌پیچ تحریک وجود ندارد، لذا دومین رابطه در سری روابط (۴-۹) و (۴-۱۰) حذف می‌گردد. بدین ترتیب شار مغناطیس دائم، ψ_m ، جایگزین $L_{md} i_f$ در روابط مربوط به محور d می‌گردد. بدین ترتیب معادلات دینامیکی موتور سنکرون مغناطیس دائم به صورت زیر خواهد گردید:

$$\begin{aligned} v_{ds} &= R_s i_{ds} - \omega_r \psi_{qs} + p \psi_{ds} \\ v_{qs} &= R_s i_{qs} + \omega_r \psi_{ds} + p \psi_{qs} \\ v_{0s} &= R_s i_{0s} + p \psi_{0s} \end{aligned} \quad (۴-۱۲)$$

روابط شار نیز به صورت زیر می‌باشند:

$$\begin{aligned} \psi_{ds} &= L_d i_{ds} + \psi_m \\ \psi_{qs} &= L_q i_{qs} \\ \psi_{0s} &= L_{ls} i_{0s} \end{aligned} \quad (۴-۱۳)$$

رابطه گشتاور هم به صورت زیر خواهد شد:

$$T_e = P[\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}] = P[L_{md}(i_{ds} + i_f + i_{kd})i_{qs} - L_{mq}(i_{qs} + i_{kq})i_{ds}] \quad (4-14)$$

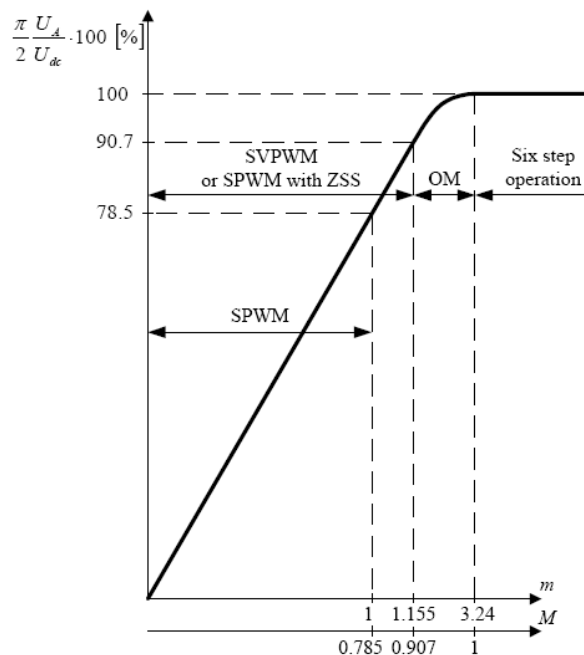
$$= P[\psi_m i_{qs}] + P[(L_{md} - L_{mq})i_{ds}i_{qs}]$$

در این رابطه ترم اول مربوط به گشتاور الکتریکی بوده همانند موتور dc تحریک جداگانه با این تفاوت عمده که شار توسط آهنربای دائم تولید می‌گردد. ترم دوم نیز گشتاور رلوکتانسی ناشی از تفاوت بین اندوکتانس‌های محورهای d و q ضربدر مؤلفه‌های جریان d و q می‌باشد. بر این اساس در موتور مغناطیس دائم داخلی، هر دو ترم گشتاور الکترومغناطیسی و رلوکتانسی وجود دارد. در موتورهای سنکرون رلوکتانسی ترم شار آهنربا از تمامی روابط از جمله رابطه گشتاور حذف می‌گردد.

۴-۳- انواع روش‌های مدولاسیون

نیازهای اصلی که یک روش مدولاسیون مناسب باید برآورده کند، به شرح زیر می‌باشند: [۱۶]

- رنج وسیع ناحیه خطی
- دستیابی به تعداد کلیدزنی کم و در نتیجه تلفات کم
- ایجاد محتوای هارمونیک کم در جریان و ولتاژ
- حذف هارمونیک‌های مرتبه پایین
- امکان عملکرد در ناحیه فرامدولاسیون
- سادگی پیاده‌سازی
- کاهش نویز

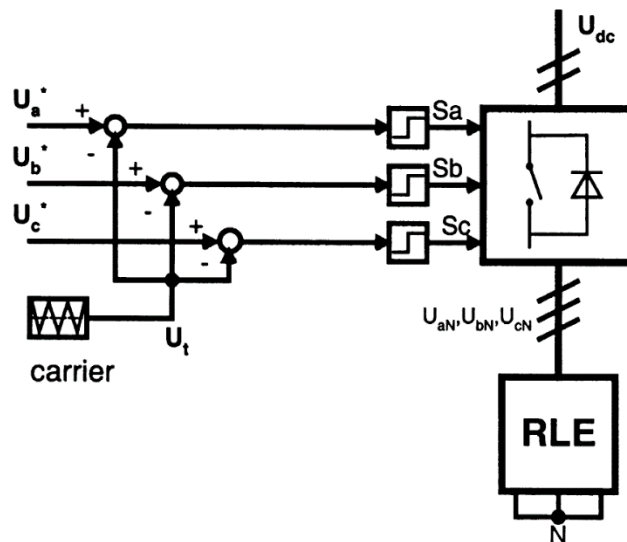


شکل ۱-۴: ولتاژ خروجی اینورتر منبع ولتاژ برحسب ضریب مدولاسیون

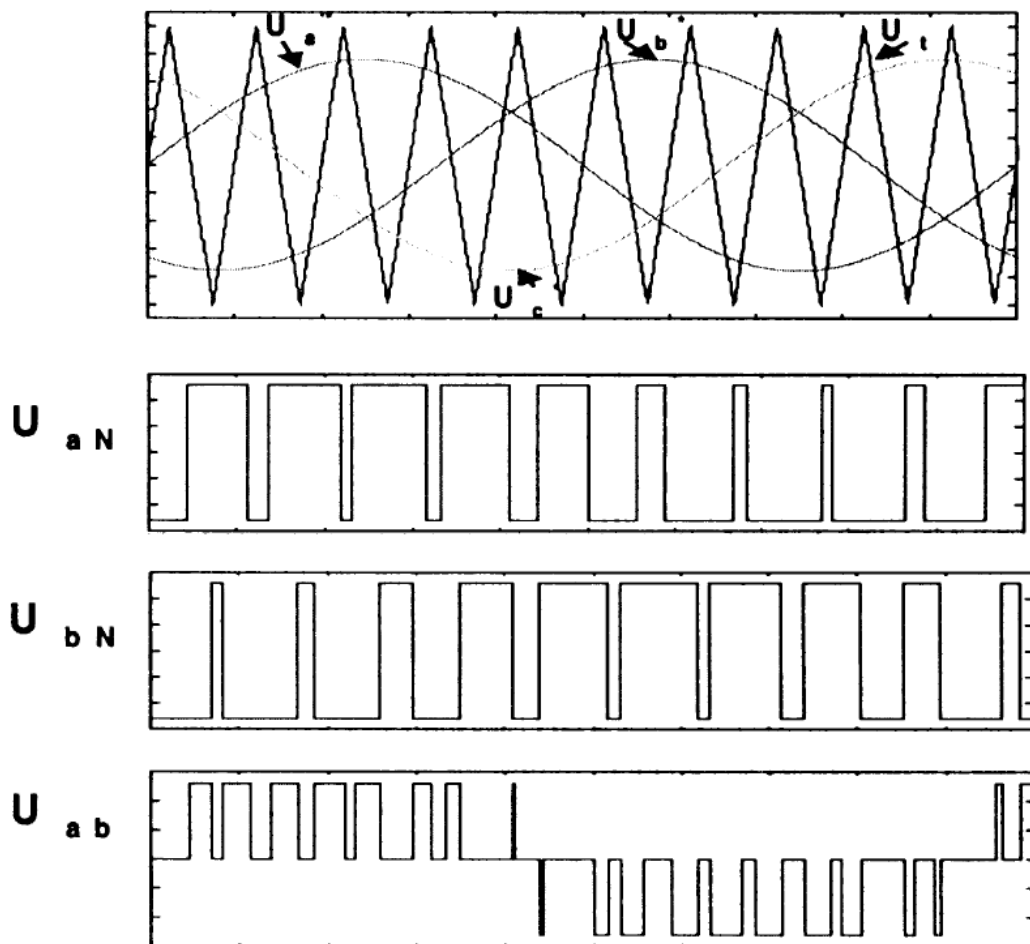
۴-۳-۱- مدولاسیون پهنای پالس مبتنی بر موج حامل

۴-۳-۱-۱- مدولاسیون پهنای پالس سینوسی

این نوع مدولاسیون بر پایه موج حامل مثلثی انجام می‌شود. به این صورت که سه سیگنال مرجع سینوسی U_a ، U_b و U_c با موج‌های حامل مقایسه شده و از این مقایسه بازه‌های کلیدزنی تعیین می‌گردد. ثابت بودن فرکانس موج حامل، موجب تمرکز هارمونیک‌ها در فرکانس کلیدزنی و ضرایب آن می‌شود. از طرفی رنج محدود ناحیه خطی، یک محدودیت برای مدولاسیون پهنای پالس مبتنی بر موج حامل می‌باشد. محدوده ناحیه خطی در جایی است که دامنه موج مرجع و حامل برابر باشند. بعد از این ناحیه فرامدولاسیون رخ خواهد داد [۱۷].



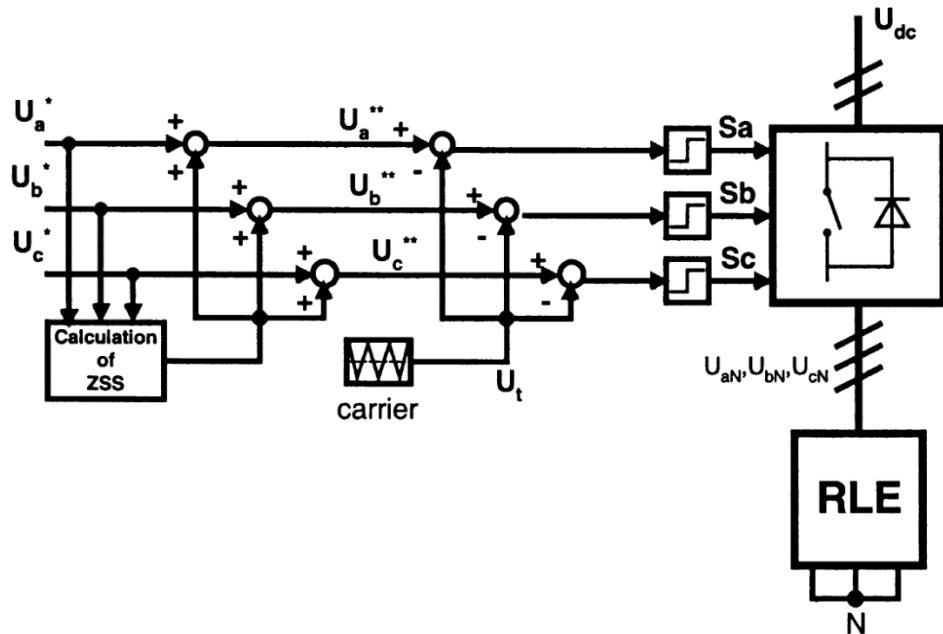
شکل ۲-۴: بلوک دیاگرام مدولاسیون پهنای پالس مبتنی بر موج حامل



شکل ۳-۴: شکل موج‌های مربوط به مدولاسیون پهنای پالس مبتنی بر موج حامل

۴-۳-۱-۲- مدولاسیون پهنای پالس مبتنی بر موج حامل با سیگنال مؤلفه صفر

در سیستم‌هایی که نقطه خنثی به سر وسط لینک dc متصل نشده باشد، جریان فاز تنها به اختلاف ولتاژ بین فازها وابسته خواهد بود. بر این اساس می‌توان یک سیگنال مؤلفه صفر اضافی (متشکل از هارمونیک‌های مضرب ۳) به موج اصلی اضافه کرد. که این مؤلفه موجب اختلال در ولتاژ فازهای مختلف نخواهد شد و تأثیری روی جریان بار نخواهد گذاشت. این موضوع موجب افزایش ناحیه خطی و کاهش فرکانس متوسط کلیدزنی می‌شود. ولتاژ مؤلفه صفر اضافه شده بین نقطه خنثی و سر وسط لینک dc ظاهر می‌شود.



شکل ۴-۴: مدولاسیون پهنای پالس مبتنی بر موج حامل با سیگنال مؤلفه صفر

۴-۳-۲- مدولاسیون بردار فضایی

۴-۳-۱- اساس مدولاسیون بردار فضایی

استراتژی مربوط به این مدولاسیون بر اساس بیان بردار فضایی ولتاژ سمت ac می‌باشد. در یک مبدل دو سطحی سه فاز، هشت حالت کلیدزنی مختلف وجود دارد. که این هشت حالت شامل شش بردار فعال و دو بردار صفر می‌باشد. بردارهای فعال فضا را به شش ناحیه تقسیم می‌کنند که بردار مرجع با استفاده از فعال سازی بردارهای مختلف در بازه های زمانی مختلف ایجاد می‌شود. حداکثر طول بردار مرجع، برای هر زاویه، برابر $\frac{V_{dc}}{\sqrt{3}}$ می‌باشد. مقادیر بزرگتر از این، برای بردار مرجع منجر به عملکرد در ناحیه فرامدولاسیون (ناحیه غیرخطی) می‌شود. بر خلاف روش مدولاسیون پهنای پالس مبتنی بر موج حامل، در مدولاسیون بردار فضایی، موج حامل وجود ندارد. بلکه از بردار مرجع با فرکانس ثابت $2f_s$ نمونه برداری شده که در نمونه برداری بعدی از مقدار جدید بردار مرجع استفاده شده تا زمان های مربوط به بردارها یعنی t_0, t_1, t_2 و t_7 تعیین شوند. بدین ترتیب، کافی است که زمان های بردارها برای یک سکتور محاسبه شده و به بقیه سکتورها بسط داده شود [۱۸].

$$t_1 = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} M T_s \sin(\pi/3 - \alpha) \quad (4-15)$$

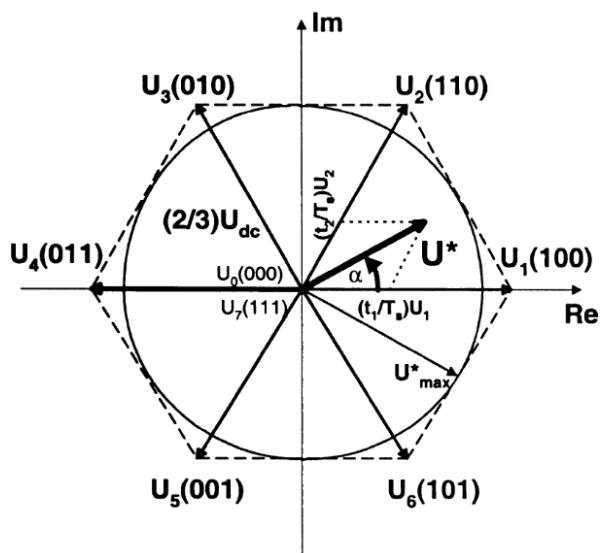
$$t_2 = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} M T_s \sin \alpha.$$

شرط دیگری که حتماً باید برقرار باشد عبارتست از:

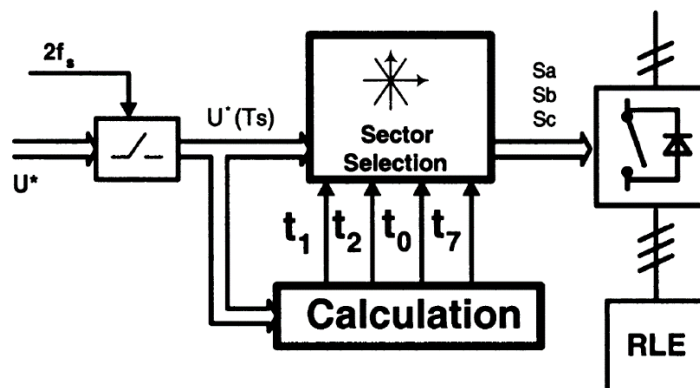
$$t_1 + t_2 < T_s \quad (4-16)$$

که اختلاف زمان تا T_s مربوط به بردارهای صفر یعنی U_0 و U_7 می‌باشد.

$$t_{0,7} = T_s - t_1 - t_2 = t_0 + t_7 \quad (4-17)$$



شکل ۵-۴: اساس مدولاسیون بردار فضایی



شکل ۶-۴: بلوک دیاگرام مربوط به مدولاسیون بردار فضایی [۱۸]

همچنین ولتاژهای مابین سه فاز خروجی و هر یک از نقاط خنثی و نقطه سر وسط لینک dc در جدول زیر نمایش داده شده است. رابطه ولتاژ بین N و 0 به قرار زیر می باشد:

$$U_{N0} = \frac{1}{T_s} \left(-\frac{U_{dc}}{2} t_0 - \frac{U_{dc}}{6} t_1 + \frac{U_{dc}}{6} t_2 + \frac{U_{dc}}{2} t_7 \right) = \frac{U_{dc}}{2} \frac{1}{T_s} \left(-t_0 - \frac{t_1}{3} + \frac{t_2}{3} + t_7 \right) \quad (4-18)$$

جدول ۱-۴: ولتاژهای مابین سه فاز خروجی و هر یک از نقاط خنثی و نقطه سر وسط لینک dc

	U_{a0}	U_{b0}	U_{c0}	U_{aN}	U_{bN}	U_{cN}	U_{N0}
U_0	$-U_{dc}/2$	$-U_{dc}/2$	$-U_{dc}/2$	0	0	0	$-U_{dc}/2$
U_1	$U_{dc}/2$	$-U_{dc}/2$	$-U_{dc}/2$	$2U_{dc}/3$	$-U_{dc}/3$	$-U_{dc}/3$	$-U_{dc}/6$
U_2	$U_{dc}/2$	$U_{dc}/2$	$-U_{dc}/2$	$U_{dc}/3$	$U_{dc}/3$	$-2U_{dc}/3$	$U_{dc}/6$
U_3	$-U_{dc}/2$	$U_{dc}/2$	$-U_{dc}/2$	$-U_{dc}/3$	$2U_{dc}/3$	$-U_{dc}/3$	$-U_{dc}/6$
U_4	$-U_{dc}/2$	$U_{dc}/2$	$U_{dc}/2$	$-2U_{dc}/3$	$U_{dc}/3$	$U_{dc}/3$	$U_{dc}/6$
U_5	$-U_{dc}/2$	$-U_{dc}/2$	$U_{dc}/2$	$-U_{dc}/3$	$-U_{dc}/3$	$2U_{dc}/3$	$-U_{dc}/6$
U_6	$U_{dc}/2$	$-U_{dc}/2$	$U_{dc}/2$	$U_{dc}/3$	$-2U_{dc}/3$	$U_{dc}/3$	$U_{dc}/6$
U_7	$U_{dc}/2$	$U_{dc}/2$	$U_{dc}/2$	0	0	0	$U_{dc}/2$

۴-۲-۲-۲- مدولاسیون بردار فضایی سه فاز با استفاده از بردارهای صفر متقارن

متداول ترین روش مدولاسیون بردار فضایی استفاده از بردارهای صفر متقارن می باشد:

$$t_0 = t_7 = (T_s - t_1 - t_2)/2 \quad (۴-۱۹)$$

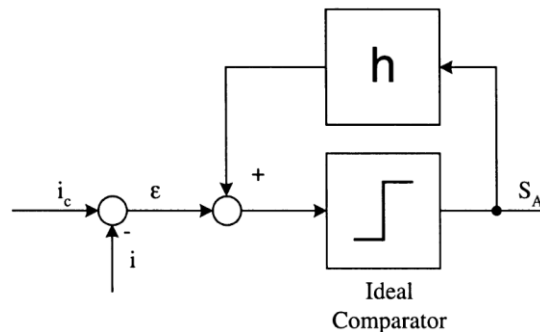
در این حالت رابطه بین زمان های t_0, t_1, t_2 و t_7 و زمان های قطع و وصل به صورت زیر می باشد:

$$\begin{aligned} T_{aon} &= t_0/2 & T_{aoff} &= t_0/2 + t_1 + t_2 \\ T_{bon} &= t_0/2 + t_1 & T_{boff} &= t_0/2 + t_2 \\ T_{con} &= t_0/2 + t_1 + t_2 & T_{coff} &= t_0/2. \end{aligned} \quad (۴-۲۰)$$

در نوع متداول مدولاسیون بردار فضایی، زمان های t_0, t_1 و t_2 ، تنها برای یک سکتور محاسبه می شوند.

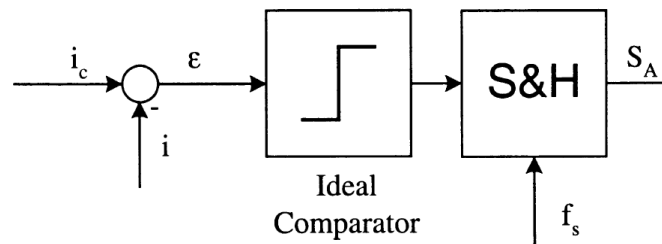
۴-۳-۳- کنترل کننده های غیر خطی از نوع قطع و وصلی^۳

جهت ایجاد جریان کاملاً ایده آل در یک بار سلفی باید فرکانس کلیدزنی بینهایت باشد که این امر منجر به تلفات کلیدزنی می شود. برای جلوگیری از این موضوع فرکانس کلیدزنی توسط یک باند h (شکل (۳-۷)) و یا با استفاده از یک S&H با فرکانس نمونه برداری f_s (شکل (۳-۸)) محدود می شود. بر این اساس دو دسته کنترل داریم:



شکل ۷-۴: محدود کردن فرکانس کلیدزنی با استفاده از باند هیستریزس

³ On-off



شکل ۸-۴: محدود کردن فرکانس کلیدزنی با محدود کردن فرکانس نمونه برداری [۱۹]

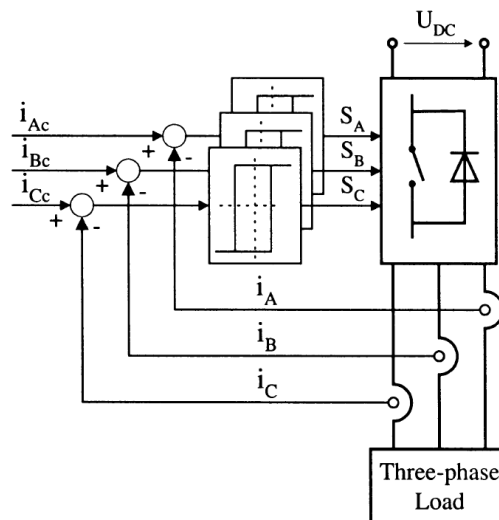
۴-۳-۱- کنترل کننده های جریان هیستریز

طرح های کنترل هیستریز بر اساس حلقه فیدبک غیر خطی با مقایسه کننده هیستریز دو سطحی می باشند. سیگنال های کلیدزنی S_A ، S_B و S_C به طور مستقیم هنگامیکه خطا از باند h خارج شود، تعیین می شوند.

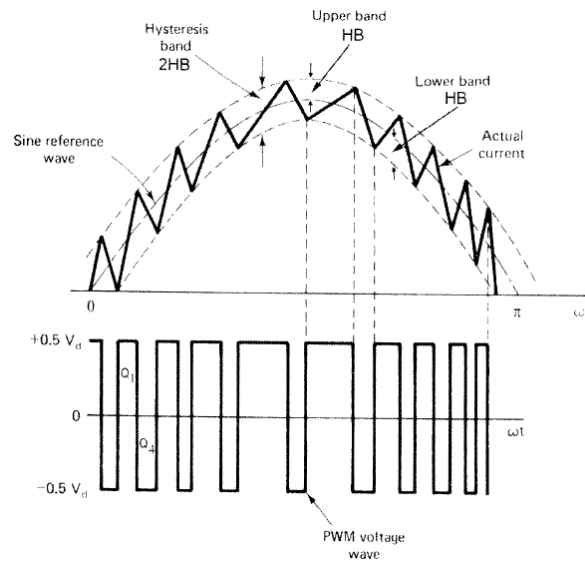
مزایای مهم کنترل کننده های هیستریز، سادگی، قابلیت اطمینان بالا، عدم وجود خطای دنبال کننده، عدم وابستگی به تغییر پارامترهای بار و دینامیک سریع که تنها با سرعت کلیدزنی و ثابت زمانی بار محدود می شود.

البته کنترل کننده هیستریز معایب زیر را نیز دارد:

- فرکانس کلیدزنی مبدل تا حد زیادی به پارامترهای بار وابسته بوده و با ولتاژ ac تغییر می کند.
 - به علت ذات تصادفی این روش، عملکرد آن به نحوی است که حفاظت از مبدل مشکل می گردد.
- یکی از مشخصات اصلی کنترل کننده های هیستریز آن است که جریان لحظه ای دقیقاً در باند قرار می گیرد. مگر در سیستم های بدون سیم صفر که در این سیستم ها خطای لحظه ای می تواند به دو برابر مقدار باند هیستریز برسد. که این موضوع به علت اثر متقابل بین سه کنترل کننده مستقل در سیستم می باشد. در واقع تغییر وضعیت مقایسه گر در یک فاز بر روی ولتاژ اعمالی در دو فاز دیگر تأثیر می گذارد.



شکل ۹-۴: کنترل کننده های جریان هیستریز

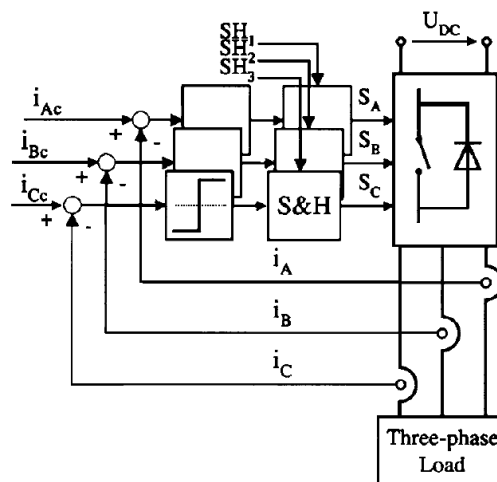


شکل ۱۰-۴: اساس کار کنترل کننده هیستریزس

۴-۳-۳-۲- کنترل کننده دلتا

طرح پایه این روش در شکل (۳-۱۱) نشان داده شده است. این طرح مشابه روش هیستریزس بوده اما دارای تفاوت‌هایی می‌باشد. در این روش تنها علامت خطا توسط مقایسه گرهای تشخیص داده می‌شود (نمونه-برداری با نرخ ثابتی انجام می‌شود و وضعیت اینورتر در فواصل نمونه برداری ثابت می‌ماند). بدین ترتیب در این روش PWM به کار گرفته نمی‌شود. یکی از معایب این روش تولید زیرهارمونیک (به صورت اجتناب ناپذیر) می‌باشد. با در نظر گرفتن خروجی‌های یکسان، روش دلتا باید دارای فرکانس کلیدزنی حدود هفت برابر مدولاتور PWM باشد. البته لازم به ذکر است که روش دلتا ساده و درعین حال با قابلیت اطمینان بالا می‌باشد و علاوه بر این دارای دینامیک مناسبی می‌باشد.

در روش دلتا، فرکانس کلیدزنی محدود به فرکانس نمونه برداری می‌باشد. همچنین در این روش، هارمونیک‌های جریان ثابت نبوده و به پارامترهای بار، ولتاژ لینک dc، ولتاژ سمت ac فرکانس نمونه برداری وابسته است.



شکل ۱۱-۴: بلوک دیاگرام کنترل کننده دلتا

۴-۴-۴- روش‌های کنترل موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی و موتورهای سنکرون مغناطیسی

دائم

بکارگیری روش کنترل مناسب در کنترل موتورهای سنکرون جهت دستیابی به عملکرد مطلوب از اهمیت بسزایی برخوردار است. گشتاور در موتورهای سنکرون با آهنربای داخلی با رابطه زیر بیان می‌گردد:

$$T_e = P[\lambda_f i_{qs}] + P[(L_d - L_q)i_{ds}i_{qs}] \quad (۴-۲۱)$$

همانگونه که ملاحظه می‌گردد، گشتاور از جمع مؤلفه‌های رلوکتانسی و مؤلفه مربوط به آهنربا حاصل می‌گردد. روش‌های مختلفی در کنترل این موتورها مورد استفاده قرار می‌گیرد که از جمله آنها می‌توان به روش زاویه گشتاور ثابت، ضریب توان واحد، شار پیوندی ثابت، حداکثر گشتاور به جریان، تلفات ثابت و روش حداکثر بازده اشاره کرد. در ادامه به اختصار این روش‌ها توضیح داده خواهند شد.

۴-۴-۴-۱- روش زاویه گشتاور ثابت ($\delta = 90$)

زاویه گشتاور، زاویه بین بردار جریان و محور d در قاب مرجع رتور می‌باشد. در این روش زاویه گشتاور همواره برابر 90 درجه بوده که موجب می‌گردد تا جریان محور d برابر صفر گردد. همچنین روش زاویه گشتاور ثابت، رایج‌ترین روش در صنعت می‌باشد. مهمترین مزیت این روش آنست که با خطی کردن رابطه بین گشتاور و جریان موجب ساده شدن کنترل گشتاور می‌شود. بر این اساس کنترل موتور PMSM بر اساس این روش همانند موتور dc می‌گردد که این امر موجب توجه صنعت به این روش گردیده است [۲۰].

رابطه (۴-۲۲) به فرم دیگری بر حسب زاویه δ و جریان i_s به صورت زیر قابل بیان می‌باشد:

$$T_e = P[\lambda_{af} i_s \sin \delta] + \frac{P}{2}[(L_d - L_q)i_s^2 \sin 2\delta] \quad (۴-۲۲)$$

حال با توجه به شرط $\delta = 90$ جریان i_d برابر صفر شده، لذا رابطه گشتاور به فرم زیر در می‌آید:

$$T_e = P[\lambda_{af} i_s] \quad (۴-۲۳)$$

که تحت این شرایط ($\delta = 90$)، $i_{qs} = i_s$ می‌باشد. براساس رابطه (۴-۲۳) گشتاور در این روش مؤلفه رلوکتانسی نداشته و به بیان دیگر به ضریب برجستگی وابستگی ندارد که به همین دلیل به ازای جریان محور q یکسان، در هر دو نوع موتور با آهنربای داخلی و با آهنربای سطحی گشتاور یکسانی تولید می‌گردد.

$$PF = \frac{\lambda_f i_q}{\sqrt{(\lambda_f i_q)^2 + (L_q i_q^2)^2}} \quad (۴-۲۴)$$

لازم به ذکر است که با توجه به اینکه در این روش، مؤلفه گشتاور رلوکتانسی حذف می‌شود و فقط از مؤلفه گشتاور ناشی از شار آهنربا استفاده می‌شود، لذا این روش برای موتورهای سنکرون رلوکتانسی و همچنین موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی قابل استفاده نمی‌باشد.

۴-۴-۴-۲- روش ضریب توان واحد

در این روش زاویه گشتاور به نحوی کنترل می‌گردد تا همواره زاویه بین جریان و ولتاژ صفر گردد. برای دستیابی به زاویه گشتاور مطلوب، از رابطه زیر استفاده می‌گردد:

$$\tan(\delta + \varphi) = \frac{v_{qs}^r}{v_{ds}^r} \quad (4-25)$$

جهت یک شدن ضریب توان، زاویه φ برابر صفر می‌گردد، که بدین ترتیب، رابطه (4-25) به صورت زیر خواهد گردید [21]:

$$\tan(\delta) = \frac{v_{qs}^r}{v_{ds}^r} = \frac{\lambda_f + L_d I_s \cos(\delta) + \frac{R_s I_s}{\omega_r} \sin(\delta)}{\frac{R_s I_s}{\omega_r} \cos(\delta) - L_q I_s \sin(\delta)} \quad (4-26)$$

با ساده‌سازی رابطه (4-26)، زاویه گشتاور برای یک شدن ضریب توان رابطه‌ای به فرم زیر خواهد داشت:

$$(\delta) = \cos^{-1} \left(\frac{-\lambda_f \pm \sqrt{\lambda_f^2 - 4L_d I_s^2 (L_d - L_q)}}{2I_s (L_d - L_q)} \right) \quad (4-27)$$

در این رابطه تنها زوایایی قابل قبول هستند که بزرگتر از ۹۰ درجه باشند؛ چراکه زوایای کمتر موجب به اشباع رفتن موتور می‌گردد. که این شرط تنها با علامت مثبت قابل حصول می‌باشد. همانگونه که از رابطه (4-27) قابل ملاحظه می‌باشد، مقدار مورد نظر در این روش به پارامترهای مختلفی از جمله جریان استاتور، اندوکتانس‌های محورهای d و q و شار آهنربا وابسته بوده و البته از سرعت موتور مستقل می‌باشد. در این روش با وجود اینکه توان راکتیو صفر می‌باشد اما نسبت گشتاور به جریان بهینه نبوده لذا بازدهی تا حدودی کاهش می‌یابد. اما در مقایسه با روش زاویه گشتاور ثابت، نیازمند ولت‌آمپر کمتری می‌باشد که این امر منجر به کاهش ظرفیت اینورتر می‌گردد [22-23]. این موضوع به این معناست که در این روش، ناحیه گشتاور ثابت توسعه یافته که منجر به دستیابی به توان بیشتر می‌گردد. این روش برای کاربردهایی که نیازمند بکارگیری در رنج سرعت وسیع‌تر و یا ظرفیت کوچکتر بوده، مناسب می‌باشد.

۴-۳- روش شار پیوندی ثابت

در این روش شار پیوندی در مقداری برابر λ_f ثابت نگه داشته می‌شود. مزیت اصلی این روش آنستکه با محدود کردن شار پیوندی، ولتاژ مورد نیاز استاتور پایین نگه داشته می‌شود. این روش، بر خلاف روش‌های قبل که تنها در سرعت‌های کمتر از نامی کار می‌کنند، روشی مؤثر برای بکارگیری در تمام بازه سرعت می‌باشد. رابطه شار پیوندی به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\lambda_m = \sqrt{(\lambda_f + L_d I_{ds}^r)^2 + (L_q I_{qs}^r)^2} \quad (4-28)$$

حال با برابر قرار دادن شار پیوندی با شار آهنربا، جریان استاتور به صورت زیر خواهد شد ($\lambda_m = \lambda_f$):

$$I_s = \frac{-2\lambda_f}{L_d} \left(\frac{\cos \delta}{\cos^2 \delta + \rho^2 \sin^2 \delta} \right) \quad (4-29)$$

که در این رابطه $\rho = \frac{L_q}{L_d}$ بوده که ضریب برجستگی نام دارد. بر اساس این ضریب می‌توان زاویه گشتاور را در دو حالت مختلف بدست آورد. حالت اول مربوط به موتورهای با آهنربای سطحی بوده که در این موتورها، ضریب برجستگی تقریباً برابر یک می‌باشد. حالت دوم مربوط به موتورهای با آهنربای داخلی بوده که ضریب برجستگی آنها بزرگتر از یک می‌باشد.

- حالت ۱: موتورهای با آهنربای سطحی ($\rho = 1$)

با برابر یک قرار دادن ضریب برجستگی در رابطه (4-29)، زاویه گشتاور به فرم زیر محاسبه می‌گردد:

$$(\delta) = \cos^{-1} \left(\frac{-L_d I_s}{2\lambda_f} \right) \quad (4-30)$$

- حالت ۱: موتورهای با آهنربای داخلی ($\rho \neq 1$)

در این حالت نیز رابطه (۴-۲۹) بر حسب پارامتر ρ حل شده و زاویه گشتاور به صورت زیر بدست می‌آید [۲۱]:

$$(\delta) = \cos^{-1} \left(\frac{-\lambda_f}{L_d I_s (1 - \rho^2)} \pm \sqrt{\left(\frac{\lambda_f}{L_d I_s (1 - \rho^2)} \right)^2 - \frac{\rho^2}{(1 - \rho^2)}} \right) \quad (4-31)$$

از بین دو پاسخ حاصله، پاسخی انتخاب می‌گردد که جریان مغناطیس زدای مربوطه کوچکتر و زاویه گشتاور حتماً بزرگتر از ۹۰ درجه باشد. در این روش نیز نسبت گشتاور به جریان بهینه نبوده ولی ضریب توان تقریباً نزدیک به یک می‌باشد.

۴-۴-۴- روش کنترل حداکثر نسبت گشتاور به جریان

در این روش الگوریتم کنترلی به نحوی پیاده می‌گردد تا حداکثر نسبت گشتاور به جریان حاصل گردد. تا به حال تحقیقات نسبتاً متعددی بر روی این مبحث صورت پذیرفته است. تا بحال روش‌های مختلفی برای دستیابی به حداکثر نسبت گشتاور به جریان ارائه گردیده است. برخی از روش‌ها به صورت همزمان جریان محور d استاتور را با استفاده از تزریق سیگنال [۲۴-۲۵] و یا روش‌های هوشمند [۲۶] بدست می‌آورند. اما در برخی دیگر، که رایج‌تر می‌باشند، بر اساس مدل موتور، مقدار بهینه جریان محور d جهت حداکثر کردن نسبت بین گشتاور به جریان عمل می‌کنند [۲۷-۳۱]. بر این اساس نسبت گشتاور به جریان محاسبه شده و از آن نسبت به زاویه گشتاور مشتق گرفته و حاصل آن برابر صفر قرار داده می‌شود تا حداکثر نسبت گشتاور به جریان حاصل گردد.

$$\frac{a(T_{I_s}^e)}{d\delta} = \lambda_f \cos \delta + (L_d - L_q) I_s \cos 2\delta = 0 \quad (4-32)$$

با حل رابطه (۴-۳۲) زاویه گشتاور بدست می‌آید:

$$(\delta) = \cos^{-1} \left(\frac{-\lambda_f}{4I_s(L_d - L_q)} - \sqrt{\left(\frac{\lambda_f}{4I_s(L_d - L_q)} \right)^2 + \frac{1}{2}} \right) \quad (4-33)$$

در این روش نسبت گشتاور به جریان، در مقایسه با روش‌های قبل، بهبود می‌یابد. البته این بهبود به بهای افزایش ولتاژ ورودی (البته در مقایسه با روش شار ثابت) (در مقایسه با روش زاویه گشتاور ثابت ولتاژ کاهش می‌یابد) حاصل شده است. برای موتورهای با آهنربای سطحی (با ضریب برجستگی یک) پاسخ حاصل از این روش با پاسخ روش زاویه گشتاور ثابت یکسان می‌گردد. در این روش هرچه ضریب برجستگی افزایش یابد، میزان بهبود گشتاور نیز افزایش می‌یابد. بر اساس الگوریتم مربوط به این روش، در کل تلفات مسی حداقل می‌گردد.

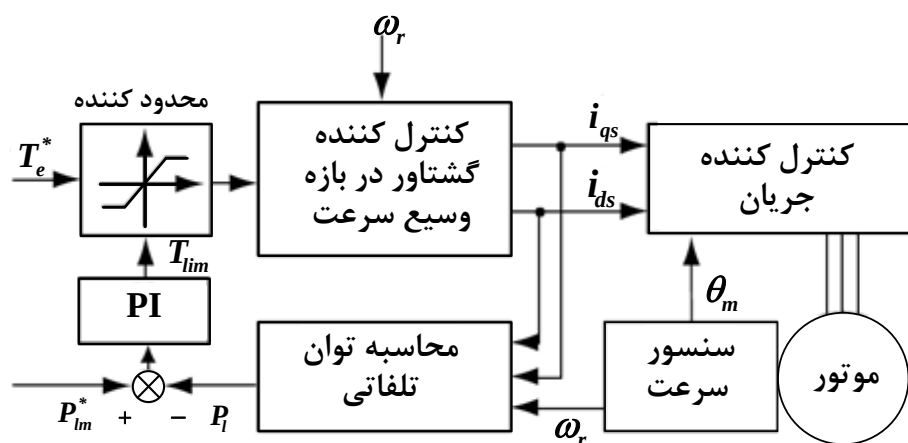
۴-۴-۵- روش کنترل تلفات

در سرعت‌های بیشتر از سرعت نامی معمولاً توان خروجی بر روی توان نامی موتور محدود می‌گردد. قرار دادن محدودیت بر روی جریان‌های مرجع تنها تلفات مسی را محدود می‌کند و الزاماً تلفات آهنی را محدود

نمی‌کند. به طور مشابه، محدود کردن توان خروجی، به طور مستقیم تلفات را محدود نمی‌کند. محدود کردن جریان و توان خروجی به مقادیر نامی، به لحاظ حرارتی کافی نبوده بلکه باید تلفات کل محدود گردد. محدود کردن توان خروجی و جریان موتور به مقادیر نامی، تنها تا سرعت نامی مطلوب می‌باشد.

در این روش محدودیت هر ماشین بر اساس حداکثر تلفات مجاز آن تعیین می‌شود. این روش در مقایسه با روش محدودیت جریانی (و توان خروجی) موجب افزایش گشتاور مجاز در سرعت‌های کمتر از نامی می‌گردد که این امر منجر به بهبود پاسخ دینامیکی در سرعت‌های کمتر از نامی می‌شود. از طرف دیگر استفاده از روش محدودیت جریانی ممکن است که منجر به افزایش تلفات کل در ناحیه تضعیف شار گردد.

پایاده‌سازی این روش بر اساس یک حلقه فیدبک خارجی بوده که ورودی این سیستم حداکثر تلفات مطلوب می‌باشد. در نهایت براساس خروجی این حلقه فیدبک، گشتاور خروجی محدود می‌گردد. این سیستم کنترلی قابل پایاده‌سازی بر روی تمام موتورهایی که در رنج وسیعی از سرعت کار می‌کنند، قابل بکارگیری می‌باشد. این روش کنترلی با تغییرات کوچکی قابل بکارگیری بر روی انواع مختلف موتورها می‌باشد. در روش مورد نظر، حداکثر توان تلفاتی که به عنوان ورودی به سیستم کنترلی داده می‌شود، می‌تواند توسط یک حلقه خارج بر اساس پارامترهایی چون شرایط محیطی، دمای محیط و سیستم خنک‌سازی ماشین کنترل گردد.



شکل ۱۲-۴: بلوک دیاگرام مربوط به روش کنترل تلفات [۳۲]

بر این اساس رابطه ولتاژ استاتور در حالت دائم به صورت زیر خواهد شد:

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^r \\ V_{ds}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & \omega_r L_d \left(1 + \frac{R_s}{R_c}\right) \\ -\omega_r L_q \left(1 + \frac{R_s}{R_c}\right) & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_q \\ I_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_r \lambda_f \left(1 + \frac{R_s}{R_c}\right) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4-34)$$

بدین ترتیب تلفات هسته به صورت رابطه (۳۵-۴) محاسبه می گردد:

$$P_c = \frac{3\omega_r^2(L_q I_q)^2}{2R_c} + \frac{3\omega_r^2(\lambda_f + L_d I_d)^2}{2R_c} = \frac{3}{2R_c} \omega_r^2 \lambda_f^2 \quad (45)$$

با اضافه کردن تلفات مسی، به تلفات هسته تلفات کل بدست می آید:

$$P_t = \frac{3}{2} R_s (I_{qs}^2 + I_{qd}^2) + \frac{3\omega_r^2 ((L_q I_q)^2 + (\lambda_f + L_d I_d)^2)}{2R_c} \quad (4-36)$$

۴-۶- نتایج شبیه سازی کنترل در سیستم موتورهای سنکرون رلوکتانسی و سنکرون رلوکتانسی با

آهنربای کمکی

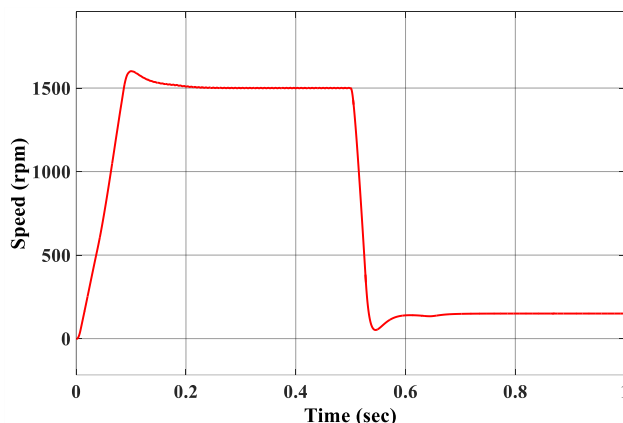
پارامترهای موتور سنکرون رلوکتانسی و همچنین موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی در جدول (۳-۱) نشان داده شده اند.

جدول ۲-۴: پارامترهای موتورها

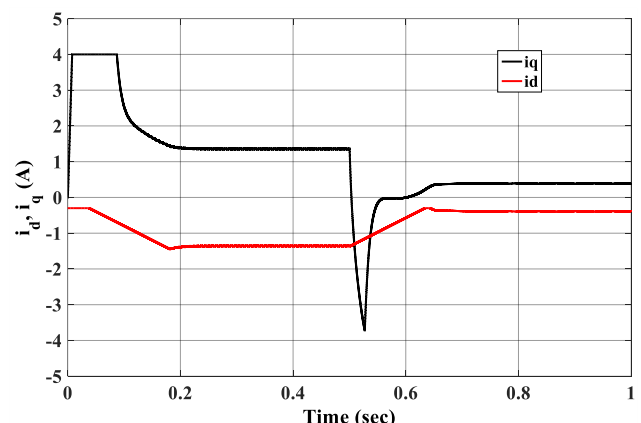
موتور سنکرون رلوکتانسی	موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی	
۱۴/۲	۱۳/۴۳	مقاومت استاتور (Ω)
۰/۱۲۸۶	۰/۱۳۴	اندوکتانس محور d (H)
۰/۶۸	۰/۵۲۸۹	اندوکتانس محور q (H)
-	۰/۳۲۱۲	$\lambda_f(Wb)$
۱۵۰۰	۱۵۰۰	سرعت نامی (rpm)
۲/۳۷	۲/۳۷	گشتاور نامی (N.m)
۰/۵	۰/۵	توان نامی (hp)

در این بخش نتایج شبیه سازی کنترل موتور سنکرون رلوکتانسی و موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی نمایش داده شده اند. برای هر موتور شبیه سازی در دو حالت انجام شده است. در حالت اول، عملکرد در شرایط تغییر سرعت مرجع بررسی شده و در حالت دوم عملکرد در شرایط اعمال بار بررسی گردیده است. برای بررسی تغییرات سرعت، ابتدا سرعت مرجع موتور به ۱۵۰۰ دور بر دقیقه افزایش می یابد، سپس در لحظه ۰/۵ ثانیه به ۱۵۰ دور بر دقیقه کاهش می یابد. برای بررسی عملکرد در شرایط اعمال بار، ابتدا در شرایط بی بار، سرعت مرجع موتور به ۱۵۰۰ دور بر دقیقه افزایش یافته، سپس در لحظه ۰/۵ ثانیه باری معادل بار نامی به موتور اعمال می گردد.

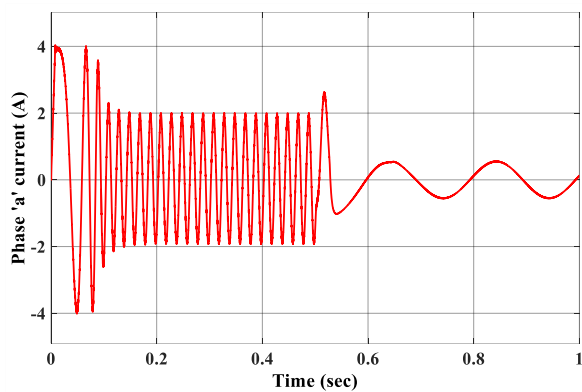
نتایج مربوط به کنترل موتور سنکرون رلوکتانسی در شرایط تغییرات سرعت مرجع و شرایط اعمال بار در شکل (۳-۱۳) و شکل (۳-۱۴) نمایش داده شده است. همچنین، نتایج مربوط به کنترل موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی تحت شرایط مشابه در شکل (۳-۱۵) و شکل (۳-۱۶) نمایش داده شده اند. در این نتایج، جریان محور d، جریان محور q، سرعت و جریان فاز a موتور نشان داده شده اند.



(ب)

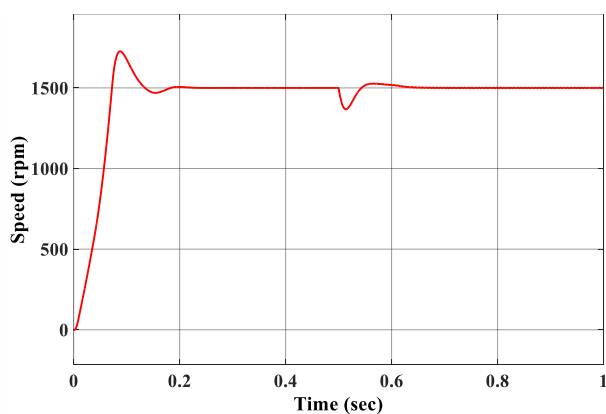


(الف)

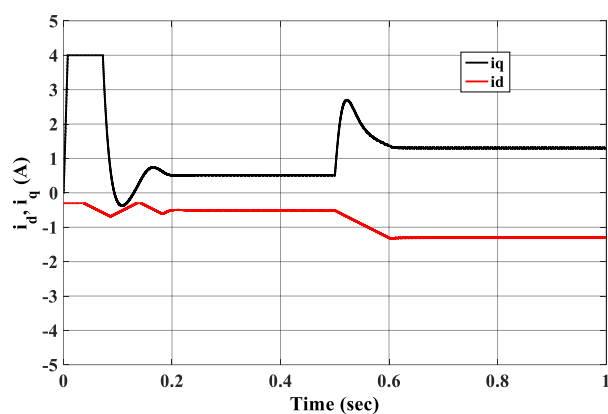


(پ)

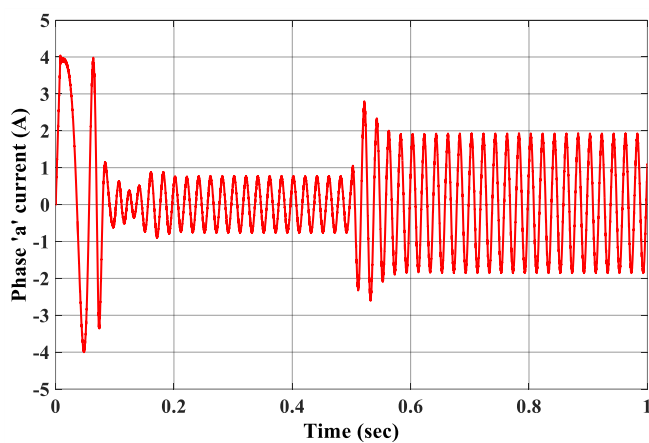
شکل ۱۳-۴: کنترل موتور سنکرون رلکتانسی در شرایط تغییر سرعت مرجع
(الف) جریان محور d و جریان محور q (پ) سرعت (ت) جریان فاز a موتور



(ب)

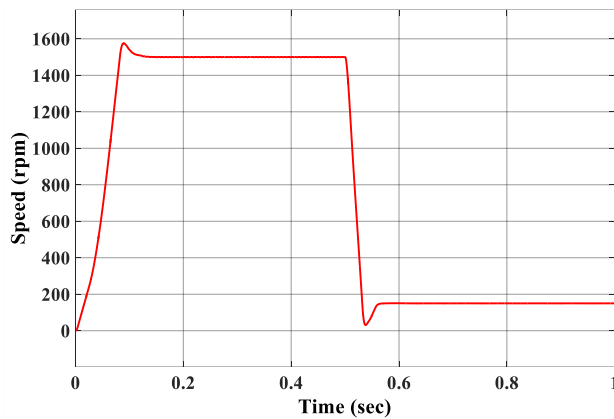


(الف)

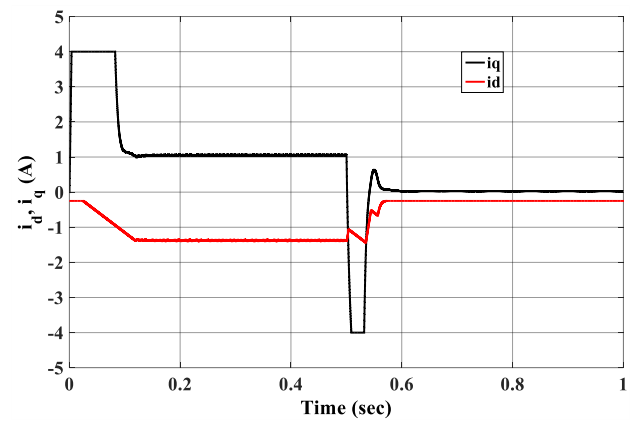


(پ)

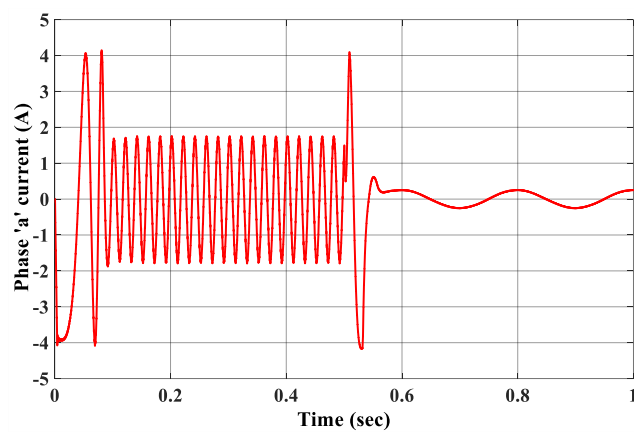
شکل ۱۴-۴: کنترل موتور سنکرون رلکتانسی در شرایط اعمال بار
(الف) جریان محور d و جریان محور q (پ) سرعت (ت) جریان فاز a موتور



(ب)

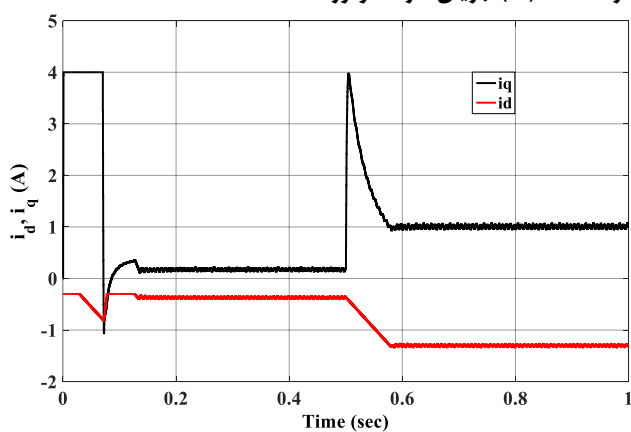


(الف)

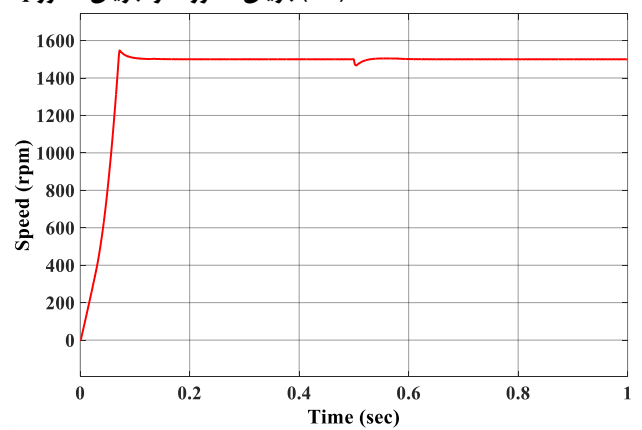


(پ)

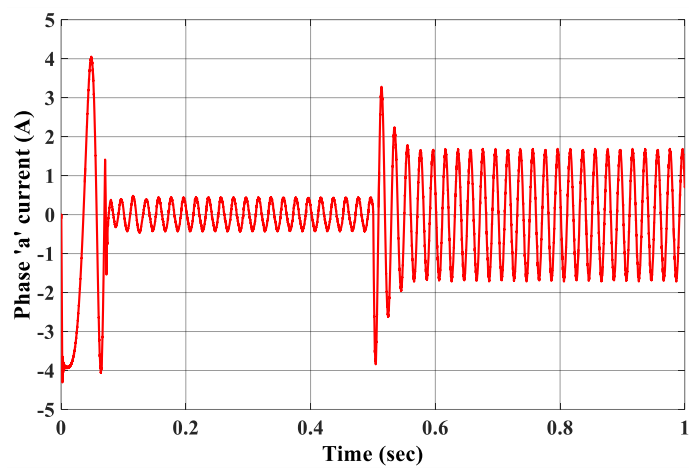
شکل ۱۵-۴: کنترل موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنبای کمکی در شرایط تغییر سرعت مرجع
(الف) جریان محور d و جریان محور q (پ) سرعت (ت) جریان فاز a موتور



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۱۶-۴: کنترل موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی در شرایط اعمال بار
(الف) جریان محور d و جریان محور q (پ) سرعت (ت) جریان فاز a موتور

فصل پنجم: ساخت، مونتاژ و تست درایو و موتور سنکرون رلوکتانسی با و بدون آهنربای کمکی

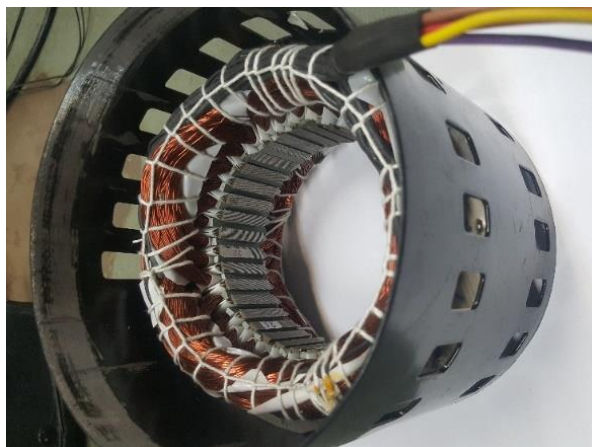
۱-۵- ساخت موتورهای سنکرون رلوکتانس با/بدون آهنربای دائم

۱-۱-۵- مقدمه

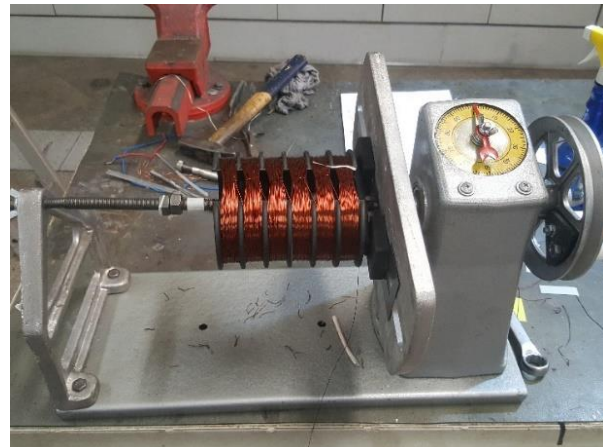
در این پروژه دو موتور سنکرون رلوکتانس برای کولر آبی طراحی شده است: ۱. موتور بدون آهنربای دائم کمکی و ۲. موتور با آهنربای کمکی. در این راستا، با توجه به توافق انجام شده در زمان تعریف پروژه، مقرر گردید که از فریم استاندارد کولری ساخت شرکت کیا الکتروموتور پارت استفاده شود. بر این اساس، برای ساخت موتورهای از هسته استاتور و فریم ساخت شرکت کیا الکتروموتور استفاده گردید و الباقی فرآیند ساخت موتورهای شامل سیم‌پیچی استاتور، ساخت رتور و مونتاژ نهایی با توجه به طراحی‌های انجام شده در پژوهشگاه نیرو به انجام رسید. در ادامه فرآیند ساخت موتورهای ارائه می‌گردد.

۱-۲-۵- سیم‌پیچی استاتور

استاتور دو موتور سنکرون رلوکتانس با/بدون آهنربای کمکی، از نظر تعداد و هندسه شیارها و همچنین قطر داخلی و خارجی، یکسان بوده و تنها تفاوت آنها در طول محوری است. مشخصات سیم‌پیچ استاتور نیز در دو موتور با/بدون آهنربای کمکی، کاملاً یکسان است و تنها از لحاظ طول محوری با یکدیگر تفاوت دارند. فرایند سیم‌بندی استاتور موتورهای طراحی شده در آزمایشگاه تحقیقاتی ماشین‌های الکتریکی پژوهشگاه نیرو انجام شد. شکل ۱-۵ الف ساخت کلاف‌های سیم‌پیچ توسط دستگاه کلاف‌پیچ را نشان می‌دهد و استاتور سیم‌بندی شده برای موتور با آهنربای کمکی نیز در شکل ۱-۵ ب نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۱-۵: (الف) ساخت کلاف‌های سیم‌پیچ استاتور به کمک دستگاه کلاف‌پیچ؛ (ب) استاتور سیم‌پیچی شده مربوط به موتور با آهنربای کمکی

۵-۱-۱- ساخت روتور

۵-۱-۱-۱- برش و چینش ورق‌ها

مرحله اول در ساخت روتور دو موتور سنکرون رلوکتانسی با/بدون آهنربای دائم، برش ورق‌های مغناطیسی و سپس روی هم چیدن آنها است. شکل ۵-۲-الف ورق روتور با آهنربای دائم و شکل ۵-۲-ب ورق روتور از نوع بدون آهنربای دائم را نشان می‌دهد. برش ورق‌های روتور معمولاً به دو روش وایرکات یا لیزرکات انجام می‌شود. روش وایرکات، دقت زیاد داشته اما هزینه آن نیز زیاد است. در مقابل، روش لیزرکات اگرچه در مقایسه با وایرکات، دقت کمتری دارد اما از نظر هزینه، مقرون به صرفه است. در این پروژه، برش ورق‌های روتور با توجه به محدودیت‌های مالی، به روش لیزرکات انجام شد. از آنجا که برش ورق با لیزر باعث ایجاد پلیسه در محل برش می‌شود، لازم است قبل از روی هم چیدن ورق‌ها، پلیسه‌گیری انجام شود. پس از این کار، ورق‌ها روی هم چیده می‌شوند و از چسب برای استحکام آنها استفاده می‌شود.

شکل ۵-۲-پ روتور با آهنربای دائم را نشان می‌دهد که ورق‌ها روی هم قرار گرفته‌اند. چینش ورق‌های روتور از نوع بدون آهنربا نیز در شکل ۵-۲-ت آمده است.



(ب)



(الف)



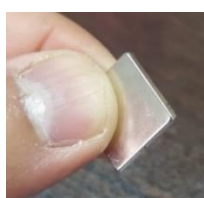
(ت)



(پ)

شکل ۵-۲: (الف) ورق روتور با آهنربای دائم کمکی؛ (ب) ورق روتور بدون آهنربای دائم کمکی؛ (پ) روتور موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای دائم کمکی؛ (ت) روتور موتور سنکرون رلوکتانسی بدون آهنربای دائم کمکی

پس از روی هم قرار دادن و چسب زدن ورق‌ها، لازم است جهت استحکام روتور و جلوگیری از جدا شدن ورق‌ها، از دو صفحه فولادی غیرمغناطیسی در دو طرف روتور استفاده شود. در روتور با آهنربای کمکی، لازم است قبل از قرار دادن صفحات فولادی، آهنرباهای دائم درون موانع شار^۴ روتور قرار داده شوند. این آهنرباها در شکل ۵-۳-الف نشان داده شده‌اند. پس از قرار دادن و چسباندن آهنرباهای دائم در موانع شار روتور، می‌توان صفحات فولادی را در دو طرف روتور قرار داد. شکل ۵-۳-ب روتور با آهنربای کمکی را نشان می‌دهد که صفحات فولادی در دو طرف آن قرار گرفته و روتور برای قرار گرفتن در داخل کوره، جهت استحکام چسب‌های استفاده شده، آماده است.



(الف)



(پ)



(ب)

شکل ۳-۵: (الف) آهنرباهای دائم مورد استفاده در روتور موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی؛ (ب) روتور موتور با آهنربای کمکی (پس از روی هم چیدن و چسباندن ورق‌ها، قرار دادن آهنرباها در موانع شار روتور و نصب صفحات فولادی جهت استحکام روتور)؛ (پ) روتور موتور سنکرون رلوکتانسی بدون آهنربای کمکی (پس از روی هم چیدن و چسباندن ورق‌ها و نصب صفحات فولادی جهت استحکام روتور)

شکل ۵-۳-پ نیز روتور از نوع بدون آهنربای دائم را نشان می‌دهد که پس از چیدن و چسباندن ورق‌ها بر روی هم، صفحات فولادی جهت تقویت استحکام روتور در دو طرف آن قرار گرفته و محکم شده است. در این مرحله روتور برای استحکام چسب‌های استفاده شده، داخل کوره قرار می‌گیرد.

۵-۱-۱-۲- جا زدن شفت روتورها

پس از پایان فرایند ساخت روتورها و قرار دادن آنها در داخل کوره، لازم است شفت روتور به کمک دستگاه پرس نصب شود. شکل ۵-۴-الف نصب شفت روتور توسط پرس هیدرولیکی را نشان می‌دهد. از آنجاکه جهت استحکام شفت و روتور، از چسب استفاده گردید، از این‌رو پس از جا زدن شفت، روتور داخل کوره قرار گرفت

^۴ Flux barriers

تا چسب استفاده شده خشک و مقاوم شود. این مرحله در ۵-۳- ب نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

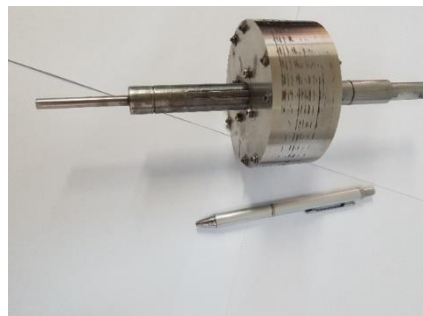
شکل ۴-۵: الف) نصب شفت روتور توسط پرس هیدرولیکی؛ ب) قرار دادن روتور در داخل کوره پس از جا زدن شفت

۳-۱-۵- سنگ زدن و بالانس روتور و مونتاژ نهایی

از آنجا که برش ورق‌های روتور توسط لیزر انجام شده است، لازم است پس از آماده شدن روتورها، سطح دوار آنها به منظور رسیدن به ابعاد مورد نظر و همچنین رفع ناهم‌محوری، سنگ زده شود. پس از آن، جهت جلوگیری از ارتعاش روتور در سرعت‌های کاری مختلف، روتور بالانس می‌شود. شکل ۵-الف روتور موتور سنکرون رلوکتانسی با آهن‌ربای کمکی را پس از فرایند سنگ زدن و بالانس نشان می‌دهد که برای قرار گرفتن در داخل استاتور (شکل ۱-۵-ب) آماده است. موتور مونتاژ شده و آماده تست نیز در شکل ۱-۵-ج نشان داده شده است.



(ب)



(الف)



(ج)

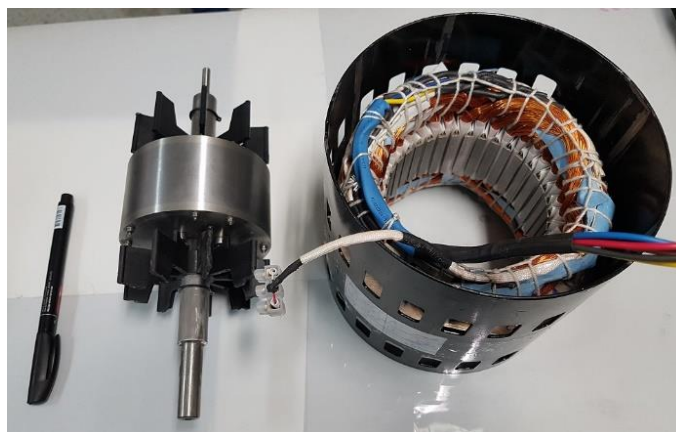
شکل ۵-۵: (الف) روتور با آهنربای کمکی پس از فرایند سنگ زدن و بالانس؛ (ب) روتور و استاتور موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی که برای مونتاژ نهایی آماده شده‌اند؛ (ج) موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی آماده برای تست

شکل ۵-۶ - الف و شکل ۵-۶-ب نیز روتور موتور سنکرون رلوکتانسی بدون آهنربای کمکی را به ترتیب، قبل و بعد از فرایند سنگ زدن و بالانس نشان می‌دهند. روتور و استاتور موتور سنکرون رلوکتانسی بدون آهنربای کمکی که برای مونتاژ نهایی آماده شده‌اند در شکل ۵-۶-ج نشان داده شده‌اند.



(ب)

(الف)



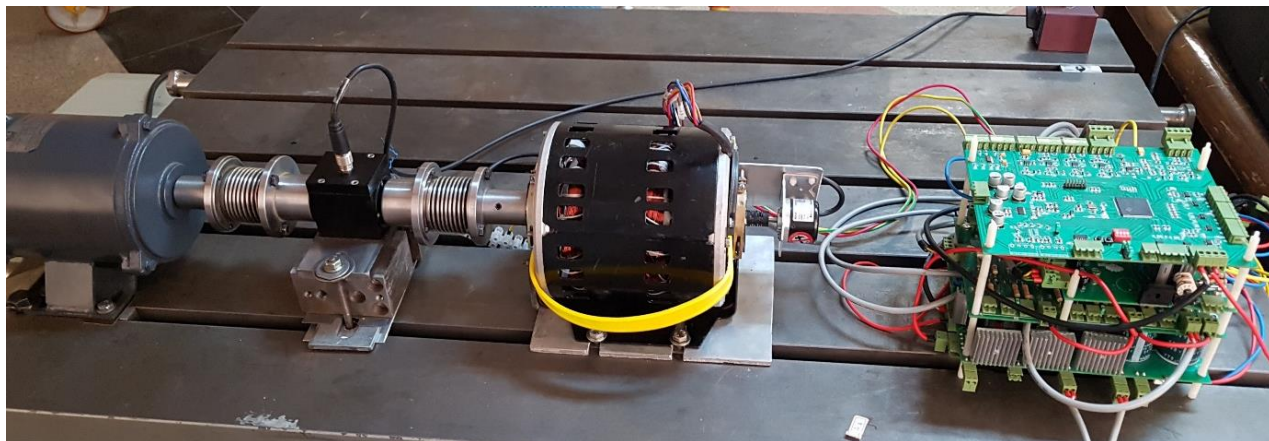
(ج)

شکل ۵-۶: روتور بدون آهنربای دائم (الف) قبل و (ب) پس از فرایند سنگ زدن و بالانس؛ (ج) روتور و استاتور موتور سنکرون رلوکتانسی بدون آهنربای کمکی که برای مونتاژ نهایی آماده شده‌اند

۲-۵- سیستم آزمایشگاهی درایو موتور سنکرون رلوکتانسی

۲-۵-۱- مقدمه

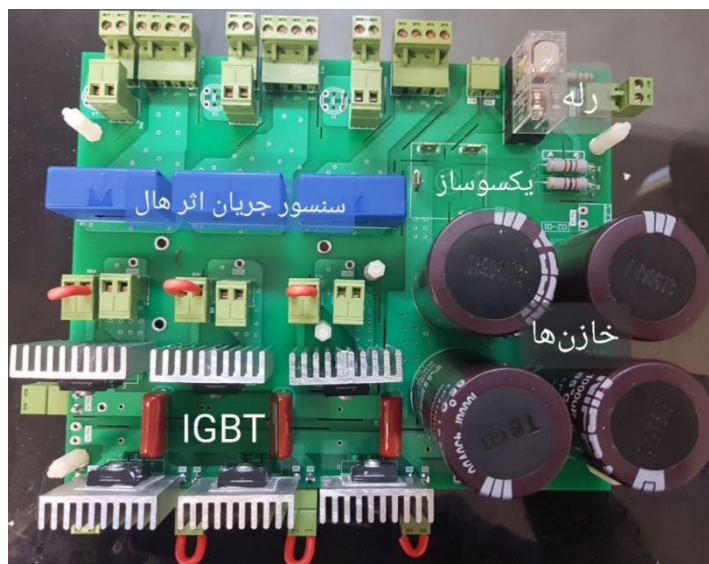
سیستم آزمایشگاهی در شکل ۵-۷ ۵-۷ نمایش داده شده است. بخش‌های مختلف سیستم آزمایشگاهی در این شکل از یکدیگر تفکیک شده‌اند. بخش‌های مختلف سیستم آزمایشگاهی شامل مدار تغذیه، مدار قدرت، مدار درایو IGBT و مدار کنترل به همراه سنسورهای اثرهال و انکدر می‌باشد.



شکل ۵-۷: سیستم آزمایشگاهی درایو موتور سنکرون رلوکتانسی

۲-۵-۲- مدار قدرت

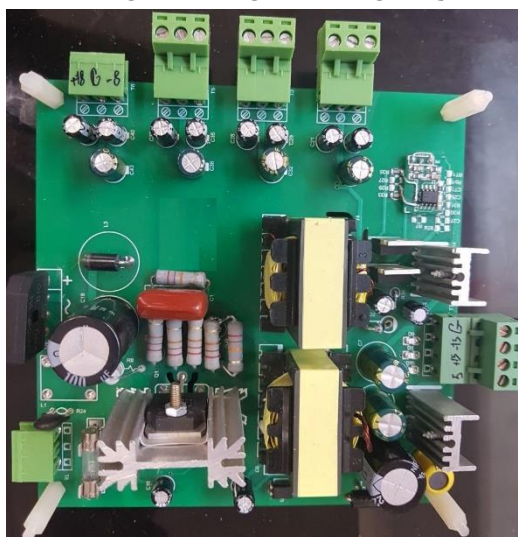
در مدار قدرت از کلیدهای IGBT با شماره قطعه IRG4PH50UDPBF ساخت شرکت International Rectifier استفاده شده است. همچنین برای ایجاد ولتاژ DC از یک یکسوساز پل دیودی ساخت همین شرکت با شماره مدل 36MT160 استفاده گردیده است. در خروجی یکسوساز از ۴ خازن ۴۷۰ میکروفاراد و ۴۰۰ ولت (ساخت شرکت Nippa) بصورت موازی استفاده شده است. علاوه بر این به منظور انجام پیش شارژ خازن، یک رله ساخت شرکت OMRON با شماره قطعه G2R-2 به صورت موازی با چهار مقاومت ۲ کیلو اهم مورد استفاده قرار گرفته است. در آخر نیز برای اندازه‌گیری جریان‌های فاز استاتور و ولتاژ DC اینورتر از سنسورهای اثرهال ساخت شرکت LEM و با شماره قطعات LA55 و LV25 استفاده شده است. در مدار حسگر ولتاژ نیز با در نظر گرفتن شرایط اضافه ولتاژ از چهار مقاومت ۱۵ کیلو اهم به صورت سری با ورودی حسگر استفاده شده است. بورد قدرت ساخته شده در شکل ۵-۸ نمایش داده شده است.



شکل ۸-۵: مدار قدرت

۵-۲-۳- مدار تغذیه

از برد تغذیه برای تولید ولتاژهای تغذیه‌ی سایر بوردها استفاده می‌شود. از این برد سه ولتاژ شامل ولتاژهای ۵ ولت و ± 15 ولت به همراه زمین مشترک به برد کنترل انتقال می‌یابد. ولتاژ ۵ ولت برای ایجاد ولتاژهای تغذیه مورد نیاز پردازنده بکار می‌رود. همچنین ولتاژهای ± 15 ولت نیز برای تغذیه‌ی برخی از آی سی های برد کنترل و همچنین تغذیه‌ی حسگرهای اثر هال مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر موارد ذکر شده چهار مجموعه ولتاژ $+15$ ولت و یک ولتاژ -5 ولت برای تغذیه‌ی درایور IGBT ها استفاده می‌شود. برد مدار تغذیه در شکل ۵-۹ شکل ۹-۵ نشان داده شده‌است.

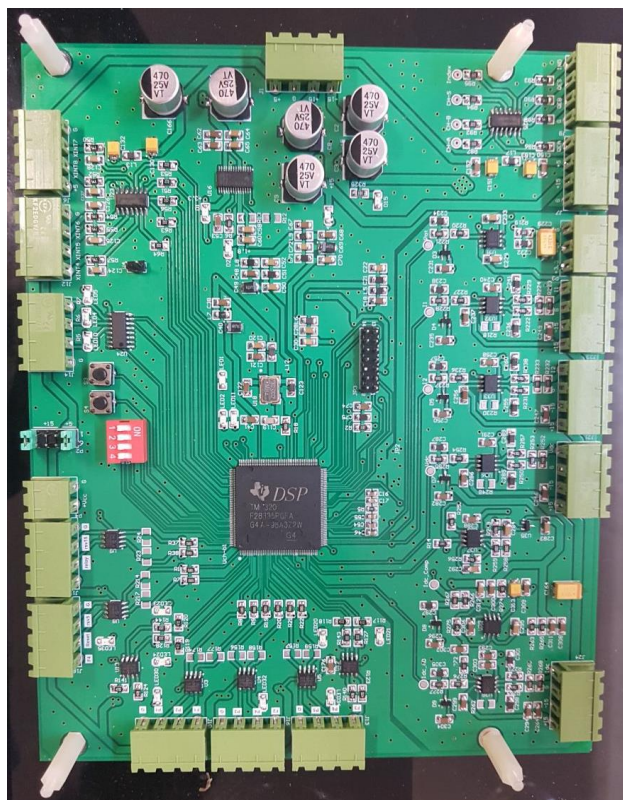


شکل ۹-۵: مدار تغذیه

۵-۲-۴- مدار کنترل

این مدار وظیفه دارد با دریافت ورودی‌های آنالوگ از حسگرها و همچنین فرمان‌های مربوط به استارت و استپ و تبدیل آن‌ها به مقادیر مطلوب از طریق مدارات بهسازی سیگنال و سپس پردازش آن‌ها بوسیله‌ی DSP خروجی‌های مناسب سیستم کنترل را تامین کند. ورودی‌های این برد شامل دو ورودی از سنسورهای جریان اثر هال، یک ورودی مربوط به سنسور ولتاژ، یک ورودی برای انکودر، یک ورودی از ولوم برای اعمال سرعت مرجع موتور و دو ورودی دیجیتال به منظور فرمان استارت و استپ می‌باشد. خروجی‌های این برد شامل شش سیگنال خروجی SVM برای فرمان دادن به IGBT ها و یک خروجی برای کنترل رله‌ی بکار رفته در مدار پیش شارژ می‌باشد.

در این پروژه از DSP ساخت شرکت Texas با مدل TMS320F28335 استفاده شده‌است. فرکانس کاری این پردازنده ۱۵۰ مگاهرتز می‌باشد. برد مدار تغذیه در شکل ۵-۱۰ نشان داده شده‌است.



شکل ۵-۱۰: مدار کنترل

۵-۲-۵- مدار درایو IGBT

برای تولید ولتاژ مورد نیاز برای روشن و خاموش کردن IGBT ها و همچنین ایزوله کردن این ولتاژ نسبت به پردازنده‌ی دیجیتال از این برد استفاده شده‌است. این برد فرمان‌های ایجاد شده توسط برد کنترل را به سطوح ولتاژ مناسب و ایزوله جهت اعمال به IGBT ها ایجاد می‌نماید. سطح ولتاژ فرمان‌های ورودی به این برد ۰ و ۵ ولت بوده و خروجی‌ها جهت اعمال به IGBT ها دارای سطح ولتاژ ۵- ولت برای خاموش کردن و ۱۵+ ولت برای روشن کردن استفاده می‌شود. برد مدار تغذیه در شکل ۵-۱۱ نشان داده شده‌است.



شکل ۱۱-۵: مدار درایور IGBT

۵-۲-۶- سیستم ثبت داده‌های آزمایشگاهی

از یک دستگاه گشتاور سنج دینامیکی ساخت شرکت AEP دارای گواهی کالیبراسیون جهت اندازه‌گیری گشتاور شفت استفاده شده است. دستگاه گشتاور سنج در شکل ۵-۱۲ نشان داده شده است. همچنین از یک دستگاه آنالیزور توان ساخت شرکت HIOKI جهت اندازه‌گیری توان ورودی موتور و همچنین توان ورودی درایو استفاده شده است. دستگاه آنالیزور توان نیز در شکل ۵-۱۳ نشان داده شده است. همچنین برای اندازه‌گیری سرعت از یک انکدر افزایشی ساخت شرکت Autonics با شماره قطعه E40S6-2500-3-N-24 استفاده شده است.



شکل ۱۲-۵: دستگاه گشتاور سنج



شکل ۱۳-۵: دستگاه آنالیزور توان

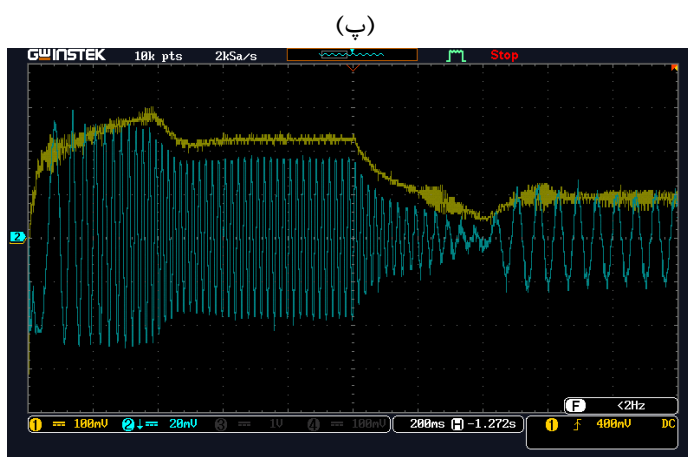
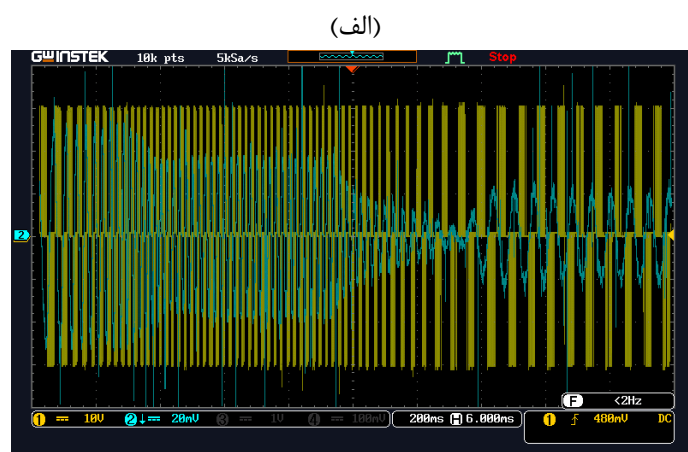
۳-۵- تست های عملکردی موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی

در این بخش نتایج تست های مختلف که روی موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی انجام شده است، ارائه می گردد. در تست های انجام شده ابتدا عملکرد موتور و درایو در شرایط تغییر سرعت مرجع به صورت بی بار و تحت بار بررسی گردیده است. همچنین در تست بعدی، عملکرد موتور در شرایط اعمال بار پله بررسی شده است. علاوه بر این، راندمان مجموعه موتور و درایو اندازه گیری شده است.

۳-۵-۱- تست تغییرات سرعت در شرایط تحت بار

در این تست موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی به ژنراتور کوپل بوده و خروجی ژنراتور بار مقاومتی قرار گرفته است. مقدار این بار مقاومتی به نحوی می باشد که در سرعت نامی گشتاوری در حدود ۲.۳ نیوتن متر ایجاد شود که با کاهش سرعت، مقدار گشتاور خروجی کاهش می یابد. در این شرایط ابتدا سرعت موتور به سرعت نامی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه افزایش یافته و سپس در لحظه ۱ ثانیه، سرعت موتور به یک سوم سرعت نامی یعنی ۵۰۰ دور بر دقیقه کاهش می یابد. در نتایج شکل ۴-۵، سرعت، جریان محورهای d و q ، جریان فاز a ، ولتاژ خط خروجی درایو و گشتاور موتور به همراه ولتاژ و جریان در سرعت و گشتاور نامی به صورت زوم شده نشان داده شده است. همانطور که در نتایج مشخص است، سرعت موتور در نواحی افزایش سرعت و کاهش سرعت به خوبی سرعت مرجع را با دینامیک مناسب دنبال می نماید.





(ت)

شکل ۱۴-۵: سرعت، جریان محورهای d و q، جریان فاز a، ولتاژ خط خروجی درایو و گشتاور موتور در تست تغییرات سرعت تحت بار (الف) سرعت موتور (رنگ بنفش / 500rpm/Div) - جریان محور q (رنگ زرد / 1.2A/Div) - جریان محور d (رنگ زرد /

1.2A/Div

(ب) ولتاژ خط (رنگ زرد / 100V/Div)

(پ) ولتاژ (100V/Div) و جریان (1.2A/Div) زوم شده در سرعت و گشتاور نامی

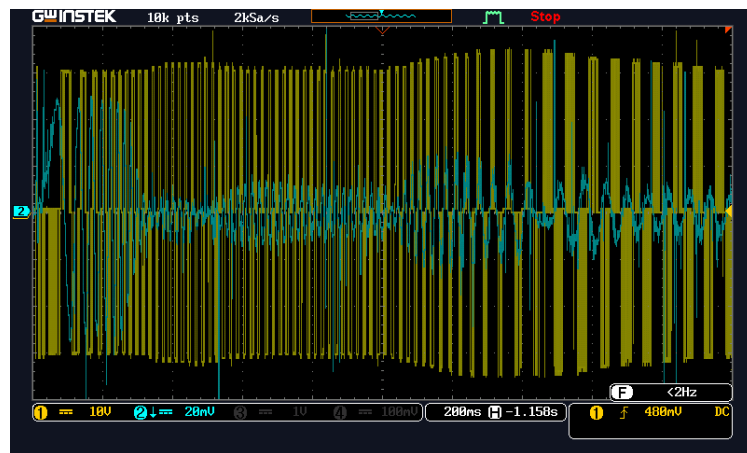
(ت) گشتاور (رنگ زرد / 1.N.m/Div) - جریان فاز a (رنگ سبز / 1.2A/Div)

۵-۳-۲- تست تغییرات سرعت در شرایط بی بار

در این تست موتور سنکرون رلکتانسی با آهنربای کمکی به ژنراتور کوپل بوده ولی خروجی ژنراتور بی بار می باشد. در این شرایط ابتدا سرعت موتور به سرعت نامی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه افزایش یافته و سپس در لحظه ۱ ثانیه، سرعت موتور به یک سوم سرعت نامی یعنی ۵۰۰ دور بر دقیقه کاهش می یابد. در نتایج شکل ۵-۱۵، سرعت، جریان محورهای d و q، جریان فاز a، ولتاژ خط خروجی درایو و گشتاور موتور نشان داده شده است. همانطور که در نتایج مشخص است، سرعت موتور در نواحی افزایش سرعت و کاهش سرعت به خوبی سرعت مرجع را با دینامیک مناسب دنبال می نماید.



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۱۵-۵: سرعت، جریان محورهای d و q، جریان فاز a، ولتاژ خط خروجی درایو و گشتاور موتور در تست تغییرات سرعت در شرایط بی بار

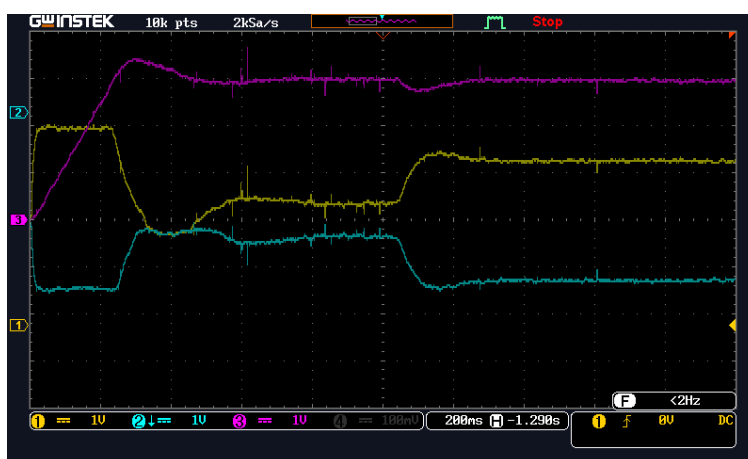
(الف) سرعت موتور (رنگ بنفش / 500rpm/Div) - جریان محور q (رنگ زرد / 1.2A/Div) - جریان محور d (رنگ زرد / 1.2A/Div)

(ب) ولتاژ خط (رنگ زرد / 100V/Div)

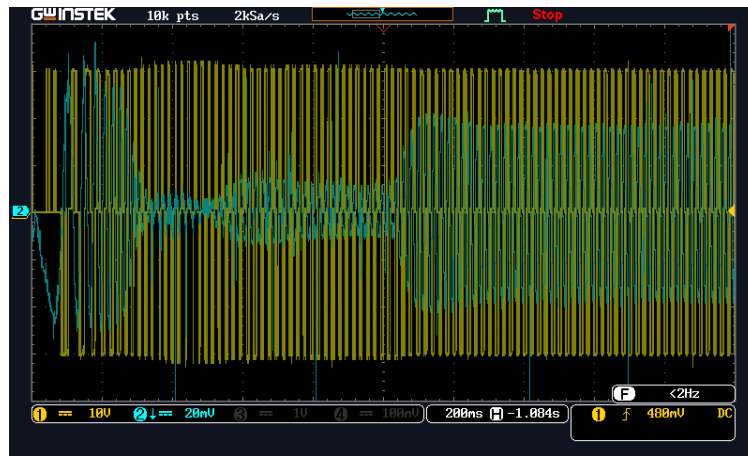
(پ) گشتاور (رنگ زرد / 1 N.m/Div) - جریان فاز a (رنگ سبز / 1.2A/Div)

۵-۳-۳- تست اعمال بار پله به موتور

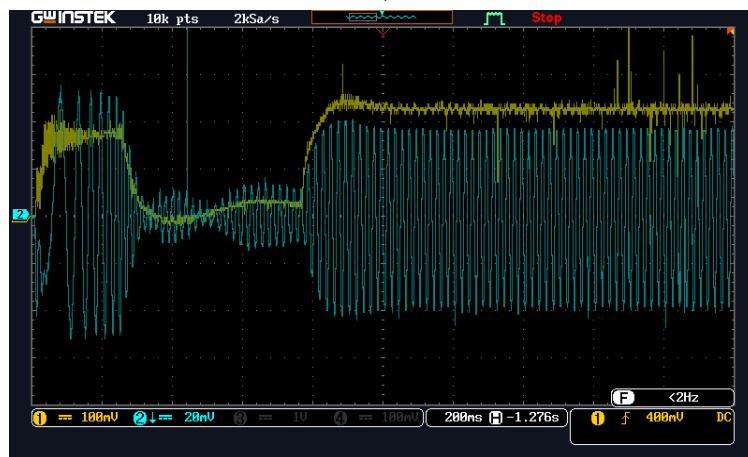
در این تست عملکرد موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی در شرایط اعمال بار پله مورد بررسی قرار می گیرد. ابتدا تحت شرایط بی بار سرعت موتور به سرعت نامی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه افزایش می یابد. سپس در لحظه حدود ۱ ثانیه بار پله ای در حدود گشتاور نامی ۲.۳ نیوتن متر (با وصل کردن مقاومت خروجی ژنراتور) به موتور اعمال می گردد. در نتایج شکل ۵-۱۶ تا شکل ۵-۱۶، سرعت، جریان محورهای d و q، جریان فاز a، ولتاژ خط خروجی درایو و گشتاور موتور نشان داده شده است. همانطور که در نتایج مشخص است، سیستم کنترل پس از اعمال بار پله به خوبی سرعت موتور را در سرعت نامی تثبیت می نماید.



(الف)



(پ)



(پ)

شکل ۱۶-۵: سرعت، جریان محورهای d و q، جریان فاز a، ولتاژ خط خروجی درایو و گشتاور موتور در تست اعمال بار پله

(الف) سرعت موتور (رنگ بنفش / 500rpm/Div) – جریان محور q (رنگ زرد / 1.2A/Div) – جریان محور d (رنگ زرد / 1.2A/Div)

(ب) ولتاژ خط (رنگ زرد / 100V/Div)

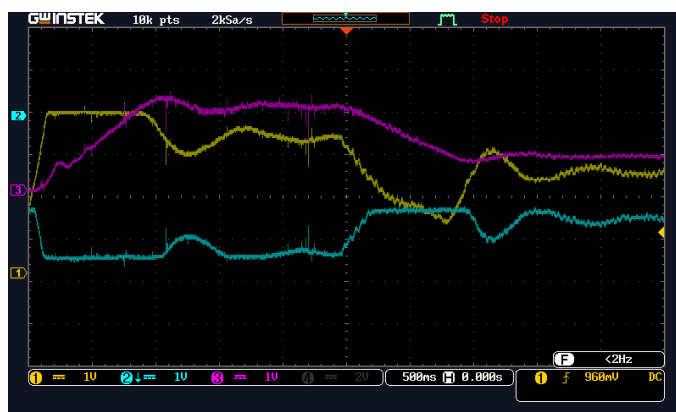
(پ) گشتاور (رنگ زرد / 1 N.m/Div) – جریان فاز a (رنگ سبز / 1.2A/Div)

۵-۳-۴- تست موتور تحت بار کولر آبی

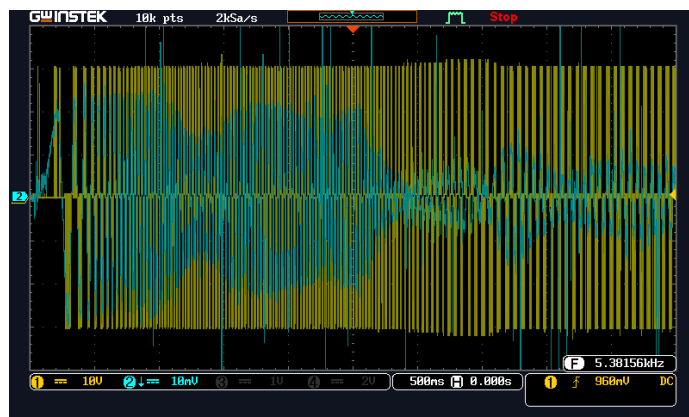
در این تست، عملکرد موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی تحت بار کولر آبی مورد بررسی قرار گرفته است. سیستم آزمایشگاهی در شکل ۵-۱۷ نشان داده شده است. از آنجاییکه توان موتور ساخته شده نیم اسب بخار و توان کولر آبی سه چهارم اسب بخار می باشد، سرعت موتور نهایتاً تا حدود ۱۲۰۰ دور بر دقیقه افزایش داده می شود. در این تست، سرعت موتور ابتدا تا حدود ۱۲۰۰ دور بر دقیقه افزایش داده شده و سپس در لحظه ۲.۵ ثانیه سرعت به ۵۰۰ دور بر دقیقه کاهش داده می شود. سرعت و جریان محورهای d و q در شکل ۵-۱۸ الف و جریان فاز a به همراه ولتاژ خط خروجی درایو در شکل ۵-۱۸ ب نشان داده شده اند. همانطور که در نتایج مشخص است، سیستم کنترل، تغییرات سرعت را تحت بار کولر آبی به خوبی دنبال می نماید.



شکل ۱۷-۵: سیستم آزمایشگاهی تست موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی بر روی کولر آبی



(الف)



(ب)

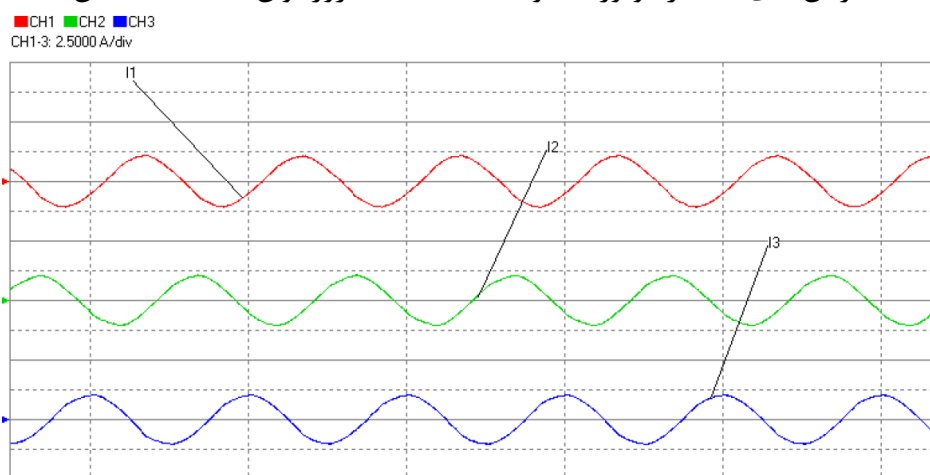
شکل ۱۸-۵: سرعت، جریان محورهای d و q، جریان فاز a، ولتاژ خط خروجی درایو در تست تغییرات سرعت تحت بار کولر آبی
 (الف) سرعت موتور (رنگ بنفش / 500rpm/Div) - جریان محور q (رنگ زرد / 1.2A/Div) - جریان محور d (رنگ زرد / 1.2A/Div)
 (ب) ولتاژ خط (رنگ زرد / 100V/Div) - جریان فاز a (رنگ سبز / 1.2A/Div)

۵-۳-۵- بررسی راندمان موتور سنکرون رلکتانسی با آهنربای کمکی

اندازه‌گیری راندمان موتور سنکرون رلکتانسی با آهنربای کمکی، با استفاده از اندازه‌گیری توان ورودی و توان خروجی موتور انجام شده است. بدین منظور گشتاور خروجی با استفاده از گشتاورسنجی که به شفت موتور کوپل شده و سرعت موتور نیز با استفاده از انگدر اندازه‌گیری شده‌اند. همچنین توان ورودی موتور و درایو با استفاده از دستگاه آنالیزور توان اندازه‌گیری شده‌است.

بدین منظور ابتدا سرعت موتور به سرعت نامی افزایش داده شده و باری در حدود بار نامی به آن اعمال شده است. سپس موتور در حدود ۹۰ دقیقه در این شرایط به صورت پیوسته به کار گرفته شد تا شرایط دمایی موتور تثبیت گردد. پس از آن، همزمان گشتاور موتور با استفاده از گشتاورسنج و توان ورودی با استفاده از آنالیزور توان ثبت گردید. گشتاور سنج، گشتاور خروجی شفت موتور را در این نقطه کاری ۲.۳ نیوتن‌متر نشان می‌دهد. نتایج حاصل از آنالیزور توان نیز در ادامه ارائه می‌گردد.

در شکل ۵-۱۹ جریان‌های سه فاز موتور که توسط دستگاه آنالیزور توان ثبت شده، نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۹: جریان‌های سه فاز موتور سنکرون رلکتانسی با آهنربای کمکی در سرعت و گشتاور نامی (خروجی دستگاه آنالیزور توان)

در جدول ۵-۱، طیف هارمونیک‌های جریان فاز 'a' حاصل از خروجی دستگاه آنالیزور توان نشان داده شده است. همانگونه که در این جدول مشخص شده، ضریب اعوجاج هارمونیک (THD) فاز 'a' برابر ۲.۰۴ درصد می‌باشد.

جدول ۱-۵: طیف هارمونیک جریان فاز 'a' موتور سنکرون رلکتانسی با آهنربای کمکی در سرعت و گشتاور نامی (خروجی دستگاه آنالیزور توان)

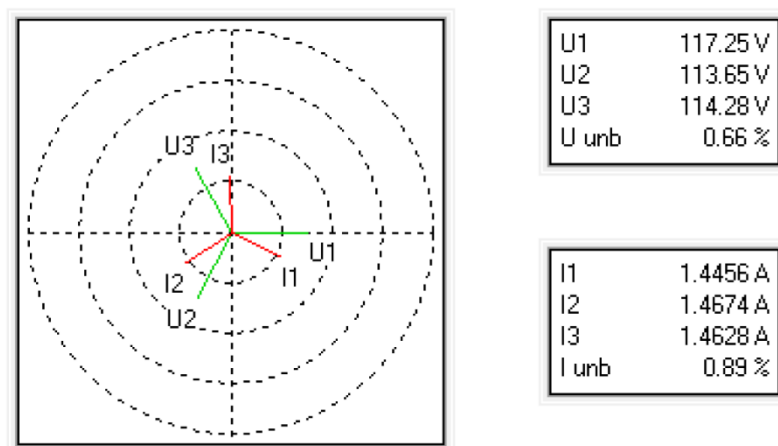
Order	(A)	Order	(A)	Order	(A)
1	1.4456	18	0.0006	35	0.0014
2	0.0041	19	0.0022	36	0.0005
3	0.0094	20	0.0005	37	0.0012
4	0.0026	21	0.0005	38	0.0002
5	0.0201	22	0.0004	39	0.0005
6	0.0034	23	0.0015	40	0.0002
7	0.0075	24	0.0006	41	0.0004
8	0.0021	25	0.0010	42	0.0004
9	0.0022	26	0.0003	43	0.0010
10	0.0009	27	0.0006	44	0.0002
11	0.0071	28	0.0002	45	0.0001
12	0.0010	29	0.0004	46	0.0004
13	0.0065	30	0.0004	47	0.0007
14	0.0008	31	0.0015	48	0.0002
15	0.0008	32	0.0002	49	0.0007
16	0.0010	33	0.0005	50	0.0002
17	0.0126	34	0.0005	THD	2.04 %

در جدول ۵-۲ توان سه فاز ورودی موتور، ضریب توان و ضریب اعوجاج هارمونیک جریان سه فاز نشان داده شده است. این جدول که خروجی حاصل از دستگاه آنالیزور توان می باشد، در شرایط کار در سرعت نامی و گشتاور ۲.۳ نیوتن متر بدست آمده است. بر این اساس در این نقطه کار، توان سه فاز ورودی موتور ۴۴۶.۹ وات و ضریب توان ۰.۸۵۹ می باشند. با توجه به اینکه در سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه، گشتاور خروجی موتور برابر ۲.۳ نیوتن متر گردید، توان خروجی موتور ۳۶۱.۱ وات می باشد که بر این اساس، راندمان موتور ۸۰.۸ درصد می گردد.

جدول ۲-۵: توان ورودی، ضریب توان و THD جریان ورودی سه فاز موتور سنکرون رلکتانسی با آهنربای کمکی در سرعت نامی و گشتاور ۲.۳ نیوتن متر (خروجی دستگاه آنالیزور توان)

POWER		VOLTAGE		CURRENT	
Freq	49.989 Hz				
P1	0.1511kW	U1	121.25 V	I1	1.4467 A
P2	0.1464kW	U2	117.84 V	I2	1.4684 A
P3	0.1494kW	U3	117.35 V	I3	1.4639 A
Psum	0.4469kW	THD-U1	5.34 %	THD-I1	2.04 %
S1	0.1754kVA	THD-U2	5.95 %	THD-I2	2.08 %
S2	0.1730kVA	THD-U3	5.82 %	THD-I3	2.10 %
S3	0.1718kVA				
Ssum	0.5202kVA				
Q1	0.0892kvar				
Q2	0.0922kvar				
Q3	0.0848kvar				
Qsum	0.2662kvar				
PF1	0.8612				
PF2	0.8462				
PF3	0.8695				
PFsum	0.8590				

همچنین شکل ۵-۲۰ نمایش برداری جریان و ولتاژهای سه فاز ورودی موتور را نشان می دهد.



شکل ۲۰-۵: نمایش برداری ولتاژ و جریان های سه فاز ورودی موتور (خروجی دستگاه آنالیزور توان)

در جدول ۵-۳، توان و ضریب توان تکفاز ورودی یکسوساز در نقطه کار مذکور نشان داده شده است. بر این اساس، توان ورودی کل مجموعه موتور و درایو در سرعت نامی و گشتاور ۲.۳ نیوتن متر برابر ۴۶۵.۲ وات می باشد. از طرفی با توجه به توان خروجی درایو که در جدول ۵-۲ نشان داده شده، راندمان درایو برابر ۹۶.۰۶ درصد و راندمان کل مجموعه موتور و درایو برابر ۷۷.۶ درصد خواهد شد. جدول ۵-۴ راندمان موتور، درایو و مجموعه درایو و موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی را در سرعت و گشتاور نامی نشان می دهد.

جدول ۵-۳: توان ورودی تکفاز ورودی یکسوساز و ضریب توان (خروجی دستگاه آنالیزور توان)

POWER	
Freq	49.983 Hz
P1	0.4652kW
S1	0.7371kVA
Q1	-0.5718kvar
PF1	-0.6311

جدول ۵-۴: راندمان موتور، درایو و مجموعه درایو و موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی در سرعت و گشتاور نامی

راندمان موتور (درصد)	راندمان درایو (درصد)	راندمان مجموعه موتور و درایو (درصد)
۸۰.۸	۹۶.۰۶	۷۷.۶

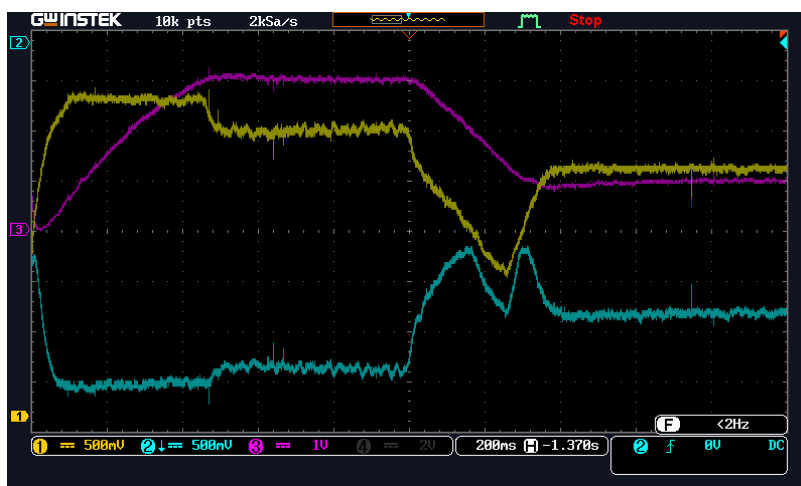
۵-۴-۵- تست های عملکردی موتور سنکرون رلوکتانسی بدون آهنربا

در این بخش نتایج تست های مختلف که روی موتور سنکرون رلوکتانسی (بدون آهنربا) انجام شده است، ارائه می گردد. به منظور بررسی عملکرد موتور و درایو، در شرایط مختلف شامل تغییرات سرعت مرجع به صورت بی بار و تحت بار و همچنین در شرایط اعمال بار پله بررسی شده است. علاوه بر این در نقاط کاری مختلف، راندمان مجموعه موتور و درایو اندازه گیری شده است.

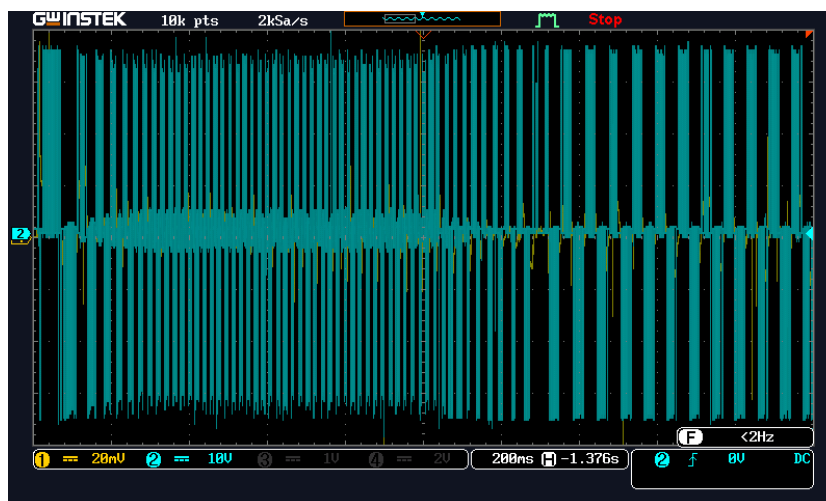
۵-۴-۵-۱- تست تغییرات سرعت در شرایط تحت بار

به منظور بررسی عملکرد موتور در شرایط تغییرات سرعت مرجع در شرایط تحت بار، موتور سنکرون رلوکتانسی به یک ژنراتور کوپل شده و خروجی ژنراتور بار مقاومتی قرار گرفته است. این بار مقاومتی به نحوی تنظیم شده است که در سرعت نامی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه گشتاوری در حدود گشتاور نامی در خروجی موتور ایجاد شود. در این شرایط ابتدا سرعت موتور به سرعت نامی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه افزایش یافته و سپس در

لحظه ۱ ثانیه، سرعت موتور به یک سوم سرعت نامی یعنی ۵۰۰ دور بر دقیقه کاهش می یابد.



(الف)



(ب)

شکل ۲۱-۵: سرعت، جریان محورهای d و q، جریان فاز a و ولتاژ خط خروجی درایو موتور سنکرون رلکتانسی در تست تغییرات سرعت تحت بار

(الف) سرعت موتور (رنگ بنفش / 500rpm/Div) - جریان محور q (رنگ زرد / 1 A/Div) - جریان محور d (رنگ زرد / 1A/Div)

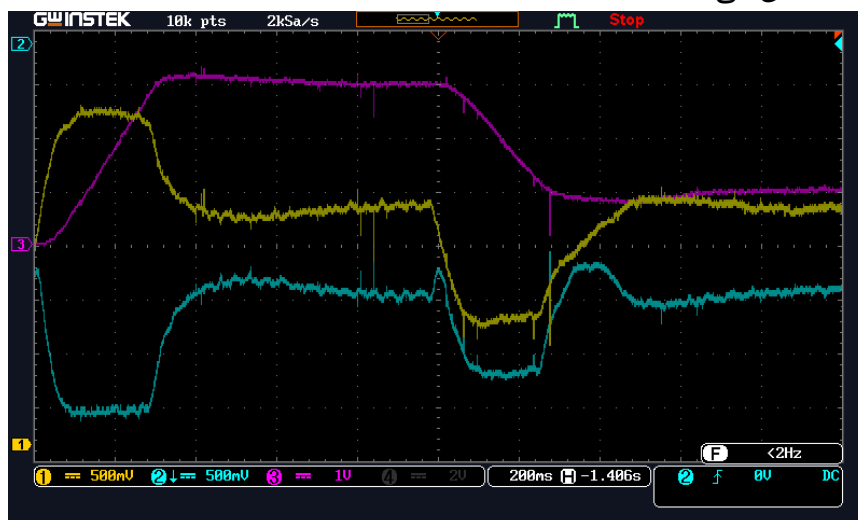
(ب) ولتاژ خط (رنگ سبز / 100V/Div) - جریان فاز a (رنگ زرد / 1A/Div)

در نتایج شکل ۲۱-۵، سرعت، جریان محورهای d و q، جریان فاز a و ولتاژ خط خروجی درایو نشان داده شده است. همانطور که در نتایج مشخص است، سرعت موتور در نواحی افزایش سرعت و کاهش سرعت به خوبی سرعت مرجع را با دینامیک مناسب دنبال می نماید.

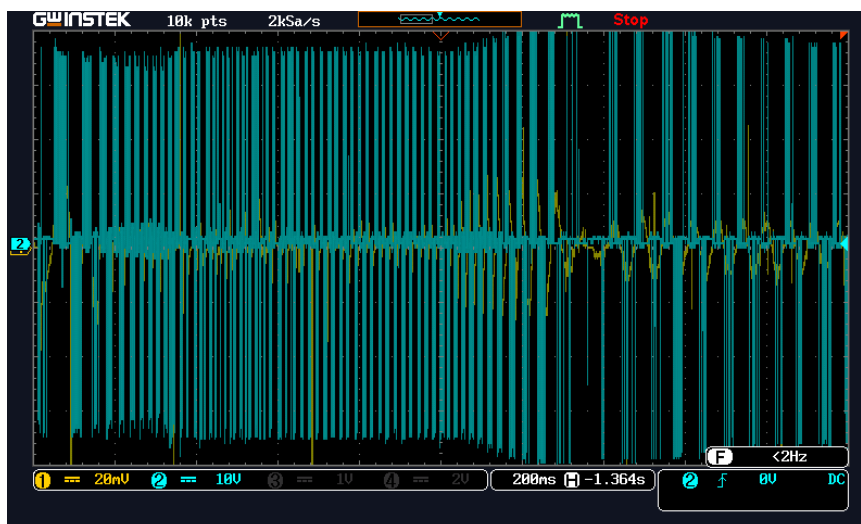
۵-۴-۲- تست تغییرات سرعت در شرایط بی بار

در این تست به بررسی عملکرد موتور تحت تغییرات سرعت در شرایط بی بار پرداخته می شود. بدین منظور، موتور سنکرون رلکتانسی به ژنراتور کوپل بوده ولی خروجی ژنراتور بی بار می باشد. در این تست، در ابتدا سرعت موتور به سرعت نامی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه افزایش یافته، سپس در لحظه ۱ ثانیه سرعت مرجع به

۵۰۰ دور بر دقیقه کاهش می‌یابد.



(الف)



(ب)

شکل ۲۲-۵: سرعت، جریان محورهای d و q، جریان فاز a و ولتاژ خط خروجی درایو موتور سنکرون رلکتانسی در تست تغییرات سرعت در شرایط بی‌بار

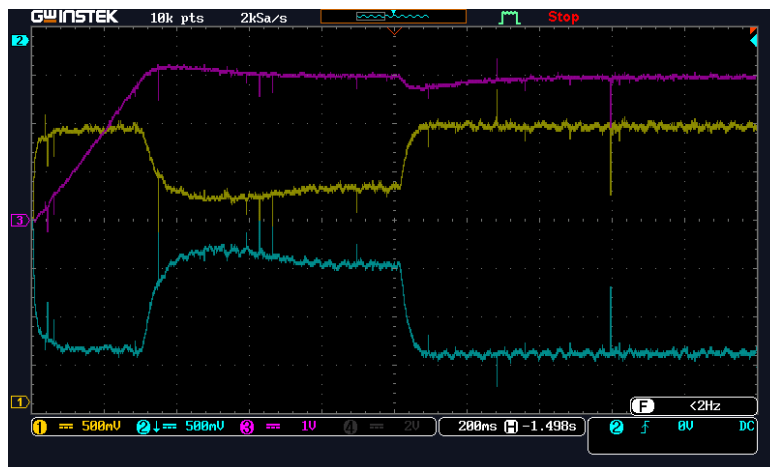
(الف) سرعت موتور (رنگ بنفش / 500rpm/Div) - جریان محور q (رنگ زرد / 1 A/Div) - جریان محور d (رنگ زرد / 1A/Div)

(ب) ولتاژ خط (رنگ سبز / 100V/Div) - جریان فاز a (رنگ زرد / 1 A/Div)

در شکل ۲۲-۵، سرعت، جریان محورهای d و q، جریان فاز a و ولتاژ خط خروجی درایو نشان داده شده است. مشابه حالت قبل، در این حالت نیز موتور به خوبی تغییرات سرعت مرجع را دنبال می‌نماید.

۳-۴-۵- تست اعمال بار پله به موتور

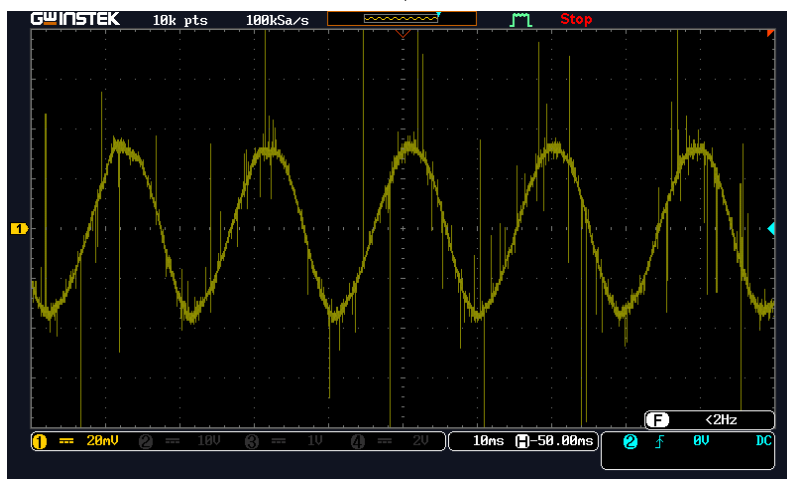
در این تست به بررسی عملکرد موتور سنکرون رلکتانسی در شرایط اعمال بار پله پرداخته شده است. بدین منظور، ابتدا سرعت مرجع تحت شرایط بی‌بار به سرعت نامی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه افزایش یافته و سپس در لحظه ۱ ثانیه بار پله‌ای در حدود گشتاور نامی (با وصل کردن مقاومت خروجی ژنراتور) به موتور اعمال می‌گردد.



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۲۳-۵: سرعت، جریان محورهای d و q، جریان فاز a، ولتاژ خط خروجی درایو و گشتاور موتور در تست اعمال بار پله

(الف) سرعت موتور (رنگ بنفش / 500rpm/Div) - جریان محور q (رنگ زرد / 1 A/Div) - جریان محور d (رنگ زرد / 1A/Div)

(ب) ولتاژ خط (رنگ سبز / 100V/Div) - جریان فاز a (رنگ زرد / 2 A/Div)

(پ) جریان زوم شده در سرعت و گشتاور نامی (رنگ زرد / 2 A/Div)

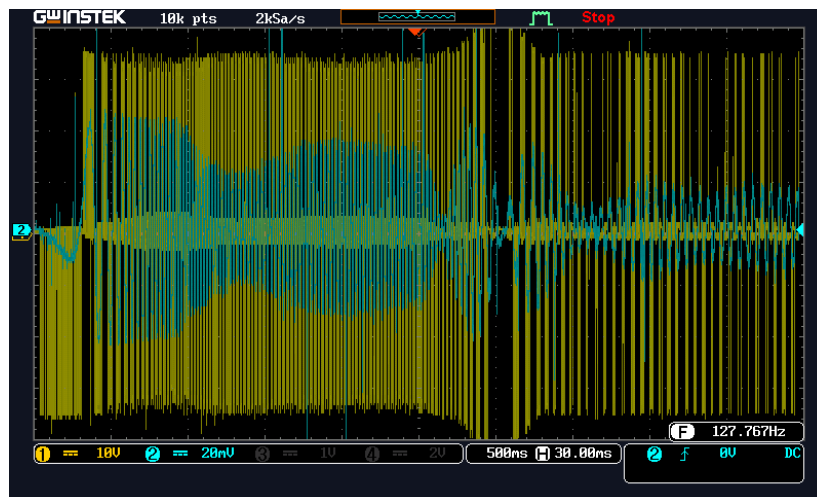
در نتایج شکل ۵-۲۳، سرعت، جریان محورهای d و q، جریان فاز a و ولتاژ خط خروجی درایو نشان داده شده است. این نتایج صحت عملکرد مجموعه موتور-درایو در تثبیت سرعت هنگام اعمال بار پله را نشان می دهد.

۵-۴-۴- تست موتور تحت بار کولر آبی

در این تست، عملکرد موتور سنکرون رلوکتانسی تحت بار کولر آبی مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور بررسی عملکرد موتور، ابتدا سرعت موتور تا حدود ۱۲۰۰ دور بر دقیقه افزایش داده شده سپس در لحظه ۲.۵ ثانیه سرعت به ۵۰۰ دور بر دقیقه کاهش داده می شود.



(الف)



(ب)

شکل ۲۴-۵: سرعت، جریان محورهای d و q، جریان فاز a، ولتاژ خط خروجی درایو موتور سنکرون رلوکتانسی در تست تغییرات سرعت تحت بار کولر آبی

(الف) سرعت موتور (رنگ بنفش / 500rpm/Div) - جریان محور q (رنگ زرد / 1 A/Div) - جریان محور d (رنگ زرد / 1A/Div)

(ب) ولتاژ خط (رنگ زرد / 100V/Div) - جریان فاز a (رنگ سبز / 2 A/Div)

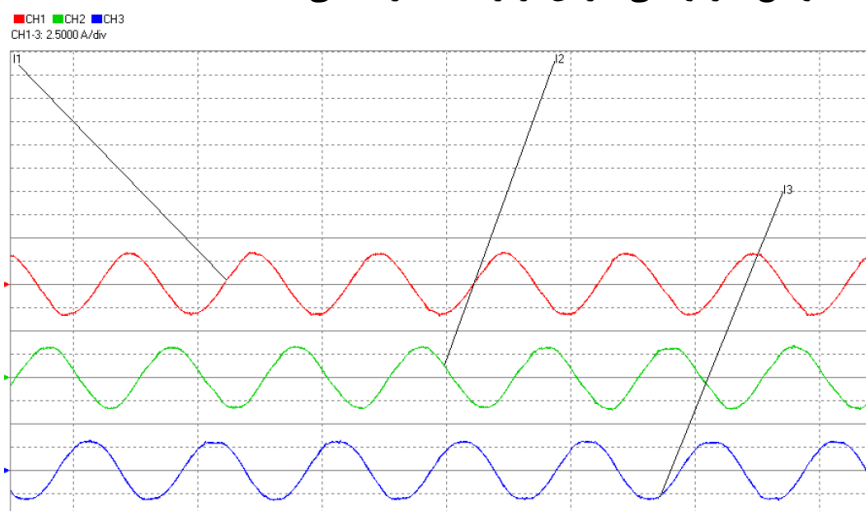
سرعت و جریان محورهای d و q و جریان فاز a به همراه ولتاژ خط خروجی درایو در شکل ۵-۲۴ نشان

داده شده‌اند. همانطور که در نتایج مشخص است، سیستم کنترل، تغییرات سرعت را تحت بار کولر آبی به خوبی دنبال می‌نماید.

۵-۴-۵- بررسی راندمان موتور سنکرون رلوکتانسی

در این بخش همانند بخش ۵-۳-۵- به بررسی راندمان موتور سنکرون رلوکتانسی (بدون آهنربا) و بررسی نتایج حاصل از اندازه‌گیری توان‌های ورودی و خروجی پرداخته می‌شود. در این بخش نیز توان تکفاز ورودی یکسوساز و توان سه فاز ورودی موتور از طریق دستگاه آنالیزور توان و همچنین توان خروجی شفت موتور با استفاده از حاصلضرب گشتاور و سرعت بدست آمده از گشتاورسنج و انگذر اندازه‌گیری شده‌اند. برای اندازه‌گیری راندمان موتور سنکرون رلوکتانسی نیز، ابتدا سرعت موتور به سرعت نامی افزایش داده شده و مقاومت خروجی ژنراتور به نحوی تنظیم شده که گشتاوری در حدود گشتاور نامی موتور ایجاد شود. در این شرایط، در حدود بیش از ۹۰ دقیقه موتور به طور پیوسته به کار خود ادامه داد تا شرایط تثبیت دمایی موتور ایجاد گردد. پس از تثبیت دمای موتور، مقادیر حاصل از آنالیزور توان و گشتاورسنج ثبت گردید که در ادامه به بررسی این نتایج پرداخته می‌شود.

جریان‌های سه فاز موتور در سرعت و گشتاور نامی که توسط دستگاه آنالیزور توان ثبت شده، در شکل ۵-۲۵ نشان داده شده‌است. همچنین طیف هارمونیک‌های جریان فاز 'a' در جدول ۵-۵ نمایش داده شده که نشان می‌دهد ضریب اعوجاج هارمونیک‌های جریان برابر ۲.۵۵ درصد می‌باشد.



شکل ۵-۲۵: جریان‌های سه فاز موتور سنکرون رلوکتانسی در سرعت نامی و گشتاور ۲.۳ نیوتن‌متر (خروجی دستگاه آنالیزور توان)

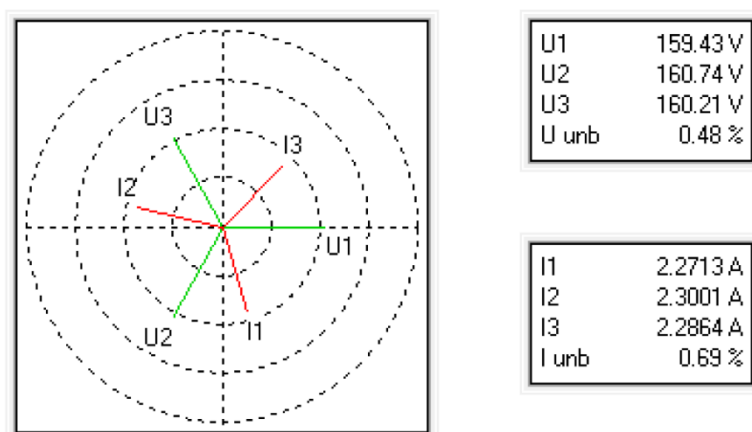
جدول ۵-۵: طیف هارمونیک‌های جریان فاز 'a' موتور سنکرون رلوکتانسی در سرعت و گشتاور نامی (خروجی دستگاه آنالیزور توان)

Order	(A)	Order	(A)	Order	(A)
1	2.2713	18	0.0021	35	0.0021
2	0.0309	19	0.0055	36	0.0019
3	0.0309	20	0.0013	37	0.0028
4	0.0064	21	0.0019	38	0.0021
5	0.0230	22	0.0015	39	0.0013
6	0.0095	23	0.0020	40	0.0006
7	0.0223	24	0.0009	41	0.0012
8	0.0037	25	0.0009	42	0.0022
9	0.0026	26	0.0009	43	0.0018
10	0.0025	27	0.0029	44	0.0015
11	0.0063	28	0.0008	45	0.0012
12	0.0012	29	0.0015	46	0.0013
13	0.0060	30	0.0011	47	0.0018
14	0.0012	31	0.0027	48	0.0013
15	0.0031	32	0.0030	49	0.0018
16	0.0016	33	0.0022	50	0.0012
17	0.0048	34	0.0028	THD	2.55 (%)

در سرعت و گشتاور نامی، پارامترهای مختلف شامل توان سه فاز ورودی موتور، ضرایب اعوجاج هارمونیک سه فاز و ضریب توان در جدول ۵-۶ نشان داده شده است. این جدول مستقیماً از دستگاه آنالیزور توان استخراج شده است. این نتایج نشان می‌دهد که در نقطه کار نامی موتور، توان سه فاز ورودی موتور ۴۵۹.۸ وات و ضریب توان ۰.۶۹۲۹ می‌باشد. در این شرایط در سرعت نامی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه، گشتاور اندازه‌گیری شده توسط گشتاورسنج برابر ۲.۳۳ نیوتن‌متر حاصل گردید. از حاصلضرب گشتاور در سرعت، توان خروجی موتور ۳۶۵.۸۱ بدست می‌آید. نهایتاً راندمان موتور سنکرون رلوکتانسی در نقطه کار نامی موتور برابر ۷۹.۵۵ درصد می‌باشد. همچنین شکل ۵-۲۶ نمایش برداری جریان و ولتاژهای سه فاز ورودی موتور با اتصال مثلث را نشان می‌دهد.

جدول ۵-۶: توان ورودی، ضریب توان و THD جریان ورودی سه فاز موتور سنکرون رلوکتانسی در سرعت نامی و گشتاور ۲.۳۳ نیوتن متر (خروجی دستگاه آنالیزور توان)

POWER		VOLTAGE		CURRENT	
Freq	49.993 Hz				
P1	0.1528kW	U1	166.78 V	I1	2.2730 A
P2	0.1539kW	U2	168.01 V	I2	2.3020 A
P3	0.1531kW	U3	167.57 V	I3	2.2885 A
Psum	0.4598kW	THD-U1	4.37 %	THD-I1	2.55 %
S1	0.2190kVA	THD-U2	5.50 %	THD-I2	2.93 %
S2	0.2224kVA	THD-U3	5.14 %	THD-I3	2.93 %
S3	0.2221kVA				
Ssum	0.6636kVA				
Q1	0.1570kvar				
Q2	0.1606kvar				
Q3	0.1609kvar				
Qsum	0.4784kvar				
PF1	0.6974				
PF2	0.6920				
PF3	0.6893				
PFsum	0.6929				



شکل ۲۶-۵: نمایش برداری ولتاژ و جریان های سه فاز ورودی موتور سنکرون رلوکتانسی با اتصال مثلث (خروجی دستگاه آنالیزور توان)

توان تکفاز ورودی یکسوساز و ضریب توان در جدول ۵-۷ نشان داده شده است. همانگونه که در داده های این جدول مشخص است، در سرعت نامی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه و گشتاور ۲.۳۳ نیوتن متر، توان ورودی کل مجموعه موتور-درايو برابر ۴۸۳.۵ وات می باشد. با در نظر گرفتن توان خروجی درايو (موجود در جدول ۵-۶)، راندمان درايو برابر ۹۵.۰۹ درصد می باشد. از طرفی راندمان کل مجموعه موتور و درايو در نقطه کار نامی برابر ۷۵.۶ درصد می باشد. راندمان موتور، درايو و مجموعه درايو و موتور سنکرون رلوکتانسی در نقطه کار نامی در جدول ۵-۸ نشان داده شده است.

جدول ۷-۵: توان ورودی تکفاز ورودی یکسوساز و ضریب توان (خروجی دستگاه آنالیزور توان)

POWER	
Freq	50.028 Hz
P1	0.4835kW
S1	0.7868kVA
Q1	-0.6208kvar
PF1	-0.6145

جدول ۸-۵: راندمان موتور، درایو و مجموعه درایو و موتور سنکرون رلکتانسی در سرعت و گشتاور نامی

راندمان موتور (درصد)	راندمان درایو (درصد)	راندمان مجموعه موتور و درایو (درصد)
۷۹.۵۵	۹۵.۰۹	۷۵.۶

نتیجه گیری

در این گزارش، به طراحی، شبیه سازی و ساخت موتور-درایو سنکرون رلوکتانسی به منظور کاربرد در کولر آبی پرداخته شد. در فصل اول، دو نوع موتور سنکرون رلوکتانسی بدون آهنربا و با آهنربای کمکی طراحی شده و عملکرد آنها با شبیه سازی در محیط نرم افزار المان محدود FLUX مورد بررسی قرار گرفت. سپس جهت اطمینان از عملکرد صحیح موتور با توجه به ملاحظات حرارتی و مکانیکی، شبیه سازی و تحلیل حرارتی و مکانیکی موتورهای طراحی شده در فصل های دوم و سوم این گزارش انجام شد. همچنین مدلسازی دینامیکی و شبیه سازی موتور سنکرون رلوکتانسی بدون آهنربای دائم و با آهنربای دائم در فصل چهارم ارائه گردید. سپس به مراحل ساخت و مونتاژ موتور شامل سیم پیچی استاتور، برش و چینش ورقه ها، جا زدن شفت رتور، سنگ زدن، بالانس رتور و مونتاژ نهایی موتور و همچنین ساخت درایو شامل برد کنترل، برد درایور، برد قدرت و برد تغذیه پرداخته شد و نتایج تست های مختلف روی دو موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی و موتور سنکرون رلوکتانسی بدون آهنربا ارائه گردید. نتایج تست های مختلف صحت عملکرد مجموعه موتور و درایو در شرایط مختلف شامل تغییرات سرعت به صورت بی بار و تحت بار و همچنین اعمال بار پله را تأیید نمودند. همچنین اندازه گیری راندمان دو موتور در نقطه کار نامی نشان داد که راندمان موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی برابر ۸۰.۸ درصد و راندمان موتور سنکرون رلوکتانسی برابر ۷۹.۵۵ درصد می باشد. همچنین صحت عملکرد هر دو موتور در تثبیت سرعت روی بار کولر آبی نشان داده شد.

مراجع

- [1] A.Vagati, G.Franceschini, I. Marongiu, G. P. Troglia, "Design criteria of high performance synchronous reluctance motors", IEEE Conferences, 1992.
- [2] A. Vagati, A. Fratta, G. Franceschini, and P. Rosso, "AC Motors for High-Performance Drives: A Design-Based Comparison", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 32, no. 5, Sept./Oct. 1996.
- [3] A. Vagati, M. Pastorelli, G. Franceschini, and S. Cornel Petrache, "Design of Low-Torque-Ripple Synchronous Reluctance Motors", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 34, no. 4, July/Aug. 1998.
- [4] R. Rajabi Moghaddam, "Synchronous Reluctance Machine (SynRM) Design", Master Thesis, KTH, Stockholm 2007.
- [5] M. J. Kamper, F. S. van der Merwe, and S. Williamson, "Direct Finite Element Design Optimisation of the Cageless Reluctance Synchronous Machine", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 11, no. 3, September 1996.
- [6] R. Rajabi Moghaddam, "Synchronous Reluctance Machine (SynRM) in Variable Speed Drives (VSD) Applications", PhD Thesis, KTH, Stockholm 2011.
- [7] Hanafy Mahmoud, "Synchronous Reluctance Machines: Eccentricity Analysis and Design Criteria", PhD Thesis, 2017.
- [8] G. Pellegrino, T. M. Jahns, N. Bianchi, W. L. Soong, F. Cupertino, The Rediscovery of Synchronous Reluctance and Ferrite Permanent Magnet Motors, Springer, 2016.
- [9] Yawei Wang, Giacomo Bacco, and Nicola Bianchi, "Geometry Analysis and Optimization of PM-Assisted Reluctance Motors", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 2017.
- [10] Syed A. Nasar, and Ion Boldea, The Induction Machines Design Handbook, 2nd Ed. CRC Press, 2010.
- [11] Massimo Barcaro, Nicola Bianchi, and Freddy Magnussen, "Permanent-Magnet Optimization in Permanent-Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor for a Wide Constant-Power Speed Range", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 6, June 2012.
- [12] N. Bianchi, "Synchronous reluctance and interior permanent magnet motors", 2013 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), 2013.
- [۱۳] علیرضا قائم پناه، "طراحی و شبیه سازی عددی موتور سنکرون رلوکتانسی"، گروه پژوهشی ماشین های الکتریکی، پژوهشگاه نیرو، ۱۳۹۵
- [14] P.C. Krause, O. Wasynczuk and S.D. Sudhoff, "Analysis of Electric Machinery", IEEE Press, Inc. New York, 1986
- [۱۵] C.M.Ong، "مدل سازی و شبیه سازی دینامیکی ماشین های الکتریکی"، مترجم دکتر سعید افشارنیا، دکتر ابوالفضل واحدی، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۸۴.
- [16] B. K. Bose, "Power Electronics and Variable Frequency Control", IEEE Press, 1996.
- [17] J. Holtz, W. Lotzkat, and A. M. Khambadadkone, "On continuous control of PWM inverters in the overmodulation range including the six-step mode", in IEEE Trans. Power Electron., 8, 540-553, 1993.
- [18] L. Malesani and P. Tomasin, "PWM current control techniques of voltage source converters: a survey", IEEE IECON'93 Conf. Rec., Maui, Hawaii, pp. 670-675, 1993.
- [19] M. Zelechowski, "Space Vector Modulated – Direct Torque Controlled (DTC – SVM) Inverter – Fed Induction Motor Drive", Ph.D. dissertation, Warsaw – Poland, 2005.
- [20] R. Krishnan, "Electric Motor Drives, Prentice Hall, Upper Saddle River", NJ, 2001.
- [21] R. Monajemy, "Control Strategies and Parameter Compensation for Permanent Magnet Synchronous Motor Drives", Ph.D. dissertation, Virginia Tech, Blacksburg, Oct. 2000.

- [22] E. Al-nabi, B. Wu, N.Zargari, V. Sood, "Input Power Factor Compensation for High-Power CSC Fed PMSM Drive Using d-axis Stator Current Control", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 59. no. 2, 2012.
- [23] Y. Nakamura, T. Kudo, F. Ishibashi, "High-Efficiency Drive Due to Power Factor Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 10. no. 2, March 1995.
- [24] S. Bolognani, R. Petrella, A. Prearo, and L. Sgarbossa, "Automatic Tracking of MTPA Trajectory in IPM Motor Drives Based on AC Current Injection", IEEE Trans. Indust. Appl., vol. 47, no. 1, January/February 2011.
- [25] S. Kim, Y.D. Yoon, S.K. Sul, and K. Ide, "Maximum Torque per Ampere (MTPA) Control of an IPM Machine Based on Signal Injection Considering Inductance Saturation", IEEE Trans. Power Electronics, vol. 28, no. 1, January 2013.
- [26] C. B. Butt, M. A. Hoque, and M. A. Rahman, "Simplified Fuzzy-Logic-Based MTPA Speed Control of IPMSM Drive", IEEE Trans. Indust. Appl., vol. 40, no. 6, November/December 2004.
- [27] S.K. Sul, "Control of Electric Machine Drive Systems", John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [28] T. Inoue, Y. Inoue, T. Hirasu, S. Morimoto, M. Sanada, "Maximum Torque per Ampere Control of a Direct Torque-Controlled PMSM in a Stator Flux Linkage Synchronous Frame", IEEE Trans. Indust. Appl., vol. 52, no. 3, 2016.
- [29] Z. Tang, X. Li, S. Dusmez, B. Akin, "A New V/F Based Sensorless MTPA Control For IPMSM Drives", IEEE Trans. Power Electron., vol. 31, no. 6, 2016.
- [30] C. Lin, T. Liu, S. Yang, "Nonlinear Position Controller Design with Input-output Linearisation Technique for an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Control System", IET Power Electron., vol. 1, no. 1, 2008.
- [31] A. Rabiei, T. Thiringer, M. Alatalo, E. Grunditz, "Improved Maximum Torque per Ampere Algorithm Accounting for Core Saturation, Cross Coupling Effect and Temperature for a PMSM Intended for Vehicular Applications", IEEE Trans. Transportation Electrification., vol. 2, no. 2, 2016.
- [32] R. Monajemy and R. Krishnan, "Control and Dynamics of Constant Power Loss Based Operation of Permanent Magnet Synchronous Motor", IEEE Trans. Indust. Appl., 48, 839–844 (2001).

