

کسب دانش فنی طراحی موتورهای سنکرون رلوکتانسی
خود راه انداز و ساخت یک نمونه ۳ کیلووات

مدیر پروژه: مهدی علی احمدی
مجری: علیرضا قائم پناه

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

کسب دانش فنی طراحی موتورهای سنکرون رلوکتانسی خود راه انداز و ساخت یک نمونه ۳ کیلووات

مدیر پروژه:
مهدی علی احمدی

همکاران پروژه:
دکتر بهزاد میرزائیان
مهندس معین فرهادیان

مجری:
علیرضا قائم پناه

کد گزارش: NRI-ER-784-PETPN12-3-00-L

DOI: 10.30503/nripress.2020.292

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. مرکز توسعه فناوری موتورهای الکتریکی پیشرفته
کسب دانش فنی طراحی موتورهای سنکرون رلکتانسی خود راه انداز و ساخت یک نمونه ۳ کیلووات / مهدی
علی احمدی. ویراستار: نازنین محمدی نام. تهران: پژوهشگاه نیرو، ۱۴۰۰.

۲۳۵ ص: مصور، نمودار، جدول

۱. میرزائی، بهزاد. فرهادیان، معین. ۲. قائم‌پناه، علیرضا. ۳. طراحی و توسعه موتورهای رلکتانسی.
۴. طراحی و توسعه موتور سنکرون رلکتانسی خودراه‌انداز.



انتشارات پژوهشگاه نیرو
مرکز توسعه فناوری موتورهای الکتریکی پیشرفته

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 بهزاد میرزائیان 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. معین فرهادیان

۲.

۳.

۴.

پیشگفتار

گزارش حاضر در ارتباط با پروژه "کسب دانش فنی طراحی موتورهای سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز و ساخت یک نمونه ۳ کیلووات" است. موتورهای سنکرون رلوکتانسی به دلیل برخورداری از ویژگی‌های قابل توجه در مقایسه با سایر موتورهای الکتریکی (و البته نقاط ضعف مشخص)، در دو دهه اخیر مورد توجه محققان حوزه ماشین‌های الکتریکی قرار گرفته‌اند. در این میان، قابلیت راه اندازی موتورهای الکتریکی از طریق اتصال مستقیم به شبکه، اهمیت بسیاری در کاربردهای مختلف صنعتی دارد. از این رو، پروژه فوق به مطالعه و تحقیق پیرامون ایجاد این قابلیت در موتورهای سنکرون رلوکتانسی می‌پردازد و نتایج تحقیقات انجام شده، از طریق ساخت یک نمونه آزمایشگاهی صحت‌سنجی خواهند شد. انجام این پروژه در قالب قرارداد شماره ق ه ۹۷/۳۰۵/۱۵۸ مورخ ۱۳۹۷/۱۲/۲۶ به دانشگاه اصفهان واگذار شد. مجری این پروژه در دانشگاه اصفهان، جناب آقای دکتر بهزاد میرزائیان و ناظر پروژه جناب آقای حسن ابراهیمی‌راد هستند.

در مرحله اول پروژه، عملکرد موتورهای سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد. موضوعاتی از قبیل مقایسه عملکرد موتورهای سنکرون رلوکتانسی خود راه انداز با موتورهای القایی، بررسی استانداردهای بین‌المللی پیرامون طراحی و ساخت موتورهای سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز و همچنین تعیین پارامترهای مهم در طراحی این موتورها در این مرحله مطالعه و بررسی می‌شوند. تعیین الگوریتم طراحی موتورهای سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز، موضوع مرحله دوم پروژه است. در مرحله سوم نیز طراحی بهینه موتور با توجه به الگوریتم تهیه شده در مرحله دوم انجام می‌شود که با آنالیز حرارتی و مکانیکی همراه خواهد بود. پس از طراحی موتور، ساخت و تست آن و همچنین ارائه گزارش نهایی پروژه، به ترتیب در مراحل چهارم و پنجم انجام می‌شوند.

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

پیشگفتار.....	ا
مقدمه.....	س
فصل ۱- سه عملکرد موتورهای القایی و موتورهای سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۱-۱-۱- مرحله راه اندازی.....	۲
۱-۱-۲- مرحله پایداری.....	۳
۱-۲- مقایسه در شرایط پایدار.....	۴
۱-۲-۱- مقایسه موتورهای ۲/۲ کیلووات.....	۴
۱-۲-۲- مقایسه موتورهای ۴ کیلووات.....	۵
۱-۲-۳- مقایسه موتورهای ۳۰ کیلووات.....	۵
۱-۳- مقایسه در شرایط راه اندازی.....	۷
۱-۴- جمع بندی.....	۹
فصل ۲- مطالعه استانداردهای بین المللی درباره طراحی و ساخت <i>LSSynRM</i>	۱۰
۲-۱- مقدمه.....	۱۱
۲-۲- استاندارد <i>IEC60034-30-1</i>	۱۱
۲-۳- استاندارد <i>IEC60034-12</i>	۱۲
۲-۴- استاندارد <i>IEC60034-6</i>	۱۳
۲-۵- تست های مورد نیاز برای موتور سنکرون رلوکتانسی.....	۱۳
۲-۵-۱- تست بازدهی.....	۱۴
۲-۵-۲- تست افزایش دمای سیم پیچ.....	۱۴
۲-۵-۳- تست اضافه بار.....	۱۵
۲-۵-۴- تست اضافه سرعت.....	۱۵
۲-۵-۵- تست تحمل ولتاژ.....	۱۶
۲-۵-۶- تست <i>IP</i>	۱۶
۲-۶- تجهیزات مورد نیاز برای اندازه گیری و حداقل مشخصات فنی آنها.....	۱۷
فصل ۳- پارامترهای مهم در طراحی و ساخت <i>LSSynRM</i>	۲۱
۳-۱- مقدمه.....	۲۲
۳-۲- پارامترهای مهم در طراحی.....	۲۲
۳-۳- چالش های طراحی و ساخت <i>LSSynRM</i>	۲۲

۳-۴	روش های ایجاد قفس برای <i>LSSynRM</i>	۲۳
۳-۴-۱	سدکننده های شار تماما پر شده از آلومینیوم.....	۲۳
۳-۴-۲	سدکننده های شار به صورت جزئی پر شده از آلومینیوم.....	۲۳
۳-۵	کاهش میزان آلومینیوم رتور.....	۲۵
۳-۵-۱	تغییر مکان پل های مماسی به سمت مرکز رتور.....	۲۵
۳-۵-۲	اضافه کردن پل های درون رتور.....	۲۶
۳-۶	مدل سازی <i>LSSynRM</i>	۲۹
۳-۶-۱	مدل سازی دینامیکی.....	۳۰
۳-۶-۲	مطالعه رفتار <i>LSSynRM</i> با آنالیز جداسازی.....	۳۵
۳-۷	کاربردهای <i>LSSynRM</i>	۳۷
۳۸	نتیجه گیری.....	۳۸
۴	فصل ۴- طراحی الکترومغناطیسی موتور سینکریل خودراه انداز.....	۴۰
۴-۱	مقدمه.....	۴۱
۴-۲	روش های طراحی الکترومغناطیسی موتور سینکریل خودراه انداز.....	۴۱
۴-۲-۱	طراحی بر اساس موتور القایی پایه.....	۴۱
۴-۳-۱	شکل سدکننده های شار.....	۴۷
۴-۵-۱	اثر موقعیت میله های رتور بر مقاومت های محور dq	۶۴
۵	فصل ۵- آنالیز موتور سینکریل خودراه انداز.....	۷۱
۵-۱	مقدمه.....	۷۲
۶	فصل ۶- تحلیل حرارتی موتور سینکریل خود راه انداز.....	۸۶
۶-۱	مقدمه.....	۸۷
۶-۲	مدل حرارتی کامل.....	۸۷
۷	فصل ۷- الگوریتم طراحی الکترومغناطیسی موتور سینکریل خودراه انداز.....	۹۴
۷-۱	مقدمه.....	۹۵
۸	فصل ۸- طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی.....	۱۰۵
۸-۱	مقدمه.....	۱۰۶
۸-۲	طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی.....	۱۰۶
۸-۲-۱	ابعاد موتور.....	۱۰۶
۸-۲-۲	طراحی استاتور و سیم پیچ ها.....	۱۰۷
۸-۲-۳	تعداد قطب ها.....	۱۰۷
۸-۲-۴	تعداد شیارهای استاتور.....	۱۰۸

۱۰۸.....	۵-۲-۸- سیم پیچی استاتور.....
۱۱۱.....	۶-۲-۸- مقایسه سیم پیچ متمرکز و توزیع شده.....
۱۱۲.....	۷-۲-۸- بهینه سازی با روش المان محدود.....
۱۱۴.....	۸-۲-۸- موتورهای سنکرون رلوکتانسی بهینه.....
۱۱۶.....	۹-۲-۸- اثر پل های شعاعی.....
۱۱۸.....	فصل ۹- طراحی قفس القایی
۱۱۹.....	۱-۹- مقدمه.....
۱۱۹.....	۲-۹- طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز.....
۱۲۰.....	۳-۹- موتور با قفس میله ای.....
۱۲۱.....	۱-۳-۹- طراحی قفس با میله های مستطیلی.....
۱۲۴.....	۴-۹- موتور با قفس ریخته گری شده.....
۱۲۶.....	۵-۹- ارزیابی عملکرد موتور با ولتاژ کاهش یافته.....
۱۲۷.....	۶-۹- ارزیابی عملکرد موتور با زوایای اولیه مختلف روتور.....
۱۲۸.....	۷-۹- تغییرات نهایی شکل روتور.....
۱۲۹.....	۸-۹- مشخصات موتور در بار نامی.....
۱۳۳.....	فصل ۱۰- آنالیز حرارتی
۱۳۴.....	۱-۱۰- مقدمه.....
۱۳۴.....	۲-۱۰- آنالیز حرارتی.....
۱۳۶.....	فصل ۱۱- آنالیز مکانیکی
۱۳۷.....	۱-۱۱- مقدمه.....
۱۳۷.....	۲-۱۱- آنالیز ساختاری.....
۱۳۹.....	۳-۱۱- آنالیز مودال و تعیین فرکانس های طبیعی روتور.....
۱۳۹.....	۸-۴.....
۱۴۲.....	فصل ۱۲- طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی خود راه انداز یک کیلووات
۱۴۳.....	۱-۱۲- مقدمه.....
۱۴۳.....	۲-۱۲- موتورهای سنکرون رلوکتانسی بهینه.....
۱۴۴.....	۱-۲-۱۲- اثر پل های شعاعی در حالت پایدار.....
۱۴۵.....	۲-۲-۱۲- اثر گام سیم پیچی در حالت پایدار.....
۱۴۶.....	۳-۱۲- طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز.....
۱۴۷.....	۱-۳-۱۲- موتور با قفس میله ای.....
۱۴۷.....	۲-۳-۱۲- طراحی قفس با میله های مستطیلی.....
۱۵۰.....	۳-۳-۱۲- اثر پل های شعاعی بر قابلیت سنکرونیزم موتور.....
۱۵۱.....	۴-۳-۱۲- اثر گام سیم پیچی بر قابلیت سنکرونیزم موتور.....

۱۵۲.....	۱۲-۳-۵- موتور با قفس ریخته‌گری شده.....
۱۵۴.....	۱۲-۳-۶- تغییرات نهایی شکل روتور.....
۱۵۵.....	۱۲-۳-۷- ارزیابی عملکرد موتور با زوایای اولیه مختلف روتور.....
۱۵۵.....	۱۲-۳-۸- مشخصات موتور در بار نامی.....
۱۵۸.....	پیوست (۱).....
۱۶۵.....	پیوست (۲).....
۱۷۴.....	فصل ۱۳- ساخت و تست موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز.....
۱۷۵.....	۱۳-۱- مقدمه.....
۱۷۵.....	۱۳-۲- ساخت موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز.....
۱۷۵.....	۱۳-۲-۱- روتور سنکرون رلوکتانسی.....
۱۷۶.....	۱۳-۲-۲- استاتور و سیم پیچی.....
۱۷۸.....	۱۳-۲-۳- محور روتور.....
۱۷۸.....	۱۳-۲-۴- حلقه اتصال کوتاه قفس.....
۱۷۹.....	۱۳-۲-۵- میله های قفس.....
۱۷۹.....	۱۳-۲-۶- اتصال میله ها به حلقه اتصال کوتاه.....
۱۸۱.....	۱۳-۲-۷- جازدن محور در روتور.....
۱۸۲.....	۱۳-۲-۸- تراش کاری سطح روتور.....
۱۸۳.....	۱۳-۲-۹- بالانس روتور.....
۱۸۴.....	۱۳-۲-۱۰- مونتاژ نهایی.....
۱۸۵.....	۱۳-۲-۱۱- مقایسه با موتور القایی سه فاز.....
۱۸۶.....	۱۳-۳- تست موتور.....
۱۸۶.....	۱۳-۳-۱- تست دینامومتری شرکت الکتروژن.....
۱۸۸.....	۱۳-۳-۲- مقایسه نتایج شبیه‌سازی و اندازه گیری.....
۱۸۹.....	۱۳-۳-۳- تست موتور در آزمایشگاه دانشگاه صنعتی اصفهان.....
۱۹۱.....	۱۳-۳-۴- قابلیت سنکرونیزم موتور سنکرون رلوکتانسی.....
۱۹۲.....	13-4- بررسی عملکرد موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز در شرایط کنترل سرعت V/f
۱۹۳.....	۱۳-۴-۱- شرایط توان نامی و سرعت ۷۵۰ دور در دقیقه.....
۱۹۶.....	۱۳-۴-۲- شرایط نصف توان نامی و سرعت ۷۵۰ دور در دقیقه.....
۱۹۹.....	نتیجه گیری.....
۲۰۰.....	پیوست (۱).....
۲۰۷.....	پیوست (۲).....

فهرست جداول

- جدول ۱-۱- مقایسه LSSynRM و موتور القایی ۲/۲ کیلووات [۲]..... ۴
- جدول ۱-۲- مقایسه LSSynRM و موتور القایی ۴ کیلووات..... ۵
- جدول ۱-۳- پارامترهای عمده موتورهای LSSynRM و موتور القایی در شرایط پایدار [۶]..... ۶
- جدول ۱-۴- مشخصه های زمان راه اندازی و نسبت توان ظاهری به توان نامی برای موتور القایی و LSSynRM ($Jm = JL = 0.217 \text{ kgm}^2, IM \text{ TLOAD} = 194 \text{ Nm}, SynRM \text{ TLOAD} = 191 \text{ Nm}$) [۶]..... ۸
- جدول ۲-۱- مشخصات نامی موتور سنکرون رلوکتانسی خودروه انداز..... ۱۱
- جدول ۲-۲- کلاس های بازدهی موتورهای الکتریکی مطابق استاندارد IEC 60034-30-1..... ۱۱
- جدول ۲-۳- گستره نامی بازدهی (%) برای بازدهی رده IE4 (A)، جدول ۹ از استاندارد IEC 60034-30-1..... ۱۲
- جدول ۲-۴- حداکثر مقادیر توان ظاهری رتور قفل شده برای طراحی های معمولی و گشتاور بالا (جدول ۲ استاندارد IEC 60034-12)..... ۱۳
- جدول ۲-۵- بیشترین سرعت کاری موتورها (جدول از استاندارد IEC 60034-1)..... ۱۷
- جدول ۲-۶- وسایل اندازه گیری و دقت مورد نیاز..... ۱۹
- جدول ۲-۷- تست های قابل انجام و دستگاه های مورد نیاز..... ۲۰
- جدول ۳-۱- مقادیر مقاومت قفس رتور برای رتورهای شکل ۳-۱۲. [۱۵]..... ۳۴
- جدول ۶-۱- ثابت های دمایی [۱۷]..... ۹۲
- جدول ۸-۱- شماره فریم استاندارد برای موتورهای ۴ قطب و ۱۵۰۰ دور..... ۱۰۶
- جدول ۸-۲- تاثیر تعداد شیارهای استاتور بر دمای سیم پیچی..... ۱۰۸
- جدول ۸-۳- ترکیب های ممکن شیار استاتور و زوج قطب برای سیم پیچی متمرکز [۵]..... ۱۰۹
- جدول ۸-۴- نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی موتور سنکرون رلوکتانسی با سیم پیچی متمرکز [۷]..... ۱۰۹
- جدول ۸-۵- مقایسه موتور با سیم پیچی توزیع شده و متمرکز و رتور یکسان..... ۱۱۲
- جدول ۸-۶- نتایج بهینه سازی..... ۱۱۴
- جدول ۸-۷- مقایسه عملکرد موتورهای سنکرون رلوکتانسی شماره یک، دو و سه..... ۱۱۶
- جدول ۸-۸- مقایسه موتور سنکرون رلوکتانسی با وجود پل های شعاعی..... ۱۱۷
- جدول ۹-۱- انواع بارها و مشخصه آن ها [۱۴]..... ۱۱۹
- جدول ۹-۲- مشخصات هندسی موتورهای بهینه..... ۱۲۰
- جدول ۹-۳- کلاس های بازده و حداکثر تلفات مجاز برای توان سه کیلووات..... ۱۲۰

- جدول ۹-۴- مقایسه عملکرد حالت پایدار موتور با قفس آلومینیوم ریخته‌گری شده و قفس میله‌ای مسی..... ۱۲۵
- جدول ۹-۵- مشخصات موتور در بار نامی..... ۱۲۹
- جدول ۱۰-۱- دمای موتور در شرایط پایدار..... ۱۳۵
- جدول ۱۱-۱- مشخصات مکانیکی ورق M400-50A..... ۱۳۷
- جدول ۱۱-۲- نتایج آنالیز ساختاری..... ۱۳۹
- جدول ۱۱-۳- نتایج آنالیز مودال..... ۱۴۱
- جدول ۱۲-۱- مقایسه عملکرد موتورهای سنکرون رلوکتانسی شماره یک و دو..... ۱۴۴
- جدول ۱۲-۲- مقایسه موتور سنکرون رلوکتانسی با و بدون پل‌های شعاعی..... ۱۴۵
- جدول ۱۲-۳- مقایسه موتور سنکرون رلوکتانسی با گام سیم‌پیچی مختلف..... ۱۴۶
- جدول ۱۲-۴- مشخصات هندسی استاتور..... ۱۴۶
- جدول ۱۲-۵- مقایسه عملکرد حالت پایدار موتور با قفس آلومینیوم ریخته‌گری شده و قفس میله‌ای مسی..... ۱۵۳
- جدول ۱۲-۶- مشخصات موتور یک کیلووات در بار نامی..... ۱۵۶
- جدول ۱۳-۱- نتایج تست در ۲۵ درصد بار نامی..... ۱۸۷
- جدول ۱۳-۲- نتایج تست در ۵۰ درصد بار نامی..... ۱۸۷
- جدول ۱۳-۳- نتایج تست در ۷۵ درصد بار نامی..... ۱۸۷
- جدول ۱۳-۴- نتایج تست در ۱۰۰ درصد بار نامی..... ۱۸۷
- جدول ۱۳-۵- نتایج تست در ۱۲۵ درصد بار نامی..... ۱۸۸
- جدول ۱۳-۶- نتایج مقایسه شبیه‌سازی و تست در بار نامی..... ۱۸۸
- جدول ۱۳-۷- مشخصات تجهیزات تست موتور در دانشگاه صنعتی اصفهان..... ۱۸۹
- جدول ۱۳-۸- نتایج اندازه‌گیری موتور سنکرون رلوکتانسی در شرایط بدون بار..... ۱۹۰
- جدول ۱۳-۹- نتایج اندازه‌گیری موتور سنکرون رلوکتانسی در شرایط بار نامی..... ۱۹۱

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱- شماتیک موتور سنکرون رلوکتانسی با سه سدکننده شار..... ۲
- شکل ۱-۲- مشخصه گشتاور- سرعت (1pull up torque, 2pull out torque) [۳]..... ۳
- شکل ۱-۳- دیاگرام فازوری LSSynRM در شرایط پایدار [۴]..... ۴
- شکل ۱-۴- سطح مقطع مدل هـای ۴ قطب و ۳۰ کیلووات موتور القایی و LSSynRM (a) موتور القایی
LSSynRM (b) ($mAl = 13.17\text{ kg}$) با دو سدکننده شار ($mAl = 8.48\text{ kg}$)؛ LSSynRM (c) با سه سدکننده
شار ($mAl = 8.56\text{ kg}$)؛ LSSynRM (d) با چهار سدکننده شار ($mAl = 8.63\text{ kg}$)؛ LSSynRM (e) با پنج
سدکننده شار ($mAl = 8.69\text{ kg}$) و LSSynRM با شش سدکننده شار ($mAl = 8.74\text{ kg}$) [۶]..... ۶
- شکل ۱-۵- مشخصه راه اندازی سرعت LSSynRM با سدکننده های شار مختلف و موتور القایی در شرایط گذرا [۶]..... ۷
- شکل ۱-۶- مشخصه راه اندازی گشتاور-سرعت LSSynRM با سدکننده های شار مختلف و موتور القایی..... ۸
- جدول ۱-۱- شکل ۱-۷- مقایسه موتورهای LSSynRM و IM..... ۹
- شکل ۲-۱- کلاس های بازدهی برای موتور ۴ قطب ۱۵۰۰ دور..... ۱۲
- شکل ۲-۲- روش های اندازه گیری گشتاور (شکل از استاندارد IEC 60034-2-1)..... ۱۴
- شکل ۳-۱- طرح رتور LSSynRM کمپانی ABB [۱۳]..... ۲۴
- شکل ۳-۲- شکستن پل های رتور ناشی از فرآیند ریخته گری [۳]..... ۲۴
- شکل ۳-۳- نمونه رتور LSSynRM با قفس میله ای آلومینیوم [۵]..... ۲۵
- شکل ۳-۴- جا به جایی پل مماسی به سمت داخل رتور به اندازه ۲ میلی متر [۶]..... ۲۶
- شکل ۳-۵- کاهش آلومینیوم در سطح رتور. (a) پل سطحی و پل تنظیم کننده (b) رتور با پنج سدکننده شار و نحوه کاهش
آلومینیوم [۶]..... ۲۷
- شکل ۳-۶- وابستگی تلفات اهمی رتور به فاصله پل تنظیم کننده از پل سطحی [۶]..... ۲۷
- شکل ۳-۷- (a) رتور تماما پر شده از آلومینیوم FuF و (b) رتور پر شده از آلومینیوم به صورت جزئی PaF [۱۴]..... ۲۸
- شکل ۳-۸- قابلیت سنکرون رتورهای PaF و FuF [۱۴]..... ۲۹
- شکل ۳-۹- تعریف قاب مرجع استاتور، قاب مرجع سنکرون رتور و سرعت سنکرون [۱۵]..... ۳۰
- شکل ۳-۱۰- مدل دینامیکی مدار معادل LSSynRM در مولفه های d و q [۱۵]..... ۳۱
- شکل ۳-۱۱- تغییرات متوسط گشتاور با Rrd (خطوط سبز) و Rrq (خطوط قرمز). (مقاومت در جهت فلش ها افزایش می
یابد.) [۹]..... ۳۴
- شکل ۳-۱۲- (a) رتور FUF n_r 14، (b) رتور PAF n_r 14 و (c) رتور PAF n_r 14b [۱۵]..... ۳۴
- شکل ۳-۱۳- تغییرات $Tcage$ با مقدار Rrd [۱۵]..... ۳۵

- شکل ۱۴-۳- منحنی سرعت و کل گشتاور اعمال شده استاتور بر هسته رتور، قفس و شفت. خط بریده عمودی لحظه سنکرونیزم را نشان می‌دهد. [۱]..... ۳۶
- شکل ۱۵-۳- منحنی گشتاور بار و گشتاور اعمال شده استاتور بر هسته رتور، قفس و شفت بر حسب تابعی از سرعت رتور [۱] ۳۶
- شکل ۱-۴- (الف) روتور القایی پایه، (ب) روتور سینکریل خودراه انداز بر اساس موتور القایی پایه..... ۴۲
- شکل ۲-۴- روتور سینکریل خودراه انداز بر اساس موتور القایی پایه [۶]..... ۴۳
- شکل ۳-۴- (الف) سینکریل پایه، (ب) موتور سینکریل خودراه انداز با سدکننده‌های شار پر شده از آلومینیوم، (پ) موتور سینکریل خودراه انداز با قفس میله ای..... ۴۴
- شکل ۴-۴- روتور موتور سینکریل خودراه انداز با پایه سینکریل و قفس میله‌ای [۷]..... ۴۵
- شکل ۵-۴- روتور موتور سینکریل خودراه انداز با پایه سینکریل و سدکننده‌های شار پر شده از آلومینیوم [۸]..... ۴۵
- شکل ۶-۴- یک قطب موتور سینکریل..... ۴۶
- شکل ۷-۴- متوسط گشتاور به ازای تغییر زاویه جریان (نامی، نصف نامی و دو برابر نامی)..... ۴۷
- شکل ۸-۴- سدکننده‌های شار با خطوط مستقیم. (الف) ضخامت ثابت ($Wq = Wd$)، (ب) ضخامت متغیر ($Wq > Wd$)..... ۴۸
- شکل ۹-۴- سدکننده‌های شار دایره‌ای. (الف) ضخامت ثابت ($Wq = Wd$)، (ب) ضخامت متغیر ($Wq > Wd$)..... ۴۹
- شکل ۱۰-۴- سدکننده‌های شار سیال گونه..... ۵۰
- شکل ۱۱-۴- (سمت چپ) خطوط شار همزمان محور d و q در روتور توپر با محور غیر مغناطیسی. (سمت راست) مقایسه خطوط شار با روش المان محدود و روش تحلیلی [۲۸]..... ۵۰
- شکل ۱۲-۴- میدان در روتور توپر با نظریه نگاشت همدیس [۲۹]..... ۵۱
- شکل ۱۳-۴- شارهای عبوری و گردشی در تحریک جریان محور q (الف) دو سدکننده شار، (ب) چهار سدکننده شار..... ۵۲
- شکل ۱۴-۴- محل قرار گرفتن شیارهای معادل روتور (نقاط انتهایی سدکننده‌های شار روتور)..... ۵۳
- شکل ۱۵-۴- روتور با دو سدکننده شار و تعریف پارامترها..... ۵۴
- شکل ۱۶-۴- مقایسه گشتاور روتور با زوایای مختلف سدکننده‌های شار..... ۵۵
- شکل ۱۷-۴- زاویه ثابت سدکننده‌های شار ($\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha$)..... ۵۵
- شکل ۱۸-۴- زاویه سدکننده‌های شار با دو درجه آزادی ($\alpha_1 = \beta, \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha$)..... ۵۶
- شکل ۱۹-۴- اثر افزایش ضریب ایزولاسیون بر متوسط گشتاور..... ۵۷
- شکل ۲۰-۴- توزیع چگالی شار محور d روی روتور..... ۵۷
- شکل ۲۱-۴- مورب کردن روتور به اندازه زاویه θ_{skew} ۵۹
- شکل ۲۲-۴- روتور مورب پیوسته. (الف) پشته ورق‌ها، (ب) روتور اریب شده با زاویه ۴ درجه نسبت به شفت [۴۳]..... ۵۹
- شکل ۲۳-۴- روتور مورب پله‌ای. (الف) تکه‌های روتور، (ب) محور پله‌ای اریب شده، (پ) محور اریب نشده [۴۴]..... ۶۰

- شکل ۲۴-۴- تقسیم بندی روتور به دو ناحیه R و J [۴۱] ۶۰
- شکل ۲۵-۴- تصویر ورق‌های با سدکننده‌های شار متفاوت (a) روتور نوع R و (b) روتور نوع J [۴۵] ۶۱
- شکل ۲۶-۴- تصویر روتور Machoan با سدکننده‌های شار با زوایای متفاوت در هر قطب [۴۵] ۶۱
- شکل ۲۷-۴- تصویر روتور Machoan با سدکننده‌های شار با تعداد متفاوت در هر قطب [۳۵] ۶۱
- شکل ۲۸-۴- تصویر روتور با سدکننده‌های شار متقارن (خطوط ممتد) و نامتقارن (خط چین) [۲۵] ۶۲
- شکل ۲۹-۴- مدار معادل dq موتور سینکریل خودراه انداز [۲۶] ۶۳
- شکل ۳۰-۴- تاثیر موقعیت میله‌های روتور بر مقاومت‌های dq [۲۶] ۶۴
- شکل ۳۱-۴- روتور موتور سینکریل خودراه انداز [۲۶] ۶۵
- شکل ۳۲-۴- (الف) مدار معادل موتور القایی (ب) پارامترهای معادل در تست روتور قفل شده [۴۶] ۶۶
- شکل ۳۳-۴- مدار معادل dq دینامیکی موتور سینکریل خودراه انداز [۱] ۶۷
- شکل ۳۴-۴- مدار معادل dq در حالت دائمی (a) محور d (b) محور q [۱] ۶۹
- شکل ۱-۵- آنالیز موتور سینکریل خودراه انداز در حالت دائمی و گذرا ۷۲
- شکل ۲-۵- دیاگرام فازوری موتور سینکریل [۲۷] ۷۳
- شکل ۳-۵- گشتاور رلکتانسی پریونیت به ازای مقادیر متفاوت مقاومت استاتور پریونیت [۲۷] ۷۵
- شکل ۴-۵- هندسه روتور موتور سینکریل با دو سدکننده شار و تعریف پارامترها [۳۷] ۷۷
- شکل ۵-۵- هندسه روتور موتور سینکریل با سدکننده‌های شار دایره‌ای شکل و تعریف پارامترها [۱۳] ۷۷
- شکل ۶-۵- مشخصه گشتاور Pull-in نمونه موتور سینکریل خودراه انداز بر اساس تابعی از کل اینرسی [۵۶] ۸۰
- شکل ۷-۵- مدار معادل IEEE موتور القایی [۵۵] ۸۲
- شکل ۸-۵- فلوچارت محاسبه پارامترهای موتور و روش تحلیلی [۵۵] ۸۲
- شکل ۹-۵- مقایسه نتایج روش تحلیلی، المان محدود و نتایج اندازه گیری [۵۵] ۸۳
- شکل ۱۰-۵- فلوچارت مدل دینامیکی [۵۷] ۸۴
- شکل ۱۱-۵- مشخصه گشتاور بر حسب زمان، شرایط روتور قفل شده [۵۷] ۸۵
- شکل ۱-۶- مدار معادل حرارتی کامل موتور ۸۸
- شکل ۲-۶- مدار معادل حرارتی موتور با خنک کاری مایع ۸۸
- شکل ۳-۶- شبکه دمایی [۶۰] ۸۹
- شکل ۴-۶- ابعاد معادل شیار مستطیلی [۶۰] ۹۰
- شکل ۵-۶- شبکه دمایی خطی ساده شده [۶۰] ۹۱
- شکل ۶-۶- مقایسه نتایج مدل حرارتی ساده و آنالیز المان محدود [۶۰] ۹۲

- شکل ۷-۶-افزایش دمای سیم‌پیچی موتورهای تحت بار نامی [۱۷]..... ۹۲
- شکل ۸-۶-تخمین متوسط دمای سیم‌پیچی برای بارگذاری‌های مختلف [۱۷]..... ۹۳
- شکل ۷-۱-روتور با سدکننده‌های شار سیال‌گونه و تعریف پارامترها..... ۹۵
- شکل ۷-۲-فلوچارت طراحی موتور سینکرل خودراه انداز..... ۹۷
- شکل ۷-۳-نمونه مشخصه قابلیت سنکرونیزم موتور سینکرل خودراه انداز [۶۰]..... ۹۸
- شکل ۷-۴-مشخصه سرعت-زمان برای نقاط S1 و S2 [۶۰]..... ۹۸
- شکل ۸-۱-شماتیک استاتور چند تکه [۷]..... ۱۰۹
- شکل ۸-۲-استاتور ۶ تکه موتور سنکرون رلوکتانسی با سیم‌پیچی متمرکز [۷]..... ۱۱۰
- شکل ۸-۳-(الف) سیم‌پیچی توزیع شده ۳۶ شیار (ب) سیم‌پیچی متمرکز ۶ شیار..... ۱۱۱
- شکل ۸-۴-یک قطب روتور با چهار سدکننده شار و زوایای یکسان سدکننده‌های شار..... ۱۱۲
- شکل ۸-۵-موتورهای بهینه با دو سدکننده شار (الف) ۳۶ شیار (ب) ۶ شیار..... ۱۱۳
- شکل ۸-۶-موتورهای بهینه با سه سدکننده شار (الف) ۳۶ شیار (ب) ۶ شیار..... ۱۱۳
- شکل ۸-۷-موتورهای بهینه با چهار سدکننده شار (الف) ۳۶ شیار (ب) ۶ شیار..... ۱۱۴
- شکل ۸-۸-نتایج بهینه سازی موتور با ۴ سدکننده شار و سیم‌پیچی توزیع شده..... ۱۱۵
- شکل ۸-۹-روتور سنکرون رلوکتانسی بهینه (الف) موتور شماره یک (ب) موتور شماره دو (ج) موتور شماره سه..... ۱۱۶
- شکل ۸-۱۰-روتورهای بهینه با پل‌های شعاعی (الف) موتور شماره یک (ب) موتور شماره دو (ج) موتور شماره سه..... ۱۱۷
- شکل ۹-۱-مشخصه گشتاور-سرعت انواع بارها [۱۵]..... ۱۱۹
- شکل ۹-۲-افزایش طول میله‌های روتور شماره یک..... ۱۲۱
- شکل ۹-۳-منحنی سرعت-زمان به ازای میله‌های با طول مختلف در روتور شماره یک..... ۱۲۲
- شکل ۹-۴-افزایش طول میله‌ها در روتور شماره دو..... ۱۲۲
- شکل ۹-۵-منحنی سرعت-زمان به ازای میله‌های با طول مختلف در روتور شماره دو..... ۱۲۳
- شکل ۹-۶-افزایش طول میله‌ها روتور شماره سه..... ۱۲۳
- شکل ۹-۷-منحنی سرعت-زمان به ازای میله‌های با طول مختلف در روتور شماره سه..... ۱۲۴
- شکل ۹-۸-روتور با قفس آلومینیوم ریخته‌گری شده (الف) شماره یک (ب) شماره دو (ج) شماره سه..... ۱۲۴
- شکل ۹-۹-منحنی سرعت-زمان برای روتورهای با قفس آلومینیوم ریخته‌گری شده..... ۱۲۵
- شکل ۹-۱۰-منحنی سرعت-زمان در بارنامی و ولتاژ ۴۰۰، ۳۸۰ و ۳۶۰ ولت..... ۱۲۶
- شکل ۹-۱۱-منحنی گشتاور موتور در حالت عدم موفقیت سنکرونیزم..... ۱۲۶
- شکل ۹-۱۲-منحنی جریان موتور در حالت عدم موفقیت سنکرونیزم..... ۱۲۷

- شکل ۱۳-۹- منحنی سرعت-زمان به ازای زوایای اولیه مختلف روتور..... ۱۲۷
- شکل ۱۴-۹- یک قطب روتور سنکرون رلوکتانسی..... ۱۲۸
- شکل ۱۵-۹- یک قطب روتور LSSynRM..... ۱۲۹
- شکل ۱۶-۹- منحنی جریان-زمان..... ۱۳۰
- شکل ۱۷-۹- منحنی گشتاور-زمان..... ۱۳۰
- شکل ۱۸-۹- منحنی سرعت-زمان..... ۱۳۱
- شکل ۱۹-۹- توزیع چگالی شار درون موتور..... ۱۳۱
- شکل ۲۰-۹- توزیع تلفات در میله‌های قفس..... ۱۳۲
- شکل ۲۱-۹- توزیع تلفات در میله‌های قفس..... ۱۳۲
- شکل ۱-۱۰- موتور با فریم خارجی و نحوه خنک کنندگی..... ۱۳۴
- شکل ۲-۱۰- سطح مقطع محوری موتور..... ۱۳۴
- شکل ۳-۱۰- مدار معادل موتور در نرم افزار MotorCAD..... ۱۳۵
- شکل ۱-۱۱- تغییر شکل روتور در سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه..... ۱۳۷
- شکل ۲-۱۱- تنش معادل روتور در سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه..... ۱۳۸
- شکل ۳-۱۱- نتایج اغراق آمیز تغییر شکل روتور در سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه..... ۱۳۸
- شکل ۴-۱۱- نتایج اغراق آمیز تنش معادل روتور در سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه..... ۱۳۹
- شکل ۵-۱۱- تغییر شکل مود اول..... ۱۴۰
- شکل ۶-۱۱- تغییر شکل مود دوم..... ۱۴۰
- شکل ۷-۱۱- تغییر شکل مود سوم..... ۱۴۱
- شکل ۱-۱۲- موتورهای سنکرون رلوکتانسی بهینه. الف) موتور شماره یک ب) موتور شماره دو..... ۱۴۴
- شکل ۲-۱۲- الف) روتور بدون پل شعاعی ب) روتور با پل‌های شعاعی..... ۱۴۵
- شکل ۳-۱۲- سیم پیچی استاتور با گام: الف) ۹ شیار ب) ۸ شیار پ) ۷ شیار استاتور..... ۱۴۶
- شکل ۴-۱۲- ورق استاتور..... ۱۴۷
- شکل ۵-۱۲- افزایش طول میله‌های روتور شماره یک..... ۱۴۸
- شکل ۶-۱۲- منحنی سرعت-زمان به ازای میله‌های با طول مختلف..... ۱۴۹
- شکل ۷-۱۲- افزایش طول میله‌ها روتور شماره دو..... ۱۴۹
- شکل ۸-۱۲- منحنی سرعت-زمان..... ۱۵۰
- شکل ۹-۱۲- الف) روتور با پل‌های شعاعی ب) روتور بدون پل‌های شعاعی..... ۱۵۱

- شکل ۱۰-۱۲- منحنی سرعت-زمان برای روتور با و بدون پل‌های شعاعی..... ۱۵۱
- شکل ۱۱-۱۲- منحنی سرعت-زمان برای روتور با تغییر گام سیم پیچی..... ۱۵۲
- شکل ۱۲-۱۲- روتور با قفس آلومینیوم ریخته‌گری شده الف) روتور شماره یک ب) روتور شماره دو..... ۱۵۲
- شکل ۱۳-۱۲- منحنی سرعت-زمان برای روتور های با قفس آلومینیوم ریخته‌گری شده..... ۱۵۳
- شکل ۱۴-۱۲- یک قطب روتور SynRM..... ۱۵۴
- شکل ۱۵-۱۲- یک قطب روتور LSSynRM..... ۱۵۴
- شکل ۱۶-۱۲- منحنی سرعت-زمان به ازای زوایای اولیه مختلف روتور..... ۱۵۵
- شکل ۱۷-۱۲- منحنی جریان-زمان..... ۱۵۶
- شکل ۱۸-۱۲- منحنی گشتاور-زمان..... ۱۵۷
- شکل ۱-۱۳- تصویر ورق روتور سنکرون رلوکتانسی..... ۱۷۵
- شکل ۲-۱۳- ساخت پشته روتور..... ۱۷۶
- شکل ۳-۱۳- تصویر ورق استاتور..... ۱۷۶
- شکل ۴-۱۳- تصویر پشته استاتور..... ۱۷۷
- شکل ۵-۱۳- تصویر سیم پیچی استاتور..... ۱۷۷
- شکل ۶-۱۳- محور موتور..... ۱۷۸
- شکل ۷-۱۳- نمونه حلقه اتصال کوتاه قفس..... ۱۷۹
- شکل ۸-۱۳- میله های قفس..... ۱۷۹
- شکل ۹-۱۳- روتور قبل از بریز..... ۱۸۰
- شکل ۱۰-۱۳- اتصال میله ها به حلقه های اتصال کوتاه با بریز آتش..... ۱۸۰
- شکل ۱۱-۱۳- تصویر روتور بعد از اتصال همه حلقه های اتصال کوتاه..... ۱۸۱
- شکل ۱۲-۱۳- برق زدن روتور..... ۱۸۱
- شکل ۱۳-۱۳- آج زدن محور..... ۱۸۲
- شکل ۱۴-۱۳- جازدن محور با دستگاه پرس..... ۱۸۲
- شکل ۱۵-۱۳- تراشکاری سطح روتور..... ۱۸۳
- شکل ۱۶-۱۳- روتور بعد از تراشکاری..... ۱۸۳
- شکل ۱۷-۱۳- روتور زیر دستگاه بالانس..... ۱۸۴
- شکل ۱۸-۱۳- محل اضافه کردن وزنه ها برای بالانس شدن روتور..... ۱۸۴
- شکل ۱۹-۱۳- جا زدن پشته استاتور به داخل بدنه..... ۱۸۵

- شکل ۲۰-۱۳- تصویر ورق روتور القایی..... ۱۸۵
- شکل ۲۱-۱۳- تصویر روتور القایی..... ۱۸۶
- شکل ۲۲-۱۳- اتصال موتور به دینامومتر شرکت الکتروژن..... ۱۸۶
- شکل ۲۳-۱۳- میز تست موتور در دانشگاه صنعتی اصفهان..... ۱۹۰
- شکل ۲۴-۱۳- جریان های سه فاز اندازه گیری شده در بی باری..... ۱۹۰
- شکل ۲۵-۱۳- جریان های سه فاز اندازه گیری نصف بار نامی و اینرسی ۴ برابر روتور..... ۱۹۲
- شکل ۲۶-۱۳- نتایج اندازه گیری گشتاور و سرعت در نصف بار نامی و اینرسی بار چهار برابر روتور..... ۱۹۲
- شکل ۲۷-۱۳- منحنی سرعت-زمان موتور در شرایط ولتاژ فاز ۱۱۰ ولت و فرکانس ۲۵ هرتز..... ۱۹۳
- شکل ۲۸-۱۳- منحنی جریان های سه فاز در شرایط ولتاژ فاز ۱۱۰ ولت و فرکانس ۲۵ هرتز..... ۱۹۴
- شکل ۲۹-۱۳- منحنی گشتاور-زمان موتور در شرایط ولتاژ فاز ۱۱۰ ولت و فرکانس ۲۵ هرتز..... ۱۹۴
- شکل ۳۰-۱۳- منحنی سرعت-زمان در شرایط ولتاژ فاز ۱۴۰ ولت و فرکانس ۲۵ هرتز..... ۱۹۵
- شکل ۳۱-۱۳- منحنی جریان سه فاز در شرایط ولتاژ فاز ۱۴۰ ولت و فرکانس ۲۵ هرتز..... ۱۹۵
- شکل ۳۲-۱۳- منحنی گشتاور-زمان موتور در شرایط ولتاژ فاز ۱۴۰ ولت و فرکانس ۲۵ هرتز..... ۱۹۶
- شکل ۳۳-۱۳- منحنی سرعت-زمان در شرایط نصف بار نامی و فرکانس ۲۵ هرتز (ولتاژ فاز ۱۴۰ ولت)..... ۱۹۷
- شکل ۳۴-۱۳- منحنی جریان های سه فاز در شرایط نصف بار و سرعت نامی و فرکانس ۲۵ هرتز..... ۱۹۷
- شکل ۳۵-۱۳- منحنی گشتاور-زمان در شرایط نصف بار و سرعت نامی و فرکانس ۲۵ هرتز..... ۱۹۷

مقدمه

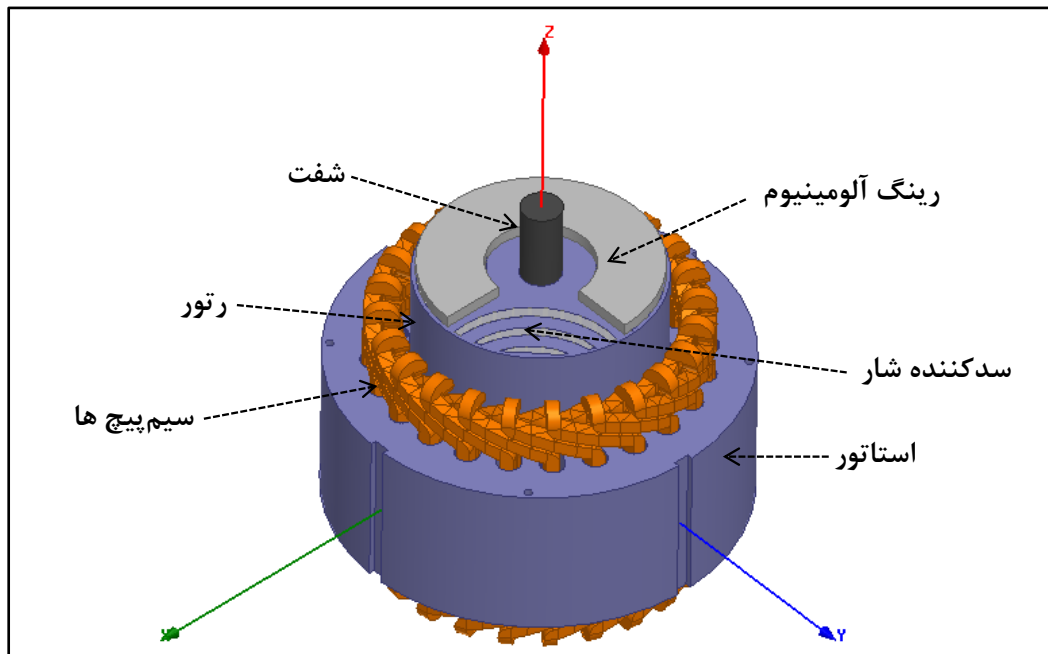
این گزارش در ارتباط با کسب دانش فنی طراحی موتورهای سنکرون رلوکتانسی خود راه انداز و ساخت یک نمونه ۳ کیلووات است. فصل اول گزارش به مقایسه عملکرد موتورهای القایی و موتورهای سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز اختصاص دارد. مطالعه استانداردهای بین المللی درباره طراحی و ساخت LSSynRM و همچنین پارامترهای مهم در طراحی و ساخت LSSynRM در فصل های دوم و سوم انجام می شود. طراحی و آنالیز الکترومغناطیسی، حرارتی و مکانیکی موتور سینکریل خودراه انداز در فصل های چهارم تا یازدهم انجام شده است. طراحی، ساخت و تست یک موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز یک کیلووات نیز موضوع فصل های دوازده و سیزده این گزارش است.

فصل ♦ -

فصل ۱- سه عملکرد موتورهای القایی و موتورهای سنکرون رلوکتانسی خودراه‌انداز

۱-۱- مقدمه

موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز (LSSynRM^۱) را می‌توان ترکیبی از موتور سنکرون رلوکتانسی و موتور القایی دانست. در مراجع از نام‌های DOLSynRM^۲ [۱] و موتور Synduction [۲] نیز برای آن استفاده می‌شود. شماتیک LSSynRM با سه سدکننده شار که تماماً توسط آلومینیوم پر شده و در دو انتها اتصال کوتاه شده اند را نشان می‌دهد. استاتور LSSynRM مشابه موتورهای القایی سه فاز بوده و تفاوت آن‌ها در شکل رتور است. عملکرد LSSynRM را می‌توان شامل دو مرحله راه اندازی (عملکرد در سرعت آسنکرون) و در شرایط پایدار (عملکرد در سرعت سنکرون) در نظر گرفت.



شکل ۱-۱- شماتیک موتور سنکرون رلوکتانسی با سه سدکننده شار

۱-۱-۱- مرحله راه اندازی

مشابه موتورهای القایی، قفس رتور با تولید گشتاور آسنکرون باعث راه اندازی موتور می‌شود. گشتاور قفس به صورت رابطه (۱-۱) است [۳].

$$T_c = K_T \Phi_m I_2 \cos \varphi_2 \quad (1-1)$$

که K_T ثابت گشتاور، Φ_m شار متقابل، I_2 و φ_2 به ترتیب جریان معادل رتور و ضریب قدرت آن هستند. علاوه بر گشتاور قفس، گشتاور کششی اضافی به دلیل عکس العمل برجستگی رتور و میدان استاتور نیز به وجود می‌آید. در سرعت‌های زیر

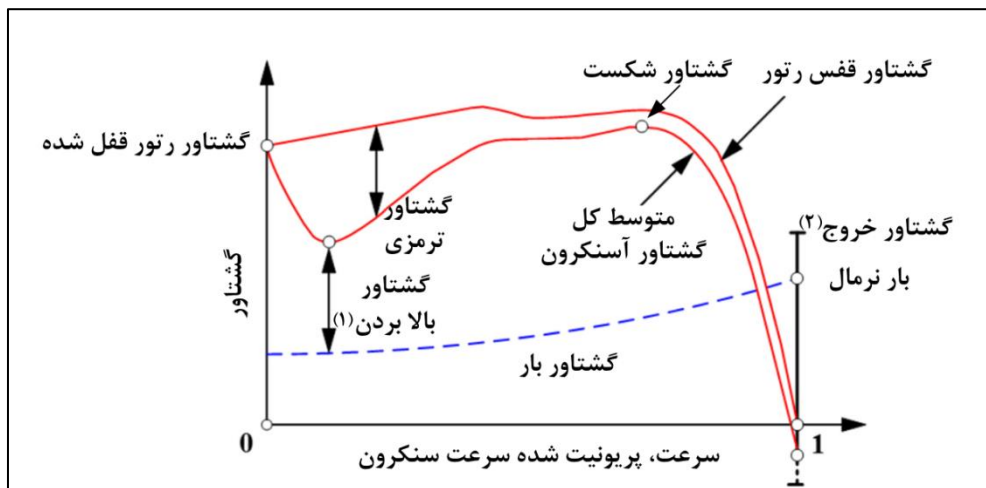
¹ Line Start Synchronous Reluctance Motor (LSSynRM)

² Direct On Line Synchronous Reluctance Motor (DOLSynRM)

سرعت سنکرون، به گشتاور تولیدی، گشتاور pull-up گفته می شود. گشتاور pull-up ناشی از برجستگی به صورت رابطه (۱-۲) به دست می آید [۳].

$$T_{sb} = -\frac{m V^2 p R_{ph}}{2 \omega} \frac{(X_{ds} - X_{qs})^2}{[R_{ph}^2 + X_{ds} X_{qs}]^2} \quad (1-2)$$

که m و p به ترتیب تعداد فازها و قطب ها هستند؛ ω سرعت زاویه سنکرون؛ X_{ds} و X_{qs} راکتانس های محور d و q بوده و R_{ph} مقاومت فاز استاتور است. * مشخصه گشتاور- سرعت LSSynRM نوعی را نشان می دهد.



شکل ۱-۲-۱- مشخصه گشتاور- سرعت (1 pull up torque, 2 pull out torque) [۳]

۲-۱-۱- مرحله پایدار

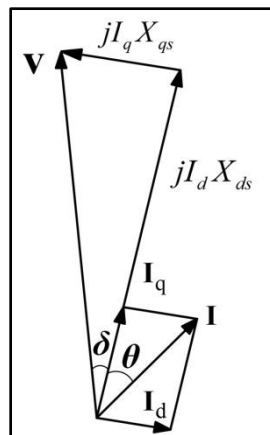
در سرعت سنکرون، جریان های رتور به سمت صفر میل می کند و مرحله راه اندازی خاتمه می یابد. قطعه های آهن روی رتور که در مسیر محور d قرار گرفته اند، جذب میدان مغناطیسی گردان استاتور می شوند و باعث ایجاد گشتاور سنکرون (رلوکتانسی) می شوند. گشتاور حالت پایدار (رلوکتانسی) به صورت رابطه (۱-۱) به دست می آید [۳].

$$T_R = \frac{mp V^2}{\omega} \frac{1}{2} \left[\left(\frac{X_{ds} - X_{qs}}{X_{ds} X_{qs}} \right) \right] \sin 2\delta \quad (1-1)$$

که δ زاویه گشتاور است. دیاگرام فازوری LSSynRM در * نشان داده شده است. زاویه ضریب قدرت (φ) به صورت جمع زاویه گشتاور (δ) و زاویه جریان (θ) محاسبه می شود. بنابراین ضریب قدرت به صورت رابطه (۱-۲) به دست می آید [۴].

$$\cos \varphi = \frac{\left(\frac{X_{ds}}{X_{qs}} - 1 \right)}{\sqrt{\left(\frac{X_{ds}}{X_{qs}} \right)^2 \frac{1}{\sin^2 \theta} + \frac{1}{\cos^2 \theta}}} \quad (1-2)$$

با توجه به روابط (۱-۱) و (۱-۲) مشاهده می شود که عملکرد در سرعت سنکرون (بازدهی، ضریب قدرت) وابسته به نسبت برجستگی است.



شکل ۳-۱- دیاگرام فازوری LSSynRM در شرایط پایدار [۴]

۲-۱- مقایسه در شرایط پایدار

با توجه به تلفات کمتر در رتور، موتور LSSynRM می تواند جایگزین موتورهای القایی سه فاز برای دستیابی به رده بازده بالاتر شود [۳]. در این بخش مروری که به مقایسه عملکرد LSSynRM و موتورهای القایی در شرایط پایدار پرداخته اند، مرور می شود.

۱-۲-۱- مقایسه موتورهای ۲/۲ کیلووات

در [۲] از استاتور مشابه یک موتور ۲/۲ کیلووات برای مقایسه LSSynRM و موتور القایی سه فاز استفاده شده است. نتایج شبیه سازی حالت پایدار نشان دهنده بهبود بازدهی LSSynRM نسبت به موتور القایی است. برای طراحی رتور LSSynRM از یک رتور SynRM^۱ که برای کاربرد درایو طراحی شده و شیارهای داخل آن تماماً از آلومینیوم پر شده، استفاده شده است. نتایج مقایسه در * نشان داده شده است.

جدول ۱-۱- مقایسه LSSynRM و موتور القایی ۲/۲ کیلووات [۲]

LSSynRM	IM		
۳۹۸	۳۹۸	[V] rms	ولتاژ خط
۴٫۷۹	۵٫۰	[A] rms	جریان فاز
۱۴٫۲	۱۵٫۱	[Nm]	گشتاور
۱۵۰۰	۱۳۸۱	[rpm]	سرعت نامی

^۱ Synchronous Reluctance Motor (SynRM)

۲۲۳۱	۲۲۳۱	[W]	توان خروجی
۰٫۷۶۳	۰٫۷۹۴	–	ضریب قدرت
۸۴٫۵	۷۹٫۰	%	بازده
۴۸	۵۰	[W]	تلفات هسته
۲۹۹	۳۳۰	[W]	تلفات اهمی استاتور
۳۱	۱۶۸	[W]	تلفات اهمی رتور
۳۱	۳۱	[W]	تلفات بادخوری ^۱

تلفات هسته در LSSynRM نسبت به موتور القایی، کاهش اندکی دارد و دلیل آن به کاهش تلفات در هسته رتور بر می‌گردد؛ اما کاهش تلفات اهمی در رتور LSSynRM نسبت به موتور القایی قابل توجه است و منجر به بهبود بازدهی آن نسبت به موتور القایی سه فاز می‌شود.

۲-۱-۲- مقایسه موتورهای ۴ کیلووات

در [۵] نتایج آزمایشگاهی تعویض رتور یک موتور القایی سه فاز ۴ کیلووات با رتور LSSynRM نشان دهنده بهبود بازدهی موتور از کلاس IE3 به IE4 است. ساختار رتور LSSynRM به صورت سدکننده‌های شار چندلایه است و از میله‌های آلومینیومی دایره‌ای شکل و با قطر یکنواخت برای قفس القایی استفاده شده است. همان طور که در ۰ نشان داده شده است، در شرایط بار نامی بازدهی LSSynRM و IM به ترتیب ۹۲٫۰ و ۸۹٫۳ درصد گزارش شده است که حاکی از کاهش ۲۸ درصدی در تلفات موتور است. همچنین دمای سیم پیچی موتورهای کاهش ۱۰ درجه ای را نشان می‌دهد؛ در عین حال ضریب قدرت از ۰٫۷۸ به ۰٫۷۶ کاهش پیدا کرده است.

جدول ۲-۱- مقایسه LSSynRM و موتور القایی ۴ کیلووات

LSSynRM	IM		
۴۰۰	۴۰۰	[V] rms	ولتاژ نامی
۹۲٫۰	۸۹٫۳	%	بازده
۰٫۷۶	۰٫۷۸	–	ضریب قدرت
۴۵	۳۵	[K]	افزایش دمای سیم پیچی

۳-۱-۲- مقایسه موتورهای ۳۰ کیلووات

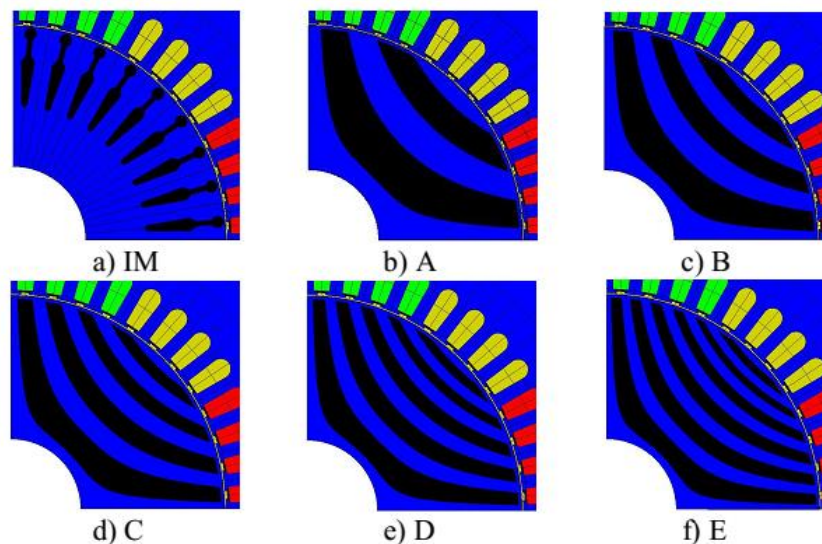
در [۶] از استاتور مشترک یک موتور ۴ قطب و ۳۰ کیلووات القایی برای مقایسه LSSynRM با سدکننده‌های شار با تعداد متفاوت استفاده شده است. طراحی رتور بر اساس روش ارائه شده در [۷] صورت گرفته است و شکل سدکننده‌های شار به صورت

¹ Windage loss

سیال^۱ انتخاب شده است. سطح مقطع یک قطب از موتور القایی و LSSynRM با تعداد ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ سدکننده‌های شار در ۰ نشان داده شده است.

با احتساب هزینه ۱/۶۱ دلار بر کیلوگرم برای آلومینیوم، هزینه LSSynRM با توان ۳۰ کیلووات، ۱۰ دلار کمتر از هزینه موتور القایی با توان مشابه خواهد بود. همچنین اختلاف قیمت بین طراحی های مختلف LSSynRM کمتر از ۱ دلار است. در شکل ۱-۴ میزان جرم آلومینیوم به کار رفته (m_{Al}) برای رتورهای مختلف آمده است.

مشخصات موتورهای مورد مطالعه در شرایط نامی و همچنین توزیع تلفات در موتورها در ۰ نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که با افزایش تعداد سدکننده‌های شار، به دلیل افزایش نسبت برجستگی، با جریان کمتر استاتور، گشتاور نامی تولید می شود که منجر به کاهش تلفات مسی استاتور می شود؛ همچنین تلفات آهن به دلیل کاهش هارمونیک های چگالی شار، کاهش می یابد. بازده LSSynRM مختلف نسبت به موتور القایی بیشتر است و در عین حال موتور القایی ضریب قدرت بالاتری دارد. در بین موتورهای LSSynRM با افزایش تعداد سدکننده‌های شار بازده و ضریب قدرت بهبود می یابد و دلیل آن افزایش نسبت برجستگی و کاهش نشت شار در رتور است.



شکل ۱-۴- سطح مقطع مدل های ۴ قطب و ۳۰ کیلووات موتور القایی و (a) LSSynRM موتور القایی ($m_{Al} = 13.17 \text{ kg}$)؛ (b) LSSynRM با دو سدکننده شار ($m_{Al} = 8.48 \text{ kg}$)؛ (c) LSSynRM با سه سدکننده شار ($m_{Al} = 8.56 \text{ kg}$)؛ (d) LSSynRM با چهار سدکننده شار ($m_{Al} = 8.63 \text{ kg}$)؛ (e) LSSynRM با پنج سدکننده شار ($m_{Al} = 8.69 \text{ kg}$) و LSSynRM با شش سدکننده شار ($m_{Al} = 8.74 \text{ kg}$) [۶]

جدول ۱-۳- پارامترهای عمده موتورهای LSSynRM و موتور القایی در شرایط پایدار [۶]

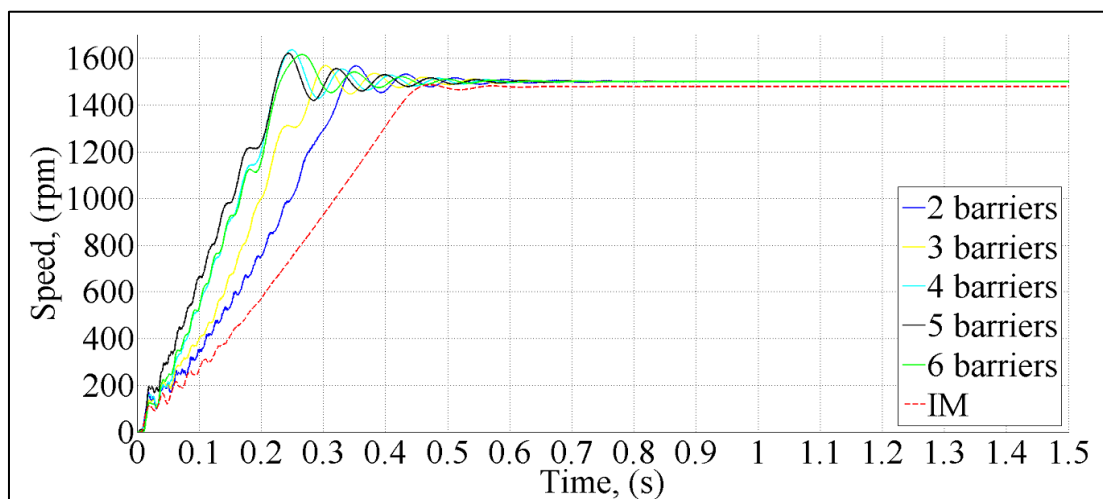
تعداد سدکننده های شار LSSynRM							
۶	۵	۴	۳	۲	IM		
۱۹۱	۱۹۱	۱۹۱	۱۹۱	۱۹۱	۱۹۴	[Nm]	گشتاور نامی
۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۴۶۸/۵	[rpm]	سرعت نامی
۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	[V]	ولتاژ فاز

¹ Fluid

۳۱/۱	۳۱/۴۱	۳۱/۶۹	۳۱/۹۵	۳۳/۱۱	۳۱/۱۹	[A]	جریان نامی فاز
۵۸۷/۷	۶۰۰/۶	۶۳۲/۷	۷۱۱/۹	۷۲۹/۸	۶۵۱/۵	[W]	مجموع تلفات آهن
۹۹۶/۴	۱۰۰۰	۱۰۱۸/۰۲	۱۰۳۵	۱۱۱۰	۹۸۶/۷	[W]	تلفات اهمی استاتور
۲۵۳/۲	۱۵۹/۵	۱۵۵/۱۱	۱۳۴/۱	۱۹۲/۷	۴۴۶/۵	[W]	تلفات اهمی رتور
۱۸۳۷	۱۷۶۰	۱۸۰۶	۱۸۸۱	۲۰۳۲	۲۰۸۵	[W]	کل تلفات
۱۰۶/۲	۱۰۴/۲	۱۰۰/۹	۹۳/۹۳	۸۳/۰۱	ندارد	[mH]	اندوکتانس محور d
۸/۹۳۶	۸/۸۵۷	۸/۷۴۸	۸/۵۵۷	۸/۲۰۵	ندارد	[mH]	اندوکتانس محور q
۹۷/۲۴	۹۵/۳۴	۹۲/۱۱	۸۵/۳۷	۷۴/۸۱	ندارد	[mH]	اختلاف اندوکتانس
۱۱/۸۸	۱۱/۷۶	۱۱/۵۳	۱۰/۹۷	۱۰/۱۲	ندارد	-	نسبت برجستگی
۰/۸۳۸	۰/۸۳۴	۰/۸۱۶	۰/۸	۰/۷۹۷	۰/۸۸۳	-	ضریب قدرت
۹۴/۲۳	۹۴/۴۶	۹۴/۳۲	۹۴/۱	۹۳/۶۶	۹۳/۵	%	بازده

۳-۱- مقایسه در شرایط راه اندازی

مقایسه‌ای که تاکنون بین LSSynRM و موتور القایی صورت گرفت، به عملکرد موتورها در شرایط پایدار اشاره داشت؛ اما عملکرد این دو موتور در شرایط گذرای راه اندازی نیز متفاوت است. در ۰ و ۰ به ترتیب مشخصه سرعت و گشتاور-سرعت LSSynRM با سدکننده‌های شار مختلف و نیز موتور القایی نشان داده شده است. نوسانات گشتاور در LSSynRM بسیار بیشتر از موتور القایی است زیرا جهت گشتاور رلوکتانسی در حین شتاب گیری موتور تغییر می‌کند. در نتیجه، جریان راه اندازی (یا توان ظاهری راه اندازی) نسبت به موتور القایی بیشتر است. جریان‌های راه اندازی بالا باعث کاهش عمر عایق موتور می‌شود و دلیل آن افزایش دمای زیاد و ایجاد نیروهای الکترومغناطیسی بزرگ است که می‌تواند منجر به خسارت‌های ناشی از تنش مکانیکی شود. بنابراین باید مواد عایقی مناسب در طراحی موتور به کار گرفته شود، تا عمر مفید آن را تضمین کند.

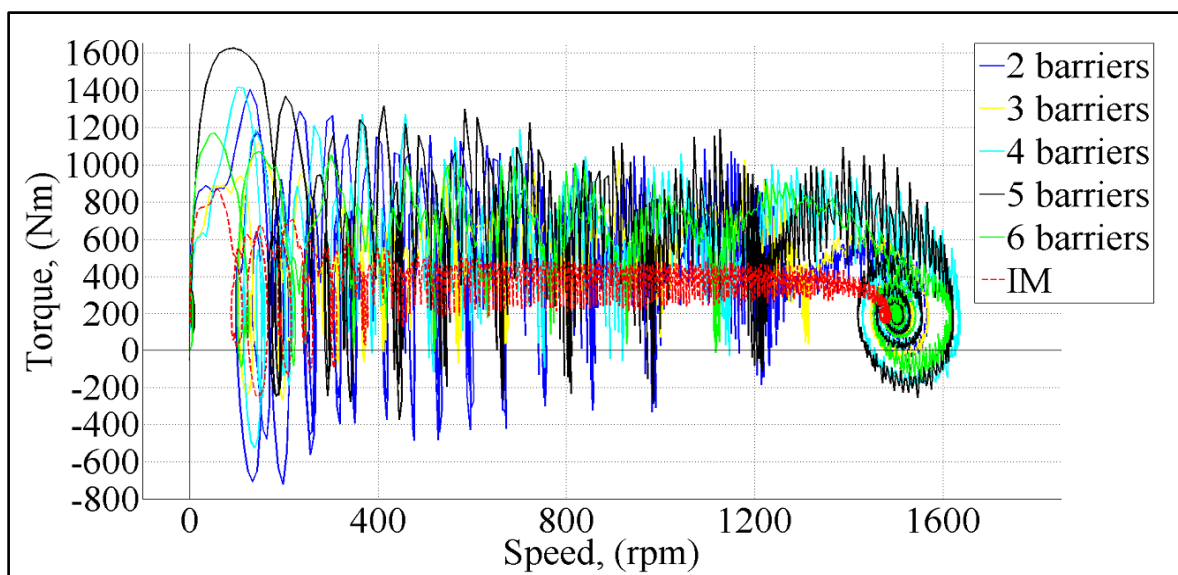


شکل ۵-۱- مشخصه راه اندازی سرعت LSSynRM با سدکننده‌های شار مختلف و موتور القایی در شرایط گذرا [۶]

مشخصه های زمان راه اندازی و نسبت توان ظاهری به توان نامی برای موتورهای مختلف * در * نشان داده شده است. حداکثر توان ظاهری راه اندازی با تغییر تعداد سدکننده های شار تغییر چندانی ندارد. زمان راه اندازی نیز تغییرات اندکی دارد. حداکثر توان ظاهری برای LSSynRM نسبت به موتور القایی بیشتر است. مطابق استاندارد IEC 60034-12 حداکثر نسبت توان ظاهری به توان نامی برای یک موتور ۳۰ کیلووات القایی نباید از ۱۱ برابر بیشتر باشد. همان طور که در * مشخص است، این نسبت برای موتورهای LSSynRM بالاتر از ۱۴ است. برای جلوگیری از ایجاد افت ولتاژهای شدید در شبکه، از تجهیزات راه اندازی نرم می توان برای موتور استفاده نمود.

جدول ۴-۱- مشخصه های زمان راه اندازی و نسبت توان ظاهری به توان نامی برای موتور القایی و LSSynRM ($J_m = 0.217 \text{ kgm}^2$, $IM T_{LOAD} = 194 \text{ Nm}$, $SynRM T_{LOAD} = 191 \text{ Nm}$) [۶]

نوع رتور	زمان صعود t_r ، (ثانیه)	زمان وضعیت پایدار t_s ، (ثانیه)	نسبت توان ظاهری راه اندازی به توان نامی، S_{st}/P_N
IM	۰/۴۵	۰/۴۵	۸/۳۲
A	۰/۳۳	۰/۵۲	۱۴/۲۵۳
B	۰/۲۹	۰/۴۷	۱۴/۴۳
C	۰/۲۲	۰/۴۶	۱۴/۵۱۷
D	۰/۲۲	۰/۴۸	۱۴/۶۲۹
E	۰/۲۳	۰/۴۴	۱۴/۵۶۴



شکل ۶-۱- مشخصه راه اندازی گشتاور-سرعت LSSynRM با سدکننده های شار مختلف و موتور القایی

۴-۱- جمع بندی

در جدول ۱-۱ بازده و ضریب قدرت برای موتورهای با توان مختلف که مورد بررسی قرار گرفته اند، آمده است. در همه موارد موتور LSSynRM بازدهی بالاتر دارد اما ضریب قدرت موتور القایی بهتر است. دمای خنک تر در حالت پایدار از جمله مزایا و افزایش جریان راه اندازی را می توان از معایب LSSynRM نسبت به موتور القایی دانست. کاهش حجم آلومینیوم مصرف شده در رتور LSSynRM نسبت به موتور القایی منجر به کاهش هزینه آن می شود در عین حال به دلیل افزایش جریان راه اندازی LSSynRM هزینه عایق کاری برای این موتور نسبت به موتور القایی بیشتر خواهد بود. با در نظر گرفتن هزینه انرژی با توجه به بازدهی بالاتر این موتورها نسبت به موتورهای القایی، هزینه تمام شده در طول دوره عمر موتور برای LSSynRM کمتر خواهد بود.

جدول ۱-۱ شکل ۱-۷-۱ مقایسه موتورهای LSSynRM و IM

بازده %		ضریب قدرت		
LSSynRM	IM	LSSynRM	IM	
۸۴/۵	۷۹/۰	۰/۷۶۳	۰/۷۹۴	موتورهای ۲/۲ کیلووات
۹۲/۰	۸۹/۳	۰/۷۶	۰/۷۸	موتورهای ۴ کیلووات
۹۴/۳۲	۹۳/۵	۰/۸۳۴	۰/۸۸۳	موتورهای ۳۰ کیلووات

فصل ۲- مطالعه استانداردهای بین‌المللی درباره طراحی و ساخت LSSynRM

۱-۲- مقدمه

مشخصات فنی موتور LSSynRM ۳ کیلووات، اعلام شده از طرف پژوهشگاه در ۰ آمده است.

جدول ۱-۲- مشخصات نامی موتور سنکرون رلکتانسی خودراه انداز

بازدهی موتور	کلاس IE4
سرعت نامی	1500 RPM
ولتاژ ورودی	400 V- line
توان خروجی	3 kW
ریپل گشتاور	در حد موتور القایی مشابه
اضافه بار	۱۰ درصد برای ۱ دقیقه
فریم	فریم استاندارد موتور القایی
محدوده عملکرد دمایی	۲۰- تا ۴۰ درجه سانتیگراد

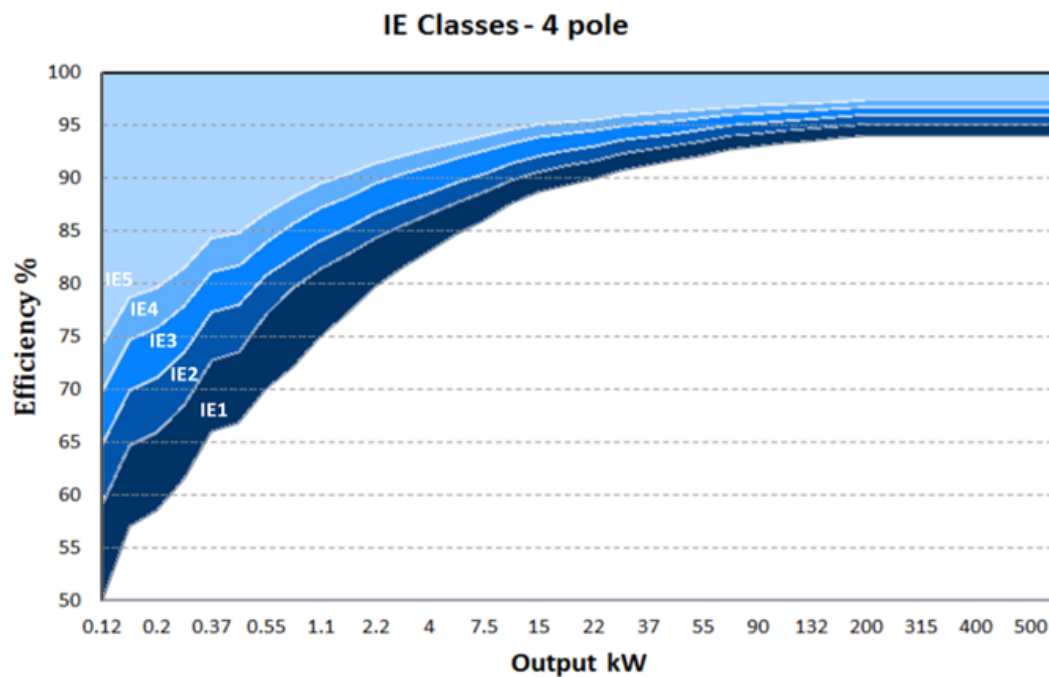
۲-۲- استاندارد IEC60034-30-1

این استاندارد کلاس‌های بازدهی را برای موتورهای تک سرعت بر اساس فرکانس، تعداد قطب‌ها و توان موتور مشخص می‌کند. در این استاندارد ۵ کلاس بازدهی IE برای تمامی موتورهایی که از طریق منبع ولتاژ سینوسی تغذیه می‌شوند، تعیین شده‌است. نام‌گذاری کلاس‌های مختلف بازدهی در ۰ آمده است.

جدول ۲-۲- کلاس‌های بازدهی موتورهای الکتریکی مطابق استاندارد IEC 60034-30-1

Standard efficiency	IE1
High efficiency	IE2
Premium efficiency	IE3
Super Premium efficiency	IE4
Ultra Premium efficiency	IE5

کلاس‌های بازدهی در IEC 60034-30-1 بر اساس روش‌های اندازه‌گیری که در استاندارد IEC 60034-2-1 مشخص شده است، تعریف شده‌اند. *همبستگی بین استاندارد مورد نیاز و قدرت خروجی موتور را برای پنج کلاس بازدهی برای موتورهای ۴ قطب نمایش می‌دهد.



شکل ۱-۲- کلاس های بازدهی برای موتور ۴ قطب ۱۵۰۰ دور

در این استاندارد، رده بندی بازده انرژی این موتورها با توجه به تلفات در منبع تغذیه سینوسی انجام شده است. به عنوان نمونه این رده بندی برای موتورهای کلاس IE4 در ۰ بر حسب تعداد قطب و سرعت سنکرون نشان داده شده است.

جدول ۳-۲- گستره نامی بازدهی (%) برای بازدهی رده IE4 (A)، جدول ۹ از استاندارد IEC 60034-30-1

سرعت سنکرون (تعداد قطب) min^{-1}				P_N kW
۷۵۰ (۸)	۱۰۰۰ (۶)	۱۵۰۰ (۴)	۳۰۰۰ (۲)	
۸۲٫۶	۸۵٫۹	۸۸٫۲	۸۶٫۵	۱٫۵
۸۴٫۵	۸۷٫۴	۸۹٫۵	۸۸٫۰	۲٫۲
۸۵٫۹	۸۸٫۶	۹۰٫۴	۸۹٫۱	۳ ←
۸۷٫۱	۸۹٫۵	۹۱٫۱	۹۰٫۰	۴
۸۸٫۳	۹۰٫۵	۹۱٫۹	۹۰٫۹	۵٫۵

۳-۲- استاندارد IEC60034-12

در این استاندارد محدودیت هایی برای حداکثر توان ظاهری مجاز در لحظه راه اندازی برای موتورهای القایی در نظر گرفته شده است.

همان طور که در بخش اشاره شد، جریان راه اندازی LSSynRM بیشتر از موتور القایی است. جریان های راه اندازی بالا منجر به افت ولتاژ در شبکه برق می شود. برای این منظور، استاندارد IEC محدودیت هایی بر روی توان ظاهری راه اندازی موتورها اعمال می کند که گشتاور راه اندازی را محدود می کند. حداکثر نسبت توان ظاهری به گشتاور خروجی شفت موتور

(S_{st}/P) برای توان های مختلف در ۰ نشان داده شده است. با توجه به ۰ برای موتور ۳ کیلووات مجاز توان ظاهری ۴۲ کیلووار است.

جدول ۴-۲- حداکثر مقادیر توان ظاهری رتور قفل شده برای طراحی های معمولی و گشتاور بالا (جدول ۲ استاندارد IEC 60034-12)

Range of rated output kW	S_1/P_N
$P_N \leq 0,4$	22
$0,4 < P_N \leq 0,63$	19
$0,63 < P_N \leq 1,0$	17
$1,0 < P_N \leq 1,8$	15
$1,8 < P_N \leq 4,0$	14
$4,0 < P_N \leq 6,3$	13
$6,3 < P_N \leq 25$	12
$25 < P_N \leq 63$	11
$63 < P_N \leq 630$	10
$630 < P_N \leq 1\ 600$	9

۴-۲- استاندارد IEC60034-6

در مورد ماشین های با محفظه کاملاً بسته که با فن خنک می شوند ($TEFC^1$)، جهت مطابقت با این استاندارد نوع خنک کنندگی IC 01 41 است. سطح فریم موتور توسط دمنده خارجی خنک می شود که روی محور قرار گرفته است. مطابق استاندارد IEC 60034-1-2017 محدودیت ها برای حداکثر THD^2 ماشین های سنکرون در توان های بالاتر از ۳۰۰ کیلووات صورت می گیرد.

۵-۲- تست های مورد نیاز برای موتور سنکرون رلوکتانسی

تست هایی که باید بر روی موتور سنکرون رلوکتانسی ساخته شده انجام شود در زیر آورده شده است:

- ☐ تست بازدهی
- ☐ تست افزایش دمای سیم پیچی های استاتور
- ☐ تست اضافه بار

¹ Totally Enclosed Fan Cooled

² Total Harmonic Distortion

- ☐ تست اضافه سرعت
- ☐ تست تحمل ولتاژ
- ☐ تست IP

۱-۵-۲- تست بازدهی

در تست بازدهی، بازدهی مجموعه و ضریب توان ورودی در بار نامی اندازه گیری می شود. به دلیل اینکه در مشخصات فنی اعلامی از طرف پژوهشگر ذکر شده است که باید کلاس بازدهی موتور IE4 باشد. بهترین روش برای بدست آوردن بازدهی اندازه گیری مستقیم توان های ورودی و خروجی می باشد. برای اندازه گیری بازده طبق استاندارد دو روش استفاده از گشتاور سنج و یا دینامومتر قابل استفاده می باشد. در ۰ دو روش مذکور نشان داده شده است.



شکل ۲-۲- روش های اندازه گیری گشتاور (شکل از استاندارد IEC 60034-2-1)

در روش استفاده از گشتاور سنج، خروجی گشتاور سنج به عنوان گشتاور موتور مورد استفاده قرار می گیرد اما در روش استفاده از دینامومتر باید یک گشتاور تصحیح که مربوط به اصطکاک می باشد به گشتاور T_d اضافه شود تا گشتاور واقعی محور موتور بدست آید.

برای انجام تست بازدهی طبق استاندارد باید موتور تحت سرعت و بار نامی راه اندازی شود. هنگامی که از نظر گرمایی پوسته موتور و دمای هوای اطراف به تعادل دمایی رسید، پارامترهای جریان، ولتاژ، ضریب توان و توان ورودی به مجموعه ثبت می شود.

- ☐ **نکته:** تعادل دمایی زمانی حاصل می شود که دمای پوست موتور جایی که مستقیم در جریان هوای فن قرار نداشته باشد، دارای تغییرات دمای مساوی یا کمتر از یک درجه کلوین در سی دقیقه باشد.

۲-۵-۲- تست افزایش دمای سیم پیچ

در این تست با توجه به کلاس عایقی سیم پیچی موتور افزایش دمای سیم پیچی اندازه گیری شده و با کلاس عایقی اعلام شده توسط سازنده مقایسه می شود. برای اندازه گیری دما سه روش در استاندارد IEC60034-1 معرفی شده است این روش ها عبارتند از:

- ☐ روش اندازه گیری دما با استفاده از اندازه گیری افزایش مقاومت سیم پیچی

□ روش اندازه گیری توسط آشکارسازهای^۱ کار گذاشته شده در سیم پیچی (ETD^۲)

□ روش استفاده از ترموکوپل و خواندن دمای سطوح در دست

مطابق استاندارد IEC 60034-1 برای اندازه گیری دمای سیم پیچی موتورهای زیر ۲۰۰ کیلو وات باید از روش اندازه گیری مقاومت استفاده شود. در این روش ابتدا قبل از اینکه موتور روشن شود موقعی که موتور در دمای محیط قرار دارد و با محیط هم دما است یک ولتاژ DC به دو سر سیم پیچی های موتور اعمال می شود و جریان آن خوانده می شود و با استفاده از ولتاژ و جریان مقاومت سیم پیچی مشخص می شود (R_1). پس از تست بارداری و به تعادل دمایی رسیدن موتور، موتور خاموش شده و یک ولتاژ DC به دو سر سیم پیچی های موتور اعمال می شود و جریان آن خوانده می شود و با استفاده از ولتاژ و جریان مقاومت پس از تست مشخص می شود (R_2). با استفاده از رابطه $(1-1)$ دمای نهایی و میزان افزایش دمای سیم پیچی در هنگام تست مشخص می شود.

$$\frac{\theta_1 + k}{\theta_2 + k} = \frac{R_1}{R_2}, \quad \text{Temperature Rise} = \theta_2 - \theta_1 \quad (1-1)$$

که θ_1 دمای سیم پیچی قبل از تست، θ_2 دمای سیم پیچی پس از تست، k یک عدد ثابت که برای سیم پیچی از نوع مسی ۲۳۴/۵ و برای سیم پیچی از نوع آلومینیومی ۲۲۵ می باشد.

□ نکته: زمان اعمال ولتاژ DC و قرائت جریان نباید بیش از ۳۰ ثانیه پس از خاموش کردن موتور باشد.

□ نکته: ماکزیمم دمای محیط در این تست نباید بیش از ۴۰ درجه سانتیگراد باشد.

بیشترین افزایش دمای قابل قبول موتور با رنج توانی مورد نظر این پروژه طبق استاندارد برای کلاس های عایقی مختلف در صورت استفاده از روش اندازه گیری مقاومتی در زیر آورده شده است (IEC 60034-1).

□ کلاس A : ۸۰ درجه سانتیگراد

□ کلاس B : ۱۰۵ درجه سانتیگراد

□ کلاس F : ۱۲۵ درجه سانتیگراد

۳-۵-۲- تست اضافه بار

موتورهای الکتریکی صرف نظر از عملکرد و ساختمان آنها، باید قادر به تحمل یک گشتاور اضافی لحظه ای در حالی که هیچ گونه توقف و یا تغییرات تند سرعت (تحت افزایش تدریجی گشتاور) وجود نداشته باشد، باشند. ولتاژ و فرکانس باید در مقادیر نامی نگه داشته شوند. با توجه به مشخصات فنی اعلام شده از طرف پژوهشگاه نیرو مقدار اضافه گشتاور ۱۰ درصد و به مدت یک دقیقه است.

۴-۵-۲- تست اضافه سرعت

این تست به منظور اطمینان از کارکرد صحیح موتورها در سرعت های بیش از سرعت نامی انجام می شود. طبق استاندارد IEC 60034-1 موتورهای با ولتاژ تغذیه زیر ۱۰۰۰ ولت باید بتوانند در شرایط غیر معمولی در سرعت های آورده شده در بدون هیچ مشکلی و به صورت ایمن کار کنند. مدت زمان آزمون اضافه سرعت ۲ دقیقه است. مطابق جدول ۲-۵ ردیف ۱ برای

¹ Detectors

² Embedded Temperature Detector

موتورهای AC که استثنا نشده‌اند، اضافه سرعت $1/2$ برابر سرعت اسمی در نظر گرفته شده‌است؛ بنابراین برای موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز با سرعت نامی 1500 RPM تست حداکثر سرعت در 1800 RPM صورت می‌گیرد.

۵-۲-۵- تست تحمل ولتاژ

این تست به منظور مشخص شدن سطح تحمل عایق بندی در برابر ولتاژ انجام می‌شود. مطابق با استاندارد IEC60034-1 برای موتور مورد نظر در این پروژه که دارای توان ۳ کیلو وات است، ولتاژ تست برابر است با ۱۰۰۰ ولت بعلاوه دو برابر ولتاژ تغذیه، اگر مقدار بدست آمده کمتر از ۱۵۰۰ ولت باشد باید تست با ولتاژ ۱۵۰۰ ولت انجام شود. مدت زمان تست یک دقیقه می‌باشد و تست بین سیم پیچی‌ها به صورت مجزا و هسته و بدنه فلزی موتور انجام می‌شود.

۶-۵-۲- تست IP

کد IP^۱ به معنای درجه حفاظت بین المللی^۲ و یا به معنای درجه حفاظت در برابر ورود^۳ می‌باشد. این کد میزان مقاومت یک دستگاه را در برابر عواملی از قبیل ذرات گرد و غبار، آب و ... نشان می‌دهد. با توجه به مشخصات فنی اعلام شده برای فریم موتور که مشابه فریم استاندارد موتور القایی با توان مشابه باید باشد (موتورهای القایی ۳ کیلووات موجود در بازار IP54 هستند)؛ باید مطابق استاندارد IEC 60034-5 تست‌های مربوطه برای مشخص شدن IP بر روی موتور انجام شود.

¹ IP code

² International Protection Marking

³ Ingress Protection Marking

جدول ۵-۲- بیشترین سرعت کاری موتورها (جدول از استاندارد^۱ IEC 60034-1)

ردیف	نوع ماشین	اضافه سرعت
۱	ماشین های جریان متناوب	۱/۲ برابر بیشینه سرعت اسمی
۱-الف	کلیه ماشین ها به استثناء آن هایی که در زیر مشخص شده اند : مولدهایی که محرک آن ها توربین آبی است و هر ماشین کمکی که به طور مستقیم (از نظر الکتریکی یا مکانیکی) به ماشین اصلی متصل شده است.	سرعت فرار ^۱ مجموعه، اما نباید کمتر از ۱/۲ برابر بیشینه سرعت اسمی نباشد مگر اینکه غیر از این مشخص شده باشد.
۱-ب	ماشین هایی که ممکن است تحت محدودیت های خاصی توسط بار به حرکت درآیند.	سرعت فرار مجموعه، اما نباید کمتر از ۱/۲ برابر بیشینه سرعت اسمی باشد.
۱-پ	موتورهای سری و یونیورسال	۱/۱ برابر سرعت در حالت بی باری در ولتاژ اسمی. برای موتورهایی که به طور دائم به بار متصل شده اند و امکان جدا شدن آن ها به طور تصادفی وجود ندارد، واژه "سرعت در حالت بی باری" باید به معنی حالت کمترین بار ممکنه در بارگذاری تعبیر شود.
۱-ت	موتورهای القایی قفسی تک سرعت سه فاز بر اساس بتد ۶-۹	۱/۲ برابر بیشینه سرعت کار ایمن
۲	ماشین های جریان مستقیم	
۲-الف	موتور با تحریک موازی و جداگانه	۱/۲ برابر بیشترین سرعت اسمی یا ۱/۵ برابر سرعت در حالت بی باری، هر کدام بزرگ تر باشد.
۲-ب	موتورهای با تحریک کمپوند (مختلط) که دارای تنظیم سرعتی معادل ۳۵٪ یا کمتر می باشند.	۱/۲ برابر بیشینه سرعت اسمی یا ۱/۱۵ برابر سرعت در حالت بی باری، هر کدام بزرگ تر باشد، اما بیشتر از ۱/۵ برابر بالاترین سرعت اسمی نشود.
۲-پ	موتورهای با تحریک کمپوند (مختلط) که دارای تنظیم سرعتی بیش از ۳۵٪ می باشند و موتورهای سری	سازنده باید بیشینه سرعت در کارکرد ایمن را تعیین و بر روی پلاک مشخصات درج نماید. اضافه سرعت برای این گونه موتورها باید ۱/۱ برابر بیشینه سرعت کارکرد ایمن باشد. نشانه سرعت کارکرد ایمن بر روی موتورهایی که قادر به افزایش سرعتی معادل ۱/۱ برابر سرعت در حالت بی باری در ولتاژ اسمی هستند، الزامی نمی باشد.
۲-ت	موتورها با تحریک مغناطیس دائم	اضافه سرعت مطابق آنچه در ردیف ۲-الف مشخص شده، مگر اینکه موتور سیم پیچ سری داشته باشد و در این صورت باید تحمل اضافه سرعت مشخص شده در ردیف ۲-ب یا ۲-ج هر کدام مناسب باشد را داشته باشد.
۲-ث	مولدها	۱/۲ برابر سرعت اسمی

۶-۲- تجهیزات مورد نیاز برای اندازه گیری و حداقل مشخصات فنی آنها

در این قسمت برخی از الزامات اساسی و نکات کلی که در انجام آزمون ها بایستی رعایت شوند و همچنین کلاس دقت^۲ مورد نیاز دستگاه های اندازه گیری مطابق استاندارد IEC 60034-2-1 ذکر شده است:

^۱ Runaway speed^۲ Accuracy class

□ در استاندارد IEC 60034-2-1 ذکر شده است حتی المقدور از وسایل اندازه‌گیری دیجیتال استفاده شود و از وسایل آنالوگ تا حد ممکن استفاده نشود. برای وسایل اندازه‌گیری آنالوگ، مقادیر مشاهده شده بهتر است در محدوده یک سوم بالایی گستره اندازه‌گیری دستگاه باشد:

□ مقیاس کامل تجهیزات اندازه‌گیری، به خصوص حسگرهای جریان، با توان ماشین تحت آزمون متناسب باشد.
 □ ترجیح داده می‌شود تا ولتاژ و جریان را مستقیماً به تحلیل‌گر توان اعمال نمود.
 □ برای اندازه‌گیری توان روش سه واتمتری توصیه می‌شود. روش دو واتمتر (اتصال آرون) هم قابل قبول است، اما باید یادآوری شود که همه تجهیزات قابل دسترسی قادر به جبران خطاهای ممکن در این روش نیست. این قابلیت را باید در دفترچه فنی تولیدکننده تجهیزات دنبال نمود. همه کابل‌های مورد استفاده در انتقال سیگنال‌های اندازه‌گیری شده باید حفاظت شده باشند.

□ به دلیل اینکه نوسانات در توان خروجی و ورودی موتور وجود دارد، باید نمونه‌گیری از ولتاژها، جریان‌ها، سرعت و گشتاور در یک بازه که شامل چندین نوسان می‌شود، انجام گیرد و متوسط اندازه‌گیری‌ها به عنوان عدد نهایی مورد استفاده قرار گیرد طبق استاندارد IEC60034-2-1 زمان نمونه‌گیری نباید بیش از ۱۵ ثانیه شود.
 □ در مورد ماشین‌های AC میانگین عددی سه جریان و ولتاژ خط باید مورد استفاده قرار بگیرد.
 □ وسایل اندازه‌گیری مستقیم مطابق با استاندارد IEC 60051، باید دارای کلاس دقت ۰/۲ و وسایل اندازه‌گیری غیر مستقیم باید دارای کلاس دقت ۰/۵ باشند داشته باشند.

گشتاور: سنسور گشتاور کوپل شونده بین موتور و بار (در صورت استفاده از روش تست مستقیم گشتاور) باید دارای حداقل کلاس دقت ۰/۲ باشد و کمترین میزان گشتاور قابل اندازه‌گیری با آن حداقل ۱۰ درصد مقدار نامی آن باشد. اگر دستگاه با کلاس بالاتر استفاده شود، بازه مجاز گشتاور متناسب با آن افزایش می‌یابد. (به عنوان مثال کلاس ۰/۱ تا ۵ درصد مقدار نامی گشتاور)

دینامومتر: (در صورت استفاده از روش دینامومتر برای محاسبه گشتاور) با توانی حدود ۲ برابر توان موتور مورد آزمایش.
توان: پاور آنالایزر کلاس A مطابق با استاندارد IEC 61000-4-30 به منظور اندازه‌گیری ولتاژ، جریان توان ظاهری، توان اکتیو، راکتیو و ضریب توان.

سرعت و فرکانس: سرعت سنج دستی از نوع نوری (مادون قرمز) برای اندازه‌گیری سرعت. وسیله اندازه‌گیری فرکانس منبع بایستی دقت $\pm 0.1\%$ در تمام بازه داشته باشد. سرعت سنج بایستی دقت ۰/۱ دور در دقیقه داشته باشد.
اندازه‌گیری دما: وسایل اندازه‌گیری دما بایستی دقت $\pm 1 K$ داشته باشند.

دستگاه تست تحمل ولتاژ: دستگاه تست تحمل ولتاژ یا Hipot test برای انجام تست ولتاژ عایقی دارای رنج ولتاژ تا حدود ۲۰۰۰ ولت.

در ۰ وسایل اندازه‌گیری و دقت مورد نیاز و در ۰۰ تست‌های قابل انجام و دستگاه‌های مورد نیاز آمده است.

جدول ۶-۲- وسایل اندازه گیری و دقت مورد نیاز

مشخصات فنی	دقت مورد نیاز	ابزار اندازه گیری
Type: Eddy Current Power: 0 to 10kW Measures: Input 3 Phase Voltage and current, Power Factor, Active and Reactive Power, Shaft Torque, Speed, Precision of Torque Loading: 1 mN.m	0.2 %	دینامومتر
Wide frequency bandwidth of DC, or 0.1 Hz to 2 MHz, High Speed Sampling Hioki PW6001-14	Class A	پاور آنالایزر
Range:-50 to 200°C Type: 3 wire	1 K±	ترمومتر دیجیتال
Clamp AC/DC Amperemeter Type: True RMS Current Range: 0 to100A AC/DC Voltage Range: 0 to 1000V AC/DC	0.2 %	مولتی متر دیجیتال
Range: 0 to 10000RPM Distance: 500mm	0.1 RPM	سرعت سنج نوری
Adjustable Voltage: 0 to 5KV Output Current: Adjustable 0 to 30mA	-	Hipot
Range:-50 to 200°C Type: 3 wire	0.2 %	نمایشگر دمای PT100

جدول ۷-۲- تست‌های قابل انجام و دستگاه‌های مورد نیاز

ردیف	تست	توضیحات	دستگاه مورد نیاز
۱	تست بازدهی	در این تست بازده موتور در گشتاور و سرعت نامی مشخص می‌شود.	دینامومتر پاورآنالایزر سرعت سنج
۲	تست افزایش دمای سیم پیچی	در این تست افزایش دمای سیم پیچی‌های موتور تحت شرایط کارکرد در بارنامی اندازه گیری می‌شود. طبق استاندارد این تست به سه روش قابل اجرا می‌باشد که معمولاً با استفاده از نصب سنسورهای دما مانند PT100 در سیم پیچی‌های موتور این کار انجام می‌شود.	نمایشگر دمای PT100 منبع تغذیه dc مولتی متر
۳	تست اضافه بار	در این تست موتور باید تحمل اضافه بار ۱۰ درصد را در مدت زمان ۱ دقیقه داشته باشد.	دینامومتر
۴	تست اضافه سرعت	در این تست موتور باید بتواند اضافه سرعت ۱/۲ برابر سرعت نامی در مدت زمان ۲ دقیقه تحمل کند.	سرعت سنج
۵	تست تحمل ولتاژ	در تست تحمل ولتاژ، ولتاژی حدود ۱۰۰۰ ولت بعلاوه دو برابر ولتاژ نامی و یا ۱۵۰۰ ولت هر کدام که بیشتر بود به مدت یک دقیقه بر روی موتور خاموش انجام می‌شود.	دستگاه Hipot
۶	تست IP	این تست برای مشخص شدن درجه حفاظت موتور انجام می‌شود.	-

فصل ۳- پارامترهای مهم در طراحی و ساخت

LSSynRM

۱-۳- مقدمه

در این فصل پارامترهای مهم در طراحی موتور سنکرون رلکتانس خودراه انداز مورد بررسی قرار می گیرد.

۲-۳- پارامترهای مهم در طراحی

هدف از طراحی LSSynRM در بسیاری مراجع دستیابی به بازدهی بالاتر در مقایسه با موتور القایی است [۸]. اهداف دیگر شامل قابلیت راه اندازی بالا و قابلیت سنکرونیسم است که از طریق طراحی مناسب رتور باید صورت پذیرد. طراحی LSSynRM یک مصالحه بین قابلیت راه اندازی بالا و عملکرد در سرعت سنکرون است. شاخص های زیر برای بررسی عملکرد LSSynRM تعریف می شوند:

گشتاور pull in: گشتاور کششی که نشان دهنده قابلیت سنکرونیسم است و به صورت حداکثر باری که می تواند راه اندازی شود، تعریف می شود [۲].

گشتاور pull out: این شاخص نشان دهنده عملکرد در شرایط سرعت سنکرون است و به صورت بیشترین گشتاور قابل دستیابی در سرعت سنکرون تعریف می شود [۲].

گشتاور pull up: در سرعت های زیر سرعت سنکرون، به گشتاوری که برای شتاب گیری ایجاد می شود، گشتاور pull up گفته می شود [۳].

گشتاور راه اندازی^۱: به گشتاور آسنکرون قفس در لحظه راه اندازی گفته می شود.

حالت گذرای راه اندازی به فرکانس و ولتاژ تغذیه، اینرسی درایو، مشخصه بار مکانیکی و موقعیت اولیه رتور بستگی دارد. اثر موقعیت اولیه رتور بر گذرای سرعت و جریان شدید گزارش شده است، به ویژه هنگامی که موتور بدون بار راه اندازی می شود [۸]. بنابراین ضروری است تا وضعیت راه اندازی در موقعیت های اولیه مختلف رتور بررسی شود. پارامترهای مهم در عملکرد راه اندازی شامل: گشتاور راه اندازی، توان ظاهری راه اندازی (که متناسب با جریان راه اندازی در ولتاژ ثابت تغذیه است) و زمان راه اندازی است. پارامترهای زیر برای ارزیابی عملکرد راه اندازی تعریف شده اند.

زمان صعود^۲: در هنگام راه اندازی مدت زمان صعود تا لحظه رسیدن موتور به سرعت نامی تعریف می شود [۶].

زمان وضعیت پایدار^۳: وضعیت پایدار لحظه ای به دست می آید که ریپل سرعت (peak to peak) کمتر از ۱ درصد سرعت نامی باشد [۶].

۳-۳- چالش های طراحی و ساخت LSSynRM

فشارهای زیاد در فرآیند ریخته گری منجر به تغییر شکل ورق های رتور می شود [۳]. کاهش فشار آلومینیوم ریخته گری برای حفظ استحکام رتور، منجر به افزایش اندازه حباب های هوا در میله های قفس می شود. این پدیده باعث افزایش مقاومت قفس شده و قابلیت سنکرونیسم را کاهش می دهد [۳].

¹ starting torque

² rising time

³ steady state time

چالش طراحی LSSynRM ایجاد مصالحه‌ای بین قابلیت راه اندازی و عملکرد در شرایط پایدار است [۵]. به طور ویژه بیان قابلیت سنکرونیزم به صورت تحلیلی دشوار است، بنابراین آنالیز المان محدود برای حل این مشکل مورد استفاده قرار می‌گیرد، هرچند که زمان محاسبات را افزایش می‌دهد.

خزیدن^۱ به عنوان یک مود عملکرد ناپایدار برای LSSynRM در نظر گرفته می‌شود که موتور در آن به سرعت سنکرون نمی‌رسد [۹]. بر اساس اینکه موتور در چه سرعتی نوسان می‌کند، میزان متفاوت ریبیل گشتاور ممکن است که ایجاد شود و لرزش شدید موتور را در پی دارد. در این شرایط، جریان‌های زیادی از سیم پیچی استاتور می‌گذرد، جریان در میله‌های قفس به سمت صفر نمی‌رود و سرعت ثابت نمی‌شود. جریان‌های زیاد در اثر خزیدن موجب افزایش تلفات مسی شده و بازدهی را کاهش می‌دهد. با داغ کردن موتور ممکن است به عایق آن آسیب برسد. علاوه بر این موارد، در هنگام خزیدن، چگالی شارهای خیلی زیاد در استاتور و رتور ایجاد شده و باعث اشباع موتور می‌شود.

چالش دیگر عدم تطابق نتایج شبیه سازی با نتایج اندازه گیری است [۱۰]. نتایج تست آزمایشگاهی در اینرسی‌های کم و بار تقریباً صفر، مواردی از عدم موفقیت سنکرونیزم مشاهده شده است که نوسانات میرا نشده سرعت را در پی دارد. این پدیده با افزایش لرزش و نویز صوتی موتور همراه است، درحالی که نتایج شبیه سازی المان محدود در بی‌باری، سنکرونیزم موفق را نشان می‌دهد [۱۰]. عدم موفقیت در سنکرونیزم در سایر مراجع نیز گزارش شده است [۹]–[۱۱].

۳-۴- روش‌های ایجاد قفس برای LSSynRM

برای ایجاد قابلیت راه اندازی، قفس القایی در رتور قرار داده می‌شود. فضای خالی سدکننده‌های شار مکان مناسبی برای قرار دادن قفس است. در صورت نیاز علاوه بر سدکننده‌های شار، از بخش‌های دیگر رتور نیز می‌توان برای ایجاد قفس استفاده کرد. در ادامه روش‌های ایجاد قفس برای LSSynRM که در مراجع استفاده شده است، مرور می‌شود.

۱-۴-۳- سدکننده‌های شار تماماً پر شده از آلومینیوم

در این روش، فرآیند ریخته‌گری روی تمام سطح رتور که سدکننده‌های شار قرار گرفته اند، صورت می‌گیرد. پل‌های رتور برای تحمل فشار ناشی از فرآیند ریخته‌گری باید تقویت شوند. مقاومت رتور در این ساختار در حداقل مقدار قرار دارد، بنابراین بیشترین قابلیت سنکرونیزم ایجاد می‌شود. به علت اینکه حجم بیشتری از آلومینیوم در مواجهه با هارمونیک‌های شار قرار می‌گیرد، تلفات اهمی رتور نسبت دیگر ساختارها قدری بیشتر خواهد بود [۱۲]. نمونه رتور LSSynRM ساخته شده توسط شرکت ABB را نشان می‌دهد که سدکننده‌های شار تماماً با آلومینیوم پر شده است.

۲-۴-۳- سدکننده‌های شار به صورت جزئی پر شده از آلومینیوم

۱-۴-۳-۲- ریخته‌گری شیارهای رتور برای ایجاد قفسه

به منظور افزایش نسبت برجستگی، شیارهای رتور به طور معمول طوری طراحی می‌شوند تا در راستای انتهای سدکننده‌های شار چند لایه قرار بگیرند. این کار باعث می‌شود تا نشت شار محور-d کاهش یابد و کاهش در اندوکتانس محور-d حداقل شود

¹ crawling

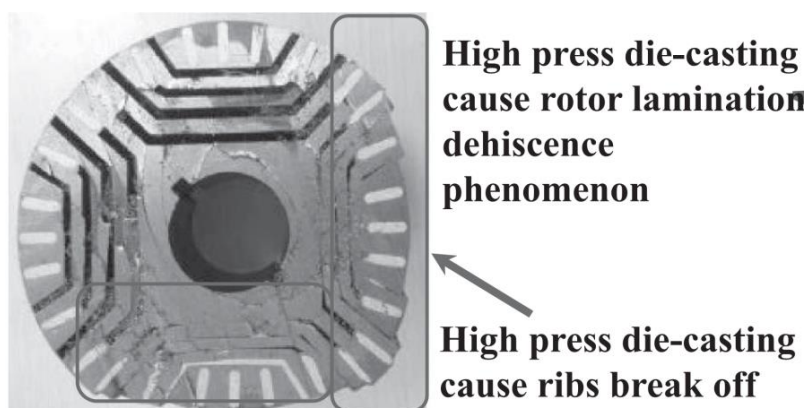
[۳]. در این ساختار پل‌های درونی به ناچار باید قرار داده شوند که منجر به شکنندگی ساختار رتور می‌شود. رتور LSSynRM را نشان می‌دهد که در اثر فشار زیاد فرآیند ریخته‌گری، درهم شکسته است.

۲-۲-۳- استفاده از میله‌های یکسان دایره‌ای شکل برای ایجاد قفس

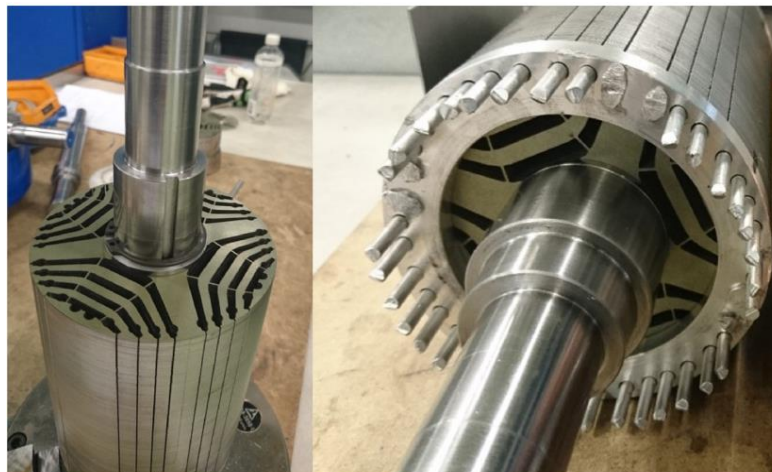
مزیت اصلی این روش حفاظت از مسیرهای شار است که منجر به کاهش تلفات آهنی هسته می‌شود، همچنین کاهش تلفات جریان گردابی در میله‌ها که ناشی از هارمونیک‌های شیار است را در پی دارد [۵] اشکال عمده کاهش قابلیت سنکرونیسم است. نمونه رتور LSSynRM با قفس میله‌ای در * نشان داده شده است.



شکل ۱-۳- طرح رتور LSSynRM کمپانی ABB [۱۳]



شکل ۲-۳- شکستن پل‌های رتور ناشی از فرآیند ریخته‌گری [۳]



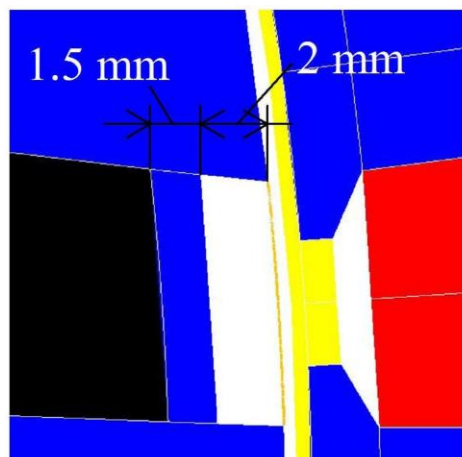
شکل ۳-۳- نمونه رتور LSSynRM با قفس میله ای آلومینیوم [۵]

۳-۵- کاهش میزان آلومینیوم رتور

با کاهش میزان آلومینیوم مصرفی در رتور، هزینه موتور کاهش خواهد یافت. تغییر توزیع آلومینیوم در سدکننده‌های شار می‌تواند به عنوان یک ابزار برای بهبود عملکرد موتور در نظر گرفته شود. اگرچه این روش به طور معمول منجر به کاهش قابلیت سنکرونیسم می‌شود، اما اگر شرایط راه اندازی بار زیاد مورد تقاضا نباشد، می‌تواند مفید واقع شود. تغییر توزیع آلومینیوم می‌تواند با تغییر مکان پل‌های مماسی به سمت مرکز رتور [۶]، اضافه کردن پل‌های دورنی [۱۴] و یا پر کردن جای خالی آلومینیوم با مواد کامپوزیتی صورت پذیرد [۶]. در ادامه روش های مذکور بررسی می‌شوند.

۳-۵-۱- تغییر مکان پل‌های مماسی به سمت مرکز رتور

در این روش همان طور که در * نشان داده شده است، پل مماسی به سمت مرکز رتور جا به جا می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که جا به جایی پل‌ها تاثیر منفی بر نسبت برجستگی و اختلاف اندوکتانس‌ها دارد. محتوای هارمونیک میدان فاصله هوایی نیز افزایش می‌یابد. نسبت به حالتی که پل‌ها در سطح رتور قرار دارند، پل‌ها بیشتر اشباع می‌شوند و به جریان‌های محور d و q بیشتری در بار نامی نیاز است. جا به جایی پل‌ها راه حل مناسبی برای طراحی قفس القایی نمی‌باشد. پل‌های مماسی که در سطح رتور قرار می‌گیرند، برای طراحی لازم هستند، زیرا باعث نرم شدن چگالی شار فاصله هوایی شده و نسبت برجستگی را نیز بهبود می‌دهند.



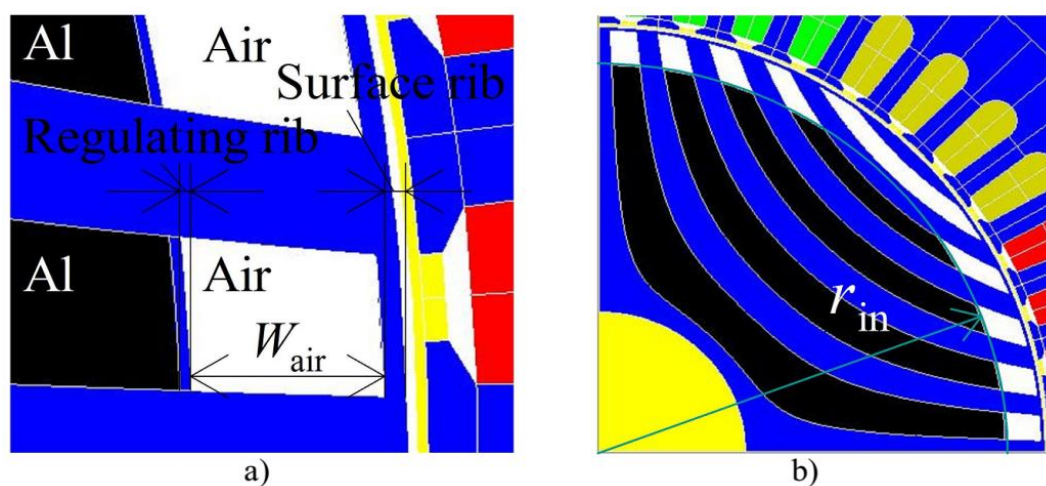
شکل ۴-۳- جا به جایی پل مماسی به سمت داخل رتور به اندازه ۲ میلی متر [۶]

۲-۵-۳- اضافه کردن پل های درون رتور

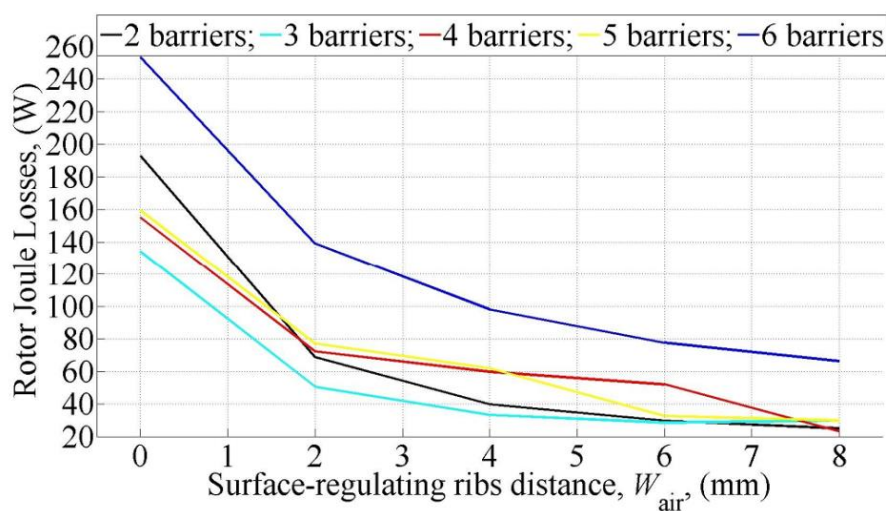
با اضافه کردن پلهایی به درون رتور می توان بخشی از حجم سدکننده های شار را خالی از آلومینیوم گذاشت. اضافه کردن پل ها با افزایش نشت شار در رتور همراه است و قابلیت سنکرونیسم را کاهش می دهد، اما همان طور که در ادامه نشان داده خواهد شد، حذف آلومینیوم در قسمت های نزدیک سطح رتور باعث بهبود بازده شده و حذف آلومینیوم از قسمت های دورنی افزایش گشتاور راه اندازی را در پی دارد.

۱-۲-۵-۳- حذف آلومینیوم از قسمت های نزدیک به سطح رتور

نتایج تحقیقات [۶]-[۱۲] نشان می دهد که تلفات اهمی رتور عمدتاً در قسمت های نزدیک به سطح رتور اتفاق می افتد، بنابراین برای طراحی LSSynRM با بازدهی بالا، کاهش آلومینیوم در این نواحی باید صورت بگیرد. برای کاهش آلومینیوم در سطح رتور، در مرجع [۶] پل مماسی را به دو قسمت تقسیم کرده است. قسمت ضخیم تر برای هموار کردن چگالی شار در سطح رتور قرار می گیرد و قسمت نازک تر برای تنظیم مقدار آلومینیوم در شعاع کوچک تری از رتور قرار می گیرد. پل ضخیم تر در سطح رتور با نام پل سطحی و پل نازک تر با نام پل تنظیم کننده در ۰ نشان داده شده است. با تغییر فاصله پل تنظیم کننده از پل سطحی یا همان W_{air} در شکل ۳-۵ می توان میزان آلومینیوم درون رتور را تغییر داد. در ۰ اثر تغییر W_{air} بر تلفات اهمی رتور به ازای رتور با سدکننده های شار مختلف نشان داده شده است.



شکل ۵-۳- کاهش آلومینیوم در سطح رتور. (a) پل سطحی و پل تنظیم کننده (b) رتور با پنج سدکننده شار و نحوه کاهش آلومینیوم [۶]



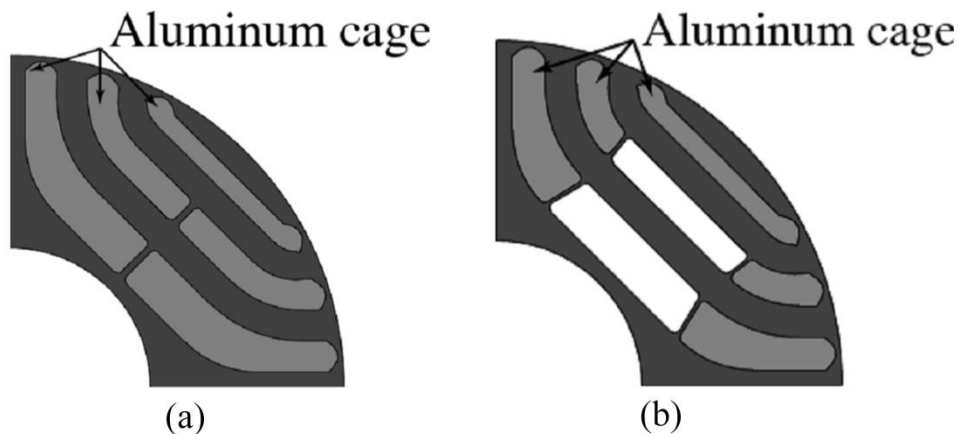
شکل ۶-۳- وابستگی تلفات اهمی رتور به فاصله پل تنظیم کننده از پل سطحی [۶]

۲-۲-۵-۳- حذف آلومینیوم از قسمت های درونی رتور

در [۱۴] مقایسه‌ای بین رتور با سدکننده‌های شار تماماً پر شده از آلومینیوم (FuF^1) که در (a) و رتور پر شده به صورت جزئی (PaF^2) که در (b) نشان داده شده است، صورت گرفته است.

¹ Fully Filled Aluminum

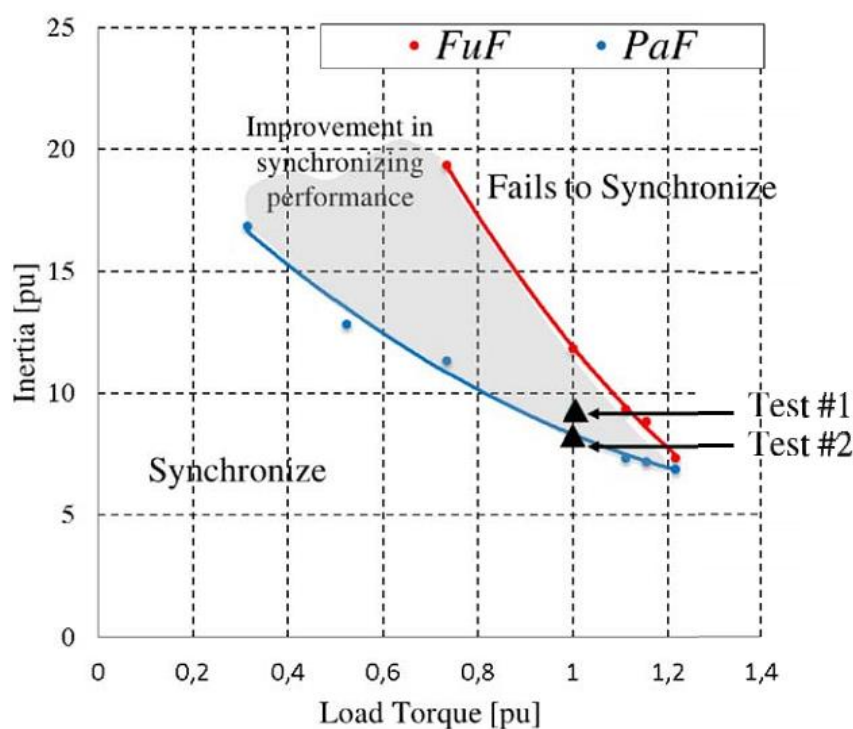
² Partially Filled Aluminum



شکل ۷-۳- (a) رتور تماماً پرشده از آلومینیوم FuF و (b) رتور پرشده از آلومینیوم به صورت جزئی PaF [۱۴]

• نتایج آزمایشگاهی مقایسه قابلیت سنکرونیسم دو موتور FuF و PaF را نشان می‌دهد. نتایج زیر از مقایسه موتورهای استخراج شده است [۱۴].

- برای رتور PaF گشتاور راه اندازی به علت افزایش مقاومت رتور، نسبت به رتور FuF بیشتر خواهد بود (مثبت ۱۵ تا ۲۰ درصد در تمامی سرعت های غیر از سنکرون)
- رتور PaF به دلیل حضور پل های بیشتر داخل رتور، گشتاور رلوکتانسی کمتر تولید می‌کند. این کاهش گشتاور بازدهی (کاهش ۲/۵ درصدی در بار نامی) و قابلیت سنکرونیسم (کاهش ۱۰ درصدی یا اینرسی در گشتاور نامی) را نسبت به FuF تخریب می‌کند.
- رتور FuF نسبت به PaF گشتاور pull in و عملکرد بهتری در سنکرونیسم دارد و دلیل آن به این بر می‌گردد که با کاهش مقاومت رتور، شیب منحنی گشتاور سرعت افزایش می‌یابد. همچنین سنکرونیسم بیشتر به گشتاور رلوکتانسی در مقایسه با گشتاور قفس وابسته است.

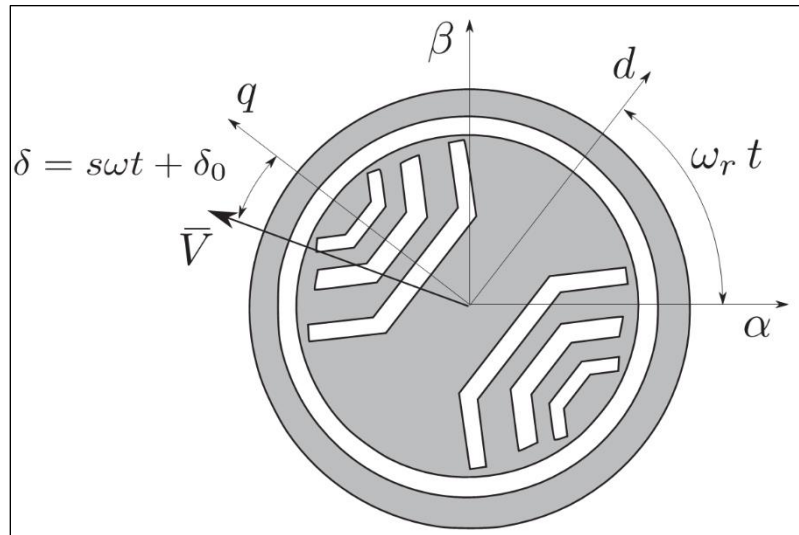


شکل ۸-۳- قابلیت سنکرون رتورهای PaF و FuF [۱۴]

۳-۶- مدل سازی LSSynRM

برای مدل سازی دینامیکی موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز باید به صورت همزمان برجستگی رتور که ناشی از ساختار موتور سنکرون رلوکتانسی است و همچنین قفس القایی اتصال کوتاه شده که ناشی از موتور القایی است را در نظر گرفت. قاب مرجع dq که به صورت سنکرون با رتور است در $\cdot$ نشان داده شده است. سرعت رتور بر حسب رادیان الکتریکی ω_r است. بردار ولتاژ نیز در $\cdot$ با فرکانس زاویه ای ω نشان داده شده است. در قاب رتور، بردار ولتاژ با سرعت می لغزد. لغزش s به صورت رابطه (۱-۱) تعریف می شود.

$$s = \frac{\omega - \omega_r}{\omega} \quad (۱-۱)$$



شکل ۹-۳- تعریف قاب مرجع استاتور، قاب مرجع سنکرون رتور و سرعت سنکرون [۱۵]

۱-۶-۳- مدل سازی دینامیکی

ولتاژ استاتور (v_s) و رتور (v_r) به ترتیب به صورت روابط (۳-۱) و (۳-۲) به دست می‌آیند. روابط (۱-۱) تا (۳-۱۷) از مرجع [۱۵] است.

$$\bar{v}_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\lambda}_s}{dt} + j\omega \bar{\lambda}_s \quad (۱-۳)$$

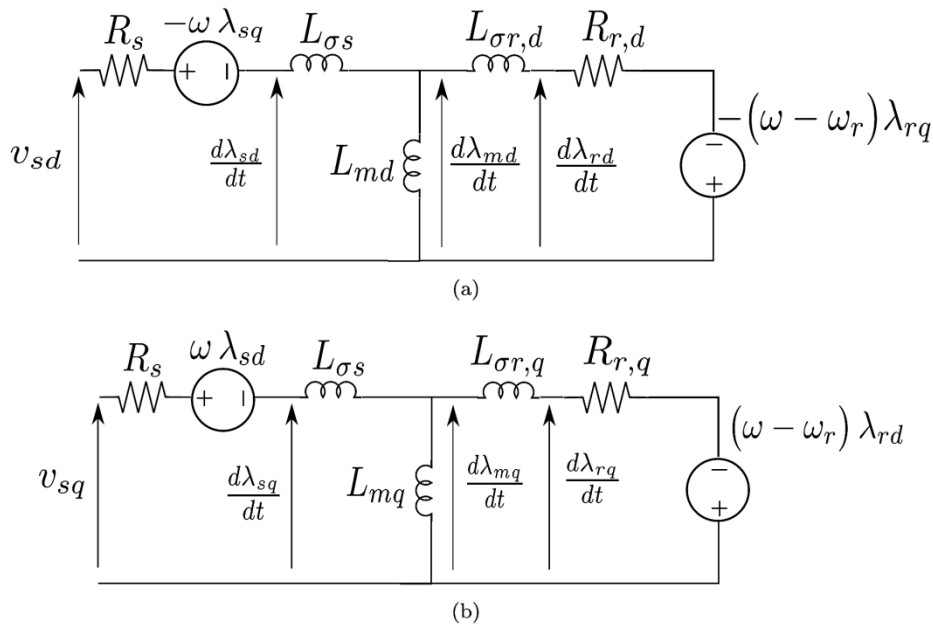
$$\bar{v}_r = \begin{bmatrix} R_{rd} & 0 \\ 0 & R_{rq} \end{bmatrix} \bar{i}_r + \frac{d\bar{\lambda}_r}{dt} = 0 \quad (۲-۳)$$

که $\bar{\lambda}$ و $\bar{i}$ بردارهای شار و جریان هستند. زیر نویس s به متغیرهای استاتور و زیر نویس r به متغیرهای رتور اشاره می‌کند. شکل ناهمسانگرد قفس رتور در پارامترهای مدل خودش را نشان می‌دهد و مقاومت‌های متفاوتی در مسیر محور d - و q دارد. مدل مغناطیسی به صورت روابط (۳-۳) تا (۳-۵) است.

$$\bar{\lambda}_s = L_{\sigma s} \bar{i}_s + \begin{bmatrix} L_{md} & 0 \\ 0 & L_{mq} \end{bmatrix} \bar{i}_m \quad (۳-۳)$$

$$\bar{\lambda}_r = \begin{bmatrix} L_{\sigma r,d} & 0 \\ 0 & L_{\sigma r,q} \end{bmatrix} \bar{i}_r + \begin{bmatrix} L_{md} & 0 \\ 0 & L_{mq} \end{bmatrix} \bar{i}_m \quad (۴-۳)$$

$$\bar{i}_m = \bar{i}_s + \bar{i}_r \quad (۵-۳)$$



شکل ۳-۱۰- مدل دینامیکی مدار معادل LSSynRM در مولفه های d و q [۱۵]

که L_{md} و L_{mq} اندوکتانس های مغناطیس کنندگی، $L_{\sigma s}$ و $L_{\sigma r}$ به ترتیب اندوکتانس های نشتی استاتور و رتور هستند. همانند مقاومت های رتور، اندوکتانس های نشتی رتور نیز در محور d- و q یکسان نیستند. به طور کلی پارامترهای مداری مرتبط با رتور، منعکس کننده ساختار ناهمسانگرد رتور هستند. گشتاور الکترومغناطیسی و معادله های مکانیکی به صورت روابط (۳-۶) و (۳-۷) تعریف می شود.

$$T_{em} = \frac{3}{2}p (\bar{\lambda}_s \times \bar{i}_s) \quad (۳-۶)$$

$$J_{tot} \frac{d\omega_r}{dt} = T_{em} - T_{load} \quad (۳-۷)$$

که J_{tot} اینرسی موتور و بار است و T_{load} گشتاور بار است.

جدول ۳-۲ آنالیز گشتاور شبه پایدار

با فرض اینکه پدیده های الکتریکی و مغناطیسی سریع تر از گذراهای مکانیکی هستند، سرعت لغزش در زمان های متفاوت می تواند ثابت در نظر گرفته شود در حالی که بردار ولتاژ به صورت پایدار به دور رتور در سرعت لغزش می چرخد. برای محاسبه وضعیت پایدار الکتریکی، از آنجا که متغیرها در شرایط پایدار سینوسی هستند و به صورت فازور در نظر گرفته می شوند، بنابراین می توان مشتقات زمانی d/dt را در روابط (۳-۱) و (۳-۲) با عملگر $j\omega$ جایگزین کرد. به دلیل انتخاب قاب مرجع رتور، سرعت زاویه ای فازورها ω است. رابطه های الکتریکی (۳-۱) و (۳-۲) به روابط (۳-۱) و (۳-۲) تبدیل می شوند.

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_d + j\omega \Lambda_{sd} - \omega_r \Lambda_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_q + j\omega \Lambda_{sq} + \omega_r \Lambda_{sd} \end{cases} \quad (۳-۱)$$

$$\begin{cases} 0 = R_r I_{rd} + j\omega \Lambda_{rd} \\ 0 = R_r I_{rq} + j\omega \Lambda_{rq} \end{cases} \quad (۳-۲)$$

که حروف بزرگ مشخص کننده فازورها هستند. فازورهای شار با نماد (Λ) مشخص شده است. رابطه گشتاور از ضرب برداری جریان‌های استاتور و مولفه‌های شار پیوندی که برحسب فازور d و q معرفی می‌شوند، به دست می‌آید. برای حذف جریان‌های رتور از روابط و نوشتن آن‌ها برحسب جریان‌های استاتور، رابطه (۳-۱) با (۳-۴) و (۳-۵) دستکاری می‌شود.

$$\begin{cases} I_{rd} = -\frac{j s \omega L_{md}}{R_{rd} + j s \omega L_{rd}} I_{sd} \\ I_{rq} = -\frac{j s \omega L_{mq}}{R_{rq} + j s \omega L_{rq}} I_{sq} \end{cases} \quad (3-3)$$

$$\begin{cases} \Lambda_{sd} = \left(L_{sd} - \frac{j s \omega L_{md}}{R_{rd} + j s \omega L_{rd}} \right) I_{sd} = Z_{pd} I_{sd} \\ \Lambda_{sq} = \left(L_{sq} - \frac{j s \omega L_{mq}}{R_{rq} + j s \omega L_{rq}} \right) I_{sq} = Z_{pq} I_{sq} \end{cases} \quad (3-4)$$

که $L_{rd} = L_{\sigma r, d} + L_{md}$ و $L_{rq} = L_{\sigma r, q} + L_{mq}$ به ترتیب اندوکتانس محور d و q رتور هستند. به طور مشابه برای استاتور $L_{sd} = L_{\sigma s, d} + L_{md}$ و $L_{sq} = L_{\sigma s, q} + L_{mq}$ به ترتیب اندوکتانس‌های محور d و q استاتور هستند. به Z_{pd} و Z_{pq} امپدانس‌های عملیاتی^۱ گفته می‌شود [۲] که دارای مقادیر مختلط بوده و تابع سرعت لغزش هستند. روابط ولتاژ و جریان استاتور به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + j s \omega Z_{pd} & -(1-s)\omega Z_{pq} \\ (1-s)\omega Z_{pd} & R_s + j s \omega Z_{pq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

$$\begin{cases} V_{sd} = -\hat{V} \sin(s\omega t + \delta_0) = j\hat{V} \\ V_{sq} = \hat{V} \cos(s\omega t + \delta_0) = \hat{V} \end{cases} \quad (3-6)$$

$$\begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} = \frac{1}{\det} \begin{bmatrix} R_s + j s \omega Z_{pq} & (1-s)\omega Z_{pq} \\ -(1-s)\omega Z_{pd} & R_s + j s \omega Z_{pd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

$$\det = R_s^2 + j s \omega R_s (Z_{pd} + Z_{pq}) + (1-2s)\omega^2 Z_{pd} Z_{pq} \quad (3-8)$$

$$\begin{cases} I_{sd} = a + jb \\ I_{sq} = c + jd \\ \Lambda_{sd} = e + jf \\ \Lambda_{sq} = g + jh \end{cases} \quad (3-9)$$

پس از جایگذاری‌ها رابطه گشتاور به صورت (۳-۱۸) به دست می‌آید.

$$T_e = T_{cage} + T_{rel} \cos(2s\omega t - \alpha) \quad (3-10)$$

¹ Operational impedances

که T_{rel} ، T_{cage} و α به ترتیب با روابط (۳-۱۱) تا (۳-۱۳) برابر هستند. منشا گشتاور T_{cage} جریان‌های قفس رتور است و به میزان آن مشابه موتور القایی وابسته به لغزش است. به T_{cage} گشتاور متوسط نیز گفته می‌شود [۹] و در هر لغزش مقدار ثابتی دارد. T_{rel} دامنه گشتاور رلوکتانسی که منشا آن ساختار برجسته رتور است. گشتاور رلوکتانسی متناوب بوده و با دو برابر فرکانس زاویه‌ای لغزش نوسان می‌کند. α زاویه فاز مولفه ضربانی گشتاور است.

$$T_{cage} = \frac{3}{4} p \operatorname{Real}(\Lambda_{sd}^* I_{sq} - \Lambda_{sq}^* I_{sd}) = \frac{3}{4} p (ce + df - ga - bh) \quad (۱۱-۳)$$

$$T_{rel} = \frac{3}{4} p \sqrt{(ce + bh - df - ga)^2 + (ed + df - gb - ah)^2} \quad (۱۲-۳)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{gb + ah - ed - cf}{ce + bh - df - ga} \right) \quad (۱۳-۳)$$

یافتن تاثیر پارامترها بر روابط کامل گشتاور موتور ساده نیست، بنابراین تحت ساده سازی هایی مانند صرف نظر از مقاومت استاتور داریم:

$$\begin{cases} \Lambda_{sd} = \frac{V}{\omega} \\ \Lambda_{sq} = -j \frac{V}{\omega} \end{cases} \quad (۱۴-۳)$$

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{V}{\omega Z_{pd}} \\ I_{sq} = -j \frac{V}{\omega Z_{pq}} \end{cases} \quad (۱۵-۳)$$

با جایگذاری روابط (۳-۱۴) و (۳-۱۵) در رابطه گشتاور رابطه (۳-۱۶) برای گشتاور قفس به دست می‌آید.

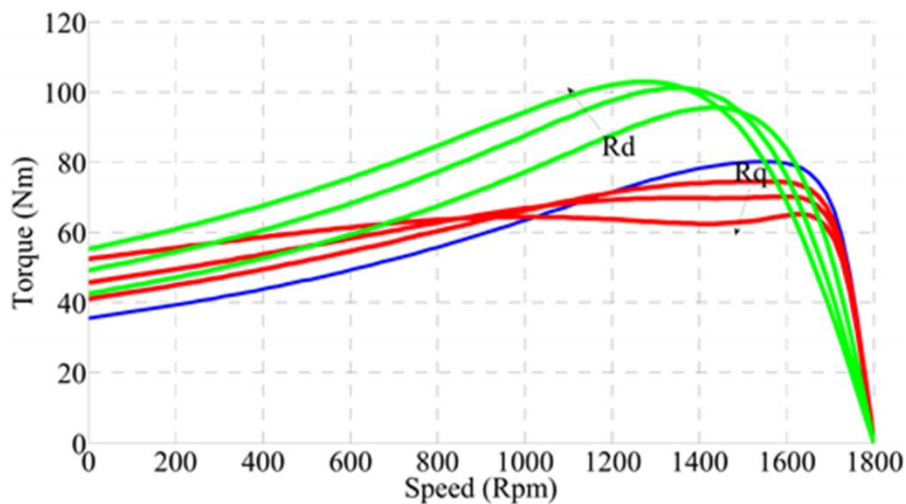
$$T_{cage} = \frac{3}{4} p \left(\frac{V^2}{\omega} \right) \left(\frac{R_{rq} L_{mq}^2}{R_{rq}^2 L_{sq}^2 + s^2 \omega^2 (L_{sq} L_{rq} - L_{mq}^2)^2} + \frac{R_{rd} L_{md}^2}{R_{rd}^2 L_{sd}^2 + s^2 \omega^2 (L_{sd} L_{rd} - L_{mq}^2)^2} \right) \quad (۱۶-۳)$$

با در نظر گرفتن شرایط نزدیک سنکرونیزم، که s به سمت صفر میل می‌کند، رابطه (۳-۱۷) به دست می‌آید.

$$T_{cage} = \frac{3}{4} p \left(\frac{V^2}{\omega} \right) \left(\frac{L_{mq}^2}{R_{rq} L_{sq}^2} + \frac{L_{md}^2}{R_{rd} L_{sd}^2} \right) \quad (۱۷-۳)$$

تاثیر مقاومت قفس ($R_{rd,q}$) در رابطه گشتاور (۳-۱۷) با نسبت های L_{mq}/L_{sq} و L_{md}/L_{sd} وزن داده می‌شود. عبارت قرمز رنگ بزرگ‌تر از عبارت مولفه q است، بنابراین کاهش مقاومت محور d اهمیت بیشتری دارد. تغییر مقاومت‌های رتور منجر به تغییر مقدار متوسط گشتاور می‌شود. همانطور که در $\bullet$ نشان داده شده است، افزایش R_{rd} منجر به افزایش گشتاور پیک و راه

اندازی می‌شود، اما افزایش R_{rq} گشتاور پیک را کاهش می‌دهد. با افزایش هر دو مقاومت R_{rq} و R_{rd} ، گشتاور پیک ثابت می‌ماند، اما به سمت سرعت‌های کمتری جابه‌جا می‌شود.



شکل ۱۱-۳- تغییرات متوسط گشتاور با R_{rd} (خطوط سبز) و R_{rq} (خطوط قرمز). (مقاومت در جهت فلش‌ها افزایش می‌یابد.) [۹]

در سه نمونه رتور LSSynRM نشان داده شده است که در آن هندسه سدکننده‌های شار و پل‌ها یکسان است و تفاوت در میزان پر شدن سدکننده‌های شار از آلومینیم است.

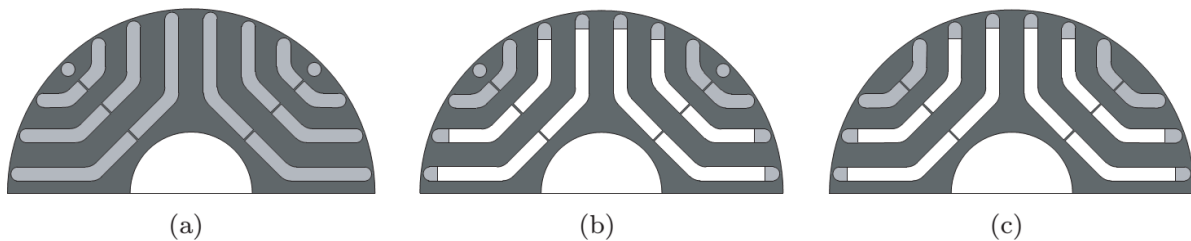


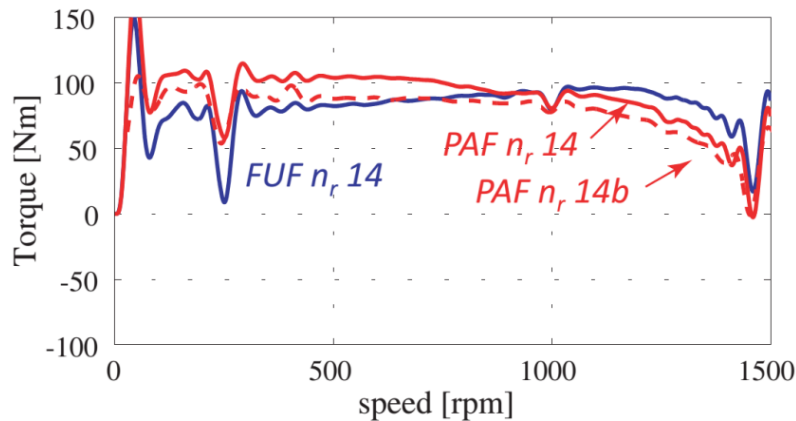
FIGURE 4.6: (a) FUF n_r 14 b) PAF n_r 14 c) PAF n_r 14b

شکل ۱۲-۳- (a) رتور FUF n_r 14، (b) رتور PAF n_r 14، و (c) رتور PAF n_r 14b [۱۵]

جدول ۱-۳- مقادیر مقاومت قفس رتور برای رتورهای شکل ۳-۱۲. [۱۵]

R_{rq}	R_{rd}	
۰/۵	۰/۲۵	رتور FUF n_r 14
۰/۶۳	۰/۷۸	رتور PAF n_r 14
۰/۴۲	۱/۱۶	رتور PAF n_r 14b

مقاومت رتورهای مختلف در ۰ آمده است. تغییر اندکی در میزان آلومینیم قفس منجر به تغییر مقاومت قفس می‌شود. ۰ گشتاور قفس را برای رتورهای مختلف نشان می‌دهد. اقدام کوچکی مانند برداشتن یک میله رتور تاثیر شدیدی بر نتایج گشتاور قفس دارد. رتوری که تماما با آلومینیم پر شده است، گشتاور بیشتری در نزدیکی سرعت سنکرون تولید می‌کند. بنابراین برای افزایش قابلیت سنکرونیزم باید تا حد امکان سدکننده‌های شار از آلومینیم پر شوند. کاهش مقاومت رتور، شیب منحنی گشتاور در نزدیکی سرعت سنکرون را افزایش داده و قابلیت سنکرونیزم را بهبود می‌بخشد.



شکل ۱۳-۳- تغییرات T_{cage} با مقدار R_{rd} [۱۵]

۲-۶-۳- مطالعه رفتار LSSynRM با آنالیز جداسازی

مطالعات بسیاری برای بررسی رفتار LSSynRM گشتاور ماشین را به دو مولفه گشتاور آسنکرون و گشتاور نوسانی دوقطبی سنکرون با استفاده از آنالیز گشتاور متوسط (آنالیز حالت شبه پایدار یا سرعت شبه ثابت) تقسیم کرده‌اند. آنالیز گشتاور متوسط، عملکرد حالت پایدار را در هر سرعت فرض می‌کند. تحت این فرض، تاثیر گذارهای الکتریکی و مکانیکی بر گشتاورهای سنکرون و آسنکرون نادیده گرفته می‌شود. از نتایج این فرض، این است که گشتاور آسنکرون در هر سرعتی ثابت در نظر گرفته می‌شود. به کمک روش جداسازی میدان^۱ می‌توان سهم قسمت‌های مختلف ماشین بر گشتاور را به دست آورد. از این روش در [۱] برای جداسازی سهم گشتاور قفس و گشتاور هسته در رتور LSSynRM استفاده شده است. با استفاده از این روش می‌توان با در نظر گرفتن اثر اشباع، جریان‌های گردابی و حرکت رتور، نیروها را بین اجزا مختلف در حوزه زمان به دست آورد. در ۰ و ۰ منحنی‌های گشتاور و سرعت یک موتور LSSynRM ۹۰ کیلووات از لحظه اتصال به شبکه تا رسیدن به پایداری که با روش جداسازی به دست آمده است، نشان داده شده است [۱].

مراحل را که LSSynRM از لحظه اتصال به شبکه تا سنکرونیزم طی می‌کند، می‌توان به چهار مرحله تقسیم کرد [۱]:

مرحله هجوم: در مرحله هجوم^۲، سرعت رتور کم است و نیروی ضد محرکه^۳ نسبتاً کمی توسط رتور تولید می‌شود. بنابراین ماشین جریان هجومی بزرگی می‌کشد و هسته آهنی تحت اشباع شدید مغناطیسی است. این حقیقت که گشتاور قفس نیز منفی

¹ Field decomposition

² Inrush

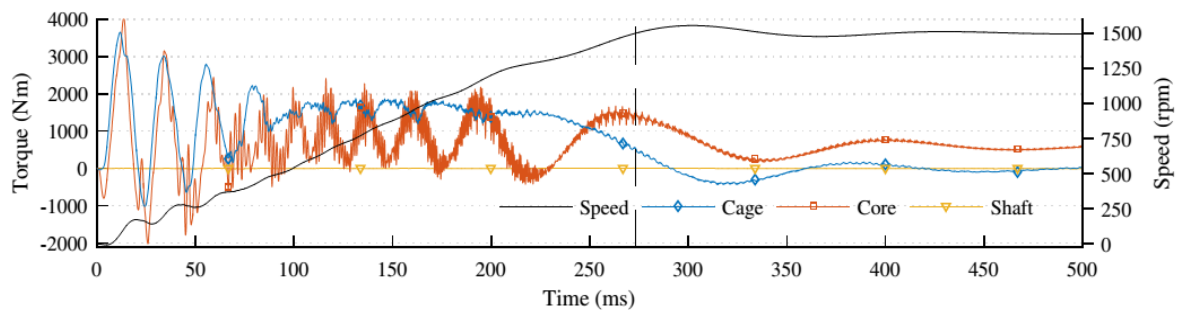
³ Back EMF

می شود قابل مشاهده است که توسط آنالیز متوسط گشتاور قابل به دست نمی آید. با کمک روش جداسازی سهم گشتاور قفس و هسته آهنی اشباع شده در گشتاور ماشین با صراحت به دست می آید.

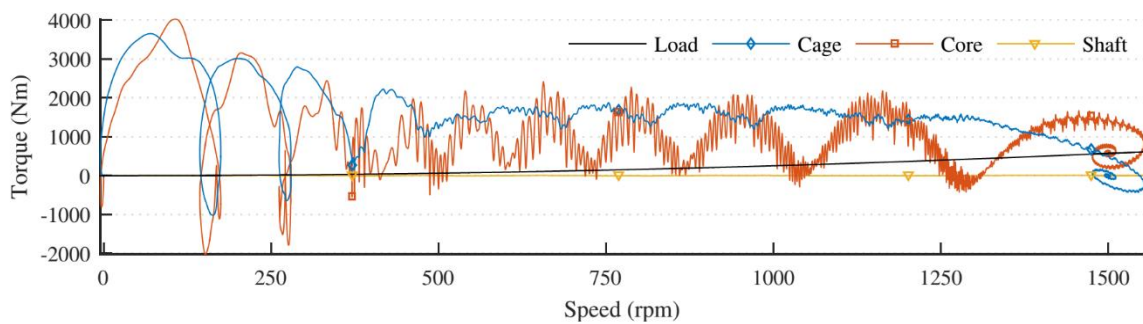
مرحله نوسان: در ۰ مرحله نوسان^۱ تقریباً در زمان ۹۰ میلی ثانیه و سرعت ۵۰۰ دور در دقیقه آغاز می شود و تا آغاز مرحله سنکرونیزم (زمان ۲۳۰ میلی ثانیه) ادامه پیدا می کند. در این مدت، گشتاور قفس تقریباً ثابت باقی می ماند. اما نوسان کمی دارد حداقل آن زمانی اتفاق می افتد که جریان قفس در راستای محور d قرار می گیرند و حداکثر آن زمانی رخ می دهد که جریان های قفس در راستای محور q است. در این مرحله گشتاور هسته تقریباً به صورت تک جهتی تغییر می کند و دلیل آن جریان های رتور است که مغناطیس کنندگی هسته را تحت تاثیر قرار می دهد.

مرحله سنکرونیزم: مرحله سنکرونیزم تقریباً در زمان ۲۳۰ میلی ثانیه و سرعت ۱۳۰۰ دور در دقیقه آغاز می شود. در این لحظه گشتاور قفس مثبت است و رتور را تا سنکرونیزم می کشاند. نکته قابل توجه این است که گشتاور قفس تا لحضاتی بعد از اینکه سرعت رتور از سرعت سنکرون فراتر می رود، بزرگتر از صفر باقی می ماند. این پدیده نیز توسط آنالیز متوسط گشتاور که گشتاور قفس را بعد از سنکرونیزم صفر در نظر می گیرد به دست نمی آید.

مرحله پایداری: بعد از این که سرعت رتور به سرعت سنکرون می رسد، قفس رتور مانند سیم پیچی میراکننده عمل می کند و با هر تغییری که سرعت را از سنکرون خارج کند، مقابله می کند. در این مرحله گشتاور هسته به گشتاور نامی می رسد.



شکل ۱۴-۳- منحنی سرعت و کل گشتاور اعمال شده استاتور بر هسته رتور، قفس و شفت. خط بریده عمودی لحظه سنکرونیزم را نشان می دهد. [۱]



شکل ۱۵-۳- منحنی گشتاور بار و گشتاور اعمال شده استاتور بر هسته رتور، قفس و شفت بر حسب تابعی از سرعت رتور [۱]

¹ Oscillation

۷-۳- کاربردهای LSSynRM

نتایج مطالعات نشان می‌دهد که قابلیت سنکرونیسم LSSynRM تنها برای بارهای با اینرسی کم و گشتاورهای بار کم در هنگام راه اندازی وجود دارد. بنابراین کاربردهای این موتور به وسایل با اینرسی کم محدود می‌شود. کاربردهایی که موتور تحت بی‌باری راه اندازی می‌شود، مانند: نوار نقاله خالی، پمپ‌های با شیر کنترل دریچه و فن با پروانه قابل تنظیم را می‌توان از کاربردهای این نوع موتور برشمرد [۵]. بارهای فن و پمپ به دلیل گشتاور راه اندازی کمی که نیاز دارند، برای LSSynRM مناسب هستند [۹].

در [۱۶] LSSynRM برای کاربرد کمپرسور استفاده شده است. به دلیل افزایش سرعت LSSynRM نسبت به موتور القایی بهبود عملکرد خنک‌کنندگی برای حالتی که از LSSynRM استفاده شده، گزارش شده است.

نتیجه گیری

در این گزارش برای بررسی عملکرد LSSynRM در فصل یک به مقایسه بین این نوع موتور و موتورهای القایی پرداخته شد. نتایج تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهد که امکان دستیابی به بازدهی بالاتر از موتورهایی در یک فریم مشابه برای LSSynRM وجود دارد؛ اما ضریب قدرت آن‌ها نسبت به موتورهای القایی کمتر است. در فصل دوم استانداردهای مربوط به طراحی و ساخت الکتروموتور مرور شد. باتوجه به نوظهور بودن LSSynRM انتظار می‌رود که استانداردهای اختصاصی برای این نوع موتورها در آینده منتشر شود. در فصل سوم روش‌های طراحی رتور LSSynRM و چالش‌های آن مرور شد. قابلیت سنکرونیزم بالا و عملکرد مناسب در شرایط پایدار دو هدف طراحی‌اند که با یکدیگر در تعارض هستند. در صورت ریخته‌گری تمام فضای سدکننده‌های شار، پل‌های رتور باید تقویت شوند تا تحمل شار ناشی از فرآیند ریخته‌گری را داشته باشند؛ این کار اگرچه بهبود قابلیت سنکرونیزم را در پی دارد اما تاثیر منفی بر گشتاور حالت پایدار دارد. استفاده از میله‌های آلومینیومی روشی دیگر برای ساخت قفس رتور است که با کاهش قابلیت سنکرونیزم همراه است اما بهبود عملکرد شرایط پایدار را در پی دارد. با توجه به قابلیت راه اندازی محدود LSSynRM کاربردهای آن‌ها نیز نسبت به موتورهای القایی محدودتر خواهد بود.

مراجع

- [1] J. Tampio, T. Käsäkangas, S. Suuriniemi, J. Kolehmainen, L. Kettunen, and J. Ikäheimo, "Analysis of direct-on-line synchronous reluctance machine start-up using a magnetic field decomposition," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 3, pp. 1852-1859, 2017.
- [2] M. Gamba, G. Pellegrino, A. Vagati, and F. Villata, "Design of a line-start synchronous reluctance motor," in *2013 International Electric Machines & Drives Conference*, 2013, pp. 648-655: IEEE.
- [3] H.-C. Liu and J. Lee, "Optimum design of an IE4 line-start synchronous reluctance motor considering manufacturing process loss effect," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 4, pp. 3104-3114, 2018.
- [4] H.-C. Liu, H.-S. Seol, J.-Y. Kim, and J. Lee, "Design and Analysis of an IE4 Class Line-Start Synchronous Reluctance Motor Considering Total Loss and Starting Performance," *Journal of Electronic Materials*, vol. 48, no. 3, pp. 1386-1394, 2019.
- [5] A. Kersten, Y. Liu, and D. Pehrman, "Rotor Design of a Line-Start Synchronous Reluctance Machine with Respect to Induction Machine for Industrial Applications," in *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2018, pp. 393-399: IEEE.
- [6] V. Abramenko, I. Petrov, J. Pyrhönen, and L. Aarniovuori, "Design Aspects of Direct-on-Line Synchronous Reluctance Motors," in *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2018, pp. 138-145: IEEE.
- [7] R. Rajabi Moghaddam, "Synchronous reluctance machine (SynRM) in variable speed drives (VSD) applications," KTH Royal Institute of Technology, 2011.
- [8] T. Marčič, "A short review of energy-efficient line-start motor design," *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 87, no. 3, pp. 119-122, 2011.
- [9] A. Negahdari and H. A. Toliyat, "Studying crawling effect in line-start synchronous reluctance motors (LS-SynRM)," in *2016 IEEE 25th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2016, pp. 210-215: IEEE.
- [10] A. Castagnini, T. Käsäkangas, J. Kolehmainen, and P. S. Termini, "Analysis of the starting transient of a synchronous reluctance motor for direct-on-line applications," in *2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 2015, pp. 121-126: IEEE.
- [11] Q. Smit, A. Sorgdrager, and R. Wang, "Design and optimisation of a line-start synchronous reluctance motor," in *Proc. 24th Southern African Universities Power Engineering Conference*, 2016.
- [12] V. Abramenko, I. Petrov, and J. Pyrhönen, "Analysis of damper winding designs for direct-on-line synchronous reluctance motor," in *IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2017, pp. 1802-1809: IEEE.
- [13] <https://new.abb.com/motors-generators/iec-low-voltage-motors/technical-publications>.
- [14] M. Gamba, E. Armando, G. Pellegrino, A. Vagati, B. Janjic, and J. Schaab, "Line-start synchronous reluctance motors: Design guidelines and testing via active inertia emulation," in *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2015, pp. 4820-4827: IEEE.
- [15] M. Gamba, G. Pellegrino, and A. Vagati, "Design of non conventional Synchronous Reluctance machine," *Politecnico di Torino*, 2017.
- [16] Y. Hu, Y. Xiao, B. Chen, and J. Shi, "Effect of Direction and Shape of Rotor Conductor Bars on Parameters of Line-Start Synchronous Reluctance Motor," in *2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2018, pp. 634-639: IEEE.

فصل ۴- طراحی الکترومغناطیسی موتور سینکرل خودراه انداز

۱-۴- مقدمه

ماشین‌های سنکرون خودراه انداز ($LSSM^1$) دارای قفس القایی برای راه‌اندازی و آهنربای دائم یا سدکننده‌های شار برای تولید گشتاور سنکرون هستند. از آنجا که موتور در سرعت سنکرون کار می‌کند، جریان‌های القایی در روتور در حالت دائمی نسبت به موتور القایی کمتر است، زیرا مولفه اصلی میدان مغناطیسی با روتور سنکرون بوده و تنها مولفه‌های هارمونیکی هستند که باعث القای جریان در روتور می‌شوند؛ بنابراین تلفات اهمی روتور به صورت قابل توجهی کاهش می‌یابد. ماشین‌های سنکرون رلوکتانسی (سینکرل^۲) خودراه‌انداز به صورت روز افزون در کاربردهای مختلف در حال جایگزینی ماشین‌های القایی هستند [۱]. اگرچه نسبت به موتورهای سنکرون مغناطیس دائم خودراه‌انداز ($LSSPM^3$) بازده و ضریب قدرت کمتری دارند، اما هزینه آن‌ها به مراتب کمتر خواهد بود.

در گزارش حاضر، روش‌های طراحی موتور سینکرل خودراه انداز که مبتنی بر پایه موتور القایی بوده و یا مبتنی بر پایه موتور سینکرل است، مرور می‌شود. مزایا و معایب هر کدام مورد بررسی قرار می‌گیرد. عملکرد حالت دائمی موتور سینکرل خودراه انداز وابسته به اندوکتانس‌های مغناطیس کننده است. اگرچه پارامترهای قفس روتور عملکرد حالت دائمی را تغییر نمی‌دهند، اما آن‌ها تعیین کننده حالت گذرا هستند. درباره تاثیر پارامترهای مختلف روتور بر طراحی موتور سینکرل خودراه انداز در وضعیت حالت دائمی بحث خواهد شد و تاثیر پارامترهای روتور بر عملکرد موتور در هنگام راه‌اندازی مورد بررسی قرار می‌گیرد. روش‌های موجود در مراجع برای محاسبه این پارامترها مرور می‌شود. در فصل دوم آنالیز عملکرد موتور در حالت دائمی و گذرا به صورت جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد و روش‌هایی که در مراجع برای مدل‌سازی این موتورها ارائه شده است، بررسی می‌شود. فصل سوم به آنالیز حرارتی این موتورها می‌پردازد، در فصل چهارم الگوریتم طراحی برای موتور سینکرل خودراه انداز بر اساس آخرین مراجع مرتبط در این زمینه، ارائه خواهد شد.

۲-۴- روش‌های طراحی الکترومغناطیسی موتور سینکرل خودراه انداز

طراحی‌های اولیه روتور موتور سینکرل خودراه انداز شامل یک روتور موتور القایی می‌شود که سدکننده‌های شار به آن اضافه شده‌اند [۱]؛ بنابراین مشخصه راه‌اندازی مناسبی داشته و قابلیت سنکرونیزم برای آن‌ها بوجود می‌آید، اما بازده موتورها نسبت به نمونه القایی قابل رقابت نبود. اما امروزه طراحی موتور سینکرل خودراه انداز با طراحی روتور سینکرل برای دستیابی به حداکثر بازده در شرایط حالت دائمی آغاز می‌شود، سپس قفس القایی یا با پر کردن تمامی یا بخشی از فضای سدکننده‌های شار قرار داده می‌شود. به طور کلی دو نوع طراحی موتور سینکرل خودراه انداز را می‌توان به صورت زیر تقسیم بندی کرد:

۱-۲-۴- طراحی بر اساس موتور القایی پایه

در این روش ابتدا روتور موتور القایی برای دستیابی به مشخصه راه‌اندازی مورد نظر طراحی می‌شود، سپس در فضای باقی مانده روتور، سدکننده‌های شار قرار داده می‌شوند تا گشتاور رلوکتانسی سنکرون برای کار در حالت دائمی ایجاد شود. این گونه

¹ Line Start Synchronous Machine/Motor

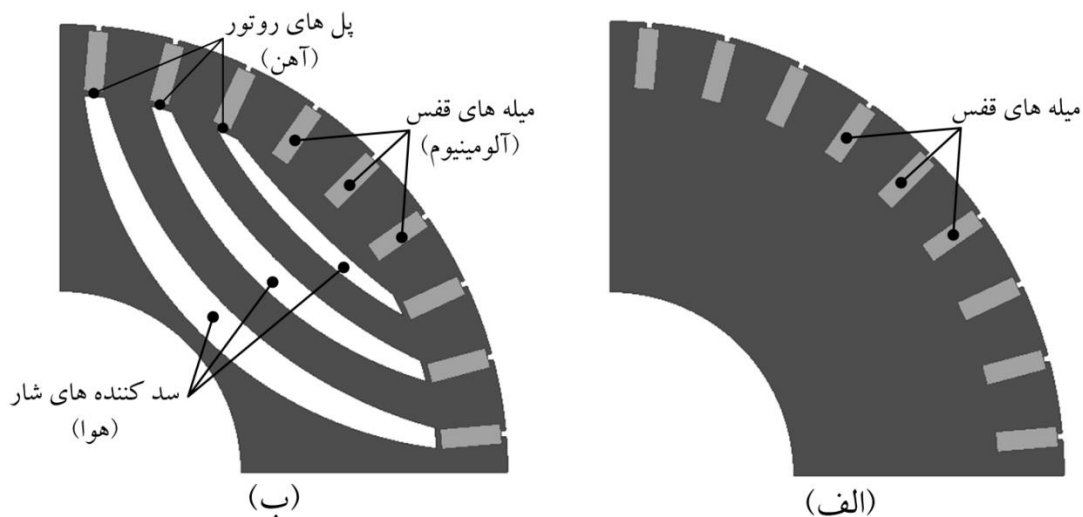
² Synchronous Reluctance (SynchRel)

³ Line Start Synchronous Permanent Magnet

طراحی روتور در ۰ نشان داده شده است. ۰ (الف) روتور القایی پایه را نشان می‌دهد و ۰ (ب) روتور موتور سینکرونل خودراه انداز را نشان می‌دهد که سدکننده‌های شار به آن اضافه شده است.

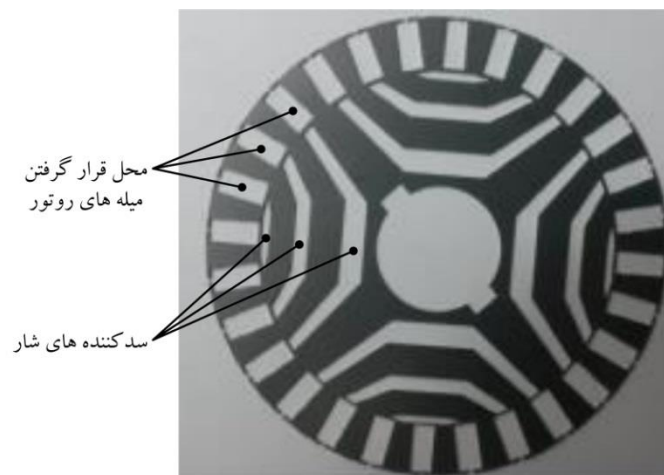
اشکال عمده این روش در این است که دندانه‌های روتور محدودیت‌های از پیش تعیین شده‌ای را برای طراحی روتور رلوکتانسی ایجاد می‌کنند. سدکننده‌های شار به طور معمول در امتداد دندانه‌های روتور قرار داده می‌شوند تا شار محور d کاهش نیابد. در صورتی که قفس روتور ریخته گری شود، پل‌های روتور که بین دندانه و سدکننده‌های شار قرار می‌گیرند، باید استحکام کافی را داشته باشند تا فشارهای زیاد ناشی از فرآیند ریخته گری باعث شکستن یا تغییر شکل روتور نشود [۲]. از طرفی افزایش ضخامت پل‌ها با افزایش نشت شار محور q همراه است؛ بنابراین عملکرد حالت دائمی را خراب می‌کند.

این روش طراحی پایه اکثر طراحی موتورهای خودراه انداز مغناطیس دائم را شامل می‌شود [۳، ۴]. در [۵، ۶] از این روش برای طراحی موتور سینکرونل خودراه انداز استفاده شده است. در مورد موتورهای خودراه انداز مغناطیس دائم، به دلیل حضور مغناطیس دائم، بازدهی نسبت به نمونه القایی افزایش می‌یابد. اما بازدهی موتور سینکرونل خودراه انداز که با این روش طراحی شده است، نسبت به موتور القایی قابل مقایسه نیست، زیرا حالت بهینه روتور برای کار در حالت دائمی سنکرون به دست نیامده است.



شکل ۱-۴- (الف) روتور القایی پایه، (ب) روتور سینکرونل خودراه انداز بر اساس موتور القایی پایه

نمونه ورق روتور موتور سینکرونل خودراه انداز که با این روش ساخته شده است در ۰ نشان داده شده است. میله‌های روتور به شکل مربع بوده و در نزدیکی سطح روتور قرار گرفته‌اند. سدکننده‌های شار سه لایه در راستای محل قرار گرفتن میله‌های روتور تعبیه شده است.

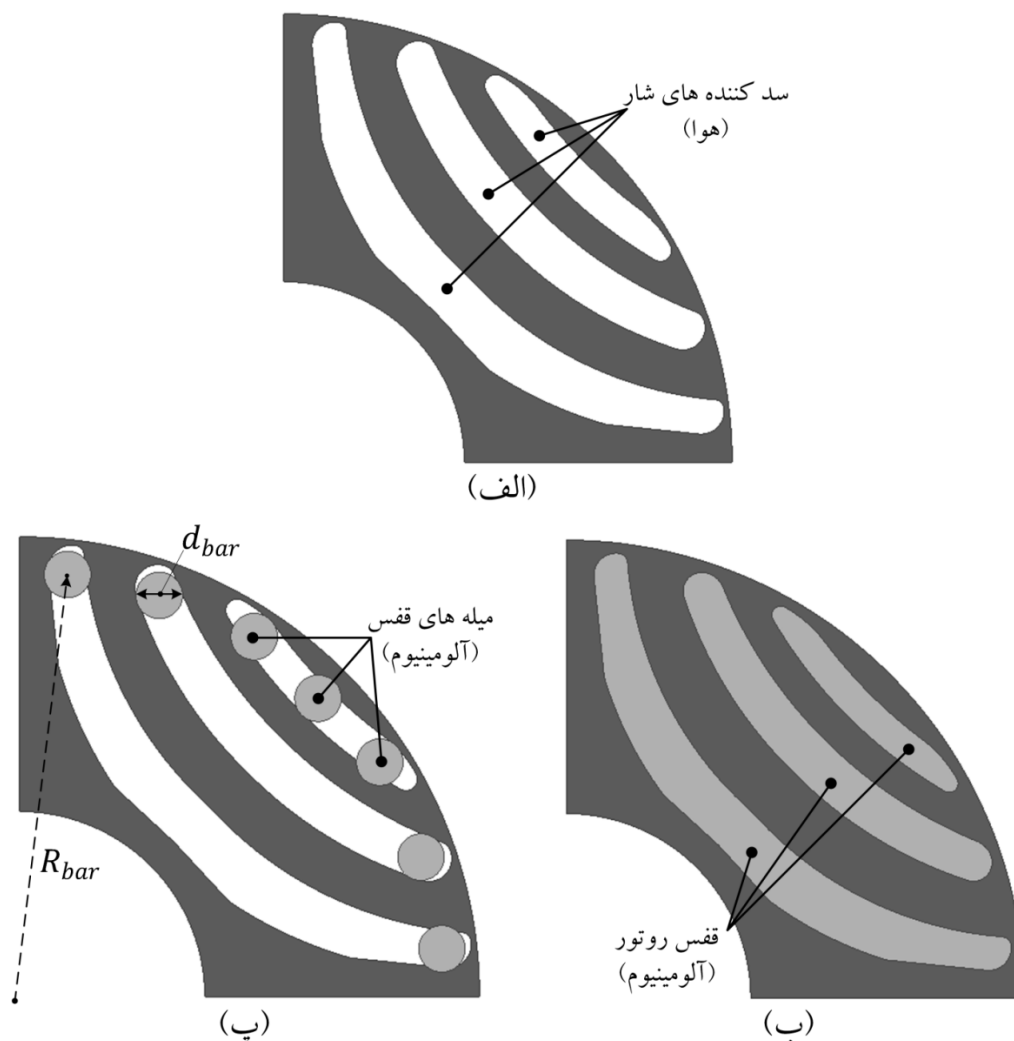


شکل ۲-۴- روتور سینکریل خودراه انداز بر اساس موتور القایی پایه [۶]

۲-۲-۴- طراحی بر اساس موتور سینکریل پایه

در این روش ابتدا موتور سینکریل با در نظر گرفتن وضعیت حالت دائمی طراحی می‌شود و سپس قفس القایی برای روتور تعبیه می‌شود. از آنجا که جریان‌های درون قفس در حالت دائمی نزدیک به صفر هستند، موتور سینکریل خودراه انداز در حالت دائمی همانند موتور سینکریل عمل می‌کند؛ بنابراین تمامی روش‌هایی که برای بهینه‌سازی عملکرد سینکریل به کار می‌رود را می‌توان برای بهینه‌سازی موتور سینکریل خودراه انداز در حالت دائمی به کار برد.

در صورتی که طراحی با روتور سینکریل آغاز شود، دیگر محدودیتی ناشی از قفس القایی در تولید گشتاور سنکرون وجود نخواهد داشت؛ بنابراین حداکثر نسبت برجستگی (بازدهی) در حالت دائمی به دست می‌آید. اگرچه در راه‌اندازی سینکریل با درایو الکترونیکی، مشکلی وجود ندارد؛ اما راه‌اندازی موتور سینکریل خودراه انداز بسیار حائز اهمیت است؛ زیرا در این نوع طراحی که بر پایه سینکریل است، این بار روتور رلوکتانسی است که محدودیت‌هایی را برای مکان قرار گرفتن قفس اعمال می‌کند. برای جلوگیری از کاهش شار محور d، میله‌های قفس نباید در مسیر شارش آن قرار داده شوند؛ بنابراین قرار دادن میله‌های قفس درون سدکننده‌های شار امری اجتناب ناپذیر است. * دو نوع روتور موتور سینکریل خودراه انداز را نشان می‌دهد که بر اساس پایه سینکریل طراحی شده‌اند. * (الف) روتور سینکریل پایه با سه سدکننده شار را نشان می‌دهد. در روتور * (ب) تمامی فضای سدکننده‌های شار با آلومینیوم پر شده است و در روتور * (پ) از

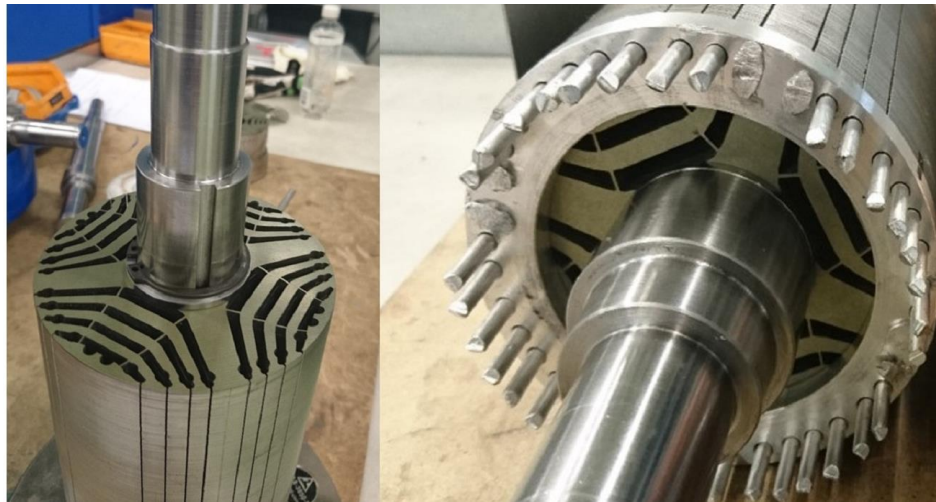


شکل ۳-۴- (الف) سینکریل پایه، (ب) موتور سینکریل خودراه انداز با سدکننده های شار پُر شده از آلومینیوم، (پ) موتور سینکریل خودراه انداز با قفس میله ای

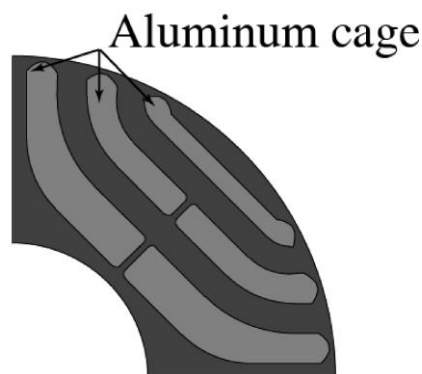
میله های آلومینیومی برای قفس استفاده شده است که برای محافظت از مسیر شار محوری d ، تا حد امکان درون سدکننده های شار قرار داده شده اند. در روتور $\bullet$ (ب) ضخامت پل های مماسی افزایش داده می شود؛ زیرا آن ها باید تحمل فشار زیاد ناشی از فرآیند ریخته گری را داشته باشند در صورتی که روتور پایه که برای کاربرد درایو طراحی می شود، پل ها تنها باید تحمل نیروی گریز از مرکز و الکترومغناطیسی را داشته باشند. اما در روتور شکل ۱-۳ (پ) که از میله های از قبل تهیه شده برای قفس استفاده می شود، میله های آلومینیومی از طریق فرآیند لحیم کاری یا جوشکاری به حلقه های انتهایی متصل می شوند. در این نوع روتور، پل های مماسی نازک تر هستند و بنابراین موتور عملکرد سنکرون بهتری دارد.

در روتور $\bullet$ (ب) چونکه از حجم بیشتری از آلومینیوم برای ساخت قفس استفاده می شود، بنابراین مقاومت روتور کاهش یافته و قابلیت سنکرونیسم افزایش می یابد. در صورتی که موتور با قفس تماماً پر شده از آلومینیوم، توانایی راه اندازی موفق را نداشته باشد، دو راه وجود خواهد داشت؛ یکی این که از یک طرح رلوکتانسی بهینه دیگر استفاده شود و دوم تغییر توزیع آلومینیوم درون سدکننده های شار است. در روتور $\bullet$ (پ)، فاصله میله ها از مرکز روتور (R_{bar}) و قطر آن ها (d_{bar}) پارامترهایی هستند که می توان با آن ها مشخصه راه اندازی را کنترل کرد. نمونه روتورهای سینکریل که بر اساس پایه سینکریل ساخته شده اند. در $\bullet$

• نشان داده شده است. درباره نحوه توزیع آلومینیوم درون قفس و تاثیر آن بر مشخصه راه اندازی در بخش ۱-۴ توضیح داده شده است.



شکل ۴-۴- روتور موتور سینکرون خودراه انداز با پایه سینکرون و قفس میله‌ای [۷]



شکل ۴-۵- روتور موتور سینکرون خودراه انداز با پایه سینکرون و سدکننده‌های شار پرشده از آلومینیوم [۸]

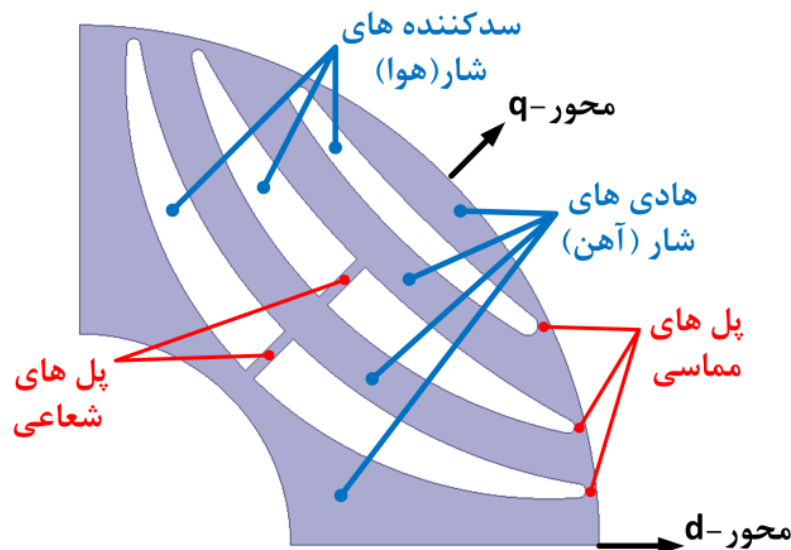
۴-۳- طراحی موتور سینکرون

اساس عملکرد سینکرون همانطور که از نام آن پیداست بر مبنای تغییرات رلوکتانس قرار دارد. در یک قطب روتور موتور سینکرون که دارای سه سدکننده شار^۱ است، نشان داده شده است. محور d در مسیر با مقاومت مغناطیسی کمتر را نشان می‌دهد. هادی‌های شار مغناطیسی^۲ که از جنس آهن هستند به گونه‌ای قرار می‌گیرند، تا شار محور d عبور کند و اندوکتانس محور d بیشترین مقدار را داشته باشد. سدکننده‌های شار که از جنس هوا هستند با ایجاد مسیر با مقاومت مغناطیسی زیاد در

¹ Flux Barriers, Cavities

² Flux Carriers, Flux Guides, Islands, Segments

محور-q باعث کاهش اندوکتانس محور-q می‌شوند. پل‌های مماسی^۱ و شعاعی^۲ برای نگهداری قطعات روتور و تامین استحکام مکانیکی در سرعت‌های بالا لازم هستند. پارامترهای مهم در طراحی روتور سینکریل شامل: شکل، تعداد و ابعاد سدکننده‌های شار است [۹، ۱۰].



شکل ۶-۴- یک قطب موتور سینکریل

بهینه‌سازی طراحی موتور سینکریل دشوار است، زیرا ترکیب‌های مختلفی از شکل، تعداد و ابعاد سدکننده‌های شار برای روتور امکان‌پذیر است؛ همچنین حداکثر گشتاور تابعی از زاویه جریان است که آن هم خود تابعی از پارامترهای طراحی موتور است [۱۰، ۱۱].^۳ نتایج تغییر زاویه جریان (زاویه بین بردار جریان و محور-d) بر گشتاور یک موتور سینکریل به ازای جریان‌های مختلف که با آنالیز المان محدود به دست آمده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با افزایش جریان، به دلیل افزایش سطح اشباع در موتور، زاویه‌ای که در آن حداکثر گشتاور اتفاق می‌افتد، افزایش می‌یابد (به جریان محور-d بیشتری برای مغناطیس‌کنندگی ماشین نیاز است). روش‌های متفاوتی در مراجع برای مقابله با این مشکل ارائه شده است:

□ برخی از مراجع [۱۲] جستجوی بیشتر برای هر طراحی منتخب برای تعیین زاویه جریان $MTPA^3$ پیشنهاد

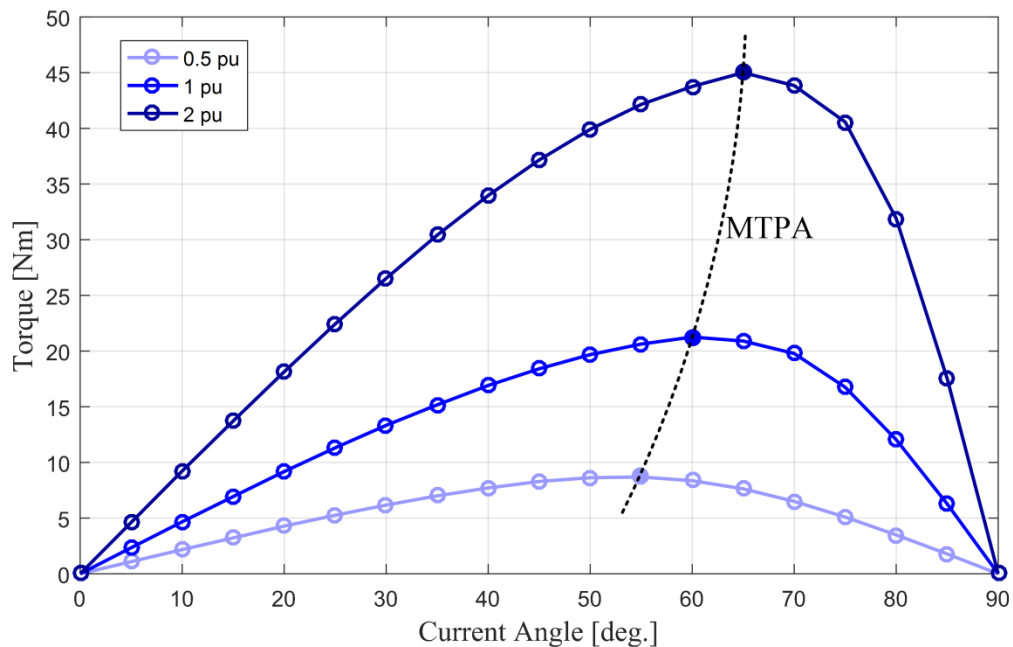
کرده‌اند.

□ سایر مراجع [۱۳] زاویه جریان را جز پارامترهایی قرار داده‌اند که در بهینه‌سازی باید تعیین شود.

¹ Tangential Ribs, Bridges

² Radial Ribs, Center post

³ Maximum Torque Per Ampere



شکل ۷-۴-متوسط گشتاور به ازای تغییر زاویه جریان (نامی، نصف نامی و دو برابر نامی)

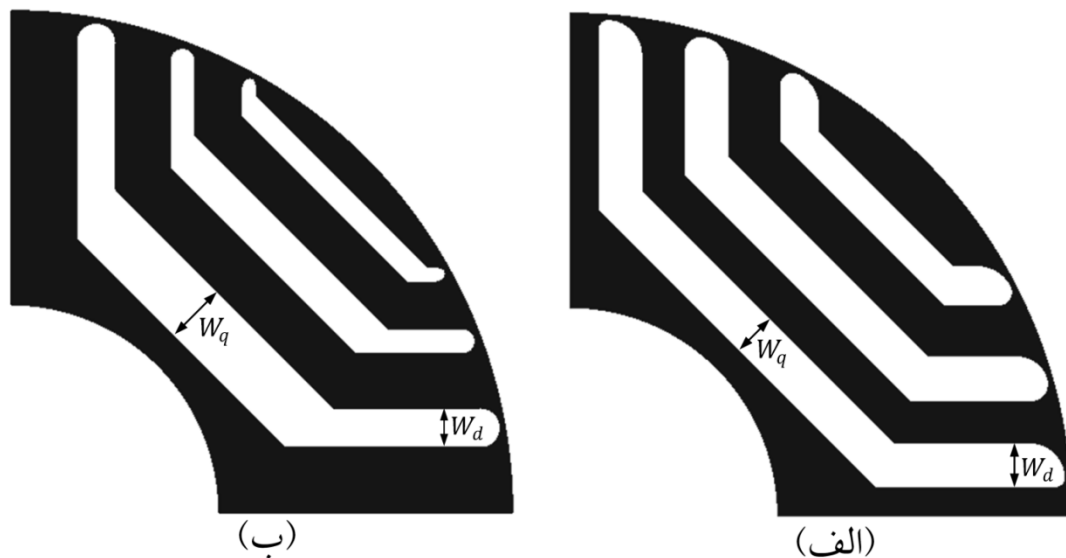
۱-۳-۴- شکل سدکننده های شار

در مراجع از شکل های مختلفی برای سدکننده های شار استفاده شده است [۱۳-۱۷]. در یک تقسیم بندی ساده می توان این شکل ها را به دو دسته شکل های با خطوط مستقیم و منحنی تقسیم کرد. اگرچه سدکننده های شار به شکل سیال نیز می توان در دسته منحنی قرار داد، اما به دلیل اهمیتی که این نوع شکل اخیرا برای طراحی موتور سینکرونل پیدا کرده است، بخش جداگانه ای به آن ها اختصاص داده خواهد شد. در ادامه مزایا و معایب هر یک از این طرح ها برای روتور موتور سینکرونل ذکر خواهد شد.

۱-۳-۴-۱- سدکننده های شار با خطوط مستقیم

در شکل ۸-۱ از خطوط مستقیم برای کشیدن سدکننده های شار روتور استفاده شده است و به آن ها روتور ذورنقه ای، مستطیلی و ترکیب تکه ای^۱ نیز گفته می شود. مزیت این شکل هندسی در این است که اضافه کردن آهنرباهای دائم مستطیل شکل، درون سدکننده های شار به راحتی امکان پذیر است. در روتور شکل ۸-۱ (الف) با حرکت در جهت محور d ضخامت سدکننده های شار ثابت است، اما در روتور شکل ۸-۱ (ب) ضخامت سدکننده های شار در نزدیکی سطح روتور نسبت به مرکز روتور کمتر است و درجه آزادی بیشتری برای تغییر شکل آن وجود دارد. نمونه روتور که سدکننده های شار آن با خطوط مستقیم کشیده شده است در مراجع [۱۸] و [۱۹] موجود است.

¹ Segment Shape



شکل ۸-۴- سدکننده‌های شار با خطوط مستقیم. (الف) ضخامت ثابت ($W_q = W_d$)، (ب) ضخامت متغیر ($W_q > W_d$)

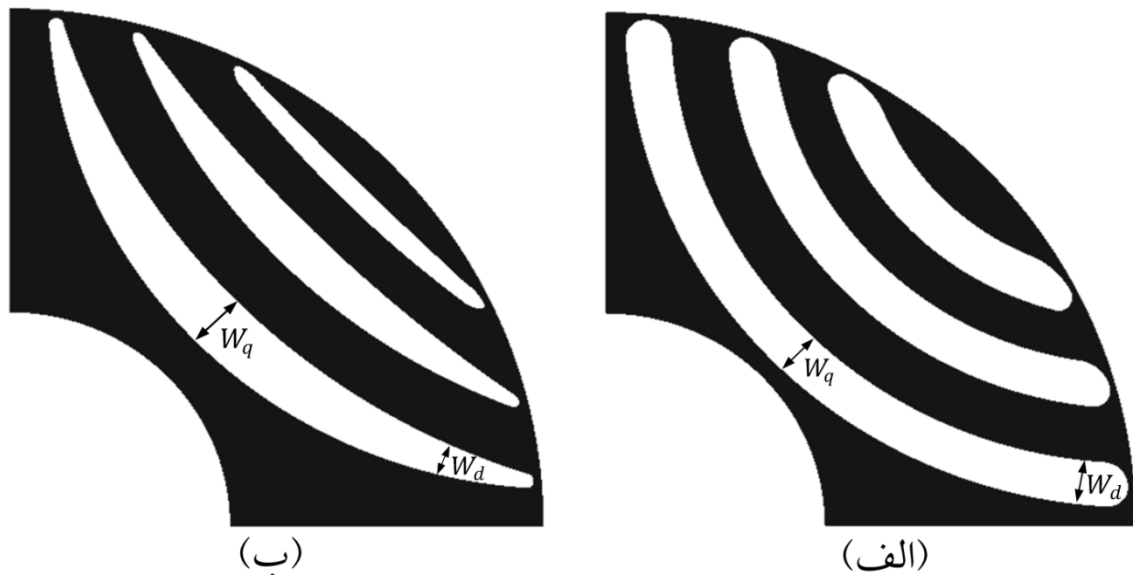
۲-۱-۳-۴- سدکننده‌های شار منحنی شکل

• هندسه سدکننده‌های شار دایره‌ای شکل را نشان می‌دهد. در روتور ۰ (الف) مرکز دایره‌هایی که برای رسم سدکننده‌های شار استفاده شده است، یکسان است؛ بنابراین ضخامت هر سدکننده و هادی شار در راستای محور d تغییر نمی‌کند ($W_q = W_d$). نمونه این نوع روتور در [۲۰، ۲۱] استفاده شده است. مزیت این نوع هندسه برای روتور در این است که به دلیل ثابت بودن ضخامت سدکننده‌های شار، تعداد متغیرهایی که برای مشخص کردن هندسه هر سدکننده شار به کار می‌رود، کم است. کاهش تعداد متغیرها باعث تسریع در فرآیند بهینه‌سازی زمان بر می‌شود. در روتور ۰ (ب) سدکننده‌های شار به شکل کمان^۱ هستند و مشابه حالت (الف) از دایره برای رسم آن‌ها استفاده شده است، با این تفاوت که مرکز دایره‌ها برای هر سدکننده‌های شار می‌تواند متفاوت باشد؛ بنابراین درجه‌های آزادی برای هر سدکننده شار افزایش می‌یابد. از این نوع روتور در مراجع [۱۶، ۲۲، ۲۳] استفاده شده است.

علاوه بر دایره، از دیگر منحنی‌ها نیز برای ترسیم سدکننده‌های شار استفاده شده است؛ به عنوان مثال در [۲۴] از معادله چند جمله‌ای درجه دو برای کشیدن سدکننده‌های شار استفاده شده است. در [۲۵] برای ایجاد درجه آزادی بیشتر در رسم سدکننده‌های شار از ترکیب خطوط مستقیم و چندجمله‌ای درجه دو استفاده شده است. در [۱۷] از توابع هذلولی برای رسم سدکننده‌های شار بهره گرفته است.

در [۲۶] مقایسه‌ای بین روتور با سدکننده‌های شار به شکل خطوط مستقیم و کمانی شکل انجام شده است که در هر دو حالت از چهار متغیر برای تعریف هندسه هر سدکننده‌های شار استفاده شده است و ضخامت هر سدکننده شار می‌تواند از سمت محور d تا q تغییر کند ($W_q \neq W_d$). نتایج حاکی از آن است که روتور با سدکننده‌های شار کمانی شکل نسبت به روتور با شکل خطوط مستقیم توانایی دستیابی به متوسط گشتاور بیش‌تری دارد.

^۱ Arc-shaped



شکل ۹-۴- سدکننده‌های شار دایره‌ای. (الف) ضخامت ثابت ($W_q = W_d$)، (ب) ضخامت متغیر ($W_q > W_d$).

۳-۱-۳-۴- سدکننده‌های شار سیال گونه

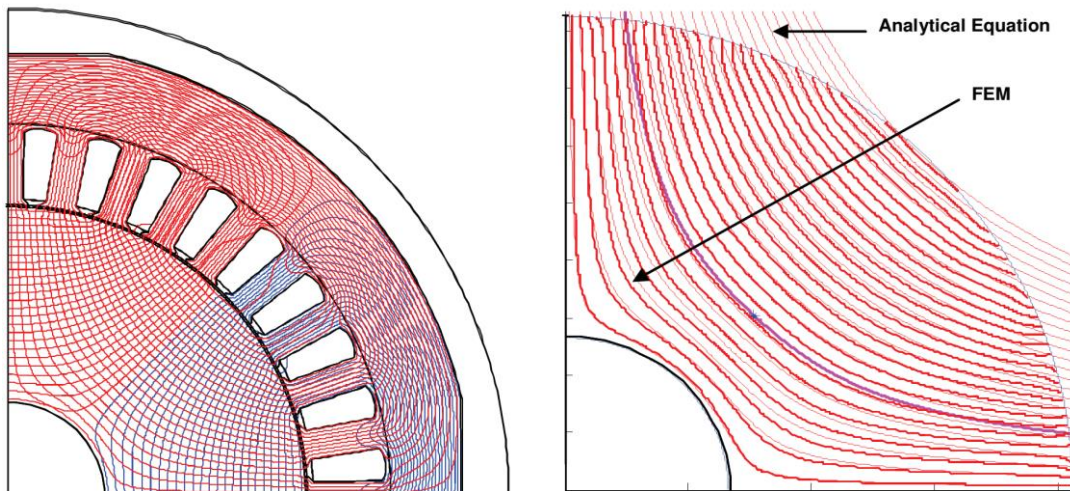
• هندسه روتور با سه سدکننده‌های شار سیال گونه^۱ را نشان می‌دهد. (سمت چپ) خطوط شار محور d و q در روتور توپر را نشان می‌دهد. با صرف نظر از اثر تزویج متقابل محور d و q خطوط شار آن‌ها بر هم عمود است. برای افزایش اندوکتانس محور d باید تا حد امکان مانعی برای مسیر شار محور d از داخل روتور ایجاد نشود، بنابراین سدکننده‌های شار باید منطبق بر خطوط شار محور d باشند (در این شرایط بر محور q عمودند) تا بیشترین ممانعت را برای شار عبوری از محور q ایجاد کنند و اندوکتانس این محور را تا حد امکان کاهش دهند. منحنی‌های مختلفی که برای ترسیم سدکننده‌های شار در مراجع مختلف به کار رفته‌اند [۲۳-۲۷]، همگی تلاش می‌کنند تا خطوط شار در روتور را تقریب بزنند. خوشبختانه منحنی خطوط شار در روتور توپر توسط معادله ریاضی تحلیلی و صریح قابل دستیابی است. روابط به فرم بسته^۲ خطوط شار، توسط نظریه نگاشت هم‌مدیسی و معادله پتانسیل ژوکوفسکی به دست می‌آید [۲۸]. (سمت راست) خطوط شار محور d در روتور توپر را نشان می‌دهد که با معادله ژوکوفسکی به دست آمده و با نتایج روش المان محدود مقایسه شده است.

¹ Fluid shape

² Closed form

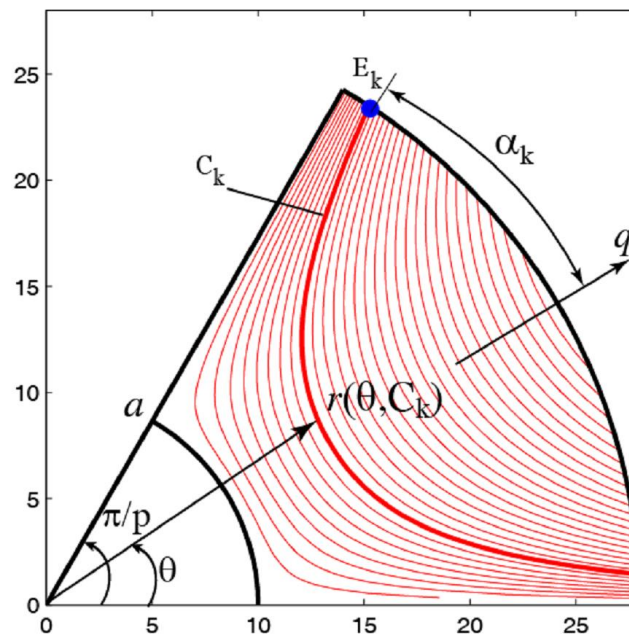


شکل ۱۰-۴- سدکننده‌های شار سیال گونه



شکل ۱۱-۴- (سمت چپ) خطوط شار همزمان محور d و q در روتور توپر با محور غیر مغناطیسی. (سمت راست) مقایسه خطوط شار با روش المان محدود و روش تحلیلی [۲۸]

در تناظری مشابه می‌توان خطوط شار در روتور توپر را مشابه خطوط دارای سرعت یکسان در یک جریان سیال در نظر گرفت. همان‌طور که در دینامیک سیالات بهترین راه برای مسدود کردن جریان سیال، انتخاب سدی عمود بر مسیر جریان است؛ بهترین راه برای کاهش شار محور q در روتور، انتخاب سدکننده‌های شار عمود بر این خطوط است [۲۸]. معادله‌ای که خطوط پتانسیل مغناطیسی در روتور توپر را به دست می‌دهد به صورت (۱-۱) است [۲۸، ۲۹]. که r و θ مختصات قطبی نقاط صفحه هستند، r شعاع و θ زاویه نسبت به محور افقی است. p تعداد زوج قطب ماشین، a شعاع محور است. ثابت C تعیین می‌کند که کدامین خط میدان در نظر گرفته شده است. مقادیر کوچک‌تر C متناظر با خطوط نزدیک‌تر به شفت هستند. برای ترسیم هر خط شار به صورت پیوسته کافی است تا مختصات یک نقطه از آن معلوم باشد؛ با مشخص شدن ثابت C متناظر با آن خط، مختصات سایر نقاط به دست می‌آید.



شکل ۱۲-۴- میدان در روتور توپیر با نظریه نگاشت همدیس [۲۹]

$$C = \sin(p\theta) \frac{\left(\frac{r}{a}\right)^{2p} - 1}{\left(\frac{r}{a}\right)^{2p}} \quad (۱-۴)$$

به عنوان مثال، برای رسم خط شاری که فاصله هوایی را در زاویه α_k قطع می‌کند و در * نشان داده شده است، با جایگذاری نقطه $E_k(r_k, \theta_k)$ در رابطه (۴-۱)، ثابت C متناظر با آن نقطه (C_k) به دست می‌آید. وقتی که C_k به دست آمد، رابطه تحلیلی خط شار در مختصات قطبی با رابطه (۴-۲) مشخص می‌شود.

$$r(\theta, C) = a \sqrt[p]{\frac{C + \sqrt{C^2 + 4 \sin^2(p\vartheta)}}{2 \sin(p\vartheta)}} \quad 0 \leq \vartheta \leq \frac{\pi}{p} \quad (۲-۴)$$

از طرح سدکننده‌های شار سیال گونه برای روتور سینکریل در دیگر مراجع نیز استفاده شده است [۳۰-۳۲]. در مطالعات صورت گرفته، نتایج شبیه سازی [۳۲] و عملی [۳۱] مقایسه‌ی بین روتور طراحی شده با سدکننده‌های شار با الگوی خط شار^۱ (همچنین طراحی مسیر میدان^۲ گفته می‌شود) و روتور با سدکننده‌های شار با خطوط مستقیم، نشان می‌دهد که استفاده از الگوی خط شار برای هندسه سدکننده‌های شار نتایج بهتری از نظر متوسط گشتاور به دست می‌آید. همچنین در مقایسه با سدکننده‌های شار دایره‌ای شکل، روتور با سدکننده‌های شار ژوکوفسکی^۳ نتایج بهتری از نظر متوسط گشتاور گزارش شده است [۳۳].

¹ Flux Line Pattern

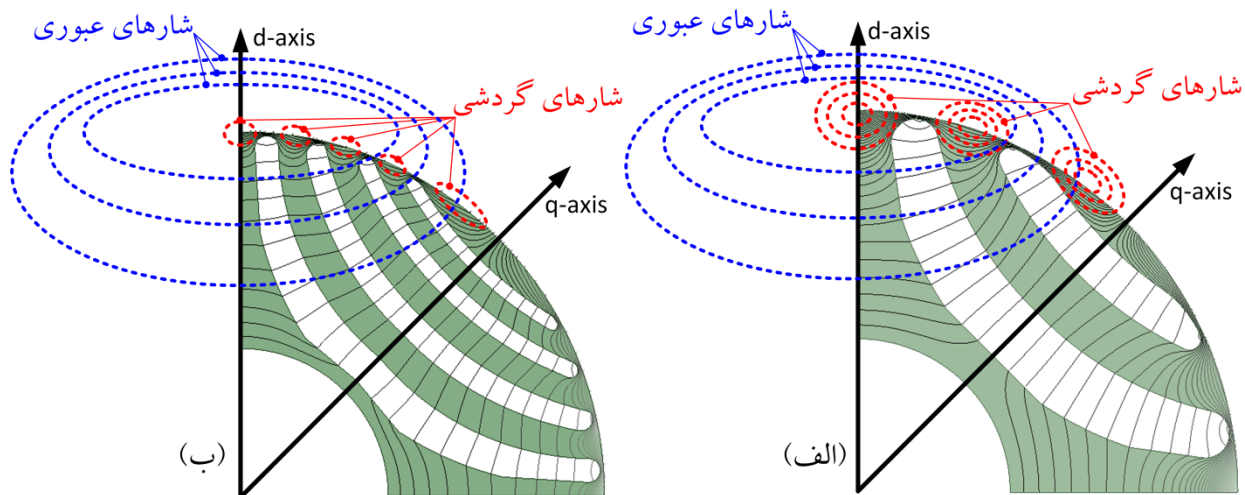
² Field Path Design

³ Zhukovski Shaped

۲-۳-۴- تعداد سدکننده‌های شار

مشخصه‌های مورد انتظار از یک موتور، حداقل رپیل گشتاور و حداکثر متوسط گشتاور است. در موتور سینکریل، تعداد سدکننده‌های شار بر هر دو مورد فوق تاثیر گذار است. از آنجا که تعداد سدکننده‌های شار تاثیر زیادی بر گشتاور خروجی موتور سینکریل دارد، تعداد آن‌ها باید قبل از سایر پارامترها تعیین شود.

در موتور سینکریل افزایش متوسط گشتاور، با افزایش نسبت برجستگی (نسبت اندوکتانس محور d به اندوکتانس محور q) صورت می‌گیرد. در خطوط شار محور q برای روتور با دو و چهار سدکننده شار نشان داده شده است. خطوط شار محور q دارای مولفه‌های عبوری^۱ و گردشی^۲ است [۳۴]. مولفه عبوری از مسیر با مقاومت مغناطیسی زیاد سدکننده‌های شار می‌گذرد، اما مولفه گردشی از مسیر آهن بین دو سدکننده شار مسیر خود را می‌بندد. همان‌طور که در نشان داده شده است، افزایش تعداد سدکننده‌های شار، مولفه عبوری شار محور q را تغییر نمی‌دهد، اما مولفه چرخشی شار محور q را کاهش می‌دهد [۲۸]، بنابراین اندوکتانس محور q کاهش (نسبت برجستگی افزایش) می‌یابد.



شکل ۱۳-۴- شارهای عبوری و گردشی در تحریک جریان محور q (الف) دو سدکننده‌شار، (ب) چهار سدکننده‌شار

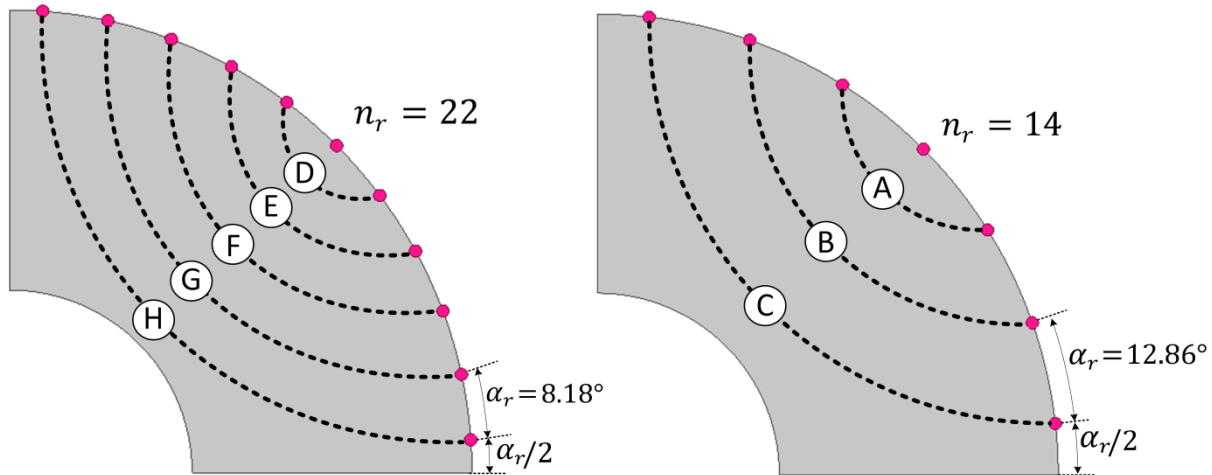
اثر متقابل نیرو محرکه استاتور و هندسه روتور باعث بوجود آمدن مولفه‌های هارمونیکی مکانی می‌شود. هر گونه تغییر در هندسه روتور، باعث تغییر توزیع مولفه‌های هارمونیکی می‌شود. مولفه اصلی میدان مغناطیسی فاصله هوایی با روتور سنکرون بوده و باعث بوجود آمدن متوسط گشتاور می‌شود، در حالی که مولفه‌های هارمونیکی با روتور سنکرون نیستند و باعث تغییر پتانسیل مغناطیسی در روتور و بوجود آمدن رپیل گشتاور می‌شوند. تغییر تعداد سدکننده‌های شار، محتوای هارمونیکی میدان مغناطیسی را تغییر می‌دهد. برای کاهش رپیل گشتاور، تعداد آن‌ها با توجه به تعداد شیارهای استاتور، باید به گونه‌ای انتخاب شود تا باعث تشدید محتوای هارمونیکی و افزایش رپیل گشتاور نشود.

بر اساس یافته‌های [۳۴] برای کاهش رپیل گشتاور موتور سینکریل، رابطه $n_s - n_r = \pm 4$ بایستی بین شیارهای استاتور و روتور برقرار باشد که n_s تعداد شیارهای استاتور به ازای یک زوج قطب و n_r شیارهای معادل روتور به ازای یک زوج قطب است.

¹ Flow through flux

² Circulating flux

به عنوان مثال اگر تعداد شیارهای استاتور ۳۶ و تعداد قطبها ۴ باشد، $n_s = 18$ می شود و بنابراین برای کاهش رپل گشتاور n_r می تواند ۱۴ یا ۲۲ انتخاب شود. با انتخاب این تعداد نقاط، زاویه سدکننده های شار (همان زاویه شیارهای معادل روتور (α_r)) به سادگی به دست می آید. در شکل ۱۴-۱ محل قرار گرفتن زاویه سدکننده های شار برای $n_r = 14$ با A, B, C و برای $n_r = 22$ با D, E, F, G, H به صورت نمادین نشان داده شده است.



شکل ۱۴-۱- محل قرار گرفتن شیارهای معادل روتور (نقاط انتهایی سدکننده های شار روتور)

با انتخاب $n_r = 14$ و سه سدکننده شار، تنها ترتیب ABC قابل انتخاب است اما، با انتخاب $n_r = 22$ حالت های مختلف با تعداد متفاوت سدکننده شار امکان پذیر است.

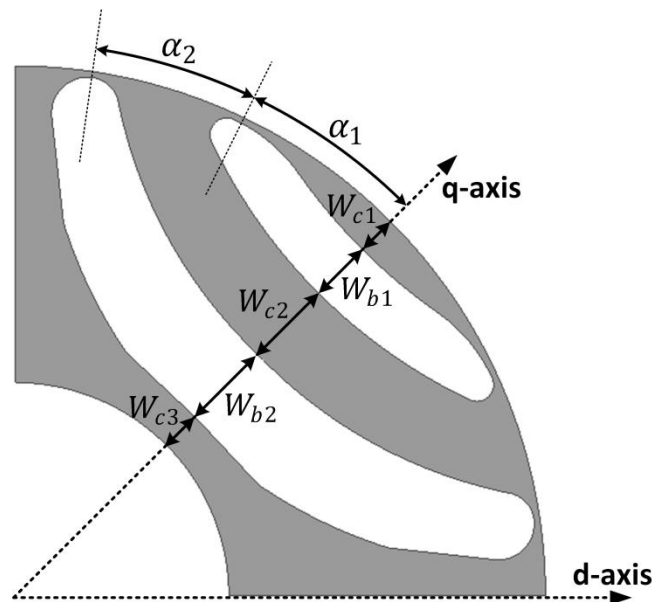
در [۹] مطالعه ای جامع برای یافتن اثر تعداد سدکننده های شار بر عملکرد بهینه موتور سینکریل صورت گرفته است. نتایج حاکی از این است که برای یک تعداد مشخص سدکننده شار، افزایش شیارهای استاتور منجر به افزایش متوسط گشتاور تولیدی می شود و به ازای تعداد شیار ثابت استاتور، افزایش تعداد سدکننده های شار، متوسط گشتاور را به طور ملایم افزایش می دهد. برای هر تعداد شیار استاتور، تعداد خاصی از سدکننده شار، کمترین رپل را ایجاد می کنند. ماشین های با تعداد شیار استاتور بیشتر، محتوای هارمونیکی کمتری در نیرو محرکه مغناطیسی ایجاد می کنند، بنابراین هر چه تعداد شیار استاتور بیشتر باشد کاهش رپل گشتاور ساده تر است.

نتایج زیر در مورد تعداد شیارهای استاتور و سدکننده های شار روتور استخراج شده است [۹]:

- تعداد شیارهای استاتور در بیشترین تعداد ممکن باشد.
- تعداد سدکننده های شار بایستی مطابق با تعداد شیارهای استاتور برای کاهش رپل گشتاور انتخاب شوند.
- از انتخاب سدکننده شار تکی به دلیل عملکرد بسیار ضعیف، اجتناب شود.

۳-۴- ابعاد سدکننده های شار

در پارامتر بندی یک قطب روتور سینکریل با دو سدکننده شار سیال گونه را نشان داده شده است. α_1 و α_2 زاویه سدکننده های شار و W_{b1} و W_{b2} ضخامت آن ها در راستای محور q است. W_{c1} ، W_{c2} و W_{c3} ضخامت قطعه های آهنی در راستای محور q است. در ادامه تاثیر پارامترها بر عملکرد موتور بررسی می شود.

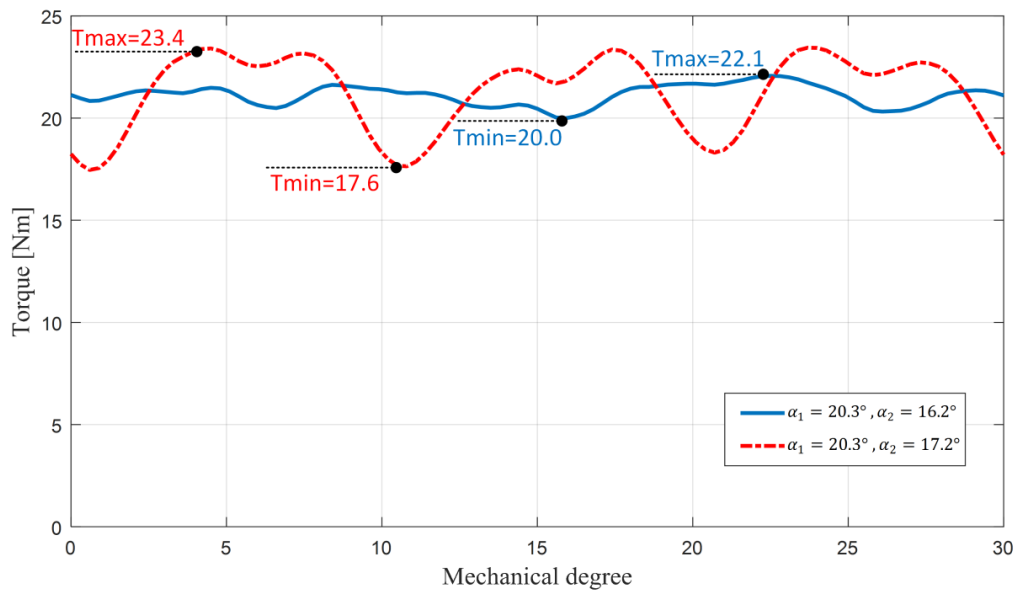


شکل ۱۵-۴- روتور با دو سدکننده شار و تعریف پارامترها

۲-۱-۱-۱- زاویه سدکننده‌های شار

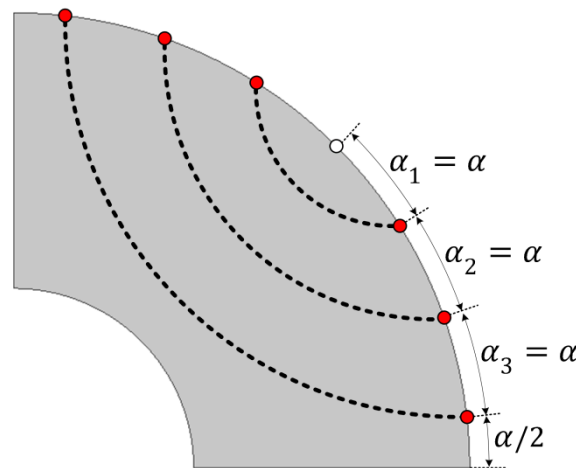
پارامتر هندسی مهمی که بر رپیل گشتاور اثر می‌گذارد، زاویه انتهایی سدکننده‌های شار است. تغییر زاویه سدکننده‌های شار، محل افت پتانسیل ایجاد شده توسط روتور را تغییر می‌دهد؛ بنابراین محتوای هارمونیک میدان فاصله هوایی نیز تغییر می‌کند. تاثیر زاویه سدکننده‌های شار بر رپیل گشتاور موتور سینکرونل شدید گزارش شده است [۳۵]. در [۳۶] نشان داده شده که از میان پارامترهای مختلف هندسه روتور، بیشترین حساسیت به رپیل گشتاور را زاویه سدکننده‌های شار ایجاد می‌کند. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که زاویه سدکننده‌های شار تاثیر زیادی بر متوسط گشتاور نداشته و به طور مستقل بهینه‌سازی بر روی آنها می‌تواند صورت پذیرد [۳۷].

برای درک بهتر تاثیر زاویه سدکننده‌های شار بر رپیل گشتاور، در ادامه در ۰ منحنی گشتاور یک موتور سینکرونل برای روتور ۰ و حالتی که همه پارامترهای روتور ثابت است و تنها زاویه سدکننده شار دوم (α_2) یک درجه افزایش پیدا کرده است، با آنالیز المان محدود نشان داده شده است. با تغییر یک درجه‌ای α_2 ، رپیل گشتاور حدود سه برابر (از ۱۰ درصد به ۳۰ درصد) افزایش یافته است که نشان از تاثیرگذاری شدید زاویه سدکننده شار بر رپیل گشتاور دارد؛ بنابراین انجام بهینه‌سازی بر روی زوایای سدکننده‌های شار برای کاهش رپیل گشتاور ضروری است.



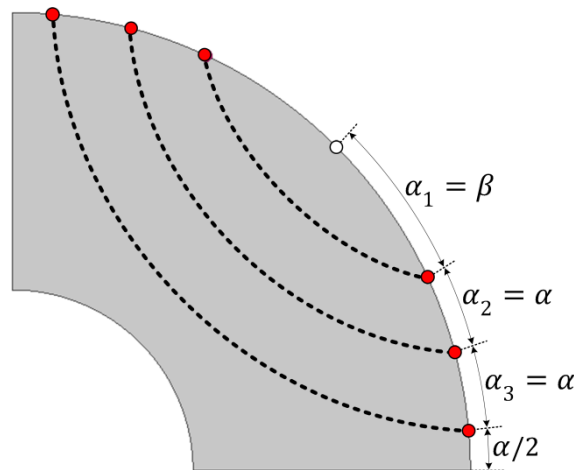
شکل ۱۶-۴- مقایسه گشتاور روتور با زوایای مختلف سدکننده‌های شار

روش‌های مختلفی برای تعیین زاویه بهینه سدکننده‌های شار در مراجع ارائه شده است. یک روش کلی این است که تعداد و زاویه سدکننده‌های شار را متناسب با تعداد شیارهای استاتور تنظیم شوند. در [۳۴] گام شیار ثابت روتور (α در $^\circ$) برای کاهش ریپل گشتاور موتور سینکریل در نظر گرفته شده است. در 10° دایره‌های توپر محل قرار گرفتن زاویه سدکننده‌های شار با گام شیار ثابت روتور را نشان می‌دهد.



شکل ۱۷-۴- زاویه ثابت سدکننده‌های شار ($\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha$)

استفاده از گام شیار ثابت روشی قدیمی و متداول برای کاهش ریپل گشتاور بخصوص در مورد موتورهای القایی است. در [۱۵] با ثابت در نظر گرفتن فاصله بین سدکننده‌های شار درونی روتور و تغییر فاصله نزدیک‌ترین سدکننده شار به سطح روتور، ریپل گشتاور را کاهش می‌دهد؛ بنابراین درجه آزادی زاویه سدکننده‌های شار نسبت به حالت قبل یک درجه افزایش یافته است. در 0° ، β زاویه سدکننده شار اول است و زاویه بقیه سدکننده‌های شار (α) با هم برابر است.



شکل ۱۸-۴- زاویه سدکننده‌های شار با دو درجه آزادی ($\alpha_1 = \beta, \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha$)

در [۹] زاویه هر سدکننده شار را مستقل از دیگری برای کاهش رپیل گشتاور در بهینه‌سازی نظر گرفته است. با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی و آنالیز المان محدود بهینه‌سازی صورت گرفته است. نتایج حاکی از این است که در اکثر موارد زاویه بهینه بصورت گام شیار ثابت به دست می‌آید. در [۳۸] از روش تحلیلی برای آنالیز رپیل گشتاور و بهینه‌سازی با روش سیمپلکس برای یافتن زاویه بهینه سدکننده‌های شار بهره گرفته شده است. با توجه به زمان بر بودن آنالیز المان محدود، روش‌های تحلیلی برای ارزیابی رپیل گشتاور بسیار مناسب هستند.

۱-۳-۳-۴- ضخامت سدکننده‌های شار

با تغییر ضخامت سدکننده‌های شار، اندوکتانس‌های محور d و q و سطح اشباع در ماشین تغییر می‌کند. برای بررسی تاثیر ضخامت سدکننده‌های شار بر عملکرد موتور، استفاده از پارامتری به نام ضریب ایزولاسیون در مراجع مرسوم شده است [۱۴، ۲۸، ۳۹]. ضریب ایزولاسیون (k_{ins}) برابر با نسبت ضخامت کل سدکننده‌های شار به ضخامت روتور به صورت رابطه (۴-۱) تعریف می‌شود [۱۰]:

$$k_{ins} = \frac{\sum_i^{N_b} W_{bi}}{\sum_i^{N_b} W_{bi} + \sum_i^{N_b+1} W_{ci}} = \frac{\sum_i^{N_b} W_{bi}}{(D_r - D_{sh})/2} \quad (4-1)$$

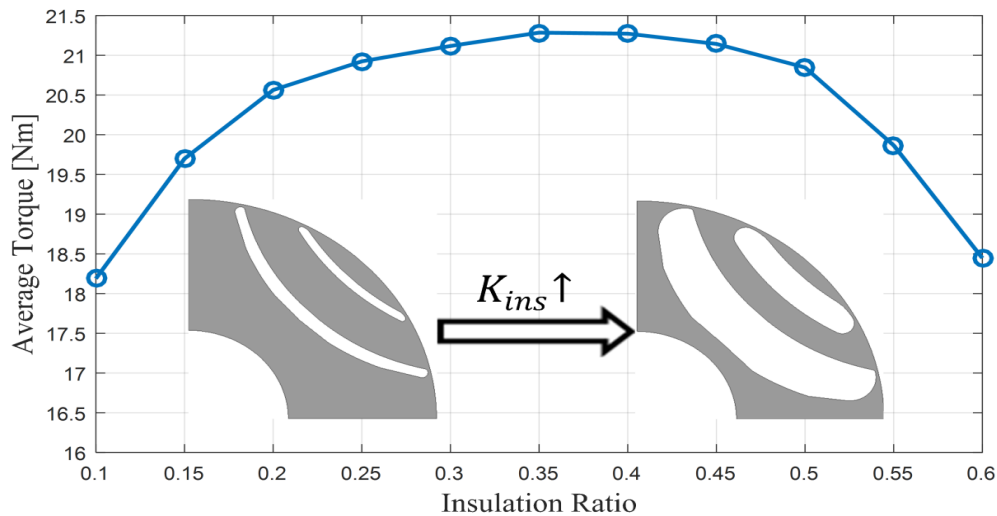
که N_b تعداد سدکننده‌های شار، W_{bi} و W_{ci} به ترتیب ضخامت سدکننده^۱ و هادی^۲ شار i -ام است، D_r قطر خارجی روتور و D_{sh} قطر محور است. با افزایش ضخامت سدکننده‌های شار (یعنی افزایش k_{ins}) چگالی شار در روتور افزایش می‌یابد، به عبارت دیگر چگالی شار در استاتور کاهش می‌یابد.

برای نشان دادن اثر ضخامت سدکننده‌های شار بر عملکرد موتور سینکریل، ضمن ثابت در نظر گرفتن زاویه‌های سدکننده‌های شار، ضریب ایزولاسیون از ۰/۱ تا ۰/۶ برای یک موتور با دو سدکننده شار متغیر در نظر گرفته شده و اثر افزایش آن بر متوسط گشتاور با شبیه سازی المان محدود در ۰ به دست آمده است. با افزایش ضریب ایزولاسیون از ۰/۱ به دلیل کاهش

¹ Barrier

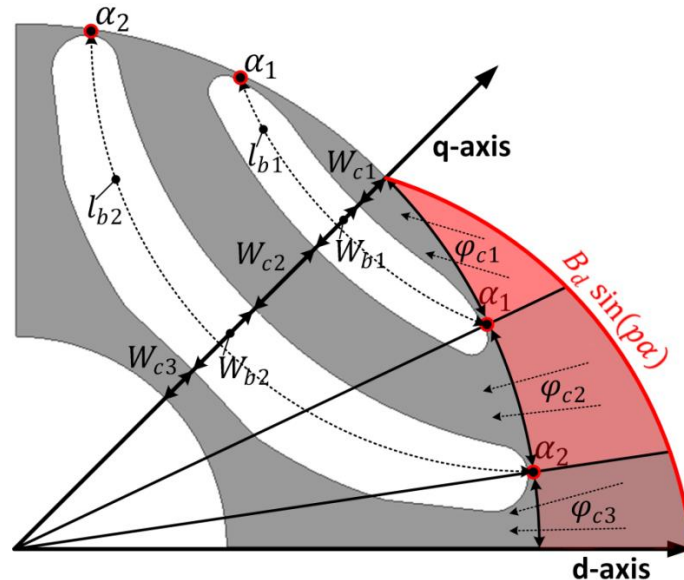
² Carrier

اندوکتانس محور-q، مقدار متوسط گشتاور افزایش می‌یابد. در ضریب ایزولاسیون بین ۰/۳۵ تا ۰/۴۵ گشتاور تقریباً ثابت است و به مقدار ماکزیمم می‌رسد. با افزایش ضریب ایزولاسیون از ۰/۴۵ اثر افزایش هوا بر کاهش اندوکتانس محور-q کم است در حالی که دلیل کاهش ضخامت هادی شار، باعث کاهش اندوکتانس (شار) محور-d می‌شود، بنابراین متوسط گشتاور کاهش می‌یابد.



شکل ۱۹-۴- اثر افزایش ضریب ایزولاسیون بر متوسط گشتاور

با تغییر پارامتر k_{ins} می‌توان مقدار بیشینه گشتاور را به دست آورد. با مشخص شدن مقدار بهینه k_{ins} میزان ضخامت کل سدکننده‌های شار به دست می‌آید. پرسش بعدی که مطرح می‌شود این است که ضخامت هر سدکننده شار و هر هادی شار چقدر باشد؟ راه حلی که برای این منظور در مراجع ارائه شده به این صورت است که ضخامت هر هادی شار روتور (قطعه‌های آهنی) را متناسب با میزان شاری که از آن در حالت توزیع شار سینوسی محور-d می‌گذرد، محاسبه می‌کنند [۱۵]، [۱۴]. توزیع چگالی شار سینوسی محور-d بر روی روتور با دو سدکننده شار را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، در حالت توزیع سینوسی، از هادی شار دوم سهم شار بیشتری نسبت به هادی شار اول می‌گذرد ($\varphi_{c2} > \varphi_{c1}$)؛ بنابراین ضخامت هادی شار دوم نسبت به هادی شار اول بزرگ‌تر انتخاب می‌شود ($W_{c2} > W_{c1}$) تا قطعات آهن روی روتور به صورت متعادل اشباع شوند.



شکل ۲۰-۴- توزیع چگالی شار محور-d روی روتور

متوسط چگالی شار عبوری از هر هادی شار با رابطه (۴-۲) به دست می‌آید. ضخامت هر هادی شار متناسب با پریونیت شده چگالی شار عبوری از آن طبق رابطه (۴-۳) محاسبه می‌شود [۱۴].

$$\begin{cases} B_{avg,i} = \frac{1}{\alpha_i - \alpha_{i-1}} \int_{\alpha_{i-1}}^{\alpha_i} B_d \sin(p\alpha) d\alpha, & 1 \leq i \leq N_b \\ B_{avg,N_b+1} = \frac{1}{\pi - 2\alpha_{N_b}} \int_{\alpha_{N_b}}^{\frac{\pi}{2}} B_d \sin(p\alpha) d\alpha, & i = N_b + 1 \end{cases} \quad (4-2)$$

$$W_{ci} = \frac{(D_{re} - D_{ri})(1 - k_{ins})}{2} \frac{B_{avg,i}}{\sum_{i=1}^{N_b+1} B_{avg,i}}, \quad 1 \leq i \leq N_b + 1 \quad (4-3)$$

که B_d حداکثر چگالی شار فاصله هوایی، $B_{avg,i}$ متوسط چگالی شار در i -امین قسمت آهنی، N_b تعداد سدکننده‌های شار، و α_i زاویه سدکننده شار i -ام است.

پهنای هر سدکننده شار باید بگونه‌ای تنظیم شود که شار محور q را تا حد ممکن کاهش دهد. روشی که در ادامه استفاده می‌شود بر اساس نتایج [۱۴] است، که به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\begin{cases} F_{avg,i} = \frac{1}{\alpha_i - \alpha_{i-1}} \int_{\alpha_{i-1}}^{\alpha_i} F_d \cos(p\alpha) d\alpha, & 1 \leq i \leq N_b \\ \Delta F_{q,i} = F_{avg,i} - F_{avg,i+1} & 1 \leq i \leq N_b - 1 \\ \Delta F_{q,N_b} = F_{avg,N_b} \end{cases} \quad (4-4)$$

$$\frac{W_{bi}}{W_{bj}} = \frac{\Delta F_{q,k}}{\Delta F_{q,h}} \sqrt{\frac{l_{b,i}}{l_{b,j}}} \approx \frac{\Delta F_{q,k}}{\Delta F_{q,h}} \sqrt{\frac{\alpha_i}{\alpha_j}} \quad (4-5)$$

که $\Delta F_{q,i}$ تفاوت در متوسط پریونیت شده نیرو محرکه مغناطیسی ($F_{avg,i}$) در سدکننده شار i -ام است. $l_{b,i}$ طول سدکننده شار i -ام است. پس از انجام محاسبات، با مشخص شدن نسبت‌های هادی‌های شار با رابطه (۴-۳) و نسبت سدکننده‌های شار با رابطه (۴-۵) به دست آوردن پهنای هر سدکننده شار به آسانی با رابطه (۴-۱) قابل انجام است.

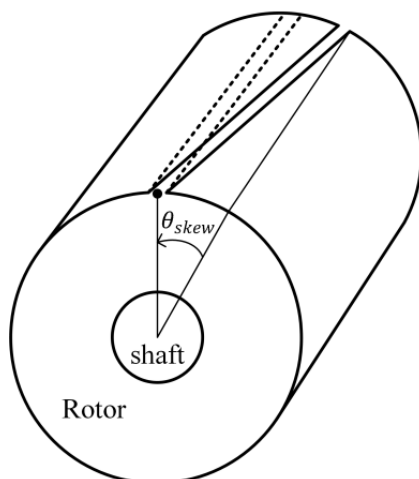
۴-۴- روش‌های کاهش رپیل گشتاور

اگرچه کاهش رپیل گشتاور در خلال بهینه سازی با مشخص شدن زاویه بهینه سدکننده‌های شار صورت می‌گیرد، اما با روش‌های دیگری مانند مورب کردن روتور [۴۰]، انتخاب سدکننده‌های شار ناهمسان در هر قطب [۴۱]، انتخاب سدکننده‌های شار نامتقارن [۲۵] و یا تزریق هارمونیک جریان [۴۲] امکان کاهش بیشتر رپیل گشتاور وجود دارد. در ادامه سه روش نخست که بر مبنای طراحی روتور هستند، مرور می‌شوند. مورد آخر تنها در کاربردهای دارای درایو می‌تواند استفاده شود.

□ مورب کردن روتور

مورب کردن ابزار مفیدی برای کاهش رپیل گشتاور در ماشین‌های AC است، در این روش با کاهش رپیل گشتاور مقدار متوسط گشتاور نیز کاهش می‌یابد. در ماشین‌های AC، هارمونیک‌های شیار سهم زیادی در رپیل گشتاور دارند. حداقل رپیل گشتاور زمانی به دست می‌آید که زاویه اریب که در $\theta_{skew} = \theta_{slot}$ [۴۳] مورب کردن روتور موتور سینکریل با زاویه اریب برابر با یک گام شیار استاتور، تاثیر کمی (کمتر از ۲ درصد) بر روی گشتاور، ضریب قدرت و توان موتور دارد [۴۰]. در [۴۴] توصیه شده است تا برای ارزیابی اثر مورب کردن روتور از

شبیه‌سازی سه بعدی المان محدود استفاده شود، زیرا شبیه‌سازی‌های دو بعدی به دلیل نادیده گرفتن اثرات تغییر شار محوری، برای ارزیابی اثر مورب کردن روتور، دقت کافی را ندارند. مورب کردن روتور به دو صورت پله‌ای^۱ و پیوسته^۲ امکان‌پذیر است. در حالت پیوسته که نمونه آن در شکل ۲۱-۲۲ نشان داده شده است، تمامی ورق‌های روتور در راستای محور چرخانده می‌شوند تا زاویه اریب نسبت به محور به دست آید. در حالت اریب پله‌ای، روتور به چند تکه^۳ تقسیم شده و هر تکه نسبت به تکه دیگر با زاویه مشخصی قرار می‌گیرد. نمونه روتور مورب با سه پله در ۰ نشان داده شده است.



شکل ۲۱-۴- مورب کردن روتور به اندازه زاویه θ_{skew}



(ب)



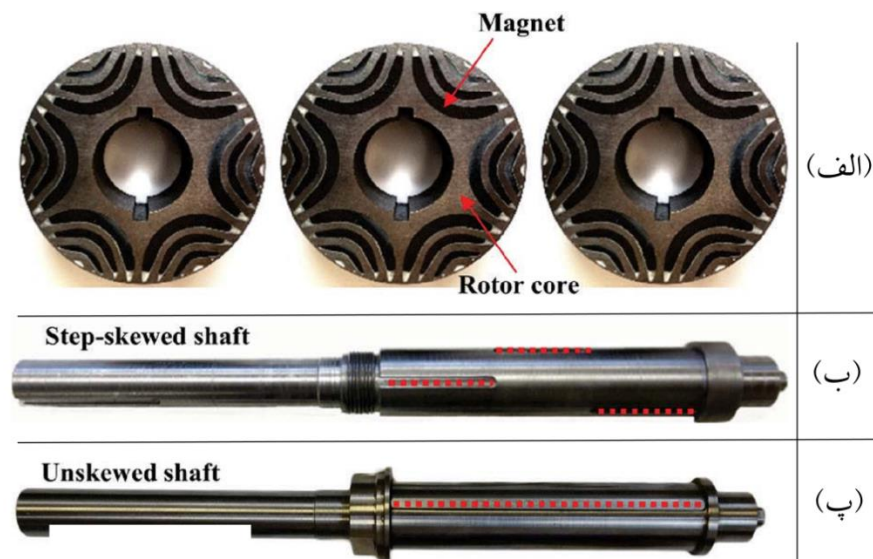
(الف)

شکل ۲۲-۴- روتور مورب پیوسته. (الف) پشته ورق‌ها، (ب) روتور اریب شده با زاویه ۴ درجه نسبت به شفت [۴۳]

¹ step-skew

² continuous-skew

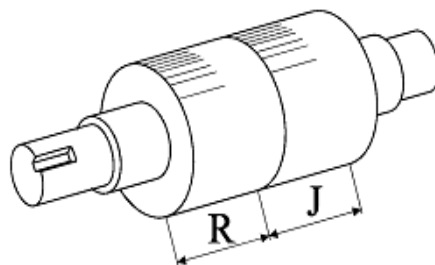
³ multislice



شکل ۲۳-۴- روتور مورب پله‌ای. (الف) تکه‌های روتور، (ب) محور پله‌ای اریب شده، (پ) محور اریب نشده [۴۴]

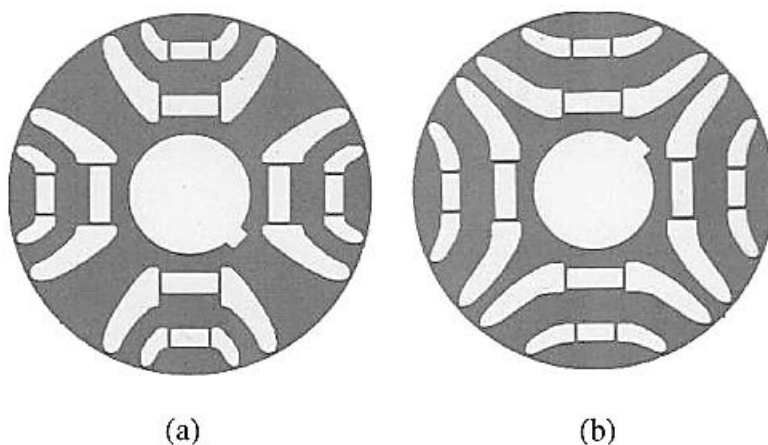
□ روتور با سدکننده‌های شار ناهمسان

در [۴۵] از روتور با سدکننده‌های شار با زوایای انتهایی متفاوت به منظور کاهش ریپل گشتاور استفاده شده‌است. در این روش هارمونیک‌های ریپل گشتاور ناشی از سدکننده‌های شار با زوایای متفاوت همدیگر را خنثی کرده و ریپل گشتاور کاهش می‌یابد. این روش به دو صورت قابل پیاده‌سازی است: روش اول روتور به دو قسمت مساوی مطابق تقسیم می‌شود که با حروف R و J مشخص شده‌است. در قسمت R از ورق‌های (a) و در قسمت J از ورق‌های (b) استفاده می‌شود. در روش دوم که به آن روتور $Machoon^1$ گفته می‌شود و در $\bullet$ و $\bullet$ نشان داده شده‌است، در کل روتور از یک نوع ورق که دارای سدکننده‌های شار با زوایای متفاوت در هر قطب [۴۵] و یا در هر قطب دارای سدکننده‌های شار با تعداد متفاوت است [۳۵]، استفاده می‌شود.

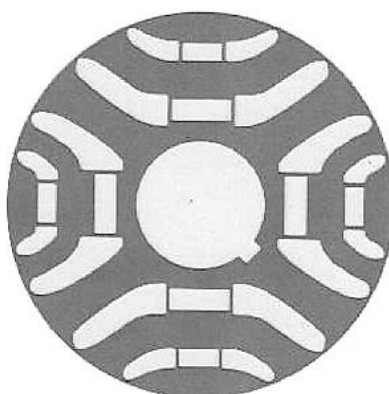


شکل ۲۴-۴- تقسیم بندی روتور به دو ناحیه R و J [۴۱]

¹ نام پروانه‌ای با بال‌های کوچک و بزرگ



شکل ۲۵-۴- تصویر ورق‌های با سدکننده‌های شار متفاوت (a) روتور نوع R و (b) روتور نوع J [۴۵]



شکل ۲۶-۴- تصویر روتور Machoan با سدکننده‌های شار با زوایای متفاوت در هر قطب [۴۵]

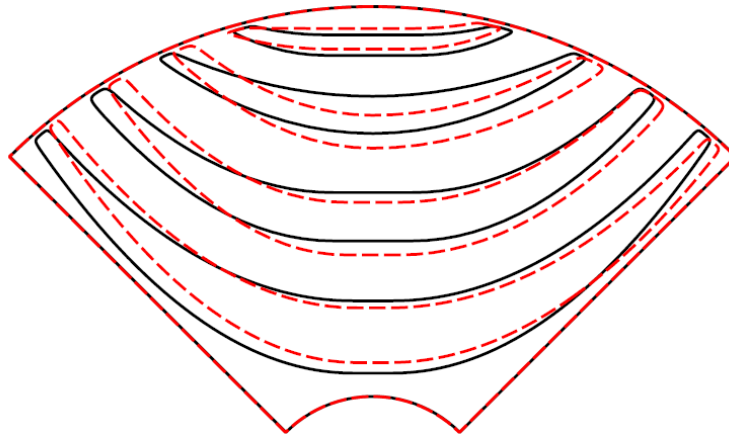


شکل ۲۷-۴- تصویر روتور Machoan با سدکننده‌های شار با تعداد متفاوت در هر قطب [۳۵]

□ روتور با سدکننده‌های شار نامتقارن

در [۲۵] ساختار روتور با سدکننده‌های شار نامتقارن برای کاهش ریبیل گشتاور پیشنهاد شده است. در * تصویر روتور با سدکننده‌های شار نامتقارن با خطچین نشان داده شده است. بهینه‌سازی به منظور کاهش ریبیل گشتاور و افزایش متوسط گشتاور

بر روی هر دو ساختار متقارن و نامتقارن برای استاتور با شیارهای ۲۴ و ۳۶ شیاره صورت گرفته است. سرعت نامی موتورها ۱۵۰۰ دور در دقیقه است. جریان نامی موتور ۲۴ و ۳۶ شیار، به ترتیب ۳/۵ و ۴۲ آمپر است. در حالت متقارن، نتایج بهینه سازی ریل گشتاور برای استاتور دارای ۲۴ و ۳۶ شیار به ترتیب ۱۱/۴ و ۸/۵ درصد و برای حالت نامتقارن به ترتیب ۵/۷ و ۳/۹ درصد، بدون مورب کردن روتور به دست آمده است. روتور نامتقارن نسبت به روتور متقارن افت متوسط گشتاور نداشته است، درحالی که ریل گشتاور ۵۰ درصد نسبت به حالت متقارن کاهش یافته است.



شکل ۲۸-۴- تصویر روتور با سدکننده های شار متقارن (خطوط ممتد) و نامتقارن (خط چین) [۲۵]

روش ارائه شده (سدکننده های شار نامتقارن) برای کاربردهای تک جهتی مانند: فن ها، پمپ ها و نوار نقاله ها مورد بررسی قرار گرفته است. عملکرد موتور در شرایط چرخش معکوس و یا تغییر مود عملکرد (موتور یا ژنراتور) ممکن است دستخوش تغییر شود.

۵-۴- طراحی قفس القایی

پارامترهای روتور (اندوکتانس های نشستی و مقاومت های روتور) به شدت عملکرد موتور در حلت گذرا را تحت تاثیر قرار می دهند. در عین حال، یافتن تاثیر دقیق مقاومت های روتور بر فرایند سنکرونیسم دشوار است. در ادامه تاثیر مقاومت های محور d و q روتور (R_{rd} و R_{rq}) بر فرایند سنکرونیسم با بررسی متوسط گشتاور الکترومغناطیسی در هنگام راه اندازی به دست می آید. گشتاور متوسط قفس در عملکرد آسنکرون هنگام راه اندازی موتور سینکرونل خودراه انداز را می توان با رابطه (۴-۱) به دست آورد [۲۶].

$$T_{em-avg} = \frac{3}{2} p \text{Real}(\bar{\Lambda}_{sd} * \bar{I}_{sq} - \bar{\Lambda}_{sq} * \bar{I}_{sd}) \quad (۱-۴)$$

که اندیس * مزدوج مختلط بودن را نشان می دهد. فازورهای شار پیوندی استاتور به صورت رابطه (۴-۲) به دست می آیند.

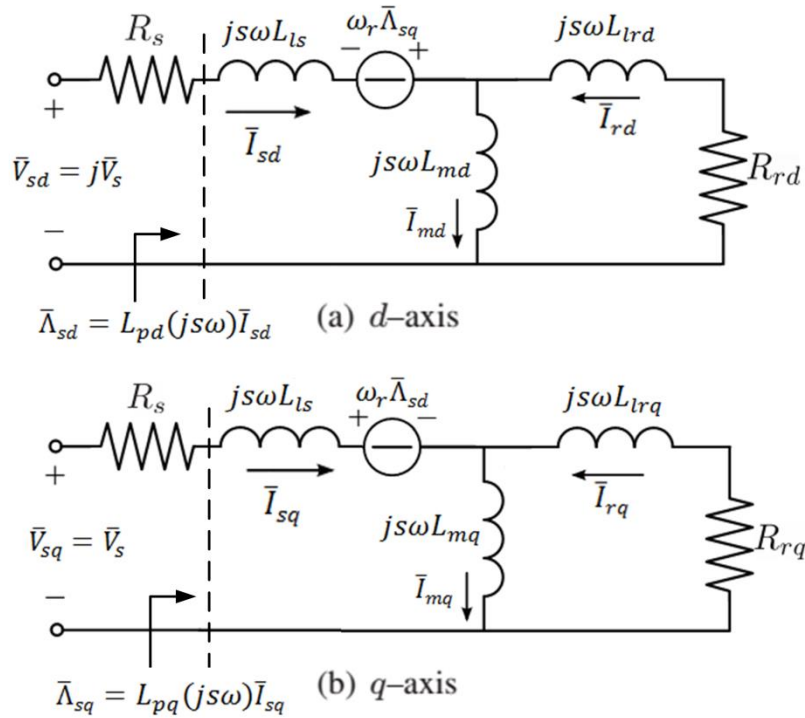
$$\bar{\Lambda}_{sd} = L_{pd} \bar{I}_{sd} \quad (۲-۴)$$

$$\bar{\Lambda}_{sq} = L_{pq} \bar{I}_{sq}$$

که L_{pd} و L_{pq} اندوکتانس های عمیاتی محورهای d و q هستند. همانطور که در رابطه (۴-۳) نشان داده شده است، در واقع L_{pd} و L_{pq} توابع انتقال موتور سینکرونل خودراه انداز مطابق مدار معادل هستند و ارتباط بین $\bar{\Lambda}_{sq}$ و $\bar{I}_{sd}$ با $\bar{I}_{sq}$ را برقرار می کنند.

$$L_{pd} = L_{sd} - \frac{j\omega L_{md}^2}{R_{rd} + j\omega L_{rd}} \quad (۳-۴)$$

$$\bar{\Lambda}_{sd} = L_{pd}(j\omega)\bar{I}_{sd} = L_{sq} - \frac{j\omega L_{mq}^2}{R_{rd} + j\omega L_{ls}}$$



شکل ۲۹-۴- مدار معادل dq موتور سینکریل خودراه انداز [۲۶]

با جایگذاری رابطه (۴-۱) و (۴-۲) گشتاور الکترومغناطیسی متوسط به صورت رابطه (۴-۴) به دست می‌آید.

$$T_{em-avg} = \frac{3}{2} p \operatorname{Real} \left(\frac{\bar{\Lambda}_{sd}^* \bar{\Lambda}_{sq}}{L_{qp}} - \frac{\bar{\Lambda}_{sq}^* \bar{\Lambda}_{sd}}{L_{dp}} \right) \quad (4-4)$$

در سیستم سه فاز متعادل، ولتاژها به صورت رابطه (۴-۵) بیان می‌شوند.

$$\bar{V}_{sq} = -j\bar{V}_{sd} = \bar{V}_s \quad (5-4)$$

با صرف نظر کردن از مقاومت استاتور، فازورهای شار پیوندی استاتور به صورت رابطه (۴-۶) به دست می‌آیند.

$$\bar{\Lambda}_{sd} = \frac{\bar{V}_s}{\omega_r + s\omega} = \frac{\bar{V}_s}{\omega} \quad (6-4)$$

$$\bar{\Lambda}_{sq} = -j \frac{\bar{V}_s}{\omega_r + s\omega} = -j \frac{\bar{V}_s}{\omega}$$

با جایگذاری رابطه (۴-۶) در رابطه (۴-۴) و (۴-۷) برای گشتاور الکترومغناطیسی به دست می‌آید.

$$T_{em-avg} = \frac{3P}{2} \left(\frac{\bar{V}_s}{\omega_r + s\omega} \right)^2 \operatorname{Imag} \left(\frac{1}{L_{pd}} + \frac{1}{L_{pq}} \right) \quad (7-4)$$

$$= \frac{3P}{2} \frac{V_s^2 s\omega}{(\omega_r + s\omega)^2} \left(\frac{R_{rd} L_{md}^2}{R_{rd}^2 L_{sd}^2 + s^2 \omega^2 (L_{sd} L_{rd} - L_{md}^2)^2} + \frac{R_{rq} L_{mq}^2}{R_{rq}^2 L_{sq}^2 + s^2 \omega^2 (L_{sq} L_{rd} - L_{mq}^2)^2} \right)$$

از آنجا که در فرآیند سنکرونیزم، مقدار لغزش کوچک است و ω_r به ω نزدیک است. در هنگام سنکرونیزم، T_{em-avg} به صورت رابطه (۴-۸) ساده می‌شود.

$$T_{em-avg} = \frac{3}{2} p \frac{s_{sync} \bar{V}_s^2}{\omega} \left\{ \frac{1}{R_{rd}} \left(\frac{L_{md}}{L_{sd}} \right)^2 + \frac{1}{R_{rq}} \left(\frac{L_{mq}}{L_{sq}} \right)^2 \right\} \quad (۴-۸)$$

که s_{sync} لغزش موتور در هنگام سنکرونیزم است. در موتور سینکریل که به خوبی طراحی شده باشد، L_{sq} خیلی از L_{sd} کوچک‌تر بوده و به اندوکتانس ناشی موتور نزدیک است. بنابراین $(L_{md}/L_{sd})^2$ بزرگ‌تر از $(L_{mq}/L_{sq})^2$ است.

جمع بندی

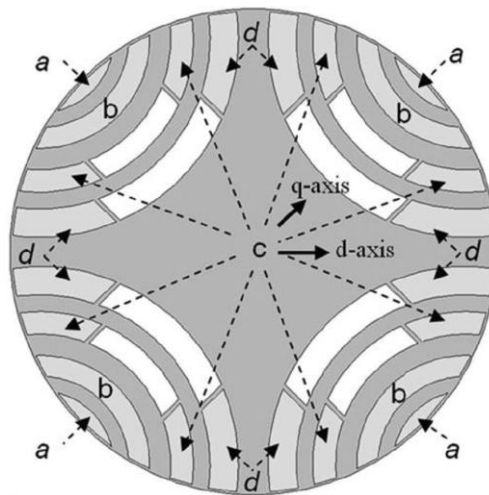
- ✚ برای سنکرونیزم موفق، مقادیر کم R_{rd} و R_{rq} مورد نیاز است.
- ✚ کاهش R_{rd} نسبت به کاهش R_{rq} به صورت موثرتری شرایط سنکرونیزم موفق را برآورده می‌کند.
- ✚ کاهش اندوکتانس‌های ناشی استاتور در محور dq گشتاور متوسط بیشتری در شرایط سنکرونیزم را حاصل می‌کند.

۱-۵-۴- اثر موقعیت میله‌های روتور بر مقاومت‌های محور dq

در بخش قبل درباره تاثیر مقاومت‌های روتور بر عملکرد موتور در فرایند سنکرونیزم اشاره شد، حال این پرسش بوجود می‌آید که قرار گرفتن میله‌های روتور در هر ناحیه از روتور بر کدام مقاومت بیشتر تاثیرگذار است؟ به طور کلی انتظار می‌رود که میله‌های روتور با موقعیت زاویه‌ای دور از یک محور، تاثیر بیشتری بر مقاومت آن محور داشته باشند. به عنوان مثال میله‌های روتور که در نزدیکی محور q هستند، بیشترین تاثیر را بر مقاومت محور d (R_{rd}) دارند و برعکس [۲۶]. برای بررسی ادعای فوق، حالت‌های مختلفی برای توزیع آلومینیوم درون سدکننده‌های شار می‌توان متصور شد و سپس مقاومت‌های روتور را محاسبه نمود. در ادامه روشی که در [۲۶] برای بررسی موقعیت میله‌ها بر مقاومت‌های محور dq صورت گرفته، بررسی می‌شود. روش محاسبه مقاومت‌های روتور در ادامه توضیح داده شده است. در نمونه روتور موتور سینکریل خود راه انداز نشان داده شده است. با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف برای قطعه‌های a, b, c, d که از آلومینیوم پر شوند و یا هوا، نتایج محاسبه مقاومت‌های روتور در جدول نشان داده شده است. برای مقایسه بهتر حاصلضرب مقاومت‌ها در سطح مقطع آلومینیوم نیز در گزارش شده است.

شکل ۳۰-۴- تاثیر موقعیت میله‌های روتور بر مقاومت‌های dq [۲۶]

Case no.	Included rotor bar	Rotor bar area (mm ²)	R_{rq} (Ω)	R_{rd} (Ω)	Area * R_{rq} (Ω)	Area * R_{rd} (Ω)
1	a	28.68	—	5.35	—	153.42
2	b	140.76	—	1.73	—	243.62
3	c	140.77	4.44	4.66	624.88	656.39
4	d	227.47	1.57	14.36	356.37	3266.23
5	ab	169.44	17.67	1.91	2994.61	323.05
6	cd	368.24	1.12	4.21	412.65	1551.53
7	abc	310.21	3.87	1.81	1201.70	561.73
8	bcd	509.00	1.12	1.36	570.44	693.02
9	abcd	537.68	1.06	1.81	568.76	975.03



شکل ۳۱-۴-روتور موتور سینکرون خودراه انداز [۲۶]

نتایج زیر از جدول استخراج می‌شود [۲۶]:

- موثرترین میله‌ها بر مقاومت R_{rd} به ترتیب میله‌های a و b هستند، که در نزدیکی محور q قرار دارند.
 - اگرچه میله a نسبت به میله b به محور q نزدیک‌تر است، به دلیل سطح مقطع کمتر میله a ، سهم آن در کاهش R_{rd} کمتر از میله b است.
 - از آنجا که میله‌های c و d نسبت به محور q دور هستند، تاثیر ناچیزی در کاهش مقاومت R_{rd} دارند.
 - میله d نسبت به میله c به محور d نزدیک‌تر است و تاثیر بیشتری بر R_{rq} دارد.
 - میله‌های a و b تزویج مغناطیس با شار محور q نداشته و تاثیری بر مقاومت R_{rq} ندارند.
- به طور کلی موارد زیر در طراحی قفس روتور باید در نظر گرفته شود [۱۱]:
- سطح مقطع قفس آلومینیوم باید افزایش پیدا کند و یا فضای سدکننده‌های شار تماماً با آلومینیوم پر شود. این کار باعث کاهش مقاومت‌های روتور شده و سرعتی که در آن گشتاور قفس به حداکثر می‌رسد را افزایش می‌دهد.
 - برای کاهش اندوکتانس نشستی روتور، بهتر است تا شیارهای روتور به صورت باز در نظر گرفته شوند تا حداکثر گشتاور قفس، افزایش یابد.
 - در طراحی روتور، باید استقامت کافی ورق‌ها مد نظر قرار بگیرد تا از تغییر شکل آن جلوگیری شود.

۲-۵-۴- تخمین پارامترهای موتور

به دلیل ماهیت ناهمسانگرد روتور موتور سینکرون خودراه انداز، تخمین پارامترهای روتور آن با روش‌هایی که برای تخمین پارامترهای روتور موتور القایی به کار می‌رود، متفاوت است.

روش معمول برای محاسبه پارامترهای موتور القایی از طریق محاسبه کمیت‌های انتگرالی مانند: انرژی مغناطیسی و تلفات است که از نتایج شبیه سازی المان محدود از حل میدان به دست می‌آیند. به عنوان مثال مقاومت روتور از طریق محاسبه متوسط تلفات اهمی در میله‌های روتور رابطه (۴-۱) و اندوکتانس از طریق محاسبه متوسط انرژی مغناطیسی در مواد مغناطیسی رابطه (۴-۲) به دست می‌آید [۴۶].

$$P_{jr} = 2pL \frac{1}{2\sigma_{Al}} \int_{S_{Al}} J_z \cdot J_z^* dS \quad (۴-۱)$$

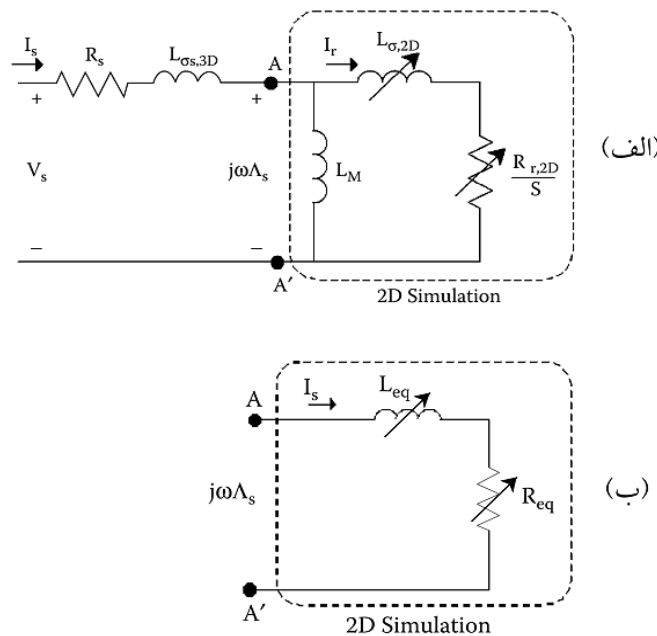
که L طول میله‌های روتور، σ_{Al} رسانایی آلومینیوم، S_{Al} کل سطح مقطع میله‌های روتور در یک قطب است. ضریب $2p$ نشان دهنده این است که تنها یک قطب موتور شبیه‌سازی شده است. J_z مولفه محوری چگالی جریان و $(*)$ نماد مزدوج مختلط است.

$$W_m = 2pL_{fe} \frac{1}{2} \int_D \frac{\hat{B}}{\sqrt{2}} \frac{\hat{H}}{\sqrt{2}} dS \quad (۲-۴)$$

$\hat{B}$ و $\hat{H}$ به ترتیب حداکثر شدت میدان و چگالی میدان، L_{fe} طول موثر پشته آهن است.
 • (الف) مدار معادل موتور القایی را نشان می‌دهد. برای محاسبه مقاومت روتور $(R_{r,2D})$ و اندوکتانس نشتی روتور $(L_{\sigma,2D})$ ، شرایط روتور قفل شده در نظر گرفته می‌شود. ترمینال AA' در • (الف) با امپدانس معادل • (ب) مدل می‌شود. مقاومت و اندوکتانس معادل $(L_{eq}$ و $R_{eq})$ به ترتیب با رابطه $(۳-۴)$ و $(۴-۴)$ محاسبه می‌شوند [۴۶]. I_s مقدار موثر جریان استاتور در هنگام تست است.

$$R_{eq} = \frac{P_{jr}}{3I_s^2} \quad (۳-۴)$$

$$L_{eq} = \frac{2W_m}{3I_s^2} \quad (۴-۴)$$



شکل ۳۲-۴- (الف) مدار معادل موتور القایی (ب) پارامترهای معادل در تست روتور قفل شده [۴۶]

مقادیر حقیقی و موهومی امپدانس معادل در ترمینال AA' با $R_{eq} + j\omega_r L_{eq}$ مشخص شده است. با مشخص شدن اندوکتانس مغناطیس کنندگی (L_m) از طریق تست بی‌باری، پارامترهای مدار معادل روتور $R_{r,2D}$ و $L_{\sigma,2D}$ به دست می‌آیند. در یک ماشین ناهمسانگرد، مانند موتور سینکرون خودراه انداز، به طور معمول محاسبه پارامترها از طریق مقادیر انتگرال مانند تلفات اهمی و انرژی مغناطیسی مطابق آنچه تاکنون توضیح داده شد، قابل دستیابی نیست [۱]؛ بنابراین از روش‌های جایگزین باید استفاده شود. روش‌های مختلفی برای تخمین پارامترهای موتور سینکرون خودراه انداز در مراجع ارائه شده است که اکثراً بر

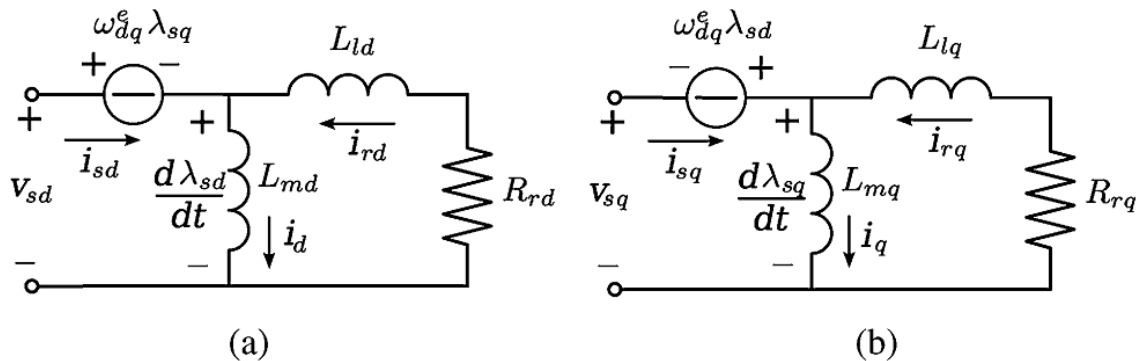
مبنای اندازه گیری هستند [۴۷, ۴۸]. به عنوان مثال در [۴۸] با استفاده از نتایج اندازه گیری گذراهای موتور و تطبیق آن با مدل دینامیکی مدار معادل خطی، پارامترهای موتور با جستجوی تکامل تفاضلی به دست می آیند.

در ادامه روشی که برای تخمین پارامترهای موتور سنکرون خودراه انداز به کار رفته است [۱]، مرور می شود؛ زیرا این روش نیازی به داده های اندازه گیری نداشته، همچنین در این روش اثر برجستگی روتور، اشباع آهن و تغییرات فرکانس روتور در محاسبه پارامترهای موتور در نظر گرفته شده است.

۳-۵-۴- تخمین پارامترها بر اساس مدل dq

با فرض اینکه قاب مرجع dq بر روی روتور ثابت شود و با سرعت چرخش روتور بچرخد، در این قاب مرجع ولتاژهای استاتور به صورت رابطه (۴-۱) به دست می آید [۱].

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\lambda_{sd}}{dt} - \omega_m^e \lambda_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\lambda_{sq}}{dt} + \omega_m^e \lambda_{sd} \end{cases} \quad (۴-۱)$$



شکل ۳۳-۴-مدار معادل dq دینامیکی موتور سنکرون خودراه انداز [۱]

مدل dq موتور سنکرون خودراه انداز در * نشان داده شده است که تمامی پارامترها به سمت استاتور ارجاع یافته است. در این مدار معادل، کل اندوکتانس های ناشی (L_{ld} و L_{lq}) به صورت یکجا در نظر گرفته شده و مقاومت ها روتور در مسیر d و q متفاوت هستند ($R_{rd} \neq R_{rq}$) و از مقاومت استاتور صرف نظر شده است.

در حالت دائمی، ولتاژها و جریان ها نسبت به زمان سینوسی فرض می شوند. در مدل قاب مرجع dq، آن ها با سرعت الکتریکی ($\omega - \omega_{dq}^e$) تغییر می کنند، که $\omega = 2\pi f$ و فرکانس خط است. معادلات dq بر حسب متغیرهای مختلط می توانند بیان شوند، بنابراین رابطه (۴-۱) به رابطه (۴-۲) تبدیل می شود. کمیت های که روی آن های خط کشیده شده است، مختلط هستند.

$$\begin{cases} \overline{V_{sd}} = R_s \overline{I_{sd}} + j(\omega - \omega_{dq}^e) \overline{\lambda_{sd}} - \omega_{dq}^e \overline{\lambda_{sq}} \\ \overline{V_{sq}} = R_s \overline{I_{sq}} + j(\omega - \omega_{dq}^e) \overline{\lambda_{sq}} + \omega_{dq}^e \overline{\lambda_{sd}} \end{cases} \quad (۲-۴)$$

۳-۱-۱-۱- اندوکتانس های مغناطیس کننده dq

برای محاسبه اندوکتانس های مغناطیس کننده، سرعت قاب مرجع برابر سرعت سنکرون در نظر گرفته می شود یعنی ($\omega = \omega_{dq}^e$) که نتیجه آن این است که کمیت های الکتریکی (ولتاژها، جریان ها و شارهای پیوندی) دارای مقادیر ثابتی

می‌شوند. بنابراین معادله ولتاژ به صورت رابطه (۳-۴) به دست می‌آید. از آنجا سرعت قاب مرجع سنکرون در نظر گرفته شده، جریان‌های القا شده در روتور صفر هستند.

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} - \omega \Lambda_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \omega \Lambda_{sd} \end{cases} \quad (3-4)$$

شارهای پیوندی dq موتور به جریان‌های dq موتور وابسته هستند، زیرا آهن مشخصه غیرخطی دارد. نکته قابل توجه این است که جریان‌های dq به صورت همزمان اعمال می‌شوند، بنابراین اثر متقابل شارهای dq نیز بر یکدیگر به دست می‌آید. شارهای dq از جواب‌های میدان به دست می‌آیند. اندوکتانس‌های مغناطیس کننده با رابطه (۴-۴) محاسبه می‌شوند.

$$\begin{aligned} L_{md}(I_d, I_q) &= \frac{\Lambda_{md}(I_d, I_q)}{I_d} \\ L_{mq}(I_d, I_q) &= \frac{\Lambda_{mq}(I_d, I_q)}{I_q} \end{aligned} \quad (4-4)$$

۲-۳-۴- پارامترهای روتور

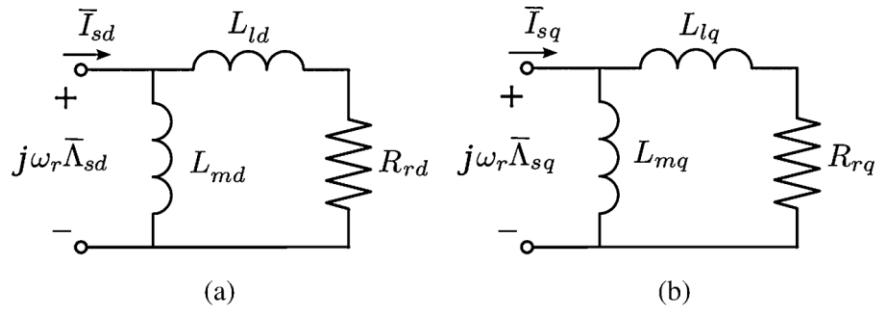
برای محاسبه پارامترهای روتور، بهتر است تا فرکانس روتور در نظر گرفته شود [۱]. با در نظر گرفتن قاب مرجعی که با سرعت روتور می‌چرخد ($\omega_{dq}^e = \omega_m^e$)، فرکانس روتور به صورت $\omega_r = (\omega - \omega_m^e) = (\omega - \omega_{dq}^e)$ به دست می‌آید. با صرف نظر از مقاومت استاتور R_s ، ولتاژهای dq با رابطه (۴-۱) نوشته می‌شوند و با فرکانس الکتریکی ω_r تغییر می‌کنند.

$$\begin{cases} \overline{V_{sd}} = +j \omega_r \overline{\Lambda_{sd}} - \omega_m^e \overline{\Lambda_{sq}} \\ \overline{V_{sq}} = +j \omega_r \overline{\Lambda_{sq}} + \omega_m^e \overline{\Lambda_{sd}} \end{cases} \quad (1-4)$$

بنابراین برای محاسبه پارامترهای روتور لازم است تا شبیه سازی هارمونیک-زمانی المان محدود در فرکانس $f_r = \omega_r / 2\pi$ انجام شود. شبیه سازی المان محدود در شرایط روتور و استاتور ساکن انجام می‌شود و جریان‌های dq سیم پیچی استاتور در فرکانس روتور تغذیه می‌شوند. از آنجا که پارامترهای روتور وابسته به فرکانس روتور هستند، بنابراین چندین اجرای شبیه سازی هارمونیک-زمانی المان محدود لازم است تا مقاومت روتور در فرکانس‌های مختلف محاسبه شود. در شبیه سازی هارمونیک-زمانی المان محدود مشخصه B-H ورق‌های آهنی باید به صورت خطی در نظر گرفته شوند. بنابراین نفوذپذیری مغناطیسی آهن در قسمت مختلف ماشین ثابت^۱ در نظر گرفته می‌شود و از اصل جمع آثار استفاده می‌گردد. به دلیل ضخامت کم پل‌های آهنی روتور، تمرکز شار در این نواحی زیاد بوده و باعث اشباع شدید آن‌ها می‌شود. این موضوع در محاسبه نفوذپذیری آن‌ها باید مد نظر قرار بگیرد.

در تمامی شبیه سازی‌های المان محدود، روتور ثابت شده است، بنابراین مدار معادل مورد نظر به ω تقلیل می‌یابد.

¹ freezing permeability



شکل ۳۴-۲- مدار معادل dq در حالت دائمی (a) محور d (b) محور q [۱]

برای تخمین پارامترهای روتور، جریان‌های dq استاتور در شبیه‌سازی ثابت در نظر گرفته می‌شوند. $\bar{I} = \sqrt{2}I_{rms}$ که $\bar{I}_{sd} = \bar{I}$, $\bar{I}_{sq} = -j\bar{I}$ است. بنابراین، میدان مغناطیسی گردانی بوجود می‌آید که بر هندسه ناهمسانگرد^۱ روتور مدوله^۲ شده است. جریان در میله‌های روتور القا می‌شود و پارامترهای مدار معادل^۰ را می‌توان حساب کرد. شارهای پیوندی $\bar{\Lambda}_{sd}$ و $\bar{\Lambda}_{sq}$ از جواب‌های میدان به دست می‌آیند. بنابراین، ولتاژهای رابطه (۴-۱) محاسبه می‌شوند. پارامترهای مدار معادل را می‌توان برحسب مولفه‌های شار پیوندی به دست آورد.

$$R_{eq,d} = -\omega_r \text{Imag} \left(\frac{\bar{\Lambda}_{sd}}{\bar{I}_{sd}} \right) L_{eq,d} = \text{Real} \left(\frac{\bar{\Lambda}_{sd}}{\bar{I}_{sd}} \right) \quad (۲-۴)$$

$$R_{eq,q} = -\omega_r \text{Imag} \left(\frac{\bar{\Lambda}_{sq}}{\bar{I}_{sq}} \right) L_{eq,q} = \text{Real} \left(\frac{\bar{\Lambda}_{sq}}{\bar{I}_{sq}} \right) \quad (۳-۴)$$

و در نهایت اندوکتانس‌های نشستی و مقاومت‌های روتور با رابطه (۴-۴) و (۴-۵) به دست می‌آیند.

$$L_{l,k} = L_m \frac{L_{eq,k}(L_m - L_{eq,k}) - (R_{eq,k}/\omega)^2}{(L_m - L_{eq,k})^2 + (R_{eq,k}/\omega)^2}, \quad k = d \text{ or } q \quad (۴-۴)$$

$$R_{r,k} = R_{eq,k} \frac{L_m + L_{l,k}}{L_m - L_{eq,k}}, \quad k = d \text{ or } q \quad (۵-۴)$$

باید توجه داشت شرایط تساوی جریان ($|\bar{I}_{sd}| = |\bar{I}_{sq}|$) در شبیه‌سازی المان محدود اعمال می‌شود و نتیجه آن این است که $|\bar{V}_{sd}| \neq |\bar{V}_{sq}|$ زیرا شارهای پیوندی و متناظر با آن‌ها ولتاژها، با هندسه ناهمسانگرد روتور مدوله شده اند. در حالی که در وضعیت واقعی $|\bar{V}_{sd}| = |\bar{V}_{sq}|$ و جریان‌ها باهم اختلاف دارند $|\bar{I}_{sd}| \neq |\bar{I}_{sq}|$.

۴-۵-۴- جمع‌بندی

در این فصل روش‌های طراحی موتور سینکریل خودراه انداز مرور شد. طراحی موتور سینکریل خودراه انداز بر اساس پایه موتور سینکریل روشی است که برای دستیابی به حداکثر بازدهی در حالت دائمی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تاثیر پارامترهای مختلف روتور بر عملکرد موتور سینکریل نشان داده شد. ضخامت و زاویه سدکننده‌های شار به ترتیب بیشترین تاثیر را بر متوسط و رپیل گشتاور موتور دارند، بنابراین برای طراحی بهینه موتور، انجام بهینه‌سازی بر روی آن‌ها ضروری است.

¹ anisotropic

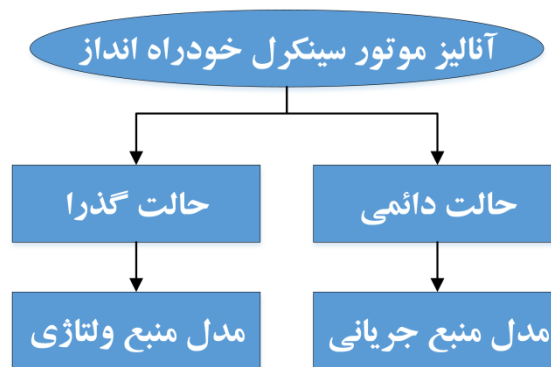
² modulated

طراحی قفس القایی پس از طراحی موتور سینکرل آغاز می‌شود. تاثیر مقاومت و اندوکتانس‌های ناشی روتور بر مشخصه راه اندازی موتور با روابط ساده شده تحلیلی نشان داده شد و روش محاسبه آن‌ها با شبیه‌سازی المان محدود تشریح شد. مقاومت روتور در راستای محور d بیشترین تاثیر را بر قابلیت سنکرونیزم موتور دارد و از آن جا که افزایش حجم میله‌های روتور در نزدیکی محور q باعث کاهش آن می‌شود، بنابراین برای افزایش قابلیت سنکرونیزم باید حجم آلومینیوم در راستای محور q را افزایش داد.

فصل ۵- آنالیز موتور سینکرل خودراه انداز

۱-۵- مقدمه

در یک دسته بندی می توان نحوه آنالیز عملکرد موتور سینکرون خودراه انداز را به دو مرحله حالت دائمی و حالت گذرا مطابق تقسیم کرد. در حالت دائمی و سرعت سنکرون، می توان مدلی بر اساس منبع جریان برای موتور در نظر گرفت و بهینه سازی را برای حداکثر کردن متوسط گشتاور (بازده) و حداقل کردن ریبیل گشتاور بر روی موتور انجام داد. برای ارزیابی حالت گذرا به طور معمول از مدل منبع ولتاژ برای بررسی قابلیت راه اندازی موتور با در نظر گرفتن اینرسی و گشتاور بار استفاده می شود. اگرچه در انتهای این آنالیز نیز عملکرد حالت دائمی به دست می آید، اما عملکرد راه اندازی و سنکرونیزم با دقت بیشتری بررسی می شود و زمان محاسباتی بیش تری نیاز است. در ادامه روابط حالت دائمی و گذرای موتور بر اساس مراجع مرور می شود [۸، ۱۷].



شکل ۱-۵- آنالیز موتور سینکرون خودراه انداز در حالت دائمی و گذرا

۲-۵- روابط حالت دائمی

هنگامی که عملکرد موتور در سرعت سنکرون مد نظر باشد، قفس القایی قابل صرف نظر کردن است، بنابراین موتور سینکرون خودراه انداز به موتور سینکرون تقلیل می یابد. معادلات الکتریکی در قاب مرجع dq که رفتار دینامیکی ولتاژ استاتور موتور سینکرون را توصیف می کند، با رابطه (۱-۲) مشخص می شود:

$$\bar{v}_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\lambda}_s}{dt} + j\omega \bar{\lambda}_s \quad (2-1)$$

که $\bar{v}_s$ ، $\bar{i}_s$ و $\bar{\lambda}_s$ به ترتیب بردار ولتاژ، جریان و شار استاتور است. شار استاتور با رابطه (۵-۱) مشخص می شود.

$$\bar{\lambda}_s = L_{ls} \bar{i}_s + \begin{bmatrix} L_{md} & 0 \\ 0 & L_{mq} \end{bmatrix} \bar{i}_s \quad (1-5)$$

اندوکتانس های محور d و q استاتور L_{sd} و L_{sq} برابر با جمع اندوکتانس های مغناطیس کنندگی و نشتی $L_{ls} + L_{md}$ و $L_{ls} + L_{mq}$ تعریف می شوند، نسبت L_{sd} به L_{sq} با نسبت برجستگی معادل می شود رابطه (۵-۲).

$$\xi = \frac{L_{sd}}{L_{sq}} \quad (2-5)$$

با کمک نسبت برجستگی، ضریب قدرت داخلی موتور سینکرون با رابطه (۵-۳) به دست می آید.

$$IPF_{max} = \cos(\phi) = \frac{\xi - 1}{\xi + 1} \quad (3-5)$$

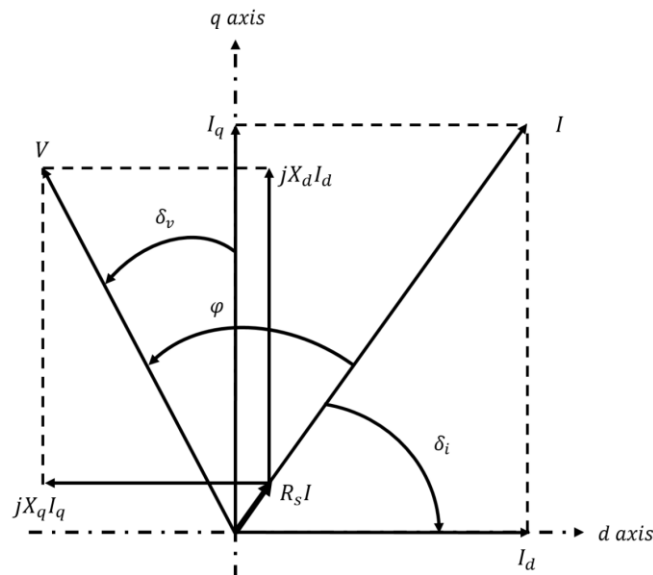
اگر از تحریک جریان استفاده شود، با جایگذاری روابط شار و جریان استاتور در معادله عمومی گشتاور رابطه (4-5)، رابطه گشتاور موتور با رابطه (5-5) مشخص می‌شود. با در نظر گرفتن زاویه بین فازور جریان و محور d (δ_i)، همان‌طور که در نشان داده شده است، رابطه گشتاور (5-5) به رابطه (6-5) تبدیل می‌شود.

$$T_{em} = \frac{3}{2} p \operatorname{Im}(\bar{\lambda}_s^* \bar{i}_s) \quad (4-5)$$

$$T_{em} = \frac{3}{2} p (L_{sd} - L_{sq}) i_{sd} i_{sq} \quad (5-5)$$

$$T_{em} = \frac{3}{2} p (L_{sd} - L_{sq}) I \sin(\delta_i) I \cos(\delta_i) = \frac{3}{4} p (L_{sd} - L_{sq}) I^2 \sin(2\delta_i) \quad (6-5)$$

حداکثر گشتاور وابسته به اختلاف لندوکتانس‌های L_{sd} و L_{sq} است. روابط (3-5) و (5-5) نشان می‌دهد که برای بهینه‌سازی متوسط گشتاور و ضریب قدرت هدف مشترکی را باید دنبال کرد و آن افزایش نسبت برجستگی است.



شکل ۵-۲- دیاگرام فازوری موتور سینکرون [۲۷]

اگر از تحریک ولتاژ استفاده شود، رابطه گشتاور متفاوت خواهد بود. در حالت دائمی شار استاتور با رابطه (7-5) مشخص می‌شود.

$$\begin{bmatrix} \bar{\lambda}_{sd} \\ \bar{\lambda}_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{sd} & 0 \\ 0 & L_{sq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_{sd} \\ \bar{i}_{sq} \end{bmatrix} \quad (7-5)$$

با فرض اینکه تغییرات شار در حالت دائمی صفر است. رابطه ولتاژ استاتور به فرم رابطه (8-5) به دست می‌آید.

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{sd} \\ \bar{V}_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega L_{sq} \\ \omega L_{sd} & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_{sd} \\ \bar{i}_{sq} \end{bmatrix} \quad (8-5)$$

در شرایطی که استاتور مستقیم به شبکه متصل شود، جریان‌ها بر اساس وابستگی به ولتاژ مطابق رابطه (۵-۹) به دست می‌آیند.

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{sd} \\ \bar{I}_{sq} \end{bmatrix} = \frac{1}{R_s^2 + X_d X_q} \begin{bmatrix} R_s & X_q \\ -X_d & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_{sd} \\ \bar{V}_{sq} \end{bmatrix} \quad (۹-۵)$$

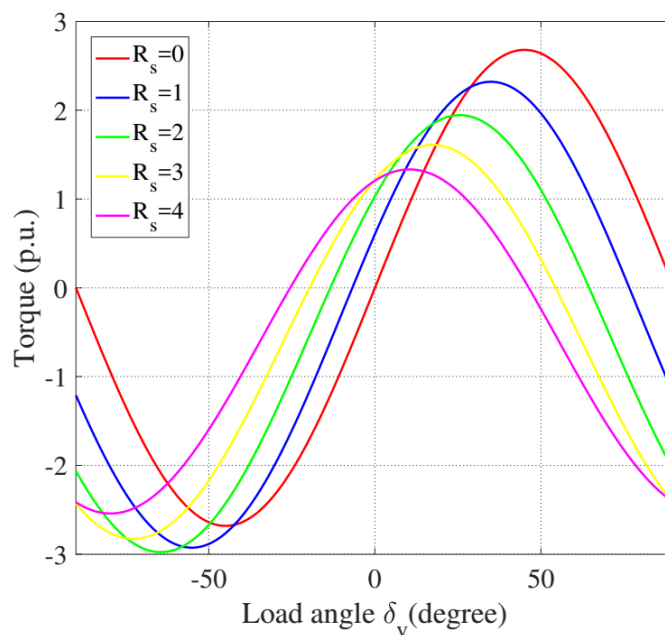
با تعریف زاویه ولتاژ (δ_v) که مشخص‌کننده زاویه بین فازور ولتاژ و محور q است، مولفه‌های محور d و q ولتاژ با رابطه (۵-۱۰) به دست می‌آید.

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\hat{V} \sin(\delta_v) \\ +\hat{V} \cos(\delta_v) \end{bmatrix} \quad (۱۰-۵)$$

با جایگذاری روابط (۵-۹) و (۵-۱۰) در رابطه (۵-۴)، رابطه نهایی گشتاور که برحسب تحریک ولتاژ است با (۵-۱۱) به دست می‌آید.

$$T_{em} = \frac{3}{2} p \frac{V^2}{2} \frac{(L_{sd} - L_{sq})}{(R_s^2 + X_d X_q)^2} \{ (X_d X_q - R_s^2) \sin(2\delta_v) + R_s (X_d - X_q) - R_s (X_d + X_q) \cos(2\delta_v) \} \quad (۱۱-۵)$$

اگر از مقاومت استاتور صرف نظر شود، رابطه گشتاور با تحریک ولتاژ مشابه رابطه گشتاور با تحریک جریان می‌شود. در گشتاور رلوکتانسی پریونیت به ازای مقادیر متفاوت مقاومت استاتور پریونیت شده، نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، افزایش مقاومت استاتور، گشتاور حداکثر^۱ را کاهش داده است و منحنی گشتاور را پایین می‌کشد؛ همچنین با در نظر گرفتن مقاومت استاتور، منحنی گشتاور متقارن نخواهد بود، به خصوص در مورد موتورهای کوچک، اثر مقاومت استاتور قابل صرف نظر کردن نیست [۲۷].



¹ pull-out torque

شکل ۳-۵- گشتاور رلوکتانسی پریونیت به ازای مقادیر متفاوت مقاومت استاتور پریونیت [۲۷]

برای شبیه سازی وضعیت حالت دائمی، سرعت موتور ثابت و برابر سرعت سنکرون در نظر گرفته می شود، بنابراین اثر گذارهای سیستم مکانیکی حذف می شود. اگر از تغذیه منبع جریان برای شبیه سازی استفاده شود، مستقیماً جریان های حالت دائمی را می توان به موتور اعمال کرد، اما اگر از منبع ولتاژ استفاده شود، گذارهای الکترومغناطیسی ناشی از نیروی ضد محرکه^۱ بوجود می آید و تا رسیدن به حالت دائمی بسته به مقاومت و اندوکتانس استاتور مدت زمانی طول می کشد. در [۲۸] مقایسه ای بین موتور سینکرون در شرایط سرعت سنکرون با تغذیه جداگانه منبع ولتاژ و منبع جریان صورت گرفته است. نتایج نشان دهنده این است که جریان و گشتاور موتور سینکرون هنگام تغذیه ولتاژ بسیار شبیه به جریان و گشتاور موتور در شرایط تغذیه جریان است؛ همچنین تلفات آهن نیز در هر دو حالت، تغییرات ناچیزی دارد [۲۸]؛ بنابراین استفاده از مدل منبع جریان برای بهینه سازی طراحی ماشین توجیه پذیر است.

۳-۵- روابط حالت گذرا

در حالت گذرا و سرعت لغزش روابط دینامیکی بیان کننده رفتار الکترومغناطیسی موتور سینکرون خود را با اضافه شدن معادلات روتور به دست می آید.

$$\bar{v}_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\lambda}_s}{dt} + j\omega \bar{\lambda}_s \quad (۱-۵)$$

$$\bar{v}_r = \begin{bmatrix} R_{rd} & 0 \\ 0 & R_{rq} \end{bmatrix} \bar{i}_r + \frac{d\bar{\lambda}_r}{dt} + j(\omega - \omega_m) \bar{\lambda}_r = 0 \quad (۲-۵)$$

$$\bar{\lambda}_s = L_{ls} \bar{i}_s + \begin{bmatrix} L_{md} & 0 \\ 0 & L_{mq} \end{bmatrix} \bar{i}_m \quad (۳-۵)$$

$$\bar{\lambda}_r = \begin{bmatrix} L_{lr} & 0 \\ 0 & L_{lrq} \end{bmatrix} \bar{i}_r + \begin{bmatrix} L_{md} & 0 \\ 0 & L_{mq} \end{bmatrix} \bar{i}_m \quad (۴-۵)$$

$$\bar{i}_m = \bar{i}_s + \bar{i}_r \quad (۵-۵)$$

مشابه حالت قبل، رابطه گشتاور الکتریکی را مجدد می توان به کار برد.

$$T_{em} = \frac{3}{2} p \operatorname{Im}(\bar{\lambda}_s^* \bar{i}_s) \quad (۶-۵)$$

معادله مکانیکی با رابطه (۵-۷) به دست می آید. T_{load} گشتاور بار، J اینرسی معادل و p تعداد جفت قطب است.

$$\frac{1}{p} \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{T_{em} - T_{load}}{J} \quad (۷-۵)$$

در هر مرحله از آنالیز عملکرد موتور چه در حالت دائمی و چه در حالت گذرا می توان از روش های عددی، تحلیلی و یا ترکیبی از این دو استفاده کرد. در ادامه تلاش هایی که در مقالات در زمینه مدل سازی و آنالیز این موتورها صورت گرفته است، مرور می شود.

¹ Back EMF

۴-۵- آنالیز حالت دائمی موتور سینکریل خودراه انداز

در حالت دائمی موتور سینکریل خودراه انداز به موتور سینکریل تبدیل می‌شود بنابراین روش‌هایی که برای آنالیز و طراحی موتور سینکریل به کار می‌رود را می‌توان برای موتور سینکریل خودراه انداز در حالت دائمی به کار برد. روش آنالیز المان محدود (FEA^۱) یک روند معمول برای آنالیز ماشین‌های الکتریکی است. در ابتدا مقالاتی مرور می‌شود که از FEA برای طراحی موتور سینکریل استفاده کرده‌اند. در کنار دقت بالایی که روش‌های عددی مانند FEA دارند؛ معایبی هم مانند: زمان محاسباتی زیاد و نیاز به ساخت مدل هندسی برای هر آنالیز در الگوریتم بهینه‌سازی دارد. بنابراین تلاش محققان به این سمت بوده است تا به کمک روش‌هایی تا حد ممکن زمان شبیه‌سازی را کاهش دهند. از میان روش‌های تحلیلی، روش مدار معادل مغناطیسی (MEC^۲)، روش تابع سیم‌پیچی (WFM^۳) و نگاشت همدیسی (CM^۴) مرور شده و توانایی‌ها و محدودیت‌های روش‌های تحلیلی برای طراحی موتور سینکریل ارائه می‌گردد.

۱-۴-۵- روش‌های آنالیز عددی

در [۳۹] استراتژی بهینه‌سازی هندسه روتور موتور سینکریل، روند سیستماتیک عددی با استفاده از شبیه‌سازی دوبعدی FEA برای یافتن متغیرهای طراحی شامل: ضخامت سدکننده‌های شار، فاصله سدکننده‌های شار از محور، ضریب ایزولاسیون، ضخامت پل‌های مماسی و شعاعی روتور انتخاب شده است. ضریب ایزولاسیون به صورت نسبت ضخامت هوا به ضخامت آهن در مسیر محور-q روتور تعریف شده است.

در مطالعه‌ای که در [۳۷] صورت گرفته است، علاوه بر ضریب ایزولاسیون در محور-q، ضریب ایزولاسیون در محور-d نیز به عنوان پارامتر بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. در این مطالعه با استفاده از روش‌های تحلیلی ابتدا طرح اولیه روتور موتور سینکریل به دست می‌آید. سپس از درون پارامترهای هندسی روتور (پارامترهای میکروسکوپی) سه پارامتر اصلی (پارامترهای ماکروسکوپی) ضریب ایزولاسیون در محور-q و d (K_{wd} و K_{wq}) که با روابطه (۱-۵) و (۲-۵) مشخص شده اند، برای بهینه‌سازی متوسط گشتاور و زاویه گام شیار روتور (α_m در ۰) برای کاهش ریبیل گشتاور در نظر گرفته شده است.

بهینه‌سازی ریبیل گشتاور و متوسط گشتاور به صورت مجزا صورت گرفته است. با استفاده از FEA و آنالیز حساسیت روی پارامترهای اصلی، بهینه‌سازی صورت می‌گیرد. در ۰ که روتور با دو سدکننده شار را نشان می‌دهد، ضخامت سدکننده‌های شار در محور-q ($W1_1$ و $W1_2$) ضخامت سدکننده‌های شار در محور-d ($W2_d$ و $W1_d$) و ضخامت لایه‌های آهن (S_1 ، S_2 و S_3) پارامترهای میکروسکوپی هستند.

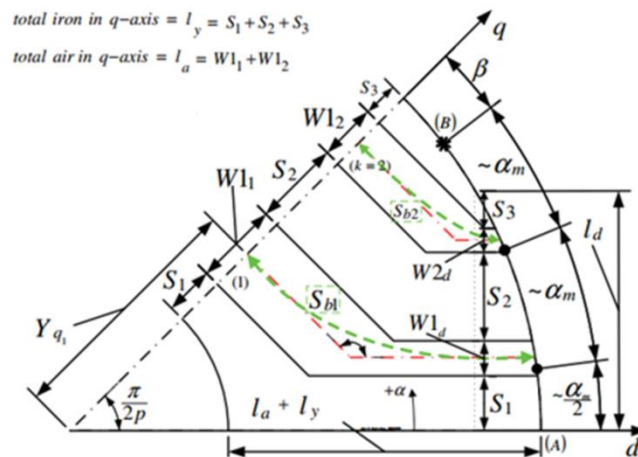
در [۳۷] نشان داده شد که بهینه‌سازی مستقل ریبیل و متوسط گشتاور امکان‌پذیر است، زیرا با ثابت در نظر گرفتن یکی دیگری تغییرات اندکی دارد.

¹ Finite Element Analysis

² Magnetic Equivalent Circuit

³ Winding Function Method

⁴ Conformal Mapping

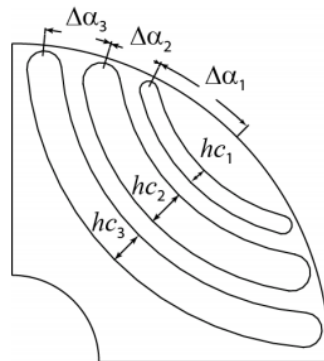


شکل ۴-۵- هندسه روتور موتور سینکریل با دو سدکننده شار و تعریف پارامترها [۳۷]

$$K_{wq} = \frac{\text{مجموع ضخامت هادی های شار (آهن) در محور } q}{\text{مجموع ضخامت سدکننده های شار (هوا) در محور } q} = \frac{W1_1 + W1_2}{S_1 + S_2 + S_3} \quad (۱-۵)$$

$$K_{wd} = \frac{\text{مجموع ضخامت هادی های شار (آهن) در محور } d}{\text{مجموع ضخامت سدکننده های شار (هوا) در محور } d} = \frac{(W1_d + W2_d)}{l_d - (W1_d + W2_d)} \quad (۲-۵)$$

استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفه برای طراحی موتور سینکریل، ساده‌سازی‌هایی در شکل روتور لازم دارد تا تعداد تکرارها در فرایند بهینه‌سازی کاهش یابد. به عنوان مثال در [۱۳، ۴۹] برای بهینه‌سازی چندهدفه (بهینه‌سازی همزمان متوسط و ریپل گشتاور) از لایه‌های روتور با شکل‌های دایره‌ای، که تنها با دو متغیر در هر لایه مشخص می‌شوند، استفاده شده‌است. ۰ را ببینید. متغیرهای طراحی شامل ضخامت (h_c) و زاویه ($\Delta\alpha$) هر کدام از سدکننده‌های شار است. طراحی روتور موتور سینکریل با ورق‌های متقاطع و چند لایه در طی سال‌ها تلاش محققان فرمول بندی شده‌است. با این وجود یافتن یک روند طراحی یکپارچه هنوز یک مشکل آشکار است [۱۳].



شکل ۵-۵- هندسه روتور موتور سینکریل با سدکننده‌های شار دایره‌ای شکل و تعریف پارامترها [۱۳].

با توجه به متغیرهای زیاد طراحی روتور، استفاده از روش FEA برای بهینه‌سازی این موتورها بسیار زمان‌بر است. در [۱۳] که از FEA به همراه بهینه‌سازی تکاملی چندهدفه برای بهبود مشخصه گشتاور موتور سینکریل استفاده شده است، با انتخاب تصادفی نقاطی از یک گام شیوار استاتور که گشتاور در آن محاسبه می‌شود سعی در کاهش تعداد نقاط محاسبه گشتاور و به تبع

آن کاهش زمان شبیه سازی شده است. در [۵۰] برای تسریع در روند بهینه سازی از مدل جایگزین^۱ Kriging در کنار آنالیز المان محدود دو بعدی بهره گرفته است. در [۳۷] نیز روند طراحی سیستماتیک برای بهبود مشخصه گشتاور موتور سینکرون بر مبنای تعداد محدودی آنالیز FE ارائه شده است. در این روش جواب نهایی لزوماً بهینه نیست، اما با ترکیب روش تحلیلی و FEA تعداد ماشین‌هایی که ارزیابی می‌شوند را تا حدودی کاهش داده است.

۲-۴-۵- روش‌های تحلیلی

روش MEC می‌تواند ابزار مفیدی برای ارزیابی سریع عملکرد ماشین باشد. با این وجود از این روش معمولاً برای محاسبه اندوکتانس‌های محور-d و q و مقدار متوسط گشتاور استفاده می‌شود [۵۱]. در مطالعه‌ای که در [۵۲] انجام شد، با استفاده از روش MEC مدل روتور به دست می‌آید و اندوکتانس‌های محور-d و q مرتبط با پارامترهای هندسی روتور تعریف می‌شوند؛ سپس با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی و مدل MEC بهینه‌سازی بر روی پارامترهای روتور برای دستیابی به بیشینه گشتاور صورت می‌گیرد. در نهایت با FEA مدل نهایی به دست می‌آید.

روش MEC به تنهایی توانایی تخمین دقیق شکل موج میدان فاصله هوایی و یا رپیل گشتاور را ندارد، مگر اینکه شبکه رلوکتانسی بسیار متراکم در نظر گرفته شود که در این صورت با مدل FEA از لحاظ زمان تفاوت چندانی ندارد. بنابراین محققان به دنبال ترکیب روش MEC با دیگر روش‌ها بوده‌اند.

در [۴۱] روشی تحلیلی برای موتور سینکرون ارائه شد که در آن مدل MEC تنها برای روتور به کار گرفته شده است. در این روش، افت پتانسیل مغناطیسی در روتور موتور سینکرون را به کمک روش MEC بر اساس تابعی از پتانسیل مغناطیسی استاتور که بر اساس بسط سری فوریه بیان شده است، به دست می‌آید و با استفاده از تفاضل پتانسیل روتور و استاتور، میدان شعاعی فاصله هوایی یکنواخت (صاف و بدون شیار) به دست می‌آید و سپس برای محاسبه گشتاور و رپیل استفاده می‌شود. در [۳۸] از این روش به همراه الگوریتم بهینه سازی سیمپلکس برای مشخص شدن زوایای انتهایی سدکننده‌های شار برای کاهش رپیل گشتاور استفاده شده است. در [۵۳] روش تحلیلی مشابه برای محاسبه میدان شعاعی فاصله هوایی موتور سینکرون با در نظر گرفتن اثر شیار استاتور به وسیله تابع بدون بعد پرمیانس شیار ارائه شده است که در آن، روش تابع سیم پیچی برای مدل سازی استاتور و روش MEC برای مدل روتور به کار گرفته شده است. روش CM یک روش تحلیلی معمول برای آنالیز میدان در ماشین‌ها بوده و قابلیت انعطاف در ترکیب با دیگر روش‌ها را دارد. استفاده از CM برای موتورهای سینکرون در محاسبه رلوکتانس سدکننده شار دایره‌ای شکل [۲۶] و به دست آوردن اثر شیار در میدان شعاعی فاصله هوایی به وسیله تابع پرمیانس شیار [۲۷] بوده است. اگرچه اثر شیار استاتور در میدان فاصله هوایی باعث ایجاد رپیل گشتاور می‌شود، اما برای موتور سینکرون تا کنون این اثر تنها در مؤلفه شعاعی میدان به دست آمده است و سپس از میدان شعاعی برای محاسبه گشتاور استفاده می‌شود دقت روش‌های ارائه شده به دلیل صرف نظر کردن از مؤلفه مماسی میدان فاصله هوایی برای محاسبه رپیل گشتاور کم است.

۵-۵- تحلیل دینامیکی موتور سینکرون خودراه انداز

روند طراحی برای ماشین‌های الکتریکی به طور معمول با مدل‌های تحلیلی آغاز می‌شود، اما روش‌های تحلیلی اغلب این توانایی را ندارند که رفتار ماشین، به خصوص گذراهای راه‌اندازی را با دقت تخمین بزنند. در خصوص موتور سینکرون خودراه انداز این مسئله وقتی تشدید می‌شود که قفس القایی روتور نیز به صورت نامتقارن باشد. بیان تحلیلی شارهای پیوندی روتور با در نظر گرفتن عدم تعادل بین امپدانس میله‌ها، دشوار است [۵۴]. در [۵۵] روش تحلیلی به کمک آنالیز المان محدود برای تخمین قابلیت راه‌اندازی LSSPM ارائه شده است. طراحی موتور سینکرون خودراه انداز با مدار معادل دینامیکی در [۵۶] صورت گرفته است. روش‌های تحلیلی ارائه شده برای مدل سازی دینامیکی این موتورها [۵۵-۵۷] حداقل برای تخمین پارامترهای موتور از

¹ Surrogate model

آنالیز المان محدود کمک می‌گیرند؛ بنابراین به کار بردن لفظ تحلیلی-عددی برای آن‌ها شاید مناسب‌تر باشد. در ادامه روش‌های ارائه شده در مراجع برای مدل‌سازی دینامیکی موتورهای سنکرون خودراه انداز (LSSM¹) مرور می‌شود. محدودیت‌های آن‌ها برای مدل‌سازی بررسی می‌شود.

۱-۵-۵- مدل‌سازی با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای روتور

در [۵۶] مدل‌سازی دینامیکی با روابط تحلیلی بر اساس مدار معادل dq برای موتور سینکرون خودراه انداز صورت گرفته است. پارامترهای روتور ثابت در نظر گرفته شده ($R_{rd} = cte$, $R_{rq} = cte$, $L_{lrd} = cte$, $L_{lrq} = cte$) و اثر اشباع اندوکتانس‌های مغناطیس‌کنندگی با آنالیز المان محدود محاسبه شده است. روابط مربوط به مدل‌سازی در روابط (۵-۱) تا (۵-۶) آمده است.

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\lambda_{sd}}{dt} - j\omega\lambda_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\lambda_{sq}}{dt} + j\omega\lambda_{sd} \end{cases} \quad (۱-۵)$$

$$\begin{cases} v_{rd} = R_{rd} i_{rd} + \frac{d\lambda_{rd}}{dt} - j(\omega - \omega_m)\lambda_{rq} = 0 \\ v_{rq} = R_{rq} i_{rq} + \frac{d\lambda_{rq}}{dt} + j(\omega - \omega_m)\lambda_{rd} = 0 \end{cases} \quad (۲-۵)$$

$$\begin{cases} \lambda_{sd} = L_{ls} i_{sd} + L_{md}(i_{sd} + i_{rd}) \\ \lambda_{sq} = L_{ls} i_{sq} + L_{mq}(i_{sq} + i_{rq}) \end{cases} \quad (۳-۵)$$

$$\begin{cases} \lambda_{rd} = L_{lrd} i_{rd} + L_{md}(i_{sd} + i_{rd}) \\ \lambda_{rq} = L_{lrq} i_{rq} + L_{mq}(i_{sq} + i_{rq}) \end{cases} \quad (۴-۵)$$

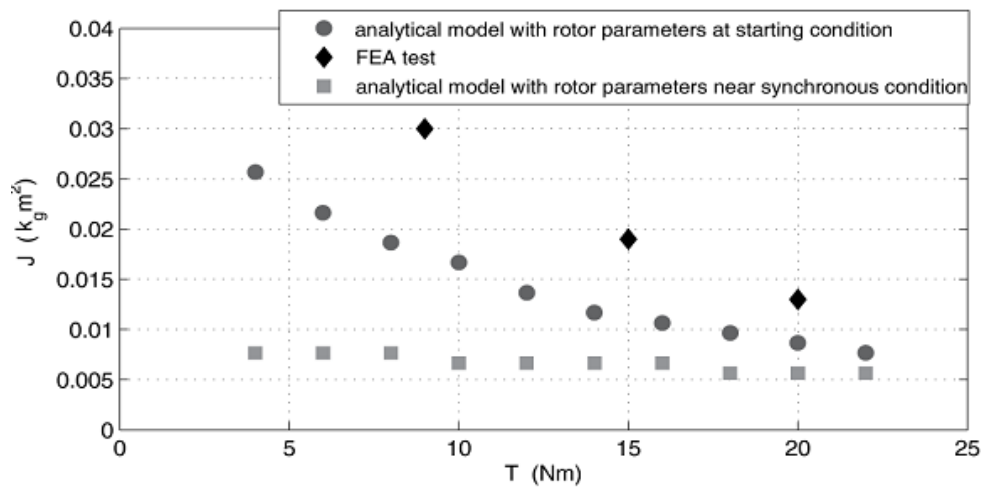
$$T_{em} = \frac{3}{2} p (\lambda_{sd} i_{sq} - \lambda_{sq} i_{sd}) \quad (۵-۵)$$

$$\frac{1}{p} \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{T_{em} - T_{load}}{J} \quad (۶-۵)$$

• نتایج مقایسه گشتاور Pull-in (حداکثر گشتاوری که موتور می‌تواند بار را در شرایط سنکرونیزم حفظ کند) با روش تحلیلی مدار معادل و روش آنالیز المان محدود را نشان می‌دهد. نتایج نشان دهنده دقت ناکافی روش تحلیلی نسبت به آنالیز المان محدود است.

شبیه‌سازی با روش تحلیلی، وابستگی زیادی به تخمین درست از پارامترهای روتور دارد. با جایگذاری پارامترهای روتور در شرایط راه‌اندازی و یا در شرایط نزدیک سنکرون، نتایج متفاوتی برای گشتاور Pull-in به دست آمده و در هر دو مورد نسبت به روش المان محدود، اختلاف نتایج است.

¹ Line Start Synchronous Motors



شکل ۶-۵- مشخصه گشتاور Pull-in نمونه موتور سینکرونل خودراه انداز بر اساس تابعی از کل اینرسی [۵۶]

۴-۱-۱-۱-۵- مدل سازی با متغیر در نظر گرفتن پارامترهای روتور

پارامترهای روتور تابعی از فرکانس روتور هستند. همانطور که در بخش قبل نشان داده شد، ثابت در نظر گرفتن مقاومت و اندوکتانس نشستی روتور باعث اختلاف زیاد نتایج مدل سازی با آنالیز المان محدود می شود. در ادامه مرآجعی که مدل سازی دینامیک را بر حسب تخمین پارامترهای روتور بر اساس تابعی از فرکانس انجام داده اند، مرور می شوند [۵۵، ۵۷]. در [۵۵] از مدار معادل موتور القایی برای تخمین پارامترهای روتور استفاده شده و در [۵۷] از مدار معادل qd موتور سینکرونل خودراه انداز برای تخمین پارامترها استفاده شده است.

۲-۵-۱-۵- مدل سازی با تخمین پارامترهای روتور توسط مدار معادل موتور القایی

موتورهای سینکرونل خودراه انداز را می توان مشابه موتورهای LSSPM در نظر گرفت با این تفاوت که آهنربای دائم در داخل سدکننده های شار وجود ندارد؛ بنابراین از روابط مربوط به مدل سازی LSSPM با تغییر جزئی می توان برای موتور سینکرونل خودراه انداز استفاده کرد ($\lambda_{pm} = 0$). در مدل سازی صورت گرفته برای موتور LSSPM [۵۵]، راکتانس پراکندگی و مقاومت روتور ارجاع یافته به سمت استاتور بر اساس تابعی از سرعت لغزش محاسبه می شوند ($R_r = f(s)$ و $L_{lr} = f(s)$)، زیرا با افزایش سرعت روتور، عمق نفوذ جریان های گردابی به تدریج افزایش می یابد و سطح مقطع هادی افزایش پیدا می کند؛ در نتیجه مقاومت روتور و راکتانس آن افزایش پیدا می کند. پارامترهای روتور با آنالیز هارمونیک المان محدود به دست می آیند. مشابه موتورهای القایی، مقاومت و راکتانس نشستی روتور در هر دو محور d و q یکسان در نظر گرفته شده است

$$(R_{rd} = R_{rq} = R_r \text{ و } L_{lrd} = L_{lrq} = L_{lr})$$

(۱-۵)

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\lambda_{sd}}{dt} - j\omega_m \lambda_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\lambda_{sq}}{dt} + j\omega_m \lambda_{sd} \end{cases}$$

(۲-۵)

$$\begin{cases} v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\lambda_{rd}}{dt} = 0 \\ v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\lambda_{rq}}{dt} = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \lambda_{sd} = L_{ls} i_{sd} + L_{md}(i_{sd} + i_{rd}) - \lambda_{pm} \\ \lambda_{sq} = L_{ls} i_{sq} + L_{mq}(i_{sq} + i_{rq}) \end{cases} \quad (3-5)$$

$$\begin{cases} \lambda_{rd} = L_{lr} i_{sd} + L_{md}(i_{sd} + i_{rd}) - \lambda_{pm} \\ \lambda_{rq} = L_{lr} i_{sq} + L_{mq}(i_{sq} + i_{rq}) \end{cases} \quad (4-5)$$

$$T_{em} = \frac{3}{2} p (\lambda_{sd} i_{sq} - \lambda_{sq} i_{sd}) \quad (5-5)$$

$$\frac{1}{p} \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{T_{em} - T_{load}}{J} \quad (6-5)$$

شکل ۲-۸ فلوجارت روش ارائه شده برای مدل سازی LSSPM را نشان می دهد [۵۵]. با مشخص شدن پارامترهای استاتور و روتور از طریق حل معادلات مدار معادل محور d و q که در (۵-۱) تا (۵-۶) آمده است، شبیه سازی دینامیکی موتور صورت می گیرد.

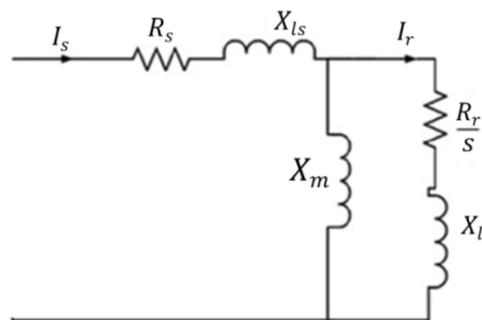
- **پارامترهای استاتور:** پارامترهای استاتور در مدل سازی ثابت در نظر گرفته شده اند. مقاومت استاتور با تست متداول DC مشخص می شود. اندوکتانس های L_{qs} و L_{ds} از طریق تست لغزش به دست می آیند. اندوکتانس نشتی استاتور از تست روتور قفل شده و تست بی باری در نزدیکی سرعت سنکرون، همانند موتور القایی محاسبه می شود.
- **پارامترهای روتور:** قبل از مشخص شدن پارامترهای روتور، راکتانس مغناطیس کنندگی (X_m) از طریق آنالیز المان محدود در سرعت سنکرون به دست می آید. روتور در سرعت سنکرون چرخانده می شود، بنابراین القای جریان های گردابی درون هسته روتور وجود نخواهد داشت. راکتانس مغناطیس کنندگی (X_m) با تقسیم شار پیوندی فاصله هوایی بر ثانیه (V_m) بر جریان استاتور (I_s) با رابطه (۵-۷) به دست می آید.

$$X_m = \frac{V_m}{I_s} \quad (7-5)$$

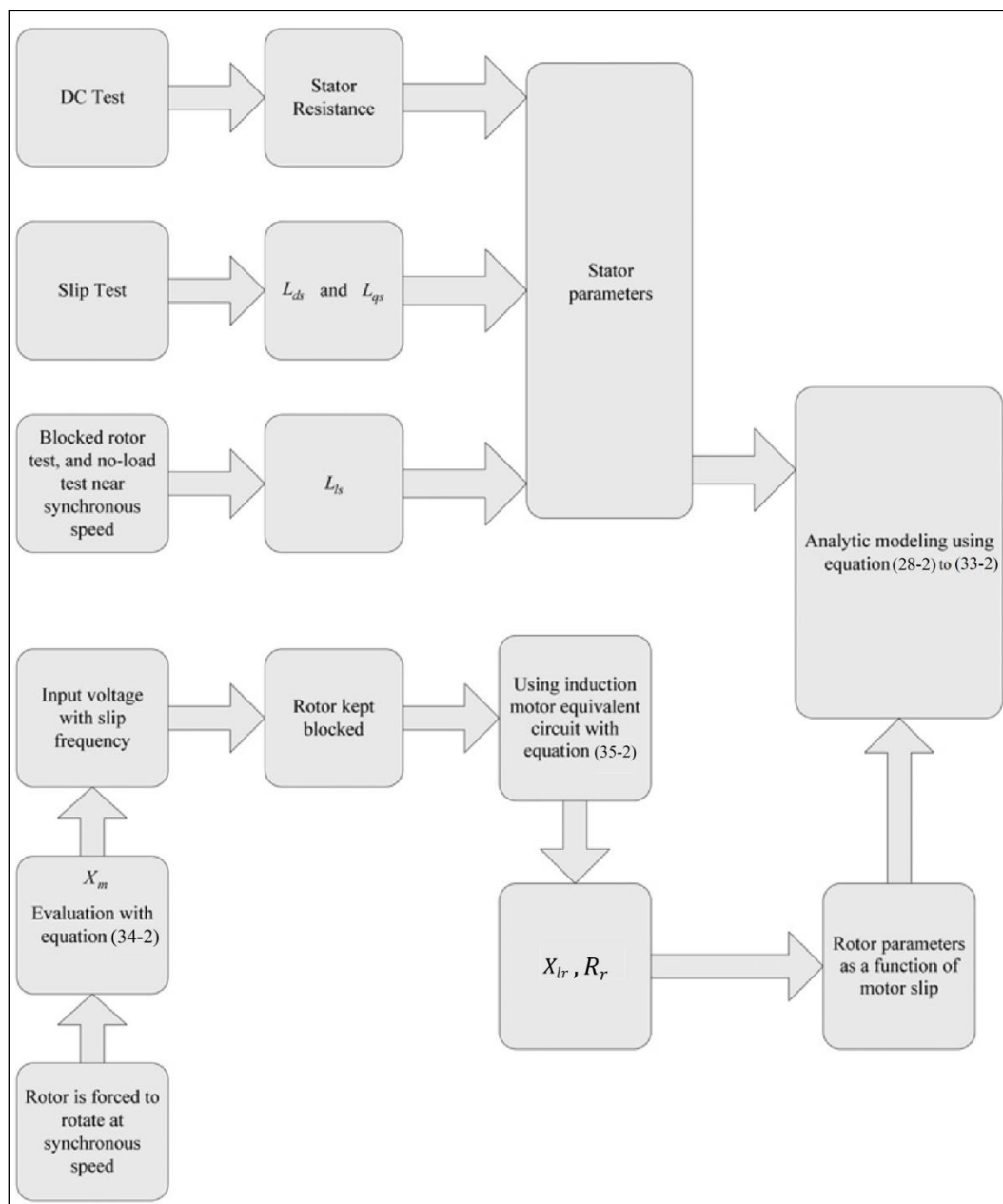
در مدار معادل IEEE موتور القایی نشان داده شده است. برای تعیین پارامترهای روتور، شبیه سازی هارمونیکی المان محدود لازم است. در هر سرعت لغزش، درحالی که روتور قفل شده است، ولتاژهای سینوسی سه فاز با فرکانس لغزش به استاتور اعمال می شود. در این شرایط جریان های گردابی با فرکانس لغزش در روتور القا می شود. مولفه اصلی شار پیوندی بر ثانیه (V_{m1}) استخراج می شود. در هر سرعت لغزش پارامترهای روتور (R_r و X_{lr}) با توجه به مدار معادل ۰ با (۵-۸) محاسبه می شوند.

$$X_{lr} + R_r = \frac{V_{m1}}{(I_{s1} + (V_{m1}/X_m))} \quad (8-5)$$

در رابطه (۵-۶)، I_{s1} مولفه اصلی جریان است.

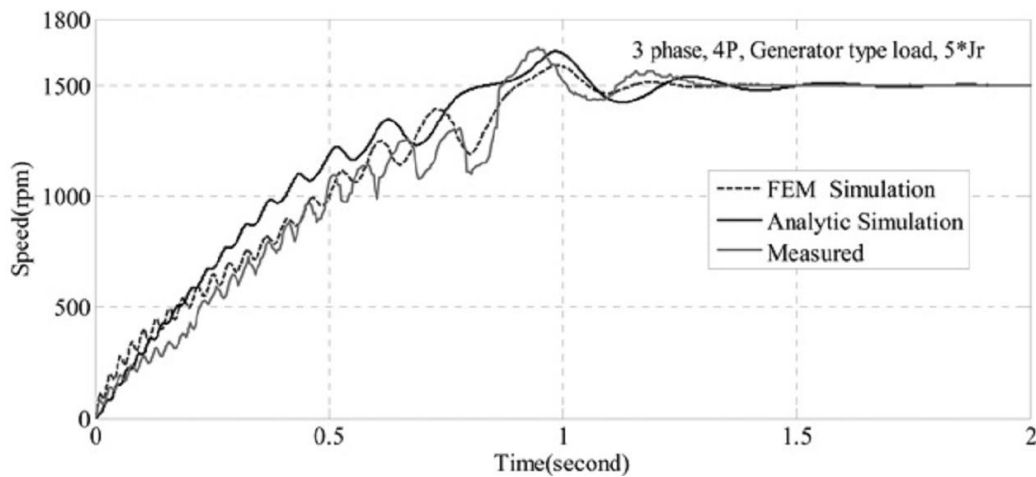


شکل ۷-۵- مدار معادل IEEE موتور القایی [۵۵]



شکل ۸-۵- فلوچارت محاسبه پارامترهای موتور و روش تحلیلی [۵۵]

• نتایج مقایسه محاسبه سرعت موتور در حین راه اندازی بار دارای گشتاور خطی با روش ارائه شده [۵۵]، روش المان محدود و نتایج اندازه گیری را نشان می دهد. دقت نتایج روش المان محدود نسبت به داده های اندازه گیری نزدیک تر است.



شکل ۹-۵- مقایسه نتایج روش تحلیلی، المان محدود و نتایج اندازه گیری [۵۵]

۳-۱-۵-۵- مدل سازی با تخمین پارامترهای روتور توسط مدار معادل dq

در [۵۷] مدل تحلیلی با کمک آنالیز المان محدود دو بعدی برای مدل سازی گذرای LSSM ارائه شده است. مشابه حالت قبل پارامترهای روتور با آنالیز المان محدود به دست می آیند و با جایگذاری در مدار معادل dq مدل دینامیکی به دست می آید؛ با این تفاوت که در مدل سازی صورت گرفته اندوکتانس های ناشی و مقاومت های روتور در مسیر محور d و q متفاوت در نظر گرفته شده اند. کل اندوکتانس های ناشی در سمت روتور در نظر گرفته شده است. روابط به کار رفته در مدل سازی [۵۷] در روابط (۵-۱) تا (۵-۶) آمده است.

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\lambda_{sd}}{dt} - j\omega_m \lambda_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\lambda_{sq}}{dt} + j\omega_m \lambda_{sd} \end{cases} \quad (5-1)$$

$$\begin{cases} v_{rd} = R_{rd} i_{rd} + \frac{d\lambda_{rd}}{dt} = 0 \\ v_{rq} = R_{rq} i_{rq} + \frac{d\lambda_{rq}}{dt} = 0 \end{cases} \quad (5-2)$$

$$\begin{cases} \lambda_{sd} = L_{md}(i_{sd} + i_{rd}) \\ \lambda_{sq} = L_{mq}(i_{sq} + i_{rq}) - \lambda_{pm} \end{cases} \quad (5-3)$$

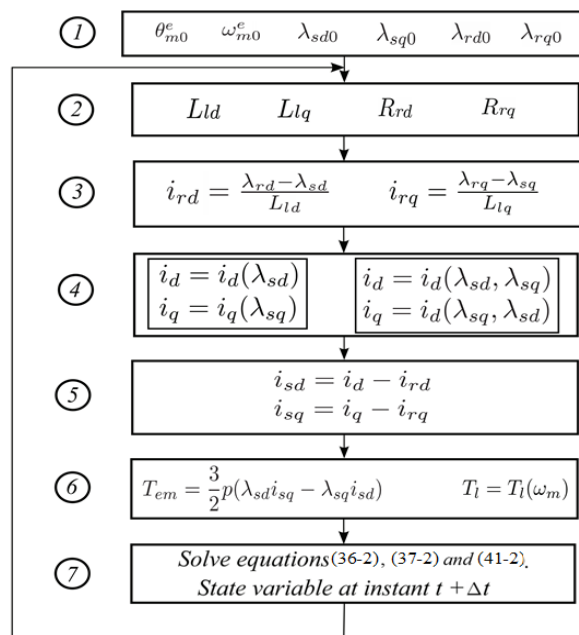
$$\begin{cases} \lambda_{rd} = L_{ld} i_{rd} + L_{md}(i_{sd} + i_{rd}) \\ \lambda_{rq} = L_{lq} i_{rq} + L_{mq}(i_{sq} + i_{rq}) - \lambda_{pm} \end{cases} \quad (5-4)$$

$$T_{em} = \frac{3}{2} p (\lambda_{sd} i_{sq} - \lambda_{sq} i_{sd}) \quad (5-5)$$

$$\frac{1}{p} \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{T_{em} - T_{load}}{J} \quad (5-6)$$

فلوچارت روش ارائه شده در * نشان داده شده است. مراحل انجام فلوچارت به شرح زیر است:

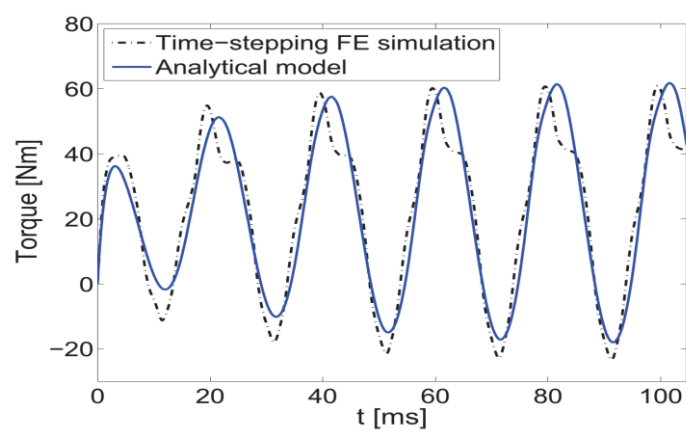
- **مرحله اول:** در این مرحله مقادیر اولیه برای متغیرهای حالت تنظیم می‌شود.
- **مرحله دوم:** برای هر گام شبیه‌سازی پارامترهای روتور بر اساس تابعی از فرکانس روتور با روش ارائه شده در [۱] محاسبه می‌شوند.
- **مرحله سوم:** جریان‌های روتور بر اساس شارهای پیوندی محاسبه می‌شوند.
- **مرحله چهارم:** جریان‌های مغناطیس‌کنندگی در حالت در نظر گرفتن اثر اشباع متقاطع^۱ و یا عدم اشباع متقاطع بر اساس جداولی که از قبل اندوکتانس‌های مغناطیس‌کنندگی را به ازای جریان‌های مختلف با آنالیز المان محدود به دست آورده، محاسبه می‌شوند.
- **مرحله پنجم:** جریان‌های استاتور بر اساس مدار معادل موتور به دست می‌آید.
- **مرحله ششم:** گشتاور الکترومغناطیسی و گشتاور بار محاسبه می‌شوند.
- **مرحله هفتم:** تغییرات متغیرهای حالت محاسبه شده و انتگرال گیری صورت می‌گیرد.



شکل ۱۰-۵- فلوچارت مدل دینامیکی [۵۷]

* نتایج محاسبه گشتاور در شرایط روتور قفل شده LSSPM بر اساس مدل تحلیلی [۵۷] و مقایسه آن با نتایج روش المان محدود آمده است. نتایج روش تحلیلی نسبت به آنالیز المان محدود دقت خوبی دارد. اعوجاج منحنی گشتاور در روش تحلیلی ناشی از صرف نظر کردن از مولفه‌های هارمونیک MMF فاصله هوایی و یا اشباع آهن است [۵۷].

¹ Cross saturation



شکل ۱۱-۵- مشخصه گشتاور بر حسب زمان، شرایط روتور قفل شده [۵۷]

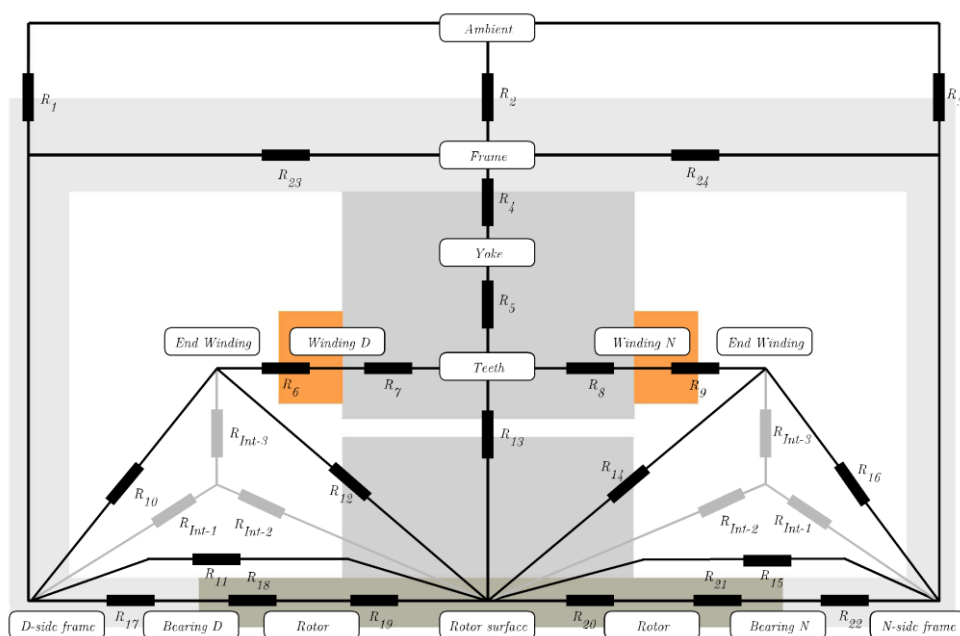
فصل ۶- تحلیل حرارتی موتور سینکرل خود راه- انداز

۶-۱- مقدمه

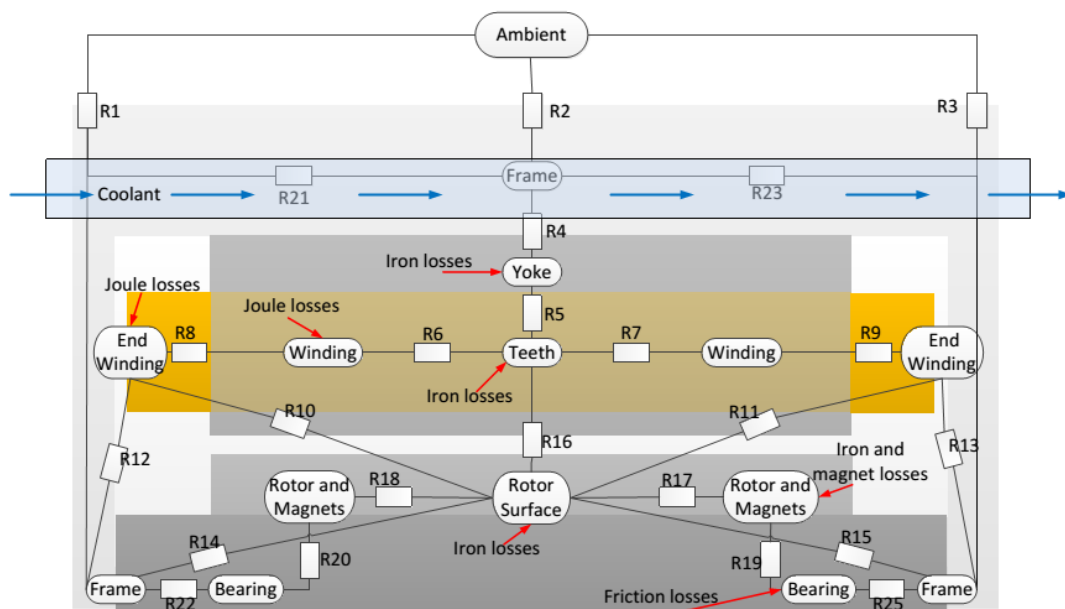
به دست آوردن یک مدل حرارتی برای ماشین برای تخمین دمای آن در شرایط کاری مختلف بسیار مفید است؛ زیرا عمر عایق یک ماشین به دمای آن وابستگی زیادی دارد. در صورتی که دمای ماشین خیلی کمتر از کلاس عایقی آن انتخاب شود، هزینه اضافی بر ساخت ماشین تحمیل شده است و در شرایطی که دمای ماشین به کلاس عایقی آن نزدیک و یا بیشتر از آن باشد، عمر مفید ماشین کاهش خواهد یافت. تخمین افزایش دمای ماشین در مرحله قبل و بعد از ساخت می‌تواند صورت پذیرد. در مرحله اولیه طراحی تخمین افزایش دمای موتور به انتخاب ابعاد مناسب موتور و تعیین کلاس عایقی آن کمک می‌کند. در مرحله بعد از ساخت تعیین دمای موتور برای صحت سنجی مدل‌های حرارتی و تخمین قابلیت اضافه بار موتور مفید خواهد بود. برای تحلیل حرارتی موتور سینکرون خودراه انداز در حالت دائمی، می‌توان از مدل‌های موجود برای موتور سینکرون استفاده کرد؛ زیرا موتور سینکرون خودراه انداز در حالت دائمی همانند موتور سینکرون رفتار می‌کند. در [۵۸] و [۵۹] مدار معادل حرارتی کامل برای موتور سینکرون توسعه داده شده است. در [۶۰] مدل حرارتی ساده برای تخمین افزایش دمای موتور در مرحله اولیه طراحی ارائه شده است. این مدل حرارتی می‌تواند برای تحلیل افزایش دمای ترکیب‌های مختلف شیار استاتور با دقت مناسبی به کار رود. در [۱۷] بعد از ساخت موتور بر اساس نتایج اندازه‌گیری، روابطی برای تخمین افزایش دمای موتور سینکرون خودراه انداز ارائه شده است. دو مورد اخیر به دلیل سادگی پیاده سازی و زمان محاسباتی کم برای تحلیل حرارتی موتور با جزئیات معرفی می‌شود.

۶-۲- مدل حرارتی کامل

نمونه مدار معادل حرارتی کامل موتور در شکل ۳-۱ و شکل ۳-۲ نشان داده شده است. در [۵۸] مدار معادل حرارتی برای موتور سینکرون با خنک کاری طبیعی توسعه داده شده است. دمای حالت دائمی موتور بر اساس هندسه موتور تخمین زده می‌شود. جزئیات مربوط به محاسبات پارامترهای فشرده در مرجع آمده است. ثابت دمایی انتقال حرارت از بدنه موتور به محیط بر اساس داده اندازه‌گیری به دست آمده است و منابع تلفات بر اساس داده‌های اندازه‌گیری به شبکه دمایی اعمال شده‌اند. در [۵۹] مدار معادل حرارتی کامل موتور سینکرون با خنک کاری مایع به دست آمده است و با مدار معادل مغناطیسی کوپل شده است. با استفاده از این روش امکان به دست آوردن نقشه‌های بازدهی در تمامی نقاط منحنی گشتاور-سرعت وجود دارد. منابع ایجاد تلفات در موتور بر اساس مدل مغناطیسی ماشین محاسبه شده است. در شکل ۳-۲ منابع تلفات با پیکان‌های قرمز نشان داده شده است و پیکان‌های آبی مربوط به مایع خنک کننده است که به صورت تلفات منفی در نظر گرفته شده است.



شکل ۶-۱- مدار معادل حرارتی کامل موتور



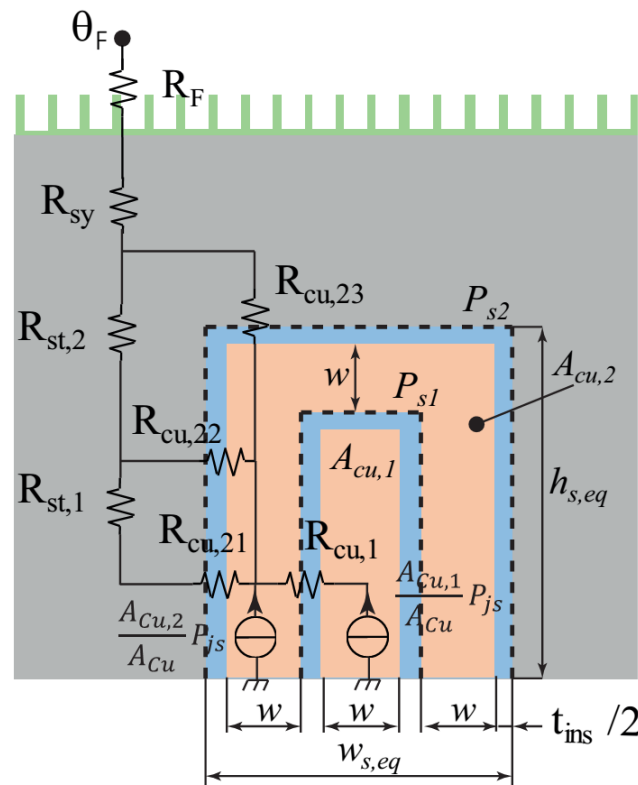
شکل ۶-۲- مدار معادل حرارتی موتور با خنک کاری مایع

۶-۳- مدل حرارتی ساده

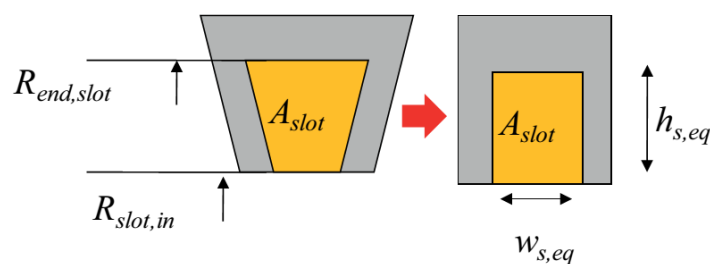
در [۶۰] مدل حرارتی ساده برای تخمین افزایش دمای سیم‌پیچی نسبت به دمای فریم ارائه شده است. این مدل برای تخمین دمای دقیق قسمت‌های مختلف موتور مناسب نیست و از آن می‌توان برای تخمین افزایش دمای سیم‌پیچی نسبت به فریم در مرحله اولیه طراحی استفاده کرد.

مدل دمایی، افزایش دما را در حالت دائمی محاسبه می‌کند، بنابراین از خازن‌های حرارتی صرف نظر می‌شود. با فرض اینکه پدیده‌های الکترومغناطیسی از حرارتی بسیار سریع‌تر هستند، می‌توان فرض کرد که تلفات اهمی به صورت یکنواخت در شیارهای استاتور پخش می‌شود. فرضیات زیر درباره مدل اعمال شده است:

- دمای فریم ثابت فرض می‌شود و به عنوان یک پارامتر اعمال می‌شود.
 - تنها تلفات اهمی استاتور در نظر گرفته می‌شود.
 - تنها انتقال حرارت شعاعی مد نظر است. از اثرات مدل سه بعدی صرف نظر می‌شود.
 - انتهای سیم‌پیچی در در شبکه دمایی جایی ندارد و تنها در محاسبه تلفات در نظر گرفته می‌شود.
- مدل مدار معادل حرارتی موتور در ۰ نشان داده شده است. سطح مقطع شیار به صورت سطح مقطع معادل مستطیلی مطابق ۰ در نظر گرفته می‌شود، سپس سطح مقطع شیار به دو قسمت $A_{cu,1}$ و $A_{cu,2}$ تقسیم می‌شود. اعمال تلفات اهمی (P_{js}) متناسب با سطح مقطع است. ($\frac{A_{cu,1}}{A_{cu}} P_{js}$) تلفات در قسمت داخلی شیار و ($\frac{A_{cu,2}}{A_{cu}} P_{js}$) تلفات در قسمت خارجی شیار است. مقاومت دمایی یوغ استاتور به صورت رابطه (۳-۱) به دست می‌آید.



شکل ۳-۶- شبکه دمایی [۶۰]



شکل ۴-۶-ابعاد معادل شیار مستطیلی [۶۰]

$$R_{sy} = \frac{1}{2\pi\lambda_{fe}L} \ln\left(\frac{R}{r+g+l_t}\right) \quad (۳-۱)$$

که r و R به ترتیب شعاع خارجی روتور و استاتور است، g طول فاصله هوایی، l_t طول دندان و L طول هسته است. مقاومت دندان به دو جز تقسیم می‌شود. یکی $R_{st,1}$ ، که نشان دهنده افت دما در وسط دندان است، و دوم $R_{st,1}$ ، که نشان دهنده افت بین وسط و انتهای دندان است.

$$R_{st,1} = \frac{1}{2\pi\lambda_{fe}k_{pth}L} \ln\left(\frac{r+g+l_t/2}{r+g}\right) \quad (۱-۶)$$

$$R_{st,2} = \frac{1}{2\pi\lambda_{fe}k_{pth}L} \ln\left(\frac{r+g+l_t}{r+g+l_t/2}\right) \quad (۲-۶)$$

که λ_{fe} ثابت دمایی آهن که عموماً برابر $۲۵(W/m\ K)$ در نظر گرفته می‌شود. k_{pth} نشانگر نسبت بین حجم آهن و حجم کل (آهن و شیار) بدون یوغ است رابطه (۳-۶).

$$K_{pth} = \frac{\text{حجم آهن دندانها}}{\text{حجم کل استاتور}} = \frac{6pqw_t l_t}{6pq(w_t l_t + A_{slot})} \quad (۳-۶)$$

که p و q به ترتیب تعداد زوج قطب و تعداد شیار بر قطب بر فاز هستند. w_t ضخامت شیار استاتور است. کل ضخامت عایق در شیار به صورت رابطه (۴-۶) محاسبه می‌شود.

$$t_{ins} = \frac{(1 - k_{cu})A_{slot}}{P_s} \quad (۴-۶)$$

که A_{slot} مساحت شیار استاتور، k_{cu} ضریب انباشتگی و P_s محیط خارجی شیار در شکل ۳-۴ است. ضخامت عایق به دو قسمت مساوی $t_{ins,1} = t_{ins,2} = t_{ins}/2$ تقسیم می‌شود. مقاومت دمایی لایه‌های عایق با روابط (۵-۶) و (۶-۶) محاسبه می‌شود.

$$R_{cu,1} = \frac{t_{ins,1}}{P_{s,1}\lambda_{ins}L} \frac{1}{6pq} \quad (۵-۶)$$

$$R_{cu,21} = R_{cu,22} = \frac{1}{2} \frac{t_{ins,2}}{2l_t\lambda_{ins}L} \frac{1}{6pq} \quad (۶-۶)$$

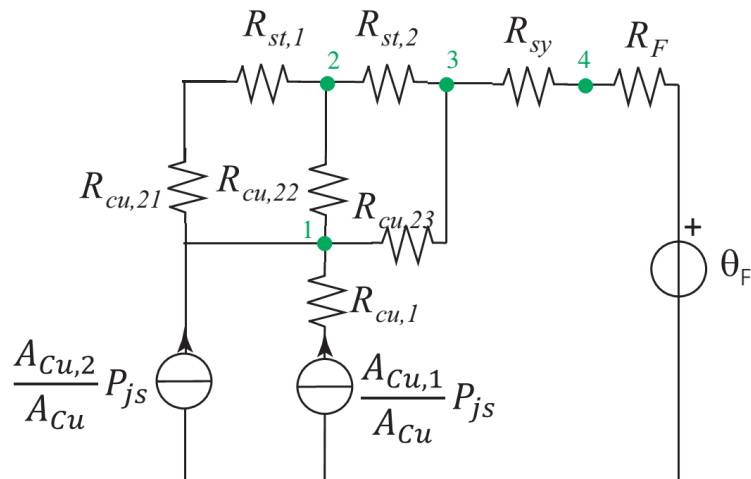
که $\lambda_{ins} = 0.3$ ثابت دمایی معادل عایق است که نمایانگر رزین درون شیارها است. انتهای شیار با یک مقاومت که مستقیماً به یوغ متصل است، مدل می‌شود رابطه (۷-۶).

$$R_{cu,23} = \frac{1}{2} \frac{t_{ins,2}}{\omega_{s,eq}\lambda_{ins}L} \frac{1}{6pq} \quad (۷-۶)$$

مقاومت فریم با رابطه (۸-۶) به دست می‌آید.

$$R_F = \frac{1}{\pi k_c L R} \quad (۸-۶)$$

که k_c ثابت اتصال هسته به فریم است و برابر ۱۰۰۰ انتخاب می‌شود. با حل شبکه دمایی نشان داده شده در شکل ۳-۳، محاسبه دمای سیم‌پیچی امکان‌پذیر است. دمای فریم ثابت و برابر ۶۵ درجه سلسیوس در نظر گرفته می‌شود که از نتایج اندازه گیری برای موتور IE4 به دست آمده است. در شبکه دمایی مجدداً ترسیم شده است. برای حل شبکه دمایی به سادگی می‌توان از رابطه (۹-۶) استفاده کرد.



شکل ۵-۶- شبکه دمایی خطی ساده شده [۶۰]

$$[G][\theta] = [P] \quad (۹-۶)$$

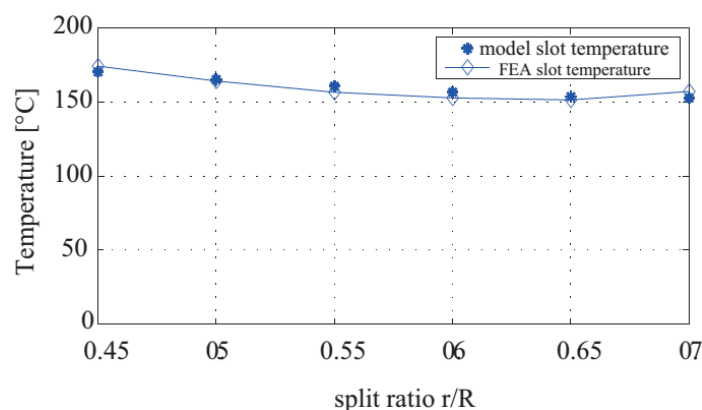
که $[G]$ ماتریس هدایت حرارتی^۱، $[\theta]$ بردار ستونی افزایش دما و $[P]$ بردار ستونی تلفات است (۳-۱۱).

$$[G] = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{cu,21} + R_{st,1}} + \frac{1}{R_{cu,22}} + \frac{1}{R_{cu,23}} & -\frac{1}{R_{cu,21} + R_{st,1}} - \frac{1}{R_{cu,22}} & -\frac{1}{R_{cu,23}} \\ -\frac{1}{R_{cu,21} + R_{st,1}} - \frac{1}{R_{cu,22}} & \frac{1}{R_{cu,21} + R_{st,1}} + \frac{1}{R_{st,2}} + \frac{1}{R_{cu,22}} & -\frac{1}{R_{st,2}} \\ -\frac{1}{R_{cu,23}} & -\frac{1}{R_{st,2}} & \frac{1}{R_{cu,23}} + \frac{1}{R_{st,2}} + \frac{1}{R_{sy} + R_F} \end{bmatrix} \quad (۹-۶)$$

$$[\theta] = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T \quad [P] = \left[P_{js}, 0, \frac{\theta_F}{R_F + R_{sy}} \right]^T$$

در نتایج مقایسه مدل حرارتی برای هندسه‌های مختلف استاتور، نشان داده دهنده دقت قابل قبول مدل مدار معادل نسبت آنالیز المان محدود است.

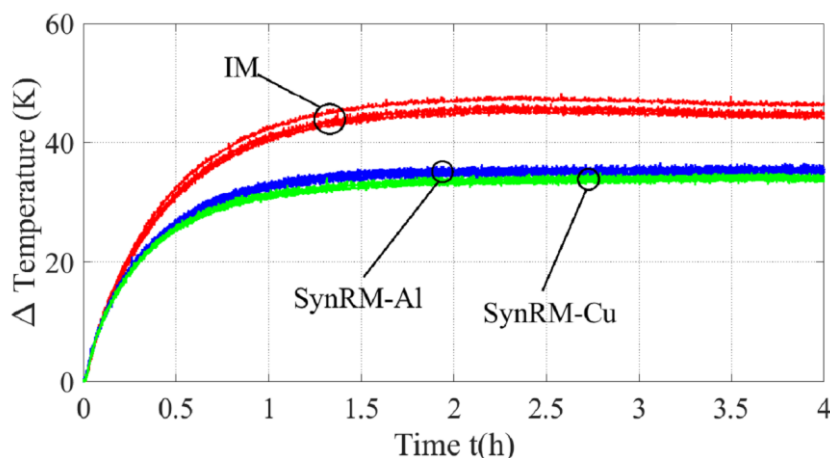
¹ Thermal Conductance



شکل ۶-۶- مقایسه نتایج مدل حرارتی ساده و آنالیز المان محدود [۶۰]

۴-۶- اندازه گیری دمای حالت ماندگار

قبل از اندازه گیری بازده و ضریب قدرت موتور در بارهای مختلف، موتور باید به تعادل دمایی برسد. برای این منظور، ثابت زمانی حرارتی موتور باید مشخص شود. اندازه گیری افزایش دمای سیم پیچی نمونه دو موتور سینکریل خودراه انداز با قفس آلومینیومی و مسی و موتور القایی با توان مشابه را در بازه ۴ ساعت، هنگامی که بار نامی به موتور اعمال شده است را نشان می دهد. استاتور و فریم موتورهای یکسان و مشابه استاتور موتور القایی ۴ کیلووات است. رفتار دمای سیم پیچی موتورهای مشابه رفتار سیستم های مرتبه ۱ است. حدود ۲ تا ۳ ساعت زمان لازم است تا موتورهای به تعادل دمایی برسد. افزایش دمای سیم پیچی موتورهای سینکریل خودراه انداز نسبت به موتور القایی حدود ۱۰ درجه کمتر است.



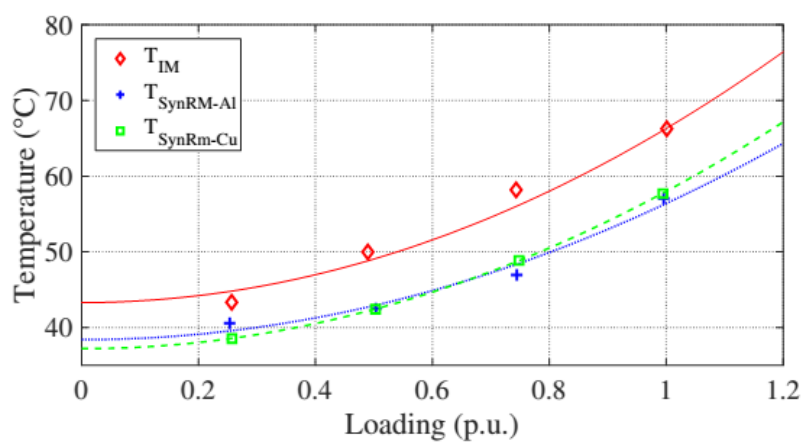
شکل ۶-۷- افزایش دمای سیم پیچی موتورهای تحت بار نامی [۱۷]

در [۱۷] برای تخمین دمای موتور در بارهای مختلف از معادله درجه ۲ مطابق رابطه (۶-۱) استفاده شده است. نمودار تخمین دمای موتورهای از طریق داده های اندازه گیری در ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد بار نامی را نشان می دهد. ثابت های A و B برای موتورهای در آمده است.

$$T = A \left(\frac{P_{mech}}{P_{rated}} \right)^2 + B \quad (۶-۱)$$

جدول ۶-۱- ثابت های دمایی [۱۷]

Motor	A	B
IM	23	43.3
SynRM-Cu	18	38.4
SynRM-Al	20.8	37.2



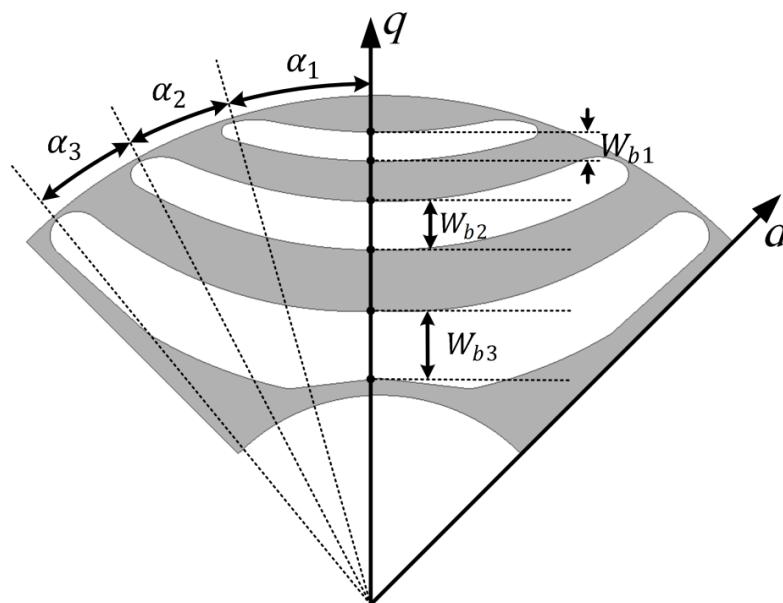
شکل ۸-۶- تخمین متوسط دمای سیم پیچی برای بارگذاری‌های مختلف [۱۷]

فصل ۷- الگوریتم طراحی الکترومغناطیسی موتور سینکرون خودراه انداز

۷-۱- مقدمه

از آنجا که هدف از طراحی موتور سینکریل خودراه انداز، دستیابی به کلاس بازدهی IE4 است، بنابراین عملکرد موتور در حالت دائمی حائز اهمیت بوده و طراحی موتور سینکریل خودراه انداز بر اساس پایه موتور سینکریل صورت می‌گیرد تا حداکثر گشتاور رلکتانسی در حالت دائمی ایجاد شود.

در بخش ۱-۳-۱، هندسه‌های مختلف سدکننده‌های شار برای روتور موتور سینکریل مرور شد و به مزایا و معایب آن‌ها اشاره شد. با توجه به اینکه شکل سیال‌گونه سدکننده‌های شار، امکان دستیابی به نسبت برجستگی بیشتری نسبت به سایر اشکال هندسی برای سدکننده‌های شار را می‌دهد؛ بنابراین سدکننده‌های شار همانند سیال‌گونه انتخاب خواهد شد و بهینه‌سازی با هدف افزایش متوسط گشتاور و کاهش ریپل گشتاور بر روی پارامترهای ضخامت (W_{bi}) و زاویه (α_{bi}) سدکننده‌های شار صورت خواهد گرفت.



شکل ۷-۱- روتور با سدکننده‌های شار سیال‌گونه و تعریف پارامترها

در بخش ۲-۴ روش‌های تحلیلی مختلفی که به مدل‌سازی دینامیکی LSSynRM پرداخته‌اند، مرور شد و به مزایا و معایب آن‌ها اشاره شد. در هر یک از این روش‌ها، ساده‌سازی‌های در مدل دینامیکی موتور صورت می‌گیرد. ثابت در نظر گرفتن اندوکتانس‌های مغناطیس‌کنندگی باعث کاهش دقت مدل‌سازی می‌شود. در [۵۷] اثر هارمونیک‌های میدان در مدل‌سازی صرف نظر می‌شود. از آنجا که ارزیابی دقیق عملکرد موتور حین راه‌اندازی بسیار حائز اهمیت است. صرف نظر از هر یک پدیده‌هایی که در موتور اتفاق می‌افتد، ممکن است به تخمین نادرست از عملکرد موتور منجر شود؛ بنابراین استفاده از روش آنالیز المان محدود برای تخمین عملکرد گذرای موتور انتخاب می‌شود.

۷-۲- الگوریتم طراحی موتور سینکریل خودراه انداز

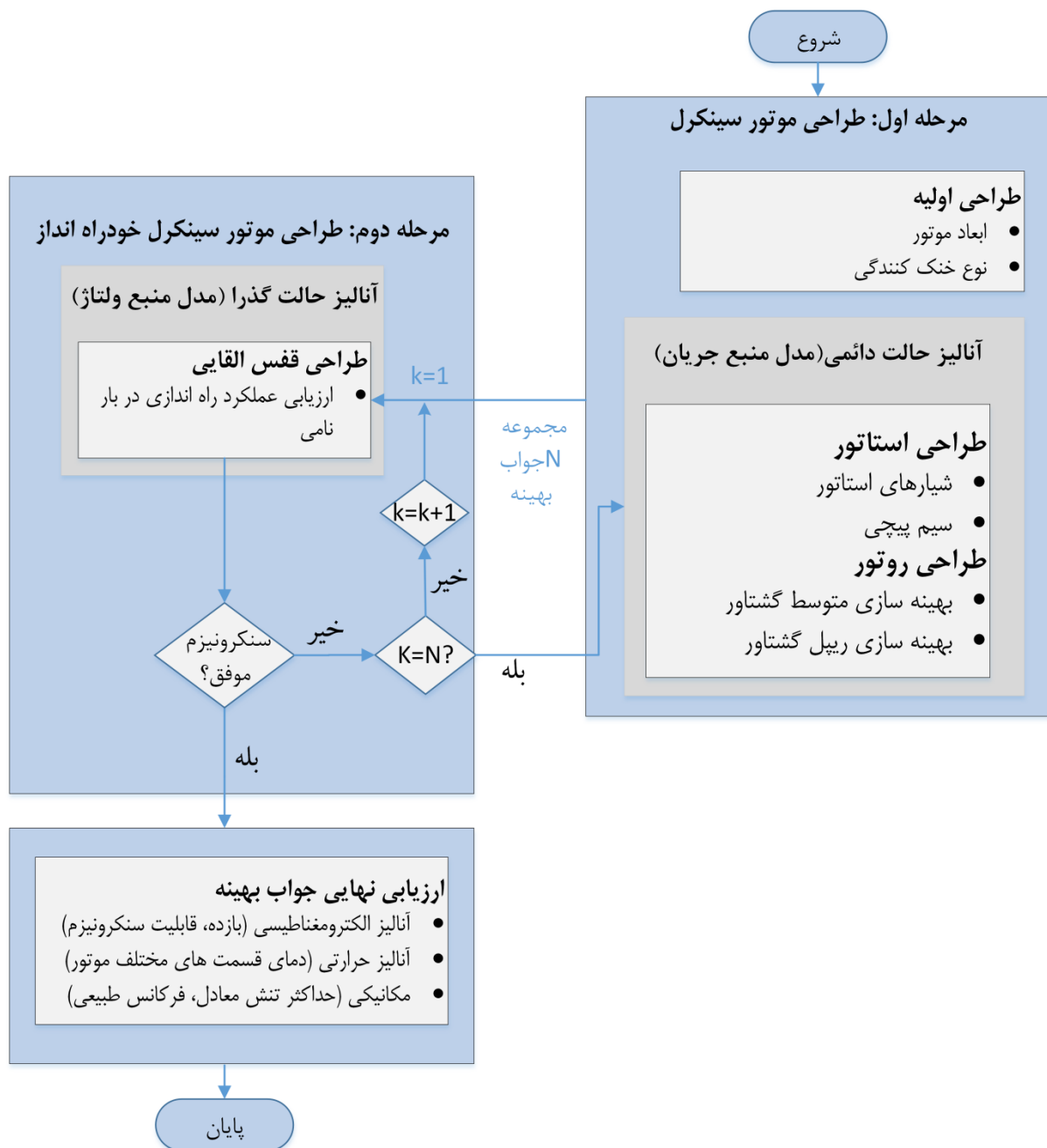
الگوریتم طراحی موتور سینکریل خودراه انداز به طور کلی در دو مرحله در نظر گرفته می‌شود. •فلوچارت طراحی موتور را نشان می‌دهد.

۱-۲-۷- مرحله اول

مرحله اول به بهینه‌سازی طراحی موتور سینکرون اختصاص دارد. ابتدا با توجه مشخصات مورد انتظار از موتور (توان خروجی، سرعت، و ولتاژ نامی و ...) ابعاد اولیه موتور تخمین زده می‌شود. با کمک مدل حرارتی ساده و حداکثر تلفات با توجه به کلاس بازدهی موتور، با تغییر آرایش شیارهای استاتور، حداکثر افزایش دمای سیم پیچی تخمین زده تا افزایش دمای موتور نسبت به کلاس عابقی مورد نظر مشخص شود و از آن تجاوز نکند.

سپس بهینه‌سازی طراحی موتور سینکرون آغاز می‌شود. با استفاده از روش‌های تحلیلی بهینه‌سازی بر روی موتور با هدف حداکثر کردن متوسط گشتاور و حداقل کردن ریپل گشتاور صورت می‌گیرد. تعداد و ابعاد سدکننده‌های شار تعیین می‌شود. موتورهای بهینه با روش آنالیز المان محدود مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

در این مرحله از مدل منبع جریان برای شبیه‌سازی استفاده می‌شود، زیرا همانطور که در بخش ۱-۲ اشاره شد، نتایج شبیه‌سازی منبع ولتاژ و منبع جریان به هم نزدیک است، اما استفاده از مدل منبع ولتاژ، زمان شبیه‌سازی را به شدت افزایش می‌دهد. در پایان بهینه‌سازی، تعداد N موتور بهینه از نظر متوسط و ریپل گشتاور برای اضافه کردن قفس در مرحله بعد انتخاب می‌شود.



شکل ۲-۷- فلوچارت طراحی موتور سینکرون خودراه انداز

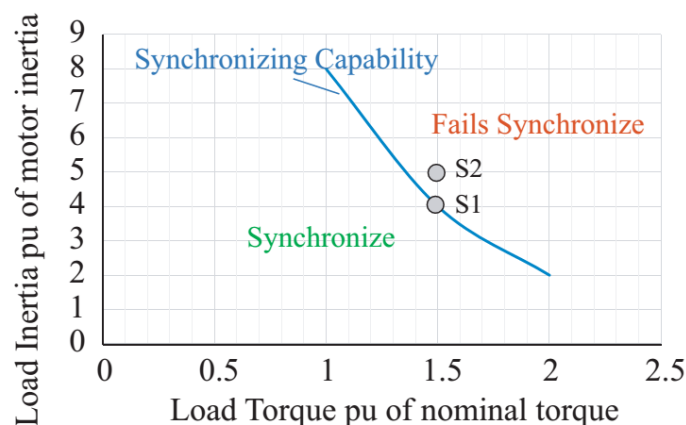
۲-۷- مرحله دوم

در مرحله دوم قفس القایی به موتور سینکرون اضافه می‌شود. قابلیت سنکرونیسم و عملکرد دینامیکی موتورها با آنالیز المان محدود مشخص می‌شود. اگر موتور قابلیت سنکرونیسم موفق در بار نامی را نداشته باشد، دومین موتور بهینه که شرایط بهتر از نظر متوسط و ریپل گشتاور را دارد، برای ارزیابی قابلیت سنکرونیسم انتخاب می‌شود و به همین ترتیب ادامه پیدا می‌کند. هندسه موتورهایی که توانایی سنکرونیسم ندارند را می‌توان با اضافه و یا کم کردن میزان آلومینیوم قفس اصلاح کرد.

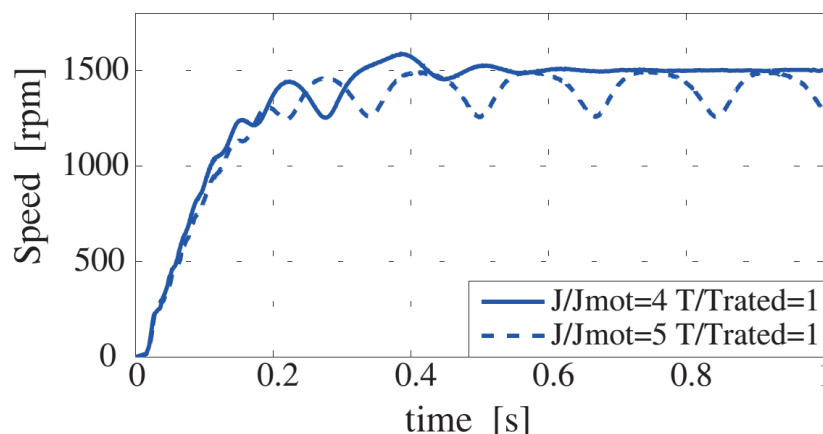
در این مرحله، از مدل منبع ولتاژ برای شبیه‌سازی موتور استفاده می‌شود. عملکرد راه‌اندازی موتورها در ۹۰ درصد ولتاژ نامی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد تا مشخص شود موتور توانایی به سنکرونیزم رساندن بار نامی را دارد یا نه. اگر هیچ یک از موتورهای بهینه سینکریل توانایی سنکرونیزم را نداشته باشند، طراحی مجدد بر روی موتور سینکریل صورت خواهد گرفت.

۳-۲-۷- ارزیابی نهایی جواب بهینه

در پایان مرحله دوم، موتور بهینه برای به دست آوردن حداکثر قابلیت سنکرونیزم مورد ارزیابی بیشتر قرار خواهد گرفت. مشخص شدن محدوده عملکرد ایمن موتور حائز اهمیت است. در این مرحله محدوده حداکثر گشتاور و اینرسی باری که موتور می‌تواند با موفقیت به سنکرونیزم برساند، مشخص خواهد شد. نمونه کیفی قابلیت سنکرونیزم موتور سینکریل خودراه انداز در ۰ نشان داده شده است. ناحیه بالای خط سنکرونیزم، ترکیب‌هایی از گشتاور بار و اینرسی است که موتور نمی‌تواند به سنکرونیزم برسد. در صورتی که موتور نتواند به سنکرونیزم برسد، مانند نقطه S2 همان طور که در ۰ با خطچین نشان داده شده است؛ سرعت و گشتاور موتور نوسان می‌کند و این باعث القای جریان‌های نوسانی و به تبع آن، افزایش تلفات اهمی می‌شود که ممکن است به عایق موتور آسیب بزند؛ همچنین نوسانات گشتاور باعث افزایش لرزش شفت شده و نویز صوتی بیشتری تولید می‌شود. در این مرحله آنالیز حرارتی و مکانیکی بر روی موتور صورت خواهد گرفت. با استفاده از مدار معادل حرارتی دمایی قسمت‌های مختلف موتور تخمین زده خواهد شد. استحکام مکانیکی روتور در سرعت دو برابر نامی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و در صورت لزوم ضخامت پل‌های روتور افزایش داده می‌شود تا حداکثر تنش معادل از استحکام تسلیم ورق کمتر شود.



شکل ۳-۷- نمونه مشخصه قابلیت سنکرونیزم موتور سینکریل خودراه انداز [۶۰]



شکل ۳-۷- مشخصه سرعت-زمان برای نقاط S1 و S2 [۶۰]

نتیجه گیری

این گزارش در ارتباط با طراحی بهینه موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز با توان ۳ کیلووات تهیه شده است. در فصل اول طراحی الکترومغناطیسی موتور سینکرل خودراه انداز انجام شد و آنالیز این موتور موضوع فصل دوم این گزارش بود. در فصل های سوم و چهارم نیز تحلیل حرارتی موتور سینکرل خود راه انداز و همچنین الگوریتم طراحی الکترومغناطیسی این موتور مورد بررسی قرار گرفتند

مراجع

- [1] S. T. Boroujeni, N. Bianchi, and L. Alberti, "Fast estimation of line-start reluctance machine parameters by finite element analysis," *IEEE Transactions on energy Conversion*, vol. 26, no. 1, pp. 1-8, 2010.
- [2] H.-C. Liu and J. Lee, "Optimum design of an IE4 line-start synchronous reluctance motor considering manufacturing process loss effect," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 4, pp. 3104-3114, 2018.
- [3] F. Kalluf, C. Pompermaier, M. F. da Luz, and N. Sadowski, "Modelling of a line-start permanent magnet motor using finite element method," 2010.
- [4] M. N. Azari and M. Mirsalim, "Line-start permanent-magnet motor synchronisation capability improvement using slotted solid rotor," *IET Electric Power Applications*, vol. 7, no. 6, pp. 462-469, 2013.
- [5] V. Aguba, M. Muteba, and D. V. Nicolae, "Transient analysis of a start-up synchronous reluctance motor with symmetrical distributed rotor cage bars," in *2017 IEEE AFRICON*, 2017, pp. 1290-1295.
- [6] Q. Smit, A. Sorgdrager, and R. Wang, "Design and optimisation of a line-start synchronous reluctance motor," in *Proc. 24th Southern African Universities Power Engineering Conference*, 2016.
- [7] A. Kersten, Y. Liu, and D. Pehrman, "Rotor Design of a Line-Start Synchronous Reluctance Machine with Respect to Induction Machine for Industrial Applications," in *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2018, pp. 393-399: IEEE.
- [8] M. Gamba, E. Armando, G. Pellegrino, A. Vagati, B. Janjic, and J. Schaab, "Line-start synchronous reluctance motors: Design guidelines and testing via active inertia emulation," in *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2015, pp. 4820-4827: IEEE.
- [9] M. Palmieri, M. Perta, F. Cupertino, and G. Pellegrino, "Effect of the numbers of slots and barriers on the optimal design of synchronous reluctance machines," in *2014 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, 2014, pp. 260-267.
- [10] G. Pellegrino, T. M. Jahns, N. Bianchi, W. L. Soong, and F. Cupertino, *The Rediscovery of Synchronous Reluctance and Ferrite Permanent Magnet Motors: Tutorial Course Notes*. Springer, 2016.
- [11] D. Mingardi and N. Bianchi, "Line-Start PM-Assisted Synchronous Motor Design, Optimization, and Tests," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 12, pp. 9739-9747, 2017.
- [12] G. Y. Sizov, P. Zhang, D. M. Ionel, N. A. O. Demerdash, and M. Rosu, "Automated Multi-Objective Design Optimization of PM AC Machines Using Computationally Efficient FEA and Differential Evolution," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 5, pp. 2086-2096, 2013.
- [13] G. Pellegrino, F. Cupertino, and C. Gerada, "Automatic design of synchronous reluctance motors focusing on barrier shape optimization," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 2, pp. 1465-1474, 2015.
- [14] Y. Wang, G. Bacco, and N. Bianchi, "Geometry Analysis and Optimization of PM-Assisted Reluctance Motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 5, pp. 4338-4347, 2017.
- [15] R. R. Moghaddam and F. Gyllensten, "Novel High-Performance SynRM Design Method: An Easy Approach for A Complicated Rotor Topology," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 9, pp. 5058-5065, 2014.

- [16] S. Stipetic, D. Zarko, and N. Cavar, "Design Methodology for Series of IE4/IE5 Synchronous Reluctance Motors Based on Radial Scaling," in *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2018, pp. 146-151.
- [17] A. Kersten, Y. Liu, D. Pehrman, and T. Thiringer, "Rotor Design of Line-Start Synchronous Reluctance Machine with Round Bars," *IEEE Transactions on Industry Applications*, pp. 1-1, 2019.
- [18] R. Moghaddam, F. Magnussen, and C. Sadarangani, "Novel rotor design optimization of Synchronous Reluctance Machine for low torque ripple," in *2012 XXth International Conference on Electrical Machines*, 2012, pp. 720-724.
- [19] M. J. Kamper and W. T. Villet, "Design and performance of compensated reluctance synchronous machine drive with extended constant power speed range," in *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012, pp. 4330-4337.
- [20] M. J. Kamper, F. S. V. d. Merwe, and S. Williamson, "Direct finite element design optimisation of the cageless reluctance synchronous machine," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 11, no. 3, pp. 547-555, 1996.
- [21] X. B. Bomela and M. J. Kamper, "Effect of machine design on performance of reluctance synchronous machine," in *Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No.00CH37129)*, 2000, vol. 1, pp. 515-522 vol.1.
- [22] M. H. Prins, C. W. Vorster, and M. J. Kamper, "Reluctance synchronous and field intensified-PM motors for variable-gear electric vehicle drives," in *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2013, pp. 657-664: IEEE.
- [23] A. Tassarolo, "Modeling and Analysis of Synchronous Reluctance Machines With Circular Flux Barriers Through Conformal Mapping," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 4, pp. 1-11, 2015.
- [24] W. Villet, M. Prins, C. Vorster, and M. Kamper, "Saliency performance investigation of synchronous machines for position sensorless controlled EV drives," in *2013 IEEE International Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives and Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (SLED/PRECEDE)*, 2013, pp. 1-8: IEEE.
- [25] E. Howard, M. J. Kamper, and S. Gerber, "Asymmetric Flux Barrier and Skew Design Optimization of Reluctance Synchronous Machines," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 5, pp. 3751-3760, 2015.
- [26] S. T. Boroujeni, M. Haghparast, and N. Bianchi, "Optimization of flux barriers of line-start synchronous reluctance motors for transient-and steady-state operation," *Electric Power Components and Systems*, vol. 43, no. 5, pp. 594-606, 2015.
- [27] A. Kersten, "Efficiency investigation of line start synchronous reluctance motors," MS thesis, Dept. Electr. Power Eng., Chalmers Univ. Technol., Gothenburg, Sweden, 2017.
- [28] R. Rajabi Moghaddam, "Synchronous reluctance machine (SynRM) in variable speed drives (VSD) applications," Ph.D. Dissertation, (KTH) Royal Institute of Technology, 2011.
- [29] M. Gamba, G. Pellegrino, and F. Cupertino, "Optimal number of rotor parameters for the automatic design of synchronous reluctance machines," in *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2014, pp. 1334-1340: IEEE.
- [30] J. Kim, B. Son, D. Kim, Y. Kim, J. Ro, and S. Jung, "Flux Path Design of Synchronous Reluctance Motor to Analyze Torque Characteristic and Operating Region," in *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2018, pp. 225-230.
- [31] C. Liu, T. Luo, C. Hwang, and B. Chang, "Field Path Design Assessments of a High-Performance Small-Power Synchronous-Reluctance Motor," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 11, pp. 1-4, 2015.
- [32] S. Yammine, C. Henaux, M. Fadel, S. Desharnais, and L. Calégari, "Synchronous reluctance machine flux barrier design based on the flux line patterns in a solid rotor," in *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2014, pp. 297-302.

- [33] C. Oprea, A. Dziechciarz, and C. Martis, "Comparative analysis of different synchronous reluctance motor topologies," in *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, 2015, pp. 1904-1909: IEEE.
- [34] A. Vagati, M. Pastorelli, G. Francheschini, and S. C. Petrache, "Design of low-torque-ripple synchronous reluctance motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 34, no. 4, pp. 758-765, 1998.
- [35] N. Bianchi, M. Degano, and E. Fornasiero, "Sensitivity analysis of torque ripple reduction of synchronous reluctance and interior PM motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 1, pp. 187-195, 2015.
- [36] M. Ibrahim, P. Sergeant, and E. Rashad, "Influence of rotor flux-barrier geometry on torque and torque ripple of permanent-magnet-assisted synchronous reluctance motors," in *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2016, pp. 398-404: IEEE.
- [37] R. Moghaddam and F. Gyllensten, "Novel High-Performance SynRM Design Method: An Easy Approach for A Complicated Rotor Topology," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 9, pp. 5058-5065, 2014.
- [38] M. Degano, H. Mahmoud, N. Bianchi, and C. Gerada, "Synchronous reluctance machine analytical model optimization and validation through finite element analysis," in *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2016, pp. 585-591.
- [39] P. Niazi, "Permanent magnet assisted synchronous reluctance motor, design and performance improvement," Ph.D. dissertation, Texas A&M University, 2006.
- [40] X. B. Bomela and M. J. Kamper, "Effect of stator chording and rotor skewing on performance of reluctance synchronous machine," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, no. 1, pp. 91-100, 2002.
- [41] N. Bianchi, S. Bolognani, D. Bon, and M. Dai Pre, "Torque harmonic compensation in a synchronous reluctance motor," *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 23, no. 2, pp. 466-473, 2008.
- [42] S. Yammine, "Contribution to the Synchronous Reluctance Machine Performance Improvement by Design Optimization and Current Harmonics Injection," Ph.D. dissertation, UNIVERSITE DE TOULOUSE, 2015.
- [43] M. A. Kabir and I. Husain, "Application of a Multilayer AC Winding to Design Synchronous Reluctance Motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 6, pp. 5941-5953, 2018.
- [44] P. Lazari, J. Wang, and B. Sen, "3-D Effects of Rotor Step-Skews in Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Machines," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 11, pp. 1-4, 2015.
- [45] N. Bianchi, S. Bolognani, D. Bon, and M. D. Pre, "Rotor Flux-Barrier Design for Torque Ripple Reduction in Synchronous Reluctance and PM-Assisted Synchronous Reluctance Motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 45, no. 3, pp. 921-928, 2009.
- [46] N. Bianchi, *Electrical machine analysis using finite elements*. CRC press, 2017.
- [47] H. Nee, L. Lefevre, P. Thelin, and J. Soulard, "Determination of d and q reactances of permanent-magnet synchronous motors without measurements of the rotor position," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, no. 5, pp. 1330-1335, 2000.
- [48] T. Marcic, G. Stumberger, B. Stumberger, M. Hadziselimovic, and P. Vrtic, "Determining Parameters of a Line-Start Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Model by the Differential Evolution," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 11, pp. 4385-4388, 2008.
- [49] F. Cupertino, G. Pellegrino, and C. Gerada, "Design of synchronous reluctance machines with multi-objective optimization algorithms," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2013 IEEE, 2013, pp. 1858-1865: IEEE.

- [50] S. Guenther and W. Hofmann, "Multi-objective tradeoffs in the design optimization of synchronous reluctance machines for electric vehicle application," in *2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 2015, pp. 1715-1721.
- [51] C. López, T. Michalski, A. Espinosa, and L. Romeral, "Rotor of synchronous reluctance motor optimization by means reluctance network and genetic algorithm," in *Electrical Machines (ICEM), 2016 XXII International Conference on*, 2016, pp. 2052-2058: IEEE.
- [52] M. Z. Islam, S. S. R. Bonthu, and S. Choi, "Obtaining optimized designs of multi-phase PMA-SynRM using lumped parameter model based optimizer," in *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2015 IEEE International*, 2015, pp. 1722-1728: IEEE.
- [53] A. Tassarolo, M. Degano, and N. Bianchi, "On the analytical estimation of the airgap field in synchronous reluctance machine," in *Electrical Machines (ICEM), 2014 International Conference on*, 2014, pp. 239-244: IEEE.
- [54] M. Villani, M. Santececca, and F. Parasiliti, "High-Efficiency Line-Start Synchronous Reluctance Motor for Fan and Pump Applications," in *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2018, pp. 2178-2184.
- [55] N. M. Azari and M. Mirsalim, "Analytic modelling of a line-start permanent-magnet motor with slotted solid rotor," *IET Electric Power Applications*, vol. 8, no. 7, pp. 278-285, 2014.
- [56] M. Gamba, G. Pellegrino, A. Vagati, and F. Villata, "Design of a line-start synchronous reluctance motor," in *2013 International Electric Machines & Drives Conference*, 2013, pp. 648-655: IEEE.
- [57] D. Mingardi and N. Bianchi, "FE-aided analytical method to predict the capabilities of line-start synchronous motors," in *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2014, pp. 5123-5130.
- [58] M. Mahmoudi, "Thermal modelling of the synchronous reluctance machine," M.S. thesis, (KTH) Royal Institute of Technology, 2012.
- [59] C. López Torres, "Analysis and implementation of a methodology for optimal PMA-SynRM design taking into account performances and reliability," Ph.D. Dissertation, (UPC) University Politecnico di Catalunya, 2018.
- [60] M. Gamba, G. Pellegrino, and A. Vagati, "Design of non conventional Synchronous Reluctance machine," Ph.D. Dissertation, Politecnico di Torino, 2017.

فصل ۸- طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی

۸-۱- مقدمه

در این فصل مطالبی پیرامون طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی ارائه خواهد شد.

۸-۲- طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی

موتور سنکرون رلوکتانسی، پایه موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز است و عملکرد حالت دائمی موتور را تحت تاثیر قرار می‌دهد. ابتدا با استفاده از استانداردهای مربوط به قاب موتور، ابعاد اولیه موتور تخمین زده می‌شود، سپس درباره تعداد شیارهای استاتور و نوع سیم‌پیچی آن بحث خواهد شد. پس از بهینه‌سازی، چند طرح بهینه که قابلیت اضافه کردن قفس را دارند برای بررسی‌های بیشتر انتخاب خواهد شد.

۸-۲-۱- ابعاد موتور

در مرحله اول طراحی لازم است تا ابعاد موتور مشخص شود. هدف این گزارش طراحی موتور ۳ کیلووات، ۱۵۰۰ دور در دقیقه است. در استاندارد ¹EN 50347 CELENEC، مطابق **Error! Reference source not found.** برای توان ۳ کیلووات و سرعت نامی ۱۵۰۰ دور در دقیقه، شماره فریم استاندارد 100LB-4 پیشنهاد شده است.

جدول ۸-۱- شماره فریم استاندارد برای موتورهای ۴ قطب و ۱۵۰۰ دور

شماره فریم IEC	توان [kW]	سرعت [rpm]	گشتاور [Nm]	فرکانس [Hz]
90L-4	۱٫۵	۱۵۰۰	۹٫۶	۵۰
100LA-4	۲٫۲	۱۵۰۰	۱۴٫۰	۵۰
100LB-4	۳	۱۵۰۰	۱۹٫۱	۵۰
112M-4	۴	۱۵۰۰	۲۵٫۵	۵۰
132S-4	۵٫۵	۱۵۰۰	۳۵٫۰	۵۰

برای موتور با فریم شماره ۱۰۰ قطر خارجی استاتور ۱۵۰ میلی‌متر است که به عنوان محدودیت در طراحی موتور در نظر گرفته خواهد شد.

¹ European Committee for Electrotechnical Standardization

۸-۲-۲- طراحی استاتور و سیم پیچ‌ها

در این بخش تعداد قطب‌های موتور، تعداد شیارها و نوع سیم‌پیچی برای موتور سنکرون رلوکتانسی مشخص می‌شود. درباره تاثیر هر یک از متغیرهای فوق بر عملکرد موتور بحث خواهد شد. دو نوع سیم پیچی متمرکز و توزیع شده برای موتور سنکرون رلوکتانسی در نظر گرفته شده و عملکرد موتور با توجه به ضریب انباشتگی قابل دستیابی، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۸-۲-۳- تعداد قطب‌ها

تعداد قطب‌ها بر عملکرد موتور سنکرون رلوکتانسی تاثیر زیادی دارد. رابطه **Error! Reference source not found.** افت گشتاور ناشی از پل‌های مماسی روتور را نشان می‌دهد که از حاصلضرب شاری که از پل‌های روتور می‌گذرد (λ_{ribs}) در جریان محور d (i_d) به دست می‌آید [۱] شار عبوری از پل‌های مماسی با ضرب چگالی شار پل‌ها (B_{rib}) در سطح مقطع پل (S_{rib}) به دست می‌آید. p تعداد زوج قطب، B_{ag} مولفه اصلی چگالی شار فاصله هوایی، k_c ضریب کارتر، k_s ضریب افت آمپر دور ناشی از اشباع آهن و g طول فاصله هوایی است.

۸-۱

$$\Delta T_{ribs} = \frac{3}{2} p \lambda_{ribs} i_d = \frac{4}{\mu_0} (B_{rib} S_{rib}) p^2 B_{ag} (g k_c k_s)$$

رابطه **Error! Reference source not found.** نشان می‌دهد که افت گشتاور ناشی از پل‌های روتور با م جذور تعداد قطب‌ها متناسب است؛ بنابراین در طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی توصیه می‌شود تا تعداد قطب‌ها بزرگ‌تر از ۴ انتخاب نشود [۱].

لندوکتانس‌های مغناطیسی‌کنندگی محور d و q تعیین‌کننده تولنایی تولید گشتاور در موتور است. لندوکتانس مغناطیس‌کنندگی محور d (L_{md}) مشابه اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی در ماشین القایی است، اما اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی محور q ($L_{mq} = L_{cq} + L_{fq}$) از دو مولفه گردشی (L_{cq}) و عبوری (L_{fq}) تشکیل شده است. شار مولفه گردشی در قسمت آهنی هادی‌های شار نزدیک سطح روتور دور می‌زند ولی شار مولفه عبوری مسیر خود را از دورن سدکننده‌های شار دور می‌بندد.

در [۱] جزئیات محاسبه مولفه‌های اندوکتانس آمده است، در اینجا به نتایج آن اکتفا می‌شود. در [۲] نشان داده شده است که نسبت (L_{cq}/L_{md}) مستقل از تعداد قطب‌های موتور است ولی با افزایش تعداد سدکننده‌های شار، افزایش می‌یابد. در مقابل نسبت (L_{fq}/L_{md}) متناسب با تعداد قطب‌ها افزایش می‌یابد، اما مستقل از تعداد سدکننده‌های شار است. بنابراین روابط **Error! Reference source not found.** و **Error! Reference source not found.** را برای مولفه‌های اندوکتانس محور q به دست می‌آید که K_{cq} و K_{fq} ثابت‌های محاسبه اندوکتانس هستند. با توجه به بحث فوق برای کاهش اندوکتانس محور q، تعداد قطب‌ها بهتر است در حداقل مقدار خود نگه‌داشته شوند.

۸-۲

$$L_{cq} = K_{cq} L_{md}$$

۸-۳

$$L_{fq} = p K_{fq} L_{md}$$

۸-۲-۴- تعداد شیارهای استاتور

در گزارش فصل دوم مدل حرارتی ساده برای تخمین افزایش دمای سیم پیچی با توجه به ابعاد استاتور به دست آمد. در اینجا از آن مدل برای تخمین افزایش دمای موتور ۳ کیلووات با تغییر تعداد شیارهای استاتور استفاده می‌شود. با فرض اینکه کلاس بازدهی موتور IE4 باشد، حداقل بازده باید ۹۰/۴ درصد باشد. بنابراین حداکثر تلفات موتور، حدود ۳۲۰ وات می‌شود. با فرض اینکه ۶۰ وات از این تلفات سهم تلفات چرخشی باشد و مابقی ۲۶۰ وات تلفات مسی در نظر گرفته شود. با فرض دمای بدنه ۶۵ درجه سلسیوس، در **Error! Reference source not found.** نتایج محاسبه دمای سیم پیچی به ازای مقادیر متفاوت شیار استاتور نشان داده شده است. به طور کلی با افزایش تعداد شیارهای استاتور، دمای سیم پیچی کاهش می‌یابد. دمای استاتور با تعداد ۳۶ شیار نسبت به استاتور با تعداد ۶ شیار حدود ۳۰ درجه خنک‌تر است. البته در این مقایسه محاسبه دما برای تعداد ۶ شیار با فرض ضریب انباشتگی ۰/۶ به دست آمده است، در صورتی که ضریب انباشتگی مشابه سیم پیچی توزیع شده در نظر گرفته شود، دمای سیم پیچی افزایش حدود ۵۵ درجه‌ای خواهد داشت.

در سیم پیچی توزیع شده افزایش تعداد شیارها باعث پخش شدن تلفات داخل استاتور شده و بنابراین حداکثر دمای سیم پیچی کاهش می‌یابد. اگرچه با افزایش تعداد شیارها از ۳۶، باز هم دمای استاتور کاهش می‌یابد؛ اما در مراجع طراحی استاتور با توان حتی بیش از ۳ کیلووات، تعداد شیار ۳۶ در نظر گرفته شده است [۳، ۴]، زیرا افزایش بیشتر تعداد شیارها، به دلیل افزایش سطح برش ورق، تلفات ورق را افزایش می‌دهد. بنابراین در طراحی سیم پیچی توزیع شده تعداد شیارها برابر ۳۶ انتخاب می‌شود و برای طراحی سیم پیچی متمرکز تعداد ۶ شیار انتخاب می‌شود.

جدول ۸-۲- تاثیر تعداد شیارهای استاتور بر دمای سیم پیچی

نوع سیم پیچی		توزیع شده		متمرکز	
تعداد شیار		۳۶	۲۴	۱۸	۶
دمای سیم پیچی (°C)		۷۸/۳	۸۱/۷	۸۵/۸	۱۳۳/۶
ضریب انباشتگی		۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۶

۸-۲-۵- سیم پیچی استاتور

در مطالعات دو نوع سیم پیچی متمرکز و توزیع شده برای طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی استفاده شده است [۱۴، ۱۵]. در ادامه مزایا و معایب هر یک از این سیم پیچی‌های برای موتور سنکرون رلوکتانسی مرور می‌شود.

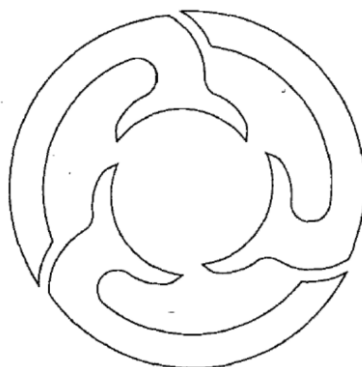
سیم پیچی متمرکز

در **Error! Reference source not found.** حالت‌های مختلف ترکیب تعداد شیارهای استاتور و تعداد قطب‌ها برای ماشین‌های سه فاز با سیم پیچی متعادل متمرکز نشان داده شده است [۵]. در جدول ضرایب سیم پیچی درون پرانتز نشان داده شده است.

جدول ۳-۸- ترکیب‌های ممکن شیار استاتور و زوج قطب برای سیم پیچی متمرکز [۵]

زوج قطب شیار استاتور	۲	۴	۶	۸	۱۰	۱۲
۳	۱/۲ (۰/۸۸۶)	۱/۴ (۰/۸۸۶)		۱/۸ (۰/۸۸۶)	۱/۱۰ (۰/۸۸۶)	
۶		۱/۲ (۰/۸۸۶)		۱/۴ (۰/۸۸۶)	۱/۵ (۰/۸۸۶)	
۹			۱/۲ (۰/۸۸۶)	۳/۸ (۰/۹۴۵)	۳/۱۰ (۰/۹۴۵)	۳/۱۲ (۰/۸۸۶)
۱۲				۱/۲ (۰/۸۸۶)	۲/۵ (۰/۸۸۶)	
۱۵					۱/۲ (۰/۸۸۶)	
۱۸						۱/۲ (۰/۸۸۶)

سیم پیچی متمرکز دارای مزیت کاهش طول انتهای سیم‌پیچی و به تبع آن، کاهش مقاومت و تلفات مسی را دارد. همچنین امکان دستیابی به ضریب انباشتگی بالا (تا ۰/۷ در نوع استاتور مدولار) با این نوع سیم پیچی وجود دارد [۶]. دستیابی به ضریب انباشتگی بالا نیازمند ساخت استاتور به صورت چند تکه است. شماتیک استاتور چند تکه در **Error! Reference source not found.** در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است. در **Error! Reference source not found.** (پ) نمونه استاتور ۶ تکه نشان داده شده است. سیم پیچی هر تکه به صورت جداگانه مانند **Error! Reference source not found.** (الف) صورت می‌گیرد؛ سپس دو تکه سیم‌پیچی شده در کنار یکدیگر همانند **Error! Reference source not found.** (ب) قرار داده می‌شود تا حداکثر ضریب انباشتگی مشخص شود. در **Error! Reference source not found.** نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی تست موتور سنکرون رلوتانسی با سیم پیچی متمرکز و ضریب انباشتگی ۰/۶ نشان داده شده است [۷]. بازده موتور به حدود ۹۰ درصد رسیده است که بسیار نزدیک به کلاس IE4 برای موتور ۳ کیلووات، ۱۵۰۰ دور است.

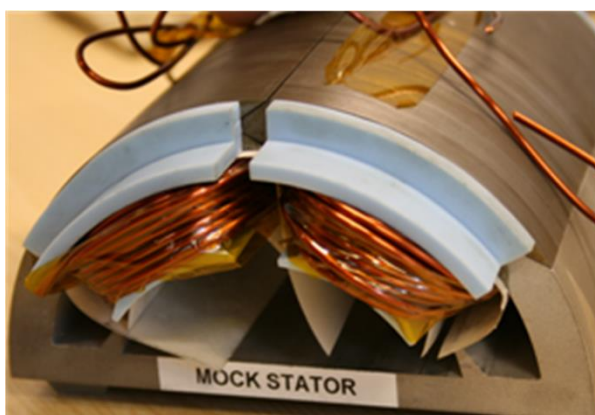


شکل ۱-۸- شماتیک استاتور چند تکه [۷]

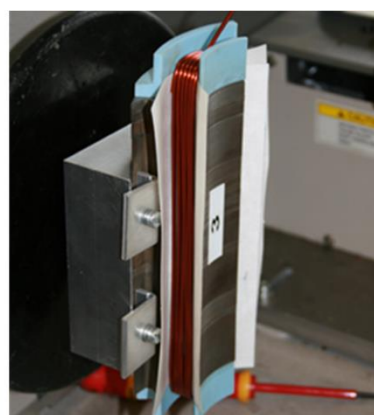
جدول ۴-۸- نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی موتور سنکرون رلوتانسی با سیم‌پیچی متمرکز [۷]

نتایج اندازه گیری	نتایج المان محدود	
۲۳/۴	۲۳/۴	جریان (A)

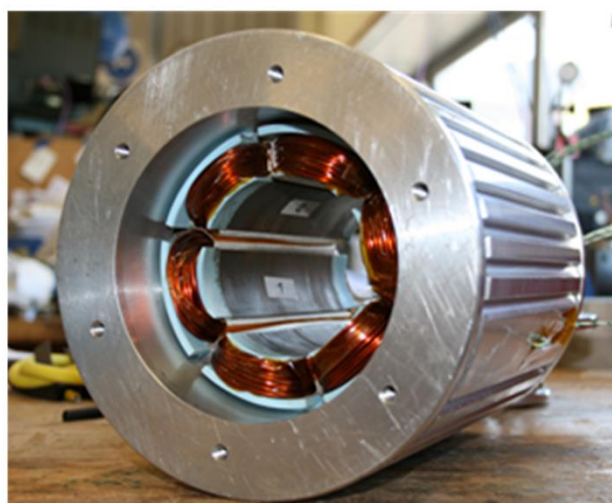
۲۲/۰	۲۴/۲	گشتاور (Nm)
۳/۵	۳/۸	توان خروجی (kW)
۸۸/۹	۹۰/۰	بازده (%)
۰/۴۹	۰/۴۷	ضریب قدرت



(ب)



(الف)



(پ)

شکل ۲-۸- استاتور ۶ تکه موتور سنکرون رلوکتانسی با سیم پیچی متمرکز [۷]

در [۸] از استاتور یکپارچه با سیم پیچی متمرکز و تعداد ۹ شیار برای سنکرون رلوکتانسی استفاده شده است، اگرچه نتایج شبیه سازی امکان رسیدن به کلاس بازدهی IE4 برای موتور سنکرون رلوکتانسی را با داشتن ضریب انباشتگی ۰/۶ نشان داده است، اما عدم موفقیت عملی در رسیدن به کلاس بازدهی IE4 با سیم پیچی متمرکز برای موتور سنکرون رلوکتانسی گزارش شده است، زیرا در پیاده سازی عملی دستیابی به ضریب انباشتگی حداکثر ۰/۴۵ گزارش شده است [۸]. کاهش ضریب قدرت و افزایش دمای سیم پیچی بیشتر نسبت به سیم پیچی توزیع شده از دیگر مشکلات سیم پیچی متمرکز است [۶].

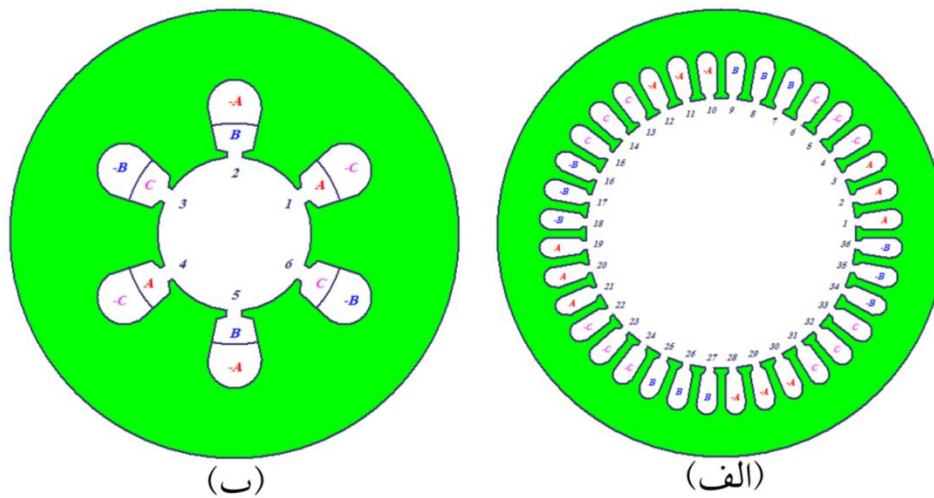
از آن جا که سرعت مورد نظر برای موتور ۱۵۰۰ دور در دقیقه است و موتور سنکرون رلوکتانسی برای کاربرد خود راه انداز طراحی می شود، بنابراین برای تعداد ۴ قطب، مطابق جدول ۱-۳ تعداد شیارهای استاتور برای سیم پیچی متمرکز ۳ و ۶ عدد می تواند انتخاب شود. با توجه به بحث فوق و در نظر گرفتن مسائل مرتبط با خنک کنندگی موتور در ادامه طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی با تعداد ۶ شیار برای سیم پیچی متمرکز و ۳۶ شیار برای سیم پیچی توزیع شده انجام شده است.

سیم پیچی توزیع شده

سیم پیچی توزیع شده مزیت کاهش هارمونیک های شار و رپل گشتاور را دارا است. در بسیاری از مراجع برای طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی استاتور را همانند موتورهای القایی با سیم پیچی توزیع شده در نظر می گیرند [۹، ۱۰].

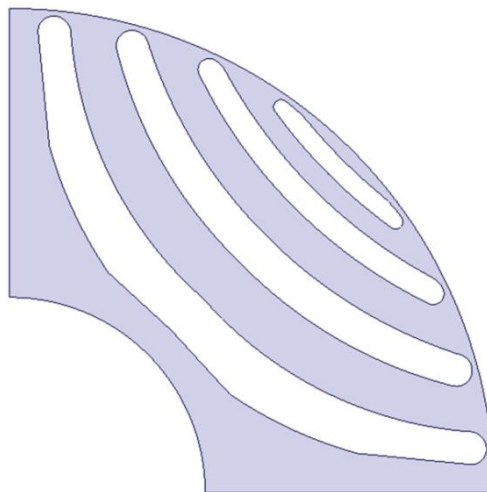
۸-۲-۶- مقایسه سیم پیچ متمرکز و توزیع شده

در این قسمت عملکرد موتور با سیم پیچی توزیع شده و متمرکز مورد ارزیابی قرار می گیرد. **Error! Reference source not found.** (الف) سیم پیچی توزیع شده استاتور با ۳۶ شیار و **Error! Reference source not found.** (ب) سیم پیچی متمرکز استاتور با ۶ شیار را نشان می دهد.



شکل ۸-۳- (الف) سیم پیچی توزیع شده ۳۶ شیار (ب) سیم پیچی متمرکز ۶ شیار

در اینجا قبل از انجام بهینه سازی سعی می شود تا عملکرد دو موتور مقایسه شود. **Error! Reference source not found.** نتایج مقایسه موتور با ۴ سدکننده شار و دو نوع سیم پیچی را برای حالتی که از روتور شکل ۱-۴ استفاده شود، نشان می دهد. در روتور **Error! Reference source not found.** زاویه همه س دکننده های شار یکسان و ضریب ایزولاسیون ۰/۴۵ در نظر گرفته شده است. تلفات استاتور ثابت و برابر ۲۶۰ وات در نظر گرفته شده است.



شکل ۴-۸- یک قطب روتور با چهار سدکننده شار و زوایای یکسان سدکننده‌های شار

جدول ۵-۸- مقایسه موتور با سیم‌پیچی توزیع شده و متمرکز و روتور یکسان

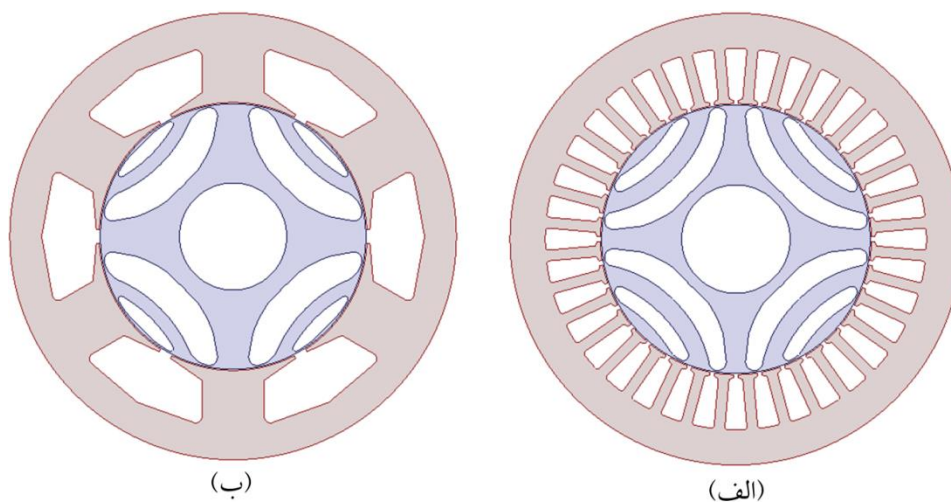
تعداد قطب	تعداد شیار برپ قطب بر فاز	ضریب انباشتگی	متوسط گشتاور	ریپل گشتاور	ضریب قدرت
۴	۳	۰/۴۵	۲۰/۱۳	۴۶/۳	۰/۷۵
۴	۰/۵	۰/۴۵	۱۵/۶	۱۰۳/۶	۰/۴۹
۴	۰/۵	۰/۶	۱۹/۳	۱۰۳/۶	۰/۴۷

مطابق نتایج **Error! Reference source not found.** ریپل گشتاور موتورهای با سیم‌پیچی توزیع شده و متمرکز به ترتیب حدود ۴۶ و ۱۰۳ درصد است. بنابراین انجام بهینه‌سازی برای کاهش ریپل گشتاور ضروری به نظر می‌رسد. موتور دارای ۶ شیار با ضریب انباشتگی ۰/۴۵ متوسط گشتاور ۱۵/۶ نیوتن-متر دارد که از مقدار گشتاور نامی موتور ۳ کیلو وات (۱۹/۱ نیوتن-متر) ۳/۵ نیوتن-متر کمتر است. بنابراین در صورت استفاده از سیم‌پیچی متمرکز به ناچار باید ضریب انباشتگی را افزایش داد تا امکان دستیابی به کلاس بازدهی مورد نظر فراهم شود و این کار مستلزم ساخت استاتور به صورت چندتکه است. موتور با سیم‌پیچی توزیع شده از نظر متوسط و ریپل گشتاور و ضریب قدرت وضعیت بهتری نسبت به موتور با سیم‌پیچی متمرکز دارد.

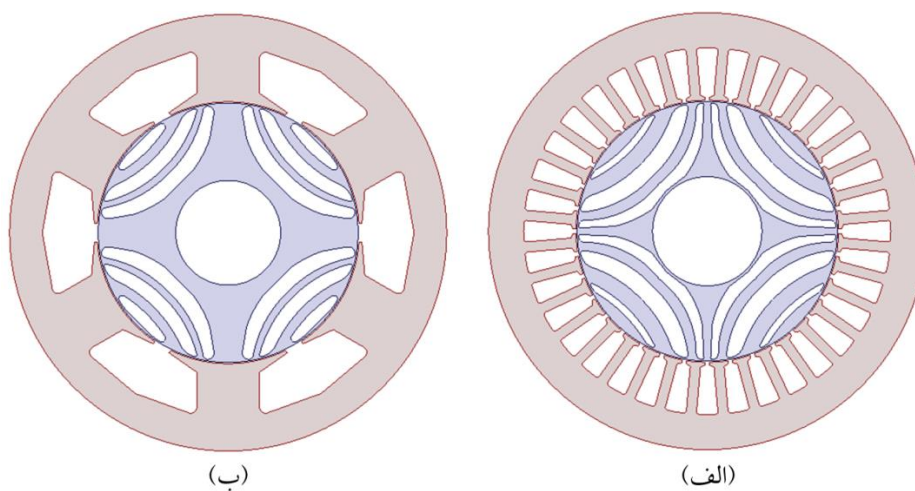
۷-۲-۸- بهینه سازی با روش المان محدود

همانطور که در گزارش فاز دوم اشاره شد، مراجع متعددی از روش المان محدود برای طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی استفاده کرده‌اند [۱۰-۱۲]. تفاوت روش‌های ارائه شده در نحوه پارامتر بندی روتور و الگوریتم بهینه سازی است. در این گزارش شکل سدکننده‌های شار به صورت سیال انتخاب شده و از روش بهینه‌سازی تفاضل تکاملی برای بهینه‌سازی استفاده شده است. ضخامت و زاویه سدکننده‌های شار به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی روتور انتخاب شده است. نمونه موتورهای بهینه با تعداد دو، سه و چهار سدکننده شار برای استاتور با سیم پیچی متمرکز و توزیع شده به

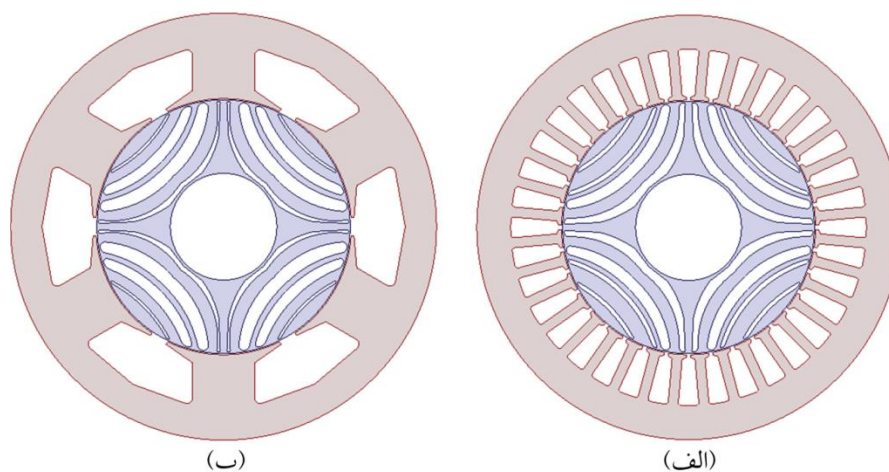
ترتیب در **Error! Reference source not found.** تا **Error! Reference source not found.** نش
ان داده شده است.



شکل ۵-۸- موتورهای بهینه با دو سدکننده‌شار (الف) ۳۶ شیار (ب) ۶ شیار



شکل ۶-۸- موتورهای بهینه با سه سدکننده‌شار (الف) ۳۶ شیار (ب) ۶ شیار



شکل ۷-۸- موتورهای بهینه با چهار سدکننده شار (الف) ۳۶ شیار (ب) ۶ شیار

جدول ۶-۸- نتایج بهینه سازی

تعداد شیار استاتور	ضریب انباشتگی	تعداد سدکننده شار روتور	متوسط گشتاور [Nm]	ریپل گشتاور %	ضریب قدرت
۳۶	۰/۴۵	۲	۲۰/۹	۱۱/۵	۰/۷۴
۳۶	۰/۴۵	۳	۲۱/۲	۱۴/۳	۰/۷۴
۳۶	۰/۴۵	۴	۲۱/۴	۱۱/۷	۰/۷۵
۶	۰/۶	۲	۱۹/۸	۱۹/۷	۰/۵۰
۶	۰/۶	۳	۲۰/۴	۲۷/۲	۰/۵۰
۶	۰/۶	۴	۱۹/۸	۸۹/۴	۰/۵۱

نتایج بهینه سازی در نشان داده شده است. موتورهای با سیم پیچی توزیع شده در تعداد سدکننده های شار مختلف، ریپل گشتاور نسبتاً کمی دارند و با افزایش تعداد سدکننده های شار، متوسط گشتاور آن ها افزایش پیدا کرده است. در مورد موتور با سیم پیچی متمرکز، ریپل گشتاور موتور با تعداد دو سدکننده شار کمترین مقدار را دارد و با افزایش تعداد سدکننده های شار، افزایش می یابد. ذکر این نکته قابل توجه است که برای موتورهای با چهار سدکننده شار، ریپل گشتاور موتور با سیم پیچی متمرکز، ۱۰ برابر بیشتر از موتور با سیم پیچی توزیع شده است. حتی با انجام بهینه سازی طولانی مدت نیز امکان کاهش ریپل گشتاور به مقداری که قابل قبول باشد، وجود ندارد و این نکته اهمیت انتخاب تعداد مناسب سدکننده های شار با توجه به تعداد شیار استاتور را نشان می دهد.

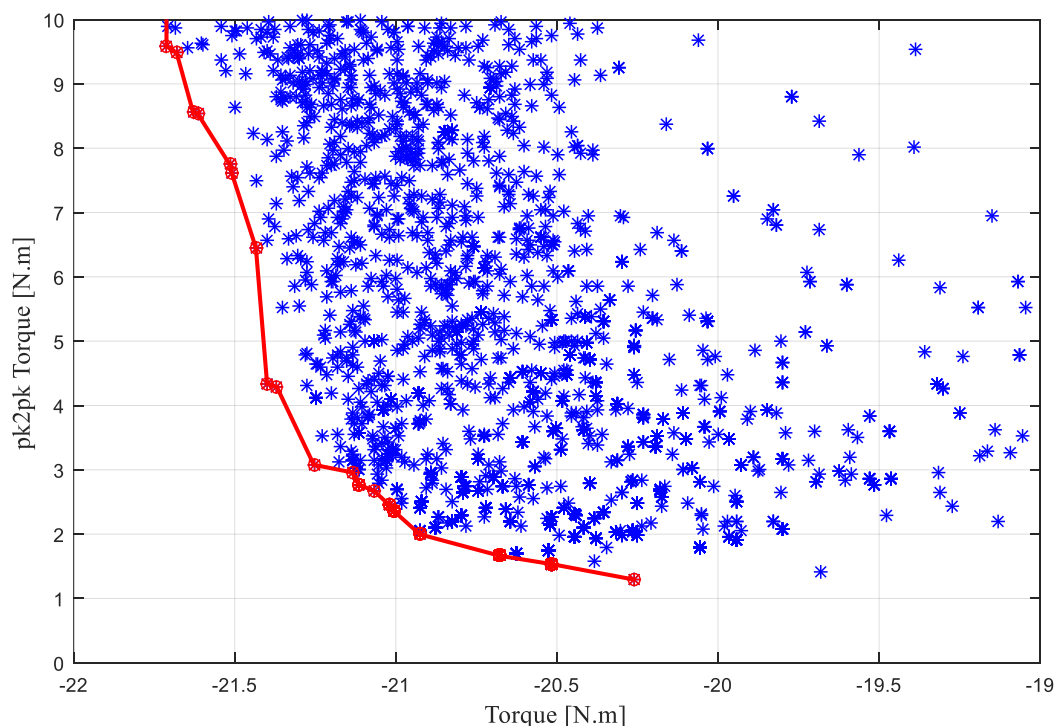
با توجه ریپل گشتاور کمتر و نیز دمای سیم پیچی پایین تر در ادامه از سیم پیچی توزیع شده برای طراحی موتور سنکرون رلکتانسی استفاده خواهد شد.

۸-۲-۸- موتورهای سنکرون رلکتانسی بهینه

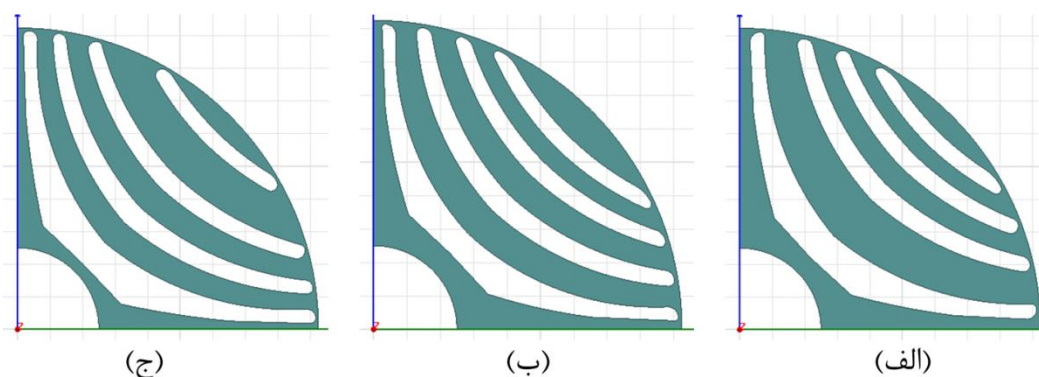
با توجه به نتایج بخش قبل، تعداد سدکننده های شار و نوع سیم پیچی ای که بهترین عملکرد را برای موتور دارد، مشخص شد. بنابراین در ادامه نتایج بهینه سازی با تعداد ۴ سدکننده شار و سیم پیچی توزیع شده مورد بررسی قرار

می‌گیرد. تعداد جمعیت ۶۰ و ۵۰ نسل به عنوان پارامترهای بهینه سازی انتخاب شده است که متناظر با تعداد جمعیت و نسل در مطالعه [۱۳] برای بهینه سازی موتور سنکرون رلوتانسی است. در مطالعه دیگر [۱۱] نیز تعداد ۳۰۰۰ مرتبه ارزیابی تابع هدف برای بهینه سازی کافی دانسته شده است. مدت زمان بهینه سازی با پردازنده ۵ هسته‌ای، 2.6GHz و 8GB حافظه تصادفی، حدود ۲۴ ساعت برای هر اجرا طول می‌کشد. تعداد ۱۵ نقطه از منحنی گشتاور در سه گام شیار استاتور برای ارزیابی در هنگام بهینه سازی انتخاب شده است. نتایج بهینه سازی همزمان متوسط و ریپل گشتاور در نشان داده شده است.

برای طراحی موتور سنکرون رلوتانسی خودراه انداز، سه طرح روتور سنکرون رلوتانسی بهینه مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند تا به عنوان پایه طراحی موتور خودراه انداز انتخاب شوند. الف) روتور شماره یک، ب) روتور شماره دو و ج) روتور شماره سه را نشان می‌دهد. عملکرد حالت پایدار سه موتور سنکرون رلوتانسی بهینه با روش آنالیز المان محدود مورد ارزیابی قرار گرفته است. مقدار متوسط و ریپل گشتاور دو موتور به ازای جریان ثابت استاتور در گزارش شده است.



شکل ۸-۸- نتایج بهینه سازی موتور با ۴ سدکننده شار و سیم پیچی توزیع شده



شکل ۹-۸- روتور سنکرون رلوتکنسی بهینه. (الف) موتور شماره یک (ب) موتور شماره دو (ج) موتور شماره سه

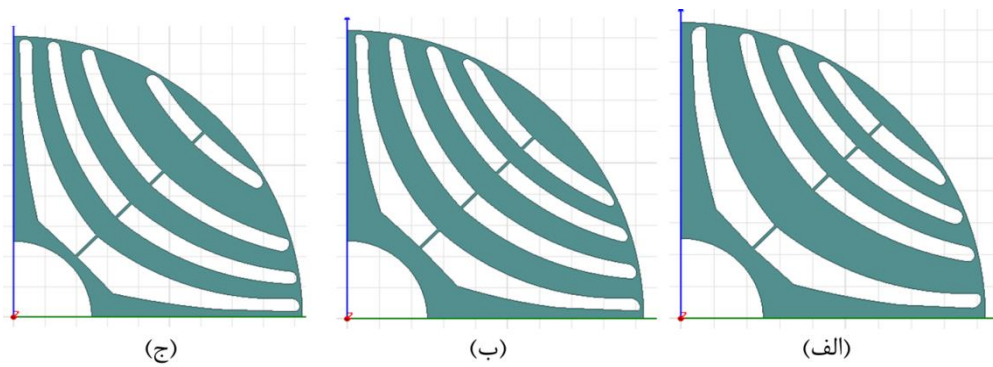
جدول ۷-۸- مقایسه عملکرد موتورهای سنکرون رلوتکنسی شماره یک، دو و سه

نام موتور	جریان استاتور [A]	متوسط گشتاور [Nm]	ریپل گشتاور %
موتور شماره یک	۶/۳۰	۱۹/۸۲	۱۳/۶۲
موتور شماره دو	۶/۳۰	۱۹/۸۳	۱۰/۷۷
موتور شماره سه	۶/۳۰	۱۹/۹۹	۱۱/۰۹

مقدار متوسط گشتاور هر سه موتور نسبت به هم تفاوت اندکی دارد و ریپل گشتاور آن‌ها نیز مشابه بوده و در حد قابل قبولی است. موتور شماره دو ریپل گشتاور کمتر و موتور شماره سه متوسط گشتاور بیشتری دارد. در ادامه اثر پل‌های شعاعی و گام سیم‌پیچی بر عملکرد حالت پایدار موتور سنکرون رلوتکنسی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۹-۲-۸- اثر پل‌های شعاعی

در اینجا گشتاور موتورهای سنکرون رلوتکنسی در جریان استاتور ثابت برای حالتی که روتور دارای پل‌های شعاعی باشد، آمده است. **Error! Reference source not found.** روتورهای بهینه را با پل‌های شعاعی نشان م ی‌دهد. ضخامت پل‌های شعاعی برابر ضخامت ورق یعنی 0.5mm انتخاب شده است. نتایج در **Error! Reference source not found.** آمده است. با وجود پل‌های شعاعی، متوسط گشتاور در سه موتور حدود ۰/۴ نیوتن-متر افت کرده است. ریپل گشتاور در موتور شماره یک و دو کاهش یافته و در موتور شماره سه افزایش داشته است. اگرچه اضافه کردن پل‌های شعاعی، باعث افت گشتاور موتور می‌شود؛ اما استحکام مکانیکی روتور را افزایش می‌دهد.



شکل ۱۰-۸- روتورهای بهینه با پل‌های شعاعی. الف) موتور شماره یک ب) موتور شماره دو ج) موتور شماره سه

جدول ۸-۸- مقایسه موتور سنکرون رلوتانسی با وجود پل‌های شعاعی

نوع موتور	جریان استاتور [A]	متوسط گشتاور [Nm]	ریپل گشتاور %
موتور شماره یک	۶/۳۰	۱۹/۳۴	۱۲/۸۵
موتور شماره دو	۶/۳۰	۱۹/۳۸	۱۰/۱۱
موتور شماره سه	۶/۳۰	۱۹/۵۱	۱۲/۰۳

فصل ٩- طراحی قفس القایی

۹-۱- مقدمه

در این فصل طراحی قفس القایی موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز مورد بررسی قرار می گیرد.

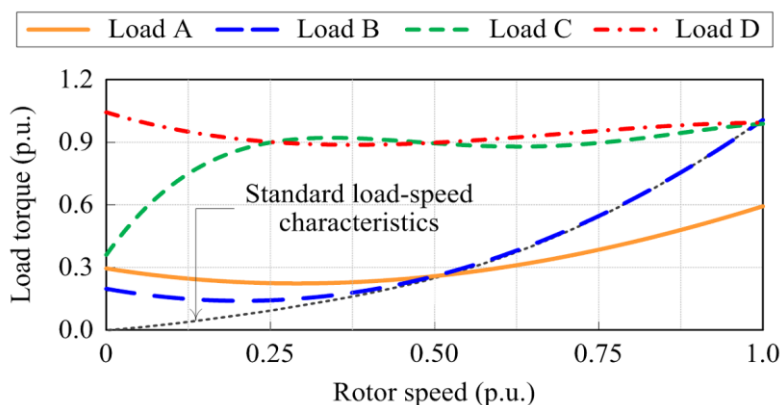
۹-۲- طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز

طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز به شدت وابسته بار است؛ زیرا رفتار بار در لحظه راه اندازی بر قابلیت سنکرونیزم موتور بسیار تاثیر گذار است. در [۱۴] بارهای متداول را در چهار دسته مطابق ۰ تقسیم بندی کرده است.

جدول ۹-۱- انواع بارها و مشخصه آنها [۱۴]

نوع بار	تعریف	کاربردها	گشتاور راه اندازی	مشخصه بار
A	بارهای سبک	پرس ها، پانچ ها، ماشین های دریل	بین ۲۰ تا ۳۰ درصد	گشتاور در مقدار کمی باقی می ماند. بار وقتی اعمال می شود که موتور سرعت گرفته است.
B	بارهای متوسط	فن ها، دمنده ها، پمپ های گریز از مرکز و کمپرسورها	بین ۱۰ تا ۴۰ درصد	توان متناسب با مکعب سرعت است. گشتاور متناسب با مربع سرعت افزایش می یابد.
C	بارهای راه اندازی سنگین	دستگاه های آسیاب و نورد، سانتریفیوژها	بین ۳۰ تا ۴۰ درصد با اینرسی زیاد	توان متناسب با مربع سرعت است.
D	بارهای سنگین	نوار نقاله ها و بالابر ها	بین ۱۰۰ تا ۱۱۰ درصد	توان متناسب با سرعت است. در تمامی بازه سرعت، گشتاور تقریباً ثابت و برابر مقدار نامی باقی می ماند.

مشخصه گشتاور-سرعت نوعی بارهای مختلف در ۰ نشان داده شده است. این بارها مشخصه سختگیرانه تری نسبت به مشخصه بار استاندارد که گشتاور متناسب با مربع سرعت دارد و در بسیاری از طراحی مورد استفاده قرار می گیرد، دارند [۱۵].



شکل ۹-۱- مشخصه گشتاور-سرعت انواع بارها [۱۵]

در ادامه برای طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز، مشخصه بار متوسط در نظر گرفته شده است. گشتاور راه اندازی ۴۰ درصد مقدار نامی بوده و گشتاور متناسب با مربع سرعت افزایش می‌یابد. اینرسی کل برابر با دو برابر اینرسی موتور در نظر گرفته شده است. مشخصات هندسی موتور در ۰ آمده است. از ورق M400-50A برای شبیه سازی استفاده شده است.

جدول ۲-۹- مشخصات هندسی موتورهای بهینه

پارامتر	واحد	مقدار
طول محوری	[mm]	۱۵۰
قطر خارجی استاتور	[mm]	۱۵۰
قطر داخلی استاتور	[mm]	۹۳
قطر داخلی روتور	[mm]	۲۵
ضخامت فاصله هوایی	[mm]	۰/۳
تعداد شیارهای استاتور	-	۳۶
دهانه باز شیار	[mm]	۲/۰
ضخامت دندان استاتور	[mm]	۳/۶

مطابق با استاندارد IEC-60034-30-1 برای موتور با توان سه کیلووات، کلاس‌های بازده و میزان تلفات در ۰ مشخص شده است.

جدول ۳-۹- کلاس‌های بازده و حداکثر تلفات مجاز برای توان سه کیلووات

کلاس بازده		IE3		IE4		IE5	
توان موتور [W]	بازده %	تلفات حداکثر [W]	بازده %	تلفات حداکثر [W]	بازده %	تلفات حداکثر [W]	بازده %
۳۰۰۰	۸۷/۷	۴۲۰/۷	۹۰/۴	۳۱۸/۵	۹۲/۱	۲۵۷/۳	

با توجه به مقادیر ۰ برای رسیدن به کلاس بازده IE4، بازده موتور باید به حداقل ۹۰/۴ درصد برسد و حداکثر تلفات موتور نباید از ۳۱۸/۵ وات بیشتر باشد.

۳-۹- موتور با قفس میله‌ای

دو نوع شکل متداول با قفس میله‌ای می‌توان برای موتور خودراه انداز در نظر گرفت، یکی میله‌های دایره‌ای و دیگری میله‌های مستطیلی است. میله‌های دایره‌ای به دلیل اینکه سدکننده‌های شار در نزدیکی سطح روتور ضخامت کمی دارند، بنابراین وارد ناحیه هادی‌های شار شده و مسیر عبور شار محور d را کاهش می‌دهند که نتیجه آن کاهش

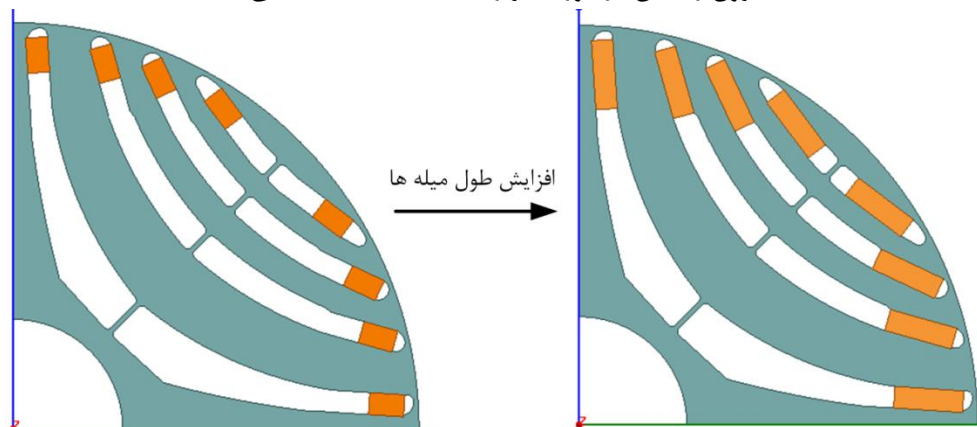
گشتاور تولیدی و افت بازده موتور در شرایط کار سنکرون است [۳]؛ بنابراین در ادامه طراحی قفس با میله‌های مستطیلی مدنظر قرار گرفته است.

۱-۳-۹- طراحی قفس با میله‌های مستطیلی

روند طراحی به این صورت است که سه نمونه روتور سنکرون رلکتانسی که از نظر متوسط و ریبیل گشتاور بهینه هستند، در این مرحله برای طراحی قفس در نظر گرفته می‌شود. زاویه سدکننده‌های شار پارامتر تاثیر گذار بر ریبیل گشتاور است و ضخامت سدکننده‌های شار متوسط گشتاور را تعیین می‌کند [۱۰]. با ثابت در نظر گرفتن زاویه سدکننده‌های شار، ریبیل گشتاور تقریباً ثابت باقی می‌ماند. با ثابت ماندن ضریب ایزولاسیون متوسط گشتاور تقریباً ثابت باقی می‌ماند. بنابراین ضخامت سدکننده‌های طوری تنظیم شده‌اند تا بتوانند میله‌های قفس را در داخل سدکننده‌ها جای دهند.

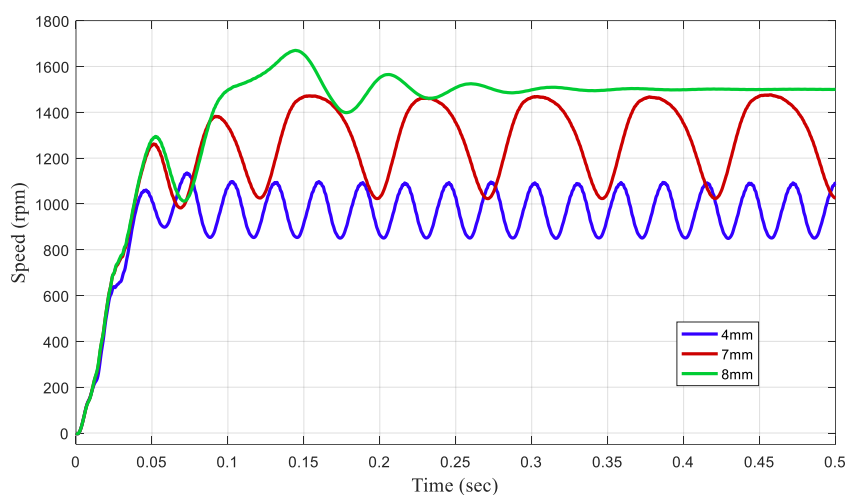
۱-۳-۹-۱- روتور بهینه شماره یک

فاصله میله‌ها از سطح روتور ۱/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است تا میله‌ها مسیر انتهایی هادی‌های شار را تغییر ندهند. طول میله‌ها همانطور که در ۰ نشان داده شده است از ۴ میلی‌متر با گام یک میلی‌متر افزایش داده می‌شود تا زمانی که موتور توانایی سنکرونیزم را داشته باشد. با انجام این روند، حداقل میزان مس برای ایجاد قفسی که توانایی به سنکرون رساندن بار مورد نظر را داشته باشد، به دست می‌آید.



شکل ۲-۹- افزایش طول میله‌های روتور شماره یک

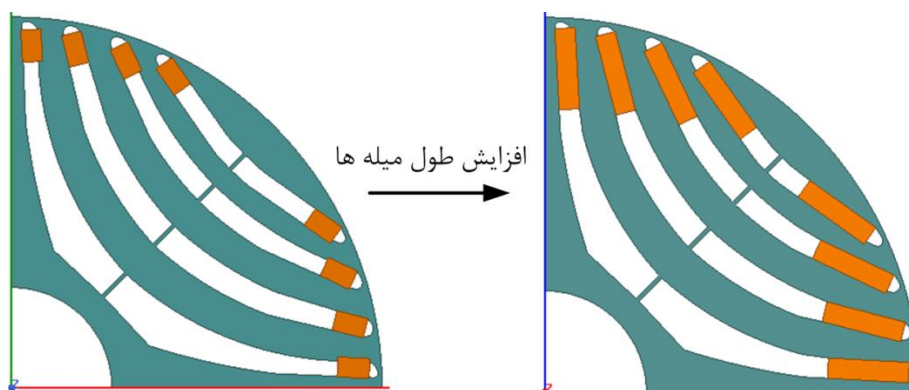
مشخصه سرعت-زمان موتور شماره یک در ۰ به ازای چند حالت مختلف از طول میله‌ها نشان داده شده است. با افزایش طول میله‌ها از ۴ میلی‌متر به ۷ میلی‌متر، متوسط سرعت افزایش می‌یابد اما همچنان با نوسانات شدید سرعت در پی است. با رسیدن طول میله‌ها به ۸ میلی‌متر، موتور توانایی سنکرونیزم موفق را دارد و نوسانات سرعت پس از مدتی میرا می‌شوند.



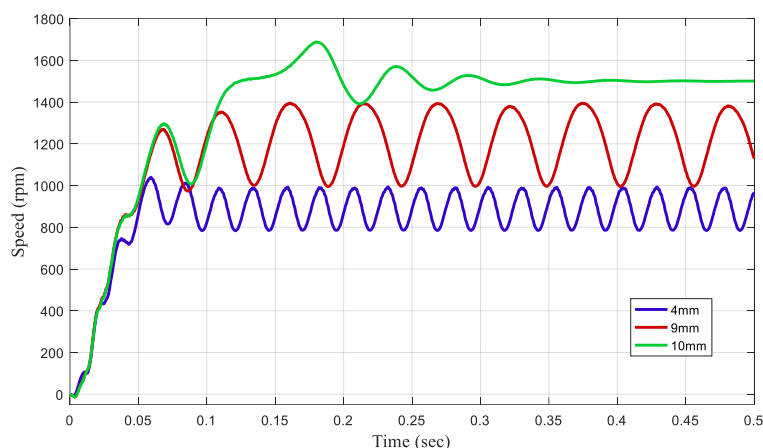
شکل ۳-۹- منحنی سرعت-زمان به ازای میله‌های با طول مختلف در روتور شماره یک

۲-۱-۳-۹- روتور بهینه شماره دو

مشابه حالت قبل، طول میله‌های قفس یا گام یک میلی‌متر افزایش داده می‌شود و عملکرد راه اندازی موتور مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. روتور شماره دو را با میله‌های با طول ۴ و ۱۰ میلی‌متر نشان می‌دهد.



شکل ۴-۹- افزایش طول میله‌ها در روتور شماره دو

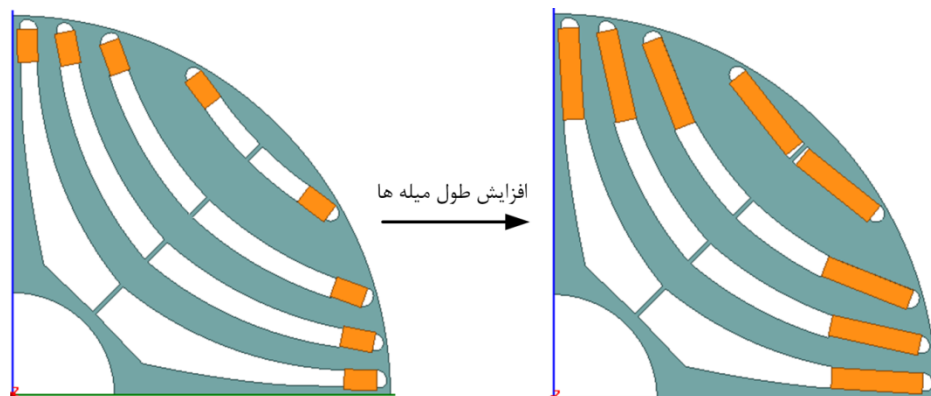


شکل ۵-۹- منحنی سرعت-زمان به ازای میله‌های با طول مختلف در موتور شماره دو

منحنی‌های سرعت-زمان برای موتور شماره دو به ازای طول مختلف میله‌های قفس، در * نشان داده شده است. برای موتور شماره دو، توانایی سنکرونیزم به ازای میله‌های با طول ۱۰ میلی‌متر به دست می‌آید که نسبت به موتور شماره ۱، طول میله‌ها ۲ میلی‌متر افزایش داشته است. بنابراین اگرچه هر دو موتور سنکرون رلکتانسی شماره یک و دو، مشخصه حالت پایدار تقریباً یکسانی دارند، اما عملکرد راه اندازی آن‌ها متفاوت است.

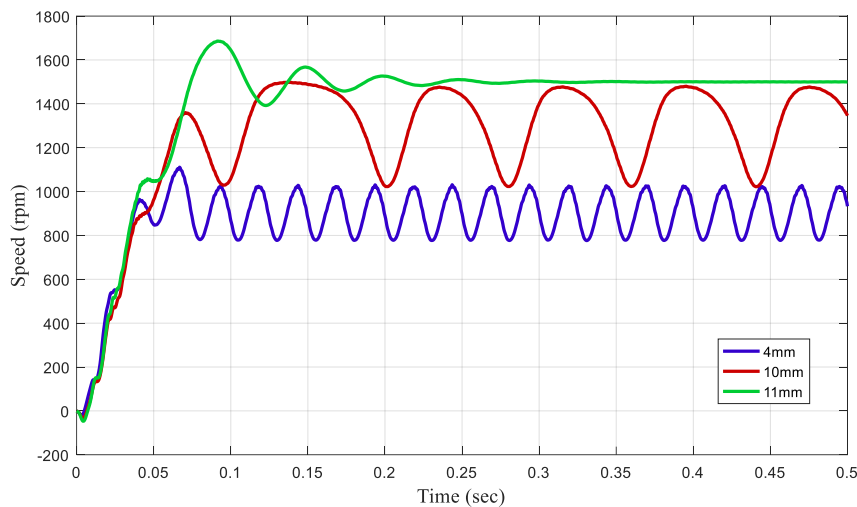
۳-۱-۳-۹- روتور بهینه شماره سه

برای موتور شماره سه نیز، طول میله‌های قفس با گام یک میلی‌متر افزایش داده شده و عملکرد راه اندازی موتور مورد ارزیابی قرار گرفته است. * روتور شماره دو را با میله‌های با طول ۴ و ۱۱ میلی‌متر نشان می‌دهد.



شکل ۶-۹- افزایش طول میله‌ها روتور شماره سه

منحنی‌های سرعت-زمان برای موتور شماره سه به ازای طول مختلف میله‌های قفس، در * نشان داده شده است.

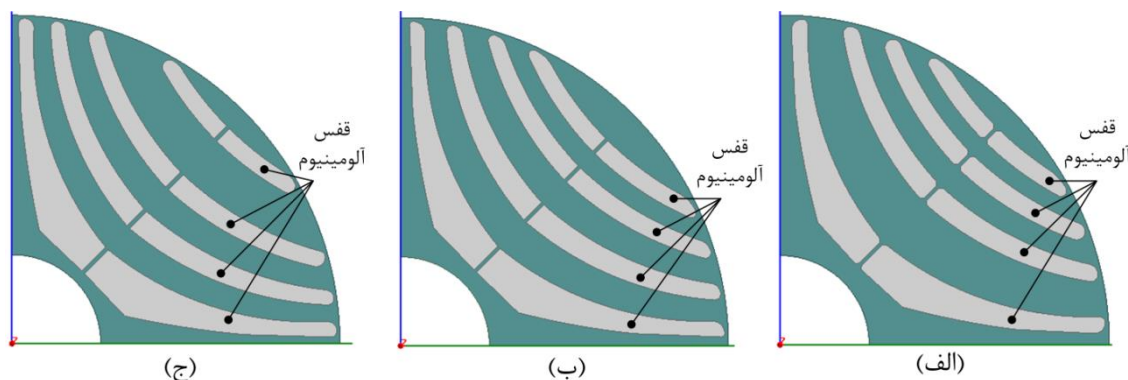


شکل ۷-۹- منحنی سرعت-زمان به ازای میله‌های با طول مختلف در روتور شماره سه

برای موتور شماره سه، توانایی سنکرونیزم به ازای میله‌های با طول ۱۱ میلی‌متر به دست می‌آید. بنابراین از بین سه موتور، موتور شماره یک با کمترین میزان مصرف مس توانایی سنکرونیزم موفق بار را دارد. برای توجیه این که چرا موتور شماره یک مشخصه راه‌اندازی بهتری نسبت به موتور شماره دو و سه دارد، باید به این نکته توجه کرد که زاویه سدکننده‌های شار در موتور شماره یک به محور q نزدیک‌تر هستند. نزدیک‌تر بودن میله‌های قفس به محور q در موتور شماره یک، باعث می‌شود تا مقاومت محور d روتور کاهش یافته و قابلیت سنکرونیزم موتور افزایش یابد [۱۶].

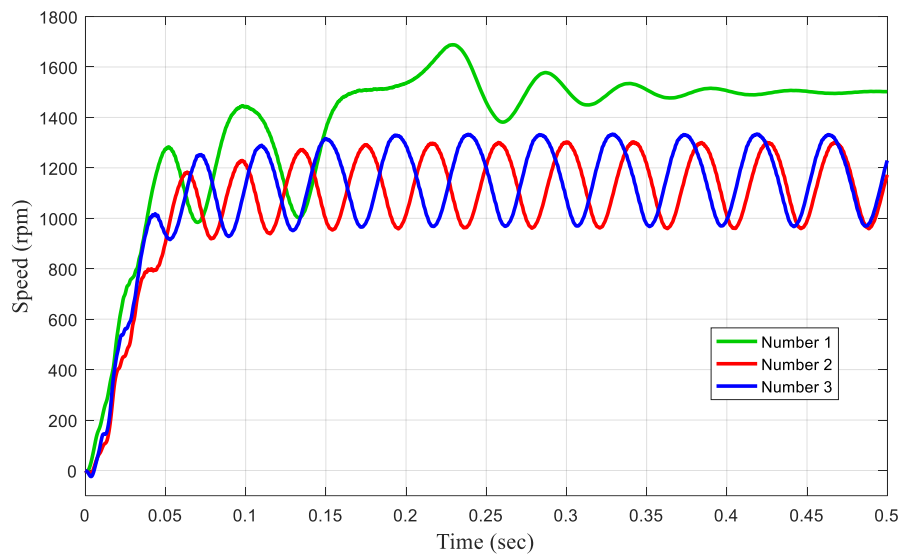
۹-۴- موتور با قفس ریخته‌گری شده

پُر کردن تمامی فضای سدکننده‌های شار با آلومینیوم مذاب راه حل دیگری برای ایجاد قفس راه‌اندازی است. * دو روتور موتور سنکرون رلکتانسی خودراه انداز را نشان می‌دهد که فضای خالی سدکننده‌های شار تماماً با آلومینیوم مذاب پر شده است.



شکل ۸-۹- روتور با قفس آلومینیوم ریخته‌گری شده (الف) شماره یک (ب) شماره دو (ج) شماره سه

مقایسه عملکرد راه‌اندازی روتورهای با قفس آلومینیوم ریخته‌گری شده در * نشان داده شده است.



شکل ۹-۹- منحنی سرعت-زمان برای روتورهای با قفس آلومینیوم ریخته گری شده

با پر شدن تمامی فضای سدکننده‌های شار، روتور شماره یک توانایی سنکرونیسم بار را دارد ولی روتور شماره دو و سه نمی‌توانند بار نامی را به سرعت سنکرون برسانند. عملکرد شرایط پایدار موتور شماره یک با قفس میله‌ای مسی و آلومینیوم ریخته‌گری شده در ۰ مقایسه شده است. در محاسبه بازده، تلفات آهن $1/25$ برابر لحاظ شده است تا اثر برش ورق‌ها در افزایش تلفات نیز منظور شده باشد. روتور با قفس ریخته‌گری شده به دلیل اینکه حجم زیادی از فضای قفس در معرض هارمونیک‌های شار قرار می‌گیرد، تلفات اهمی روتور بیشتری دارد. از آنجا که افزایش تلفات اهمی روتور، منجر به افزایش جریان استاتور می‌شود، بنابراین تلفات اهمی استاتور و تلفات هسته نیز نسبت به موتور با قفس با میله‌های مسی مقدار کمی بیشتر است. بازده موتور با قفس میله‌ای مسی $0/5$ درصد نسبت به موتور با قفس آلومینیوم ریخته‌گری شده بیشتر است. کلاس بازدهی موتور با قفس میله‌ای مسی به استاندارد IE4 و موتور با قفس آلومینیوم ریخته‌گری شده به استاندارد IE3 می‌رسد. برای اینکه موتور با قفس ریخته‌گری شده به کلاس یازده بالاتر برسد، باید ابعاد موتور افزایش داده شود.

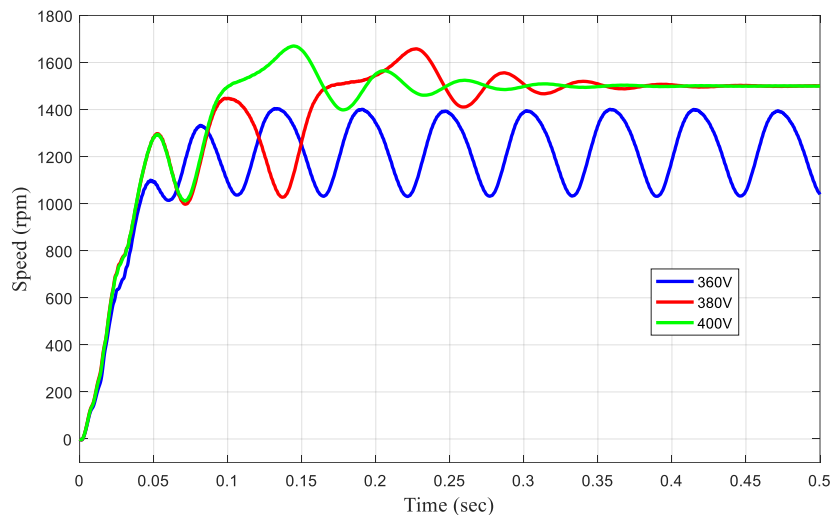
جدول ۴-۹- مقایسه عملکرد حالت پایدار موتور با قفس آلومینیوم ریخته‌گری شده و قفس میله‌ای مسی

نوع قفس	تلفات اهمی استاتور	تلفات اهمی روتور	تلفات آهن $1/25$ برابر	تلفات مکانیکی	بازده
آلومینیوم ریخته‌گری شده	$204/9$	$38/5$	$63/1$	$30/0$	$89/9$
میله‌ای مسی	$204/5$	$23/8$	$62/0$	$30/0$	$90/4$

با توجه به عملکرد بهتر موتور با قفس میله‌ای نسبت به روتور با قفس ریخته‌گری شده، بنابراین موتور با قفس میله‌ای به عنوان موتور نهایی برای ارزیابی‌های بیش‌تر، انتخاب می‌شود.

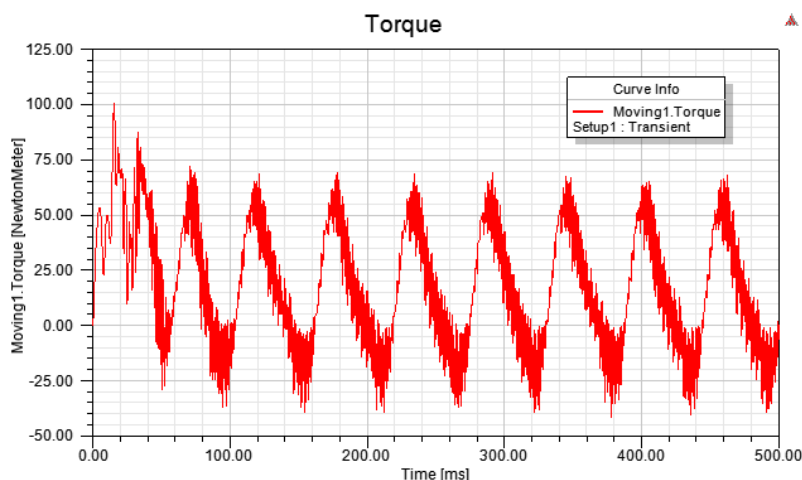
۵-۹- ارزیابی عملکرد موتور با ولتاژ کاهش یافته

یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر قابلیت راه اندازی موتور سنکرون رلکتانسی خودراه انداز، اندازه ولتاژ تغذیه است. در بخش‌های قبل عملکرد راه اندازی موتور در ولتاژ نامی که برابر ۴۰۰ ولت است، مورد بررسی قرار گرفت. در اینجا عملکرد موتور با کاهش ۵ و ۱۰ درصدی در ولتاژ خط مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. منحنی سرعت-زمان موتور برای بار نامی ولتاژ نامی و ولتاژ نامی کاهش یافته ۳۸۰ و ۳۶۰ ولت در ۰ نشان داده شده است.

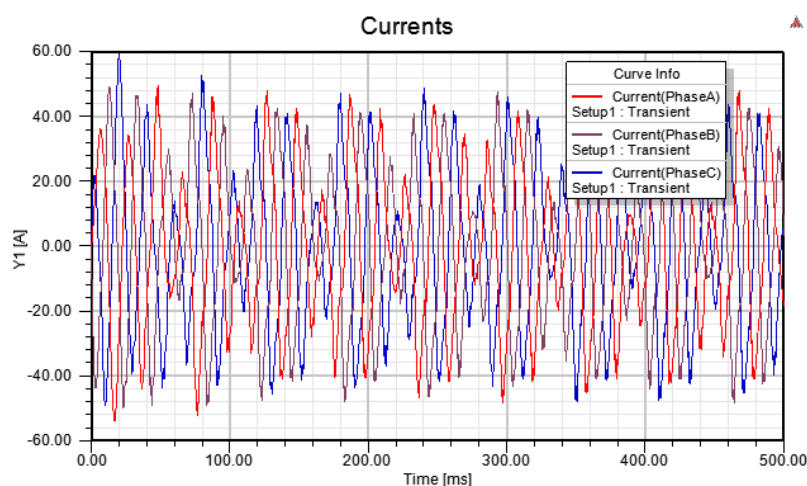


شکل ۱۰-۹- منحنی سرعت-زمان در بار نامی و ولتاژ ۴۰۰، ۳۸۰ و ۳۶۰ ولت

با کاهش ۵ درصدی ولتاژ تغذیه، موتور همچنان توانایی سنکرونیزم بار نامی را دارد، ولی نسبت به ولتاژ نامی دیرتر به سرعت سنکرون می‌رسد. با کاهش ۱۰ درصدی ولتاژ تغذیه، موتور توانایی سنکرونیزم بار نامی را ندارد. ۰ و ۰ منحنی جریان و گشتاور موتور را در شرایط عدم موفقیت سنکرونیزم نشان می‌دهد. جریان‌های بیش‌تر از مقدار نامی در صورتی که مدت طولانی از موتور بگذرد، ممکن است به عایق موتور آسیب بزند. همچنین گشتاور و سرعت نوسانی در شرایط عدم سنکرونیزم، باعث لرزش شدید موتور می‌شود و ممکن است به یاتاقان‌های موتور آسیب بزند.



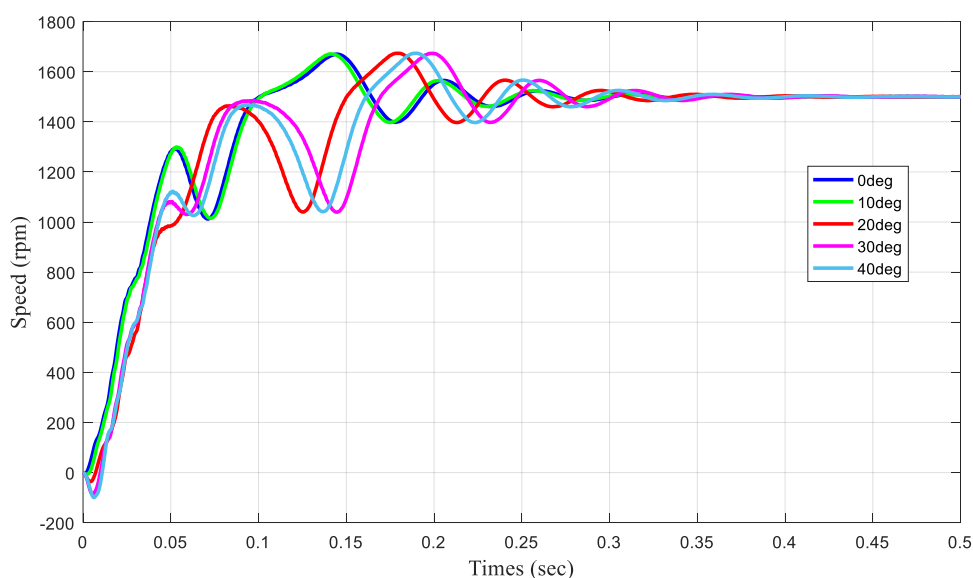
شکل ۱۱-۹- منحنی گشتاور موتور در حالت عدم موفقیت سنکرونیزم



شکل ۹-۱۲- منحنی جریان موتور در حالت عدم موفقیت سنکرونیزم

۹-۶- ارزیابی عملکرد موتور با زوایای اولیه مختلف روتور

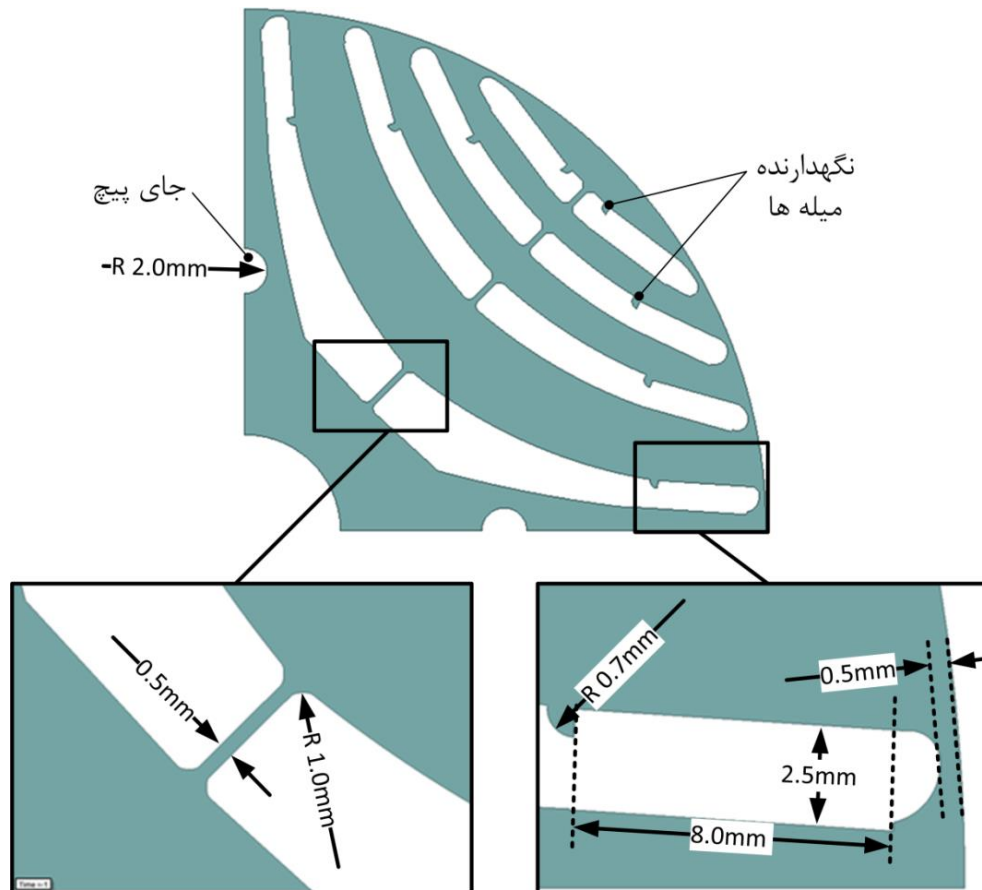
موقعیت اولیه روتور بر حالت گذاری راه اندازی، تاثیر زیادی دارد [۱۷]. منحنی سرعت-زمان را به ازای زوایای اولیه روتور برابر با صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه نشان می‌دهد. با تغییر زاویه اولیه روتور، مشخصه‌های راه اندازی متفاوتی نیز مشاهده می‌شود. به ازای زوایای اولیه مختلف روتور، در همه موارد نوسانات سرعت پس از مدتی میرا شده و روتور به سرعت سنکرون می‌رسد.



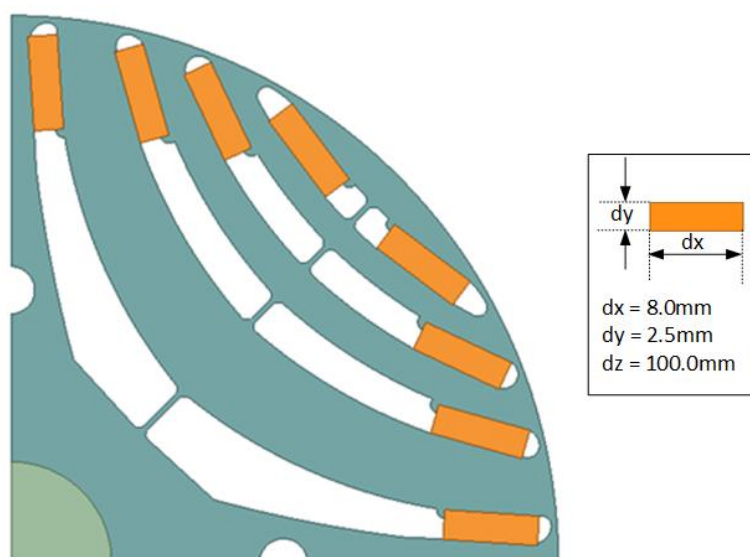
شکل ۹-۱۳- منحنی سرعت-زمان به ازای زوایای اولیه مختلف روتور

۷-۹- تغییرات نهایی شکل روتور

برای نگه داشتن میله‌های قفس روتور، برآمدگی‌هایی در داخل سدکننده‌های شار ایجاد شده است. همچنین برای محکم کردن ورق‌های روتور روی هم، جای چهار پیچ تعبیه شده است. جزئیات شکل نهایی روتور در * و * نشان داده شده است.



شکل ۱۴-۹- یک قطب روتور سنکرون رلوکتانسی



شکل ۱۵-۹- یک قطب روتور LSSynRM

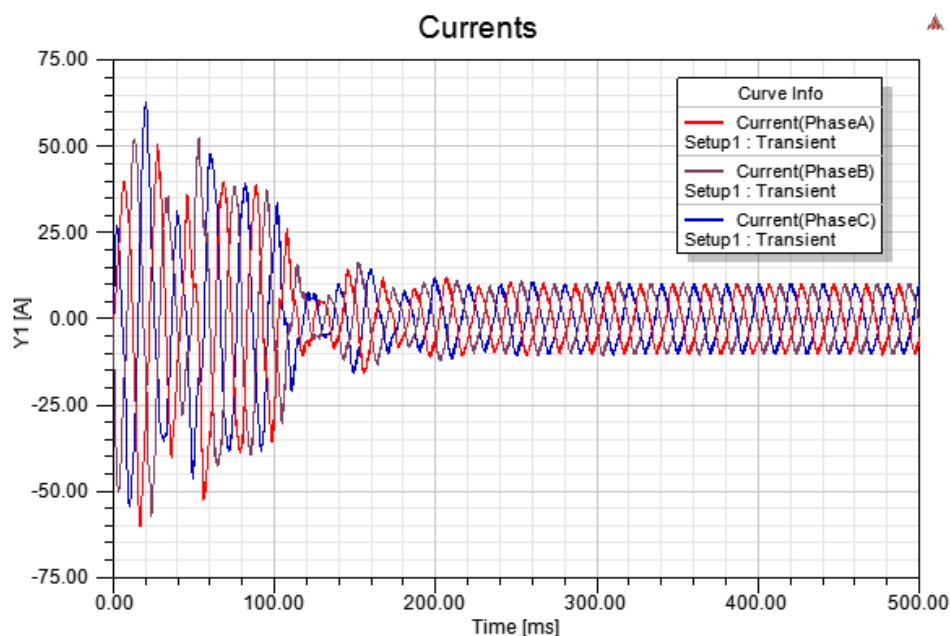
۸-۹- مشخصات موتور در بار نامی

در اینجا مشخصات موتور در بار نامی و با در نظر گرفتن اثر تلفات آهن بر میدان محاسبه شده است. طول فاصله هوایی $\frac{2}{3}$ میلی متر و طول محوری ۱۵۰ میلی متر است. از ورق مغناطیسی M400-A50 برای شبیه سازی استفاده شده است. مشخصات موتور در ۰ نشان داده شده است.

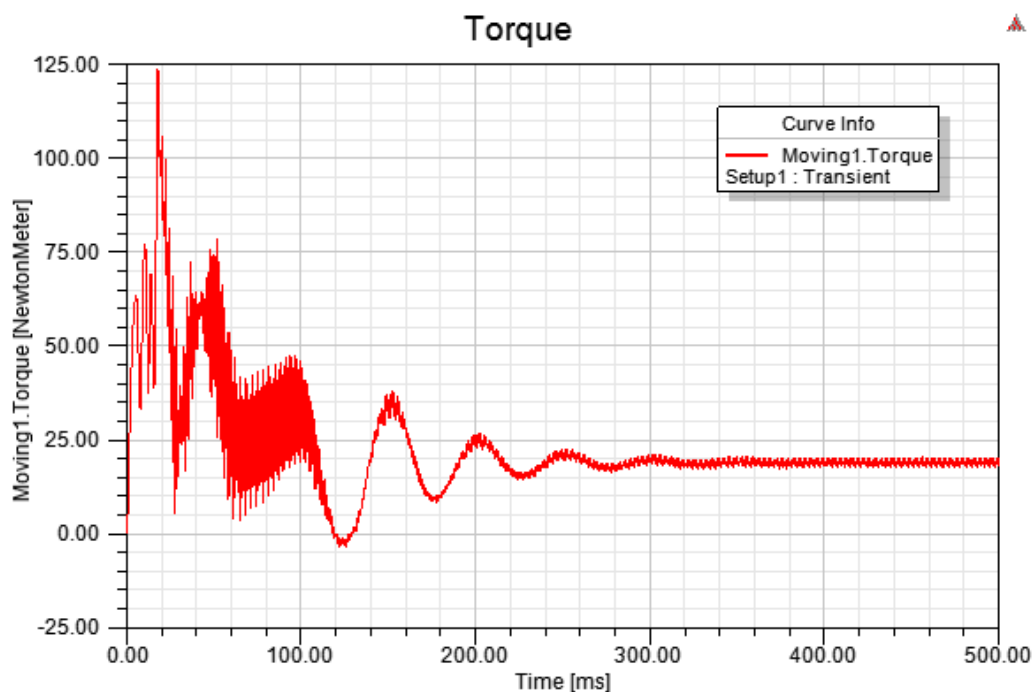
جدول ۵-۹- مشخصات موتور در بار نامی

پارمتر	واحد	مقدار
ولتاژ نامی	[V]	۴۰۰
متوسط گشتاور	[Nm]	۱۹٫۱
ریپل گشتاور	%	۱۵٫۸
جریان استاتور	[A(rms)]	۶٫۵۲
متوسط دمای سیم پیچی	[°C]	۷۰٫۰
تلفات مس استاتور	[W]	۲۰۴٫۵
تلفات مس روتور	[W]	۲۳٫۸
تلفات آهن	[W]	۶۲٫۰
تلفات مکانیکی	[W]	۳۰
مجموع تلفات	[W]	۳۲۰٫۳
بازده	%	۹۰٫۴
ضریب قدرت	-	۰٫۷۴

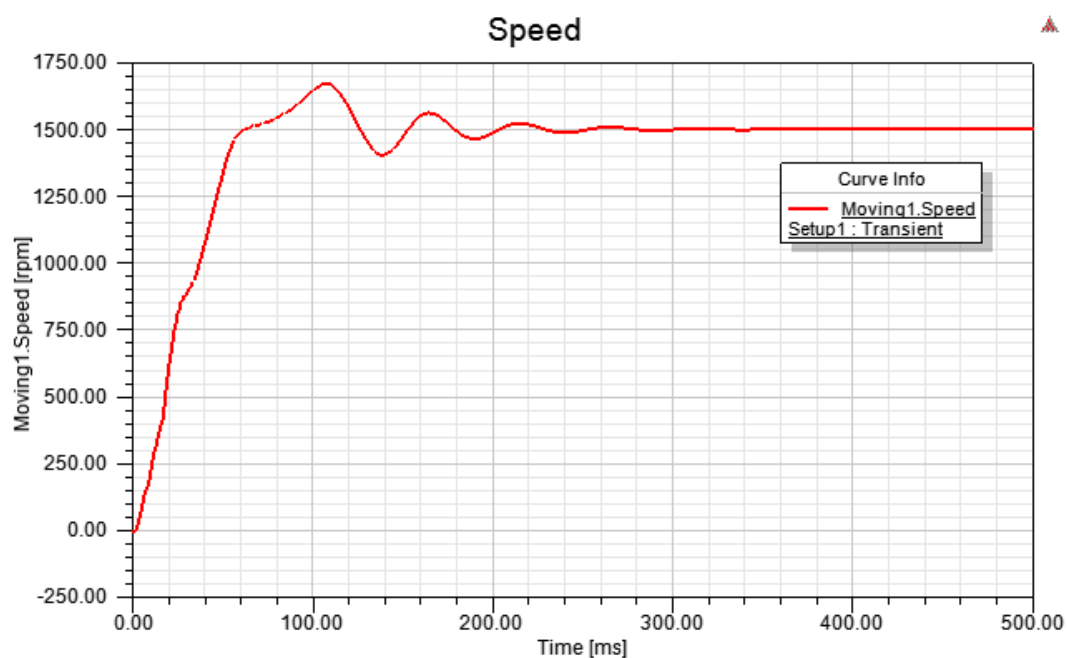
منحنی‌های جریان، گشتاور و سرعت موتور در شرایط نامی به ترتیب در ۰ تا ۰ نشان داده شده است. در صورت اتصال مستقیم موتور به شبکه، جریان راه اندازی حدود ۶ برابر جریان در شرایط نامی است. ۰ توزیع چگالی شار در سطح موتور در شرایط نامی را نشان می‌دهد. ۰ توزیع چگالی جریان در میله‌های قفس را در دو لحظه متفاوت پس از پایدار شدن سرعت، نشان می‌دهد.



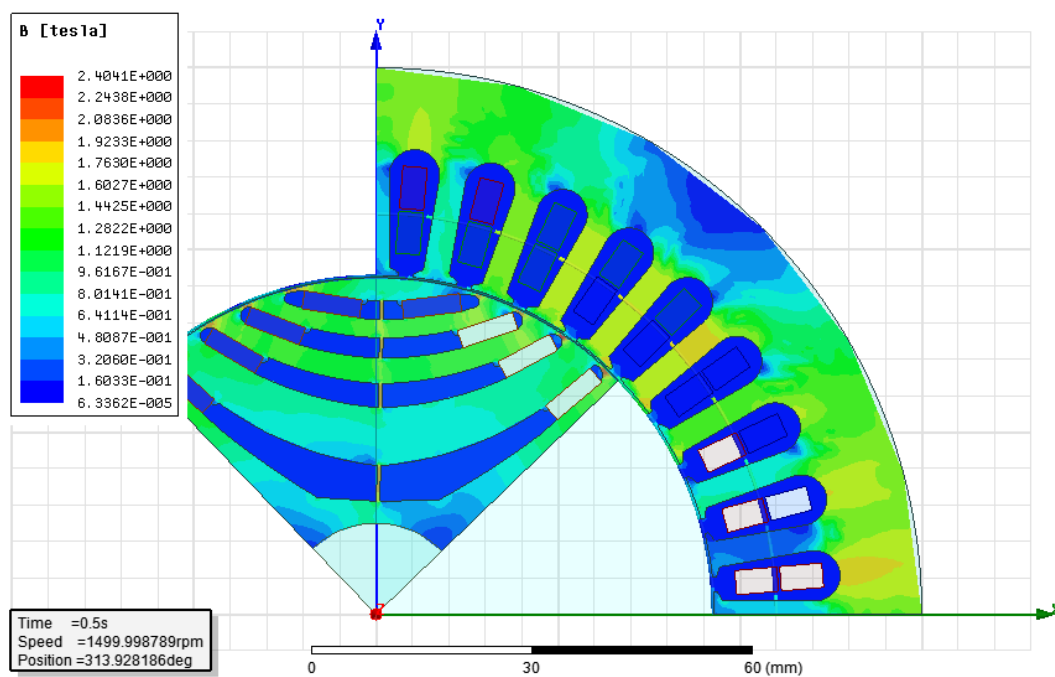
شکل ۹-۱۶- منحنی جریان-زمان



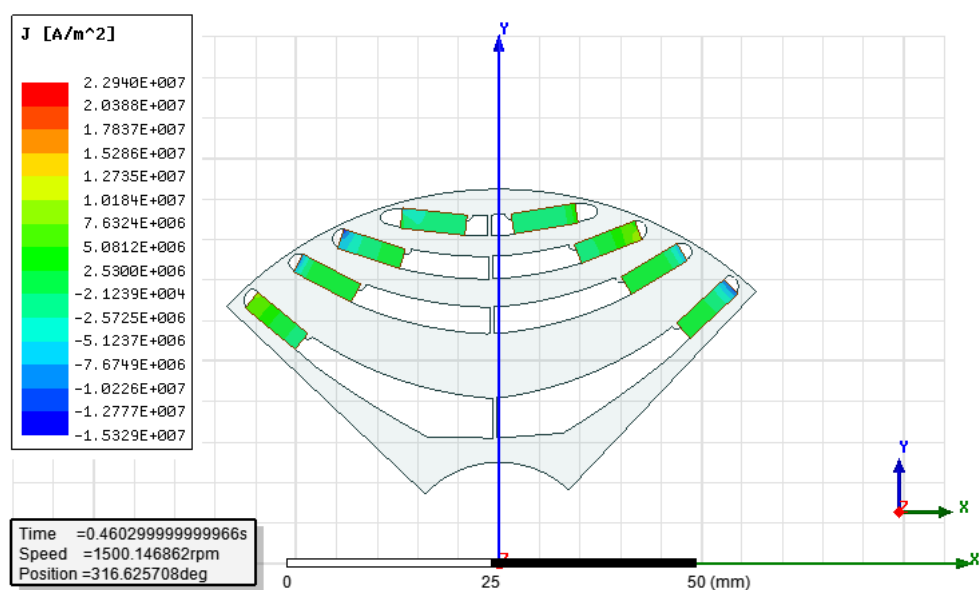
شکل ۹-۱۷- منحنی گشتاور-زمان



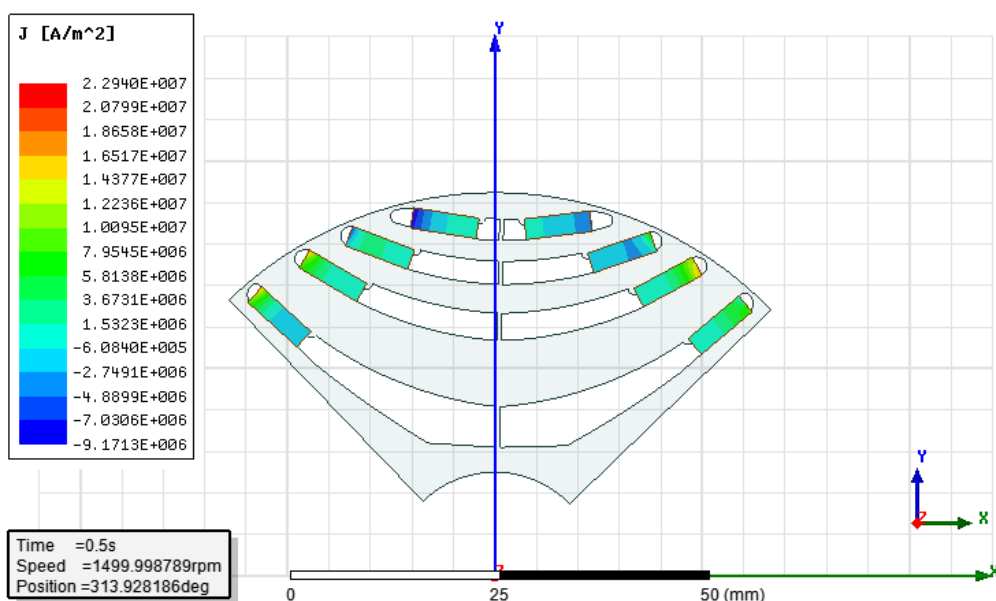
شکل ۱۸-۹- منحنی سرعت-زمان



شکل ۱۹-۹- توزیع چگالی شار درون موتور



شکل ۲۰-۹- توزیع تلفات در میله‌های قفس



شکل ۲۱-۹- توزیع تلفات در میله‌های قفس

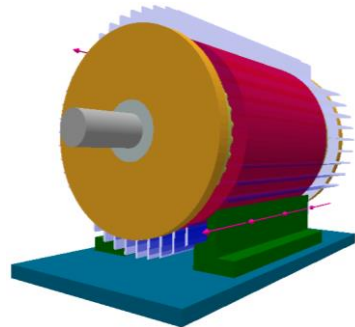
فصل ۱۰- آنالیز حرارتی

۱-۱۰- مقدمه

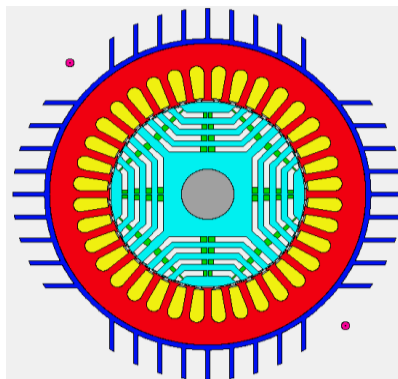
در این فصل مطالبی پیرامون آنالیز حرارتی موتور سنکرون رلوکتانسی ارائه خواهد شد.

۱-۱۰-۲ آنالیز حرارتی

آنالیز حرارتی بر روی موتور بهینه در شرایط کار نامی در نرم افزار Motor-CAD صورت گرفته است. شکل موتور و فریم خارجی آن در * و سطح مقطع محوری آن در * نشان داده شده است. موتور بر روی پایه فلزی قرار گرفته است. برای خنک کنندگی، از فن خارجی که هوا را به روی فین‌های بدنه می‌دمد، استفاده شده است. تلفات قفس القایی به جای مغناطیس دائم (نسخه فعلی نرم افزار MotoCad فاقد مدل حرارتی موتور LSSynRM است) لحاظ شده است.

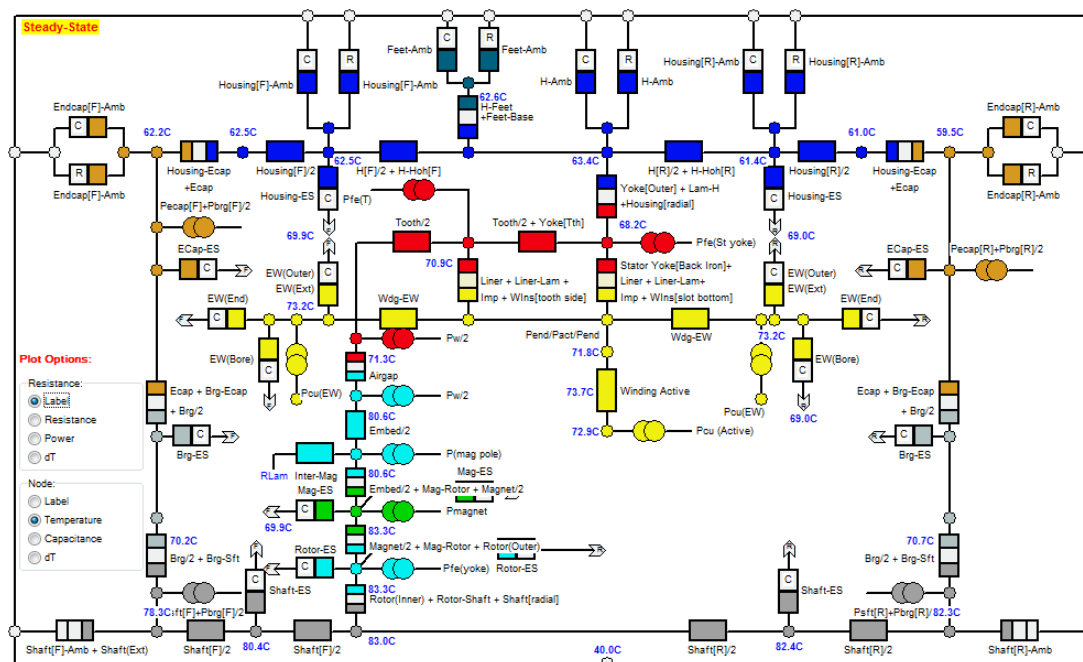


شکل ۱-۱۰-۱- موتور با فریم خارجی و نحوه خنک کنندگی



شکل ۱-۱۰-۲- سطح مقطع محوری موتور

با اعمال تلفات به موتور، نتایج تحلیل مدار معادل حرارتی با پوسته آلومینیومی برای موتور در * نشان داده شده است. دمای محیط ۴۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است.



شکل ۳-۱۰- مدار معادل موتور در نرم افزار MotorCAD

دمای قسمت‌های مختلف موتور در شرایط پایدار در ۰ آمده است. دمای انتهای سیم‌پیچی برای فریم آلومینیومی و چدنی به ترتیب با دمای ۷۳/۲ و ۷۴/۸ درجه سانتیگراد اتفاق می‌افتد و متوسط دمای سیم‌پیچی به ترتیب ۷۲/۹ و ۷۴/۵ درجه سانتیگراد است.

جدول ۱-۱- دمای موتور در شرایط پایدار

نقطه اندازه گیری	دما [°C] فریم آلومینیوم	دما [°C] فریم چدن
بدنه	۶۳/۴	۶۴/۹
یوغ استاتور	۶۸/۲	۶۹/۸
متوسط دمای سیم پیچی	۷۲/۹	۷۴/۵
انتهای سیم پیچی	۷۳/۲	۷۴/۸

فصل ۱۱ - آنالیز مکانیکی

۱۱-۱- مقدمه

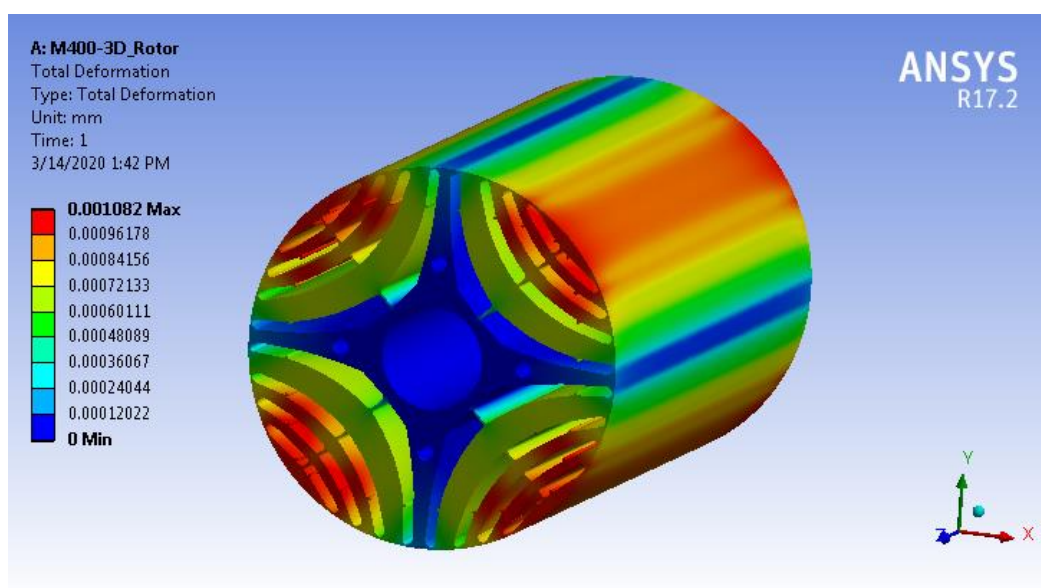
در این فصل مطالبی پیرامون آنالیز مکانیکی موتور سنکرون رلکتانس ارائه خواهد شد.

۱۱-۲- آنالیز ساختاری

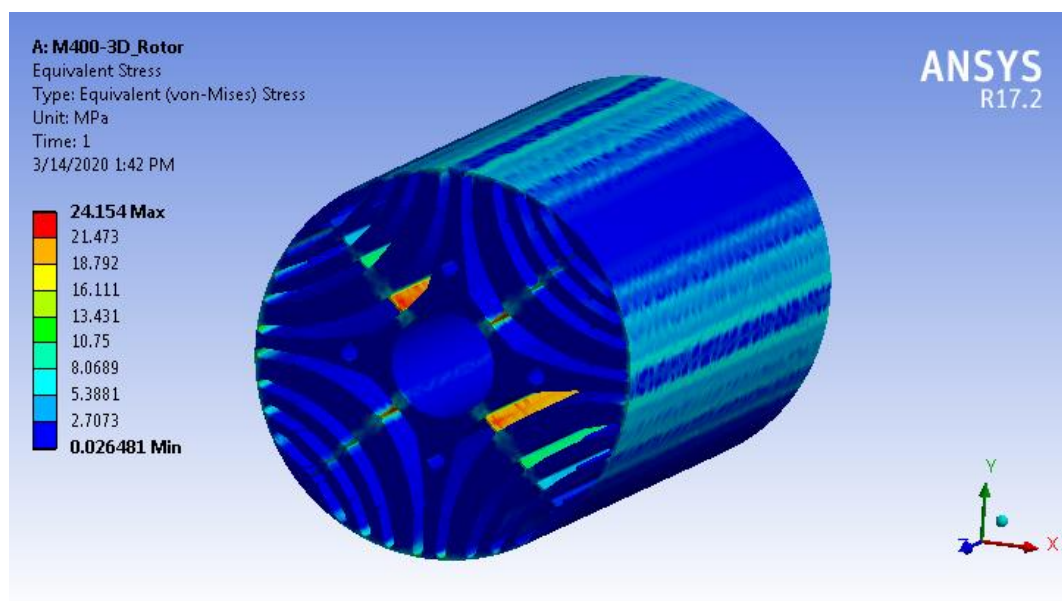
در این قسمت استحکام روتور بهینه با ورق M400 و ضخامت ۰/۵ میلی متر مورد ارزیابی قرار می گیرد. مشخصات مکانیکی ورق در ۰ آمده است. نتایج تغییر شکل و تنش معادل برای روتور با پل های مماسی و شعاعی با ضخامت ۰/۵ میلی متر در سرعت دو برابر نامی (۳۰۰۰ دور در دقیقه) در ۰ و ۰، همچنین نتایج اغراق آمیز تغییر شکل و تنش معادل روتور در ۰ و ۰ نشان داده شده است.

جدول ۱۱-۱- مشخصات مکانیکی ورق M400-50A

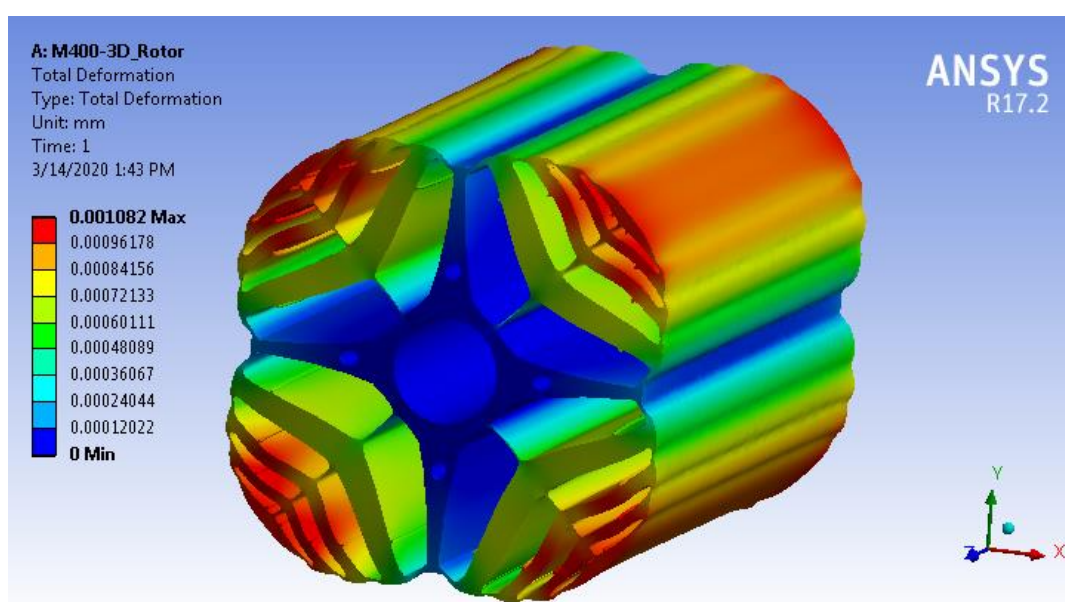
پارامتر	واحد	مقدار
چگالی	Kg/m ³	۷۷۰۰
ضخامت ورق	mm	۰/۵
مدول یانگ	Gpa	۲۰۰
نسبت پواسن	-	۰/۲۹
استحکام تسلیم	MPa	۳۰۵



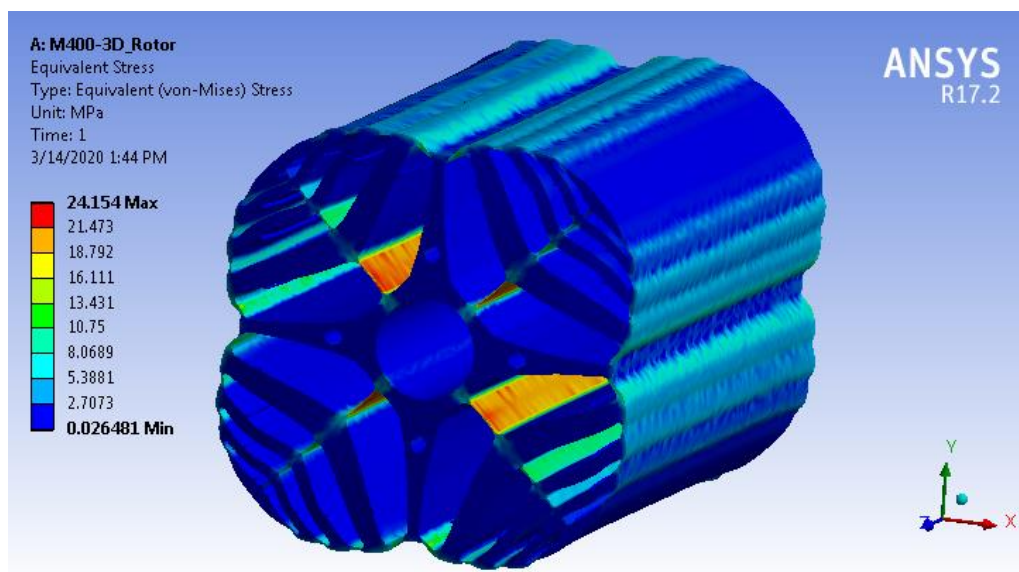
شکل ۱۱-۱- تغییر شکل روتور در سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه



شکل ۲-۱۱- تنش معادل روتور در سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه



شکل ۳-۱۱- نتایج اغراق آمیز تغییر شکل روتور در سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه



شکل ۴-۱۱- نتایج اغراق آمیز تنش معادل روتور در سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه

مطابق ۰ حداکثر تغییر شکل در قسمت هادی‌های شار درونی روتور اتفاق می‌افتد. حداکثر تغییر شکل ۰/۰۰۱ میلی‌متر بوده و با فرض فاصله هوایی ۰/۳ میلی‌متر این مقدار کمتر از نیم درصد طول فاصله هوایی است. در ۰ نتایج حداکثر تغییر شکل و تنش معادل برای روتور با پل‌های مماسی و شعاعی با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر آمده است. حداکثر تنش معادل ۲۴/۱ MPa به دست آمده است که از استحکام تسلیم ورق (۳۰۵ MPa) با ضریب اطمینان بالا کمتر است.

جدول ۲-۱۱- نتایج آنالیز ساختاری

حداکثر تغییر شکل [μm]	حداکثر تنش معادل [MPa]	
۱/۰۸	۲۴/۱۵	ضخامت پل‌ها ۰/۵ میلی‌متر

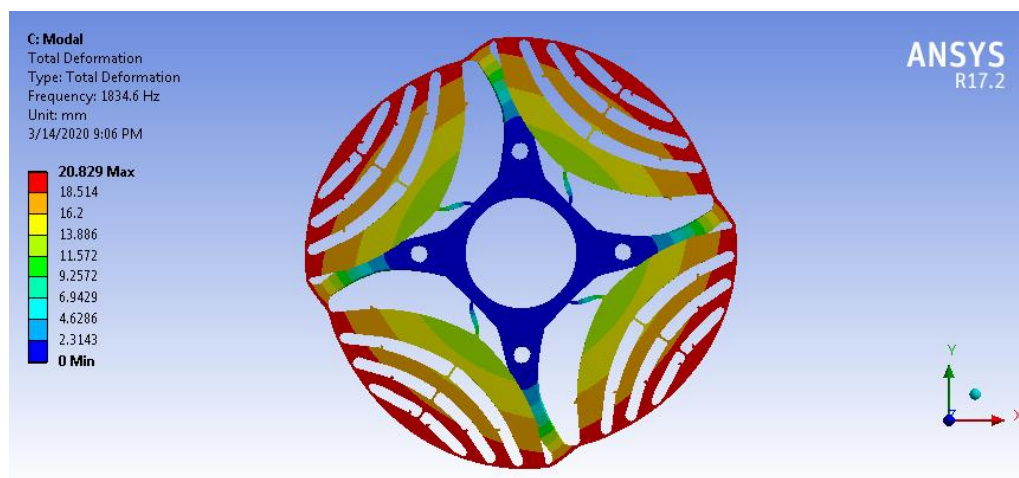
۳-۱۱- آنالیز مودال و تعیین فرکانس‌های طبیعی روتور

مشخصه‌های تغییر شکل روتور برای مودهای رزونانس مرتبه اول، دوم و سوم به ترتیب در ۰ تا ۰ نشان داده شده است. در ۰ نتایج آنالیز مودال برای روتور بهینه آمده است. n_{cr} سرعت بحرانی با رابطه ۴-۸ به دست می‌آید.

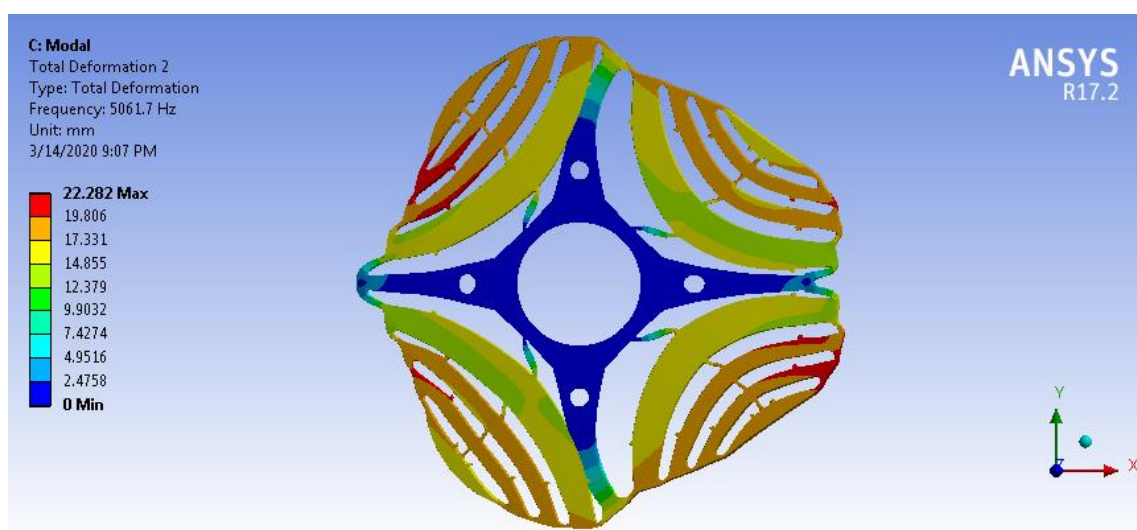
۴-۸

$$n_{cr} = \frac{60f_n}{v}$$

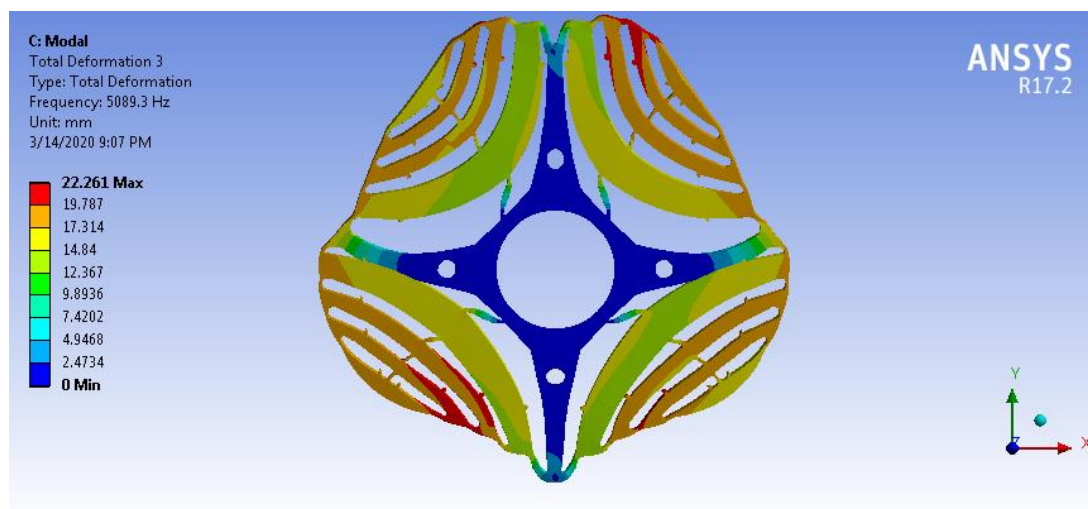
که v مرتبه مود و f_n فرکانس طبیعی مرتبه n ام است.



شکل ۵-۱۱- تغییر شکل مود اول



شکل ۶-۱۱- تغییر شکل مود دوم



شکل ۷-۱۱- تغییر شکل مود سوم

مودهای رزونانس مختلف مشخصه‌های تغییر شکل متفاوتی ایجاد می‌کنند. نخستین مود لرزش پیچشی روتور با انحراف شدید چهار پره در جهت مماسی یکسان همراه است. مود دوم باعث انحراف مرکز روتور به سمت راست شده است. مود سوم لرزش نیز مشابه مود دوم بوده و باعث انحراف مرکز روتور به سمت بالا شده است.

جدول ۳-۱۱- نتایج آنالیز مودال

مرتبۀ مود	۱	۲	۳	۴	۵	۶
فرکانس طبیعی [Hz]	۱۸۳۴/۶	۵۰۶۱/۷	۵۰۸۹/۳	۵۸۶۸/۵	۵۹۶۵/۴	۵۹۸۳/۷
سرعت بحرانی [kRPM]	۱۱۰/۰	۱۵۱/۸	۱۰۱/۷	۸۸/۰	۷۱/۵	۵۹/۸

فصل ۱۲- طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی خود راه انداز یک کیلووات

۱۲-۱- مقدمه

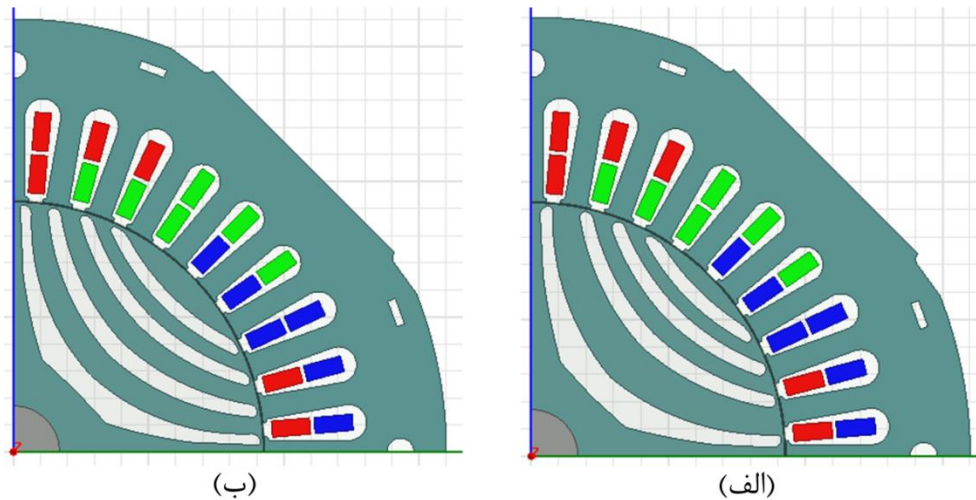
همانطور که در فصل دوم اشاره شد، روش‌های طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز به دو دسته کلی مبتنی بر پایه موتور القایی [۱-۳] یا مبتنی بر پایه موتور سنکرون رلوکتانسی [۴، ۵] تقسیم بندی می‌شوند. از آنجا که هدف از طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز در این گزارش دستیابی به بازده بالا می‌باشد، بنابراین روش طراحی مبتنی بر پایه موتور سنکرون رلوکتانسی مورد استفاده قرار گرفته است.

در این گزارش به طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز از جنبه‌های مختلف پرداخته شده است. از دو طرح روتور سنکرون رلوکتانسی بهینه به عنوان پایه طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز استفاده شده است. طراحی قفس راه‌اندازی با میله‌های مسی و همچنین ریخته‌گری آلومینیوم برای دو روتور صورت گرفته و عملکرد آن‌ها مقایسه شده است. در میان موتورهای با قفس میله‌ای مسی، روتور سنکرون رلوکتانسی که سدکننده‌های شار نزدیک محور q دارد، قابلیت راه‌اندازی بهتری داشته و با مصرف میزان مس کمتر توانایی راه‌اندازی موفق بار را دارد. اگرچه مولفه اصلی میدان فاصله هوایی در شرایط پایدار تأثیری در تلفات اهمی روتور ندارد اما حضور مولفه‌های هارمونیک باعث می‌شود تلفات روتور در سرعت سنکرون، صفر نباشد؛ این مولفه‌های هارمونیک در روتور ریخته‌گری شده، به علت حجم بالای هادی درون روتور، تلفات قابل ملاحظه‌ای تولید می‌کند و باعث می‌شود که عملکرد روتور با قفس میله‌ای بسیار بهتر از روتور با قفس ریخته‌گری شده باشد.

در گزارش پیشرو اثر پل‌های شعاعی و گام سیم‌پیچی بر عملکرد حالت پایدار و گذرای موتور مورد ارزیابی قرار گرفته است. وجود پل‌های شعاعی اگرچه باعث تضعیف ناچیز عملکرد حالت پایدار موتور می‌شود، اما بهبود عملکرد راه‌اندازی موتور را در پی دارد. کاهش گام سیم‌پیچی بخصوص در موتورهای با توان پایین به علت کاهش مقاومت استاتور باعث بهبود قابلیت راه‌اندازی موتور می‌شود، همچنین در حالت پایدار کاهش ریل گشتاور را نیز در پی دارد. با توجه به اینکه روتور با قفس میله‌ای مسی دارای بازدهی بیشتری نسبت به قفس آلومینیومی ریخته‌گری شده است، روتور با قفس میله‌ای مسی برای ساخت انتخاب شده و مورد ارزیابی بیشتری قرار گرفته است.

۱۲-۲- موتورهای سنکرون رلوکتانسی بهینه

برای طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز از دو روتور سنکرون رلوکتانسی بهینه استفاده شده است که به عنوان پایه طراحی موتور خودراه انداز انتخاب شده‌اند. شکل الف) موتور شماره یک و شکل ب) موتور شماره دو را نشان می‌دهد. عملکرد حالت پایدار دو موتور سنکرون رلوکتانسی بهینه با روش آنالیز المان محدود مورد ارزیابی قرار گرفته است.



شکل ۱۲-۱- موتورهای سنکرون رلوتکنسی بهینه. الف) موتور شماره یک ب) موتور شماره دو

مقدار متوسط و ریپل گشتاور دو موتور به ازای جریان ثابت استاتور در ۰ گزارش شده است.

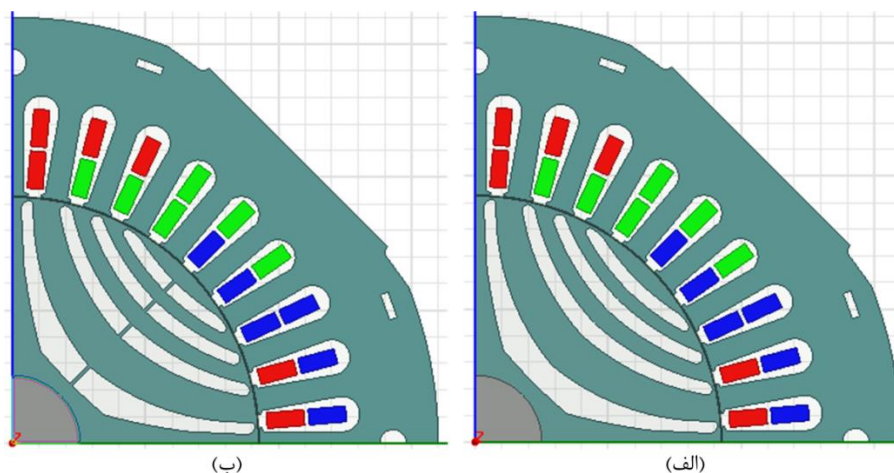
جدول ۱۲-۱- مقایسه عملکرد موتورهای سنکرون رلوتکنسی شماره یک و دو

نوع موتور	جریان استاتور [A]	متوسط گشتاور [Nm]	ریپل گشتاور %
موتور شماره یک	۲٫۲	۶٫۵۷	۱۰٫۱
موتور شماره دو	۲٫۲	۶٫۵۹	۱۰٫۴

مقدار متوسط گشتاور هر دو موتور نسبت به هم تفاوت اندکی دارد و ریپل گشتاور آن‌ها نیز مشابه بوده و در حد قابل قبولی است. موتور شماره یک ریپل گشتاور کمتر و موتور شماره دو متوسط گشتاور بیشتری دارد. در ادامه اثر پل‌های شعاعی و گام سیم‌پیچی بر عملکرد حالت پایدار موتور سنکرون رلوتکنسی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج برای موتور شماره یک گزارش شده است، نتایج مشابهی برای موتور شماره دو می‌توان متصور بود.

۱-۲-۲- اثر پل‌های شعاعی در حالت پایدار

در اینجا گشتاور موتور سنکرون رلوتکنسی در جریان استاتور ثابت برای حالتی که روتور دارای پل‌های شعاعی باشد و یا نباشد، آمده است. ۰ ب) موتور با پل‌های شعاعی را نشان می‌دهد. ضخامت پل‌های شعاعی برابر ضخامت ورق یعنی 0.5mm انتخاب شده است. نتایج در ۰ آمده است. با وجود پل‌های شعاعی متوسط گشتاور ۰٫۱۲ نیوتن-متر افت کرده است و ریپل گشتاور نیز ۱ درصد کاهش نشان داده است. اگرچه اضافه کردن پل‌های شعاعی، باعث افت گشتاور موتور می‌شود؛ اما استحکام مکانیکی روتور را افزایش می‌دهد؛ همچنین در ادامه نشان داده خواهد شد که اضافه کردن پل‌های شعاعی باعث بهبود قابلیت سنکرونیسم موتور می‌شود.



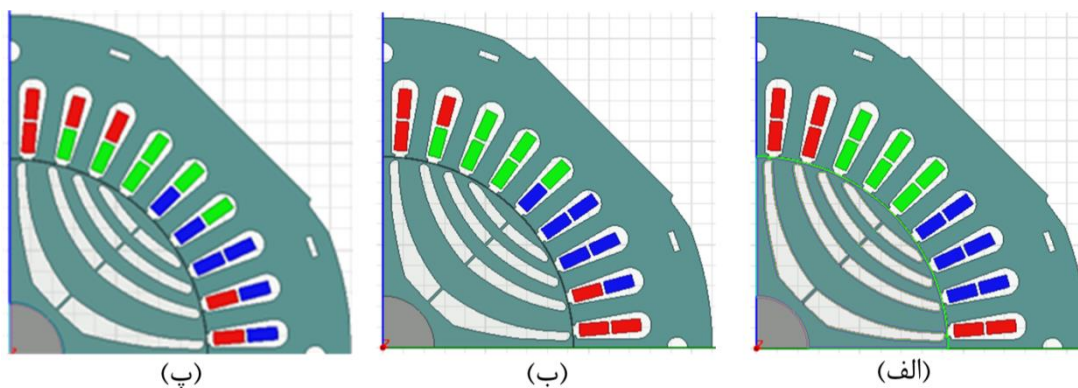
شکل ۱۲-۲- الف) روتور بدون پل شعاعی ب) روتور با پل‌های شعاعی

جدول ۱۲-۲- مقایسه موتور سنکرون رلوکتانسی با و بدون پل‌های شعاعی

ریپل گشتاور %	متوسط گشتاور [Nm]	جریان استاتور [A]	
۱۰٫۱	۶٫۵۷	۲٫۲	بدون پل‌های شعاعی
۹٫۱	۶٫۴۴	۲٫۲	با پل‌های شعاعی

۲-۲-۱ اثر گام سیم‌پیچی در حالت پایدار

در اینجا گشتاور موتور سنکرون رلوکتانسی در تلفات استاتور ثابت برای حالتی که گام سیم‌پیچی ۷، ۸ و ۹ شیار باشد، مورد ارزیابی قرار گرفته است. از سیم‌پیچی دولایه برای موتور استفاده شده است. سیم‌پیچی استاتور برای یک قطب در ۰ نشان داده شده است. نتایج در ۰ آمده است. با کاهش گام سیم‌پیچی، متوسط گشتاور تغییرات ناچیزی دارد؛ اما در عین حال ریپل گشتاور را کاهش می‌دهد؛ همچنین کاهش گام سیم‌پیچی باعث بهبود قابلیت سنکرونیسم موتور می‌شود و کاهش تلفات مسی روتور می‌شود [۶].



شکل ۳-۱۲- سیم پیچی استاتور با گام: الف) ۹ شیار ب) ۸ شیار پ) ۷ شیار استاتور

جدول ۳-۱۲- مقایسه موتور سنکرون رلوکتانسی با گام سیم پیچی مختلف

گام سیم پیچی	ریبل گشتاور %	متوسط گشتاور [Nm]	تلفات اهمی استاتور [W]	مقاومت استاتور [Ω]
۹ شیار	۱۱٫۱	۶٫۳۷	۷۲	۵٫۶۵
۸ شیار	۱۰٫۵	۶٫۵۷	۷۲	۵٫۳۰
۷ شیار	۹٫۱	۶٫۴۴	۷۲	۴٫۹۵

۳-۱۲- طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز

طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز به شدت وابسته بار است؛ زیرا رفتار بار در لحظه راه اندازی بر قابلیت سنکرونیسم موتور بسیار تاثیر گذار است.

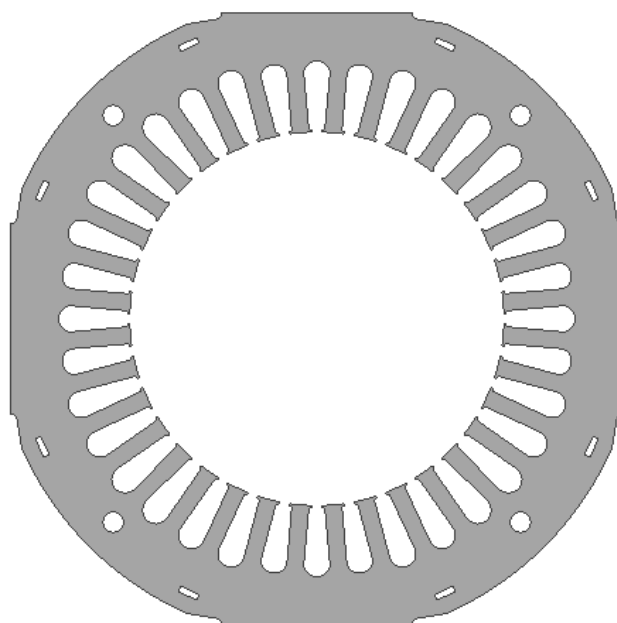
در ادامه برای طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز، بار متوسط در نظر گرفته شده است که گشتاور راه اندازی ۴۰ درصد مقدار نامی است و گشتاور متناسب با مربع سرعت افزایش می یابد. اینرسی کل برابر با دو برابر اینرسی موتور در نظر گرفته شده است.

با توجه به اینکه برای استاتور موتور مورد نظر از استاتور موتورهای کولر تکفاز استفاده می شود و موتورهای القایی موجود در کارخانه الکتروموتور پارت در طول پشته های ۴۰ و ۶۰ میلی متر موجود هستند. در این گزارش برای موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز مورد نظر از استاتور با طول پشته ۶۰ میلی متر استفاده شده است. استاتور مورد نظر در ۰ نشان داده شده است. مشخصات استاتور در ۰ آمده است.

جدول ۴-۱۲- مشخصات هندسی استاتور

پارامتر	واحد	مقدار
جنس ورق	M700-50A	-
طول محوری	[mm]	۶۰
قطر خارجی استاتور	[mm]	۱۵۲
قطر داخلی استاتور	[mm]	۹۳
تعداد شیارهای استاتور	-	۳۶
دهانه باز شیار	[mm]	۲٫۵۳
ضخامت دندانه استاتور	[mm]	۴٫۲۵

۰/۵	[mm]	عمق نوک دندانه استاتور
۸۸	[mm ^۲]	مساحت شیار سیم پیچ اصلی
۹۷	[mm ^۲]	مساحت شیار سیم پیچ کمکی



شکل ۴-۱۲- ورق استاتور

با توجه به طول پشته انتخاب شده برای موتور، و در نظر گرفتن این نکته که جنس ورق‌های سیلیکونی مورد استفاده M700-50A هستند، حداکثر توان موتور معادل یک کیلووات در نظر گرفته شده است.

۱-۲-۳- موتور با قفس میله‌ای

دو نوع شکل متداول با قفس میله‌ای می‌توان برای موتور خودراه‌انداز در نظر گرفت، یکی میله‌های دایره‌ای و دیگری میله‌های مستطیلی است. میله‌های دایره‌ای به دلیل اینکه سدکننده‌های شار در نزدیکی سطح روتور ضخامت کمی دارند، بنابراین وارد ناحیه هادی‌های شار شده و مسیر عبور شار محور d را کاهش می‌دهند که نتیجه آن کاهش گشتاور تولیدی و افت بازده موتور در شرایط کار سنکرون است [۹]. بنابراین در ادامه طراحی قفس با میله‌های مستطیلی مدنظر قرار گرفته است.

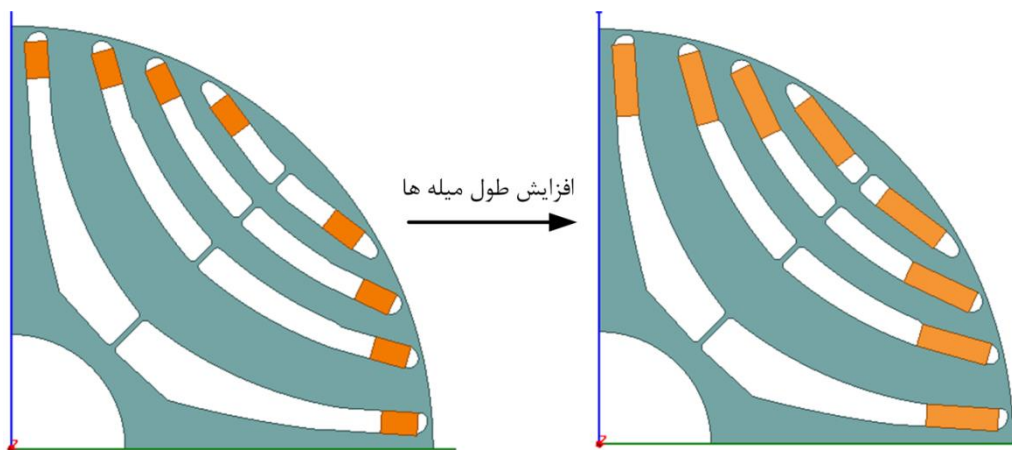
۲-۱۲-۳- طراحی قفس با میله‌های مستطیلی

روند طراحی به این صورت است که دو نمونه روتور سنکرون رلوکتانسی که از نظر متوسط و ریپل گشتاور بهینه هستند، در این مرحله برای طراحی قفس در نظر گرفته می‌شود. زاویه سدکننده‌های شار پارامتر تاثیر گذار بر ریپل گشتاور است و

ضخامت سدکننده‌های شار متوسط گشتاور را تعیین می‌کند [۱۰]. با ثابت در نظر گرفتن زاویه سدکننده‌های شار، رپیل گشتاور تقریباً ثابت باقی می‌ماند. با ثابت ماندن ضریب ایزولاسیون متوسط گشتاور تقریباً ثابت باقی می‌ماند. بنابراین ضخامت سدکننده‌های طوری تنظیم شده اند تا بتوانند میله‌های قفس را در داخل سدکننده‌ها جای دهند.

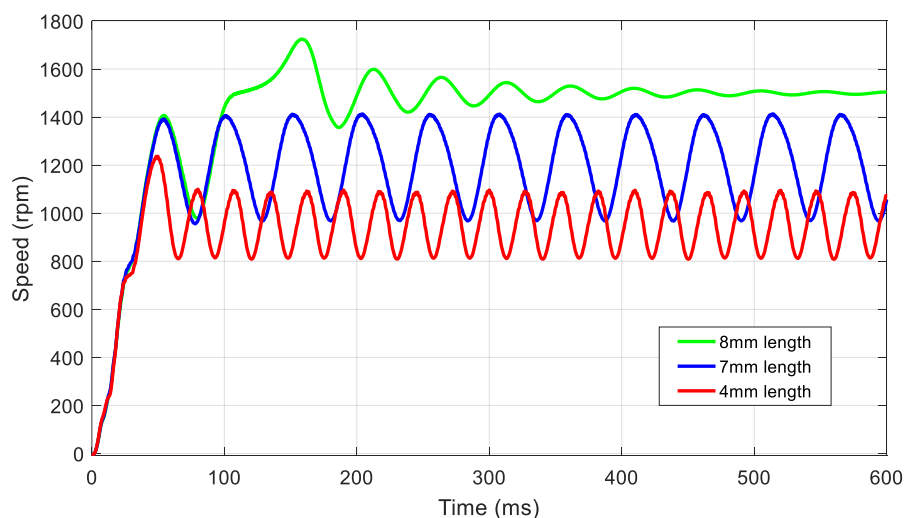
۱-۲-۳-۲-۱- روتور بهینه شماره یک

فاصله میله‌ها از سطح روتور ۱/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است تا میله‌ها مسیر انتهایی هادی‌های شار را تغییر ندهند. طول میله‌ها همانطور که در ۰ نشان داده شده است از ۴ میلی‌متر با گام یک میلی‌متر افزایش داده می‌شود تا زمانی که موتور توانایی سنکرونیزم را داشته باشد. با انجام این روند حداقل میزان مس برای ایجاد قفسی که توانایی به سنکرون رساندن بار مورد نظر را داشته باشد، به دست می‌آید.



شکل ۵-۱۲-افزایش طول میله‌های روتور شماره یک

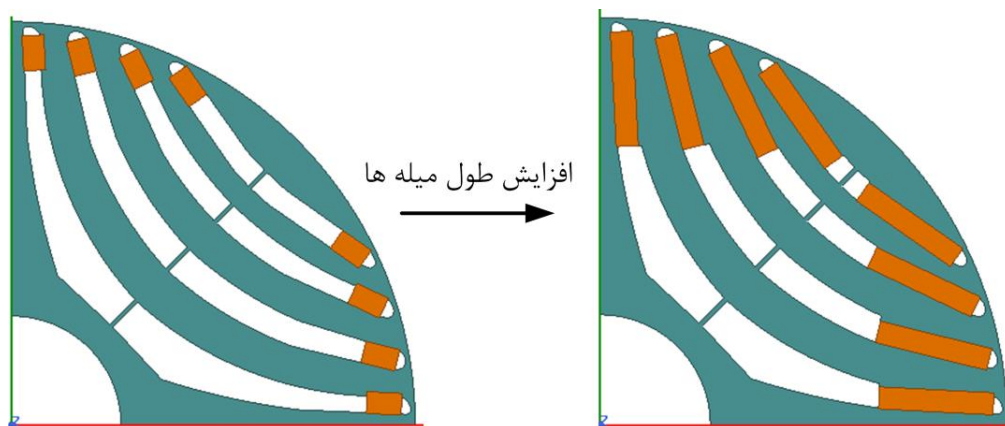
مشخصه سرعت-زمان موتورهای شماره یک، دو و سه به ترتیب در شکل‌های در ۰ به ازای چند حالت مختلف از طول میله‌ها نشان داده شده است. با افزایش طول میله‌ها از ۴ میلی‌متر به ۷ میلی‌متر، متوسط سرعت افزایش می‌یابد اما همچنان با نوسانات شدید سرعت در پی است. با رسیدن طول میله‌ها به ۸ میلی‌متر موتور توانایی سنکرونیزم موفق را دارد و نوسانات سرعت پس از مدتی میرا می‌شوند.



شکل ۶-۱۲- منحنی سرعت-زمان به ازای میله‌های با طول مختلف

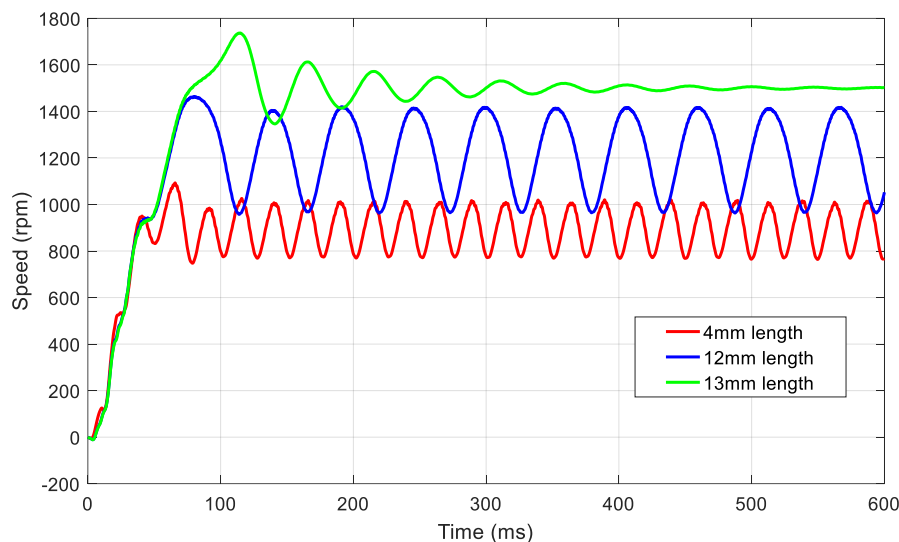
۲-۲-۳-۱۲- روتور بهینه شماره دو

مشابه حالت قبل طول میله‌های قفس یا گام یک میلی‌متر افزایش داده می‌شود و عملکرد راه اندازی موتور مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. روتور شماره دو را با میله‌های با طول ۴ و ۱۳ میلی‌متر نشان می‌دهد.



شکل ۷-۱۲- افزایش طول میله‌ها روتور شماره دو

منحنی‌های سرعت-زمان برای موتور شماره دو به ازای طول مختلف میله‌های قفس، در * نشان داده شده است.



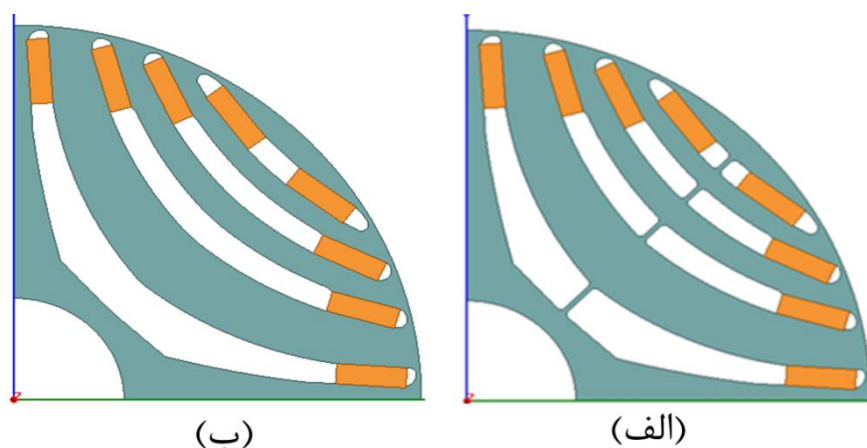
شکل ۸-۱۲- منحنی سرعت-زمان

برای موتور شماره دو، توانایی سنکرونیزم به ازای میله‌های با طول ۱۳ میلی‌متر به دست می‌آید که نسبت به موتور شماره ۲، طول میله‌ها ۵ میلی‌متر افزایش داشته است. بنابراین اگرچه هر دو موتور سنکرون رلوکتانسی شماره یک و دو مشخصه حالت پایدار تقریباً یکسانی دارند، اما عملکرد راه اندازی آن‌ها بسیار متفاوت است. با توجه به اینکه موتور شماره یک با مصرف میزان مس کمتر توانایی سنکرونیزم را دارد، برای ساخت و بررسی‌های بعدی انتخاب خواهد شد.

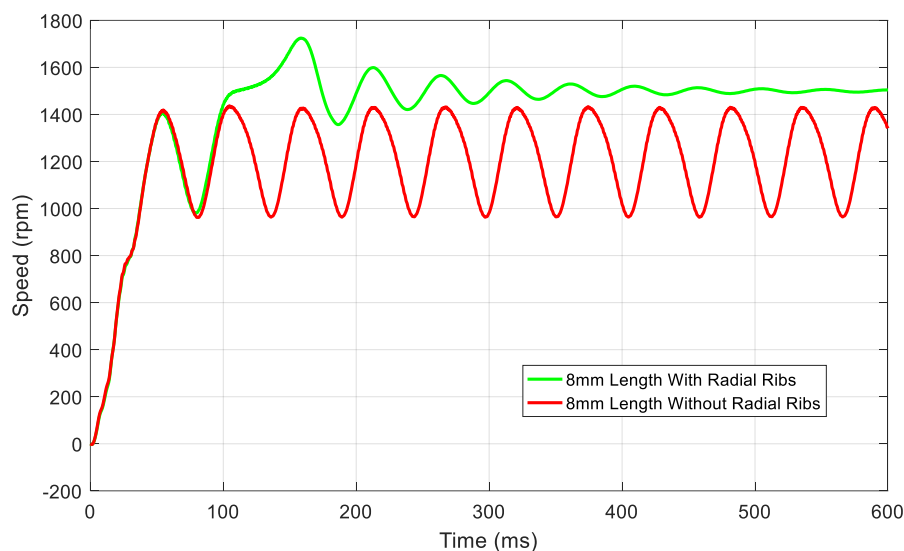
برای توجیه این که چرا موتور شماره یک مشخصه راه‌اندازی بهتری نسبت به موتور شماره دو دارد، باید به این نکته توجه کرد که زاویه سدکننده‌های شار در موتور شماره یک به محور q نزدیک‌تر هستند. نزدیک‌تر بودن میله‌های قفس به محور q در موتور شماره یک، باعث می‌شود تا مقاومت محور d روتور کاهش یافته و قابلیت سنکرونیزم موتور افزایش یابد [۱۱].

۳-۳-۱۲- اثر پل‌های شعاعی بر قابلیت سنکرونیزم موتور

• روتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز شماره یک با طول میله‌های ۸ میلی‌متر برای حالتی که دارای پل‌های شعاعی ویا فاقد آن باشد را نشان می‌دهد. نتایج ارزیابی قابلیت راه اندازی موتورها در • نشان داده شده است.



شکل ۹-۱۲- الف) روتور با پل‌های شعاعی ب) روتور بدون پل‌های شعاعی

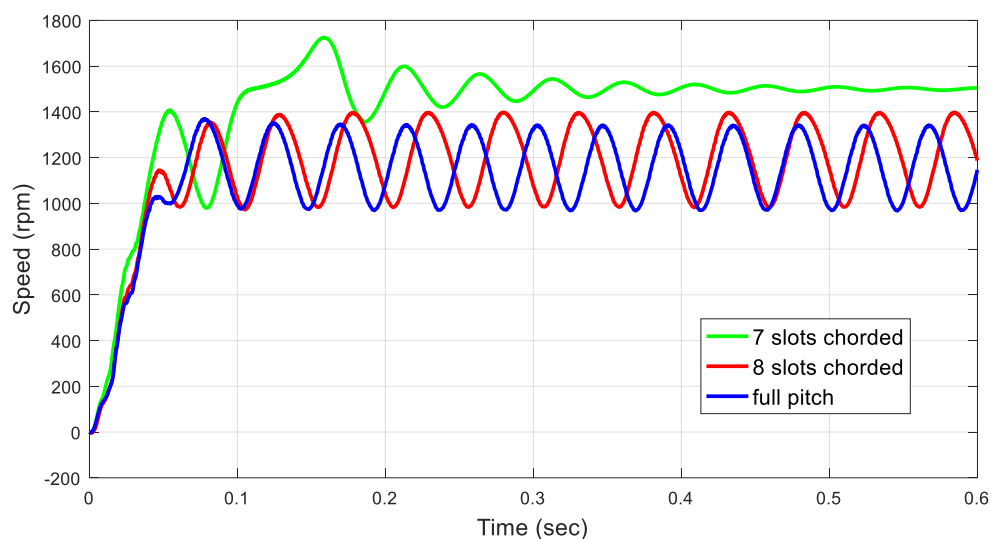


شکل ۱۰-۱۲- منحنی سرعت-زمان برای روتور با و بدون پل‌های شعاعی

برای حالتی که روتور فاقد پل‌های مماسی باشد، موتور توانایی سنکرون کردن بار را ندارد. وجود پل‌های شعاعی باعث افزایش گشتاور ناشی از قفس القایی شده و قابلیت سنکرونیزم را افزایش می‌دهد.

۴-۳-۱۲- اثر گام سیم پیچی بر قابلیت سنکرونیزم موتور

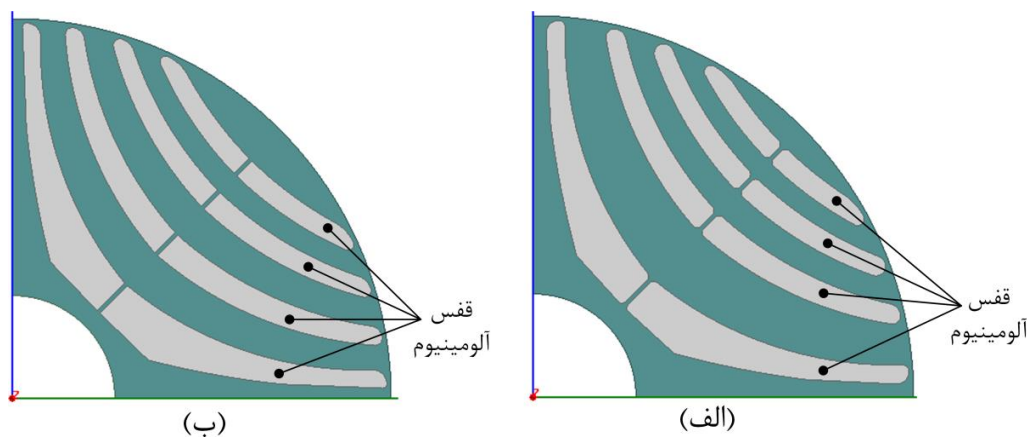
• نتایج شبیه سازی برای گام سیم پیچی ۷، ۸ و ۹ نشان می‌دهد. افزایش گام سیم‌پیچی منجر به افزایش مقاومت استاتور می‌شود. با افزایش مقاومت استاتور، گشتاور رلوکتانسی موتور افت می‌کند [۴] و موتور توانایی سنکرونیزم بار را ندارد.



شکل ۱۱-۱۲- منحنی سرعت-زمان برای روتور با تغییر گام سیم پیچی

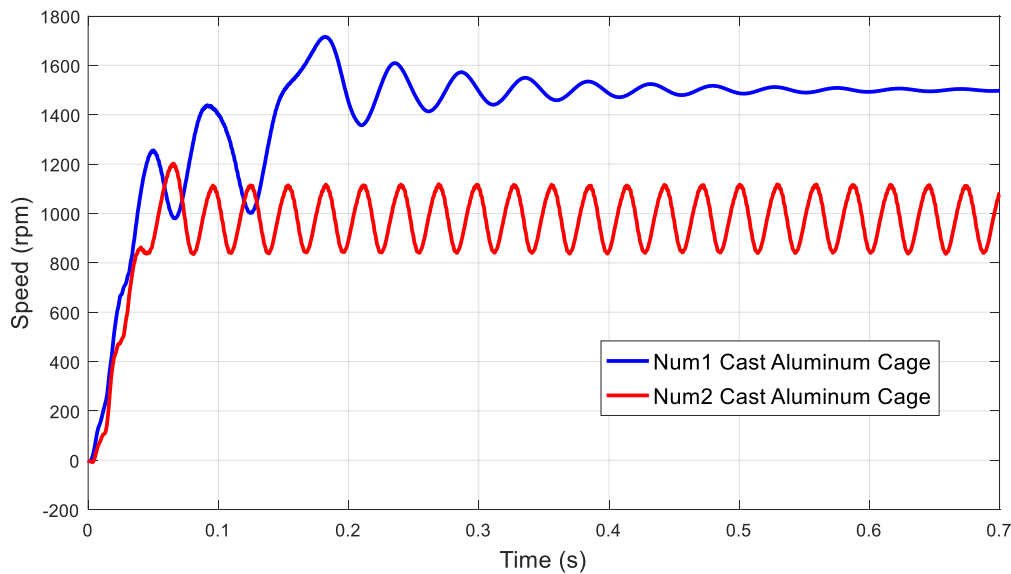
۵-۳-۱۲- موتور با قفس ریخته‌گری شده

پُر کردن تمامی فضای سدکننده‌های شار با آلومینیوم مذاب راه حل دیگری برای ایجاد قفس راه اندازی است. *، دو روتور موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز را نشان می‌دهد که فضای خالی سدکننده‌های شار تماماً با آلومینیوم مذاب پر شده است.



شکل ۱۲-۱۲- روتور با قفس آلومینیوم ریخته‌گری شده (الف) روتور شماره یک (ب) روتور شماره دو

مقایسه عملکرد راه اندازی روتورهای با قفس آلومینیوم ریخته‌گری شده در * نشان داده شده است.



شکل ۱۳-۱۲- منحنی سرعت-زمان برای روتورهای با قفس آلومینیوم ریخته گری شده

با پر شدن تمامی فضای سدکننده‌های شار، روتور شماره یک توانایی سنکرونیسم با را دارد ولی روتور شماره دو، نمی‌تواند به سرعت سنکرون برسد.

عملکرد شرایط پایدار موتور شماره یک با قفس میله‌ای مسی و آلومینیوم ریخته‌گری شده در ۰ مقایسه شده است. روتور با قفس ریخته‌گری شده به دلیل اینکه حجم زیادی از فضای قفس در معرض هارمونیک‌های شار قرار می‌گیرد، تلفات اهمی روتور بیشتری دارد. از آنجا که افزایش تلفات اهمی روتور، منجر به افزایش جریان استاتور می‌شود، بنابراین تلفات اهمی استاتور و تلفات هسته نیز نسبت به موتور با قفس با میله‌های مسی بیشتر است.

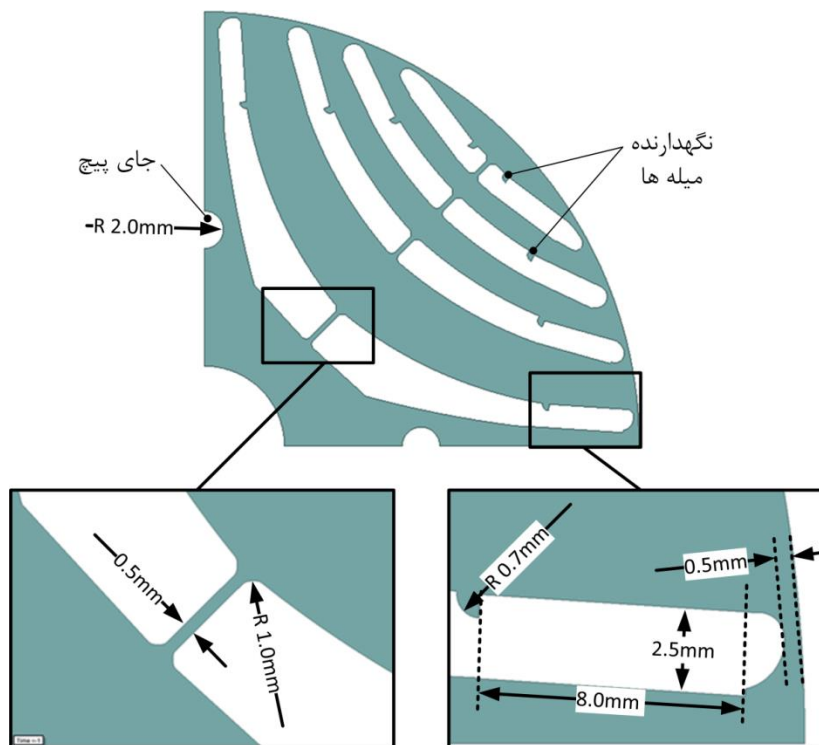
بازده موتور با قفس میله‌ای مسی ۴/۳ درصد نسبت به موتور با قفس آلومینیوم ریخته‌گری شده بیشتر است. کلاس بازدهی موتور با قفس میله‌ای مسی به استاندارد IE4 و موتور با قفس آلومینیوم ریخته‌گری شده به IE3 می‌رسد.

جدول ۵-۱۲- مقایسه عملکرد حالت پایدار موتور با قفس آلومینیوم ریخته‌گری شده و قفس میله‌ای مسی

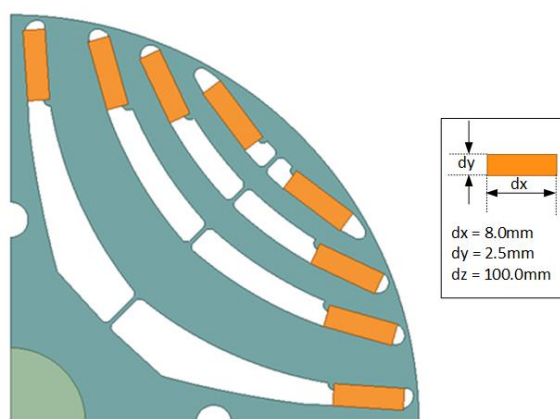
نوع قفس	تلفات اهمی استاتور	تلفات اهمی روتور	تلفات آهن	تلفات مکانیکی	بازده
آلومینیوم ریخته‌گری شده	۷۸٫۳	۵۴٫۳	۴۷٫۶	۷٫۰	۸۴٫۲
میله‌ای مسی	۷۴٫۴	۶٫۵	۴۰٫۹	۷٫۰	۸۸٫۵

۶-۳-۱۲ - تغییرات نهایی شکل روتور

برای نگه داشتن میله‌های قفس روتور، برآمدگی‌هایی در داخل سدکننده‌های شار ایجاد شده است. همچنین برای محکم کردن ورق‌های روتور روی هم، جای چهار پیچ تعبیه شده است. جزئیات شکل نهایی روتور در * و * نشان داده شده است.



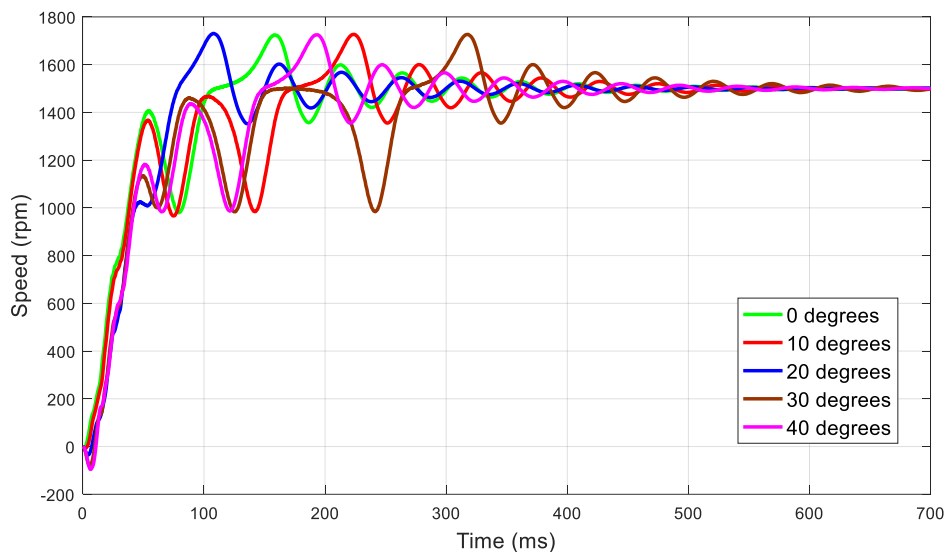
شکل ۱۴-۱۲ - یک قطب روتور SynRM



شکل ۱۵-۱۲ - یک قطب روتور LSSynRM

۷-۳-۱۲- ارزیابی عملکرد موتور با زوایای اولیه مختلف روتور

موقعیت اولیه روتور بر حالت گذاری راه اندازی، تاثیر زیادی دارد [۱۲]. ۰ منحنی سرعت-زمان را به ازای زوایای اولیه روتور برابر با صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه نشان می‌دهد. با تغییر زاویه اولیه روتور، مشخصه‌های راه اندازی متفاوتی نیز مشاهده می‌شود. به ازای زوایای اولیه مختلف روتور، در همه موارد نوسانات سرعت پس از مدتی میرا شده و روتور به سرعت سنکرون می‌رسد.



شکل ۱۶-۱۲- منحنی سرعت-زمان به ازای زوایای اولیه مختلف روتور

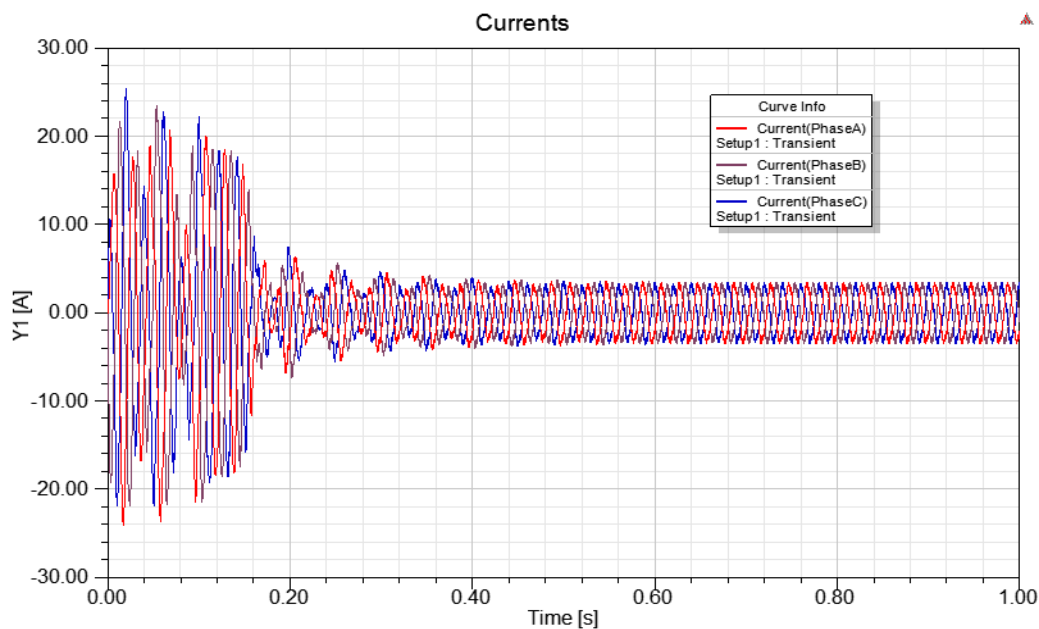
۸-۳-۱۲- مشخصات موتور در بار نامی

در اینجا مشخصات موتور در بار نامی و با در نظر گرفتن اثر تلفات آهن بر میدان محاسبه شده است. طول فاصله هوایی ۰/۳ میلی‌متر و طول محوری ۶۰ میلی‌متر است. از ورق مغناطیسی M700-A50 برای شبیه‌سازی استفاده شده است. مشخصات موتور در ۰ نشان داده شده است.

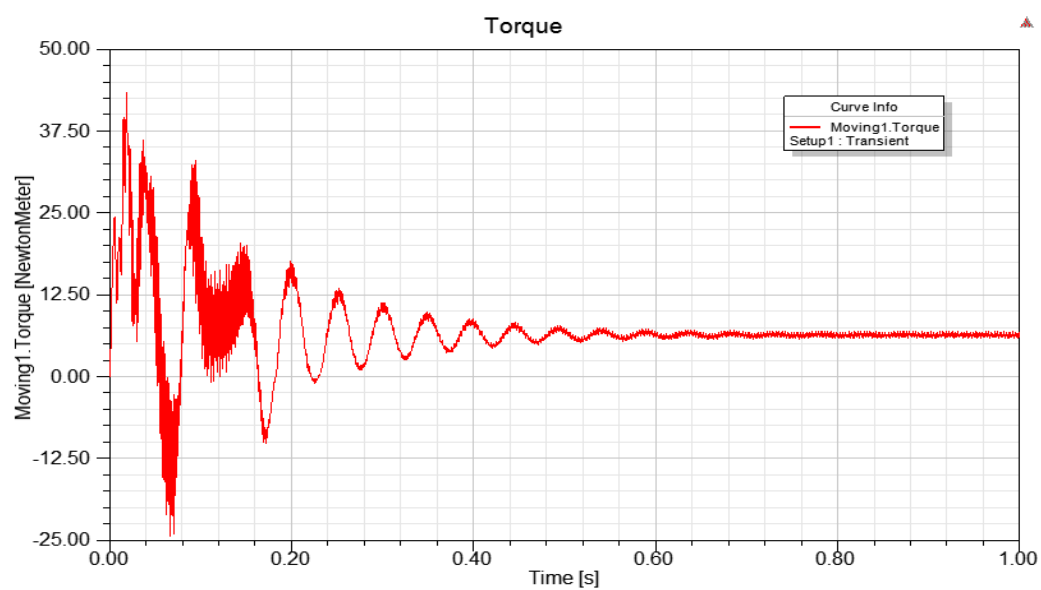
جدول ۶-۱۲- مشخصات موتور یک کیلووات در بار نامی

پارمتر	واحد	مقدار
ولتاژ نامی	[V]	۴۰۰
متوسط گشتاور	[Nm]	۶/۳۷
ریپل گشتاور	%	۱۹/۱
جریان استاتور	[A(rms)]	۲/۳۱
متوسط دمای سیم پیچی	[°C]	۷۰/۰
تلفات مس استاتور	[W]	۷۸/۹
تلفات مس روتور	[W]	۷/۷
تلفات آهن	[W]	۴۵/۲
تلفات مکانیکی	[W]	۷
تلفات سرگردان	[W]	۱۰
مجموع تلفات	[W]	۱۴۸/۸
بازده	%	۸۷/۱
ضریب قدرت	-	۰/۷۲

منحنی‌های جریان و گشتاور موتور در شرایط نامی در ۰ و ۰ نشان داده شده است. در صورت اتصال مستقیم موتور به شبکه، جریان راه اندازی حدود ۷ برابر جریان در شرایط نامی است.



شکل ۱۷-۱۲- منحنی جریان-زمان



شکل ۱۸-۱۲- منحنی گشتاور-زمان

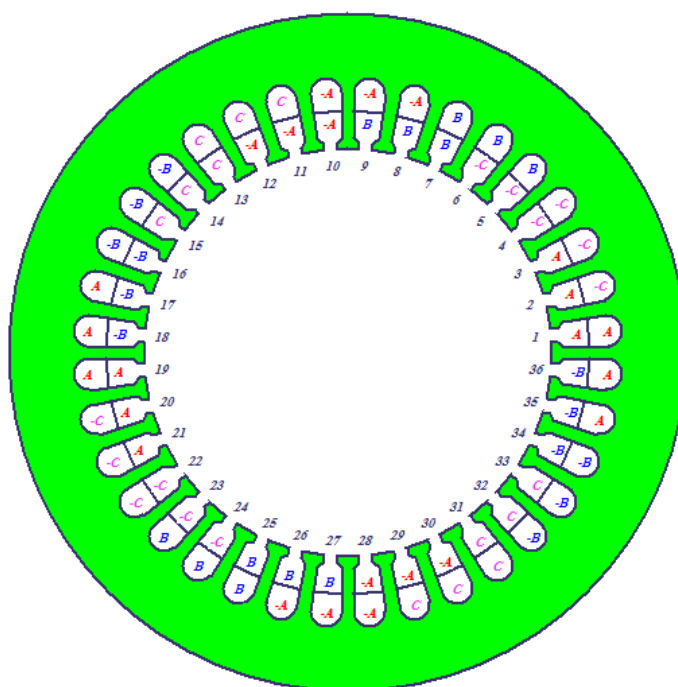
پیوست (۱)

مشخصات سیم پیچی استاتور

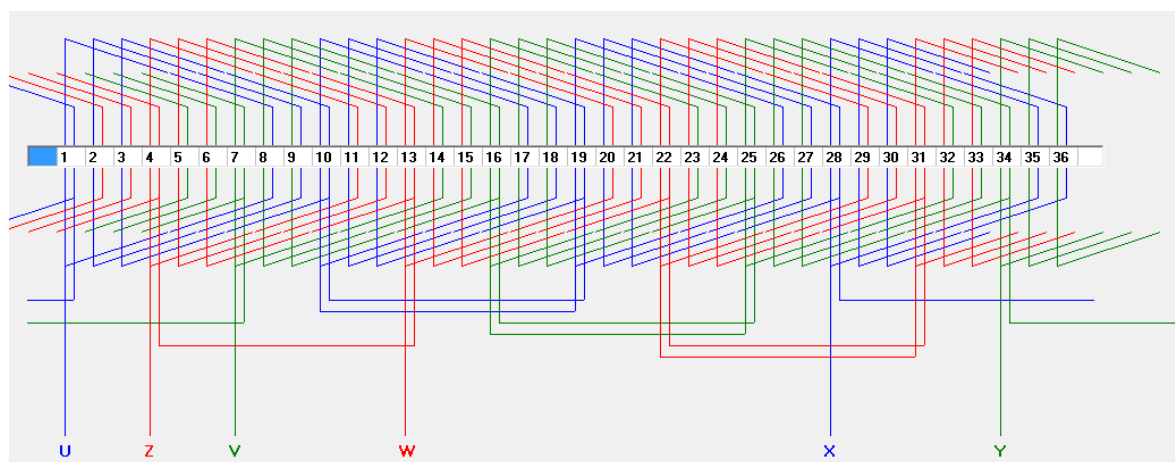
مشخصات سیم پیچی استاتور

جدول پ ۱. سیم پیچی استاتور

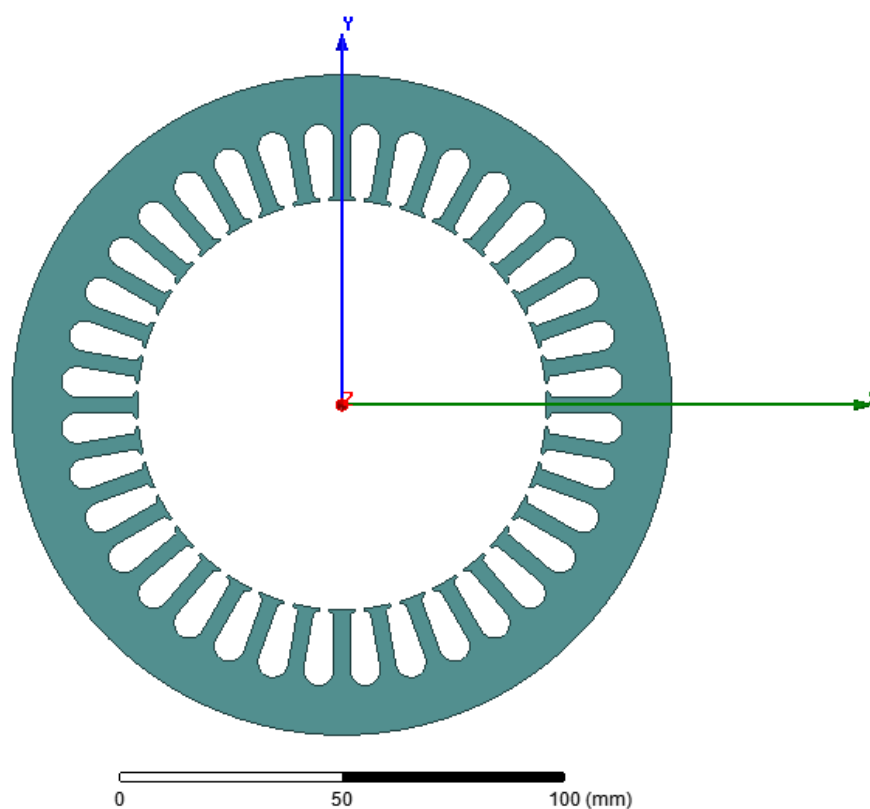
۲	تعداد لایه های سیم پیچی
۳۴	تعداد هادی در هرشیار
۱۷	تعداد هادی در هر لایه در هرشیار
۷ شیار	گام سیم پیچی
۶/۷ درجه ۱۵۴	گام سیم پیچی
۱/۳ mm	قطر سیم (مس)
۱/۳۵ mm	قطر سیم با عایق



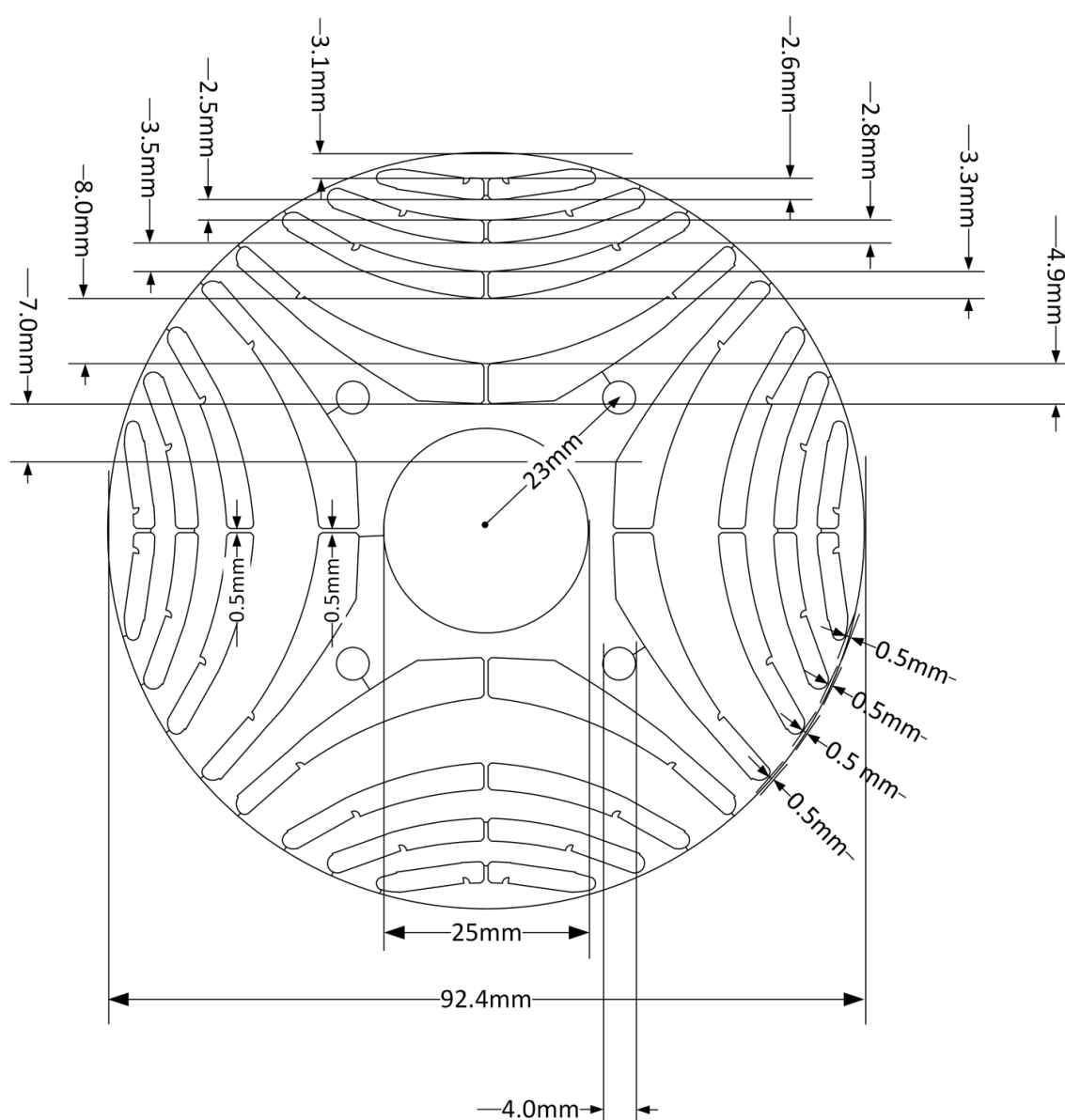
شکل پ ۱. سیم پیچی استاتور



شکل پ ۲. دیاگرام گسترده سیم پیچی استاتور و اتصالها



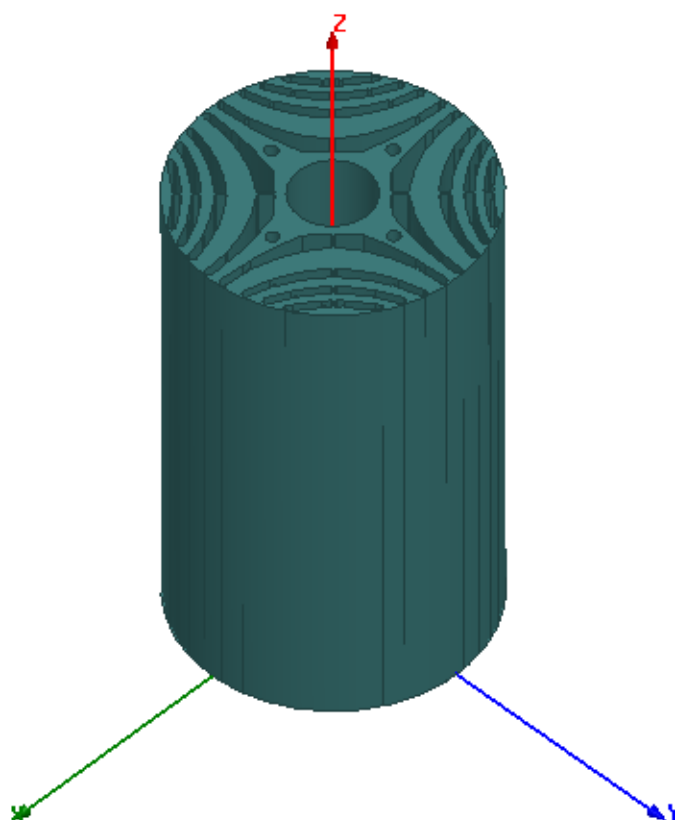
شکل پ ۳. استاتور موتور بهینه



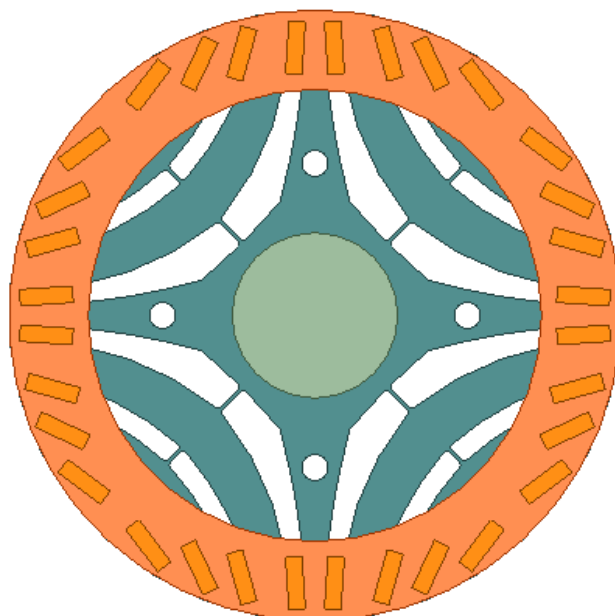
شکل پ ۴. ابعاد روتور سنکرون رلکتانسی



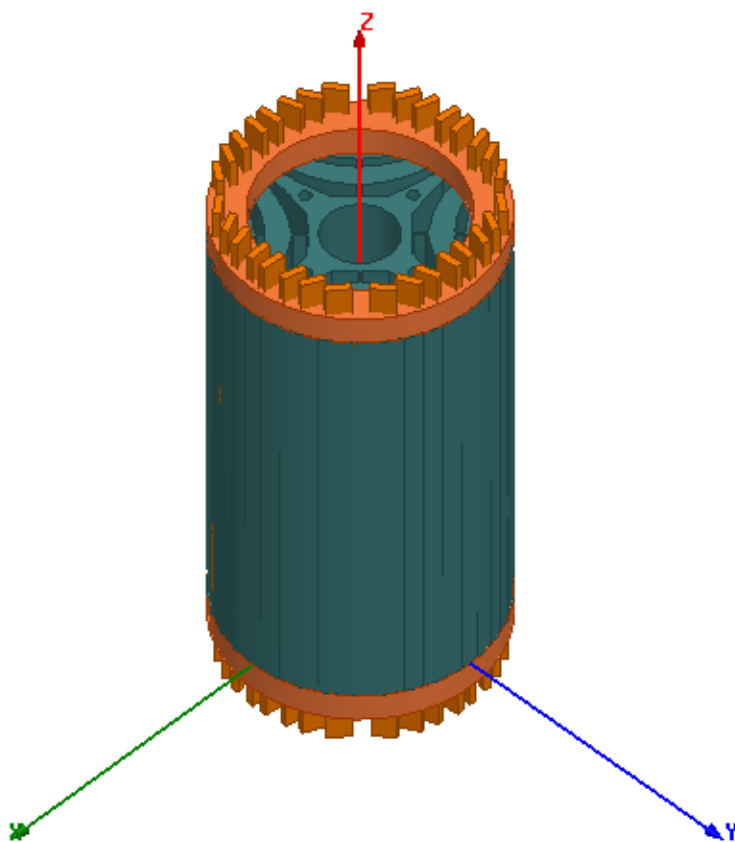
شکل پ ۵. دید از بالا روتور سنکرون رلوکتانسی



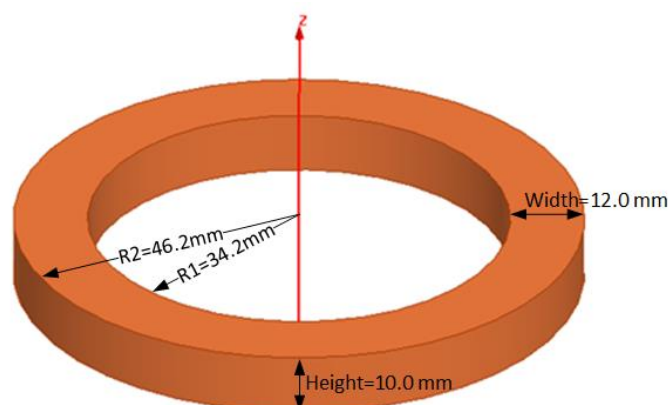
شکل پ ۶. نمای سه بعدی روتور سنکرون رلوکتانسی



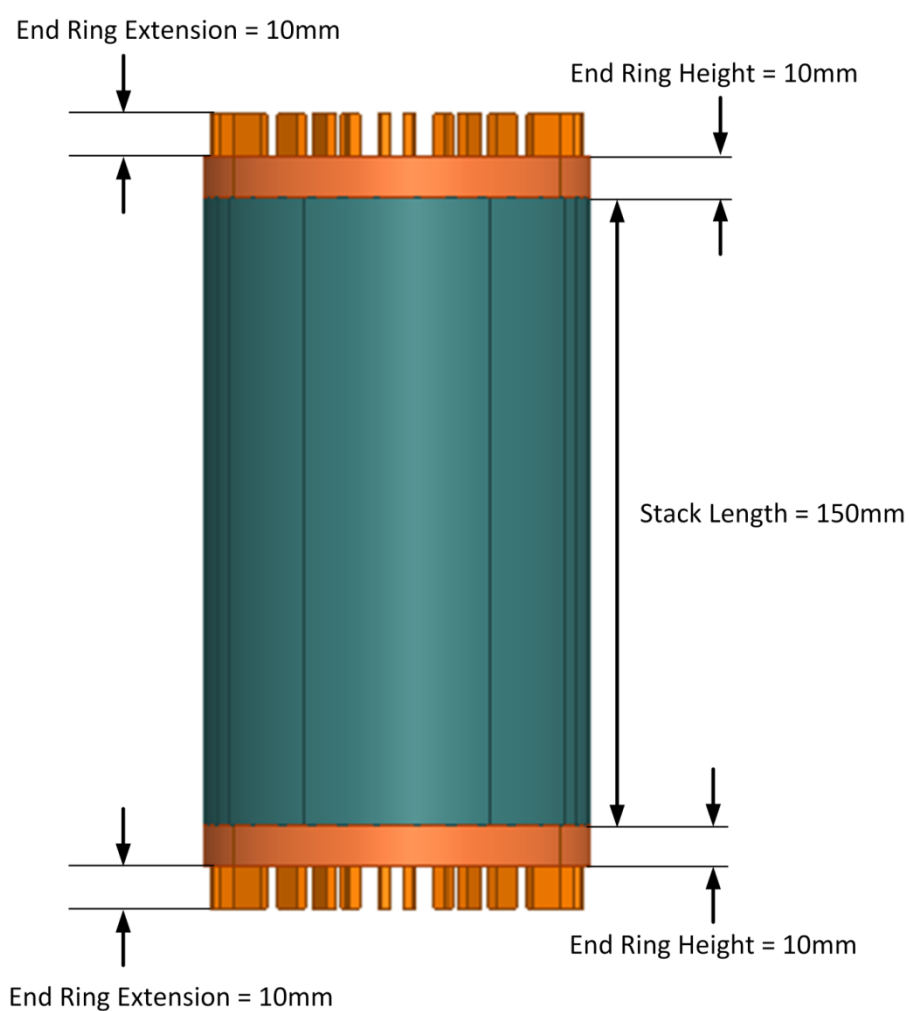
شکل پ ۷. دید از بالای روتور LSSynRM با رینگ انتهایی



شکل پ ۸. نمای سه بعدی روتور LSSynRM



شکل پ ۹. ابعاد رینگ انتهایی



شکل پ ۱۰. دید محوری روتور LSSynRM

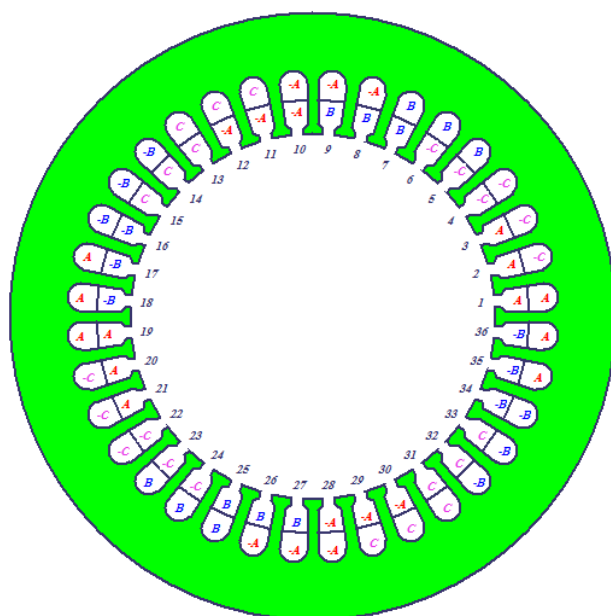
پیوست (۲)

مشخصات سیم پیچی استاتور

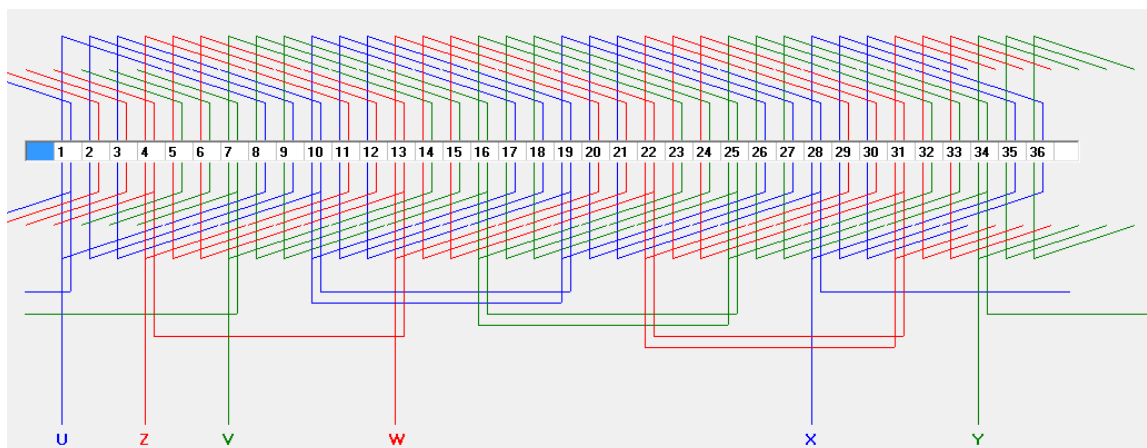
مشخصات سیم پیچی استاتور

جدول پ ۱: سیم پیچی استاتور

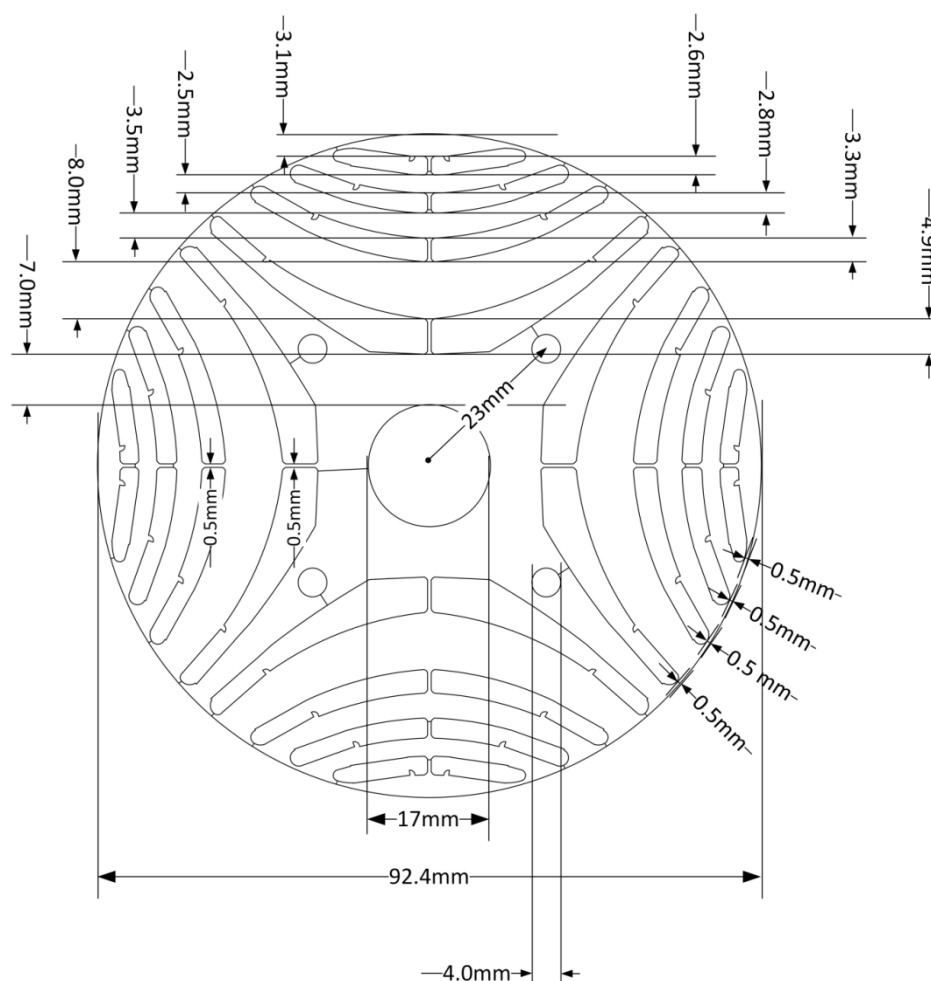
۲	تعداد لایه های سیم پیچی
۷۴	تعداد هادی در هرشیار
۳۷	تعداد هادی در هر لایه در هرشیار
۷ شیار	گام سیم پیچی
۶/۷ ۱۵۴ درجه	گام سیم پیچی
mm۰/۸۵	قطر سیم (مس)
mm۰/۹	قطر سیم با عایق



شکل پ ۱: سیم پیچی استاتور



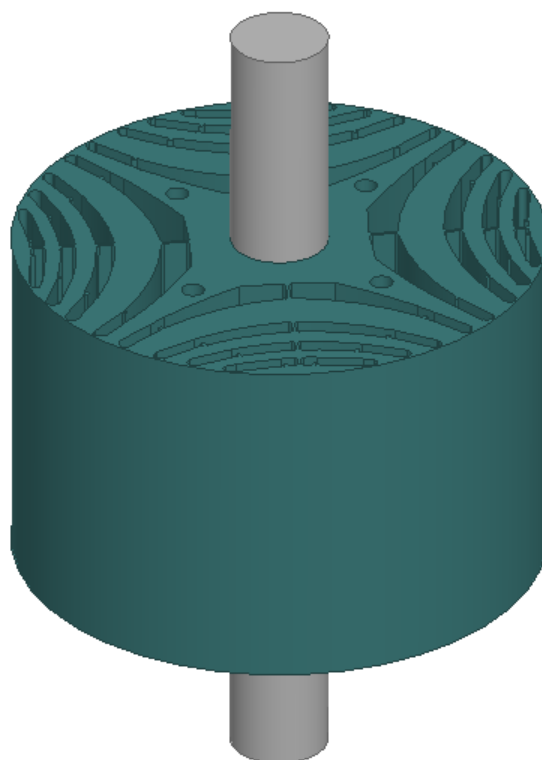
شکل پ ۲: دیاگرام گسترده سیم پیچی استاتور و اتصالها



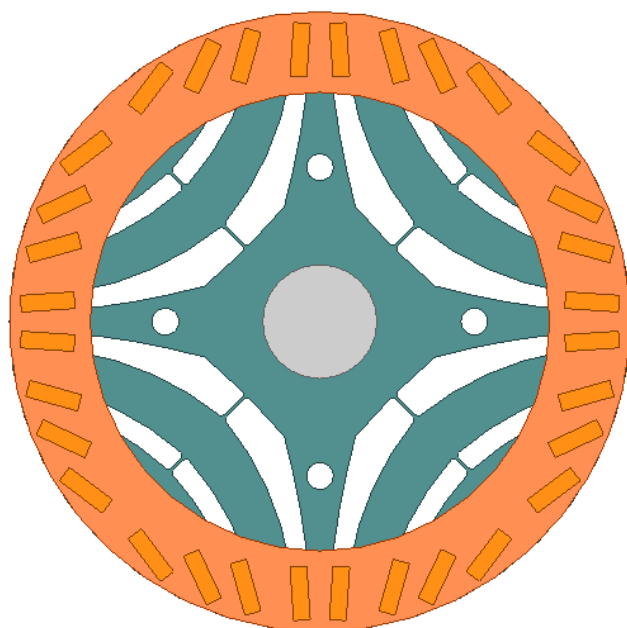
شکل پ ۳: ابعاد روتور SynRM



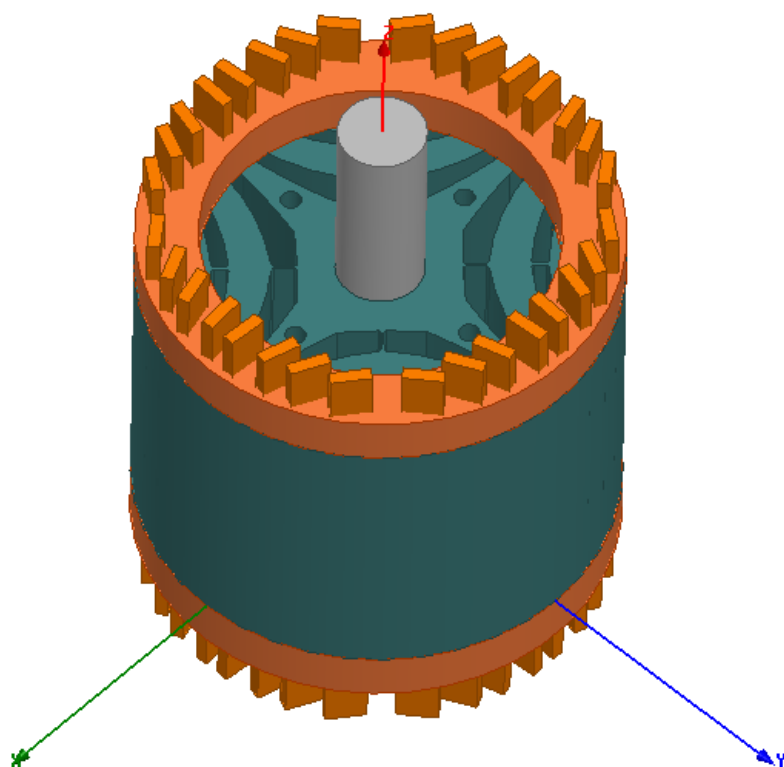
شکل پ ۴: دید از بالا روتور SynRM



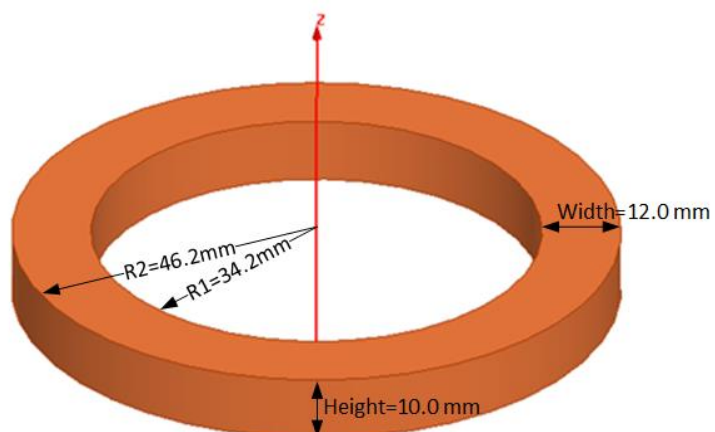
شکل پ ۵: نمای سه بعدی روتور SynRM



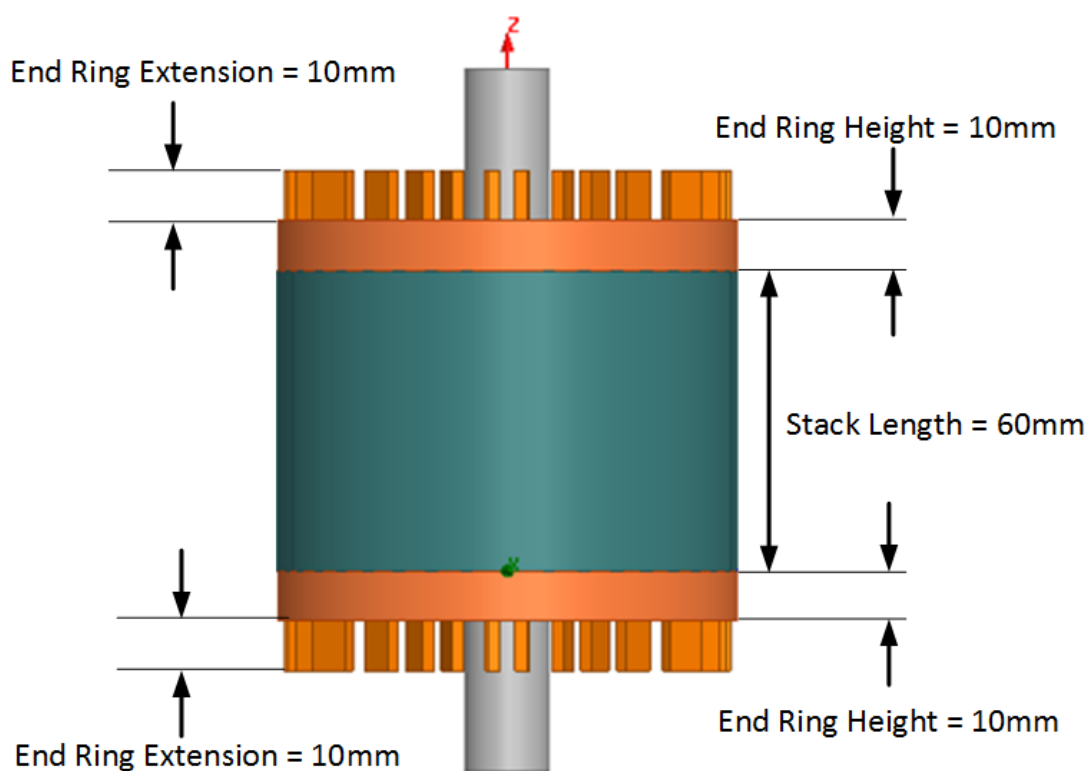
شکل پ۶: دید از بالای روتور LSSynRM با رینگ انتهایی



شکل پ۷: نمای سه بعدی روتور LSSynRM



شکل پ ۸: ابعاد رینگ انتهایی



شکل پ ۹: دید محوری روتور LSSynRM

نتیجه گیری

در این گزارش طراحی بهینه موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز با توان ۳ کیلووات ارائه گردید. در فصل اول طراحی این موتور انجام شد و در فصل دوم، طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز از جنبه های مختلف به ویژه قفسه روتور، انواع آن و بهینه سازی طرح مورد بررسی قرار گرفت. فصل های سوم و چهارم نیز به ترتیب به آنالیز حرارتی و مکانیکی موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز با طرح بهینه اختصاص داشتند.

- [١] A. Vagati, G. Franceschini, I. Marongiu, and G. P. Trogia, "Design criteria of high performance synchronous reluctance motors," in *Conference Record of the 1992 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 4-9 Oct. 1992 1992, pp. 66-73 vol.1 , doi: 10.1109/IAS.1992.244463 .
- [٢] R. Rajabi Moghaddam, "Synchronous reluctance machine (SynRM) in variable speed drives (VSD) applications," KTH Royal Institute of Technology, 2011 .
- [٣] A. Kersten, Y. Liu, D. Pehrman, and T. Thiringer, "Rotor Design of Line-Start Synchronous Reluctance Machine with Round Bars," *IEEE Transactions on Industry Applications*, pp. 1-1, 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2914010.
- [٤] A. Kersten, "Efficiency investigation of line start synchronous reluctance motors," MS thesis, Dept .Electr. Power Eng., Chalmers Univ. Technol., Gothenburg, Sweden, 2017 .
- [٥] J. Cros and P. Viarouge, "Synthesis of high performance PM motors with concentrated windings," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 17, no. 2, pp. 248-253, 2002, doi: 10.1109/TEC.2002.1009476.
- [٦] M. Gamba, G. Pellegrino, E. Armando, and S. Ferrari, "Synchronous reluctance motor with concentrated windings for IE4 efficiency," in *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 1-5 Oct. 2017 2017, pp. 3905-3912 ,doi: 10.1109/ECCE.2017.8096686 .
- [٧] C. M. Donaghy-Spargo, "Synchronous reluctance motors with fractional slot-concentrated windings," Newcastle University, 2016 .
- [٨] M. Gamba and P. d. T. D. energia, *Design of Non Conventional Synchronous Reluctance Machine: Doctoral Thesis*. 2017.
- [٩] A. Kersten, Y. Liu, and D. Pehrman, "Rotor design of a line-start synchronous reluctance machine with respect to induction machine for industrial applications," in *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2018: IEEE, pp. 393-399 .
- [١٠] R. R. Moghaddam and F. Gyllensten, "Novel High-Performance SynRM Design Method: An Easy Approach for A Complicated Rotor Topology," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 9, pp. 5058-5065, 2014 ,doi: 10.1109/TIE.2013.2271601.
- [١١] F. Cupertino, G. Pellegrino, and C. Gerada, "Design of synchronous reluctance motors with multiobjective optimization algorithms," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 6, pp. 3617-3627, 2014.
- [١٢] E. Howard, M. J. Kamper, and S. Gerber, "Asymmetric flux barrier and skew design optimization of reluctance synchronous machines," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 5, pp. 3751-3760, 2015.
- [١٣] F. Cupertino, G. Pellegrino, E. Armando ,and C. Gerada, "A SyR and IPM machine design methodology assisted by optimization algorithms," in *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012: IEEE, pp. 3686-3691 .
- [١٤] K. Agrawal, *Industrial power engineering handbook*. Elsevier, 2٠٠١
- [١٥] C.-T. Liu *et al.*, "Designs of a four-in-one laminated electrical steel rotor structure for application-oriented synchronous reluctance motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 4, pp. 4389-4397, 2019.

-
- [۱۶] S. T. Boroujeni ,M. Haghparast, and N. Bianchi, "Optimization of flux barriers of line-start synchronous reluctance motors for transient-and steady-state operation," *Electric Power Components and Systems*, vol. 43, no. 5, pp. 594-606, 2015.
- [۱۷] T. Marčič, "A short review of energy-efficient line-start motor design," *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 87, no. 3, pp. 119-122, 2011.

فصل ۱۳- ساخت و تست موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز

۱۳-۱- مقدمه

در این فصل مراحل و نحوه ساخت موتور تشریح می‌شود. نتایج تست دینامومتری موتور در آزمایشگاه شرکت الکتروژن و نتایج تست بازده و قابلیت سنکرونیزم در آزمایشگاه دانشگاه صنعتی اصفهان ارائه شده است. مقایسه بین موتور القایی و موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز با استاتور مشترک آمده است. در انتهای فصل نیز قابلیت موتور برای کار با درایو V/f در شرایط سرعت کاهش یافته بررسی خواهد شد.

۱۳-۲- ساخت موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز

۱۳-۲-۱- روتور سنکرون رلوکتانسی

• نمونه ورق روتور سنکرون رلوکتانسی را نشان می‌دهد. از روش برش لیزر برای ساخت روتور استفاده شده است.



شکل ۱-۱۳- تصویر ورق روتور سنکرون رلوکتانسی

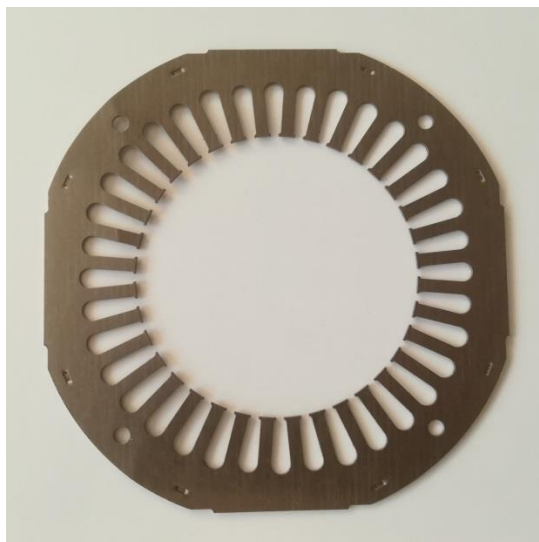
ورق های روتور با استفاده از محل پین های تعبیه شده همانطور که در • نشان داده شده، روی هم قرار داده می شوند تا پشته با طول ۶۰ میلی متر روتور ساخته شود.



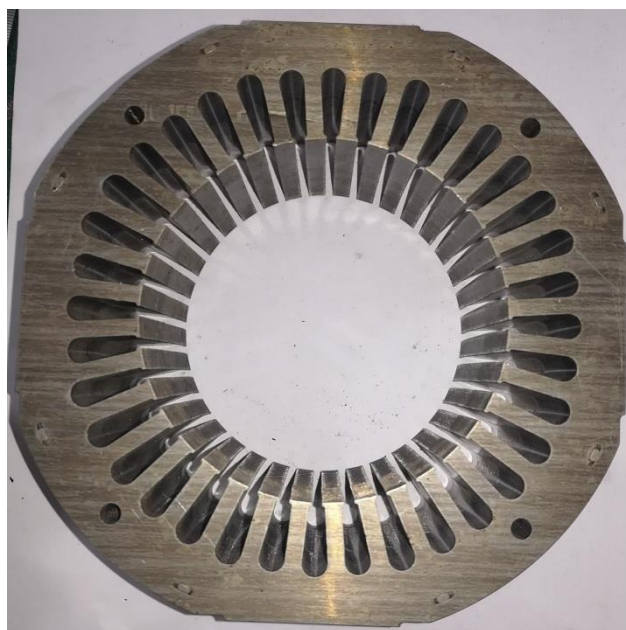
شکل ۲-۱۳- ساخت پشته روتور

۲-۲-۱۳- استاتور و سیم پیچی

نمونه ورق استاتور در * نشان داده شده است. ورق های استاتور با پانچ کردن ایجاد شده اند و به وسیله خارهای ایجاد شده هنگام پانچ، روی هم قرار گرفته و پشته استاتور را در * ایجاد کرده اند.



شکل ۳-۱۳- تصویر ورق استاتور



شکل ۴-۱۳- تصویر پشته استاتور

• تصویر استاتور بعد از قرار گرفتن سیم پیچ ها داخل شیار های استاتور را نشان می دهد.



شکل ۵-۱۳- تصویر سیم پیچی استاتور

۱۳-۲-۳- محور روتور

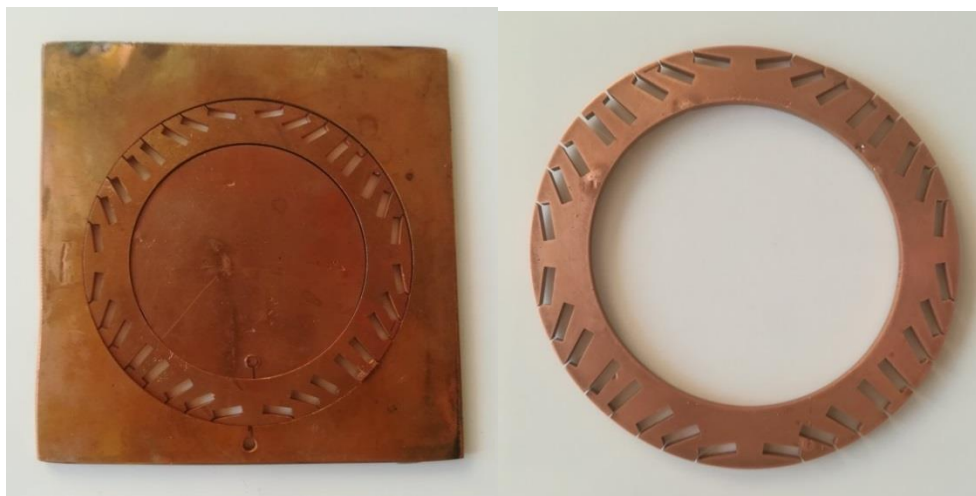
محور موتور به گونه ای طراحی شده تا در قسمت انتهایی بتوان به آن انکدر وصل کرد. محور موتور به سمت بار مشابه موتورهای کولری متداول تراش خورده است. * محور روتور را نشان می دهد.



شکل ۶-۱۳- محور موتور

۱۳-۲-۴- حلقه اتصال کوتاه قفس

برای ساخت حلقه های اتصال کوتاه از ورق مسی با ضخامت 2.5mm استفاده شده و همان طور که در * نشان داده شده حلقه ها با روش وایرکات بریده شده اند. در هر طرف سه لایه حلقه قرار می گیرد تا به مقاومت مورد نیاز برای سنکرونیزم موفق بار برسد.



شکل ۷-۱۳ - نمونه حلقه اتصال کوتاه قفس

۵-۲-۱۳ - میله های قفس

برای میله های قفس از همان ورق مسی با ضخامت 2.5mm که برای ساخت حلقه های اتصال کوتاه استفاده شد، برش داده شده است. نمونه میله قفس و نحوه قرار گرفتن آن در * نشان داده شده است.



شکل ۸-۱۳ - میله های قفس

۶-۲-۱۳ - اتصال میله ها به حلقه اتصال کوتاه

بعد از ساخت پشته روتور رلوکتانسی و آماده شدن میله ها و حلقه های اتصال کوتاه، یک لایه از حلقه ها در هر طرف روتور قرار داده شده و میله های قفس باچکش به داخل پشته موتور و حلقه های اتصال کوتاه کوبیده می شوند. تصویر روتور بعد از جاذدن میله ها و رینگ و قبل از بریزکاری در * نشان داده شده است.



شکل ۹-۱۳- روتور قبل از بریز

برای اتصال میله ها به حلقه های اتصال کوتاه از روش بریز با آتش استفاده شده است. همان طور که در * نشان داده شده، ابتدا با استفاده از هواگاز، میله ها و رینگ حرارت داده می شوند و سپس سیم لحیم به سمت محل اتصال هدایت می شود تا اتصال بین دو قسمت مسی شکل بگیرد.



شکل ۱۰-۱۳- اتصال میله ها به حلقه های اتصال کوتاه با بریز آتش

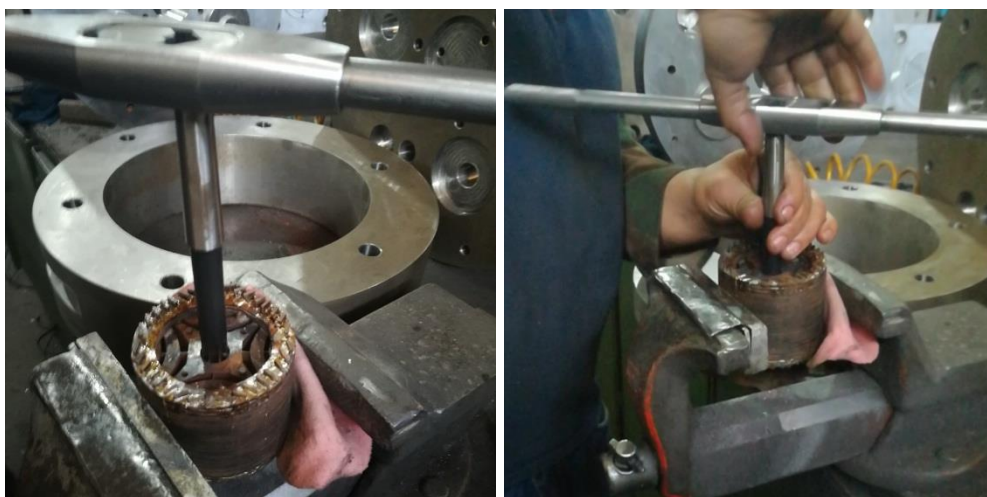
* روتور را پس از اتصال هر سه لایه حلقه اتصال کوتاه در هر طرف روتور نشان می دهد.



شکل ۱۱-۱۳- تصویر روتور بعد از اتصال همه حلقه های اتصال کوتاه

۷-۲-۱۳- جازدن محور در روتور

به دلیل اینکه ورقهای روتور با برش لیزر ایجاد شده اند، ابعاد ورق ها دقیقا مشابه هم نیستند و اندکی تلورانس دارد، همچنین به دلیل تنش های وارد شده حین اتصال میله ها به رینگ، مسیر محور روتور کاملا صاف نیست و نیاز به برقو زدن برای جازدن محور به داخل روتور، وجود دارد. سوراخ روتور به اندازه قطر محور با ابزار دستی برقو زده شده است. * روتور را در حین برقو زدن نشان می دهد.



شکل ۱۲-۱۳- برقو زدن روتور

قبل از جا زدن محور، لازم است تا محور توسط دستگاه آج زده می شود. * محور روتور زیر دستگاه تراش آج نشان می دهد.



شکل ۱۳-۱۳- آج زدن محور

بعد از برقر زدن روتور و آج زدن محور، با استفاده از دستگاه پرس که در * نشان داده شده، محور به داخل روتور قرار داده می شود.

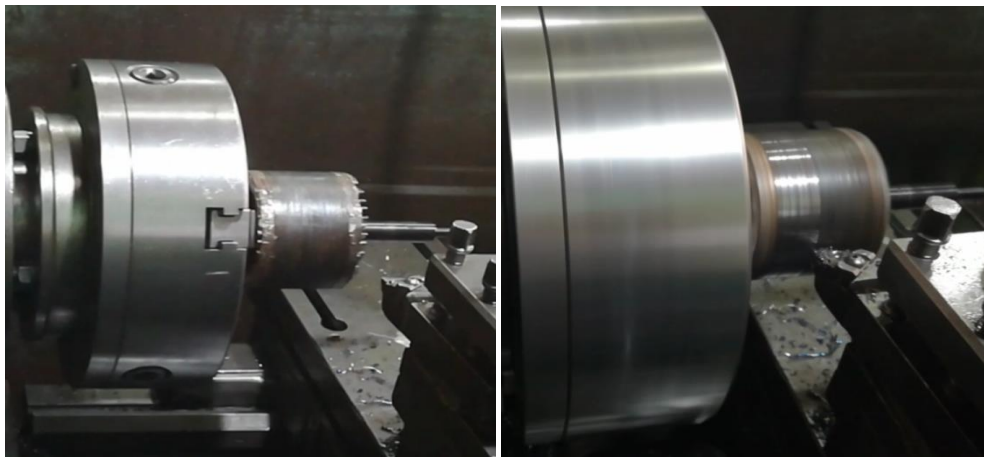


شکل ۱۴-۱۳- جازدن محور با دستگاه پرس

۸-۲-۱۳- تراش کاری سطح روتور

سطح روتور به دلیل تلورانس ورق ها و تنش های مکانیکی هنگام ساخت، کاملاً صاف نیست. غیر یکنواخت بودن سطح روتور منجر به فاصله هوایی غیر یکنواخت در موتور می شود که مشکلاتی مانند: افزایش ریبیل موتور و لرزش های مکانیکی ناشی از بالانس نبودن روتور را در پی دارد. بنابراین لازم است تا قبل مونتاژ موتور، سطح آن تراش داده شود. * روتور را حین

تراش کاری نشان می دهد. در طراحی موتور فاصله هوایی 0.3mm در نظر گرفته شده بود که بعد از تراشکاری به 0.35mm افزایش یافته است. * روتور بعد از تراشکاری را نشان می دهد.



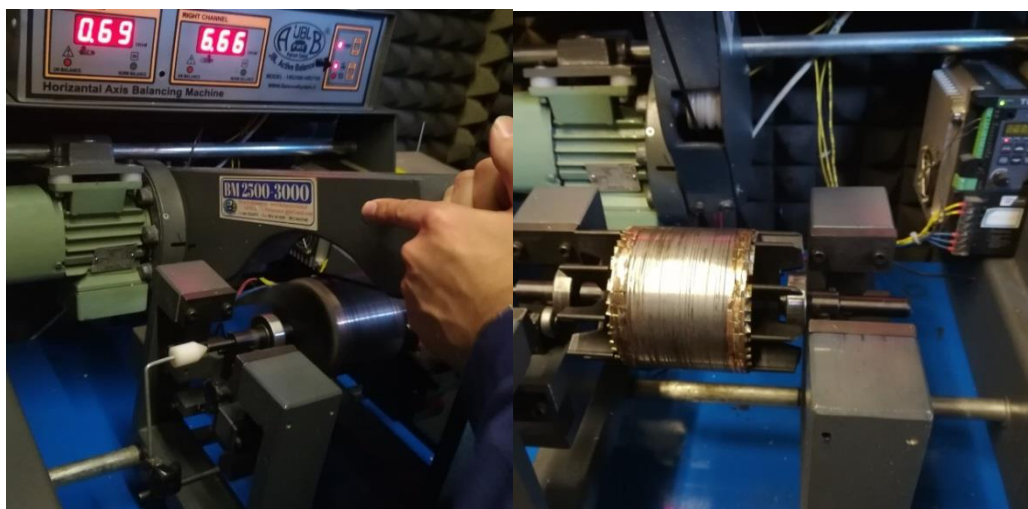
شکل ۱۵-۱۳- تراشکاری سطح روتور



شکل ۱۶-۱۳- روتور بعد از تراشکاری

۹-۲-۱۳- بالانس روتور

به دلیل اینکه میله های قفس با روش بریز با آتش به حلقه های اتصال کوتاه متصل شده اند، هنگام حرارت دادن مقداری از سیم لحیم درون سدکننده های شار و ناحیه بین حلقه های اتصال کوتاه گیر می کند که به دلیل توزیع غیر یکنواخت، باعث می شوند بالانس روتور به هم بخورد. بعد از جاذدن بیرینگ ها و نصب پروانه های خنک کاری، روتور آماده بالانس کردن می شود. تصویر روتور زیر دستگاه بالانس در * نشان داده شده است.



شکل ۱۷-۱۳- روتور زیر دستگاه بالانس

برای بالانس شدن روتور، مقداری وزنه با چسب حرارتی در محل داخلی حلقه های اتصال کوتاه اضافه شده اند تا در اثر سرعت گرفتن و نیروی گریز از مرکز خارج نشوند. * محل اضافه شدن وزنه ها (مهرهای فلزی) را نشان می دهد.



شکل ۱۸-۱۳- محل اضافه کردن وزنه ها برای بالانس شدن روتور

۱۰-۲-۱۳- مونتاژ نهایی

از بدنه موتورهای کولری تکفاز برای موتور استفاده شده است. در نهایت پشته استاتور به داخل بدنه همان طور که در * نشان داده شده، با دستگاه پرس جا زده می شود.



شکل ۱۹-۱۳- جا زدن پشته استاتور به داخل بدنه

۱۱-۲-۱۳- مقایسه با موتور القایی سه فاز

برای مقایسه موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز با موتور القایی سه فاز، از استاتور و سیمپیچی سه فاز مشترک برای هر دو موتور استفاده شده است و تنها روتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز با روتور القایی که در * تصویر ورق آن نشان داده شده، استفاده شده است. برش ورق های روتور القایی با روش پانچ انجام شده است.



شکل ۲۰-۱۳- تصویر ورق روتور القایی

جنس رینگ روتور القایی آلومینیوم است و بیشترین ضخامت رینگ را در میان روتورهای موجود در کارخانه کیاالکتروموتور را دارد. طول پشته آن مشابه روتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز، ۶۰ میلی متر است. اما قطر روتور آن 0.1mm از روتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز بیشتر است (فاصله هوایی موتور القایی 0.3mm از هر طرف است). تصویر روتور القایی در * نشان داده شده است.

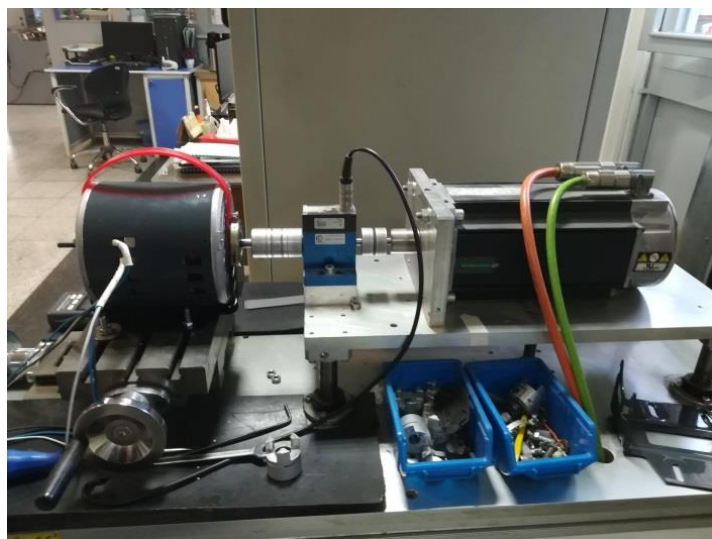


شکل ۲۱-۱۳- تصویر روتور القایی

۱۳-۳- تست موتور

۱-۱۳-۳- تست دینامومتری شرکت الکتروژن

اندازه گیری بازده موتورها با آزمایش دینامومتری صورت گرفته است. • اتصال موتور به دینامومتر شرکت الکتروژن را نشان می‌دهد. مشخصات دینامومتر (Via Cialdini 35/2 Milano (MI) 20161)



شکل ۲۲-۱۳- اتصال موتور به دینامومتر شرکت الکتروژن

نتایج تست دینامومتری در بارهای مختلف در • تا • نشان داده شده است.

جدول ۱-۱۳- نتایج تست در ۲۵ درصد بار نامی

پارمتر	واحد	DOLSynRM	IM
ولتاژ خط	[V]	۳۸۰	۳۸۰
جریان استاتور	[A(rms)]	۱/۷۷	۱/۷۰
سرعت	[rpm]	۱۴۹۸/۸	۱۴۸۱/۳
توان مکانیکی	[W]	۲۵۳/۶	۲۴۴/۲
توان الکتریکی	[W]	۳۹۷/۴	۴۱۱/۷
ضریب قدرت	–	۰/۳۴۲	۰/۳۶۹
بازده	%	۶۳/۸	۵۹/۳

جدول ۲-۱۳- نتایج تست در ۵۰ درصد بار نامی

پارمتر	واحد	DOLSynRM	IM
ولتاژ نامی	[V]	۳۸۰	۳۸۰/۱
جریان استاتور	[A(rms)]	۱/۹۹	۱/۹۲
سرعت	[rpm]	۱۵۰۰/۵	۱۴۵۸/۷
توان مکانیکی	[W]	۵۰۶/۴	۵۰۵/۴
توان الکتریکی	[W]	۶۶۳/۶	۶۹۷/۸
ضریب قدرت	–	۰/۵۰۵	۰/۵۵۳
بازده	%	۷۶/۳	۷۲/۴

جدول ۳-۱۳- نتایج تست در ۷۵ درصد بار نامی

پارمتر	واحد	DOLSynRM	IM
ولتاژ نامی	[V]	۳۸۰	۳۸۰
جریان استاتور	[A(rms)]	۲/۳۰	۲/۲۴
سرعت	[rpm]	۱۴۹۸/۵	۱۴۳۱/۳
توان مکانیکی	[W]	۷۵۵/۱	۷۶۳/۹
توان الکتریکی	[W]	۹۳۲/۴	۱۰۰۲/۷
ضریب قدرت	–	۰/۶۱۹	۰/۶۷۹
بازده	%	۸۱/۰	۷۶/۲

جدول ۴-۱۳- نتایج تست در ۱۰۰ درصد بار نامی

پارمتر	واحد	DOLSynRM	IM
ولتاژ نامی	[V]	۳۸۰	۳۸۰

۲/۶۶	۲/۶۷	[A(rms)]	جریان استاتور
۱۴۰۴/۵	۱۴۹۹/۴	[rpm]	سرعت
۱۰۱۷/۵	۱۰۰۹/۲	[W]	توان مکانیکی
۱۳۲۳/۷	۱۲۱۱/۸	[W]	توان الکتریکی
۰/۷۵۷	۰/۶۹۵	–	ضریب قدرت
۷۶/۹	۸۳/۳	%	بازده

جدول ۵-۱۳- نتایج تست در ۱۲۵ درصد بار نامی

IM	DOLSynRM	واحد	پارمتر
۳۸۰	۳۸۰	[V]	ولتاژ نامی
۳/۱۳	۳/۱۲	[A(rms)]	جریان استاتور
۱۳۷۱/۵	۱۵۰۰/۲	[rpm]	سرعت
۱۲۵۵/۹	۱۲۶۲/۴	[W]	توان مکانیکی
۱۶۵۸/۷	۱۵۰۴/۹	[W]	توان الکتریکی
۰/۸۰۴	۰/۷۴۰	–	ضریب قدرت
۷۵/۷	۸۳/۹	%	بازده

در همه بارها موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز با مصرف انرژی الکتریکی کمتر می‌تواند بار با سرعت سنکرون بچرخاند و بازدهی بالاتری نسبت به موتور القایی دارد. در بار نامی اختلاف بازدهی دو موتور 6.4 درصد است. در مقابل موتور القایی ضریب قدرت بهتری نسبت به موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز دارد. در بار نامی اختلاف ضریب قدرت دو موتور 0.062 است.

۲-۳-۱۳- مقایسه نتایج شبیه‌سازی و اندازه گیری

در ۰ مقایسه بین نتایج شبیه سازی با پارامترهای موتور سنکرون رلوکتانسی ساخته شده و نتایج اندازه گیری با دینامومتر شرکت الکتروژن در بارنامی آمده است.

جدول ۶-۱۳- نتایج مقایسه شبیه‌سازی و تست در بار نامی

شبیه سازی	اندازه گیری	واحد	پارمتر
۳۸۰	۳۸۰	[V]	ولتاژ نامی
۲/۴۶	۲/۶۷	[A(rms)]	جریان استاتور
۱۵۰۰/۰	۱۴۹۹/۴	[rpm]	سرعت
۱۰۱۰/۰	۱۰۰۹/۲	[W]	توان مکانیکی

۱۱۶۱٫۸	۱۲۱۱٫۸	[W]	توان الکتریکی
۰٫۷۱۸	۰٫۶۹۵	–	ضریب قدرت
۸۶٫۹	۸۳٫۳	%	بازده

از جمله دلایل عدم مطابقت نتایج شبیه سازی و اندازه گیری می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- برش لیزر ورق روتور باعث از بین رفتن خاصیت مغناطیسی و افزایش تلفات می شود.
- یکنواخت نبودن شیارهای استاتور باعث افزایش تلفات هارمونیک می شود.
- عدم مطابقت ابعاد روتور در شبیه سازی و نمونه عملی با برش لیزر
- اندازه گیری در ولتاژ شبکه صورت گرفته که با شرایط سینوسی کامل فاصله دارد.
- پانچ شدن ورق های استاتور باعث افزایش تلفات آهن تا حدود 1.5 برابر شبیه سازی می شود.

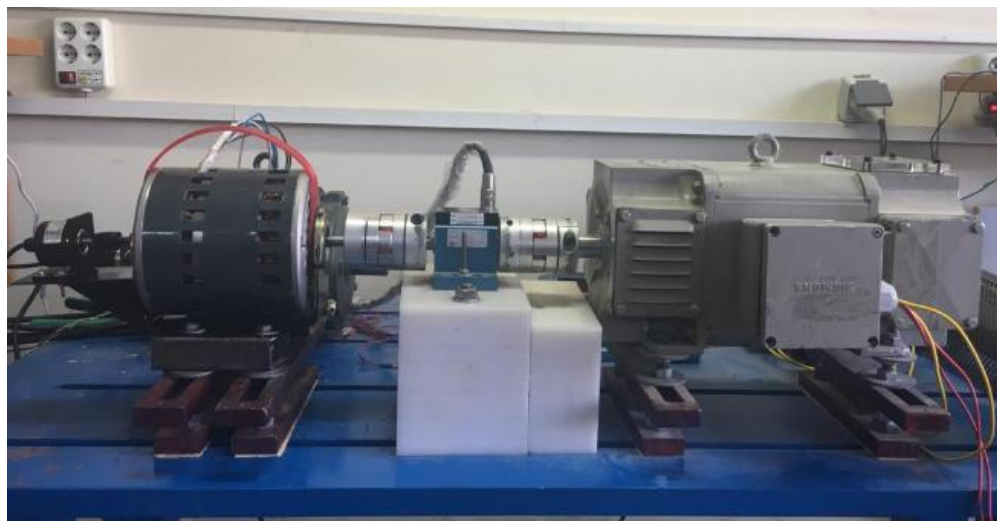
۳-۳-۱۳- تست موتور در آزمایشگاه دانشگاه صنعتی اصفهان

اندازه گیری تست بی باری، بازده و قابلیت سنکرونیزم در دانشگاه صنعتی اصفهان با استفاده از تجهیزات موجود در آزمایشگاه صورت گرفته است. مشخصات تجهیزات اندازه گیری در * آمده است.

جدول ۷-۱۳- مشخصات تجهیزات تست موتور در دانشگاه صنعتی اصفهان

تجهیز	ظرفیت/دقت	جزئیات
سنسور گشتاور	20Nm 0.1%	Inline Rotary Torque meter type TLS/TLSD -Serial number: 4694 Indmeas -made in UK
سنسور موقعیت	12-24VDC ±5%	model: E50S8-1024-3-T-24 Rotary Encoder Autonics-made in Korea
پاور آنالایزر	Class A	Unilyzer 902-MeterSerialNo: 25004070 Unipower-made in Sweden
ژنراتور DC	4.65kW	Siemens Mot.1GG5 104-0FG40- 35-400v 50-3570 rpm-Made in Germany

* کوپلینگ اتصال موتور به سنسور گشتاور و ژنراتور DC را نشان می دهد.

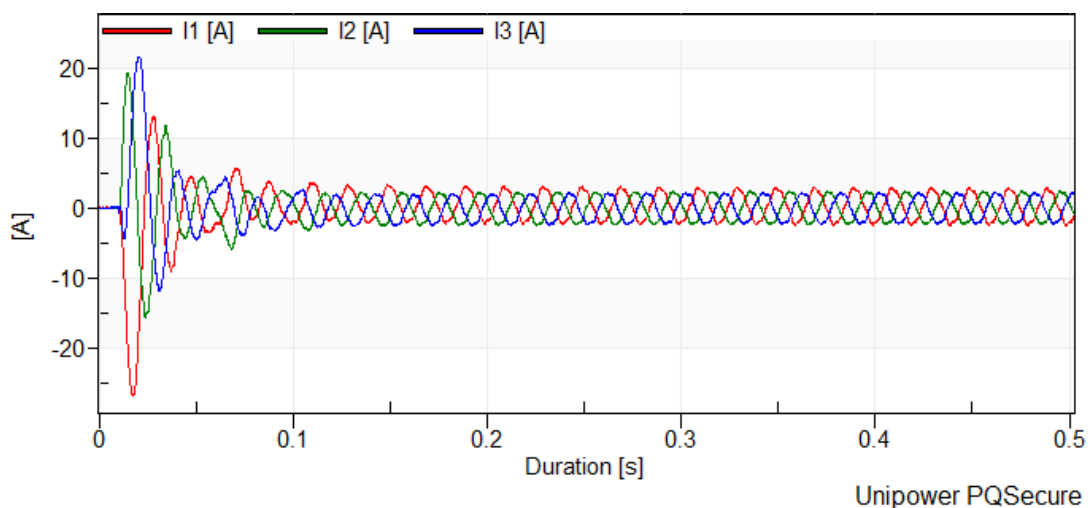


شکل ۲۳-۱۳- میز تست موتور در دانشگاه صنعتی اصفهان

برای ثبت جریان‌های ورودی و ولتاژ، تنظیمات پاور آنالایزر بر روی بازه زمان اندازه‌گیری ۳ ثانیه ای قرار داده شده است. (مقادیر ارائه شده در گزارش متوسط مقادیر در بازه ۳ ثانیه اند.)

➤ تست بی باری

در ۰ جریان راه اندازی موتور سنکرون رلوکتانسی در شرایط بدون بار و در ۰ نتایج اندازه‌گیری بی باری نشان داده شده است.



شکل ۲۴-۱۳- جریان‌های سه فاز اندازه‌گیری شده در بی باری

جدول ۸-۱۳- نتایج اندازه‌گیری موتور سنکرون رلوکتانسی در شرایط بدون بار

پارمتر	واحد	اندازه گیری	شبه سازی
ولتاژ	[V]	۳۷۹/۳	۳۸۰
اعوجاج هارمونیک ولتاژ	%	۳/۶۶	۰/۰
عدم تعادل ولتاژ	%	۰/۲	۰/۰
جریان	[A(rms)]	۱/۶۷	۱/۵۵
توان الکتریکی بی باری	[W]	۱۲۸/۰	۹۲/۳
ضریب قدرت بی باری	–	۰/۱۱۷	۰/۰۹۱

➤ تست بار نامی

نتایج اندازه گیری در بار نامی در ۰ آمده است.

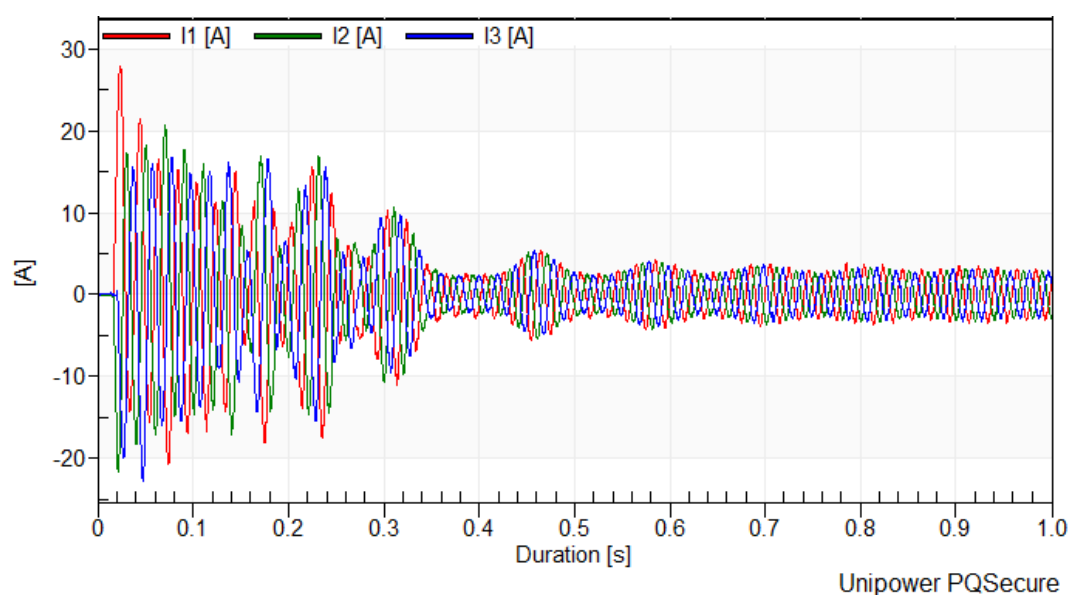
جدول ۹-۱۳- نتایج اندازه گیری موتور سنکرون رلوکتانسی در شرایط بار نامی

پارمتر	واحد	اندازه گیری	شبه سازی
ولتاژ نامی	[V]	۳۸۲/۱	۳۸۰
اعوجاج هارمونیک ولتاژ	%	۲/۸۶	۰/۰
عدم تعادل ولتاژ	%	۰/۳	۰/۰
جریان استاتور	[A(rms)]	۲/۵۴	۲/۴۶
سرعت	[rpm]	۱۵۰۰/۰	۱۵۰۰/۰
توان مکانیکی	[W]	۱۰۱۱/۰	۱۰۱۰/۰
توان الکتریکی	[W]	۱۱۸۲/۰	۱۱۶۱/۸
ضریب قدرت	–	۰/۷۱	۰/۷۱۸
بازده	%	۸۵/۵	۸۶/۹

نتایج اندازه گیری بازده در بار نامی ۸۵.۵ درصد است که نسبت به اندازه گیری با تست دینامومتری ۲.۲ درصد بیشتر است. علاوه بر خطاهای دستگاه های اندازه گیری باید در نظر داشت که اندازه گیری در هر دو مورد با ولتاژ شبکه صورت گرفته است. از آنجا که در محیط های صنعتی عدم تعادل و اعوجاج ولتاژ ورودی بیشتر است، انتظار می رود که تلفات موتور نیز در شرایط ولتاژ نامتعادل و غیرسینوسی بیش تر باشد.

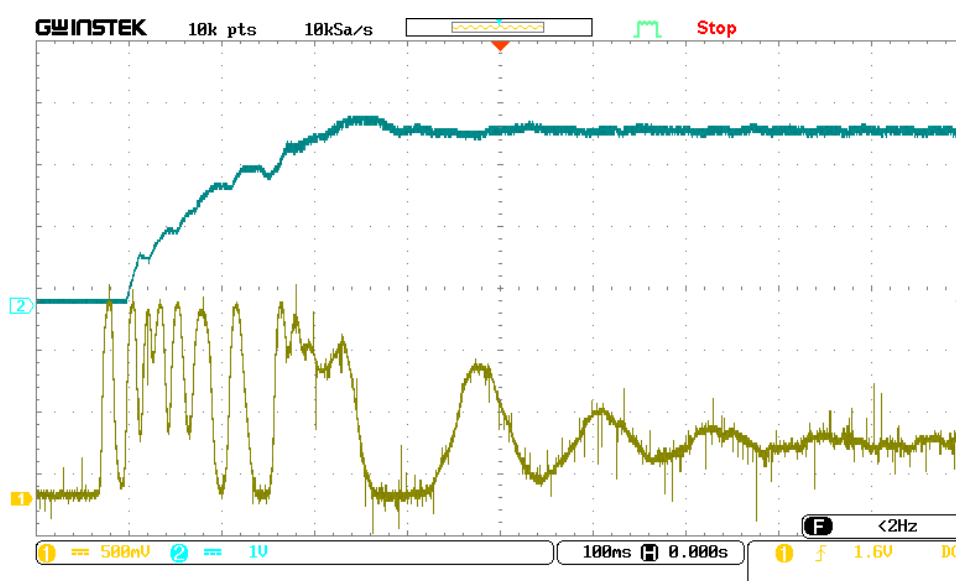
۴-۳-۱۳- قابلیت سنکرونیزم موتور سنکرون رلوکتانسی

برای بررسی قابلیت سنکرونیزم، موتور با اعمال بار مورد نظر توسط ژنراتور راه اندازی می شود. طراحی موتور به گونه ای بوده که توانایی راه اندازی بار یک کیلووات با اینرسی بار معادل با اینرسی خود روتور (0.0033Kgm^2) را داشته باشد، ماشین DC کوپل شده به موتور اینرسی ۴ برابر موتور را دارد. بنابراین مقدار باری که موتور در این شرایط می تواند سنکرون کند، کاهش می یابد. ۰ نتایج اندازه گیری جریان راه اندازی را برای حالتی که بار با اینرسی چهار برابر به موتور اعمال شده را نشان می دهد.



شکل ۲۵-۱۳- جریان های سه فاز اندازه گیری نصف بار نامی و اینرسی ۴ برابر روتور

نتایج گشتاور و سرعت اندازه گیری شده در * نشان داده شده است.



شکل ۲۶-۱۳- نتایج اندازه گیری گشتاور و سرعت در نصف بار نامی و اینرسی بار چهار برابر روتور

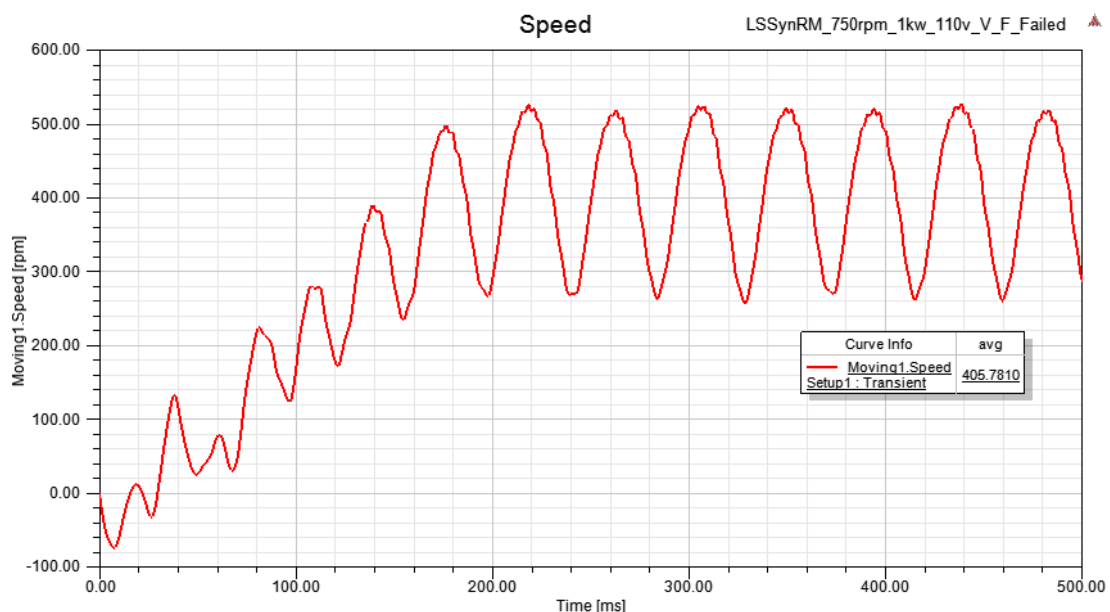
۴-۱۳- بررسی عملکرد موتور سنکرون رلکتانسی خودراه انداز در شرایط کنترل سرعت V/f

موتور سنکرون رلکتانسی خود راه انداز به طور معمول برای کار در شرایط سنکرون با فرکانس شبکه طراحی می‌شوند، اما در صورت نیاز می‌توان با استفاده از درایو با تغییر فرکانس تغذیه، سرعت موتور را کنترل کرد. باید توجه داشت که با

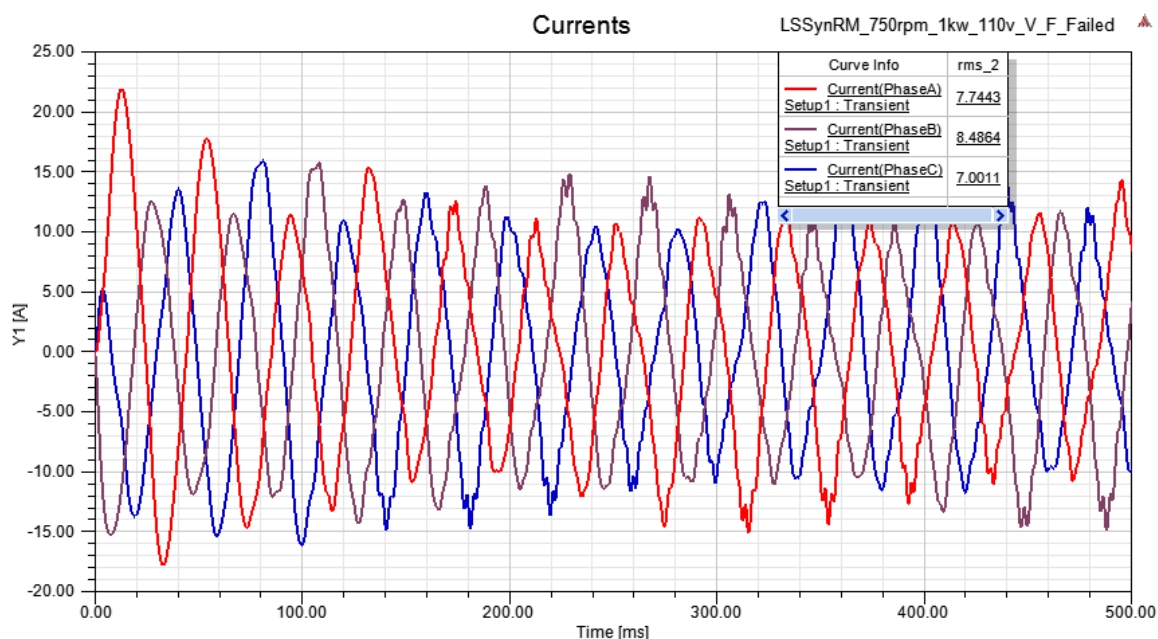
کاهش فرکانس، ولتاژ ورودی موتور را نیز همزمان کاهش داد تا موتور در شرایط شار ثابت کار کند و هسته به اشباع شدید نرود.

۱-۴-۱- شرایط توان نامی و سرعت ۷۵۰ دور در دقیقه

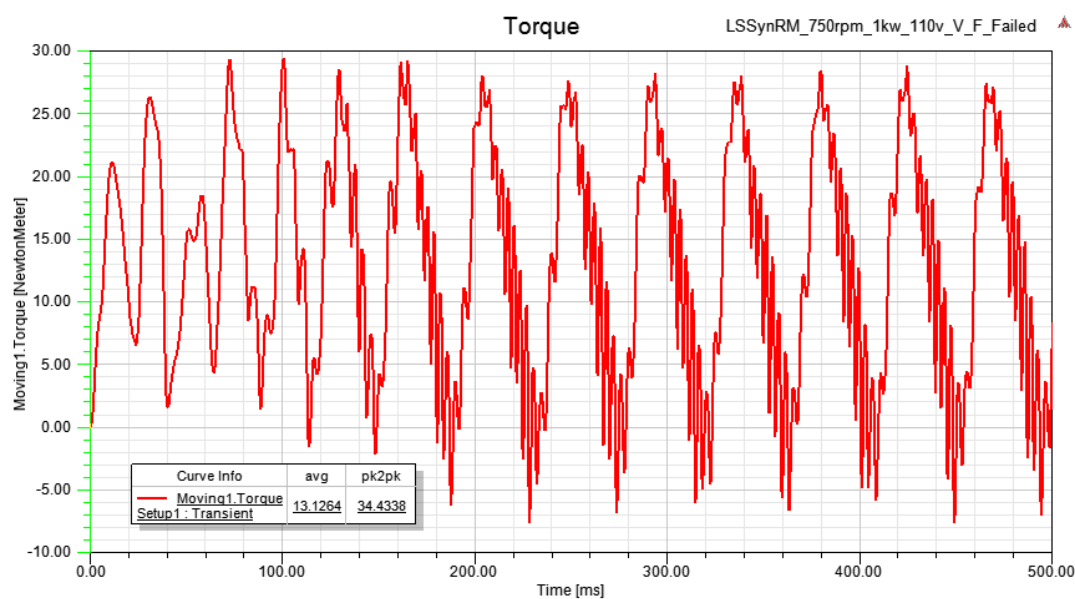
برای بررسی عملکرد موتور در نصف سرعت نامی، به سیم‌پیچی استاتور ولتاژ و فرکانس نصف مقدار نامی (ولتاژ فاز ۱۱۰ ولت و فرکانس ۲۵ هرتز) اعمال شده و شبیه سازی حالت گذرا انجام شده است. فرض می‌کنیم که توان خروجی نامی (بار یک کیلووات) تغییر نمی‌کند، بنابراین با نصف شدن سرعت، گشتاور بار دو برابر (۱۲/۷ نیوتون-متر) می‌شود. نتایج در ۰ تا ۰ نشان داده شده است.



شکل ۲۷-۱۳- منحنی سرعت-زمان موتور در شرایط ولتاژ فاز ۱۱۰ ولت و فرکانس ۲۵ هرتز



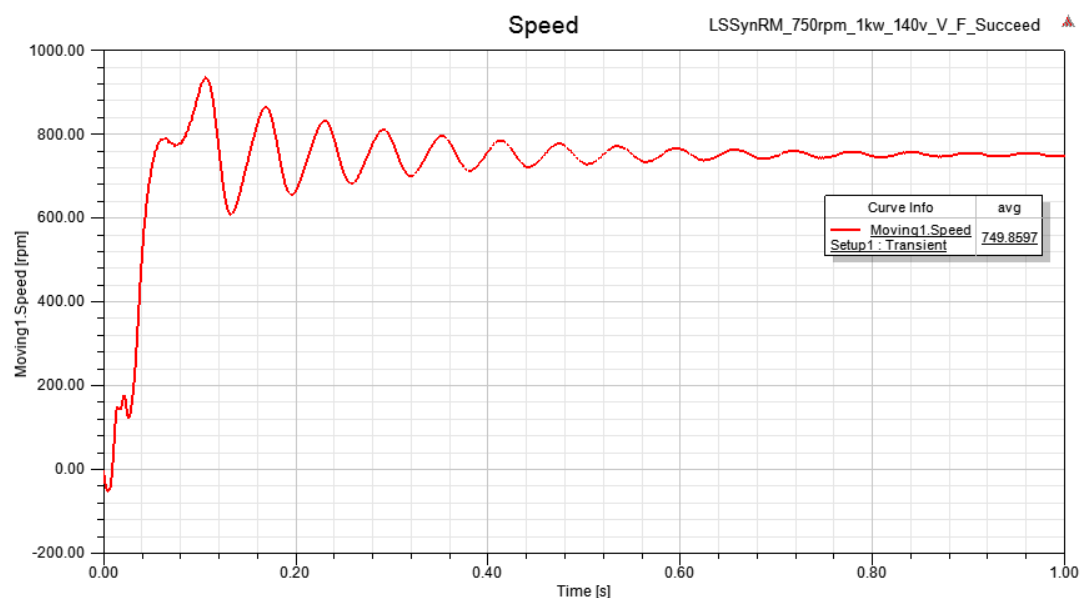
شکل ۲۸-۱۳- منحنی جریان‌های سه فاز در شرایط ولتاژ فاز ۱۱۰ ولت و فرکانس ۲۵ هرتز



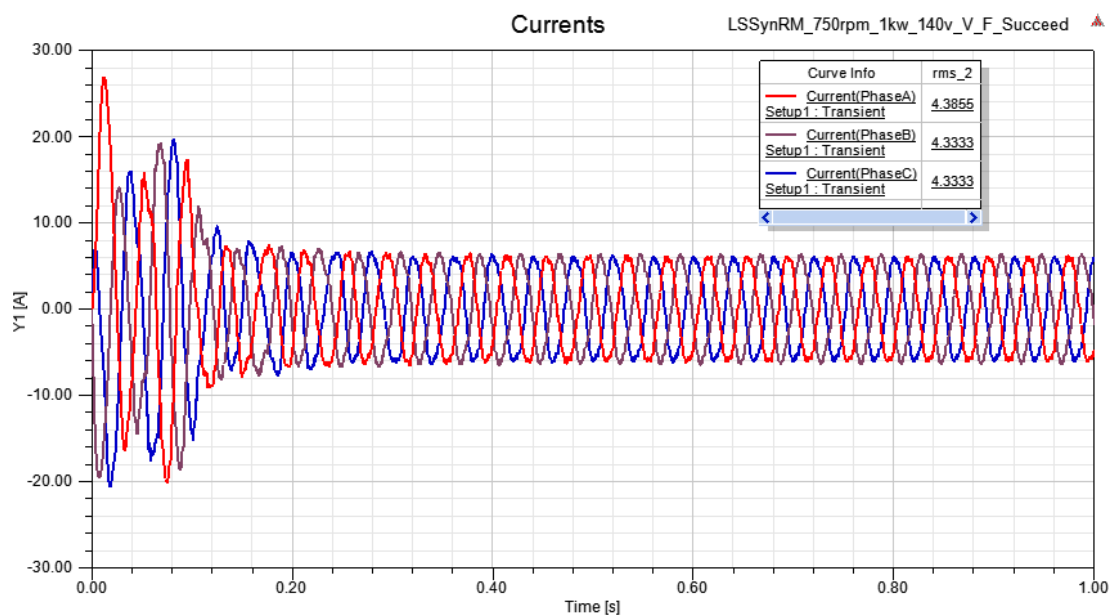
شکل ۲۹-۱۳- منحنی گشتاور-زمان موتور در شرایط ولتاژ فاز ۱۱۰ ولت و فرکانس ۲۵ هرتز

در شرایطی فوق موتور به سنکرونیزم نمی‌رسد و سرعت موتور حالت نوسانی داشته و مقدار متوسط حدود ۴۰۰ دور در دقیقه ایجاد می‌کند. جریان‌های شدیدی از سیم‌پیچی می‌گذرد و نوسانات سرعت نیز شدید است. برای سنکرون کردن بار، موتور به ولتاژ بیشتری نسبت به حالت V/f ثابت نیاز دارد. زیرا در بار نامی و ولتاژ کاهش یافته، موتور جریان بیشتری می‌کشد و افت ولتاژ لحظه راه اندازی مقدار زیادی دارد که مانع می‌شود تا انرژی لازم برای به نزدیکی

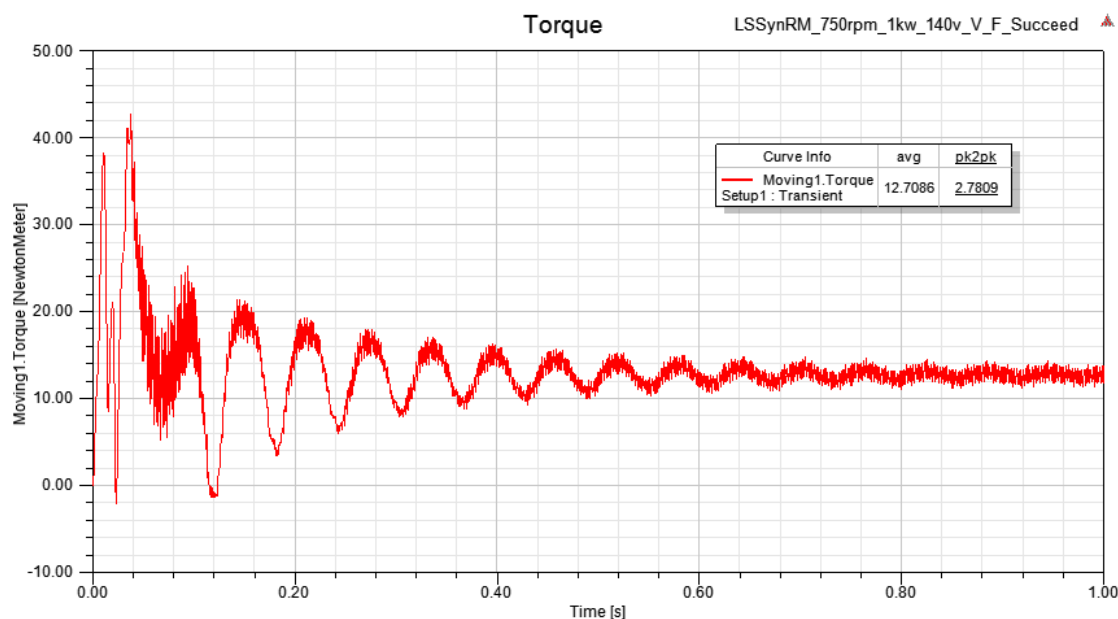
سرعت سنکرون رساندن روتور ایجاد شود. بنابراین با ثابت نگهداشتن فرکانس مانند حالت قبل (۲۵ هرتز) و تنها افزایش ولتاژ ورودی فازی به ۱۴۰ ولت مجدداً شبیه سازی حالت گذرا انجام شده است. نتایج در ۰ تا ۰ نشان داده شده است.



شکل ۳۰-۱۳- منحنی سرعت-زمان در شرایط ولتاژ فاز ۱۴۰ ولت و فرکانس ۲۵ هرتز



شکل ۳۱-۱۳- منحنی جریان سه فاز در شرایط ولتاژ فاز ۱۴۰ ولت و فرکانس ۲۵ هرتز

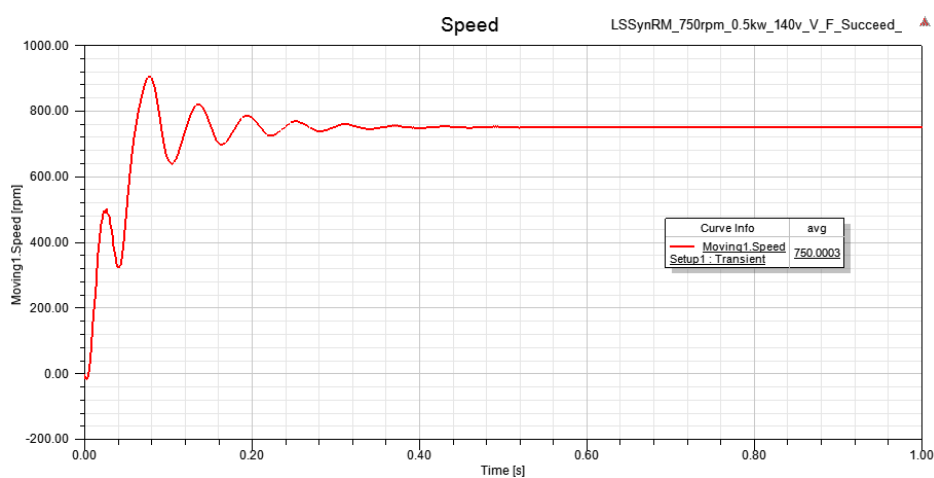


شکل ۳۲-۱۳- منحنی گشتاور-زمان موتور در شرایط ولتاژ فاز ۱۴۰ ولت و فرکانس ۲۵ هرتز

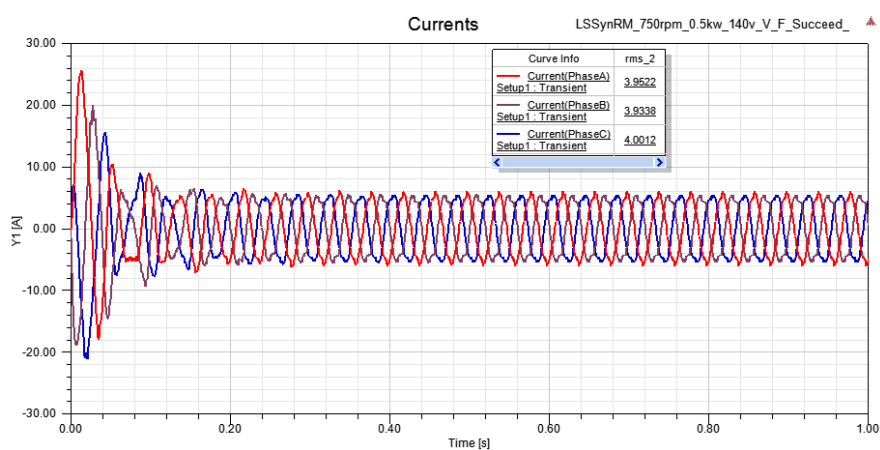
با توجه به شکل‌های فوق می‌توان دریافت که موتور در سرعت نصف مقدار نامی هم می‌تواند بار نامی را سنکرون کند، اما باید توجه داشت که موتور سنکرون رلکتانسی خودراه انداز برای شرایط سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه و گشتاور ۶/۳۷ نیوتون-متر طراحی شده است. جریان نامی آن حدود ۲/۶ آمپر است و فریم موتور از نوع موتورهای کولری تکفاز است. در صورتی که گشتاور دو برابر نامی به موتور اعمال شود، ممکن است در لحظه راه اندازی، فریم و یا اتصالات روتور توانایی تحمل شوک راه اندازی را نداشته باشند و موتور آسیب ببیند. همچنین جریان در شرایط توان نامی و سرعت ۷۵۰ دور در دقیقه ۴/۳ آمپر است، در صورتی که موتور برای مدت طولانی کار کند، افزایش دمای سیم‌پیچی به عایق آن صدمه می‌زند.

۲-۴-۱۳- شرایط نصف توان نامی و سرعت ۷۵۰ دور در دقیقه

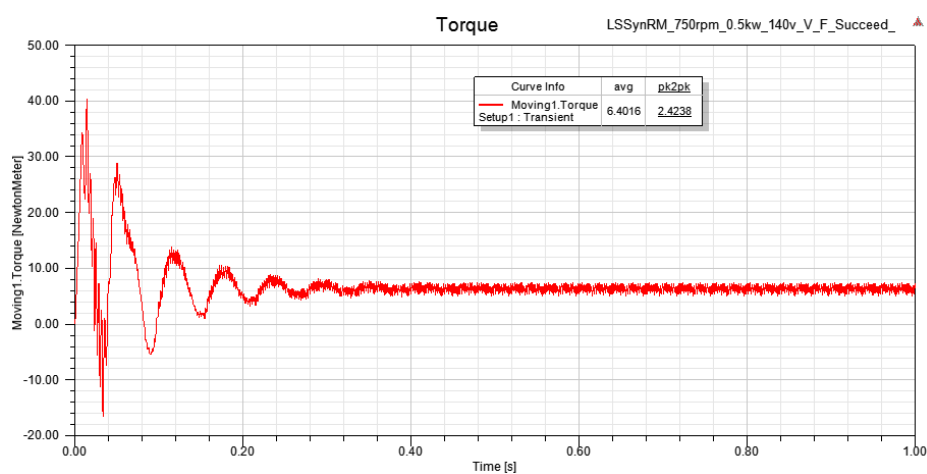
مشخصه بسیاری از بارها به این صورت است که با کاهش سرعت توان بار نیز افت می‌کند. اگر فرض کنیم که موتور در سرعت ۷۵۰ دور در دقیقه، نصف بار نامی را تحویل می‌دهد، در این شرایط گشتاور با حالت سرعت نامی تغییری نمی‌کند. شبیه سازی در شرایط نصف سرعت و توان نامی بر روی موتور انجام شده است، نتایج در ۰ تا ۰ نشان داده شده است.



شکل ۳۳-۱۳- منحنی سرعت-زمان در شرایط نصف بار نامی و فرکانس ۲۵ هرتز (ولتاژ فاز ۱۴۰ ولت)



شکل ۳۴-۱۳- منحنی جریان‌های سه فاز در شرایط نصف بار و سرعت نامی و فرکانس ۲۵ هرتز



شکل ۳۵-۱۳- منحنی گشتاور-زمان در شرایط نصف بار و سرعت نامی و فرکانس ۲۵ هرتز

همان طور که مشاهده می شود، موتور توانایی سنکرونیزم را دارد و جریان موتور نیز تقریباً به شرایط نامی نزدیک است. بنابراین در صورتی از کنترل V/f برای موتور استفاده شود، و قرار است که موتور در مدت طولانی بار را با سرعت کاهش یافته بچرخاند، توصیه می شود تا توان نیز کاهش یابد تا افزایش جریان و افزایش حرارت به سیم پیچی آن آسیب نزنند.

نتیجه گیری

در این گزارش طراحی موتورهای سنکرون رلوکتانسی خود راه انداز و ساخت یک نمونه ۳ کیلووات مورد بررسی قرار گرفت. در فصل اول مقایسه عملکرد موتورهای القایی و موتورهای سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز انجام شده و مطالعه استانداردهای بین المللی درباره طراحی و ساخت این موتور و همچنین پارامترهای مهم در طراحی و ساخت آن در فصل های دوم و سوم انجام شد. فصل های چهارم تا یازدهم به طراحی و آنالیز الکترومغناطیسی، حرارتی و مکانیکی موتور سینکرون خودراه انداز اختصاص داشت و طراحی، ساخت و تست یک موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه انداز یک کیلووات نیز موضوع فصل های دوازده و سیزده این گزارش بود.

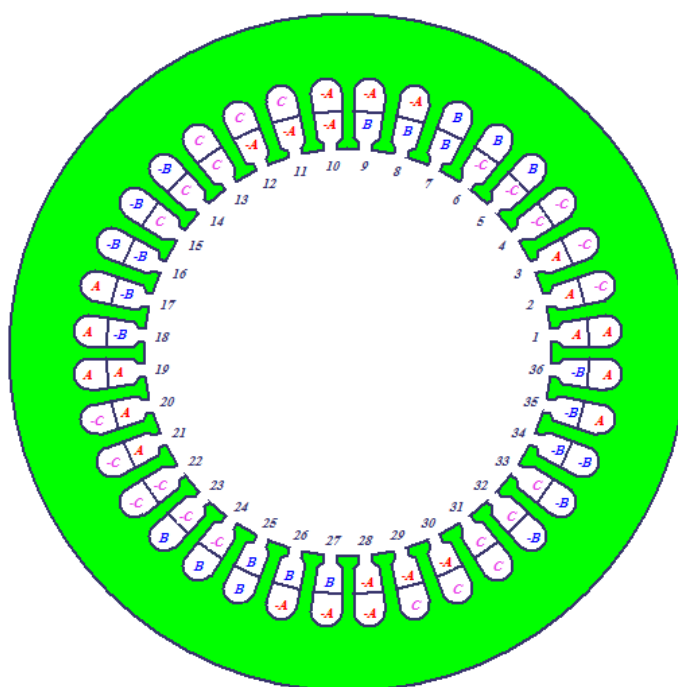
پیوست (۱)

مشخصات سیم پیچی استاتور

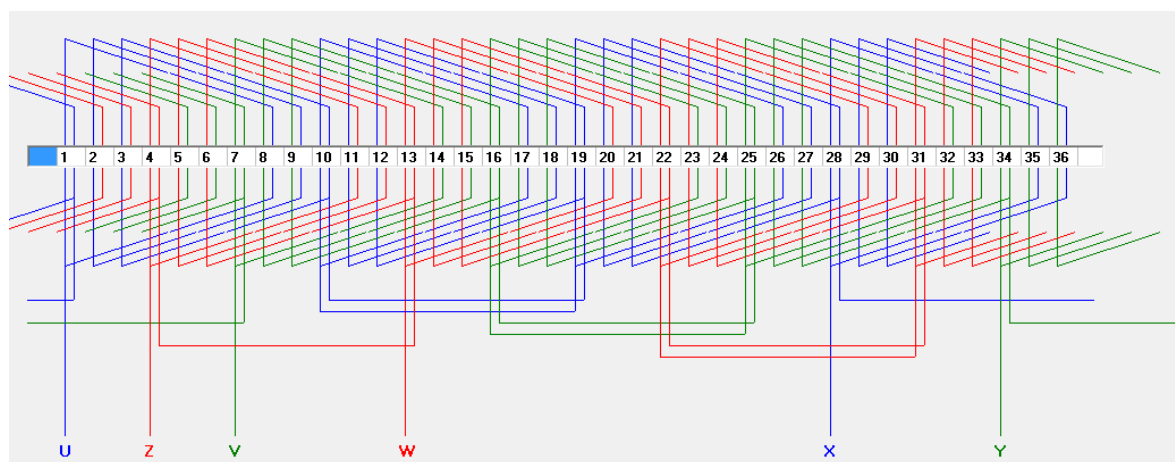
۱- مشخصات سیم پیچی استاتور

جدول پ ۱. سیم پیچی استاتور

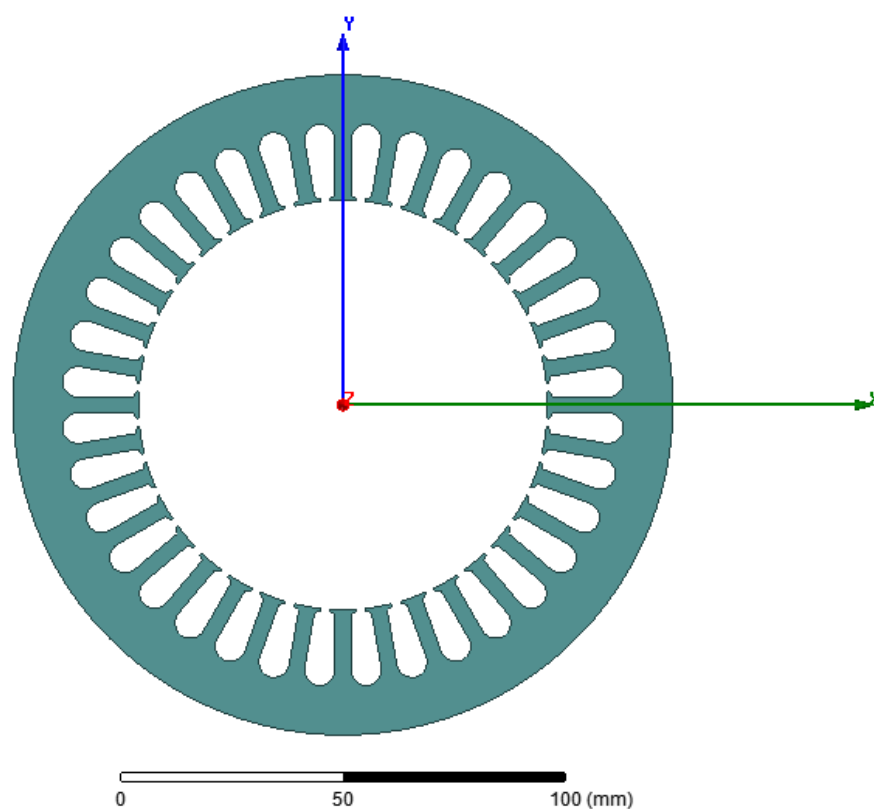
۲	تعداد لایه های سیم پیچی
۳۴	تعداد هادی در هر شیار
۱۷	تعداد هادی در هر لایه در هر شیار
۷ شیار	گام سیم پیچی
۶/۷ درجه ۱۵۴	گام سیم پیچی
۱/۳ mm	قطر سیم (مس)
۱/۳۵ mm	قطر سیم با عایق



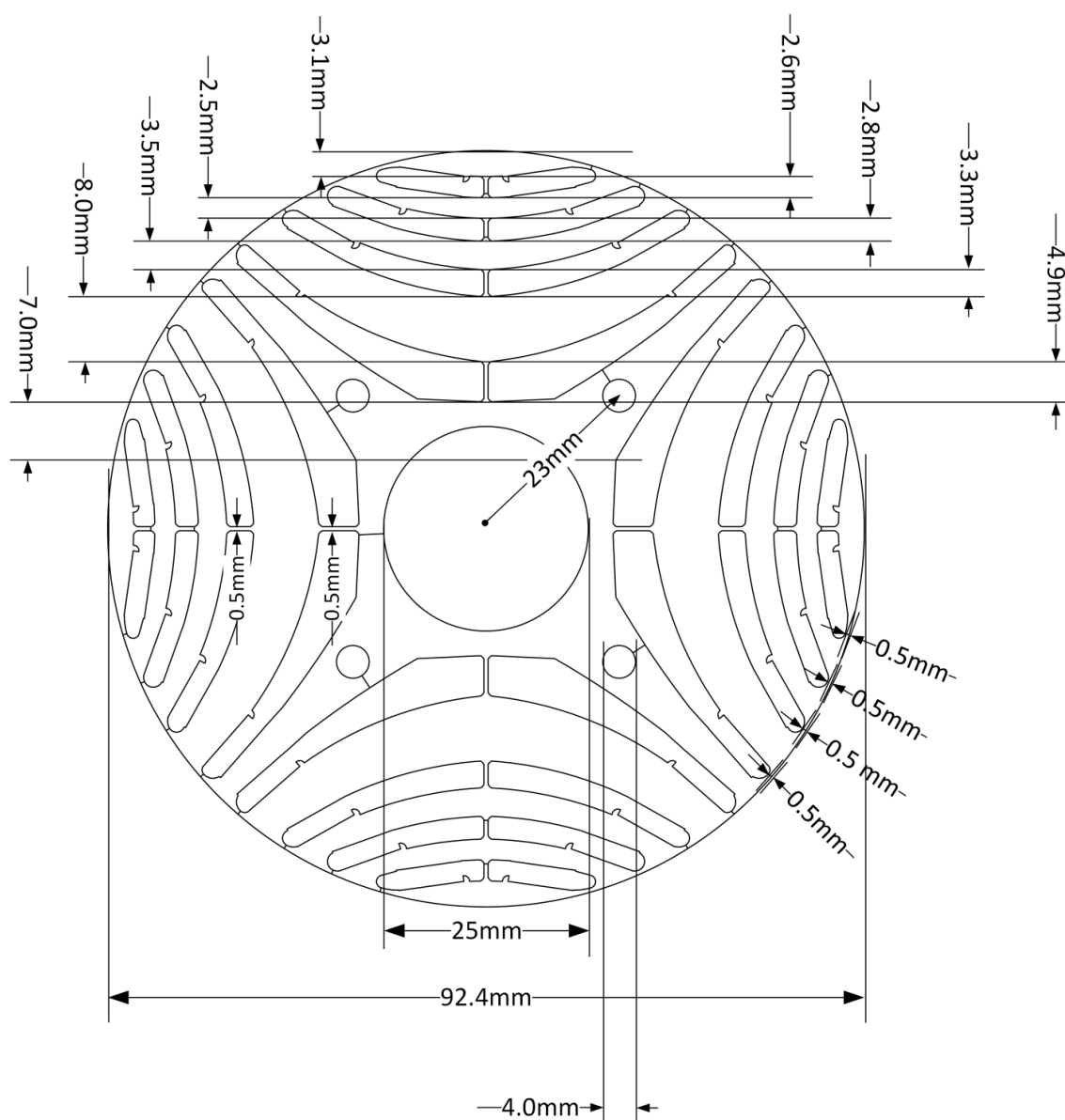
شکل پ ۱. سیم پیچی استاتور



شکل پ ۲. دیاگرام گسترده سیم پیچی استاتور و اتصالها



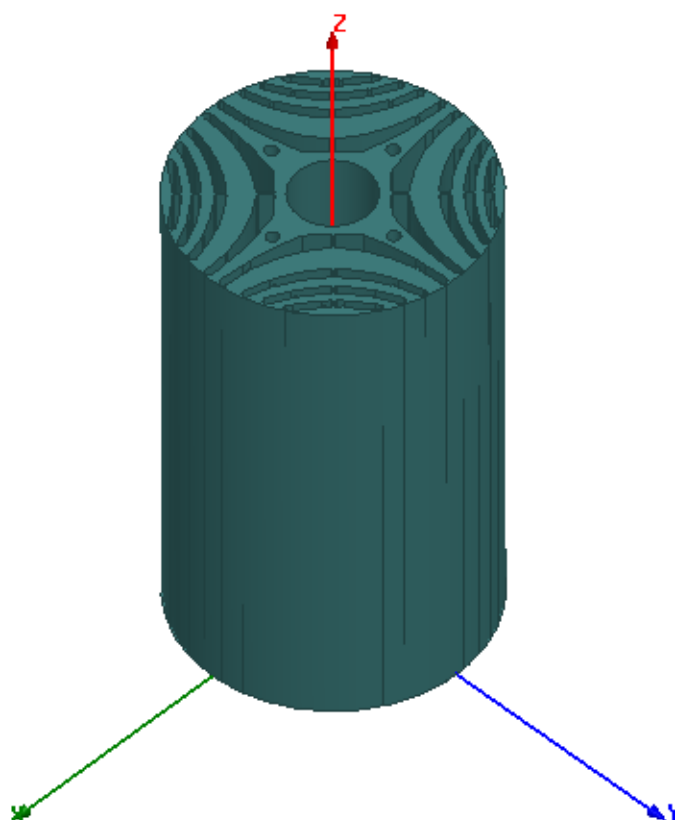
شکل پ ۳. استاتور موتور بهینه



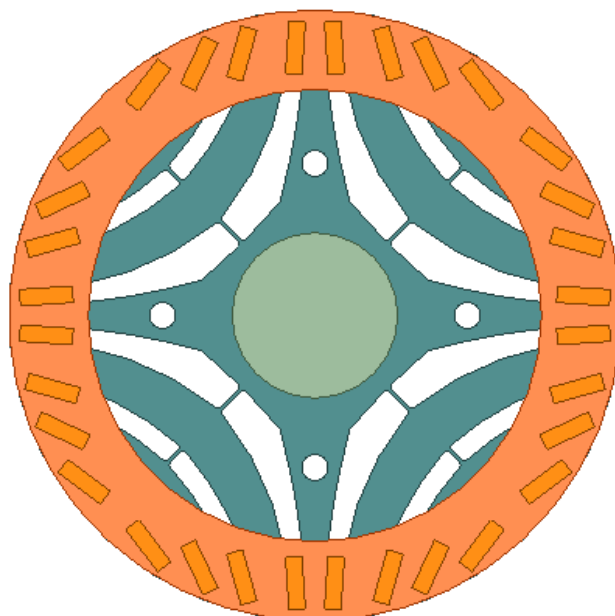
شکل پ ۴. ابعاد روتور سنکرون رلوکتانسی



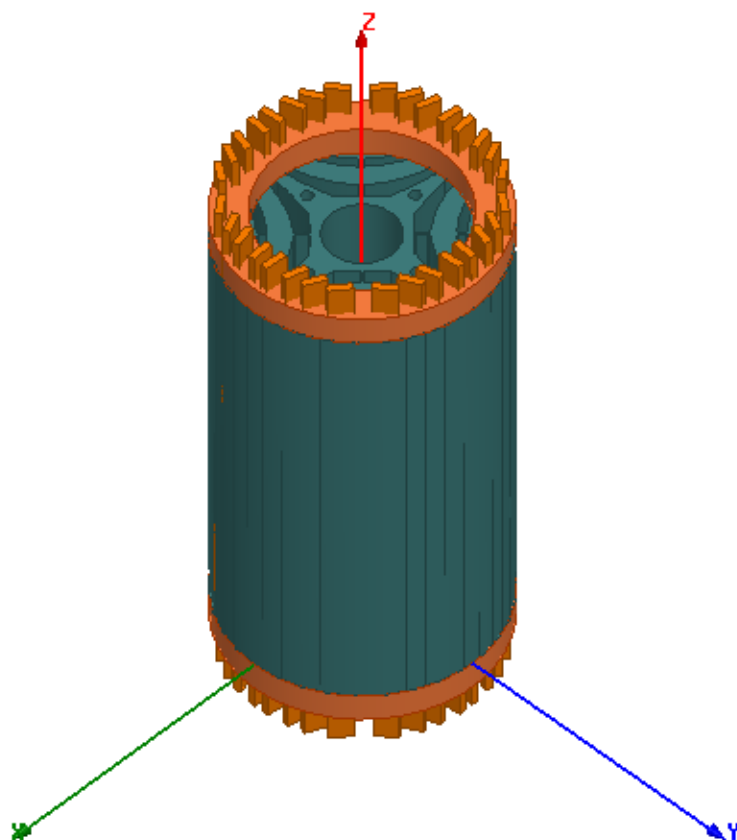
شکل پ ۵. دید از بالا روتور سنکرون رلوکتانسی



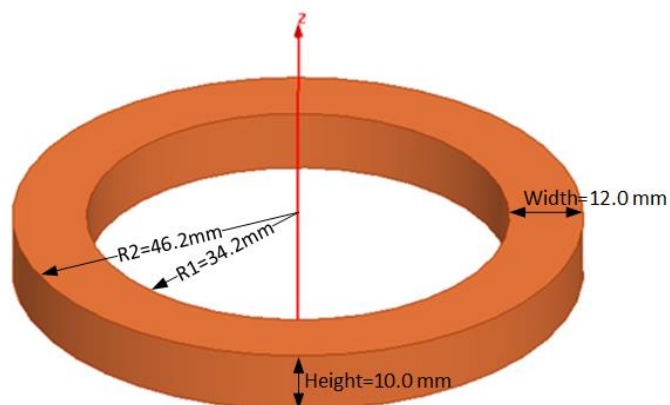
شکل پ ۶. نمای سه بعدی روتور سنکرون رلوکتانسی



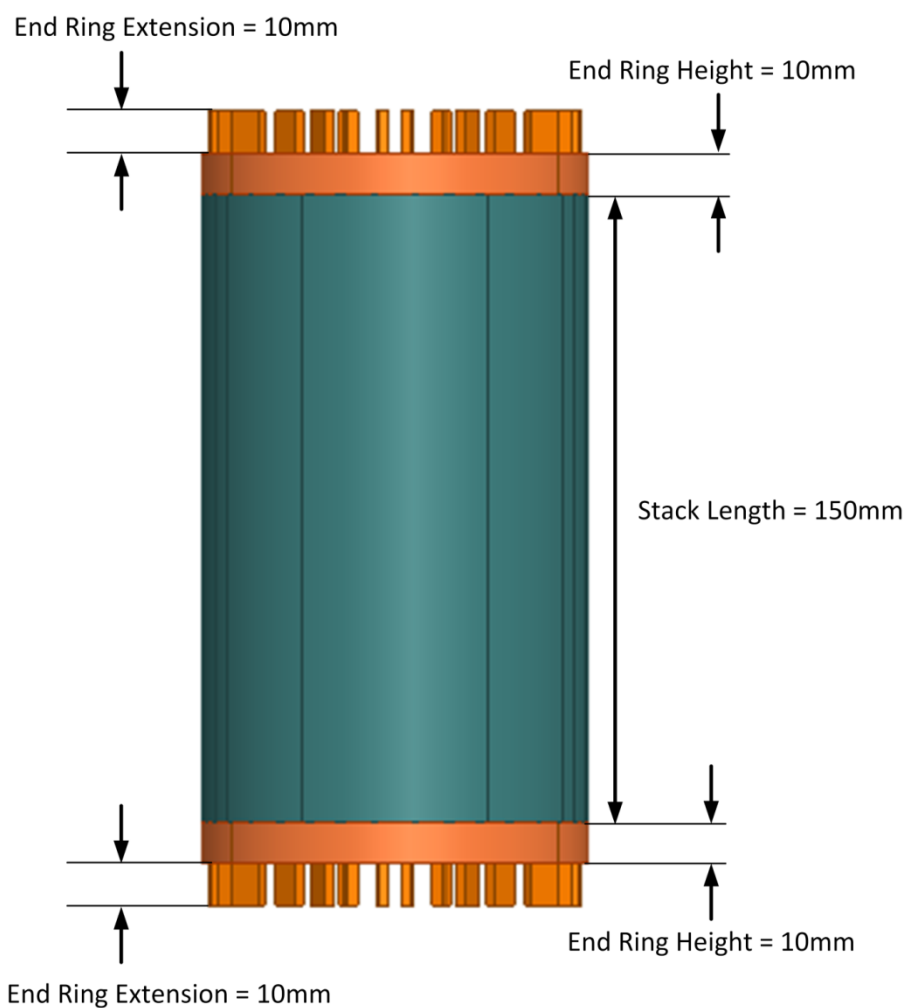
شکل پ ۷. دید از بالای روتور LSSynRM با رینگ انتهایی



شکل پ ۸. نمای سه بعدی روتور LSSynRM



شکل پ ۹. ابعاد رینگ انتهایی



شکل پ ۱۰. دید محوری روتور LSSynRM

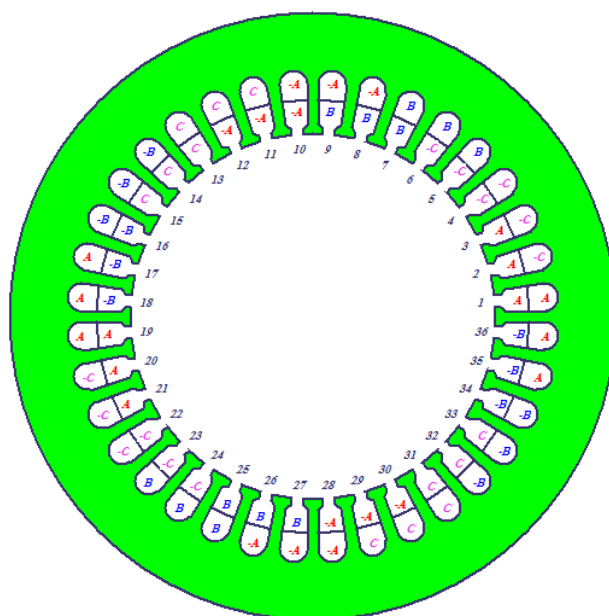
پیوست (۲)

مشخصات سیم پیچی استاتور

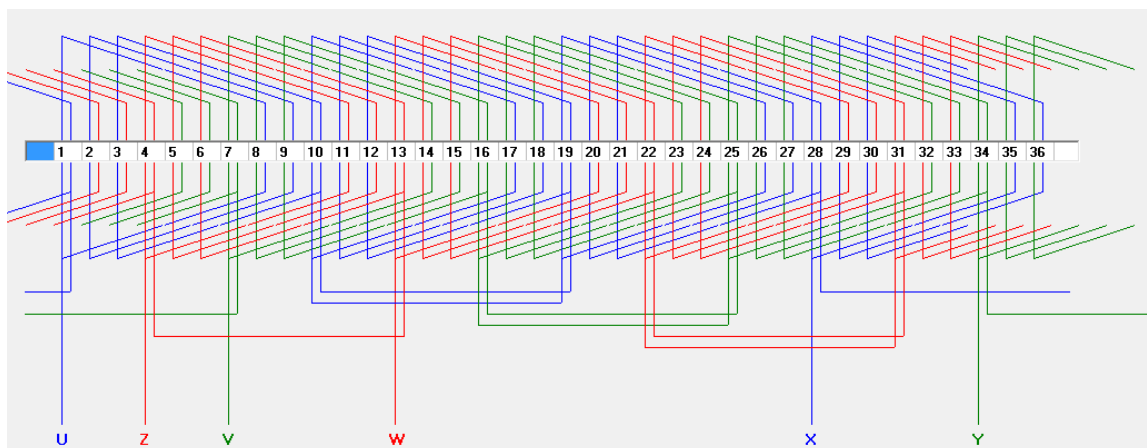
۲- مشخصات سیم پیچی استاتور

جدول پ ۱: سیم پیچی استاتور

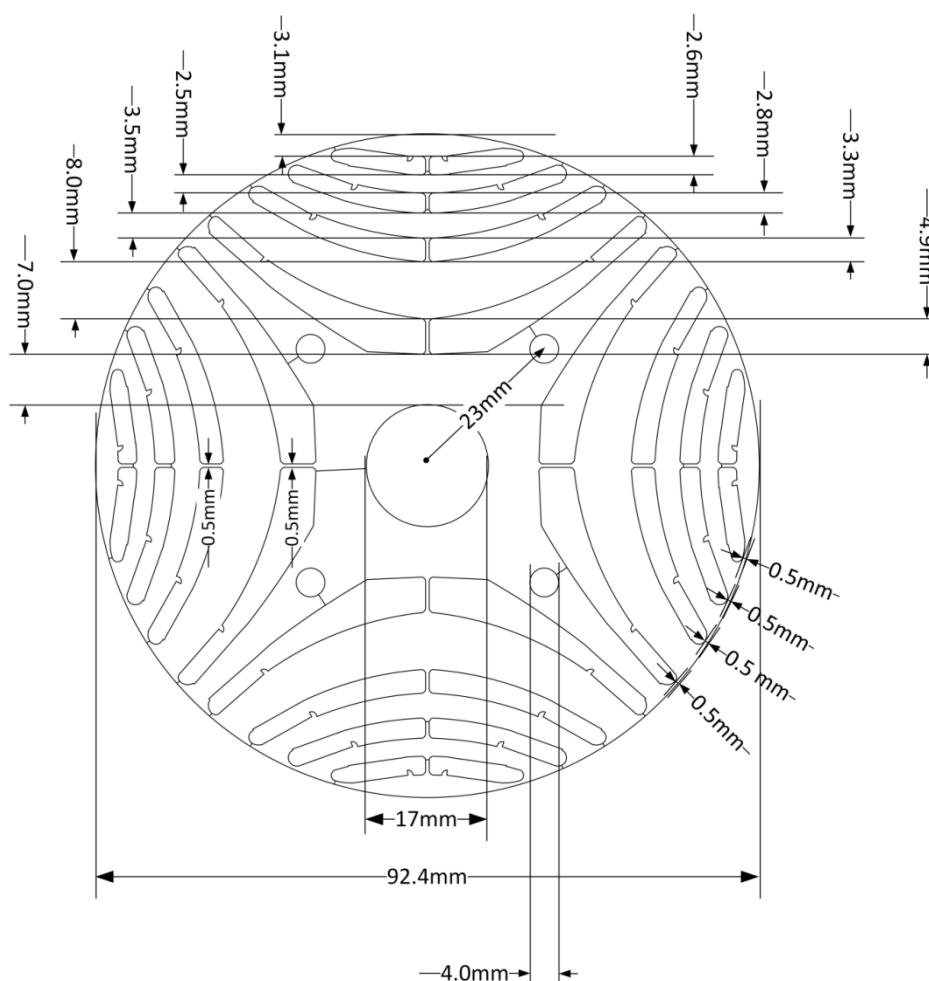
۲	تعداد لایه های سیم پیچی
۷۴	تعداد هادی در هر شیار
۳۷	تعداد هادی در هر لایه در هر شیار
۷ شیار	گام سیم پیچی
۶/۷ ۱۵۴ درجه	گام سیم پیچی
mm۰/۸۵	قطر سیم (مس)
mm۰/۹	قطر سیم با عایق



شکل پ ۱: سیم پیچی استاتور



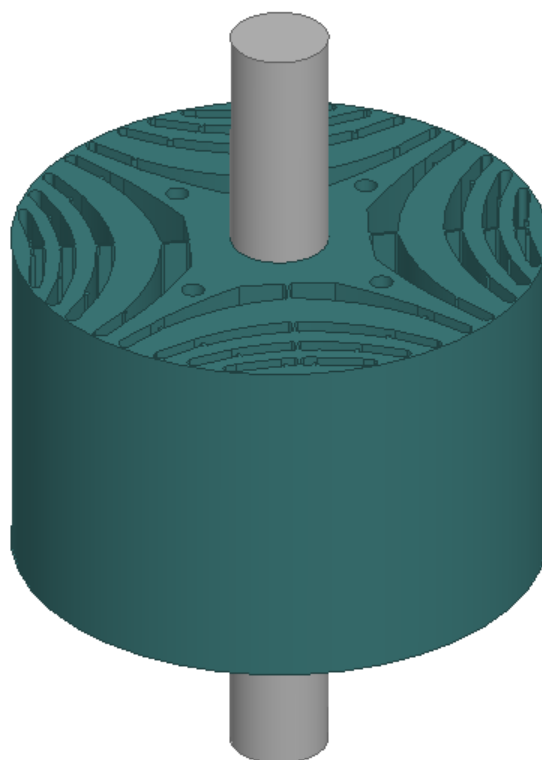
شکل پ ۲: دیاگرام گسترده سیم پیچی استاتور و اتصالها



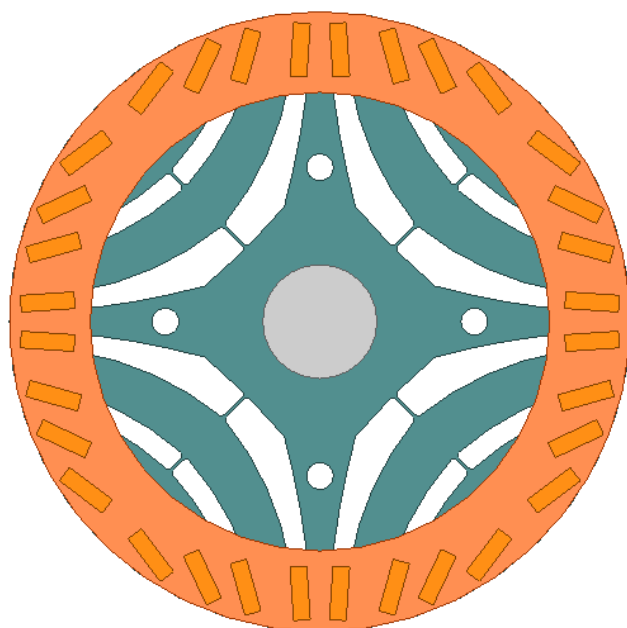
شکل پ ۳: ابعاد روتور SynRM



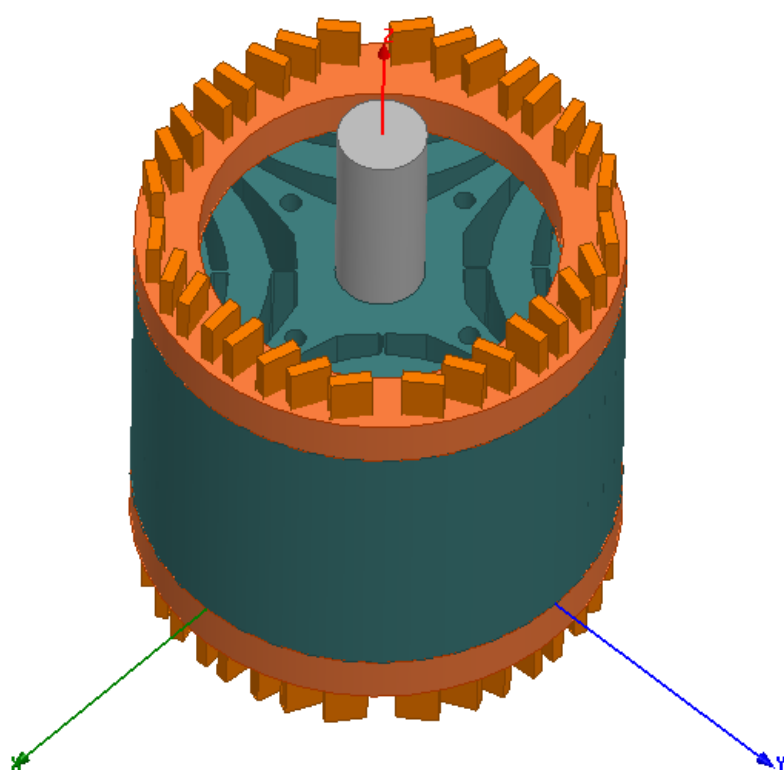
شکل پ ۴: دید از بالا روتور SynRM



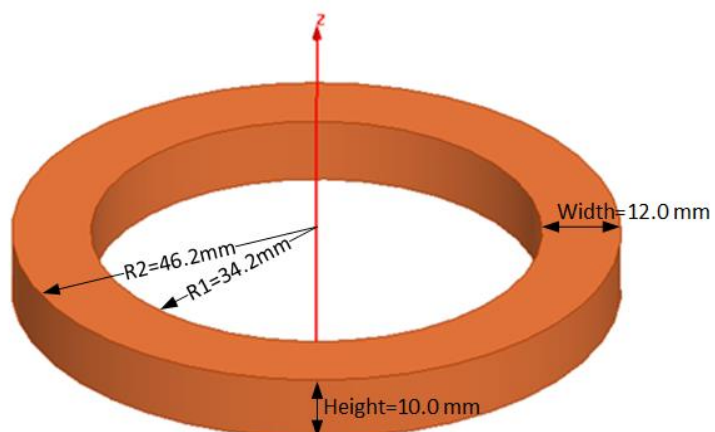
شکل پ ۵: نمای سه بعدی روتور SynRM



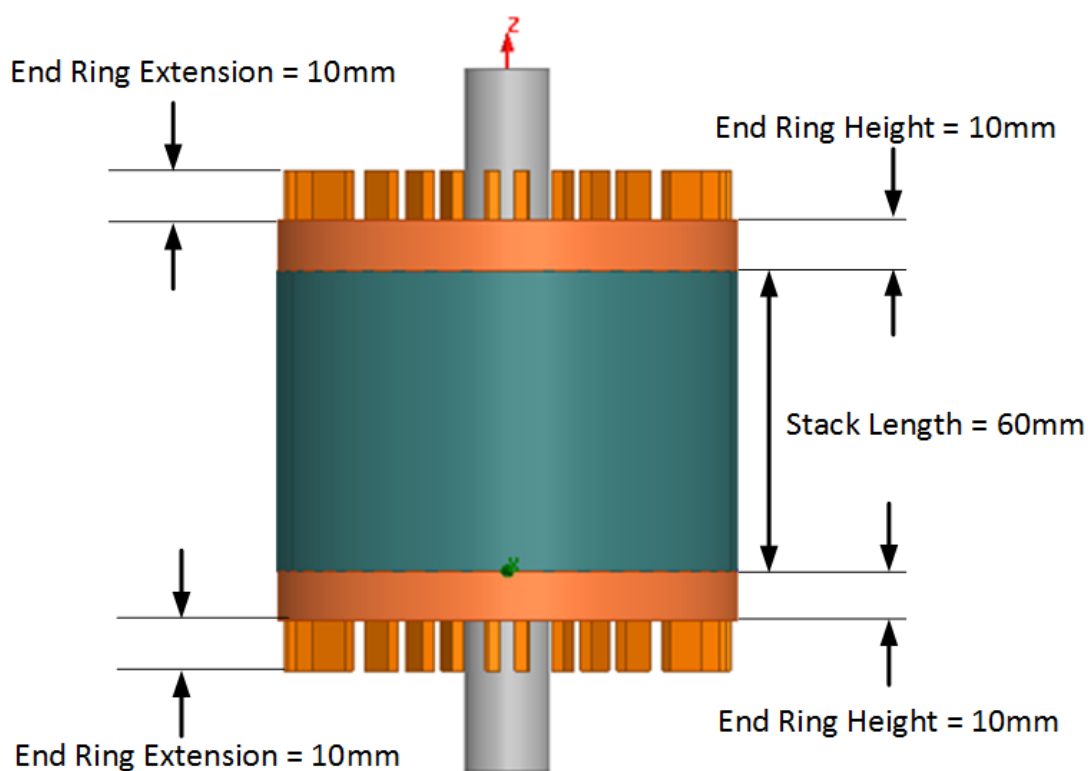
شکل پ۶: دید از بالای روتور LSSynRM با رینگ انتهایی



شکل پ۷: نمای سه بعدی روتور LSSynRM



شکل پ ۸: ابعاد رینگ انتهایی



شکل پ ۹: دید محوری روتور LSSynRM

مراجع

- [۱] A. Vagati, G. Franceschini, I. Marongiu, and G. P. Trogia, "Design criteria of high performance synchronous reluctance motors," in *Conference Record of the 1992 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 4-9 Oct. 1992 1992, pp. 66-73 vol.1 , doi: 10.1109/IAS.1992.244463 .
- [۲] R. Rajabi Moghaddam, "Synchronous reluctance machine (SynRM) in variable speed drives (VSD) applications," KTH Royal Institute of Technology, 2011 .
- [۳] A. Kersten, Y. Liu, D. Pehrman, and T. Thiringer, "Rotor Design of Line-Start Synchronous Reluctance Machine with Round Bars," *IEEE Transactions on Industry Applications*, pp. 1-1, 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2914010.
- [۴] A. Kersten, "Efficiency investigation of line start synchronous reluctance motors," MS thesis, Dept .Electr. Power Eng., Chalmers Univ. Technol., Gothenburg, Sweden, 2017 .
- [۵] J. Cros and P. Viarouge, "Synthesis of high performance PM motors with concentrated windings," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 17, no. 2, pp. 248-253, 2002, doi: 10.1109/TEC.2002.1009476.
- [۶] M. Gamba, G. Pellegrino, E. Armando, and S. Ferrari, "Synchronous reluctance motor with concentrated windings for IE4 efficiency," in *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 1-5 Oct. 2017 2017, pp. 3905-3912 ,doi: 10.1109/ECCE.2017.8096686 .
- [۷] C. M. Donaghy-Spargo, "Synchronous reluctance motors with fractional slot-concentrated windings," Newcastle University, 2016 .
- [۸] M. Gamba and P. d. T. D. energia, *Design of Non Conventional Synchronous Reluctance Machine: Doctoral Thesis*. 2017.
- [۹] A. Kersten, Y. Liu, and D. Pehrman, "Rotor design of a line-start synchronous reluctance machine with respect to induction machine for industrial applications," in *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2018: IEEE, pp. 393-399 .
- [۱۰] R. R. Moghaddam and F. Gyllensten, "Novel High-Performance SynRM Design Method: An Easy Approach for A Complicated Rotor Topology," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 9, pp. 5058-5065, 2014 ,doi: 10.1109/TIE.2013.2271601.
- [۱۱] F. Cupertino, G. Pellegrino, and C. Gerada, "Design of synchronous reluctance motors with multiobjective optimization algorithms," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 6, pp. 3617-3627, 2014.
- [۱۲] E. Howard, M. J. Kamper, and S. Gerber, "Asymmetric flux barrier and skew design optimization of reluctance synchronous machines," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 5, pp. 3751-3760, 2015.
- [۱۳] F. Cupertino, G. Pellegrino, E. Armando ,and C. Gerada, "A SyR and IPM machine design methodology assisted by optimization algorithms," in *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012: IEEE, pp. 3686-3691 .
- [۱۴] K. Agrawal, *Industrial power engineering handbook*. Elsevier, 2۰۰۱

- [۱۵] C.-T. Liu *et al.*, "Designs of a four-in-one laminated electrical steel rotor structure for application-oriented synchronous reluctance motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 4, pp. 4389-4397, 2019.
- [۱۶] S. T. Boroujeni, M. Haghparast, and N. Bianchi, "Optimization of flux barriers of line-start synchronous reluctance motors for transient-and steady-state operation," *Electric Power Components and Systems*, vol. 43, no. 5, pp. 594-606, 2015.
- [۱۷] T. Marčič, "A short review of energy-efficient line-start motor design," *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 87, no. 3, pp. 119-122, 2011.