

بِسْمِ اللَّهِ

الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

مرکز آموزش های الکترونیکی

رشته مهندسی برق گرایش قدرت

پایان نامه کارشناسی ارشد

طراحی، مدلسازی و بررسی عملکرد ماشین القایی تک فاز شار محوری به روش المان محدود

نگارنده: علی بوبه رژ

استاد راهنما:

دکتر احمد دارابی

استاد مشاور:

مهندس حامد طحانیان

شهریور ۱۳۹۵

تقديم به

همسر عزیز و مهربانم که همواره

مشوق و همراه من است.

تعهد نامه

اینجانب علی بوبه رژ دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق قدرت دانشکده مجازی دانشگاه شاهرود

نویسنده پایان نامه

"طراحی،مدلسازی و بررسی عملکرد ماشین القایی تک فاز شار محوری به روش المان محدود" تحت راهنمایی دکتر احمد دارابی

متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه شاهرود » و یا « Shahrood University » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده:

ماشین‌های شار محوری به دلیل مزایای منحصر به فرد خود در سالیان اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. از جمله این ماشین‌ها می‌توان به ماشین‌های القایی تک فاز شار محوری اشاره کرد. اخیراً قابلیت استفاده از این ماشین به عنوان جایگزین ماشین‌های استوانه‌ای القایی تک فاز و ماشین‌های یونیورسال و سایل‌خانگی، سیستم‌های تهویه و سرمایش منازل، مورد توجه صنایع وابسته می‌باشد. این رویکرد از ویژگی‌های خاص ماشین‌های شار محوری از قبیل ساختار فشرده و قابلیت تنظیم فاصله هوایی بعد از طی فرایند ساخت و هنگام مونتاژ ناشی شده است. اخیراً تعداد محدودی از شرکت‌های داخلی اقدام به واردات این نوع ماشین‌ها و یا احیاناً کپی‌سازی آنها می‌کنند. در این نوع فعالیت‌های تجاری و یا تولیدی توجه لازم به تکنولوژی بسیار قدیمی بکار رفته در نوع وارداتی این ماشین نمی‌شود. به هر حال در مواردی گزارشاتی از مشخصه‌های عملکردی نامطلوب موتورهای وارداتی و یا ساخت داخل از قبیل بازده کم و تلفات حرارتی بسیار بالا از موتورهای القایی تک فاز شار محوری همانند نوع استوانه‌ای مرسوم و یا حتی نامطلوب تر از آن، در بعضی محافل خصوصی برای بررسی امکان اصلاح طراحی ارائه می‌شود. از طرف دیگر تحقیقات انجام گرفته و یا منتشر شده در مورد ماشین‌های القایی شار محوری به ویژه نوع تک فاز آن بسیار محدود و یا نادر می‌باشد. بنابراین، ضرورت تدوین الگوریتم طراحی و ارائه روش مدلسازی به منظور تحلیل عملکرد این نوع ماشین قابل انکار نیست.

با این انگیزه در این پایان‌نامه یک موتور القایی تک فاز شار محوری، تولید شرکت نیروتهویه، که کاربرد قابل توجهی در سیستم‌های تهویه مطبوع دارد، مورد بررسی عملکردی قرار می‌گیرد. این بررسی عملکردی شامل آزمایشات، اندازه‌گیری‌ها و مدلسازی حالت دائمی و گذرا بوسیله روشهای شبیه سازی مرسوم و مدلسازی عددی به روش اجزاء محدود می‌باشد. سپس با ارائه الگوریتم طراحی سعی خواهد شد با کمترین تغییرات فیزیکی و ساختاری ممکن، موتور مجدداً مورد طراحی قرار گرفته و اصلاحات لازم انجام گیرد. به منظور تأیید صحت این فرآیند و نیز ضرورت اصلاحات احتمالی، موتور مورد مطالعه با استفاده از روش اجزاء محدود مدلسازی می‌شود و عملکرد آن بررسی می‌گردد و در فصل پایانی پیشنهاداتی جهت بهبود وضعیت موتور موجود، ارائه می‌گردد.

کلمات کلیدی: موتور القایی شار محوری تکفاز، الگوریتم طراحی، روش اجزای محدود

فهرست

فصل اول: مقدمه

- ۱-۱- تاریخچه: ۲
- ۲-۱- دسته بندی انواع موتورهای شار محور : ۳
- ۳-۱- ضرورت استفاده از موتور شار محور: ۳
- ۴-۱- دسته بندی انواع موتور شار محور: ۴
- ۱-۴-۱- ساختار با یک فاصله هوایی (یک طرفه): ۴
- ۲-۴-۱- ساختار با دو فاصله هوایی (دو طرفه): ۵
- ۳-۴-۱- ساختار با چند فاصله هوایی: ۶
- ۴-۴-۱- ساختار ترکیبی شار محور و شار شعاعی: ۶
- ۵-۱- کاربردها: ۷
- ۶-۱- نحوه ساخت موتور در کارخانه: ۸
- ۷-۱- پیشینه پژوهش های قبلی: ۹

فصل دوم: آزمایشات و اندازه گیری ها

- ۱-۲- اندازه گیری ابعاد ماشین در حال ساخت: ۱۴
- ۲-۲- آزمایشهای کلاسیک: ۱۵
- ۲-۲-۱- آزمایش DC : ۱۵
- ۲-۲-۲- آزمایش NL : ۱۶
- ۲-۲-۳- آزمایش LR : ۱۶
- ۲-۲-۴- محاسبه پارامترهای سیم پیچ اصلی: ۱۷
- ۲-۲-۵- محاسبه پارامترهای سیم پیچ کمکی: ۱۸
- ۲-۲-۶- نتایج آزمایشات در موتور مورد نظر : ۱۹
- ۲-۳- اندازه گیری با دینامومتر: ۱۹
- ۲-۴- آزمایشهای جدید: ۲۰

۲۰	۱-۴-۲-روش تحلیل جریان استاتور:
۲۱	۲-۴-۲-آزمایش اِپشتاین اصلاح شده:
۲۳	۳-۴-۲-نحوه اندازه گیری و فرمول های ممان اینرسی:
	فصل سوم: طراحی
۲۶	۱-۳-الگوریتم طراحی:
۲۷	۲-۳-مشخصات موتور مورد مطالعه:
۲۷	۳-۳-فرضیات :
۲۸	۱-۳-۳-ضریب بارگذاری الکتریکی ویژه:
۲۸	۲-۳-۳-ضریب بارگذاری مغناطیسی ویژه:
۲۸	۳-۳-۳-عدد طلایی(لاندا):
۲۹	۴-۳-محاسبات ابعادی استاتور:
۳۲	۱-۴-۳-طول فاصله هوایی:
۳۲	۲-۴-۳-محاسبات سیم پیچی اصلی و کمکی:
۳۳	۳-۴-۳-طراحی سیم پیچی:
۳۵	۴-۴-۳-محاسبه تعداد دور سیم پیچ اصلی:
۳۷	۵-۴-۳-محاسبه تعداد دور هر کلاف از گروه کلاف ها:
۳۷	۶-۴-۳-محاسبه طول سیم مصرفی:
۳۸	۷-۴-۳-محاسبه قطر سیم مصرفی در سیم پیچ اصلی:
۳۸	۸-۴-۳-محاسبه تعداد دور سیم پیچ کمکی:
۳۷	۹-۴-۳-محاسبه تعداد دور هر کلاف از گروه کلاف ها:
۳۸	۱۰-۴-۳-محاسبه قطر سیم مصرفی در سیم پیچ کمکی:
۳۸	۵-۳-محاسبات ابعادی روتور:
۴۰	۶-۳-محاسبات آمپر دور و ضریب اشباع:
۴۱	۱-۶-۳-یافتن آمپر دور فاصله هوایی:
۴۲	۲-۶-۳-یافتن آمپر دور دندانه استاتور:

۴۲	۳-۶-۳- یافتن آمپر دور دندان روتور:
۴۳	۳-۶-۴- یافتن آمپر دور یوغ استاتور:
۴۳	۳-۶-۵- یافتن آمپر دور یوغ روتور:
۴۳	۳-۶-۶- محاسبه ضریب اشباع:
۴۴	۳-۷-۷- محاسبه پارامترهای مدار معادل پیشنهادی:
۴۴	۳-۷-۱- محاسبه مقاومت سیم پیچ اصلی:
۴۴	۳-۷-۲- محاسبه مقاومت سیم پیچ کمکی:
۴۵	۳-۷-۳- محاسبه مقاومت اهمی و تلفات روتور:
۴۵	۳-۸-۸- محاسبه راکتانس ها:
۴۵	۳-۸-۱- راکتانس نشتی شیار (Xss):
۴۶	۳-۸-۲- راکتانس زیگزاگ (Xzz):
۴۶	۳-۸-۳- راکتانس کله سیم ها (Xe):
۴۶	۳-۸-۴- راکتانس نشتی کمربندی (Xbelt):
۴۷	۳-۸-۵- راکتانس کج شدگی (Xskew):
۴۷	۳-۸-۶- راکتانس نشتی کل از دید سیم پیچ اصلی:
۴۷	۳-۸-۸- راکتانس مغناطیس کننده (Xm):
۴۷	۳-۹- محاسبات وزنی:
۴۸	۳-۱۰- محاسبه خازن:
۴۹	۳-۱۱- پارامترهای مهم محاسبه شده:
۵۰	۳-۱۲- مدار معادل پیشنهادی تحلیل عملکرد موتور:
۵۰	۳-۱۲-۱- مدار معادل سیم پیچ کمکی و اصلی:
۵۲	۳-۱۳- محاسبات عملکردی (جریان، گشتاور، کسینوس فی و راندمان):
۵۳	۳-۱۳-۱- نمودارهای ترسیم شده:
فصل چهارم: تحلیل به روش اجزای محدود	
۵۶	۴-۱- مبانی روش اجزای محدود:

۵۶.....	۱-۱-۴-انواع روشهای اجزای محدود:
۵۷	۲-۱-۴-شرایط مرزی:
۵۷	۳-۱-۴-روشهای حل :
۵۸	۴-۱-۴-پس پردازش:
۵۸	۲-۴-شبیه سازی با نرم افزار JMAG:
۶۰	۱-۲-۴-تنظیم استپ های زمانی:
۶۰	۲-۲-۴-شرایط مرزی:
۶۱	۳-۲-۴-مش بندی:
۶۱	۴-۲-۴-مدار بندی:
۶۲.....	۵-۲-۴-نحوه اعمال بار:
۶۲.....	۶-۲-۴-نمودارهای خروجی در حالت سرعت ثابت:
۶۴.....	۷-۲-۴-نمودارهای خروجی در حالت اعمال بار:
۶۶.....	۳-۴-بدست آوردن مدار معادل با روش اجزای محدود:

فصل پنجم: شبیه سازی مدل عملکردی

۷۲.....	۱-۵-معادلات مدل DQ موتور شار محور تکفاز خازن دائم:
۷۵	۲-۵-شبیه سازی با نرم افزار سیمولینک متلب:
۸۰	۳-۵-شبیه سازی با مدل آماده متلب :

فصل ششم: بهینه سازی، نتیجه گیری و پیشنهادات

۸۲.....	۱-۶-تاثیر تغییر طول فاصله هوایی:
۸۳	۲-۶-تاثیر تغییر اندازه یوغ:
۸۴.....	۳-۶-تاثیر تغییر طول دندانه ها:
۸۵	۴-۶-تاثیر پهنا و ارتفاع شیار:
۸۵	۵-۶-تاثیر پوشاننده روتور:
۸۶.....	۶-۶-راه های بهبود راندمان:
۸۸	۷-۶-راههای بهبود گشتاور:
۹۱	۹-۶-بهینه سازی:

۶-۱۰- نتیجه گیری: ۹۳

۶-۱۱- پیشنهادات برای ادامه کار در آینده: ۹۴

منابع

منابع مورد استفاده: ۹۶

فهرست شکل ها:

۲	شکل ۱-۱: ماشین شارمحور
۲	شکل ۲-۱: ماشین شار شعاعی
۴	شکل ۳-۱: تفاوت موتور شار محور و شار شعاعی از لحاظ تلفات و راندمان و ابعاد
۴	شکل ۴-۱: ساختار موتور شار محور با یک فاصله هوایی
۵	شکل ۵-۱: ساختار شبه یا تاقان موتور شار محور
۵	شکل ۶-۱: ساختار موتور شار محور با دو فاصله هوایی
۶	شکل ۷-۱: ساختار موتور شار محور با چند فاصله هوایی
۷	شکل ۸-۱: موتور ترکیبی شار محوری و شار شعاعی
۷	شکل ۹-۱: سیم پیچی تک لایه و گرامه در موتور شار محور
۸	شکل ۱۰-۱: موتور شار محور بدون هسته
۱۵	شکل ۱-۲: مدار معادل سیم پیچ کمکی
۱۵	شکل ۲-۲: مدار معادل سیم پیچ اصلی
۱۶	شکل ۳-۲: مدار معادل سیم پیچ اصلی در آزمایش بی باری
۱۷	شکل ۴-۲: مدار معادل سیم پیچ اصلی در آزمایش روتور قفل شده
۱۷	شکل ۵-۲: نحوه بستن مدار آزمایش بی باری و روتور قفل شده
۲۰	شکل ۶-۲: دینامومتر مورد استفاده
۲۰	شکل ۷-۲: نمونه خروجی دینامومتر
۲۱	شکل ۸-۲: شکل روش تحلیل جریان استاتور روی سیم پیچ کمکی
۲۱	شکل ۹-۲: شکل روش تحلیل جریان استاتور روی سیم پیچ اصلی
۲۲	شکل ۱۰-۲: نحوه اجرای آزمایش اپشتاین
۲۲	شکل ۱۱-۲: شکل مدار آزمایش اپشتاین
۲۴	شکل ۱۲-۲: نحوه آزمایش سقوط وزنه و سیستم قرقره
۲۶	شکل ۱-۳: الگوریتم طراحی استفاده شده برای موتور تکفاز خازن دایم شار محور
۳۰	شکل ۲-۳: نمودار ماکزیمم چگالی شار بر حسب قطر متوسط موتور برای زوج قطب های مختلف
۳۲	شکل ۳-۳: ابعاد قسمتهای مختلف استاتور
۳۴	شکل ۴-۳: نقشه سیم پیچی موتور تکفاز ۳۶ شیاره ۶ قطب شار محور با سیم پیچی متحدالمرکز
۳۶	شکل ۵-۳: نمودار اندازه قسمت های مختلف یک کلاف موتور
۳۹	شکل ۶-۳: ابعاد قسمت های مختلف روتور
۴۲	شکل ۷-۳: منحنی B-H هسته از جنس فولاد M470
۵۰	شکل ۸-۳: مدار معادل سیم پیچ کمکی
۵۰	شکل ۹-۳: مدار معادل سیم پیچ اصلی
۵۰	شکل ۱۰-۳: مدار معادل کلی موتور تکفاز با خازن
۵۱	شکل ۱۱-۳: مدار معادل کلی موتور تکفاز با خازن
۵۳	شکل ۱۲-۳: نمودار گشتاور-سرعت موتور مورد نظر
۵۳	شکل ۱۳-۳: نمودار راندمان-سرعت موتور مورد نظر

- شکل ۳-۱۴: نمودار جریان-سرعت موتور مورد نظر ۵۳
- شکل ۳-۱۵: نمودار ضریب توان-سرعت موتور مورد نظر ۵۴
- شکل ۳-۱۶: نمودار جریان سیم پیچ اصلی و کمکی بر حسب سرعت موتور مورد نظر ۵۴
- شکل ۳-۱۷: نمودار زوایای جریان سیم پیچ اصلی و کمکی بر حسب سرعت موتور مورد نظر ۵۴
- شکل ۴-۱: مش بندی مدل دو بعدی رسم شده ۵۹
- شکل ۴-۲: نمودار رنگی چگالی شار مدل دوبعدی رسم شده ۵۹
- شکل ۴-۳: مدل دو بعدی دایره ای ترسیم شده ۶۰
- شکل ۴-۴: مدار بندی تکفاز روتور و استاتور ۶۲
- شکل ۴-۵: نمودار جریان های سیم پیچ اصلی و کمکی بر حسب زمان در حالت سرعت ثابت ۶۲
- شکل ۴-۶: نمودار نیرو در راستای محور X بر حسب زمان در حالت سرعت ثابت ۶۳
- شکل ۴-۷: نمودار نیرو در راستای محور Y بر حسب زمان در حالت سرعت ثابت ۶۳
- شکل ۴-۸: نمودار جریان های سیم پیچ اصلی و کمکی بر حسب زمان در حالت اعمال بار ۶۴
- شکل ۴-۹: نمودار گشتاور بر حسب زمان در حالت اعمال بار ۶۵
- شکل ۴-۱۰: نمودار سرعت بر حسب زمان در حالت اعمال بار ۶۵
- شکل ۴-۱۱: نمودار گشتاور سرعت مدل اجزای محدود موتور مورد نظر ۶۶
- شکل ۴-۱۲: شکل ۴-۱۳: نمودار چگالی شار در طول یک جفت قطب (۱۲۰ درجه مکانیکی) در فاصله هوایی موتور مورد نظر ۶۶
- شکل ۴-۱۳: نمودارهای حاصل از تحلیل فرکانسی حالت روتور قفل شده موتور مورد نظر ۶۷
- شکل ۴-۱۴: مقایسه پارامترهای مدار معادل بین مقادیر واقعی و نتایج الگوریتم طراحی و آزمایش های معمول ۶۹
- شکل ۵-۱: مدل مداری ایده آل ماشین القایی تکفاز ۷۲
- شکل ۵-۲: مدار معادل dq ماشین القایی تکفاز خازن دائم ۷۲
- شکل ۵-۳: ورودی و خروجی و متغیرهای حالت انتخابی در شبیه سازی ۷۵
- شکل ۵-۴: شبیه سازی موتور شار محور با خازن دائم کار بوسیله سیمولینک متلب ۷۵
- شکل ۵-۵: ساختار داخلی ساب سیستم اصلی ۷۶
- شکل ۵-۶: ساختار داخلی ساب سیستم i to F to v ۷۶
- شکل ۵-۷: ساختار داخلی ساب سیستم TL ۷۷
- شکل ۵-۸: ساختار داخلی ساب سیستم ROTOR ۷۷
- شکل ۵-۹: خروجی سرعت بر حسب زمان ۷۸
- شکل ۵-۱۰: خروجی گشتاور بر حسب زمان ۷۸
- شکل ۵-۱۱: خروجی گشتاور بر حسب سرعت ۷۸
- شکل ۵-۱۲: جریان سیم پیچ کمکی بر حسب زمان ۷۹
- شکل ۵-۱۳: جریان سیم پیچ اصلی بر حسب زمان ۷۹
- شکل ۵-۱۴: جریان کل ورودی به موتور بر حسب زمان ۷۹
- شکل ۵-۱۵: نمودار زمان استارت موتور بر حسب گشتاور بار اعمالی اولیه به موتور ۸۰
- شکل ۵-۱۶: شبیه سازی موتور تکفاز خازن دائم به وسیله مدل آماده سیمولینک متلب ۸۰
- شکل ۵-۱۷: خروجی گشتاور سرعت مدل آماده سیمولینک متلب برای موتور مورد نظر ۸۰

- ۸۳ شکل ۶-۱: نمودار تغییر راندمان و ضریب قدرت بر حسب تغییر فاصله هوایی
- ۸۳ شکل ۶-۲: نمودار تغییر تلفات روتور بر حسب تغییر فاصله هوایی
- ۸۴ شکل ۶-۳: نمودار تغییر چگالی شار یوغ بر حسب تغییر ضخامت یوغ از ۲۰ میلیمتر (شکل a) به ۳۰ میلیمتر (شکل b)
- ۸۴ شکل ۶-۴: نمودار تغییر چگالی شار دندانه بر حسب تغییر طول دندانه از ۲۰ میلیمتر (شکل a) به ۱۵ میلیمتر (شکل b)
- ۸۵ شکل ۶-۵: پوشانده زیری و رویی برای روتور موتور شار محوری
- ۸۶ شکل ۶-۶: مشخصات الکتریکی و مغناطیسی و فیزیکی ماده magnoval 2067
- ۸۷ شکل ۶-۷: نحوه سیم پیچی متحدالمرکز بدون تغییر طبقه ی موتور تکفاز شار محور ، در شرکت نیرو تهویه
- ۸۷ شکل ۶-۸: کاسه موتور (stator housing) موتور شار محور
- ۸۹ شکل ۶-۹: تغییر مقدار خازن به روش کلید زنی برای داشتن بهترین شرایط گشتاور
- ۹۰ شکل ۶-۱۰: نمودار گشتاور سرعت با سه روش طراحی حالت دائم ، اجزای محدود و مدلسازی با متلب
- ۹۰ شکل ۶-۱۱: نمودار جریان سیم پیچ اصلی بر حسب سرعت با سه روش طراحی حالت دائم ، اجزای محدود و مدلسازی با متلب
- ۹۱ شکل ۶-۱۲: نمودار جریان سیم پیچ کمکی بر حسب سرعت با سه روش طراحی حالت دائم ، اجزای محدود و مدلسازی با متلب
- ۹۲ شکل ۶-۱۳: نمودار ستونی مقایسه جریان های مختلف موتور در دو حالت طول استاتور ۵۰ و ۴۵ میلی متر
- ۹۳ شکل ۶-۱۴: نمودار ستونی مقایسه جریان های مختلف موتور در سه حالت تعداد دور سیم پیچی ها
- ۹۳ شکل ۶-۱۵: نمودار ستونی مقایسه گشتاورهای استارت و بی باری موتور در سه حالت تعداد دور سیم پیچی ها
- ۹۴ شکل ۶-۱۶: مقایسه بین ابعاد موتور با تکنولوژی معمول و ابر هادیها

فهرست جداول:

- ۱۴ جدول ۱-۲: ابعاد موتور ۶ قطب ۶۵۰ وات شرکت نیرو تهویه
- ۱۹ جدول ۲-۲: نتایج آزمایشات بی باری ، روتور قفل شده و دی سی روی موتور مورد نظر
- ۴۹ جدول ۳-۱: پارامترهای مهم موتور مورد نظر
- ۵۲ جدول ۳-۲: جدول محاسبه پارامترهای عملکرد موتور
- ۸۸ جدول ۶-۱: مشخصه فولادهای مغناطیسی پر کاربرد در صنعت تولید الکتروموتور
- ۸۹ جدول ۶-۲: نتایج حاصل از مدل سیمولینک متلب
- ۹۰ جدول ۶-۳: نتایج حاصل از مدل اجزای محدود دو بعدی
- ۹۱ جدول ۶-۴: مقایسه پارامترهای مختلف موتور در دو حالت طول استاتور ۵۰ و ۴۵ میلی متر
- ۹۲ جدول ۶-۵: مقایسه پارامترهای مختلف موتور در سه حالت تعداد دور سیم پیچی

فهرست علائم:

λ	نسبت قطر خارجی به قطر داخلی	AT_{cr}	آمپر دور یوغ روتور
ϕ_p	شار زیر هر قطب	AT_{cs}	آمپر دور یوغ استاتور
τ_p	گام قطبی	A_{ts}	سطح مقطع دندانه استاتور
γ	زاویه الکتریکی بین دو شیار	AT_{tr}	آمپر دور دندانه روتور
ΔV	افت ولتاژ	AT_{ts}	آمپر دور دندانه استاتور
η	بازده	b_{10}	عرض شیار استاتور
α_{skew}	زاویه کج شدگی شیار روتور	b_{12}	عرض شیار استاتور
μ_0	ضریب نفوذ مغناطیسی هوا	b_{20}	دهانه شیار روتور
ρ	چگالی	b_{22}	عرض شیار روتور
ρ	چگالی بار حجمی	B_{av}	چگالی شار متوسط فاصله هوایی (ضریب بار گذاری مغناطیسی)
ρ	مقاومت ویژه	B_c	چگالی شار هسته
ρ_{AL}	وزن مخصوص آلومینیوم	B_{cs}	چگالی شار ماکزیمم یوغ استاتور
ρ_{cu}	وزن مخصوص مس	B_g	چگالی شار فاصله هوایی
α	ضریب حرارتی ویژه	B_{gmax}	چگالی شار ماکزیمم فاصله هوایی
Δt	تغییرات دما	B_{max}	چگالی شار ماکزیمم فاصله هوایی
ϕ	شار (فوران)	b_{ti}	پهنای دندانه داخلی
ω_b	سرعت زاویه ای مبنا	B_{tmax}	چگالی شار ماکزیمم دندانه
ω_r	سرعت زاویه ای روتور	b_{to}	پهنای دندانه خارجی
ω_s	سرعت زاویه ای سنکرون	b_{tor}	پهنای دندانه خارجی روتور
λ_{qs}	شار دور محور q استاتور	b_{tos}	پهنای دندانه خارجی استاتور
λ'_{ds}	شار دور محور d استاتور	B_{tr}	چگالی شار ماکزیمم دندانه روتور
λ'_{qr}	شار دور محور q روتور	B_{ts}	چگالی شار ماکزیمم دندانه استاتور
λ'_{dr}	شار دور محور d روتور	c	ظرفیت خازن
θ_r	زاویه جابجایی بین روتور و استاتور	$C\chi$	ضریب تصحیح راکتانس نشتی
ψ	شار دور پیوندی	D	قطر
β	نسبت طول قطب به گام قطبی	D	چگالی میدان الکتریکی
A	ضریب بار گذاری ویژه الکتریکی	d_a	قطر سیم سیم پیچ کمکی
A	پتانسیل برداری	D_{avg}	قطر متوسط
a	نسبت تبدیل اسکالر	$dc1$	عمق یوغ استاتور

A_{ag}	سطح مقطع یک قطب فاصله هوایی	$dc2$	عمق یوغ روتور
A_b	سطح مقطع میله روتور	D_g	قطر فاصله هوایی
A_{cr}	سطح مقطع یوغ روتور	D_i	قطر داخلی استاتور
A_{cs}	سطح مقطع یوغ استاتور	d_m	قطر سیم سیم پیچ اصلی
AT_{ag}	آمبر دور فاصله هوایی	D_{min}	میانگین قطر داخلی روتور
D_{mout}	میانگین قطر خارجی روتور	k_i	ضریب تورق
D_o	قطر خارجی استاتور	K_p	ضریب کوتاهی گام
E	شدت میدان الکتریکی	K_w	ضریب سیم پیچی
f	فرکانس	K_{wa}	ضریب سیم پیچی سیم پیچ کمکی
$FIPP$	شار زیر هر قطب	K_{wm}	ضریب سیم پیچی سیم پیچ اصلی
g	طول فاصله هوایی	K_x	ضریب راکتانس ناشی شیار
G_{ir}	گام دندان داخلی روتور	K_{zz}	ضریب راکتانس زیگزآگ
G_{or}	گام دندان خارجی روتور	L'_{lds}	اندوکتانس ناشی محور d استاتور
H	شدت میدان مغناطیسی	L'_{lr}	اندوکتانس ناشی محور d روتور
h_{10}	عمق دندان استاتور	L_1	طول کل استاتور
h_{11}	عمق گوه استاتور	L_2	طول کل روتور
h_{12}	عمق شیار استاتور	L_{at}	طول کل سیم یک کلاف سیم پیچ کمکی
h_{22}	عمق شیار روتور	L_b	طول واقعی میله روتور
i'_{dr}	جریان محور d روتور	l_{ei}	اندازه قسمت انتهایی داخلی کلاف
i'_{ds}	جریان محور d استاتور	l_{eo}	اندازه قسمت انتهایی خارجی کلاف
i'_{qr}	جریان محور q روتور	l_{equ}	طول متوسط
I'_r	جریان میله روتور منتقل شده	L_g	فاصله هوایی موثر
I_a	جریان سیم پیچ کمکی	L_{lqs}	اندوکتانس ناشی محور q استاتور
I_{end}	جریان حلقه انتهایی روتور	L_{mq}	اندوکتانس مغناطیس کننده محور q
I_L	جریان خط ورودی به موتور	L_{mt}	طول کل سیم یک کلاف سیم پیچ اصلی
I_{mb}	جریان معادل بک وارد موتور تکفاز	m	تعداد فاز
I_{mf}	جریان معادل فور وارد موتور تکفاز	N_a	تعداد کل هادی های سیم پیچ کمکی
I_{ph}	جریان فاز	n_{aux}	تعداد گروه کلاف سیم پیچ کمکی
i_{qs}	جریان محور q استاتور	N_b	تعداد میله روتور

I_r	جریان میله های روتور	N_{ds}	تعداد دور سیم پیچ کمکی (محور d)
J	چگالی جریان	N_m	تعداد کل هادی های سیم پیچ اصلی
J_r	چگالی جریان روتور	n_{main}	تعداد گروه کلاف سیم پیچ اصلی
J_s	چگالی جریان استاتور	N_{qs}	تعداد دور سیم پیچ اصلی (محور q)
K_{ag}	ضریب راکتانس کمربندی	n_s	سرعت سنکرون
K_c	ضریب کارتر	P	تعداد قطب
K_{cr}	ضریب کارتر روتور	P_{cum}	تلفات مسی سیم پیچ اصلی
K_{cs}	ضریب کارتر استاتور	P_{cur}	تلفات ژولی روتور
K_{cu}	ضریب پیرشوندگی مس	P_{in}	توان ورودی
K_D	نسبت قطر خارجی به قطر داخلی	P_{mech}	تلفات مکانیکی
K_d	ضریب توزیع سیم پیچی	P_{out}	توان خروجی
P_{rot}	تلفات گردشی	v'_{qr}	ولتاژ محور q روتور
q	تعداد شیار بر قطب بر فاز	V_1	ولتاژ ورودی اصلی
q_{aux}	تعداد شیار بر قطب بر فاز سیم پیچ کمکی	V_a	ولتاژ سیم پیچ کمکی
q_{main}	تعداد شیار بر قطب بر فاز سیم پیچ اصلی	V_m	ولتاژ سیم پیچ اصلی
r'_{ds}	مقاومت محور d استاتور	V_{mb}	ولتاژ معادل یک وارد سیم پیچ اصلی
r'_r	مقاومت روتور منتقل شده	V_{mf}	ولتاژ معادل فور وارد سیم پیچ اصلی
R_b	مقاومت یک وارد موتور تکفاز	v_{qs}	ولتاژ محور q استاتور
R_f	مقاومت فور وارد موتور تکفاز	V_s	ولتاژ تغذیه
r_{qs}	مقاومت محور q استاتور	W_{AL}	جرم آلومینیوم
R_{ra}	مقاومت روتور از دید سیم پیچ کمکی	W_{cu}	جرم مس
R_{rm}	مقاومت روتور از دید سیم پیچ اصلی	w_{cui}	اندازه لبه داخلی کلاف
R_{sa}	مقاومت سیم پیچ کمکی	w_{cuo}	اندازه لبه خارجی کلاف
R_{sm}	مقاومت سیم پیچ اصلی	X_b	راکتانس یک وارد معادل
S	لغزش	X_{belt}	راکتانس کمربندی
S_a	سطح مقطع سیم پیچ کمکی	X_c	راکتانس خازن
$sat.f$	ضریب اشباع	X_e	راکتانس کله سیم
S_b	لغزش یک وارد	X_f	راکتانس فور وارد معادل
S_{cage}	مساحت کلی قفس روتور	X_{lm}	راکتانس نشستی کل از دید سیم پیچ اصلی
S_{end}	مساحت حلقه انتهایی روتور	X_m	راکتانس مغناطیس کننده
S_f	لغزش فور وارد	X_{md}	راکتانس مغناطیس کننده محور d
S_{fl}	لغزش بار کامل	X_{mq}	راکتانس مغناطیس کننده محور q
S_m	سطح مقطع سیم پیچ اصلی	X_{sa}	راکتانس نشستی کل از دید سیم پیچی

S_{nl}	لغزش بی باری	X_{skew}	راکتانس کج شدگی
S_r	تعداد شیار روتور	X_{ss}	راکتانس نشتی شیار
S_s	تعداد شیار استاتور	X_{zz}	راکتانس زیگزآگ
T_0	گشتاور اولیه	y_p	گام قطبی
T_a	تعداد دور سیم پیچی کمکی	y_{zmain}	گام کلاف سیم پیچ اصلی
T_{damp}	گشتاور میراکننده	Z_{12}	امپدانس معادل میانی مدار معادل موتور تکفاز
T_e	گشتاور الکترومغناطیسی	Z_{1a}	امپدانس سیم پیچ کمکی
T_L	گشتاور بار	Z_{1m}	امپدانس سیم پیچ اصلی
T_m	تعداد دور سیم پیچی اصلی	Z_{aux}	تعداد شیار مربوط به سیم پیچ کمکی
T_n	گشتاور نامی	Z_b	امپدانس بک وارد
T_{pc}	تعداد دور بر کلاف سیم پیچ اصلی	Z_f	امپدانس فوروارد
T_{pca}	تعداد دور بر کلاف سیم پیچ کمکی	Z_{main}	تعداد شیار مربوط به سیم پیچ اصلی
T_{ph}	تعداد دور فاز		
T_{pp}	تعداد دور بر قطب		
t_r	اندازه دندانه روتور		
t_s	اندازه دندانه استاتور		
v'_{dr}	ولتاژ محور d روتور		
v'_{ds}	ولتاژ محور d استاتور		

فصل

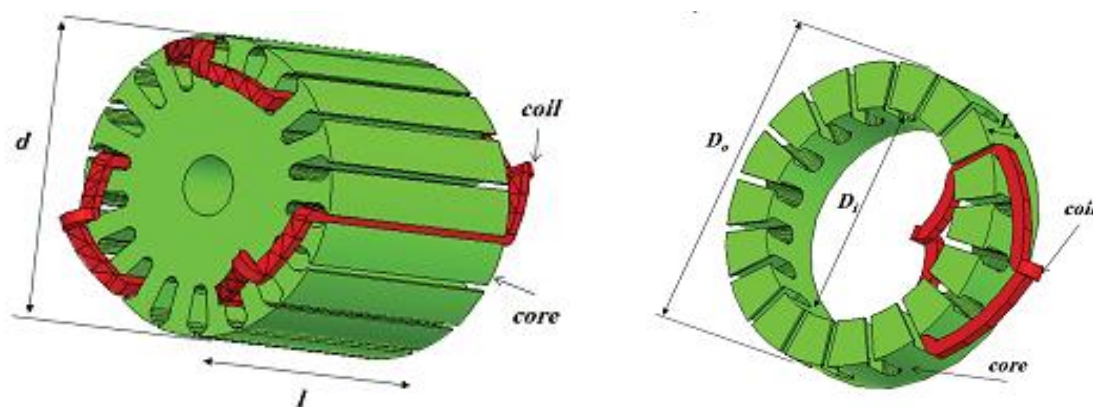
اول

۱-۱- تاریخچه:

ماشین های شار محور (AFMs)^۱ یا دیسکی در سال ۱۸۲۱ توسط فاراده اختراع شد و به تدریج با اختراع ماشین های شار شعاعی (RFMs)^۲ در سال ۱۸۳۷ توسط داون پورت^۳، کاربرد ماشین های شار محوری کاهش یافت. [1,6] و ماشین های شار شعاعی به عنوان ماشین های اصلی مورد استفاده در صنعت، شناخته شدند. کاربرد اکثر این ماشین ها بیشتر به صورت موتوری است. در دهه های اخیر به دلیل گشتاور بالا در سرعت کم و همچنین چگالی توان بالا و بازده بالاتر نسبت به موتورهای شار شعاعی، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته اند. [13]

به طور کلی در ماشین های شار شعاعی، شار فاصله هوایی در راستای شعاعی و عمود بر محور و همچنین هادی ها، محوری قرار گرفته اند، اما در ماشین های شار محوری، شار فاصله هوایی در راستای محور و هادیها به صورت شعاعی، قرار می گیرند.

علت اصلی عدم تولید انبوه موتورهای شار محور، مشکلات تولید هسته استاتور، هزینه زیاد و همچنین نیروی کشش مغناطیسی بین روتور و استاتور بود که نیاز به یک بلبرینگ قوی و یا ساختارهای هزینه بر را ایجاد می نماید.



شکل ۱-۲: ماشین شار شعاعی

شکل ۱-۱: ماشین شار محور

¹ Axial flux machine

² Radial flux machine

³ Davenport

۱-۲- دسته بندی انواع موتورهای شار محور:

این موتورها می توانند در انواع القایی، براشلس دی سی (BLDC)، هیستریزس، سویچ رلوکتانس (SR) یا مغناطیس دائم (PM) ساخته می شوند. موتورهای القایی می توانند به صورت تکفاز و سه فاز ساخته شوند. موتور مورد بحث در این پروژه، از نوع تکفاز با خازن دائم کار می باشد که در فصول بعدی به طور مفصل بحث خواهد شد.

۱-۳- ضرورت استفاده از موتور شار محور:

بر اساس تئوری پلارد^۴ در توان یکسان، موتور شار محور نسبت به موتور شار شعاعی ۲۱/۵ تا ۳۲/۵ درصد آهن کمتر و ۱۳ تا ۱۴ درصد مس کمتر نیاز دارد. [4]

از مزایای موتور شار محوری می توان به موارد زیر اشاره کرد [13]:

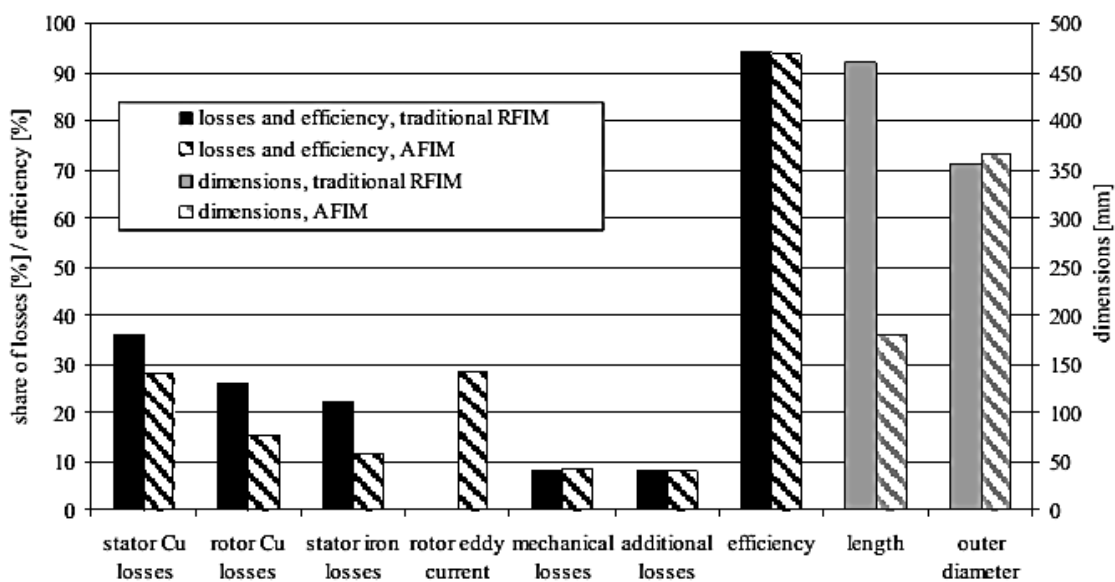
موتوری با ساختار فشرده، چگالی توان حجمی و جرمی بالا ($W/L, W/Kg$)، بدنه کوتاه (نسبت D/L بیشتر)، بازده بالا، ساختار مستحکم تر نسبت به انواع سیلندری شکل، ساخت آسان تر، امکان ساخت ماشین های با قطب زیاد را فراهم می آورد و استفاده در محدوده وسیع سرعت.

همچنین به دلیل ساختار این موتورها، خنک سازی بهتر صورت می گیرد و امکان بزرگتر در نظر گرفتن بار گذاری الکتریکی و مغناطیسی ویژه وجود دارد. در ضمن امکان اتصال بدون جعبه دنده به بار باعث افزایش بازده و کاهش فضا می گردد.

همچنین این نوع موتورها در مقابل عدم بالانس (نا هم محوری)، مقاوم تر از موتورهای شار شعاعی می باشند.

تفاوت دو موتور القایی مشابه شار محوری و شار شعاعی، از لحاظ تلفات و راندمان و ابعاد در شکل زیر نمایش داده شده است. [2]

⁴ Polard

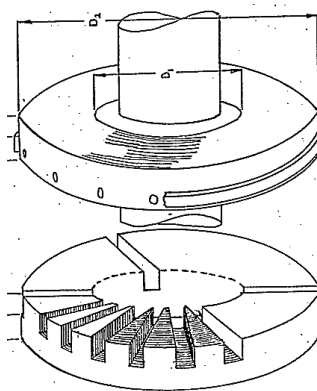


شکل ۱-۳: تفاوت موتور شار محور و شار شعاعی از لحاظ تلفات و راندمان و ابعاد
با توجه به مزایای ذکر شده، ضرورت استفاده از این موتورها در بسیاری از کاربردها احساس می گردد.

۴-۱- دسته بندی انواع موتور شار محور:

۱-۴-۱- ساختار با یک فاصله هوایی (یک طرفه):^۵

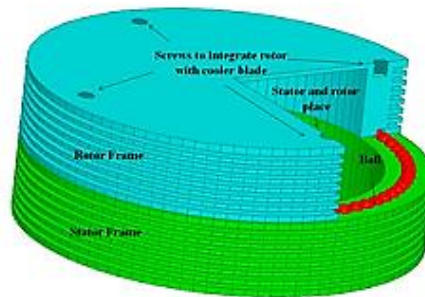
این ساختار، ساده ترین و قدیمی ترین ساختار ماشین های شار محور است و به عنوان موتور یک طرفه شناخته می شود و در مواردی که گشتاور کمی مورد نیاز است، استفاده می شود. [1] این ساختار در طراحی موتورهای با گشتاور کمتر از ۱۰۰ نیوتن متر، معمولاً استفاده می شود. [13]



شکل ۱-۴: ساختار موتور شار محور با یک فاصله هوایی

⁵ Single sided axial air gap motor

یک راه کاهش نیروی کشش مغناطیسی بین روتور و استاتور استفاده از ساختار شبه یاتاقان به صورت شکل زیر می باشد. در این ساختار، شیار باریکی روی بدنه استاتور و روتور ایجاد می شود و از ساچمه های ریزی پر می شود.[14]

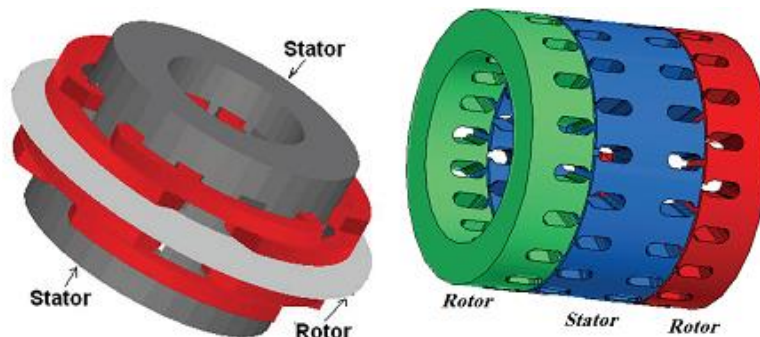


شکل ۱-۵: ساختار شبه یاتاقان موتور شار محور

۱-۴-۲- ساختار با دو فاصله هوایی (دو طرفه) ۶:

این ساختار دارای دو فاصله هوایی است و می تواند به صورت دو روتور و یک استاتور در وسط^۷ یا دو استاتور و یک روتور در وسط^۸ باشد.

به وسیله این ساختار، می توان گشتاور بیشتری تولید نمود و نیروی محوری را کاهش داد، اما قیمت قطعا افزایش می یابد و ساختار دو استاتوری معمولا گران تر است. اما در ماشین های بزرگ، این افزایش قیمت، ناچیز می باشد.[1] در ساخت موتورهای با گشتاور بالاتر از ۲۰۰ نیوتن متر، معمولا از این ساختار استفاده می شود.[13]



شکل ۱-۶: ساختار موتور شار محور با دو فاصله هوایی

^۶ Double side axial air gap motor

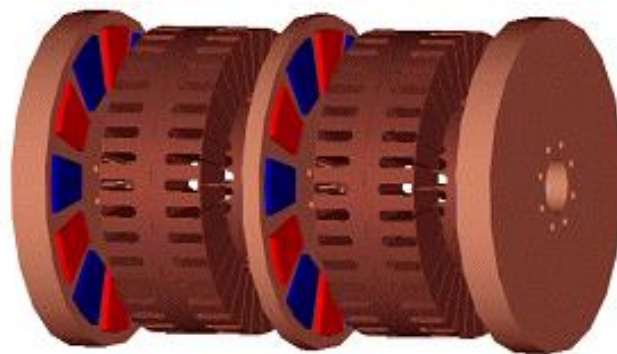
^۷ Central-stator motor

^۸ Central-rotor motor

۱-۴-۳- ساختار با چند فاصله هوایی^۹:

با اینکه ساختار دو طرفه، یک عملکرد خوب دارد، اما برای کاربردهای خاص ماشین های بسیار پر قدرت، می توان از ساختار با چند فاصله هوایی استفاده نمود.

ماشینهای با چند فاصله هوایی در ساختار استاتور داخلی- روتور خارجی (ISER)^{۱۰} دارای N استاتور و N+1 روتور می باشند و در ساختار استاتور خارجی- روتور داخلی (ESIR)^{۱۱} دارای N+1 استاتور و N روتور می باشند. و بخاطر بازده بالاتر، نوع ISER معمولاً ترجیح داده می شود. [7]



شکل ۱-۷: ساختار موتور شار محور با چند فاصله هوایی

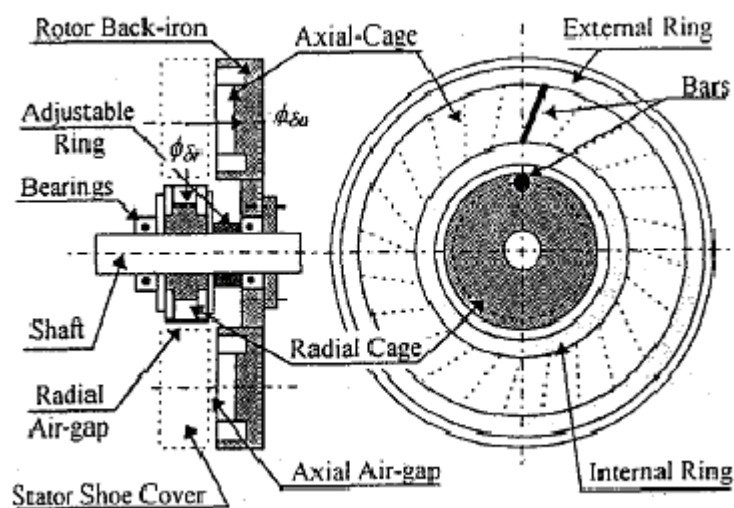
۱-۴-۴- ساختار ترکیبی شار محور و شار شعاعی:

در این ساختار می توان به چگالی توان زیاد و راندمان بالا دست پیدا کرد. این ساختار شامل یک استاتور و دو روتور، یکی به صورت محوری و یکی به صورت شعاعی سیم پیچی شده است.

⁹ multiple air gap axial flux motor

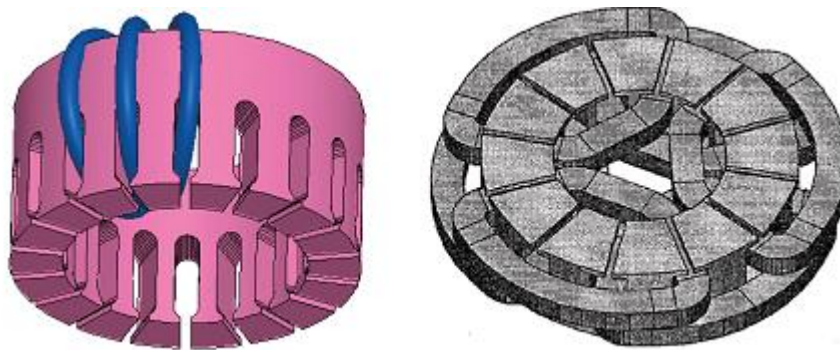
¹⁰ internal stator external rotor

¹¹ external stator internal rotor



شکل ۸-۱: موتور ترکیبی شار محوری و شار شعاعی

از لحاظ نوع سیم پیچی نیز می توان به ساختارهای سیم پیچی تک لایه و دو لایه و گرامه^{۱۲} اشاره نمود. البته با توجه به نوع سیم پیچی استفاده شده در کارخانجات تولیدی موتور شار محور (معمولا به صورت هم مرکز) این تک لایه یا دو لایه ممکن است عملا در دو یا سه یا چهار طبقه قرار گیرد. در شکل زیر مشاهده می نمایید که با اینکه در هر شیار فقط یک سیم پیچ قرار دارد (تک لایه) اما در دو طبقه جای داده شده است.



شکل ۹-۱: سیم پیچی تک لایه و گرامه در موتور شار محور

۱-۵- کاربردها:

به دلیل چگالی توان و بازده و نسبت قطر به طول بزرگ و طول فاصله هوایی قابل تنظیم، کاربرد این نوع موتورها بسیار زیاد است، از آن جمله می توان به موارد ذیل اشاره نمود:

بدلیل امکان اتصال مستقیم و سروصدا و خرابی کم در لوازم خانگی با نام تجاری DirectDrive کاربرد زیادی یافته اند.

¹² gramme

بدلیل چگالی توان بالا می توان در مکانهایی که فضای کمی وجود دارد مانند سفینه های فضایی استفاده نمود.

چون روتور می تواند با قسمتهای گردان به صورت یکپارچه ساخته شود، در فن ها و پمپ ها کاربرد دارد.[1]

با توجه به چگالی گشتاور، راندمان و کسینوس فی بالا و قابلیت تغییرات زیاد سرعت در خودروهای الکتریکی کاربرد یافته است.

همچنین در مواردی که به پاسخ سریع نیاز است از روتورهای بدون آهن یا ساختار بدون هسته^{۱۳} استفاده می شود.



شکل ۱-۱۰: موتور شار محور بدون هسته

البته ساختارهایی از موتور شار محور برای سرعت های زیاد با روتور و استاتور یکپارچه یا هسته از جنس آمورف^{۱۴} نیز وجود دارد.

همچنین موتور تکفاز شار محور با خازن دایم کار که در این پروژه بررسی می گردد، دارای همان ویژگیهای موتور مرسوم با خازن دایم کار می باشد، یعنی قابلیت خوب و آسان کنترل سرعت با تغییر ولتاژ، که ناشی از شکل منحنی گشتاور سرعت می باشد، لذا این موتور را برای کاربردهایی چون فن و هواکش و پنکه و ماشین لباسشویی و... مناسب می نماید. همچنین این موتور دارای سر و صدای کم و کار مطلوب و ضریب توان بالا و راندمان خوب می باشد.

۱-۶- نحوه ساخت موتور در کارخانه:

با توجه به اینکه موتور تکفاز شار محور که موضوع این پروژه است، در حال حاضر در شرکت نیرو تهویه در حال

ساخت می باشد، جهت آشنایی بیشتر، مراحل ساخت برشمرده می شود:

(۱) رول کردن ورق ها و پانچ نمودن آنها با فولاد M470

(۲) جوش دادن سر و ته ورق ها

¹³ coreless

¹⁴ Amorphous

۳) عایق گذاری با کاغذ برشمان و سیم پیچی استاتور با سیم های سلف باندینگ

۴) ریختن آلومینیوم به روش ریژه^{۱۵}

۵) قرار دادن استاتور در بدنه و کاسه و رزین ریزی

۶) سنگ کاری روی استاتور و رنگ زنی استاتور

۷) مونتاژ و فیلر گیری روتور و استاتور

۸) سوراخکاری بدنه روتور و پیچ کردن فن روی بدنه روتور

۹) بالانس کردن موتور

۱-۷- پیشنهاد پژوهش های قبلی:

در [1] مروری بر انواع موتورهای شار محوری و معرفی انواع روشهای ساخت و مدلسازی این نوع موتورها بیان شده است.

در [2] ضمن معرفی کامل این نوع موتورها و فرمولهای آن، روابط مدلسازی دو بعدی و سه بعدی در فضای اجزای محدود و تاثیر تغییر تعداد میله های روتور روی تلفات و راندمان و تاثیر تغییرات فاصله هوایی و عمق شیارها و یوغ و پوشاننده های روتور و گوه ها و تاثیر انواع هارمونیک روی موتور بررسی شده است.

در [3] تئوری عملکرد موتور شار محور و نحوه استخراج برخی فرمولهای طراحی این موتور و مدار معادل و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی برای موتور سه فاز به طور کامل تشریح شده است.

در [4] علاوه بر ارائه یک الگوریتم طراحی برای موتور تکفاز ضمن معرفی روش الگوریتم رقابت استعماری، بهینه سازی انجام شده است و ضمن ارائه تحلیل حرارتی، اجزای محدود و مدل dq، یک نمونه آزمایشگاهی ساخته شده است.

در [5] یک مدل جدید با دو فاصله هوایی که ترکیبی از ماشین شارشعاعی و شارمحوری می باشد، تشریح شده است.

در [6] برخی فرمولهای طراحی موتور شارمحوری ارائه گردیده است.

در [7] با استفاده از نرم افزار سیمولینک متلب، شبیه سازی برای موتور سه فاز با ساختارهای یک بر و دو بر برای کاربرد در اتومبیل های برقی ارائه شده است. همچنین در [28] فرمولهای طراحی یک موتور القایی یک طرفه شار محور برای کاربرد در اتومبیل های برقی آورده شده است.

¹⁵ Gravity

در [8] یک روش جدید برای یافتن مدار معادل موتور تکفاز معمولی با خازن دائم که مبتنی بر پیدا کردن نسبت تبدیل ولتاژ مختلط (CCVR) می باشد، استفاده شده است، که چون موتور مورد بحث در این پروژه از نوع تکفاز خازن دائم می باشد، در فصل ۳ کاربرد دارد.

در [9] یک روش جدید متکی بر یافتن نمودار جریان دشارژ استاتور، برای پیدا کردن پارامترهای dq موتور تکفاز شارمخوری، تشریح شده است. و همچنین در مورد چگونگی یافتن ممان اینرسی (J) توضیح داده شده و روش اجزای محدود برای تحلیل سه بعدی این موتور و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی استفاده شده است.

در [10] تاثیر نا هم محوری بر روی عملکرد موتور شار محوری و همچنین تشریح آزمایش اِپشتاین و مدلسازی با دو روش " بدون نا هم محوری " و " در نظر گرفتن نا هم محوری " انجام شده است و مقایسه ای بین این دو صورت گرفته است. در [11],[12],[19],[24] یک مدل حالت دائمی برای تحلیل موتور تکفاز خازن دائم معمول به همراه فرمول بندی کامل ارائه شده است که جهت بررسی تحلیلی عملکرد موتور در فصل ۳ استفاده خواهد شد.

در [13] انواع ساختار ماشین های مخصوص جدید شامل ماشین های آهنربای دائم سیلندری، ماشین های دیسکی شار محور مغناطیس دائم، ماشین های شار متقاطع و ماشین های شار برگشتی و شار سوئیچ شونده و روابط حاکم بر آنها آورده شده است.

در [14] ضمن ارائه یک الگوریتم طراحی، فرمول بندی ناقصی ارائه گردیده و یک روش بهینه سازی^{۱۶} به همراه تحلیل سه بعدی با روش اجزای محدود آورده شده و در نهایت نمودارهای خروجی مقایسه گردیده است.

در [15] مطالب مفیدی در مورد طراحی موتورهای و بخصوص تعیین پارامترهای اختیاری در موتورهای شار شعاعی معمول آورده شده است.

در [16] ضمن آوردن معادلات طراحی موتور تکفاز شار محوری، ساختارهای مختلف موتورهای شار محوری dc، سنکرون و القایی تکفاز و سه فاز آورده شده است.

در [17] ضمن آوردن بعضی فرمولهای طراحی، یک مدلسازی حرارتی و نحوه ساخت این موتور تشریح شده است و مقایسه ای بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از اجزای محدود سه بعدی آورده شده است.

منبع [18] که یک کتاب طراحی کامل می باشد، یک الگوریتم ترتیبی طراحی برای موتور تکفاز و سه فاز القایی معمول و محاسبات عملکردی موتور آورده شده است.

¹⁶ Optimization

در [20] نیز یک الگوریتم ترتیبی طراحی برای موتورهای القایی سه فاز و تکفاز شار شعاعی معمولی ارائه گردیده است. ضمناً مطالب مفیدی در مورد نحوه انتخاب پارامترهای اختیاری در طراحی موتورها آورده شده است.

منبع [21] یک کتاب طراحی ماشین با دیدی جدید به همراه فرمولهایی متفاوت همراه با توجه به مدل های dq ماشینهای الکتریکی است.

منبع [22] فرمولهایی جهت طراحی موتور شار محوری مغناطیس دائم ارائه نموده است که برخی از این فرمول ها در ماشین شار محوری القایی نیز کاربرد دارد.

منبع [23] به معرفی یک نرم افزار ساخته شده توسط نویسندگان برای طراحی موتور شارمحوری القایی همراه با ارائه برخی فرمول ها می پردازد.

منبع [24] یک کتاب در مورد طراحی سیم پیچی موتورهای تکفاز معمول می باشد که در فصل ۳ از آن استفاده خواهد شد.

منبع [26],[27] دو منبع مفید برای طراحی موتورهای معمول القایی می باشند، در [26] همچنین مطالب مفیدی در مورد نحوه انتخاب تعداد میله های روتور و ارتباط آن با پدیده های خزش و گشتاور دندانه ای بیان شده است.

در [29] مدلسازی سه بعدی اجزای محدود یک موتور معمول شار شعاعی انجام شده است.

در [30],[31] یک مدل دو بعدی موسوم به مدل لایه ای برای تبدیل اجزای محدود ۳ بعدی به ۲ بعدی در موتور شار محوری ارائه شده است.

در [32],[33],[37] روش اجزای محدود با روش مرسوم گالرکین برای محاسبات انواع ماشین های الکتریکی و روش به کارگیری اجزای محدود در این ماشین ها و چگونگی مش بندی، تعیین شرایط مرزی و پس پردازش و... تشریح شده است.

در [34],[35] مدلسازی دینامیکی انواع ماشین های معمول و خصوصاً ماشین های القایی تکفاز و سه فاز تشریح شده است. و در [42] و [45] نیز مدلسازی موتور دو فاز نا متقارن و موتور تکفاز خازنی، آمده است.

در [36] مدلسازی انواع ماشین های الکتریکی با مدل های آماده نرم افزار سیمولینک متلب ارائه گردیده است.

در [38] یک فرمول بندی کامل از طراحی و مدل دائمی تحلیلی موتور تکفاز القایی شار شعاعی معمول و بهینه سازی راندمان این موتور به روش الگوریتم PSO بهبود یافته تشریح شده است.

در [39] ضمن ارائه روش جریان دشارژ استاتور برای تعیین پارامترهای الکتریکی موتور شار محوری و روش سقوط وزنه و قرقه برای تعیین ممان اینرسی و همچنین ارائه مدار معادل کامل dq و مدار معادل حالت دائمی برای انواع موتورهای تکفاز خازنی و بدون خازن، نمودارهای حاصل از آزمایش و حاصل از دستگاه دینامومتر مقایسه شده است.

در [40] روابط الکترومغناطیس ایستا و دینامیک به طور کامل تشریح شده است.

در [41] تاثیر تغییر طول فاصله هوایی روی راندمان، تلفات و کسینوس فی و جریان به طور کامل تشریح شده است.

در [43] و [46] روش کنترل خازن به روش کلید زنی برای حداکثر کردن گشتاور متوسط و در شرایط کار دائم و حداقل بودن نوسانات گشتاور و کاهش گشتاور دندانه ای ارائه شده است.

همانطور که از توضیحات فوق الذکر مشخص است، انواع مقالاتی که بررسی شده است شامل معرفی ساختارها، طراحی، بررسی عملکرد، شبیه سازی با مدل dq و شبیه سازی با روش اجزای محدود می باشد، اما به ندرت به موضوع موتور تکفاز با خازن دائم شار محوری پرداخته اند.

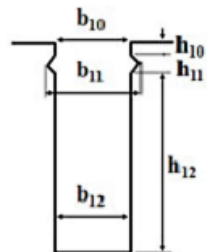
در این پروژه سعی شده است تا ضمن پوشش بهتر مطالب، موتور تکفاز با خازن دائم شار محوری به طور کامل بررسی شود.

فصل

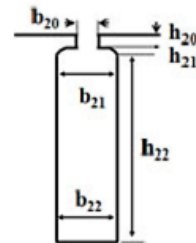
دوم

۱-۲- اندازه گیری ابعاد ماشین در حال ساخت:

باتوجه به اینکه موتور شار محور انتخابی در این پروژه از نوع تکفاز با خازن دائم کار می باشد ، جهت بررسی عوامل مختلف ، یک موتور ۶۵۰ وات و ۶ قطب انتخاب گردید و ابعاد آن توسط یک کولیس دیجیتال، اندازه گیری شد.



جدول ابعاد استاتور



جدول ابعاد روتور

مقدار	واحد	پارامتر	مقدار	واحد	پارامتر
۸۷	mm	D_{i-S}	۸۶	mm	D_{i-R}
۱۷۳.۷	mm	D_{o-S}	۱۷۳	mm	D_{o-R}
۳۶	-	S_S	۴۵	-	S_R
۵.۵	mm	b_{10}	۱	mm	b_{20}
۷	mm	b_{11}	۳.۶۵	mm	b_{21}
۵.۵	mm	b_{12}	۳.۶۵	mm	b_{22}
۱	mm	h_{10}	۱	mm	h_{20}
۲	mm	h_{11}	۰.۳	mm	h_{21}
۳۰.۲۵	mm	h_{12}	۹.۳	mm	h_{22}
۱۱.۷۵	mm	dc_1	۱۹.۵	mm	dc_2
۴۵	mm	L_S	۳۰.۱	mm	L_R
۲.۲۰	mm	bti_S	۵.۲	mm	bti_R
۹.۶۵	mm	bto_S	۱۱	mm	bto_R
۰.۶	mm	L_g			

جدول ۱-۲: ابعاد موتور ۶ قطب ۶۵۰ وات شرکت نیروتهویه

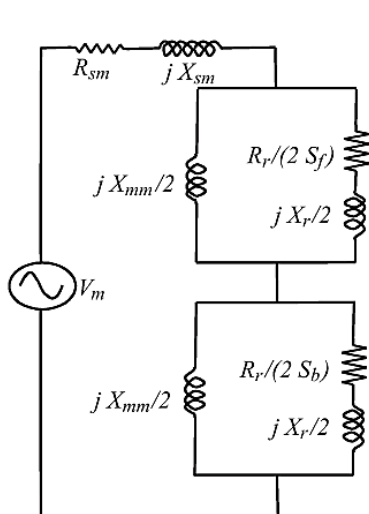
۲-۲-آزمایشهای کلاسیک:

به طور کلی برای اندازه گیری پارامترهای الکتریکی موتور القایی، روش های کلاسیک و جدید وجود دارد. روشهای

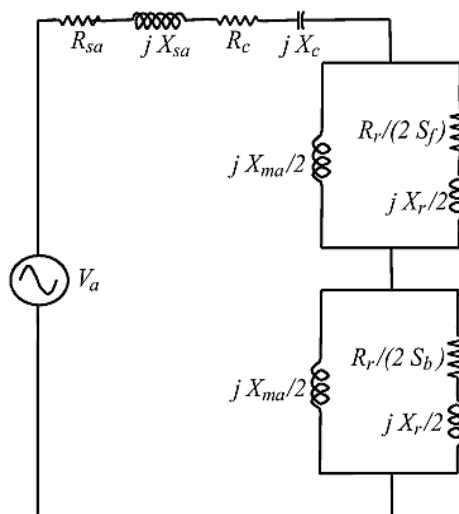
کلاسیک، شامل آزمایش DC و بی باری و روتور قفل شده است. اما روش های جدید، شامل یافتن پارامترهای مدل dq،

اندازه گیری دو فاز و تکفاز، تئوری میدان های متعامد ثابت و گردان و روش تحلیل جریان استاتور است.[4]

در یک موتور تکفاز القایی با خازن دائم کار، سیم پیچ کمکی و اصلی جداگانه توسط دو مدار معادل به شکل زیر رسم شوند:



شکل ۲-۲: مدار معادل سیم پیچ اصلی



شکل ۲-۱: مدار معادل سیم پیچ کمکی

۲-۲-۱-آزمایش DC^{۱۷}:

در این آزمایش، بعد از باز کردن خازن، ولتاژ DC به سیم پیچ های اصلی و کمکی داده می شود و جریان اندازه

گیری شده و طبق قانون اهم داریم:

$$R_{smdc} = \frac{V_{DCm}}{I_{DCm}} \quad (۱-۲)$$

$$R_{sadc} = \frac{V_{DCa}}{I_{DCa}} \quad (۲-۲)$$

و سپس با ضرب اعداد بالا در ضریب پوستی (حدوداً ۱.۲) مقدار R_{sm} , R_{sa} بدست می آید.

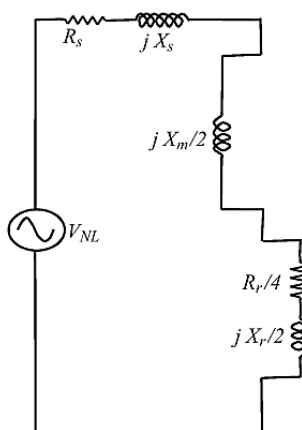
¹⁷ DC test

۲-۲-۲-۲ آزمایش ۱۸ NL:

در آزمایش بی باری، ولتاژ نامی به هر سیم پیچ اعمال می شود و جریان و توان اندازه گیری می گردد. در این حالت

مقاومت روتوری شاخه فروروارده به سمت بی نهایت میل می کند و مقاومت شاخه بک وارد، چون $2 \rightarrow S_b$ به سمت $\frac{R_r}{4}$

میل می کند.



شکل ۲-۳: مدار معادل سیم پیچ اصلی در آزمایش بی باری

۲-۲-۲-۳ آزمایش ۱۹ LR:

در آزمایش روتور قفل شده، بعد از نگه داشتن روتور، ولتاژ به تدریج اضافه می شود و جریان تا حد جریان نامی بالا

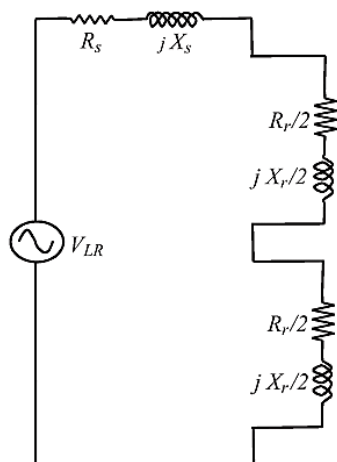
برده شده و توان اندازه گیری می گردد. چون $S_f = S_b = 1$ امپدانس مدار روتور بسیار کوچکتر از راکتانس مغناطیس

کننده است، در نتیجه راکتانس مغناطیس کننده، می تواند حذف شود و معمولاً این آزمایش باید در فرکانس ۲۵ درصد

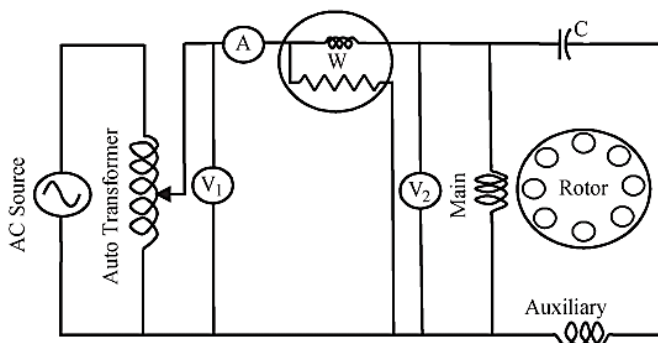
فرکانس نامی صورت گیرد تا اثر مقاومت موثر روتور در فرکانس کم در نظر گرفته شود.

¹⁸ No load test

¹⁹ locked rotor test



شکل ۲-۴: مدار معادل سیم پیچ اصلی در آزمایش روتور قفل شده
 نحوه بستن مدار جهت انجام آزمایش بی باری و قفل روتور به شکل زیر است. فقط باید توجه نمود که این آزمایش ها یک بار برای سیم پیچ اصلی و یک بار برای سیم پیچ کمکی اجرا گردد.



شکل ۲-۵: نحوه بستن مدار آزمایش بی باری و روتور قفل شده

۲-۲-۴- محاسبه پارامترهای سیم پیچ اصلی:

$$R_m = \frac{P_{LR}}{I_{LR}^2} - R_{sm} \quad (۳-۲)$$

$$X_{sm} = X_s = \frac{X_{LR}}{2} = \frac{\sqrt{\left(\frac{V_{LR}}{I_{LR}}\right)^2 - \left(\frac{P_{LR}}{I_{LR}^2}\right)^2}}{2} = X_m \quad (۴-۲)$$

$$V_{ab1} = V_{NL} - I_{NL} \left(X_{sm} + \frac{X_r}{2} \right) \quad (۵-۲)$$

$$X_{mm} = \frac{2 * V_{ab1}}{I_{NL}} = 2 \frac{V_{NL} - I_{NL} \left(X_{sm} + \frac{X_r}{2} \right)}{I_{NL}} \quad (۶-۲)$$

۲-۵- محاسبه پارامترهای سیم پیچ کمکی:

$$X_c = \frac{1}{\omega \times C} \quad (۷-۲)$$

$$R_{ra} = \frac{P_{LR}}{I_{LR}^2} - R_{sa} \quad (۸-۲)$$

$$X_{sa} = X_s = \frac{X_{LR}}{2} = \frac{\sqrt{\left(\frac{V_{LR}}{I_{LR}} \right)^2 - \left(\frac{P_{LR}}{I_{LR}^2} \right)^2}}{2} = X_{ra} \quad (۹-۲)$$

$$V_{ab2} = V_{NL} - I_{NL} \left[X_{sa} - X_c + \frac{X_r}{2} \right] \quad (۱۰-۲)$$

$$X_{ma} = \frac{2 * V_{ab2}}{I_{NL}} = 2 \left[\sqrt{\left(\frac{V_{NL}}{I_{NL}} \right)^2 - \left(R_{sa} + \frac{R_{ra}}{4} \right)^2} - \left(X_{sa} + \frac{X_{ra}}{2} - X_c \right) \right] \quad (۱۱-۲)$$

معمولا ارتباط بین دو سیم پیچ کمکی در حالت کار به صورت یک مدار معادل کامل داده می شود ، که در فصل سوم به طور کامل مورد بحث قرار می گیرد.

ارتباط بین تعداد دور سیم پیچ کمکی و اصلی به نسبت تبدیل اسکالر^{۲۰} معروف است و بصورت زیر تعریف می شود:

$$a = \frac{N_{sa}}{N_{sm}} \quad (۱۲-۲)$$

در [8] با استفاده از یک روش جدید، نسبت تبدیل ترانسفورمری، به صورت یک عدد مختلط با عنوان نسبت ولتاژ مختلط

محاسبه شده (CCVR)^{۲۱} یافت می شود و بر اساس آن یک مدار معادل جدید برای حالت گذرا رسم شده است.

²⁰ Scalar turns ratio

²¹ Computed complex voltage ratio

۲-۲-۶- نتایج آزمایشات در موتور مورد نظر :

پارامتر	واحد	مقدار
R_{sm20}^0	اهم	۶.۶
R_{sa20}^0	اهم	۱۰.۳۲
R_{rm}	اهم	۱۲
R_{ra}	اهم	۱۸
c	میکروفاراد	۲۵
X_c	اهم	۱۲۷.۳
X_{sm}	اهم	۵
X_{sa}	اهم	۷.۵
X_{mm}	اهم	۱۲۰
X_{ma}	اهم	۱۲۰
N_{sa}	دور	۹۰
N_{sm}	دور	۸۰
a	-	۱.۱۲
P	قطب	۶
n_s	دور بر دقیقه	۱۰۰۰
n_r	دور بر دقیقه	۸۵۰
S_{nl}	درصد لغزش	۰.۱۲۵
S_{fl}	درصد لغزش	۰.۱۵

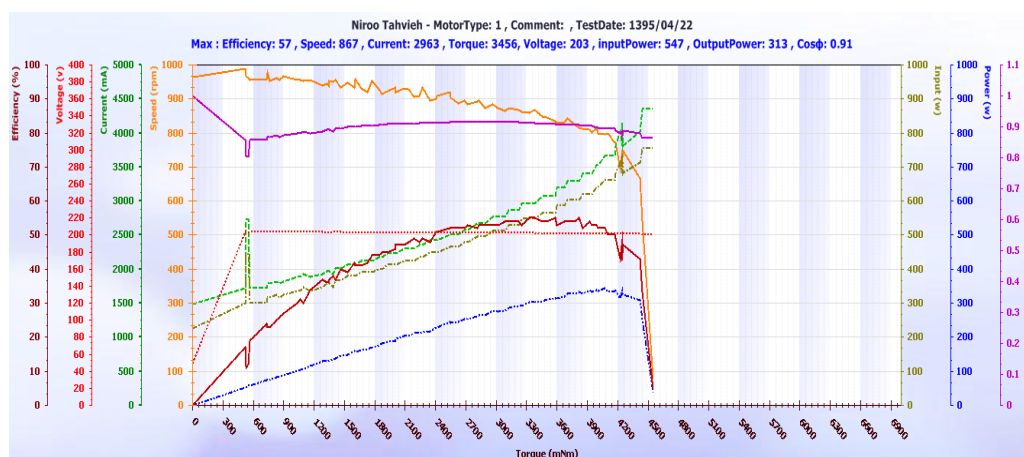
جدول ۲-۲: نتایج آزمایشات بی باری، روتور قفل شده و دی سی روی موتور مورد نظر

۲-۳- اندازه گیری با دینامومتر:

به وسیله دینامومتر، نمودارهای عملکردی موتور مورد نظر را می توان یافت. این دستگاه متشکل از یک سروو موتور که متصل به یک لود سل می باشد و به وسیله تغییر بار توسط این سروو موتور، به موتور مورد آزمایش، می تواند نمودارهای مختلف عملکردی موتور را رسم نماید. دینامومتر و نمودارهای خروجی آن برای یک موتور نمونه به صورت زیر می باشند:



شکل ۲-۶: دینامومتر مورد استفاده



شکل ۲-۷: نمونه خروجی دینامومتر

۲-۴-آزمایشهای جدید:

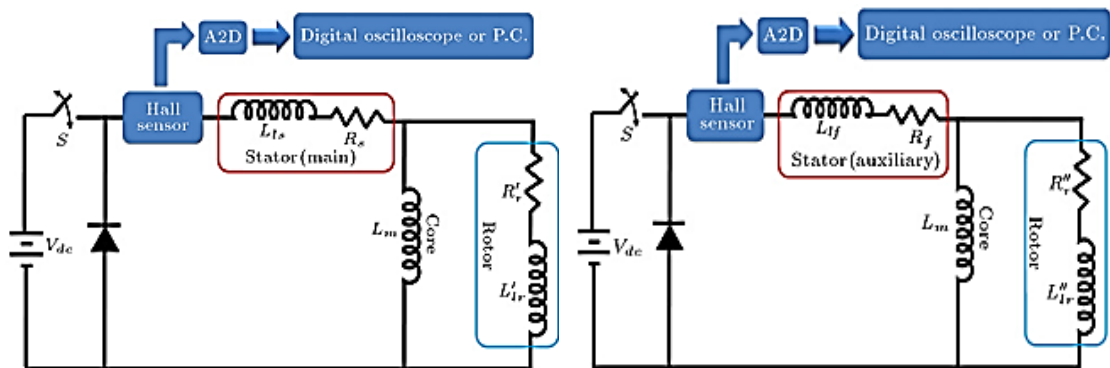
۲-۴-۱- روش تحلیل جریان استاتور^{۲۲}:

هدف این روش، یافتن پارامترهای مدار معادل روتور با روشی نوین است. در این روش از اعمال یک موج پالس DC به یکی از سیم پیچ ها و مدار باز کردن سیم پیچ دیگر استفاده می شود. برای هر دو سیم پیچ، بسته شدن سوئیچ S باعث افزایش در جریان استاتور است که جریان شارژ^{۲۳} نامیده می شود. هنگامی که جریان استاتور به مقدار حالت پایدار خود می

²² Discharge current method

²³ Charge current

رسد، کلید S باز خواهد شد و این جریان در حلقه امپدانس سیم پیچ استاتور، سلف مغناطیس کننده و دیود دمپر، خالی می شود. و در این حین سنسور اثر هال آن را حس می نماید. ولتاژ خروجی سنسور را می توان از طریق یک کارت A/D ، به کامپیوتر تحویل داده و یا با استفاده از یک اسیلوسکوپ دیجیتال مانیتور کرد. شکل موج حاصل، نمایی است و می توان از روی آن ثابت زمانی و ثابتهای دیگر را یافت. در نتیجه با محاسباتی که در [9] آمده است، می توان پارامترهای مدار معادل روتور را یافت.

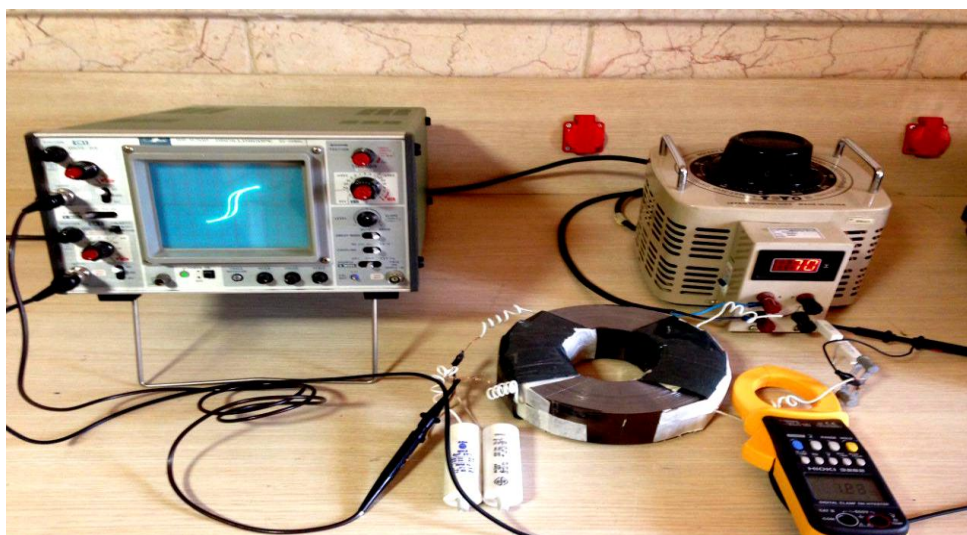


شکل ۲-۸: شکل روش تحلیل جریان استاتور روی سیم پیچ کمکی شکل ۲-۹: شکل روش تحلیل جریان استاتور روی سیم پیچ اصلی

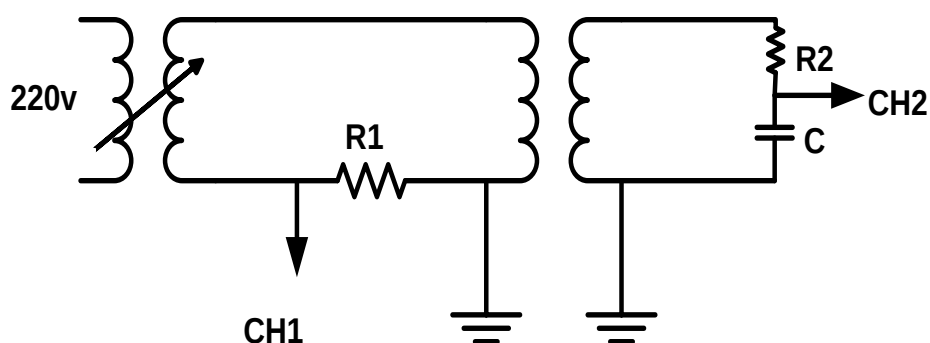
۲-۴-۲-۲- آزمایش اِپستاین اصلاح شده^{۲۴}

به دلیل تنش های حرارتی ایجاد شده در حین پروسه تولید هسته شامل پروسه برشکاری و گرم شدن در حین کار و...، ممکن است مقداری مشخصه هیستریزیس هسته تغییر نماید، به وسیله این آزمایش می توان منحنی هیستریزیس ماده هسته را بر روی اسیلوسکوپ مشاهده نمود.

²⁴ Modified Epstein test



شکل ۲-۱۰: نحوه اجرای آزمایش اِشتاین



شکل ۲-۱۱: شکل مدار آزمایش اِشتاین

طبق شکل این آزمایش ، کانال CH1 ولتاژ دو سر مقاومت R1 را نشان می دهد:

$$Hl_c = NI \Rightarrow V_{CH1} = H \frac{l_c R_1}{N_1} \quad (۲-۱۳)$$

همانطور که مشخص است V_{CH1} متناسب با H است.

همچنین V_{CH2} ، ولتاژ دو سر خازن را نشان می دهد:

$$V_{CH2} = \frac{1}{C} \int I_2 dt = \frac{1}{C} \int \frac{V_s}{R_2} dt = \frac{N_2 \times A_c}{C \times R_2} B \quad (۲-۱۴)$$

همانطور که مشخص است V_{CH2} متناسب با B است.

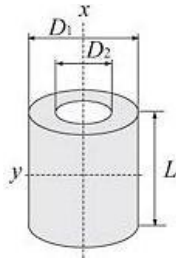
در این آزمایش N_1, N_2 برابر ۱۰۰ دور و $R_1=1$ و $R_2=1.2M$ اهم و $C=3.3$ میکرو فاراد انتخاب می شود.

۲-۴-۳- نحوه اندازه گیری و فرمول های ممان اینرسی^{۲۵}:

با توجه به اینکه در فصول بعدی نیاز به محاسبه ممان اینرسی در شبیه سازی ها با سیمولینک و نرم افزار المان

محدود است در نتیجه، طرز محاسبه ممان اینرسی در این قسمت بیان می شود.

به طور کلی برای محاسبه ممان اینرسی روتور به شکل دیسکی رابطه زیر وجود دارد.



$$J = \frac{\pi}{32} \rho L (D_1^4 - D_2^4) \quad (۱۵-۲)$$

اما با توجه به اینکه، روتور، شامل دو ماده فولاد و آلومینیوم است، ممان اینرسی طبق [3] از رابطه های ۲-۱۶ تا ۲-۲۰ محاسبه می گردد.

اینرسی برای فولاد به تنهایی:

$$J_i = \pi \rho \times 10^{-8} (\beta 6.87 + 2.17) \text{ g.mm}^2 \quad (۱۶-۲)$$

اینرسی برای حلقه های انتهایی روتور:

$$J_e = \pi \rho \times 10^{-8} \times 1.21 \text{ g.mm}^2 \quad (۱۷-۲)$$

اینرسی برای شمش های روتور قفسی:

$$J_b = \pi \rho \times 10^{-8} \times 0.125 \text{ g.mm}^2 \quad (۱۸-۲)$$

بنابراین اینرسی کل برابر است با:

$$J_i = \pi \rho \times 10^{-8} \times (\beta 6.87 + 3.505) \text{ g.mm}^2 = 19530674.09 \text{ g.mm}^2 = 1.95 \times 10^{-2} \text{ kg.m}^2 \quad (۱۹-۲)$$

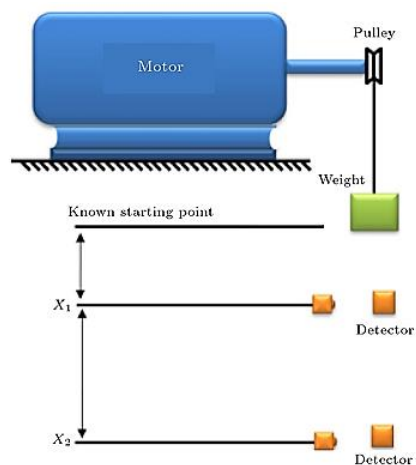
در این روابط چگالی آهن مورق از رابطه زیر یافت می شود :

$$\rho = 7.8 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^3 \quad (۲۰-۲)$$

و مقدار β (نسبت طول یک قطب به گام قطبی) بین ۰.۴۴۵ و ۰.۷۷۸ محدود می شود، که در اینجا ۰.۶۵ فرض گردید.

²⁵ Moment of inertia

همچنین در [9] یک روش بر مبنای "سقوط وزنه و سیستم قرقره"^{۲۶} بیان شده است، که با اندازه گیری شتاب، به وسیله دو دتکتور نوری، می تواند ممان اینرسی را بیابد. شکل این آزمایش به صورت زیر است:



شکل ۲-۱۲: نحوه آزمایش سقوط وزنه و سیستم قرقره

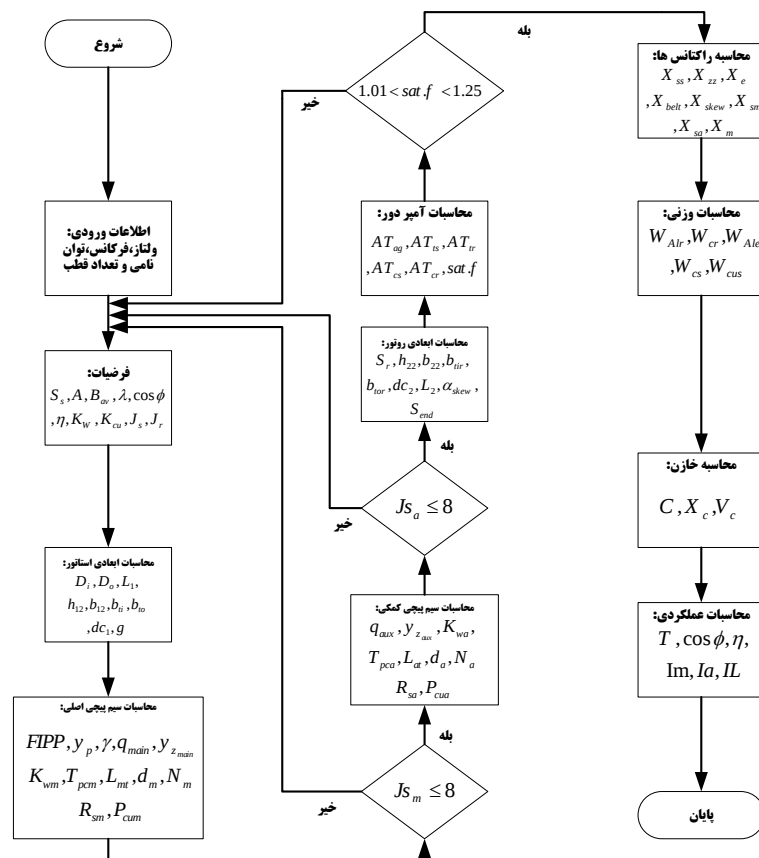
²⁶ The Falling Weight and Pulley System

فصل

سوم

۱-۳- الگوریتم طراحی:

الگوریتم طراحی به کار رفته جهت موتور شار محور تکفاز به صورت شکل ۱-۳ می باشد. در این الگوریتم بعد از انتخاب اطلاعات ورودی که معمولاً سفارش مشتری می باشد، پارامترهای اختیاری (فرضیات) مانند چگالی جریان، لاند، بارگذاری الکتریکی و مغناطیسی ویژه و نسبت تبدیل اسکالر و ... انتخاب می شوند و بر اساس الگوریتم پیشنهادی، محاسبات ابعادی استاتور و روتور و سیم پیچی ها انجام می شود و با چک کردن چگالی جریان و ضریب اشباع، درستی محاسبات بررسی می گردد. قابل ذکر است که این مراحل ممکن است چندین بار تکرار شود تا به نتیجه مطلوب برسیم. سپس پارامترهای الکتریکی شامل مقاومت ها و اندوکتانس ها و خازن محاسبه می شود. بعد از یافتن تمام پارامترها می توان مدار معادل نهایی حالت دائمی و گذرا را رسم نمود و محاسبات عملکردی شامل یافتن راندمان، گشتاور، ضریب توان، جریان های سیم پیچی اصلی و کمکی را انجام داد و همچنین نمودارهای عملکردی موتور در دو حالت دائمی و گذرا را رسم نمود.



شکل ۱-۳: الگوریتم طراحی استفاده شده برای موتور تکفاز خازن دایم شار محور

۳-۲- مشخصات موتور مورد مطالعه:

موتور مورد استفاده در این پروژه موتور تکفاز E65-6 شرکت نیرو تهویه با مشخصات نامی ۲۲۰ ولت، ۵۰، هرتز، ۶ قطب با قدرت خروجی ۶۵۰ وات نامی است.

۳-۳- فرضیات:

معمولا بعضی پارامترها به عنوان فرضیات انتخاب می گردد و با تکرار الگوریتم طراحی به صحت انتخاب فرضیات اولیه می رسیم. تعداد شیارها برابر ۳۶ انتخاب می شود. (فقط کفایت تعداد شیارها بر تعداد قطب ها یک عدد صحیح شود)، مقدار قطر خارجی و داخلی برابر ۱۷۴ و ۸۷ می باشد. همچنین طبق کاتالوگ های ماشین شار محور در این رنج، میزان کسینوس فی ۰.۹۵ و راندمان ۰.۷ انتخاب می گردد.

۳-۳-۱- ضریب بارگذاری الکتریکی ویژه:

ضریب بارگذاری الکتریکی ویژه بنا به تعریف میزان کل جریان استاتور تقسیم بر محیط استاتور می باشد. این ضریب

در موتورهای القایی معمولا با A یا ac نمایش می دهند. و واحد اندازه گیری آن آمپر هادی بر متر $\frac{Ac}{m}$ می باشد.

طبق تعریف گفته شده، در ماشینهای القایی معمولی، فرمول محاسبه بارگذاری ویژه الکتریکی به صورت زیر خواهد بود:

$$A = \frac{2mI_{ph}T_{ph}}{\pi D} \quad (۱-۳)$$

همچنین با قرار دادن قطر متوسط در رابطه بالا می توان به فرمول محاسبه بارگذاری ویژه الکتریکی در ماشینهای شار محور رسید:

$$A = \frac{2mI_{ph}T_{ph}}{\frac{\pi}{2}(D_i + D_o)} \quad (۲-۳)$$

بارگذاری ویژه الکتریکی، طبق [15] برای ماشینهای الکتریکی کوچک و متوسط بین ۳۰۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ و برای ماشین های بزرگ، بین ۴۰۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰ انتخاب می گردد. طبق [20] مقدار بارگذاری الکتریکی ویژه بین ۵۰۰۰ تا ۴۵۰۰۰ تغییر می کند.

عوامل موثر بر روی مقدار این پارامتر شامل ولتاژ کارکرد موتور، ظرفیت اضافه بار و تلفات مس می باشد. [20] در ماشین های شارمحور می توان مقدار مذکور را بیشتر انتخاب نمود. [4]

در این پروژه مقدار A برابر ۳۰۰۰۰ انتخاب گردید.

۳-۳-۲- ضریب بارگذاری مغناطیسی ویژه:

ضریب بارگذاری مغناطیسی ویژه همان چگالی شار متوسط فاصله هوایی برای یک قطب، است. این ضریب با B_{av} نمایش داده می شود و واحد اندازه گیری آن تسلا یا وبر بر متر مربع است. انتخاب B_{av} باید طوری باشد که هیچ قسمتی از مدار مغناطیسی وارد اشباع نشود. انتخاب B_{av} به دلیل تاثیر بر روی تلفات آهن و ظرفیت اضافه بار موتور و ضریب توان و افزایش دما بسیار مهم است. [15] همچنین B_{av} وابسته به چگالی شار دندانه (B_t) و چگالی شار هسته (B_c) است. تلفات هیستریزیس با $B_c^{1.7}$ و $B_t^{1.7}$ وادی با B_c^2 و B_t^2 متناسب هستند. B_t حداکثر ۱.۸ و B_c بین ۱.۳ تا ۱.۵ در موتورهای القایی انتخاب می-شود. [15]

بار گذاری ویژه مغناطیسی طبق [15] در حدود ۰.۴۵ تا ۰.۶ تسلا انتخاب می گردد. در [20] این مقدار بین ۰.۳ تا ۰.۶۵ توصیه شده است.

به دلیل اینکه نسبت قطر به طول و قطر داخلی به قطر محور در ماشینهای شار محور بزرگتر از ماشین های مرسوم است، خنک سازی بهتر و تهویه راحت تر است پس می توان B_{av} را بیشتر انتخاب کرد. [4]

۳-۳-۳- عدد طلایی (لاندا):

نسبت قطر خارجی به قطر داخلی یکی از مهمترین پارامترها در طراحی موتور شار محور می باشد. این مقدار با لاندا نمایش داده می شود و معکوس این مقدار برابر K_D است. در ماشین شار محور انتخاب لاندا بسیار مهم است به همین دلیل می توان گفت لاندا، یک عدد طلایی است. طبق تعریف دو پارامتر به شکل زیر تعریف می نماییم:

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

$$K_D = \frac{D_i}{D_o} \quad (4-3)$$

کمپبل^{۲۷} در سال ۱۹۷۱ بهترین نسبت K_D برای ماشین ایده آل مغناطیس دایم و القایی را ۰.۵۸ بدست آورد. [2] اما طبق [22]، K_D برای موتور شار محور مغناطیس دایم چهار قطب ۰.۳۱۵ و موتور ۶ قطب ۰.۳۵ و موتور ۸ قطب ۰.۳۷۵ و موتور ۱۲ قطب ۰.۴۰۵ بهترین انتخاب هستند.

۳-۴- محاسبات ابعادی استاتور:

از آنجا که نقطه شروع طراحی ماشینهای الکتریکی، معادله خروجی است پس آن را می یابیم.

$$S = mV_1 I_1 \quad (۵-۳)$$

$$V_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f \phi_p K_W T_{ph} \quad (۶-۳)$$

$$FIPP = \phi_p = B_{av} \tau_p l \quad (۷-۳)$$

طبق روش پیشنهادی منابع مختلف، جهت یافتن معادلات ماشین شار محور القایی کافی است که به جای D از

$$D_{avg} = \frac{D_o + D_i}{2} \text{ و به جای } l \text{ از } l = \frac{D_o - D_i}{2} \text{ استفاده شود. [23]}$$

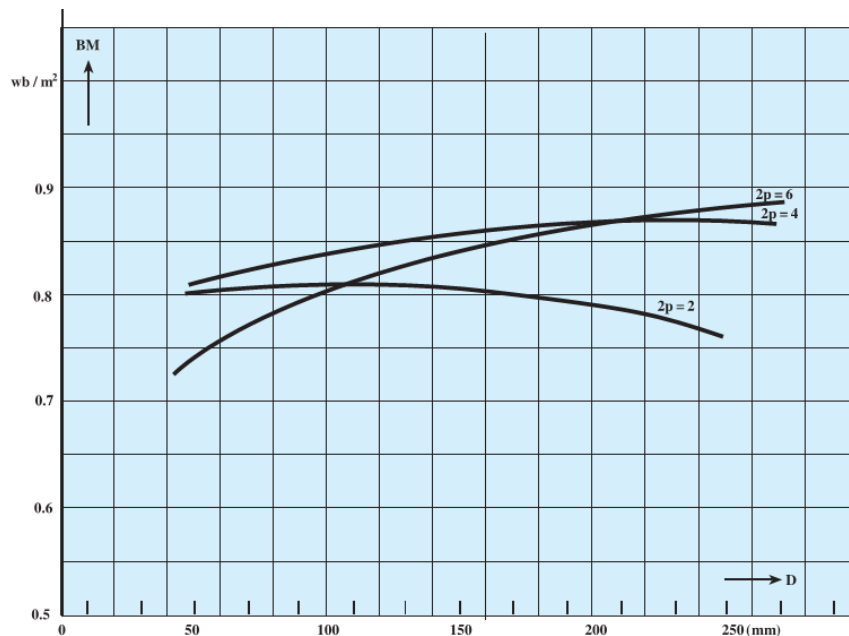
در نتیجه شار زیر هر قطب (FIPP) به شکل زیر یافت می شود:

$$FIPP = \phi_p = B_{av} \tau_p l = B_{av} \times \frac{\pi D_{avg}}{P} \times l = B_{av} \times \frac{\pi \frac{D_o + D_i}{2}}{P} \times \frac{D_o - D_i}{2} = \frac{2}{\pi} B_{max} \times \pi \frac{D_o^2 - D_i^2}{4P}$$

$$FIPP = B_{max} \times \frac{D_o^2 - D_i^2}{2P} \quad (۸-۳)$$

معمولا برای محاسبه B_{max} نمودارهایی به شکل زیر وجود دارد.

²⁷ campbell



شکل ۳-۲: نمودار ماکزیمم چگالی شار بر حسب قطر متوسط موتور برای زوج قطب های مختلف از روی شکل با توجه به اینکه $D_{avg} = 130mm$ در نتیجه تقریباً $B_{max} = 0.85T$ می شود.

بعد از محاسبات معادله خروجی ماشین شار محور به شکل زیر در می آید:

$$S = \frac{\sqrt{2}}{32} \pi^3 K_w B_{av} A (\lambda + 1)^2 (\lambda - 1) D_i^3 n_s \quad (۹-۳)$$

که در این فرمول n_s سرعت سنکرون بر حسب دور بر ثانیه است.

$$n_s = \frac{2f}{p} \quad (۱۰-۳)$$

یا فرمول محاسبه قطر داخلی موتور را می توان به شکل زیر نوشت: [17]

$$D_i = \sqrt[3]{\frac{32P_{out}}{\sqrt{2}\pi^3 K_w B_{av} A (\lambda + 1)^2 (\lambda - 1) n_s \eta \cos \phi}} \quad (۱۱-۳)$$

با محاسبه این فرمول قطر داخلی حدود ۸۷ میلی متر بدست می آید.

طول استاتور طبق [16,14] به شکل زیر بدست می آید:

$$L_1 = \left(2.3 \frac{A}{J_s} + 0.7 \frac{\pi D_i}{4P} \right) (\lambda + 1) \quad (۱۲-۳)$$

طبق [15] برای موتور با کلاس عایقی A مقدار J_s تقریباً ۳.۵ آمپر بر میلیمتر مربع و برای کلاس عایقی E تقریباً برابر ۴

آمپر بر میلیمتر مربع، برای کلاس عایقی B بین ۵ تا ۶ آمپر بر میلیمتر مربع و برای کلاس عایقی H بین ۵ تا ۸ آمپر

بر میلیمتر مربع می تواند انتخاب گردد.

در موتور مورد نظر چون کلاس عایقی H است ، با شرط $J_s = 7 \times 10^6 \frac{A}{m^2}$ ، بعد از محاسبه $L=5cm$ می شود.

برای محاسبه عرض شیار استاتور فرمولی به شکل زیر در [6] ذکر شده است:

$$b_{10} = b_{12} = \frac{\pi}{2S_1} (D_o + D_i) \left(1 - \frac{B_{g \max}}{B_{t \max}}\right) \quad (13-3)$$

که در این فرمول $B_{g \max} = \frac{\pi}{2} \times B_{av} = 0.85T$ و $B_{t \max} = 1.7T$ در نتیجه : $b_{10} = b_{12} \approx 5.6mm$

برای محاسبه عمق مفید شیار دو فرمول به شکل زیر در [14] و [22] ذکر شده است:

$$h_{12} = \frac{A}{2J_s K_{CU}} (1 + \lambda) = \frac{A}{2J_s K_{CU}} \left(\frac{1 + K_D}{K_D}\right) \quad (14-3)$$

که در این فرمول K_{CU} ضریب پرشوندگی مس نام دارد و حدودا ۰.۴ در نظر گرفته می شود. در این صورت مقدار h_{12} برابر ۳۰ میلیمتر است.

کمترین و بیشترین پهنای دندان در قسمت بیرونی و داخلی استاتور به صورت فرمول های زیر می باشد:

$$b_{ti} = \frac{\pi D_i - S_1 b_{12}}{S_1} \quad (15-3)$$

$$b_{to} = \frac{\pi D_o - S_1 b_{12}}{S_1} \quad (16-3)$$

که بعد از محاسبه داریم: $b_{to} = 10.16mm$, $b_{ti} = 2.59mm$

برای محاسبه عمق یوغ استاتور داریم:

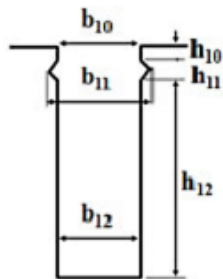
$$dc_1 = L_1 - h_{10} - h_{11} - h_{12} \quad (17-3)$$

بعد از محاسبه: $dc_1 = 17mm$

همچنین برای محاسبه عمق یوغ استاتور در [24] فرمولی به شکل زیر آمده است:

$$dc_1 = \frac{B_{\max} \times D_{avg}}{B_c \times \frac{P}{2}} \quad (18-3)$$

که بعد از محاسبه تقریبا ۲۰ میلی متر را پیش بینی می کند.



شکل ۳-۳: ابعاد قسمتهای مختلف استاتور

۳-۴-۱- طول فاصله هوایی:

برای محاسبه طول فاصله هوایی روابط زیادی وجود دارد که همگی تقریباً اعداد مشابهی را پیشنهاد می دهند:

$$g = \left(3.06 - \frac{6560}{D_{avg} + 2280}\right) \times 10^{-3} \quad [28] (3-19)$$

$$g = 0.2 + 2\sqrt{D_{avg} L} = 0.2 + \sqrt{D_o^2 - D_i^2} \quad (3-20)$$

$$g = 5 \times 10^{-3} \sqrt{\frac{D_{avg}^2 \times \pi}{2P}} \quad (3-21)$$

فرمولهای بالا همگی مقداری در حدود ۰.۳۵ را پیشنهاد می دهند، اما در عمل به دلیل مشکلات ساخت و جلوگیری از تغییر فرم و خرابی روتور و بلبرینگ ها، این مقدار حداقل ۰.۵ میلیمتر در نظر گرفته می شود.

۳-۴-۲- محاسبات سیم پیچی اصلی و کمکی:

ابتدا باید شار زیر هر قطب محاسبه گردد. طبق فرمولی که قبلاً محاسبه گردید

$$FIPP = B_{max} \times \frac{D_o^2 - D_i^2}{2P} = 0.00160wb$$

بدست می آید. که در این فرمول $B_{max} = 0.85T$

برای محاسبه ضریب سیم پیچی، با توجه به اینکه در این موتور تعداد شیار بر قطب بر فاز (q) را برابر ۲ فرض می کنیم،

ادامه محاسبات به شکل زیر است:

$$y_p = \frac{S_1}{P} = \frac{36}{6} = 6 \quad (3-22)$$

$$\gamma = \frac{180 \times P}{S_1} = 30^\circ \quad (3-23)$$

$$K_d = \frac{\sin(\frac{q\gamma}{2})}{q \sin(\frac{\gamma}{2})} = 0.9659 \quad (24-3)$$

توجه کنیم در موتورهای معمولی تکفاز معمولاً بدلیل در نظر گرفتن تعمیرات در آینده، سیم پیچی به صورت متحدالمرکز و در اکثر موارد سیم پیچی کمکی بر روی سیم پیچی اصلی قرار می گیرد اما در این موتور که همه استاتور با رزین پر می شود و امکان تعمیرات وجود ندارد، هر دو نوع سیم پیچی متحدالمرکز^{۲۸} و زنجیری^{۲۹} می تواند به کار رود و حتی می تواند سیم پیچی اصلی^{۳۰} بر روی سیم پیچی کمکی^{۳۱} قرار گیرد.

با توجه به اینکه در کارخانه نیرو تهویه سیم پیچی متحدالمرکز به کار می رود، در نتیجه محاسبات را با این نوع از سیم پیچی ادامه می دهیم.

۳-۴-۳- طراحی سیم پیچی:

برای بهبود موج mmf بهتر است سیم پیچی موتور به صورت دو طبقه و گام کوتاه باشد. در نتیجه محاسبات به شکل زیر انجام می شود:

چون معمولاً در موتورهای تکفاز، اتصال دور استفاده می شود، تعداد گروه کلافهای سیم پیچی اصلی برابر تعداد قطبهاست:

$$n_{main} = P = 6 \quad (25-3)$$

تعداد شیارهای استفاده شده برای سیم پیچ اصلی برابر Z_{main} است، آنگاه تعداد کلافهای هر گروه از کلاف اصلی برابر است با:

$$q_{main} = \frac{Z_{main}}{2n_{main}} = \frac{24}{2 \times 6} = 2 \quad (26-3)$$

با توجه به اینکه گام قطبی برابر ۶ است و قرار است که سیم پیچی گام کوتاه پیچیده شود، در نتیجه گام بزرگترین کلاف سیم پیچی اصلی برابر است با:

$$y_{Z_{main}} = y_p - 1 = 5 \quad (27-3)$$

همچنین تعداد گروه کلافهای سیم پیچی کمکی هم برابر تعداد قطبهاست:

²⁸ concentric

²⁹ Cross-connected

³⁰ Main winding

³¹ Auxiliary winding

$$n_{aux} = P = 6 \quad (28-3)$$

و تعداد شیارهای استفاده شده برای سیم پیچ کمکی برابر Z_{aux} است، آنگاه تعداد کلافهای هر گروه از کلاف کمکی برابر است با:

$$q_{aux} = \frac{Z_{aux}}{2n_{aux}} = \frac{24}{2 \times 6} = 2 \quad (29-3)$$

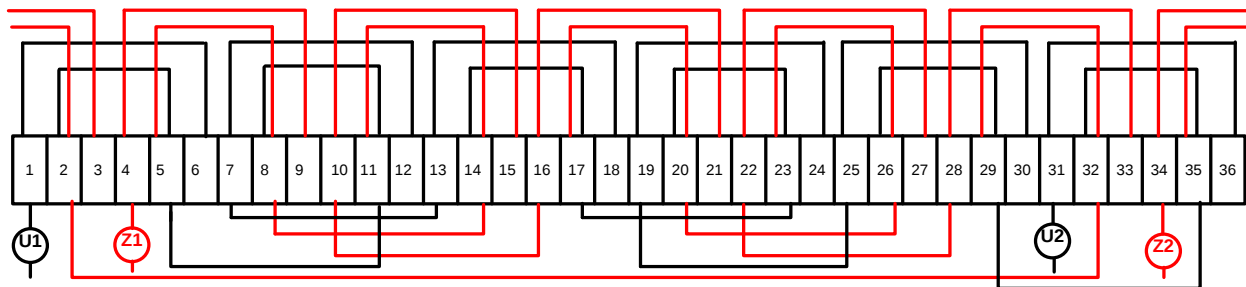
و با توجه به اینکه گام قطبی برابر ۶ است و قرار است که سیم پیچی گام کوتاه پیچیده شود، در نتیجه گام بزرگترین کلاف سیم پیچی کمکی برابر است با:

$$y_{z_{main}} = y_p - 1 = 5 \quad (30-3)$$

همچنین شیار شروع سیم پیچ کمکی و اصلی برابر است با:

$$\begin{cases} U_1 \rightarrow 1 \\ Z_1 \rightarrow 1 + \frac{90}{\gamma} = 4 \end{cases} \quad (31-3)$$

نمودار سیم پیچی پیشنهادی که از نوع گام کوتاه^{۳۲} با اتصال دور می باشد، به شکل زیر می باشد:



شکل ۳-۴: نقشه سیم پیچی موتور تکفاز ۳۶ شیاره ۶ قطب شار محور با سیم پیچی متحدالمرکز

برای محاسبه ضریب سیم پیچی در موتور با سیم پیچی متحدالمرکز به ترتیب زیر عمل می نماییم:

شماره کوئل	اسپان شیارها (گام کلاف)	فاکتور y_1	K_p
۱	۱ به ۶	$\frac{5}{6}$	$K_{p1} = \sin(\frac{\pi}{2} y_1) = 0.9659$
۲	۲ به ۵	$\frac{3}{6}$	$K_{p2} = \sin(\frac{\pi}{2} y_1) = 0.7071$

در نتیجه:

$$\sum K_p = 0.9659 + 0.7071 = 1.673$$

³² Short-pitch

و داریم:

$$\%N_1 = \frac{K_{P1} \times 100}{\sum K_P} = \%57.735 \quad (32-3)$$

$$\%N_2 = \frac{K_{P2} \times 100}{\sum K_P} = \%42.265 \quad (33-3)$$

و آنگاه ضریب سیم پیچی برای سیم پیچی اصلی به صورت زیر یافت می گردد:

$$K_{Wm} = \frac{K_{P1} \times \%N_1 + K_{P2} \times \%N_2}{100} \times K_d = 0.827 \quad (34-3)$$

۳-۴-۴- محاسبه تعداد دور سیم پیچ اصلی:

تعداد دور سری سیم پیچ اصلی تقسیم بر تعداد قطب از رابطه زیر یافت می شود:

$$T_{pc} = \frac{(1 - \Delta V \%) V_1}{4.44f \times FIPP \times K_{Wm} \times P} \quad (35-3)$$

با فرض $\Delta V \% = 2\%$ داریم: $T_{pc} \approx 124$

تعداد دور سری سیم پیچ اصلی از رابطه زیر یافت می شود.

$$T_m = T_{pc} \times P = 744 \quad (36-3)$$

تعداد کل هادیهای سیم پیچ اصلی از رابطه زیر یافت می شود:

$$N_m = 2 \times T_{pc} = 1488 \quad (37-3)$$

۳-۴-۵- محاسبه تعداد دور هر کلاف از گروه کلاف ها:

$$N_{1m} = \frac{\%N_1 \times T_{pc}}{100} \approx 72 \text{ turn} \quad (38-3)$$

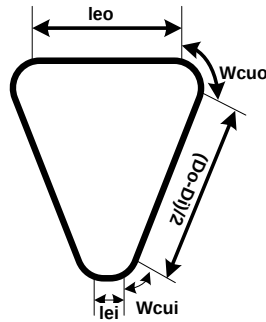
$$N_{2m} = \frac{\%N_2 \times T_{pc}}{100} \approx 54 \text{ turn} \quad (39-3)$$

۳-۴-۶- محاسبه طول سیم مصرفی:

با فرض $W_{CUi} = W_{CUo} = 1 \text{ cm}$ و $l_{ei} = 3 \text{ cm}$ و $l_{eo} = 8 \text{ cm}$

$$L_{mt} = T_{pc} \times (D_o - D_i + 2W_{cui} + 2W_{cuo} + l_{ei} + l_{eo}) = 29.35 \text{ m} \quad (40-3)$$

که در شکل زیر، این مقادیر نشان داده شده است:



شکل ۳-۵: نمودار اندازه قسمت های مختلف یک کلاف موتور

۳-۴-۷- محاسبه قطر سیم مصرفی در سیم پیچ اصلی:

همانطور که در فصل ۲ بیان شد، نسبت تبدیل اسکالر (a) به صورت تعداد دور سیم پیچی کمکی به اصلی تعریف می شود، طبق [21] نسبت تبدیل a عددی بین ۱ و ۲ است. در اینجا $a=1.2$ انتخاب شده است. همچنین مقدار راندمان ۰.۷ و مقدار کسینوس فی ۰.۹۵ در نظر گرفته شده است.

با توجه به فرمول پیشنهادی در [21] داریم:

$$I_{Lph} = \frac{P_{out}}{\eta \cos \phi} = 4.44A \quad (۴۱-۳)$$

$$I_{mph} = \frac{I_{Lph}}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{a}\right)^2}} = 3.40A \quad (۴۲-۳)$$

$$S_m = \frac{I_{mph}}{J_s} = 0.485mm^2 \quad (۴۳-۳)$$

$$d_m = \sqrt{\frac{4S_m}{\pi}} \approx 0.9mm \quad (۴۴-۳)$$

۳-۴-۸- محاسبه تعداد دور سیم پیچ کمکی:

چون سیم پیچ کمکی از نظر گام کلاف کاملاً مشابه سیم پیچ اصلی در نظر گرفته شده است در نتیجه

$$K_{Wm} = K_{Wa} = 0.827 \quad \text{تعداد دور سری سیم پیچ کمکی را می توان از رابطه زیر یافت:}$$

$$T_a = a \times T_m \times \frac{K_{Wm}}{K_{Wa}} = 1.2 \times 744 \approx 893 \quad (۴۵-۳)$$

و در نتیجه:

$$N_a = T_a \times 2 = 1786 \quad (46-3)$$

و

$$T_{pca} = \frac{T_a}{P} \simeq 150 \quad (47-3)$$

باز هم چون سیم پیچ از نوع متحدالمرکز است داریم:

شماره کویل	اسپان شیارها (گام کلاف)	فاکتور y_1	K_p
۱	۴ به ۹	$\frac{5}{6}$	$K_{p1} = \sin(\frac{\pi}{2} y_1) = 0.9659$
۲	۵ به ۸	$\frac{3}{6}$	$K_{p2} = \sin(\frac{\pi}{2} y_1) = 0.7071$

در نتیجه:

$$\sum K_p = 0.9659 + 0.7071 = 1.673$$

و داریم:

$$\%N_1 = \frac{K_{p1} \times 100}{\sum K_p} = \%57.735 \quad (48-3)$$

$$\%N_2 = \frac{K_{p2} \times 100}{\sum K_p} = \%42.265 \quad (49-3)$$

۳-۴-۹- محاسبه تعداد دور هر کلاف از گروه کلاف ها:

$$N_{1a} = \frac{\%N_1 \times T_{pca}}{100} \simeq 87turn \quad (50-3)$$

$$N_{2a} = \frac{\%N_2 \times T_{pca}}{100} \simeq 64turn \quad (51-3)$$

و آنگاه ضریب سیم پیچی واقعی برای سیم پیچی کمکی به صورت زیر یافت می گردد:

$$K_{Wa} = \frac{K_{p1} \times N_1 + K_{p2} \times N_2}{N_1 + N_2} \times K_d = 0.8562 \quad (52-3)$$

حالا می توان a واقعی را نیز به صورت زیر محاسبه کرد:

$$a = \frac{T_a}{T_m} \times \frac{K_{Wa}}{K_{Wm}} = \frac{893}{744} \times \frac{0.8562}{0.827} = 1.2426 \quad (53-3)$$

۳-۴-۱۰- محاسبه قطر سیم مصرفی در سیم پیچ کمکی:

$$I_{Lph} = \frac{P_{out}}{\eta N \cos \phi} = 4.44A \quad (54-3)$$

$$S_a = \frac{N_{1m}}{N_{1a}} \times S_m = \frac{72}{87} \times 0.485 = 0.4014 \quad (55-3)$$

$$d_a = \sqrt{\frac{4S_a}{\pi}} \approx 0.7mm \quad (56-3)$$

۳-۵- محاسبات ابعادی روتور:

برای انتخاب تعداد شیارهای روتور محدودیت هایی به شکل زیر وجود دارد: [26]

برای جلوگیری از خزش^{۳۳} و کوجینگ^{۳۴} باید $S_s \neq S_r, S_s - S_r \neq \pm 3P$

برای جلوگیری از نقاط نوک تیز^{۳۵} و کج شدگی^{۳۶} در نمودار "گشتاور سرعت" باید $S_s - S_r \neq \pm P, \pm 2P, \pm 5P$

برای جلوگیری از عملکرد نویزی باید $S_s - S_r \neq \pm 1, \pm 2, (\pm P \pm 1), (\pm P \pm 2)$

چون تعداد شیار استاتور ۳۶ است، طبق موارد بالا عدد ۴۵ برای تعداد میله های روتور یک عدد مناسب می باشد.

برای یافتن ابعاد روتور، باید به این موضوع توجه کرد که شاری که از قسمتهای فلزی روتور و استاتور می گذرد، یکی است،

پس در نتیجه:

$$\varphi_r = \varphi_s \quad (57-3)$$

پس:

$$L \times S_s \times b_{to_s} = L \times S_r \times b_{to_r} \quad (58-3)$$

سپس:

$$b_{to_r} = \frac{S_s}{S_r} \times b_{to_s} = \frac{36}{45} \times 10.16 = 8.2mm \quad (59-3)$$

گام دندان خارجی روتور از رابطه زیر یافت می شود:

³³ crawling

³⁴ cogging

³⁵ cusps

³⁶ hooks

$$G_{o_r} = \frac{\pi \times 173}{45} = 12.07 \text{ mm} \quad (۶۰-۳)$$

گام دندانه داخلی روتور نیز از رابطه زیر یافت می شود:

$$G_{i_r} = \frac{\pi \times 86}{45} = 6.00 \text{ mm} \quad (۶۱-۳)$$

عرض شیار در فاصله هوایی از رابطه زیر یافت می شود:

$$b_{22} = G_{o_r} - b_{to_r} = 12.07 - 8.2 = 3.87 \text{ mm} \quad (۶۲-۳)$$

جریان روتور به طور تقریبی از رابطه زیر یافت می شود:

$$I'_r = I_{mph} \times \cos \phi = 3.40 \times 0.95 = 3.23 \text{ A} \quad (۶۳-۳)$$

$$\frac{I'_r}{I_r} = \frac{S_r}{2mT_{ph}K_{W_m}} \quad (۶۴-۳)$$

$$I_r = \frac{2mT_{ph}K_{W_m}}{S_r} \times I'_r = \frac{2 \times 2 \times 744 \times 0.827}{45} \times 3.23 = 176.65 \text{ A} \quad (۶۵-۳)$$

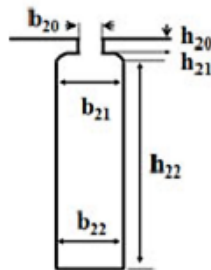
در اینجا $J_r = 4 \frac{A}{\text{mm}^2}$ انتخاب می گردد.

مساحت کلی قفس از رابطه ذیل بدست می آید:

$$S_{cage} = \frac{I_r}{J_r} = 44.16 \text{ mm}^2 \quad (۶۶-۳)$$

به طور تقریبی می توان عمق شیار روتور را از یافت:

$$h_{22} = \frac{S_{cage}}{b_{22}} = \frac{44.16}{3.87} = 11.41 \text{ mm} \quad (۶۷-۳)$$



شکل ۳-۶: ابعاد قسمت های مختلف روتور

همچنین جریان در حلقه انتهایی از رابطه زیر یافت می شود:

$$I_{end} = I_r \times \frac{S_r}{\pi \times P} = 176.65 \times \frac{45}{\pi \times 6} = 421.73 \text{ A} \quad (۶۸-۳)$$

مساحت حلقه انتهایی نیز به شکل زیر است:

$$S_{end} = \frac{I_{end}}{J_r} = 105.43 \text{ mm}^2 \quad (3-69)$$

طبق [4] عمق یوغ روتور و طول روتور از رابطه های زیر یافت می شود:

$$dc_2 = 0.95 \times dc_1 = 0.95 \times 17 = 16.15 \text{ mm}$$

$$L_2 = dc_2 + h_{20} + h_{21} + h_{22} = 28.86 \text{ mm}$$

اما در پروسه تولید در کارخانه نیرو تهویه ، اندازه عمق یوغ روتور ۱۹.۵ میلیمتر انتخاب شده است که دلیل آن مقدار جایی است که برای پیچ کردن و سوراخکاری روی روتور جهت بستن فن به کار می رود.

طبق [4] زاویه کج شدگی شیارهای روتور از رابطه زیر یافت می شود:

$$\alpha_{skew} = \left(\frac{360}{S_1} \times \frac{P}{2} \right)^\circ = 30^\circ \quad (3-70)$$

اما به دلیل مشکلات ساخت معمولاً این زاویه را بین ۱۵ تا ۲۰ درجه در نظر می گیرند.

و طول واقعی میله های روتور به ازای $\alpha_{skew} = 15^\circ$ برابر است با:

$$L_b = \left(\frac{D_o - D_i}{2 \cos \alpha_{skew}} \right) = 41.87 \text{ mm} \quad (3-71)$$

۳-۶- محاسبات آمپر دور و ضریب اشباع:

اگر هسته وارد اشباع شود، دیگر رلوکتانس مغناطیسی هسته در مقایسه با رلوکتانس فاصله هوایی کم نیست و نمی توان از آن چشم پوشی کرد. به همین دلیل محاسباتی برای آمپر دور انجام می شود و در نهایت ضریبی به نام ضریب اشباع^{۳۷} تعریف می-شود که باید عددی بین ۱.۰۱ و ۱.۲۵ باشد، تا صحت محاسبات تایید شود. [27]

الگوریتم یافتن آمپر دور به صورت ذیل است:

الف) یافتن شار هر قسمت

ب) یافتن سطح مقطع هر قسمت

ج) یافتن چگالی شار هر قسمت

د) یافتن شدت میدان مغناطیسی از روی منحنی مغناطیسی

³⁷ Saturation factor

ه) یافتن طول مسیر مغناطیسی

و) یافتن آمپر دور

۳-۶-۱- یافتن آمپر دور فاصله هوایی:

با توجه به اینکه طول فاصله هوایی در مقابل عبور شار، در تمام نقاط یکسان نیست، به همین دلیل ضریبی به نام کارتر^{۳۸} در محاسبات ظاهر می شود. مقدار این ضریب عددی بین ۱.۲ تا ۱.۶ می باشد. این ضریب معمولاً به صورت حاصلضرب ضریب کارتر روتور و ضریب کارتر استاتور تعریف می شود.

$$K_{cs} = \frac{t_s}{t_s - g \times \frac{4}{\pi} \left(\frac{b_{10}}{2g} \tan^{-1} \left(\frac{b_{10}}{2g} \right) - \ln \sqrt{1 + \left(\frac{b_{10}}{2g} \right)^2} \right)} = 1.46 \quad (۷۲-۳)$$

$$K_{cr} = \frac{t_r}{t_r - g \times \frac{4}{\pi} \left(\frac{b_{20}}{2g} \tan^{-1} \left(\frac{b_{20}}{2g} \right) - \ln \sqrt{1 + \left(\frac{b_{20}}{2g} \right)^2} \right)} = 1.03 \quad (۷۳-۳)$$

$$K_c = K_{cs} \times K_{cr} = 1.47 \quad (۷۴-۳)$$

t_s و t_r گام متوسط شیار استاتور و گام متوسط شیار روتور می باشد.

این پارامترها با فرمولهای زیر یافت می شود.

$$t_s = \frac{\pi}{2S_s} (D_o + D_i) = 0.0114 \quad (۷۵-۳)$$

$$t_r = \frac{\pi}{2S_r} (D_o + D_i) = 0.0091 \quad (۷۶-۳)$$

طول موثر فاصله هوایی بوسیله رابطه زیر یافت می شود:

$$L_g = K_c \times g = 0.88mm \quad (۷۷-۳)$$

سطح مقطع فاصله هوایی برابر است با:

$$A_{ag} = \frac{\pi}{4P} (D_o^2 - D_i^2) = 2.96 \times 10^{-3} m^2 \quad (۷۸-۳)$$

و چگالی شار فاصله هوایی :

$$B_g = \frac{FIPP}{0.637A_{ag}} = 0.85T \quad (۷۹-۳)$$

و در نتیجه:

³⁸ Carter's coefficient

$$AT_{ag} = \frac{1}{\mu_0} B_g L_g = 597.66 \quad (۸۰-۳)$$

۳-۶-۲- یافتن آمپر دور دندانه استاتور:

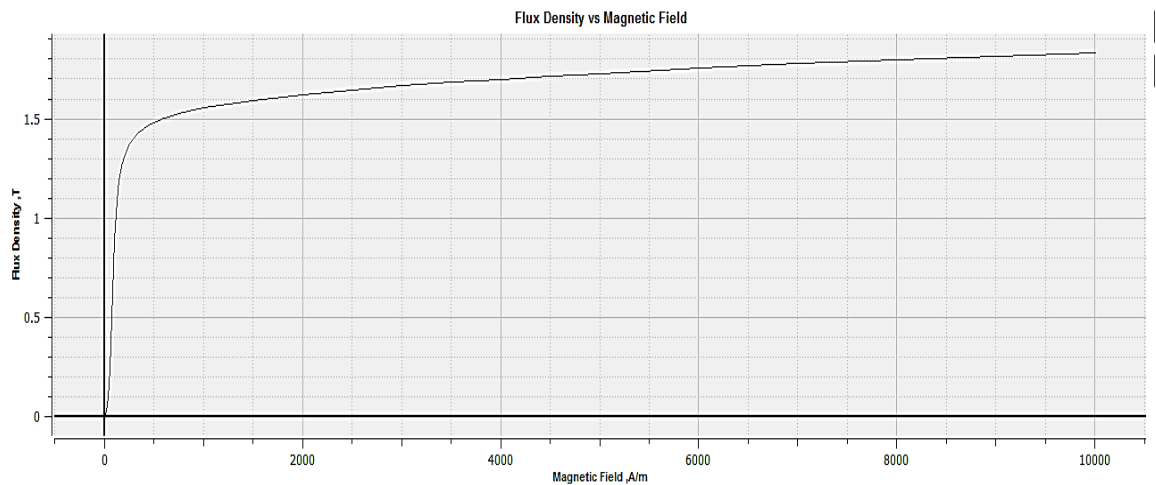
سطح مقطع دندانه های استاتور زیر یک قطب برابر است با:

$$A_{t_s} = \frac{S_s}{4P} (b_{ti \min} + b_{to \min}) k_i (D_o - D_i) = 15.75 \times 10^{-4} m^2 \quad (۸۱-۳)$$

در این رابطه k_i ضریب تورق می باشد، که در حدود ۰.۹۵ است.

و چگالی شار دندانه استاتور برابر است با:

$$B_{t_s} = \frac{FIPP}{0.637 \times A_{t_s}} = 1.595 T \quad (۸۲-۳)$$



شکل ۳-۷: منحنی B-H هسته از جنس فولاد M470

با توجه به منحنی B-H هسته : $H=1500$ و با توجه به طول مسیر شار در دندانه داریم: $L=h_{10}+h_{11}+h_{12}= 33mm$

آنگاه آمپر دور دندانه:

$$AT_{t_s} = H L = 49.5 \quad (۸۳-۳)$$

۳-۶-۳- یافتن آمپر دور دندانه روتور:

سطح مقطع دندانه های روتور زیر یک قطب برابر است با:

$$A_{t_r} = \frac{S_r}{4P} (b_{tri \min} + b_{tro \min}) k_i (D_o - D_i) = 0.001586 m^2 \quad (۸۴-۳)$$

و چگالی شار دندانه روتور برابر است با:

$$B_{t_r} = \frac{FIPP}{0.637 \times A_{t_r}} = 1.585T \quad (۸۵-۳)$$

با توجه به منحنی B-H هسته : $H=1400$ و با توجه به طول مسیر شار در دندان داریم: $L=h_{20}+h_{21}+h_{22}=11mm$
 آنگاه آمپر دور دندان:

$$AT_{t_r} = H.L = 15.4 \quad (۸۶-۳)$$

۳-۶-۴- یافتن آمپر دور یوغ استاتور:

$$A_{c_s} = dc_1 \times \frac{D_o - D_i}{2} \times k_i = 6.89 \times 10^{-4} m^2 \quad (۸۷-۳)$$

شار عبوری از یوغ استاتور $\frac{FIPP}{2}$ است پس:

$$B_{c_s} = \frac{FIPP}{2A_{c_s}} = 1.16T \quad (۸۸-۳)$$

$$L = \frac{\pi D_{avg}}{P} = 0.068m \quad \text{با توجه به منحنی B-H هسته : } H=250 \text{ و با توجه به طول مسیر شار در یوغ داریم:}$$

آنگاه آمپر دور یوغ :

$$AT_{c_s} = H.L = 13.64 \quad (۸۹-۳)$$

۳-۶-۵- یافتن آمپر دور یوغ روتور:

$$A_{c_r} = dc_2 \times \frac{D_o - D_i}{2} \times k_i = 6.65 \times 10^{-4} m^2 \quad (۹۰-۳)$$

شار عبوری از یوغ روتور $\frac{FIPP}{2}$ است پس:

$$B_{c_r} = \frac{FIPP}{2A_{c_r}} = 1.2T \quad (۹۱-۳)$$

$$L = \frac{\pi D_{avg}}{P} = 0.068m \quad \text{با توجه به منحنی B-H هسته : } H=250 \text{ و با توجه به طول مسیر شار در یوغ داریم:}$$

آنگاه آمپر دور یوغ :

$$AT_{c_r} = H.L = 17.06 \quad (۹۲-۳)$$

۳-۶-۶- محاسبه ضریب اشباع:

آمپر دور کل برابر است با:

$$AT_t = AT_{ag} + AT_{t_s} + AT_{t_r} + AT_{c_s} + AT_{c_r} = 692 \quad (93-3)$$

و ضریب اشباع :

$$Sat.f = \frac{AT_t}{AT_{ag}} = 1.1583 \quad (94-3)$$

۳-۷-محاسبه پارامترهای مدار معادل پیشنهادی:

۳-۷-۱-محاسبه مقاومت سیم پیچ اصلی:

باتوجه به اینکه سیم از نوع مسی است در نتیجه، مقاومت ویژه مس در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد برابر است با:

$$\rho_{20^\circ} = 0.0178 \times 10^{-6} \Omega.m \quad \text{و ضریب حرارتی ویژه مس برابر است با: } \alpha = 0.004 \frac{1}{^\circ C}$$

$$\rho_{75^\circ} = \rho_{20^\circ} (1 + \alpha \Delta t) = 2.17 \times 10^{-8} \Omega.m \quad (95-3)$$

$$S_m = \frac{\pi d_m^2}{4} \quad \text{و} \quad L_{mt} = 29.35m \quad \text{با توجه به اینکه:}$$

$$R_{sm} = \rho_{75^\circ} \frac{L_{mt} \times P}{S_m} = 6.01 \Omega \quad (96-3)$$

معمولا اثر پوستی با ضریبی بین ۱.۱ تا ۱.۳ مدل می شود در اینجا ۱.۲ منظور شده است:

$$R_{smAC} = 1.2 \times R_{sm} = 7.21 \Omega \quad (97-3)$$

تلفات مسی سیم پیچ اصلی نیز برابر است با:

$$P_{cum} = R_{smAC} \times I_{mph}^2 \quad (98-3)$$

۳-۷-۲-محاسبه مقاومت سیم پیچ کمکی:

با توجه به اینکه $T_{pca} \simeq 150$:

$$L_{at} = T_{pca} \times (D_o - D_i + 2W_{cui} + 2W_{cuo} + l_{ei} + l_{eo}) = 35.50m \quad (99-3)$$

$$S_a = \frac{\pi d_a^2}{4} \quad \text{و پس:}$$

$$R_{sa} = \rho_{75^\circ} \frac{L_{at} \times P}{S_a} = 12 \Omega \quad (100-3)$$

با توجه به اثر پوستی:

$$R_{saAC} = 1.2 \times R_{sa} = 14.4 \Omega \quad (101-3)$$

تلفات مسی سیم پیچ کمکی نیز برابر است با:

$$P_{cua} = R_{saAC} \times I_{aph}^2 \quad (102-3)$$

۳-۷-۳- محاسبه مقاومت اهمی و تلفات روتور:

باتوجه به اینکه میله های روتور^{۳۹} از نوع آلومینیوم است در نتیجه، مقاومت ویژه آلومینیوم، در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد برابر است با: $\rho_{20^\circ} = 0.0277 \times 10^{-6} \Omega.m$ و ضریب حرارتی ویژه آلومینیوم برابر است با:

$$\alpha = 0.00403 \frac{1}{^\circ C}$$

$$\rho_{75^\circ} = \rho_{20^\circ} (1 + \alpha \Delta t) = 3.38 \times 10^{-8} \Omega.m \quad (103-3)$$

برای محاسبه مقاومت روتور فرمول ۳-۱۰۴ در منابع مختلف پیشنهاد شده است:

$$R_r = \rho_{75^\circ} \left(\frac{D_o - D_i}{2A_b N_b \cos \alpha_{skew}} + \frac{1}{\pi} \frac{K_{R_{in}} D_{m_{in}} + K_{R_{out}} D_{m_{out}}}{P^2 S_{end}} \right) = 1.57 \times 10^{-6} \Omega \quad (104-3)$$

مقاومت منتقل شده از دید سیم پیچ اصلی به سمت استاتور برابر است با:

$$R'_{rm} = P \times N_m^2 \times K_{Wm}^2 \times R_r = 13.88 \Omega \quad (105-3)$$

مقاومت منتقل شده از دید سیم پیچ کمکی به سمت استاتور برابر است با:

$$R'_{ra} = a^2 R'_{rm} = 19.68 \Omega \quad (106-3)$$

جریان در میله های روتور برابر است با:

$$I'_r = I_{mph} \times \cos \phi = 3.40 \times 0.95 = 3.23 A \quad (107-3)$$

در نتیجه تلفات ژولی میله های روتور از دید سیم پیچ اصلی نیز برابر است با:

$$P_{cur} = R'_{rm} \times I_r'^2 = 145.02 W \quad (108-3)$$

همچنین می توان تلفات ژولی میله های روتور را از دید سیم پیچ کمکی بدست آورد:

$$P_{cur} = R'_{ra} \times I_r'^2 \quad (109-3)$$

۳-۸-۱- محاسبه راکتانس ها:

راکتانس های ناشی موتور شامل راکتانس ناشی شیار (X_{ss})، راکتانس زیگزآگ (X_{zz})، راکتانس کله سیم ها (X_e)،

راکتانس ناشی کمربندی (X_{belt})، راکتانس کج شدگی (X_{skew}) و راکتانس مغناطیس کننده (X_m) و راکتانس ناشی

روتور (X_r) است.

۳-۸-۱- راکتانس ناشی شیار (X_{ss}):

$$X_{ss} = 2.512 \times K_x \times (K_{s1} C_x + K_{s2} \frac{S_1}{S_2}) \times \frac{D_o - D_i}{2S_1} = 0.1582 \Omega \quad (110-3)$$

که در این فرمول:

$$K_x = 2\pi f (N_m K_{Wm})^2 \times 10^{-8} = 4.63 \quad (111-3)$$

³⁹ Rotor bars

$$K_{s1} = \frac{h_{12}}{3b_{12}} \times \frac{h_{12}}{b_{12}} + \frac{h_{10} + h_{11}}{b_{12}} = 11.5 \quad (112-3)$$

$$K_{s2} = \frac{h_{22}}{3b_{22}} \times \frac{h_{22}}{b_{22}} + \frac{h_{20}}{b_{20}} + \frac{2 \times h_{21}}{b_{20} + b_{21}} = 3.32 \quad (113-3)$$

همچنین C_x ضریب تصحیح دلخواه است و برای سیم پیچی دو فاز ۰.۷۵ است.

۳-۸-۲- راکتانس زیگزاگ (X_{zz}):

راکتانس زیگزاگ به وضعیت نسبی استاتور و روتور و پهنای دندانه های روبروی هم بستگی دارد.

$$X_{zz} = K_x \times K_{zz} \times \frac{0.838 \times (D_o - D_i)}{2S_1 L_g} = 5.315\Omega \quad (114-3)$$

که در این فرمول:

$$K_{zz} = \frac{\pi(D_o + D_i)(S_1 + S_2) - 2S_1 S_2 (b_{10} + b_{20})}{\pi(D_o + D_i)(S_1 + S_2)} = 0.6825 \quad (115-3)$$

۳-۸-۳- راکتانس کله سیم ها (X_e):

راکتانسی که بدلیل شار نشستی در کله سیم ها بوجود می آید.

$$X_e = 1.236 \times K_x \times D_g \times \frac{T_{pc} / T_{pp}}{S_1 P} = 0.0035\Omega \quad (116-3)$$

که در این فرمول T_{pc} تعداد دور بر کوئل و T_{pp} تعداد دور بر قطب است. که در این موتور خاص، هر دو عدد یکی هستند.

۳-۸-۴- راکتانس نشستی کمربندی (X_{belt}):

راکتانس تفاضلی یا کمربندی به علت تفاوت در شکل موج نیروی محرکه روتور و استاتور که بر روی هم تزویج

ایجاد می- کنند، به وجود می آید.

$$X_{belt} = 9.29 \times 10^{-3} K_x K_B \frac{\pi(D_o^2 - D_i^2)}{4K_{ag} L_g \times sat.f \times P} = 0.07456\Omega \quad (117-3)$$

در این فرمول K_{ag} ضریبی است که از رابطه زیر یافت می شود: [14]

$$K_{ag} = \frac{\pi(D_o + D_i)}{\pi(D_o + D_i) - 2S_r b_{20} K_{cr}} \times \frac{\pi(D_o + D_i)}{\pi(D_o + D_i) - 2S_s b_{10} K_{cs}} = 1.47 \quad (118-3)$$

که در این فرمول K_{cs} و K_{cr} ضریب کارتر استاتور و روتور هستند.

۳-۸-۵- راکتانس کج شدگی (X_{skew}):

راکتانسی است که بدلیل کج بودن میله های روتور نیروی محرکه ای تولید می کند.

$$X_{skew} = \frac{0.2546 \times \pi (D_o^2 - D_i^2)}{4K_{ag} L_g \times sat.f \times P} \times \frac{K_p \times K_x}{4} \times \left(\frac{\alpha_{skew}}{100} \right)^2 = 0.02349\Omega \quad (۱۱۹-۳)$$

۳-۸-۶- راکتانس نشتی کل از دید سیم پیچ اصلی:

از جمع کلیه راکتانس ها، راکتانس نشتی کل استاتور محاسبه می گردد.

$$X_{sm} = X_{ss} + X_{zz} + X_e + X_{belt} + X_{skew} = 5.5748\Omega \quad (۱۲۰-۳)$$

۳-۸-۷- راکتانس نشتی کل از دید سیم پیچ کمکی:

$$X_{sa} = a^2 X_{lm} = 7.901\Omega \quad (۱۲۱-۳)$$

۳-۸-۸- راکتانس مغناطیس کننده (X_m):

$$X_m = \frac{0.2546 \times \pi (D_o^2 - D_i^2) K_x}{4K_{ag} L_g \times sat.f \times P} \times \frac{\sin(\alpha_{skew} / 2)}{\pi \times \alpha_{skew} / 360} = 130\Omega \quad (۱۲۲-۳)$$

۳-۹- محاسبات وزنی:

با توجه به وزن مخصوص آلومینیوم (۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب) و وزن مخصوص فولاد (۷۸۰۰) و وزن مخصوص

مس (۸۹۰۰) می توان محاسبات را انجام داد.

جرم آلومینیوم حلقه های روتور از رابطه زیر یافت می شود:

$$W_{ALr} = (L_b \times A_b \times N_b) \times \rho_{AL} \times 10^{-6} = 41.87 \times 44.16 \times 45 \times 2700 \times 10^{-6} = 0.225kg \quad (۱۲۳-۳)$$

برای محاسبه جرم هسته روتور:

$$W_{cr} = \rho_c (L_2 \times \left(\frac{\pi(D_o^2 - D_i^2)}{4} \right) - A_b N_b L_b) = 3.4Kg \quad (۱۲۴-۳)$$

برای محاسبه جرم حلقه های آلومینیومی انتهایی :

$$W_{ALe} = 1.2Kg \quad (۱۲۵-۳)$$

برای محاسبه وزن هسته استاتور:

$$W_{cs} = \rho_c (L_1 \times \left(\frac{\pi(D_o^2 - D_i^2)}{4} \right) - (h_{12} + h_{11} + h_{10}) \times b_{12} \times S_s (D_o - D_i)) = 3.9Kg \quad (۱۲۶-۳)$$

برای محاسبه وزن سیم پیچ ها:

$$W_{cus} = \rho_{cu} ((L_{mt} \times S_m \times P) + (L_{at} \times S_a \times P)) = 1.1Kg \quad (۱۲۷-۳)$$

۳-۱۰- محاسبه خازن:

با توجه به اینکه نسبت تبدیل تعداد دور سیم پیچ کمکی به اصلی برابر a است و این مقدار برابر نسبت تبدیل ولتاژها

و معکوس جریانها است در نتیجه:

$$a = \frac{I_{mph}}{I_{aph}} = \frac{V_{an}}{V_{mn}} = 1.19 \quad (۱۲۸-۳)$$

پس:

$$I_{aph} = \frac{I_{mph}}{a} = 2.86A \quad (۱۲۹-۳)$$

و:

$$V_{an} = V_{mn} \times a = 261.9V \quad (۱۳۰-۳)$$

آنگاه مقدار ولتاژ دو سر خازن از رابطه زیر یافت می شود:

$$V_c = \sqrt{V_s^2 + V_{an}^2} = 342.04V \quad (۱۳۱-۳)$$

و ظرفیت خازن برابر است با:

$$C = \frac{I_a}{2\pi f \times V_c} \approx 25\mu F \quad (۱۳۲-۳)$$

۳-۱۱- پارامترهای مهم محاسبه شده:

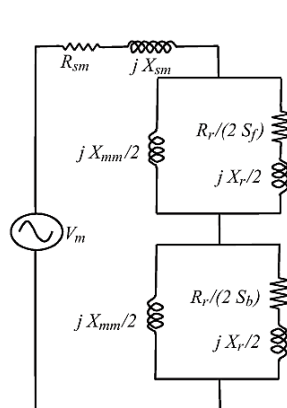
نام پارامتر	مقدار محاسبه شده برای موتور مورد نظر
نسبت تبدیل اسکالر	$a = 1.2$
تعداد دور سیم پیچ اصلی	$N_{1_m} = 72turn \quad N_{2_m} = 54turn$
قطر سیم پیچی اصلی	$d_m = 0.9mm$
تعداد دور سیم پیچ کمکی	$N_{1_a} = 87turn \quad N_{2_a} = 64turn$
قطر سیم پیچی کمکی	$d_a = 0.7mm$
مقاومت سیم پیچ اصلی در حین کار	$R_{smAC} = 7.21\Omega$
مقاومت سیم پیچ کمکی در حین کار	$R_{saAC} = 14.4\Omega$
مقاومت روتور در حین کار	$R'_{rm} = 13.88\Omega \quad R'_{ra} = 19.68\Omega$
راکتانس نشتی کلی استاتور	$X_{sm} = 5.5748\Omega \quad X_{sa} = 7.901\Omega$
راکتانس نشتی کلی روتور	$X'_r = 3.37\Omega$
راکتانس مغناطیس کننده	$X_m = 130\Omega$
مقدار خازن	$c = 25\mu F \quad X_c = 127.3\Omega$
فاصله هوایی	$g = 0.6mm$
فاصله هوایی موثر با اعمال ضریب کارتر	$L_g = 0.88mm$
چگالی شار متوسط فاصله هوایی	$B_{av} = 0.55T$
چگالی شار ماکزیمم فاصله هوایی	$B_g = 0.85T$
چگالی شار ماکزیمم دندان استاتور	$B_{ts} = 1.595T$
چگالی شار ماکزیمم دندان روتور	$B_{tr} = 1.585T$
چگالی شار ماکزیمم یوغ استاتور	$B_{cs} = 1.16T$
چگالی شار ماکزیمم یوغ روتور	$B_{cr} = 1.2T$
عرض شیار استاتور	$b_{10} = b_{12} = 5.6mm$
عرض شیار روتور	$b_{21} = b_{22} = 3.87mm$
عمق شیار استاتور	$h_{12} = 30mm$
عمق شیار روتور	$h_{22} = 11.41mm$
عمق یوغ استاتور	$dc_1 = 17mm$
عمق یوغ روتور	$dc_2 = 16.15mm$
طول کل استاتور	$L_1 = 50mm$
طول کل روتور	$L_2 = 28.86mm$
وزن کل روتور	$W_s = 4.8Kg$
وزن کل استاتور	$W_s = 5Kg$

جدول ۳-۱: پارامترهای مهم موتور مورد نظر

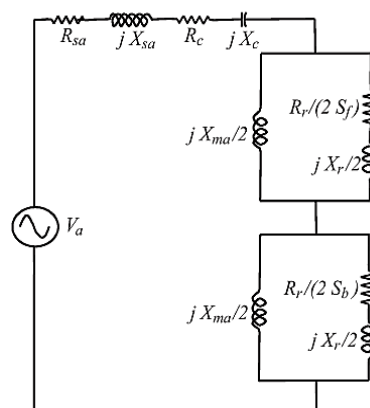
۳-۱۲- مدار معادل پیشنهادی تحلیل عملکرد موتور:

۳-۱۲-۱- مدار معادل سیم پیچ کمکی و اصلی:

همان طور که در فصل ۲ اشاره شد، طبق [8] مدار معادل سیم پیچ های کمکی و اصلی به صورت زیر می باشد:

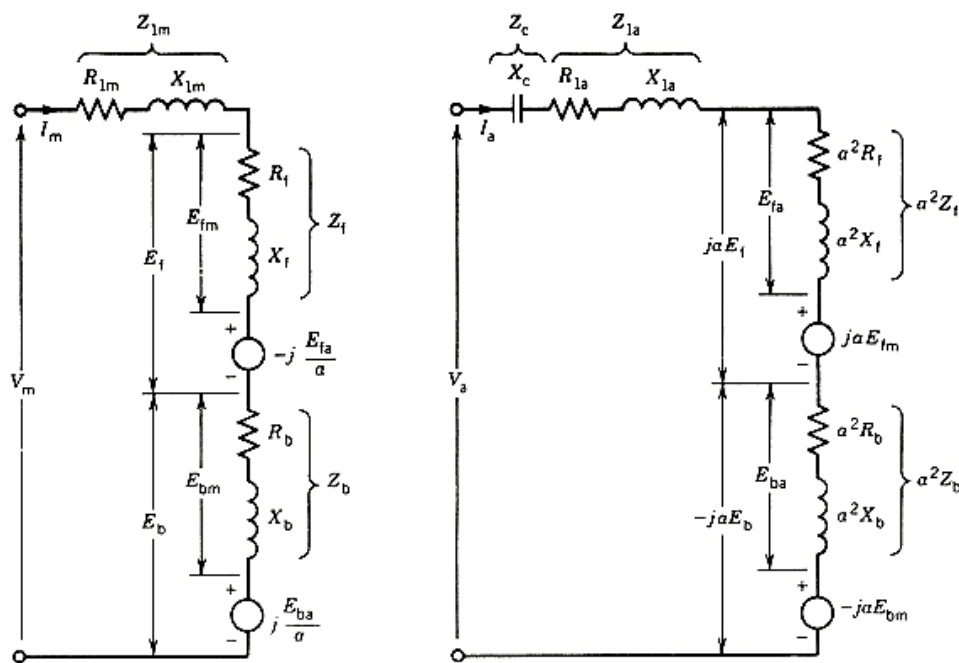


شکل ۳-۹: مدار معادل سیم پیچ اصلی



شکل ۳-۸: مدار معادل سیم پیچ کمکی

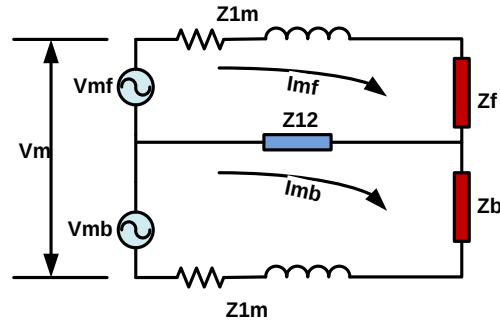
در [19] یک مدار معادل برای موتور خازن دایم، به شکل زیر برای حالت دایمی پیشنهاد شده است.



شکل ۳-۱۰: مدار معادل کلی موتور تکفاز با خازن

اما راه حلی که بیشتر در منابع به کار رفته است، در ادامه بحث برای محاسبات عملکردی مد نظر قرار می گیرد.

و مدار معادل کلی حالت دایمی، طبق [11,12,25,34,35] به شکل زیر پیشنهاد شده است:



شکل ۳-۱۱: مدار معادل کلی موتور تکفاز با خازن

در این شکل پارامترها با فرمولهای زیر یافت می شود:

$$\tilde{Z}_f = jX_m \parallel \left(\frac{R'_r}{s} + jX'_r \right) = R_f + jX_f \quad (۳-۱۳۳)$$

$$\tilde{Z}_b = jX_m \parallel \left(\frac{R'_r}{(2-s)} + jX'_r \right) = R_b + jX_b \quad (۳-۱۳۴)$$

$$\tilde{Z}_{1a} = (R_{sa} + jX_{sa}) - jX_c \quad (۳-۱۳۵)$$

$$\tilde{Z}_{12} = \frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{Z}_{1a}}{a^2} - \tilde{Z}_{1m} \right) \quad (۳-۱۳۶)$$

$$\tilde{V}_{mf} = \frac{1}{2} \left(\tilde{V}_m - j \frac{\tilde{V}_a}{a} \right) \quad (۳-۱۳۷)$$

$$\tilde{V}_{mb} = \frac{1}{2} \left(\tilde{V}_m + j \frac{\tilde{V}_a}{a} \right) \quad (۳-۱۳۸)$$

$$\tilde{I}_{mf} = \frac{\tilde{V}_{mf} (\tilde{Z}_{1m} + \tilde{Z}_b + \tilde{Z}_{12}) + \tilde{V}_{mb} \tilde{Z}_{12}}{(\tilde{Z}_{1m} + \tilde{Z}_b + \tilde{Z}_{12})(\tilde{Z}_{1m} + \tilde{Z}_f + \tilde{Z}_{12}) - \tilde{Z}_{12}^2} \quad (۳-۱۳۹)$$

$$\tilde{I}_{mb} = \frac{\tilde{V}_{mb} (\tilde{Z}_{1m} + \tilde{Z}_f + \tilde{Z}_{12}) + \tilde{V}_{mf} \tilde{Z}_{12}}{(\tilde{Z}_{1m} + \tilde{Z}_b + \tilde{Z}_{12})(\tilde{Z}_{1m} + \tilde{Z}_f + \tilde{Z}_{12}) - \tilde{Z}_{12}^2} \quad (۳-۱۴۰)$$

$$\tilde{I}_m = \tilde{I}_{mf} + \tilde{I}_{mb} \quad (۳-۱۴۱)$$

$$\tilde{I}_a = \frac{j}{a} (\tilde{I}_{mf} - \tilde{I}_{mb}) \quad (۳-۱۴۲)$$

$$\tilde{I}_L = \tilde{I}_m + \tilde{I}_a = |I_L| \angle \phi_1 \quad (۳-۱۴۳)$$

$$T = \frac{2}{\omega_s} (|I_{mf}|^2 R_f - |I_{mb}|^2 R_b) \quad (۳-۱۴۴)$$

$$P_{mech} = T \cdot \omega_s \quad (۳-۱۴۵)$$

$$P_{out} = P_{mech} - P_{rot} \quad (۳-۱۴۶)$$

$$P_{in} = V_m I_L \cos \phi_1 \quad (۳-۱۴۷)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (۱۴۸-۳)$$

برای محاسبه پارامترها یک فایل اکسل نوشته شد و طبق فرمول های گفته شده در بالا در حالت راه اندازی و حالت کار

مقادیر زیر محاسبه گردید:

حالت راه اندازی (s=1):

$$I_{L\text{ start}} = 8.6A \quad (۱۴۹-۳)$$

$$T_{\text{start}} = 5.82Nm$$

حالت کار با s=0.1 با فرض Prot=70w :

$$I_L = 3.34A \quad (۱۵۰-۳)$$

$$T = 5.15Nm$$

$$\cos \phi_1 = 0.97$$

$$\eta = 0.58$$

۳-۱۳- محاسبات عملکردی (جریان، گشتاور، کسینوس فی و راندمان):

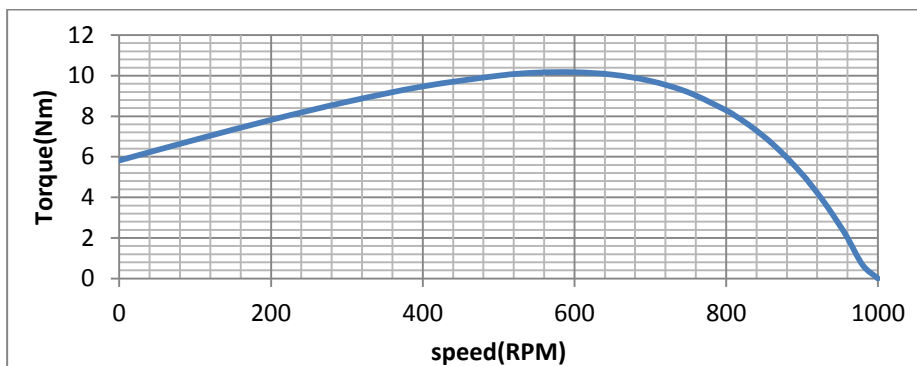
با توجه به فایل اکسل نوشته شده جدولی به شکل زیر رسم شد و از روی آن نمودارهای مختلف رسم گردید:

s	nr	efficiency	T	il	COSphi	im	ia	<il	<im	<ia
0	1000	0	0	0	0	0	0	90	-180	0
0.02	980	0.054	0.66	1.98	0.84	1.21	3.16	33.16	-161.5	27.61
0.04	960	0.28	2	2.33	0.9	0.74	3.06	26.12	-146.4	27.93
0.05	950	0.37	2.6	2.5	0.92	0.57	3.02	23.36	-130.33	28.13
0.07	930	0.49	3.72	2.84	0.95	0.5	2.93	18.14	-76.44	28.55
0.09	910	0.56	4.7	3.18	0.96	0.79	2.85	15.29	-43.64	29.05
0.1	900	0.58	5.15	3.34	0.97	0.98	2.81	13.77	-36.32	29.33
0.12	880	0.61	5.96	3.65	0.98	1.38	2.74	11.13	-28.58	29.91
0.14	860	0.62	6.67	3.95	0.988	1.77	2.67	8.9	-24.86	30.55
0.15	850	0.62	6.99	4.09	0.99	1.96	2.63	7.9	-23.72	30.89
0.17	830	0.61	7.57	4.37	0.994	2.33	2.57	6.1	-22.22	31.61
0.19	810	0.6	8.07	4.63	0.997	2.69	2.51	4.51	-21.36	32.37
0.2	800	0.597	8.29	4.76	0.998	2.86	2.48	3.79	-21.09	32.77
0.25	750	0.55	9.18	5.35	0.999	3.65	2.35	0.67	-20.54	34.89
0.3	700	0.5	9.74	5.86	0.999	4.35	2.24	-1.79	-20.69	37.21
0.35	650	0.44	10.05	6.31	0.997	4.98	2.15	-3.8	-21.09	39.67
0.4	600	0.39	10.17	6.7	0.995	5.52	2.07	-5.47	-21.59	42.23
0.45	550	0.33	10.15	7.05	0.993	6.01	2.01	-6.87	-22.11	44.85
0.5	500	0.28	10	7.35	0.99	6.44	1.96	-8.06	-22.61	47.49
0.6	400	0.19	9.47	7.83	0.985	7.16	1.89	-9.91	-23.5	52.75
0.7	300	0.11	8.71	8.17	0.98	7.71	1.86	-11.22	-24.21	57.83
0.8	200	0.052	7.82	8.41	0.977	8.13	1.84	-12.1	-24.73	62.67
0.9	100	0	6.84	8.55	0.975	8.42	1.84	-12.6	-25.1	67.23
1	0	0	5.82	8.6	0.975	8.61	1.87	-12.76	-25.2	71.55

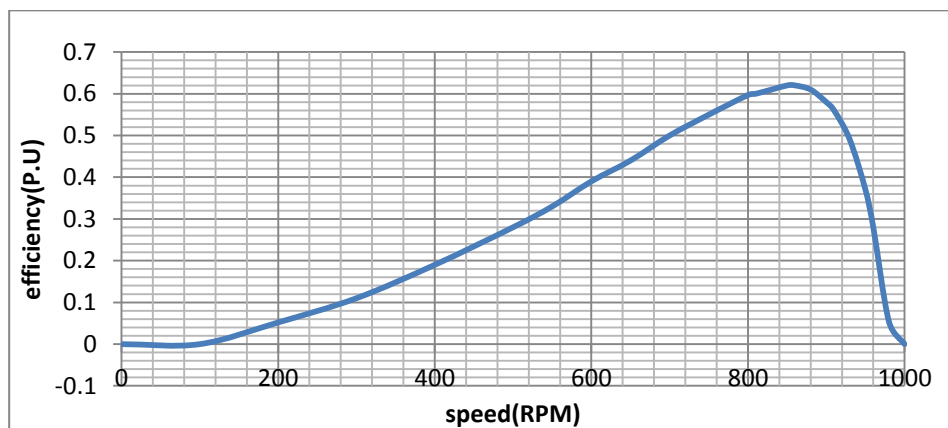
جدول ۳-۲: جدول محاسبه پارامترهای عملکرد موتور

۳-۱۳-۱- نمودارهای ترسیم شده:

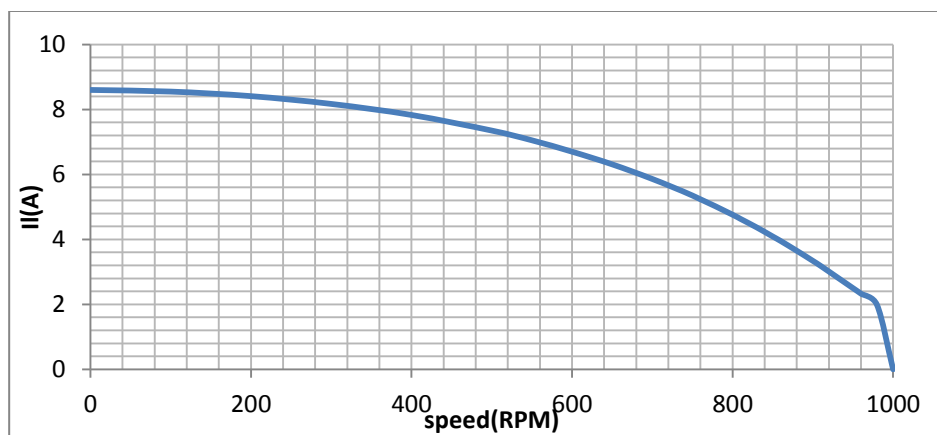
با توجه به جدول ۳-۲ نمودارهای خروجی به شکل زیر رسم گردید:



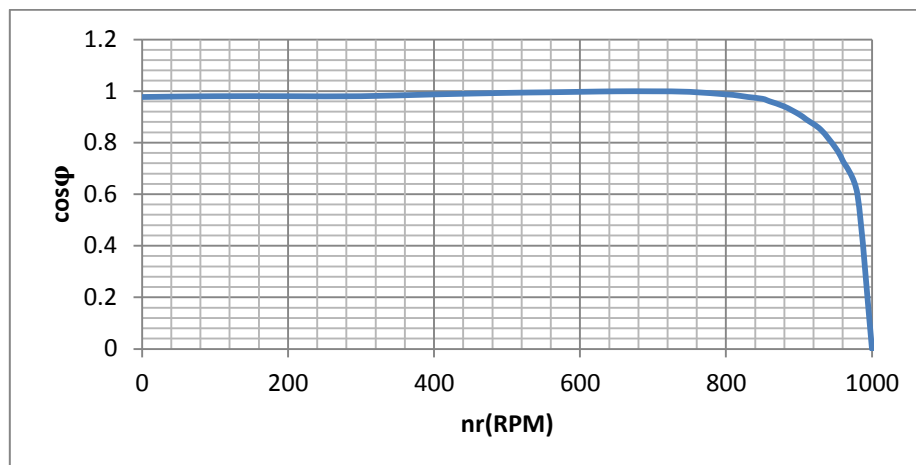
شکل ۳-۱۲: نمودار گشتاور-سرعت موتور مورد نظر



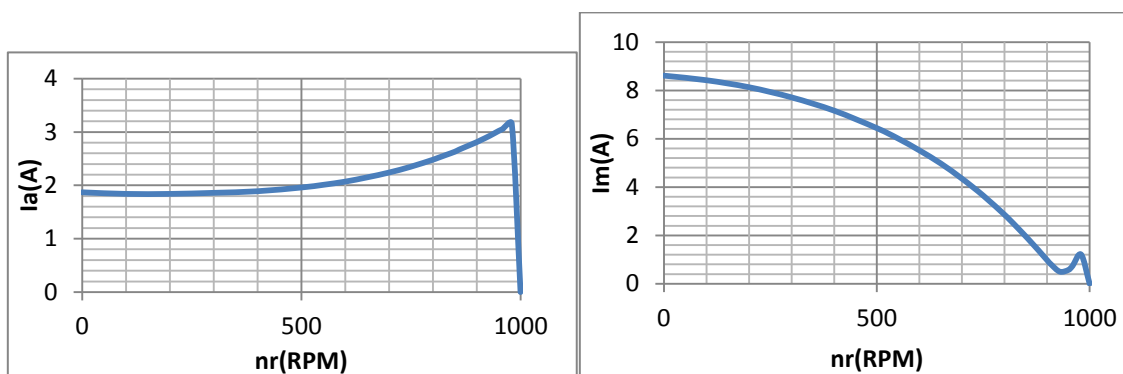
شکل ۳-۱۳: نمودار راندمان-سرعت موتور مورد نظر



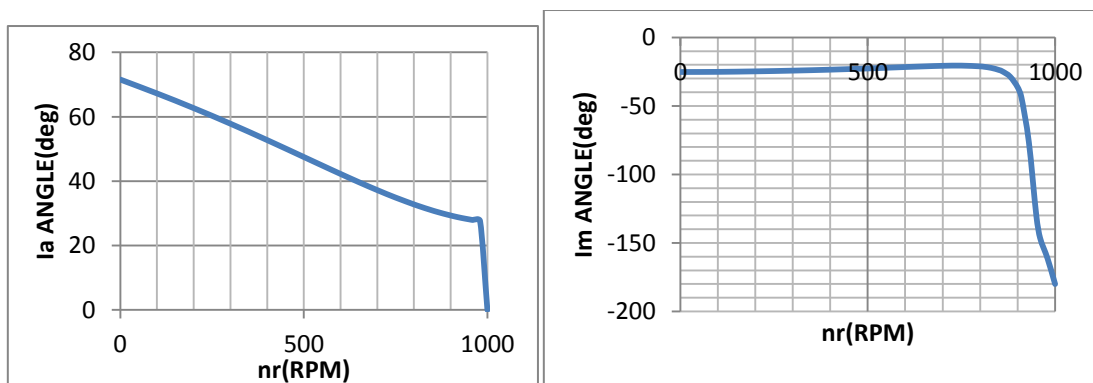
شکل ۳-۱۴: نمودار جریان-سرعت موتور مورد نظر



شکل ۳-۱۵: نمودار ضریب توان-سرعت موتور مورد نظر



شکل ۳-۱۶: نمودار جریان سیم پیچ اصلی و کمکی بر حسب سرعت موتور مورد نظر



شکل ۳-۱۷: نمودار زوایای جریان سیم پیچ اصلی و کمکی بر حسب سرعت موتور مورد نظر

فصل

چهارم

۴-۱- مبانی روش اجزای محدود:

روش اجزای محدود^{۴۰} بوسیله تبدیل کردن معادلات انتگرالی یا دیفرانسیلی حاکم بر مسائل پیچیده مهندسی به تعداد زیادی معادله جبری ساده و تقسیم مدل به قسمت‌های کوچکتر و آنالیز آن قسمت‌ها ، آنها را حل نموده و جواب بسیار دقیقی را تولید می- نماید.

روش اجزای محدود، یکی از جدید ترین و قدرتمند ترین روشهای حل مسائل پیوسته است. این روش ابتدا در مهندسی عمران و تحلیل سازه ها و مکانیک سیالات و انتقال حرارت ، مطرح گردید و از سال ۱۹۷۰ نیز در مسائل الکترومغناطیس کاربرد یافت.[37]

مراحل روش اجزای محدود به ترتیب زیر می باشد:

۱-رسم هندسه^{۴۱} طرح

۲-تعریف مواد تشکیل دهنده طرح

۳-تعریف مدار

۴-تعریف شرایط مرزی

۵-مش بندی

۶-اجرای برنامه (حل دستگاه های معادلات) و جمع بندی با روشهای حل

۷-پس پردازش

۴-۱-۱- انواع روشهای اجزای محدود:

برای یافتن معادلات اجزای محدود دو روش اساسی "حساب تغییرات"^{۴۲} و "باقی مانده های وزنی"^{۴۳} وجود دارد [32]. در روش باقیمانده وزنی باید در ناحیه مورد نظر، انتگرال تصویر باقی مانده روی تابع وزن^{۴۴} مشخص، برابر صفر گردد.[32] روش باقی مانده وزنی ، بر اساس نوع تابع وزن ، شامل چهار روش "هم محلی" ، "زیر دامنه" ، "مینیمم مربعات" و "گالرکین" می باشد. در حل مسائل الکترومغناطیسی عموماً روش گالرکین استفاده می شود. در این روش تابع

⁴⁰ Finite element method

⁴¹ geometry

⁴² Variational approach

⁴³ Weighted residuals

⁴⁴ Weighting function

وزن همان "تابع شکل"^{۴۵} عناصر انتخاب می-گردد. حال برای حل معادلات، مساله به اجزای کوچکی به نام عناصر محدود، شبکه بندی^{۴۶} می گردد. این عناصر می توانند یک بعدی^{۴۷} (خط یا منحنی) یا دوبعدی^{۴۸} (مثلث یا چهار ضلعی) و یا سه بعدی^{۴۹} (چهار وجهی یا شش وجهی) و به صورت مرتبه اول^{۵۰} یا دوم یا بالاتر با تعداد گره های^{۵۱} متفاوت باشد. انتگرال روی کل محدوده با جمع نمودن مقدار این انتگرالها به دست می آید. [32]

۴-۱-۲- شرایط مرزی:

برای اینکه مساله پاسخی منحصر به فرد (یکتا) داشته باشد باید پارامتر مجهول مساله یا مشتق عمود آن در هر نقطه از مرز معلوم باشد. [32] متذکر می شویم که اگر پتانسیل در یک نقطه مشخص باشد به آن شرط "دیریکله" می گوئیم و اگر پتانسیل در یک نقطه صفر باشد به آن شرط "دیریکله همگن" می گوئیم. اگر پتانسیل در طول یک خط ثابت باشد آن را "خط هم پتانسیل" می نامیم. اگر مشتق عمود پتانسیل در مساله ای معلوم باشد به آن شرط "نیومن" می گوئید و اگر مشتق عمود پتانسیل در مساله ای صفر باشد به آن شرط "نیومن همگن" یا "شرط مرزی طبیعی"^{۵۲} می گویند.

۴-۱-۳- روشهای حل:

همانطور که گفته شد با اعمال روش گالرکین معادلات دیفرانسیلی موجود به معادلات ماتریسی تبدیل می گردد. اما باتوجه به معادلات، متوجه حضور نفوذ پذیری مغناطیسی در ماتریس سختی عناصر می شویم، با توجه به اینکه مواد فرومغناطیس مورد استفاده در ماشینهای الکتریکی غیر خطی بوده و دارای اثر اشباع هستند، در نتیجه از روشهای حل، مانند گاوس سایدل یا نیوتن رافسون استفاده می شود. در ابتدا با یک مقدار فرضی μ شروع شده و با محاسبه چگالی شار، μ اصلاح می گردد و این فرآیند ادامه می یابد تا μ ثابت شود.

⁴⁵ Shape function

⁴⁶ mesh

⁴⁷ 1D element

⁴⁸ 2D element

⁴⁹ 3D element

⁵⁰ linear

⁵¹ node

⁵² Natural boundary condition

۴-۱-۴- پس پردازش^{۵۳}

بعد از محاسبه مقادیر پتانسیل مغناطیسی در گره ها، جهت محاسبه کمیت های مفید ماشین الکتریکی فرآیندی طی می-شود که اصطلاحاً پس پردازش نامیده می شود.[37] یافتن پارامترهایی چون مقاومت، جریان گردابی، اندوکتانس، تلفات فوکو، هیستریزیس و اضافی، نیرو و گشتاور در مرحله پس پردازش صورت می گیرد.

۴-۲- شبیه سازی با نرم افزار JMag^{۵۴}

انجام محاسبات روش اجزای محدود توسط نرم افزارهای تجاری مختص این کار مانند FLUX, MAXWELL, ANSYS, JMag, ... صورت می گیرد. تمامی این نرم افزارها شامل سه مرحله در انجام پروژه ها می باشند.

مرحله پیش پردازش^{۵۴} که شامل ترسیم شکل دو بعدی یا سه بعدی مساله، تعیین شرایط مرزی، رسم مدار تحریک، مش بندی و تعیین خواص مواد و شرایط کارکرد مدار می باشد.

مرحله حل کننده^{۵۵} که شامل تشکیل ماتریس ها و حل معادلات جبری حاکم بر مش ها و گره ها و ارائه پاسخ های اولیه شامل مجموعه ای از پتانسیل گره ها می باشد.

مرحله پس پردازش که تحلیل نتایج و محاسبه پارامترهایی چون مقاومت، جریان گردابی، اندوکتانس، تلفات فوکو، هیستریزیس و اضافی، نیرو و گشتاور را بر عهده دارد.

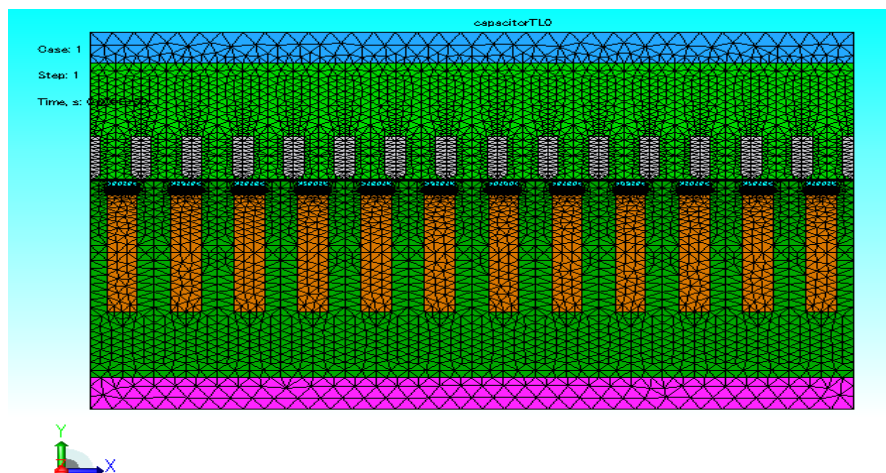
نرم افزار JMag یک نرم افزار ژاپنی از شرکت JSOL است که از کامل ترین این نرم افزار ها می باشد، و دارای تحلیل های حرارتی و الکترو مغناطیسی دینامیکی و استاتیکی زمانی و فرکانسی، است.

در این پروژه برای شبیه سازی موتور شار محور، از مدل های دو بعدی خطی و دو بعدی دایره ای، استفاده شد که نمونه مش بندی و خروجی های این برنامه در ادامه آورده می شود.

⁵³ Post-processing

⁵⁴ Preprocessing

⁵⁵ Solver



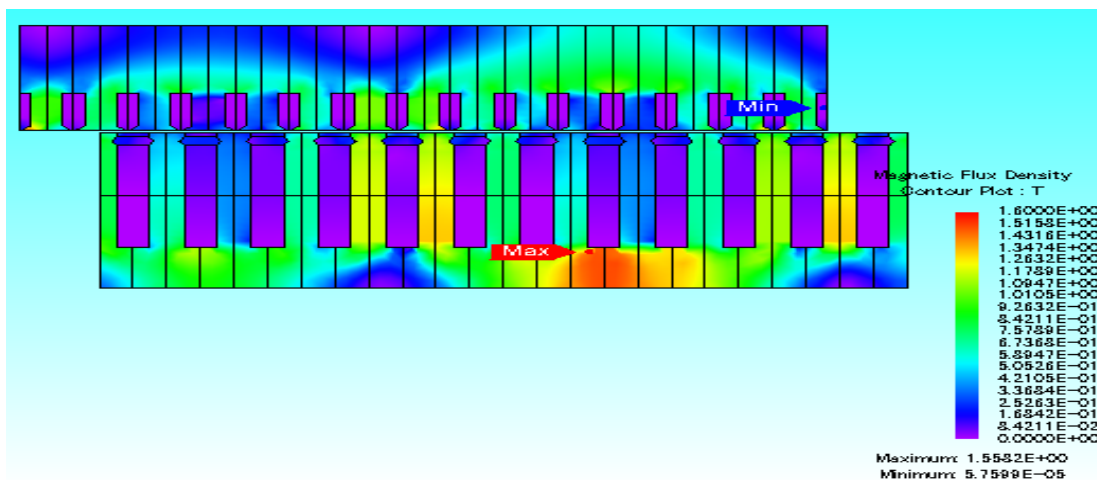
شکل ۴-۱: مش بندی مدل دو بعدی رسم شده

در مدل دوبعدی (2D-FEM) رسم شده، دو نکته ای که مورد توجه قرار گرفته است به شکل زیر می باشد:

الف) طول کلی طرح از رابطه $l_{equ} = \pi \left(\frac{D_o + D_i}{2} \right) = 409mm$ یافت می شود.

ب) ضخامت طرح^{۵۶} برابر $\frac{D_o - D_i}{2} = 43.5mm$ بدست می آید.

نمودار رنگی^{۵۷} مربوط به چگالی میدان مغناطیسی در شکل زیر نمایش داده شده است:

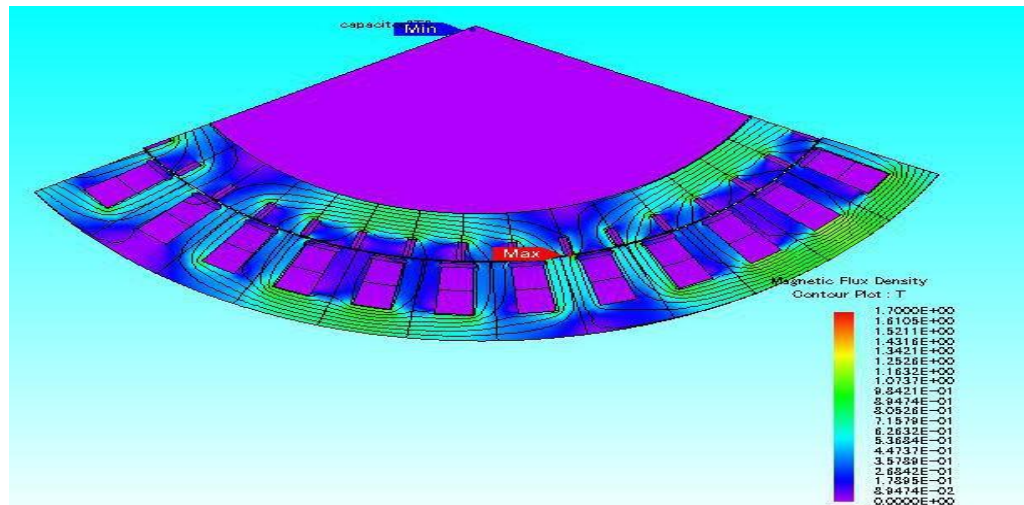


شکل ۴-۲: نمودار رنگی چگالی شار مدل دوبعدی رسم شده

⁵⁶ Stack length

⁵⁷ contour

همچنین یک مدل دو بعدی دایره ای هم بوسیله قسمت ترسیم این نرم افزار (Geometry editor) برای یک جفت قطب (۱۲۰ درجه مکانیکی) رسم گردید، که به شکل زیر می باشد:



شکل ۴-۳: مدل دو بعدی دایره ای ترسیم شده

این مدل با تقریب بسیار خوبی نمودارهای خروجی را بدست می آورد، در این پروژه از نمودارهای خروجی این مدل استفاده گردیده است.

۴-۲-۱- تنظیم استپ های زمانی^{۵۸}:

جهت تنظیم زمان استپ ها برای انجام تحلیل المان محدود ، باید طبق فرمول زیر ، زمان مورد نظر را تنظیم نمود.

$$\text{Analysis time} = \text{start time} + (((\text{end time} - \text{start time}) / (\text{number of divisions})) \times (\text{number of steps} - 1)) \quad (۱-۴)$$

به طور مثال، در بعضی از تحلیل های این پروژه، زمان شروع ۰ ثانیه و زمان پایان ۰.۰۹ و تعداد تقسیمات ۱۰۰ دفعه و تعداد استپ ها ۱۵۰۰ تنظیم گردید در این صورت زمان تحلیل ۱.۳۵ ثانیه محاسبه می گردد.

۴-۲-۲- شرایط مرزی^{۵۹}:

شرایط مرزی موجود در این نرم افزار شامل شرایط مرزی پریودیک^{۶۰}، شرایط مرزی طبیعی^{۶۱} و شرایط مرزی متقارن^{۶۲} می باشد.

⁵⁸ Time stepping

⁵⁹ Boundary conditions

⁶⁰ Periodic Boundary conditions

⁶¹ Natural Boundary conditions

چون این مدل قسمتی از مدل خطی ترسیم شده است ، باید از شرط مرزی پریودیک حرکت خطی^{۶۳} ، استفاده نماییم . در مدل دو بعدی دایره ای، نیز از شرط مرزی پریودیک حرکت دورانی^{۶۴} استفاده می گردد. چون در تحلیل مدل خطی از روش تولید منطقه هوایی^{۶۵} استفاده گردید ، شرط مرزی متقارن بر روی آن قرار می گیرد. برای اینکه بتوان خرابی مش ها در اثر جابجایی روتور نسبت به استاتور را اصلاح نمود ، از روش لغزیدن^{۶۶} استفاده گردیده است.

۴-۲-۳- مش بندی:

همانطور که بیان شد، در مدل خطی ودایره ای، جهت انجام مش بندی(شبکه بندی) از روش لغزیدن (اسلاید) همراه با تولید منطقه هوایی استفاده گردید. در مش بندی انجام شده برای مدل جفت قطبی کشیده شده خطی ، تعداد گره ها ۵۹۵۱ و تعداد عناصر ۱۰۷۴۳ عدد تعیین شد و در مدل جفت قطبی دایره ای، تعداد گره ها ۱۶۰۴۰ و تعداد عناصر ۲۵۹۵۰ می باشد. در هنگام مش بندی فقط توجه به این نکته حائز اهمیت است که در هر مکانی که تعداد خطوط شار و تغییرات آن بالا است، همانند فاصله هوایی در این مدل، باید مش بندی ریز تری اعمال شود.

۴-۲-۴- مدار بندی:

مدار استفاده شده برای موتور تکفاز خازن دایم به شکل زیر در فضای Edit Circuit ترسیم گردید، طبق این مدار ، در سیم پیچها(FEM coil)، سیم پیچ اصلی با ۷۲ دور و مقاومت ۷.۲ اهم و سیم پیچ کمکی با ۸۷ دور و مقاومت ۱۴.۴ اهم شبیه سازی گردید. و هادیهای قفس روتور(FEM conductor) نیز با مقاومت انتهایی 6×10^{-5} اهم در نظر گرفته شد. در این مدار به دلیل اینکه یک سوم طرح ترسیم شده است باید مقاومت سیم پیچ ها و ولتاژ ورودی یک سوم حالت کامل در نظر گرفته شود و خازن سه برابر حالت اصلی در نظر گرفته می شود.

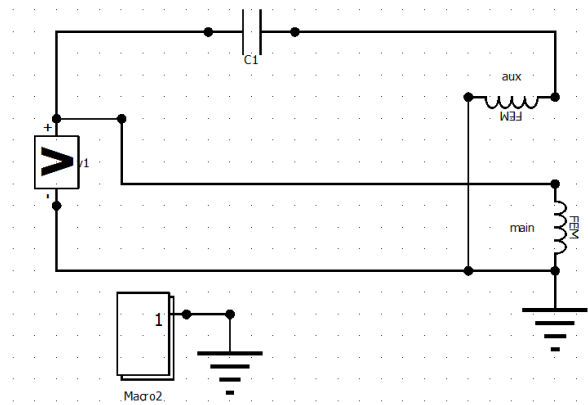
⁶² Symmetry Boundary conditions

⁶³ Translation Periodic Boundary conditions

⁶⁴ Rotation Periodic Boundary conditions

⁶⁵ Air region

⁶⁶ Slide



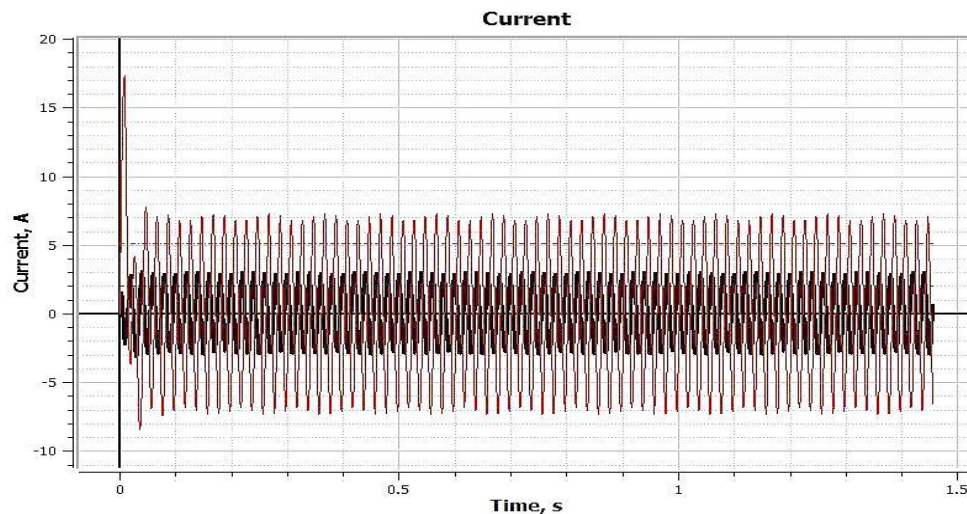
شکل ۴-۴: مدار بندی تکفاز روتور و استاتور

۴-۲-۵- نحوه اعمال بار:

به طور کلی برای دیدن نمودارهای خروجی در موتور القایی می توان از دو روش سرعت ثابت و اعمال بار استفاده نمود. حالت سرعت ثابت با دقت قابل قبولی شرایط حالت دائمی^{۶۷} را مدل می نماید و حالت اعمال بار با معادله حرکت^{۶۸} نیز حالت گذرا^{۶۹} و دائمی را پوشش می دهد.

۴-۲-۶- نمودارهای خروجی در حالت سرعت ثابت:

جریان سیم پیچی اصلی و کمکی در شرایط سرعت ثابت، به شکل زیر است :



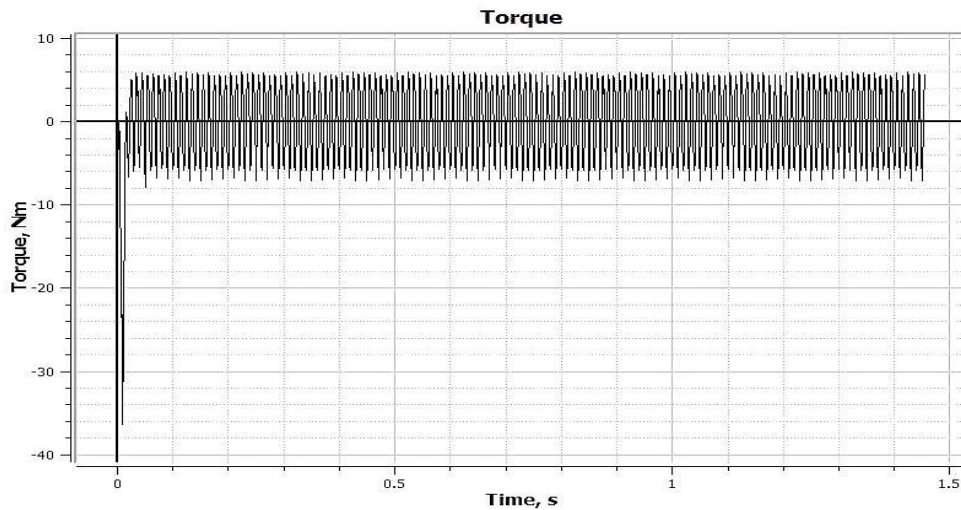
شکل ۴-۵: نمودار جریان های سیم پیچ اصلی و کمکی بر حسب زمان در حالت سرعت ثابت

⁶⁷ Steady state

⁶⁸ Equation of motion

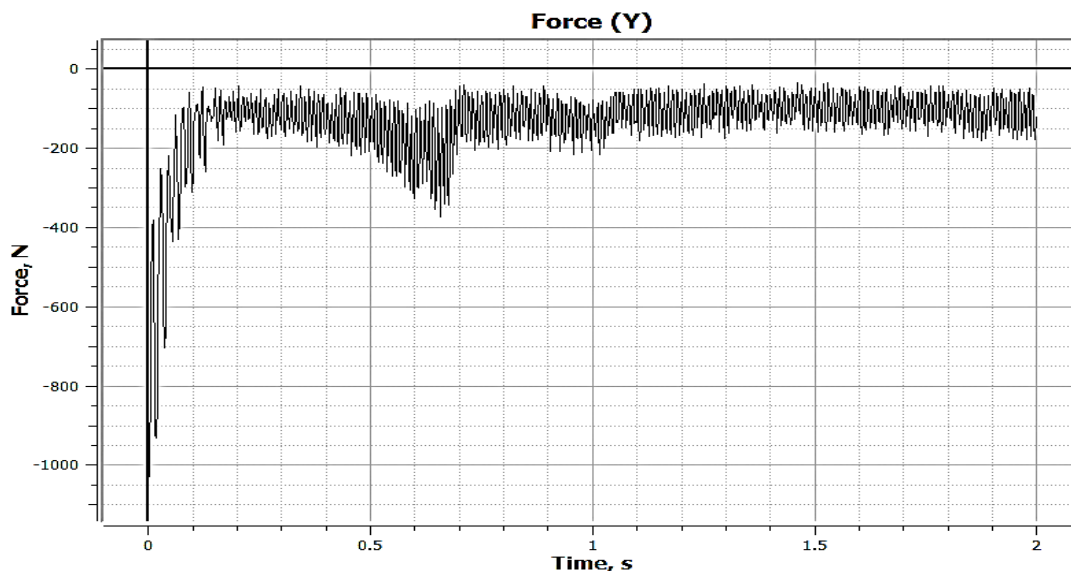
⁶⁹ Transient state

نیروی تولید کننده گشتاور در راستای محور X است ، و نمودار آن به صورت شکل ۷-۴ می باشد.



شکل ۷-۴: نمودار نیرو در راستای محور X بر حسب زمان در حالت سرعت ثابت

با توجه به اینکه گشتاور کل یک موتور از رابطه $T = F \times D$ یافت می شود و قطر متوسط موتور مورد بحث ۱۳۰ میلی متر (۰.۱۳ متر) می باشد ، در نتیجه مقدار گشتاور متوسط به دست می آید، در این شکل چون مقدار متوسط نیرو تقریباً صفر است در نتیجه مقدار متوسط گشتاور نیز حدوداً صفر می باشد. همچنین نمودار نیرو در راستای محور Y که در حقیقت نیرویی مزاحم و گاهی تخریب کننده است به شکل زیر می باشد. منفی بودن این نیرو نشان از نیروی جذب بین روتور و استاتور است.



شکل ۷-۴: نمودار نیرو در راستای محور Y بر حسب زمان در حالت سرعت ثابت

۴-۲-۷- نمودارهای خروجی در حالت اعمال بار:

در مدل خطی، برای اعمال بار در قسمت معادله حرکت از فرمول زیر استفاده می گردد.

$$F = M \frac{d^2x}{dt^2} + B \frac{dx}{dt} + K(x - x_0) + f \quad (۲-۴)$$

که در این فرمول F نیروی الکترومغناطیسی، M جرم قسمت متحرک، B ثابت میرایی، K ثابت فنر در صورت وجود و f نیروی اصطکاک می باشد.

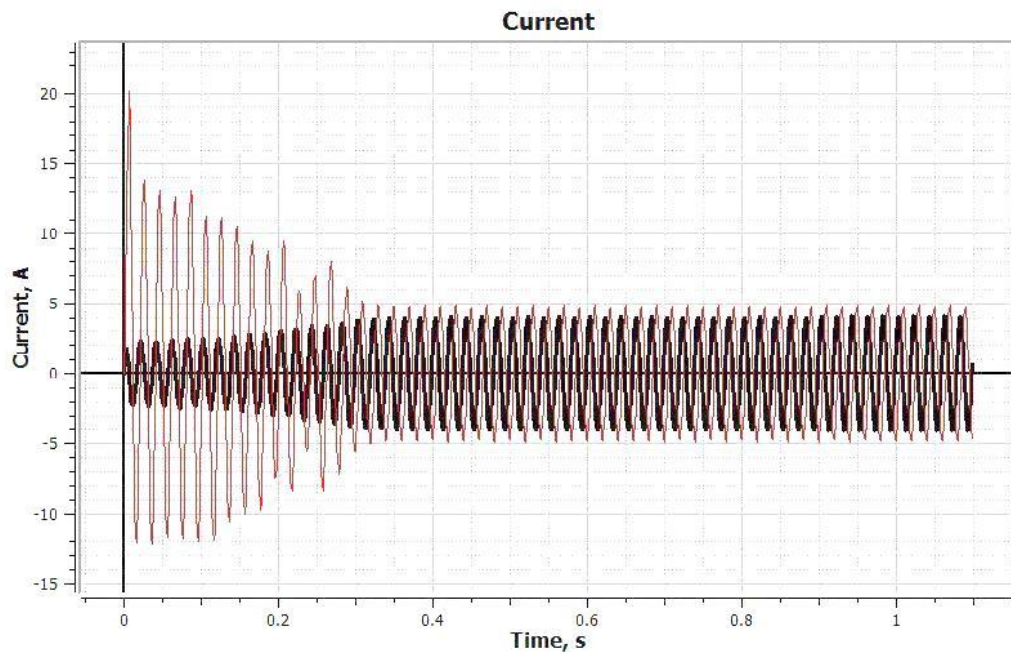
و در حالت مدل دو بعدی دایره ای:

$$T = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} + K(\theta - \theta_0) + \tau \quad (۳-۴)$$

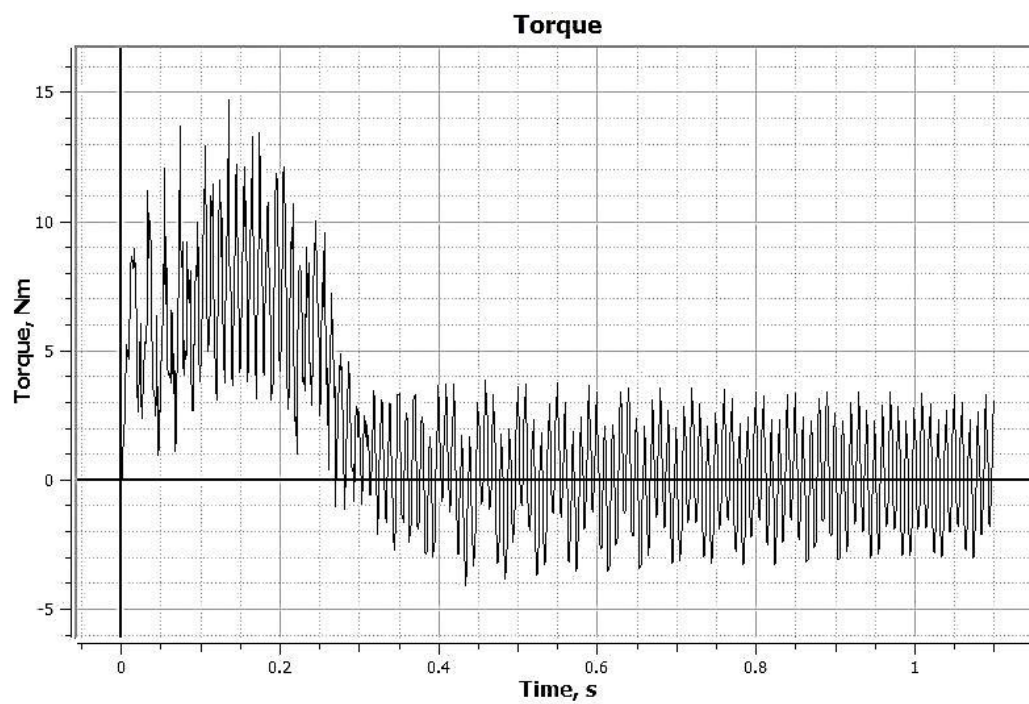
که در این فرمول T گشتاور الکترومغناطیسی، J لختی دورانی (مان اینرسی) قسمت متحرک، B ثابت میرایی، K ثابت فنر در صورت وجود و τ نیروی اصطکاک دورانی، می باشد.

در حالت اعمال بار، جرم کلی قسمت روتور و گشتاور لختی آن معمولاً قابل محاسبه است، اما به دلیل عدم شبیه سازی مقاومت های انتهایی در مدل های ترسیمی، بهتر است دستی وارد گردد.

نمودارهای خروجی مدل دوبعدی در شکل های زیر قابل مشاهده است.

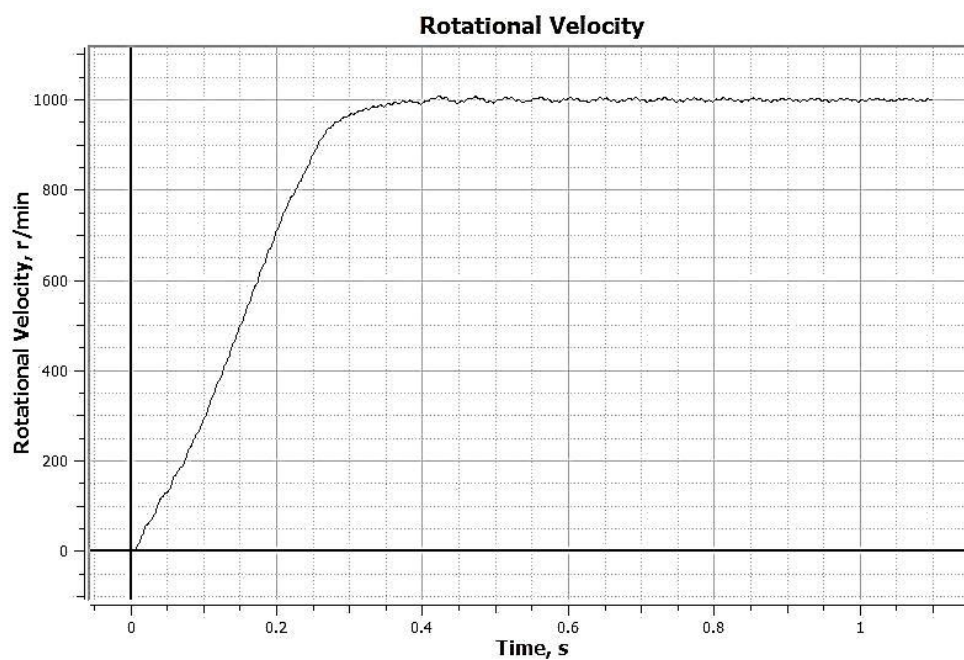


شکل ۴-۸: نمودار جریان های سیم پیچ اصلی و کمکی بر حسب زمان در حالت اعمال بار



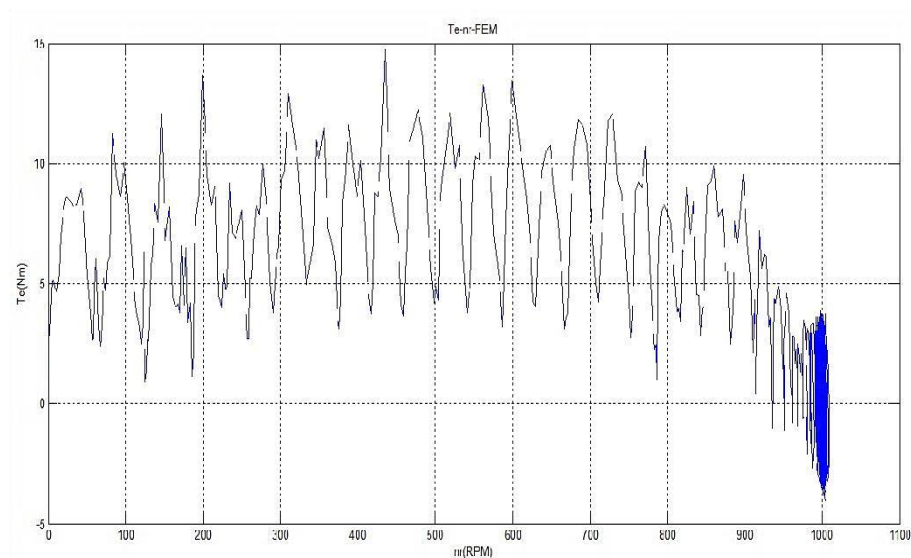
شکل ۴-۹: نمودار گشتاور بر حسب زمان در حالت اعمال بار

همچنین نمودار گشتاور سرعت به شکل ۴-۱۱ است:



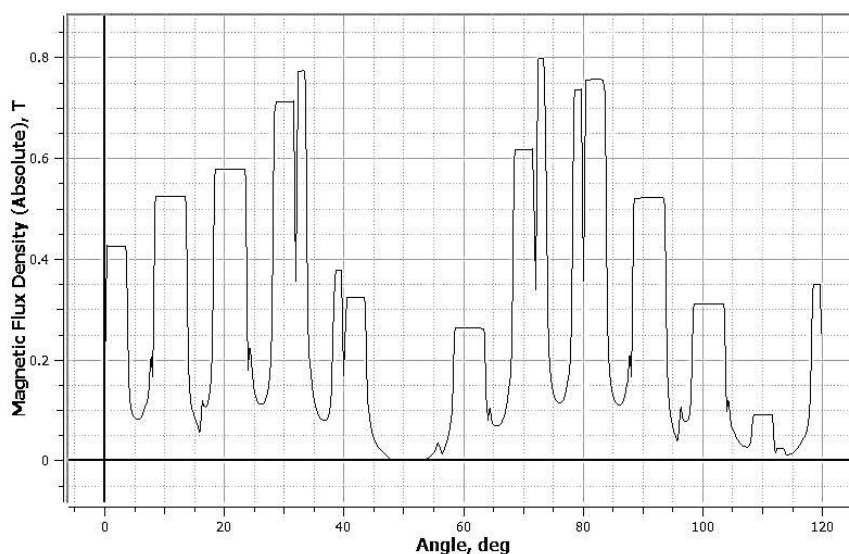
شکل ۴-۱۰: نمودار سرعت بر حسب زمان در حالت اعمال بار

همچنین نمودار گشتاور- سرعت به صورت شکل زیر می باشد:



شکل ۴-۱۱: نمودار گشتاور سرعت مدل اجزای محدود موتور مورد نظر

در ضمن، نمودار چگالی شار در حالت دائمی در طول یک جفت قطب به صورت شکل ۴-۱۳ می باشد:



شکل ۴-۱۲: نمودار چگالی شار در طول یک جفت قطب (۱۲۰ درجه مکانیکی) در فاصله هوایی موتور مورد نظر

۴-۳- بدست آوردن مدار معادل با روش اجزای محدود:

برای یافتن مدار معادل باید شرایط بی باری و قفل روتور توسط نرم افزار JMAG شبیه سازی گردد. جهت شبیه سازی شرایط قفل روتور طبق [44],[33],[32] بهتر است تحلیل فرکانسی انجام شود. طبق [44],[32] برای یافتن امپدانس در فرکانس های متفاوت داریم:

$$Z(j\omega) = \frac{V}{I} \quad (4-4)$$

و برای یافتن مقاومت کل داریم:

$$R = \frac{P}{I_{rms}^2} \quad (5-4)$$

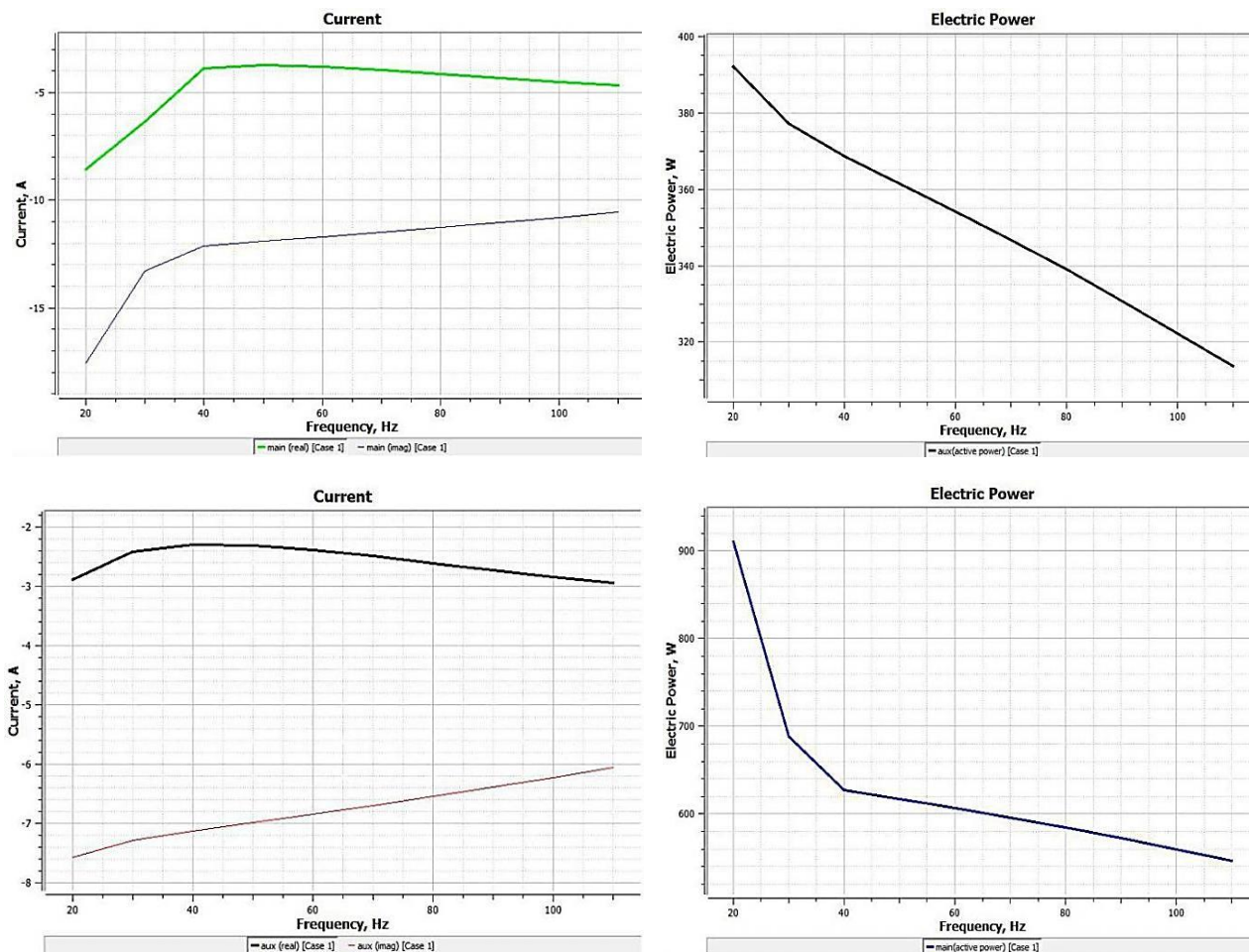
و جهت یافتن راکتانس کلی در حالت قفل روتور:

$$X_{LR} = \sqrt{|Z|^2 - R^2} \quad (6-4)$$

و در این حالت مقاومت روتور منتقل شده به سمت استاتور برابر است با:

$$R_r = R - R_s \quad (7-4)$$

تحلیل فرکانسی انجام شده نمودارهایی به شکل ۴-۱۴ را ارائه می نماید:



شکل ۴-۱۳: نمودارهای حاصل از تحلیل فرکانسی حالت روتور قفل شده موتور موردنظر

با استفاده از فرمولهای مذکور و نمودارهای بالا در فرکانس ۵۰ هرتز، شرایط قفل روتور را به طور جداگانه برای سیم پیچ اصلی و کمکی اجرا می نماییم، در این حالت چون ۲ قطب ماشین مدل شده است بعد از محاسبه مقادیر پارامترها در ۳ ضرب می گردد. برای ۲ قطب از سیم پیچ اصلی داریم:

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{103.6/\sqrt{2}}{|-3.8-j12|/\sqrt{2}} = 8.23\Omega \quad (۸-۴)$$

$$R = \frac{P}{I_{rms}^2} = \frac{620}{8.9^2} = 7.82\Omega \quad (۹-۴)$$

$$R_m = R - R_{sm} = 7.82 - 2.4 = 5.42 \quad (۱۰-۴)$$

$$X_{LR} = \sqrt{|Z|^2 - R^2} = 6.19\Omega \quad (۱۱-۴)$$

و در نتیجه برای مدل کامل: $Z_m = 24.69\Omega$ و $R_m = 23.46\Omega$ و $R_{ra} = 16.26\Omega$ و $X_{LR} = 18.57\Omega$ و

$$X_{sm} = \frac{X_{LR}}{2} = 9.28\Omega$$

در نتیجه

و برای سیم پیچ کمکی هم به همین ترتیب با انجام محاسبات، برای مدل کامل داریم: $Z_a = 42.18\Omega$ و

$$X_{sa} = \frac{X_{LR}}{2} = 6.73\Omega \text{ و در نتیجه } X_{LR} = 13.47\Omega \text{ و } R_{ra} = 25.56\Omega \text{ و } R_a = 39.96\Omega$$

برای شرایط بی باری می توان از همان روش تحلیل زمانی استفاده نمود. در این حالت نیز، تحلیل یک بار برای سیم پیچ

اصلی و یک بار برای سیم پیچ کمکی با سرعت بی باری اجرا می گردد:

برای سیم پیچ اصلی:

$$V_{ab1} = V_{NL} - I_{NL} \left(X_{sm} + \frac{X_r}{2} \right) = 220 - 3.85(9.28 + \frac{3.3}{2}) = 177.92V \quad (۱۲-۴)$$

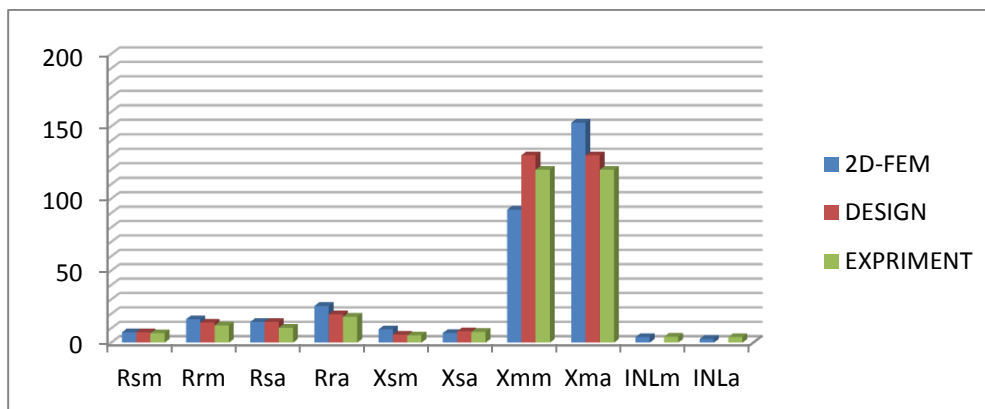
$$X_{mm} = \frac{2 * V_{ab1}}{I_{NL}} = \frac{2 * 177.92}{3.85} = 92.42\Omega \quad (۱۳-۴)$$

و برای سیم پیچ کمکی:

$$V_{ab2} = V_{NL} - I_{NL} \left[X_{sa} + \frac{X_r}{2} \right] = 220 - 2.6(6.73 + \frac{3.3}{2}) = 198.21V \quad (۱۴-۴)$$

$$X_{ma} = \frac{2 * V_{ab2}}{I_{NL}} = \frac{2 * 198.21}{2.6} = 152.47\Omega \quad (۱۵-۴)$$

مقایسه بین مقادیر واقعی و نتایج الگوریتم طراحی و آزمایش های معمول به صورت نمودار زیر می باشد:



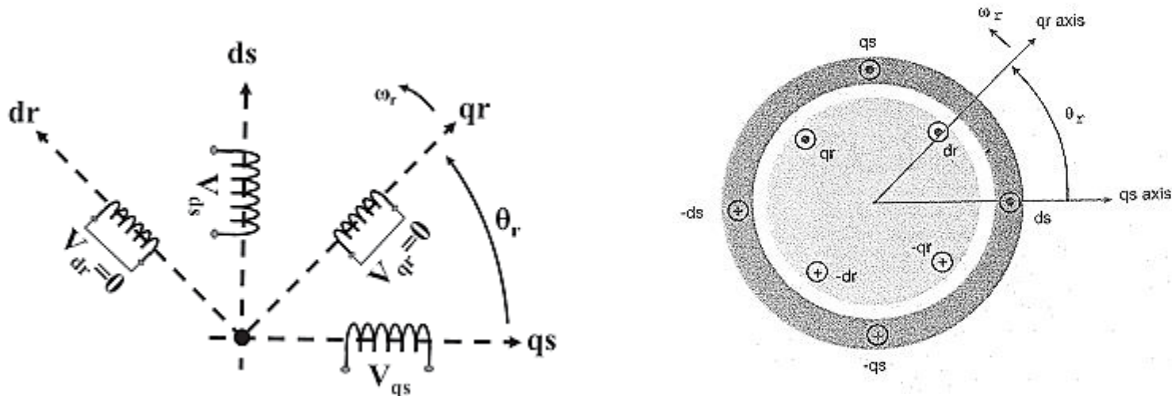
شکل ۴-۱۴: مقایسه پارامترهای مدار معادل بین مقادیر واقعی و نتایج الگوریتم طراحی و آزمایش های معمول

فصل

نجم

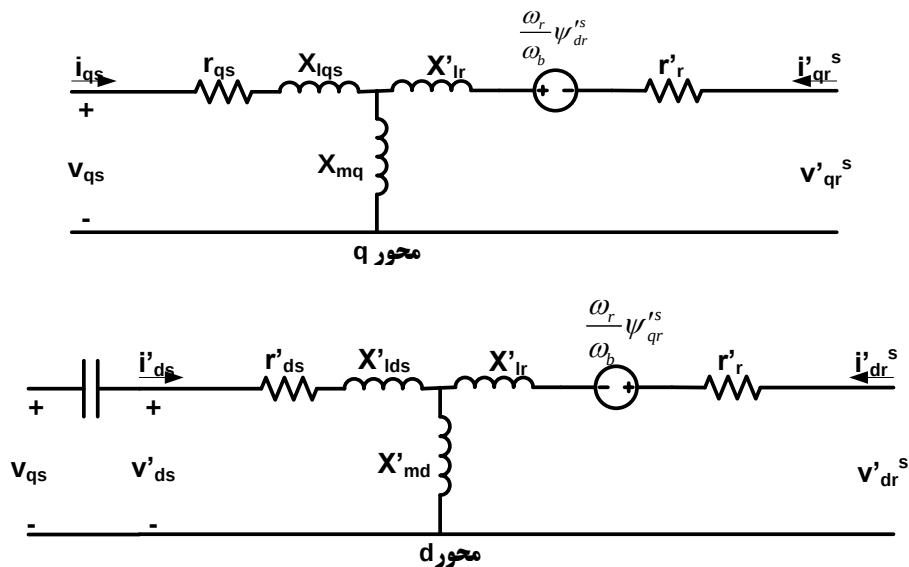
۵-۱- معادلات مدل DQ موتور شار محور تکفاز خازن دائم:

مدل مداری ایده آل ماشین القایی تکفاز خازن دائم به شکل زیر می باشد:



شکل ۵-۱: مدل مداری ایده آل ماشین القایی تکفاز

و مدار معادل dq ماشین القایی تکفاز خازن دائم طبق [35,45] به صورت شکل زیر می باشد:



شکل ۵-۲: مدار معادل dq ماشین القایی تکفاز خازن دائم

طبق [34,35] فرمولهای الکتریکی و مغناطیسی به شرح ذیل است:

$$v_{qs} = r_{qs} i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} \quad (۱-۵)$$

$$v'_{ds} = r'_{ds} i'_{ds} + \frac{d\lambda'_{ds}}{dt} \quad (۲-۵)$$

$$v_{qr}^{rs} = r'_r i_{qr}^{rs} + \frac{d\lambda_{qr}^{rs}}{dt} - \omega_r \lambda_{dr}^{rs} \quad (۳-۵)$$

$$v_{dr}^{ts} = r_r' i_{dr}^{ts} + \frac{d\lambda_{dr}^{ts}}{dt} + \omega_r \lambda_{qr}^{ts} \quad (۴-۵)$$

مقدار سرعت زاویه ای روتور نیز برابر است با:

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (۵-۵)$$

و مقدار شار دور ها از روابط زیر یافت می شود:

$$\lambda_{qs} = L_{lqs} i_{qs} + L_{mq} (i_{qs} + i_{qr}^{ts}) \quad (۶-۵)$$

$$\lambda_{ds}' = L_{lds}' i_{ds}' + L_{mq} (i_{ds}' + i_{dr}^{ts}) \quad (۷-۵)$$

$$\lambda_{qr}^{ts} = L_{lq}' i_{qr}^{ts} + L_{mq} (i_{qs} + i_{qr}^{ts}) \quad (۸-۵)$$

$$\lambda_{dr}^{ts} = L_{lr}' i_{dr}^{ts} + L_{mq} (i_{ds}' + i_{dr}^{ts}) \quad (۹-۵)$$

که در این روابط:

$$v_{ds}' = \frac{N_{qs}}{N_{ds}} v_{ds} = \frac{v_{ds}}{a} \quad (۱۰-۵) \quad i_{ds}' = \frac{N_{ds}}{N_{qs}} i_{ds} = a i_{ds} \quad (۱۶-۵)$$

$$L_{md}' = L_{mq} \quad (۱۷-۵)$$

$$L_{lds}' = \left(\frac{N_{qs}}{N_{ds}}\right)^2 L_{lds} \quad (۱۱-۵) \quad r_{ds}' = \left(\frac{N_{qs}}{N_{ds}}\right)^2 r_{ds} \quad (۱۸-۵)$$

$$L_{lr}' = \left(\frac{N_{qs}}{N_r}\right)^2 L_{lr} \quad (۱۲-۵) \quad r_r' = \left(\frac{N_{qs}}{N_r}\right)^2 r_r \quad (۱۹-۵)$$

$$v_{qr}^{ts} = \left(\frac{N_{qs}}{N_r}\right) v_{qr}^s \quad (۱۳-۵) \quad v_{dr}^{ts} = \left(\frac{N_{qs}}{N_r}\right) v_{dr}^s \quad (۲۰-۵)$$

$$i_{qr}^{ts} = \left(\frac{N_r}{N_{qs}}\right) i_{qr}^s \quad (۱۴-۵) \quad i_{dr}^{ts} = \left(\frac{N_r}{N_{qs}}\right) i_{dr}^s \quad (۲۱-۵)$$

$$\lambda_{qr}^{ts} = \left(\frac{N_{qs}}{N_r}\right) \lambda_{qr}^s \quad (۱۵-۵) \quad \lambda_{dr}^{ts} = \left(\frac{N_{qs}}{N_r}\right) \lambda_{dr}^s \quad (۲۲-۵)$$

رابطه بین شار دورها و شار دورهای پیوندی و همچنین راکتانس ها و اندوکتانس ها نیز به شکل زیر است:

$$\psi = \omega_b \lambda \quad (۲۳-۵)$$

$$X = \omega_b L \quad (۲۴-۵)$$

توجه شود که در واقع در موتور تکفاز خازن دائم، سیم پیچ محور d همان سیم پیچ کمکی و سیم پیچ محور q همان سیم

پیچ اصلی است.

جهت شبیه سازی موتور به وسیله نرم افزار سیمولینک متلب لازم است تا از فرمولهای مشروحه ذیل استفاده گردد:

$$\psi_{qs} = \omega_b \int (v_{qs} + \frac{r_{qs}}{X_{lqs}} (\psi_{mq} - \psi_{qs})) dt \quad (25-5)$$

$$\psi'_{ds} = \omega_b \int (v'_{ds} + \frac{r'_{ds}}{X'_{lds}} (\psi'_{md} - \psi'_{ds})) dt \quad (26-5)$$

$$\psi_{qr}^{rs} = \omega_b \int (v_{qr}^{rs} + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{dr}^{rs} + \frac{r'_r}{X'_{lr}} (\psi_{mq} - \psi_{qr}^{rs})) dt \quad (27-5)$$

$$\psi_{dr}^{rs} = \omega_b \int (v_{dr}^{rs} - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{qr}^{rs} + \frac{r'_r}{X'_{lr}} (\psi'_{md} - \psi_{dr}^{rs})) dt \quad (28-5)$$

$$\psi_{mq} = X_{mq} (i_{qs} + i_{qr}^{rs}) \quad (29-5)$$

$$\psi'_{md} = X_{mq} (i'_{ds} + i_{dr}^{rs}) \quad (30-5)$$

$$i_{qs} = \frac{\psi_{qs} - \psi_{mq}}{X_{lqs}} \quad (31-5)$$

$$i'_{ds} = \frac{\psi'_{ds} - \psi'_{md}}{X'_{lds}} \quad (32-5)$$

$$i_{qr}^{rs} = \frac{\psi_{qr}^{rs} - \psi_{mq}}{X'_{lr}} \quad (33-5)$$

$$i_{dr}^{rs} = \frac{\psi_{dr}^{rs} - \psi'_{md}}{X'_{lr}} \quad (34-5)$$

$$\frac{1}{X_{Mq}} = \frac{1}{X_{mq}} + \frac{1}{X_{lqs}} + \frac{1}{X'_{lr}} \quad (35-5)$$

$$\frac{1}{X_{Md}} = \frac{1}{X_{mq}} + \frac{1}{X'_{lds}} + \frac{1}{X'_{lr}} \quad (36-5)$$

$$\psi_{mq} = X_{Mq} (\frac{\psi_{qs}}{X_{lqs}} + \frac{\psi_{qr}^{rs}}{X'_{lr}}) \quad (37-5)$$

$$\psi'_{md} = X_{Md} (\frac{\psi'_{ds}}{X'_{lds}} + \frac{\psi_{dr}^{rs}}{X'_{lr}}) \quad (38-5)$$

برای یافتن گشتاور ها از فرمول های زیر استفاده می شود:

$$T_e = \frac{P}{2\omega_b} (\psi'_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i'_{ds}) = \frac{P}{2} (\frac{N_{sa}}{N_{sm}}) (\frac{X_{ms}}{\omega_b}) (i_{qs}^s i_{dr}^{rs} - i_{ds}^s i_{qr}^{rs}) \quad (39-5)$$

$$T_e - T_L - T_{damp} = J (\frac{2}{P}) \frac{d\omega_r}{dt} \quad (40-5)$$

برای اعمال اثر خازن نیز از فرمولهای ذیل استفاده می گردد:

$$a = \frac{N_{sa}}{N_{sm}} = \frac{N_{ds}}{N_{qs}} = \frac{i'_{ds}}{i_{ds}} = \frac{v_{ds}}{v'_{ds}} \quad (41-5)$$

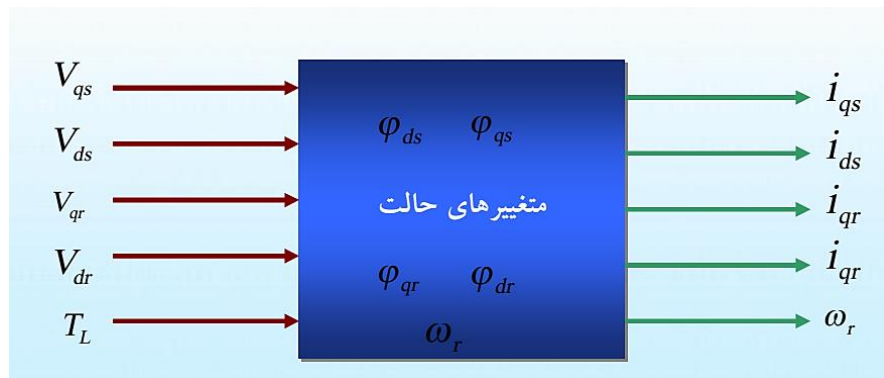
$$v'_{ds} = v_{qs} - v_c = v_{qs} - \frac{1}{C} \int i'_{ds} dt \rightarrow v_{ds} = v_{qs} . a - \frac{1}{C} \int a^2 i_{ds} dt \quad (42-5)$$

۵-۲- شبیه سازی با نرم افزار سیمولینک متلب:

بر اساس فرمولهای بالا، شبیه سازی با نرم افزار سیمولینک متلب به شکل زیر انجام می شود:

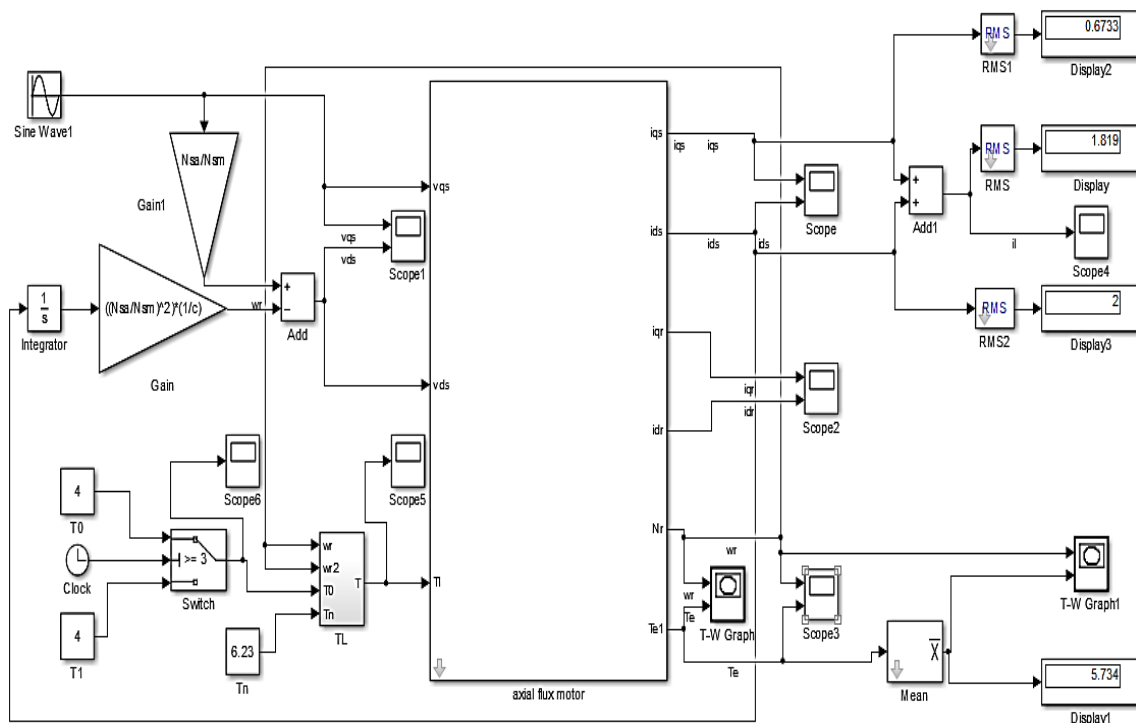
در این شبیه سازی، ولتاژها و گشتاور بار به عنوان ورودی، جریان ها و سرعت و گشتاور به عنوان متغیرهای خروجی و

شارهای پیوندی به عنوان متغیر حالت انتخاب می شوند:



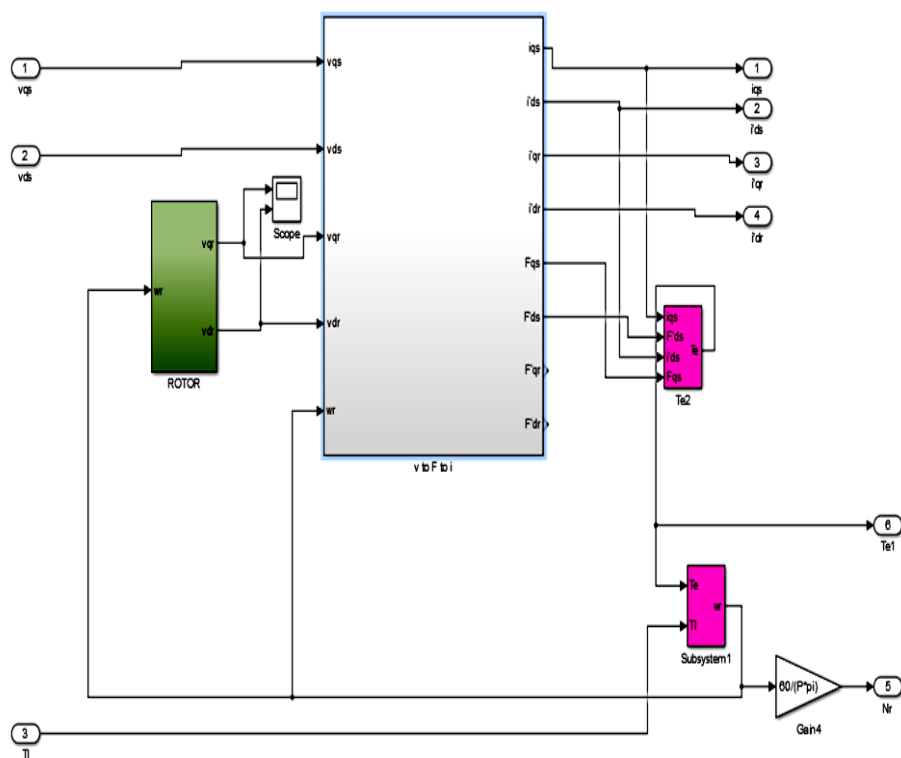
شکل ۵-۳: ورودی و خروجی و متغیرهای حالت انتخابی در شبیه سازی

ساختار کلی شبیه سازی به شکل زیر است:

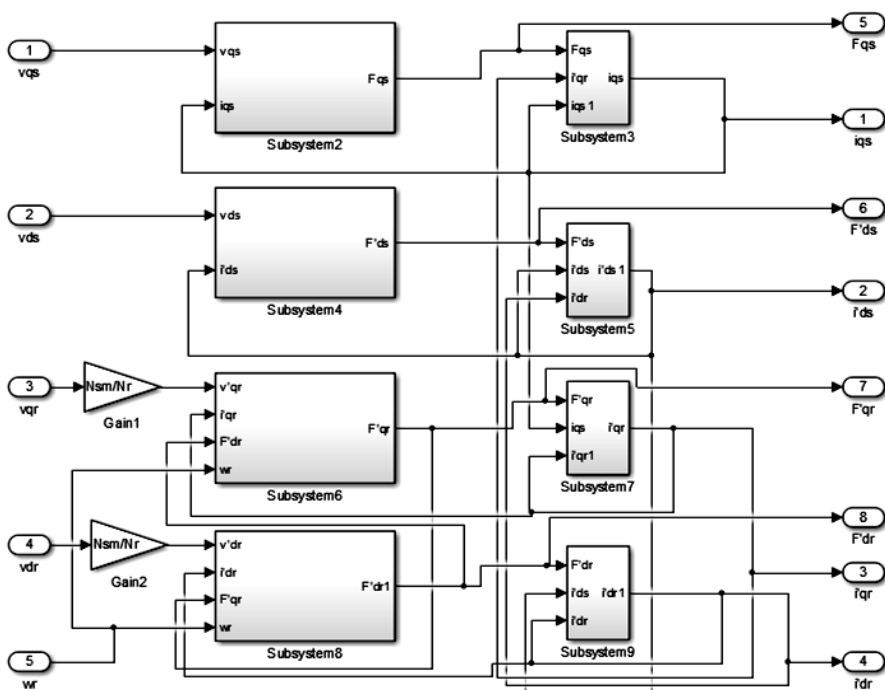


شکل ۵-۴: شبیه سازی موتور شار محور با خازن دائم کار بوسیله سیمولینک متلب

ساختار داخلی ساب سیستم های شبیه سازی به شکل زیر می باشد:



شکل ۵-۵: ساختار داخلی ساب سیستم اصلی



شکل ۵-۶: ساختار داخلی ساب سیستم v to F to i

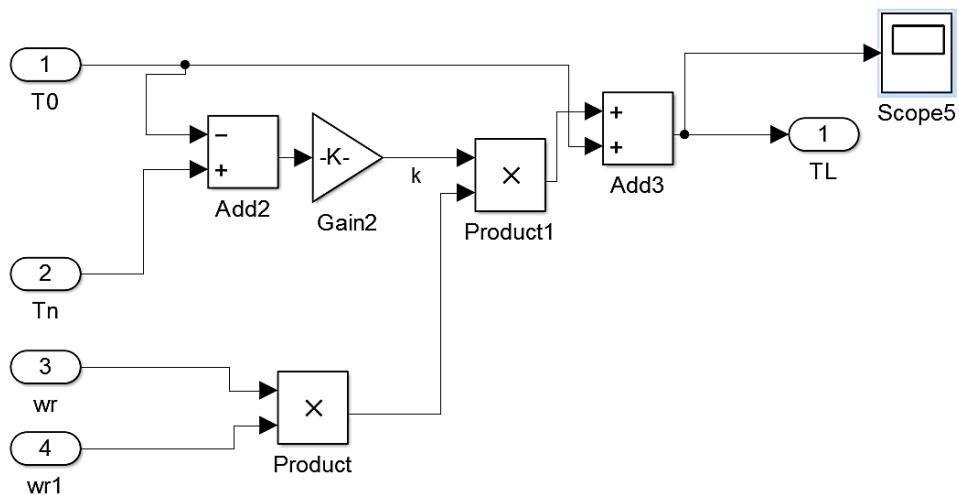
با توجه به اینکه بار موتور مورد استفاده، فن است در نتیجه معادله گشتاور بار، متناسب با سرعت است، در نتیجه :

$$T_L = K \omega_r^2 + T_0 \quad (۴۳-۵)$$

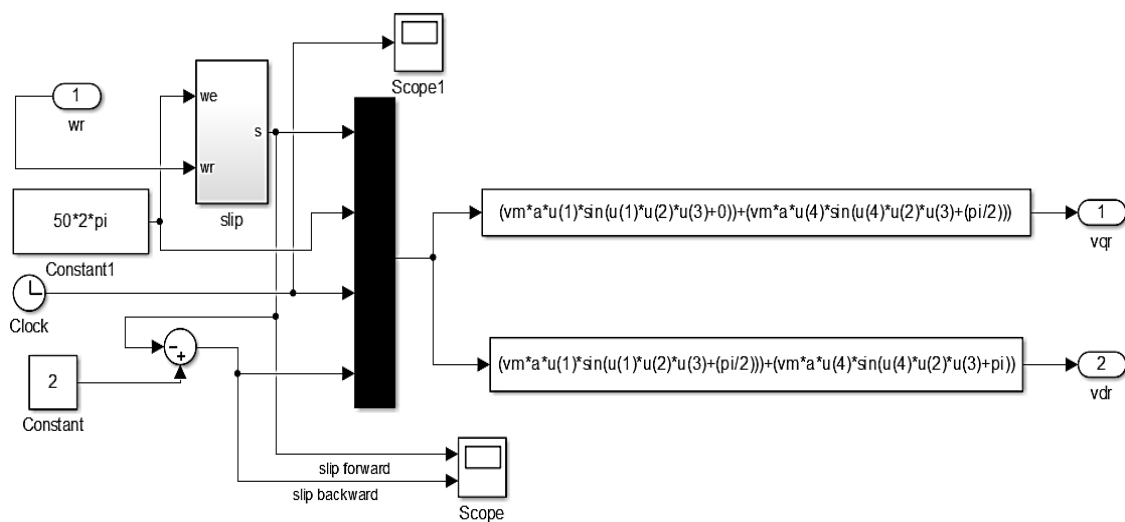
که در حالت نامی:

$$T_n = K \omega_n^2 + T_0 \quad (۴۴-۵)$$

در این صورت شبیه سازی آن به صورت زیر است:

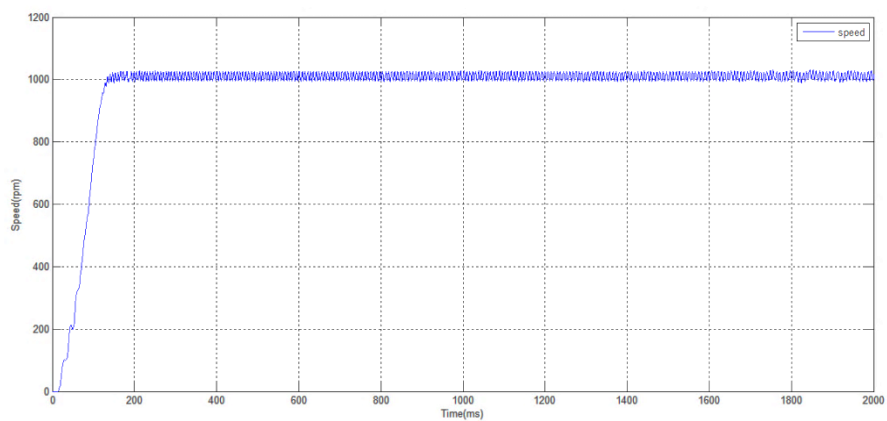


شکل ۵-۷: ساختار داخلی ساب سیستم TL

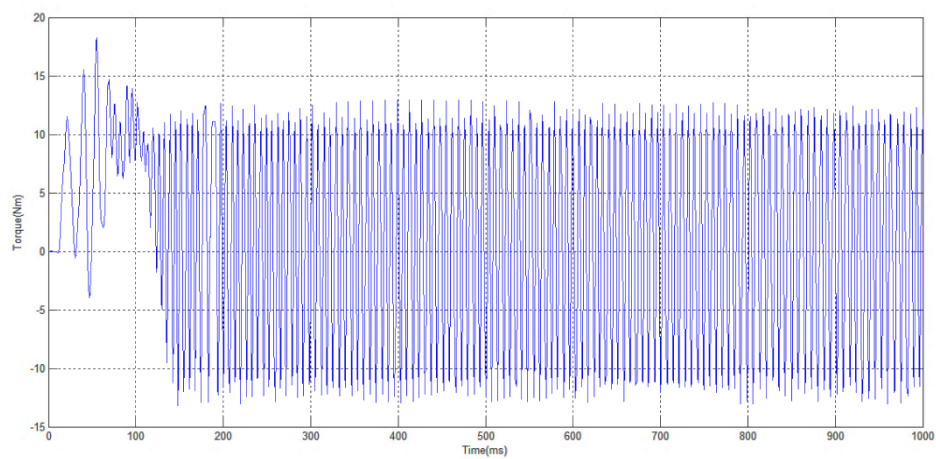


شکل ۵-۸: ساختار داخلی ساب سیستم ROTOR

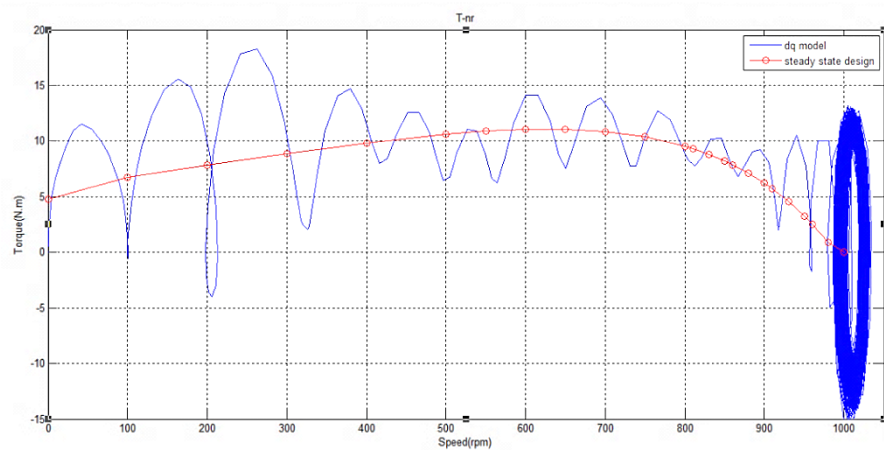
و نتایج شبیه سازی به شکل زیر است:



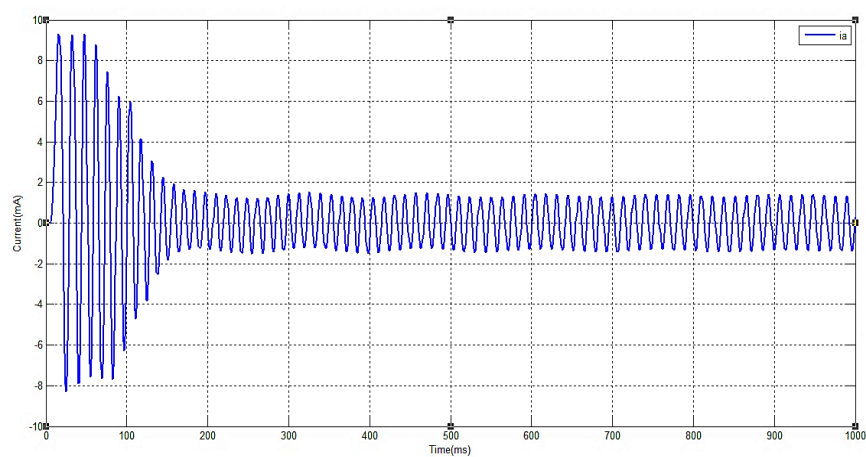
شکل ۵-۹: خروجی سرعت بر حسب زمان



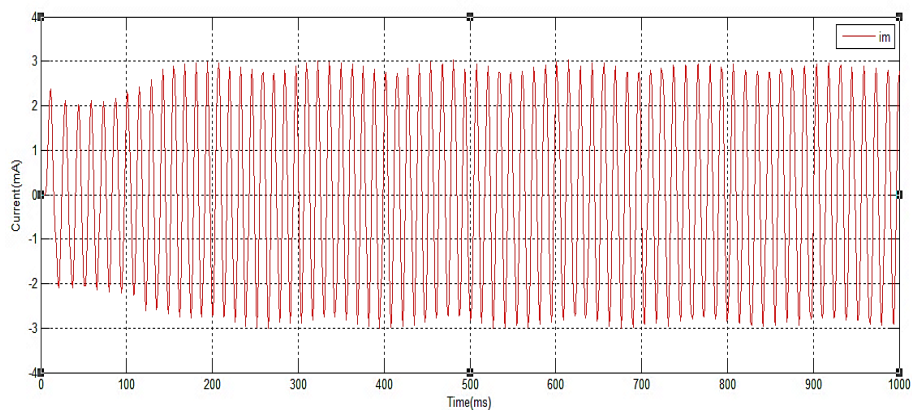
شکل ۵-۱۰: خروجی گشتاور بر حسب زمان



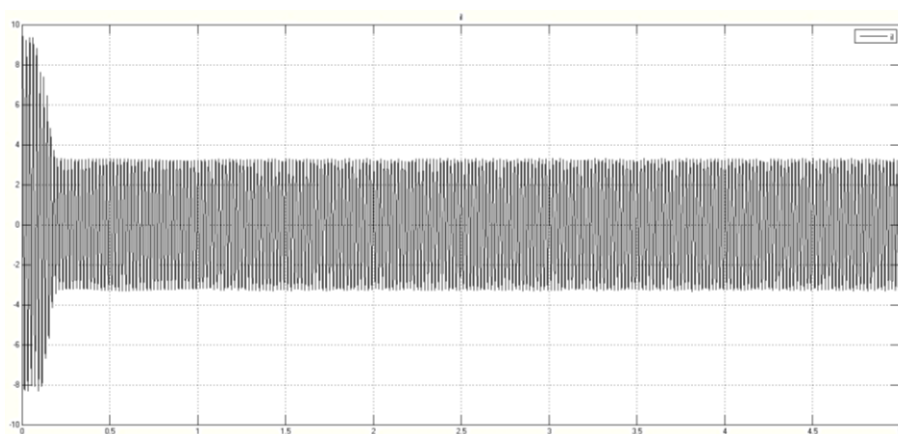
شکل ۵-۱۱: خروجی گشتاور بر حسب سرعت



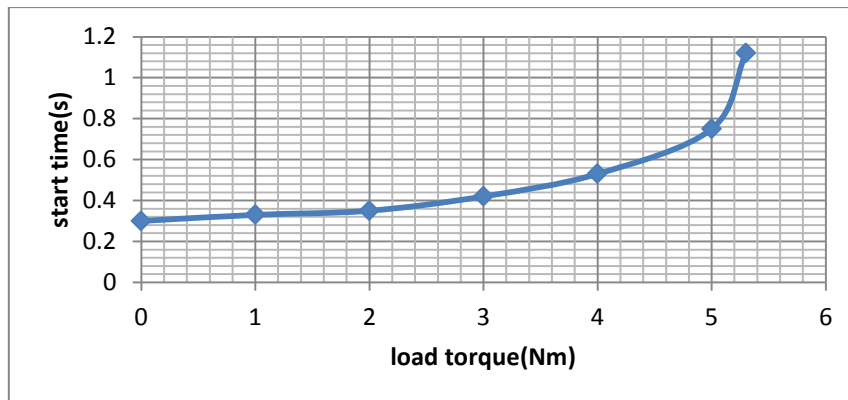
شکل ۵-۱۲: جریان سیم پیچ کمکی بر حسب زمان



شکل ۵-۱۳: جریان سیم پیچ اصلی بر حسب زمان



شکل ۵-۱۴: جریان کل ورودی به موتور بر حسب زمان

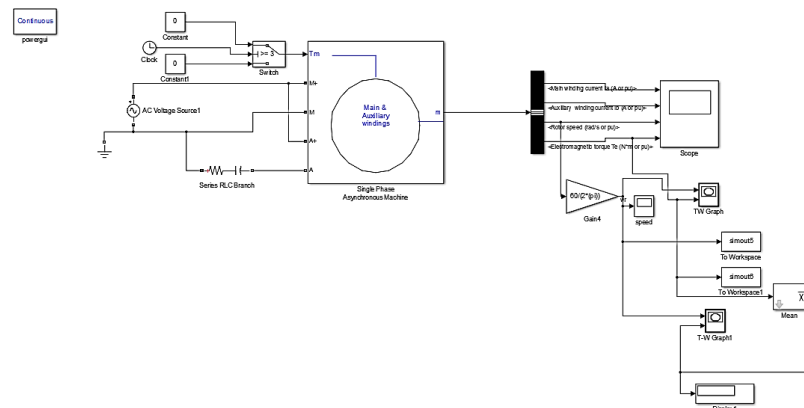


شکل ۵-۱۵: نمودار زمان استارت موتور بر حسب گشتاور بار اعمالی اولیه به موتور

۵-۳- شبیه سازی با مدل آماده متلب :

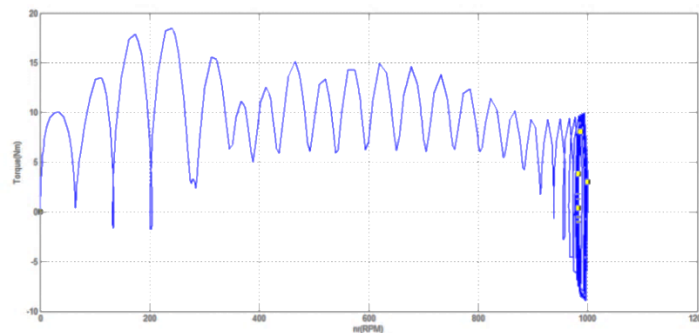
برای شبیه سازی می توان از مدل آماده سیمولینک متلب نیز به شکل زیر استفاده کرد که نتایج مشابهی

ارائه می - نماید.



شکل ۵-۱۶: شبیه سازی موتور تکفاز خازن دائم به وسیله مدل آماده سیمولینک متلب

خروجی گشتاور سرعت / این مدل به شکل زیر است:



شکل ۵-۱۷: خروجی گشتاور سرعت مدل آماده سیمولینک متلب برای موتور مورد نظر

فصل

ششم

در این فصل ضمن بر شمردن راههای بهینه سازی موتور شار محوری تکفاز، نتایج حاصل از شبیه سازی با مدل آماده سیمپولینک متلب، نتایج حاصل از شبیه سازی با مدل حالت دائمی پیشنهادی در فصل ۳ و نتایج حاصل از اجزای محدود با مدل خطی و دایره ای دو بعدی مقایسه شده است. همچنین پیشنهادهایی برای ادامه کار در آینده ارائه شده است.

نظر به اینکه هدف از ارائه این پروژه، بهبود راندمان، گشتاور، کاهش جریان و کاهش هزینه های تولید موتور شار محور می باشد، در نتیجه پیشنهادهایی به شکل زیر جهت بهبود عملکرد و کم کردن معایب این نوع موتور ارائه می شود:

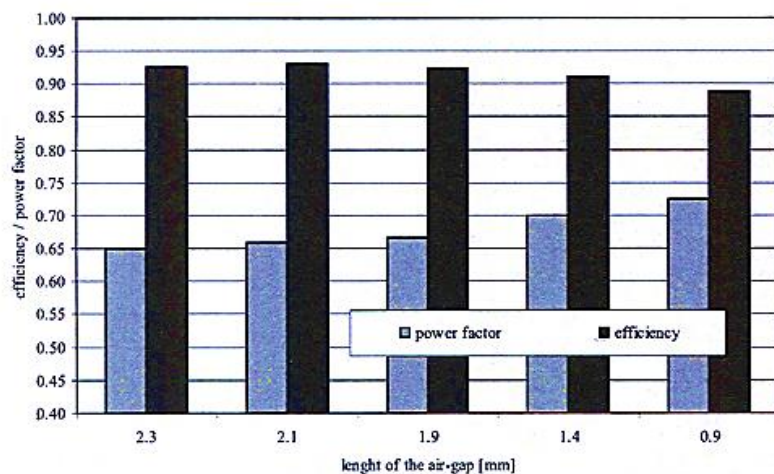
۶-۱-تاثیر تغییر طول فاصله هوایی:

یکی از مشخصه های اصلی و مهم موتور های شارمحوری طول فاصله هوایی قابل تنظیم است، در [2,4,41] مطالبی در مورد تاثیر تغییر فاصله هوایی روی پارامترهای مختلف موتور ذکر شده است.

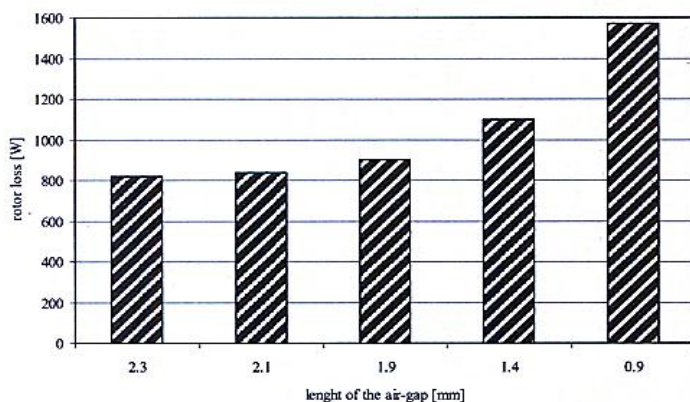
افزایش طول فاصله هوایی به طور کلی باعث افزایش آمپر دور فاصله هوایی و در نتیجه افزایش جریان مغناطیس کننده موتور و بنابر این افزایش تلفات مسی استاتور خواهد شد اما تلفات جریان گردابی کاهش می یابد.[41] در نتیجه راندمان کاهش می یابد ، همچنین افزایش فاصله هوایی باعث کاهش کسینوس فی می گردد.[41] در ضمن افزایش این فاصله باعث کاهش گشتاور نامی می گردد[4] ، اما خطر جذب استاتور به روتور کم شده و ضربان های شار در دندانه ها کاهش می یابد ،همچنین راکتانس های نشتی نیز کم می شود.

کاهش طول فاصله هوایی باعث افزایش محتوای هارمونیک چگالی شار مغناطیسی و افزایش نیروی کشش مغناطیسی بین روتور و استاتور و خنک سازی دشوار می گردد.[4] همچنین این کاهش باعث افزایش تلفات ژولی روتور می گردد. کاهش فاصله هوایی باعث افزایش لغزش نیز می گردد.[2]

نمودار های مقایسه ای برای یک موتور شار محوری نمونه که در [41] آمده است ،به شکل زیر می باشد:



شکل ۶-۱: نمودار تغییر راندمان و ضریب قدرت بر حسب تغییر فاصله هوایی



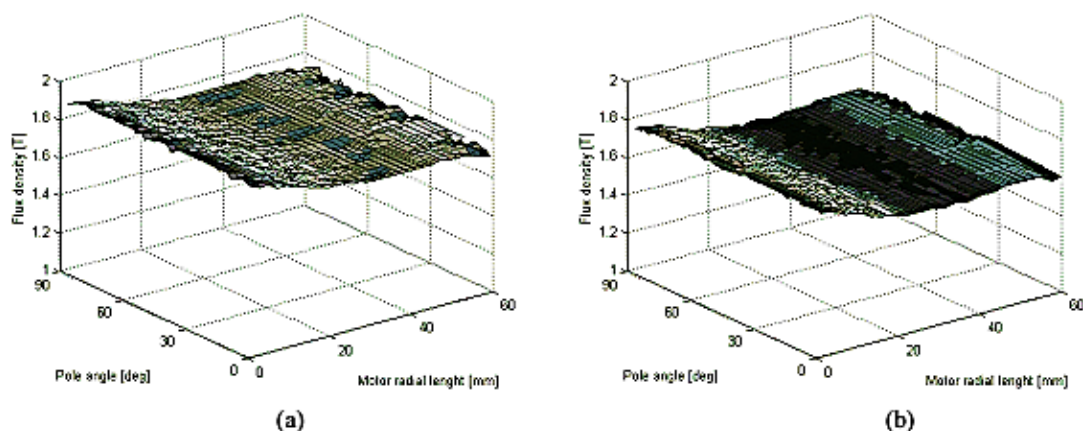
شکل ۶-۲: نمودار تغییر تلفات روتور بر حسب تغییر فاصله هوایی

برای داشتن یک عملکرد خوب در ماشین شار محوری باید چگالی شار فاصله هوایی، بیشترین مقدار انتخاب گردد تا در نتیجه گشتاور ماکزیمم گردد. [2] به طور کلی می توان صحبت های بالا را به شکل زیر نوشت:

$$L_g \downarrow \Rightarrow (\cos \phi \uparrow, T_n \uparrow, s \uparrow, F(Y) \uparrow, B_{gh} \uparrow) \quad (۱-۶)$$

۶-۲-تأثیر تغییر اندازه یوغ:

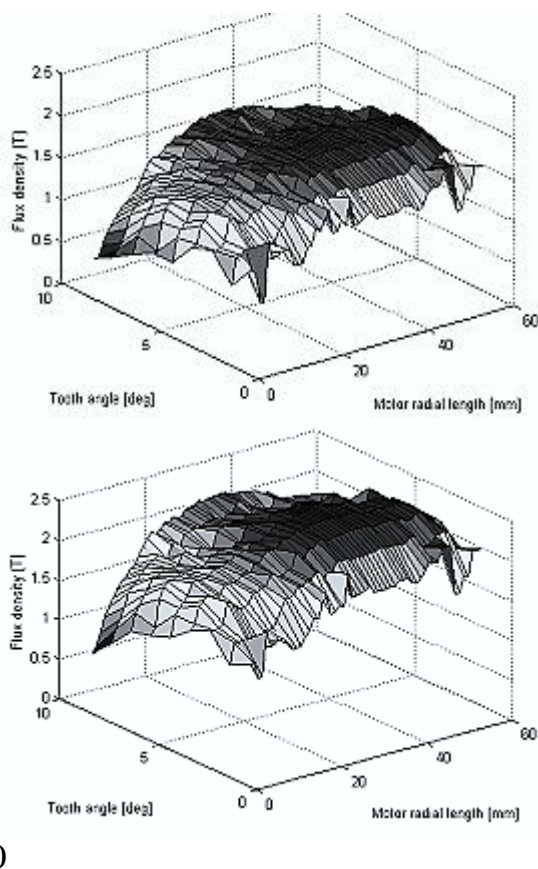
چگالی میدان مغناطیسی در یوغ معمولاً بین ۰.۴ و ۱.۶ است. [2] اگر چگالی میدان مغناطیسی بالاتر از حد باشد، هسته به اشباع رفته و تلفات نیز افزایش می یابد. در [2] نمودار های مقایسه ای برای یک موتور شار محوری نمونه، که با روش اجزای محدود ۳ بعدی بدست آمده، وجود دارد، که با دقت در این نمودارها متوجه می شویم با کاهش یوغ روتور، چگالی میدان مغناطیسی افزایش می یابد.



شکل ۳-۶: a: نمودار تغییر چگالی شار یوغ بر حسب تغییر ضخامت یوغ از ۲۰ میلیمتر (شکل a) به ۳۰ میلیمتر (شکل b)

۳-۶- تأثیر تغییر طول دندانه ها:

به طور کلی با کاهش طول دندانه، چگالی شار در دندانه افزایش یافته و اگر طراحی اشتباه صورت گیرد، دندانه به اشباع رفته و تلفات بالا می رود. [2] نمودار های مقایسه ای برای یک موتور شار محوری نمونه به شکل ۴-۶ است:



شکل ۴-۶: نمودار تغییر چگالی شار دندانه بر حسب تغییر طول دندانه از ۲۰ میلیمتر (شکل a) به ۱۵ میلیمتر (شکل b)

۶-۴-تأثیر پهنا و ارتفاع شیار:

افزایش پهنای شیار استاتور و روتور در کل باعث افزایش حجم هسته و کاهش پهنای دندانه و در نتیجه اشباع می گردد.[4]

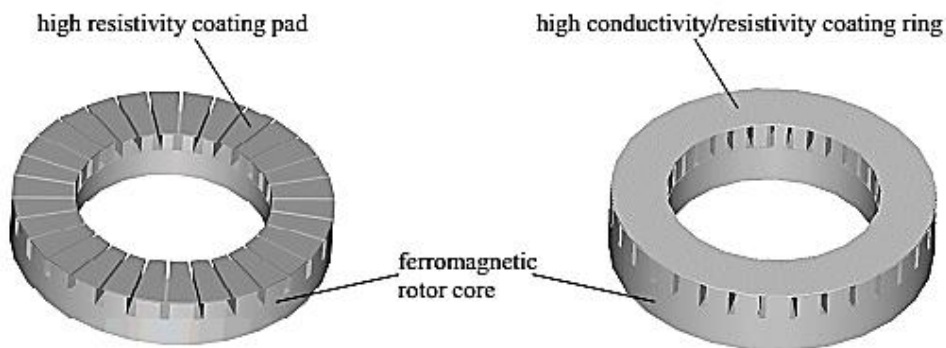
کاهش پهنای شیار استاتور در ارتفاع ثابت باعث افزایش ضریب پرشوندگی شیار شده و در نتیجه ممکن است، سیم پیچ در شیار ها جا نشود.[4]

کاهش پهنای شیار روتور در ارتفاع ثابت، باعث افزایش مقاومت روتور و کاهش راندمان و کسینوس فی و گشتاور می گردد.[4] البته کاهش پهنای شیار روتور سبب کاهش نويز می گردد.

کاهش ارتفاع شیار روتور و استاتور باعث می گردد تا راکتانس نشتی کاهش و کسینوس فی افزایش یابد.(البته اگر سیم ها جا شوند).

۶-۵-تأثیر پوشاننده روتور^{۷۰}:

طبق [2] استفاده از یک پوشش روی سطح استاتور باعث کاهش هارمونیک های فرکانس بالا قبل از نفوذ به روتور و همچنین کاهش جریان گردابی^{۷۱} و اصلاح^{۷۲} توزیع چگالی شار می گردد. این پوشش معمولاً از دو لایه پوشش زیری^{۷۳} و پوشش رویی^{۷۴} تشکیل شده است.



شکل ۶-۵: پوشاننده زیری و رویی برای روتور موتور شار محوری

⁷⁰ Rotor coating

⁷¹ Eddy current

⁷² smooth

⁷³ Coating pad

⁷⁴ Coating ring

جنس این پوشاننده در فرکانس های متوسط و بالا مس است ولی در کاربردهای عمومی لایه زیری از یک آلیاژ با مقاومت بالا که شامل استیل کربنی Fe52 و ماده ۱ ماده ۲ که از نوع فرو مغناطیسی تجاری خاصی هستند، تشکیل می گردد. و لایه رویی معمولا از جنس مس و ماده دوم می باشد. در حقیقت پوشش رویی مانند یک آینه برای هارمونیک های فرکانس بالا عمل می نماید.[2] همچنین جریان گردابی القا شده کاهش یافته و امپدانس سطح روتور افزایش می یابد .

۶-۶-۶-۶ راه های بهبود راندمان:

بدلیل حذف تسمه و قرقره و خاصیت دایرکت درایو بودن موتور شار محوری، راندمان این موتور ها از موتورهای شار شعاعی هم توان، بالاتر است. با تغییر در پارامترهای گفته شده در قسمت های قبل می توان به طراحی بهتر و راندمان بالاتری از ماشین دست یافت. اما راههای دیگری نیز برای افزایش راندمان به شکل زیر وجود دارد:

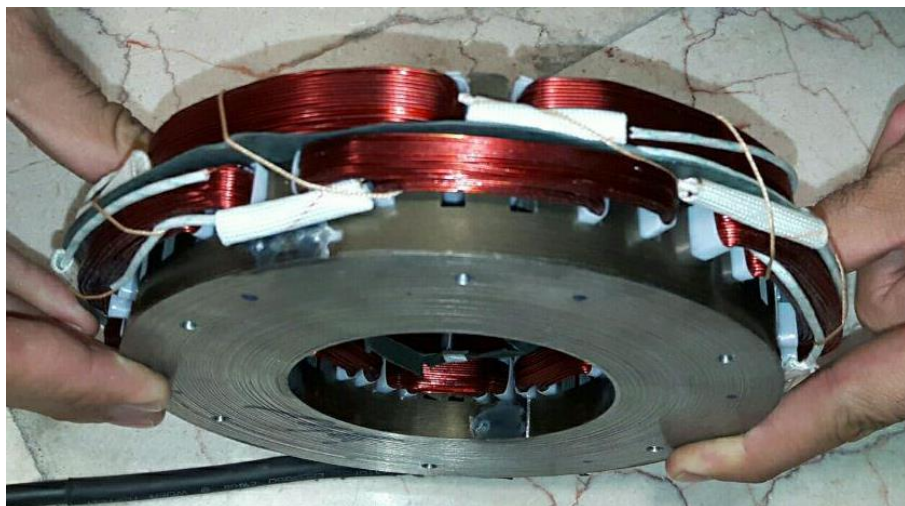
الف) استفاده از ماده مغناطیس خاصی که برای گوه شیار^{۷۵} استاتور کاربرد دارد. این ماده با نام magnoval 2067 شناخته می شود. که دارای مشخصه های مغناطیسی ، الکتریکی و فیزیکی زیر می باشد.

Properties	Norm	Unit	Value						
Magnetic induction	IPV Nr. 11	Tesla	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
Relative permeability [$\mu(B)$] Tolerance: $\pm 10\%$	IPV Nr. 11	-	2.8	2.9	2.9	2.8	2.6	2.5	2.4
Magnetic field strength	IPV Nr. 11	A/cm	500	1000	1500	2000	2500		
Magnetic induction [B(H)] Tolerance: $\pm 10\%$	IPV Nr. 11	Tesla	0.18	0.35	0.5	0.63	0.73		
Properties	Norm	Unit	Value						
Density	ISO 1183	g/cm ³	3.5 $\pm$ 0.2						
Flexural strength at 23°C / 150°C	ISO 178	MPa	≥ 150 / ≥ 120						
Modulus of elasticity at 23°C / 150°C	ISO 178	GPa	approx. 12 / approx. 9						
Resistivity	IEC 60167	Ohm x cm	$\geq 1 \times 10^6$						
Iron content		%	approx. 75						
Glass content		%	approx. 7						
Resin content		%	approx. 18						
Temperature index	IEC 60216	°C	approx. 155						

شکل ۶-۶-۶: مشخصات الکتریکی و مغناطیسی و فیزیکی ماده magnoval 2067

ب) تغییر نوع سیم پیچی از متحدالمرکز به زنجیری و تغییر فرم کله سیم ها به حالت کج شده در دولایه .
هم اکنون در کارخانه نیرو تهویه به دلیل سیم پیچی صنعتی و بالا بردن سرعت کار، سیم پیچی به صورت متحدالمرکز و بدون تغییر شکل کله سیم تولید می گردد، که این عمل باعث عدم تقارن جریانی در سیم پیچ ها و تولید هارمونیک و تلفات می گردد.

⁷⁵ Slot wedge



شکل ۶-۷: نحوه سیم پیچی متحدالمرکز بدون تغییر طبقه ی موتور تکفاز شار محور ، در شرکت نیرو تهویه
 ج) کم کردن نیروی جاذبه مغناطیسی بین روتور و استاتور ($F(Y)$) با استفاده از ساختار دو طرفه (دو بر) که می تواند
 راندمان را بالا ببرد اما هزینه ساخت تا حد زیادی در توانهای کم، مانع ساخت موتور با این ساختار گردیده است.
 د) استفاده از ساختار شبه یاتاقان گفته شده در شکل ۱-۵ فصل اول، که البته ایراد هایی از جمله خورده شدن ساچمه ها
 و آلومینیوم روتور و افزایش نویز و سروصدا با مرور زمان، دارد.

ه) افزایش نسبت $\lambda = \frac{D_o}{D_i}$ که باعث افزایش راندمان، چگالی شار فاصله هوایی و گشتاور می گردد، اما باعث افزایش

حجم هسته و جا رفتن سخت پیشانی کلاف ها در داخل موتور، می گردد.

و) بهبود کاسه موتور^{۷۶} برای ارتباط بیشتر با هوای اطراف و خارج کردن گرما از استاتور ، که نیاز به تحلیل حرارتی موتور
 دارد.



شکل ۶-۸: کاسه موتور (stator housing) موتور شار محور

⁷⁶ Stator housing

ز) انتخاب نوع مرغوب فولاد و تست هسته با آزمایش اِپشتاین.

طبق شکل ۲-۱۰ فصل دوم ، آزمایش مذکور در کارخانه نیرو تهویه انجام شد و نتیجه حاکی از متفاوت بودن مشخصه کاتالوگ و شکل بدست آمده بود. که البته مقداری خطا به دلیل انجام آزمایش در فرکانس ۵۰ هرتز و ایجاد تلفات گردابی قطعاً وجود داشته است. این آزمایش حدود ۱۰ درصد کمتر بودن B را در منحنی مغناطیسی ورق فولاد M470-50A نشان داد. همچنین باید توجه نمود بعد از پانچ کاری و عملیات حرارتی روی استاتور یا روتور این مشخصه باز هم افت خواهد داشت. به طور کلی در انتخاب نوع هسته و کاربرد مورد نظر باید دقت خاصی نمود. مشخصه برخی از هسته های پر کاربرد در موتورهای الکتریکی به صورت شکل زیر می باشد:

Typical Magnetic Properties									
Typical Characteristics									
Grade		Thickness (mm)	Core Loss (W/kg)				Magnetic Induction (T)		
Reference	ArcelorMittal Inox Brasil		1.0 T		1.5 T		B2500	B5000	B10000
			50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz			
P800-100A ⁽¹⁾	E233	1.00	3.08	4.14	6.59	8.93	1.67	1.75	1.86
P470-65A ⁽¹⁾	E233	0.64	1.73	2.26	3.74	4.92	1.66	1.76	1.86
M600-65A	E230		1.83	2.35	3.97	5.16	1.62	1.74	1.82
M470-65A	E185		1.76	2.27	3.84	5.01			
M450-65A	E170		1.69	2.20	3.70	4.85			
M400-65A	E157		1.61	2.09	3.57	4.70			
M530-54A	E230		0.54	1.56	2.01	3.37	4.36	1.62	1.72
P400-50A ⁽¹⁾	E233	0.50	1.41	1.81	3.08	3.97	1.66	1.75	1.85
M530-50A	E230		1.51	1.92	3.29	4.21	1.62	1.72	1.82
M470-50A	E185		1.46	1.88	3.19	4.10			
M400-50A	E170		1.42	1.83	3.10	4.00			
M370-50A	E157		1.38	1.77	3.02	3.90			
M350-50A	E145		1.33	1.72	2.94	3.82			
M330-50A	E137		1.24	1.60	2.77	3.58	1.60	1.70	1.82
M310-50A	E125		1.11	1.42	2.54	3.28			
M290-50A	E115		1.08	1.38	2.48	3.21			
M270-50A	E110		1.04	1.34	2.42	3.13			
M250-50A	E105		1.01	1.30	2.40	3.11			
M230-50A	E100		0.93	1.20	2.26	2.93	1.59	1.69	1.81

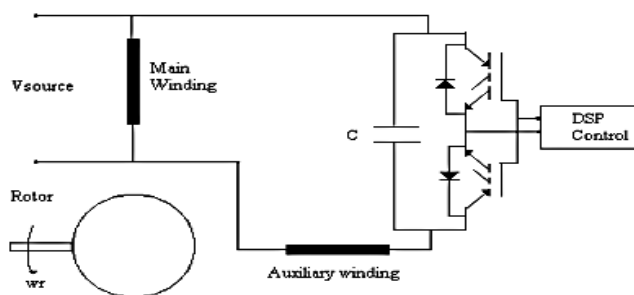
جدول ۶-۱: مشخصه فولادهای مغناطیسی پر کاربرد در صنعت تولید الکتروموتور

۶-۷- راه های بهبود گشتاور:

با توجه به تئوری میدان گردان، نیروهای برشی که به دلیل میدان دوار نامتقارن، به طور ذاتی در موتور تکفاز، وجود دارد، همواره گشتاور دارای ریبلی را برای موتور، تولید می نمایند. استفاده از بلبرینگ های مرغوب و بالانس کردن مناسب روتور و توجه به عدم وجود نا هم محوری می تواند در بهبود وضعیت گشتاور، کمک شایانی نماید.

همانطور که از فرمول گشتاور راه اندازی مشخص است، این گشتاور وابسته به مقاومت روتور است پس تعیین و ساخت درست روتور اهمیت دارد. همچنین گشتاور ماکزیمم به مقاومت روتور بستگی ندارد. [39]

از آنجایی که معمولا در شرایط راه اندازی، حداکثر بودن گشتاور متوسط و در شرایط کار دائم، حداقل بودن نوسانات گشتاور و کاهش گشتاور دندانه ای مهم است در نتیجه باید مصالحه ای بین این دو برقرار گردد. یک راه حلی که در [43, 46] گفته شده است، تغییر مقدار خازن به روش کلید زنی برای حصول به این نتیجه می باشد، بدین ترتیب که ابتدا برای داشتن گشتاور راه اندازی زیاد، خازن بزرگ و در هنگام کار، خازن کوچک باشد.



شکل ۶-۹: تغییر مقدار خازن به روش کلید زنی برای داشتن بهترین شرایط گشتاور

۶-۸- مقایسه نتایج:

با توجه به مطالب گفته شده در فصول قبلی، نتایج حاصل از آزمایشات، مدل حالت دائمی، مدل dq و مدل اجزای محدود، جهت مطابقت، در یک نمودار رسم گردیده اند تا صحت نتایج، تایید گردد.

نتایج حاصل از مدل سیمولینک متلب در جدول زیر آمده است:

TL	S	ns	nr	Te _{avg}	il	im	ia	tstart
0	0.016	1000	984	1	1.75	1.45	3.15	0.3
1	0.027	1000	973	3	1.96	1.19	3.14	0.33
2	0.039	1000	961	4.5	2.31	0.7	3.14	0.35
3	0.052	1000	948	6.5	2.55	0.55	2.87	0.42
4	0.066	1000	934	9	2.87	0.5	2.8	0.53

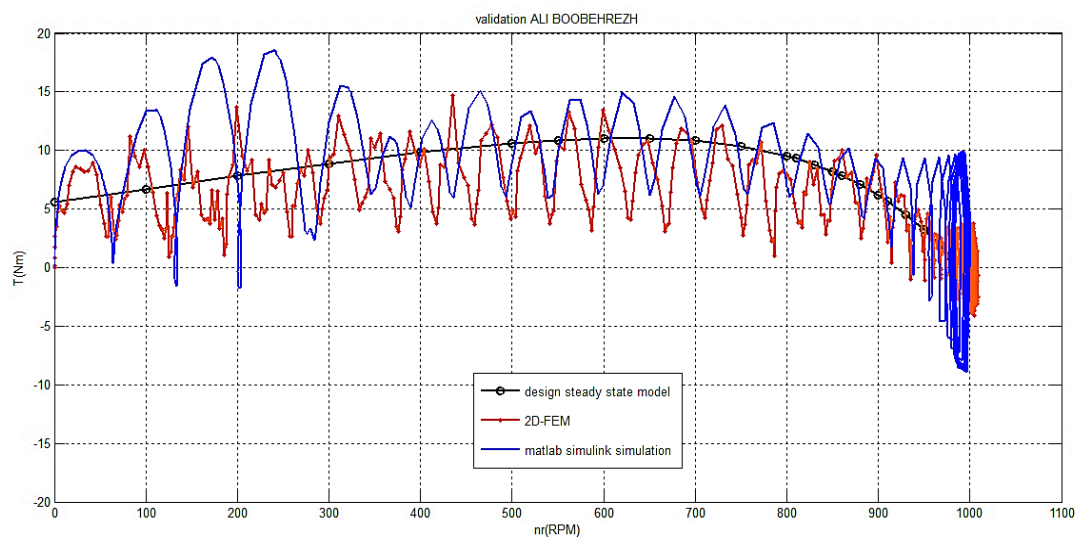
جدول ۶-۲: نتایج حاصل از مدل سیمولینک متلب

و نتایج حاصل از مدل اجزای محدود دو بعدی به صورت جدول زیر می باشد:

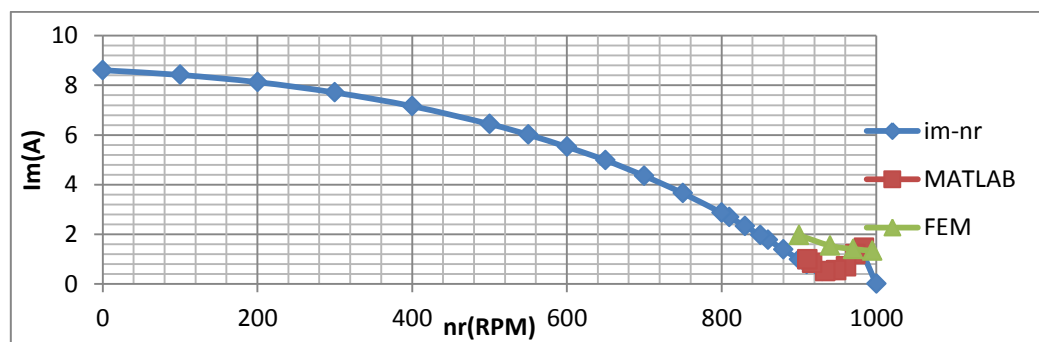
TL	S	ns	nr	Te _{avg}	im	ia
0	0.005	1000	995	1	1.33	2.87
1	0.02	1000	970	2.5	1.4	2.66
2	0.04	1000	940	2.7	1.54	2.59
3	0.06	1000	900	3.5	1.96	2.45

جدول ۶-۳: نتایج حاصل از مدل اجزای محدود دو بعدی

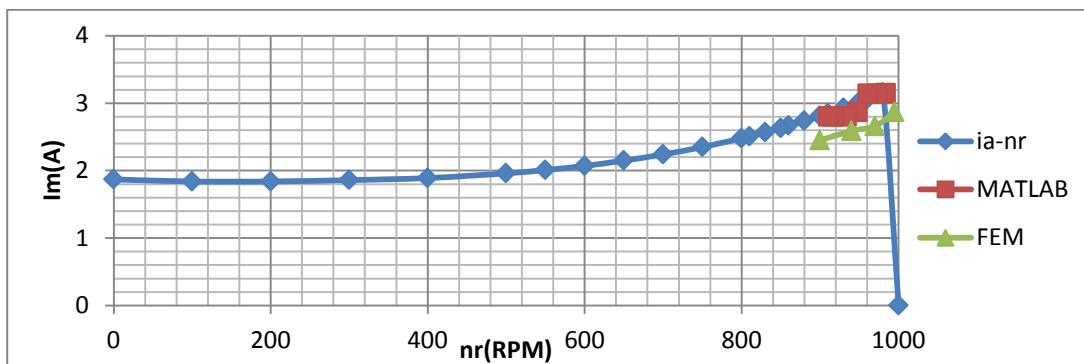
نمودارهای مقایسه ای به صورت شکل های بعدی می باشد:



شکل ۶-۱۰: نمودار گشتاور سرعت با سه روش طراحی حالت دائم، اجزای محدود و مدل سازی با متلب



شکل ۶-۱۱: نمودار جریان سیم پیچ اصلی بر حسب سرعت با سه روش طراحی حالت دائم، اجزای محدود و مدل سازی با متلب



شکل ۶-۱۲: نمودار جریان سیم پیچ کمکی بر حسب سرعت با سه روش طراحی حالت دائم، اجزای محدود و مدلسازی با متلب

۶-۹- بهینه سازی:

جهت مقایسه، با توجه به اینکه در الگوریتم طراحی، مقدار مطلوب طول استاتور ۵۰ میلی متر است، به وسیله روش

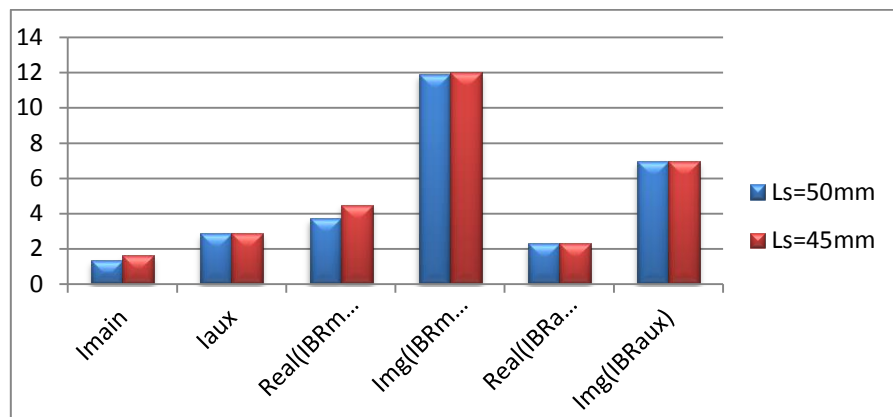
اجزای محدود، شبیه سازی تکرار گردید و نتایج به شرح ذیل، حاصل شد. توجه شود که نتایج زیر حاصل از تحلیل های

فرکانسی و تحلیل های زمانی به وسیله نرم افزار jmag می باشد.

نام پارامتر	علامت اختصاری	Ls=45mm	Ls=50mm
جریان ماکزیمم سیم پیچ اصلی در شرایط بی باری	Imain	۱.۶۱	۱.۳۳
جریان ماکزیمم سیم پیچ کمکی در شرایط بی باری	Iaux	۲.۸۷	۲.۸۷
مقدار حقیقی جریان ماکزیمم سیم پیچ اصلی در حالت روتور قفل شده	Real(IBRmain)	۴.۵	۳.۷۲
مقدار موهومی جریان ماکزیمم سیم پیچ اصلی در حالت روتور قفل شده	Img(IBRmain)	۱۲	۱۱.۹۱
مقدار حقیقی جریان ماکزیمم سیم پیچ کمکی در حالت روتور قفل شده	Real(IBRaux)	۲.۳۱	۲.۳
مقدار موهومی جریان ماکزیمم سیم پیچ کمکی در حالت روتور قفل شده	Img(IBRaux)	۶.۹۸	۶.۹۷
توان ورودی سیم پیچ اصلی	Pmain	۳۶۱.۵۵	۳۶۱.۴۳
توان ورودی سیم پیچ کمکی	Paux	۶۱۹.۱۷	۶۱۷.۰۶
مقدار چگالی شار ماکزیمم	B	۰.۵۸	۰.۵۴۵
تلفات ژولی کل بر حسب وات	Joule Loss	۱۵۲.۹۱	۱۴۹.۹۸
میانگین سرعت بی باری	nr	۹۹۹	۹۹۷

جدول ۶-۴: مقایسه پارامترهای مختلف موتور در دو حالت طول استاتور ۵۰ و ۴۵ میلی متر

و نمودار تفاوت این پارامترها در شکل زیر آورده شده است:



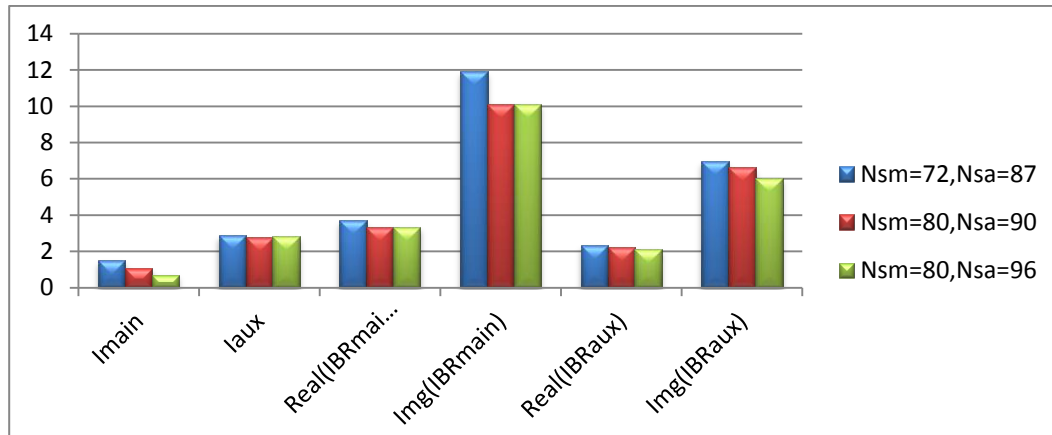
شکل ۶-۱۳: نمودار ستونی مقایسه جریان های مختلف موتور در دو حالت طول استاتور ۵۰ و ۴۵ میلی متر

از جدول ۶-۴ و نمودار ۶-۱۳ می توان به نتایج رسید. با افزایش اندازه یوگ استاتور، جریان و توان ورودی و تلفات کاهش می یابد و گشتاور افزایش می یابد. اما در عوض چگالی شار فاصله هوایی کم شده و لغزش افزایش می یابد و در ضمن هزینه ها نیز بالا می رود. در ادامه مقایسه ای بین حالت های مختلف برای تعداد دور سیم پیچی، به وسیله نرم افزار JMAG انجام شده است که در ادامه ذکر می گردد:

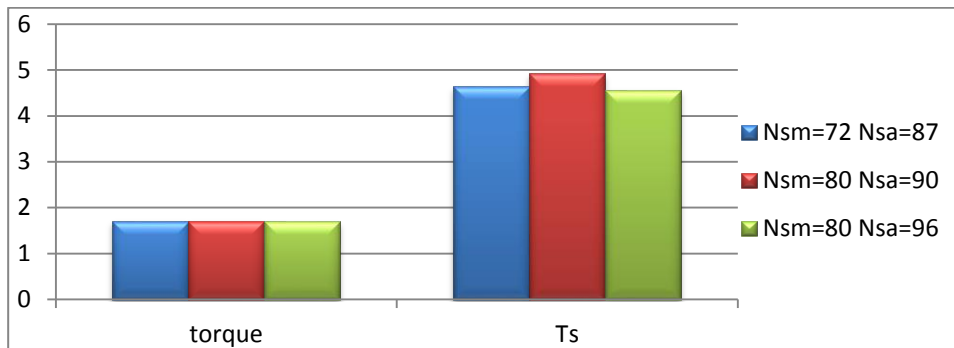
نام پارامتر	علامت اختصاری	Nsm=72 Nsa=87	Nsm=80 Nsa=90	Nsm=80 Nsa=96
جریان ماکزیمم سیم پیچ اصلی در شرایط بی باری	I _{main}	۱.۴۸۹	۱.۰۵۴	۰.۷۰۷۳
جریان ماکزیمم سیم پیچ کمکی در شرایط بی باری	I _{aux}	۲.۸۸۱	۲.۷۶۰۷	۲.۸۴۳۸
مقدار حقیقی جریان ماکزیمم سیم پیچ اصلی در حالت روتور قفل شده	Real(IBR _{main})	۳.۷۲	۳.۳۵	۳.۳۵
مقدار موهومی جریان ماکزیمم سیم پیچ اصلی در حالت روتور قفل شده	Img(IBR _{main})	۱۱.۹۱	۱۰.۱۲	۱۰.۱۲
مقدار حقیقی جریان ماکزیمم سیم پیچ کمکی در حالت روتور قفل شده	Real(IBR _{aux})	۲.۳۱	۲.۲۵	۲.۱۳
مقدار موهومی جریان ماکزیمم سیم پیچ کمکی در حالت روتور قفل شده	Img(IBR _{aux})	۶.۹۷	۶.۶۴	۶.۰۴
چگالی شار ماکزیمم	B	۰.۶۴۷	۰.۶۶۲	۰.۶۳
تلفات ژولی کل بر حسب وات	Joule Loss	۱۴۹	۱۳۱	۱۳۷
میانگین سرعت بی باری	nr	۹۹۹	۹۹۶	۹۹۲
گشتاور متوسط بی باری حالت دائمی	Torque	۱.۷۰۹۱	۱.۷۰۴۷	۱.۶۹۵۰
گشتاور راه اندازی	Ts	۴.۶۴	۴.۹۲	۴.۵۶

جدول ۶-۵: مقایسه پارامتر های مختلف موتور در سه حالت تعداد دور سیم پیچی

و نمودار تفاوت این پارامترها در شکل زیر آورده شده است:



شکل ۶-۱۴: نمودار ستونی مقایسه جریان های مختلف موتور در سه حالت تعداد دور سیم پیچی ها از جدول ۶-۵ و شکل ۶-۱۴ مشخص است که کمترین تلفات و بیشترین چگالی شار فاصله هوایی و بیشترین گشتاور راه اندازی در نسبت تبدیل ۹۰/۸۰ رخ می دهد. ولی لغزش در نسبت تبدیل ۸۷/۷۲ کمتر است اما گشتاور متوسط در شرایط بی باری در هر سه مورد تقریباً مشابه است.



شکل ۶-۱۵: نمودار ستونی مقایسه گشتاورهای استارت و بی باری موتور در سه حالت تعداد دور سیم پیچی ها

۶-۱۰- نتیجه گیری:

با توجه به متن، یک روش کامل طراحی برای موتور تکفاز خازن دائم شار محوری که در منابع بسیار کمی در مورد آن صحبت شده است، ارائه گردید و یک مدل dq و یک مدل حالت دائمی برای این موتور پیشنهاد گردید و شبیه سازی کاملی شامل حالت دائمی و حالت گذرا، که در هیچ منبعی بدین شکل موجود نبود، ارائه گردید. همچنین با استفاده از روش اجزای محدود مدل دو بعدی خطی و دایره ای ترسیم گردید و نتایج خروجی رسم شد. از نتایج حاصله از نمودارها مشخص است که الگوریتم طراحی ارائه شده و مدل حالت دائمی حاصل از آن، در این مقاله، طبق محاسبات انجام شده با مدل واقعی و مدل تحلیلی dq و مدل اجزای محدود استفاده شده، مطابقت دارد و بنابراین می تواند به عنوان یک روش

طراحی قابل اطمینان برای این موتورها استفاده شود. همچنین طبق مقایسه نمودارهای خروجی شبیه سازی انجام شده با مدل آماده نرم افزار سیمولینک متلب صحت مدل کشیده شده تایید گردید. در فصل پایانی نیز ضمن برشمردن راههای بهبود راندمان و گشتاور راه اندازی و گشتاور کار، مقایسه ای بین مقادیر حاصل از آزمایش، الگوریتم طراحی، المان محدود و شبیه سازی متلب صورت گرفت که نشان از مطابقت این پارامترها داشت.

۶-۱۱- پیشنهادات برای ادامه کار در آینده:

با توجه به مطالب گفته شده در این پروژه، برای بهینه سازی موتور می توان از الگوریتم های هوشمندی چون ژنتیک، رقابت استعماری، PSO و... استفاده نمود و موتور را به بهترین نحوی بهینه سازی کرد تا بتوان ضمن داشتن تلفات کم و بازده بالا، گشتاور کار و راه اندازی و لغزش قابل قبول داشت.

ضمناً می توان با استفاده از مدل های حرارتی نسبت به تحلیل و ارائه یک مدل عملکرد حرارتی برای تحلیل دقیق تر این نوع ماشین ها اقدام نمود. همچنین استفاده از خازن متغیر به روش کلیدزنی با مدارات الکترونیک قدرت، برای داشتن حداکثر گشتاور در هر لجزه که در متن نیز اشاره شد از روشهای مدرن کنترل این ماشینها است که می تواند زمینه ای برای مطالعات آتی باشد.

از موارد دیگر، استفاده از موتور با سوپر هادیها (HTS)⁷⁷ و موتور بدون هسته است، که می تواند بازده خروجی را افزایش دهد. با پیشرفت تکنولوژی این نوع از موتورها در بین موتورهای شار محور نیز توسعه یافته اند. حذف هسته استاتور، علاوه بر رفع نگرانی ساخت هسته، باعث حذف تلفات هسته استاتور نیز خواهد شد. ماشین های الکتریکی که با استفاده از سیم پیچ های ابررسانا ساخته می شوند، دارای حجم کمتر و راندمان بیشتری نسبت به ماشین های الکتریکی معمولی هستند. این موضوع نیز به عنوان یک زمینه مطالعاتی در ادامه این پروژه می تواند باشد.



شکل ۶-۱۶: مقایسه بین ابعاد موتور با تکنولوژی معمول و ابر هادیها

⁷⁷ High temperature superconductor

منابع

منابع مورد استفاده:

- [1] Zahra NASIRI-GHEIDARI, Hamid LESANI "A Survey on Axial Flux Induction Motors" PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), R. 88 NR 2/2012ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), pp.300-305, 2/2012
- [2] Mikko Valtonen, "Performance Characteristics Of An Axial-Flux Solid-Rotor-Core Induction Motor" Phd Thesis, Lappeenranta University Of Technology, Lappeenranta, Finland, 2007.
- [3] Benard Capaldi,"THE THEORY AND PERFORMCE OF A. C. AXIAL FLUX MACHINES" A thesis submitted to the University of Warwick for the degree of Doctor of Philosophythesis submitted to the University of Warwick for the degree of Doctor of Philosophy, October, 1973
- [4] زهرا نصیری قیداری، "طراحی بهینه و ساخت موتور القایی کوچک شار محوری"، رساله جهت اخذ درجه دکتری، دانشگاه تهران، ۱۳۹۲
- [5] A. Benoudjit, N. Nait Said, "New Dual-Airgap & Radial-Flux Induction Motor For On Wheel Drive Electric Propulsion Systems", Ieee, 1998
- [6] R Wallace, L Mopan, G Cea, F Perez, "Design And Construction Of Medium Power Axial Flux Induction Motors", IEEE, Pp.260-265
- [7] Pesari Neelima, Mrs. Ch. Manjeera, Mr. V Ramesh Babu, "Modelling Of Axial Flux Induction Machines And It Application As Differential In Electrical Vehicles", International Journal Of Innovative Research In Advanced Engineering (Ijirae) Volume 1 Issue 12 (December 2014)
- [8] Vijay Kumar Ghial, Lalit Mohan Saini, And Jasbir Singh Saini, "Parameter Estimation of Permanent-Split Capacitor-Run Single-Phase Induction Motor Using Computed Complex Voltage Ratio", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 61, NO. 2, FEBRUARY 2014
- [9] Z. NASIRI-GHEIDARI, H. LESANI, "Using Stator Discharge Current For The Parameter Estimation Of A Single-Phase Axial Flux Induction Motor", scientia iranica d, pp.1794-1801, (2012)
- [10] Zahra Nasiri-Gheidari, Hamid Lesani, "New Design Solution For Static Eccentricity In Single Stator-Single Rotor Axial Flux Induction Motors", IET Electr. Power Appl., 2013, Vol. 7, pp.523-534
- [11] D P Kothari, I J Nagrath, "Electric Machines" Forth Edition, Tata Mcgraw Hill Education Private Limited New Delhi, 2010
- [12] William H. Yeadon, Alan W. Yeadon, "Handbook Of Small Electric Motors", mcgraw-Hill, 2001
- [13] جواد سلیمانی، عبدالحسین اجلالی، "تئوری، طراحی و تحلیل ماشین های الکتریکی مخصوص"، انتشارات نهر دانش، چاپ اول، زمستان ۱۳۹۳
- [14] Z. Nasiri-Gheidari and H. Lesani, "Optimal Design of Adjustable Air-Gap, Two-Speed, Capacitor-Run, Single-Phase Axial Flux Induction Motors", IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 28, NO. 3, SEPTEMBER 2013
- [15] M. V. Dashpande, "Design & Testing Electrical Machine", Phi Learning, New Delhi, 2010
- [16] C. C. Chan, "axial-field electrical machines-design and applications" IEEE Transactions on energy conversion, vol. EC-2, No. 2, june 1987, pp. 294-300

[17]Farid Tootoonchian,Zahra Nasiri-Gheidari,Hamid Lesani, “Design,Analysis,And Implementation Of Extra Low Air-Gap Single-Phase Axial-Flux Induction Motors For Low-Cost Applications” ,International Transactions On Electrical Energy Systems ,2016

[18]K M Vishnu Murthy ,”Computer-Aided Design Of Electrical Machines”Bs Publications,2008

[19]P.C.Sen , “Principles Of Electric Machines And Power Electronics” , Third Edition,Wiley,2012

[20] حمید لسانی(مترجم)، "طراحی جامع ماشینهای الکتریکی" تألیف آک ساونی ، انتشارات دانش و فن ، چاپ اول ۱۳۶۱

[21] ion boldeasyed a. nasar ,” the induction machines design handbook” s e c o n d e d i t i o n ,crc press,2010

[22] Surong Huang, Jim Luo, Franco Leonardi, Thomas A. Lipo ,” A Comparison of Power Density for Axial Flux Machines Based on General Purpose Sizing Equations” IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 2, June 1999

[23]Liu Xinzhen ,Su Shaoping,Chen Dunli , “Integrated Cad Software For Axial Flux Induction Machines”

[24] علی عراقی،علی رحیمیان پرور،محمد حیدری،احمد معیری ،”محاسبه و طراحی موتورهای الکتریکی تکفاز،انیورسال و سیم بندی آرمیچر”.

نشر کیفیت،چاپ ششم،۱۳۸۴

[25] دکتر محمد رضا فیضی، کامران خفافی ،”ماشینهای الکتریکی مخصوص ” ، انتشارات دانشگاه تبریز،چاپ اول،۱۳۸۰

[26] Vtu Learning Course ,”Design Of Induction Motors”

[27] V. N. MITTLE,” DESIGN OF ELECTRICAL MACHINES”,

[28]M.Ashari, H.Suryoatmojo,...”Design And Implementation Of Axial Flux Induction Motor Single Stator – Single Rotor For Electric Vehicle Application” ,Iptek,Journal Of Proceeding Series, Vol.1,2014,Pp.497-502

[29] BOBON Andrzej,” 3D Finite Element Computation of Axial Flux in Induction Machine” , Transactions on Electrical Engineering, Vol. 1 (201 2),pp.72-75

[30] Qin Wei , Fan Yu, Zhu Xi ,Li Shuo ,”analysis on electromagnetic field of an axial- Flux Solid Aluminum Rotor Induction Motor”

[31] Zahra Nasiri-Gheidari, and Hamid Lesani,” Theoretical modeling of axial flux squirrel cage induction motor considering both saturation and anisotropy” , International Transactions On Electrical Energy Systems, 2014

[32] مجتبی میر سلیم، عارف درودی ، محمود حالتی املشی (مترجمان) ،”تحلیل ماشینهای الکتریکی با روش عناصر محدود ”،شپارد جی. سالون،

نشر دانشگاه صنعتی امیر کبیر، چاپ دوم، زمستان ۱۳۸۴

[33] Nicola Bianchi,” Electrical Machine Analysis Using Finite Elements” , CRC Press, 2005

[34] Paul C. Krause, Oleg Wasynczuk, Scott D. Sudhoff, "Analysis Of Electric Machinery And Drive Systems", Second Edition, Wiley Press, 2002

[35] Chee-Mun Ong, "Dynamic Simulation Of Electric Machinery Using Matlab/Simulink", Prentice Hall, 1998

[36] زهرا نصیری قیداری، محمدرضا ذوالقدری، "دستورالعمل آزمایشگاه تبدیل انرژی ۱" ویرایش ۴-۱، دانشگاه صنعتی شریف بهمن ماه ۱۳۹۱

[37] دکتر ابوالفضل واحدی، "جزوه طراحی ماشین های الکتریکی"، بهار ۹۱، دانشگاه علم و صنعت ایران

[38] امیثم مهدوی، حسن منصف، "طراحی موتور القایی تکفاز با خازن دایم بکمک الگوریتم PSO بهبود یافته"، بیست و چهارمین کنفرانس بین

المللی برق

[39] حمید لسانی، زهرا نصیری قیداری، فرید توتونچیان، "یک روش جدید برای دینامومتری موتورهای القایی تکفاز"، مجله انجمن متخصصین برق

والکترونیک ایران، سال پنجم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۳۸۷

[40] دکتر پرویز جبه دار مارالانی، دکتر محمد قوامی (مترجمان)، الکترومغناطیس میدان و موج، دیوید ک. چنگ، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ

چهارم ۱۳۷۶

[41] Mikko Valtonen, Asko Parviainen and Juha Pyrhonen, "Influence of the Air-Gap Length to the Performance of an Axial-Flux Induction Motor", Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines, 2008 IEEE

[42] P. C. KRAUSE, "Simulation of Unsymmetrical 2-Phase Induction Machines", IEEE TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS, NOVEMBER 1965

[43] علیرضا پیمان وصادق واعظ زاده، "کنترل ظرفیت خازن در موتور القایی تکفاز بدون استفاده از حسگر سرعت به منظور افزایش گشتاور

متوسط و کاهش نوسانات گشتاور"، نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران، جلد ۴۰، شماره ۳، شهریورماه ۱۳۸۵

[44] JMAG Application Notes .available on " www.jmag-international.com"

[45] Aleksander Leicht, Krzysztof Makowski, "Analysis Of A Single-Phase Capacitor Induction Motor Operating At Two Power Line Frequencies", Archives Of Electrical Engineering, VOL. 61(2), pp. 251-266 (2012)

[46] Vishal Verma, Peeyush Pant, Bhim Singh, "Simulation Of A Single Phase Induction Motor With Dynamic Capacitor For Maximum Torque Operation", IEEE 2008

Abstract:

Axial flux machines because of its unique advantages, have in recent years taken into consideration. Including single-phase axial flux induction machine, these machines can be noted. Recently usability of this machine as an alternative to single-phase induction machines, cylindrical and universal machines, household appliances, air conditioning and cooling homes, the attention of related industries. This approach axial flux machines of special features such as compact structure and adjustable air gap after the creation process and the assembly is due. More recently, a limited number of domestic companies to import this type of machine or possibly copies of them. In this type of business activity or production necessary attention to a very old technology used in this machine is not imported. design offers the possibility of reform. On the other hand studies or published in axial flux induction machines, especially the single phase is very limited and rare. Therefore, the need to develop design algorithms and modeling techniques to analyze the performance of this type of machine can not be denied.

The motivation of this thesis is a single-phase axial flux induction motor, the production company Nirootahvieh, which is notable application in air conditioning systems, performance is evaluated. Yield, including tests, measurements and modeling of steady state and transient simulation by using the finite element method is conventional and numerical modeling. Then try to design algorithms will be presented with a minimum of physical and structural changes may be, the engine has been re-designed and reform is essential.

Keywords: single phase axial flux induction motor, design algorithm, finite element method



Shahrood university of technology
E-Learning Center
Msc Thesis in Electrical Engineering

**"Design, modeling and performance analysis of single phase axial flux
induction machine by using finite element method"**

By: Ali Boubehrezh

Supervisor
Dr.Ahmad Darabi

Advisor
Hamed Tahanian

September 2016