

الحمد لله الذي
خلقنا من
الحمم



دانشکده مهندسی برق و رباتیک
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی الکترونیک قدرت و ماشین های الکتریکی

بهبود عملکرد جعبه دنده مغناطیسی اکتیو با نسبت تبدیل متغیر

نگارنده:

محمد رضا مراد دخت

استاد راهنما:

دکتر امیر حسن نیا

دی ۱۴۰۰

شماره: ۹۷۱۴۹۸۴
تاریخ: ۱۴۰۱/۱۱/۲۰
ویرایش: —

باسمه تعالی
فرم های ارزشیابی پایان نامه کارشناسی ارشد



فرم شماره (۳): صورت جلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای محمدرضا مراددخت شماره دانشجویی ۹۷۱۴۹۸۴ رشته مهندسی برق گرایش الکترونیک قدرت و ماشین های الکتریکی تحت عنوان بهبود عملکرد جعبه دنده مغناطیسی اکتیو با نسبت تبدیل متغیر که در تاریخ ۱۴۰۰/۱۱/۲۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید بشرح ذیل اعلام می گردد:

☐ الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۹
☒ ج) درجه خوب: نمره ۱۷-۱۶	☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۵-۱۴
☐ ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد	
☒ نوع تحقیق: نظری	☐ عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
استاد راهنما	دکتر امیر حسن نیا	استادیار	
نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر سید میثم سید برزگر	استادیار	
استاد ممتحن اول	دکتر احمد دارابی	استاد	
استاد ممتحن دوم	دکتر مهدی بانزاد	دانشیار	

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده مهندسی برق

دکتر حسین خسروی

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم اثر

با یاد

خدایی که آفرید

جهان را، انسان را، عقل را، علم را، معرفت را، عشق را

و

پدر و مادری فداکاری را

تا در سایه درخت پر بار وجودشان بیاسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم، چراکه این دو وجود، پس از پروردگار، مایه هستی ام بوده اند، دستم را گرفتند و راه رفتن در این وادی پر از فراز و نشیب زندگی را به من آموختند. آموزگاران که برایم زندگی، بودن و انسان بودن را معنا کردند...

تقدیم به پدر و مادرم

و تقدیم به قلب مهربان و پر عاطفه خواهر عزیزم

شکر و قدردانی

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بماند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند.

همچنین، بر اساس این اصل که (هر کس از مخلوق تشکر نکند، شکر خالق را بجا نیاورده است)، بر خود لازم میدانم که:

- از پدر و مادر عزیزتر از جانم که در همه مراحل زندگی‌ام، پشتیبان، همراه و همیار من بوده‌اند، نهایت تشکر و قدردانی را داشته باشم.
- از استاد راهنمای خود، جناب آقای دکتر امیر حسن‌نیا که در روند تدوین این پایان‌نامه، بارانمایی‌های بی‌دریغ و ارزشمندشان، نقاط تاریک و مبهم را برای من روشن ساخته و پیمودن این مسیر را برای من ممکن نمودند، کمال تشکر و قدردانی صمیمانه را نمایم.
- همچنین از تمامی اساتید گروه برق دانشگاه صنعتی شاهرود که از راهنمایی‌های آنان بهره‌مند بودم، تشکر کنم.

تعمدنامه

این جانب **محمدرضا مراددخت** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **برق قدرت** دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **بهبود عملکرد جعبه دنده مغناطیسی اکتیو با نسبت تبدیل متغیر** تحت راهنمایی **دکتر امیر حسن نیا** متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش های 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 صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج بانام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار 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 بافت های آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

با رشد صنعت و دانش بشری، ابداع جعبه‌دنده و استفاده از آن برای انتقال نیرو، گشتاور، تبدیل سرعت و تغییر جهت چرخش در انواع ماشین‌آلات صنعتی، گسترش یافت. جعبه‌دنده‌های مکانیکی، به دلیل گشتاور و راندمان بالا، بیشترین استفاده را در صنعت دارند. ارتباط تماسی بین چرخ‌دنده‌های موجود در جعبه‌دنده مکانیکی، نیازمند اقدامات تعمیر و نگهداری بالا و در نتیجه هزینه بهره‌برداری زیادی هست. این مشکل در جعبه‌دنده مغناطیسی، با توجه به ویژگی انتقال گشتاور غیر تماسی آن‌ها، وجود ندارد. به‌طور کلی، جعبه‌دنده‌های مغناطیسی، به دو نوع پسیو و اکتیو تقسیم می‌شوند. جعبه‌دنده‌های پسیو، معمولاً دارای نسبت‌دنده ثابتی هستند، اما در جعبه‌دنده‌های مغناطیسی اکتیو، نسبت‌دنده، در بازه وسیع‌تری قابل تغییر است. در این میان، جعبه‌دنده‌های مغناطیسی هم‌محور از هر دو نوع اکتیو و پسیو، به دلیل چگالی گشتاور بالا و کاربرد وسیع‌تر، بیشتر از سایر ساختارها، مورد توجه قرار گرفته‌اند. به همین منظور، در این پایان‌نامه، ابتدا، تحلیل اجزاء محدود جعبه‌دنده مغناطیسی هم‌محور پسیو، در نرم‌افزار JMAG-Designer برای بررسی تغییرات تلفات و گشتاور بار، نسبت به تغییرات سرعت انجام شد. ملاحظه شد که با افزایش سرعت، راندمان جعبه‌دنده پسیو به‌شدت کاهش می‌یابد. در پایان، برای کاهش تلفات و بهبود سطح گشتاور در جعبه‌دنده پسیو، یک ساختار جدید از جعبه‌دنده مغناطیسی اکتیو، پیشنهاد شد. تحلیل این ساختار به روش اجزاء محدود که با تغییراتی در اجزاء حلقه تعدیل‌کننده میانی همراه است، نشان داد که راندمان ساختار پیشنهادی در سرعت‌های بالا، بهبود قابل توجهی داشته است. همچنین، امکان کنترل زاویه بار و ایجاد نسبت‌دنده متغیر در جعبه‌دنده پیشنهادی وجود دارد.

کلمات کلیدی: جعبه‌دنده مغناطیسی، جعبه‌دنده مغناطیسی هم‌محور، تحلیل اجزاء محدود، تلفات

هسته، حلقه تعدیل‌کننده

فهرست مطالب

۱	فصل ۱ : مقدمه
۲	۱-۱ مقدمه
۲	۲-۱ تاریخچه چرخ دنده
۳	۳-۱ چرخ دنده فلزی
۴	۴-۱ جعبه دنده مکانیکی
۵	۵-۱ جعبه دنده مغناطیسی نوع پایه
۹	۶-۱ کاربرد جعبه دنده
۱۰	۷-۱ مزایا جعبه دنده مکانیکی
۱۰	۸-۱ معایب جعبه دنده مکانیکی
۱۰	۹-۱ مزایا جعبه دنده مغناطیسی
۱۱	۱۰-۱ معایب جعبه دنده مغناطیسی
۱۱	۱۱-۱ مواد مغناطیس دائم
۱۳	۱۲-۱ شرح مسئله و هدف تحقیق
۱۳	۱۳-۱ نوآوری
۱۴	۱۴-۱ ساختار پایان نامه

- ۱-۲ مقدمه ۱۶
- ۲-۲ تشریح و دسته‌بندی انواع جعبه‌دنده مغناطیسی در مطالعات گذشته ۱۶
- ۱-۲-۲ چرخ‌دنده مغناطیسی اولیه ۱۷
- ۲-۲-۲ جعبه‌دنده مغناطیسی هم‌محور ۱۹
- ۳-۲-۲ جعبه‌دنده مغناطیسی خطی ۲۶
- ۴-۲-۲ جعبه‌دنده مغناطیسی دیسکی ۲۸
- ۵-۲-۲ جعبه‌دنده مغناطیسی اکتیو با نسبت‌دنده ثابت ۳۱
- ۶-۲-۲ جعبه‌دنده مغناطیسی اکتیو با نسبت‌دنده متغیر ۳۳

فصل ۳: تحلیل عملکرد جعبه‌دنده مغناطیسی پسیو

- ۱-۳ مقدمه ۳۶
- ۲-۳ اصول عملکرد جعبه‌دنده مغناطیسی هم‌محور ۳۶
- ۱-۲-۳ تحلیل جعبه‌دنده مغناطیسی هم‌محور مورد مطالعه ۳۹
- ۲-۲-۳ عوامل تأثیرگذار بر روی عملکرد جعبه‌دنده مغناطیسی هم‌محور ۴۲
- ۳-۲-۳ زاویه بار جعبه‌دنده مغناطیسی ۴۵
- ۴-۲-۳ محاسبه تلفات و راندمان در جعبه‌دنده مغناطیسی مورد مطالعه ۴۶

فصل ۴: بررسی و تحلیل مدل پیشنهادی

۵۵

۴-۱ مقدمه ۵۶

۴-۱-۱ جعبه‌دنده مغناطیسی پسیو با پل تعدیل‌کننده یکپارچه: ۵۶

۴-۲ ایده و طرح جدید پیشنهادی ۵۹

۴-۲-۱ جعبه‌دنده مغناطیسی اکتیو با حلقه تعدیل‌کننده مجازی ۵۹

۴-۲-۲ بررسی عملکرد حلقه تعدیل‌کننده مجازی در محیط FEM ۶۰

۴-۲-۳ ایجاد نسبت‌دنده متغیر با حلقه تعدیل‌کننده مجازی ۷۱

فصل ۵: جمع‌بندی نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۷۹

۵-۱ جمع‌بندی ۸۰

۵-۲ نتیجه‌گیری ۸۰

۵-۳ پیشنهادها ۸۱

مراجع

۸۳

فهرست جداول

- جدول ۱-۱. خصوصیات مواد مغناطیس دائم ۱۳
- جدول ۱-۲. محاسبه تلفات در دو سرعت متفاوت ۲۴
- جدول ۲-۲. تأثیر مواد مغناطیس دائم بر گشتاور ۲۵
- جدول ۱-۳. پارامترهای و ابعاد جعبه‌دنده مغناطیسی ۴۱
- جدول ۲-۳. خواص مواد به‌کاررفته در جعبه‌دنده ۴۲
- جدول ۳-۳. حالت‌های کاری در زوایای مختلف ۴۶
- جدول ۱-۴. میزان افزایش گشتاور به ازای افزایش جریان ۵۸
- جدول ۲-۴. مشخصات و پارامترهای ماشین ۶۱
- جدول ۳-۴. خواص مواد به‌کاررفته در جعبه‌دنده ۶۱

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱. اجزاء تشکیل دهنده چرخ دنده ۳
- شکل ۲-۱. جعبه دنده مکانیکی خودرو ۴
- شکل ۳-۱. چرخ دنده ساده مکانیکی و مغناطیسی ۶
- شکل ۴-۱. کاربرد چرخ دنده ساده در پمپ هیدرولیک ۶
- شکل ۵-۱. چرخ دنده سیاره‌ای ۸
- شکل ۶-۱. کاربرد چرخ دنده سیاره‌ای در توربین بادی ۸
- شکل ۷-۱. چرخ دنده پینیون و ریلی ۹
- شکل ۸-۱. کاربرد چرخ دنده ریلی در تولید انرژی توسط موج ۹
- شکل ۹-۱. منحنی مغناطیس زدایی سه مواد ۱۳
- شکل ۱-۲. دسته‌بندی انواع جعبه دنده مغناطیسی ۱۷
- شکل ۲-۲. چرخ دنده الکترومغناطیسی اولیه ۱۸
- شکل ۳-۲. چرخ دنده مغناطیسی نوع ساده ۱۸
- شکل F-۲. جعبه دنده مغناطیسی حلزونی ۱۹
- شکل ۵-۲. انتقال دهنده مغناطیسی هم‌محور نوع ۱ ۲۰
- شکل ۶-۲. جعبه دنده مغناطیسی هم‌محور نوع ۲ ۲۰
- شکل ۷-۲. جعبه دنده مغناطیسی هم‌محور ۲۱
- شکل ۸-۲. چرخ دنده مغناطیسی هم‌محور با آرایش پره‌ای آهنرباهای روتور داخلی ۲۱
- شکل ۹-۲. ساختار جدید جعبه دنده مغناطیسی هم‌محور ۲۲
- شکل ۱۰-۲. جعبه دنده مغناطیسی پسو با آرایش مغناطیسی هالباخ ۲۳

- شکل ۲-۱۱. جعبه‌دنده مغناطیسی هم‌محور با آرایش متفاوت در دو روتو..... ۲۳
- شکل ۲-۱۲. جعبه‌دنده مغناطیسی با پل تعدیل‌کننده ۲۵
- شکل ۲-۱۳. شش طرح برتر قطعات حلقه تعدیل‌کننده ۲۵
- شکل ۲-۱۴. مقایسه عملکرد شش طرح پل تعدیل‌کننده ۲۵
- شکل ۲-۱۵. پنج ترکیب اصلی مغناطیس دائم‌ها ۲۶
- شکل ۲-۱۶. الگوی کلی آرایش مغناطیس دائم‌ها ۲۶
- شکل ۲-۱۷. جعبه‌دنده مغناطیسی خطی ۲۷
- شکل ۲-۱۸. ترکیب ژنراتور و جعبه‌دنده مغناطیسی خطی ۲۷
- شکل ۲-۱۹. جعبه‌دنده مغناطیسی شار محوری ۲۸
- شکل ۲-۲۰. جعبه‌دنده مغناطیسی متمرکز بر شار ۲۹
- شکل ۲-۲۱. جعبه‌دنده مغناطیسی دیسکی شار متقاطع ۳۰
- شکل ۲-۲۲. جعبه‌دنده مغناطیسی با مسیر شار ترکیبی ۳۰
- شکل ۲-۲۳. جعبه‌دنده مغناطیسی شار ترکیبی ساده ۳۱
- شکل ۲-۲۴. ترکیب جعبه‌دنده مغناطیسی با ماشین مغناطیس دائم ۳۲
- شکل ۲-۲۵. ترکیب جعبه‌دنده مغناطیسی با ماشین مغناطیس دائم (استاتور داخلی) ۳۲
- شکل ۲-۲۶. جعبه‌دنده مغناطیسی هم‌محور با نسبت‌دنده متغیر ۳۳
- شکل ۳-۱. طیف هارمونیکی چگالی شار مغناطیسی شعاعی ۳۹
- شکل ۳-۲. جعبه‌دنده مغناطیسی پسیو هم‌محور ۴۰
- شکل ۳-۳. برش عرضی ماشین و نمایش پارامترهای ابعادی آن ۴۱
- شکل ۳-۴. مش‌بندی و توزیع شار جعبه‌دنده مغناطیسی مورد مطالعه ۴۲
- شکل ۳-۵. نمودار و طیف هارمونیکی چگالی شار مغناطیسی فاصله‌هوایی در راستای محور (I) ۴۳
- شکل ۳-۶. چگالی جریان فوکو در حلقه تعدیل‌کننده ۴۴

- شکل ۳-۷. گشتاور در حالت مطلوب ۴۵
- شکل ۳-۸. گشتاور در سرعت ۵۰۰ rpm روتور بیرونی ۴۵
- شکل ۳-۹. زوایای بار در جعبه‌دنده مغناطیسی ۴۶
- شکل ۳-۱۰. منحنی تلفات هسته برحسب چگالی شار و فرکانس ۴۸
- شکل ۳-۱۱. منحنی مغناطیس شوندگی مواد JFE Steel 50JN1300 ۴۸
- شکل ۳-۱۲. تلفات آهن ایجاد شده توسط جریان گردابی ۴۹
- شکل ۳-۱۳. میانگین گشتاور در سرعت‌های مختلف ۴۹
- شکل ۳-۱۴. میانگین تلفات کل حلقه تعدیل‌کننده در سرعت‌های مختلف ۵۰
- شکل ۳-۱۵. راندمان جعبه‌دنده در سرعت‌های مختلف ۵۰
- شکل ۳-۱۶. قطعات تعدیل‌کننده یکپارچه و مورق شده ۵۱
- شکل ۳-۱۷. گشتاور حلقه یکپارچه و مورق ۵۲
- شکل ۳-۱۸. میانگین گشتاور قطعات تعدیل‌کننده مورق و یکپارچه در سرعت‌های مختلف ۵۳
- شکل ۳-۱۹. میانگین تلفات قطعات تعدیل‌کننده مورق و یکپارچه در سرعت‌های مختلف ۵۳
- شکل ۴-۱. جعبه‌دنده مغناطیسی با حلقه تعدیل‌کننده یکپارچه به همراه سیم‌پیچ کمکی ۵۷
- شکل ۴-۲. شار عبوری از پل در حلقه تعدیل‌کننده ۵۸
- شکل ۴-۳. ساختار جعبه‌دنده مغناطیسی پیشنهادی ۶۰
- شکل ۴-۴. برش عرضی و نمایش پارامترهای ماشین ۶۱
- شکل ۴-۵. مدار اعمالی جریان به سیم‌پیچ‌های حلقه میانی ۶۲
- شکل ۴-۶. شکل موج جریان اعمالی به مدار ماشین ۶۳
- شکل ۴-۷. جزییات مش در فاصله هوایی بین دو روتور ۶۳
- شکل ۴-۸. توزیع شار مغناطیسی و مش‌بندی جزءهای مختلف ماشین ۶۴
- شکل ۴-۹. نمودار و طیف هارمونیک چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی در راستای محور (r) ۶۵

- شکل ۴-۱۰. چگالی شار مغناطیسی مدل پیشنهادی ۶۵
- شکل ۴-۱۱. سطح گشتاور جعبه‌دنده مغناطیسی با حلقه تعدیل‌کننده مجازی ۶۶
- شکل ۴-۱۲. مبدل چهار فازه ۶۷
- شکل ۴-۱۳. ویژگی عمومی کلید زنی ۶۷
- شکل ۴-۱۴. تلفات کلیدزنی در فرکانس‌های مختلف ۶۸
- شکل ۴-۱۵. میانگین گشتاور ساختار پسیو و اکتیو ۷۰
- شکل ۴-۱۶. میانگین تلفات ساختار پسیو و اکتیو ۷۰
- شکل ۴-۱۷. راندمان ساختار پسیو و اکتیو ۷۱
- شکل ۴-۱۸. ساختار جعبه‌دنده مغناطیسی پسیو ۷۲
- شکل ۴-۱۹. جعبه‌دنده مغناطیسی اکتیو با نسبت‌دنده متغیر ۷۳
- شکل ۴-۲۰. سطح گشتاور با فعال بودن ۸ قطعه در حلقه میانی ۷۳
- شکل ۴-۲۱. سطح گشتاور با فعال بودن ۱۶ قطعه در حلقه میانی ۷۴
- شکل ۴-۲۲. میانگین گشتاور در ساختار اکتیو و پسیو ۷۵
- شکل ۴-۲۳. میانگین تلفات کل در سه ساختار ۷۵
- شکل ۴-۲۴. راندمان در سه ساختار ۷۶
- شکل ۴-۲۵. چگالی جریان در جعبه‌دنده مغناطیسی با نسبت‌دنده متغیر ۷۶

فصل ۱ : مقدمه

۱-۱ مقدمه

به حرکت درآوردن یک جسم سنگین، به وسیله اهرم کردن چوب را می توان به عنوان ابتدایی ترین روش برای انتقال نیرو دانست. به تدریج با رشد صنعت و دانش بشری، ابداع و استفاده از جعبه دنده برای انتقال نیرو^۱ و گشتاور^۲ در انواع ماشین آلات صنعتی مورد استفاده قرار گرفت. از مهم ترین کاربرد این جعبه دنده ها می توان به تبدیل سرعت، تغییر جهت چرخش، انتقال گشتاور و نیرو اشاره کرد. به عنوان مثال پله برقی را در نظر بگیرید، برای به حرکت درآوردن پله، به گشتاور بالایی نیاز است و استفاده از منبع قدرت به صورت مستقیم، در ابعاد بزرگ و هزینه بالا امکان پذیر است. راه حل مقرون به صرفه تر، قرار دادن جعبه دنده در بین بار و منبع قدرت خواهد بود. در نتیجه منبع قدرت با نیرو کمتر در نظر گرفته می شود و به وسیله جعبه دنده توان مورد نیاز برای به حرکت درآوردن پله انتخاب می شود. برای چنین اهدافی می توان از جعبه دنده استفاده کرد. جعبه دنده مکانیکی^۳ اغلب دارای گشتاور و راندمان بالایی هستند اما به دلیل ارتباط تماسی بین چرخ دنده های موجود در جعبه دنده، به تعمیر نگهداری بالایی نیاز است که هزینه زیادی در بردارد. با ظهور آهنرباها، مفهوم استفاده از جعبه دنده مغناطیسی با انتقال توان بدون تماس از طریق جذب و دفع آهنرباها توجه زیادی به خود جلب کرد. جعبه دنده مغناطیسی مزایای زیادی نسبت به همتا مکانیکی خود دارد، اما هزینه ساخت زیادی، به دلیل استفاده از آهنرباهای خاک کمیاب، به همراه خواهد داشت. قبل از بیان عملکرد و کاربرد جعبه دنده مغناطیسی در این فصل، برای فهم بهتر مسئله لازم است مقدماتی در رابطه با جعبه دنده مکانیکی و تاریخچه ارتباط این دو جعبه دنده، مزایا، معایب و کاربرد آن ها بیان شود.

۲-۱ تاریخچه چرخ دنده

استفاده از چرخ دنده به سالیان قبل برمی گردد، زمانی که رومیان برای به حرکت درآوردن سنگ

1 Force Transfer

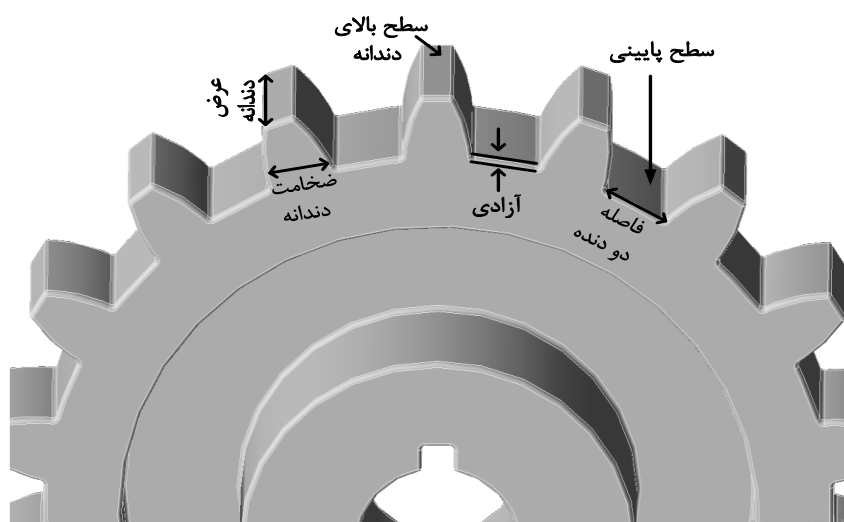
2 Torque

3 Mechanical Gearbox

آسیاب از چرخ‌دنده چوبی استفاده می‌شد و برای روانکاری چرخ‌دنده‌ها از چربی حیوانات مورد استفاده قرار می‌گرفت. همراه با آغاز انقلاب صنعتی انگلستان در قرن هجدهم، زمینه پیشرفت در صنعت ذوب‌آهن نمود یافت و استفاده از چرخ‌دنده‌های فلزی در ماشین‌آلات صنعتی از آن دوره آغاز شد. امروزه به‌تدریج با رشد صنعت و دانش بشری، ابداع و استفاده از چرخ‌دنده‌ها، تحول‌یافته است و به نظر می‌رسد در این زمان بسیار پیشرفته است، اما مطمئناً در آینده از پیشرفت‌های بیشتری برخوردار خواهند بود [۱].

۳-۱ چرخ‌دنده فلزی^۱

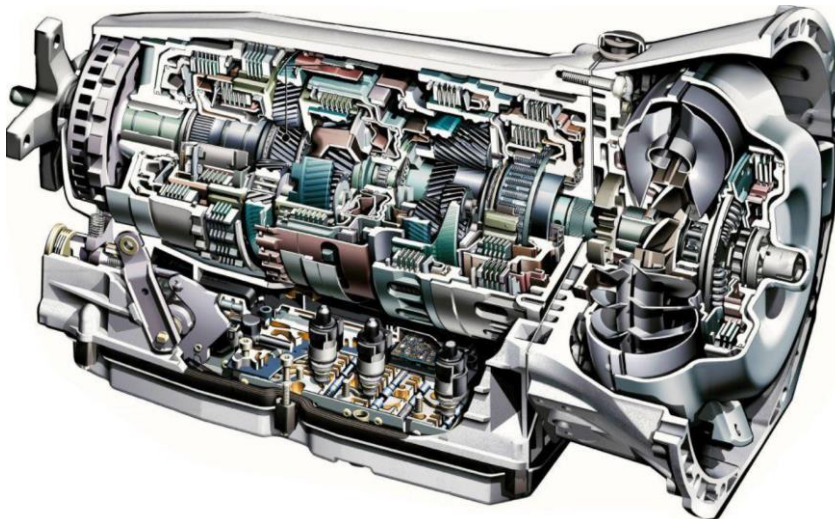
امروزه از چرخ‌دنده‌ها در تمامی ابزارهای صنعتی و خانگی استفاده می‌شود. چرخ‌دنده‌ها، کاربردهای مختلفی دارند وابسته به نوع کاربرد وظایف خود را انجام می‌دهند. از مهم‌ترین وظایف چرخ‌دنده‌ها می‌توان به تبدیل سرعت، تغییر جهت چرخش، انتقال گشتاور و نیرو اشاره کرد. در شکل ۱-۱ اجزاء تشکیل دنده چرخ‌دنده نشان داده شده است. در هنگام طراحی چرخ‌دنده، به پارامترهای نشان داده شده در شکل ۱-۱، همچنین آلیاژ به‌کاررفته در ساخت چرخ‌دنده دقت شود، تا عملکرد مناسبی در برابر فشار، حرارت، سایش و شکستگی در اثر ضربه داشته باشد.



شکل ۱-۱. اجزاء تشکیل‌دهنده چرخ‌دنده

۴-۱ جعبه‌دنده مکانیکی

جعبه‌دنده مکانیکی از مجموعه‌ای چرخ‌دنده کوچک و بزرگ تشکیل شده است که در یک محفظه بسته نگهداری می‌شود. در شکل ۲-۱ نمونه‌ای از جعبه‌دنده مکانیکی خودرو نشان داده شده است. این جعبه‌دنده متشکل از تعدادی چرخ‌دنده است که بر روی محور ورودی و خروجی قرار دارند. با چرخش محور ورودی، چرخ‌دنده‌ها با یکدیگر درگیر می‌شوند و انتقال توان به سمت خروجی توسط محور انجام می‌شود. محل قرارگیری جعبه‌دنده در خودرو، بین موتور و محور محرک خودرو است. سرعت و میزان گشتاور خروجی جعبه‌دنده بستگی به اندازه و تعداد دندانه‌های موجود روی استوانه چرخ‌دنده دارد. به‌عنوان مثال اگر بدون جعبه‌دنده هدف افزایش گشتاور خودرو باشد، با افزایش دور موتور، گشتاور و توان افزایش می‌یابد تا به یک مقدار حداکثری می‌رسد و از آنجا به بعد راندمان موتور کاهش پیدا خواهد کرد و امکان دارد به موتور آسیب وارد شود، همچنین مصرف سوخت بالا می‌رود و اصلاً مقرون به‌صرفه نخواهد بود. در نتیجه می‌توان با به‌کارگیری جعبه‌دنده با حداقل توان از موتور خودرو حداکثر توان موردنیاز را از جعبه‌دنده دریافت کرد.



شکل ۲-۱. جعبه‌دنده مکانیکی خودرو [۲]

۵-۱ جعبه‌دنده مغناطیسی نوع پایه

ساده‌ترین راه برای تعریف جعبه‌دنده مغناطیسی^۱ معرفی انواع دنده‌های مکانیکی و مقایسه آن‌ها است. مهم‌ترین نوع چرخ‌دنده‌ها عبارتند از: ساده، سیاره‌ای و چرخ‌دنده پینیون و ریلی. در ادامه به معرفی سه چرخ‌دنده پرکاربرد نوع پایه، پرداخته خواهد شد.

۱. چرخ‌دنده ساده^۲

در شکل ۱-۳، ساده‌ترین نوع چرخ‌دنده مغناطیسی قابل مشاهده است، که طراحی همانند نوع مکانیکی را دارد. در این چرخ‌دنده، دندانه‌های فلزی با آهنربا جایگزین شده است. این چرخ‌دنده از دو قسمت چرخ‌دنده سرعت بالا^۳ و چرخ‌دنده سرعت پایین^۴ تشکیل شده است. نکته حائز اهمیت در چرخ‌دنده مغناطیسی، انتقال توان به صورت غیر تماسی بین دو چرخ‌دنده است. در این دو نوع چرخ‌دنده، با چرخش هر کدام از قسمت‌ها، طبق نسبت دنده^۵ دیگری آن را دنبال می‌کند. با کوپل مغناطیسی بین دو قسمت در چرخ‌دنده مغناطیسی، همانند چرخ دنده مکانیکی، اصطکاک مکانیکی، سایش و شکستگی در دندانه‌ها را به همراه ندارد. نسبت دنده در مدل الف و ب به ترتیب از رابطه (۱-۱) و (۲-۱) به دست می‌آید.

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{R_2}{R_1} \quad (1-1)$$

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{N_2}{N_1} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (2-1)$$

ω_1 ، N_1 و R_1 به ترتیب سرعت چرخش، تعداد دندانه و شعاع صفحه روتور کم‌سرعت است. همچنین،

ω_1 ، N_1 و R_1 به ترتیب سرعت چرخش، تعداد دندانه و شعاع صفحه روتور پرسرعت است.

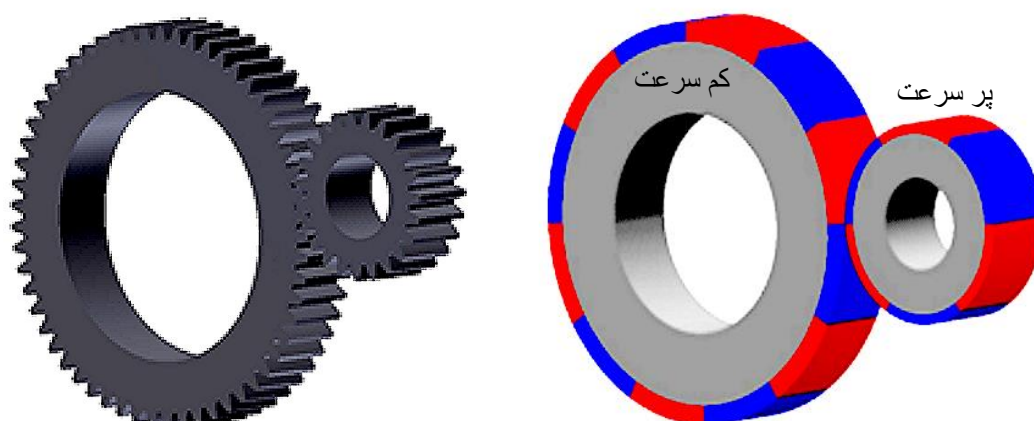
1 Magnetic Gearbox

3 High Speed

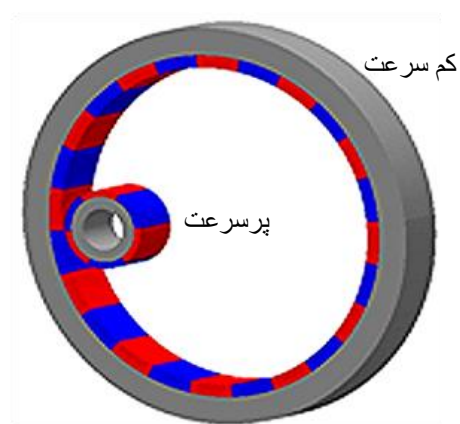
5 Gear Ratio

2 Spur Gear

4 Low Speed

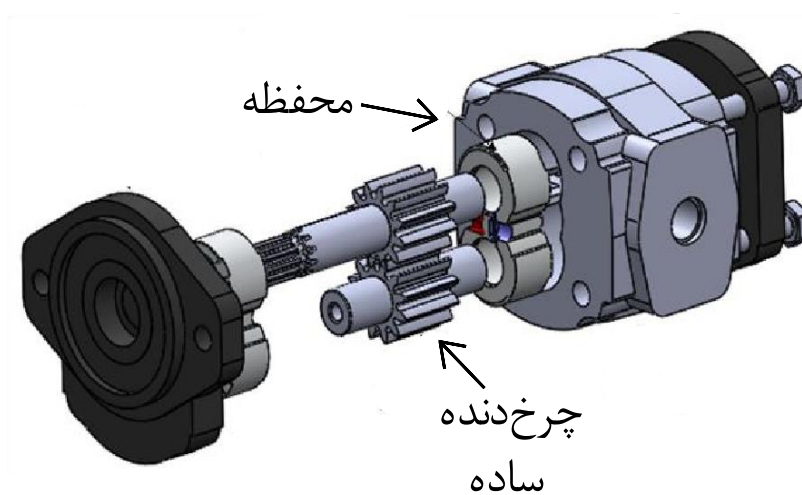


(الف)



(ب)

شکل ۳-۱. چرخ‌دنده ساده مکانیکی و مغناطیسی. (الف) محور بیرونی. (ب) محور داخلی [۳]



شکل ۴-۱. کاربرد چرخ‌دنده ساده در پمپ هیدرولیک [۴].

۲. چرخ‌دنده سیاره‌ای^۱

نمای چرخ‌دنده سیاره‌ای در شکل ۱-۵ نشان داده شده است. ساختار چرخ‌دنده، از یک چرخ‌دنده خورشیدی، چرخ‌دنده سیاره‌ای، حمل‌کننده و چرخ‌دنده حلقه‌ای تشکیل شده است. ساختار این چرخ‌دنده نسبت به نوع ساده پیچیده‌تر است. این چرخ‌دنده حالت‌های کاری مختلفی دارد. هر یک از اجزاء می‌تواند ورودی، خروجی یا ثابت باشند و اینکه کدام جزء چه نقشی دارد اساس تولید نسبت‌دنده متغیر است. حالت‌های کاری چرخ‌دنده سیاره‌ای:

(۱) حالت اول، چرخ‌دنده سیاره‌ای و حمل‌کننده به‌عنوان خروجی عمل می‌کنند. بنابراین، چرخ‌دنده خورشیدی و حلقه‌ای متحرک است. از این حالت معمولاً برای کاهش سرعت استفاده می‌شود. در نتیجه، رابطه سرعت زاویه‌ای به‌صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\omega_c = \frac{P_s}{P_s + P_r} \omega_s + \frac{P_r}{P_s + P_r} \omega_r \quad (3-1)$$

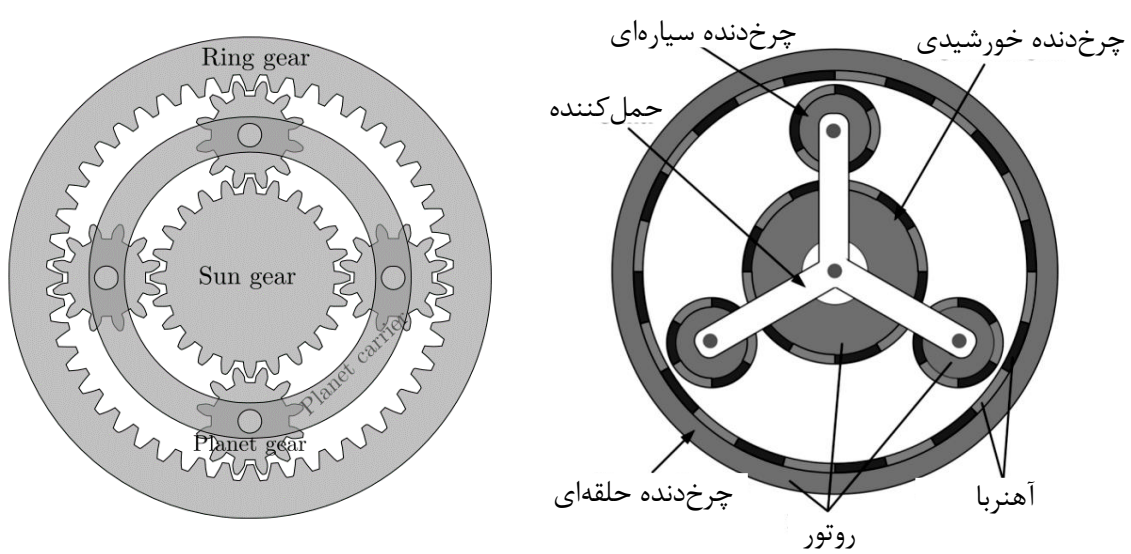
در این رابطه ω_s ، ω_r و ω_c به ترتیب سرعت چرخش چرخ‌دنده خورشیدی، حلقه‌ای و سیاره‌ای هستند. همچنین، P_s ، P_r و P_p به ترتیب جفت قطب‌های چرخ‌دنده خورشیدی، سیاره‌ای و حلقه‌ای است. (۲) حالت دوم، چرخ‌دنده خورشیدی به‌عنوان خروجی، چرخ‌دنده حلقه‌ای و سیاره‌ای به‌عنوان

ورودی ایفای نقش می‌کنند. بنابراین:

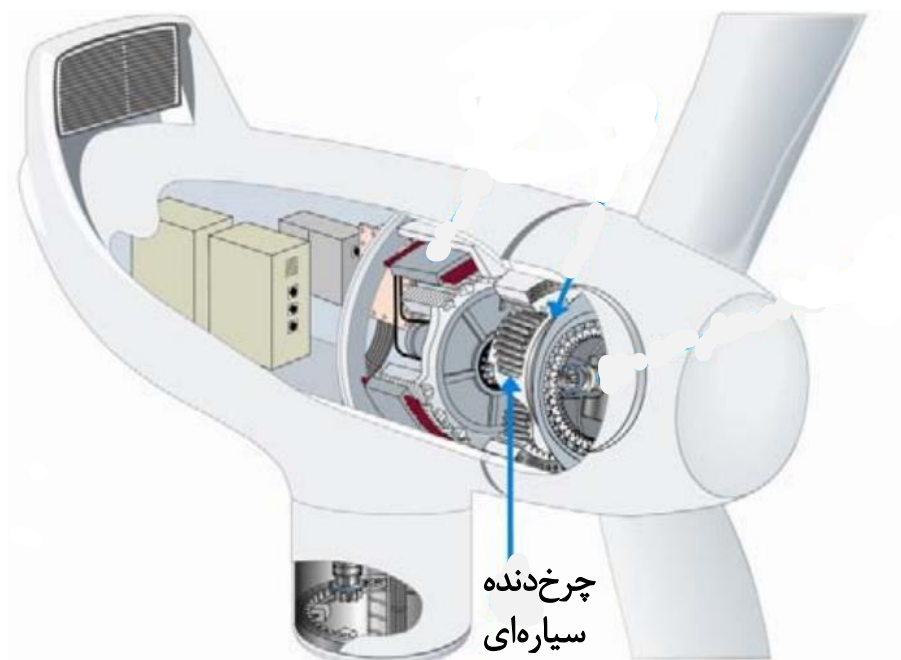
$$\omega_s = \frac{P_s + P_r}{P_s} \omega_c - \frac{P_r}{P_s} \omega_r \quad (4-1)$$

(۳) حالت سوم، چرخ‌دنده حلقه‌ای به‌عنوان خروجی در نظر گرفته می‌شود. در این صورت:

$$\omega_r = \frac{P_s + P_r}{P_r} \omega_c - \frac{P_s}{P_r} \omega_s \quad (5-1)$$



شکل ۱-۵. چرخ دنده سیاره‌ای [۵] و [۶].



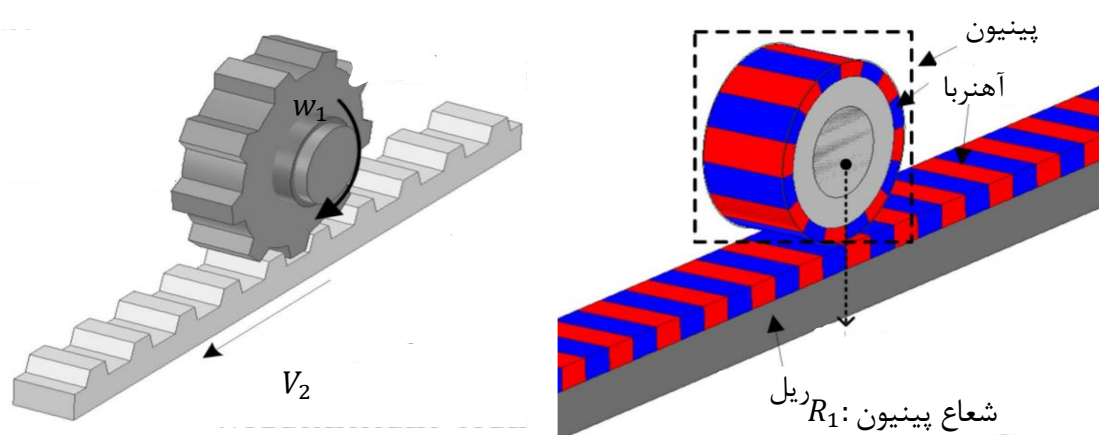
شکل ۱-۶. کاربرد چرخ دنده سیاره‌ای در توربین بادی [۷].

۳. چرخ دنده پینیون و ریلی

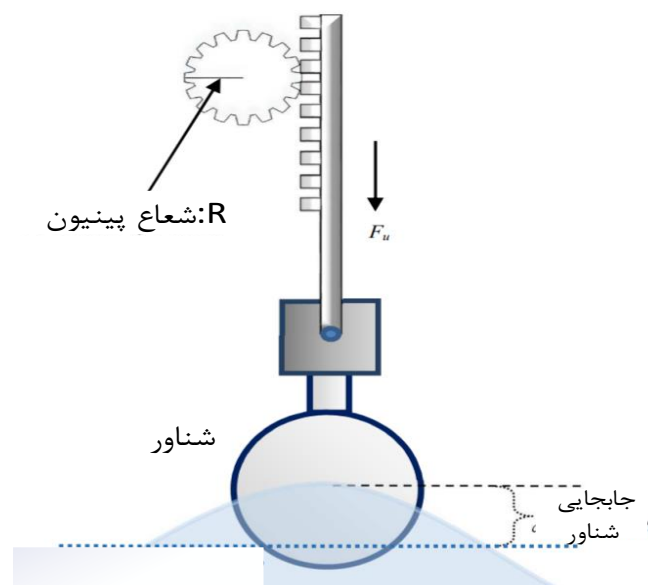
این چرخ دنده شامل یک چرخ دنده پینیون^۱ و چرخ دنده ریلی^۲ است که در شکل ۱-۷ قابل مشاهده است. با درگیر شدن دو دنده، حرکت خطی را به دورانی یا بالعکس تبدیل می کنند. سرعت حرکت ریل (V_2)، به قطر (R_1) و سرعت چرخش (ω_1) چرخ دنده دایره‌ای بستگی دارد.

$$V_2 = \omega_1 R_1$$

(۶-۱)



شکل ۷-۱. چرخ‌دنده پینیون و ریلی [۸].



شکل ۸-۱. کاربرد چرخ‌دنده ریلی در تولید انرژی توسط موج [۹].

۶-۱ کاربرد جعبه‌دنده

در شکل‌های بخش قبل، چند نمونه از کاربردهای جعبه‌دنده، نشان داده شد. با این حال، جعبه‌دنده‌ها، کاربردهای فراوانی دارند و فقط به موارد ذکر شده محدود نمی‌شود. از جمله کاربردهای دیگر جعبه‌دنده‌ها، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

(۱) توربین‌های بادی و دریایی

(۲) صنایع خودروسازی

(۳) صنایع ریلی

(۴) صنایع هوا و فضا

(۵) رباتیک

(۶) مخلوط‌کن‌های صنعتی

(۷) انواع دستگاه‌های حفر چاه

(۸) کاربرد در پمپ‌ها و کمپرسورهای فشار بالا

۷-۱ مزایای جعبه‌دنده مکانیکی

(۱) گشتاور بالا نسبت به جعبه‌دنده‌های مغناطیسی نوع پایه

(۲) هزینه ساخت پایین

۸-۱ معایب جعبه‌دنده مکانیکی

(۱) نویز و سروصدا

(۲) لرزش

(۳) اصطکاک

(۴) ساییدگی و شکنندگی دنده‌ها بر اثر افزایش بار

(۵) احتیاج به روانکاری

(۶) هزینه بالای تعمیر و نگهداری

۹-۱ مزایای جعبه‌دنده مغناطیسی

به دلیل انتقال توان به صورت غیر تماسی و اتصال بین چرخ‌دنده‌ها توسط میدان مغناطیسی باعث

شده است معایب دنده مکانیکی در این جعبه‌دنده برطرف شود. از مزایای جعبه‌دنده مغناطیسی به موارد

زیر می‌توان اشاره کرد:

- (۱) عدم نویز و سروصدا
- (۲) عدم لرزش و اصطکاک
- (۳) عدم تخریب ساختار در اثر افزایش بار (لغزش قطب)
- (۴) قابلیت اطمینان بالا
- (۵) عدم نیاز به روغن کاری

۱-۱۰ معایب جعبه‌دنده مغناطیسی

از مهم‌ترین معایب جعبه‌دنده مغناطیسی، می‌توان به هزینه ساخت اولیه بالای آن، به دلیل استفاده از مواد مغناطیس دائم خاک کمیاب، اشاره کرد.

۱-۱۱ مواد مغناطیس دائم

اساس عملکرد جعبه‌دنده مغناطیسی، بر پایه مواد مغناطیس دائم است. بنابراین، در این بخش، به مرور کلی مشخصه مغناطیسی این مواد، پرداخته می‌شود. مواد مغناطیس دائم مورد استفاده در ماشین‌های الکتریکی، به سه دسته تقسیم می‌شوند [۱۰]:

۱. آلنیکو

۲. سرامیک (فریت)

۳. خاک کمیاب

منحنی مغناطیس‌زدایی این سه ماده در دمای 20°C ، در شکل ۱-۹ نشان داده شده است. همچنین، خصوصیات مغناطیسی آن‌ها، در جدول ۱-۱ ارائه شده است. هر کدام از این مواد، با توجه به خصوصیات ذکر شده در شکل ۱-۹ و جدول ۱-۱، تعریف می‌شوند.

۱. آلنیکو

آلیاژ آلنیکو، سال ۱۹۳۱ در ژاپن کشف شد. این آلیاژ در اواخر دهه ۱۹۶۰، در صنعت موتورهای

الکتریکی مغناطیس دائم، مورد استفاده قرار می‌گرفت. آلنیکو^۱ از آلیاژهای آلومینیوم، نیکل، کبالت و آهن (Al, Ni, Co, Fe) تشکیل شده است. چگالی شار مغناطیسی پسماند^۲ (Br) در این مواد حدود ۱/۲ تسلا و انرژی تولیدی (BH) آن تا ۴۳/۷ آمپر بر متر است. طبق جدول ۱-۱، کار در درجه حرارت بسیار بالا و چگالی شار پسماند بالا از جمله مزایای آلنیکو است. از طرفی، مقاومت کم در برابر مغناطیس زدایی^۳ (Hci)، به عنوان عیب این ماده تلقی می‌شود [۱۰].

۲. سرامیک (فریت):

نمونه اولیه فریت^۴ یا سرامیک، سال ۱۹۳۸ در مؤسسه فناوری توکیو ساخته شده، که از اکسیدهای پودری بود. حدود ۱۲ سال بعد در سال ۱۹۵۰ فریت‌های باریم و استرانسیوم کشف شد. فریت (Fe₃O₄) از آلیاژهای اکسید آهن و فلزهای دو ظرفیتی مانند باریم، استرانسیم، سرب، نیکل یا کبالت تشکیل شده است. از مزایای و معایب فریت طبق جدول ۱-۱ می‌توان، به کار در درجه حرارت بالا، قیمت پایین نسبت به سایر مغناطیس دائم‌ها و مقاومت بالاتر در برابر مغناطیس زدایی (Hci) نسبت به آلنیکو که از تلفات جریان گردابی بسیار کمتری برخوردار است، اما یکی از مهم‌ترین معایب فریت، می‌توان به چگالی شار پسماند بسیار پایین آن اشاره کرد. استفاده از آهنربا فریت در موتورهای الکتریکی با توان پایین، از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است [۱۰].

۳. خاک کمیاب:

این آهنرباها در دو نسل معرفی شدن که خاصیت مغناطیسی بسیار خوبی دارند. نخستین نسل آهنربا خاک کمیاب با آلیاژ ساماریم و کبالت (SmCo₅) بود، که در دهه ۱۹۶۰ اختراع شد. طبق اعداد ذکر شده در جدول ۱-۱، این آهنربا از مزایای زیادی نسبت به آلنیکو و فریت، برخوردار است اما از معایب این آهنربا که می‌توان اشاره کرد، ترد و شکننده بودن آهنربا، همچنین به دلیل کمیاب بودن دو عنصر ساماریم و کبالت، این آلیاژ نسبتاً گران است. نسل دوم آهنرباهای خاک کمیاب که به نئودیمیم معروف‌اند

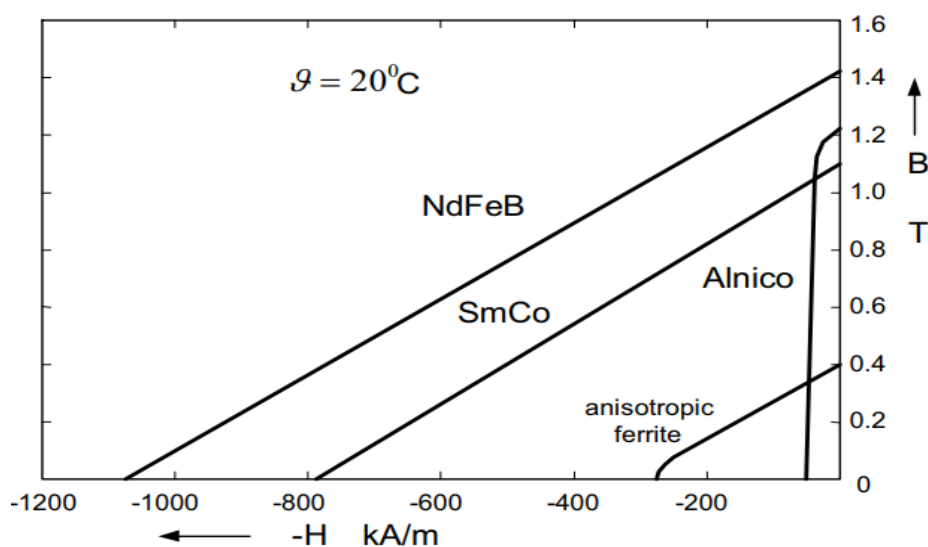
^۱ Alnico

^۳ Demagnetization

^۲ Remanent Magnetization

^۴ Ferrite

در سال ۱۹۸۳ معرفی شد. این آهنربا از ترکیب آلیاژهای نئودیمیم، آهن و بور (NdFeB) ساخته می‌شوند. چگالی شار مغناطیسی و مقاومت بالا در برابر مغناطیس زدایی (Hci)، پارامترهای نشان‌دهنده برتری آهنربا نئودیمیم نسبت به آهنربای نسل اول است. با این وجود، چالش جدی این آهنربا نسبت به سایر آهنرباها، دمای کاری بسیار کم آن است. هزینه ساخت آهنربا نئودیمیم به دلیل عناصر به کاررفته نسبت به ساماریم کبالت معقول‌تر است [۱۰].



شکل ۹-۱. منحنی مغناطیس زدایی سه مواد [۱۰].

جدول ۱-۱. خصوصیات مواد مغناطیس دائم [۱۱].

TC(°C)	BHmax (kJ/m ³)	Hci (kA/m)	Br (T)	آهنربا
۳۱۰-۴۰۰	۲۰۰-۴۴۰	۷۵۰-۲۰۰۰	۱/۰-۱/۴	Nd ₂ Fe ₁₄ B (sintered)
۷۲۰	۱۲۰-۲۰۰	۶۰۰-۲۰۰۰	۰/۸-۱/۱	SmCo ₅ (sintered)
۷۰۰-۸۶۰	۱۰-۸۸	۲۷۵	۰/۶-۱/۴	Alnico (sintered)
۴۵۰	۱۰-۴۰	۱۰۰-۳۰۰	۰/۲-۰/۴	Sr-ferrite (sintered)

۱۲-۱ شرح مسئله و هدف تحقیق

با توجه به مزایای ذکر شده از جعبه‌دنده‌های مغناطیسی، تحقیقات گسترده‌ای برای بهبود انتقال گشتاور در این جعبه‌دنده‌ها صورت گرفته است. در این پایان‌نامه، ابتدا ساختار جعبه‌دنده مغناطیسی پسیو هم‌محور، با روش اجزاء محدود، به صورت دقیق مورد تحلیل قرار می‌گیرد. نتایج حاصله، محدودیت

جعبه‌دنده پسیو را در سرعت‌های بالا به دلیل تلفات ایجاد شده در حلقه تعدیل‌کننده^۱، نشان می‌داد. بنابراین یک مدل پیشنهادی با ارائه ساختار جدید از حلقه میانی مجازی با هدف پایداری گشتاور در سرعت‌های بالا ارائه می‌شود.

۱-۱۳ نوآوری

نوآوری این پایان‌نامه در ارائه یک ساختار جدید از حلقه میانی در جعبه‌دنده مغناطیسی اکتیو است. این ساختار نسبت به جعبه‌دنده مغناطیسی پسیو هم‌محور، عملکرد بهتری خواهد داشت و پایداری گشتاور و افزایش راندمان را در سرعت‌های بالا به همراه دارد. در واقع، در مدل پیشنهادی، قطعات تعدیل‌کننده مجازی، جایگزین قطعات تعدیل‌کننده فرومغناطیس^۲ حلقه میانی شده‌اند که این تغییر، منجر به حذف تلفات هسته در حلقه میانی جعبه‌دنده مغناطیسی پسیو می‌شود و این ویژگی در سرعت‌های بالا حائز اهمیت است.

۱-۱۴ ساختار پایان‌نامه

در فصل دوم، به مروری بر پیشینه تحقیق پرداخته خواهد شد. در این فصل، سعی بر آن است تا ساختارهای مشابه با موضوع، ارائه شود. در فصل سوم، اصول عملکرد جعبه‌دنده مغناطیسی هم‌محور، بیان خواهد شد. در فصل چهارم، مدل پیشنهادی با ساختار جدیدی از جعبه‌دنده مغناطیسی اکتیو ارائه می‌شود. در انتها، فصل پنجم، شامل جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای بهبود عملکرد جعبه‌دنده مغناطیسی هم‌محور در مطالعات آینده، خواهد بود.

1 Modulating Ring

2 Ferromagnetism

فصل ۲ : مروری بر پیشینه پژوهش

۱-۲ مقدمه

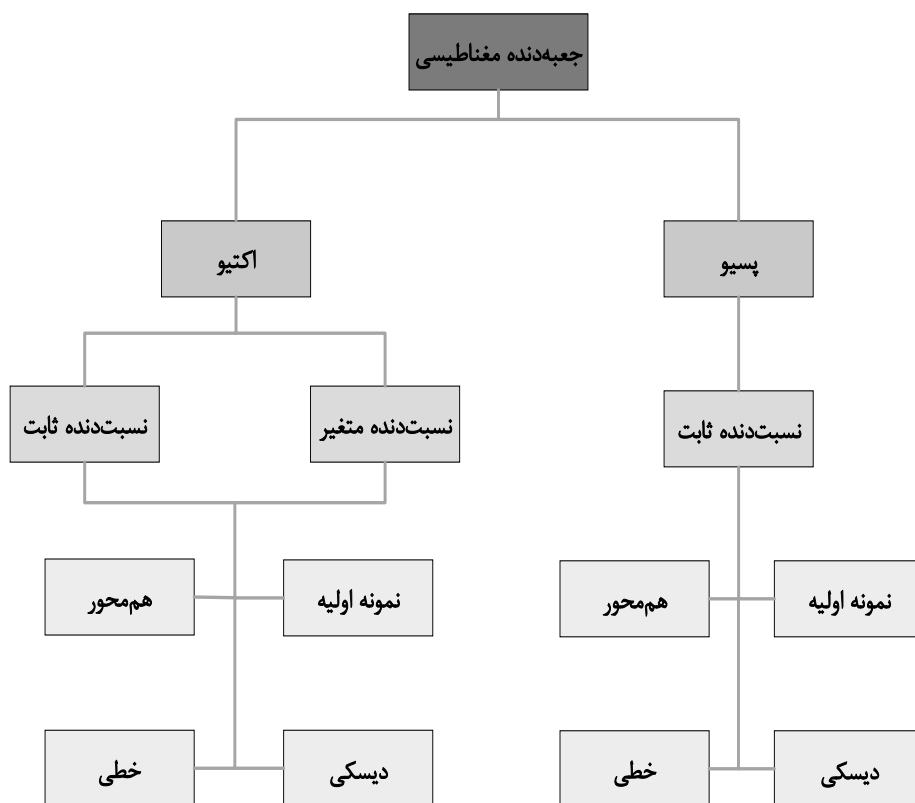
چرخ‌دنده‌های موجود در جعبه‌دنده‌های مکانیکی، نیاز به روانکاری و خنک‌سازی دارند که باعث افزایش هزینه تعمیر و نگهداری این نوع چرخ‌دنده‌ها می‌شود. بعلاوه، این کار توسط گریس، واسکازین و یا روغن صورت می‌گیرد که آسیب‌های زیست‌محیطی نیز به همراه دارد. در نتیجه استفاده از جعبه‌دنده‌های مغناطیسی می‌تواند گزینه مناسبی بجای جعبه‌دنده مکانیکی باشد. جعبه‌دنده مغناطیسی نسبت به نوع مکانیکی مزایای زیاد مانند عدم نیاز به روانکاری، کاهش تعمیرات و نگهداری، قابلیت اطمینان بالا، کاهش نویز و سروصدا دارند. در فصل قبل چند نمونه از جعبه‌دنده‌های مغناطیسی پایه معرفی شد که شباهت زیادی با جعبه‌دنده‌های مکانیکی داشتند، اما به دلیل پایین بودن سطح گشتاور، مورد توجه قرار نگرفتند. با پیدایش آهن‌ربای خاک کمیاب، حوزه استفاده از آهن‌رباها به دلیل خاصیت جذب مغناطیسی بالا، در صنعت جعبه‌دنده‌ها با گستردگی زیادی روبرو شد. در ادامه این فصل، ابتدا پیشینه‌ای از انواع جعبه‌دنده‌های مغناطیسی مورد استفاده در صنعت و دسته‌بندی آن‌ها در مطالعات گذشته، بررسی می‌شود.

۲-۲ تشریح و دسته‌بندی انواع جعبه‌دنده مغناطیسی در مطالعات گذشته

به‌طور کلی جعبه‌دنده مغناطیسی به دو نوع تقسیم می‌شوند: (۱) جعبه‌دنده مغناطیسی پسیو^۱ (۲) جعبه‌دنده مغناطیسی اکتیو. جعبه‌دنده‌های پسیو، معمولاً دارای نسبت‌دنده ثابتی هستند و توان مصرفی کمی دارند، اما جعبه‌دنده‌های مغناطیسی اکتیو^۲، توان بیشتری را مصرف می‌کنند و نیازمند منبع تغذیه خارجی هستند و نسبت‌دنده در بازه وسیع‌تری قابل تغییر است. در شکل ۱-۲ یک دسته‌بندی کلی از جعبه‌دنده‌های مغناطیسی نشان داده شده است.

۱-۲-۲ چرخ‌دنده مغناطیسی اولیه

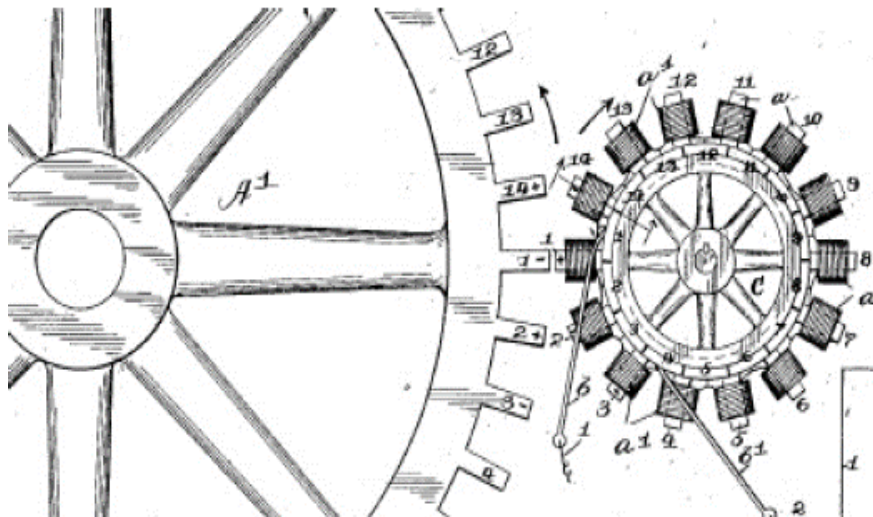
اولین جعبه‌دنده مغناطیسی به حدود یک قرن قبل برمی‌گردد که تا حدودی انتقال گشتاور را انجام می‌داد، اما به دلیل ضعیف بودن نسبت به جعبه‌دنده مکانیکی به دلیل قدرت جذب و دفع کم آهن‌ربا و مواد به‌کاررفته در ماشین نتوانست جایگزین مناسبی برای جعبه‌دنده مکانیکی شود. آرمسترانگ^۱ در سال ۱۹۰۱ یک محرکه الکترومغناطیسی طراحی کرد که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است [۱۲]. جعبه‌دنده متشکل از دو چرخ‌دنده هست. یک چرخ با دنده‌های فولادی به همراه سیم‌پیچ و دیگری با دنده‌های فولادی تشکیل شده است. این چرخ‌دنده با میدان مغناطیسی ایجاد شده در اطراف دنده‌ها با یکدیگر کوپل^۲ می‌شوند. در این محرکه به دلیل ارتباط غیر تماسی که بین دنده‌ها وجود دارد از نویز و سروصدا کاسته شده است، اما گشتاور انتقالی به دلیل تعامل سه دنده در هر لحظه با یکدیگر، کم خواهد بود.



شکل ۲-۱. دسته‌بندی انواع جعبه‌دنده مغناطیسی

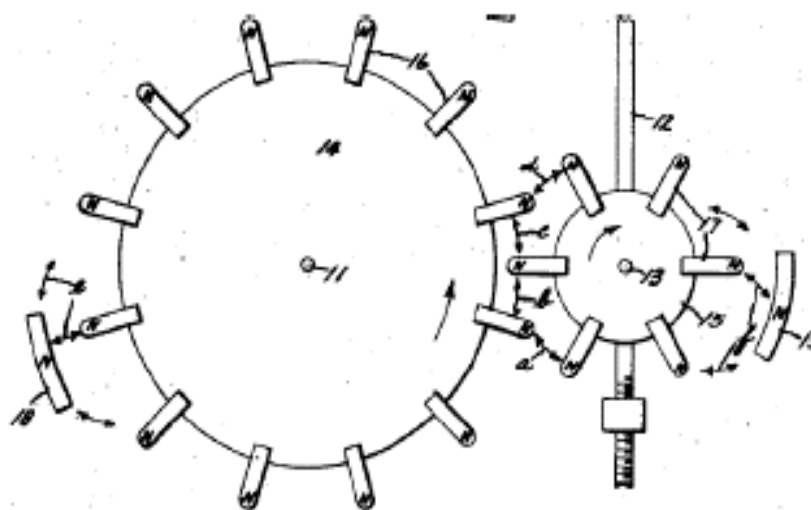
1 Armstrong

2 Coupl



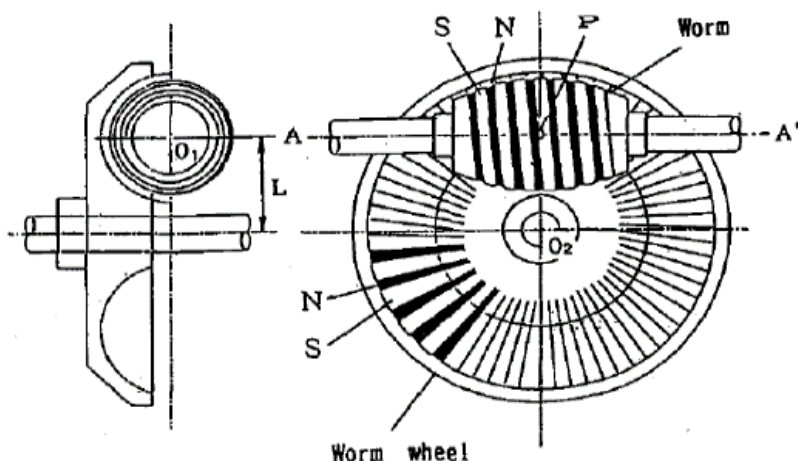
شکل ۲-۲. چرخ‌دنده الکترومغناطیسی اولیه [۱۲].

در سال ۱۹۴۱ یک چرخ‌دنده مغناطیسی ارائه شد، که شکل ۲-۳ نشان داده شده است [۱۳]. این جعبه‌دنده همانند طرح شکل ۲-۲ عمل می‌کند، با این تفاوت که بجای دندانه فلزی و سیم‌پیچ، از آهنرباهای دائم در لبه دوچرخ محرک استفاده شده است. با افزایش بار در این طرح، قطب‌ها دچار لغزش می‌شدند و با برخورد دو آهنربا با یکدیگر احتمال شکستن بسیار بالا بود بنابراین قابلیت اطمینان و استحکام مکانیکی بسیار کمی داشت.



شکل ۲-۳. چرخ‌دنده مغناطیسی نوع ساده [۱۳]

در مرجع [۱۴]، یک چرخ‌دنده مغناطیسی حلزونی ارائه شده است. دنده ارائه شده، دارای نسبت‌دنده ۱:۳۳ است. طراحی اصلی دارای قابلیت گشتاور بسیار کم، به دلیل فاصله هوایی زیاد بود. با کاهش فاصله هوایی (شکل ۲-۴)، گشتاور خروجی تا حدود ۱/۵ برابر افزایش یافت. با این حال، به دلیل پیچیدگی مدل ارائه شده، هزینه ساخت و مونتاژ بالایی داشت.



شکل ۲-۴. جعبه‌دنده مغناطیسی حلزونی [۱۴]

۲-۲-۲ جعبه‌دنده مغناطیسی هم‌محور^۱

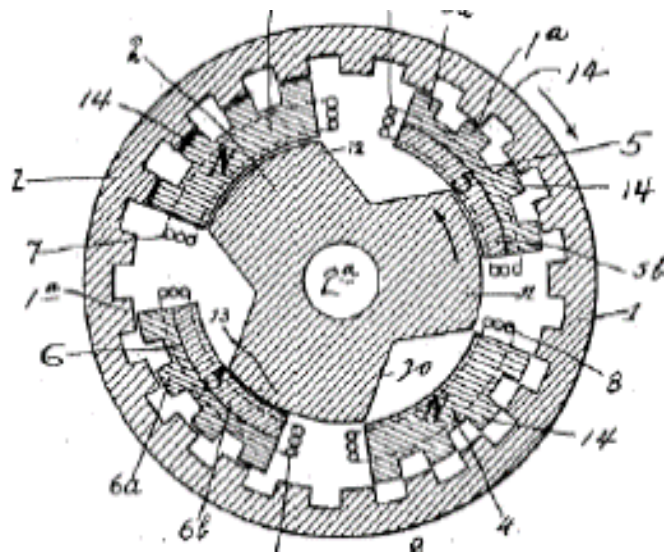
اولین جعبه‌دنده مغناطیسی هم‌محور در [۱۵] اختراع شد. این جعبه‌دنده شامل چهار جزء است. روتور داخلی و بیرونی از جنس فولاد، دو جفت قطب در حلقه میانی که متصل به حلقه تعدیل‌کننده^۲ است. در شکل ۲-۵ این جعبه‌دنده قابل مشاهده است. قطعات مدولاسیون برای تعدیل کردن شار مغناطیسی شکل گرفته‌اند. چگالی گشتاور در این پیکربندی در مقایسه با طرح ارائه شده توسط آرمسترانگ بسیار بهبود یافته است، زیرا بیشتر دندانه‌های جعبه‌دنده در هر لحظه در انتقال گشتاور شرکت می‌کنند.

در سال ۱۹۶۸ یک اختراع از جعبه‌دنده مغناطیسی هم‌محور با استفاده از آهنرباهای فریت به ثبت رسید [۱۶]. این جعبه‌دنده قادر به کنترل سرعت و انتقال گشتاور بدون تماس مکانیکی بود (شکل ۲-۶). در سال ۲۰۰۱، مدل جدیدی از جعبه‌دنده مغناطیسی هم‌محور ارائه شد. در این ساختار، آهنرباها بر روی

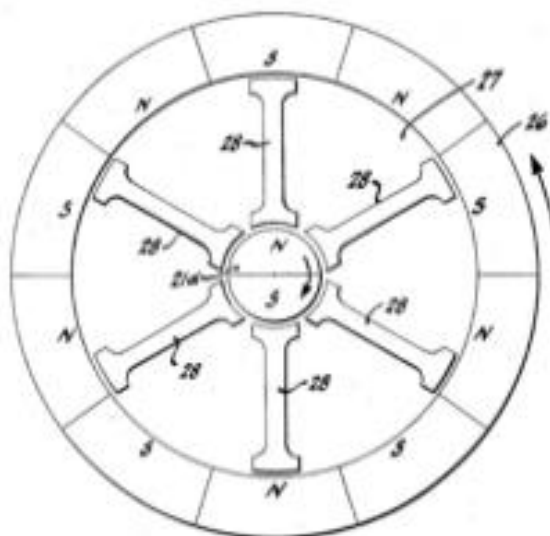
1 Coaxial Magnetic Gearbox

2 Modulating Ring

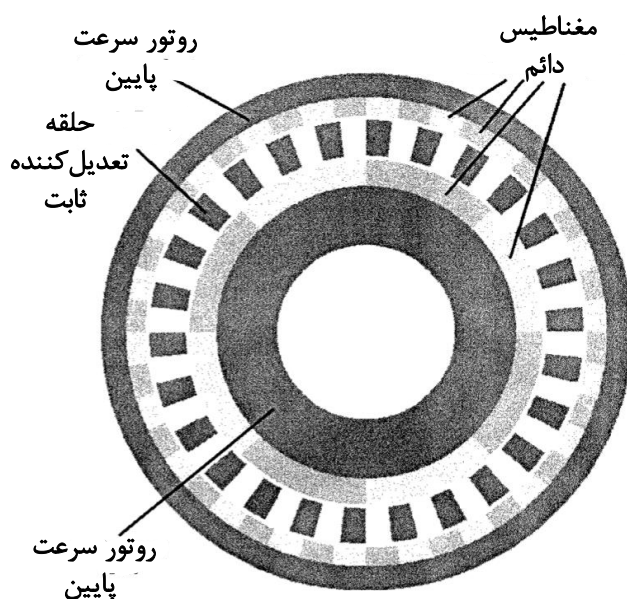
سطح دو روتور، متصل شده بودند [۱۷]. در این ساختار، رابطه بین تعداد قطب‌ها و تعداد قطعات تعدیل‌کننده برای تعیین نسبت‌دنده توضیح داده شده است. در این جعبه‌دنده، از آهن‌ربا خاک کمیاب مورد استفاده قرار گرفته است. چگالی گشتاور به‌دست‌آمده در این جعبه‌دنده بیش از ۱۰۰ نیوتن متر بر مترمکعب بود، سپس در سال ۲۰۰۵، مدلی دیگر مشابه با همین مدل ارائه شد [۱۸]، با این تفاوت که آهن‌رباهای روتور داخلی بر روی سطح قرار نداشتند (شکل ۲-۸). این جعبه‌دنده، دارای نسبت‌دنده ۵/۵:۱ و گشتاور ۲۷ نیوتن متر بود. با این حال، نتایج عملی نشان می‌داد، گشتاور کل فقط ۱۶ نیوتن متر است.



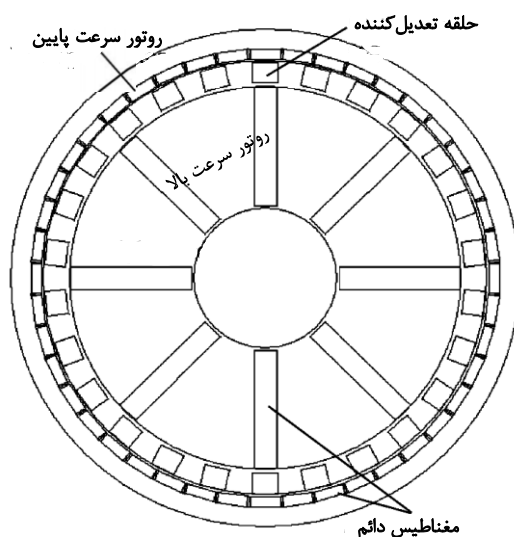
شکل ۲-۵. انتقال‌دهنده مغناطیسی هم‌محور نوع ۱ [۱۵].



شکل ۲-۶. جعبه‌دنده مغناطیسی هم‌محور نوع ۲ [۱۶]



شکل ۲-۷. جعبه دنده مغناطیسی هم محور [۱۷].

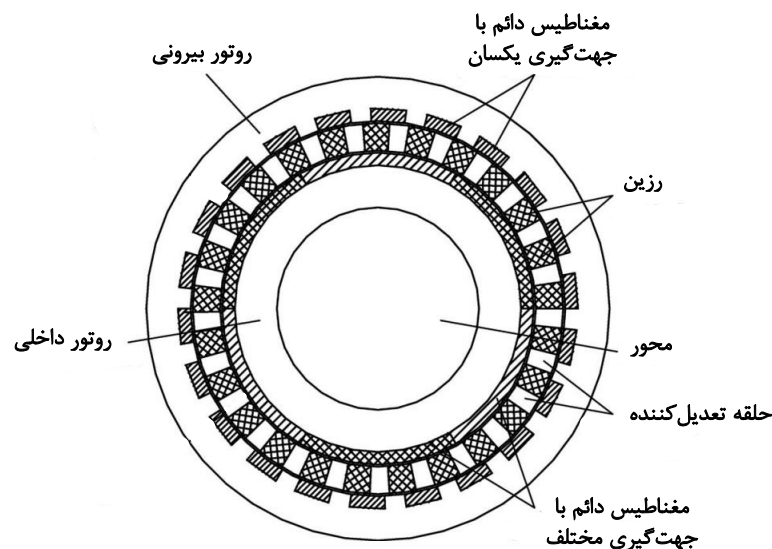


شکل ۲-۸. چرخ دنده مغناطیسی هم محور با آرایش پره‌ای^۱ آهنرباهای روتور داخلی [۱۸].

در سال ۲۰۰۸، یک ساختار از جعبه دنده مغناطیسی سیاره‌ای را ارائه شد [۵]. این مدل شباهت زیادی با دنده‌های مکانیکی معمولی داشت. با این تفاوت، هر دندان با یک آهنربا دائم جایگزین می‌شد. حداکثر گشتاور را می‌توان، با افزایش تعداد سیاره‌ها افزایش داد. نتایج جعبه دنده آزمایش شده، حداکثر چگالی گشتاور ۱۰۰ کیلو نیوتن بر مترمکعب را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۲-۹ قابل مشاهده است، در مرجع [۱۹] ساختاری جدید معرفی شد. آهنرباهای روتور بیرونی در این ساختار درون یوغ

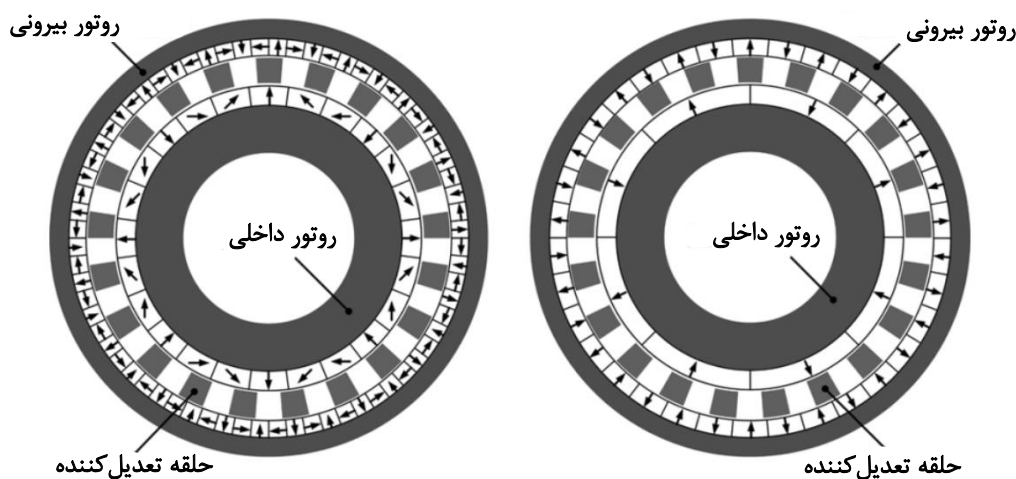
^۱ Spoke

قرار گرفته است، که می‌تواند یکپارچگی مکانیکی و کاهش حجم آهنربای به‌کاررفته در جعبه‌دنده را به همراه داشته باشد. نسبت‌دنده در این ساختار $7/33$ است. چگالی گشتاور محاسبه شد در حالت استاتیک، با شعاع بیرونی 110 میلی‌متر، نتایج اجزاء محدود و آزمایش تجربی به ترتیب $73/3$ نیوتن متر و 73 نیوتن متر را نشان می‌داد. برای افزایش چگالی گشتاور در [۲۰] جعبه‌دنده مغناطیسی با جهت‌گیری مغناطیسی هالباخ^۱ برای آهنرباهای دو روتور، معرفی شد. در این تحقیق، ساختار معرفی شده، با ساختار هم‌محور، با جهت‌گیری مغناطیسی معمول (شعاعی) مقایسه شد (شکل ۲-۱۰). با ثابت نگه‌داشتن روتور داخلی و چرخش روتور بیرونی، نتایج محاسبه‌شده در اجزاء محدود نشان می‌داد، گشتاور خروجی این ساختار، $51/7$ نیوتن متر (روتور داخلی) و $221/1$ نیوتن متر (روتور بیرونی) و در جهت‌گیری مغناطیسی نوع معمول، $45/5$ نیوتن متر (روتور داخلی) و $195/2$ نیوتن متر (روتور بیرونی) است. مشخص است، آرایش مغناطیسی هالباخ دارای خصوصیات جذابی هستند. از ویژگی‌های مهم این آرایش می‌توان به، توزیع چگالی شار نزدیک به سینوسی در فاصله هوایی، چگالی گشتاور بالا به دلیل شدت میدان مغناطیسی قوی و رپیل گشتاور کم اشاره کرد. پیاده‌سازی دشوار این آرایش، یکی از معایبی است که با آن روبروست.



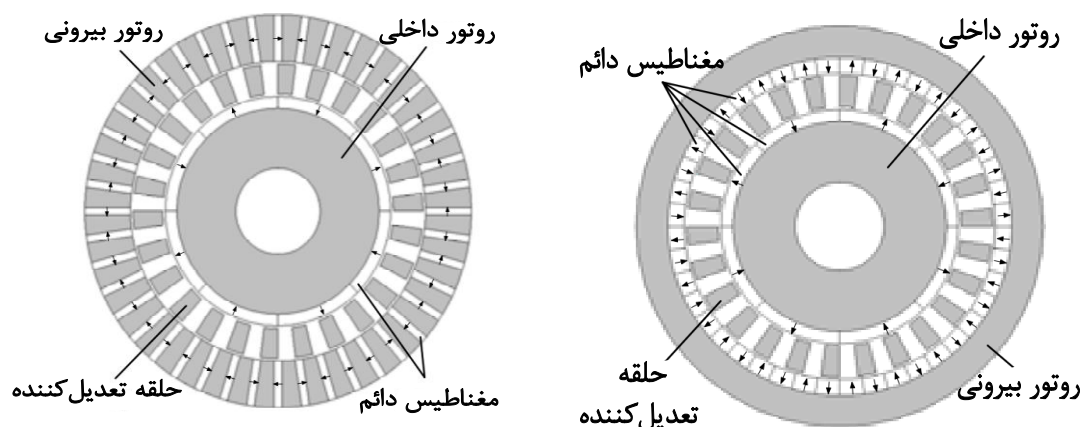
شکل ۲-۹. ساختار جدید جعبه‌دنده مغناطیسی هم‌محور [۱۹]

¹ Halbach



شکل ۲-۱۰. جعبه‌دنده مغناطیسی پسیو با آرایش مغناطیسی هالباخ [۲۰]

در شکل ۲-۱۱، ساختاری متفاوتی را از جعبه‌دنده مغناطیسی نشان داده شده است. در این ساختار آهنرباهای روتور داخلی و بیرونی به ترتیب، شعاعی و محیطی مغناطیسی شده‌اند. در روتور بیرونی بین آهنرباها قطعات فرومغناطیس برای افزایش تمرکز شار ایجاد شده در فاصله هوایی جاگذاری شده است که می‌تواند به بهبود قابلیت انتقال گشتاور کمک کند. حداکثر گشتاور خروجی اندازه‌گیری شده، ۱۶۸ نیوتن متر روتور بیرونی و ۳۱ نیوتن متر روتور داخلی است. مدل ارائه شده در مقایسه با مدل معمول، ۲۴/۹ درصد افزایش گشتاور را به همراه داشت [۲۱].



شکل ۲-۱۱. جعبه‌دنده مغناطیسی هم‌محور با آرایش متفاوت در دو روتور [۲۱]

در مرجع [۲۲]، یک چرخ‌دنده مغناطیسی متمرکز بر شار با هزینه کم برای استفاده در مبدل‌های انرژی امواج ارائه شد. محاسبات در این پروژه، با در نظر گرفتن اثرات مغناطیس زدایی صورت گرفته

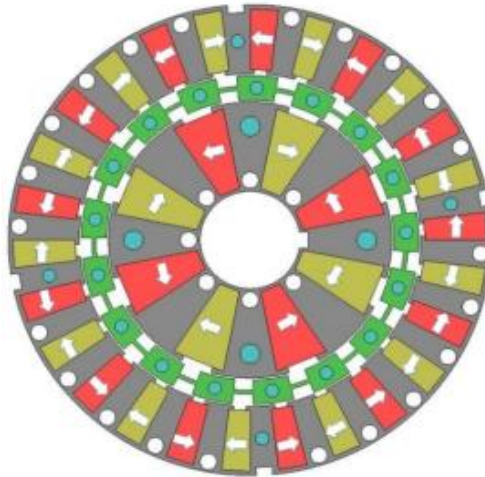
است. ساختار آهنرباها در این مدل از نوع پره‌ای با مواد فریت است که، تمرکز چگالی شار در فاصله هوایی را افزایش می‌دهد. حداکثر سرعت مجاز ورودی برای این جعبه‌دنده ۲۰ دور بر دقیقه است. در نتیجه قطعات حلقه تعدیل‌کننده در این جعبه‌دنده، یکپارچه در نظر گرفته شده است. در جدول ۱-۲ خلاصه از گشتاور، تلفات و راندمان این مدل را نشان می‌دهد. همچنین، این ساختار با هدف تأثیر مواد مغناطیس دائم بر روی سطح گشتاور، توسط مرجع [۲۳]، توسط نرم‌افزار اجزاء محدود و آزمایش عملی^۱ محاسبه و مقایسه شد. این نتایج، به‌طور خلاصه در جدول ۲-۲ ارائه شده است. در این ساختار، از قطعات فرومغناطیس به‌صورت یکپارچه در حلقه تعدیل‌کننده مورد استفاده قرار گرفته است. مهار کردن این قطعات در جعبه‌دنده به‌صورت جدا مشکل است در نتیجه در مرجع [۲۴] ساختارهای مختلفی از قطعات تعدیل‌کننده و آهنرباها مطرح شد. در این مقاله، سیزده طرح ارائه شد و تأثیر تمام طرح‌ها بر روی گشتاور و راندمان مورد ارزیابی قرار گرفت. دایره‌های آبی نشان داده شده در شکل ۲-۱۲، برای نگهداری قطعات فولادی در جای خود از طریق صفحات انتهایی محور هستند. در سال ۲۰۱۳ فوجیتا^۲، شکل‌های مختلف از قطعات تعدیل‌کننده را برای جعبه‌دنده مغناطیسی هم‌محور ارائه داد. هدف اصلی این مطالعه [۲۵]، توسعه چرخ‌دنده مغناطیسی برای چرخش در سرعت‌های بالا، با پایداری تحت گشتاور زیاد است. در این مقاله بیست و چهار طرح از حلقه تعدیل‌کننده معرفی شد، که شش (شکل ۲-۱۳) طرح عملکرد خوبی نسبت به سایر طرح‌ها دارا بودند. در شکل ۲-۱۴، خلاصه‌ای از عملکرد طرح‌ها، نشان داده شده است.

جدول ۱-۲. محاسبه تلفات در دو سرعت متفاوت [۲۲]

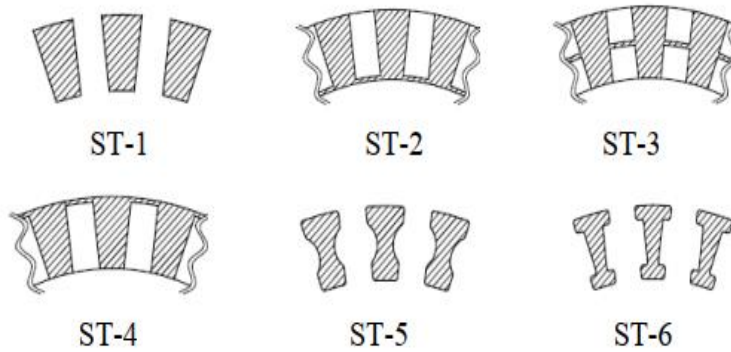
۱۰۰	۲۰	سرعت روتور بیرونی (rpm)
۴۳/۶۲	۲/۶۲	تلفات حلقه تعدیل‌کننده (W)
۲۲/۱۵	۱/۳۸	تلفات روتور بیرونی (W)
۶/۲۱	۰/۳۸	تلفات روتور داخلی (W)
۷۱/۹۸	۴/۳۸	تلفات کل (W)
۲۰۱	۲۰۱	توان خروجی (W)
۹۳/۳۲	۹۷/۸	راندمان (%)

جدول ۲-۲. تأثیر مواد مغناطیس دائم بر گشتاور [۲۳]

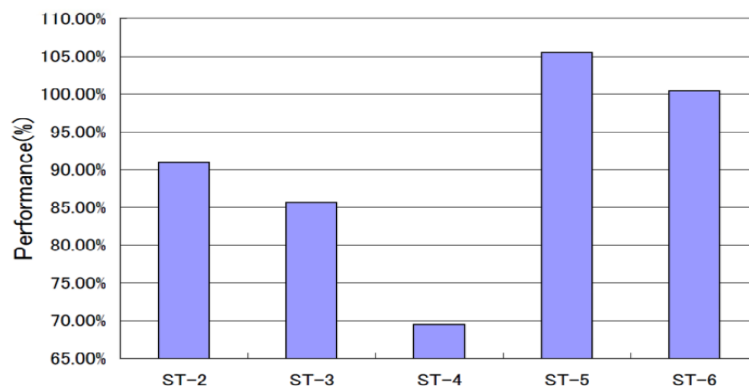
گشتاور (Nm)		مواد مغناطیس دائم
محاسبه شده	آزمایش عملی	
۴۲	۲۵	فریت
۶۱	۴۸	ترکیبی
۱۱۵	۱۱۳	NdFeB



شکل ۲-۱۲. جعبه دنده مغناطیسی با پل تعدیل کننده [۲۴]

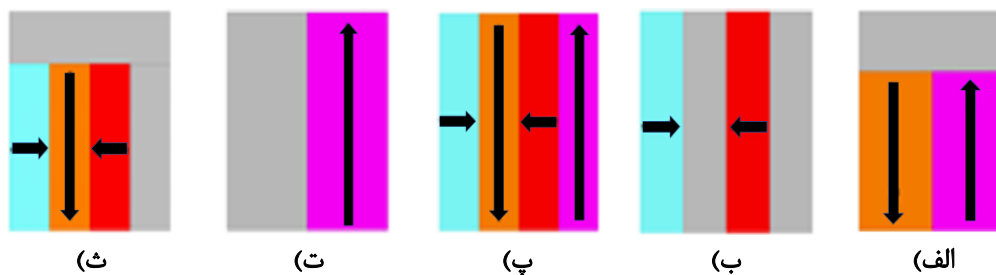


شکل ۲-۱۳. شش طرح برتر قطعات حلقه تعدیل کننده [۲۵]

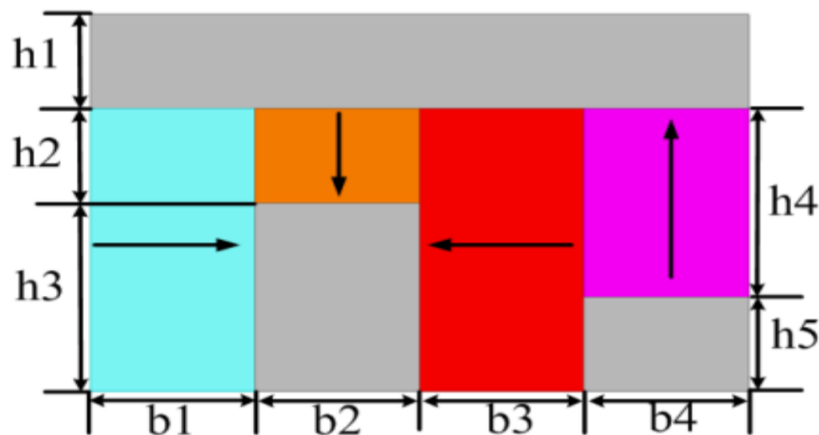


شکل ۲-۱۴. مقایسه عملکرد شش طرح پل تعدیل کننده [۲۵]

با انتخاب بهترین آرایش از آهن‌رباهای دو روتور در جعبه‌دنده، می‌توان چگالی گشتاور بالاتری نسبت به ساختار معمولی به دست آورد. در مرجع [۲۶] پنج نوع از آرایش آهن‌رباها، که معمولاً بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد، معرفی شد (شکل ۲-۱۵). مسیرهای مغناطیسی، از جهت‌های نشان داده شده در شکل ۲-۱۶ پیروی می‌کنند. ساخت این طرح‌ها به دلیل وجود قطعات آهنربایی کوچک بسیار دشوار است.



شکل ۲-۱۵. پنج ترکیب اصلی مغناطیس دائم‌ها [۲۶]: (الف) آرایش سطحی (ب) آرایش پره‌ای (پ) آرایش ساده هالباخ (ت) آرایش قطب بعدی (ث) آرایش ترکیب قطب بعد و هالباخ

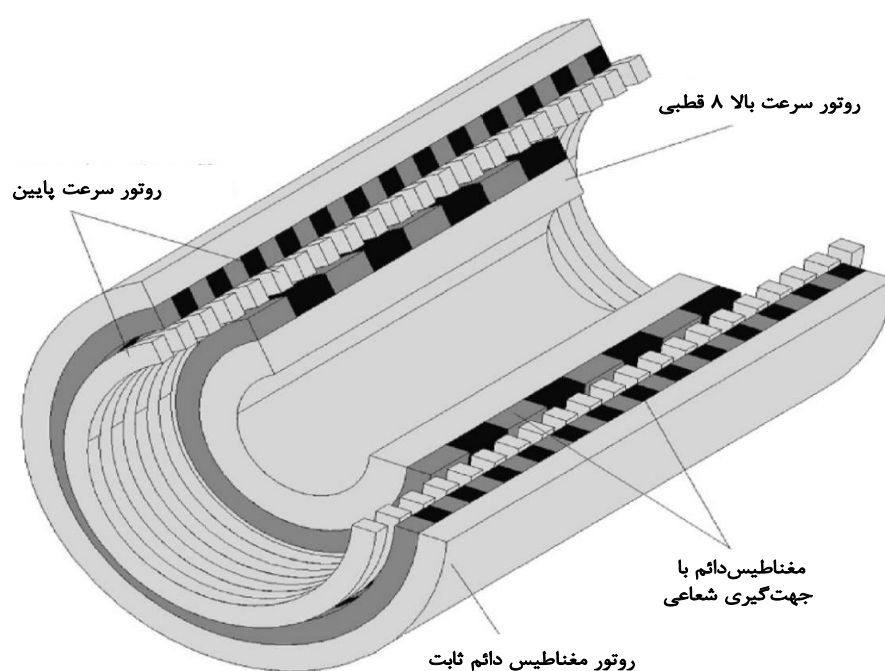


شکل ۲-۱۶. الگوی کلی آرایش مغناطیس دائم‌ها [۲۶]

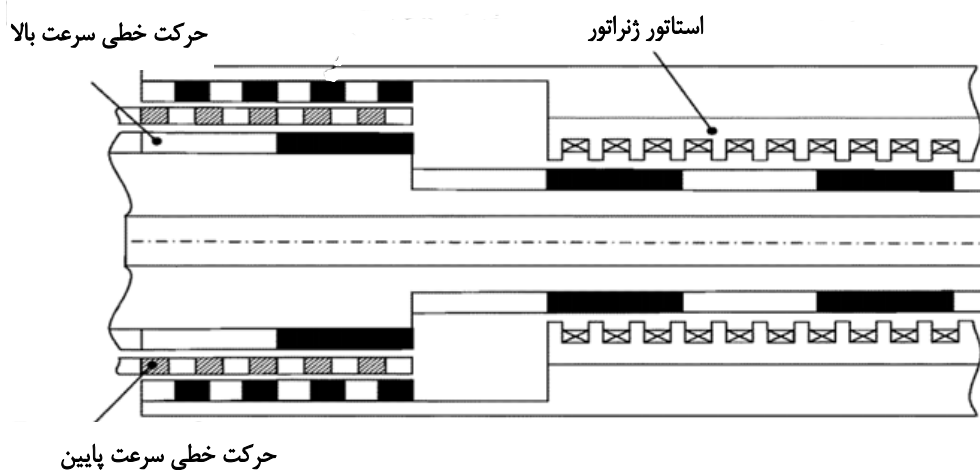
۳-۲-۲ جعبه‌دنده مغناطیسی خطی

عطاءالله و همکاران در سال ۲۰۰۵ یک مدلی از جعبه‌دنده مغناطیسی خطی ارائه دادند [۲۷]. این جعبه‌دنده، عملکردی همانند جعبه مغناطیسی هم‌محور که در مرجع [۱۷] ارائه شده داشت. در این جعبه‌دنده، از آهنربا NdFeB مورد استفاده قرار گرفته است و نتایج چگالی نیرو، $1/7$ نیوتن متر بر مترمکعب را نشان می‌داد (شکل ۲-۱۷). در این مرجع مطرح شد، با ترکیب یک چرخ‌دنده مغناطیسی

خطی با یک موتور خطی آهنربای دائمی، باعث می‌شود جعبه‌دنده دارای چگالی گشتاور بالاتری باشد. با ارائه جعبه‌دنده مغناطیسی هم‌محور، مدل‌های دیگری از جعبه‌دنده مغناطیسی، با هدف افزایش چگالی گشتاور معرفی شد. مرجع [۲۸] یک ماشین، برای تولید انرژی توسط موج ارائه داد. ساختار این ماشین، از یک چرخ‌دنده مغناطیسی خطی که با یک ژنراتور آهنربای دائم خطی به صورت سری شده یا یکدیگر قرار گرفته‌اند تشکیل شده است (شکل ۲-۱۸). نتایج تحلیل المان محدود نشان می‌داد، این ماشین می‌تواند چگالی توان و راندمان بالاتری نسبت به همتای خود ارائه دهد.



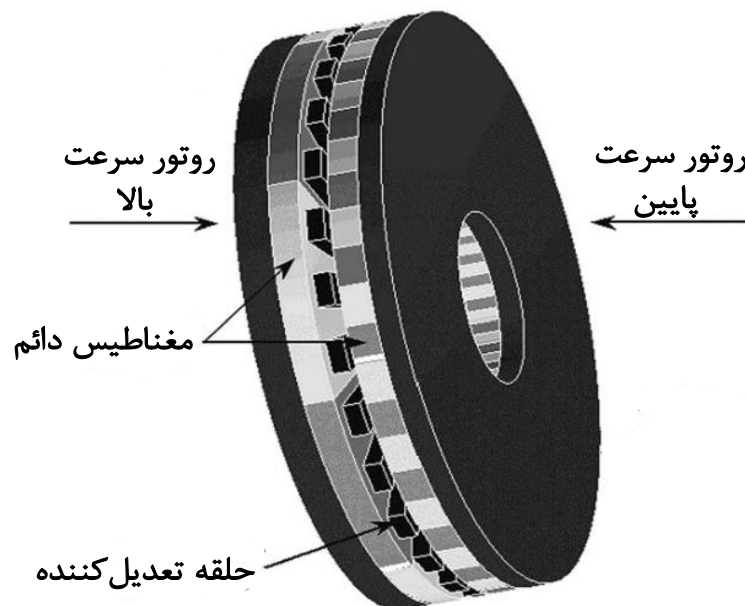
شکل ۲-۱۷. جعبه‌دنده مغناطیسی خطی [۲۷]



شکل ۲-۱۸. ترکیب ژنراتور و جعبه‌دنده مغناطیسی خطی [۲۹]

۴-۲-۲ جعبه‌دنده مغناطیسی دیسکی

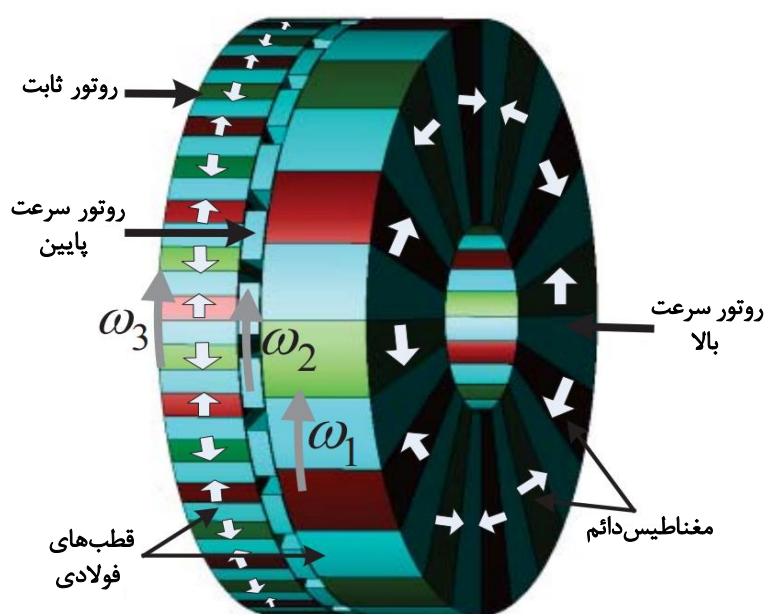
در مرجع [۲۹]، یک ساختار از جعبه‌دنده مغناطیسی شار محوری^۱ ارائه شد، که در شکل ۲-۱۹ قابل مشاهده است. اصل عملکرد جعبه‌دنده مغناطیسی شار محوری همانند شار شعاعی است. چگالی گشتاور به دست آمده از این مدل در فاصله هوایی ۰/۵ میلی‌متر، ۷۰ کیلو نیوتن متر با نسبت دنده ۵/۷۵ است. نیروهای محوری که بر روتورهای پرسرعت و کم‌سرعت اعمال می‌شوند نسبتاً کم است. جانسون^۲، یک جعبه‌دنده مغناطیسی شار محوری، به منظور بررسی تأثیر ضخامت فاصله هوایی بین روتورها و حلقه تعدیل کننده ارائه کرد [۳۰]. مدل سه بعدی این ماشین، با استفاده از، نرم افزار اجزاء محدود تحلیل شد. نتایج نشان می‌داد افزایش ضخامت فاصله هوای به طور چشمگیری قابلیت انتقال گشتاور چرخ دنده را کاهش می‌دهد، زیرا عدم تمایل مسیرهای شار عبوری از محوری را افزایش می‌دهد و پیوند شار محوری از بین می‌رفت. در مقاله [۳۱]، ویژگی‌های چگالی گشتاور بالا، با استفاده از آهن ربای خاک کمیاب برای یک چرخ دنده مغناطیسی شار محوری با ساختار متمرکز بر شار، ارائه شده است (شکل ۲-۲۰).



شکل ۲-۱۹. جعبه‌دنده مغناطیسی شار محوری [۲۹]

1 Axial Flux

2 Johnson



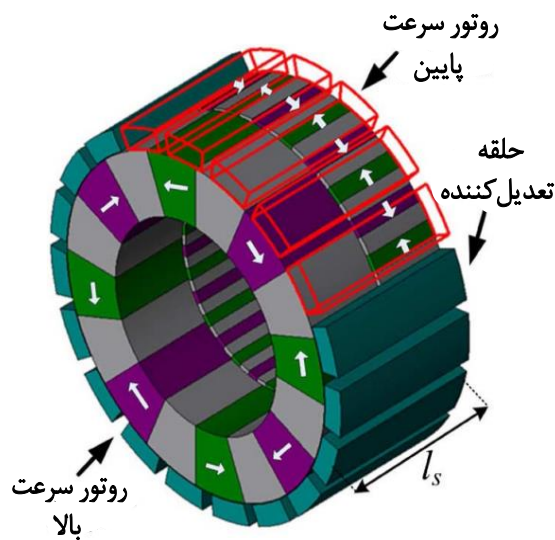
شکل ۲-۲۰. جعبه‌دنده مغناطیسی متمرکز بر شار [۳۱]

در این پژوهش، با تغییر پارامترهای ماشین توانست، رپیل گشتاور و چگالی گشتاور خوبی را به دست آورد. رپیل گشتاور در روتور سرعت پایین و روتور سرعت بالا، به ترتیب $1/1$ و $10/5$ ٪، همچنین، چگالی حجمی و جرمی فعال گشتاور به ترتیب $78/5$ نیوتن متر بر لیتر و $17/9$ نیوتن متر بر کیلوگرم محاسبه شده. مرجع [۳۲]، ساختار جدیدی از جعبه‌دنده مغناطیسی شار متقاطع^۱، با هدف تمرکز شار ارائه داد که در شکل ۲-۲۱ قابل مشاهده است. در این ساختار، از آهنرباهای خاک کمیاب استفاده شده است که در امتداد جهت محیطی مغناطیسی می‌شوند و شار از قطعات فولادی در جهت محوری عبور می‌کند. چگالی شار را در صورتی می‌توان افزایش داد که مساحت آهنرباها، بزرگ‌تر از مساحت قطعات فرومغناطیس باشند. نتایج نشان می‌داد که این ساختار در مقایسه با ساختار متمرکز شار شعاعی با استفاده مواد فریت در آهنرباها، چگالی گشتاور کمتری دارد.

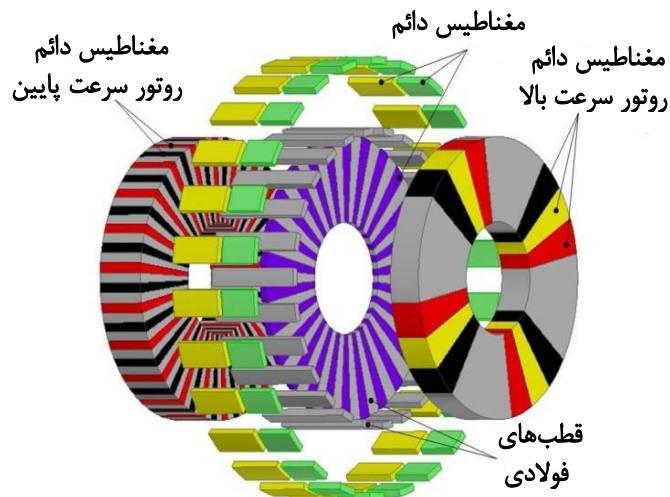
در مرجع [۳۳] یک چرخ‌دنده مغناطیسی شار ترکیبی، با ساختار جدید ارائه شده. این مدل، از سه جزء آهنربا به همراه ترکیب دو جعبه‌دنده شار متقاطع و شار محوری تشکیل شده است. ساختار جدید

1 Transverse Flux

در مقایسه با دنده مغناطیسی شار متقاطع، یک پیکربندی جدید بر روی روتور با سرعت بالا، یک بخش آهن اضافی بین روتور کم سرعت و روتور با سرعت بالا، برای مدولاسیون میدان مغناطیسی، همچنین آهنرباهای دائمی بر روی بخش های آهن استفاده می کند تا گشتاور اضافی تولید شود. در شکل ۲-۲۲، رنگ های سیاه و زرد مغناطیس دائم ها را با جهت مغناطیسی محیطی منفی، رنگ قرمز مغناطیس دائم را با جهت مغناطیسی محیطی مثبت، رنگ سبز مغناطیس دائم ها را با جهت مغناطیسی شعاعی مثبت و رنگ بنفش نشان دهنده مغناطیس دائم ها با جهت مغناطیسی محوری منفی را نشان می دهد.



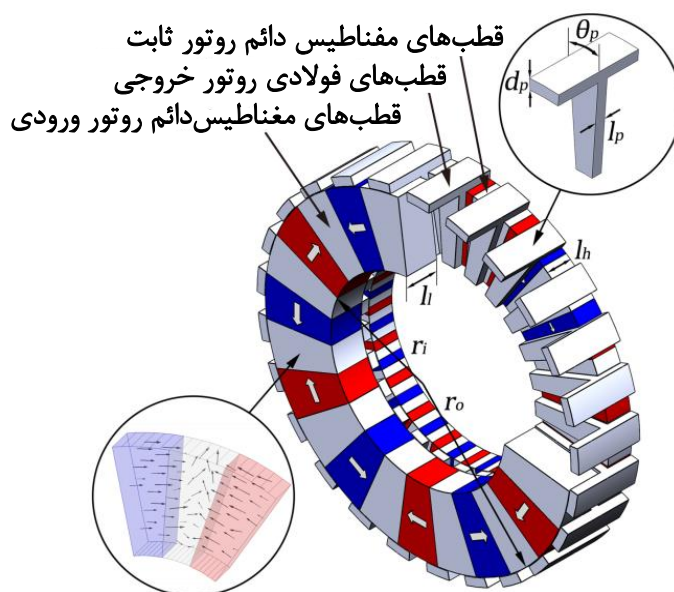
شکل ۲-۲۱. جعبه دنده مغناطیسی دیسکی شار متقاطع [۳۲]



شکل ۲-۲۲. جعبه دنده مغناطیسی با مسیر شار ترکیبی [۳۳]

یک ساختار جدید دیگر از چرخ دنده مغناطیسی شار متقاطع در مرجع [۳۴] ارائه شد. در این ماشین از روش تمرکز شار برای افزایش چگالی گشتاور و مشخص کردن مسیر عبور شار استفاده شده است. در

مقایسه با جعبه‌دنده مغناطیسی شار محوری معمولی، قطعات تعدیل‌کننده با قطعات T شکل جایگزین می‌شوند (شکل ۲-۲۳). بنابراین یک مسیر مغناطیسی متقاطع علاوه بر مسیر مغناطیسی محوری ایجاد می‌شود. با ایجاد دو مسیر عبور شار اثر اشباع کاهش می‌ابد. با بهینه‌سازی این ساختار، می‌توان به تراکم گشتاور ۲۸۲/۵۶ نیوتن متر بر لیتر دست یافت.



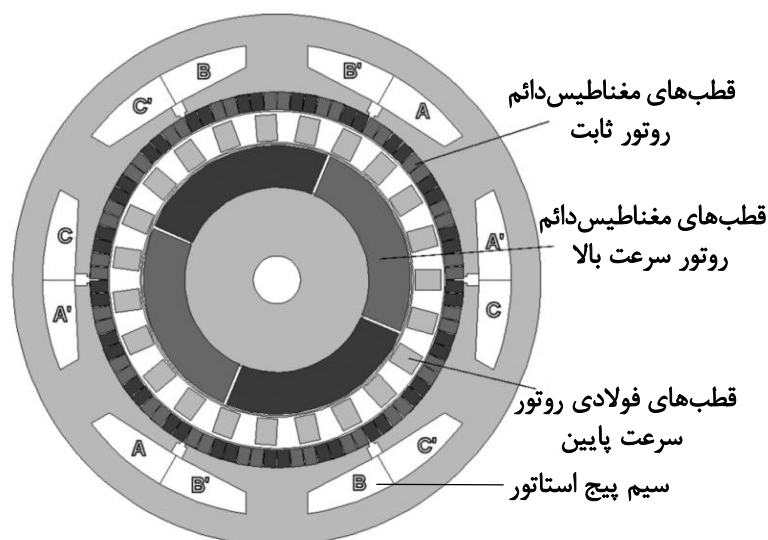
شکل ۲-۲۳. جعبه‌دنده مغناطیسی شار ترکیبی ساده [۳۴]

۵-۲-۲ جعبه‌دنده مغناطیسی اکتیو با نسبت‌دنده ثابت

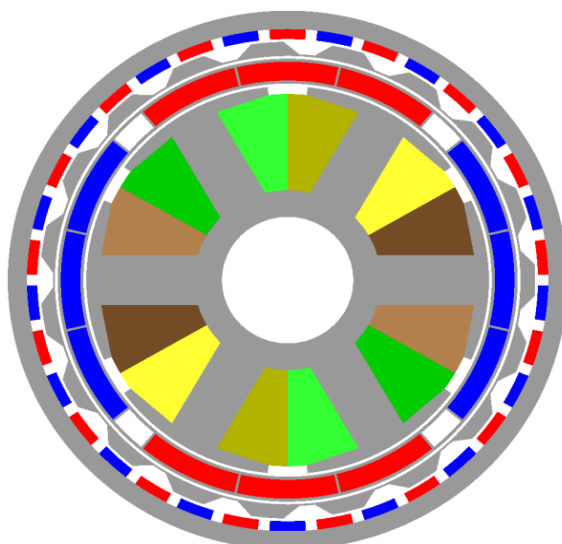
برای کاربردهای ماشین الکتریکی با سرعت پایین، معمولاً از نظر وزن، اندازه و هزینه، مقرون‌به‌صرفه است که از یک ماشین پرسرعت همراه با یک جعبه‌دنده استفاده شود. بنابراین می‌توان با ترکیب ماشین الکتریکی بدون جاروبک مغناطیس دائم با جعبه‌دنده مغناطیسی یک مدل کامل را ایجاد کرد. در این مدل گشتاور اندازه‌گیری شده بیش از ۶۰ کیلو نیوتن متر بر متر با ضریب توان ۰٫۹ به دست آورد. این ساختار در شکل ۲-۲۴ قابل مشاهده است [۳۵]. در مرجع [۳۶]، یک موتور آهنربای دائم ۳۵ کیلووات، با سرعت پایه ۴۰۰۰ دور بر دقیقه (rpm)^۱ و حداکثر سرعت ۱۴۰۰۰ دور بر دقیقه به همراه یک چرخ‌دنده

^۱ 1 Rotations Per Minute

مغناطیسی با نسبت دنده ۸/۶۷ ادغام شده است. در مرجع [۳۷]، ساختار ماشین مغناطیس دائم همراه جعبه دنده مغناطیسی با یکدیگر ادغام و با یک ماشین مغناطیس دائم گام کسری معمولی، مقایسه شده است. همان طور که در شکل ۲-۲۵ مشاهده می شود، سیم پیچ های استاتور، درون جعبه دنده تعبیه شده است. قابلیت گشتاور در ساختار ترکیب شده از ماشین معمولی برای حجم مشخص بیشتر است علاوه بر این از راندمان بالاتری برخوردار است، اما پیچیدگی مکانیکی در این ماشین زیاد است.



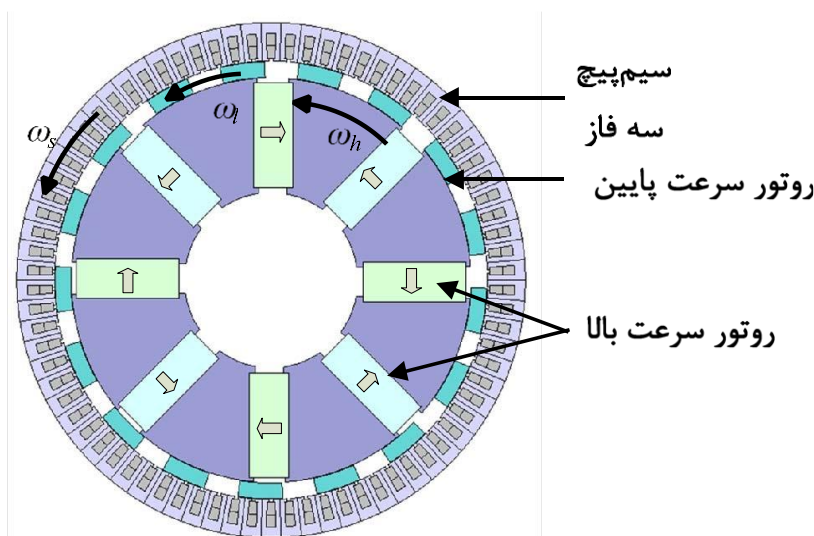
شکل ۲-۲۴. ترکیب جعبه دنده مغناطیسی با ماشین مغناطیس دائم



شکل ۲-۲۵. ترکیب جعبه دنده مغناطیسی با ماشین مغناطیس دائم (استاتور داخلی)

۶-۲-۲ جعبه‌دنده مغناطیسی اکتیو با نسبت‌دنده متغیر

در شکل ۲-۲۶ جعبه‌دنده مغناطیسی با نسبت‌دنده متغیر، نشان داده شده است [۳۸]. اگر سرعت ورودی پایین (ω_l) متغیر باشد، با کنترل مداوم فرکانس الکتریکی استاتور (ω_s)، می‌توان سرعت خروجی بالا (ω_h) را ثابت کرد. مشکل این روش این است که تعداد بالایی از قطب‌های استاتور موردنیاز است. در این ساختار، در روتور داخلی از آرایش پره‌ای برای تمرکز شار و از آهنرباهای فریت برای به حداقل رساندن هزینه مورد استفاده قرار گرفته است. در مرجع [۳۹] ساختار دیگری از ترکیب ماشین مغناطیسی دائم با جعبه‌دنده مغناطیسی ارائه شد که برای استفاده در تایر وسیله نقلیه الکتریکی کاربرد دارد. در این ساختار، روتور داخلی جعبه‌دنده مغناطیسی هم‌محور، با استاتور جایگزین شده است. همچنین، در این مدل می‌توان نسبت‌دنده متغیر را ایجاد نمود. در مرجع [۴۰]، یک ساختار متفاوت از جعبه‌دنده مغناطیسی اکتیو با نسبت‌دنده متغیر ارائه شد. در این ساختار از سیم‌پیچ‌های دوطبقه برای مغناطیس زدایی آهنرباهای روتور داخلی و بیرونی مورد استفاده قرار گرفته شده است. با توجه به مقاومت کم آلنیکو در برابر مغناطیس زدایی، با اعمال پالس جریان به صورت موقت به سیم‌پیچ‌ها، جهت‌گیری حوزه مغناطیسی آهنربا در دو روتور تغییر خواهد کرد. با این روش، شش نسبت‌دنده در جعبه‌دنده ایجاد خواهد شد.



شکل ۲-۲۶. جعبه‌دنده مغناطیسی هم‌محور با نسبت‌دنده متغیر [۳۸]

۳-۲ جمع‌بندی

در این فصل به معرفی و مروری بر انواع ساختارهای جعبه‌دنده مغناطیسی پرداخته شد. تحقیقات انجام شده با هدف بهبود عملکرد جعبه‌دنده مغناطیسی بود. ساختارهای مختلفی از آهنرباها، قطعات تعدیل‌کننده و انواع آرایش حوزه مغناطیسی آهنرباها و تاثیر آنها بر روی چگالی گشتاور در جعبه‌دنده مغناطیسی معرفی و با یکدیگر مقایسه شدند. به دلیل حساسیت بالای حلقه تعدیل‌کننده میانی و تاثیر شدید آن بر روی عملکرد جعبه‌دنده مغناطیسی، بیشترین تمرکز مراجع بر روی این جزء در ساختار بود.

فصل ۳ : تحلیل عملکرد جبهه دنده مغناطیسی پسیو

۳-۱ مقدمه

با توجه به کاربردهای وسیع جعبه‌دنده در صنعت، تحقیقات زیادی در زمینه جعبه‌دنده مغناطیسی صورت گرفته است که انواع آن در فصل دوم معرفی شد. با پیدایش جعبه‌دنده مغناطیسی هم‌محور که از چگالی گشتاور بالایی نسبت به ساختارهای پایه برخوردار است، تمایل به استفاده از این نوع جعبه‌دنده‌ها افزایش یافت. هدف تحقیقات صورت گرفته بر روی جعبه‌دنده‌های مغناطیسی، بهبود چگالی گشتاور در آن‌ها است. در این فصل، ابتدا اصول عملکرد جعبه‌دنده مغناطیسی هم‌محور بیان می‌شود. سپس، با استفاده از تحلیل اجزاء محدود، به بررسی دقیق‌تر ساختار هم‌محور، پرداخته خواهد شد.

۳-۲ اصول عملکرد جعبه‌دنده مغناطیسی هم‌محور

در سال ۲۰۰۱، یک چرخ‌دنده مغناطیسی پسیو هم‌محور معرفی شد. از آن زمان، ساختارهای دیگری، با اصول عملکرد مشابه از جعبه‌دنده مغناطیسی معرفی شد، که در فصل دوم تعدادی از آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. این ساختار شامل سه جزء است: روتور داخلی، حلقه تعدیل‌کننده میانی و روتور بیرونی. تعداد جفت قطب‌های روتور بیرونی و داخلی به ترتیب، ۲۲ و ۴ و از جنس آهنربا NdFeB است. حلقه تعدیل‌کننده میانی، از ۲۶ قطعه فرومغناطیس تشکیل شده است [۱۷]. حلقه میانی، میدان‌های مغناطیسی تولیدشده توسط روتور داخلی و بیرونی را تعدیل می‌کند. حلقه تعدیل‌کننده میانی، در فاصله هوایی بین روتور داخلی و بیرونی، هارمونیک‌های فضایی ایجاد می‌کند. میدان‌های مغناطیسی ایجاد شده توسط روتورهای داخلی و بیرونی، گشتاور را از طریق برهم‌کنش در حلقه میانی، انتقال می‌دهند. تعداد جفت قطب‌هایی که در توزیع چگالی شار هارمونیک فضایی توسط آهنرباهای دائمی روتور داخلی یا بیرونی تولید می‌شود، از طریق روابط زیر به دست می‌آید [۱۷]. در این روابط، P_m تعداد قطعات فرومغناطیس حلقه تعدیل‌کننده میانی و P تعداد جفت قطب‌های روتور بیرونی یا داخلی است.

$$P_{m,k} = |mP + kP_m| \quad (۱-۳)$$

$$m = 1, 3, 5, \dots, \infty$$

$$k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \infty$$

سرعت دورانی هارمونیک فضای چگالی شار به صورت زیر است [۱۷]:

$$\omega_{m,k} = \frac{mP}{mP + kP_m} \omega_r + \frac{kP_m}{mP + kP_m} \omega_s \quad (2-3)$$

از رابطه بالا این نتیجه را می‌توان گرفت، در صورتی که $K=1$ باشد، یعنی حلقه تعدیل‌کننده وجود نداشته باشد سرعت چرخش هارمونیک‌های فضایی با روتور برابر خواهد بود. اما اگر حلقه تعدیل‌کننده وجود داشته باشد ($k \neq 0$)، سرعت هارمونیک‌های فضایی با سرعت روتور برابر نخواهد بود و نسبت‌دنده باید تعریف شود. حداکثر میزان انتقال گشتاور زمانی حاصل می‌شود که $m=1$ و $k=-1$ باشد. در نتیجه رابطه بین تعداد جفت قطب‌های دو روتور و قطعات حلقه تعدیل‌کننده به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$P_o = P_m - P_i \quad (3-3)$$

حالت‌های کاری، سرعت چرخش و نسبت‌دنده برای جعبه‌دنده مغناطیسی هم‌محور را می‌تواند از روابط زیر به دست آورد [۴۱]. اختلاف بیشتر بین جفت قطب‌ها باعث افزایش نسبت‌دنده می‌شود:

۱. چرخش روتور بیرونی و داخلی، حلقه میانی ثابت

در صورتی که حلقه میانی ثابت باشد و دو روتور در خلاف جهت حرکت‌کننده نسبت‌دنده و سرعت

چرخش دو روتور از روابط (۴-۳) و (۵-۳) به دست می‌آید:

$$G_{r1} = \frac{P_m - P_i}{P_i} \quad (4-3)$$

$$\omega_l = \frac{1}{-G_{r1}} \times \omega_h \quad (5-3)$$

در این روابط، G_{r1} نسب دنده، P_m تعداد قطعات فرومغناطیس حلقه تعدیل‌کننده میانی، P_i تعداد جفت قطب‌های روتور داخلی و ω_l و ω_h سرعت چرخش روتور بیرونی (سرعت‌پایین^۱) و داخلی (سرعت‌بالا^۲) است.

۲. چرخش روتور داخلی و حلقه میانی، روتور بیرونی ثابت

در صورتی که روتور بیرونی ثابت، حلقه میانی و روتور داخلی هم‌جهت حرکت‌کننده نسبت‌دنده و

سرعت چرخش دو روتور از روابط (۶-۳) و (۷-۳) به دست می‌آید:

$$G_{r2} = \frac{P_m}{P_i} \quad (۶-۳)$$

$$\omega_s = \frac{1}{G_{r2}} \times \omega_h \quad (۷-۳)$$

۳. چرخش روتور بیرونی و حلقه میانی، روتور داخلی ثابت

در صورتی که روتور داخلی ثابت، حلقه میانی و روتور بیرونی هم‌جهت حرکت‌کننده نسبت‌دنده و

سرعت چرخش دو روتور از روابط (۸-۳) و (۹-۳) به دست می‌آید:

$$G_{r1,2} = \frac{P_m}{P_m - p_o} \quad (۸-۳)$$

$$\omega_s = \frac{G_{r1}}{G_{r2}} \times \omega_l \quad (۹-۳)$$

در رابطه، ω_s سرعت چرخش حلقه میانی و P_o تعداد جفت قطب‌های روتور بیرونی است.

در شکل ۱-۳، طیف هارمونیک چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی بین حلقه تعدیل‌کننده و

روتور داخلی و روتور بیرونی مربوط به جعبه‌دنده مورد مطالعه نشان داده شده است. قابل مشاهده است،

دامنه‌ی هارمونیک‌ها برابر نبوده و بیشترین میزان دامنه، مربوط به، $m=1$ و $k=-1$ است. میدان

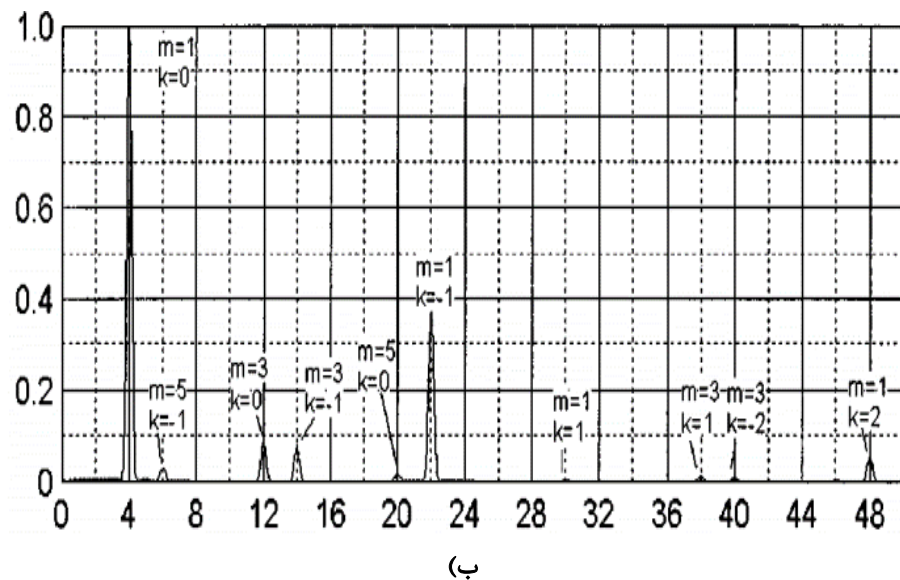
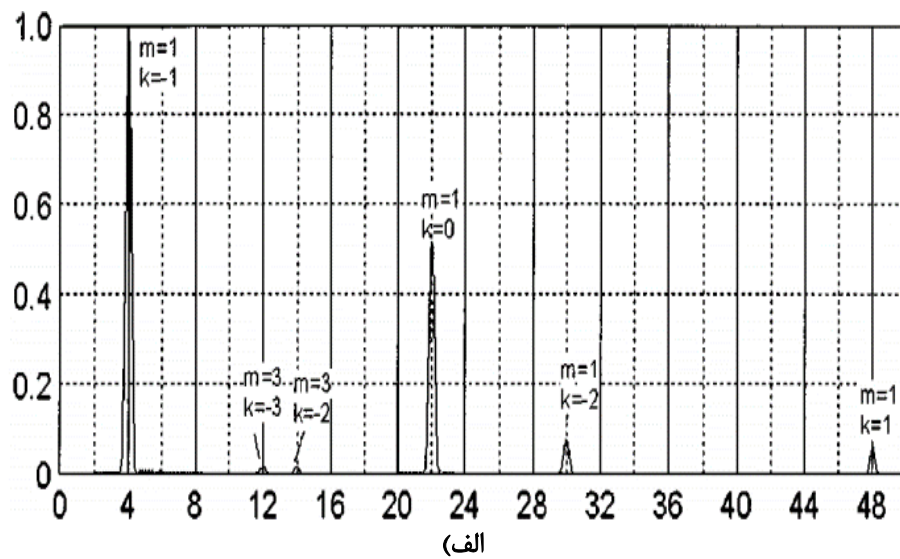
مغناطیسی ایجاد شده توسط روتور داخلی دارای هارمونیک چهارم غالب به دلیل ۴ جفت قطب است.

این میدان توسط ۲۶ قطعه فرومغناطیس حلقه میانی تعدیل می‌شود و منجر به ایجاد میدانی با

هارمونیک ۲۲ غالب می‌شود. این میدان با هارمونیک بیست دوم میدان روتور بیرونی که دارای ۲۲ جفت

قطب است برهمکنش می‌کند، در نتیجه حداکثر گشتاور منتقل می‌شود. حلقه میانی باعث می‌شود

روتورها طوری به نظر برسند که گویا روتور مقابل دارای همان تعداد قطب است.



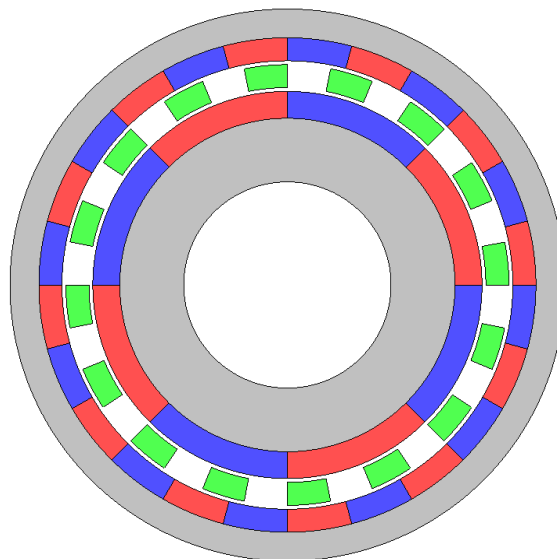
شکل ۳-۱. طیف هارمونیک چگالی شار مغناطیسی شعاعی [۱۷].

الف) در فاصله هوایی بین روتور داخلی و حلقه میانی ب) در فاصله هوایی بین روتور بیرونی و حلقه میانی.

۳-۲-۱ تحلیل جعبه‌دنده مغناطیسی هم‌محور مورد مطالعه

جعبه‌دنده مغناطیسی مورد مطالعه، از نوع هم‌محور است که در شکل ۳-۲ نشان داده شده است. این جعبه‌دنده شامل سه جزء است: روتور داخلی با سرعت بالا، حلقه تعدیل‌کننده میانی و روتور بیرونی با سرعت پایین. مدل ماشین، با استفاده از روش اجزاء محدود در محیط نرم‌افزار JMAG-Designer،

به صورت دوبعدی^۱ و در حالت پایدار^۲، مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در تحلیل حالت پایدار، سرعت دو روتور طبق رابطه (۳-۵) در خلاف جهت یکدیگر، با سرعت ثابت می‌چرخد و حلقه میانی ساکن فرض می‌شود. در این تحلیل، از اثر جریان گردابی در قطب‌های مغناطیس دائم صرف نظر شده است. در حل عددی به روش اجزاء محدود، با ترسیم هندسه ماشین در محیط نرم‌افزار، مدل ماشین به ناحیه‌های کوچک (مش^۳) تقسیم می‌شود. در این حالت برای حل مسئله، معادلات الکترومغناطیسی حاکم بر ماشین، بر روی تمام اجزاء جدا شده اعمال می‌شود. هر مش ایجاد شده، شامل چند گره^۴ است که با پیوستن این گره‌ها به هم، مش تشکیل می‌شود. ابعاد و تعداد مش، بر روی دقت و سرعت حل مسئله تأثیرگذار است. بنابراین قسمت‌هایی که حل آن‌ها نیازمند دقت بیشتری است، به مش‌های کوچک‌تری تقسیم می‌شوند و در نواحی دیگر می‌توان ابعاد مش را بزرگ‌تر فرض کرد تا سرعت تحلیل مسئله مطلوب باشد. پارامترها و ابعاد ماشین در جدول ۳-۱ و جدول ۳-۲. خواص مواد به کاررفته در جعبه‌دنده نشان داده شده است.



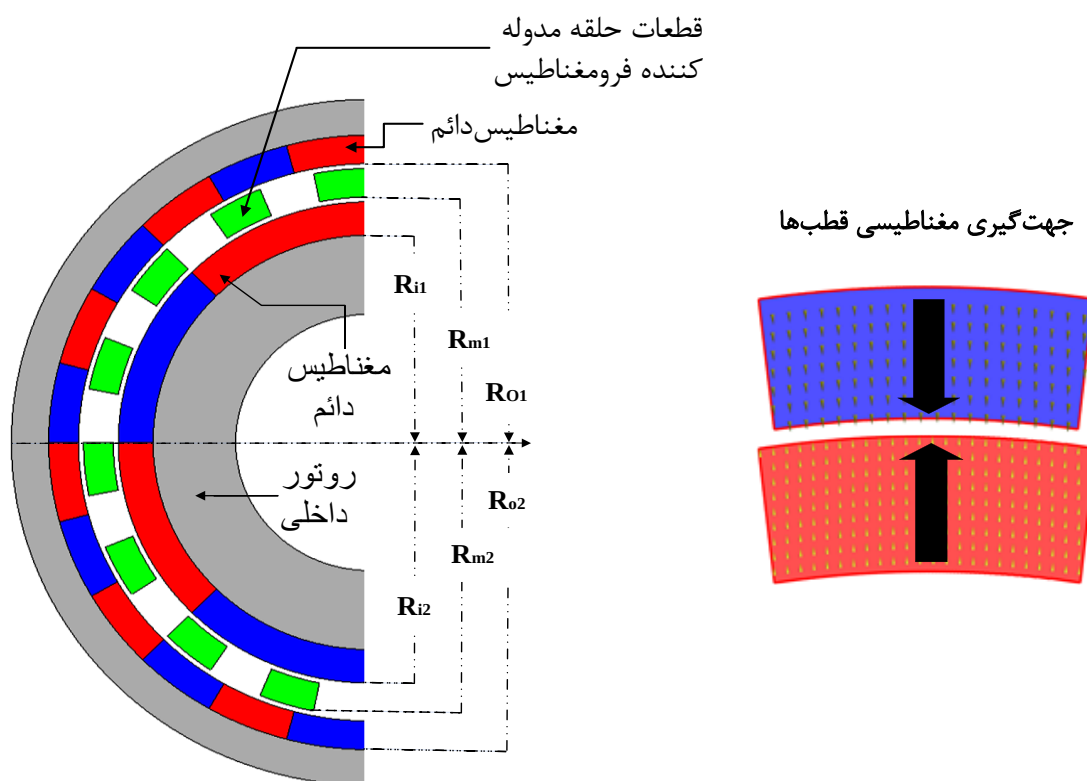
شکل ۳-۲. جعبه‌دنده مغناطیسی پسیو هم‌محور

1 . 2D

3 Mesh

2 Steady State

4 Node



شکل ۳-۳ برش عرضی ماشین و نمایش پارامترهای ابعادی آن

جدول ۳-۱. پارامترهای و ابعاد جعبه‌دنده مغناطیسی

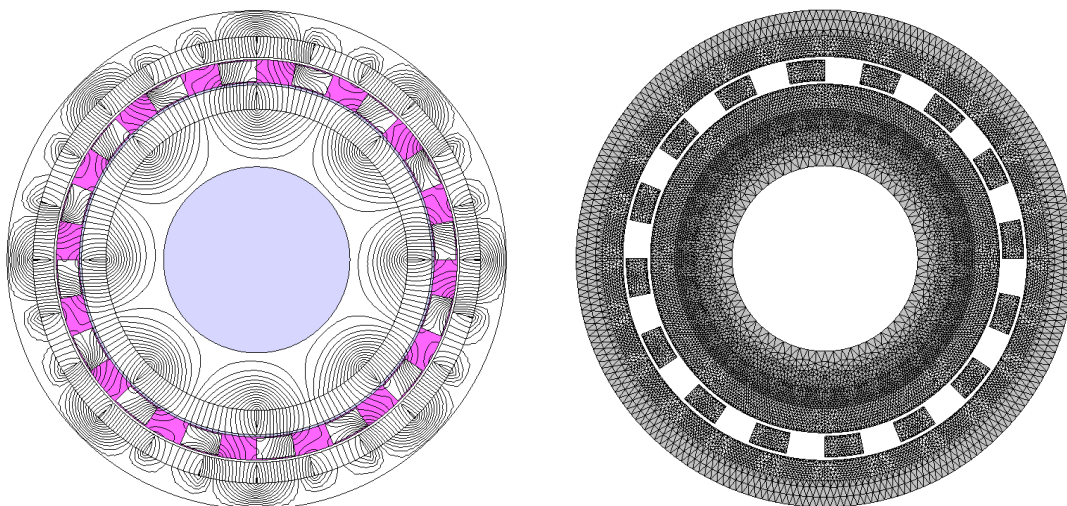
واحد	مقدار	نماد	پارامتر	
-	۴	P_i	جفت قطب	روتور داخلی
mm	۵۰/۵	R_{i2}	شعاع بیرونی قطب	
mm	۴۳/۵	R_{i1}	شعاع داخلی قطب	
-	۱۶	P_m	قطعات تعدیل کننده	حلقه میانی
mm	۵۷/۵	R_{m2}	شعاع بیرونی قطعات	
mm	۵۱/۵	R_{m1}	شعاع داخلی قطعات	
-	۱۲	P_o	جفت قطب	روتور بیرونی
mm	۶۴/۵	R_{o2}	شعاع بیرونی قطب	
mm	۵۸/۵	R_{o1}	شعاع داخلی قطب	
mm	۰/۵	R_{Air}	روتور داخلی و بیرونی	فاصله هوایی
mm	۵۰	L	عمق ماشین	

جدول ۲-۳. خواص مواد به‌کاررفته در جعبه‌دنده

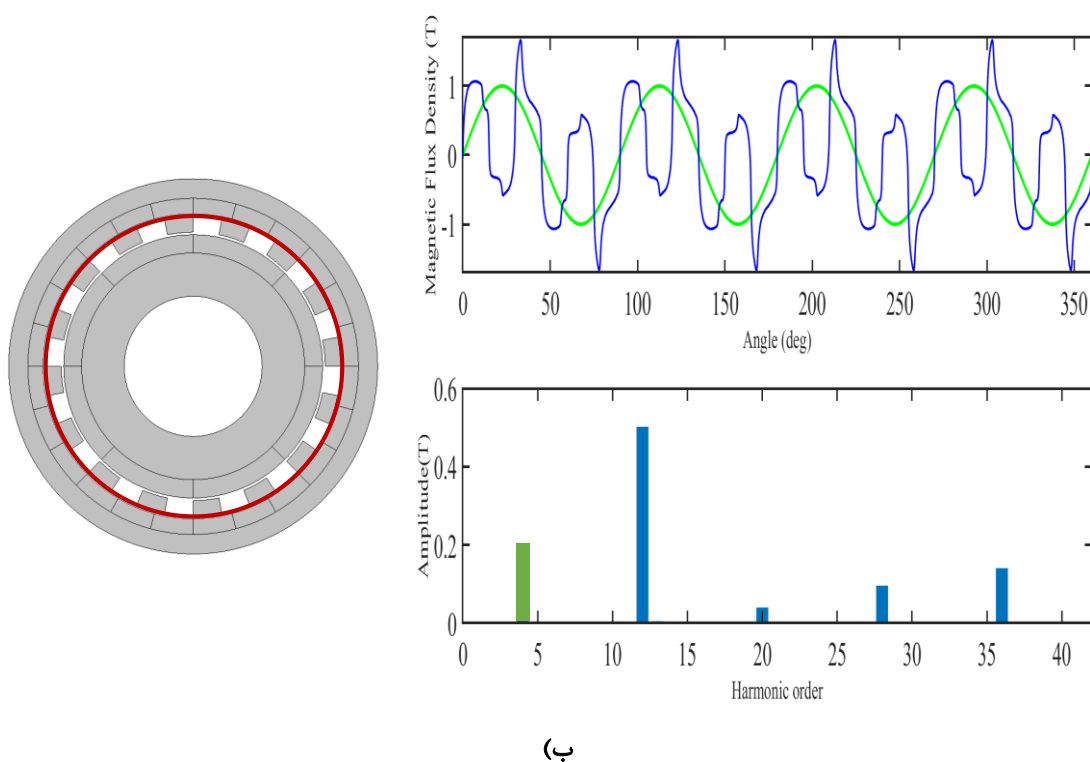
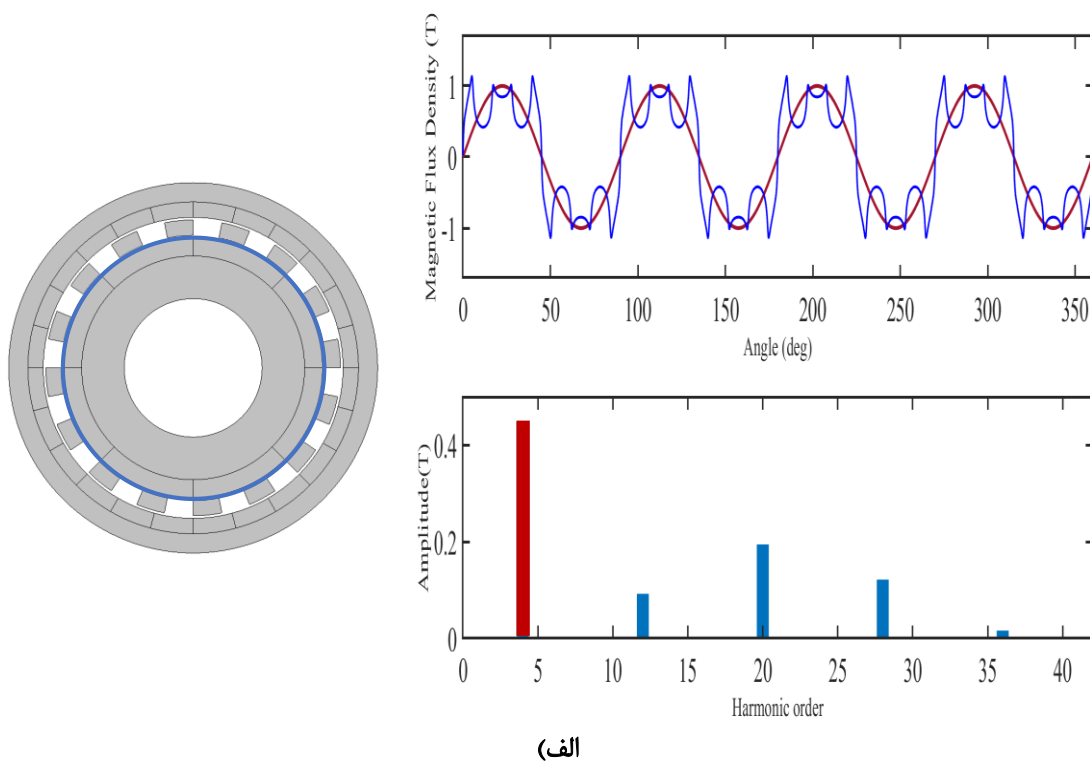
ماده	
NdFeB_Br 1.2(T)	قطب‌های روتور داخلی و بیرونی
JFE Steel 50JN1300	قطعات تعدیل‌کننده

۲-۲-۳ عوامل تأثیرگذار بر روی عملکرد جعبه‌دنده مغناطیسی هم‌محور

در تجزیه و تحلیل الکترومغناطیسی گذرا^۱، می‌توان نتایج میدان‌های مغناطیسی^۲، نیرو و گشتاور الکترومغناطیسی ایجاد شده بر روی روتورها، همراه با تلفات جریان گردابی و هیستریزیس را ارائه داد. شکل ۳-۴ مش‌بندی جزءهای مختلف جعبه‌دنده، همچنین توزیع شار مغناطیسی را نشان می‌دهد. چگالی شار مغناطیسی و هارمونیک فضایی^۳ متناظر ایجاد شده در فاصله هوایی بین حلقه تعدیل‌کننده با روتور داخلی و بیرونی، در شکل ۳-۵ نشان داده شده است. بیشترین دامنه، مربوط به هارمونیک‌های مرتبه چهار و دوازده است، که به ترتیب برابر با تعداد جفت قطب‌های روتور داخلی و خارجی هستند. علاوه بر این، نسبت‌دنده ماشین را می‌توان از روی دامنه هارمونیک‌های اصلی به دست آورد.

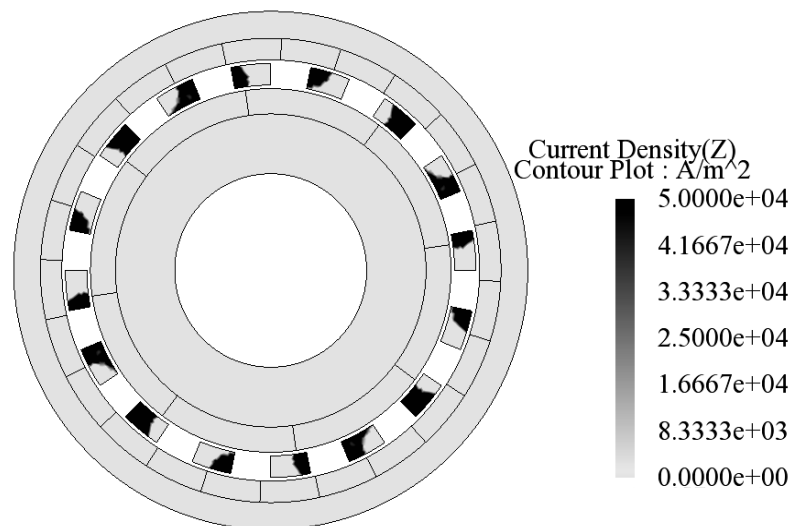


شکل ۳-۴. مش‌بندی و توزیع شار جعبه‌دنده مغناطیسی مورد مطالعه

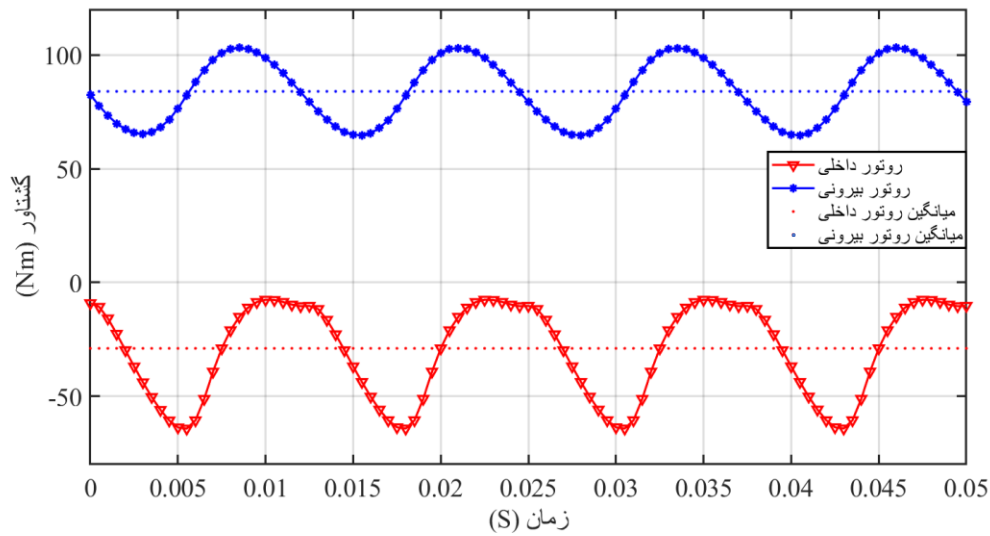


شکل ۳-۵. نمودار و طیف هارمونیک چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی در راستای محور (r).
(الف) فاصله هوایی روتور داخلی (ب) فاصله هوایی روتور بیرونی

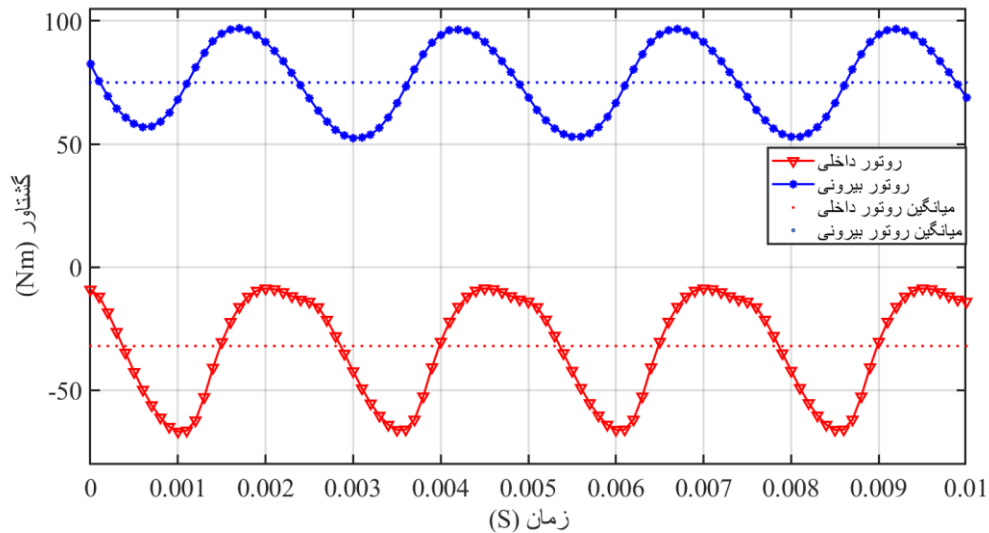
در شکل ۳-۶ چگالی جریان^۱ فوکو در حلقه تعدیل‌کننده نشان داده شده است. جریان از هر قطعه در حلقه تعدیل‌کننده جعبه‌دنده مغناطیسی، به صورت مجزا وارد و خارج می‌شود. در شکل ۳-۷، نمودار گشتاور جعبه‌دنده نشان داده شده است. میانگین گشتاور ایجاد شده در روتور داخلی و خارجی به ترتیب برابر با ۲۹ - و ۸۶ نیوتن متر در سرعت ۳۰۰ و ۱۰۰ دور بر دقیقه (rpm) است. برای محاسبه گشتاور در این حالت، از اثر تلفات آهن در قطعات تعدیل‌کننده، صرف‌نظر شده است و محاسبات جعبه‌دنده در حالت مطلوب انجام می‌شود. همچنین، با توجه به تحلیل هارمونیکي ارائه‌شده، سطح گشتاور دو روتور، از نسبت‌دنده سه تبعیت می‌کند. با در نظر گرفتن تلفات آهن^۲ در حالت قبل، گشتاور ۱/۸۷ درصد کاهش می‌یابد. با افزایش سرعت روتورها، تغییرات گشتاور قابل‌انتظار است. برای این منظور، سرعت روتور بیرونی به ۵۰۰ دور بر دقیقه افزایش داده می‌شود. در این صورت، روتور داخلی طبق نسبت‌دنده ۳، ۱۵۰۰ دور بر دقیقه می‌چرخد. میانگین گشتاور محاسبه‌شده در روتور داخلی ۳۲- نیوتن متر و روتور خارجی ۷۵ نیوتن متر است. در شکل ۳-۸ سطح گشتاور جعبه‌دنده بعد از افزایش سرعت نشان داده شده است. دلیل کاهش سطح گشتاور بعد از افزایش سرعت، تلفات ایجاد شده در حلقه تعدیل‌کننده است.



شکل ۳-۶. چگالی جریان فوکو در حلقه تعدیل‌کننده.



شکل ۳-۷. گشتاور در حالت مطلوب

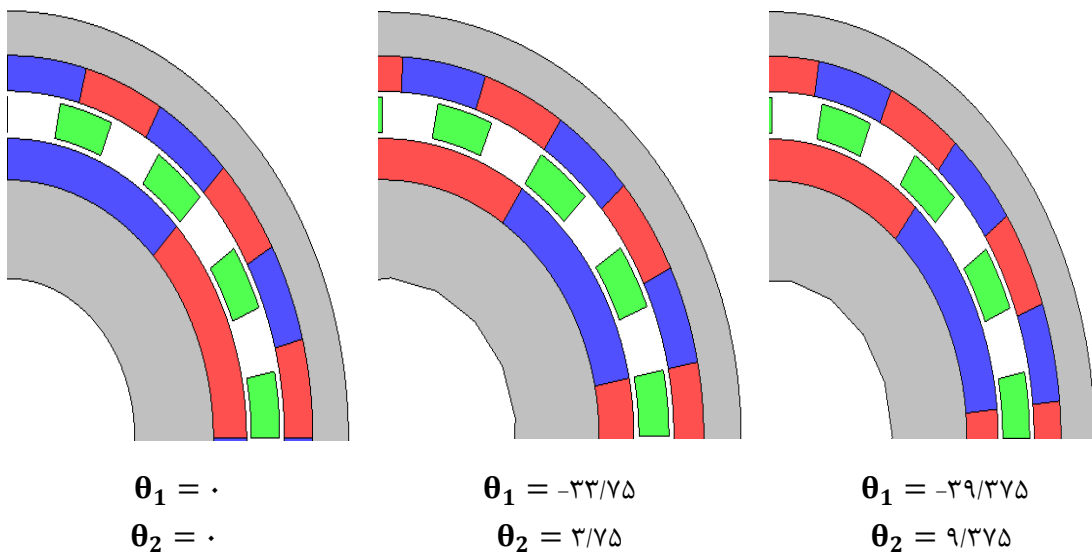


شکل ۳-۸. گشتاور در سرعت ۵۰۰ rpm روتور بیرونی

۳-۲-۳ زاویه بار^۱ جعبه‌دنده مغناطیسی

هنگامی که به روتور ماشین سنکرون، بار متصل می‌شود، سرعت موتور برای مدت کوتاهی کاهش پیدا می‌کند. به عبارت دیگر، میدان روتور و استاتور در یک راستا قرار نمی‌گیرند و بین دو میدان اختلاف زاویه ایجاد می‌شود. در صورت افزایش بار در ماشین سنکرون، اختلاف زاویه بار تا 90° ، افزایش می‌یابد. ماندگاری این اختلاف زاویه، باعث خروج موتور از حالت سنکرون خواهد شد [۴۲]. در جعبه‌دنده

مغناطیسی نیز، این زاویه وجود دارد و باید در حالت پایدار، به‌عنوان زاویه اولیه در نظر گرفته شود تا میدان ایجاد شده توسط دو روتور با یکدیگر کوپل شوند. در شکل ۳-۹ موقعیت زاویه اولیه آهنرباها نشان داده شده است. θ_1 و θ_2 به ترتیب، موقعیت زاویه‌ای روتور داخلی و بیرونی هستند و حلقه میانی ثابت فرض شده است. با تغییر دو زاویه، حالت کاری جعبه‌دنده مشخص می‌شود. در جدول ۳-۳، حالت‌های کاری جعبه‌دنده در زوایای مختلف آورده شده است.



شکل ۳-۹. زوایای بار در جعبه‌دنده مغناطیسی

جدول ۳-۳. حالت‌های کاری در زوایای مختلف

میانگین گشتاور روتور بیرونی	میانگین گشتاور روتور داخلی	θ_1	
		θ_2	
۸۵/۷۸	-۲۸/۳	۰	بار کامل
		۰	
۰/۳۷	-۰/۴۶	-۳۹/۳۷۵	بی‌باری
		۹/۳۷۵	
۲۹/۲	-۸۶/۸	-۳۳/۷۵	بار کامل
		۳/۷۵	

۳-۲-۴ محاسبه تلفات و راندمان در جعبه‌دنده مغناطیسی مورد مطالعه

جعبه‌دنده مغناطیسی هم‌محور به دلیل تلفات به وجود آمده در حلقه تعدیل‌کننده، با افزایش سرعت

دچار افت سطح گشتاور خواهد شد. با کاهش سطح گشتاور راندمان ماشین تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. در جعبه‌دنده مغناطیسی، میدان مغناطیسی متغیر توسط آهنرباها در حلقه تعدیل‌کننده جاری می‌شود و ایجاد تلفات می‌کند. تلفات به وجود آمده در ماشین شامل: تلفات جریان گردابی^۱ و تلفات هیستریزیس^۲ است.

۳-۲-۴-۱ تلفات حلقه تعدیل‌کننده

۱. تلفات جریان گردابی

بر اساس قانون فارادی، میدان‌های متغیر ایجاد شده در حلقه تعدیل‌کننده، باعث ایجاد جریان‌هایی در حلقه خواهد شد. میدان ناشی از این جریان با جهت میدان اولیه حلقه تعدیل‌کننده مخالف است و توان ناشی از آن به صورت حرارت در حلقه تلف می‌شود. این تلفات به تلفات جریان گردابی مشهور هستند و به جنس هسته که جریان گردابی در آن جاری می‌شود وابسته است. مواد به کاررفته در حلقه تعدیل‌کننده از فولاد 50JN1300 است. بعلاوه، تلفات در حلقه تعدیل‌کننده به چگالی شار و فرکانس‌های تغییر شار نیز وابسته است که در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است. همچنین بر اساس [۴۳] تلفات جریان گردابی در هسته متناسب با توان دوم ضخامت هسته است. بنابراین، یکی از راه‌های کاهش جریان گردابی، موری^۳ کردن هسته بجای یکپارچه ساختن آن است.

۲. تلفات هیستریزیس

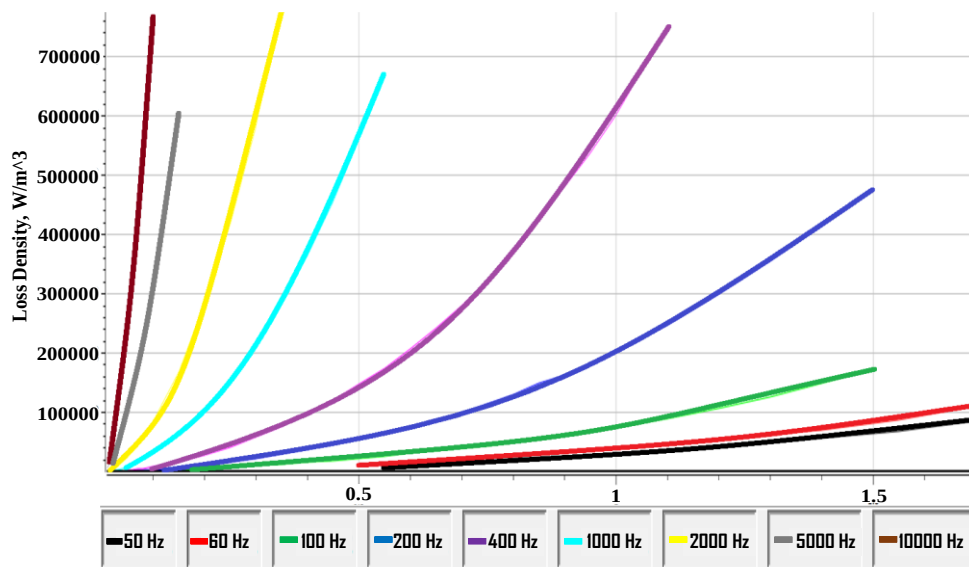
تلفات هیستریزیس به تعریف حلقه پسماند در مواد برمیگردد. قطعات فرومغناطیس، دارای حوزه میدان مغناطیسی با جهت‌های تصادفی هستند. با اعمال جریان متناوب خارجی به یک هسته، حوزه‌های مغناطیسی تمایل دارند با میدان خارجی هم جهت شوند با افزایش میدان خارجی تمام اتم‌های موجود در هسته تغییر جهت می‌دهند و با میدان خارجی کاملاً هم راستا میشوند و شار مغناطیسی در هسته افزایش پیدا میکند و دیگر با افزایش میدان خارجی تقویت بیشتر میدان وجود نخواهد داشت و آهن از

1 Eddy Current Loss

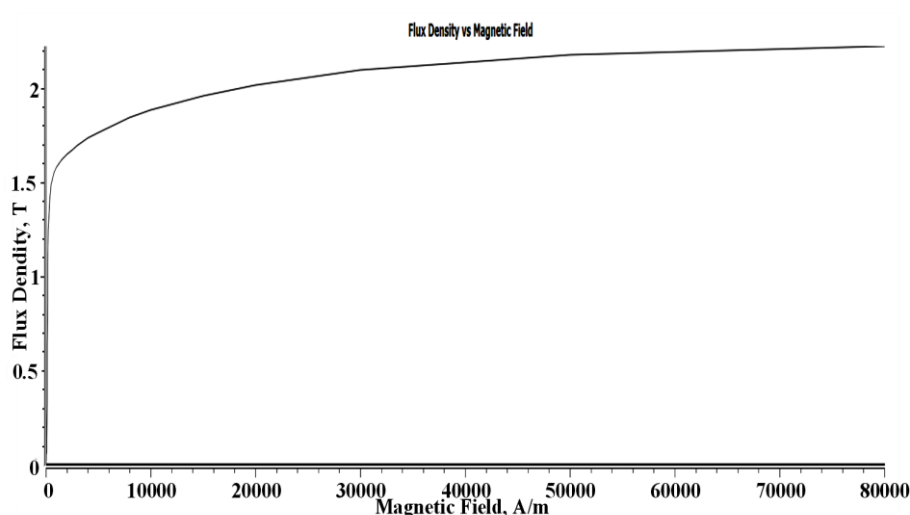
2 Hysteresis Losses

3 Lamination

شار اشباع می‌شود. برای بازگشت حوزه‌ها به حالت اول نیاز است یک میدان خارجی در خلاف جهت میدان موجود در حوزه اعمال شود. انرژی لازم برای بازگشت حوزه به حالت تصادفی به انرژی اتلافی یا تلفات هیستریزیس معروف است [۴۲]. در شکل ۳-۱۱، منحنی مغناطیس شونده (B-H) مواد به کاررفته در حلقه تعدیل‌کننده (50JN1300) نشان داده شده است. ناحیه اشباع در این مواد حدود ۱/۵ تسلا است.



شکل ۳-۱۰. منحنی تلفات هسته برحسب چگالی شار و فرکانس

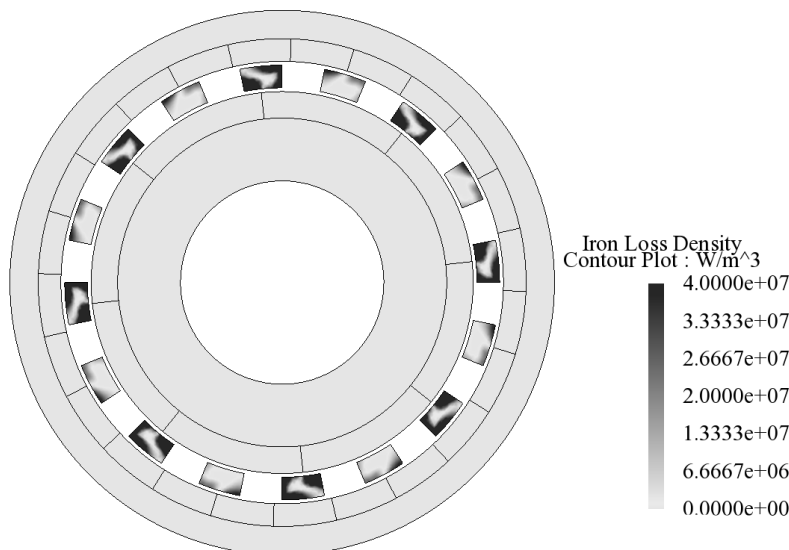


شکل ۳-۱۱. منحنی مغناطیس شونده مواد JFE Steel 50JN1300

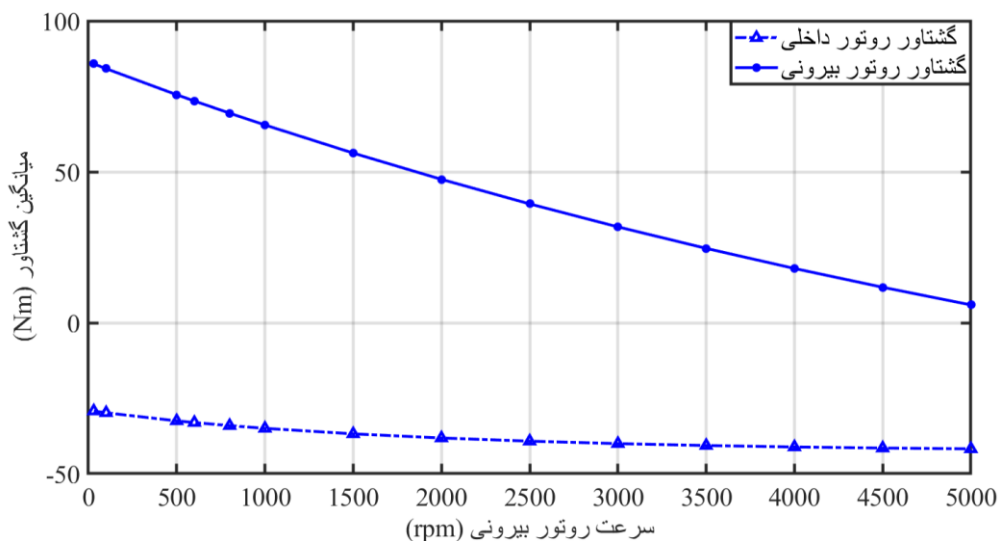
۳-۲-۴ محاسبه تلفات و راندمان

در بخش قبل، تعاریف اولیه تلفات و دلایل ایجاد تلفات در حلقه تعدیل‌کننده ارائه شدند. هدف این

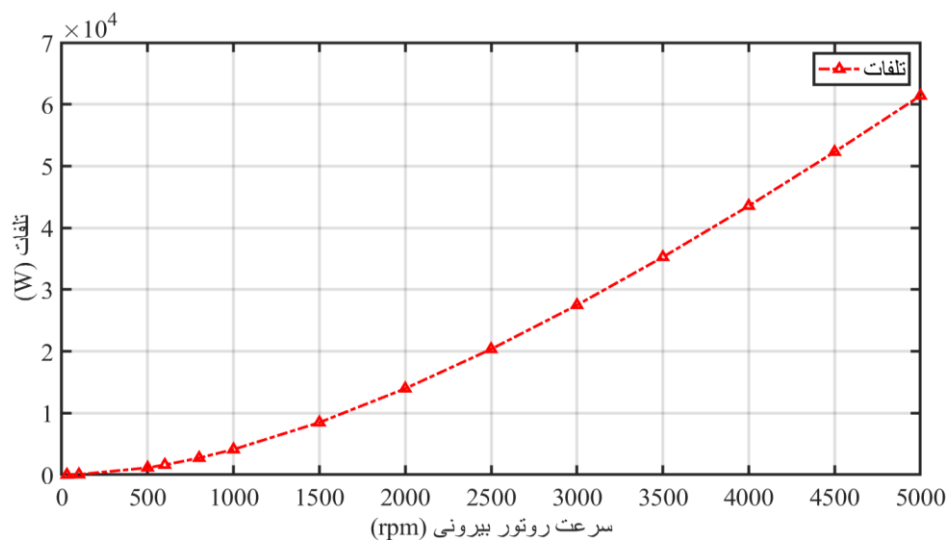
بخش، محاسبه تلفات با توجه به تعاریف بخش قبل و راندها جعبه‌دنده است. میانگین تلفات جریان گردابی و هیستریزیس محاسبه‌شده در سرعت ۵۰۰ دور بر دقیقه روتور بیرونی و ۱۵۰۰ دور بر دقیقه روتور داخلی به ترتیب ۱۱۲۱ وات و ۲۳ وات هستند. همچنین، در شکل ۳-۱۲ چگالی تلفات آهن نشان داده شده است. برای بررسی تأثیر فرکانس بر سطح گشتاور، باید مسئله را در سرعت‌های بالا بررسی کرد. میانگین گشتاور در دو روتور و تلفات حلقه تعدیل‌کننده در شکل ۳-۱۳ و شکل ۳-۱۴ نشان داده شده است. تلفات در حلقه تعدیل‌کننده تأثیر زیادی بر عملکرد جعبه‌دنده خواهد گذاشت و نسبت گشتاورها در سرعت‌های بالا از نسبت تبدیل دنده پیروی نمی‌کنند.



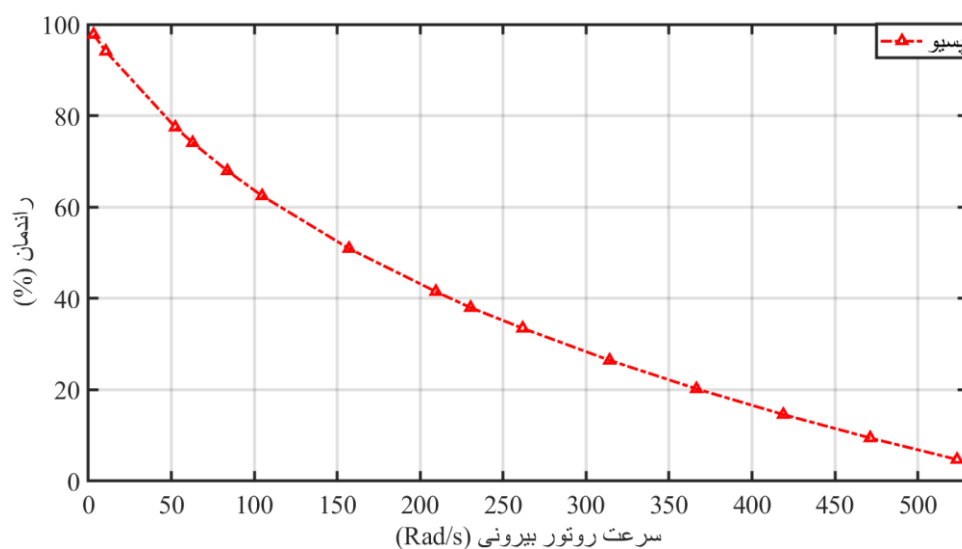
شکل ۳-۱۲. تلفات آهن ایجاد شده توسط جریان گردابی.



شکل ۳-۱۳. میانگین گشتاور در سرعت‌های مختلف



شکل ۳-۱۴. میانگین تلفات کل حلقه تعدیل‌کننده در سرعت‌های مختلف



شکل ۳-۱۵. راندمان جعبه‌دنده در سرعت‌های مختلف

در شکل ۳-۱۵، راندمان دنده مغناطیسی هم‌محور برای سرعت‌های زیاد را نشان می‌دهد. با استفاده از روابط زیر راندمان (η) جعبه‌دنده را می‌توان به دست آورد.

$$P_{in} = N_{in_rotor} * T_{in-rotor} \quad (3-10)$$

در رابطه (۳-۱۰)، P_{in} توان ورودی جعبه‌دنده، N_{in_rotor} و $T_{in-rotor}$ به ترتیب سرعت چرخش و میانگین گشتاور روتور داخلی است.

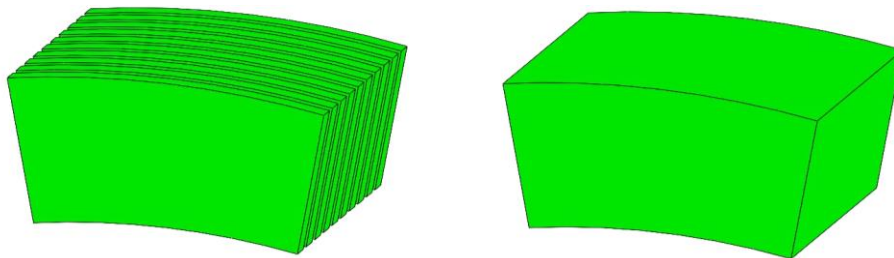
$$P_{out} = N_{out_rotor} * T_{out-rotor} \quad (3-11)$$

در رابطه (۳-۱۱)، P_{out} توان خروجی جعبه‌دنده، N_{out_rotor} و $T_{out-rotor}$ به ترتیب سرعت چرخش و

میانگین گشتاور روتور بیرونی است.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (12-3)$$

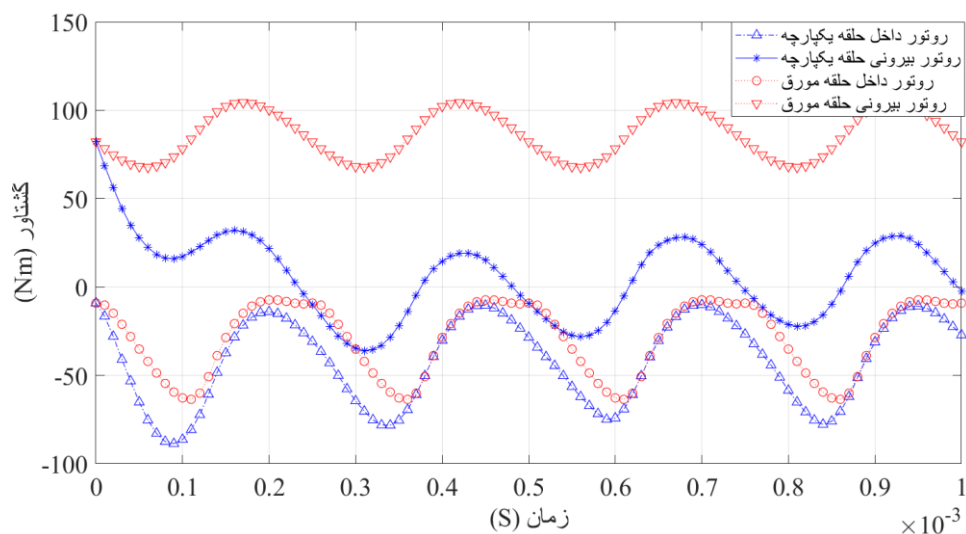
همانطوری که بیان شد، تحلیل در حالت پایدار صورت گرفته است. بنابراین، در روابط بالا توان ورودی (P_{in}) برای روتوری در نظر گرفته شده است که توان بیشتری، از حاصل ضرب میانگین گشتاور در سرعت چرخش روتور حاصل می‌شود. در شکل ۳-۱۵ قابل مشاهده است، با افزایش سرعت راندمان به شدت افت خواهد کرد. افزایش تلفات در حلقه تعدیل‌کننده، به دلیل خاصیت مغناطیسی مواد و ساختار یکپارچه قطعات حلقه تعدیل‌کننده است. برای کاهش تلفات حلقه تعدیل‌کننده می‌توان قطعات را به صورت مورق ساخت یا موادی به کار گرفته شود که مقاومت الکتریکی بالاتری داشته باشد. برای کاهش تلفات، قطعات حلقه تعدیل‌کننده به صورت مورق شده در نظر گرفته خواهد شد (شکل ۳-۱۶). برای بالا بردن دقت شبیه‌سازی باید مش در هر لایه به گونه‌ای تنظیم شود که مسیر رفت و برگشت جریان فراهم باشد. با در نظر گرفتن این شرایط اندازه مش آن قدر کوچک خواهد شد که نرم‌افزار به راحتی قابل به حل مسئله نیست و زمان خیلی زیادی را برای حل مسئله صرف می‌کند. برای حل این مشکل می‌توان ضریب مقاومت الکتریکی ماده را تغییر داد. به طور کلی تلفات جریان گردابی برای هر ماده با مقاومت الکتریکی نسبت عکس دارد. با تغییر مقدار مقاومت الکتریکی، قطعات حلقه تعدیل‌کننده یکپارچه^۱ به صورت قطعات مورق شده به نظر می‌رسد.



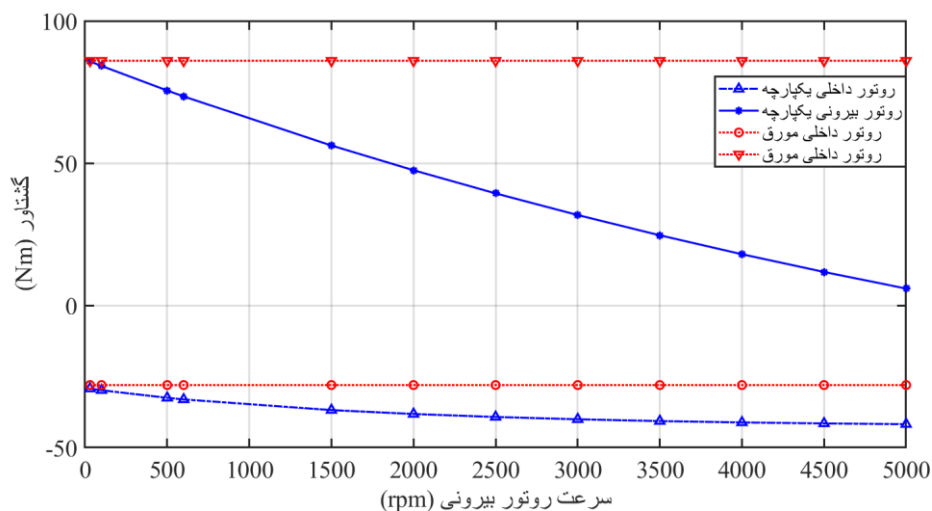
شکل ۳-۱۶. قطعات تعدیل‌کننده یکپارچه و مورق شده

¹ Solid

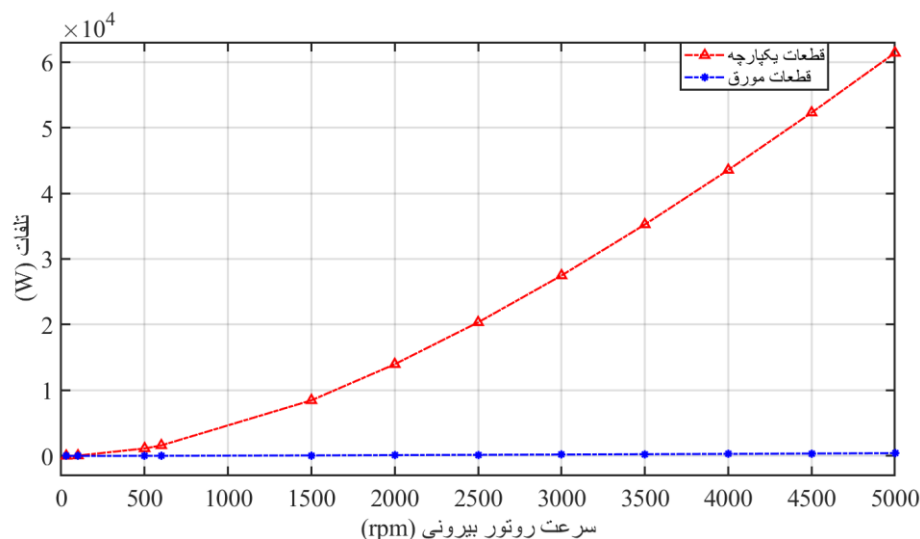
از نظر تئوری [۴۳]، اگر سطح مقطع ماده مغناطیسی نصف شود، تلفات به $\frac{1}{4}$ کاهش می‌یابد. اما جریان گردابی در مدلی با ابعاد و مقطع بزرگ‌تر تمایل دارد در قسمت بیرونی مقطع متمرکز شود، زیرا چگالی جریان در قسمت مرکزی ناهموار است و جریان گردابی در آن نقطه کم است و دقیقاً تلفات به میزان $\frac{1}{4}$ کاهش نمی‌یابد. مقدار مقاومت ویژه الکتریکی مواد استفاده‌شده در حلقه تعدیل‌کننده 1.5×10^{-7} است. با تغییر این مقدار می‌توان جریان عبوری از حلقه تعدیل‌کننده را کمتر نمود تا تلفات در این قسمت کاهش یابد. با در نظر گرفتن این شرایط میانگین سطح گشتاور در سرعت ۵۰۰۰ دور بر دقیقه روتور داخلی و ۱۵۰۰ دور بر دقیقه روتور خارجی به ترتیب ۲۹- و ۸۶ نیوتن متر، میانگین تلفات کل به ترتیب ۴۱۳ وات محاسبه شد. طبق رابطه (۳-۱۲)، راندمان محاسبه‌شده ۹۸ درصد است. همچنین، در شکل ۳-۱۷، سطح گشتاور دو ساختار مورق و یکپارچه حلقه تعدیل‌کننده قابل‌مشاهده است. با مورق کردن حلقه تعدیل‌کننده، نتایج بسیار خوبی از عملکرد جعبه‌دنده مغناطیسی به دست آمد که در شکل ۳-۱۹ و شکل ۳-۱۸ نشان داده‌شده است. اما، مشکل اساسی در ساخت این مدل است، زیرا از نظر مکانیکی کنار هم قرار دادن قطعات مورق شده با ابعاد کوچک بسیار مشکل است و استحکام مکانیکی بسیار کمی خواهد داشت.



شکل ۳-۱۷. گشتاور حلقه یکپارچه و مورق



شکل ۳-۱۸. میانگین گشتاور قطعات تعدیل‌کننده مورق و یکپارچه در سرعت‌های مختلف



شکل ۳-۱۹. میانگین تلفات قطعات تعدیل‌کننده مورق و یکپارچه در سرعت‌های مختلف

۳-۳ جمع‌بندی

با توجه به مزایای زیاد جعبه‌دنده مغناطیسی پسیو هم‌محور، در این فصل ابتدا، اصول عملکرد این جعبه‌دنده بیان شد. سپس برای تحلیل این ساختار با هدف اطمینان از عملکرد جعبه‌دنده در سرعت‌های بالا، با استفاده از نرم‌افزار المان محدود به صورت دو بعدی، نتایج گشتاور، تلفات و راندمان مورد بررسی قرار گرفت تا محدودیت‌های احتمالی مشخص شود. نتایج نشان می‌داد که این ساختار در سرعت‌های بالا عملکرد خود را از دست خواهد داد و چگالی گشتاور به دلیل تلفات ایجاد شده در حلقه میانی کاهش می‌یابد.

فصل ۴ : بررسی و تحلیل ساختار جعبه دنده

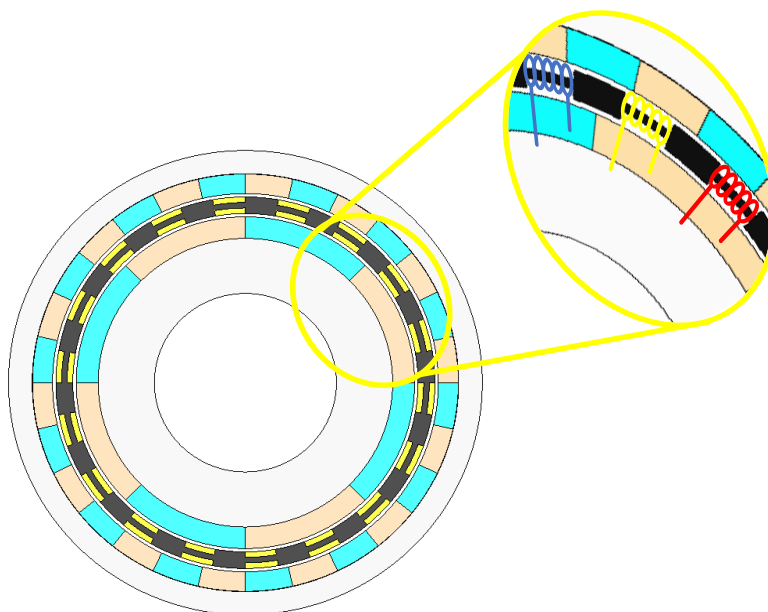
معناطیسی اکتیویشنهادی

۴-۱ مقدمه

در فصل دوم، مدل‌های مختلفی از جعبه‌دنده‌های مغناطیسی پسیو و اکتیو معرفی شد که بر روی حلقه تعدیل‌کننده میانی، تمرکز زیادی داشتند. تحقیقات انجام‌شده در پی یکپارچه‌سازی، افزایش استحکام مکانیکی و بهبود چگالی گشتاور بودند که تا حدودی موفق به حل مشکلات و محدودیت‌های ایجاد شده در جعبه‌دنده مغناطیسی اکتیو و پسیو شدند. در فصل سوم، با بررسی جعبه‌دنده مغناطیسی پسیو هم‌محور، یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های ایجاد شده در جعبه‌دنده معرفی شد. در نتیجه در این فصل، به معرفی مدلی جدید از حلقه تعدیل‌کننده میانی در جعبه‌دنده مغناطیسی اکتیو پرداخته خواهد شد که می‌تواند محدودیت‌های به‌وجودآمده در جعبه‌دنده‌های مغناطیسی پسیو را در سرعت‌های بالا، به‌صورت قابل‌توجهی برطرف کند.

۴-۱-۱ جعبه‌دنده مغناطیسی پسیو با پل تعدیل‌کننده یکپارچه:

قطعات تعدیل‌کننده نوع معمول از هسته با جنس فرو مغناطیس یکپارچه یا ورق برای کاهش تلفات هسته تشکیل شده است که جمع‌آوری و کنار هم قرار دادن آن‌ها از نظر مکانیکی کار آسانی نیست و هزینه زیادی در بردارد. در مرجع [۲۵]، مدل‌های مختلفی از پل اتصال‌دهنده بین قطعات تعدیل‌کننده فرو مغناطیس ارائه شد که در شکل ۲-۱۳ نشان داده شده است. در این بخش، یکی از شکل‌های حلقه تعدیل‌کننده میانی به‌هم‌پیوسته موردبررسی قرار می‌گیرد. میدان ایجاد شده توسط آهنرباهای روتور داخلی و بیرونی که ایجاد هارمونیک فضایی می‌کند، توسط رینگ میانی تعدیل می‌شوند، تا دو روتور را کوپل و حداکثر گشتاور را ایجاد کند. همان‌طور که در شکل ۳-۶ مشاهده کردید، قطعات تعدیل‌کننده به‌صورت مجزا عمل می‌کنند. اما، افزودن پل بین قطعات موجود در حلقه میانی برای یکپارچه‌سازی حلقه، باعث اتصال کوتاه شدن قطعات و در نتیجه، کاهش سطح گشتاور می‌شود. در شکل ۴-۱ نمونه‌ای از جعبه‌دنده مغناطیسی با حلقه تعدیل‌کننده یکپارچه به همراه سیم‌پیچ کمکی، مشاهده می‌شود. این



شکل ۴-۱. جعبه‌دنده مغناطیسی با حلقه تعدیل‌کننده یکپارچه به همراه سیم‌پیچ کمکی

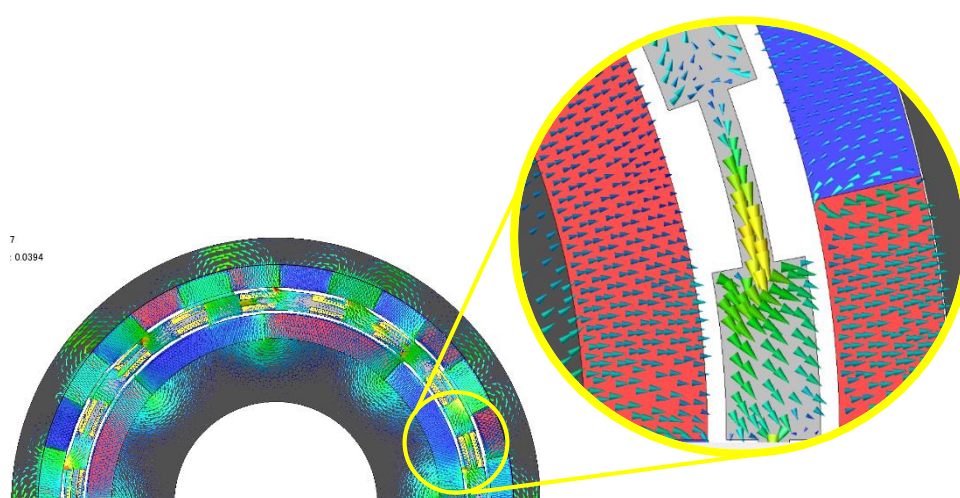
سیم‌پیچ‌ها به صورت متمرکز^۱ به دور پل‌ها پیچیده شده است، تا در مواقع نیاز، با اعمال جریان به سیم‌پیچ‌ها طبق قانون لنز^۲، میدانی در خلاف جهت میدان ایجاد شده توسط آهنرباها، که در پل‌ها جاری شده است تولید می‌کند تا بتواند اثر پل در جعبه‌دنده را خنثی کند و سطح گشتاور را کنترل کند. در حالتی که پل بین قطعات تعدیل‌کننده وجود ندارد سطح گشتاور روی روتور داخلی و بیرونی به ترتیب ۲۳ و ۸۲ نیوتن متر است، با ایجاد پل سطح گشتاور کاهش می‌یابد و مقدار آن به ترتیب ۱۴ و ۵۱ نیوتن متر خواهد شد. با افزایش سیم‌پیچ به پل‌ها می‌توان شار عبوری را کنترل و سطح گشتاور را افزایش داد. در شکل ۴-۲ مسیر عبور شار در پل‌ها قابل مشاهده است. با این روش می‌توان سطح گشتاور جعبه‌دنده را افزایش داد، اما با اضافه شدن تلفات اهمی ایجاد شده توسط سیم‌پیچ‌ها به تلفات هسته، راندمان به شدت کاهش پیدا خواهد کرد. در نتیجه، استفاده از این ساختار در حالت دائم کارآمد نخواهد بود. می‌توان از مدل پیشنهادی برای کنترل زاویه بار به صورت لحظه‌ای استفاده کرد. در جدول ۴-۱ میزان افزایش گشتاور به ازای افزایش جریان نشان داده شده است.

1 Concentrated

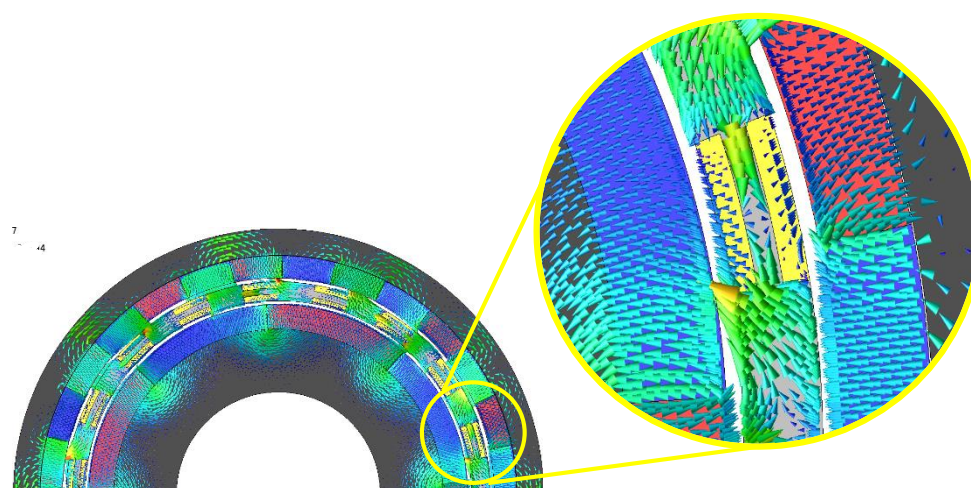
2 Lenz's Law

جدول ۴-۱. میزان افزایش گشتاور به ازای افزایش جریان

میانگین گشتاور روتور بیرونی (Nm)	مقدار افزایش جریان (%)
۵۱	۰
۵۴	۱۰
۸۲	۱۰۰
۱۰۳	۱۵۰



(الف)



(ب)

شکل ۴-۲. شار عبوری از پل در حلقه تعدیل‌کننده.

الف) شار عبوری بدون جریان اعمالی، ب) شار عبوری با افزایش ۱۰۰ درصدی جریان

۴-۲ ایده و طرح جدید پیشنهادی

همان‌طور که قبل از این بیان شد، مطالعات بررسی‌شده تاکنون با هدف بهبود سطح گشتاور جعبه‌دنده انجام شده‌اند. در بخش قبل، مدلی از جعبه‌دنده معرفی شد که توانایی کنترل سطح گشتاور را در مواقع موردنیاز داشت. با این وجود، به دلیل محدودیت‌های مغناطیسی و الکتریکی، با افزایش سطح گشتاور، راندمان ماشین کاهش می‌یابد. برای حل این مشکل مدل جدیدی معرفی خواهد شد که محدودیت‌های مدل‌های قبلی را نداشته باشد. محدودیت‌های ذکر شده در مدل‌های قبل، به دلیل جنس فرو مغناطیس حلقه تعدیل‌کننده آن‌هاست. بنابراین، برای رفع این محدودیت‌ها در مدل پیشنهادی، حلقه تعدیل‌کننده با جنس تفلون^۱ به همراه سیم‌پیچ استفاده خواهد شد. حلقه تعدیل‌کننده جنس تفلون با سیم‌پیچ به عنوان قسمت مجازی ماشین شناخته می‌شود که در ادامه این بخش به تفصیل معرفی خواهد شد.

۴-۲-۱ جعبه‌دنده مغناطیسی اکتیو با حلقه تعدیل‌کننده مجازی^۲

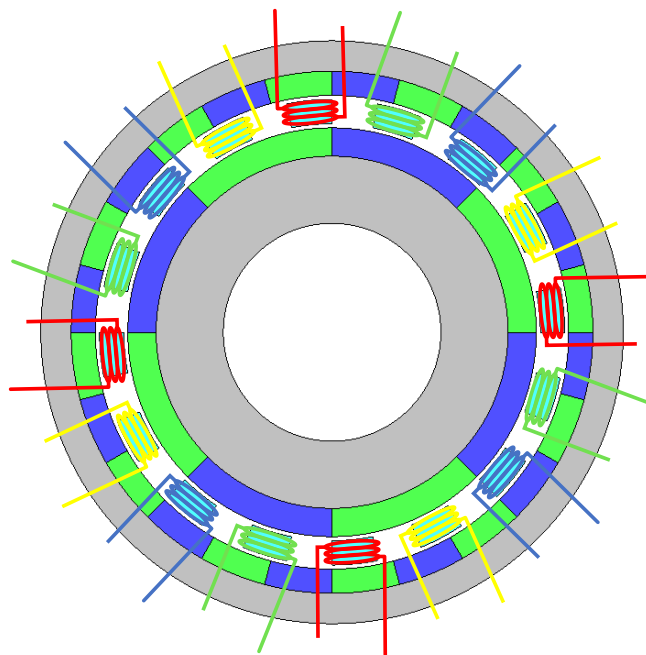
طراحی روتور داخلی و خارجی جعبه‌دنده مغناطیسی با ماشین‌های الکتریکی کلاسیک تفاوتی ندارد. با این وجود پیچیده‌ترین قسمت ماشین، مربوط به حلقه میانی^۳ است، زیرا تنش‌های وارده بر این قسمت باید با دقت در نظر گرفته شود. طراحی بهینه حلقه تعدیل‌کننده به بهبود عملکرد جعبه‌دنده مغناطیسی بسیار کمک می‌کند. چندین روش مختلف برای بهبود عملکرد معرفی شده است که مشکل آن‌ها، عدم تعیین نقطه بهینه است. برای رسیدن به یک مدل بهینه از حلقه تعدیل‌کننده در این دستگاه، باید به چند پارامتر فیزیکی از جمله حرارتی، مغناطیسی و مکانیکی توجه شود. در این بخش از پایان‌نامه مدلی معرفی خواهد شد که تلفات آهن ناشی از حلقه تعدیل‌کننده فرو مغناطیس را به طور کامل از بین می‌برد و افزایش استحکام مکانیکی بهتری را به همراه خواهد داشت. در مدل تعدیل‌کننده به صورت مجازی، با استفاده از تفلون و سیم‌پیچ، می‌تواند نقش قطعات حلقه تعدیل‌کننده را ایفا کند. همچنین، میدان ایجاد

1 Teflon

2 Virtual Moderator Ring

3 Middle Ring

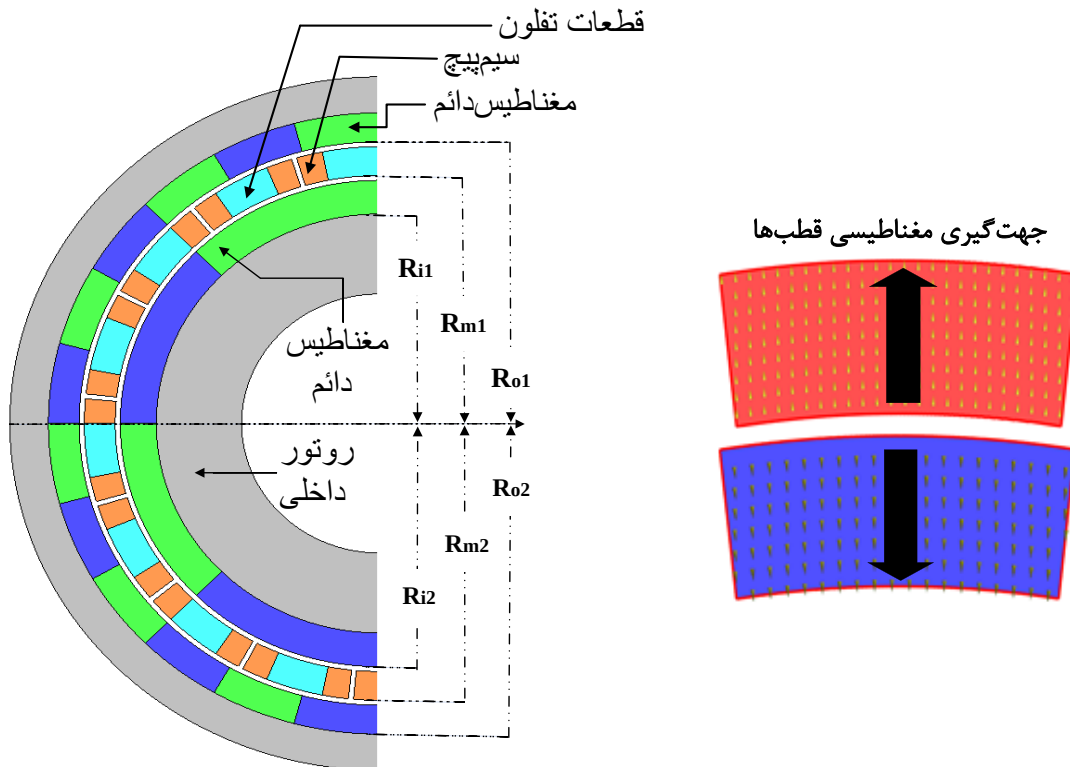
شده توسط قطب‌های دو روتور را تعدیل و مسیر عبور شار را فراهم نمود. این جعبه‌دنده شامل سه جزء روتور بیرونی، حلقه میانی (حلقه تعدیل‌کننده) و روتور داخلی است که در شکل ۳-۴ قابل مشاهده است. روتور بیرونی و داخلی از جفت قطب‌های مغناطیسی تشکیل شده‌اند و حلقه میانی متشکل از قطعه‌های تعدیل‌کننده با جنس تفلون و سیم‌پیچ است. در ادامه با شبیه‌سازی مدل پیشنهادی در محیط FEM به بررسی کامل این ماشین خواهیم پرداخت.



شکل ۳-۴. ساختار جعبه‌دنده مغناطیسی پیشنهادی

۲-۲-۴ بررسی عملکرد حلقه تعدیل‌کننده مجازی در محیط FEM

جعبه‌دنده پیشنهادی، با استفاده از روش اجزاء محدود در محیط نرم‌افزار JMAG-Designer، به صورت دوبعدی و در حالت پایدار، مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در تحلیل حالت پایدار، سرعت دو روتور طبق نسبت‌دنده به صورت ثابت می‌چرخد و حلقه میانی ساکن فرض می‌شود. از اثر جریان گردابی آهنرباهای روتور داخلی و خارجی، در تحلیل المان محدود صرف نظر شده است. مشخصات و پارامترهای ماشین در جدول ۲-۴ و جدول ۳-۴ بیان شده است.



شکل ۴-۴. برش عرضی و نمایش پارامترهای ماشین

جدول ۴-۲. مشخصات و پارامترهای ماشین

واحد	مقدار	نماد	پارامتر	
-	۴	P_i	جفت قطب	روتور داخلی
mm	۵۰/۵	R_{i2}	شعاع بیرونی قطب	
mm	۴۳/۵	R_{i1}	شعاع داخلی قطب	
-	۱۶	P_m	قطعات تعدیل کننده	حلقه میانی
mm	۵۷/۵	R_{m2}	شعاع بیرونی قطعات	
mm	۵۱/۵	R_{m1}	شعاع داخلی قطعات	
-	۱۲	P_o	جفت قطب	روتور بیرونی
mm	۶۴/۵	R_{o2}	شعاع بیرونی قطب	
mm	۵۸/۵	R_{o1}	شعاع داخلی قطب	
mm	۰/۵	R_{Air}	روتور داخلی و بیرونی	فاصله هوایی
mm	۵۰	L	عمق ماشین	

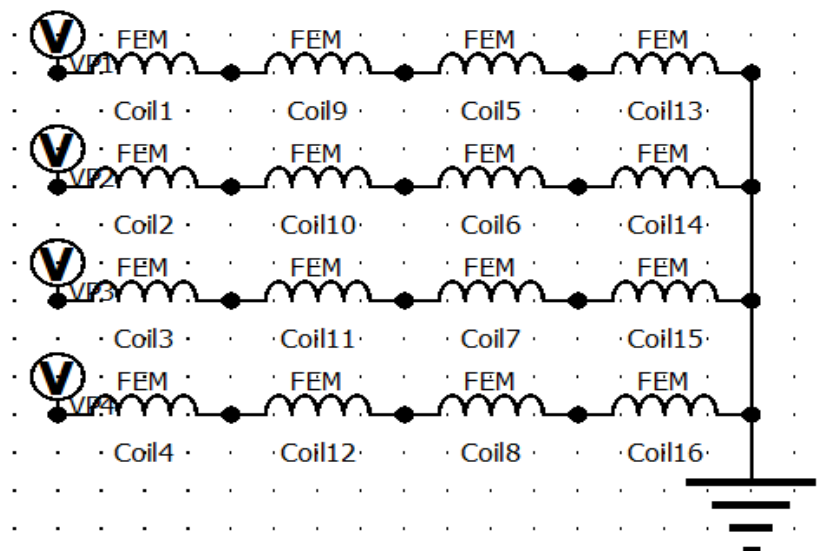
جدول ۳-۴. خواص مواد به‌کاررفته در جعبه‌دنده

ماده	
NdFeB_Br 1.2(T)	روتور داخلی و بیرونی
مس	سیم‌پیچ
پلاستیک	قطعات تعدیل‌کننده

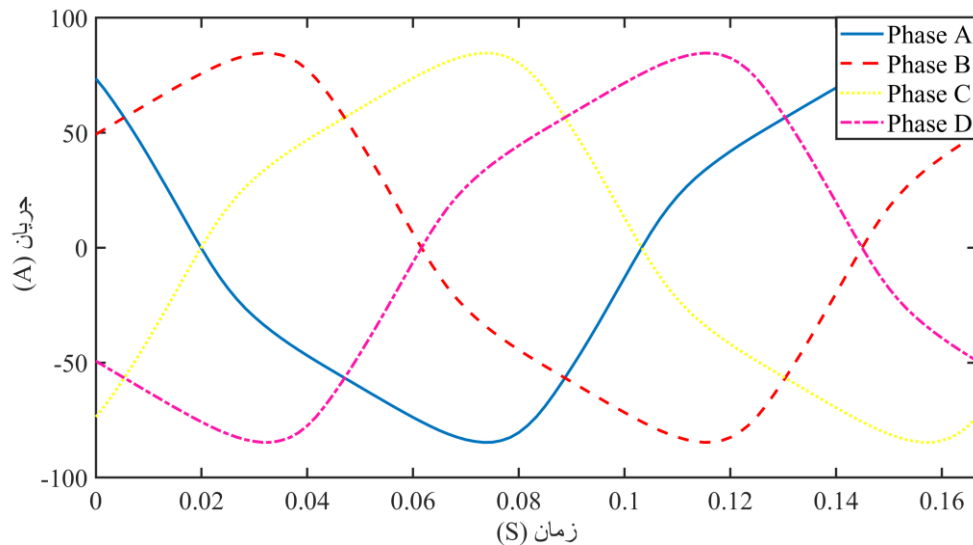
۱-۲-۲-۴ اجرا و تحلیل عملکرد مدل پیشنهادی

شکل موج جریان اعمالی به قطعات تعدیل‌کننده در شکل ۴-۶، نشان داده شده است. شکل موج جریان و شار پیوندی با یکدیگر برابر هستند بنابراین، طبق قانون فارادی، در حالت مدار باز سیم‌پیچ‌ها (شکل ۴-۵) و چرخش دو روتور در حالت پایدار، ولتاژی درون سیم‌پیچ‌ها القا می‌شود که می‌توان با استفاده از رابطه (۴-۱) شار پیوندی را به دست آورد. دامنه جریان (شکل ۴-۶) اعمالی به سیم‌پیچ‌ها به‌اندازه‌ای افزایش داده می‌شود تا چگالی شار مغناطیسی در مرکز قطعات تعدیل‌کننده مجازی برابر با چگالی شار مغناطیسی قطعات فرومغناطیس باشد.

$$\lambda = \int \varepsilon dt \quad (۴-۱)$$

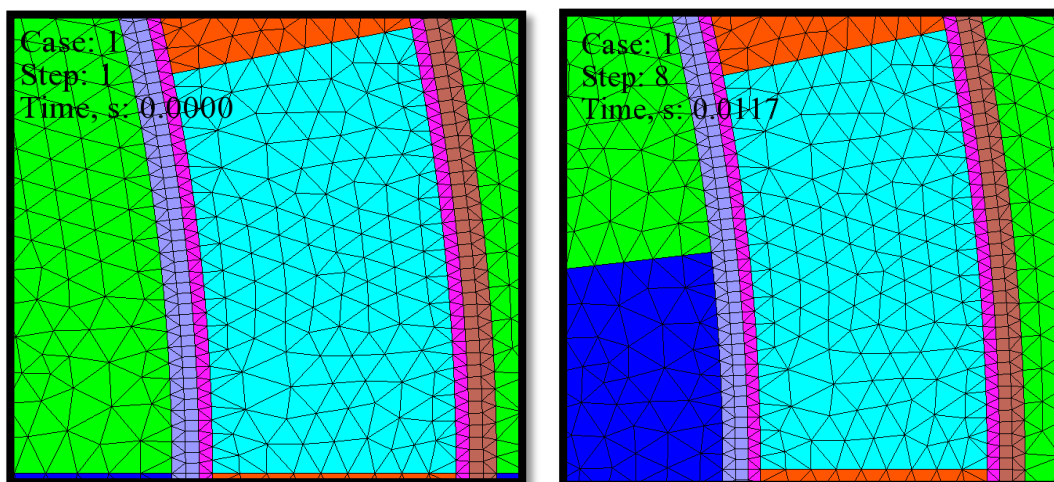


شکل ۴-۵. مدار اعمالی جریان به سیم‌پیچ‌های حلقه میانی

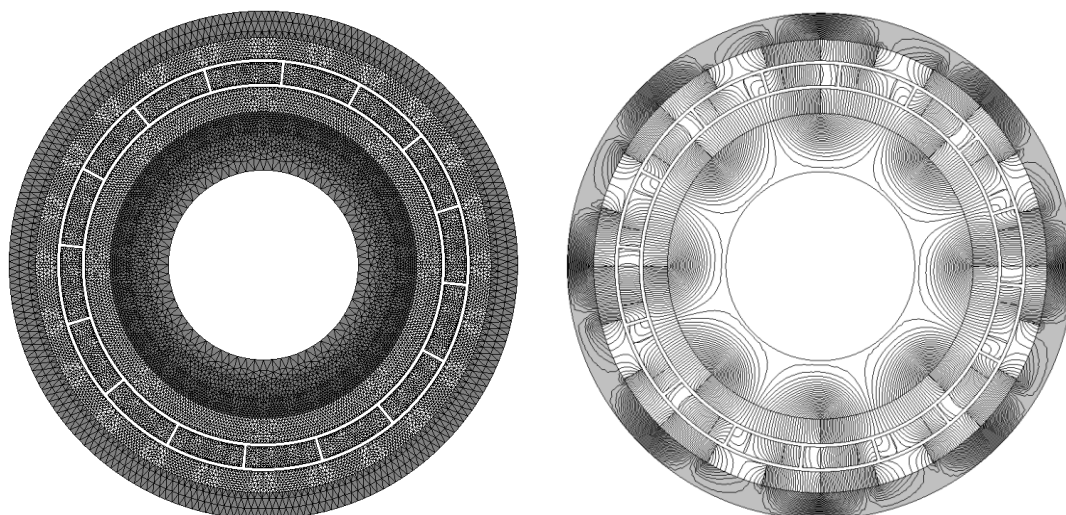


شکل ۴-۶. شکل موج جریان اعمالی به مدار ماشین

در شکل ۴-۸ توزیع شار مغناطیسی و مش‌بندی جزءهای مختلف ماشین مشاهده می‌شود. برای بالا بردن دقت نتایج و کاهش زمان تحلیل، سایز مش‌ها بسیار مهم است. به این منظور اندازه مش‌ها، در قسمت‌های مختلف ماشین متفاوت خواهد بود. همچنین، در شکل ۴-۷ مش در فاصله هوایی مشاهده می‌شود که با چرخش دو روتور باند متحرک تغییر شکل نداده است. با اعمال جریان به سیم‌پیچ‌های ماشین (شکل ۴-۶)، حلقه تعدیل‌کننده مجازی، نقش حلقه تعدیل‌کننده با جنس فرو مغناطیس را به صورت مجازی ایفا می‌کند.

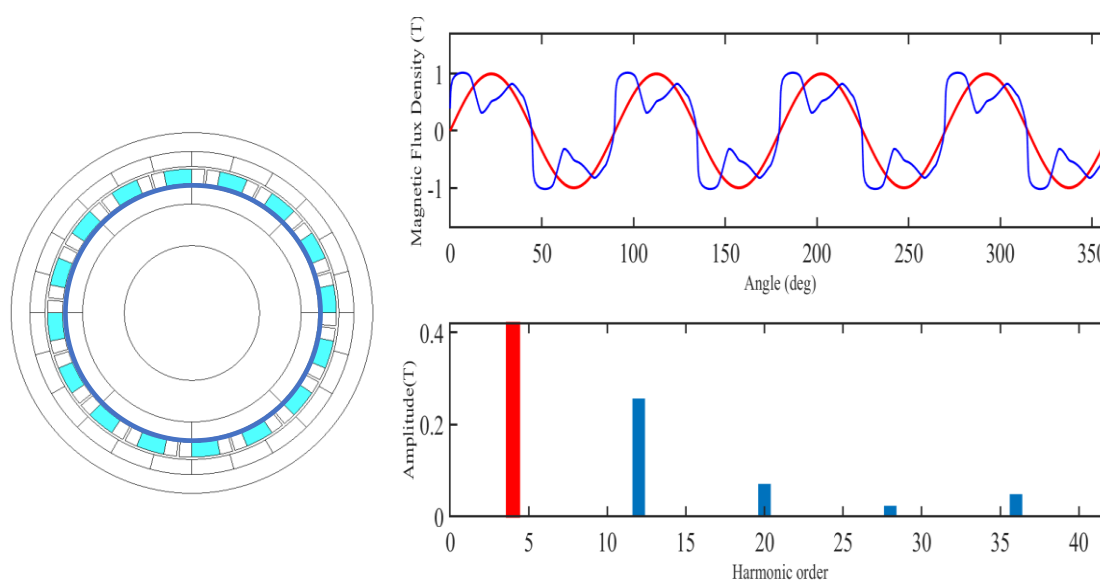


شکل ۴-۷. جزئیات مش در فاصله هوایی بین دو روتور

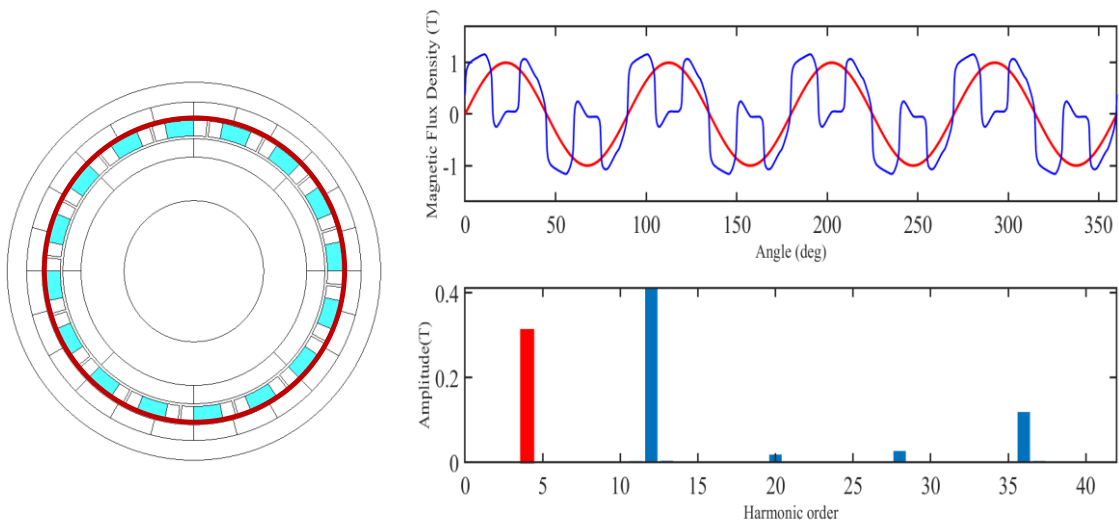


شکل ۴-۸. توزیع شار مغناطیسی و مش‌بندی جزءهای مختلف ماشین

چگالی شار مغناطیسی و هارمونیک فضایی متناظر ایجاد شده در فاصله هوایی دو روتور داخلی و خارجی بین حلقه تعدیل‌کننده در شکل ۴-۹ نشان داده شده است که می‌توان به اطلاعات ساختاری جعبه‌دنده دست پیدا کرد. قابل‌مشاهده است، هارمونیک‌های اصلی، ۴ و ۱۲ هستند که برابر با تعداد جفت قطب‌های روتور داخلی و خارجی می‌باشند. علاوه بر این می‌توان از روی دامنه هارمونیک‌های اصلی نسبت‌دنده ماشین را، به دست آورد. همچنین، در شکل ۴-۱۰، نقشه توزیع چگالی شار مغناطیسی در تمام نواحی ماشین را می‌توان مشاهده کرد.

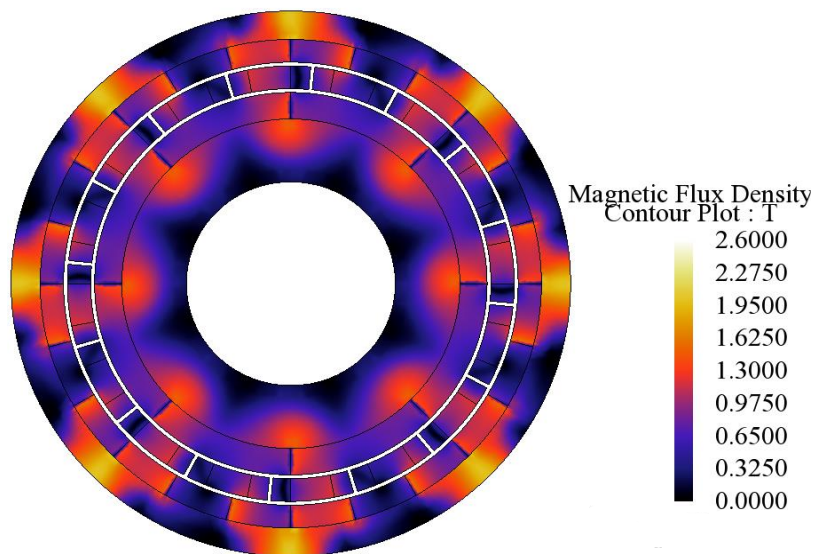


(الف)



(ب)

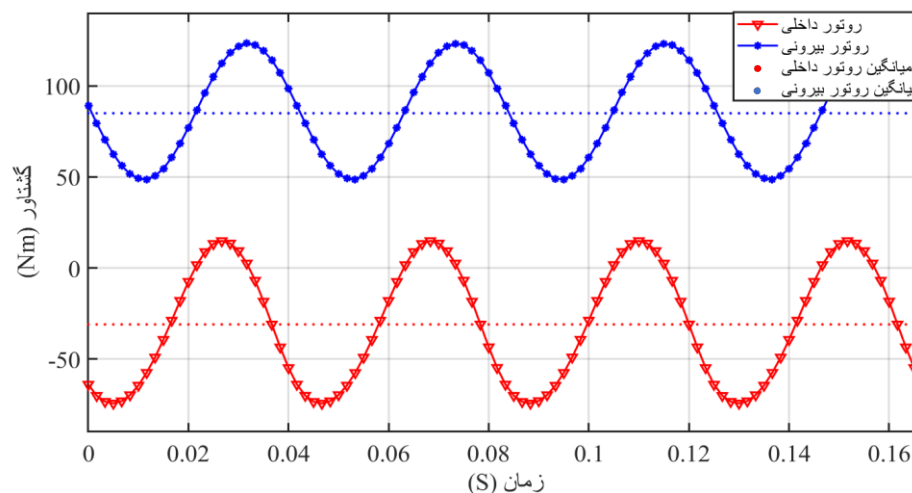
شکل ۴-۹. نمودار و طیف هارمونیکی چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی در راستای محور (r).
 (الف) فاصله هوایی روتور داخلی (ب) فاصله هوایی روتور بیرونی



شکل ۴-۱۰. چگالی شار مغناطیسی مدل پیشنهادی

۴-۲-۲-۲ تجزیه و تحلیل گشتاور و راندمان

با تحلیل چگالی شار فاصله هوایی می‌توان، نسبت سطح گشتاور در دو روتور را بدست آورد. در شکل ۴-۱۱ سطح گشتاور جعبه‌دنده پیشنهادی را نشان می‌دهد. میانگین گشتاور محاسبه‌شده برای روتور داخلی ۳۰ نیوتن متر در سرعت ۳۰ دور بر دقیقه و روتور بیرونی ۸۵/۵ نیوتن متر در سرعت ۹۰ دور بر دقیقه است.



شکل ۴-۱۱. سطح گشتاور جعبه‌دنده مغناطیسی با حلقه تعدیل‌کننده مجازی

تلفات ماشین در محاسبه راندمان گنجانده شده است. این تلفات در مدل پیشنهادی در دو بخش، تلفات اهمی و تلفات کلید زنی تقسیم‌بندی می‌شود. برای راه‌اندازی ماشین پیشنهادی نیاز به یک مبدل چهار فازه است. در شکل ۴-۱۲، مبدل چهار فازه قابل‌مشاهده است [۴۴]. برای ایجاد هر فاز در این مبدل، نیاز به دو کلید در هر ساق است.

۱. تلفات اهمی

تلفات اهمی، از طریق روابط (۲-۴) و (۳-۴) محاسبه می‌شود.

$$P_{CL} = R \times I_{rms}^2 \quad (2-4)$$

$$R = \frac{L}{\sigma \times A} \quad (3-4)$$

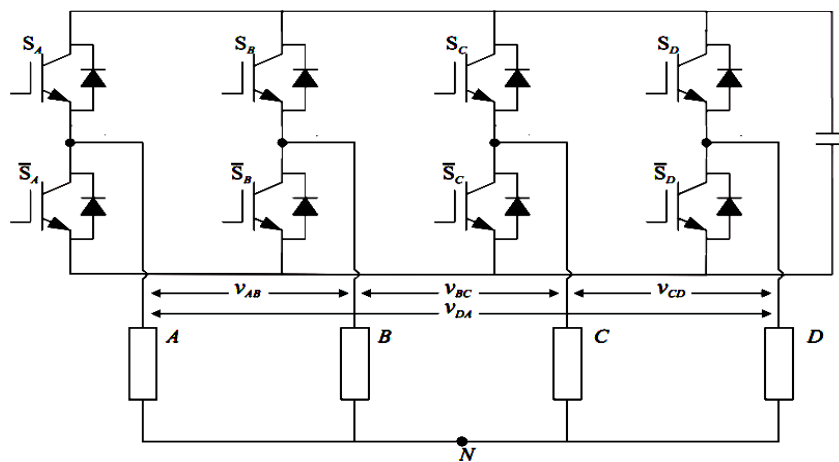
در این روابط، I مقدار موثر جریان، R مقاومت الکتریکی برحسب اهم و L واحد طول هر سیم مسی که بر اساس هندسه استاتور و تعداد دورهای هر سیم‌پیچ با واحد متر، در نظر گرفته می‌شود. A واحد سطح مقطع برحسب میلی‌متر مربع است و σ رسانایی ویژه برحسب زیمنس بر متر که از طریق رابطه (۴-۴)، قابل محاسبه است.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (4-4)$$

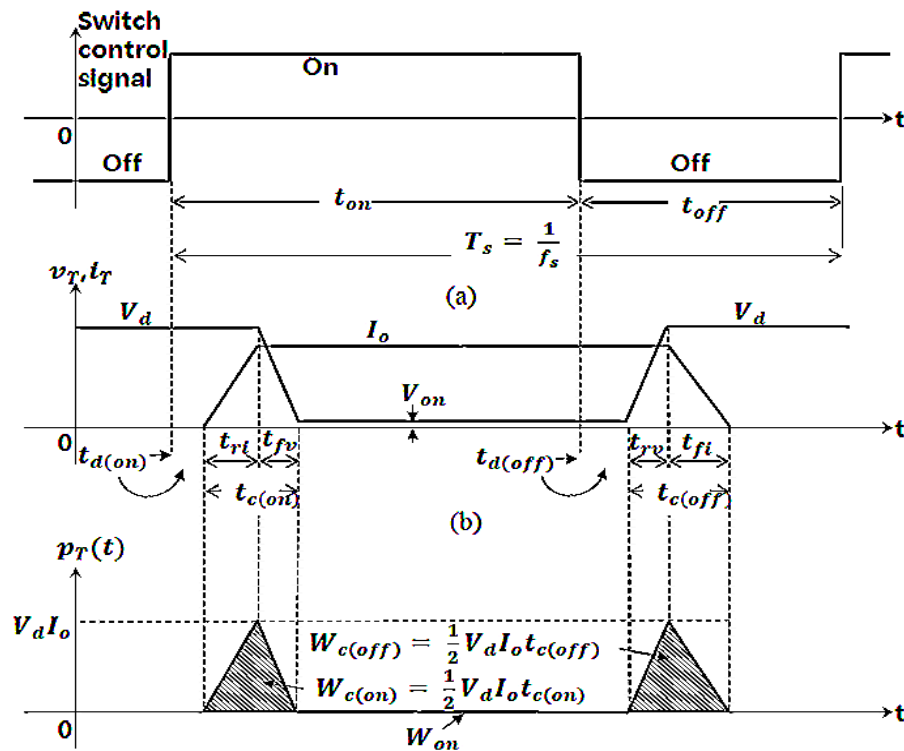
در این رابطه، ρ مقدار مقاومت مخصوص است و نشان می‌دهد ماده تا چه اندازه در برابر جریان مخالفت می‌کند، که برای مس $1/637e-8$ در نظر گرفته می‌شود.

۲. تلفات کلید زنی مبدل

مرجع [45]، یک نمای کلی از تئوری فرکانس کلید زنی و تأثیرات آن بر تلفات مبدل ارائه می‌دهد. دستگاه‌های نیمه‌هادی قدرت، مانند ماسفت، IGBT و سایر نیمه‌هادی‌ها را می‌توان با اعمال سیگنال کنترل کرد. شکل ۴-۱۳ مشخصات کلید زنی نیمه‌هادی‌ها را نشان می‌دهد. هنگام روشن و خاموش شدن نیمه‌هادی‌ها، به دلیل ایجاد هم‌زمان جریان و ولتاژ در آن‌ها، تلفاتی را به همراه دارند که به آن تلفات کلید زنی گفته می‌شود.



شکل ۴-۱۲. مبدل چهار فاز [۴۴]



شکل ۴-۱۳. ویژگی عمومی کلید زنی [۴۶]

طول بازه روشن شدن را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$t_{c(on)} = t_{ri} + t_{d(on)} \quad (۵-۴)$$

و همچنین مدت زمان تغییر وضعیت از روشن به خاموش به صورت زیر خواهد بود:

$$t_{c(off)} = t_{rv} + t_{d(off)} \quad (۶-۴)$$

$t_{d(on)}$ و $t_{d(off)}$ زمان تأخیر خاموش و روشن شدن است. t_{rv} و t_{ri} زمان افزایش و کاهش ولتاژ است.

انرژی تلف شده در طول زمان روشن و خاموش شدن را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$W_{c(on)} = \frac{1}{2} V_d I_o t_{c(on)} \quad (۷-۴)$$

$$W_{c(off)} = \frac{1}{2} V_d I_o t_{c(off)} \quad (۸-۴)$$

با توجه به این نکته که کلید در هر ثانیه چندین بار تغییر وضعیت بین روشن و خاموش شدن خواهد

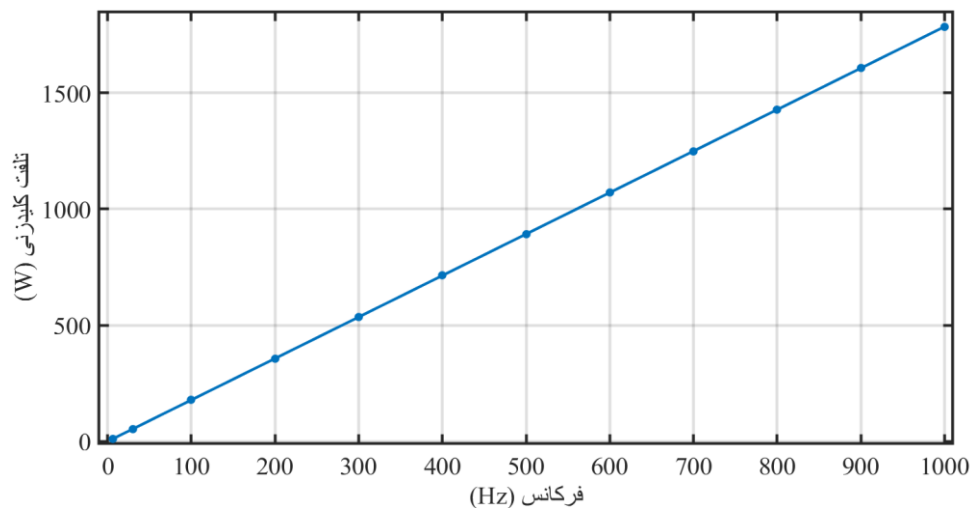
داشت، تلفات کلید زنی از رابطه زیر به صورت تقریبی تخمین زده خواهد شد:

$$P_{sw} = \frac{1}{T} V_d I_o f_{sw} (t_{c(on)} + t_{c(off)}) \quad (۹-۴)$$

تلفات کلید زنی (P_{sw}) برای سیستم، با استفاده از اطلاعات فنی نیمه‌هادی انتخاب شده [۴۷]، محاسبه

می‌شود. تلفات کلید زنی با تغییر فرکانس نامی جعبه‌دنده تغییر خواهد کرد که در شکل ۴-۱۴ این

تغییرات نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۴. تلفات کلید زنی در فرکانس‌های مختلف

راندمان مدل پیشنهادی برای سرعت ۵۰۰ دور بر دقیقه روتور داخلی و ۱۵۰۰ دور بر دقیقه روتور بیرونی، از طریق روابط زیر به دست خواهد آمد:

$$N_{out_rotor} = 500 \text{ (rpm)}$$

$$T_{out_rotor} = 85.5 \text{ (Nm)}$$

$$P_{out} = N_{out_rotor} * T_{out_rotor} = \left(500 * \frac{2\pi}{60}\right) * 85.5 = 4476.7 \text{ W} \quad (10-4)$$

$$P_{in} = P_{out} + P_{sw} + P_{CL} = 4476.7 + 178 + 32694 = 37348.7 \text{ W} \quad (11-4)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = 11.9 \% \quad (12-4)$$

نتایج محاسبات راندمان برای مدل پیشنهادی در سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه روتور بیرونی و ۳۰۰۰ دور بر دقیقه روتور داخلی در معادلات (۱۳-۴) تا (۱۵-۴) نشان داده شده است.

$$N_{out_rotor} = 1000 \text{ (Rpm)}$$

$$T_{out_rotor} = 85.5 \text{ (Nm)}$$

$$P_{out} = N_{out_rotor} * T_{out_rotor} = \left(1000 * \frac{2\pi}{60}\right) * 85.5 = 8953.5 \text{ W} \quad (13-4)$$

$$P_{in} = P_{out} + P_{sw} + P_{CL} = 8953.5 + 357 + 32694 = 42004 \text{ W} \quad (14-4)$$

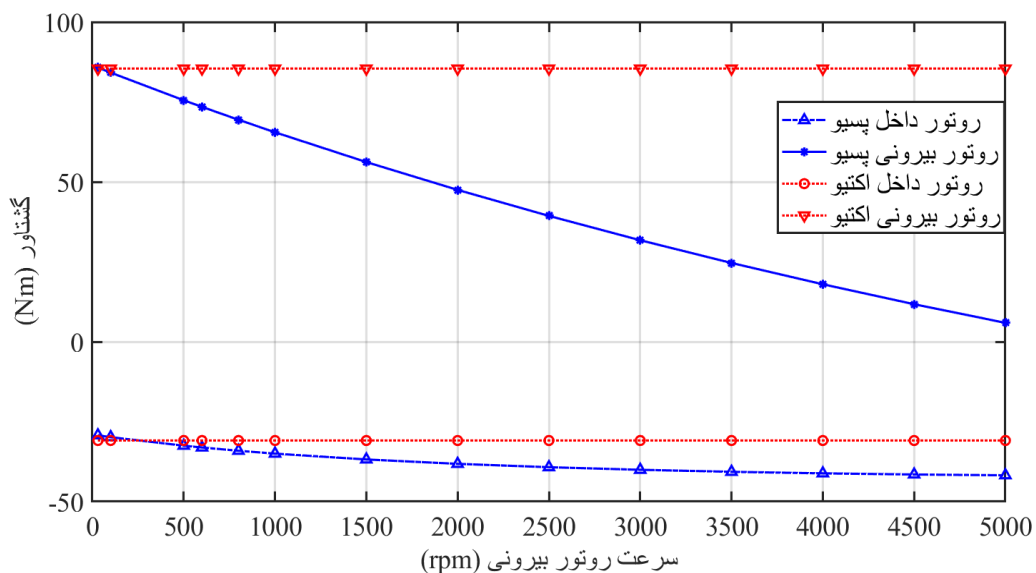
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = 21 \% \quad (15-4)$$

در این بخش، تلفات و راندمان در جعبه‌دنده مدل پیشنهادی محاسبه شد. نتایج محاسبات نشان می‌داد که با تغییر سرعت، تلفاتی اهمی ثابت و تلفات کلید زنی متغیر خواهد بود. همچنین نتایج راندمان برای دو سرعت متفاوت ارائه شد.

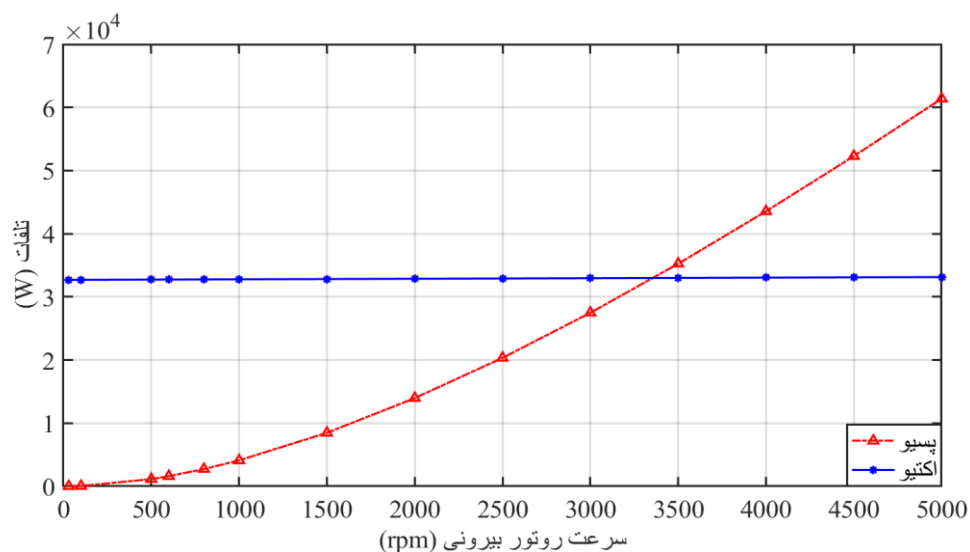
۳-۲-۲-۴ مقایسه جعبه‌دنده مغناطیسی پیشنهادی با ساختار پسیو

این بخش با هدف، مقایسه نتایج ساختار پیشنهادی و ساختار پسیو با حلقه تعدیل‌کننده یکپارچه، ارائه می‌شود. در شکل ۱۵-۴، سطح گشتاور دو مدل بیان شده، در سرعت‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سطح گشتاور در مدل پسیو یکپارچه با افزایش سرعت، در حال کاهش است. دلیل روند کاهشی گشتاور در مدل یکپارچه، تلفات ناشی از حلقه تعدیل‌کننده است. در

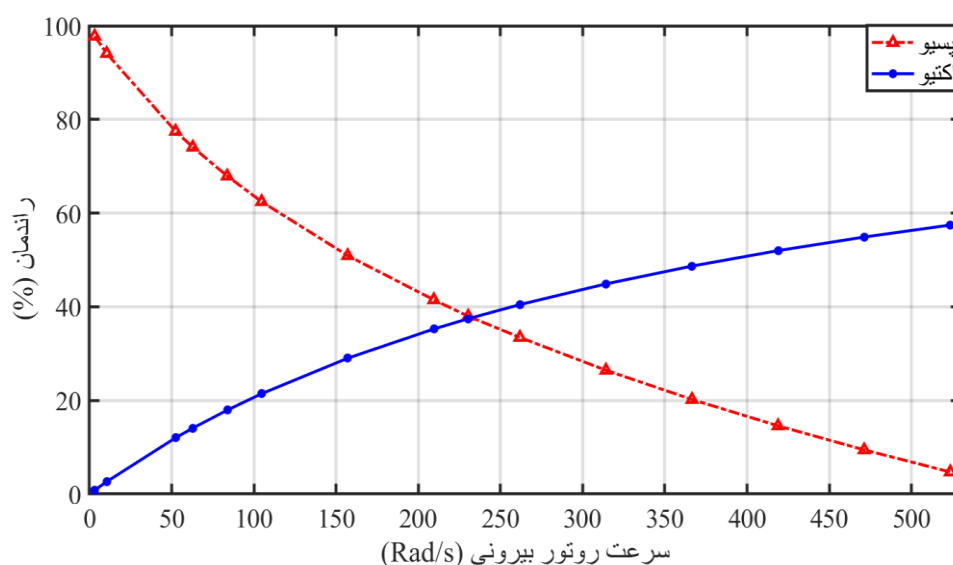
شکل ۴-۱۶، میانگین تلفات برای هر دو مدل در سرعت‌های مختلف نشان داده شده است. تلفات اهمی ایجاد شده در سیم‌پیچ‌ها، در سرعت‌های مختلف ثابت است اما تلفات کلید زنی با یک شیب بسیار کم افزایش میابد. البته این افزایش تلفات کلیدزنی در مقایسه با تلفات مس، بسیار ناچیز است. همچنین، طبق معادلات ارائه‌شده برای محاسبه راندمان هر دو ساختار، برای سرعت‌های مختلف، در شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است. بر اساس این شکل، راندمان مدل یکپارچه و مدل پیشنهادی، در سرعت حدود ۲۵۰۰ دور بر دقیقه (روتور بیرونی)، باهم برابرند. اما، برتری مدل پیشنهادی در سرعت بالاتر نشان داده می‌شود.



شکل ۴-۱۵. میانگین گشتاور ساختار پسیو و اکتیو



شکل ۴-۱۶. میانگین تلفات ساختار پسیو و اکتیو



شکل ۴-۱۷. راندمان ساختار پسیو و اکتیو

۳-۲-۴ ایجاد نسبت‌دنده متغیر با حلقه تعدیل‌کننده مجازی

در فصل دوم، انواع جعبه‌دنده مغناطیسی اکتیو با نسبت‌دنده متغیر معرفی شد. ساختارهای معرفی شده با جایگزینی روتورهای مغناطیس دائم داخلی یا بیرونی با استاتور، توانستند طبق نسبت‌دنده، سرعت جعبه‌دنده را به صورت پیوسته تغییر دهند. ساختار پیشین، همچنان مشکل ایجاد شده در حلقه تعدیل‌کننده را به همراه دارند. علاوه بر آن، تلفات هسته و مس در استاتور به جعبه‌دنده اضافه شد. در بخش قبل ساختار جدیدی از حلقه میانی مجازی معرفی شد و توانست محدودیت به وجود آمده توسط حلقه میانی را در ساختار پسیو از بین ببرد و گشتاور را با تغییر سطح جریان کنترل کند. حلقه تعدیل‌کننده مجازی در بخش قبل دارای نسبت‌دنده ثابت سه است. در این بخش هدف این است با استفاده از حلقه میانی مجازی، نسبت‌دنده متغیر در دو عدد ایجاد شود. با استفاده از رابطه (۴-۱۶) می‌توان تعداد قطعات حلقه تعدیل‌کننده را به دست آورد [۲۶]:

$$N_m = P_i \pm P_o \quad (4-16)$$

P_1 و P_2 تعداد جفت قطب‌های مغناطیس دائم روتور داخلی و بیرونی است که به ترتیب برابر با ۸ و ۱۲ است. تعداد قطعات حلقه میانی با توجه به معادله (۴-۱۶) می‌تواند ۱۶ یا ۸ باشد. حداکثر گشتاور زمانی

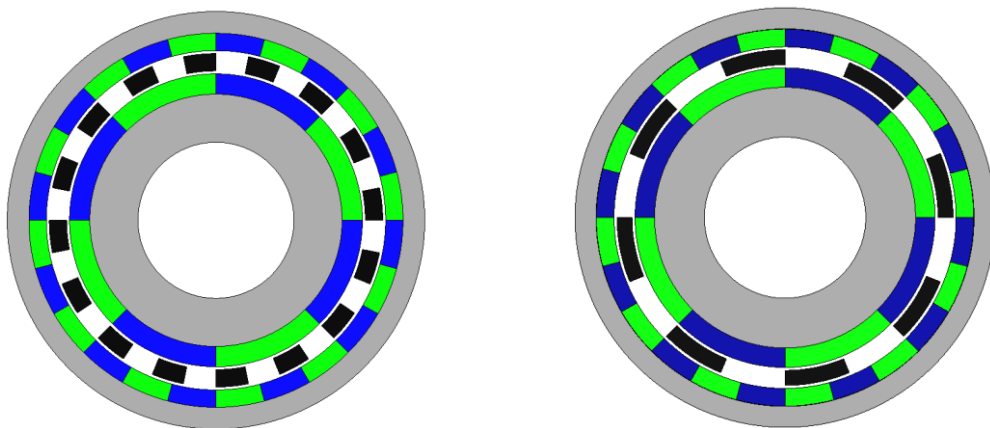
حاصل خواهد شد که، تعداد قطعات حلقه تعدیل‌کننده عدد ۱۶ باشد. در شکل ۴-۱۸ دو ترکیب انتخابی از جعبه‌دنده مغناطیسی پسیو نشان داده شده است. ایجاد نسبت‌دنده متغیر در ساختار پسیو با ترکیب قطعات به‌دست‌آمده امکان‌پذیر نخواهد بود. در نتیجه برای ایجاد نسبت‌دنده متغیر، می‌توان حلقه تعدیل‌کننده مجازی را مورد استفاده قرار داد. در شکل ۴-۱۹ جعبه‌دنده مغناطیسی اکتیو با نسبت‌دنده متغیر نشان داده شده است. در این مدل با استفاده از حلقه تعدیل‌کننده مجازی در حلقه میانی و تغذیه مجزا سیم‌پیچ‌ها، می‌توان نسبت‌دنده متغیر را ایجاد کرد. با اعمال جریان به‌صورت هم‌زمان به قطعه آبی و مشکی حلقه تعدیل‌کننده، طبق رابطه (۴-۱۶) تعداد ۸ قطعه در حلقه میانی ایجاد می‌شود. نسبت‌دنده، سرعت و جهت چرخش دو روتور، در این حالت طبق رابطه (۴-۱۷) و (۴-۱۸) به دست می‌آید. جهت چرخش دو روتور بیرونی و داخلی در یک جهت است.

$$G_{ra} = \frac{P_o}{P_o + P_m} \quad (4-17)$$

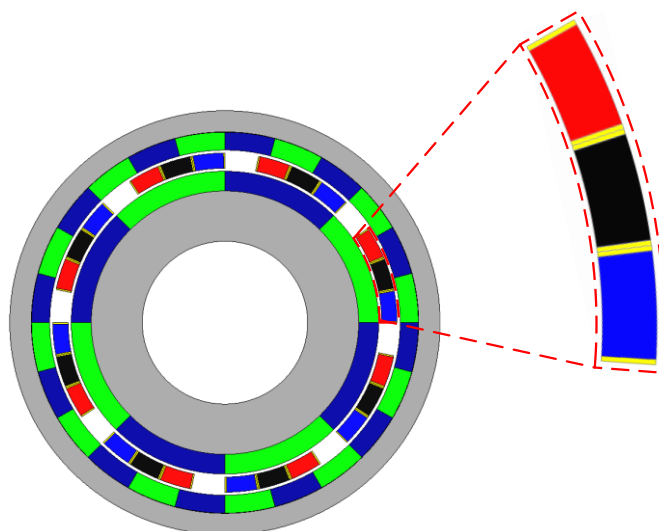
$$\omega_l = \frac{1}{G_r} \times \omega_h \quad (4-18)$$

برای ایجاد تعداد قطعه ۱۶ در حلقه میانی، به‌صورت هم‌زمان به قطعات قرمز و آبی جریان اعمال می‌شود. نسبت‌دنده، سرعت و جهت چرخش دو روتور، در این حالت به ترتیب طبق رابطه (۴-۱۷) و (۴-۱۹) به دست می‌آید. علامت منفی نشان دهنده جهت چرخش دور روتور در خلاف جهت است.

$$\omega_l = \frac{1}{-G_r} \times \omega_h \quad (4-19)$$

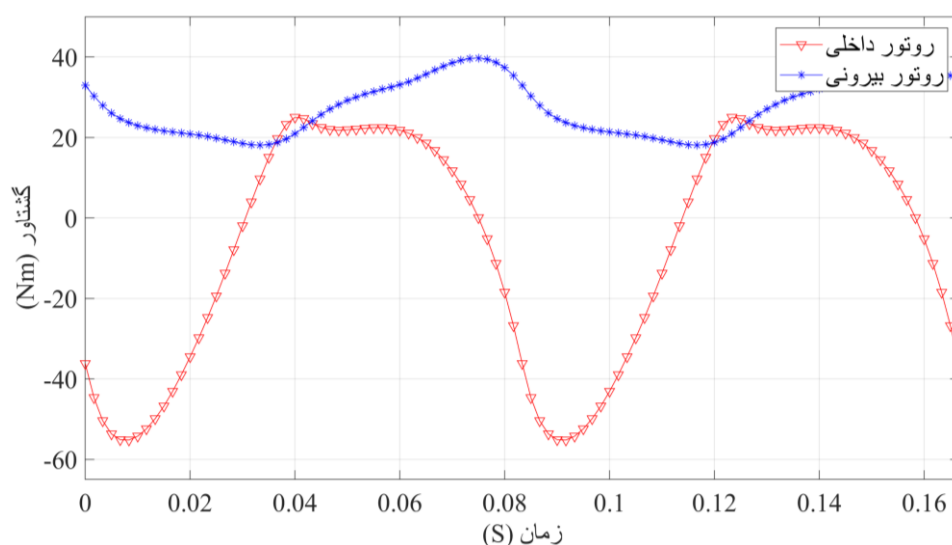


شکل ۴-۱۸. ساختار جعبه‌دنده مغناطیسی پسیو



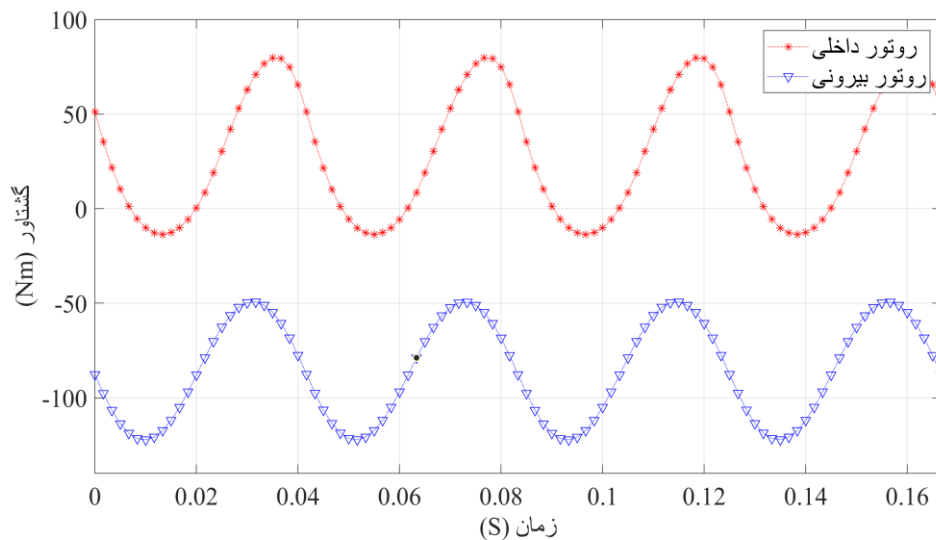
شکل ۴-۱۹. جعبه‌دنده مغناطیسی اکتیو با نسبت‌دنده متغیر

در شکل ۴-۲۰، گشتاور ایجاد شده در حالتی که تعداد ۸ قطعه در حلقه میانی وجود دارد را نشان می‌دهد. میانگین گشتاور محاسبه‌شده در روتور بیرونی^۱، $27/6$ نیوتن متر است. در شکل ۴-۲۱ گشتاور ایجاد شده توسط ۱۶ قطعه در حلقه میانی را نشان می‌دهد. میانگین سطح گشتاور در روتور بیرونی $85/5$ نیوتن متر محاسبه‌شده است. همان‌طور که بیان شد، بیشترین مقدار سطح گشتاور مربوط به حالتی است که ۱۶ قطعه در حلقه میانی فعال است، با توجه به این موضوع، بسته به نوع کاربرد ساختار موردنظر انتخاب می‌شود.



شکل ۴-۲۰. سطح گشتاور با فعال بودن ۸ قطعه در حلقه میانی

1 Outer Rotor

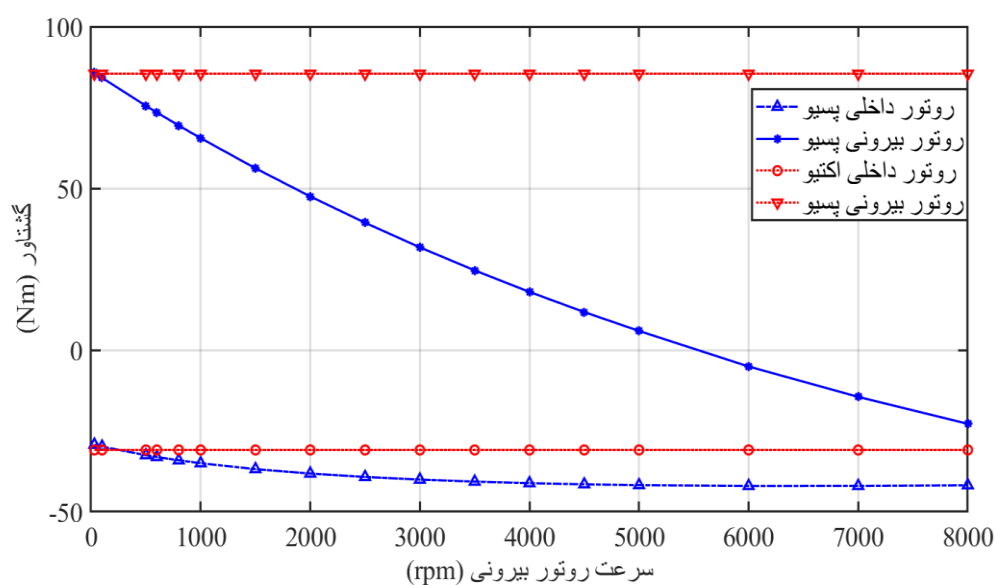


شکل ۴-۲۱. سطح گشتاور با فعال بودن ۱۶ قطعه در حلقه میانی

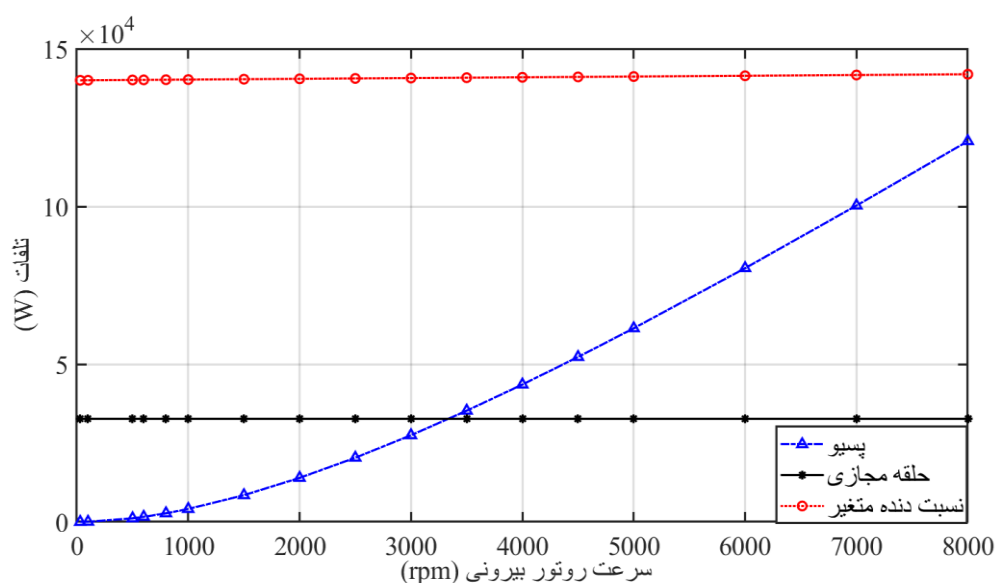
۴-۲-۳-۱ محاسبه تلفات، راندمان و مقایسه نتایج

با توجه به ساختار پایه مشابه در هر دو نوع جعبه‌دنده مغناطیسی ۸ و ۱۶ قطعه مجازی در حلقه میانی، می‌توان نتیجه گرفت که تحلیل‌های ارائه‌شده بر روی تغییرات تلفات نسبت به سرعت در جعبه‌دنده مغناطیسی با ۱۶ قطعه مجازی (حلقه میانی)، برای جعبه‌دنده مغناطیسی ۸ قطعه مجازی (حلقه میانی)، نیز صحیح می‌باشد. همچنین، برای پرهیز از تکرار، تحلیل و مقایسه نتایج در جعبه‌دنده مغناطیسی با نسبت‌دنده متغیر نیز، فقط بر روی جعبه‌دنده با ۱۶ قطعه مجازی ارائه خواهد شد. با توجه به این موضوع که در حلقه میانی جعبه‌دنده مغناطیسی اکتیو با نسبت‌دنده متغیر، از قطعات تعدیل‌کننده مجازی مورد استفاده قرار گرفته است، تغییرات سطح گشتاور آن، برابر با جعبه‌دنده مغناطیسی اکتیو با حلقه مجازی خواهد بود. از شکل ۴-۲۲، می‌توان دریافت، افزایش سرعت دو روتور باعث کاهش سطح گشتاور در ساختار پسیو می‌شود. همان‌طور که قبلاً بیان شد، این امر به دلیل ایجاد تلفات در حلقه میانی است. تلفات در ساختار جعبه‌دنده مغناطیسی با نسبت‌دنده متغیر پیشنهادی، همانند ساختار حلقه مجازی، از طریق روابط (۴-۲) تا (۴-۹) محاسبه می‌شود. تلفات مس هنگامی که ۱۶ قطعه در حلقه میانی فعال است، ۸۳ کیلووات خواهد بود. در شکل ۴-۲۳ تلفات سه جعبه‌دنده مغناطیسی پسیو با حلقه میانی یکپارچه، اکتیو با حلقه میانی مجازی و اکتیو با نسبت‌دنده متغیر نشان داده شده است. تلفات در حالتی

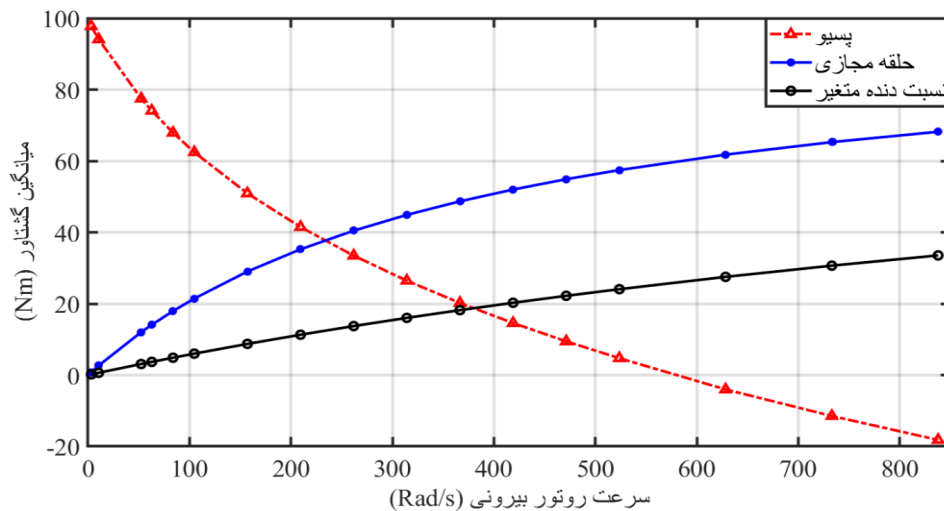
محاسبه شده است که سطح گشتاور بار، در سه ساختار برابر می‌باشد. قابل مشاهده است، جعبه‌دنده مغناطیسی با نسبت‌دنده متغیر را می‌توان در بازه سرعت بیشتر نسبت به جعبه‌دنده مغناطیسی پسیو بکار برد. در شکل ۴-۲۴، راندمان سه ساختار قابل مشاهده است. روند تغییرات راندمان اکتیو با نسبت‌دنده متغیر، مشابه اکتیو با حلقه مجازی است با این تفاوت که به دلیل افزایش تلفات مس در نسبت‌دنده متغیر، درصد راندمان کمتر خواهد بود.



شکل ۴-۲۲. میانگین گشتاور در ساختار اکتیو و پسیو

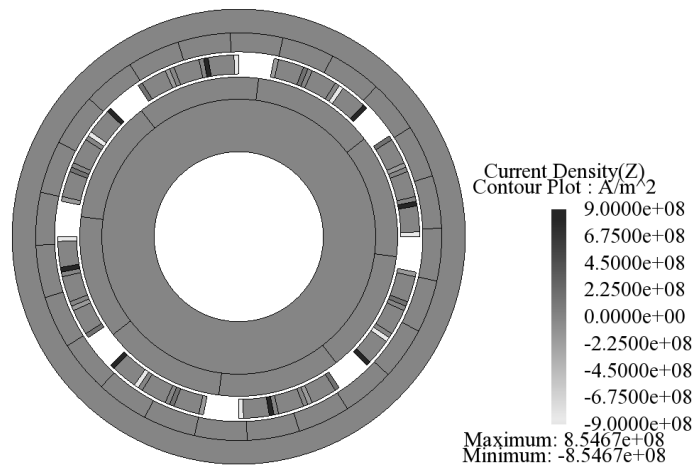


شکل ۴-۲۳. میانگین تلفات کل در سه ساختار



شکل ۴-۲۴. راندمان در سه ساختار

تحلیل و بررسی‌های بیان‌شده تاکنون، مزایای جعبه‌دنده مغناطیسی با نسبت‌دنده متغیر را نسبت به جعبه‌دنده مغناطیسی پسیو نشان می‌دهد. باین‌وجود یک چالش اساسی برای جعبه‌دنده مغناطیسی با نسبت‌دنده متغیر وجود دارد، که به دلیل کاهش سطح مقطع سیم‌پیچ‌ها، چگالی جریان بسیار بالایی خواهد داشت (شکل ۴-۲۵). این چگالی جریان بالا، باعث ایجاد حرارت بسیار بالا می‌شود که امکان آسیب رساندن به سیم‌پیچ‌ها را دارد. بنابراین، این ساختار برای استفاده در مدت‌زمان بسیار کوتاه و یا همراه با سیستم خنک‌سازی قوی، کاربرد دارد. علاوه براین، همان‌طور که قبلاً بیان شد، برای مقایسه عملکرد سه ساختار موردبررسی، گشتاور بار ابتدایی در هر سه ساختار، یکسان فرض شده است. درنتیجه برای کاهش چگالی جریان در ساختار پیشنهادی، می‌توان توان ورودی را کاهش داد و در دستگاه‌های با توان کمتر، مورد استفاده قرارداد.



شکل ۴-۲۵. چگالی جریان در جعبه‌دنده مغناطیسی با نسبت‌دنده متغیر

۳-۴ جمع‌بندی

چگالی گشتاور بالا در جعبه‌دنده مغناطیسی از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین، در این فصل ابتدا تاثیر سیم‌پیچ بر روی قطعات تعدیل‌کننده با پل‌های استحکام دهنده میانی در جعبه‌دنده مغناطیسی هم‌محور، مورد بررسی قرار گرفت. سپس به جهت بهبود عملکرد جعبه‌دنده مغناطیسی هم‌محور با توجه به محدودیت‌های به وجود آمده در سرعت‌های بالا، ساختاری از حلقه تعدیل‌کننده مجازی معرفی شد. دو ساختار پسیو و اکتیو با استفاده از نرم افزار المان محدود تحلیل و مقایسه شدند. نتایج، برتری ساختار پیشنهادی را در سرعت‌های بالا نشان می‌دهد. همچنین، ایجاد نسبت دنده متغیر با استفاده از حلقه تعدیل‌کننده مجازی، پیشنهاد و مورد تحلیل قرار گرفت.

فصل ۵ : جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱ جمع‌بندی

در این پایان‌نامه ابتدا، برای فهم بهتر مسئله، مقدماتی در رابطه با اصول عملکرد جعبه‌دنده مکانیکی و تاریخچه ارتباط این جعبه‌دنده با جعبه‌دنده مغناطیسی، مزایا، معایب و کاربرد آن‌ها بیان شد. با دسته‌بندی انواع جعبه‌دنده مغناطیسی، به بررسی ساختارهای مشابه با موضوع پرداخته شد. سپس اصول عملکرد جعبه‌دنده مغناطیسی پسیو هم‌محور مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. توزیع چگالی شار مغناطیسی ایجاد شده در فاصله هوایی بین حلقه میانی با روتور داخلی و روتور بیرونی، برای بررسی تأثیر هارمونیک‌های فضایی تعدیل شده توسط قطعات تعدیل‌کننده با روش اجزاء محدود مورد تحلیل قرار گرفت. همچنین، حالت‌های کاری جعبه‌دنده، با تغییر زوایای اولیه دو روتور و عوامل تأثیرگذار بر روی سطح گشتاور جعبه‌دنده مغناطیسی پسیو، در سرعت‌های بالا مشخص شد. تمامی تحلیل‌ها، توسط نرم‌افزار JMAG-Designer، در حالت پایدار و بار کامل صورت گرفته است. با دستیابی به محدودیت‌های ایجاد شده در جعبه‌دنده مغناطیسی پسیو هم‌محور، ساختاری جدیدی از جعبه‌دنده مغناطیسی اکتیو به جهت بهبود عملکرد جعبه‌دنده مغناطیسی، پیشنهاد شد. این ساختار، با هدف تمرکز شار در حلقه تعدیل‌کننده و پایداری گشتاور در سرعت‌های بالا، ارائه شده است.

۵-۲ نتیجه‌گیری

با توجه به کاربردهای وسیع جعبه‌دنده‌ها در انتقال گشتاور، تبدیل سرعت و تغییر جهت چرخش در انواع ماشین‌آلات صنعتی، جعبه‌دنده مغناطیسی باید از عملکرد و قابلیت اطمینان بالایی برخوردار باشد تا بتواند جایگزینی مناسب به جای جعبه‌دنده مکانیکی باشد. یکی از معایب جعبه‌دنده مغناطیسی پسیو، تلفات هسته موجود در حلقه میانی آن است. این عیب، باعث ایجاد محدودیت در افزایش سرعت جعبه‌دنده می‌شود. بنابراین، در فصل سوم، برای بررسی دقیق‌تر جعبه‌دنده مغناطیسی هم‌محور در سرعت‌های مختلف و مشاهده ویژگی‌های عملکردی آن، تحلیل اجزاء محدود در نرم‌افزار JMAG-Designer، انجام شد. نتایج این تحلیل نشان می‌داد که افزایش سرعت در ساختار پسیو با افزایش تلفات

حرارتی، مغناطیسی و مکانیکی را بر روی حلقه تعدیل‌کننده انجام داد تا به نقطه بهینه واقعی نزدیک‌تر شد.

- بررسی اثر ایجاد نسبت‌دنده متغیر در بازه وسیع‌تر با استفاده از حلقه میانی مجازی، بر روی راندمان جعبه‌دنده، می‌تواند موضوع قابل‌توجهی برای ادامه این تحقیق باشد.
- هدف ساختار پیشنهادی، ایجاد نسبت‌دنده متغیر در دو عدد بود. با این وجود، ایجاد نسبت‌دنده متغیر در ابعاد ثابت، باعث چگالی جریان بالا و تولید حرارت زیاد در سیم‌پیچ حلقه مجازی جعبه‌دنده پیشنهادی می‌شود. یکی از موضوعاتی که برای ادامه و بهبود این تحقیق، پیشنهاد می‌شود، بررسی و امکان‌سنجی استفاده از ابررسانا در ساختار جعبه‌دنده مغناطیسی است

مراجع

- [1] غلامحسین پایگانه. (۱۳۹۵) "اجزاء ماشین" جلد اول، شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، تهران، ص ۱۹۸.
- [2] K. Ivanov, "Creation of Adaptive-Mechanical Continuously Variable Transmission," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 436, pp. 63–70, Oct. 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.436.63.
- [3] P. M. Tlali, R. Wang, and S. Gerber, "Magnetic Gear Technologies : A Review," no. April 2015, 2014, doi: 10.1109/ICELMACH.2014.6960233.
- [4] S. Woo and A. Vacca, "Experimental Characterization and Evaluation of the Vibroacoustic Field of Hydraulic Pumps: The Case of an External Gear Pump," *Energies*, vol. 13, no. 24, p. 6639, 2020.
- [5] C.-C. Huang, M.-C. Tsai, D. G. Dorrell, and B.-J. Lin, "Development of a magnetic planetary gearbox," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 3, pp. 403–412, 2008.
- [6] R.-J. Wang, A. Matthee, S. Gerber, and P. Tlali, "Torque performance calculation of a novel magnetic planetary gear," *IEEE Magn Lett*, vol. 7, pp. 1–4, 2016.
- [7] H. Polinder, J. A. Ferreira, B. B. Jensen, A. B. Abrahamsen, K. Atallah, and R. A. McMahon, "Trends in wind turbine generator systems," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. power Electron.*, vol. 1, no. 3, pp. 174–185, 2013.
- [8] G.-H. Jang, C.-W. Kim, S.-W. Seo, K.-H. Shin, I.-J. Yoon, and J.-Y. Choi, "Torque Characteristic Analysis and Measurement of Magnetic Rack–Pinion Gear Based on Analytical Method," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 55, no. 7, pp. 1–5, 2019.
- [9] M. S. Amin, H. B. Karayaka, P. Yanik, and Y. Sang, "Suboptimal Control of a Rack and Pinion Based Wave Energy Converter Power Take-off System," in *SoutheastCon 2021*, 2021, pp. 1–7.
- [10] J. F. Gieras, *Permanent Magnet Motor Technology Design and Applications*. CRC press, 2010.

- [11] R. Goyal, A. Tripathy, M. S. Gujral, and V. Pradhan, "CURRENT PRODUCING SUSPENSION," *Int. J. Mech. Eng. Robot. Res.*, vol. 3, no. 2, p. 239, 2014.
- [12] C. G. Armstrong, "Power transmitting device," *Unites States Pat. Off. No. 687, 292, 26^*, 1901.
- [13] H.Faus, "Magnet gearing," US Patent 2,243,555, 1941.
- [14] S. Kikuchi and K. Tsurumoto, "Design and characteristics of a new magnetic worm gear using permanent magnet," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 29, no. 6, pp. 2923–2925, 1993.
- [15] A. Neuland, "Apparatus for transmitting power," US Patent 1, 717, 351, 1916.
- [16] T. B. Martin, "Magnetic transmission," USA Patent 3,378,710, 1968.
- [17] K. Atallah and D. Howe, "A novel high-performance magnetic gear," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37, no. 4, pp. 2844–2846, 2001.
- [18] P. O. Rasmussen, T. O. Andersen, F. T. Jorgensen, and O. Nielsen, "Development of a high-performance magnetic gear," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, no. 3, pp. 764–770, 2005.
- [19] X. Liu, K. T. Chau, J. Z. Jiang, and C. Yu, "Design and analysis of interior-magnet outer-rotor concentric magnetic gears," *J. Appl. Phys.*, vol. 105, no. 7, pp. 103–106, 2009, doi: 10.1063/1.3058619.
- [20] L. Jian, K. T. Chau, Y. Gong, J. Z. Jiang, C. Yu, and W. Li, "Comparison of coaxial magnetic gears with different topologies," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 10, pp. 4526–4529, 2009, doi: 10.1109/TMAG.2009.2021662.
- [21] X. Li, K. T. Chau, M. Cheng, W. Hua, and Y. Du, "An improved coaxial magnetic gear using flux focusing," *2011 Int. Conf. Electr. Mach. Syst. ICEMS 2011*, no. d, pp. 2–5, 2011, doi: 10.1109/ICEMS.2011.6073746.
- [22] K. K. Uppalapati, J. Z. Bird, D. Jia, J. Garner, and A. Zhou, "Performance of a magnetic gear using ferrite magnets for low speed ocean power generation," *2012 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2012*, pp. 3348–3355, 2012, doi: 10.1109/ECCE.2012.6342498.
- [23] K. K. Uppalapati, W. B. Bomela, J. Z. Bird, M. D. Calvin, and J. D. Wright,

- “Experimental evaluation of low-speed flux-focusing magnetic gearboxes,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 6, pp. 3637–3643, 2014, doi: 10.1109/TIA.2014.2312551.
- [24] K. Uppalapati, J. Kadel, J. Wright, K. Li, W. Williams, and J. Z. Bird, “A low assembly cost coaxial magnetic gearbox,” *2016 IEEE 2nd Annu. South. Power Electron. Conf. SPEC 2016*, pp. 1–6, 2016, doi: 10.1109/SPEC.2016.7846207.
- [25] T. Fujita *et al.*, “Surface Magnet Gears with a New Magnet Arrangement and Optimal Shape of Stationary Pole Pieces,” *J. Electromagn. Anal. Appl.*, vol. 05, no. 06, pp. 243–249, 2013, doi: 10.4236/jemaa.2013.56039.
- [26] W. N. Fu and L. Li, “Optimal Design of Magnetic Gears with a General Pattern of Permanent Magnet Arrangement,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, no. 7, 2016, doi: 10.1109/TASC.2016.2587279.
- [27] K. Atallah, J. Wang, and D. Howe, “A high-performance linear magnetic gear,” *J. Appl. Phys.*, vol. 97, no. 10, p. 10N516, 2005.
- [28] W. Li, K. T. Chau, and J. Z. Jiang, “Application of linear magnetic gears for pseudo-direct-drive oceanic wave energy harvesting,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, no. 10, pp. 2624–2627, 2011.
- [29] S. Mezani, K. Atallah, and D. Howe, “A high-performance axial-field magnetic gear,” *J. Appl. Phys.*, vol. 99, no. 8, pp. 97–100, 2006, doi: 10.1063/1.2158966.
- [30] M. Johnson, A. Shapoury, P. Boghrat, M. Post, and H. A. Toliyat, “Analysis and development of an axial flux magnetic gear,” *2014 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2014*, pp. 5893–5900, 2014, doi: 10.1109/ECCE.2014.6954210.
- [31] V. M. Acharya, M. Calvin, and J. Z. Bird, “A low torque ripple flux focusing axial magnetic gear,” *7th IET Int. Conf. Power Electron. Mach. Drives, PEMD 2014*, pp. 1–6, 2014.
- [32] W. Bomela, J. Z. Bird, and V. M. Acharya, “The performance of a transverse flux magnetic gear,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, no. 1, pp. 8–11, 2014, doi: 10.1109/TMAG.2013.2277431.
- [33] Y. Chen, W. Fu, and S. Peng, “Design method of a novel hybrid-flux magnetic gear using 3-D finite element method,” *2015 IEEE Int. Magn. Conf. INTERMAG*

- 2015, vol. 50, no. 11, 2015, doi: 10.1109/INTMAG.2015.7156628.
- [34] X. Yin, P. D. Pfister, and Y. Fang, "A Novel Magnetic Gear: Toward a Higher Torque Density," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 11, pp. 1–4, 2015, doi: 10.1109/TMAG.2015.2436058.
- [35] K. Atallah, J. Rens, S. Mezani, and D. Howe, "A novel 'pseudo' direct-drive brushless permanent magnet machine," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 11 PART 2, pp. 4349–4352, 2008, doi: 10.1109/TMAG.2008.2001509.
- [36] P. O. Rasmussen, H. H. Mortensen, T. N. Matzen, T. M. Jahns, and H. A. Toliyat, "Motor Integrated Permanent Magnet Gear with a Wide Torque-Speed Range," pp. 1510–1518, 2009.
- [37] S. Gerber and R. J. Wang, "Torque capability comparison of two magnetically geared PM machine topologies," *Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Technol.*, pp. 1915–1920, 2013, doi: 10.1109/ICIT.2013.6505970.
- [38] P. Padmanathan, S. Member, and J. Z. Bird, "A Continuously Variable Magnetic Gear," 2013.
- [39] Y. Fan, X. Han, Z. Xue, and H. Jiang, "Design, analysis and control of a permanent magnet in-wheel motor based on magnetic-gear for electric vehicles," 2011, doi: 10.1109/ICEMS.2011.6073543.
- [40] M. Chen, K. T. Chau, W. Li, C. Liu, and C. Qiu, "Design and analysis of a new magnetic gear with multiple gear ratios," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 24, no. 3, pp. 3–6, 2014, doi: 10.1109/TASC.2013.2291972.
- [41] L. Shah, A. Cruden, and B. W. Williams, "A variable speed magnetic gear box using contra-rotating input shafts," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, no. 2, pp. 431–438, 2010.
- [42] S. J Chapman, *Electric machinery fundamentals*. McGraw-hill, 2004.
- [43] G. R. Slemon, *Electric machines and drives*. Reading, Mass.; Don Mills, Ont.: Addison-Wesley, 1992.
- [44] J. Viola, F. Quizhpi, J. Restrepo, J. P. Pesántez, and M. M. Sánchez, "Analysis of a four-phase induction machine with direct torque control," in *2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, 2013, pp. 1–9.

-
- [45] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power electronics: converters, applications, and design*. John Wiley & Sons, 2003.
- [46] T. Nam *et al.*, “Trade-Off Strategies in Designing Capacitor Voltage Balancing Schemes for Modular Multilevel Converter HVDC,” *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 11, pp. 829–838, Jul. 2016, doi: 10.5370/JEET.2016.11.4.829.
- [47] Mitsubishi IGBT Modules and High Power, “CM200DU-12NFH,” 2009. https://www.mitsubishielectric.com/semiconductors/content/product/powermodule/igbt/nfh_series/cm200du-12nfh_e.pdf.

Abstract

With the growth of industry and human knowledge, the invention of the gearbox and its use for power transmission, torque, speed conversion, and rotation change in various types of industrial machinery, spread. Mechanical gearboxes are the most widely used in the industry due to their high torque and efficiency. Contact communication between the gears in the mechanical gearbox requires high maintenance and therefore high operating costs. This problem does not exist in magnetic gearboxes due to their non-contact torque transmission characteristics. In general, magnetic gearboxes are divided into two types, passive and active. Passive gearboxes usually have a fixed gear ratio, but in active magnetic gearboxes, the gear ratio can be varied over a wider range. Meanwhile, coaxial magnetic gearboxes of both active and passive types attract more attention due to their high torque density and wider application. For this purpose, in this dissertation, first, the finite element analysis of passive coaxial magnetic gearbox was performed in JMAG-Designer software to examine the changes in losses and load torque with respect to speed changes. Finally, a new structure of the active magnetic gearbox was proposed to reduce losses and improve the torque level in the passive gearbox. The analysis of this structure by the finite element method, which was accompanied by changes in the components of the intermediate modulator ring, showed that the efficiency of the proposed structure is significantly improved at high speeds. It is also possible to control the load angle and change the gear ratio in the proposed gearbox.

keywords: Magnetic Gearbox, Coaxial Magnetic Gearbox, Finite Element Analysis, Core Loss, Modulator Ring



Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical and Robotics Engineering

M.Sc. Thesis in Power Electronic and Machine Engineering

Performance Improvement of Active Magnetic Gearbox With Variable Gear Ratio

By:

Mohammadreza Moraddokht

Supervisor:

Dr. Amir Hassannia

January 2022