دانشکده مهندسی برق وکامپیوتر

گروه قدرت

پایان‌نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته‌ی مهندسی برق- قدرت گرایش ماشین‌های الکتریکی و درایو

عنوان

مدل‌سازی موتور مغناطیس دائم شارمحور با استفاده از روش المان محدود و بررسی اثر پارامترهای اصلی طراحی روی عملکرد آن

استادان راهنما

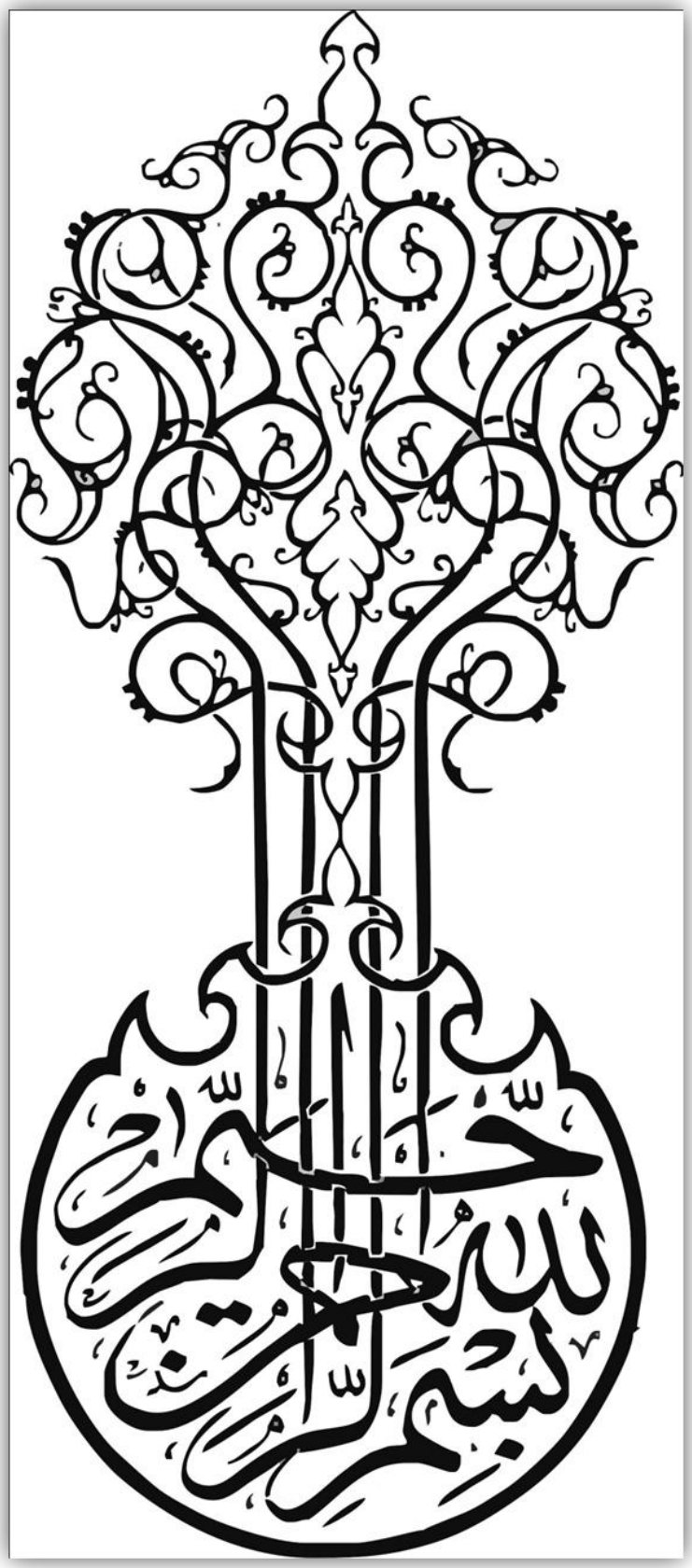
آقای دکتر محمدرضا فیضی

آقای دکتر هیرش سیدی

پژوهشگر

سیامک طالبی

شهریور ۹۰


بسم الله الرحمن الرحيم

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تـا در سـایه درخـت پربـار وجودشان بیاسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علـم و دانـش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم چـرا کـه این دو وجود پس از پروردگار مایه هستی‌ام بوده‌اند دسـتم را گرفتنـد و راه رفـتن را در ایـن وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند. آموزگارانی که برایم زندگی، بودن و انسان بودن را معنـا کردنـد حال این برگ سبزی است تحفه درویش تقدیم آنان...

نام خانوادگی: طالبی **نام:** سیامک

عنوان: مدل‌سازی موتور مغناطیس دائم شارمحور با استفاده از روش المان محدود و بررسی اثر پارامترهای اصلی طراحی روی عملکرد آن

استاد راهنما: دکتر محمدرضا فیضی، دکتر هیرش سیدی

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** مهندسی برق قدرت **گرایش:** ماشین‌های الکتریکی و درایو

دانشگاه: تبریز

دانشکده: مهندسی برق و کامپیوتر **تاریخ فارغ التحصیلی:** شهریور ۱۳۹۰

تعداد صفحه: ۸۵

کلیدواژه‌ها: ماشین شارمحور(AFPM) ،گشتاور،گشتاور اثر دندانه

چکیده:

داشتن گشتاور بالا با کمترین ریپل و راندمان بالا با کمترین تلفات از جمله شاخص‌های مهم در طراحی ماشین‌های شار محوری(AFPM) می باشند. عوامل موثر در کنترل این شاخص‌ها فاصله هوایی وساختار استاتور روتور ویا نحوه جایگذاری قطعات مغناطیس دائم می‌باشند. با بررسی هر یک از این عوامل درطراحی ماشین می‌توان به میزان تاثیرگذاری آنها در بهبود شاخص‌ها پی برد. از جمله شاخص‌های مطرح در این ماشین‌ها کیفیت گشتاور است. افزایش این شاخص همراه با کاهش در ریپل آن از جمله موارد مورد علاقه در مقالات است.

ریپل موجود در ماشین‌های شارمحور می‌تواند ناشی قسمت‌های کنترلی ماشین یعنی مربوط به سویچ زنی و هارمونیک‌های تولید شده در نیروی محرکه القایی و یا درجریان‌های القا شده باشد. همچنین یکی دیگر از عوامل ایجاد ریپل می‌تواند ناشی از ساختار ماشین باشد که از جمله مهمترین آنها گشتاور اثر دندانه است. این گشتاور ناشی از عمل و عکس‌العمل مغناطیس دائم‌ها و شیارهای موجود در استاتور است. از جمله پارامترهای تاثیرگذار در گشتاور اثر دندانه شکل و نحوه قرار گرفتن مغناطیس دائم‌ها روی روتور و همچنین شکل شیارهای استاتور است. در این پژوهش سعی در بررسی عوامل تاثیرگذار در گشتاور اثر دندانه در ماشین‌های شار محور شده است.

فهرست مطالب:

چکیده iv

فهرست شکل‌ها viii

فهرست جدول‌ها ix

فصل اول

مقدمه

بررسی منابع ۲

فصل دوم

ماشین شارمحور مغناطیس دائم

۲-۱- مقدمه ۷

۲-۲- تاریخچه ۷

۲-۳- انواع ماشین‌های شارمحور ۸

۲-۴-توپولوژی ۱۰

۲-۵- مقایسه ماشین‌های شارمحور با ماشین‌های شارشعاعی ۱۴

۲-۶- ماشین یکطرفه ۱۶

۲-۷- ماشین دوطرفه با روتور داخلی ۱۶

۲-۸- ماشین دوطرفه با استاتور داخلی ۱۷

۲-۹- ماشین دوطرفه با استاتور داخلی شیاردار ۱۸

۲-۱۰- ماشین دوطرفه با استاتور داخلی بدون هسته ۱۸

۲-۱۱- ماشین چند سطحه ۱۹

۲-۱۲- سیم پیچ‌ها ۱۹

۲-۱۲-۱- سیم پیچی سه فاز پخش شده در شیارها ۱۹

۲-۱۲-۲- سیم پیچی Toroidal ۲۱

۲-۱۲-۳- سیم پیچی استاتور بدون هسته ۲۲

۲-۱۲-۴- سیم پیچی متمرکز-غیر رویهم ۲۳

۲-۱۳- تولید گشتاور ۲۴

۲-۱۴- فلوی مغناطیسی ۲۴

۲-۱۵- گشتاور الکترومغناطیسی و نیرومحرکه گشتاور ۲۵

۲-۱۶- تلفات و راندمان ۲۶

۲-۱۶-۱- تلفات سیم پیچ استاتور ۲۶

۲-۱۶-۲- تلفات هسته استاتور ۲۷

۲-۱۶-۳- تلفات در مغناطیس دائم ۲۸

۲-۱۶-۴- تلفات هسته روتور ۲۹

۲-۱۶-۵- تلفات جریان گردابی در هادی‌های استاتور ۳۰
۲-۱۶-۶- تلفات چرخشی ۳۱
۲-۱۷- راندمان ۳۲
۲-۱۸- موتور شارمحور مغناطیس دائم ۳۲
۲-۱۸-۱- موتور با شکل موج سینوسی ۳۲
۲-۱۸-۲- موتور با شکل موج مربعی ۳۳

فصل سوم

روش المان محدود

۳-۱- مقدمه ۳۷
۳-۲- روش المان محدود ۳۸
۳-۳- بدست آوردن معادلات فیزیکی ۳۹
۳-۴- مثلث مرتبه اول ۳۹
۳-۵- کاربرد روش وزنی‌باقیمانده ۴۱
۳-۶- کاربرد روش المان محدود و حل آن ۴۳
۳-۷- شرایط مرزی ۴۵
۳-۷-۱- شرایط مرزی دیریکله-پتانسیل تحمیلی ۴۵
۳-۷-۲- شرایط مرزی نیومن- با نودها با مقادیر نامعلوم ۴۶
۳-۸- روش المان محدود در حالت کلی ۴۶
۳-۹- المان محدود با درجه بالا ۴۷
۳-۱۰ نرم افزار المان محدود ۴۸

فصل چهارم

بکار بردن روش المان محدود در بررسی کیفیت گشتاور

۴-۱- ریپل گشتاور ۵۲
۴-۲- تغییر ساختار شیار در استاتور ۵۸
۴-۲-۱- مورب کردن شیارهای استاتور ۵۸
۴-۲-۲ استفاده از گوه مغناطیسی ۶۰
۴-۳- تغییر در ساختار روتور ۶۱
۴-۳-۱- تغییر نسبت قوس قطب به گام قطب ۶۱
۴-۳-۲- روش مورب کردن معمول ۶۴
۴-۳-۳- روش مثلثی ۶۷
۴-۳-۴- روش موازی کردن ۶۷
۴-۳-۵- روش ذوزنقه‌ای ۷۰
۴-۳-۶- روش دایره‌ای ۷۲
۴-۳-۷- روش مورب کردن دوطرفه ۷۵

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱- خلاصه ۷۹

۵-۲- نتیجه گیری ۷۹

۵-۳- پیشنهادات ۸۱

مراجع ۸۲

چکیده انگلیسی ۸۴

فهرست شکل‌ها:

شکل ۱-۱- جابجایی مغناطیس‌های دائم روی روتور ۳
شکل ۱-۲- مورب کردن مغناطیس دائم به روش هیبریدی ۴
شکل ۱-۳- ماشین شارمحور با دو روتور و یک استاتور بدن هسته به همراه فایبرگلاس جهت نگه‌داشتن سیم‌پیچ ۵
شکل ۲-۱- ماشین شار محور مغناطیس دائم هشت قطبی جریان مستقیم کموتاتوردار با سیم‌پیچی پرینت شده روتور ۹
شکل ۲-۲- توپولوژی‌های ابتدایی ماشین شارمحور ۱۱
شکل ۲-۳- ماشین شارمحور بدون‌جاروبک با استاتور قطب برجسته داخلی و دو روتور داخلی ۱۲
شکل ۲-۴- ماشین شارمحور سه فاز دوطرفه، هشت قطبی با نه سیم‌پیچ روی استاتور قطب برجسته ۱۲
شکل ۲-۵- ماشین شارمحور چند سطحه با سه استاتور بدون هسته وچهار دیسک روتور ۱۳
شکل ۲-۶- توپولوژی ۱۴
شکل ۲-۷- مقایسه عملکرد در ماشین‌های شارشعاعی و ماشین‌های شار محور ۱۵
شکل ۲-۸- ماشین یکطرفه دیسکی ۱۶
شکل ۲-۹- ماشین دوطرفه با استاتور بدون شیار ۱۷
شکل ۲-۱۰- سیم‌پیچی سه فاز، قطب ها و مسیر شارهای مغناطیسی در ماشین دیسکی دوطرفه با استاتور بدون شیار داخلی ۱۷
شکل ۲-۱۱- ماشین دوطرفه به همراه استاتور شیاردار داخلی ۱۹
شکل ۲-۱۲- ماشین شارمحور با سیم‌پیچی یک-طبقه ۲۲
شکل ۲-۱۳- سیم‌پیچی Toroidalسه فاز ۲۲
شکل ۲-۱۴- سیم‌پیچی سه فاز بدون هسته ۲۳
شکل ۲-۱۵- دیاگرام اتصال سه فاز، با ۹ پیچک در ماشین بدون جاروبک ۲۳
شکل ۲-۱۶- شکل موج‌های جریان در ماشین‌های شارمحور ۳۲
شکل ۲-۱۷- جریان ناشی از سویچ زنی در ماشین مغناطیس دائم شارمحور ۳۳
شکل ۳-۱- یک نمونه المان مثلثی که قابل تقسیم به المان‌های کوچک‌تر است ۳۹
شکل ۳-۲- یک المان مثلثی به همراه مشخصات گره‌ها ۳۹
شکل ۳-۳- توابع وزنی W_k و W_{k+1} ۴۳
شکل ۳-۴- جمع توابع وزنی درالمان n ۴۳
شکل ۳-۵- تابع ϕ_1 برای المان مثلثی ۴۵
شکل ۳-۶- شرایط مرزی دیریکله ۴۵
شکل ۳-۷- شرایط مرزی نیومن ۴۶
شکل ۳-۸- المان‌های خطی و غیرخطی ۴۷
شکل ۳-۹-مش بندی اعمال شده توسط نرم افزار ماکسول به ماشین شار محور مورد آزمایش ۵۰
شکل ۴-۱- مورب کردن شیارهای استاتور ۵۳
شکل ۴-۲- استفاده از گوه‌های مغناطیسی در لایه شیارها ۵۳
شکل ۴-۳- ساختارهای مختلف مربوط به شکل مغناطیس‌های دائم ۵۴

شکل ۴-۴- ساختار ماشین شارمحور یک طرفه مطرح شده ۵۵
شکل ۴-۵- ماشین شارمحور یک‌طرفه شبیه‌سازی شده ۵۶
شکل ۴-۶- پخش چگالی شار الکتریکی در ماشین شار محور ۵۶
شکل ۴-۷- پخش چگالی جریان الکتریکی در ماشین شارمحور ۵۷
شکل ۴-۸- مش بندی اعمال شده در ماشین شارمحور ۵۷
شکل ۴-۹- نسبت تغییرات گشتاور به زوایای مورب کردن مختلف در استاتور ۵۸
شکل ۴-۱۰- گشتاور اثر دندانه ۵۹
شکل ۴-۱۱- گشتاور متوسط با جریان ۱۰۰آمپر ۵۹
شکل ۴-۱۲- گشتاور اثردندانه در حالت استفاده از گوه مغناطیسی در بین شیارهای استاتور ۶۰
شکل ۴-۱۳- گشتاور متوسط در حالت استفاده از گوه مغناطیسی در بین شیارهای استاتور ۶۰
شکل ۴-۱۴- گشتاور اثر دندانه به ازای نسبت قوس قطب به گام قطب مختلف ۶۳
شکل ۴-۱۵- گشتاور اثر متوسط با جریان ۱۰۰آمپر به ازای نسبت قوس قطب به گام قطب۰.۷۱۱ ۶۳
شکل ۴-۱۶- تغییرات گشتاور پیک به پیک به ازای زوایای قوس قطب‌های مختلف ۶۴
شکل ۴-۱۷- روش مورب کردن معمول از ۳ تا ۱۵درجه ۶۶
شکل ۴-۱۸- گشتاور متوسط با زاویه مورب ۱۵و جریان ۱۰۰آمپر ۶۶
شکل ۴-۱۹- مورب کردن مغناطیس دائم‌ها به ازای زوایای مختلف وبررسی گشتاور پیک به پیک ۶۷
شکل ۴-۲۰- روش موازی کردن به ازای قوس قطب متفاوت ۶۹
شکل ۴-۲۱- گشتاور متوسط با جریان ۱۰۰آمپربرای حالت موازی کردن لبه ۶۹
شکل ۴-۲۲- تغییرات گشتاور پیک به پیک نسبت به موازی کردن مغناطیس دائم‌ها با قوس قطب‌های متفاوت ۷۰
شکل ۴-۲۳- گشتاور اثر دندانه الف)معمولی ب)ذوزنقه‌ای ۷۱
شکل ۴-۲۴- گشتاور متوسط با جریان ۱۰۰آمپربرای حالت ذوزنقه‌ای ۷۱
شکل ۴-۲۵- بررسی گشتاور پیک به پیک اثر دندانه به ازای تغییرات ذوزنقه‌ای مغناطیس دائم ۷۲
شکل ۴-۲۶- روش دایره‌ای به ازای شعاع‌های مختلف ۷۴
شکل ۴-۲۷- گشتاور متوسط با جریان ۱۰۰ آمپربرای حالت دایره‌ای ۷۴
شکل ۴-۲۸- دایره‌ای کردن مغناطیس دائم و بررسی گشتاور پیک به پیک اثر دندانه ۷۵
شکل ۴-۲۹- روش مورب کردن دوطرفه با زوایای مورب کردن مختلف ۷۶
شکل ۴-۳۰- گشتاور متوسط با جریان ۱۰۰آمپر حالت مورب کردن دوطرفه ۷۷
شکل ۴-۳۱- مورب کردن دو طرفه‌ای تحت زوایای مختلف و بررسی گشتاور پیک به پیک اثر دندانه ۷۷
شکل ۵-۱- بررسی نمودار گشتاور متوسط به ازای روش‌های مختلف تغییر شکل مغناطیس دائم ۸۰
شکل ۵-۲- بررسی نمودارهای گشتاور متوسط به ازای ایجاد تغییرات در استاتور ۸۰

فهرست جدول‌ها:

جدول ۴-۱-پارامترها و ویژگی‌های ماشین طراحی شده ۵۵

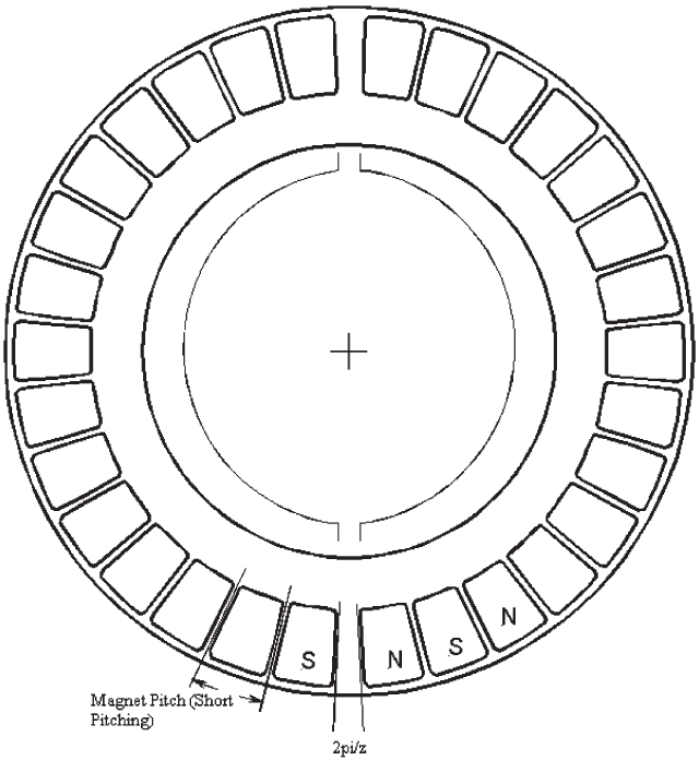
فصل اول

مقدمه

۱-۱ بررسی منابع

در [۴] نویسنده به دنبال تکنیک‌های افزایش اندوکتانس بوده تا بتواند رنج توان و همچنین راندمان رادر سرعت های بالا بهبود بخشد. یکی دیگر از اهداف دنبال شده در این مقاله کاهش تلفات چرخشی بی‌باری است. همچنین روش‌هایی نیز برای کاهش گشتاور اثر دندانه پیشنهاد شده است. از جمله مزایای ماشین‌های شارمحور کم وزن بودن و اشغال کردن حجم کم است که باعث بالا بودن چگالی توان می‌شود. از دیگر مزایای این ماشین‌ها قابلیت کنترل‌پذیری سرعت است که باعث شده مهندسین توجه بیشتر برای استفاده از این ماشین‌ها در خودروهای الکتریکی و هیبریدی بکنند[۳]، چراکه با حذف جعبه‌دنده در این ماشین‌ها علاوه بر کاستن از هزینه‌ها، در فضای اشغال شده نیز صرفه‌جویی می‌شود و راندمان بهبود می‌یابد.

روشی که در ابتدا در این مقاله برای کاهش گشتاور اثر دندانه پیشنهاد شده است، جابجایی مغناطیس دائم‌های روی روتور به اندازه $2\pi / pz$ است که در شکل۱-۱ نشان داده شده است، که p تعداد جفت قطب، z تعداد شیارهای استاتور است. اگرچه این روش در کاهش گشتاور اثر دندانه موثر است، با این حال تاثیری در تلفات چرخشی بی‌باری ندارد. در نتیجه از گوه‌های مغناطیسی نیز استفاده شده است، این روش در عین کم‌هزینه بودن کیفیت گشتاور را نیز بهبود می‌بخشد.



شکل۱-۱ جابجایی مغناطیس‌های دائم روی روتور

امروزه بشر به دنبال جایگزینی تجهیزات مکانیکی با دستگاه‌های الکتریکی است، چراکه این دستگاه‌ها با قابلیت کنترل‌پذیری مناسب، به همراه دقت و راندمان بالا مهندسین را به استفاده هر چه بیشتر از این دستگاه‌ها تشویق می‌کنند. یکی دیگر از دلایل رشد روز افزون این محبوبیت، استفاده از مغناطیس دائم‌های با میدان‌های مغناطیسی قوی است که با پیشرفت تکنولوژی هزینه تولید کمتر نیز است[۸].

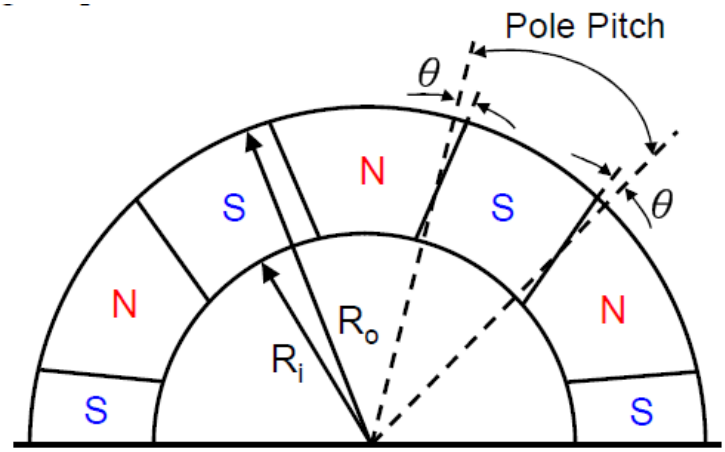
ماشین‌های شارمحور به دلیل کم وزن و کم حجم بودن دارای چگالی توان بالا بوده و استفاده از این ماشین‌ها روز به روز بیشتر می‌شود. یکی از موارد کاربرد این ماشین‌ها در ژنراتورهای لاندل است.

در [۸] از ماشین شارمحور بدون هسته در استاتور استفاده شده است. بدون هسته بودن این ماشین‌ها باعث نبود تلفات هسته شده و همچنین گشتاور اثر دندانه نیز وجود نخواهد داشت، که در نتیجه باعث افزایش راندمان و چگالی توان می‌شود. در این مقاله همچنین کیفیت نیرومحرکه القایی و هارمونیک‌ها نیز مورد بحث قرار گرفته است.

در [۱۱] با استفاده از یک ماشین شارمحور با استاتور بدون هسته داخلی و دو روتور به دنبال طراحی بهینه‌ای است که در نهایت باعث کاهش ریپل گشتاور شود. در کل دلایل ایجاد ریپل گشتاور را می‌توان به دو دسته

تقسیم کرد. یکی از آنها گشتاور اثر دندانه، نیرو محرکه غیر ایده‌آل و اشباع هسته است. و دیگری مربوط به دلایل کنترلی و سویچ‌زنی است. اگر چه با انتخاب کردن استاتور بدون هسته گشتاور اثر دندانه وجود نخواهد داشت، ولی با این حال ریپل‌های پارازیتی موجود خواهد بود.

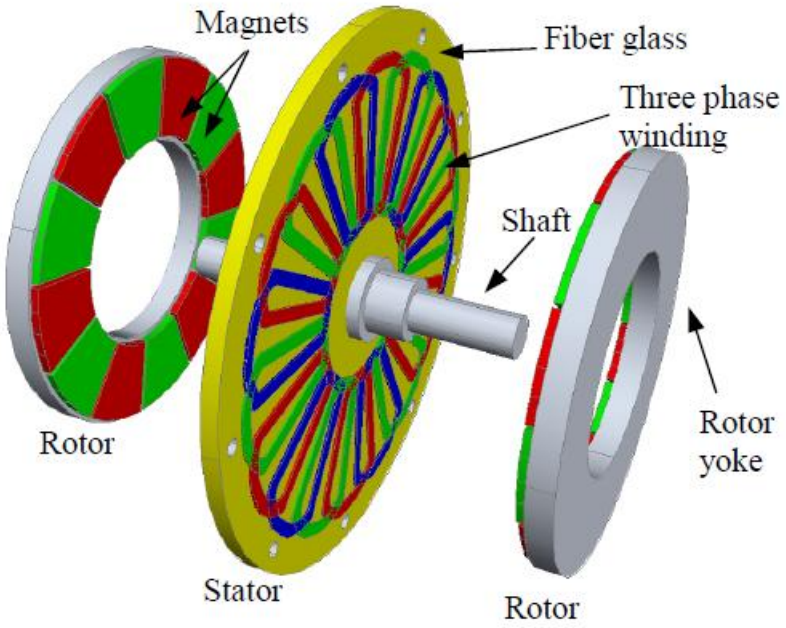
در [۱۷] از یک روش برای کاهش گشتاور اثر دندانه استفاده شده است که برای توربین‌های بادی بیشتر مناسب است. یکی از مشکلاتی که وجود گشتاور اثر دندانه در توربین‌های بادی ایجاد می‌کند در شروع حرکت[1] است. این گشتاور، سرعت گرفتن این نوع ماشین‌ها را سخت‌تر می‌کند. استفاده از ماشین‌های شارمحور دو طرفه نسبت به یک طرفه ارجحیت دارد چراکه باعث ایجاد تعادل در بین نیروهای دو طرف می‌شود.
اگرچه استفاده از چرخ‌دنده باعث حل مشکل شروع در این نوع ماشین‌ها می‌شود ولی اینکار باعث بیشتر شدن گشتاور اثردندانه و در نتیجه افزایش ریپل گشتاور نیز می‌شود. در نتیجه در این مقاله علاوه بر استفاده از تکنیک مورب‌کردن شیارهای استاتور از مورب‌کردن نوع هیبریدی نیز بصورت نشان داده شده در شکل۱-۲ استفاده شده است.



شکل۱-۲ مورب کردن مغناطیس دائم به روش هیبریدی

در [۱۸] نیز از دو روتور و یک استاتور بدون هسته نشان داده شده در شکل۱-۳ استفاده شده است که سیم‌پیچ‌ها روی یک ورقه فایبرگلاس برای نگه داشتن پیچیده شده‌اند.

[1] - Start Up



شکل۱-۳ ماشین شارمحور با دو روتور و یک استاتور بدن هسته به همراه فایبرگلاس جهت نگه‌داشتن سیم‌پیچ

در [۱۵] با توجه به پرهزینه بودن ایجاد تغییرات در استاتور[۱۳]، به ایجاد تغییرات روی شکل مغناطیس دائم‌ها بیشتر تمرکز شده است. از جمله روش‌های مطرح شده در این مقاله می‌توان به روش مورب‌کردن معمولی، روش مورب کردن دو طرفه، موازی کردن لبه‌ها، استفاده از مغناطیس‌دائم‌های دایره‌ای، مورب کردن ذوزنقه‌ای ومثلثی اشاره کرد. همه این روش‌ها در فصل ۴ مورد بررسی قرار گرفته اند.

در [۱۳] همچنین تکنیک مورب‌کردن شیارهای استاتور برای به حداقل رساندن مقدار گشتاور اثردندانه هم توسط حل تحلیلی و هم از طریق حل عددی المان محدود برای یک موتور یک‌طرفه بررسی شده است.

فصل دوم

ماشین شارمحور مغناطیس دائم

۲-۱مقدمه

در این فصل در مورد ماشین‌های شارمحور از ابتدا و همچنین انواع آن و قوانین حاکم بر این ماشین‌ها مورد بررسی قرار خواهدگرفت. توپولوژی انواع این ماشین‌ها، مدارهای مغناطیسی، انواع سیم پیچ ها، تولید گشتاور، تلفات، مدارهای معادل و ویژگی‌های مربوط به عملکرد ماشین‌های شارمحور(سنکرون و جریان مستقیم) از جمله مواردی هستند که با ذکر جزئیات بررسی خواهد شد.

۲-۲ تاریخچه

تاریخ ماشین‌های الکتریکی نشان می‌دهد که اولین ماشین‌های الکتریکی ابداعی، ماشین‌های شارمحور بوده‌اند(فارادی[۱]،۱۸۳۱ ، مخترع ناشناس با مغناطیس دائم، ۱۸۳۲، ریچی[۲]، ۱۸۳۳، جاکوبی[۳]، ۱۸۳۴). با وجود این بعد از ساخته شدن اولین نمونه ماشین‌های شارشعاعی در سال ۱۸۳۷ توسط دون پورت[۴]، این ماشین‌ها مورد استقبال بیشتری قرار گرفتند[۲۳،۲۴]

اولین نمونه ماشین شارمحور[۵] توسط فارادی در سال ۱۸۳۱ساخته شد. اما دیسکی شدن ساختار ماشین‌های الکتریکی توسط تسلا در سال ۱۸۸۹ در مجلات بطوررسمی چاپ شد. از دلایل اصلی عدم اقبال عمومی به این ماشین می توان بطور خلاصه به موارد زیر اشاره کرد:

- نیروی جاذبه شدید بین استاتور وروتور
- مشکلات موجود در ساخت این ماشین‌ها از جمله برش هسته ورقه‌شده برای ایجاد شیار

1- M.Faraday
[2] - W.Ritchie
[3] - B.Jacobi
4- T.Davenport
[5] - Axial Flux Permanent Magnet Machine

- هزینه‌های بالای مربوط به تولید هسته شیاردار وتهیه مغناطیس‌های دائم
- مشکلات مربوط به مونتاژ و ثابت نگه داشتن فاصله‌هوایی در یک مقدار ثابت

با وجود اعمال اولین تحریک از نوع مغناطیس‌دائم در ماشین‌های الکتریکی در دهه ۱۸۳۰، کیفیت نامرغوب مربوط به این مغناطیس‌دائم باعث کم شدن رغبت نسبت به استفاده از این نوع تحریک در ماشین‌ها شد. با اختراع آلنیکو[1] درسال ۱۹۳۱، فریت باریوم[2] در سال ۱۹۵۳ و مخصوصا نئودیمیم‌آهن‌برن[3] که در سال ۱۹۸۳ اعلام شد باعث محبوبیت دوباره تحریک از نوع مغناطیس‌دائم در ماشین‌های الکتریکی شد.

یکی از دلایل اصلی استفاده دوباره از تحریک مغناطیس دائم، امکان استفاده از مواد مغناطیس‌دائم با انرژی بالا بود. قیمت مربوط به این مواد دردهه‌ی گذشته در حال کاهش بوده است. تحقیقات جدید نشان می‌دهد که قیمت نئودیمیم‌آهن‌برن به ازای هر کیلوگرم ۲۰دلار است. با ادامه کاهش قیمت در مواد مغناطیس‌دائم در استفاده از ماشین‌های شارمحور گسترش بیشتری پیدا کرد[۲۵].

۲-۳ انواع ماشین شارمحور

در واقع هر نوع ماشین شارشعاعی یک نمونه مشابه نیز در ماشین شار محور دارد. در عمل ماشین‌های شار محور به ماشین‌های زیر محدود می‌شود[۲۶].

- ماشین جریان مستقیم کموتاتوردار مغناطیس‌دائم
- ماشین‌های بدون‌جاروبک جریان مستقیم وسنکرون مغناطیس‌دائم
- ماشین‌های القایی

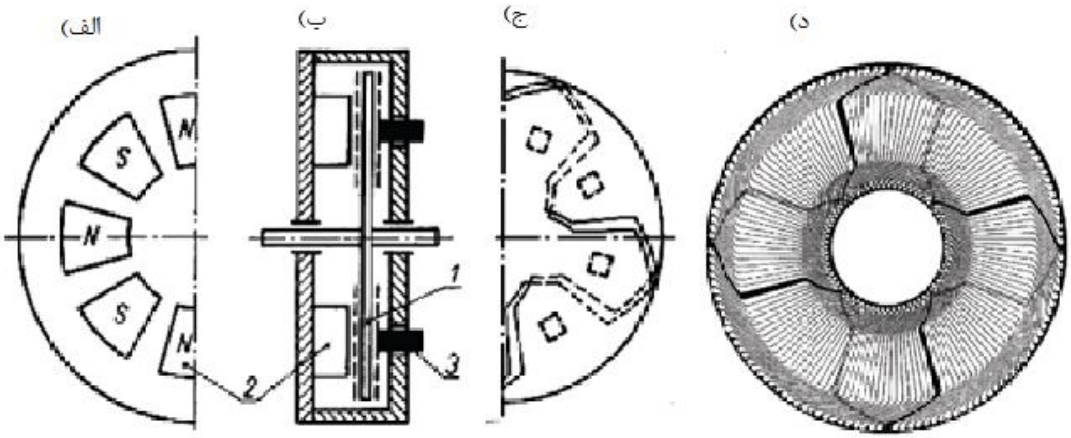
همانند ماشین‌های شارشعاعی در ماشین‌های شارمحور کموتاتوردارجریان مستقیم، از مغناطیس‌های دائم جهت ایجاد تحریک استفاده می‌کنند. روتور(آرمیچر)در اینگونه ماشین‌ها می‌توانند بصورت روتور سیم‌پیچی شده ویا روتور با سیم‌پیچی پرینت شده طراحی شوند.

در روتور سیم‌پیچی شده، جنس پیچک‌ها از جنس مس است. کموتاتور این ماشین‌ها به مانند کموتاتور موجود در ماشین‌های شارشعاعی می‌تواند بصورت شعاعی یا استوانه‌ای ساخته شود.

در شکل۲-۱یک نوع موتور دیسکی(شار محور)با سیم‌پیچی پرینت شده نشان داده شده است. روتور فاقد هسته بوده و نوع سیم‌پیچی از نوع موجی معمول در ماشین‌های جریان مستقیم است.

---

[1] - Alnico
[2] - Barium Ferrite
[3] - NdFeB



شکل۲-۱ ماشین شار محور مغناطیس دائم هشت قطبی جریان مستقیم کموتاتوردار با سیم پیچی پرینت شده روتور الف)استاتور با مغناطیس دائم ب)سطح مقطع ج)سیم پیچی روتور و جاروبک ها د)۱-روتور با سیم پیچی پرینت شده۲-مغناطیس دائم۳-جاروبک ها

موتورهای شارمحور جریان مستقیم کموتاتور دار همچنان کاربردهای مختلفی در صنعت، خودروسازی، خودرو برقی، فن ها و دستگاه های برقی دارند.

از نظر کاربردی ماشین های جریان مستقیم بدون جاروبک و ماشین های سنکرون ساختار یکسانی دارند، اما از لحاظ قوانین عملکردی متفاوت هستند. مهمترین تفاوت، در شکل موج جریان کاربردی است:

- ماشین بدون جاروبک جریان مستقیم نیروی محرکه القایی با شکل موج ذوزنقه‌ای تولید می کند که با جریان خطی به شکل مستطیلی کار می کند.
- ماشین سنکرون جریان متناوب نیروی محرکه القایی سینوسی تولید می کند که با جریان سینوسی کار می کند.

تولید روتور ورقه شده همراه با روتور قفسه‌ای برای ماشین دیسکی بسیار سخت و هزینه بر است. اگر سیم پیچی قفسه‌ای با یک دیسک غیر مغناطیسی با هدایت بالا وهمگن (آلومینیوم یا مس) پوشیده شده با لایه‌ای از مس جایگزین شود، آنگاه عملکرد ماشین بسیار افت می کند. در نتیجه این عملکرد ضعیف، تولید و استفاده از ماشین های دیسکی القایی چندان طرفدار ندارد.

۲-۴ توپولوژی

از لحاظ ساختاری ماشین‌های شارمحور بدون‌جاروبک می‌توانند بصورت یک‌طرفه[1] ویا دوطرفه[2]، شیاردار یا بدون شیار، همراه یا بدون هسته، روتور با مغناطیس‌های دائم داخلی یا خارجی بصورت نشان داده شده در شکل ۲-۲،۲-۳و۲-۴ساخته شوند[۲۶].

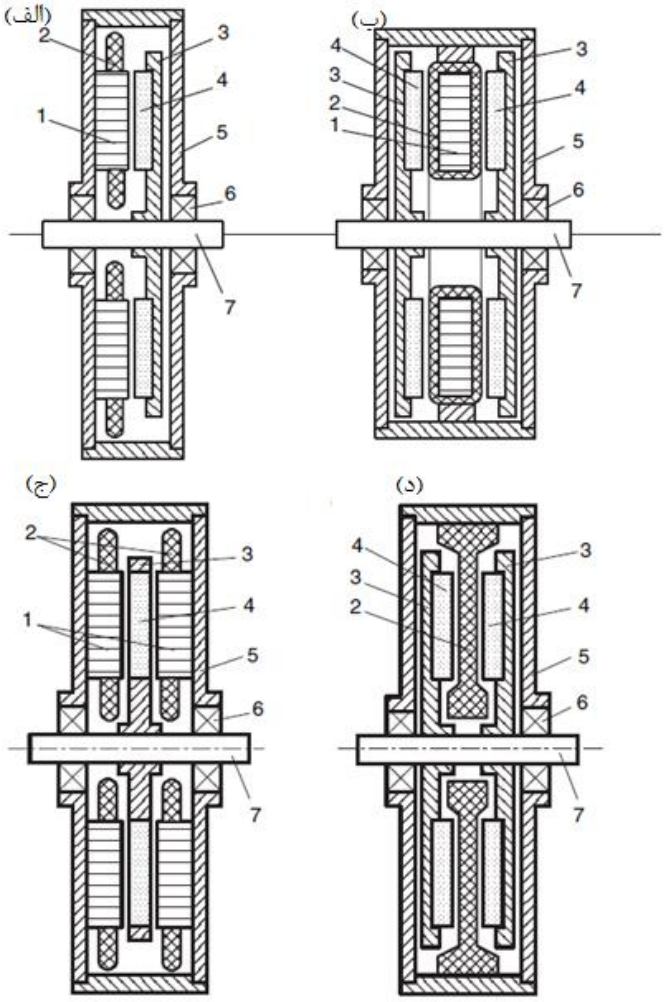
درحقیقت ماشین‌های دوطرفه از اضافه کردن یک استاتور و یا روتور به ماشین‌های یک‌طرفه بنا به نیاز و کاربرد بدست می‌آیند. ماشین‌های دوطرفه با یک استاتورخارجی دارای این مزیت هستند که تعداد مغناطیس‌های دائم مورد نیاز کمتر بوده با وجود این استفاده از سیم‌پیچی بیشتر می‌شود.

طبقه‌بندی ماشین‌های شارمحور را می‌توان بصورت زیر خلاصه کرد.

- ماشین شار محور مغناطیس دائم یک‌طرفه
  - استاتور شیاردار
  - استاتور بدون‌شیار
  - استاتور قطب برجسته
- ماشین شارمحور مغناطیس دائم دوطرفه
  - استاتور داخلی
    - استاتور شیاردار
    - استاتور بدون شیار
    - استاتور هسته‌دار
    - استاتور بدون هسته
    - استاتور و روتور بدون‌هسته
    - استاتور با قطب برجسته
  - روتور داخلی
    - استاتور شیاردار
    - استاتور بدون شیار
    - استاتور قطب برجسته
- ماشین شارمحور مغناطیس دائم چندسطحه[1](شکل۲-۵)

---

[1] - Single-Side AFPM
[2] - Double-Side AFPM



شکل۲-۲ توپولوژی های ابتدایی ماشین های شارمحور الف) ماشین شیاردار یک طرفه ب) ماشین بدون شیار دوطرفه با استاتور داخلی ج) ماشین شیاردار دوطرفه با روتور داخلی د) موتور بدون هسته دوطرفه با استاتور داخلی۱- هسته استاتور۲- سیم پیچ استاتور۳- روتور۴- مغناطیس دائم ۵- قاب ۶- یاتاقان ۷- شفت

[1] -Multi-Disc AFPM