

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی الکترونیک قدرت و ماشین‌های الکتریکی

طراحی بهینه یک موتور سه فاز سوئیچینگ شار مغناطیس دائم به منظور کاهش

گشتاور دندان‌های

شیما گویامفرد

استاد راهنما:

دکتر احمد دارابی

استاد مشاور:

دکتر امیر حسن نیا خیبری

شهریور ۱۳۹۶

ماحصل آموخته هایم را تقدیم می کنم به

پدر و مادر مهربانم

که از نگاهشان صلابت

از رفتارشان محبت

و از صبرشان ایستادگی را آموختم.

تشکر و قدردانی:

خداوند بزرگ را شاکرم که لطف خود را شامل حال من نمود تا بتوانم تحقیق خود را به پایان برسانم

و بر خود لازم می‌دانم از راهنمایی‌ها و زحمات استاد محترم و گران‌قدر جناب آقای دکتر دارابی که از

ابتدای راه و در طی انجام این تحقیق، بار راهنمایی‌های خود مراد تهیه و نگارش این اثر یاری نمودند،

صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم.

همچنین از جناب آقای دکتر امیر حسن نیا که وقت خود را بی‌شائبه در اختیار من قرار داده

و با دقت نظر خاصی مشاوره‌ی لازم در این خصوص ارائه نمودند، تشکر می‌کنم.

تعهد نامه

اینجانب **شیما گویامفرد** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق / قدرت دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه طراحی بهینه یک موتور سه فاز تعویض شار مغناطیس دائم به منظور کاهش گشتاور دندانه‌ای تحت راهنمایی دکتر احمد دارابی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « 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 بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه 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

در حال حاضر ماشین‌های بدون جاروبک آهنربا دائم به‌طور گسترده‌ای در صنایع مختلفی کاربرد دارند. ماشین‌های تعویض شار آهنربا دائم به دلایلی از جمله نصب سیم‌پیچی و آهنربا در استاتور، روتور ساده و چگالی گشتاور بالا مورد توجه قرار گرفته‌اند. از کاربردهای عمده‌ی این ماشین می‌توان به صنایع هوا و فضا، تولید انرژی بادی و خودروهای الکتریکی اشاره کرد. یکی از مهم‌ترین معایب این ماشین‌ها گشتاور دندانه‌ای بالا بوده که موجب نویز و لرزش می‌شود و کنترل ماشین را مشکل می‌سازد. در این تحقیق موتور روتور چندتکه‌ای تعویض شار آهنربا دائم مورد مطالعه قرار گرفته است که نسبت به دیگر ماشین‌های تعویض شار برتری داشته ولی گشتاور دندانه‌ای بالایی دارد. هدف از این تحقیق کاهش گشتاور دندانه‌ای ماشین روتور چندتکه‌ای تعویض شار آهنربا دائم با استفاده از روش‌های کاهش گشتاور دندانه‌ای ماشین‌های آهنربا دائم است. برای تحقق این هدف، انواع روش‌های دوبعدی نظیر ایجاد شکاف در روتور و استاتور، جفت کردن قطعه‌های روتور به صورت شعاعی، ایجاد پل آهنی در روتور، تغییر انحنای قطعه‌های روتور و روش‌های سه‌بعدی مانند انحراف روتور، جفت کردن قطعه‌های روتور به صورت محوری بر روی ماشین مورد نظر شبیه‌سازی شده است. تأثیر این روش‌ها در مشخصات مختلفی از جمله ریپل گشتاور خروجی، اندازه ماکزیمم تا مینیمم گشتاور دندانه‌ای، میانگین گشتاور خروجی و هارمونیک‌های نیرومحرکه‌ی القایی بررسی شده است و در نهایت روش‌های بهینه‌ی ترکیبی برای کاهش بهتر ریپل گشتاور و اندازه‌ی گشتاور دندانه‌ای ارائه گردیده است.

کلیدواژه: موتور روتور چندتکه‌ای تعویض شار آهنربا دائم، گشتاور دندانه‌ای، المان محدود، ریپل

گشتاور.

عنوان	فهرست مطالب	صفحه
فصل اول: پیشگفتار.....		۱
۱-۱- مقدمه.....		۲
۱-۱-۱- ماشین‌های تعویض شار آهنربا دائم.....		۲
۱-۲- هدف تحقیق.....		۵
۱-۳- مروری بر فصل‌های پایان‌نامه.....		۶
فصل دوم: مروری بر پژوهش‌های پیشین.....		۷
۱-۲- مقدمه.....		۸
۲-۲- کاهش گشتاور دندانه‌ای به روش ایجاد شکاف در روتور و استاتور.....		۸
۲-۳- کاهش گشتاور دندانه‌ای به روش جفت کردن دندانه‌های روتور.....		۱۰
۲-۴- کاهش گشتاور دندانه‌ای به روش مورب کردن دندانه‌های روتور.....		۱۱
۲-۵- کاهش گشتاور دندانه‌ای به روش شکل‌دهی قطب روتور.....		۱۳
۲-۶- کاهش گشتاور دندانه‌ای به روش ایجاد پل آهنی در استاتور.....		۱۴
۲-۷- جمع‌بندی.....		۱۵
فصل سوم: انواع ماشین‌های تعویض شار آهنربا دائم.....		۱۷
۱-۳- مقدمه.....		۱۸
۲-۳- انواع ماشین‌های تعویض شار آهنربا دائم.....		۱۸
۳-۱-۲- انواع ماشین‌های تعویض شار آهنربا دائم.....		۱۸
۳-۲-۲- پیشرفت‌های اخیر در ماشین‌های تعویض شار آهنربا دائم.....		۲۰
۳-۲-۲-۱- تغییرات نوع هسته استاتور.....		۲۱

- ۲۱-۲-۲-۳- تغییرات در ترکیب تعداد قطب‌های استاتور و روتور و تعداد فاز.....
- ۲۲-۳-۲-۲-۳- تغییرات سیم‌پیچی آرمیچر.....
- ۲۳-۳- تحلیل و بررسی گشتاور دندانه‌ای در ماشین تعویض شار آهنربا دائم.....
- ۲۴-۴- روش‌های به‌کاررفته برای کاهش گشتاور دندانه‌ای.....
- ۲۴-۱-۴-۳- تئوری روش ایجاد شکاف در روتور و استاتور.....
- ۲۸-۲-۴-۳- روش محیطی جفت شدن دندانه‌های روتور.....
- ۳۰-۳-۴-۳- روش استفاده از پل آهنی.....
- ۳۰-۴-۴-۳- روش تغییر انحنای لبه روتور.....
- ۳۱-۵-۴-۳- روش انحراف روتور.....
- ۳۱-۶-۴-۳- روش ترکیبی.....
- ۳۱-۵- جمع‌بندی.....
- فصل چهارم: معرفی و شبیه‌سازی موتور روتور چند تکه ای تعویض شار آهنربا دائم.....**
- ۳۳-۱-۴- مقدمه.....
- ۳۴-۲-۴- اصول عملکرد ماشین روتور چند تکه ای تعویض شار آهنربا دائم.....
- ۳۶-۳-۴- شباهت‌ها و تفاوت‌های ماشین تعویض شار معمولی با روتور چند تکه‌ای.....
- ۳۷-۴-۴- پارامترهای ماشین روتور چندتکه‌ای تعویض شار آهنربا دائم.....
- ۳۹-۵-۴- شبیه‌سازی موتور روتور چندتکه‌ای تعویض شار آهنربا دائم.....
- ۳۹-۱-۵-۴- مدار الکتریکی شبیه‌سازی.....
- ۴۱-۲-۵-۴- مش‌بندی شبیه‌سازی.....
- ۴۲-۳-۵-۴- توزیع چگالی و خطوط شار شبیه‌سازی.....
- ۴۳-۴-۵-۴- عملکرد حالت مدار باز ماشین در سرعت نامی.....

۴۶	.....	۴-۵-۵- بررسی عملکرد ماشین در بار نامی
۴۸	.....	۴-۶- جمع بندی
۴۹	.....	فصل پنجم: نتایج اعمال روش های کاهش گشتاور دندانه ای
۵۰	.....	۵-۱- مقدمه
۵۰	.....	۵-۲- بررسی ایجاد شکاف در روتور
۵۱	.....	۵-۲-۱- تغییر زاویه ی گستردگی شکاف در روتور
۵۲	.....	۵-۲-۲- تغییر عمق شکاف در روتور
۵۳	.....	۵-۲-۳- مقایسه تعداد شکاف های متفاوت در روتور
۵۵	.....	۵-۳- روش ایجاد شکاف در استاتور
۵۵	.....	۵-۳-۱- تغییر زاویه ی گستردگی شکاف در استاتور
۵۷	.....	۵-۳-۲- تغییر عمق شکاف در استاتور
۵۸	.....	۵-۴- روش جفت کردن محیطی قطعه های روتور
۶۰	.....	۵-۴-۱- انتخاب زاویه ی گستردگی α
۶۰	.....	۵-۴-۲- انتخاب زاویه ی گستردگی β برای روش جفت کردن
۶۲	.....	۵-۴-۳- ترکیب زاویه ی مناسب برای قطعه های روتور
۶۳	.....	۵-۵- ایجاد پل آهنی در روتور
۶۷	.....	۵-۶- تغییر انحنای لبه ی روتور
۶۹	.....	۵-۷- روش ترکیبی دوبعدی
۷۱	.....	۵-۸- مقایسه ی روش های کاهش ریپل گشتاور دوبعدی
۷۲	.....	۵-۹- جمع بندی
۷۵	.....	فصل ششم: نتایج روش های شبیه سازی سه بعدی کاهش ریپل گشتاور

۷۶	۱-۶-مقدمه.....
۷۶	۲-۶- روش انحراف روتور.....
۷۹	۳-۶- روش جفت کردن محوری قطعه‌های روتور.....
۸۱	۴-۶- روش ترکیبی سه‌بعدی.....
۸۳	۵-۶- مقایسه روش‌های کاهش ریپل گشتاور سه‌بعدی.....
۸۵	۶-۶- جمع‌بندی.....
۸۹	فصل هفتم: نتیجه‌گیری.....
۸۸	۱-۷- نتیجه‌گیری.....
۸۹	۲-۷- پیشنهاداتی برای آینده.....
۹۱	مراجع.....

- شکل (۱-۱): ماشین تعویض شار ساده برای نمایش اهداف تعویض شار ۴
- شکل (۱-۲): ایجاد شکاف در روتور ۹
- شکل (۲-۲): روش جفت کردن دندانه‌ها ۱۱
- شکل (۳-۲): روش مورب کردن دندانه‌های روتور ۱۱
- شکل (۴-۲): روش پله‌ای مورب کردن روتور ۱۲
- شکل (۵-۲): مسیر ساده شار هنگامیکه دندانه‌ی استاتور و روتور در یک راستا نیستند ۱۳
- شکل (۶-۲): دندانه‌ی استاتور با پل آهنی و توزیع شار در ماشین AFFSPMM ۱۵
- شکل (۱-۳): سه نوع ماشین تعویض شار ۱۹
- شکل (۲-۳): انواع ماشین‌های تعویض شار آهنربا دائم ۲۰
- شکل (۳-۳): تغییرات در ماشین‌های تعویض شار آهنربا دائم ۲۳
- شکل (۴-۳): ماشین ۱۲ فاز ۲۴/۲۲ تعویض شار آهنربا دائم ۲۳
- شکل (۵-۳): ماشین تعویض شار آهنربا دائم با سیم‌پیچی یک‌درمیان ۲۳
- شکل (۶-۳): چگالی شار حاصل از یک قطعه در موتور بدون شیار ۲۶
- شکل (۷-۳): نمایش ساده‌ی روتور و تابع نفوذپذیری فاصله‌ی هوایی ۲۷
- شکل (۱-۴): توزیع شار در ساختار ساده FSPM ۳۵
- شکل (۲-۴): نمایی دوبعدی از دو ماشین تعویض شار آهنربا دائم ۳۶
- جدول (۱-۴): تفاوت‌های ماشین SRFSPM و FSPM ۳۷
- جدول (۲-۴): ابعاد موتور روتور چند تکه ای تعویض شار آهنربا دائم ۳۸
- شکل (۳-۴): پارامترهای طراحی ماشین SRFSPM ۳۹
- شکل (۴-۴): نمای دوبعدی موتور روتور چند تکه‌ای تعویض شار آهنربا دائم ۴۰

- جدول (۳-۴): مقادیر آزمایش شده موتور روتور چند تکه ای تعویض شار آهنربا دائم ۴۰
- شکل (۵-۴): نمای سه بعدی نصف موتور روتور چند تکه ای تعویض شار آهنربا دائم ۴۱
- شکل (۶-۴): مدار الکتریکی موتور روتور چند تکه ای تعویض شار آهنربا دائم ۴۱
- شکل (۷-۴): مش بندی موتور روتور چند تکه ای تعویض شار آهنربا دائم ۴۲
- شکل (۸-۴): چگالی شار موتور روتور چند تکه ای تعویض شار آهنربا دائم ۴۳
- شکل (۹-۴): خطوط شار موتور روتور چند تکه ای تعویض شار آهنربا دائم ۴۴
- شکل (۱۰-۴): نیروی محرکه ی القایی موتور در سرعت نامی ۴۴
- شکل (۱۱-۴): هارمونیک های نیرومحرکه ی القایی در سرعت نامی ۴۵
- شکل (۱۲-۴): گشتاور دندانهای موتور در سرعت نامی ۴۵
- شکل (۱۳-۴): ولتاژ ترمینال موتور در سرعت نامی ۴۶
- شکل (۱۴-۴): طیف هارمونیک ی نیرومحرکه ی القایی ۴۷
- شکل (۱۵-۴): گشتاور خروجی موتور در سرعت نامی ۴۷
- شکل (۱۶-۴): توان ورودی موتور در سرعت نامی ۴۸
- شکل (۱-۵): ایجاد شکاف در روتور ۵۰
- شکل (۲-۵): تغییر زاویه ی گسترده ی شکاف ۵۱
- شکل (۳-۵): ریپل گشتاور خروجی در سه نوع روتور بر حسب تغییرات زاویه ی عرضی ۵۲
- شکل (۴-۵): تغییر عمق شکاف ۵۲
- شکل (۵-۵): ریپل گشتاور خروجی بر حسب تغییرات عمق شکاف ۵۳
- شکل (۶-۵): گشتاور دندانهای در سه روتور ۵۴
- شکل (۷-۵): گشتاور خروجی در سه روتور ۵۴
- شکل (۸-۵): طیف هارمونیک ی روتور با تعداد شکاف متفاوت ۵۵

- شکل (۵-۹): تغییر زاویه‌ی عرضی شکاف استاتور ۵۶
- شکل (۵-۱۰): ریپل گشتاور بر حسب تغییرات زاویه‌ی گستردگی شکاف ۵۶
- شکل (۵-۱۱): ریپل گشتاور بر حسب تغییرات عمق شکاف ۵۷
- شکل (۵-۱۲): گشتاور دندان‌های در ایجاد دو شکاف بهینه و موتور بدون تغییر ۵۸
- شکل (۵-۱۳): گشتاور خروجی در ایجاد دو شکاف بهینه و موتور بدون تغییر ۵۸
- شکل (۵-۱۴): طیف هارمونیک نیرومحرکه‌ی القایی در دو شکاف بهینه ۵۹
- شکل (۵-۱۵): ماکزیمم تا مینیمم گشتاور دندان‌های بر حسب تغییرات زاویه ۶۰
- شکل (۵-۱۶): طیف هارمونیک گشتاور دندان‌های در فرکانسهای مختلف ۶۱
- شکل (۵-۱۷): دامنه و فاز هارمونیک اصلی گشتاور دندان‌های بر حسب تغییرات زاویه ۶۱
- شکل (۵-۱۸): جفت شدن دندان‌های روتور به صورت یک‌درمیان ۶۲
- شکل (۵-۱۹): گشتاور دندان‌های موتور در روش جفت شدن دندان‌های روتور ۶۳
- شکل (۵-۲۰): گشتاور خروجی موتور در روش جفت شدن دندان‌های روتور ۶۳
- شکل (۵-۲۱): طیف هارمونیک نیرومحرکه‌ی القایی در روش جفت شدن دندان ۶۴
- شکل (۵-۲۲): تغییر عرض پل آهنی روتور ۶۵
- شکل (۵-۲۳): ریپل گشتاور خروجی و ماکزیمم تا مینیمم گشتاور دندان‌های ۶۵
- شکل (۵-۲۴): گشتاور دندان‌های موتور در روش ایجاد پل آهنی در روتور ۶۶
- شکل (۵-۲۵): گشتاور خروجی موتور در روش ایجاد پل آهنی در روتور ۶۶
- شکل (۵-۲۶): طیف هارمونیک نیرومحرکه‌ی القایی در روتور با ۱ میلی‌متر پل آهنی ۶۷
- شکل (۵-۲۷): تغییر شعاع انحنای لبه‌ی روتور ۶۷
- شکل (۵-۲۸): ریپل گشتاور خروجی را بر حسب تغییرات شعاع انحنای لبه‌ی روتور ۶۸
- شکل (۵-۲۹): گشتاور دندان‌های موتور در روش تغییر انحنای لبه روتور ۶۸

- شکل (۵-۳۰): گشتاور خروجی موتور در روش تغییر انحنای لبه روتور ۶۹
- شکل (۵-۳۱): روش ترکیبی ۷۰
- شکل (۵-۳۲): مقایسه‌ی گشتاور دندانهای سه روش ۷۰
- شکل (۵-۳۳): مقایسه‌ی گشتاور خروجی سه روش ۷۱
- شکل (۵-۳۴): طیف هارمونیک‌ی نیرو محرکه‌ی القایی روش ترکیبی ۷۲
- شکل (۵-۳۵): مقایسه روش های بکار گرفته شده دو بعدی ۷۳
- شکل (۶-۱): روش انحراف روتور ۷۷
- شکل (۶-۲): ریپل گشتاور بر حسب تغییرات زاویه انحراف روتور ۷۷
- شکل (۶-۳): گشتاور دندانهای در زاویه انحراف ۳ درجه ۷۸
- شکل (۶-۴): ریپل گشتاور خروجی در زاویه انحراف ۳ درجه ۷۸
- شکل (۶-۵): طیف هارمونیک‌ی نیرو محرکه القایی روش انحراف روتور ۷۹
- شکل (۶-۶): انواع روتورهای شبیه‌سازی شده در روش جفت کردن ۸۰
- شکل (۶-۷): گشتاور دندانهای در روش جفت کردن محوری ۸۰
- شکل (۶-۸): ریپل گشتاور خروجی در روش جفت کردن محوری ۸۱
- شکل (۶-۹): طیف هارمونیک‌ی نیرو محرکه القایی روش جفت کردن محوری قطعه‌ها ۸۱
- شکل (۶-۱۰): شکاف مورب در روتور ۸۲
- شکل (۶-۱۱): ریپل گشتاور بر حسب تغییرات زاویه انحراف شکاف در روتور ۸۳
- شکل (۶-۱۲): گشتاور دندانهای در روش ایجاد شکاف مورب ۸۳
- شکل (۶-۱۳): گشتاور خروجی در روش ایجاد شکاف مورب ۸۴
- شکل (۶-۱۴): طیف هارمونیک‌ی نیرو محرکه القایی روش شکاف مورب ۸۴
- شکل (۶-۱۵): مقایسه روش‌های کاهش ریپل گشتاور سه بعدی ۸۵

فصل اول

پیشگفتار

۱-۱- مقدمه

در حال حاضر ماشین‌های روتور آهنربا دائم^۱ (PM) بدون جاروبک به طور گسترده‌ای در صنعت لوازم خانگی، هوا فضا، کاربردهای نظامی، انرژی بادی و خودروهای نقلیه هیبریدی کاربرد دارند [۱-۳]. آهنرباها در این ماشین‌ها در داخل یا در سطح روتور نصب شده‌اند و سیم‌پیچی آرمیچر در استاتور است. معمولاً روتورهای آهنربای سطحی و آهنربای داخلی به دلیل نیروی گریز از مرکز، باید به وسیله‌ی نگه‌دارنده‌ای از جنس فولاد ضدزنگ و یا فیبر غیرفلزی محافظت شوند. از این رو، در اواخر قرن بیستم برای حل مشکلات ناشی از روتور آهنربای دائم، ماشین‌های استاتور آهنربای دائم به وجود آمدند. در بین ماشین‌های استاتور آهنربای دائم، ماشین‌های تعویض شار آهنربا دائم^۲ (FSPM) به دلیل قابلیت گشتاور خروجی، چگالی گشتاور و بازده بالا مورد توجه هستند [۴].

۱-۱-۱- ماشین‌های تعویض شار آهنربا دائم

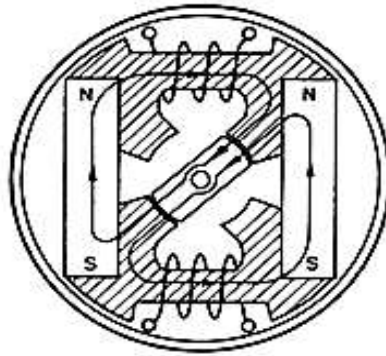
اولین ماشین FSPM احتمالاً توسط E. Hoang در سال ۱۹۹۷ پیشنهاد شده است. وی نشان داد این ماشین چگالی توان و راندمان بالایی داشته و برای خنک‌کننده‌ها و وسایلی که نیاز به سرعت و عملکرد بالا دارند، مناسب است [۵].

روش تعویض شار موجب تقویت شار پیوندی در آرمیچر شده و شار بین مقدار مثبت و منفی تغییر می‌کند، در صورتی که در ماشین‌های القایی معمولی جهت شار یک‌طرفه است. این ماشین‌ها به علت

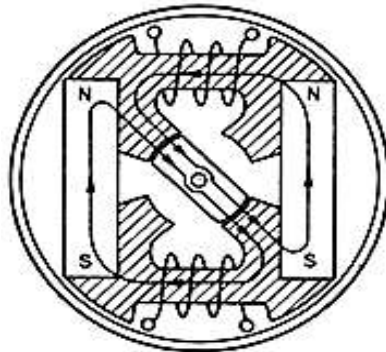
1- Permanent Magnet
2- Flux-Switching Permanent Magnet

داشتن تحریک آهنربای دائم، تلفات کمتری را در قسمت تحریک نسبت به ماشین‌های تحریک سیم‌پیچی دارند [۶].

مکانیزم عملکرد ماشین FSPM با استفاده از یک مثال ساده در شکل (۱-۱) نمایش داده شده است. ماشین به صورت دو قطب برجسته در روتور و یک جفت آهنربای دائم و سیم‌پیچی در استاتور در نظر گرفته شده است. مسیر شار در شکل (۱-۱-الف) که با فلش نمایش داده شده، در هر دو سیم‌پیچی از سمت چپ به راست است. هنگامی که روتور ۱۸۰ درجه‌ی الکتریکی حرکت می‌کند، همانند شکل (۱-۱-ب)، جهت شار پیوندی در سیم‌پیچی‌ها با اندازه‌ای برابر شکل (۱-۱-الف) اما معکوس است. مشاهده می‌شود که در هر چرخش روتور، شار معکوس شده و ولتاژ خروجی در چهار سیکل تولید می‌شود [۶]. شار تعویض شده با تغییر خود، در مقایسه با شاری که از روش پالسی یک‌طرفه در ماشین‌های القایی معمولی ایجاد می‌شود، چگالی شار دو برابر تولید می‌نماید. از آنجا که توان خروجی ماشین‌ها با توان دوم ولتاژ، رابطه‌ی مستقیم دارد، روش تعویض شار در میان ماشین‌هایی با حجم و پارامترهای برابر، توانی معادل چهار برابر ماشین‌های دیگر در حجم برابر تولید می‌کند. معکوس شدن شار موجب کاهش مقطع یوغ استاتور می‌شود؛ در نتیجه حجم مس به کار رفته برای سیم‌پیچی استاتور کاهش یافته و تلفات توان به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [۶].



(الف)



(ب)

شکل (۱-۱): ماشین تعویض شار ساده برای نمایش اهداف تعویض شار [۶]

از معایب اصلی ماشین‌های آهنربا دائم می‌توان به گشتاور دندانه‌ای^۱ زیاد آن‌ها اشاره کرد. گشتاور دندانه‌ای یک پدیده‌ی ذاتی در ماشین‌های آهنربا دائم است. این نوع گشتاور بدون وجود جریانی در سیم‌پیچی آرمیچر وجود دارد و در اثر تقابل بین شیارهای استاتور و آهنربا دائم در روتور در ماشین‌های PM بدون جاروبک به وجود می‌آید. در ماشین‌های تعویض شار، آهنربا در استاتور قرار دارد و به علت وجود ساختار برجسته‌ی استاتور و روتور و تقابل میان این دو، گشتاور دندانه‌ای در حالت مدار باز به وجود می‌آید. میانگین این گشتاور صفر بوده و بر روی مقدار میانگین گشتاور خروجی تأثیری ندارد؛ اما این گشتاور موجب لرزش و نویز شده و ریپل به وجود آمده در موتور از طریق شافت به بار

1- Cogging Torque
2- Segmented-Rotor Flux-Switching Permanent Magnet

می‌رسد. این امر باعث کاهش سرعت و دقت کنترل موتور می‌گردد و در سرعت‌های کم از اهمیت بیشتری برخوردار است [۷].

۱-۲- هدف تحقیق

کاهش گشتاور دندانه‌ای در بین ماشین‌های مغناطیس دائم حائز اهمیت است. در بین ماشین‌های تعویض شار برای حل چالش مذکور، بیشترین تحقیقات بر روی ماشین‌های تعویض شار آهنربا دائم معمولی صورت گرفته است. در صورتی که موتورهای روتور چند تکه‌ای تعویض شار آهنربا دائم^۲ (SRFSPM) مزیت‌های بیشتری از جمله کاهش مگنت و سیم‌پیچی، نسبت به موتورهای تعویض شار معمولی داشته و گشتاور دندانه‌ای و ریپل گشتاور بالایی دارد. هدف از این تحقیق طراحی بهینه موتور تعویض شار روتور چندتکه‌ای به منظور کاهش گشتاور دندانه‌ای و ریپل گشتاور خروجی است، به گونه‌ای که روش‌های مختلف برای کاهش گشتاور دندانه‌ای که در ماشین تعویض شار معمولی بررسی شده، بر روی این نوع ماشین مطالعه می‌گردد. میزان حساسیت گشتاور دندانه‌ای و ریپل گشتاور خروجی به تغییرات پارامترهای هر روش، تعیین شده و در مقدار بهینه‌ی به دست آمده تنظیم می‌شود. در این زمینه یک موتور تعویض شار مغناطیس دائم روتور چند تکه‌ای با مشخصات نامی نوعی در نظر گرفته می‌شود. سپس با استفاده از روش اجزای محدود^۱ (FEM)، ماشین مورد نظر شبیه‌سازی شده و موارد مذکور بررسی خواهند شد. همچنین روش ترکیبی بهینه‌ای برای کاهش گشتاور دندانه و ریپل گشتاور خروجی ارائه می‌گردد.

1- Finite Element Method

۱-۳- مروری بر فصل‌های پایان‌نامه

در فصل دوم برخی از کارهای پژوهشی انجام شده در زمینه‌ی کاهش گشتاور دندانه‌ای در ماشین‌های تعویض شار بررسی می‌شود. در فصل سوم انواع ساختارهای مختلف ماشین FSPM معرفی شده و در ادامه تئوری کاهش روش‌های گشتاور دندانه‌ای ارائه می‌شود. فصل چهارم ابتدا به مطالعه ساختار موتور SRFSPM اختصاص یافته و در ادامه‌ی فصل، عملکرد موتور نمونه به کمک روش اجزای محدود دو بعدی در شرایط مدار باز و شرایط نامی تحلیل می‌شود. در فصل پنجم برخی روش‌های دو بعدی و در فصل ششم روش‌های سه بعدی کاهش گشتاور دندانه‌ای بر روی ماشین مورد مطالعه، بررسی می‌شود و یک روش ترکیبی برای کاهش مؤثرتر گشتاور دندانه‌ای ارائه می‌گردد. در نهایت در فصل هفتم به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری پرداخته می‌شود.

فصل دوم

مروری بر پژوهش‌های پیشین

۲-۱- مقدمه

روش‌های موجود برای کاهش گشتاور دندانه‌ای که در ماشین‌های روتور PM به کار برده می‌شوند بر روی ماشین‌های تعویض شار مؤثر هستند. این روش‌ها به دو گروه تقسیم می‌شود. گروه اول بر روی طراحی بهینه ماشین انجام می‌گیرد. این روش‌ها علاوه بر بهبود ریل گشتاور موجب کاهش در گشتاور خروجی می‌شود. گروه دوم با تمرکز بر روش استراتژی کنترل درایو موتور صورت گرفته است [۸]. در این فصل برخی از پژوهش‌های انجام شده در زمینه طراحی ماشین‌های تعویض شار آهنربا دائم به منظور کاهش گشتاور دندانه‌ای ارائه شده است.

۲-۲- کاهش گشتاور دندانه‌ای به روش ایجاد شکاف^۱ در روتور و

استاتور

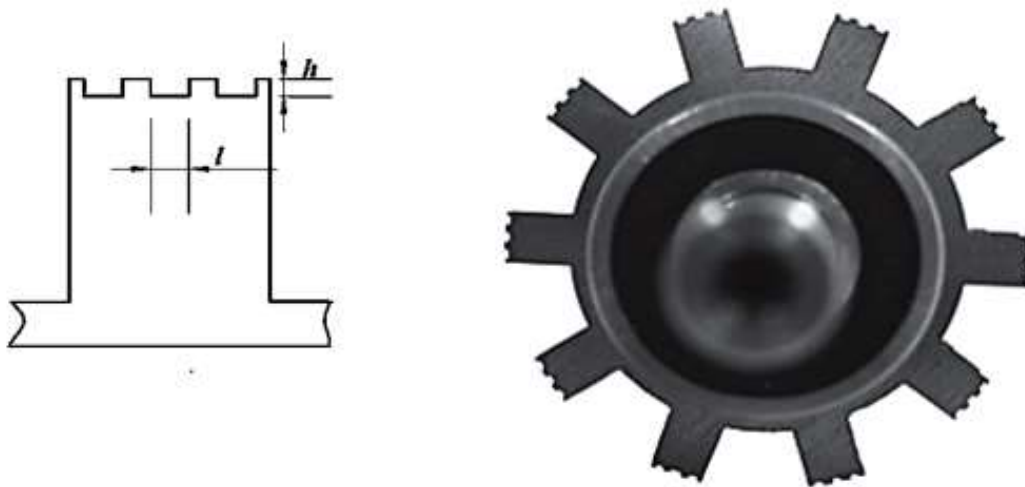
ایجاد شکاف در استاتور ماشین‌های آهنربا سطحی^۲ (SPM) و همچنین در روتور ماشین‌های آهنربا داخلی^۳ (IPM) موجب کاهش گشتاور دندانه‌ای می‌گردد. این روش با توجه به شکل (۲-۱) می‌تواند با کاهش در تغییرات اندازه نفوذپذیری نسبی فاصله هوایی، در ماشین‌های FSPM هم مؤثر واقع شود [۹]. در مرجع [۱۰] به بررسی کاهش گشتاور دندانه‌ای در ماشین‌های FSPM معمولی پرداخته شده است. در این مقاله با در نظر گرفتن تعداد متفاوتی شکاف در مکان‌های مختلف روتور و استاتور، بهترین شرایط برای ایجاد شکاف انتخاب شده است؛ در نتیجه ایجاد شکاف موجب کاهش گشتاور دندانه‌ای در ازای کاهش گشتاور خروجی می‌شود.

1- Notch

2- Surface-Mounted Permanent Magnet

3- Interior Permanent Magnet

با مطالعه بر روی ماشین شار محور تعویض شار آهنربا دائم^۱ (AFFSPMM) علاوه بر تعداد، عمق، زوایای گوشه و عرض شکاف در مرجع [۱۱] بررسی شده است و نمودار حساسیت گشتاور دندانه‌ای بر اساس تغییرات این پارامترها را به دست آورده‌اند. سپس از روش بهینه‌سازی پاسخ سطح^۲ (RSM)، شکاف بهینه محاسبه شده است. نتیجه به دست آمده مبتنی بر این است که دو شکاف بهینه‌شده از روش پاسخ سطح، تأثیر بهتری نسبت به دیگر شکاف‌ها دارند.



شکل: (۱-۲) ایجاد شکاف در روتور [۹]

در مرجع [۱۲]، با ایجاد دو شکاف به شکل نمایی در روتور موتور تعویض شار روتور چند تکه‌ای^۳ (SRFS)، موجب کاهش گشتاور دندانه‌ای شده‌اند. در این مرجع از طریق آنالیز تغییرات انرژی، گشتاور دندانه‌ای در ماشین SRFS را وابسته به عرض شکاف ایجاد شده و شکل شکاف می‌داند. ایجاد شکاف‌های نمایی نسبت به شکاف‌های مستطیلی گشتاور دندانه‌ای را به میزان کمتری کاهش داده است؛ اما میانگین گشتاور خروجی را نسبت به شکاف مستطیلی بهبود بخشیده است.

1- Axial Field Flux-Switching Permanent Magnet Machines
 2- Response Surface Methodology
 3- Segmented Rotor Flux Switching

۲-۳- کاهش گشتاور دندانه‌ای به روش جفت کردن^۱ دندانه‌های روتور

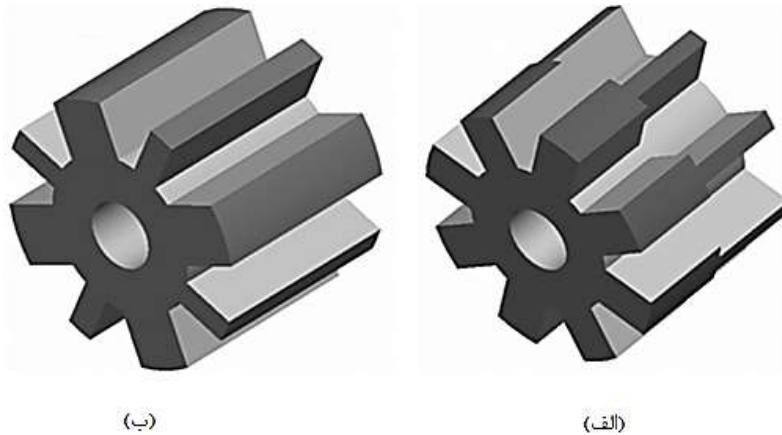
در ماشین‌های PM بدون جاروبک، جفت کردن آهنرباها به صورت محوری و محیطی موجب کاهش گشتاور دندانه‌ای می‌شود [۹]. در ماشین‌های تعویض شار، شکل موج گشتاور دندانه‌ای با تغییرات عرض دندانه‌ی روتور تغییر می‌نماید. می‌توان دو جفت عرض دندانه به دست آورد که زاویه‌ی گشتاور دندانه‌ای در آن دو، ۱۸۰ درجه اختلاف داشته باشند؛ در نتیجه اگر به صورت یک در میان در روتور بکار روند، موجب کاهش دامنه‌ی گشتاور دندانه‌ای می‌شوند [۱۳].

روش جفت کردن دندانه‌های روتور به صورت محوری^۲ (RTAP) در ماشین FSPM در مرجع [۱۳] مطالعه شده است. در این روش عرض دندانه‌ی روتور در طول محور تغییر کرده و مقادیر مناسب عرض دندانه‌ی روتور و مقدار طول مناسب برای عرض دندانه‌ی انتخاب شده گزینش می‌شود. انتخاب بهینه این موارد با شبیه‌سازی سه بعدی میسر می‌شود. شکل (۲-۲) روش جفت کردن دندانه‌های روتور را به صورت محوری و محیطی نمایش می‌دهد. روش جفت کردن دندانه‌ها به صورت محیطی^۳ (RTCP) تنها در ماشین‌هایی با تعداد دندانه‌های زوج روتور کاربرد دارد. در این روش تنها عرض دندانه‌های منتخب، به صورت یک در میان در روتور بکار می‌روند. بنابراین در روش محوری، تعداد دندانه‌های روتور اهمیتی ندارد. از مزیت‌های دیگر این روش، بالانس بودن روتور نسبت به روش محیطی است.

در مرجع [۱۴] مقایسه‌ای میان روش جفت شدن محیطی دندانه‌های روتور با دیگر روش‌ها از جمله پخ کردن^۴، مورب کردن^۵ و شکاف روتور انجام داده‌اند. روش جفت شدن دندانه‌ها به صورت محیطی موجب کاهش گشتاور دندانه‌ای می‌شود؛ اما نسبت به دیگر روش‌های مقایسه شده، اثرگذاری کمتری بر

1- Pairing
2- Rotor Teeth Axial Pairing
3- Rotor Teeth Circumferential Pairing
4- Chamfering
5- Skewing

روی گشتاور دندانه‌ای داشته و اندازه‌ی نیرو محرکه‌ی القایی کمتر تحت تأثیر قرار گرفته در حالی که افزایش درصد اعوجاج هارمونیک نیرو محرکه‌ی القایی را به همراه دارد.

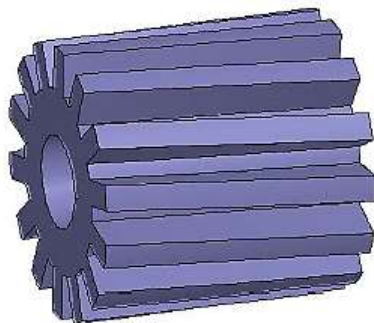


شکل (۲-۲): روش جفت کردن دندانه‌ها (الف) روش جفت کردن دندانه‌های روتور به صورت محوری (ب) روش

جفت کردن دندانه‌های روتور به صورت محیطی [۱۳]

۲-۴- کاهش گشتاور دندانه‌ای به روش مورب کردن دندانه‌های روتور

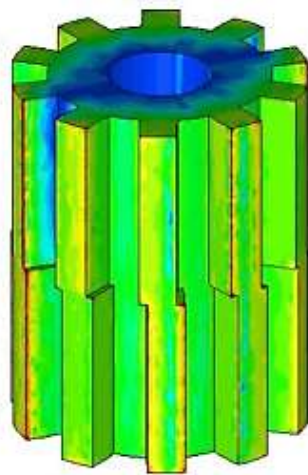
روش مورب کردن دندانه‌های روتور در ماشین‌های PM بسیار رایج است. وجود آهنربا و سیم‌پیچی در استاتور ماشین‌های PMFS، ایجاد تغییرات در استاتور را مشکل‌تر از روتور می‌نماید. در مرجع [۱۴]، روش مورب کردن دندانه‌های روتور همانند شکل (۲-۳) را با روش جفت کردن دندانه‌ها، پخ کردن و شکاف در روتور مقایسه شده است. نتایج مقاله نشان می‌دهد که روش مورب کردن علاوه بر اثرگذاری بیشتر نسبت به دیگر روش‌ها، موجب کاهش گشتاور خروجی می‌شود.



شکل (۲-۳): روش مورب کردن دندانه‌های روتور [۱۴]

در مرجع [۱۵]، روش پله‌ای مورب کردن روتور^۱ (RSS) در ماشین PMFS، پیشنهاد شده است. نتایج شبیه‌سازی سه بعدی ماشین حاکی از آن است که علاوه بر کاهش گشتاور دندانه‌ای و ریپل ماشین، تعداد و زاویه‌ی بهینه‌ی مورب کردن پله‌ها با هارمونیک‌های گشتاور و تعداد قطب‌های روتور مرتبط است.

اجرای روش پله‌ای مورب کردن روتور را با توجه به شکل (۲-۴) از دیگر روش‌های مورب کردن آسان‌تر است. در این روش، گشتاور کل ماشین با صرف‌نظر از اثرات پله‌ها در طول محور نسبت به هم، از جمع گشتاورهای دندانه‌ای ایجاد شده از هر پله به دست می‌آید. این مرجع سه روش کاهش گشتاور دندانه‌ای از جمله: تعیین عرض بهینه‌ی دندانه‌ی روتور، مورب کردن پله‌ای و جفت کردن محوری دندانه‌های روتور را به صورت سه بعدی شبیه‌سازی کرده و با هم مقایسه نموده است. نتایج حاکی از آن است که دو روش مورب کردن پله‌ای و جفت کردن محوری دندانه‌های روتور مؤثر بوده اما روش جفت کردن محوری دندانه‌ها برای بهبود ریپل گشتاور با شرایط بار کم مفید بوده و در شرایط بار زیاد موجب افزایش ریپل گشتاور می‌گردد؛ در حالی که روش پله‌ای مورب کردن روتور در تمامی محدوده‌های باری باعث کاهش ریپل گشتاور می‌شود [۱۶].

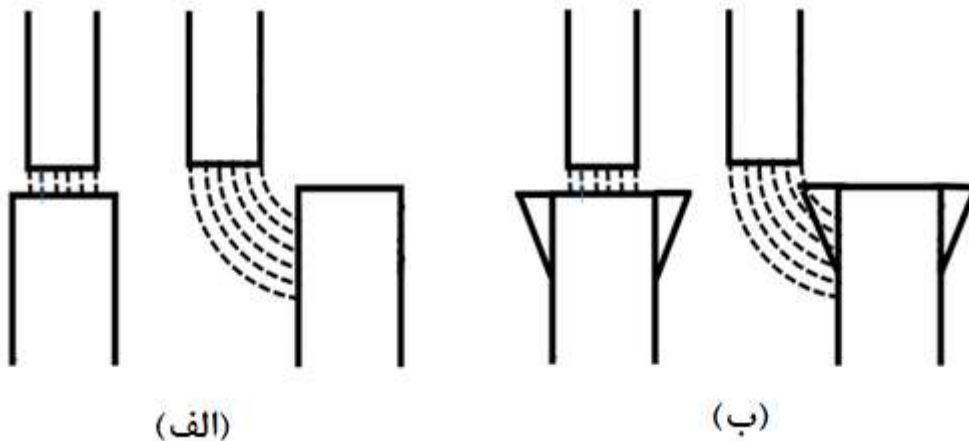


شکل (۲-۴): روش پله‌ای مورب کردن روتور [۱۶]

۲-۵- کاهش گشتاور دندانه‌ای به روش شکل‌دهی قطب^۱ روتور

شکل‌دهی قطب‌های روتور یکی از روش‌های مؤثر در کاهش گشتاور دندانه‌ای است که موجب کم کردن رلوکتانس فاصله‌ی هوایی می‌شود. تغییرات نفوذپذیری فاصله‌ی هوایی یکی از پارامترهای اساسی در گشتاور دندانه‌ای است.

در مرجع [۱۷]، با تغییر لبه‌ی دندانه روتور موجب کاهش در گشتاور دندانه‌ای ماشین FSPM شده‌اند. رلوکتانس فاصله‌ی هوایی تابعی از مکان روتور است. با توجه به شکل (الف-۲-۵) اگر دندانه‌ی استاتور و روتور همپوشانی کمتری داشته باشند، شاری که مسیر منحنی شکل را در فاصله‌ی هوایی طی می‌کند در مسیر خود با رلوکتانس بیشتری مواجه می‌شود.



شکل (۲-۵): مسیر ساده‌ی شار هنگام عبور دندانه‌ی روتور از استاتور (الف) دندانه‌ی روتور بدون لبه (ب) دندانه‌ی روتور با لبه [۱۵]

اضافه نمودن آهن بیشتر در لبه‌ی دندانه‌ی روتور همانند کفشک قطب، رلوکتانس مسیر را کاهش می‌دهد؛ بنابراین گشتاور دندانه‌ای با تغییرات هموارتر رلوکتانس مسیر شار، کاهش می‌یابد. در این مرجع رلوکتانس مسیر را به صورت تابعی از مکان دندانه‌ی روتور نسبت به استاتور به دست آورده و مشتق این

تابع را نسبت به مکان برابر صفر قرار داده تا کمترین مقدار رلوکتانس را با توجه به مکان دندانه‌ی روتور نسبت به استاتور را بیابد. از این طریق پارامترهای لبه معین می‌شود. میانگین گشتاور خروجی به میزان کمی کاهش یافته و در ادامه اشاره شده است که این روش در مقایسه با روش مورب کردن برای ساخت ماشین‌های FSPM پرکاربرد، آسان‌تر است.

۲-۶- کاهش گشتاور دندانه‌ای به روش ایجاد پل آهنی^۱ در استاتور

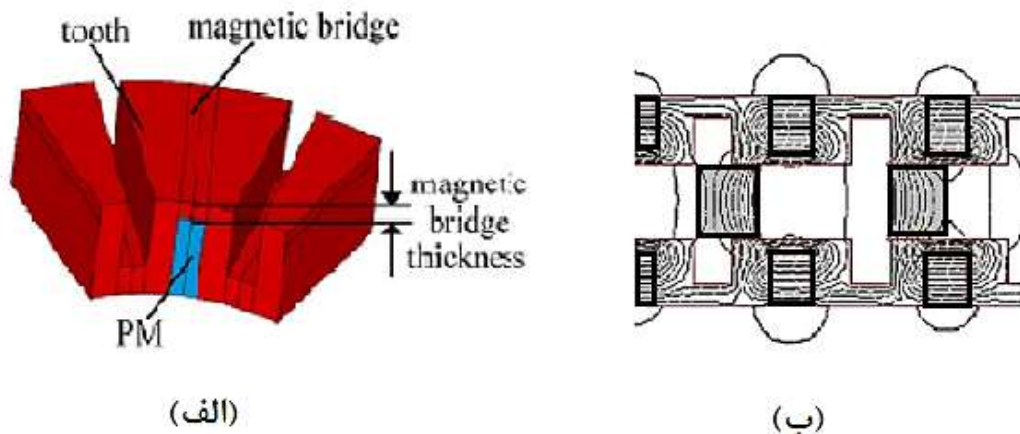
ایجاد پل آهنی در استاتور ماشین FSPM جزء روش‌های کاهش گشتاور دندانه‌ای است که کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ زیرا اگر مقدار ضخامت آهن به کار رفته زیاد شود، عبور شار را در فاصله‌ی هوایی کاهش می‌دهد. مقدار عبور بیشتر شار از آهن، نتیجه‌ی کاهش شار پیوندی را در پی داشته و گشتاور خروجی کم می‌شود [۱۸].

استفاده از پل آهنی در استاتور ماشین FSPM، موجب یکپارچه شدن هسته‌ی آهنی استاتور می‌شود [۱۹].

در مرجع [۲۰]، روش اضافه کردن پل آهنی را در دندانه‌های استاتور ماشین AFFSPMM پیشنهاد دادند. مطابق شکل (۲-۶) پل آهنی موجب افزایش ناحیه‌ی آهنی استاتور می‌شود و نفوذپذیری بین دندانه‌ی استاتور و قطب‌های روتور را ثابت می‌نماید؛ در نتیجه‌ی کوانترژی مغناطیسی به آرامی تغییر یافته و گشتاور دندانه‌ای به شدت کاهش می‌یابد؛ بنابراین انتخاب پل آهنی با ضخامت بهینه، اهمیت فراوانی دارد؛ زیرا موجب کاهش میانگین گشتاور خروجی ماشین می‌شود. در این مرجع تأثیر ضخامت پل آهنی و عرض دندانه‌های روتور و استاتور بر روی گشتاور دندانه‌ای و گشتاور خروجی ماشین تحلیل و بررسی شده است. عرض بهینه‌ی دندانه روتور، استاتور و ضخامت پل آهنی از طریق شبیه‌سازی سه بعدی انتخاب گردیده است. روش مذکور با روش مورب کردن و ایجاد شکاف در روتور مقایسه شده

1- Iron bridge

است. نتایج نشان می‌دهد که این روش نسبت به دو روش دیگر گشتاور دندانه‌ای را به میزان بیشتری کاهش می‌دهد، همچنین اجرای این روش نسبت به دیگر روش‌ها در هر دو نوع ماشین شعاعی و محوری به آسانی امکان‌پذیر است.



شکل (۲-۶): دندانه‌ای استاتور با پل آهنی و توزیع شار در ماشین AFFSPMM (الف) دندانه‌ای استاتور با پل آهنی (ب)

توزیع شار مدارباز [۲۰]

۲-۷- جمع‌بندی

در این فصل به بررسی روش‌های مختلف کاهش گشتاور دندانه‌ای در ماشین‌های FSPM از جمله ایجاد شکاف در روتور و استاتور، جفت کردن دندانه‌های روتور، مورب کردن روتور، شکل‌دهی قطب و ایجاد پل آهنی در روتور پرداخته شده است. بیشتر تحقیقات انجام‌شده، در زمینه‌ی کاهش گشتاور دندانه‌ای، بر روی ماشین‌های FSPM با روتور ساده تمرکز دارند و تنها از ارزیابی تغییرات گشتاور دندانه‌ای در طراحی بهینه ماشین استفاده شده است.

فصل سوم

انواع ساختارهای ماشین تعویض شار آهنربا

دائم

۳-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا انواع ساختارهای ماشین‌های تعویض شار آهنربا دائم بررسی شده سپس تحلیل و بررسی روش‌های کاهش گشتاور دندانه‌ای صورت گرفته است. در ادامه نیز به بررسی روش‌های کاهش گشتاور دندانه‌ای مورد نظر پرداخته شده است.

۳-۲- انواع ماشین‌های تعویض شار

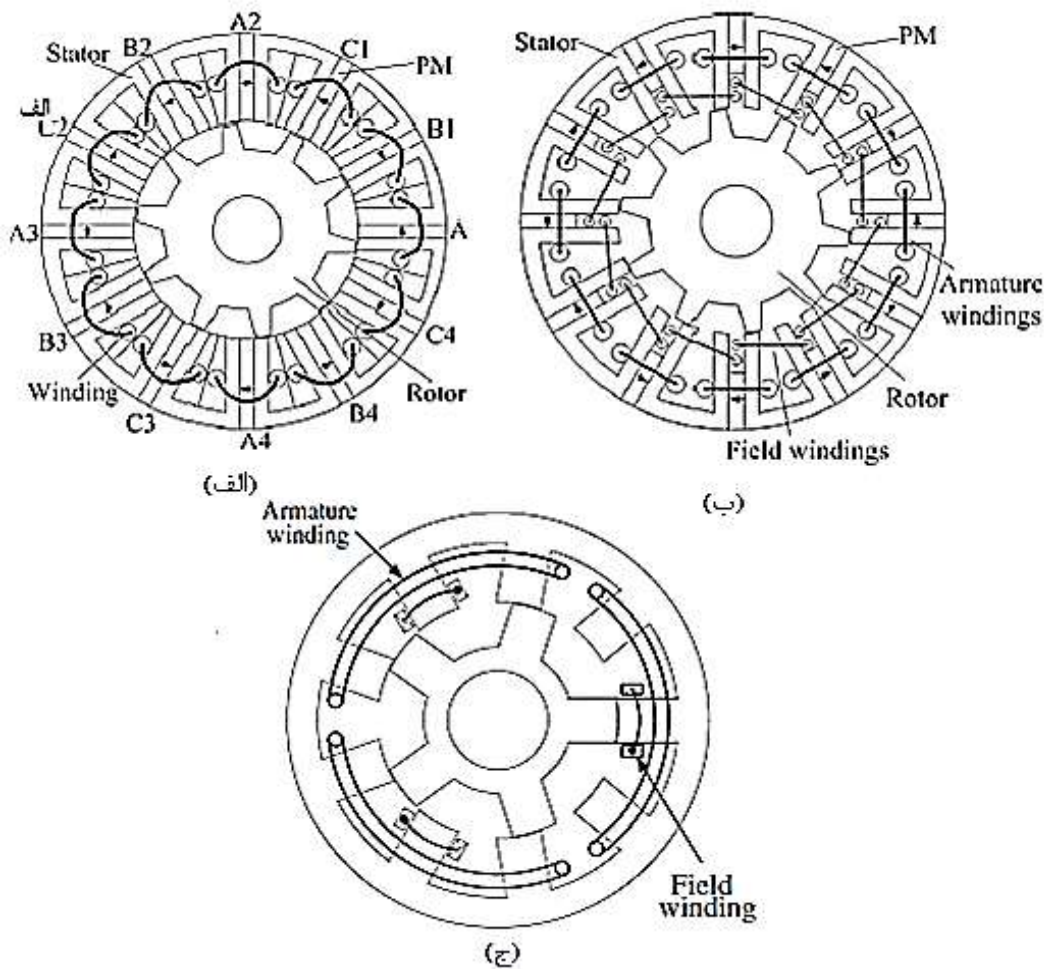
ماشین‌های تعویض شار با توجه به حالت‌های تحریک، مطابق شکل (۳-۱) به سه دسته تقسیم می‌شوند که عبارت‌اند از: ماشین‌های تعویض شار تحریک آهنربا دائم (FSPM)، ماشین‌های تعویض شار تحریک ترکیبی^۱ (HEFS) و ماشین‌های تعویض شار تحریک سیم‌پیچی^۲ (WEFS). در میان سه ماشین تعویض شار، تنظیم چگالی شار فاصله‌ی هوایی و نیرو محرکه‌ی القایی ماشین‌های HEFS و WEFS با تنظیم اندازه و جهت جریان‌های DC که به سیم‌پیچی میدان تحریک وارد می‌شوند، امکان‌پذیر است. نتیجه‌ی تنظیم جریان میدان، بهره‌برداری بهینه و قابلیت تضعیف شار ماشین در توان ثابت بوده که برای گسترش دامنه‌ی سرعت ماشین مفید است [۲۱].

۳-۲-۱- انواع ماشین‌های تعویض شار آهنربا دائم

ماشین‌های تعویض شار آهنربا دائم از لحاظ ساختار به چهار دسته‌ی ماشین‌های شار شعاعی^۳، شار محوری^۴، شار متقاطع^۵ و خطی^۶ تقسیم می‌شوند.

-
- 1- Hybrid-Excited Flux-Switching
 - 2- Wound-Excited Flux-Switching
 - 3- Radial-Flux
 - 4- Axial-Flux
 - 5- Transverse-Flux
 - 6- Linear-Flux

ماشین‌های شار شعاعی تعویض شار آهنربا دائم مطابق شکل (۳-۲-الف) جزء اولین و پرکاربردترین ماشین‌های تعویض شار هستند. بیشتر تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی ماشین‌های تعویض شار، شار شعاعی است. مشهورترین ماشین شار شعاعی ۱۲/۱۰ قطب بوده که بیشتر مطالعات در زمینه‌ی کاهش گشتاور دندانه‌ای بر روی این ماشین اجرا شده است [۲۲].

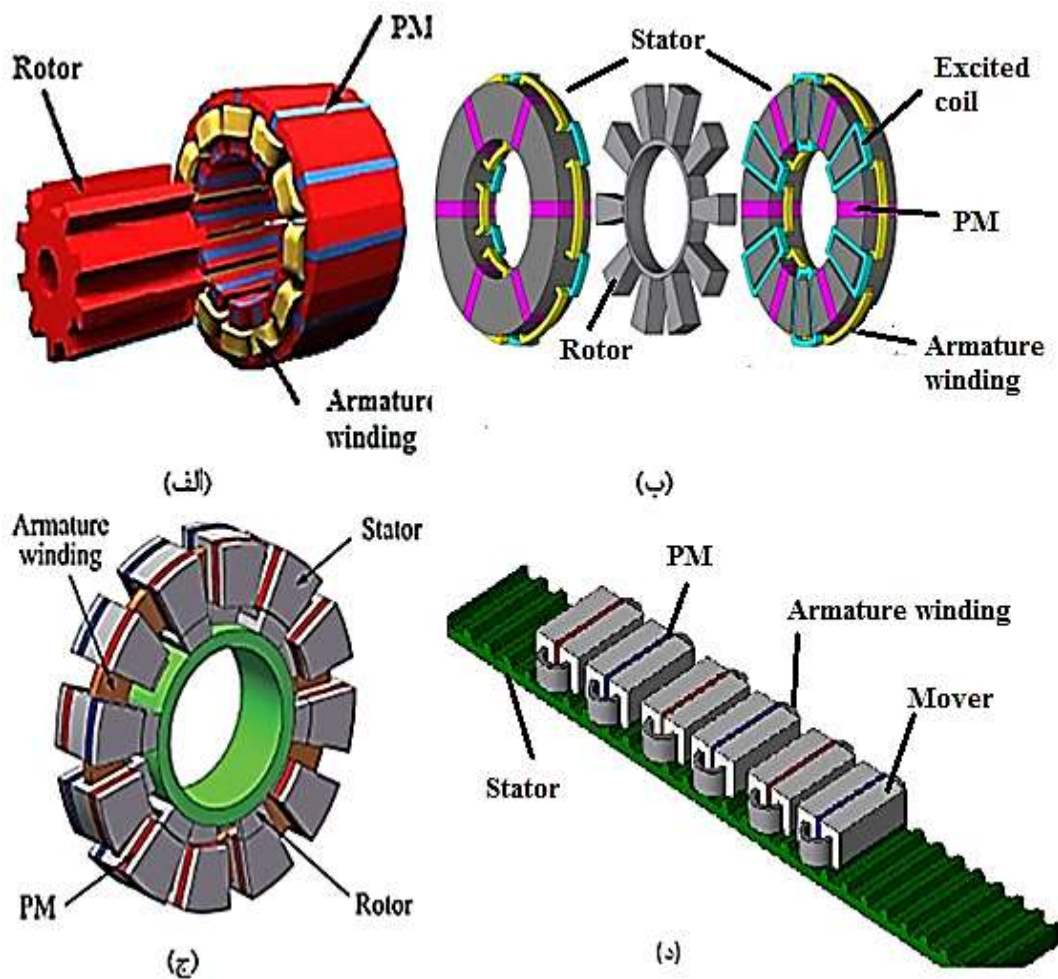


شکل (۳-۱): سه نوع ماشین تعویض شار (الف) ماشین تعویض شار آهنربا دائم [۲۳] (ب) ماشین تعویض شار تحریک هیبریدی [۲۳] (ج) ماشین تعویض شار تحریک سیم‌پیچی [۲۴]

ماشین‌های شار محوری تعویض شار آهنربا دائم با توجه به شکل (۳-۲-ب) به دلیل نوع دیسکی و کم‌حجم بودن بیشتر در زمینه‌ی انرژی‌های بادی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۵].
نوع شار متقاطع تعویض شار آهنربا دائم مطابق شکل (۳-۲-ج) به تازگی در ژنراتورهای بادی کم سرعت به کار رفته و این نوع ماشین از لحاظ چگالی گشتاور به ماشین‌های شار شعاعی و شار محوری

برتری دارد [۲۶].

ماشین‌های خطی تعویض شار آهنربا دائم همان‌طور که در شکل (۳-۲-ج) نمایش داده شده است، در صنایعی که نیاز به ایست زیاد دارند همانند قطارهای شهری یا استخراج انرژی موج کاربرد دارند. آهنربا و سیم‌پیچی‌ها تنها بر روی متحرک کوچک قرار گرفته است؛ بنابراین برخلاف ماشین‌های PM خطی طولی معمولی، مقدار مصرف سیم‌پیچی و آهنربا را کاهش می‌دهد [۲۷].



شکل (۳-۲): انواع ماشین‌های تعویض شار آهنربا دائم (الف) شار شعاعی [۲۳] (ب) شار محوری [۲۸] (ج) شار متقاطع [۲۶] (د) خطی [۲۹]

۳-۲-۲- پیشرفت‌های اخیر در ماشین‌های تعویض شار آهنربا دائم

پیشرفت‌های اخیر ماشین‌های PMFS را می‌توان به سه گروه تقسیم‌بندی نمود که عبارت‌اند از:

- نوع هسته استاتور
- ترکیب تعداد قطب‌های استاتور و روتور و تعداد فاز بیشتر
- نوع سیم‌پیچی آرمیچر

۳-۲-۱- تغییرات نوع هسته استاتور

در مرجع [۳۰]، سه نوع هسته متفاوت استاتور به ترتیب هسته E شکل، هسته C شکل و ساختار چند دندانه با توجه به شکل (۳-۳) پیشنهاد شده است. این سه ماشین نسبت به ماشین‌های (FSPM) معمولی، چگالی گشتاور بالایی دارند.

در مرجع [۳۱]، نوع جدید ماشین FSPM به نام ماشین هالبخ تعویض شار آهن‌ریا دائم^۱ (HFSPM) با توجه به شکل (۳-۳) پیشنهاد شده است که گشتاور این ماشین ۲۰ درصد بیشتر از ماشین هسته‌ی C شکل معمولی است. این ماشین از لحاظ فاز و حجم برابر با ماشین هسته‌ی C شکل بوده اما از آهن‌ریای کمتری در این ساختار استفاده شده است. ساختار استاتور پیچیده‌تر بوده و جایگذاری آهن‌ریاهای سطحی که بیرون هسته‌ی استاتور را پوشانده است، سخت‌تر از ماشین‌های هسته‌ی C شکل معمولی است.

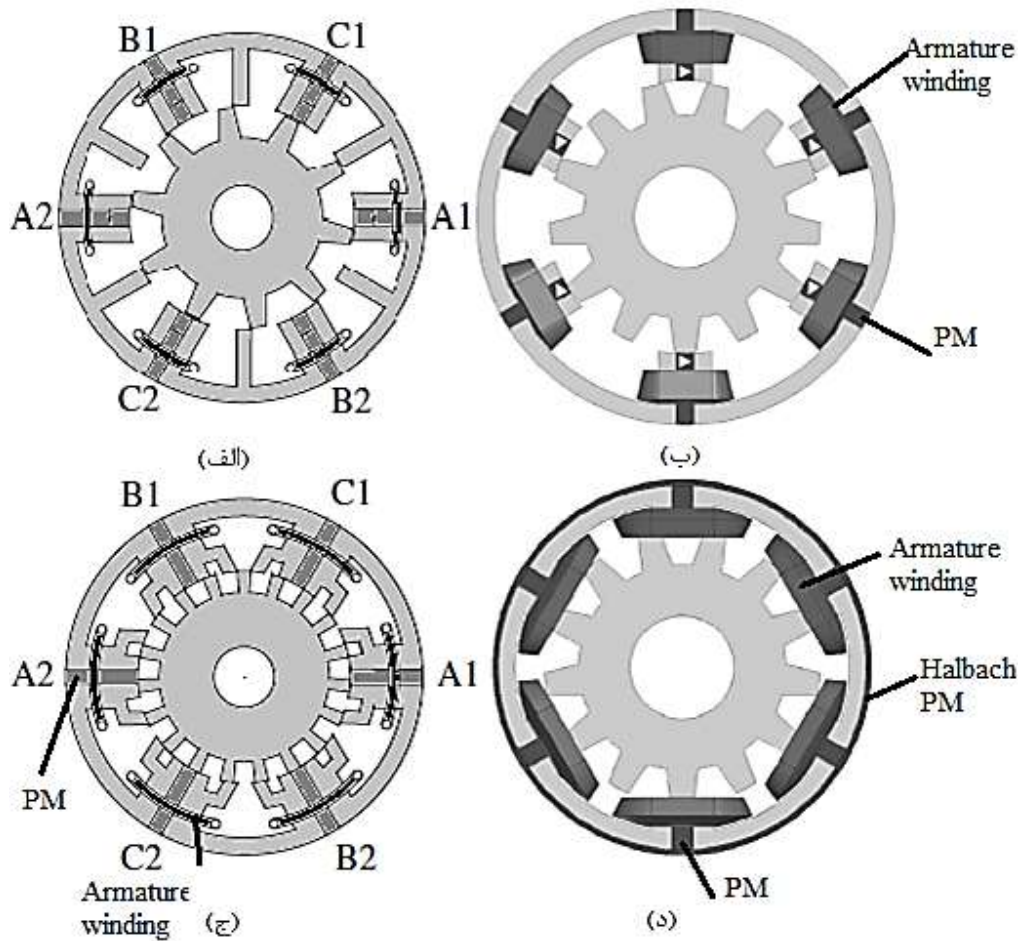
۳-۲-۲- تغییرات در ترکیب تعداد قطب‌های استاتور و روتور و تعداد فاز

فازهای متفاوتی از ماشین FSPM با ترکیب‌های متفاوتی از قطب‌های استاتور و روتور تولید شده است؛ برای مثال ماشین ۸/۶ قطب دو فاز (تعداد دندانه‌های استاتور و روتور به ترتیب هشت و شش است.) و ماشین ۴/۲ قطب تک فاز که برای سرعت‌های بالا به کار برده می‌شوند.

ماشین‌های چند فازه FSPM به علت قابلیت تحمل خطای بالا و در نتیجه‌ی آن قابلیت اطمینان بالا، ریپل گشتاور، نویز و لرزش کم برای تولید انرژی بادی کاربرد دارند. ماشین‌های ۹ فاز ۳۶/۳۴ و ۱۲

1- Halbach Flux- Switching Permanent Magnet

فاز ۲۴/۲۲ مطابق شکل (۳-۴) برای کاربرد در انرژی بادی ساخته شده‌اند [۳۲].

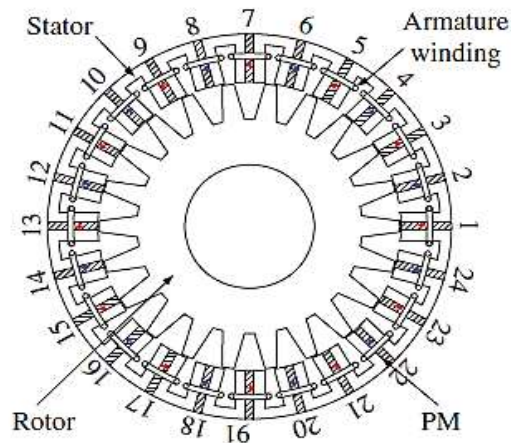


شکل (۳-۳): تغییرات در ماشین‌های تعویض شار آهنربا دائم (الف) هسته E شکل [۳۱] (ب) هسته C شکل [۳۰] (ج) چنددندانه [۳۰] (د) هالباخ [۳۱]

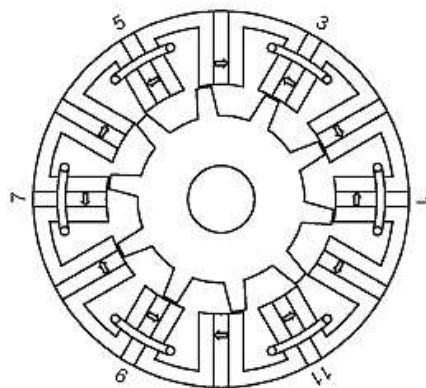
۳-۲-۲-۳- تغییرات سیم‌پیچی آرمیچر

تأثیر سیم‌پیچی آرمیچر با توجه به عملکرد الکترومغناطیسی ماشین‌های FSPM در مرجع [۳۳] توضیح داده شده است. قابلیت تحمل خطا با استفاده از سیم‌پیچی یک در میان مطابق شکل (۳-۵) افزایش می‌یابد، زیرا اندوکتانس متقابل بین فازها تقریباً صفر شده و مدار مغناطیسی و گرمایی میان سیم‌پیچ‌های آرمیچر به دلیل وجود دندانه‌های بدون سیم‌پیچی میان دندانه‌های سیم‌پیچی شده ایزوله

شده است؛ اما بارگذاری بیش از حد ظرفیت این نوع ماشین، باعث اشباع مغناطیسی شدید در دندانه‌های باریک‌تر استاتور می‌شود.



شکل (۳-۴) ماشین ۱۲ فاز ۲۴/۲۲ تعویض شار آهنربا دائم [۳۲]



شکل (۳-۵): ماشین تعویض شار آهنربا دائم با سیم‌پیچی یک‌درمیان [۳۳]

۳-۳- تحلیل و بررسی گشتاور دندانه‌ای در ماشین تعویض شار

آهنربا دائم

گشتاور ماشین تعویض شار آهنربا دائم از رابطه‌ی (۳-۱) به دست می‌آید [۱۲]:

$$T = T_{avg} + T_{cog} \quad (۱-۳)$$

به طوری که T_{avg} میانگین گشتاور و T_{cog} گشتاور دندانه‌ای است. گشتاور دندانه‌ای حاصل از تغییرات انرژی است که به وسیله‌ی چرخش روتور ایجاد می‌شود. تغییرات انرژی در قسمت‌های آهنی در مقایسه با تغییرات در فاصله‌ی هوایی قابل صرف‌نظر بوده، در نتیجه گشتاور دندانه‌ای به صورت معادله (۲-۳) به دست می‌آید:

$$T_{cog}(\alpha) = -\frac{\partial W(\alpha)_{airgap}}{\partial \alpha} \quad (۲-۳)$$

$$= -\frac{\partial}{\partial \alpha} \left[\frac{1}{2\mu_0} \cdot L_s \cdot \frac{1}{2} (R_2^2 - R_1^2) \int_0^{2\pi} G^2(\theta) \cdot B^2(\theta, \alpha) d\theta \right]$$

که L_s ، R_1 ، R_2 ، $G(\theta)$ ، $B(\theta, \alpha)$ به ترتیب طول محور، شعاع داخلی استاتور، شعاع داخلی روتور، نفوذپذیری نرمالیزه شده‌ی فاصله‌ی هوایی، تابع چگالی شار و زاویه‌ی مکان روتور است.

۳-۴- روش‌های به کاررفته برای کاهش گشتاور دندانه‌ای

در فصل دوم برخی از روش‌های کاهش گشتاور دندانه‌ای که در ماشین‌های FSPM انجام گرفته است، توضیح داده شد. شبیه‌سازی روش‌های کاهش گشتاور دندانه‌ای در نرم‌افزار المان محدود به دو صورت دو بعدی و سه بعدی امکان‌پذیر است. از آنجایی که روش سه بعدی دارای خطای بیشتر و نیازمند زمان بیشتری است، در مواقعی که می‌توان از شبیه‌سازی دو بعدی برای ماشین مورد نظر استفاده نمود، شبیه‌سازی دو بعدی ارجحیت دارد. ماشین روتور چند تکه‌ای تعویض شار آهنربا دائم، جزء گروه ماشین‌های شار شعاعی بوده که می‌توان این ماشین‌ها را به صورت دو بعدی شبیه‌سازی نمود؛ بنابراین از بین روش‌های کاهش گشتاور دندانه‌ای، روش‌های دو بعدی انتخاب شده است.

۳-۴-۱- تئوری روش ایجاد شکاف در روتور و استاتور

به دلیل پیچیده بودن ساختار استاتور نسبت به روتور، ایجاد شکاف در روتور ترجیح داده می‌شود.

گشتاور دندانه‌های ماشین به صورت رابطه (۳-۲) به دست می‌آید. مطابق مرجع [۱۲]، در ماشین روتور چند تکه‌ای تعویض شار آهنربا دائم به دلیل زوج بودن دندانه‌های استاتور و قطعه‌های روتور، بسط فوریه $G^2(\theta)$ و $B^2(\theta, \alpha)$ طبق رابطه (۳-۳) و (۴-۳) محاسبه می‌شود:

$$G^2(\theta) = \sum_{n=0}^{\infty} C_{nN_r} \cos nN_r \theta \quad (۳-۳)$$

$$B^2(\theta, \alpha) = \sum_{n=0}^{\infty} A_{nN_s} \cos nN_s(\theta + \alpha) \quad (۴-۳)$$

به طوری که در معادلات بالا N_s ، N_r ، C_{nN_r} و A_{nN_s} به ترتیب تعداد قطعه روتور، تعداد دندانه‌های استاتور و \ln امین هارمونیک ضریب فوریه نفوذپذیری، فاصله‌ی هوایی و چگالی شار فاصله‌ی هوایی است. در نتیجه با جای گذاری (۳-۳) و (۴-۳) در (۲-۳)، گشتاور دندانه‌ای مطابق رابطه (۵-۳) به دست می‌آید:

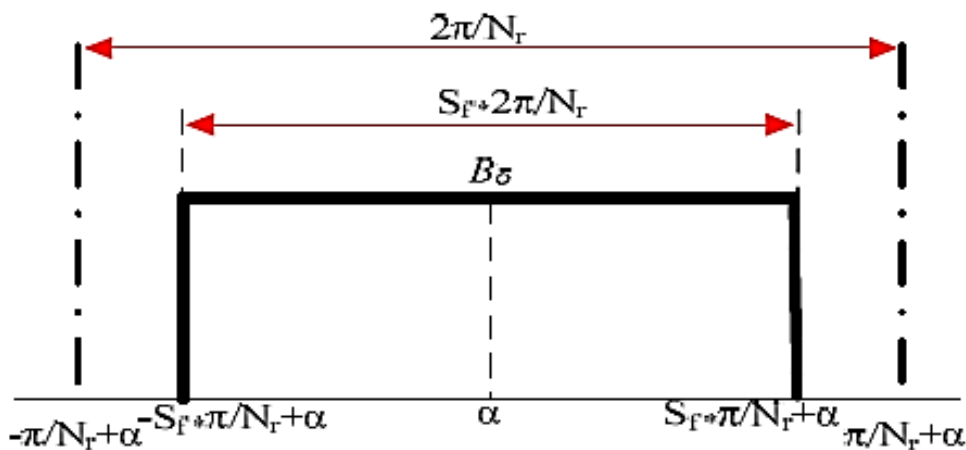
$$T_{cog}(\alpha) = T_c \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n C_{nN_L} A_{nN_L} \sin nN_L \alpha \quad (۵-۳)$$

$$T_c = N_L \cdot (R_2^2 - R_1^2) \cdot \frac{L_s \pi}{4\mu_0} \quad (۶-۳)$$

$$t_{cog} = \frac{120\pi}{n_r N_L} \quad (۷-۳)$$

که n_r سرعت روتور در رادیان بر دقیقه بوده، t_{cog} دوره‌ی تناوب گشتاور دندانه‌ای و N_L کوچک‌ترین مضرب مشترک N_s و N_r است؛ بنابراین برای کنترل این پارامترها تکنیک‌های طراحی مورد نیاز هستند تا بتوان دوره‌ی تناوب t_{cog} را افزایش داده و پیک گشتاور دندانه‌ای را کم کرد.

از رابطه‌های (۵-۳) و (۶-۳) می‌توان دریافت که گشتاور دندانه‌ای به‌طور مستقیم به ابعاد موتور بستگی دارد، اما از آنجا که گشتاور خروجی به این ابعاد وابسته است، با تغییر این ابعاد گشتاور خروجی به شدت تغییر می‌کند؛ در نتیجه می‌توان با کنترل N_L ، C_{nN_L} و A_{nN_L} گشتاور دندانه‌ای را کنترل نمود. شکل (۶-۳) چگالی شار ایده‌آل فاصله‌ی هوایی را در یک قطعه موتور و در حالتی که موتور بدون شیار است نمایش می‌دهد. k_f نمایانگر طول قطعه به گام قطعه است.



شکل (۶-۳): چگالی شار حاصل از یک قطعه در موتور بدون شیار [۱۲]

به کمک رابطه (۸-۳) به دست می‌آید:

$$A_{nN_L} = \frac{N_r}{\pi} \int_{-S_f \frac{\pi}{N_r}}^{S_f \frac{\pi}{N_r}} B_{\delta}^2 \cos(nN_L \alpha') d\alpha' = \frac{2N_r}{n\pi N_L} B_{\delta}^2 \sin(nN_L S_f \frac{\pi}{N_r}) \quad (۸-۳)$$

که B_{δ} بیشترین مقدار چگالی شار نشان داده شده در شکل (۶-۳) است. تغییر این پارامتر، عملکرد موتور را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. در نتیجه کاهش پارامتر C_{nN_L} که مربوط به شکل دندانه‌ی روتور و استاتور است، می‌تواند ضریب نفوذپذیری فاصله‌ی هوایی را کاهش دهد.

شکل ساده‌ی دندانه‌های روتور با تابع نفوذپذیری، در شکل (۷-۳) نمایش داده شده است. با توجه

به شکل بسط فوریه C_{nN_L} طبق رابطه (۹-۳) محاسبه می‌شود:

$$C_{nN_L} = \frac{N_r}{\pi} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \cos nN_L \alpha' d\alpha' = \frac{N_r}{\pi} \cdot \frac{2}{nN_L} (-1)^{n(N_L/N_r)} \sin nN_L \frac{\beta}{2} \quad (۹-۳)$$

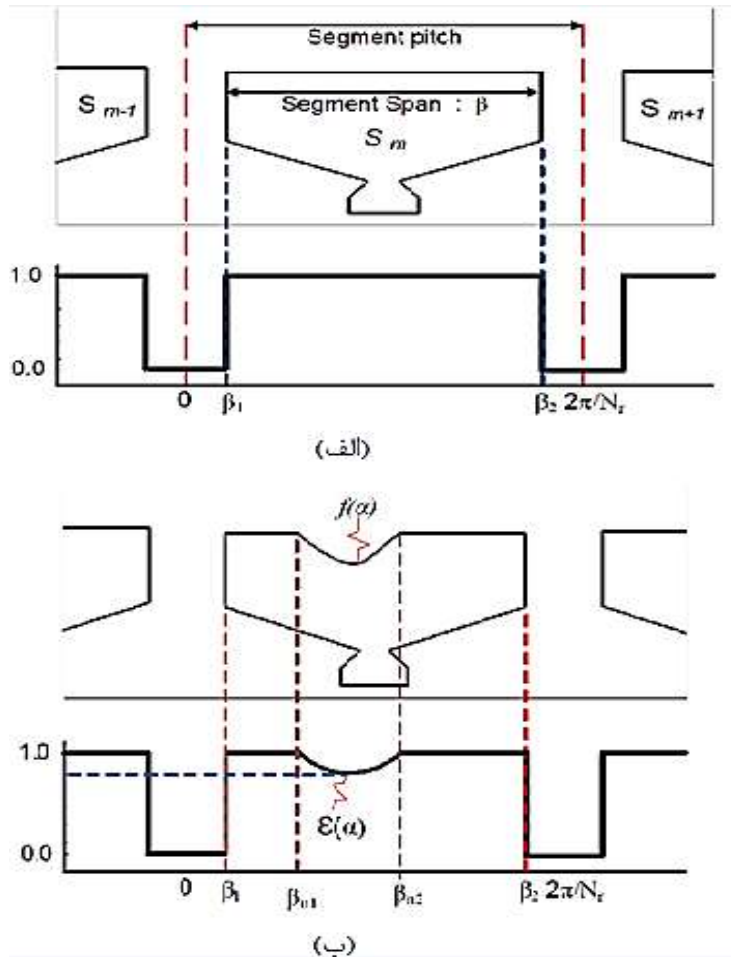
$$\beta_1 = \frac{\pi}{N_r} - \frac{\beta}{2} \quad (۱۰-۳)$$

$$\beta_2 = \frac{\pi}{N_r} + \frac{\beta}{2} \quad (۱۱-۳)$$

که β اندازه زاویه قطعه روتور است. رابطه (۹-۳) نشان می‌دهد که تابع نفوذپذیری به‌طور مستقیم وابسته به زاویه قطعه است و دوره تناوب آن $2m\pi/N_L$ بوده که m نمایش دهنده تعداد فاز است.

شکل (۳-۷-۱) قطعه روتور و تابع نفوذپذیری فاصله‌ی هوایی را قبل و پس از ایجاد شکاف از زاویه

β_{n1} تا β_{n2} نمایش می‌دهد.



شکل (۳-۷): نمایش ساده‌ی روتور و تابع نفوذپذیری فاصله‌ی هوایی (الف) بدون ایجاد شکاف (ب) با ایجاد شکاف [۱۲]

شعاع خارجی قطعه به صورت رابطه (۳-۱۲) به دست می‌آید:

$$R = \begin{cases} R_1 & : \beta_1 < \alpha < \beta_{n1}, \beta_{n2} < \alpha < \beta_2 \\ f(\alpha) & : \beta_{n1} < \alpha < \beta_{n2} \end{cases} \quad (۳-۱۲)$$

تابع نفوذپذیری نرمال شده برای هر قطعه را طبق رابطه‌ی (۳-۱۳) می‌توان نوشت:

$$C = \begin{cases} 1 & : \beta_1 < \alpha < \beta_{n1}, \beta_{n2} < \alpha < \beta_2 \\ \varepsilon(\alpha) & : \beta_{n1} < \alpha < \beta_{n2} \quad 0 < \varepsilon(\alpha) < 1 \end{cases} \quad (۳-۱۳)$$

که $\varepsilon(\alpha)$ تابعی از $f(\alpha)$ است.

بسط فوریه برای ماشین با یک شکاف در قطعه طبق شکل (۳-۸) به صورت معادله‌ی (۳-۱۴) نوشته می‌شود.

$$C_{nN_L} = \frac{N_r}{\pi} \left[\int_{\beta_1}^{\beta_{n1}} \cos nN_L \alpha' d\alpha' + \int_{\beta_{n1}}^{\beta_{n2}} \varepsilon(\alpha) \cos nN_L \alpha' d\alpha' + \int_{\beta_{n2}}^{\beta_2} \cos nN_L \alpha' d\alpha' \right]$$

$$= \frac{N_r}{\pi} \cdot \frac{4}{nN_L} (-1)^{n(N_L/N_r)} \sin nN_r \frac{\beta + \beta_{n1} - \beta_{n2}}{2}$$

$$\cos nN_L \frac{\beta_{n1} + \beta_{n2} - (\beta_1 + \beta_2)}{2} + \Omega(\beta_{n1}, \beta_{n2}, \varepsilon(\alpha))$$

در نتیجه می‌توان معادله‌ی (۳-۱۴) را طبق معادله‌ی (۳-۱۵) نوشت:

$$C_{nN_L} = \text{function}(N_r, N_L, \beta_1, \beta_2, \beta_{n1}, \beta_{n2}, \varepsilon(\alpha)) \quad (۳-۱۵)$$

معادله‌ی (۳-۱۵) نشان می‌دهد که C_{nN_L} به N_r ، N_L ، عرض شکاف، مکان شکاف و شکل شکاف بستگی دارد.

با توجه به مقالات این روش یکی از روش‌های بسیار تأثیرگذار در کاهش گشتاور دندانه‌ای است. در این تحقیق با استفاده از شبیه‌سازی دو بعدی پارامترهای مختلف شکاف و تعداد شکاف‌ها بر روی استاتور و روتور بررسی شده و شکاف بهینه از لحاظ پارامترها و تعداد انتخاب شده است.

۳-۴-۲- روش جفت شدن دندانه‌های روتور

هنگامی که همه‌ی دندانه‌های روتور همانند هم هستند، گشتاور دندانه‌ای در FSPM با تغییر عرض دندانه‌ی روتور، نه تنها در اندازه، بلکه در فاز تغییر می‌کند. در مرجع [۱۳] برای ساده شدن توضیحات، نمودار گشتاور دندانه‌ای برحسب موقعیت θ ، سینوسی فرض شده است. پس نمودار گشتاور دندانه‌ای را می‌توان به صورت معادله‌ی (۳-۱۶) به دست آورد:

$$T(W_{r1}) = A \sin(\theta + \theta_0) \quad (۳-۱۶)$$

A و θ_0 هر دو با تغییر W_{r1} تغییر می‌کنند. به طور مثال اگر عرض دندانه‌ی روتور W_{r1} باشد، پارامترهای گشتاور دندانه‌ای A_1 و θ_{01} بوده و اگر عرض دندانه‌ی روتور W_{r2} شود، پارامترهای گشتاور

دندانه‌های A_2 و θ_{02} می‌گردد. می‌توان با شبیه‌سازی دو بعدی یک جفت دندانه یافت که شرایط معادله‌های (۱۷-۳) و (۱۸-۳) را داشته باشد.

$$A_1 = A_2 \quad (17-3)$$

$$|\theta_{01} - \theta_{02}| = \pi \quad (18-3)$$

در روش جفت شدن دندانه‌ها به صورت محیطی با قرار دادن یک در میان دندانه‌هایی که شرایط (۱۷-۳) و (۱۸-۳) را دارند، تقریباً دو گشتاور دندانه‌ای که از دندانه‌ها تولید می‌شود، موجب کاهش گشتاور دندانه‌ای کل ماشین می‌گردد.

در این تحقیق ابتدا عرض دندانه‌های موردنظر با شبیه‌سازی دو بعدی شناسایی شده سپس روش مورد مطالعه با استفاده از جایگذاری محیطی دندانه‌ها به صورت یک درمیان بررسی می‌شود. روش جفت کردن محیطی دندانه‌های روتور را تنها می‌توان در ماشین‌های با تعداد دندانه‌های زوج بکار برد در صورتی که روش جفت کردن محوری دندانه‌ها در هر دو نوع ماشین با تعداد دندانه‌های زوج و فرد کاربرد دارد. در این روش طول محور روتور به چندین بخش تقسیم می‌شود و در هر بخش عرض دندانه‌ها همانند هم بوده و عرض‌های انتخاب شده در (۱۷-۳) و (۱۸-۳) به صورت یک در میان در بخش‌ها بکار می‌رود. گشتاور ایجاد شده از هر بخش به صورت معادله (۱۹-۳) می‌توان نوشت:

$$T(W_{nk}) = \frac{L_k A_k \sin(\theta + \theta_{0k})}{L_s} \quad (19-3)$$

به ترتیب عرض دندانه روتور، طول روتور بخش k ام و طول کل روتور است. با صرف نظر از اثرات انتهایی، گشتاور دندانه‌ای کل به صورت معادله (۲۰-۳) محاسبه می‌شود:

$$T = \sum_{k=1}^n T(W_{nk}) = \sum_{k=1}^n \frac{L_k}{L_s} A_k \sin(\theta + \theta_{0k}) \quad (20-3)$$

n تعداد قسمت‌های روتور است. تغییر L_k ، W_{nk} و n تعداد انتخاب‌های بیشتری را برای کاهش گشتاور دندانه‌ای نسبت به روش شعاعی ایجاد می‌نماید.

در این روش L_k با توجه به معادله (۳-۲۱) تعیین می‌شود.

$$L_1 A_1 = L_2 A_2 \quad (۳-۲۱)$$

در این تحقیق روتور به سه و پنج قسمت تقسیم شده و عرض دندانهای منتخب روش دو بعدی به صورت یک در میان در هر یک از بخش‌ها بکار برده شده است.

۳-۴-۳- روش استفاده از پل آهنی

استفاده از پل آهنی در ماشین تعویض شار آهنربا دائم معمولی موجب کاهش شار نشتی می‌شود و مقداری شار پیوندی از پل عبور می‌کند. چگالی شار در هنگام تقابل قطعه روتور و دندانه‌ی استاتور کم شده در نتیجه‌ی آن، کاهش گشتاور دندانه‌ای و گشتاور خروجی ماشین حاصل می‌گردد.

از پل آهنی در ماشین‌های تعویض شار هیبریدی هم استفاده شده است که نتیجه‌ی آن زیاد شدن اثر سیم‌پیچی میدان است [۱۹]. استفاده از این روش برای کاهش گشتاور دندانه‌ای در صورتی مؤثر است که ضمن کاهش گشتاور دندانه‌ای، تغییرات گشتاور خروجی معقول باشد.

در این تحقیق، روش پل آهنی بر روی استاتور و روتور اجرا شده و میزان بهینه‌ی ضخامت پل با استفاده از شبیه‌سازی دو بعدی تعیین می‌گردد.

۳-۴-۴- روش تغییر انحنای لبه روتور

تغییر انحنای لبه روتور در موتور (SRFSPM) موجب هموارتر شدن تغییرات نفوذپذیری فاصله هوایی می‌شود که در ماشین‌های تعویض شار آهنربا دائم به‌عنوان پخ کردن لبه روتور بکار می‌رود. این روش در ماشین‌های رلوکتانسی برای کاهش اثر عکس‌العمل آرمیچر بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹]. در مرجع [۳۴] روش‌های پخ کردن متفاوتی با زاویه‌های گوناگون ذکر شده است که ضمن کاهش گشتاور دندانه‌ای میانگین گشتاور خروجی را در میزان مطلوبی نگه دارد.

۳-۴-۵- روش انحراف روتور

روش انحراف روتور، روش رایج و بسیار مؤثر در بین ماشین‌های آهنربا دائم برای کاهش گشتاور دندانه‌ای می‌باشد. با انتخاب مناسب زاویه انحراف روتور می‌توان نفوذپذیری فاصله هوایی را بهینه نمود به گونه‌ای که گشتاور دندانه‌ای به شدت کاهش یابد [۳۵]. لازم به ذکر است که این روش نیازمند شبیه‌سازی سه بعدی است.

۳-۴-۶- روش ترکیبی

از ترکیب روش‌های ذکر شده برای کاهش گشتاور دندانه‌ای در ماشین تعویض شار استفاده نشده- است و تنها از ترکیب روش جفت شدن دندانه‌ها به صورت محوری و ایجاد شکاف در دندانه‌ی ماشین آهنربای سطحی به صورتی که عرض شکاف‌های ایجاد شده در طول دندانه با یکدیگر جفت شود، استفاده شده است [۳۶].

در این تحقیق روش ترکیبی مؤثر پیشنهاد شده و در نهایت با روش‌های دیگر مقایسه می‌گردد.

۳-۵- جمع‌بندی

در این فصل به بررسی انواع ماشین‌های تعویض شار آهنربا دائم پرداخته شده است. ساختار و کاربردهای هر یک از آن‌ها مطالعه شده و پیشرفت‌های جدیدی که در این نوع از ماشین انجام گرفته، بررسی شده است. در نهایت گشتاور دندانه‌ای و روش‌های بکار برده در تحقیق برای کاهش گشتاور دندانه‌ای تحلیل و بررسی گردیده است.

فصل چهارم

معرفی و شبیه‌سازی موتور روتور

چندتکه‌ای تعویض شار آهنربا دائم

۴-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا موتور روتور چندتکه‌ای تعویض شار آهنربا دائم بررسی شده و سپس روش‌های مختلفی که می‌توان در شبیه‌سازی دو بعدی برای کاهش گشتاور دندانه‌ای در این موتور اجرا نمود، تحلیل می‌گردد. در نهایت روش‌های مورد نظر بر روی این ماشین اجرا می‌شود.

۴-۲- اصول عملکرد ماشین روتور چندتکه‌ای تعویض شار آهنربا

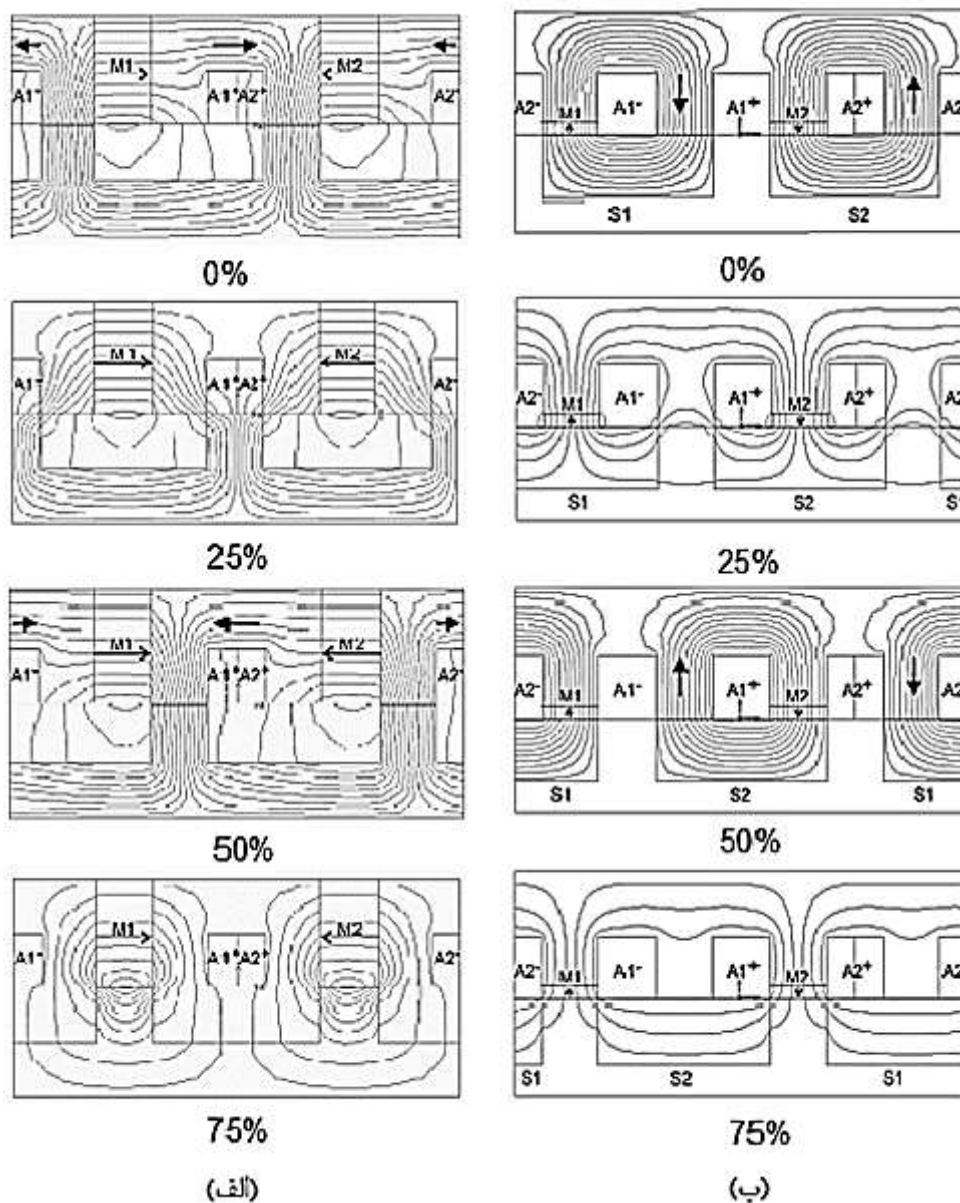
دائم

هنگامی که دندانه‌های روتور با توجه به شکل (۴-۱) در راستای دندانه‌های استاتور قرار می‌گیرند، شار در آهن پشتی استاتور یک جهت داشته و هنگامی که دندانه‌ی بعدی هم‌راستا با دندانه‌ی استاتور می‌شود، شار در جهت دیگر در آهن پشتی استاتور به وجود می‌آید. در دو موقعیت مکانی میانی که دندانه‌های استاتور و روتور در یک راستا قرار ندارند، شار پیوندی در سیم‌پیچی آرمیچر و همچنین در هسته‌ی آهن پشتی شیارهای آرمیچر صفر می‌شود. این توضیح ابتدایی برای به وجود آمدن شار دو جهته سوئیچ‌شده در ماشین تعویض شار آهنربا دائم معمولی است. این تغییر جهت شار، تنها در آهن پشتی شیار استاتور روی می‌دهد و در دیگر قسمت‌ها تغییر شار یک جهته است. ساختار روتور، رلوکتانس متغیر برای سیم‌پیچی آرمیچر نشان می‌دهد.

در ماشین دوم، مطابق شکل (۴-۱-ب) هنگامی که قطعه در راستای دو دندانه‌ی استاتور قرار می‌گیرد شار در یک جهت از دندانه‌ی سیم‌پیچی آرمیچر عبور می‌کند. مادامی که همان قطعه دوباره در راستای دو دندانه‌ی استاتور قرار می‌گیرد، جهت شار در سیم‌پیچی آرمیچر معکوس می‌شود.

دو مرحله‌ی میانی که شار در سیم‌پیچی آرمیچر صفر می‌شود، اولی هنگامی است که قطعه در وسط دندانه استاتور قرار می‌گیرد. مرحله‌ی دوم، زمانی به وقوع می‌پیوندد که فاصله‌ی غیرمغناطیسی

بین قطعه‌ها در وسط دندانهای استاتور جای می‌گیرد. با اینکه در این دو مرحله شار سیم‌پیچی صفر می‌شود اما توزیع شار در دندانهای سیم‌پیچی آرمیچر متفاوت است و نتایج قابل توجهی برای طراحی پیشرفته‌ی چند فاز دارد. در این ماشین، شار در دندانهای استاتور که سیم‌پیچی آرمیچر روی آن قرار دارد، دو جهته می‌شود و در آهن پستی تغییرات شار تنها در یک جهت انجام می‌گیرد [۳۷].

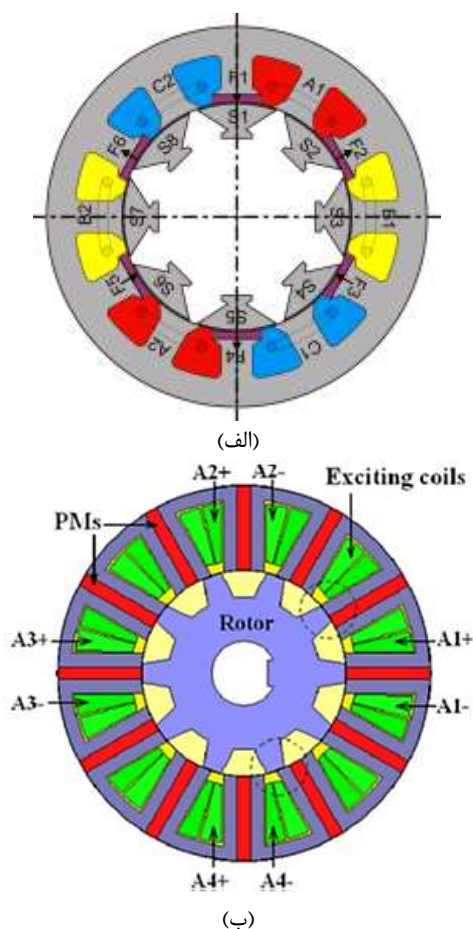


شکل (۴-۱): توزیع شار در ساختار ساده FSPM در حالت مدار باز (الف) توزیع شار در ماشین FSPM معمولی در هر ۰,۲۵ درصد سیکل (ب) توزیع شار در ماشین SR-FSPM در هر ۰,۲۵ درصد سیکل [۳۷]

۴-۳- شباهت‌ها و تفاوت‌های ماشین تعویض شار معمولی با روتور

چندتکه‌ای

از شباهت‌های این دو ماشین با توجه به شکل (۴-۲) می‌توان به تولید شار پیوندی دوجهته و تغییر رلوکتانس با تغییر مکان روتور اشاره کرد. در هر دو ماشین میدان و آرمیچر بر روی استاتور قرار گرفته است و ساختار روتور ساده، بدون هیچ‌گونه سیم‌پیچی و مگنت بوده و این استحکام، امکان استفاده از هر دو ماشین را در سرعت‌های بالا فراهم می‌کند. قرارگیری قسمت تحریک هر دو ماشین بر روی استاتور منجر به دسترسی آسان‌تر برای خنک‌سازی ماشین و در پی آن بارگذاری بالا می‌شود [۳۷]. تفاوت‌های این دو ماشین در جدول (۴-۱) ذکر شده است.



شکل (۴-۲): نمایی دوبعدی از دو ماشین تعویض شار آهنربا دائم (الف) ماشین SRFSPM [۳۷] (ب) ماشین FSPM [۱۰]

جدول (۴-۱): تفاوت‌های ماشین SRFSPM و FSPM [۳۷]

FSPM	SRFSPM
۱- شار دوجته در آهن پستی استاتور	۱- شار دوجته در دندانه‌ی آرمیچر
۲- شار تک‌جته در همه‌ی دندانه‌ها	۲- شار تک‌جته در آهن پستی استاتور و دندانه‌ی میدان
۳- مکان آهنربا در شیار بین دندانه‌های استاتور	۳- آهنرباها بر روی دندانه‌های جایگذاری شده‌اند.
۴- آهنرباها به‌صورت محیطی عمل می‌کنند.	۴- آهنرباها به‌صورت شعاعی عمل می‌کنند.
۵- کوئل به دور بیش از یک دندانه پیچیده شده است.	۵- کوئل به دور یک دندانه پیچیده شده است.
۶- مکان برای کوئل‌ها در شیارها باوجود تحریک آهنرباها، کم است.	۶- مکان برای کوئل‌ها زیاد است.
۷- انتهای سیم‌پیچی بلند	۷- انتهای سیم‌پیچی کوتاه
۸- مقدار زیادی مگنت به‌کار رفته است.	۸- مقدار کمی مگنت به‌کار رفته است.

۴-۴- پارامترهای ماشین روتور چندتکه‌ای تعویض شار آهنربا دائم

سیم‌پیچی ماشین RSFSPM به صورت سیم‌پیچی متمرکز بوده؛ در نتیجه برای طراحی استاتور، باید بیشتر به طراحی ماشین‌هایی مانند سوئیچ رلوکتانس^۱ (SRM) توجه نمود. در ماشین‌هایی با سیم‌پیچی توزیع شده، طراحی شیارها اهمیت بالایی دارد در حالی که در ماشین SRFSPM به علت استفاده از سیم‌پیچ متمرکز، دندانه‌ها و قطب‌های استاتور دارای اهمیت است. پس از انجام شبیه‌سازی‌های مختلف

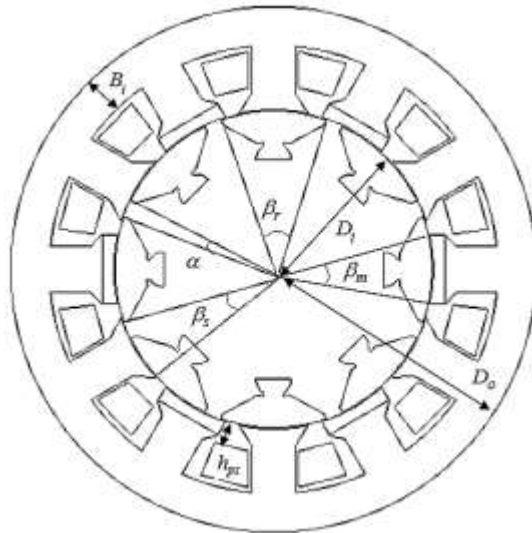
1- Switched Reluctance Motor

برای روتور و استاتور با تعداد متفاوت دندانه و قطعه، بهترین توپولوژی با توجه به ریزل گشتاور، نیرو محرکه‌ی القایی و THD ولتاژ انتخاب شده است. ابعاد در نظر گرفته شده در جدول (۲-۴) و شکل (۴-۳) مشاهده می‌شود. شرایط نامی موتور در جدول (۳-۴) نشان داده شده‌است [۳۷].

جدول (۲-۴): ابعاد موتور روتور چندتکه‌ای تعویض شار آهنربا دائم [۳۷]

پارامترها	نماد	واحد	مقادیر
طول محور	d_{ax}	mm	۱۵۰
قطر خارجی استاتور	D_o	mm	۱۵۰
عمق یوغ استاتور	B_i	mm	۱۱
قطر داخلی استاتور	D_i	mm	۹۱/۲
عرض دندانه‌ی استاتور	τ_s	mm	۱۲/۵
گسترده‌ی برآمدگی دندانه‌ی استاتور	β_s	°	۲۵
تعداد دور سیم‌پیچی آرمیچر	N_r		۱۰۰
طول فاصله هوایی	g	mm	۰/۳۵
قطر سیم کویل		mm	۱/۲۵
قطر روتور	D_r	mm	۹۰/۵
تعداد تکه‌های روتور			۸
زاویه‌ی گسترده‌ی قطعه	β_r	°	۴۱
طول آهنربا	h_{ps}	mm	۲/۸۳۵
زاویه گسترده‌ی آهنربا	β_m	°	۲۵
زاویه گسترده‌ی شیار	α	°	۵

در مرجع [۳۰] بیشتر آزمایش‌ها بر روی ماشین تعویض شار آهنربا دائم در شرایطی انجام گرفته که سرعت ماشین ۵۰۰ دور در دقیقه بوده است. در ادامه اجرای روش‌های کاهش گشتاور دندانه‌ای در این سرعت انجام شده است.



شکل (۴-۳): پارامترهای طراحی ماشین SRFSPM

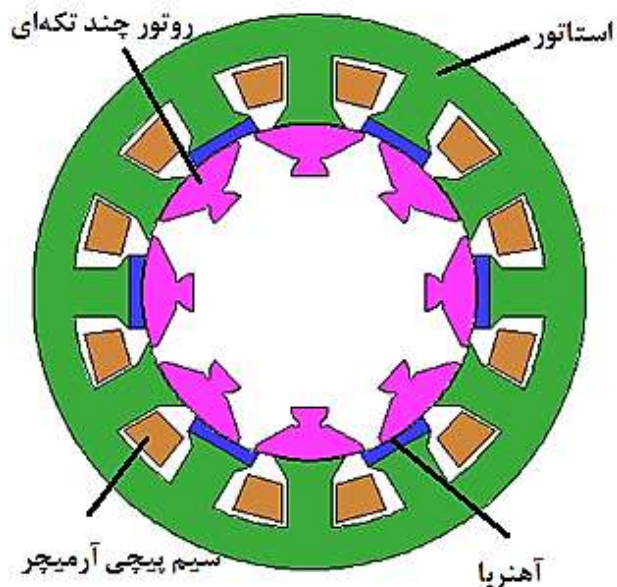
۴-۵- شبیه‌سازی موتور روتور چندتکه‌ای تعویض شار آهنربا دائم

موتور مورد مطالعه در نرم‌افزار JMAG-Designer به صورت دو بعدی شبیه‌سازی شده است. جنس هسته‌ی استاتور و قطعه‌های روتور ماده 50JN600 و جنس مغنت به کار رفته NMX-S34GH است. در شکل (۴-۴) نمای دو بعدی کل ماشین و در شکل (۴-۵) نمای سه بعدی نصف ماشین شبیه‌سازی شده، نمایش داده شده است.

۴-۵-۱- مدار الکتریکی شبیه‌سازی

موتور مورد نظر سه فاز بوده که هر فاز از دو سیم‌پیچی سری تشکیل شده است. سیم‌پیچی‌ها دور دندانه‌های بدون آهنربا، به صورت متمرکز قرار داده شده‌اند. اتصال سیم‌پیچی‌ها به صورت ستاره بوده

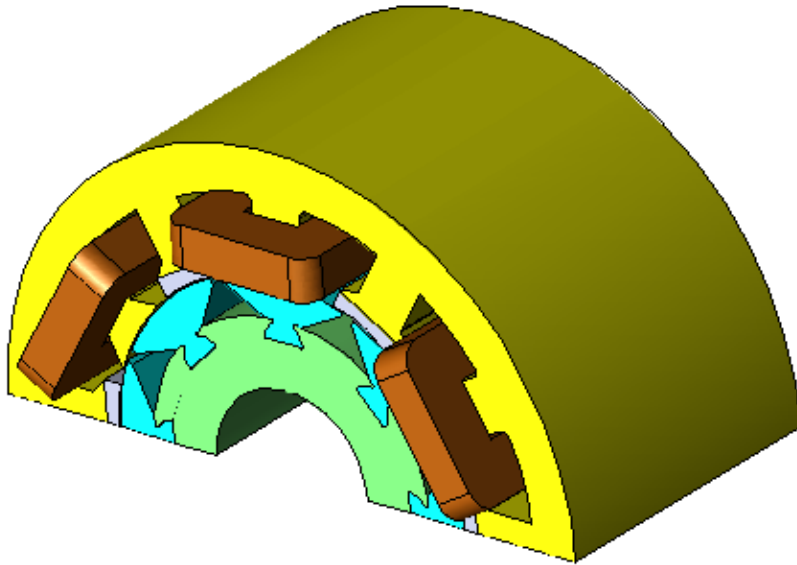
و بوده و برای هر سیم پیچ یک منبع جریان تک فاز که با منبع دیگر ۱۲۰ درجه اختلاف فاز دارد، در نظر گرفته شده است. در شکل (۴-۵) مدار شبیه سازی ماشین نشان داده شده است.



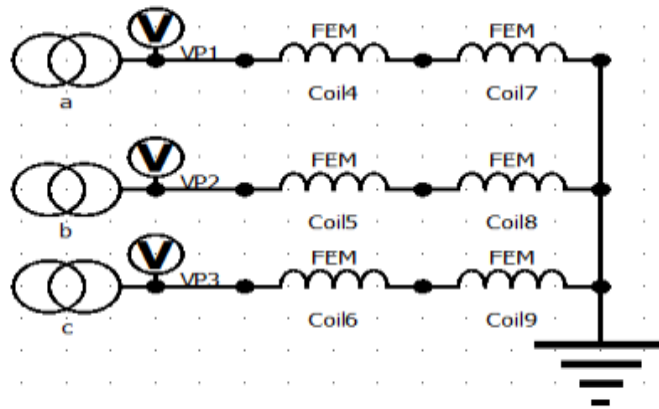
شکل (۴-۴): نمای دوبعدی موتور روتور چندتکه ای تعویض شار آهنربا دائم

جدول (۴-۳): مقادیر آزمایش شده موتور روتور چندتکه ای تعویض شار آهنربا دائم [۳۷]

مقادیر	واحد	مشخصات موتور SRFSPM
۲/۱۳	Kw	توان خروجی
۰/۵۲	V	ضریب توان
۴۱۵	V	ولتاژ پیک خط
۱۷۴	V	ولتاژ مؤثر فاز
۵۰۰	rpm	سرعت
۱۲	A	جریان مؤثر فاز
۷۶/۵	V	مقدار مؤثر نیرو محرکه ی القایی
۷۱/۴٪		بازده



شکل (۴-۵): نمای سه‌بعدی نصف موتور روتور چندتکه‌ای تعویض شار آهنربا دائم

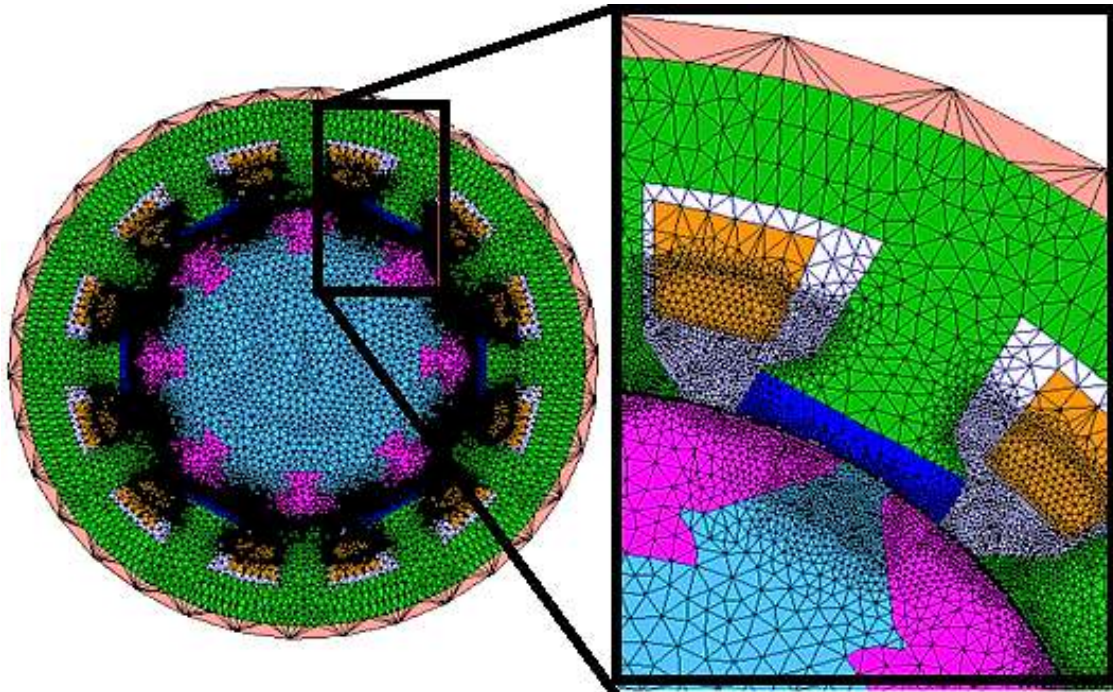


شکل (۴-۶): مدار الکتریکی موتور روتور چندتکه‌ای تعویض شار آهنربا دائم

۴-۵-۲- مش‌بندی شبیه‌سازی

اندازه‌ی مش در آهن و روتور ۲ mm و به دلیل اهمیت فراوان لبه‌های دندانه‌های روتور و استاتور ۰/۱ mm قرار داده شده است. مش کویل‌ها کم اهمیت بوده روی ۵ mm تنظیم شده و لبه‌ی مجاور

شافت استاتور 6 mm در نظر گرفته شده است. نمایی از مش بندی ماشین در شکل (۷-۴) نمایش داده شده است.



شکل (۷-۴): مش بندی موتور روتور چندتکه‌ای تعویض شار آهنربا دائم

۴-۵-۳- توزیع چگالی و خطوط شار شبیه‌سازی

با توجه به شکل (۸-۴) اشباع بالاتر از $1/8 T$ رخ می‌دهد. مشاهده می‌شود که بخش‌های قرمز که

نشان‌دهنده‌ی اشباع است، کم بوده و دندان‌ها به اشباع نرفته است.

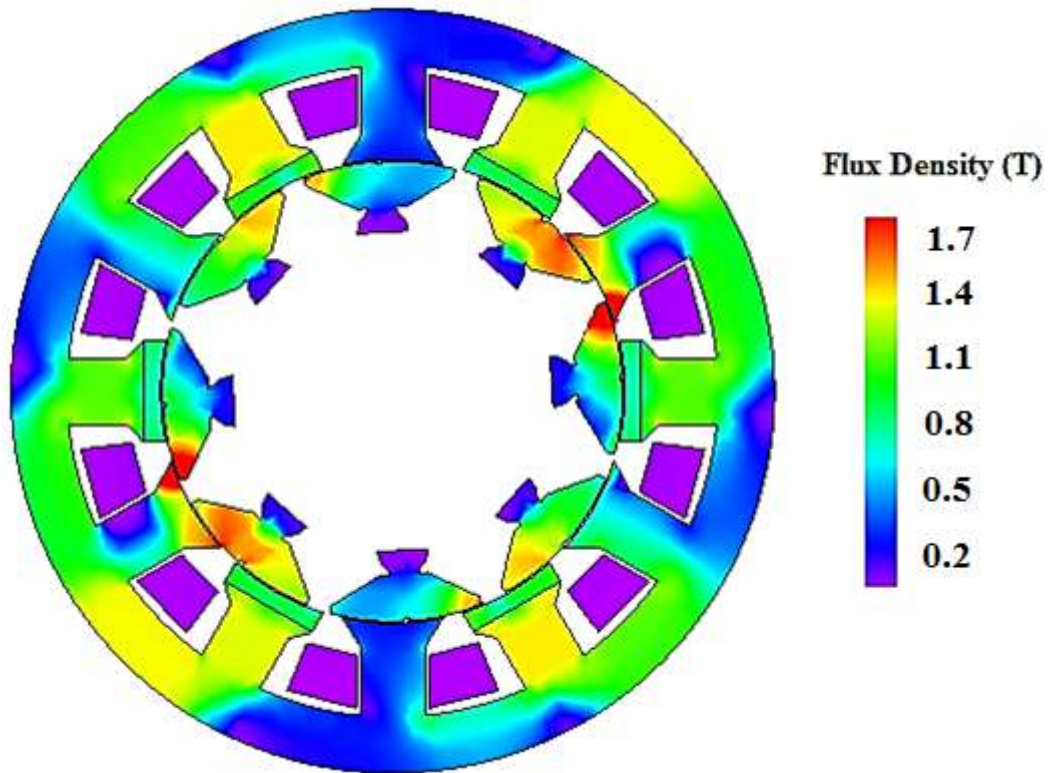
خطوط شار در شکل (۹-۴) نمایش داده شده که شکستگی نداشته و نشان‌دهنده‌ی درستی سائز

مش است.

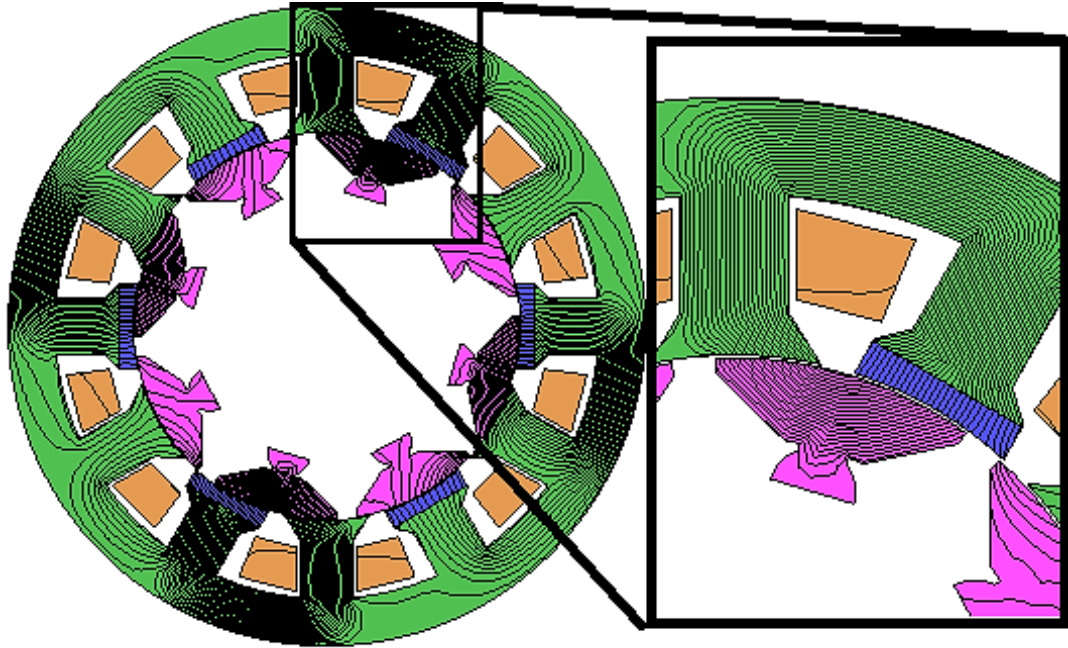
۴-۵-۴- عملکرد حالت مدار باز ماشین در سرعت نامی

بررسی عملکرد ماشین در شرایط متفاوت، صحت عملکرد ماشین را تأیید می‌کند. در این قسمت با برداشتن منابع جریان و در سرعت ثابت ۵۰۰ rpm به بررسی نیرو محرکه‌ی القایی، هارمونیک‌های نیرو محرکه‌ی القایی و گشتاور دندانه‌ای پرداخته شده است.

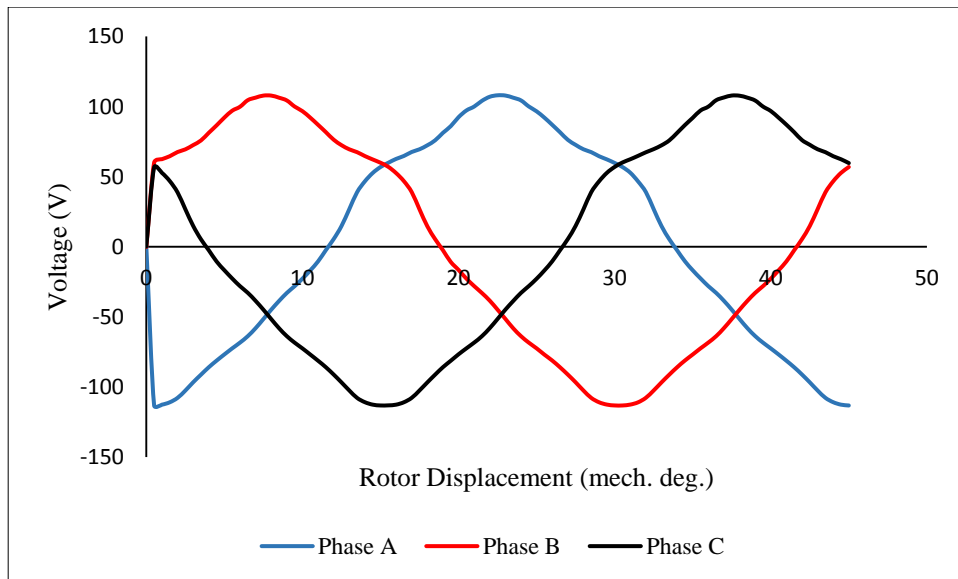
شکل (۴-۱۰) نمودار شبه سینوسی حاصل از نیرومحرکه‌ی القایی در حالت مدار باز را نشان می‌دهد. مقدار مؤثر نیرو محرکه‌ی القایی ۷۴/۹۵ V بوده که تقریباً برابر با جدول (۴-۳) است. هارمونیک‌های ولتاژ به ترتیب در شکل (۴-۱۱) نشان داده شده است.



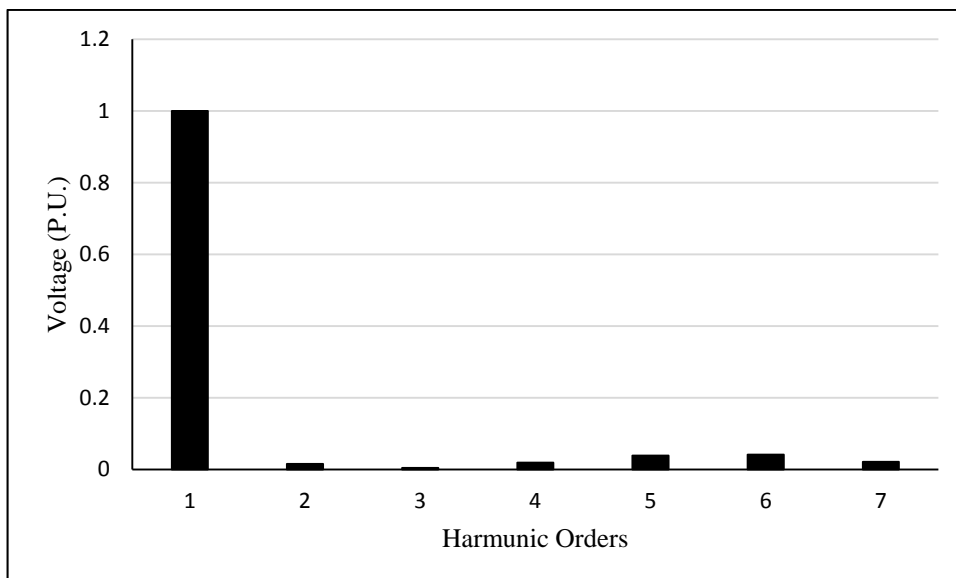
شکل (۴-۸): چگالی شار موتور روتور چندتکه‌ای تعویض شار آهنربا دائم



شکل (۴-۹): خطوط شار موتور روتور چندتکه‌ای تعویض شار آهنربا دائم



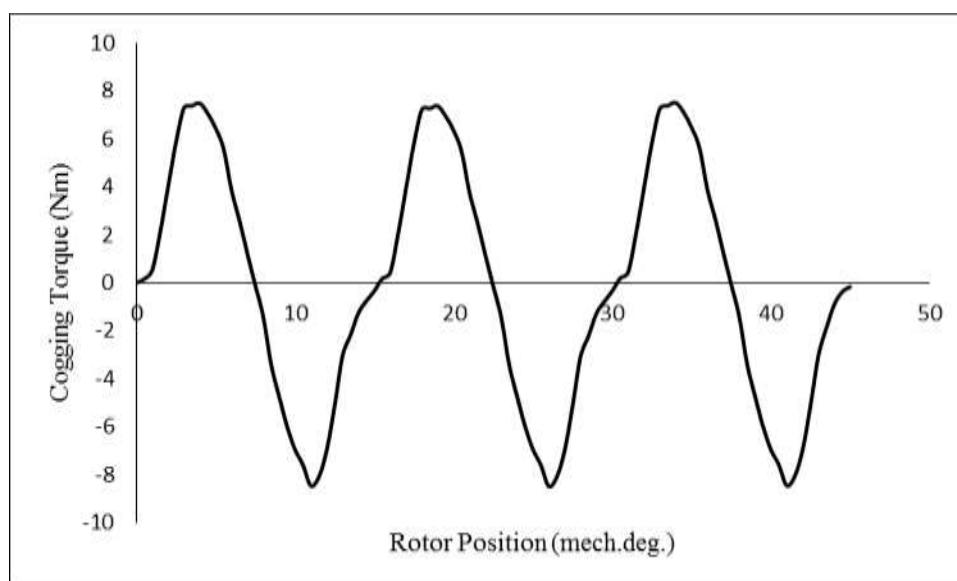
شکل (۴-۱۰): نیروی محرکه‌ی القایی موتور در سرعت نامی



شکل (۴-۱۱): هارمونیک‌های نیرومحرکه‌ی القایی در سرعت نامی

گشتاور دندانه‌ای ماشین را در حالتی که سیم‌پیچ آرمیچر بدون جریان است، می‌توان یافت. شکل

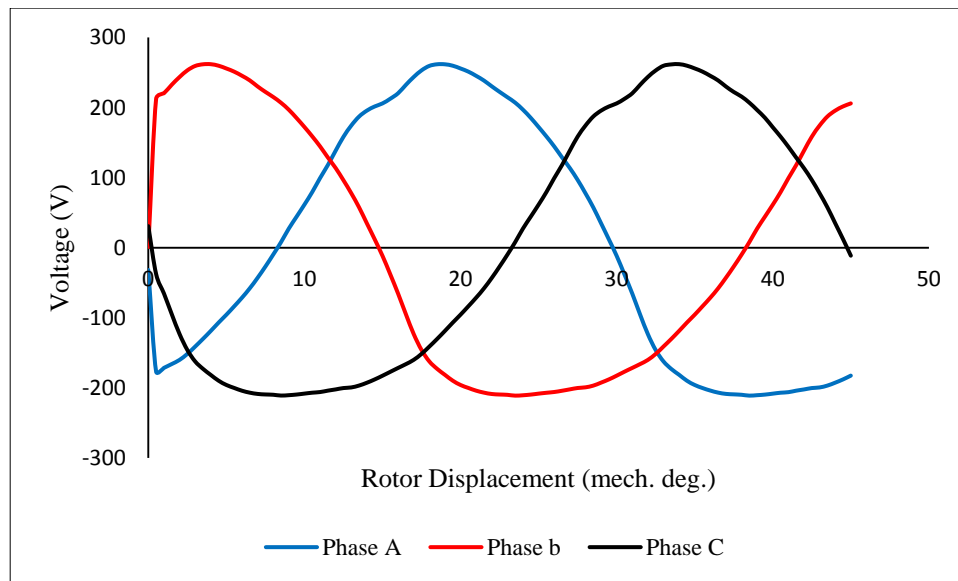
(۴-۱۲) گشتاور دندانه‌ای ماشین را نشان می‌دهد که اندازه‌ی دامنه‌ی آن برابر $7/5 \text{ Nm}$ است.



شکل (۴-۱۲): گشتاور دندانه‌ای موتور در سرعت نامی

۴-۵-۵- بررسی عملکرد ماشین در بار نامی

در این بخش موتور مورد نظر با سرعت ثابت ۵۰۰ rpm در شرایطی که منابع جریان متصل هستند، راه اندازی شده است. با تغییر زاویه ی جریان گشتاور ماشین در سرعت نامی حاصل شده است. در ادامه به بررسی ولتاژ، ضریب توان، گشتاور خروجی و توان ورودی پرداخته شده است. مطابق شکل (۴-۱۳) ولتاژ ترمینال ماشین برابر با ۱۷۳/۵۴ V است که تقریباً با مقدار جدول مطابقت دارد.



شکل (۴-۱۳): ولتاژ ترمینال موتور در سرعت نامی

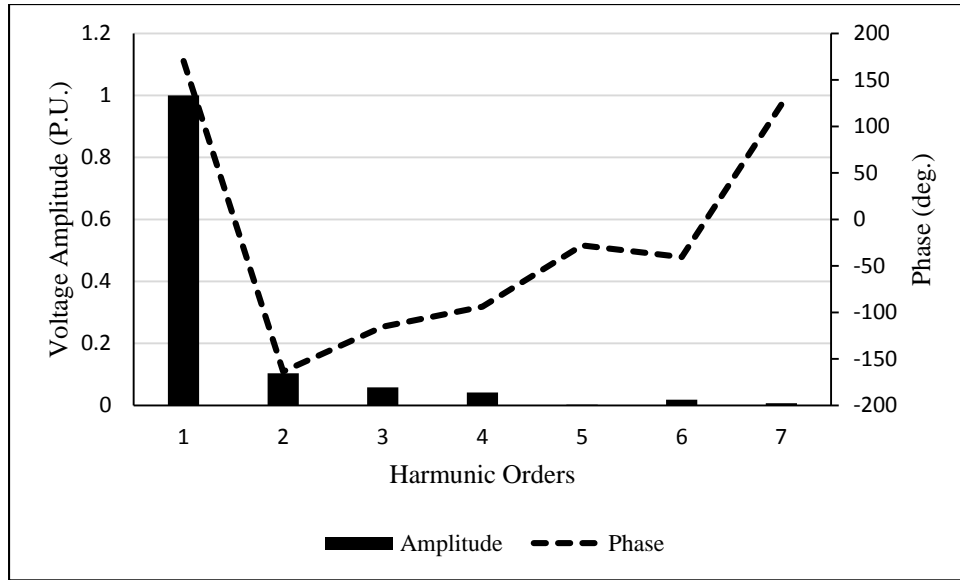
برای محاسبه ی ضریب توان، اختلاف فاز هارمونیک اصلی ولتاژ با جریان با توجه به شکل (۴-۱۴) محاسبه شده است.

در شکل (۴-۱۴) مشاهده می شود که هارمونیک دوم و سوم بیشترین مقدار را دارند. جریان به علت استفاده از منبع جریان سینوسی هارمونیک خیلی کمی دارد. ضریب توان به دست آمده برابر ۰/۵۱۳۹ است که با مقدار جدول (۴-۳) مطابقت دارد.

در شبیه سازی، گشتاور با توجه به شکل (۴-۱۵) مقدار ۴۰/۲ Nm شده که به مقدار جدول (۴-۳) نزدیک است.

توان خروجی از رابطه (۱-۴) محاسبه می‌شود.

$$P_{out} = T \omega_r \quad (۱-۴)$$



شکل (۴-۱۴): طیف هارمونیک نیرومحرکه‌ی القایی

با توجه به شکل (۴-۱۵) توان خروجی برابر ۲/۱۳ Kw است که تقریباً با مقدار جدول برابر شده-

است.



شکل (۴-۱۵): گشتاور خروجی موتور در سرعت نامی

توان ورودی را می‌توان با استفاده از توان خروجی و بازده با توجه به رابطه (۲-۴) به‌دست

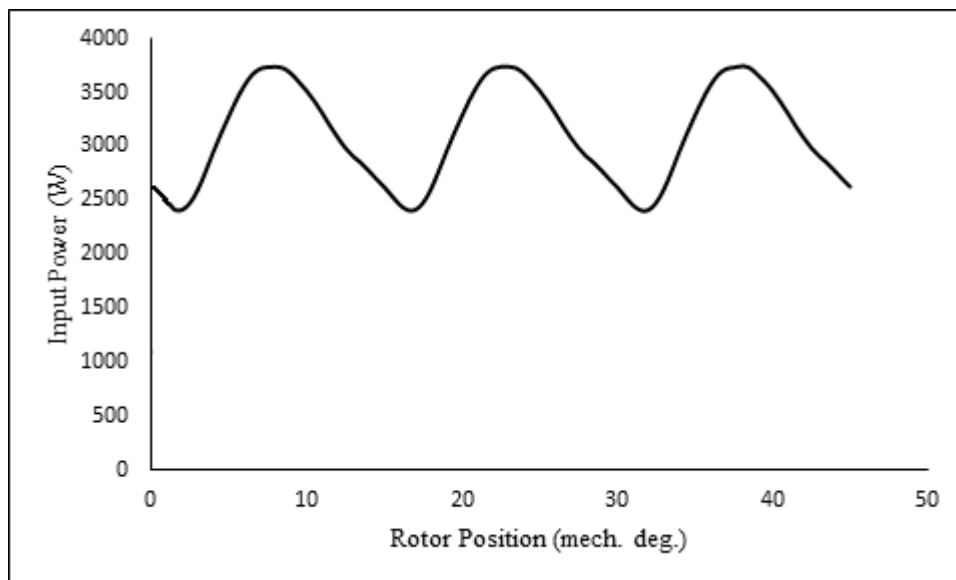
آورد.

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \quad (2-4)$$

با توجه به اعداد جدول (۳-۴)، توان ورودی برابر ۲/۹۸ kW می‌شود. در شکل (۴-۱۶) نتیجه‌ی

شبیه‌سازی در سرعت ۵۰۰ rpm برابر با توان ورودی ۳/۱۸ kW بوده که با مقدار آن تقریباً مطابقت

دارد.



شکل (۴-۱۶): توان ورودی موتور در سرعت نامی

۴-۶- جمع‌بندی

در این فصل ماشین مورد نظر بررسی و شبیه‌سازی شده است. برای اطمینان از عملکرد ماشین

مشخصات بدست آمده در شرایط نامی شبیه‌سازی با مشخصات ذکر شده در مرجع [۳۷] مقایسه شده

است.

فصل پنجم

نتایج شبیه‌سازی دو بعدی روش‌های کاهش

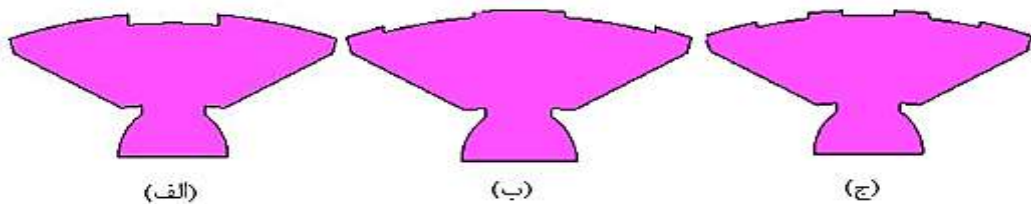
ریپل گشتاور

۵-۱- مقدمه

در این فصل به بررسی روش‌های دو بعدی ایجاد شکاف در روتور و استاتور، جفت کردن دندانه‌های روتور، ایجاد پل آهنی در روتور و تغییر انحنای لبه‌ی روتور پرداخته می‌شود. در روش شکاف، تغییر زاویه‌ی عرضی، عمق و تعداد شکاف در روتور و استاتور بررسی می‌شود. در روش جفت کردن دندانه‌های روتور، ابتدا عرض مناسب برای قطعه‌های روتور با توجه به هارمونیک اصلی گشتاور دندانه‌ای با اندازه‌ای تقریباً برابر و فاز مخالف تعیین شده و شبیه‌سازی می‌شود. روش ایجاد پل آهنی با تغییر عرض پل، مقدار بهینه برای کاهش ریپل گشتاور و اندازه گشتاور دندانه‌ای انتخاب می‌گردد. در روش تغییر انحنای لبه روتور، با تغییر دادن شعاع انحنا، گزینه‌ی مناسب که موجب کاهش گشتاور دندانه‌ای و ریپل گشتاور شده، معین می‌شود و در نهایت روش ترکیبی برای کاهش بیشتر دو مشخصه ذکر شده بر روی ماشین اعمال می‌شود. تمامی شبیه‌سازی‌ها به صورت دو بعدی و در نرم‌افزار JMAG-Designer صورت می‌گیرد.

۵-۲- بررسی ایجاد شکاف در روتور

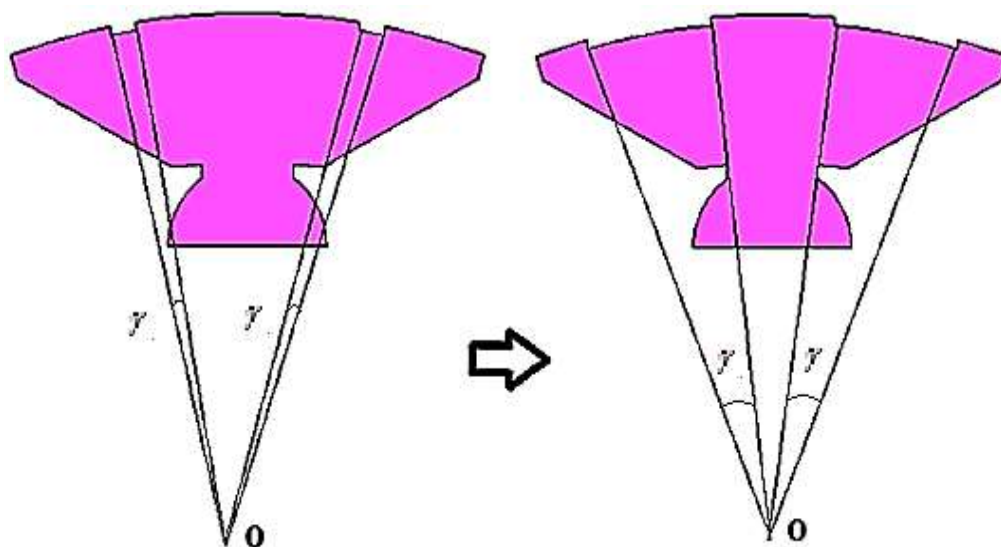
ایجاد شکاف در لبه روتور باعث کاهش تغییرات نفوذپذیری فاصله هوایی می‌شود. در فصل چهارم تأثیر ایجاد شکاف در روتور بررسی شد. در این قسمت از طریق روش صحیح و خطا شکاف بهینه حاصل می‌گردد. مطابق شکل (۵-۱-الف) یک شکاف در وسط لبه‌ی روتور، شکل (۵-۱-ب) دو شکاف هر کدام در نصف قطعه و (۵-۱-ج) سه شکاف به گونه‌ای که هر کدام در یک سوم قطعه قرار می‌گیرد.



شکل (۵-۱): ایجاد شکاف در روتور (الف) یک شکاف (ب) دو شکاف (ج) سه شکاف

۵-۲-۱- تغییر زاویه‌ی گستردگی شکاف در روتور

در این قسمت با ثابت نگه‌داشتن عمق شکاف‌ها در ۰/۵ mm، زاویه‌ی گستردگی شکاف مطابق شکل (۲-۵) تغییر داده می‌شود تا عرض مناسب برای سه حالت از روتور، با تعداد شکاف متفاوت، به‌دست آید. بهترین زاویه، زاویه‌ای است که ضمن کاهش گشتاور دندانه‌ای، ریپل گشتاور خروجی را کم کند و مقدار کاهش گشتاور خروجی در مقابل کاهش ریپل ناچیز باشد. باید به این نکته توجه شود که کاهش گشتاور دندانه‌ای همیشه موجب کاهش ریپل گشتاور خروجی نمی‌گردد.

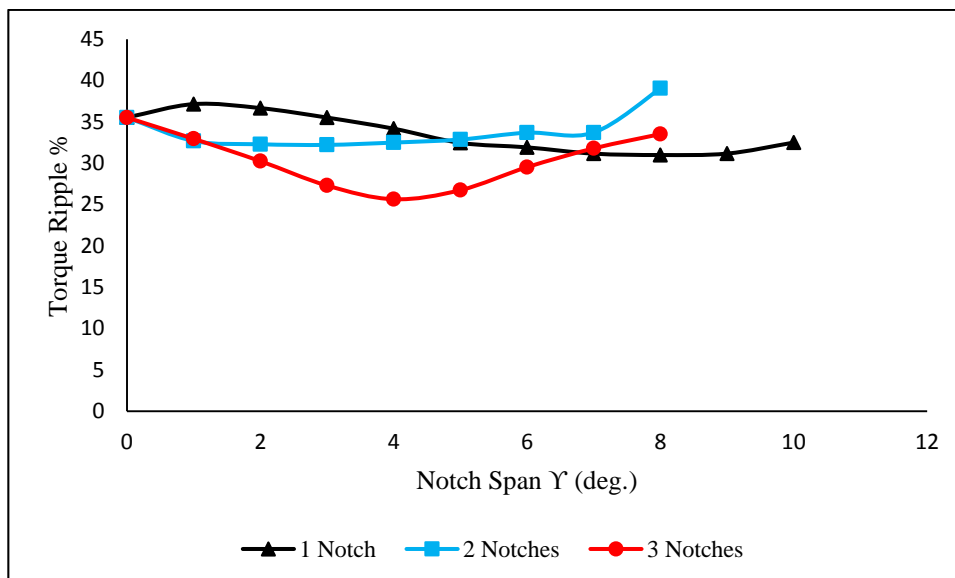


شکل (۲-۵): تغییر زاویه‌ی گستردگی شکاف

شکل (۳-۵) ریپل گشتاور خروجی را بر حسب افزایش زاویه‌ی گستردگی شکاف نشان می‌دهد. ریپل گشتاور با توجه به معادله (۱-۵) محاسبه می‌شود:

$$T_{ripple} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{avg}} \times 100\% \quad (1-5)$$

با توجه به شکل (۳-۵)، روتور دارای یک، دو و سه شکاف کمترین ریپل را به ترتیب در 8° و 3° و 4° دارند؛ در نتیجه تعداد سه شکاف بین شکاف‌ها، دارای کمترین ریپل است.

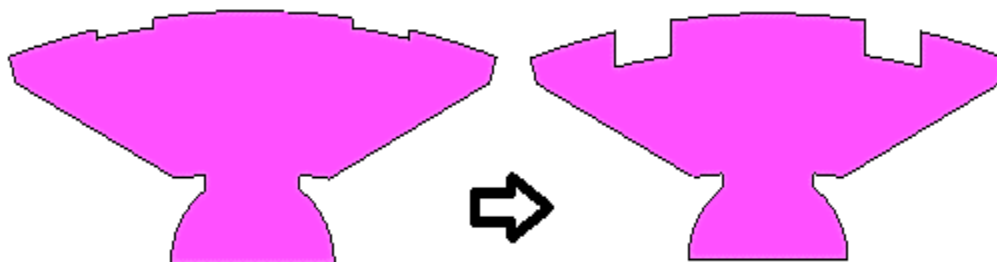


شکل (۳-۵): ریبیل گشتاور خروجی در سه نوع روتور برحسب تغییرات زاویه‌ی عرضی شکاف

۵-۲-۲- تغییر عمق شکاف در روتور

در این قسمت در زاویه‌ی گستردگی بهینه به دست آمده از قسمت قبل، عمق شکاف را مطابق شکل

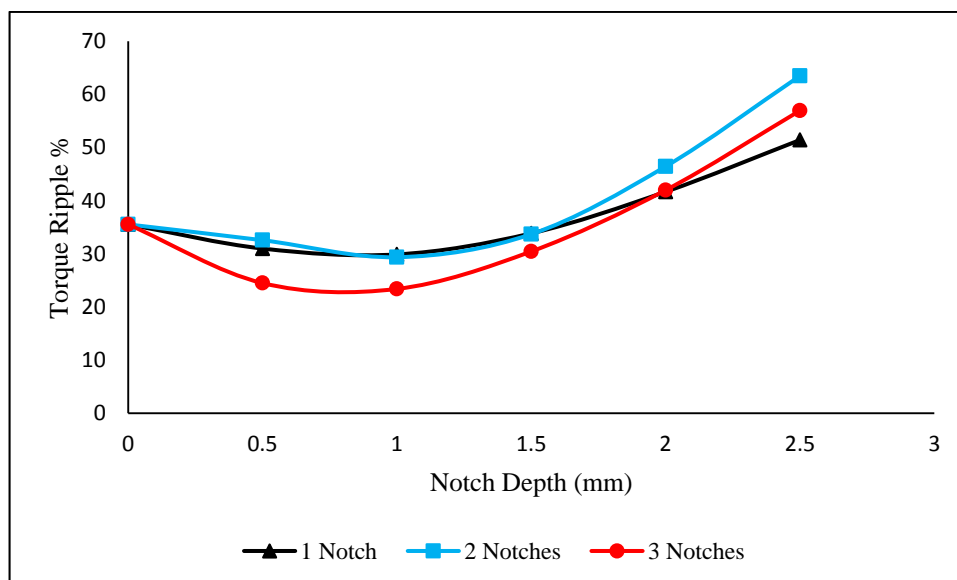
(۴-۵) تغییر داده تا عمق بهینه حاصل شود.



شکل (۴-۵): تغییر عمق شکاف

شکل (۵-۵) نمایانگر ریبیل گشتاور خروجی برحسب تغییرات عمق در سه نوع روتور است. همان طور

که مشاهده می‌شود، ایجاد سه شکاف در روتور، کمترین میزان ریبیل گشتاور خروجی را در مقادیر متفاوتی از عمق شکاف، در برداشته و در هر سه نوع روتور عمق ۱ میلی‌متری شکاف، مناسب‌ترین گزینه برای کاهش ریبیل گشتاور ماشین است.



شکل (۵-۵): ریپل گشتاور خروجی برحسب تغییرات عمق شکاف

۵-۲-۳- مقایسه تعداد شکاف‌های متفاوت در روتور

با توجه به شکل (۵-۶) و شکل (۵-۷)، به ترتیب گشتاور دندانه‌ای و گشتاور سه نوع روتور با شکاف‌های متفاوت و بهینه، با روتور بدون تغییر مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که تعداد سه شکاف بین شکاف‌ها دارای کمترین گشتاور دندانه‌ای و کمترین ریپل گشتاور بوده و میزان کاهش این دو مشخصه به ترتیب ۴۸/۶۸٪ و ۳۴/۱۶٪ است.

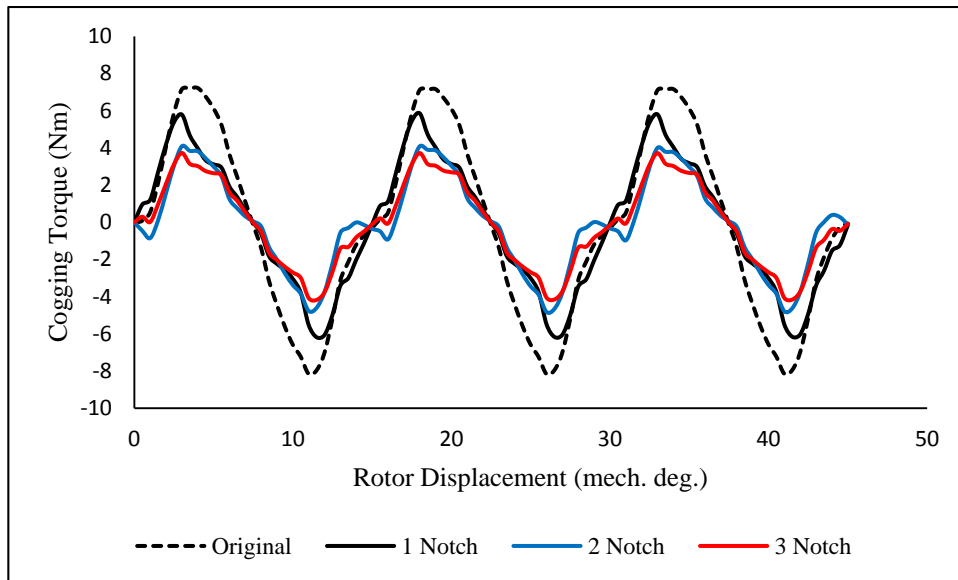
شکل (۵-۸) طیف هارمونیک نیرو محرکه‌ی القایی را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که طیف هارمونیک روتور با یک شکاف، تقریباً مشابه طیف هارمونیک روتور بدون تغییر بوده و هارمونیک ششم ولتاژ، بیشترین دامنه را دارد؛ اما ایجاد دو و سه شکاف در روتور، دامنه‌ی هارمونیک‌های دوم، سوم، چهارم و هفتم را افزایش و هارمونیک‌های پنجم و ششم را کاهش داده است؛ همچنین به‌طور کلی دامنه‌ی هارمونیک‌های سه شکاف از دو شکاف کمتر بوده و مطلوب‌تر است.

همان‌طور که در شکل (۵-۸) مشاهده می‌شود، هارمونیک اصلی نیرو محرکه‌ی القایی کاهش یافته است. تعداد دو شکاف کمترین مقدار هارمونیک اصلی و تعداد یک شکاف بیشترین مقدار را دارد.

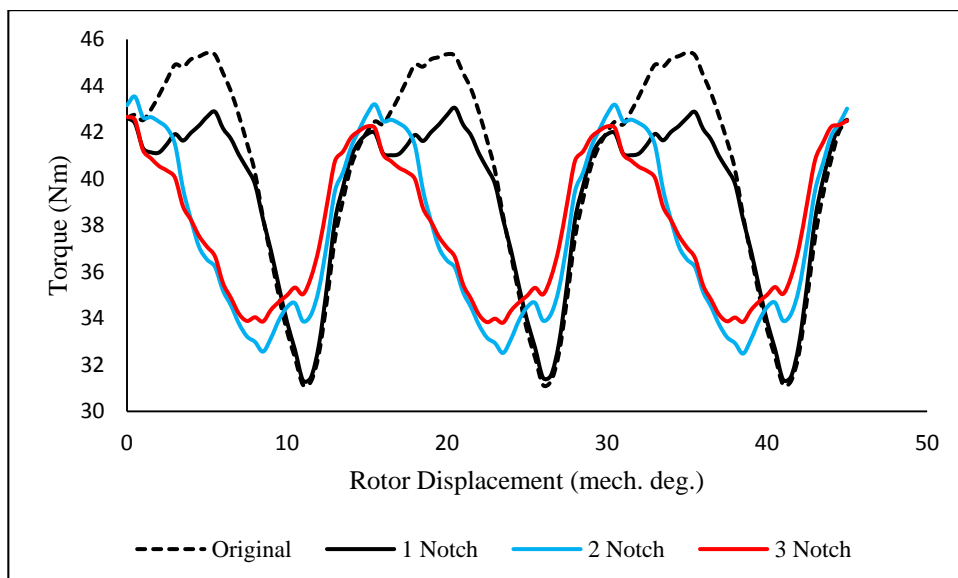
مقادیر درصد اعوجاج هارمونیکی نیرو محرکه القایی (THD) یک، دو و سه شکاف به ترتیب برابر

۱۵/۵۹٪، ۲۰/۵۸٪ و ۱۸/۸۶٪ است؛ در نتیجه تعداد سه شکاف در روتور گزینه مناسب از لحاظ

هارمونیکی، مقدار گشتاور دندان‌های ای و ریپل گشتاور خروجی نسبت به دو شکاف بوده و میانگین گشتاور خروجی آن در مقاداری نزدیک به دو شکاف است.

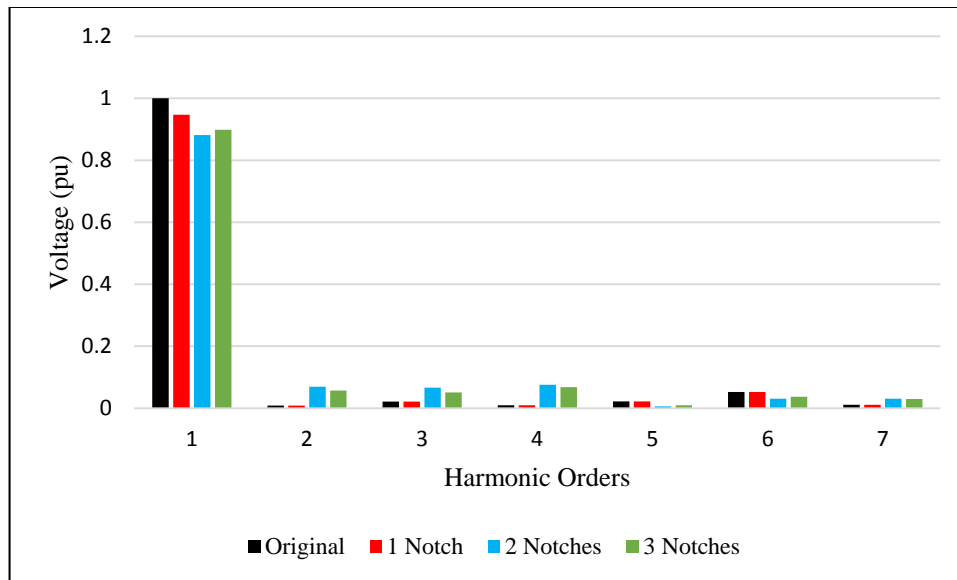


شکل (۵-۶): گشتاور دندان‌های در سه روتور



شکل (۵-۷): گشتاور خروجی در سه روتور

شایان ذکر است که تغییر زوایای گوشه شکاف تأثیر چندانی در کاهش گشتاور دندانه‌ای نداشته و مکانی که برای شکاف‌ها در لبه‌ی روتور در نظر گرفته شده، بهترین مکان در کاهش ریپل گشتاور و گشتاور دندانه‌ای است.



شکل (۵-۸): طیف هارمونیکی روتور با تعداد شکاف متفاوت

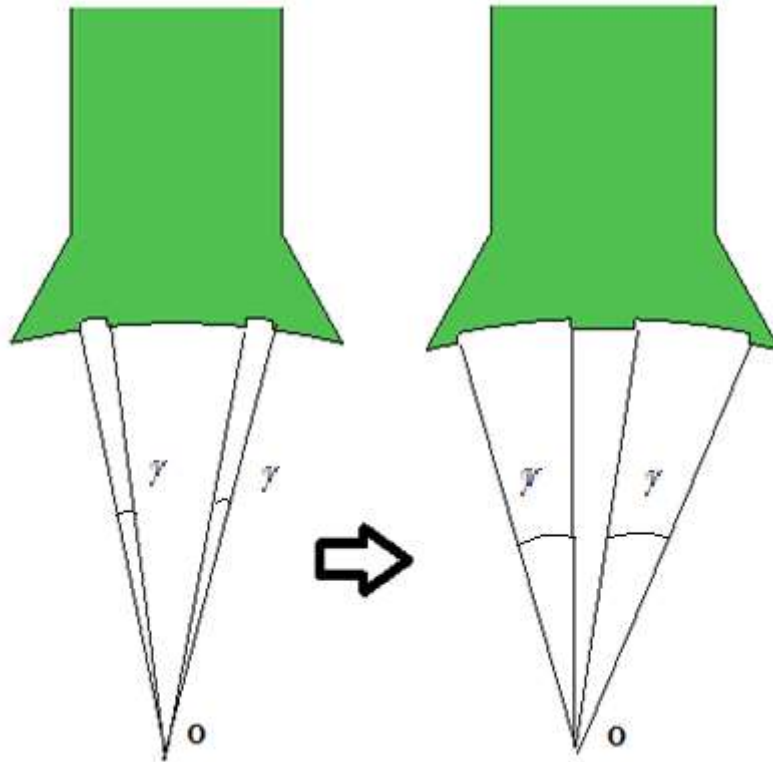
۵-۳- روش ایجاد شکاف در استاتور

ایجاد شکاف در استاتور همانند ایجاد شکاف در روتور باعث کاهش تغییرات رلوکتانس فاصله هوایی می‌شود. در این قسمت با ایجاد تعداد شکاف‌های متفاوت در استاتور همانند روش ایجاد شکاف در روتور، ریپل گشتاور خروجی و اندازه‌ی گشتاور دندانه‌ای ماشین بررسی می‌شود.

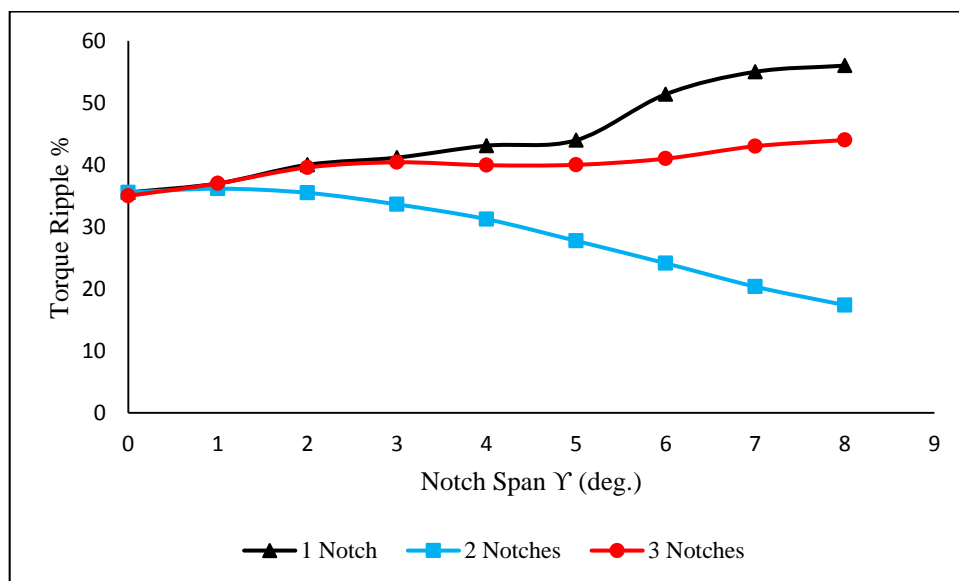
۵-۳-۱- تغییر زاویه‌ی گستردگی شکاف در استاتور

با تغییر زاویه‌ی گستردگی شکاف در استاتور مطابق شکل (۵-۹) در عمق ثابت ۵ mm، مقدار بهینه‌ی زاویه گستردگی شکاف مشخص می‌گردد. تعداد یک، دو و سه شکاف در استاتور شبیه‌سازی شده است. نتایج حاصل از ایجاد یک و سه شکاف در استاتور افزایش ریپل گشتاور را در پی داشته اما

مطابق شکل (۵-۱۰) تعداد دو شکاف در زاویه‌ی گستردگی 8° که هرکدام در نیمه‌ی قطعه و در عمق 0.5 mm تعبیه شده است، ریپل گشتاور را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد.



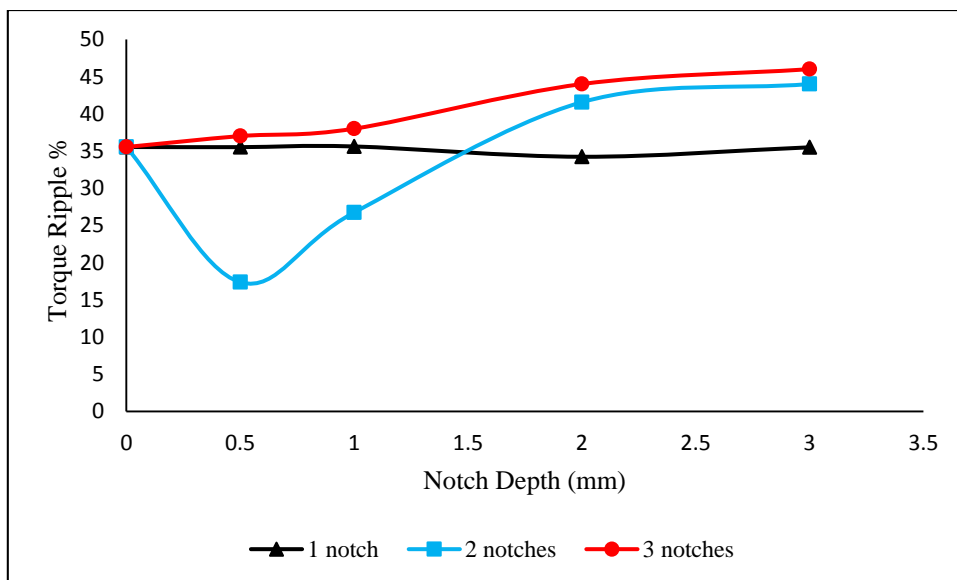
شکل (۵-۹): تغییر زاویه‌ی عرضی شکاف استاتور



شکل (۵-۱۰): ریپل گشتاور برحسب تغییرات زاویه‌ی گستردگی شکاف

۵-۳-۲- تغییر عمق شکاف در استاتور

با توجه به شکل (۵-۱۱) افزایش عمق شکاف در زاویه‌ی گستردگی بهینه، موجب افزایش ریپل گشتاور و اندازه گشتاور می‌شود. عمق ۰/۵ mm در استاتور دارای دو شکاف کمترین ریپل گشتاور را دارد.



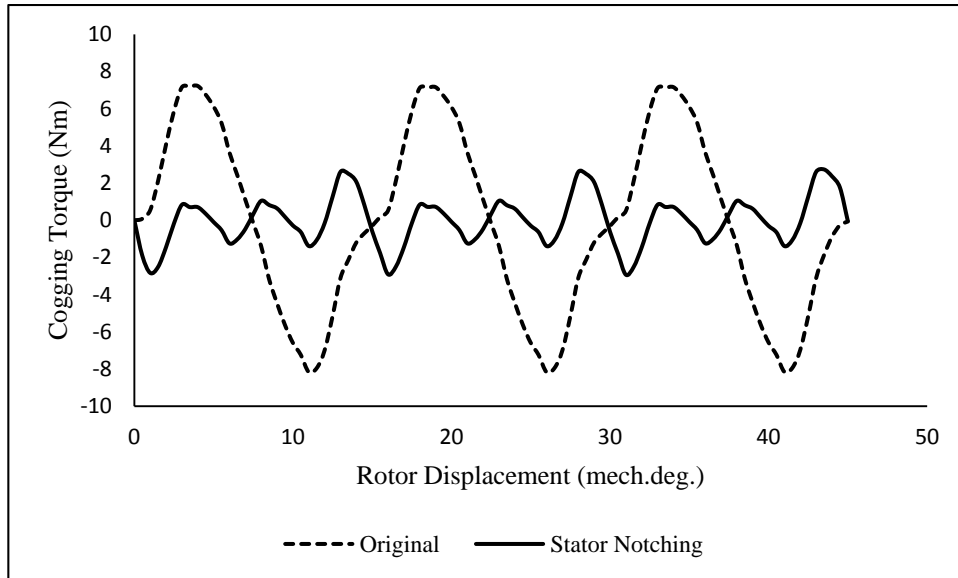
شکل (۵-۱۱): ریپل گشتاور برحسب تغییرات عمق شکاف

در شکل (۵-۱۲) و (۵-۱۳) به ترتیب گشتاور دندانه‌ای و گشتاور خروجی ماشین در زاویه‌ی گستردگی بهینه 8° در عمق ۰/۵ mm با موتور بدون تغییر، مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که ریپل گشتاور و گشتاور دندانه‌ای به میزان ۵۱/۱۳٪ و ۶۳/۲۱٪ کاهش یافته است.

استفاده از دو شکاف در استاتور ریپل گشتاور و گشتاور دندانه‌ای را به مقدار چشم‌گیری کاهش داده و مزیت این روش تغییرات کم گشتاور خروجی از مقدار اصلی است. هر چند ایجاد تغییرات در استاتور سخت‌تر از روتور بوده ایجاد شکاف در استاتور بسیار مؤثرتر از روتور است. شکل (۵-۱۴) نمایانگر طیف هارمونیک نیرو محرکه‌ی القایی ماشین است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هارمونیک سوم و هفتم بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده‌اند. هارمونیک اصلی نیرو محرکه‌ی ولتاژ کاهش یافته و

این روش هارمونیک ششم و پنجم را کاهش داده است. درصد اعوجاج هارمونیک نیرو محرکه القایی ۲۲/۸۷٪ بوده که از روش ایجاد شکاف در استاتور بیشتر است.

لازم به ذکر است که افزایش تعداد شکافها تا ۵ شکاف شبیه‌سازی شده و موجب افزایش گشتاور دندانه‌ای و ریپل گشتاور خروجی شده است.



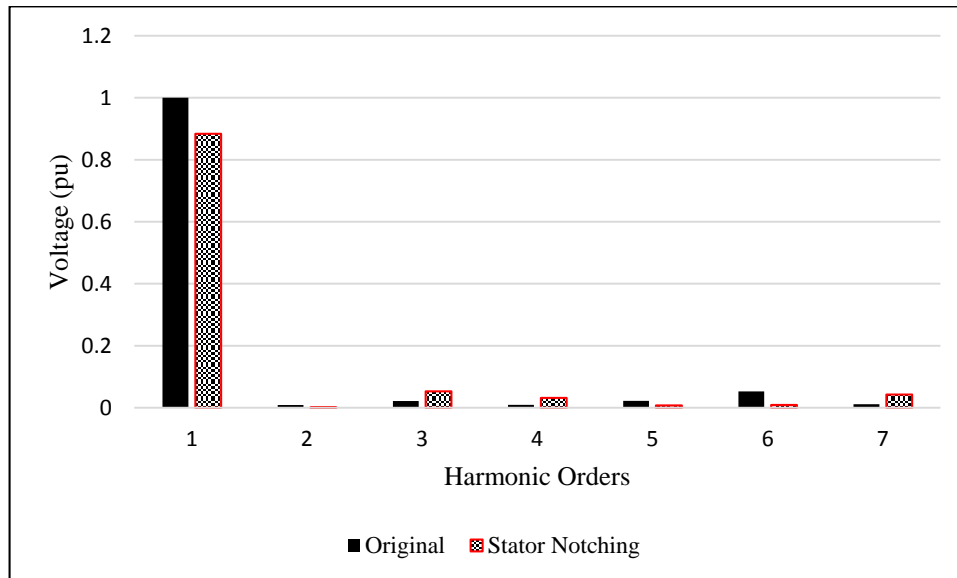
شکل (۵-۱۲): گشتاور دندانه‌ای در ایجاد دو شکاف استاتور و موتور بدون تغییر



شکل (۵-۱۳): گشتاور خروجی در ایجاد دو شکاف استاتور و موتور بدون تغییر

۵-۴- روش جفت کردن محیطی قطعه‌های روتور

روش جفت کردن محیطی قطعه‌های روتور موجب کاهش گشتاور دندانه‌ای می‌گردد. گشتاور

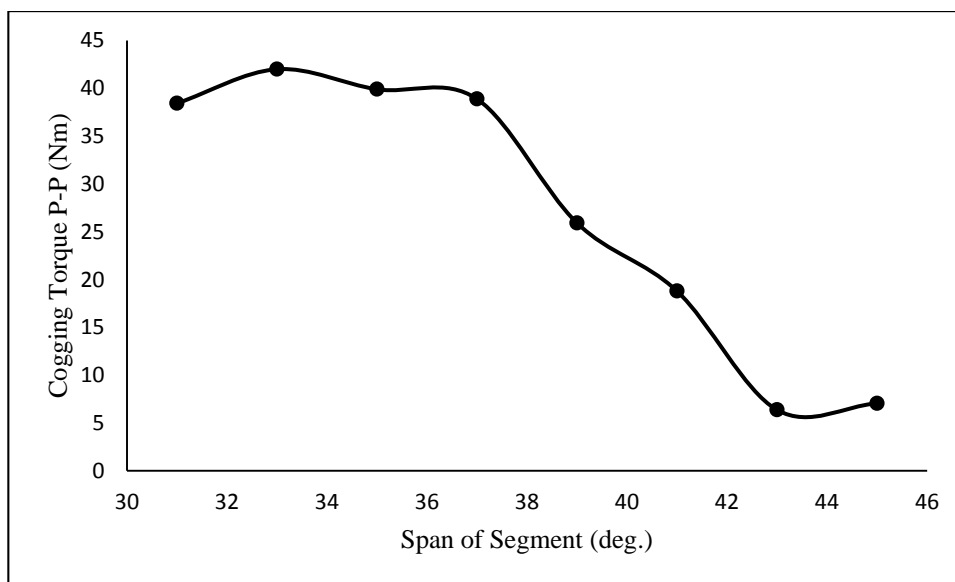


شکل (۵-۱۴): طیف هارمونیکی نیرومحرکه‌ی القایی در دو شکاف بهینه و موتور بدون تغییر

دندانه‌ای با تغییر زاویه گستردگی قطعه‌های روتور تغییر می‌نماید برای اجرای این روش، ابتدا گشتاور دندانه‌ای ماشین مورد نظر را در زاویه‌های متفاوتی از قطعه‌های روتور مطابق شکل (۵-۱۵) به دست آورده شده است. همراه با تغییر زاویه‌ی گستردگی قطعه‌های روتور، دامنه و فاز مؤلفه‌های هارمونیکی گشتاور دندانه‌ای تغییر می‌کند؛ بنابراین با انتخاب مناسب زاویه‌ی گستردگی قطعه‌ها به صورت یک در میان، مؤلفه‌های هارمونیکی گشتاور دندانه‌ای اولیه هر قطعه نسبت به هم 180° اختلاف فاز پیدا می‌کند و در نتیجه موجب کاهش یکدیگر می‌شوند.

۵-۴-۱- انتخاب زاویه‌ی گستردگی α

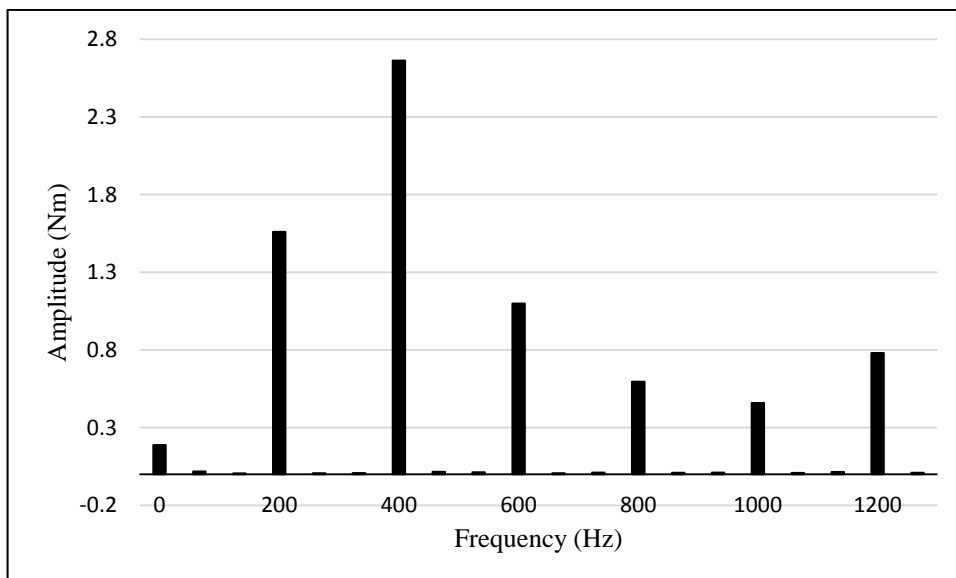
شکل (۵-۱۵) ماکزیمم تا مینیمم گشتاور دندانهای را برحسب تغییرات زاویه‌ی گستردگی قطعه نمایش می‌دهد. زاویه‌ی ۴۳ درجه دارای کمترین میزان گشتاور دندانهای بوده و به‌عنوان زاویه‌ی گستردگی بهینه انتخاب می‌گردد.



شکل (۵-۱۵): ماکزیمم تا مینیمم گشتاور دندانهای برحسب تغییرات زاویه‌ی گستردگی قطعه‌ها

۵-۴-۲- انتخاب زاویه‌ی گستردگی β برای روش جفت کردن

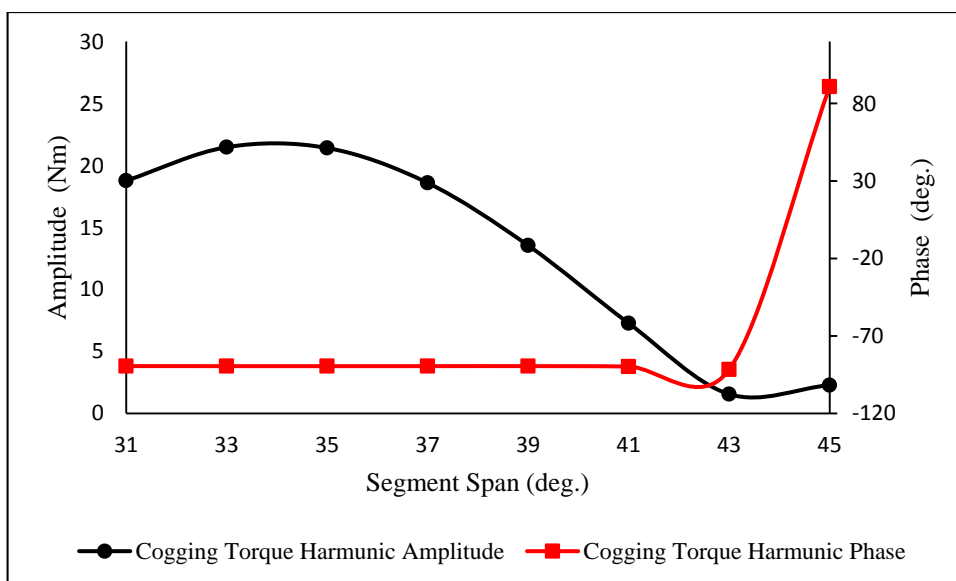
در شکل (۵-۱۶) طیف هارمونیک گشتاور دندانهای زاویه گستردگی ۴۳ درجه در فرکانس‌های مختلف نمایش داده شده‌است.



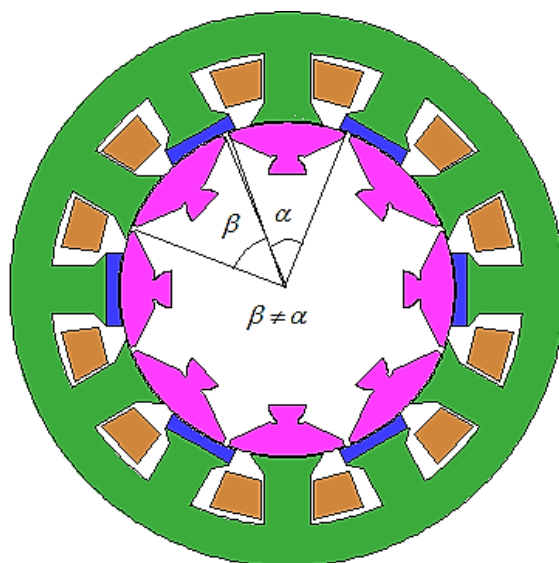
شکل (۵-۱۶): طیف هارمونیک گشتاور دندانه‌ای در فرکانس‌های مختلف

فرکانس‌های ۲۰۰ و ۴۰۰ هرتز بیشترین مقدار را دارند. فرکانس ۲۰۰ هرتز به‌عنوان هارمونیک اصلی گشتاور دندانه‌ای در نظر گرفته شده است.

دامنه و فاز هارمونیک اصلی گشتاور دندانه‌ای برحسب تغییرات زاویه‌ی گستردگی قطعه‌ها در شکل (۵-۱۷) نمایش داده شده است. در شکل (۵-۱۸) زاویه‌ی گستردگی α و β به ترتیب ۴۳ درجه و ۴۵ درجه انتخاب می‌شوند که دارای اندازه تقریباً برابر و فاز معکوس هم هستند.



شکل (۵-۱۷): دامنه و فاز هارمونیک اصلی گشتاور دندانه‌ای برحسب تغییرات زاویه‌ی گستردگی قطعه‌ها

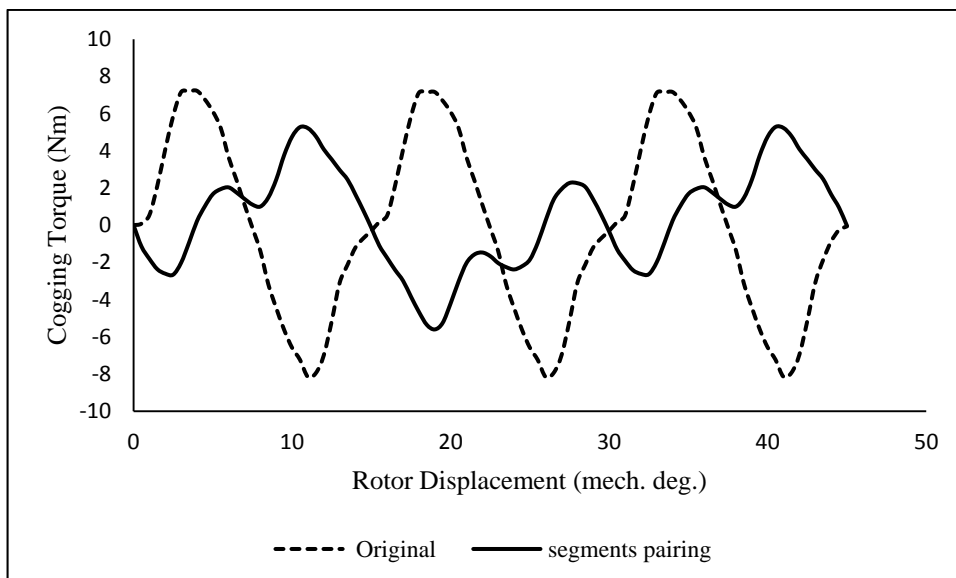


شکل (۵-۱۸): جفت شدن دندانه‌های روتور به صورت یک در میان

۵-۴-۳- ترکیب زاویه مناسب برای قطعه‌های روتور

شکل (۵-۱۹) و (۵-۲۰) گشتاور دندانه‌ای و گشتاور خروجی موتور در این روش را نمایش می‌دهند که به ترتیب به میزان ۱۶/۸۲٪ و ۲۰/۲۴٪ کاهش یافته‌اند.

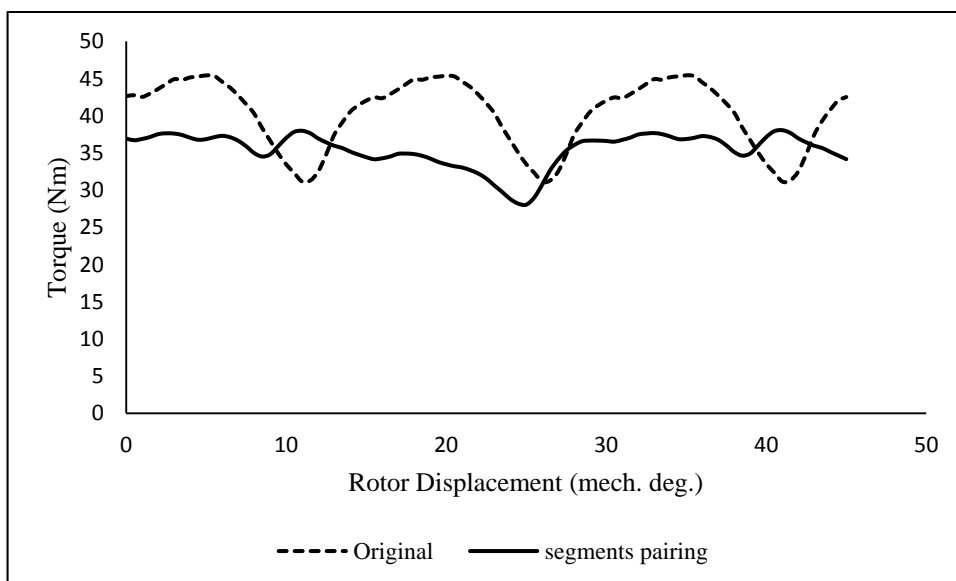
در شکل (۵-۲۱) طیف هارمونیکی نیرو محرکه‌ی القایی نشان داده شده است. در این روش هارمونیک دوم، چهارم و هفتم افزایش یافته و به طور کلی افزایش هارمونیک‌ها را در پی دارد و هارمونیک اصلی نیرو محرکه‌ی القایی کاهش پیدا کرده است. این روش همانند دو روش قبل موجب کاهش هارمونیک‌های پنجم و ششم شده است.



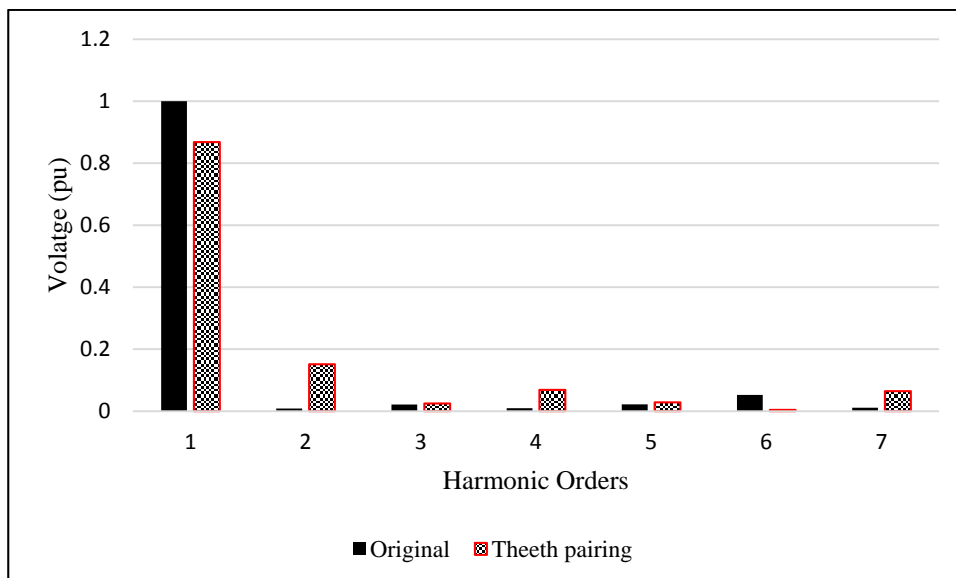
شکل (۵-۱۹): گشتاور دندانه‌ای موتور در روش جفت شدن دندانه‌های روتور

۵-۵- ایجاد پل آهنی در روتور

استفاده از پل آهنی در روتور موجب کم شدن شار نشتی شده و همچنین باعث کاهش چگالی شار در هنگام تقابل قطعه با آهنربا می‌شود. در این قسمت با اضافه کردن پل مغناطیسی به روتور، اثراتی که بر گشتاور دندانه‌ای و ریپل گشتاور خروجی ماشین دارد، بررسی می‌شود.



شکل (۵-۲۰): گشتاور خروجی موتور در روش جفت شدن دندانه‌های روتور

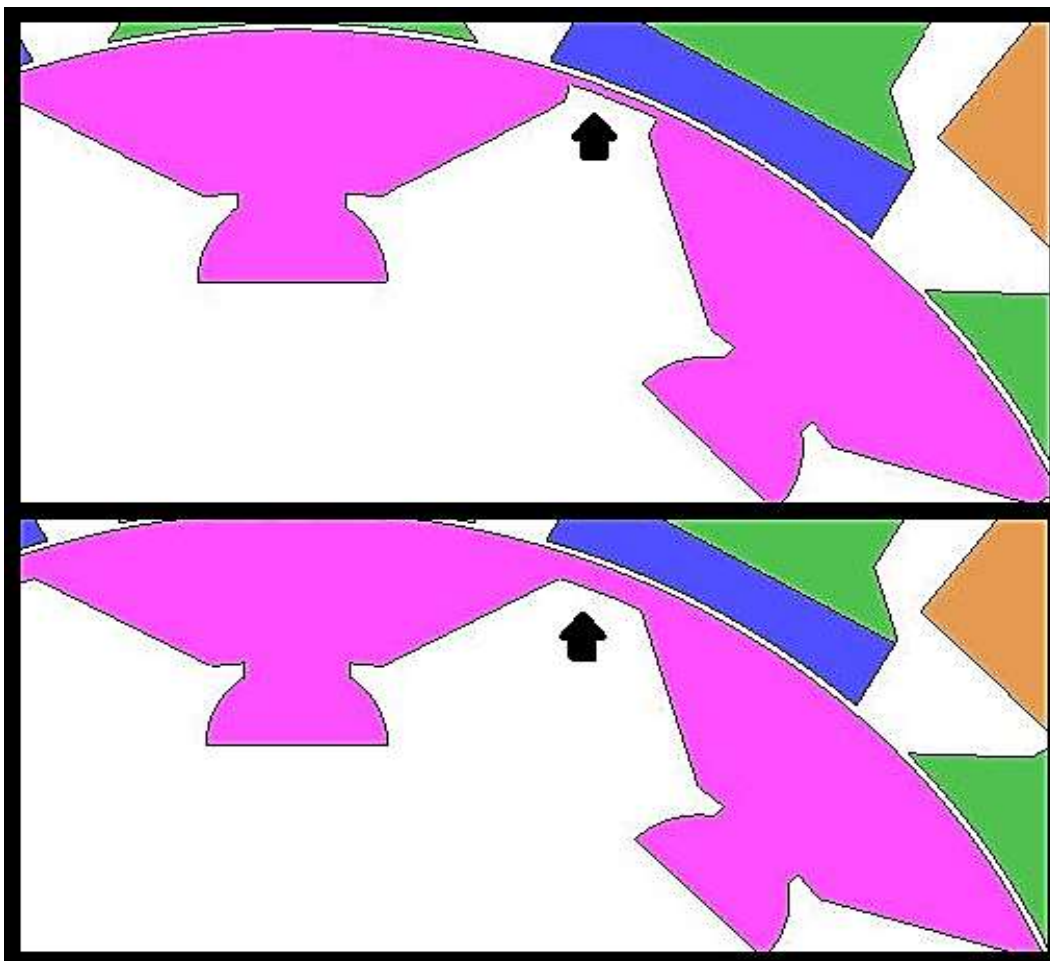


شکل (۵-۲۱): طیف هارمونیکی نیرومحرکه‌ی القایی در روش جفت شدن دندانه‌های روتور

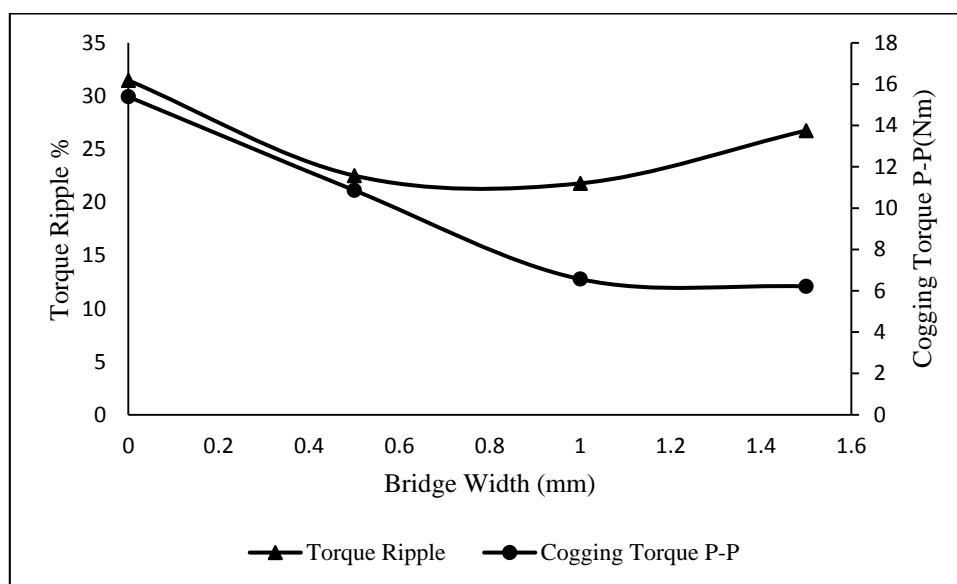
با توجه به شکل (۵-۲۲)، عرض پل آهنی میان قطعه‌های روتور را تغییر داده تا در عرض بهینه، ریپل گشتاور خروجی و اندازه گشتاور دندانه‌ای، کاهش یافته و میانگین گشتاور خروجی در مقدار مطلوب باشد.

شکل (۵-۲۳) ریپل گشتاور خروجی را برحسب تغییرات عرض پل آهنی روتور نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که در عرض ۱ میلی‌متر، ریپل گشتاور خروجی کمترین مقدار است.

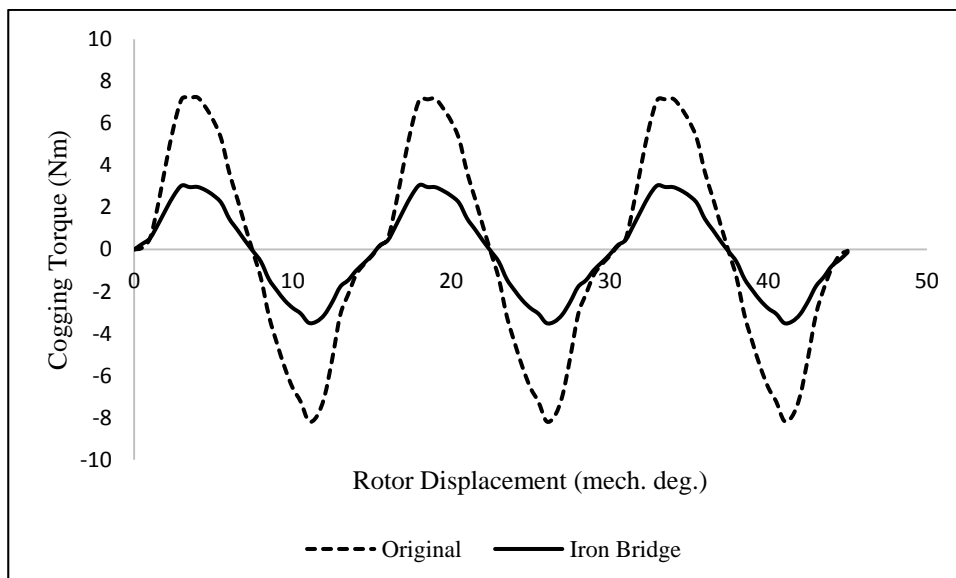
شکل (۵-۲۴) و (۵-۲۵) گشتاور دندانه‌ای و ریپل گشتاور خروجی موتور را در روش ایجاد پل آهنی در روتور نمایش می‌دهد که به ترتیب به میزان ۵۷/۳۴٪ و ۳۲/۰۸٪ کاهش یافته‌اند.



شکل (۵-۲۲): تغییر عرض پل آهنی روتور

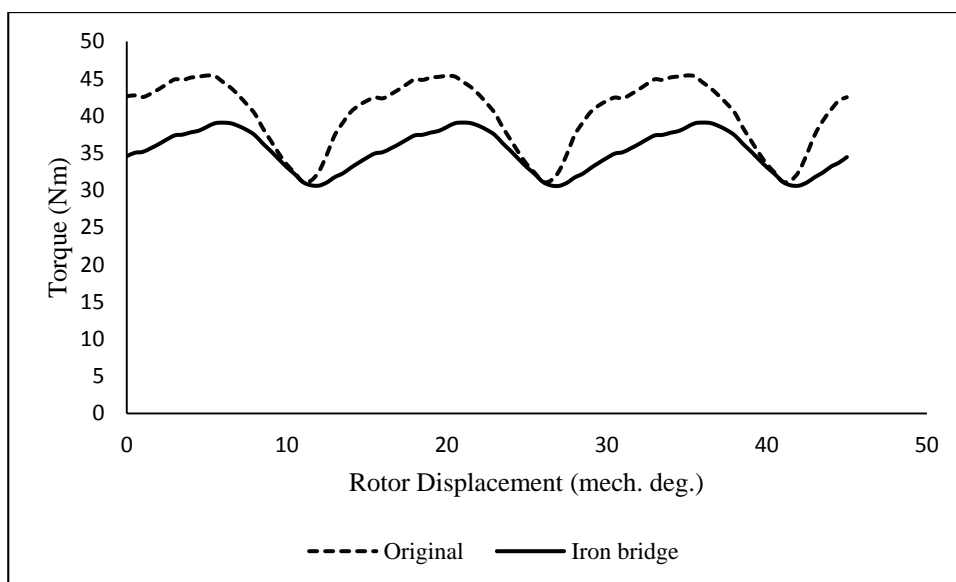


شکل (۵-۲۳): ریل گشتاور خروجی و ماکزیمم تا مینیمم گشتاور دندانه‌ای بر حسب تغییرات عرض پل آهنی

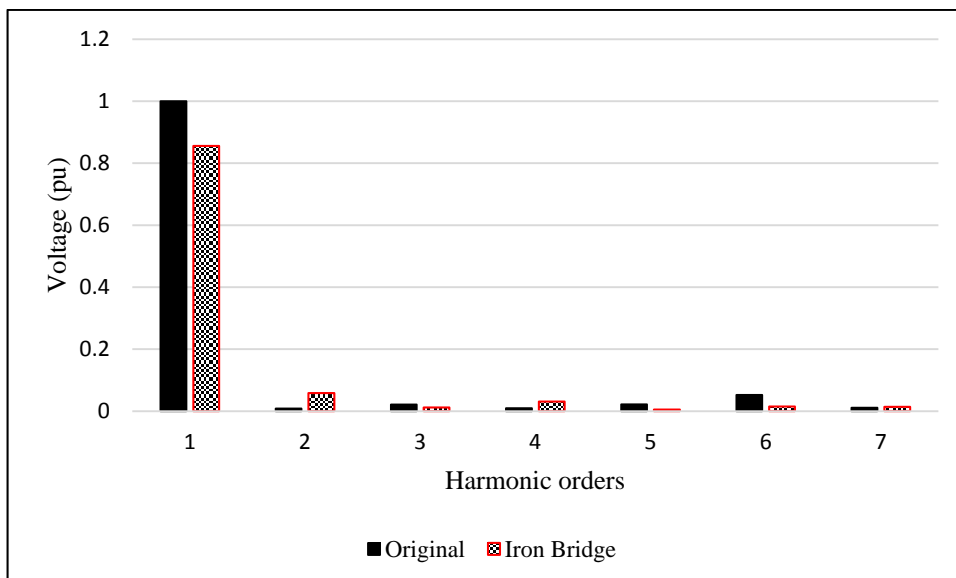


شکل (۲۴-۵): گشتاور دندانه‌ای موتور در روش ایجاد پل آهنی در روتور

شکل (۲۶-۵) نمایش دهنده‌ی طیف هارمونیک نیرو محرکه‌ی القایی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود هارمونیک دوم بیشترین مقدار را داشته و به طور کلی اندازه دامنه‌ی هارمونیک‌ها، مقدار مطلوبی دارد. هارمونیک پنجم و ششم و سوم کاهش یافته و هارمونیک چهارم و دوم افزایش دارند.



شکل (۲۵-۵): گشتاور خروجی موتور در روش ایجاد پل آهنی در روتور

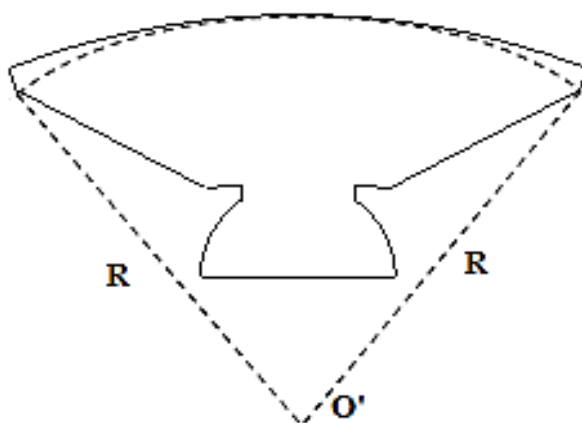


شکل (۵-۲۶): طیف هارمونیکی نیرو محرکه‌ی القایی در روتور با ۱ میلی‌متر پل آهنی

۵-۶- تغییر انحنای لبه روتور

تغییر انحنای لبه روتور روشی دیگر برای کاهش گشتاور دندان‌های و ریپل گشتاور خروجی بوده که در شکل (۵-۲۷) نشان داده شده است. این رویکرد نوسانات نفوذپذیری هوا را کاهش داده و موجب

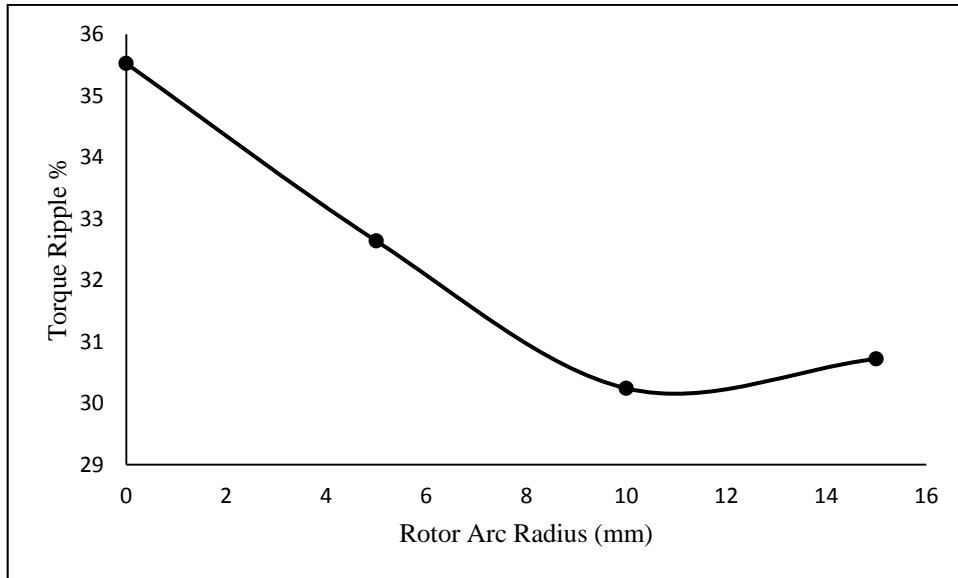
کاهش گشتاور دندان‌های می‌شود.



شکل (۵-۲۷): روش تغییر انحنای لبه روتور

شکل (۵-۲۸) ریپل گشتاور خروجی را برحسب تغییرات شعاع انحنای لبه‌ی روتور نمایش

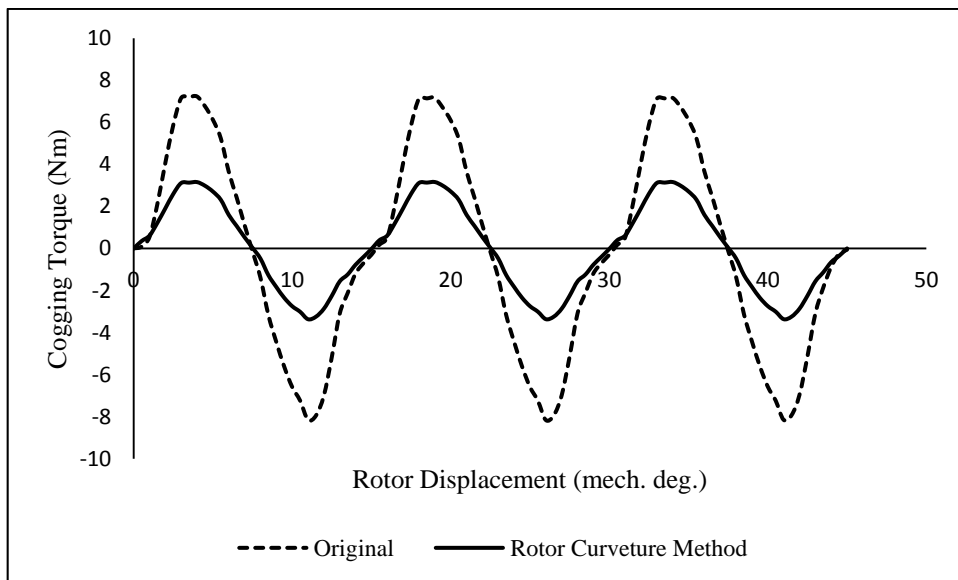
می‌دهد. شعاع ۱۰ میلی‌متر مناسب‌ترین شعاع برای کاهش ریپل گشتاور خروجی است.



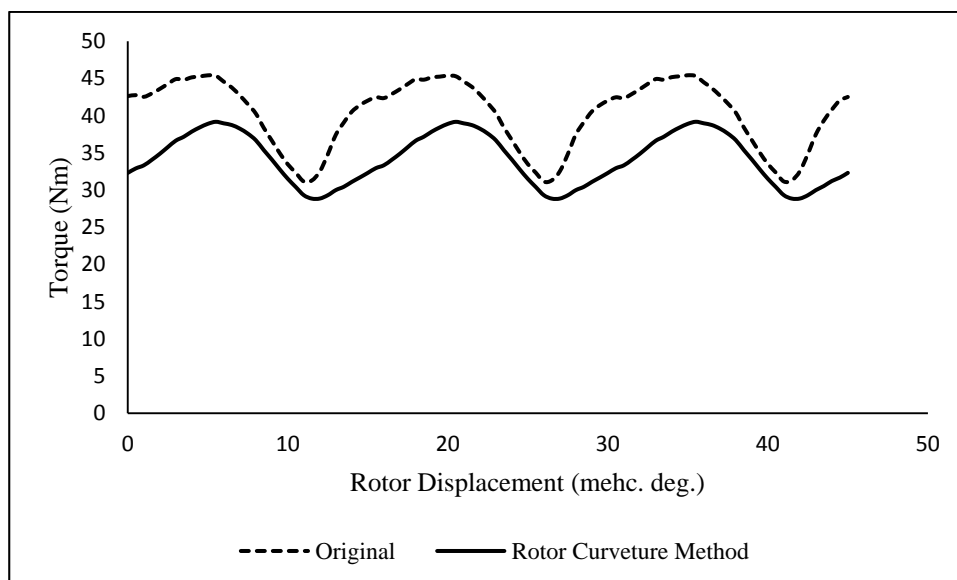
شکل (۵-۲۸): ریپل گشتاور خروجی برحسب تغییرات شعاع انحنای لبه‌ی روتور

با توجه به شکل‌های (۵-۲۹) و (۵-۳۰) گشتاور دندانه‌ای نسبت به ریپل گشتاور خروجی

بیشتر کاهش یافته و میزان کاهش این دو مشخصه به ترتیب ۵۷/۶۰٪ و ۱۴/۸۸٪ است.



شکل (۵-۲۹): گشتاور دندانه‌ای موتور در روش تغییر انحنای لبه روتور

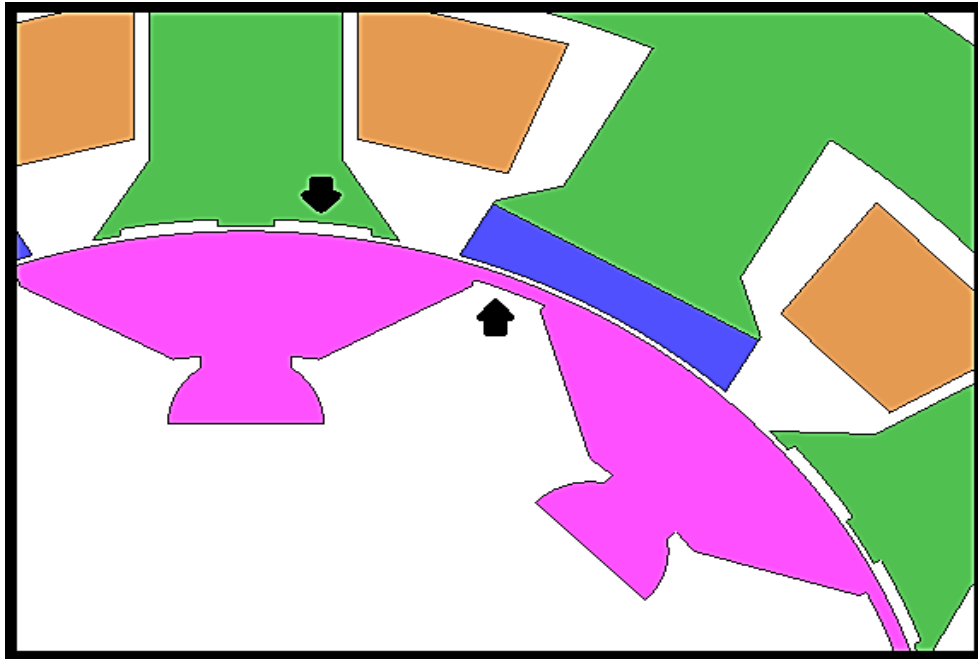


شکل (۵-۳۰): گشتاور خروجی موتور در روش تغییر انحنای لبه روتور

۵-۷- روش ترکیبی دو بعدی

با بررسی روش‌های پیشین می‌توان نتیجه گرفت که روش ایجاد شکاف در استاتور بهتر از روش‌های ذکر شده بوده و کاهش بیشتر ریپل گشتاور و اندازه‌ی گشتاور دندانه‌ای را به همراه دارد. روش ایجاد پل آهنی در روتور قطعاً با کاهش چگالی شار در هنگام تقابل قطعه و دندانه‌ی استاتور همراه بوده و گشتاور دندانه‌ای و ریپل گشتاور خروجی را کاهش می‌دهد. ترکیب این دو روش همانند شکل (۵-۳۱) می‌تواند کاهش بیشتر ریپل گشتاور خروجی و گشتاور دندانه‌ای را به همراه داشته باشد. در این قسمت با ترکیب دو روش ذکر شده به بررسی کاهش ریپل گشتاور و اندازه‌ی گشتاور دندانه‌ای پرداخته شده‌است.

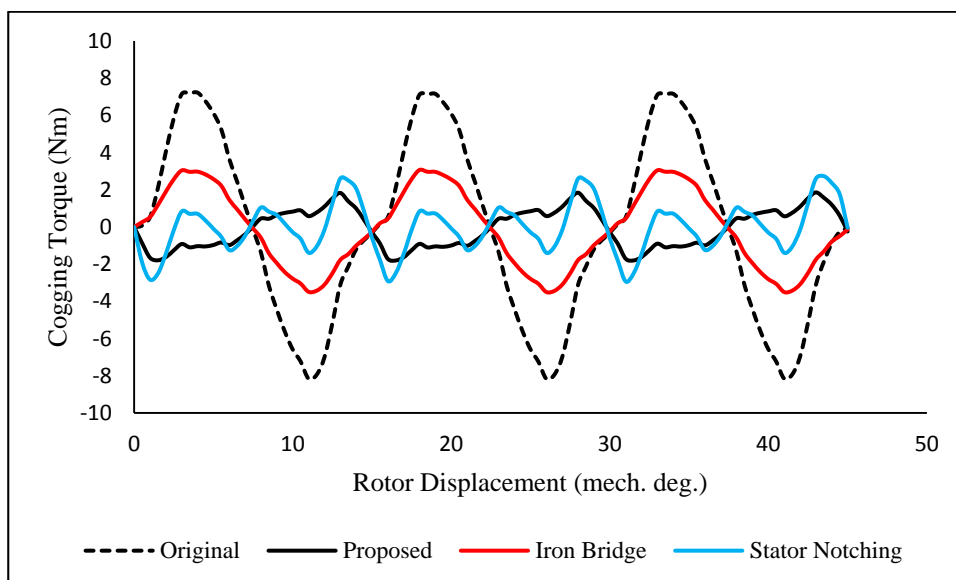
در شکل (۵-۳۲) و (۵-۳۳) گشتاور دندانه‌ای و ریپل گشتاور خروجی روش ترکیبی با روش‌های ایجاد پل در روتور، شکاف در استاتور و موتور بدون تغییر مقایسه شده است. کاهش گشتاور دندانه‌ای و ریپل گشتاور خروجی چشمگیر بوده و به ترتیب برابر ۷۶/۲۲٪ و ۵۴/۹۷٪ می‌باشد.



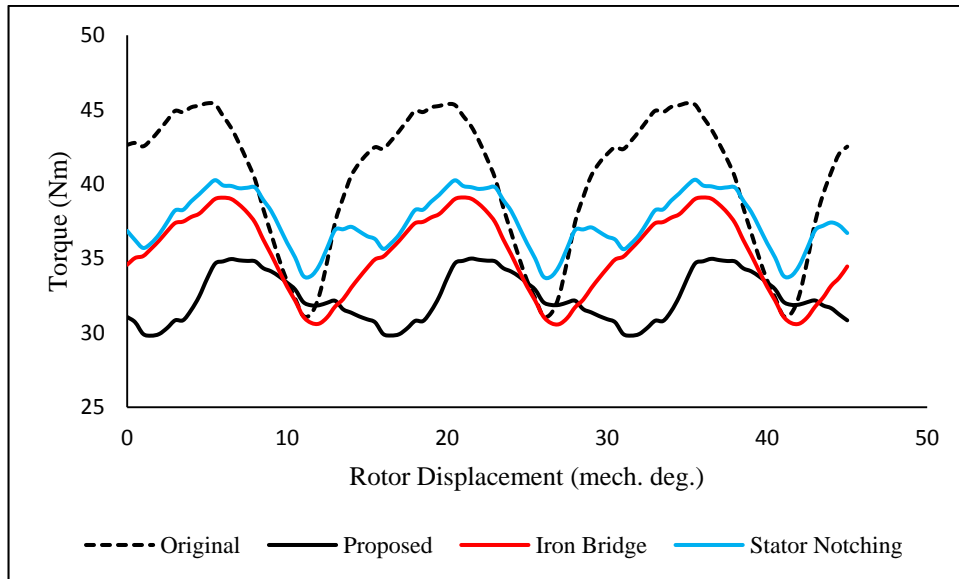
شکل (۳۱-۵): روش ترکیبی

شکل (۳۴-۵) نشان دهنده‌ی طیف هارمونیک‌ی نیرو محرکه‌ی القایی است. همان‌طور که مشاهده

می‌شود، اندازه‌ی هارمونیک‌ها کاهش یافته و تنها هارمونیک دوم و چهارم مقدار قابل‌توجه دارند.



شکل (۳۲-۵): مقایسه‌ی گشتاور دندانهای سه روش پل آهنی، شکاف در استاتور و ترکیبی



شکل (۵-۳۳): مقایسه‌ی گشتاور خروجی سه روش پل آهنی، شکاف در استاتور و ترکیبی

۵-۸- مقایسه‌ی روش‌های کاهش ریپل گشتاور دوبعدی

در شکل (۵-۳۵) روش‌های بکار رفته برای کاهش گشتاور دندانه‌ای و ریپل گشتاور مقایسه شده‌اند

✓ روش ترکیبی علاوه بر کاهش قابل توجه ریپل گشتاور خروجی، گشتاور دندانه‌ای را به میزان چشمگیری کاهش می‌دهد. درحالی‌که از میان روش‌های بکار گرفته شده، روش جفت کردن قطعه‌های روتور کمترین کاهش گشتاور دندانه‌ای و روش تغییر انحنای روتور کمترین کاهش ریپل گشتاور را دارند.

✓ روش ایجاد شکاف در استاتور ضمن کاهش شدید ریپل گشتاور و گشتاور دندانه‌ای، در بین روش‌های بررسی شده تأثیر کمتری بر روی گشتاور میانگین می‌گذارد.

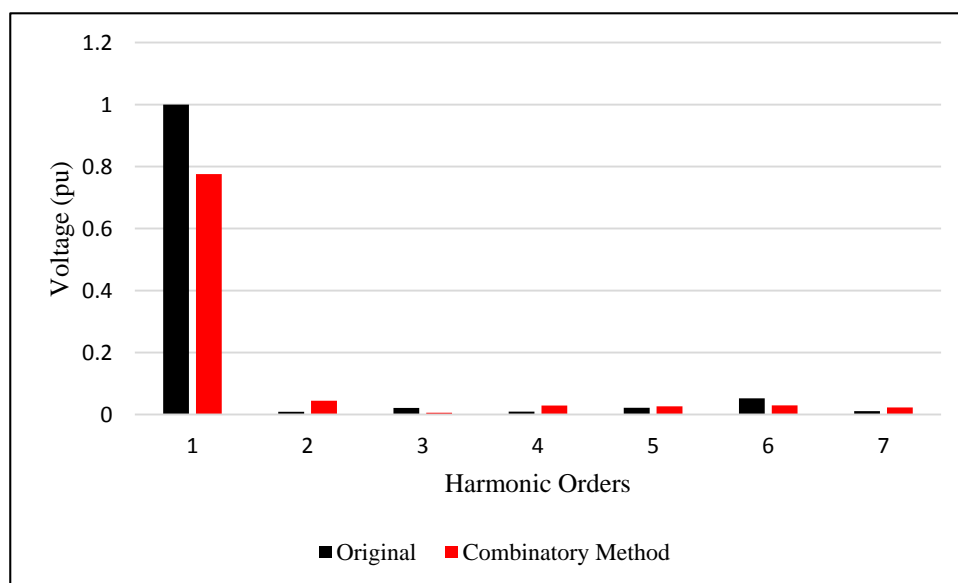
✓ از دیدگاه ساخت موتور، اجرای روش پل آهنی و روش بهینه ترکیبی به علت یکپارچه کردن روتور، آسان‌تر می‌باشند.

✓ در همه‌ی روش‌های ارائه‌شده در پایان نامه، گشتاور خروجی کاهش یافته که می‌توان نتیجه گرفت، کاهش گشتاور دندانه‌ای در ازای کاهش میانگین گشتاور خروجی است.

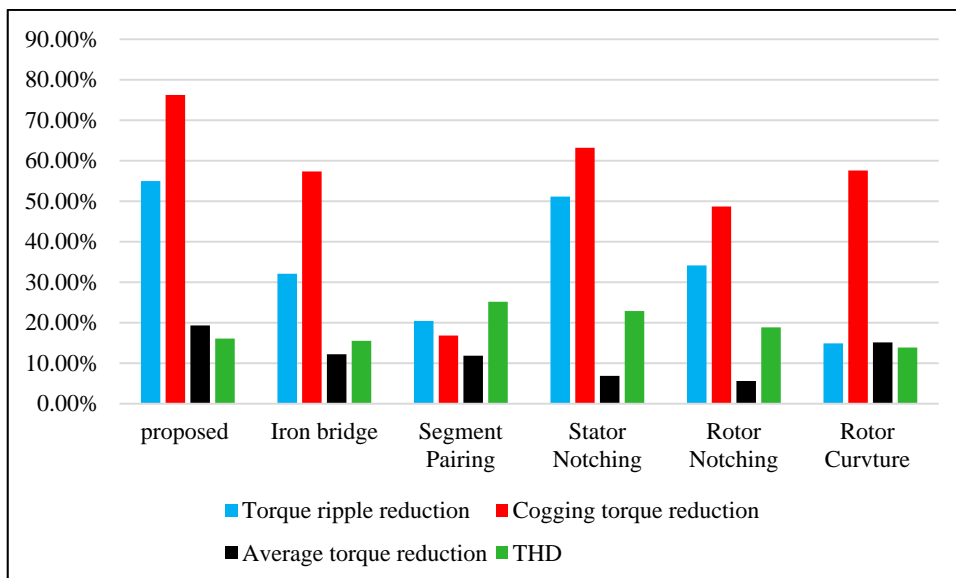
✓ درصد اعوجاج هارمونیک نیرو محرکه القایی روش پیشنهادی و روش تغییر انحنای روتور از تمامی روش‌های بکار رفته کمتر و روش جفت کردن قطعه‌های روتور دارای بیشترین اعوجاج هارمونیک است.

۵-۹- جمع‌بندی

در این فصل روش‌های مختلف دو بعدی کاهش گشتاور دندانه‌ای و ریپل گشتاور خروجی بر روی ماشین مورد مطالعه شبیه‌سازی شده و در هر روش پارامترهای موجود با توجه ریپل گشتاور خروجی تنظیم شده‌است. در نهایت روش ترکیبی برای کاهش بیشتر ریپل گشتاور و گشتاور دندانه‌ای پیشنهاد شده‌است.



شکل (۵-۳۴): طیف هارمونیک نیرو محرکه‌ی القایی روش ترکیبی



شکل (۵-۳۵): مقایسه روش‌های بکار گرفته شده دو بعدی

فصل ششم

نتایج روش‌های شبیه‌سازی سه‌بعدی کاهش

ریپل گشتاور

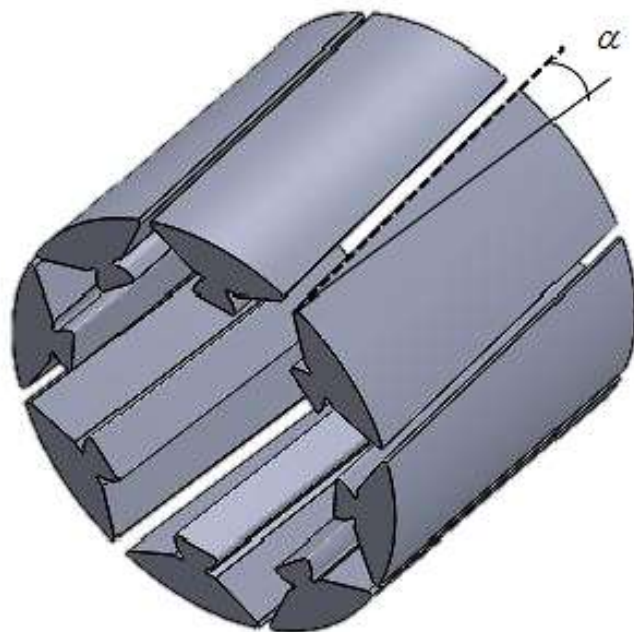
۶-۱- مقدمه

در این فصل به بررسی روش‌های سه بعدی از قبیل انحراف روتور و جفت کردن محوری قطعه‌های روتور پرداخته می‌شود. در روش انحراف روتور، زاویه‌ی انحراف مناسب با توجه به تغییرات ریپل گشتاور و گشتاور دندان‌های تعیین می‌شود. روش جفت کردن محوری قطعه‌های روتور با استفاده از نتایج شبیه‌سازی دو بعدی در به‌دست آوردن زاویه گسترده‌ی مناسب برای قطعه‌ها، در طول محور بکار می‌روند. در آخر روش ترکیبی ایجاد شکاف مورب که ایده روش از ترکیب روش‌های انحراف روتور و ایجاد شکاف به دست آمده است، بر روی موتور مورد مطالعه اجرا می‌شود روش ابداعی موجب کاهش ریپل گشتاور و گشتاور دندان‌های در میانگینی مطلوب از گشتاور خروجی می‌گردد. تغییر زاویه‌ی عرضی، عمق و تعداد شکاف در روتور و استاتور بررسی می‌شود. اجزای موتور سه بعدی در نرم‌افزار Solidwoks طراحی شده و در نرم‌افزار JMAG-Designer اجرا شده است.

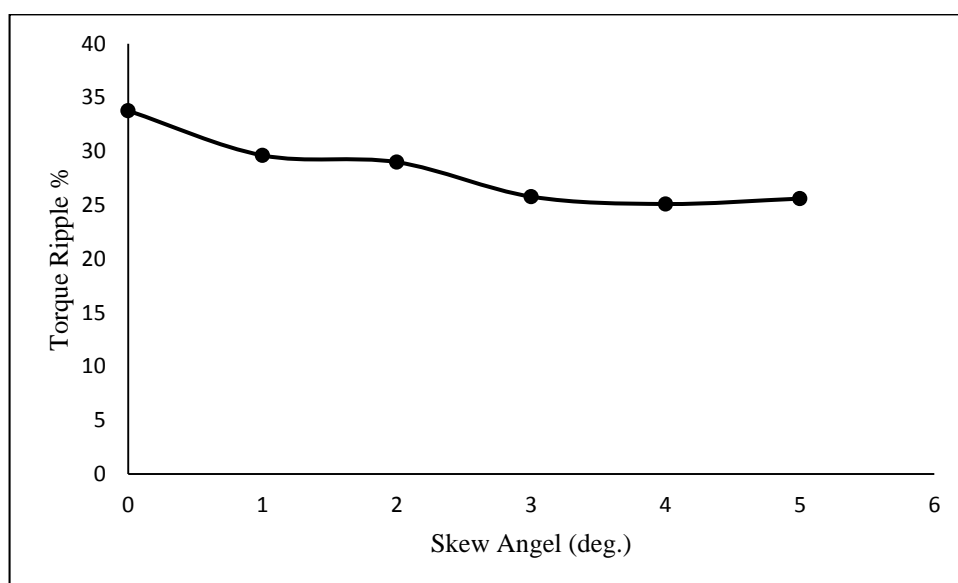
۶-۲- روش انحراف روتور

روش انحراف روتور و یا استاتور در ماشین‌های آهن‌ریا دائم کاربرد دارد. انحراف استاتور در ماشین‌های FSPM به دلیل وجود آهن‌ریاها در استاتور مشکل است در نتیجه انحراف بر روی روتور انجام می‌گیرد. در این بخش با تغییر زاویه انحراف قطعه‌ها همانند شکل (۶-۱) بهترین زاویه انحراف انتخاب می‌شود.

شکل (۶-۲) ریپل گشتاور را برحسب تغییرات زاویه انحراف روتور مشخص می‌نماید. با توجه به شکل زاویه انحراف ۳ درجه مناسب‌ترین گزینه برای کاهش ریپل گشتاور بوده زیرا با بررسی گشتاور خروجی، میانگین گشتاور در ۴ و ۵ درجه کاهش شدیدی نسبت به زاویه ۳ درجه دارد.



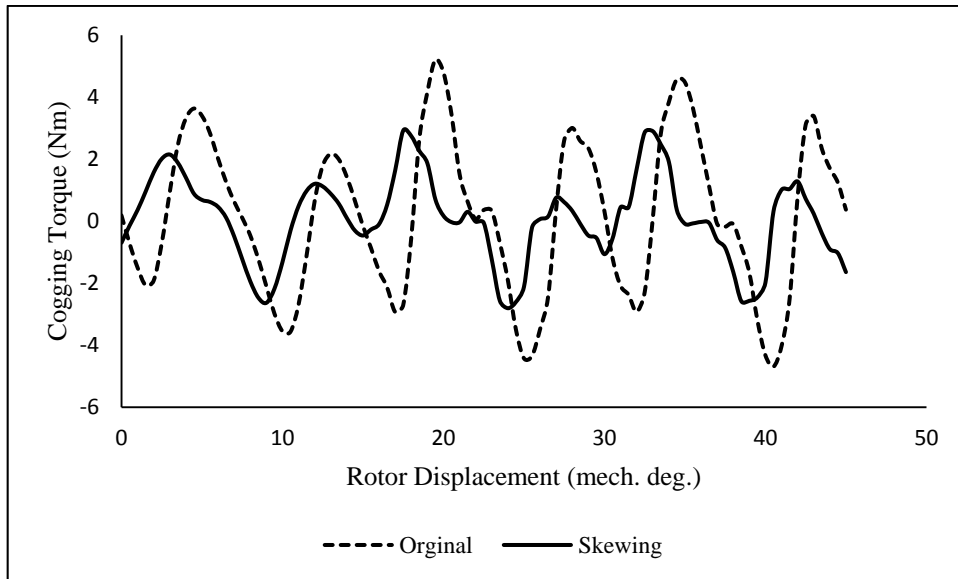
شکل (۱-۶): روش انحراف روتور



شکل (۲-۶): ریبیل گشتاور برحسب تغییرات زاویه انحراف روتور

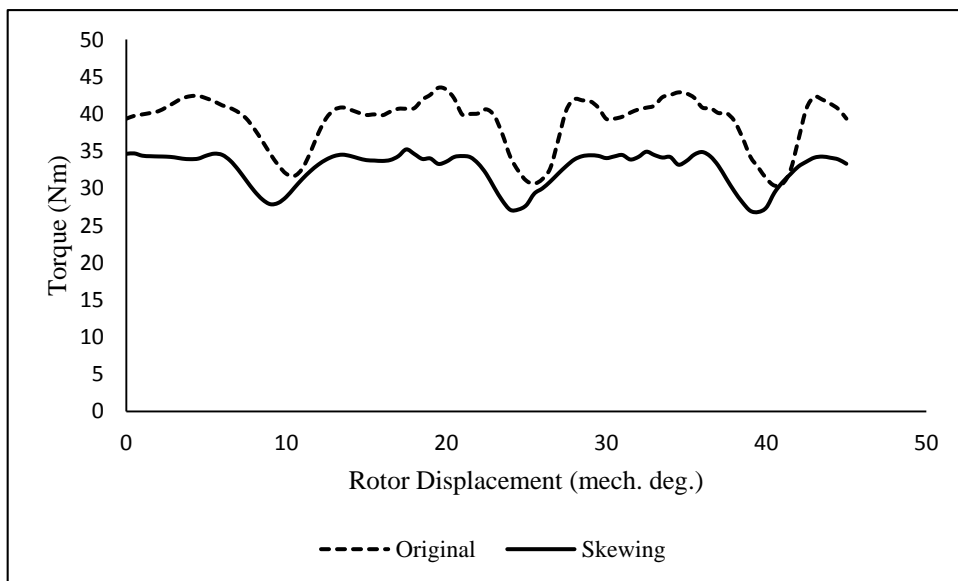
در شکل (۳-۶) و (۴-۶) به ترتیب گشتاور دندانه‌ای و ریبیل گشتاور خروجی ۳ درجه با موتور بدون

تغییر مقایسه شده است.

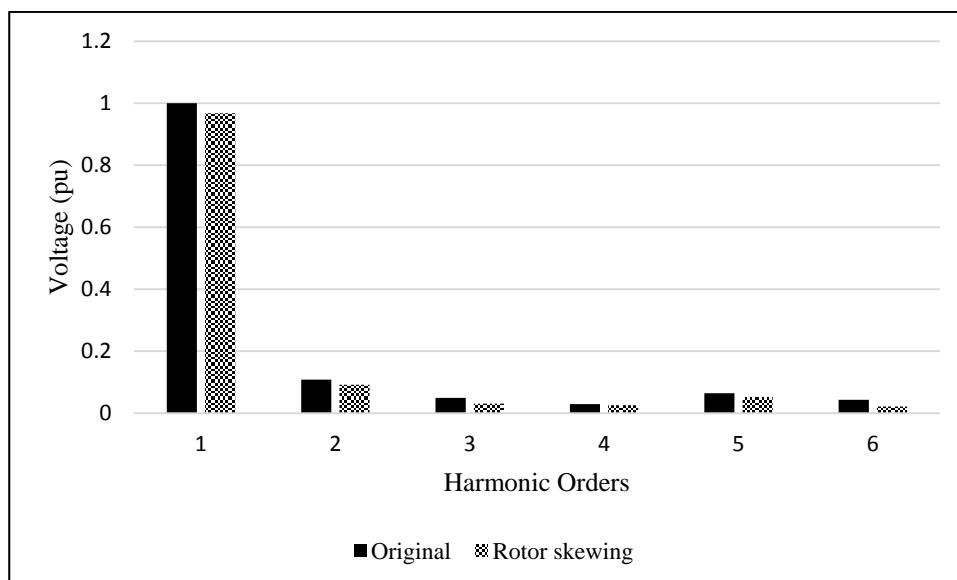


شکل (۳-۶): گشتاور دندانه‌ای در زاویه انحراف ۳ درجه

گشتاور دندانه‌ای به میزان ۴۲/۱۳٪ و ریپل گشتاور خروجی به مقدار ۲۳/۶۵٪ کاهش یافته است. شکل (۵-۶) نمایانگر طیف هارمونیک نیرو محرکه القایی روش انحراف روتور است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مؤلفه‌های هارمونیک نیرو محرکه کاهش یافته و این روش بر روی گشتاور دندانه‌ای و اعوجاج هارمونیک تأثیر بسزایی دارد.



شکل (۴-۶): ریپل گشتاور خروجی در زاویه انحراف ۳ درجه



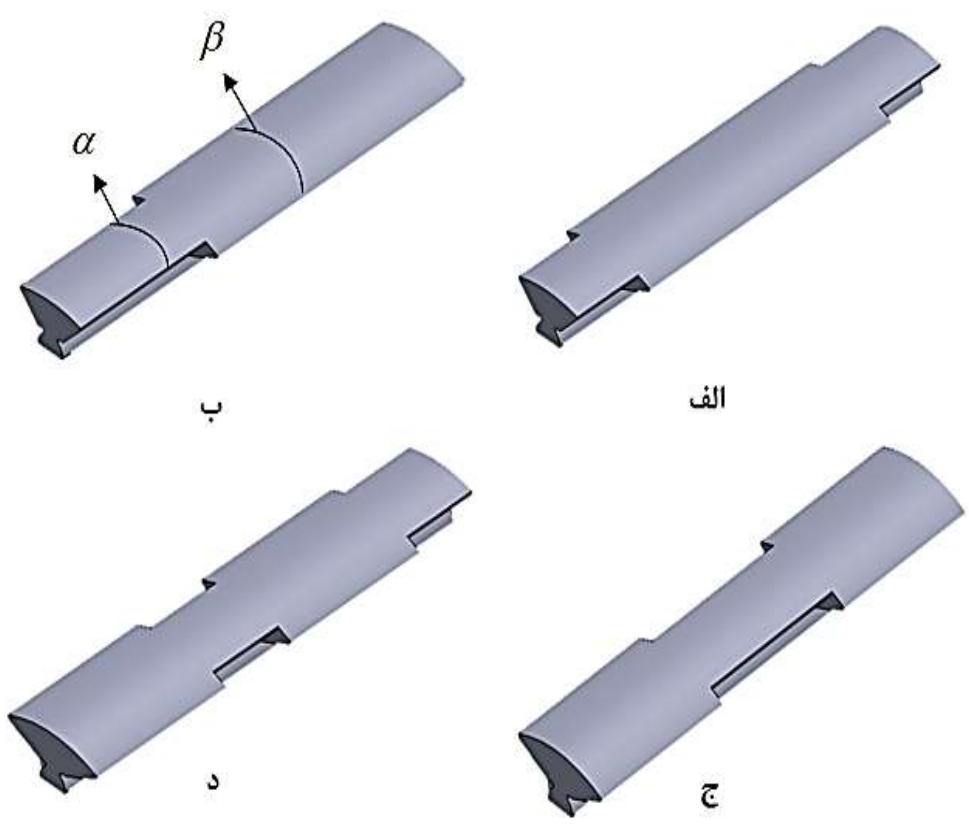
شکل (۵-۶): طیف هارمونیک نیرومحرکه‌ی القایی روش انحراف روتور

۳-۶- روش جفت کردن محوری قطعه‌های روتور

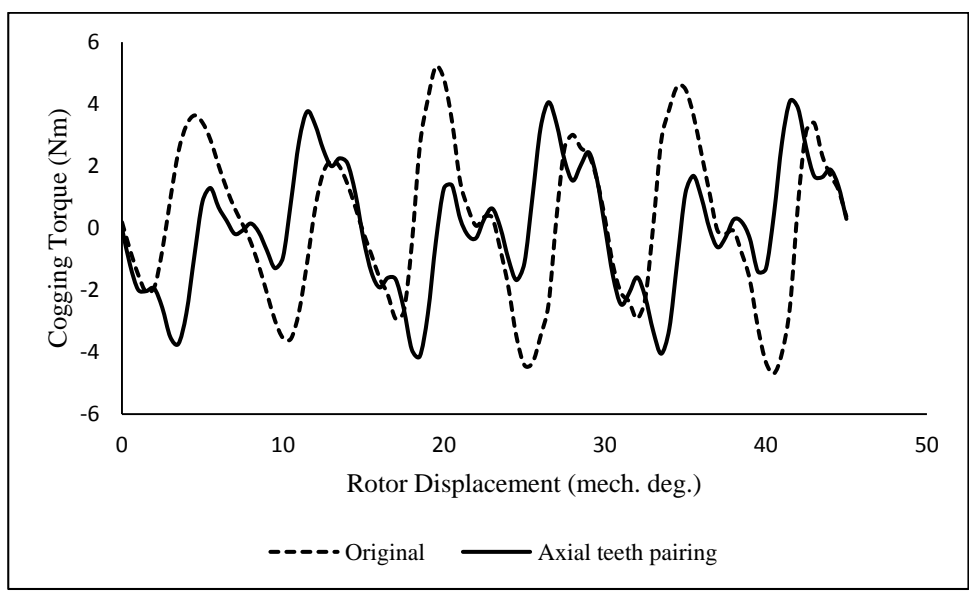
در این روش با استفاده از معادلات (۳-۱۹)، (۳-۲۰) و عرض قطعه‌های منتخب در روش دو بعدی اندازه طول محور زاویه ۴۵ درجه (β)، ۱۰۰ میلی‌متر و طول محور ۴۳ درجه (α)، ۵۰ میلی‌متر انتخاب می‌شود.

چینش‌های متفاوتی از زاویه ۴۵ و ۴۳ درجه به صورت چهار، سه و دو قسمتی همانند شکل (۶-۶) انجام شده است. دو قسمتی کردن روتور موجب نامتعادل بودن موتور می‌شود پس از دو قسمتی کردن صرف‌نظر می‌شود. از بین گزینه‌های موجود در شکل (۶-۶)، تنها نتیجه سه قسمتی کردن طول محور همانند شکل (۶-۶-الف) اثر بخش بوده است به گونه‌ای که قسمت میانی به طول ۱۰۰ میلی‌متر زاویه قطعه ۴۵ درجه و قسمت‌های دیگر هر کدام ۲۵ میلی‌متر با زاویه قطعه ۴۳ درجه باشد.

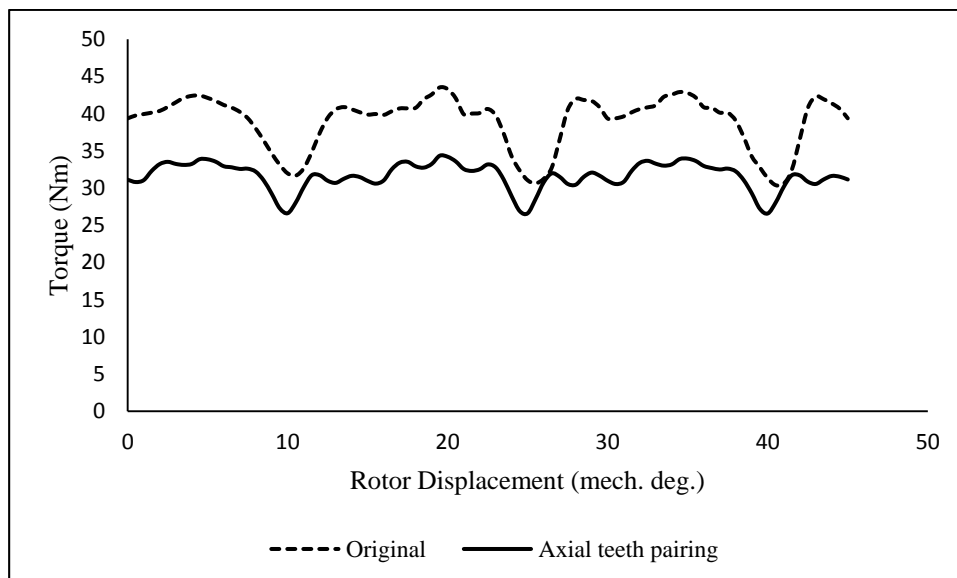
شکل (۶-۷) و (۶-۸) به ترتیب گشتاور دندانه‌ای و ریپل گشتاور خروجی نمایش داده شده است. کاهش گشتاور دندانه‌ای ۱۶/۸۶٪ و کاهش ریپل گشتاور ۲۷/۲۱٪ است. با توجه به شکل (۶-۹) هارمونیک‌های زوج افزایش یافته و همچنین هارمونیک اول کاهش فراوانی دارد.



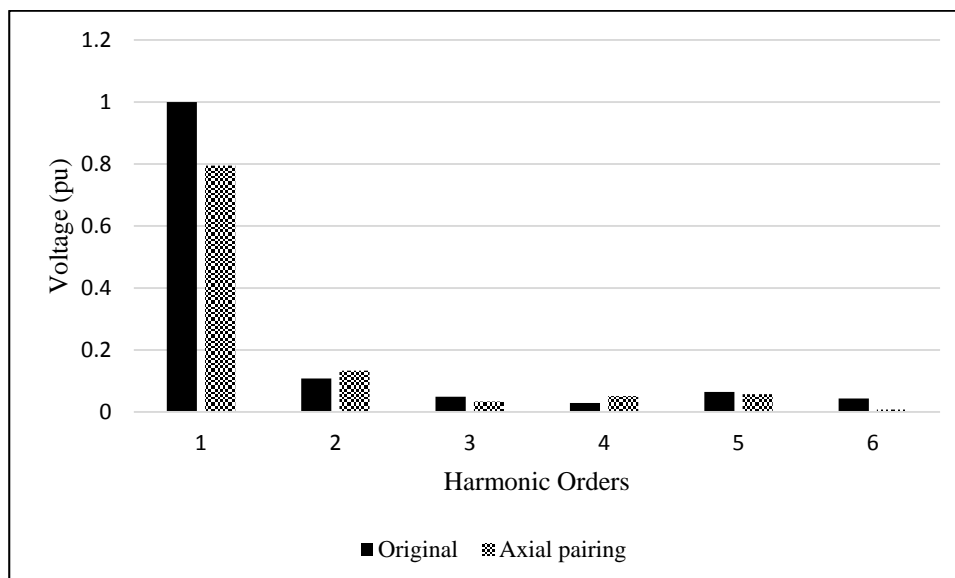
شکل (۶-۶): انواع روتورهای شبیه‌سازی شده در روش جفت کردن



شکل (۶-۷): گشتاور دندانهای در روش جفت کردن محوری



شکل (۶-۸): ریپل گشتاور خروجی در روش جفت کردن محوری



شکل (۶-۹): طیف هارمونیکی نیرو محرکه‌ی القایی روش جفت کردن محوری قطعه‌ها

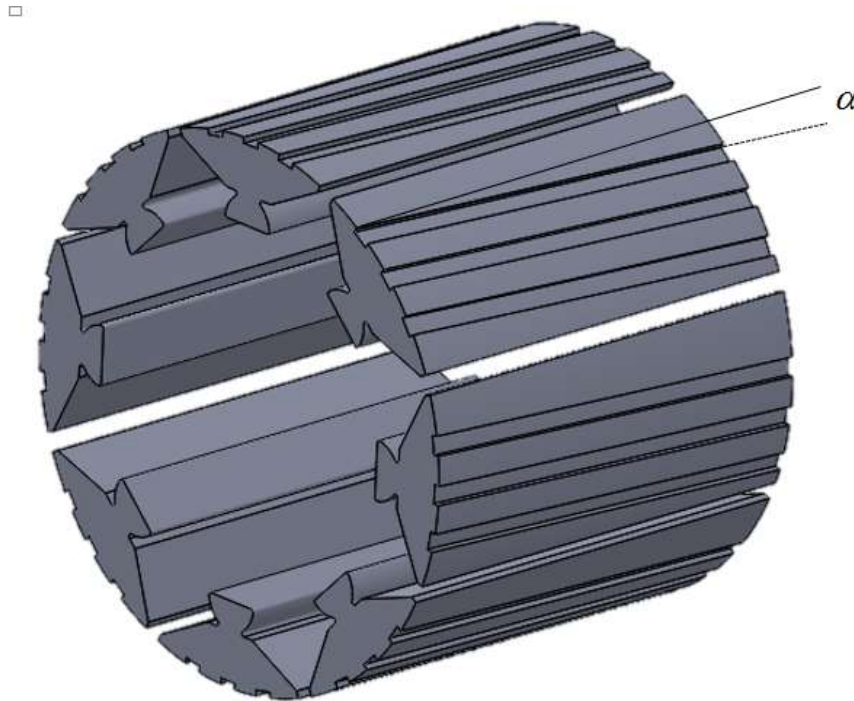
۶-۴- روش ترکیبی سه‌بعدی

روش انحراف روتور موجب پیچیدگی در ساخت می‌شود همچنین میانگین را به میزان چشمگیر

کاهش می‌دهد. ایده روش ابداعی، ایجاد شکاف مورب در روتور که در شکل (۶-۱۰) نمایش داده

شده‌است.

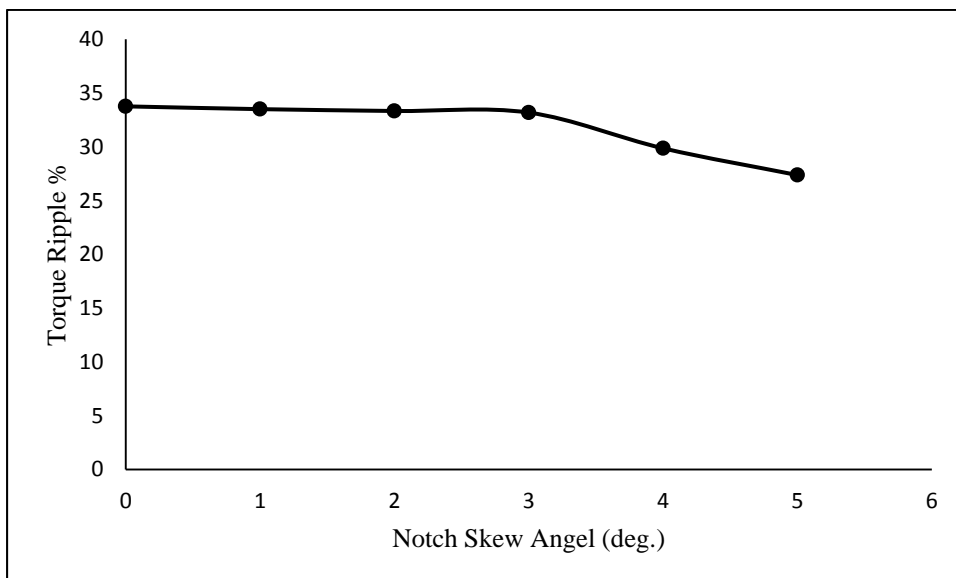
این روش ضمن کاهش ریپل گشتاور، مقدار میانگین گشتاور را در مقدار بسیار مطلوبی و تقریباً نزدیک به گشتاور اولیه حفظ می‌نماید.



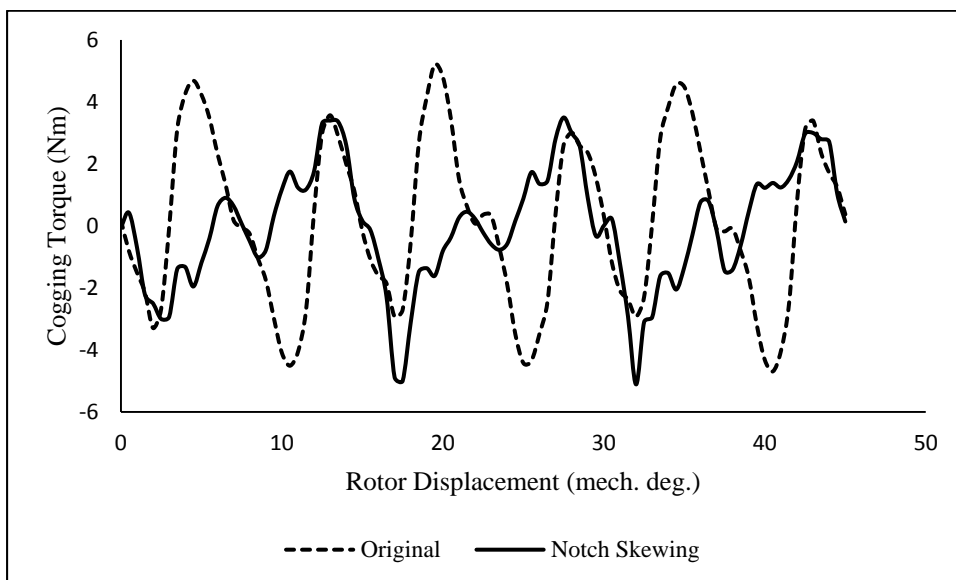
شکل (۶-۱۰): شکاف مورب در روتور

شکاف‌های بهینه به دست آورده شده از روش دو بعدی بکار رفته است. در شکل (۶-۱۱) ریپل گشتاور بر حسب تغییرات زاویه انحراف شکاف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود، در زاویه انحراف ۵ درجه کمترین ریپل گشتاور حاصل می‌گردد.

شکل (۶-۱۲) و (۶-۱۳) به ترتیب گشتاور دندانه‌ای و گشتاور خروجی موتور را در زاویه انحراف شکاف ۵ درجه نشان می‌دهد که موجب کاهش ۱۹٪ ریپل گشتاور و ۱۰/۶٪ گشتاور دندانه‌ای شده است. روش مورد نظر بر روی ریپل گشتاور خروجی مؤثرتر از گشتاور دندانه‌ای بوده و اعوجاج هارمونیک نیرو محرکه القایی را با توجه به شکل (۶-۱۴) کاهش می‌دهد.



شکل (۶-۱۱): ریپل گشتاور برحسب تغییرات زاویه انحراف شکاف در روتور

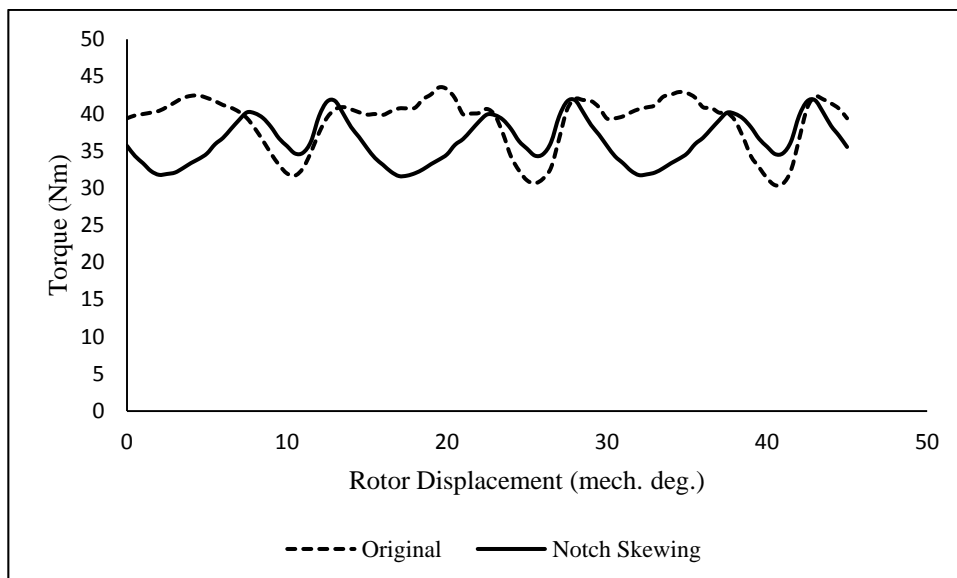


شکل (۶-۱۲): گشتاور دندانه‌ای در روش ایجاد شکاف مورب

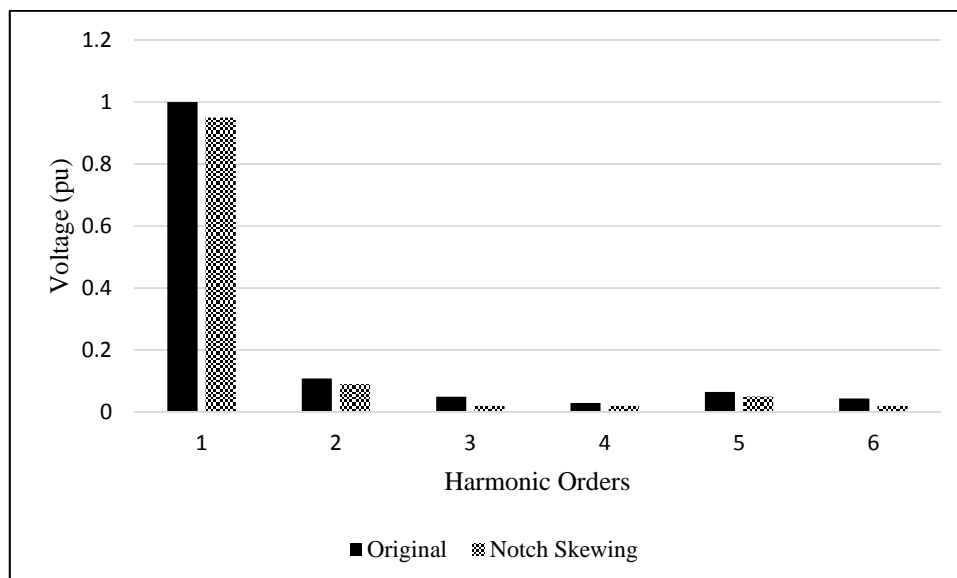
۶-۵- مقایسه روش‌های کاهش ریپل گشتاور سه‌بعدی

در شکل (۶-۱۵) روش‌های بکار رفته برای کاهش گشتاور دندانه‌ای مقایسه شده‌اند.

✓ روش انحراف روتور در کاهش گشتاور دندانه‌ای از میان روش‌های سه‌بعدی مقایسه شده مؤثرتر است.

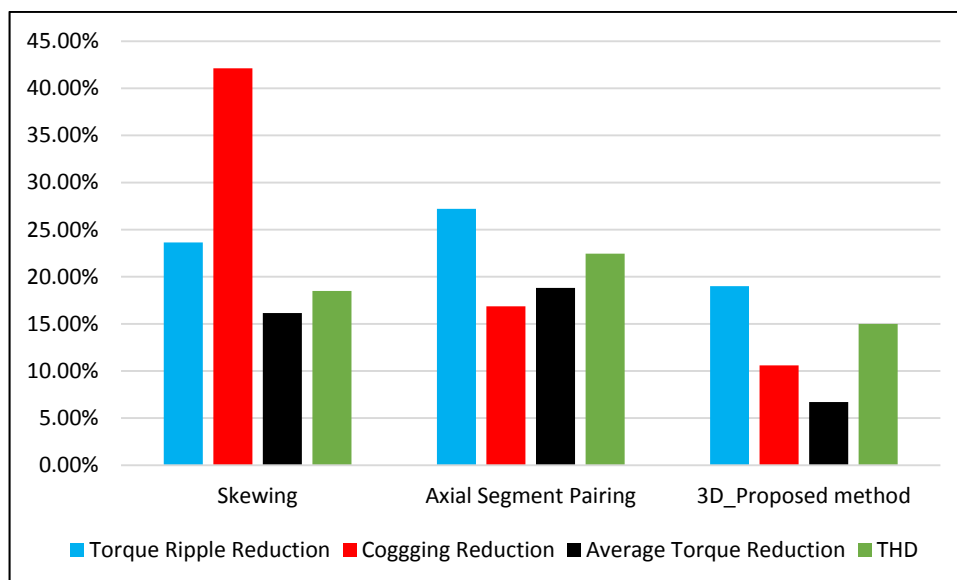


شکل (۶-۱۳): گشتاور خروجی در روش ایجاد شکاف مورب



شکل (۶-۱۴): طیف هارمونیکی نیرومحرکه‌ی القایی روش شکاف مورب

- ✓ روش جفت کردن محوری قطعه‌های روتور بر روی ریپل گشتاور بیشتر اثربخش بوده ولی کاهش میانگین گشتاور در این روش محسوس‌تر است.
- ✓ روش ارائه شده سه بعدی کمترین تأثیر را بر روی میانگین گشتاور خروجی داشته و کمترین اعوجاج هارمونیکی را دارد که یک نتیجه رضایت‌بخش است.



شکل (۶-۱۵): مقایسه روش‌های کاهش ریپل گشتاور سه‌بعدی

۶-۶- جمع‌بندی

در این فصل روش‌های مختلف سه‌بعدی کاهش گشتاور دندانه‌ای و ریپل گشتاور بر روی ماشین مورد مطالعه شبیه‌سازی شده و در هر روش پارامترهای موجود بر اساس ریپل گشتاور خروجی تنظیم شده است. در نهایت روش ترکیبی برای کاهش ریپل گشتاور و گشتاور دندانه‌ای با میانگین گشتاوری رضایت‌بخش پیشنهاد شده است.

فصل هفتم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۷-۱- نتیجه‌گیری

گشتاور دندانهای و ریپل گشتاور بالا در ماشین‌های آهنربا دائم مسئله‌ای چالش‌برانگیز است. همان‌طور که در فصل اول بیان شد ماشین SRFSPM در بین ماشین‌های تعویض شار گشتاور دندانهای و ریپل گشتاور بالایی داشته در صورتی که برتری‌های نسبت به دیگر ماشین‌های تعویض شار دارد. در فصل دوم انواع روش‌های کاهش گشتاور دندانهای در ماشین‌های تعویض شار بیان گردید و روش‌های منتخب‌شده و همچنین ساختارهای متفاوتی از ماشین‌های تعویض شار آهنربا دائم در فصل سوم معرفی شد. در فصل پنجم ماشین نمونه شبیه شده و در فصل ششم و هفتم انواع روش‌های منتخب دوبعدی و سه‌بعدی کاهش گشتاور دندانهای و ریپل گشتاور در این پایان‌نامه بررسی شد.

در روش‌های بررسی‌شده علاوه بر کاهش گشتاور دندانهای، ریپل گشتاور در نظر گرفته شده است که در مقالات هردو پارامتر باهم بررسی نشده‌اند. در هر روش پارامترهای موجود با استفاده از روش اجزای محدود برای کاهش ریپل گشتاور و گشتاور دندانهای تنظیم شده است. در ادامه روش دوبعدی پیشنهادی موجب کاهش بیشتر ریپل گشتاور و گشتاور دندانهای می‌شود و روش سه‌بعدی پیشنهادشده ضمن کاهش ریپل گشتاور و گشتاور دندانهای اثر کمتری بر روی میانگین گشتاور خروجی دارد.

به‌طور کلی در بین روش‌های سه‌بعدی و دوبعدی اجراشده، روش ایجاد شکاف در استاتور ضمن کاهش شدید اندازه ماکزیمم تا مینیمم گشتاور دندانهای، میانگین گشتاور ماشین را در مقدار مطلوبی نگه می‌دارد؛ اما روش ترکیبی دوبعدی حاصل از اضافه کردن شکاف در استاتور و پل آهنی در روتور ضمن یکپارچه کردن و استحکام بخشیدن به روتور، اندازه ماکزیمم تا مینیمم گشتاور دندانهای و ریپل گشتاور را به بیشترین میزان، کاهش می‌دهد. نیرومحرکه القایی سینوسی از خصوصیات برگزیده ماشین تعویض شار بوده که روش دوبعدی پیشنهادی تقریباً تأثیر کمی بر روی اعوجاج هارمونیک نیرو محرکه القایی دارد و مؤثرترین روش برای موتور مورد نظر، پیشنهاد می‌شود.

۷-۲- پیشنهاداتی برای پژوهش‌های آینده

با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش پیشنهادات زیر جهت ادامه آن و انجام پژوهش‌های بعدی

پیشنهاد می‌شود:

۱. در این پژوهش روش‌های کاهش گشتاور دندانه‌ای درزمینه‌ی طراحی ماشین انجام شده است. از این رو با استفاده از روش‌های کنترل درایو شاید بتوان در صورت کاهش گشتاور دندانه‌ای از میانگین مطلوب برخوردار بود.

۲. در این تحقیق بیشترین تغییرات بر روی روتور صورت گرفته است و علت آن آسان‌تر اعمال کردن تغییرات بر روی روتور بدون مگنت و سیم‌پیچی است. می‌توان با ایجاد تغییرات بر روی شیارها و نامتقارن نمودن شیارها به صورت یک‌درمیان موجب نامتقارن نمودن نیرو محرکه مغناطیسی^۱ (MMF) و کاهش گشتاور دندانه‌ای می‌شود.

۳. روش‌های ترکیبی می‌تواند علاوه بر تأثیر بر روی موتور SRFSPM بر دیگر انواع ماشین‌های شار محوری، شار متقاطع و خطی تأثیرگذار باشد و بهترین روش ترکیبی را در تمامی ماشین‌های تعویض شار برگزید.

۴. تغییرات شکل آهنرباها به علت سختی شکل‌دهی مگنت، در این تحقیق بررسی نشده است، اما همواره شکل‌دهی آهنربا نقش بسیار مؤثری در کاهش گشتاور دندانه‌ای و ریپل گشتاور دارد.

۵. با استفاده از روش‌های کاهش ریپل گشتاور و گشتاور دندانه‌ای در طراحی اولیه ماشین همانند بهینه‌سازی ابعاد ماشین می‌تواند این دو مشخصه را بهبود بخشید.

1- Magneto-Motive Force

۶. با توجه به اینکه شکل لبه‌ی دندانه‌ی استاتور و روتور نقش بسزایی در کاهش ریپل گشتاور و گشتاور دندانه‌ای دارد، می‌توان با در نظر گرفتن تعدادی نقطه در سطح دندانه و بهینه‌سازی عمق نقاط، گشتاور دندانه‌ای و ریپل گشتاور را کم نمود درحالی‌که میانگین گشتاور در میزان مطلوب باقی بماند و شکل بهینه لبه دندانه را ایجاد کرد.

مراجع

- [1] Cao R., Mi C., and Cheng M. (2012) “Quantitative comparison of flux-switching permanent-magnet motors with interior permanent magnet motor for EV, HEV, and PHEV applications” **IEEE Trans. Magn.**, 48, 8, pp 2374.
- [2] Liu X., Diao Y., Zhang C., Chen D., Zuo L., and Yi L. (2014) “Design optimisation of an axial flux-switching hybrid excitation synchronous machine at no-load” **IET Elec. Power Appl.**, 8, 9, pp 342.
- [3] Bangura J. F. (2006) “Design of high-power density and relatively high-efficiency flux-switching motor” **IEEE Trans. Energy Convers.**, 21, 2, pp 416.
- [4] Cheng M., Hua W., Zhang J., and Zhao W. (2011) “Overview of stator-permanent magnet brushless machines” **IEEE Trans. Ind. Electron.**, 58, 11, pp 5087.
- [5] Hoang E., Ben-Ahmad A. H., and Lucidarme J., (1997) “Switching flux permanent magnet polyphased synchronous machines”, **7th Eur. Conf. on Power Electron. Appl. (EPE7)**, P903, Trondheim, Norway.
- [6] Rauch S. E. and Johnson L. J., (1995) “Design principles of flux-switching alternators” **AIEE Trans. Power App. Syst. Part III**, 74, 3, pp 1261.
- [7] Zhu Z. Q. and Chen J. T. (2010) “Advanced Flux-Switching Permanent Magnet Brushless Machines” **IEEE Trans. Magn.**, 46, 6, pp 1447.
- [8] Yang H., Lin H., Zhuang E., Guo Y., Feng Y., and Lu X., (2014) “Cogging torque minimisation of novel switched flux permanent magnet memory machine by structural variation”, **7th IET Int. Conf. Power Electron. Machines and Drives (PEMD7)**, P1, Manchester.
- [9] Jin M.J., Wang Y., Shen J.X., Luk P.C.K., Fei W.Z., and Wang C.F. (2010) “Cogging Torque Suppression in a permanentmagnet flux-switching integrated-starter generator” **IET Elect. Power Appl.**, 4, 8, pp 647.
- [10] Wang D., Wang X., and Jung S.Y. (2012) “Reduction on cogging torque in flux-switching permanent magnet machine by teeth notching schemes” **IEEE Trans. Magn.**, 48, 11, pp 4228.
- [11] Hao L., Lin M., Xu D., Li N., and Zhang W. (2015) “Cogging torque reduction of axial-field flux-switching permanent magnet machine by rotor tooth notching” **IEEE Trans. Magn.**, 51, 11, pp 1.
- [12] Abdollahi S. E. and Vaez-Zadeh S. (2013) “Reducing cogging torque in flux switching motors with segmented rotor” **IEEE Trans. Magn.**, 49, 10, pp 5304.
- [13] Wang Y., Jin M. J., Fei W. Z., and Shen J. X. (2010) “Cogging torque reduction in permanent magnet flux-switching machines by rotor teeth axial pairing” **IET Elect. Power Appl.**, 4, 7, pp 500.

- [14] Xu W., Zhu J., Zhang Y., and Hu J., (2011) “Cogging torque reduction for radially laminated flux-switching permanent magnet machine with 12/14 poles”, **37th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Society (IECON37)**, P3590, Melbourne.
- [15] Fei W., Luk P.C.K., and Shen J. (2012) “Torque analysis of permanent-magnet flux switching machines with rotor step skewing” **IEEE Trans. Magn.**, 48, 10, pp 2664.
- [16] Fei W., Luk P. C. K., Shen J. X., Xia B., and Wang Y. (2011) “Permanent-magnet flux-switching integrated starter generator with different rotor configurations for cogging torque and torque ripple mitigations” **IEEE Trans. Ind. Appl.**, 47, 3, pp 1247.
- [17] Sikder C., Husain I., and Ouyang W. (2015) “Cogging torque reduction in flux switching permanent-magnet machines by rotor pole shaping” **IEEE Trans. Ind. Appl.**, 51, 5, pp 3609.
- [18] Zhu Z. Q., Pang Y., Chen J. T., Xia Z. P., and Howe D., (2008) “Influence of design parameters on output torque of flux-switching permanent magnet machines”, **IEEE Vehicle Power and Propulsion Conf**, P1, Harbin.
- [19] Owen R. L., Zhu Z. Q., and Jewell (2010) “Hybrid-excited flux-switching permanent-magnet machines with iron flux bridges” **IEEE Trans. Magn.**, 46, 6, pp 1726.
- [20] Hao L., Lin M., Xu D., and Zhang W. (2014) “Cogging torque reduction of axial field flux-switching permanent magnet machine by adding magnetic bridge in stator tooth” **IEEE Trans. Appl. Supercond.**, 24, 3, pp 1.
- [21] Jenal M., Hamzah S. A., Khan F., Soomr H. A., and Sulaiman E., (2015) “Performance investigations of flux switching machines for light weight electric vehicles”, **IEEE Conf. Energy Convers. (CENCON)**, P78, Johor Bahru.
- [22] Somesan L. E. and Viorel I. A. (2013) “Permanent magnet flux-switching machine, optimal design and performance analysis” **IEEE Trans.**, 11, 2, pp 46.
- [23] Hua W., Cheng M., and Zhang G. (2009) “A novel hybrid Excitation Flux-Switching Motor for Hybrid Vehicles” **IEEE Trans. Magn.**, 45, 10, pp 4728.
- [24] Zhou Y. J. and Zhu Z. Q. (2014) “Comparison of wound-field switched-flux machines” **IEEE Trans. Ind. Appl.**, 50, 5, pp 3314.
- [25] Lin M., Hao L., Li X., Zhao X., and Zhu Z. Q. (2011) “A novel axial field flux-switching permanent magnet wind power generator” **IEEE Trans. Magn.**, 47, 10, pp 4457.

- [26] Yan J., Lin H., Feng Y., Zhu Z. Q., Jin P., and Guo Y. (2013) “Cogging torque optimization of flux-switching transverse flux permanent magnet machine” **IEEE Trans. Magn.**, 49, 5, pp 2169.
- [27] Cao R., Cheng M., Mi C., Hua W., Wang X., and Zhao W., (2012) “Modeling of a complementary and modular linear flux-switching permanent magnet motor for urban rail transit applications” **IEEE Trans. Energy Convers.**, 27, 2, pp 489.
- [28] Xu D., Lin M. Y., Fu X. H., Hao L., Zhang W., and Zhao J. L. (2015) “Design and analysis of a hybrid axial field flux-switching permanent magnet machine”, **IEEE Int. Conf. Appl. Superconduct. Electromagnet. Devices**, pp 314.
- [29] Zhang B., Cheng M., Zhu S., Zhang M., Hua W., and Cao R., (2016) “Investigation of linear flux-switching permanent magnet machine for ropeless elevator”, **19th Int. Conf. Electric. Machines and Syst. (ICEMS19)**, P1, Chiba.
- [30] Zhu Z. Q. and Chen J. T. (2010) “Advanced flux-switching permanent magnet brushless machines” **IEEE Trans. Magn.**, 46, 6, pp 1447.
- [31] Sanabria-Walter C., Polinder H., and Ferreira J. A., (2013) “High-torque-density high-efficiency flux-switching PM machine for aerospace applications” **IEEE J. Emerg. Select. Topics Power Electron.**, 1, 4, pp 327.
- [32] Shao L., Hua W., and Cheng M., (2014) “Design of a twelve-phase flux-switching permanent magnet machine for wind power generation”, **17th Int. Conf. Elect. Machines and Syst. (ICEMS17)**, P435, Hangzhou.
- [33] Chen J.T. and Zhu Z.Q. (2010) “Winding configurations and optimal stator and rotor pole combination of flux-switching PM brushless AC machines” **IEEE Trans. Energy Convers.**, 25, 2, pp 293.
- [34] Zhu X., Hua W., and Cheng M., (2016) “Cogging torque minimization in flux-switching permanent magnet machines by tooth chamfering”, **IEEE Energy Convers. Congress and Exposition (ECCE)**, P1, Milwaukee.
- [35] Bianchi N. and Bolognani S. (2002) “Design techniques for reducing the cogging torque in surface-mounted PM motors” **IEEE Trans. Ind. Appl.**, 38, 5, pp 1259.
- [36] Ren W. and Xu Q., (2015) “A novel technique of cogging torque reduction in mass-produced surface-mounted permanent magnet motor using tooth notching pairing”, **IEEE Magn. Conf (INTERMAG)**, P1, Beijing.
- [37] Zulu A., (2010), Ph.D. thesis “Flux switching machines using segmental rotors”, Elect. Electron. and Comput. Eng. depart., Newcastle university.

Abstract

Nowadays, brushless rotor permanent magnet (PM) machines are widely used in home electric devices, space aircrafts, military apparatus, wind generators and electrical vehicles. Beside many advantages, protecting the PM pieces of the rotor from centrifugal force is the major problem of PM machines. To overcome the problem, the stator PM machines were proposed. Amongst the stator permanent magnet machines, flux switching permanent magnet machines (FSPM) are interested due to rather high torque density and high efficiency. On the other hand, the high cogging torque is the main drawback of FSPM. The cogging torque has no effect on the average output torque but causes vibration and acoustic noise, and reduces the speed control accuracy. Some cogging torque reduction techniques are essentially based on machine core shape optimization. These techniques improve the torque ripple but reduce the output torque.

Some typical techniques such as rotor and stator teeth notching, rotor segments pairing, rotor curvature variations, inserting iron bridge in rotor, and rotor skewing may reduce the torque ripple while affecting the average torque and back-EMF waveform of SRFSPM motors. In this thesis, by full investigating of typical torque reduction techniques, an inventive approach is proposed that shows more reduction of torque ripple and no considerable changes in the other performance characteristics of SRFSPM motor

***Index Terms*— Segmented-Rotor Flux-Switching Permanent Magnet Motors, Cogging Torque, Finite Element Method, Torque Ripple**



Faculty of Electrical Engineering and Robotic

M.Sc. Thesis in Power Electronic and Machine Engineering

**Optimal Design of a Three-Phase Flux-Switching
Permanent Magnet Motor in Order to Reduce the
Cogging Torque**

Shima Gooyamofrad

Supervisor:
Dr. Ahmad Darabi

Advisor:
Dr. Amir Hassannia

September 2017