

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی الکترونیک قدرت و ماشین‌های الکتریکی

بررسی تاثیر شکل قطب‌ها و شیارها بر روی مشخصه‌های عملکردی ماشین

مغناطیس دائم شار محوری

نگارنده: منصوره کریمی

استاد راهنما

دکتر احمد دارابی

استاد مشاور

دکتر امیر حسن‌نیا خیبری

شهریور ۱۳۹۶

شماره: ۱۴۹۷/۰۰۰۰  
تاریخ: ۹۴/۴/۶

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای منصوره کریمی با شماره دانشجویی ۹۳۳۲۹۱۴ رشته قدرت گرایش ماشینهای الکتریکی تحت عنوان: تأثیر شکل قطب ها و شیارها بر روی مشخصه های عملکردی ماشین مغناطیس دائم شار محوری که در تاریخ ۱۳۹۶/۰۶/۰۶ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

|                                |                                                            |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> مردود | <input type="checkbox"/> قبول (با امتیاز ۱۷,۵۲۱۸ درجه خوب) |
| <input type="checkbox"/> عملی  | <input checked="" type="checkbox"/> نظری: نوع تحقیق:       |

| عضو هیأت داوران           | نام و نام خانوادگی    | مرتبه علمی | امضاء |
|---------------------------|-----------------------|------------|-------|
| ۱- استاد راهنمای اول      | دکتر احمد داری        | استاد      |       |
| ۲- استاد راهنمای دوم      | —                     | —          | —     |
| ۳- استاد مشاور            | دکتر امیر حسن بنیادین | استادیار   |       |
| ۴- نماینده تحصیلات تکمیلی | دکتر یاسر دایم        | استادیار   |       |
| ۵- استاد ممتحن اول        | دکتر محمد سعید زکری   | استادیار   |       |
| ۶- استاد ممتحن دوم        | دکتر امیر رضا عسکری   | استادیار   |       |

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:  
تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

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

تقدیم به

پدر و مادر عزیز و مهربانم...

که در سختی ها و دشواری های زندگی، همواره یاور و دلسوز و خداکار

و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بوده اند.

## تشکر و قدردانی

منت خدای راعزوجل که طاعتش موجب قربت است و به شکراندرش مزید نعمت.

ضمن شکر خداوند بزرگ برای اتمام این تحقیق، در اینجا بر خود لازم می دانم که از راهنمایی های ارزنده استاد کرامتدوم دکتر دارابی که با صبوری مراد مراحل انجام این تحقیق همراهی نمودند و همچنین از تلاش ها و زحمات بی دریغ دکتر امیر حسن نیا که وقت ارزشمند خود را در اختیار بنده قرار دادند، صمیمانه تقدیر و تشکر نمایم.

## تعهد نامه

اینجانب **منصوره کریمی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق / قدرت دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی تاثیر شکل قطب و شیارها بر مشخصه‌های عملکردی ماشین مغناطیس دائم شار محوری 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 می باشد 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 بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافت های آن ها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

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

## چکیده

با توسعه صنایع و افزایش استفاده از ماشین‌های الکتریکی از جمله ماشین‌های آهن‌ربای دائم شار محوری (AFPM)، بهبود مشخصه‌های عملکرد این نوع موتورها اهمیت ویژه‌ای یافته است. در ماشین‌های آهن‌ربای دائم شار محوری با استاتور شیاردار، فاصله هوایی نسبت به دیگر ساختارها کمتر است. بنابراین ضخامت آهن‌ربا و در نتیجه حجم ماده آهن‌ربایی کاهش می‌یابد. با این حال، وجود شیار در استاتور موجب افزایش هارمونیک‌های ولتاژ القایی فاز و ایجاد گشتاور دندانه‌ای می‌شود که خود از عوامل تولید ریپل گشتاور، نویز و ارتعاش مکانیکی در این نوع ماشین‌ها محسوب می‌شود. در این پژوهش، تاثیر شکل قطب رتور و شیار استاتور بر عملکرد ماشین و ریپل گشتاور در حالت‌های مختلفی مانند شکل قطب با لبه‌های شعاعی گرد و پخ شده، شکل قطب منحرف شده به صورت متقارن و نامتقارن با شکل شیار باز و نیمه‌بسته مورد مطالعه قرار گرفته است. مشخصات عملکرد ماشین در شرایط بی‌بار و تحت بار با استفاده از مدل سه بعدی اجزاء محدود در نرم افزار JMAG Designer و نیز مدل مداری حالت دائمی در نرم‌افزار MATLAB بدست آمده است. در نهایت نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد ماشین AFPM با قطب‌های آهن‌ربایی منحرف شده به صورت نامتقارن، از مشخصات عملکردی بهتری در مقایسه با دیگر حالت‌های مورد بررسی برخوردار است.

کلید واژه: ماشین شار محوری آهن‌ربای دائم، ریپل گشتاور، گشتاور دندانه‌ای، شکل قطب، شکل شیار

## فهرست مطالب

### فصل اول: پیشگفتار

- ۱-۱- مقدمه ..... ۲
- ۱-۲- هدف از پژوهش ..... ۳
- ۱-۳- مروری بر فصل‌ها ..... ۴

### فصل دوم: آشنایی با ماشین‌های شار محوری آهنربای دائم

- ۱-۲- تاریخچه و توسعه ماشین‌های AFPM ..... ۶
- ۲-۲- مقایسه ماشین‌های آهنربای دائم شارمحوری و شار شعاعی ..... ۷
- ۳-۲- محدوده توان ماشین‌های AFPM ..... ۱۰
- ۴-۲- انواع ساختار روتور ماشین‌های AFPM ..... ۱۱
- ۵-۲- انواع ساختار استاتور ماشین‌های AFPM ..... ۱۴
- ۱-۵-۲- استاتور بدون هسته آهنی ..... ۱۴
- ۲-۵-۲- استاتور با هسته آهنی ..... ۱۶
- ۱-۲-۵-۲- استاتور شیاردار ..... ۱۷
- ۲-۲-۵-۲- استاتور بدون شیار ..... ۱۹
- ۳-۲-۵-۲- استاتور با قطب برجسته ..... ۲۰
- ۶-۲- انواع ساختارهای ماشین AFPM ..... ۲۱
- ۱-۶-۲- ماشین‌های AFPM یک طرفه ..... ۲۲
- ۲-۶-۲- ماشین‌های AFPM دو طرفه ..... ۲۳
- ۱-۲-۶-۲- ساختار دوطرفه با روتور داخلی ..... ۲۳
- ۲-۲-۶-۲- ساختار دوطرفه با استاتور داخلی ..... ۲۴
- ۳-۶-۲- ماشین‌های دیسکی چند طبقه ..... ۲۵
- ۷-۲- معرفی ماشین مرجع مورد مطالعه ..... ۲۵



## فصل سوم: بررسی مطالعات انجام شده به منظور بهبود عملکرد ماشین‌های AFPM

|    |                                      |
|----|--------------------------------------|
| ۲۸ | ۱-۳- مقدمه                           |
| ۲۸ | ۲-۳- گشتاور الکترومغناطیسی           |
| ۳۲ | ۳-۳- ریپل گشتاور                     |
| ۳۳ | ۴-۳- گشتاور دندانه‌ای                |
| ۳۵ | ۵-۳- روش‌های کاهش گشتاور دندانه‌ای   |
| ۳۷ | ۱-۵-۳- اصلاحات ساختار استاتور        |
| ۳۷ | ۳-۵-۱-۱- ترکیب تعداد قطب‌ها و شیارها |
| ۴۰ | ۳-۵-۱-۲- شیار کمکی                   |
| ۴۱ | ۳-۵-۱-۳- دهانه شیار                  |
| ۴۲ | ۳-۵-۱-۴- جابه‌جایی شیار              |
| ۴۳ | ۳-۵-۱-۵- انحراف شیار                 |
| ۴۴ | ۳-۵-۲- اصلاحات ساختار روتور          |
| ۴۴ | ۳-۵-۲-۱- انتخاب کمان قطب             |
| ۴۶ | ۳-۵-۲-۲- جابه‌جایی آهن‌ربا یا قطب    |
| ۴۸ | ۳-۵-۲-۳- انحراف آهن‌ربا              |
| ۵۳ | ۳-۵-۲- جابه‌جایی روتور و استاتور     |

## فصل چهارم: مدلسازی اجزاء محدود و تحلیل بی‌باری ماشین AFPM

|    |                                                                                 |
|----|---------------------------------------------------------------------------------|
| ۵۶ | ۱-۴- مقدمه                                                                      |
| ۵۶ | ۲-۴- مدلسازی                                                                    |
| ۶۱ | ۴-۲-۱- قطب‌های آهن‌ربایی با لبه‌های شعاعی متفاوت                                |
| ۶۵ | ۴-۲-۲- قطب آهن‌ربایی با لبه شعاعی متفاوت به همراه جابه‌جایی دو روتور نسبت به هم |
| ۷۰ | ۴-۲-۳- انحراف قطب‌های آهن‌ربایی روتورها به صورت متقارن و نامتقارن               |
| ۷۲ | ۴-۲-۴- انحراف قطب‌ها به صورت متقارن و نامتقارن برای استاتور با شیار باز         |

## فصل پنجم: مدل‌سازی حالت دائمی و تحلیل بارداری ماشین AFPM

|    |                                                                                                  |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ۷۸ | ۱-۵- مقدمه .....                                                                                 |
| ۷۸ | ۲-۵- مدل‌سازی .....                                                                              |
| ۷۹ | ۱-۲-۵- محاسبه مقاومت سیم‌پیچی استاتور .....                                                      |
| ۸۰ | ۲-۲-۵- محاسبه ماتریس اندوکتانس و راکتانس سنکرون ماشین .....                                      |
| ۸۱ | ۳-۲-۵- محاسبه شارهای پیوندی و ولتاژ القایی فازها .....                                           |
| ۸۳ | ۳-۵- شبیه‌سازی دینامیکی حالت دائمی ماشین AFPM .....                                              |
| ۸۵ | ۴-۵- نتایج شبیه‌سازی .....                                                                       |
| ۸۶ | ۱-۴-۵- ماشین مرجع .....                                                                          |
| ۸۹ | ۲-۴-۵- ماشین با قطب‌های با لبه‌های شعاعی مختلف .....                                             |
| ۹۱ | ۳-۴-۵- ماشین با قطب‌های با لبه‌های شعاعی مختلف و $5^\circ$ شیف‌ت دو روتور نسبت به هم .....       |
| ۹۳ | ۴-۴-۵- ماشین با انحراف قطب‌های دو روتور به صورت متقارن و نامتقارن و استاتور شیار نیمه‌بسته ..... |
| ۹۶ | ۴-۴-۵- ماشین با انحراف قطب‌های دو روتور به صورت متقارن و نامتقارن و استاتور با شیار باز .....    |

## فصل ششم: نتیجه‌گیری

|     |                                  |
|-----|----------------------------------|
| ۱۰۰ | ۱-۶- نتیجه‌گیری .....            |
| ۱۰۱ | ۲-۶- پیشنهاداتی برای آینده ..... |

مراجع

## فهرست اشکال

- شکل (۱-۲): نمای شماتیکی از استاتور و کلاف سیم‌پیچی یک الف) ماشین شار محوری ب) ماشین شار شعاعی..... ۸
- شکل (۲-۲): الف) ماشین شار محوری و ب) ماشین شار شعاعی در فرم چند طبقه..... ۸
- شکل (۳-۲): مقایسه عملکردی ماشین‌های آهن‌ربای دائم شار شعاعی و شار محوری..... ۱۰
- شکل (۴-۲): شماتیکی از روتور با آهن‌رباهای سطحی..... ۱۱
- شکل (۵-۲): شماتیکی از روتور با آهن‌رباهای داخلی..... ۱۱
- شکل (۶-۲): نمودار مغناطیس‌کنندگی آرایش هال‌باخ..... ۱۲
- شکل (۷-۲): خطوط شار و نحوه قرارگیری آهن‌رباهای دو روتور برای آرایه‌های  $۹۰^\circ$ ،  $۶۰^\circ$  و  $۴۵^\circ$  هال‌باخ..... ۱۳
- شکل (۸-۲): شماتیکی از هسته استاتور ماشین AFPM مورق به صورت الف) مارپیچی و ب) محوری..... ۱۴
- شکل (۹-۲): کلاف‌های مربوط به سیم‌پیچی بدون هسته نوع دیسکی..... ۱۵
- شکل (۱۰-۲): جای‌گذاری سیم‌پیچ‌ها با استفاده از شیارهای راهنما..... ۱۵
- شکل (۱۱-۲): شماتیکی از هسته استاتور مورق شیاردار برای یک ماشین AFPM یک طرفه..... ۱۸
- شکل (۱۲-۲): شکل موج چگالی شار فاصله‌هوائی برای الف) استاتور بدون شیار ب) استاتور شیاردار..... ۱۹
- شکل (۱۳-۲): شماتیکی از نمای بالای یک استاتور بدون شیار و سیم‌پیچی‌های قرارگرفته بر روی آن..... ۱۹
- شکل (۱۴-۲): شماتیکی از ایجاد قطب استاتور با استفاده از خم‌کاری ورق..... ۲۱
- شکل (۱۵-۲): ماشین AFPM سه فاز با استاتور قطب برجسته - ۱۲ کلاف سیم‌پیچی استاتور و ۸ قطب آهن‌ربایی..... ۲۱
- شکل (۱۶-۲): نمودار طبقه‌بندی انواع ساختار ماشین‌های AFPM..... ۲۲
- شکل (۱۷-۲): نمایی از ساختار یک طرفه ماشین AFPM با استاتور شیاردار و روتور با آهن‌رباهای سطحی..... ۲۳
- شکل (۱۸-۲): شماتیکی از ساختار ماشین AFIR-NS..... ۲۴
- شکل (۱۹-۲): ماشین AFPM با ساختار TORUS-S با سیم‌پیچی الف) روی هم، ب) چنبره‌ای..... ۲۴
- شکل (۲۰-۲): ماشین AFPM ۸ قطب و ۱۲ شیار چند طبقه با ۲ استاتور و ۳ روتور..... ۲۵
- شکل (۱-۳): ریل گشتاور برای ماشین‌های با شکل موج ولتاژ القایی الف) سینوسی ب) مربعی..... ۲۹
- شکل (۲-۳): شکل موج گشتاور دندانه‌ای معمول..... ۳۵
- شکل (۳-۳): نمودار معرفی روش‌های کاهش گشتاور دندانه‌ای..... ۳۶
- شکل (۵-۳): تغییرات پیک گشتاور دندانه‌ای به ازای ترکیب تعداد جفت قطب‌ها و شیارهای مختلف..... ۳۹
- شکل (۵-۳): توپولوژی‌های سیم‌پیچی استاتور در ماشین‌های آهن‌ربای دائم بدون جاروبک با الف) سیم‌پیچی متمرکز روی هم ب) سیم‌پیچی متمرکز غیر روی هم..... ۳۹
- شکل (۶-۳): شماتیکی از شیارهای کمکی ایجاد شده بر روی دندانه..... ۴۱
- شکل (۷-۳): ماشین AFPM تک استاتور و دو روتور با الف) کمانهای قطب آهن‌ربای یکسان ب) کمان‌های قطب آهن-ربای متفاوت با هدف کاهش گشتاور دندانه‌ای..... ۴۵

- شکل (۳-۸): گشتاور دندانهای به ازای کمانهای قطب یکسان..... ۴۵
- شکل (۳-۹): گشتاور دندانهای به ازای ترکیب کمان قطبهای متفاوت..... ۴۶
- شکل (۳-۱۰): طریقه شیفت آهنرباها برای یک ماشین AFPM ۸ قطب به دو صورت الف) دوتایی ب) چهارتایی..... ۴۶
- شکل (۳-۱۱): روشهای مختلف کج کردن آهنربا برای موتورهای AFPM..... ۴۹
- شکل (۳-۱۲): تعریف زاویه انحراف آهنربا در ماشینهای AFPM..... ۵۰
- شکل (۳-۱۳): تغییر پیک تا پیک گشتاور دندانهای برای زوایای انحراف مختلف..... ۵۰
- شکل (۳-۱۳): شماتیکی از چگونگی انحراف قطب به صورت مثلثی..... ۵۱
- شکل (۳-۱۴): گرد کردن سطح آهنربا به صورت الف) محدب ب) مقعر..... ۵۲
- شکل (۳-۱۵): شماتیکی از آهنربا با انحراف دوگانه..... ۵۳
- شکل (۴-۱): الف) معرفی کمان آهنربا و گام قطب برای شکل قطب دوزنقه‌ای، ب) قطاعی از ماشین AFPM به صورت برشهایی در شعاعهای مختلف..... ۵۷
- شکل (۴-۲): مدل یک جفت قطب از ماشین برای تحلیل به صورت الف) دو بعدی ب) سه بعدی..... ۵۸
- شکل (۴-۳): مدار الکتریکی و نوع اتصال سیم‌پیچ‌های استاتور در حالت بی باری..... ۶۰
- شکل (۴-۴): نمایی از مش‌بندی استاتور ماشین مورد مطالعه..... ۶۰
- شکل (۴-۵): نمایی از قطب آهنربایی الف) مرجع، ب) با لبه‌های گرد شده، ج) با لبه‌های پخ شده..... ۶۱
- شکل (۴-۶): شکل موج ولتاژ القایی فاز برای آهنربای با لبه پخ شده به ازای  $W=10\text{mm}$  و مقادیر مختلف  $H$ ..... ۶۲
- شکل (۴-۷): طیف هارمونیک‌های شکل موج ولتاژ القایی فاز برای قطب با لبه‌های پخ شده و مقادیر مختلف  $H$ ..... ۶۲
- شکل (۴-۸): شکل موج گشتاور دندانهای برای آهنربای با لبه پخ شده برای  $W=10\text{mm}$  و مقادیر مختلف  $H$ ..... ۶۳
- شکل (۴-۹): شکل موج ولتاژ القایی فازها در حالت بی بار برای قطب با لبه‌های مختلف..... ۶۴
- شکل (۴-۱۰): نمودار هارمونیک‌های ولتاژ القایی فاز برای آهنربا با شکل لبه‌های مختلف..... ۶۴
- شکل (۴-۱۱): شکل موج گشتاور دندانهای برای قطب با لبه‌های مختلف..... ۶۴
- شکل (۴-۱۲): توزیع چگالی شار مغناطیسی در یک جفت قطب از ماشین در حالت الف) مرجع و ب) شیفت دو روتور نسبت به یکدیگر..... ۶۵
- شکل (۴-۱۳): شکل موج ولتاژ القایی فاز برای حالت‌های قطب‌های آهنربایی با شکل لبه‌های مختلف و  $5^\circ$  جابه‌جایی دو روتور نسبت به هم..... ۶۶
- شکل (۴-۱۴): هارمونیک‌های ولتاژ القایی فاز برای حالت‌های قطب‌های آهنربایی با شکل لبه‌های مختلف و  $5^\circ$  جابه‌جایی دو روتور نسبت به هم..... ۶۶
- شکل (۴-۱۵): شکل موج گشتاور دندانهای هر روتور و گشتاور دندانهای کل ماشین AFPM با شکل قطب مرجع و  $5^\circ$  جابه‌جایی دو روتور نسبت به هم..... ۶۷
- شکل (۴-۱۶): شکل موج گشتاور دندانهای هر روتور و گشتاور دندانهای کل برای ماشین AFPM با شکل قطب لبه‌های پخ شده و  $5^\circ$  جابه‌جایی دو روتور نسبت به هم..... ۶۸

شکل (۴-۱۷): شکل موج گشتاور دندانه‌ای هر روتور و گشتاور دندانه‌ای کل برای ماشین با شکل قطب لبه‌های گرد شده و  $5^\circ$  جابه‌جایی دو روتور نسبت به هم..... ۶۸

شکل (۴-۱۸): نمودار گشتاور دندانه‌ای کل برای ماشین با قطب‌های آهن‌ربایی با شکل لبه‌های مختلف و  $5^\circ$  جابه‌جایی دو روتور نسبت به هم..... ۶۸

شکل (۴-۱۹): مقایسه مقدار پیک تا پیک گشتاور دندانه‌ای برای حالت‌های مختلف شکل قطب و جابه‌جایی روتورها.. ۶۹

شکل (۴-۲۰): مقایسه مقدار پیک گشتاور دندانه‌ای ماشین مرجع برای زوایای مختلف انحراف آهن‌ربا..... ۷۰

شکل (۴-۲۱): شماتیکی از نمای بالای دو روتور و قطب‌های آن‌ها در دو حالت انحراف (الف) متقارن و (ب) نامتقارن.. ۷۱

شکل (۴-۲۲): شکل موج ولتاژ القایی فاز برای حالت‌های انحراف متقارن و نامتقارن با شکل شیار نیمه‌بسته..... ۷۱

شکل (۴-۲۳): طیف هارمونیک ولتاژ القایی فاز برای حالت‌های انحراف متقارن و انحراف نامتقارن با شکل شیار نیمه‌بسته..... ۷۲

شکل (۴-۲۴): گشتاور دندانه‌ای برای حالت‌های انحراف متقارن و انحراف نامتقارن با شکل شیار نیمه‌بسته..... ۷۲

شکل (۴-۲۵): شکل موج ولتاژ القایی ماشین با شیار باز برای حالت‌های انحراف متقارن، انحراف نامتقارن و حالت مرجع..... ۷۳

شکل (۴-۲۶): طیف هارمونیک ولتاژ القایی فاز برای حالت‌های با انحراف متقارن و نامتقارن و استاتور با شیار باز..... ۷۳

شکل (۴-۲۷): شکل موج گشتاور دندانه‌ای ماشین با شیار باز در حالت‌های انحراف متقارن، نامتقارن و حالت مرجع..... ۷۳

شکل (۴-۲۸): شکل موج شار پیوندی سیم‌پیچ در حالت انحراف نامتقارن برای شیار باز و نیمه‌بسته..... ۷۴

شکل (۴-۲۹): نمودار مقایسه مقدار گشتاور دندانه‌ای با روش‌های انحراف متقارن و نامتقارن قطب‌ها برای ماشین‌های با شیار باز و نیمه‌بسته..... ۷۵

شکل (۵-۱): مدل مداری حالت دائمی ماشین سنکرون آهن‌ربای دائم..... ۷۸

شکل (۵-۲): شکل موج شار پیوندی سیم‌پیچ فاز a استاتور و هارمونیک‌های آن برای ماشین مرجع..... ۸۲

شکل (۵-۳): شماتیک مدل ماشین شبیه‌سازی شده در نرم افزار MATLAB..... ۸۴

شکل (۵-۴): شماتیک بلوک شبیه‌سازی ولتاژ القایی..... ۸۵

شکل (۵-۵): نمودار توان ورودی و خروجی ماشین مرجع در حالت دائمی و بارگذاری و بارزدایی..... ۸۶

شکل (۵-۶): نمودار گشتاور خروجی و سرعت مکانیکی برای ماشین مرجع در عملکرد حالت دائمی و شرایط بارگذاری و بارزدایی..... ۸۷

شکل (۵-۷): نمودار ضریب قدرت، بازده و زاویه بار ماشین مرجع در عملکرد حالت دائمی بار نامی و بارزدایی و بارگذاری..... ۸۷

شکل (۵-۸): شکل موج تغییرات جریان فاز a استاتور ماشین مرجع در عملکرد حالت دائمی بار نامی، بارگذاری و بارزدایی..... ۸۸

شکل (۵-۹): شکل موج جریان‌های سه فاز استاتور ماشین مرجع در حالت دائمی و شرایط بار نامی..... ۸۹

شکل (۵-۱۰): شکل موج گشتاور خروجی ماشین در بار نامی برای شکل قطب‌های با لبه‌های شعاعی مختلف..... ۹۰

- شکل (۵-۱۱): شکل موج جریان فاز a استاتور ماشین برای قطب‌ها با لبه‌های شعاعی مختلف در بار نامی ..... ۹۰
- شکل (۵-۱۲): طیف هارمونیکی جریان‌های فاز a استاتور ماشین برای قطب‌ها با لبه‌های شعاعی مختلف در بار نامی ..... ۹۱
- شکل (۵-۱۳): تغییرات گشتاور خروجی ماشین در شرایط بارزدایی و بارگذاری برای حالت‌های شکل قطب با لبه‌های شعاعی مختلف و  $5^\circ$  شیفت دو روتور نسبت به هم ..... ۹۱
- شکل (۵-۱۴): شکل موج گشتاور خروجی ماشین در بار نامی برای شکل قطب‌های با لبه‌های شعاعی مختلف و  $5^\circ$  شیفت دو روتور نسبت به هم ..... ۹۲
- شکل (۵-۱۵): شکل موج جریان‌های فاز a استاتور ماشین در بار نامی برای شکل قطب‌های با لبه‌های شعاعی مختلف و  $5^\circ$  شیفت دو روتور نسبت به هم ..... ۹۲
- شکل (۵-۱۶): طیف هارمونیکی جریان‌های فاز a استاتور ماشین در بار نامی برای شکل قطب‌های با لبه‌های شعاعی مختلف و  $5^\circ$  شیفت دو روتور نسبت به هم ..... ۹۳
- شکل (۵-۱۷): تغییرات گشتاور خروجی ماشین در شرایط بارزدایی و بارگذاری برای شکل قطب‌های منحرف شده به صورت متقارن و نامتقارن ..... ۹۴
- شکل (۵-۱۸): شکل موج گشتاور خروجی ماشین در بار نامی برای شکل قطب‌های منحرف شده به صورت متقارن و نامتقارن ..... ۹۴
- شکل (۵-۱۹): شکل موج جریان‌های فاز a استاتور ماشین در بار نامی برای شکل قطب‌های منحرف شده به صورت متقارن و نامتقارن ..... ۹۵
- شکل (۵-۲۰): طیف هارمونیکی جریان‌های فاز a استاتور ماشین در بار نامی برای شکل قطب‌های منحرف شده به صورت متقارن و نامتقارن ..... ۹۵
- شکل (۵-۲۱): شکل موج گشتاور ماشین با استاتور شیار باز در بار نامی برای شکل قطب‌های منحرف شده به صورت متقارن و نامتقارن ..... ۹۷
- شکل (۵-۲۲): تغییرات گشتاور خروجی ماشین در شرایط بارزدایی و بارگذاری برای حالت‌های انحراف متقارن و نامتقارن و استاتور با شیارهای باز ..... ۹۶
- شکل (۵-۲۳): شکل موج جریان‌های فاز a استاتور شیار باز ماشین در بار نامی برای شکل قطب‌های منحرف شده به صورت متقارن و نامتقارن ..... ۹۸
- شکل (۵-۲۴): طیف هارمونیکی جریان‌های فاز a استاتور شیار باز ماشین در بار نامی برای شکل قطب‌های منحرف شده به صورت متقارن و نامتقارن ..... ۹۸

## فهرست جداول

|                                                                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| جدول (۱-۲): مشخصات ماشین مورد مطالعه.....                                                                                      | ۲۶  |
| جدول (۱-۳): تغییرات ضریب $C_T$ برای تعداد شیارها و $N_c$ مختلف.....                                                            | ۴۰  |
| جدول (۲-۳): مقادیر گشتاور دندانه‌ای برای یک ماشین با عرض شیار مختلف.....                                                       | ۴۲  |
| جدول (۳-۳): مقایسه مقادیر گشتاور تحلیل شده در مرجع [۲۸] با قطب‌های آهن‌ربایی شیفت یافته.....                                   | ۴۸  |
| جدول (۱-۵): ضرایب سری فوریه شکل موج شار پیوندی سیم‌پیچ فاز a استاتور ماشین مرجع.....                                           | ۸۲  |
| جدول (۲-۵): جدول اطلاعات ورق (M600-50A) هسته استاتور ماشین مرجع.....                                                           | ۸۳  |
| جدول (۳-۵): نتایج مدلسازی حالت دائمی ماشین با شکل قطب لبه‌های مختلف در شرایط بار نامی.....                                     | ۹۰  |
| جدول (۴-۵): نتایج مدلسازی حالت دائمی ماشین با شکل قطب لبه‌های مختلف و $5^\circ$ جابه‌جایی دو روتور نسبت به هم در بار نامی..... | ۹۳  |
| جدول (۵-۵): نتایج مدلسازی حالت دائمی ماشین در بار نامی برای شکل قطب‌های منحرف شده به صورت متقارن و نامتقارن.....               | ۹۵  |
| جدول (۶-۵): نتایج مدلسازی حالت دائمی ماشین در بار نامی برای شکل قطب‌های منحرف شده به صورت متقارن و نامتقارن.....               | ۹۷  |
| جدول (۱-۶): نتایج شبیه‌سازی حالات مورد مطالعه در این تحقیق.....                                                                | ۱۰۰ |
| جدول (۲-۶): نتایج شبیه‌سازی انحراف قطب متقارن و نامتقارن و استاتور با شیارهای باز و نیمه بسته.....                             | ۱۰۱ |





# فصل اول

## پیشگفتار

## ۱-۱- مقدمه

امروزه با گسترش استفاده از انرژی الکتریکی می‌توان مدعی شد که چرخ صنعت در کشورهای صنعتی را ماشین‌های الکتریکی می‌چرخانند؛ ضمن این که با گسترش تکنولوژی، کاربردهای صنعتی و حتی خانگی جدیدی برای ماشین‌های الکتریکی فراهم شده است و بخش عمده‌ای از انرژی الکتریکی به مصرف ماشین‌های الکتریکی اختصاص می‌یابد. از این رو استفاده از ماشین‌های با بازده بالاتر و عملکرد مطلوب می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر مصرف انرژی الکتریکی در سطح کلان بگذارد. برای این منظور ماشین‌های آهنربای دائم به دلیل بازده، چگالی توان و چگالی گشتاور بالا انتخاب مناسبی هستند که دارا بودن ویژگی‌های مذکور موجب استفاده روزافزون این ماشین‌ها شده است.

در این میان ماشین‌های شار محوری آهنربای دائم<sup>۱</sup> به علت ساختار فشرده و امکان استفاده به صورت چند طبقه، برای کاربردهای با فضای محدود مثل خودروهای الکتریکی، صنایع هوایی و دریایی و ... مناسب و حتی ضروری هستند. ضمن اینکه به علت نوع ساختار آن‌ها که معمولاً قطر داخلی بزرگتر از قطر محور است، خنک‌کاری بهتر انجام می‌شود [۱]. این ماشین‌ها توپولوژی‌های متنوعی دارند که با توجه به نوع کاربرد، شرایط بهره‌برداری و دیگر پارامترها، می‌توان از ساختارهای مناسب استفاده کرد.

اگرچه اولین ماشین الکتریکی ساخته و مطرح شده که توسط مایکل فارادی در سال ۱۸۳۱ معرفی شد، از نوع شار محوری بوده است اما به علت کیفیت پایین مواد آهنربایی، مشکلات ساخت و مونتاژ و ... این ماشین‌ها خیلی زود کنار گذاشته شدند. با این حال در دهه‌های اخیر با پیشرفت مواد آهن-ربای دائم و تکنولوژی ساخت، مجدداً در صنعت مطرح شده‌اند [۱]. از این رو مطالعات گسترده‌ای بر روی این ماشین‌ها، به خصوص بر روی ماشین‌های شار محوری با استاتورهای شیاردار که به علت

---

<sup>1</sup> Axial Flux Permanent Magnet (AFPM) machine

وجود شیار با مشکلاتی مثل وجود گشتاور دندانه‌ای<sup>۲</sup>، ریپل گشتاور<sup>۳</sup>، نویز و لرزش روبه‌رو هستند، صورت گرفته است.

به علت مشکلات ساخت هسته استاتور موروک این ماشین‌ها از جمله برش شیار، ایجاد تغییر در ساختار استاتور به آسانی امکان پذیر نیست. از این رو در این ماشین‌ها بر خلاف ماشین‌های شار شعاعی مطالعات بیشتر بر روی ساختار روتور و قطب‌ها متمرکز شده است [۱].

## ۱-۱- هدف از پژوهش

ماشین‌های شار محوری آهن‌ربای دائم از تنوع ساختاری بالایی برخوردار هستند چرا که به علت ساختار تخت، این ماشین‌ها می‌توانند به صورت چند طبقه با جای‌گیری مختلف روتور و استاتور استفاده شوند. در این میان ماشین‌های با استاتور شیاردار به علت کوچک شدن فاصله هوایی و افزایش چگالی شار در آن، از جهت کاهش ماده آهن‌ربایی نسبت به انواع دیگر برتری دارد. اما استاتور شیاردار علاوه بر مشکلات ساخت، در عملکرد نیز با مشکلاتی مواجه هستند. گشتاور دندانه‌ای که در ماشین‌های آهن‌ربای دائم به علت تغییرات مقاومت مغناطیسی<sup>۴</sup> بین شیارها و قطب‌های آهن‌ربایی وجود دارد، از جمله عوامل ایجاد ریپل گشتاور و به دنبال آن لرزش و نویز در این ماشین‌ها می‌باشد.

مطالعات انجام شده در این زمینه اکثراً بر کاهش مقدار گشتاور دندانه‌ای متمرکز بوده [۲-۸] و بررسی به صورت همه‌جانبه صورت نگرفته است؛ در موارد محدودی که گشتاور خروجی نیز بررسی شده است، این مطالعه معمولاً تنها در ارتباط با ریپل گشتاور بوده [۹-۱۳] و تاثیر روش پیشنهادی در آن تحقیق بر دیگر پارامترهای ماشین مورد ارزیابی قرار نگرفته است. در این پژوهش تلاش شده است که با ارائه روش‌هایی مبتنی بر تغییر در شکل قطب‌های روتور، عملکرد این ماشین‌ها بهبود یابد. ضمن

---

<sup>۲</sup> Cogging torque

<sup>۳</sup> Torque ripple

<sup>۴</sup> Reluctance

تمرکز بر کاهش ریپل گشتاور که عامل نویز و لرزش در ماشین است، دیگر پارامترهای ماشین از جمله شکل موج ولتاژ القایی، هارمونیک‌های جریان بار استاتور، بازده، ضریب قدرت و زاویه بار که خود از مشخصه‌های مهم ماشین محسوب می‌شوند نیز پایش شده است.

## ۱-۲- مروری بر فصل‌ها

ماشین‌های شار محوری آهن‌ربای دائم ساختارهای متنوعی دارند که در فصل دوم به معرفی این ماشین‌ها، مزایا و معایب آن‌ها در مقایسه با نوع شار شعاعی، انواع ساختارها و کاربردها پرداخته و در انتها ساختار ماشین مرجع مورد مطالعه در این پژوهش معرفی شده است. در فصل سوم مروری بر پژوهش‌های انجام شده در زمینه بهبود عملکرد این ماشین‌ها صورت گرفته است که معمولاً این پژوهش‌ها بیشتر با هدف کاهش گشتاور دندانه‌ای در ساختارهای شیاردار صورت مطرح شده اند.

با انتخاب ماشین مرجع و آشنایی با پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه بهبود عملکرد ماشین‌های شار محوری آهن‌ربای دائم، در فصل چهارم حالات مختلفی برای این منظور ارائه شده است که مطالعات بی باری ماشین برای هر یک از این موارد در نرم‌افزار تحلیل اجزاء محدود صورت گرفته و گشتاور دندانه‌ای، شکل موج ولتاژ القایی و هارمونیک‌های آن برای حالات مختلف بررسی شده است. سپس با کمک نتایج حاصل از فصل چهارم و معادلات ماشین سنکرون، در فصل پنجم مدل دینامیکی حالت دائمی آن در محیط سیمولینک<sup>۵</sup> نرم افزار متلب<sup>۶</sup> شبیه‌سازی و عملکرد ماشین در حالت‌های مختلف تحت بار نامی مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت نتایج حاصل از شبیه‌سازی، در فصل ششم ارائه و تحلیل شده است.

---

<sup>۵</sup> SIMULINK

<sup>۶</sup> MATLAB

## فصل دوم

آشنایی با ماشین‌های شار محوری آهنربای

دائم

## ۲-۱- تاریخچه و توسعه ماشین‌های AFPM

همانطور که تاریخچه ماشین‌های الکتریکی نشان می‌دهد، نخستین ماشین الکتریکی و ابتدائی‌ترین نمونه کار ساخته شده از نوع ماشین‌های شار محوری بوده است که توسط مایکل فارادی در سال ۱۸۳۱ ثبت شده است (فارادی<sup>۷</sup>، ۱۸۳۱، ریچی<sup>۸</sup>، ۱۸۳۳، و جاکوبی<sup>۹</sup>، ۱۸۳۴). با این حال مدت کوتاهی پس از آن، داونپورت<sup>۱۰</sup> در سال ۱۸۳۷ اختراع اولین ماشین شار شعاعی را به نام خود ثبت کرد که امروزه به طور معمول و گسترده‌ای به عنوان اصلی‌ترین ساختار برای ماشین‌های الکتریکی پذیرفته شده‌اند [۱]. در آن زمان مشکلاتی که ماشین‌های شار محوری با آن روبه‌رو بودند و همچنین اختراع ماشین‌های شار شعاعی موجب به انزوا رفتن آن‌ها و گسترش روز افزون همتای شارشعاعی آن‌ها شد. از دلایل محدود شدن و کنار گذاشته شدن ماشین‌های شار محوری در مقایسه با همتای شار شعاعی خود می‌توان به طور خلاصه به موارد زیر اشاره کرد:

- نیروی جاذبه مغناطیسی محوری قوی بین استاتور و روتور
- مشکلات ساخت، از قبیل برش شیار در هسته مورو و دیگر روش‌های ساخت هسته‌های مورو شیاردار
- بالا بودن هزینه‌های تولید هسته‌های استاتور مورو
- مشکلات مونتاژ ماشین و حفظ یکنواختی فاصله هوایی
- و ...

از سوی دیگر، اولین سیستم تحریک آهن‌ربای دائم در اوایل دهه ۱۸۳۰ در ماشین‌های الکتریکی به کار برده شد اما کیفیت پایین مواد مغناطیسی سخت به زودی موجب کنار گذاشته شدن آن‌ها شد. با

---

<sup>7</sup> M. Faraday

<sup>8</sup> W. Ritchie

<sup>9</sup> B. Jacobi

<sup>10</sup> T. Davenport

این حال اختراع آلنیکو<sup>۱۱</sup> در سال ۱۹۳۱، فریت باریم<sup>۱۲</sup> در دهه ۱۹۵۰ و به ویژه ماده کمیاب خاکی نئودیمیوم، آهن، بورون<sup>۱۳</sup> که در سال ۱۹۸۳ معرفی شد، امکان بازگشت سیستم‌های تحریک آهنربای دائم را فراهم کردند. به طور کلی اعتقاد بر این است که در دسترس بودن مواد آهنربایی انرژی بالا و استفاده از آن‌ها به عنوان نیرو محرکه اصلی برای توپولوژی‌های ماشین‌های آهنربای دائم، موجب احیای ماشین‌های شار محوری آهنربای دائم شده است [۱].

قیمت آهنرباهای دائم خاکی کمیاب، در دهه آخر قرن بیستم یک منحنی نزولی را دنبال کرده و در سال‌های اخیر با شیب تندی همراه بوده است که با در دسترس بودن مواد آهنربایی مقرون به صرفه-تر، ممکن است در آینده نزدیک ماشین‌های AFPM نقش مهم‌تری را در صنعت ایفا کنند [۱۴]. این ماشین‌ها در دهه‌های اخیر، به ویژه در دهه ۹۰ میلادی، رشد قابل توجهی داشته و به طور فزاینده‌ای در کاربردهای خانگی و دریایی به عنوان جایگزین ماشین‌های شار شعاعی استفاده شده‌اند [۷].

## ۲-۲- مقایسه ماشین‌های آهنربای دائم شارمحوری و شار شعاعی

اگر چه در اصل، هر نوع ماشین شار شعاعی می‌تواند همتایی از نوع شار محوری داشته باشد، به طور کلی ماشین‌های شار محوری، در عمل به سه نوع زیر محدود می‌شوند:

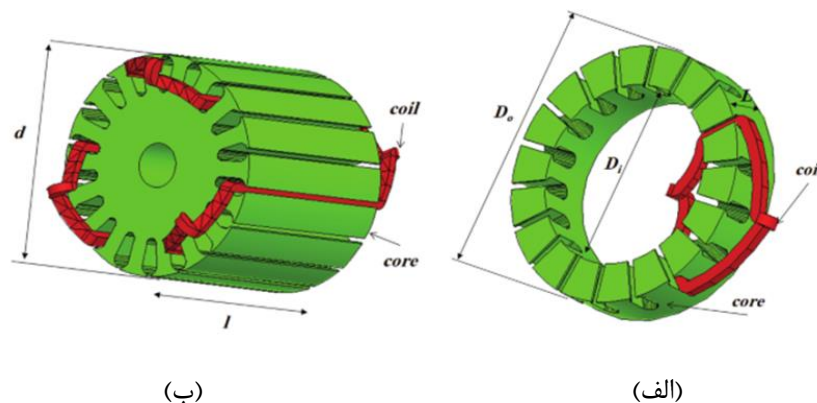
- ماشین‌های آهنربای دائم جریان مستقیم کموتاتوردار
- ماشین‌های آهنربای دائم سنکرون و جریان مستقیم بدون کموتاتور
- ماشین‌های القائی

شکل ۱-۲ نمایی از استاتور شیاردار و کلاف سیم‌پیچی دو ماشین شار محوری و شار شعاعی را نشان می‌دهد.

<sup>11</sup> Alnico

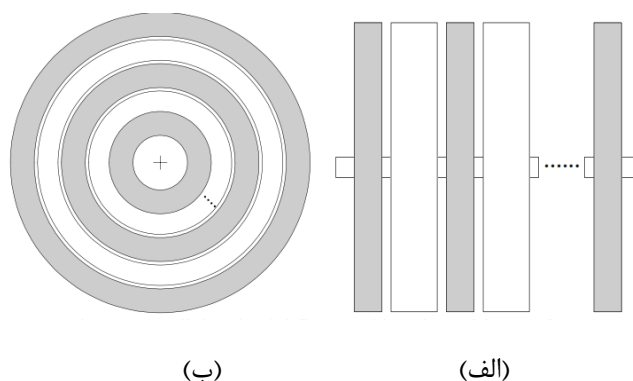
<sup>12</sup> Barium ferrite

<sup>13</sup> Neodymium-Iron-Boron (NdFeB)



شکل (۲-۱): نمای شماتیکی از استاتور و کلاف سیم‌پیچی یک الف) ماشین شار محوری ب) ماشین شار شعاعی همگام با استفاده از مواد جدید، نوآوری در تکنولوژی ساخت و بهبود سیستم‌های خنک‌سازی، افزایش چگالی توان یعنی مقدار توان خروجی به ازای واحد جرم یا حجم، برای ماشین‌های الکتریکی امکان پذیر شده است. برای ماشین‌های شار شعاعی معمولاً این افزایش چگالی توان با محدودیت‌های ذاتی همراه است [۱].

هر دو ماشین شار شعاعی و شار محوری می‌توانند به طرق مختلف ساخته شده و به صورت تک استاتور و تک روتور و یا چند طبقه به کار گرفته شوند که شکل ۲-۲ نمایی شماتیکی از ماشین‌های شار محوری و شار شعاعی را به صورت چند طبقه نشان می‌دهد [۱۴].



شکل (۲-۲): الف) ماشین شار محوری و ب) ماشین شار شعاعی در فرم چند طبقه [۱۴]

ماشین آهن‌ربای دائم شار محوری نسبت به همتای شار شعاعی به داشتن چگالی توان و گشتاور بالاتر و در نتیجه ساختار متراکم‌تر شناخته می‌شود. علاوه بر این از آنجایی که قطر داخلی هسته یک ماشین

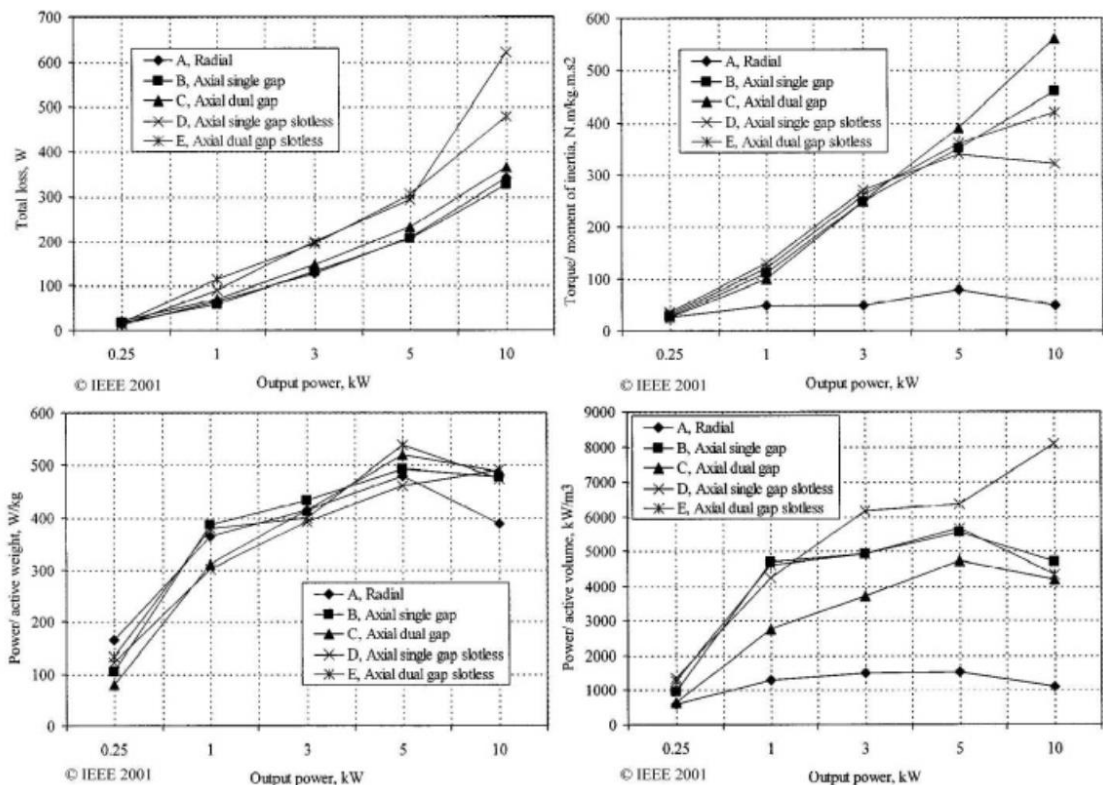


AFPM معمولاً بزرگ‌تر از قطر محور یا شافت است، تهویه و خنک‌سازی بهتری انجام می‌شود. به طور کلی، مشخصات ویژه ماشین‌های AFPM که در کاربردهای معین به عنوان مزیت نسبت به ماشین‌های RFPM در نظر گرفته می‌شود، به طور خلاصه در زیر بیان شده است [۱]:

- ماشین‌های AFPM، نسبت قطر به طول خیلی بزرگتری دارند.
- ماشین‌های AFPM یک فاصله هوایی سطحی و تا حدی قابل تنظیم دارند.
- ماشین‌های AFPM با امکان برخی صرفه جویی‌ها در ماده هسته، قابلیت طراحی برای چگالی توان بالاتر را دارا هستند.
- در طراحی یک ماشین ماژولار، از تعداد واحدهای یکسانی استفاده می‌شود که با توجه به توان و گشتاور مورد نیاز قابل تنظیم است. توپولوژی ماشین‌های AFPM برای استفاده به صورت ماژولار، ایده آل بوده و می‌توان از ترکیب آن‌ها به صورت چند طبقه نیز بهره گرفت.
- در ماشین‌های AFPM با قطر خارجی هسته بزرگتر، امکان قرارگیری تعداد قطب‌های بیشتری بر روی روتور وجود دارد. این ویژگی موجب می‌شود که این ماشین‌ها یک انتخاب مناسب برای عملکردهای فرکانس بالا و سرعت پایین باشد.
- اندازه کوچکتر و ساختار دیسکی ماشین‌های AFPM، استفاده از آن‌ها را برای کاربردهای فضای محدود، مثل ماشین‌های الکتریکی، مناسب و حتی ضروری می‌سازد.

در نتیجه ماشین‌های نوع AFPM که در برتری بر همتای شارشعاعی معمول خود، خواص ویژه‌ای ارائه می‌دهند، برای کاربردهای کنترلی، حمل و نقل، ژنراتورهای کوچک و کاربردهای با هدف خاص به کار می‌روند. مقایسه کمی بین ماشین‌های AFPM و RFPM همیشه دشوار است و ممکن است که جانب انصاف رعایت نشود. کارهای منتشر شده‌ای در این رابطه انجام شده است که شکل ۲-۳ یک مقایسه عملکردی بین ماشین RFPM معمول و تعدادی از ماشین‌های AFPM با ساختارهای متفاوت را در

پنج سطح توان متفاوت ارائه می‌کند. مطابق این شکل، ماشین‌های AFPM برای توان نامی دریافتی یکسان، نسبت به ماشین RFPM همتای خود، حجم و جرم ماده اکتیو کمتری دارد [۱].



شکل (۲-۳): مقایسه عملکردی ماشین‌های آهن‌ربای دائم شار شعاعی<sup>۱۴</sup> و شار محوری [۱]

## ۲-۳- محدود توان ماشین‌های AFPM

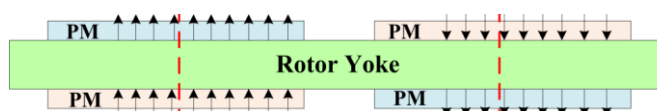
امروزه، محدوده توانی ماشین‌های AFPM بدون جاروبک دیسکی از کسری از یک وات تا زیر یک مگاوات می‌باشد. با افزایش توان خروجی ماشین AFPM سطح تماسی بین روتور و محور کمتر می‌شود که در رنج توان خروجی بالاتر، طراحی یک اتصال مکانیکی محور و روتور بی‌عیب با مشکلاتی همراه خواهد بود. یک راه حل معمول برای بهبود اتصال مکانیکی بین روتور و محور در رنج توانی بالا، طراحی ماشین به صورت چند طبقه است [۱]. به این صورت که بخشی از تأمین این توان بالا را

<sup>14</sup> Radial Flux Permanent Magnet (RFPM) machine

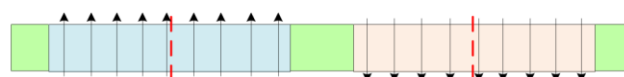
هرکدام از طبقات برعهده خواهند داشت و به این ترتیب هرکدام از طبقات یک ماشین AFPM توانی کمتر از توان اصلی ماشین داشته و دیگر مشکل اتصال مکانیکی محور و روتور وجود نخواهد داشت.

## ۴-۲- انواع ساختار روتور ماشین‌های AFPM

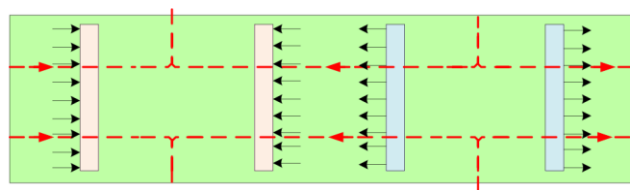
آهن‌رباها می‌توانند روی سطح ماشین قرار بگیرند و یا در دیسک روتور جاسازی شوند. در ماشین‌های با استاتور بدون شیار آهن‌رباها تقریباً همیشه به طور سطحی قرار می‌گیرند. در حالی که در ماشین‌های با استاتور شیاردار، با فاصله هوایی کوچک بین روتور و استاتور آهن‌رباها می‌توانند یا مطابق شکل ۴-۲ به طور سطحی روی دیسک قرار داده شوند و یا همانطور که در شکل ۵-۲ نشان داده شده است، درون دیسک روتور جای بگیرند [۱۵].



شکل (۴-۲): شماتیکی از روتور با آهن‌رباهای سطحی [۱۵]



(الف)



(ب)

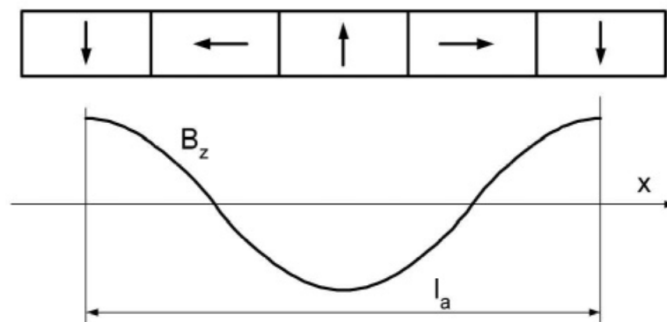
شکل (۵-۲): شماتیکی از روتور با آهن‌رباهای داخلی. (الف) آهن‌رباهای دفن شده در قطب‌های آهنی (ب) آهن‌رباهای قرار گرفته در رزین یا آلومینیوم [۱۵]

آهنرباهای قرار گرفته به صورت داخلی به دو روش استفاده می‌شوند :

۱- مطابق شکل (۵-۲) الف فضای بین آهن رباها از آلومینیوم یا اپوکسی رزین پر می‌شود که یک ساختار روتور صلب و محکم را شکل می‌دهند که محکم بودن ساختار، این روش را برای استفاده در کاربردهای سرعت بالا مناسب می‌سازد [۱۵]. در این حالت مغناطیس‌کنندگی آهن‌رباها در راستای محور است.

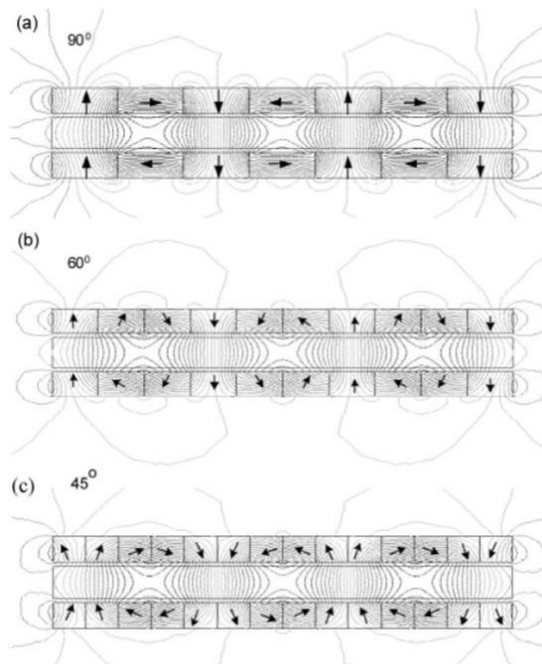
۲- آهن‌رباها مطابق شکل (۵-۲) ب درون یک ساختار آهنی قرار گرفته و قطب‌های آهنی را ایجاد می‌کنند.

همچنین آهن‌رباها می‌توانند بدون هیچ ماده فرومغناطیسی به صورت آرایه هال‌باخ<sup>۱۵</sup> مورد استفاده قرار بگیرند. مفهوم کلیدی آرایش هال‌باخ این است که بردار مغناطیس‌کنندگی آهن‌رباها به صورت تابعی از فاصله در طول آرایش مطابق شکل ۶-۲ می‌چرخد. خطوط شار این آرایش برای آهن‌رباهای دو روتور نیز در شکل ۷-۲ نشان داده شده است.



شکل (۶-۲): نمودار مغناطیس‌کنندگی آرایش هال‌باخ [۱]

<sup>15</sup> Halbach



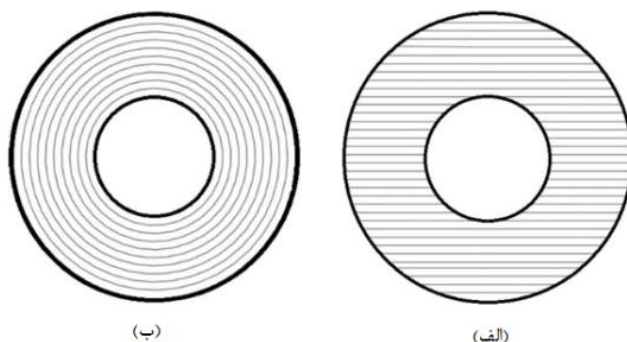
شکل (۲-۷): خطوط شار و نحوه قرارگیری آهنرباهای دو روتور برای آرایه‌های  $90^\circ$ ،  $60^\circ$  و  $45^\circ$  هال‌باخ [۱]

از جمله مزیت‌های این نوع آرایش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۱]:

- میدان اصلی با ضریب  $1/4$ ، از میدان آرایش آهنرباهای معمولی قوی‌تر است و بنابراین بازده توان ماشین تقریباً دو برابر می‌شود.
- این آرایش آهنرباها به هیچ ماده مغناطیسی فولاد پشت یا یوغ روتور نیاز ندارد و آهنرباها می‌توانند به صورت مستقیم به یک ساختار نگه‌دارنده فرومغناطیس مثل آلومینیوم یا پلاستیک متصل شوند.
- میدان مغناطیسی سینوسی‌تر از آرایش آهنرباهای معمول است.
- میدان‌های پشت قطب خیلی کوچکی دارند.

## ۲-۵- انواع ساختار استاتور ماشین‌های AFPM

با توجه به کاربرد و محیط بهره‌برداری، از ماشین با ساختار استفاده می‌شود که ساختار استاتور ممکن است با هسته‌های فرومغناطیسی و یا کلا بدون هسته ساخته شود. استاتور با هسته‌های آهنی برای کاهش تلفات آهن به صورت مورق ساخته می‌شوند که برای این منظور در ماشین‌های AFPM هسته یا باید به صورت مارپیچی مطابق شکل ۲-۸- الف و یا به صورت محوری مطابق شکل ۲-۸- ب مورق شود [۱۶]. به علت مشکلات ساخت، هسته این ماشین‌ها معمولاً به صورت مارپیچی مورق می‌شوند.



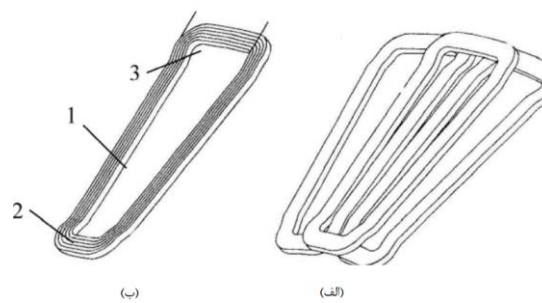
شکل (۲-۸): شماتیکی از هسته استاتور ماشین AFPM مورق به صورت (الف) مارپیچی و (ب) محوری [۱۶]

## ۲-۵-۱- استاتور بدون هسته آهنی<sup>۱۶</sup>

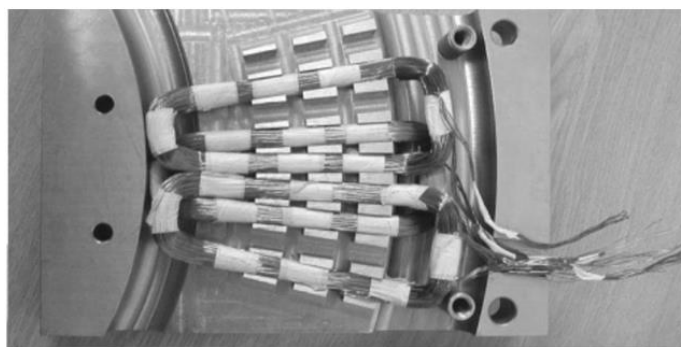
در ساختارهای بدون هسته، هرگونه ماده فرومغناطیس از قبیل ورقه‌های فولادی یا پودر SMC<sup>۱۷</sup> از استاتور حذف می‌شود که حذف تلفات هسته را نیز به همراه دارد. در نتیجه این نوع ماشین‌ها می‌توانند با بازده بالاتری کار کنند. همچنین از آنجایی که نیروی مغناطیسی تنها به آهن وارد می‌شود، با حذف استاتور در این ساختار، نیروی جاذبه مغناطیسی بین استاتور و روتور در حالت جریان صفر نیز حذف می‌شود. اما از سوی دیگر به علت افزایش فاصله هوایی، در مقایسه با ماشین با هسته استاتور فرومغناطیس مقدار آهن‌ربایی بیشتری استفاده می‌شود. شکل معمول کلاف‌های به کار رفته در این ماشین‌ها در شکل ۲-۹ و ۲-۱۰ نشان داده شده است.

<sup>16</sup> Coreless

<sup>17</sup> Soft magnetic powder composite



شکل (۲-۹): کلاف‌های مربوط به سیم‌پیچی بدون هسته نوع دیسکی (الف) کلاف تک (ب) سه کلاف مجاور هم. ۱- جهت کلاف ۲- خم چینش داخلی ۳- خم چینش خارجی [۱]



شکل (۲-۱۰): جای گذاری سیم‌پیچ‌ها با استفاده از شیارهای راهنما [۱]

همچنین در این ماشین‌ها گشتاور دندانه‌ای حذف می‌شود، کنترل سرعت پایین بهبود می‌یابد، با توجه به عدم وجود اشباع مغناطیسی مشخصه‌های گشتاور-جریان خطی را نتیجه می‌دهد و پیک گشتاور تا ۱۰ برابر گشتاور نامی فراهم می‌شود. این موتورها می‌توانند در سرعت‌های خیلی پایین به نرمی عمل کنند. علاوه بر این قابلیت پیک گشتاور بالا، در برخی کاربردهای معین، می‌تواند موجب حذف جعبه دنده‌های پرهزینه و همچنین خطر نشتی روان‌کننده‌ها شود.

با توجه به طراحی‌های خودروهای برقی که نیاز به موتورهای الکتریکی پربازده و خیلی سبک دارند، این ماشین‌ها برای این کاربرد مناسب هستند. همچنین موتورهای بدون هسته کوچک نیز در مواردی از قبیل پرینترها، رایورهای کامپیوتر، ضبط کننده‌های فیلم، تجهیزات پزشکی و .... کاربرد دارند [۱، ۱۷].

## ۲-۵-۲- استاتور با هسته آهنی [۱]

استاتور با هسته آهنی خود نیز می‌تواند به شکل‌های مختلف شیاردار<sup>۱۸</sup>، بدون شیار<sup>۱۹</sup> و با قطب‌های برجسته<sup>۲۰</sup> مورد استفاده قرار گیرد که هر حالت ویژگی‌های متفاوت دارد. اما به طور کلی ماشین‌های AFPM با هسته آهنی در دو مورد تفاوت برجسته‌ای با ماشین‌های AFPM بدون هسته<sup>۲۱</sup> دارند:

۱- ماشین‌های با هسته آهنی دارای تلفات هسته هستند، در حالی که نوع بدون هسته این تلفات را ندارند.

۲- مقدار پریونیت راکتانس سنکرون ماشین‌های با هسته آهنی بسیار بزرگتر از ماشین‌های بدون هسته است.

تلفات هسته تابعی از فرکانس و چگالی شار مغناطیسی در هسته فرو مغناطیسی است که در روابط زیر نشان داده شده است:

$$P_c = P_e + P_h \quad (۱-۲)$$

$$P_e = K_e f^2 B_{max}^2 \quad (۲-۲)$$

$$P_h = K_h f B_{max}^n \quad 1.5 < n < 2.5 \quad (۳-۲)$$

که در آن به ترتیب  $P_c$ ،  $P_e$  و  $P_h$  تلفات هسته، تلفات جریان گردابی و تلفات هیستریزیس هستند. همچنین  $f$  فرکانس میدان مغناطیسی،  $B_{max}$  حداکثر چگالی شار مغناطیسی و  $K_e$  و  $K_h$  به ترتیب ثابت‌های تلفات هیستریزیس و جریان گردابی هستند.

---

<sup>18</sup> Slotted

<sup>19</sup> Slotless

<sup>20</sup> Salient pole

<sup>21</sup> Coreless



فرکانس تغییرات شار در هسته استاتور با توجه به سرعت و تعداد جفت قطب‌ها تعیین می‌شود. در ماشین‌های بدون جاروبک AFPM تمایل به تعداد قطب‌های زیاد است، حداقل ۶ جفت قطب. سرعت ماشین‌های AFPM با هسته آهنی محدود می‌شود تا فرکانس حفظ شده و از این رو تلفات هسته ماشین محدود شود؛ مگر اینکه ماشین‌ها با چگالی‌های شار مغناطیسی هسته پایین طراحی شوند. برای هسته‌های فرومغناطیسی مورو به طور معمول فرکانس شار پایین، زیر ۱۰۰ Hz، نگه داشته می‌شوند. در کاربردهایی که فرکانس‌های بالاتر مورد نیاز است، باید از ورقه‌های فولادی سیلیکونی با ضخامت کمتر از ۰/۲ mm، نوارهای آلایژی نامنظم<sup>۲۲</sup> و یا پودرهای SMC استفاده شود.

در ماشین‌های AFPM با هسته‌های آهنی اندوکتانس سنکرون بالاتر است که در حالت ژنراتوری روی تنظیم ولتاژ ماشین اثر منفی گذاشته و می‌تواند حتی به عنوان محسوب شود. با این وجود، برای کاربردهایی که تغذیه با مبدل صورت می‌گیرد، اندوکتانس سنکرون بالاتر ماشین‌های AFPM با هسته آهنی، به علت کاهش ریپل جریان ناشی از کلیدزنی مبدل، یک مزیت در نظر گرفته می‌شود.

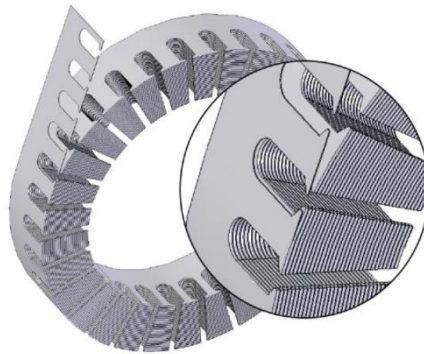
## ۲-۵-۱-۲- استاتور شیاردار

به طور معمول، هسته‌های استاتور از نوار فولادی پیچیده شده شکل می‌گیرند و شیارها با شکل دادن یا نقشه ماشین‌کاری می‌شوند که می‌توانند به صورت باز یا نیمه باز باشند. یک روش جایگزین برای ساخت هسته استاتور شیاردار، که در موسسه تحقیق و توسعه ماشین‌های الکتریکی VUES در برنو جمهوری چک مطرح شده است، این است که شیارها با فاصله‌های متغیر روی نوار ایجاد شده و سپس نوار فولادی به صورت هسته چنبره‌ای پیچیده شود. این فرایند تولید، امکان ساخت شیارهای های کج شده برای به حداقل رساندن گشتاور دندانه‌ای و اثر هارمونیک شیار را فراهم می‌کند [۱].

---

<sup>22</sup> Amorphous

شکل ۱۱-۲ نمایی شماتیکی از یک استاتور شیاردار مورق را نشان می‌دهد که به صورت هسته چنبره‌ای ایجاد شده است.

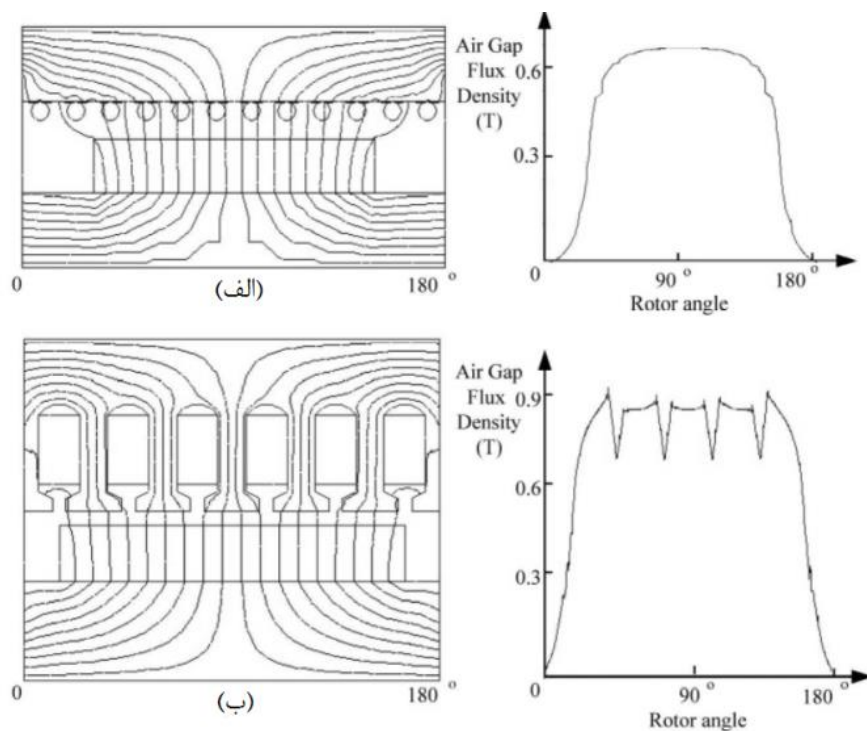


شکل (۱۱-۲): شماتیکی از هسته استاتور مورق شیاردار برای یک ماشین AFPM یک طرفه [۱۸]

فاصله هوایی در ماشین‌های AFPM با آرمیچر شیاردار، نسبتاً کوچک بوده (معمولاً کمتر از ۱mm) که موجب می‌شود چگالی شار فاصله هوایی تا ۰/۸۵ تسلا هم قابل افزایش باشد و نسبت به ساختار استاتور داخلی بدون شیار ضخامت ماده آهنربایی تا ۵۰٪ کاهش یابد؛ ضمن اینکه نیروی جاذبه مغناطیسی محوری قوی بین استاتور و روتور ایجاد می‌شود.

در این ماشین‌ها به علت افزایش رلوکتانس و انحراف خطوط شار زیر دهانه هر شیار، مطابق شکل ۲-۱۲-ب به ازای تعداد شیار که زیر یک قطب از آهنربا قرار دارند، چگالی شار فاصله هوایی دچار افت و اعوجاج می‌شود؛ در حالی که در ساختار استاتور بدون شیار به علت ثابت بودن رلوکتانس این اعوجاج‌ها مطابق شکل (۲-۱۲)-الف از شکل موج چگالی شار فاصله هوایی حذف می‌شوند [۱].

این استاتورها می‌توانند به صورت یک طرفه یا دوطرفه و با آهنرباهای سطحی و یا دفنی استفاده شوند؛ اما ساختار یک طرفه به علت نیروی محوری قوی تقریباً کنار گذاشته شده است. در صورتی که در ماشین‌های AFPM دو طرفه با تقارن مغناطیسی و مکانیکی ایده‌آل، نیروهای مغناطیسی محوری متعادل هستند.

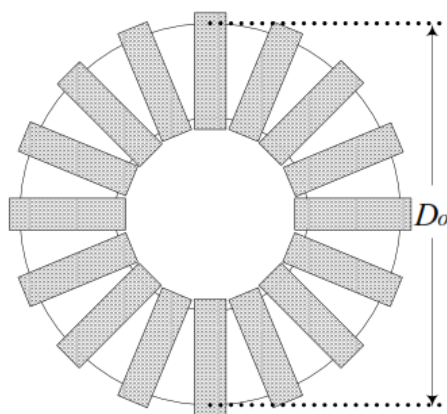


شکل (۲-۱۲): شکل موج چگالی شار فاصله هوایی برای (الف) استاتور بدون شیار (ب) استاتور شیاردار [۱]

## ۲-۲-۵-۲- استاتور بدون شیار

این نوع هسته استاتور، از پیچیدن یک نوار فولادی پیوسته و یا با استفاده از پودرهای متخلخل شکل

می‌گیرد. مطابق شکل ۲-۱۳ سیم‌پیچی آرمیچر روی سطح استاتور حلقوی شکل پیچیده می‌شود.



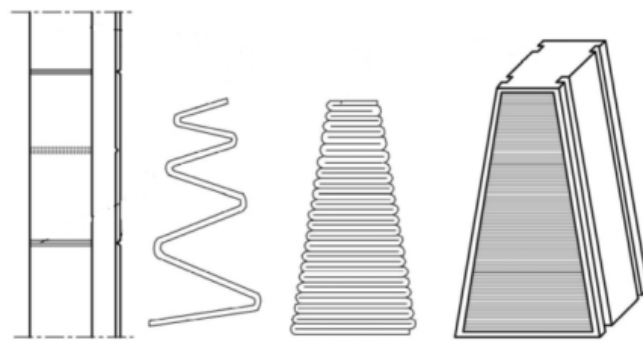
شکل (۲-۱۳): شماتیکی از نمای بالای یک استاتور بدون شیار و سیم‌پیچی‌های قرارگرفته بر روی آن [۱۴]

برای ماشین‌های AFPM با استاتور بدون شیار، فاصله هوایی خیلی بزرگتر از فاصله هوایی در ماشین با استاتور شیاردار بوده و برابر است با فاصله هوایی مکانیکی به اضافه ضخامت تمامی مواد غیر مغناطیسی مثل، سیم پیچ، ایزوله، یا هر برجستگی و نگهدارنده‌ای که شار مغناطیسی اصلی از آن عبور می‌کند.

به عنوان مزایای سیم‌پیچی یک استاتور بدون شیار در مقایسه با سیم‌پیچی یک استاتور شیاردار معمول، می‌توان از مواردی چون مونتاژ استاتور آسان، حذف گشتاور دندانه‌ای، کاهش تلفات سطحی روتور، کاهش اشباع مغناطیسی و کاهش نویز صوتی نام برد. همچنین از آنجایی که نیروی مغناطیسی به آهن وارد می‌شود و در این نوع استاتور سیم پیچی روی سطح هسته استاتور قرار می‌گیرد، نیروی محوری بین روتور و استاتور در مقایسه با ماشینی که استاتور آن شیاردار است، کمتر می‌باشد. از معایب آن نیز می‌توان به موارد، استفاده از ماده آهن ربایی بیشتر، اندوکتانس سیم‌پیچی کمتر که برای موتورهای تغذیه شده با اینورتر گاهی ایجاد مشکل می‌کند و تلفات جریان گردابی قابل توجه در هادی‌های سیم‌پیچ، اشاره کرد [۱، ۱۴].

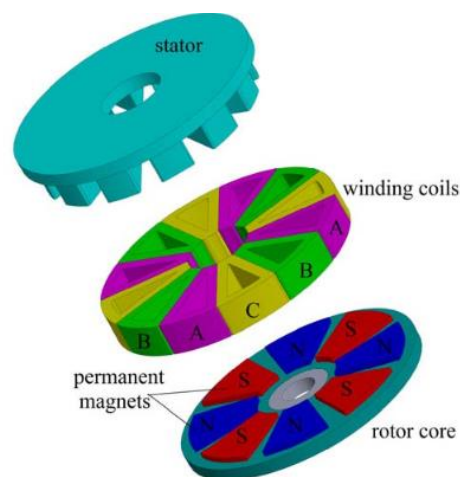
## ۲-۵-۲- استاتور با قطب برجسته

یکی دیگر از تکنیک‌های ایجاد استاتور، استفاده از دندانه‌های معمولاً دوزنقه‌ای شکل است که هر قطعه مطابق با یک گام شیار است. این قطعه‌ها می‌تواند مشابه استاتور شیاردار از برش ورقه‌ها ایجاد شود، و یا همانطور که در شکل ۲-۱۴ نشان داده شده است با استفاده از نوار ورقه‌ای با عرض ثابت ایجاد می‌شود. بدین صورت که نوار با عرض ثابت در فاصله‌های متناسب با شعاع تا شوند. یک روش دیگر ایجاد این استاتور استفاده از پودرهای SMC است که البته برای ایجاد استاتورهای شیاردار و بدون شیار نیز استفاده می‌شود.



شکل (۲-۱۴): شماتیکی از ایجاد قطب استاتور با استفاده از خم کاری ورق [۱، ۱۹]

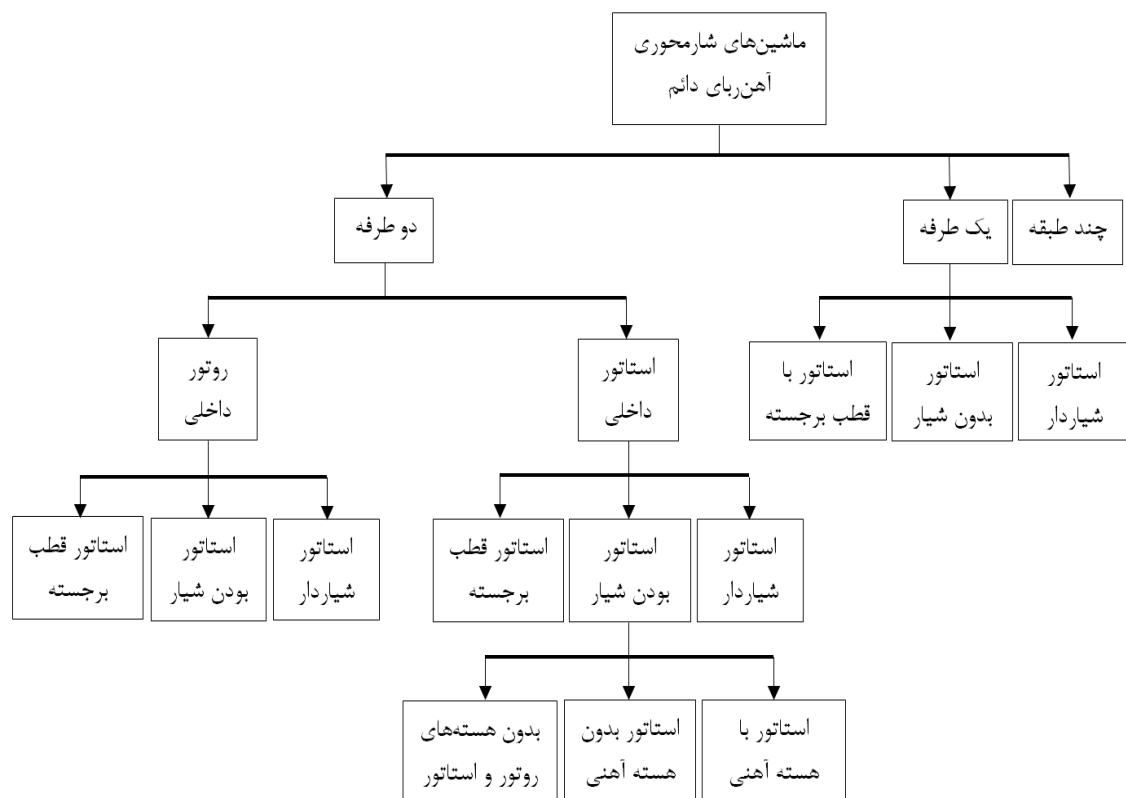
برای داشتن یک موتور سه فاز خود راه انداز، باید تعداد قطب‌های استاتور متفاوت از تعداد قطب‌های روتور باشد [۱]. شکل ۲-۱۵ ماشین AFPM دوطرفه با استاتور قطب برجسته سه فاز را نشان می‌دهد که دارای ۱۲ قطب و کلاف سیم‌پیچی استاتور و ۸ قطب روتور است.



شکل (۲-۱۵): ماشین AFPM سه فاز با استاتور قطب برجسته - ۱۲ کلاف سیم‌پیچی استاتور و ۸ قطب آهن‌ربایی [۱۵]

## ۲-۶- انواع ساختارهای ماشین AFPM

ماشین‌های آهن‌ربای دائم شار محوری بدون جاروبک، از نقطه نظر ساخت یک طرفه یا دو طرفه بودن، تعداد طبقات، ساختار هسته استاتور و نحوه قرارگیری آهن رباها در انواع مختلفی دسته بندی می‌شوند که نمودار شکل ۲-۱۶، خلاصه‌ای از این طبقه‌بندی را نشان می‌دهد و در ادامه به طور اجمالی به انواع آن‌ها پرداخته می‌شود.



شکل (۲-۱۶): نمودار طبقه بندی انواع ساختار ماشین‌های AFPM

## ۲-۶-۱- ماشین‌های AFPM یک طرفه

ساده‌ترین ساختار ماشین AFPM، ساختار تک استاتور و تک روتور است. اما علاوه بر ظرفیت تولید گشتاور کمتر نسبت ساختار دوطرفه، اصلی‌ترین مشکل این ساختار عدم وجود تعادل در نیروهای مغناطیسی محوری بین روتور و استاتور است [۱، ۱۵، ۱۹]. در این ساختار می‌توان از انواع استاتور شیاردار، بدون شیار و قطب برجسته استفاده کرد. شکل ۲-۱۷ نمایی از این ساختار با استاتور شیاردار به همراه روتور با آهن‌ربای سطحی را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۱۷): نمایی از ساختار یک طرفه ماشین AFPM با استاتور شیاردار و روتور با آهن‌رباهای سطحی [۵]

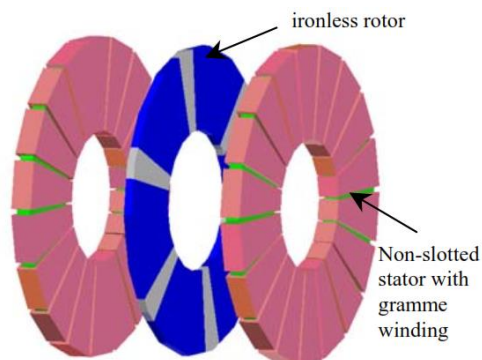
## ۲-۶-۲- ماشین‌های AFPM دو طرفه

در ساختار دو طرفه، هرکدام از آرایش‌های استاتور خارجی یا روتور خارجی می‌تواند به کار گرفته شود. ضمن اینکه روتور و استاتور خود نیز انواع متفاوتی دارند. ماشین‌های دو طرفه به دسته روتور داخلی و استاتور داخلی تقسیم می‌شوند.

### ۲-۶-۲-۱- ساختار دوطرفه با روتور داخلی

در ماشین‌های دوطرفه با روتور داخلی سیم پیچی‌های آرمیچر درون هسته استاتور در دو طرف روتور قرار می‌گیرند و روتور به همراه آهن‌ربا بین دو استاتور چرخش می‌کند که آهن‌رباها می‌توانند درون یک ماده غیرمغناطیسی قاب موتور جاسازی و یا چسبانده شوند [۱]. این ساختار به نام AFIR شناخته می‌شود که با توجه به ساختار استاتور، AFIR-NS برای ماشین دوطرفه روتور داخلی با استاتور بدون شیار و AFIR-S برای ماشین دوطرفه روتور داخلی با استاتور شیاردار به کار برده می‌شود [۱۴].

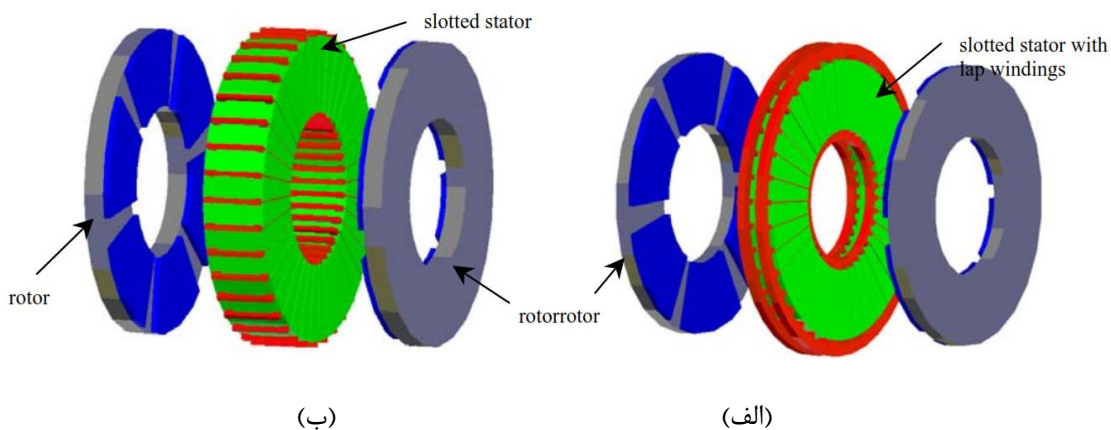
سیم‌پیچی‌های استاتورهای دو طرف روتور می‌توانند به دو صورت سری یا موازی به هم متصل شوند. یک ماشین دوطرفه با استاتورهای متصل شده به طور موازی حتی اگر یکی از سیم پیچ‌های استاتور آسیب ببیند، می‌تواند به عملکرد خود ادامه دهد [۱، ۱۹]. شکل ۲-۱۸ شماتیکی از ساختار ماشین دو طرفه با روتور داخلی را نشان می‌دهد.



شکل (۱۸-۲): شماتیکی از ساختار ماشین AFIR-NS [۱۴]

## ۲-۲-۶-۲- ساختار دوطرفه با استاتور داخلی

در ماشین‌های AFPM تک استاتور و دو روتوره، یک استاتور شیاردار بدون شیار، با قطب برجسته و یا بدون هسته بین دو روتور قرار می‌گیرد. این ساختار ماشین‌ها که یک استاتور سیم پیچی شده بین دو روتور قرار دارد به نام TORUS شناخته می‌شوند و برای ماشین‌های با استاتور بدون شیار داخلی TORUS-NS و برای ماشین‌های با استاتور شیاردار داخلی TORUS-S به کار می‌رود [۱۴]. شکل ۲-۱۹ شماتیکی از ساختار TORUS-S با دو نوع سیم‌پیچی روی هم و چنبره‌ای را نشان می‌دهد.



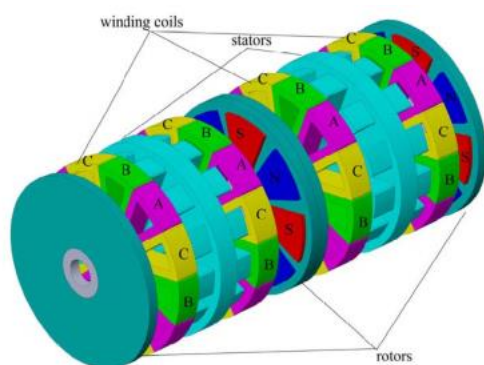
شکل (۱۹-۲): ماشین AFPM با ساختار TORUS-S با سیم‌پیچی الف) روی هم، ب) چنبره‌ای



## ۲-۶-۳- ماشین‌های دیسکی چند طبقه

از آنجایی که در افزایش توان ماشین‌های AFPM محدودیت وجود دارد، این مشکل با قابلیت کاربرد این ماشین‌ها به صورت چند طبقه قابل حل است. این لایه‌ها امکان استفاده به صورت تکی و چندتایی را دارا می‌باشند. به گونه‌ای که با افزایش بار و نیاز به گشتاور بالاتر، لایه‌ها وارد مدار شوند. برای این ساختار ماشین نیز با توجه به نوع استاتور و روتور، چندین نوع ساختار وجود دارد که می‌توانند با توجه به کاربرد مورد استفاده قرار گیرند.

موتورهای چند طبقه بزرگ با توان حداقل ۳۰۰ کیلووات، یک سیستم خنک‌کننده آبی با رادیاتور-هایی اطراف اتصالات انتهایی سیم‌پیچ دارند [۱، ۱۹]. شکل ۲-۲۰ یک ماشین دیسکی چند طبقه با استاتورهای قطب برجسته را نشان دهد.



شکل (۲-۲۰): ماشین AFPM ۸ قطب و ۱۲ شیار چند طبقه با ۲ استاتور و ۳ روتور [۱۵]

## ۲-۷- معرفی ماشین مرجع مورد مطالعه

پس از معرفی انواع ماشین‌های AFPM یکی از این ساختارها به عنوان ماشین مرجع برای این تحقیق انتخاب می‌شود. با توجه به مشکلات گشتاور دندانه‌ای و رپل گشتاور ماشین‌های با استاتور شیاردار، به منظور بررسی بهتر اثرگذاری روش‌های پیشنهادی بر مشخصه‌های عملکرد ماشین‌های AFPM،

ماشینی با استاتور شیاردار جهت مطالعه انتخاب می‌شود. مشخصات این ماشین مشابه، ماشین مورد مطالعه در مرجع [۲۰] می‌باشد که در بخش‌هایی دچار تغییر شده است.

اطلاعات ابعادی و الکتریکی ماشین در جدول ۱-۲ قابل مشاهده است. ماشین مطرح شده در [۲۰] از نوع دوطرفه با دو استاتور خارجی و یک روتور داخلی و ماشین مورد مطالعه در این پژوهش، دو طرفه با یک استاتور داخلی، دو روتور خارجی و سیم‌پیچی چنبره‌ای، مطابق شکل ۱۹-۲-ب می‌باشد.

جدول (۱-۲): مشخصات ماشین مورد مطالعه

| پارامتر                                                    | مقدار     |
|------------------------------------------------------------|-----------|
| توان نامی خروجی                                            | 5 kW      |
| سرعت نامی                                                  | 300 rpm   |
| ولتاژ فاز نامی (RMS)                                       | 210 V     |
| تعداد جفت قطب‌ها، $p$                                      | 6         |
| تعداد شیارهای استاتور، $Q$                                 | 36        |
| طول فیزیکی فاصله هوایی، $g$                                | 1.5 mm    |
| قطر خارجی هسته استاتور، $D_{out}$                          | 328 mm    |
| نسبت قطر، $K_d$                                            | 0.6       |
| نسبت گام قطب به کمان آهن‌ریا، $\alpha_p$                   | 0.65      |
| ارتفاع محوری آهن‌ریاها، $h_{PM}$                           | 4 mm      |
| ضخامت یوغ استاتور، $h_y$                                   | 15 mm     |
| ضخامت یوغ روتور، $h_{yr}$                                  | 14 mm     |
| ارتفاع دندان استاتور، $h_{ds}$                             | 37.5 mm   |
| میدان مغناطیس زدایی آهن‌ریا، $20^\circ\text{C}$ , $H_{ci}$ | 2400 kA/m |
| چگالی شار باقیمانده آهن‌ریا، $20^\circ\text{C}$ , $B_r$    | 1.1T      |

## فصل سوم

بررسی مطالعات انجام شده به منظور

بهبود عملکرد ماشین‌های AFPM

### ۳-۱- مقدمه

گشتاور الکترومغناطیسی یکی از مشخصه‌های مهم هر ماشین الکتریکی است که در صورت وجود رپیل می‌تواند با ایجاد لرزش و نویز موجب عملکرد نامطلوب موتور شود. مطالعات صورت گرفته بر روی ساختار ماشین‌های AFPM با استاتور شیاردار بیشتر بر کاهش گشتاور دندان‌های متمرکز بوده است که از عوامل ایجاد رپیل گشتاور و لرزش ماشین است. در این فصل ابتدا به معرفی گشتاور الکترومغناطیسی و عوامل ایجاد مولفه‌های ضربانی آن پرداخته و سپس راهکارهای ارائه شده در مراجع مختلف برای بهبود کیفیت گشتاور و کاهش گشتاور دندان‌های معرفی و بررسی می‌شود.

### ۳-۲- گشتاور الکترومغناطیسی

تحلیل عملکرد گشتاور ماشین‌های الکتریکی یک وظیفه مهم در طول فرآیند طراحی است. نه تنها مقدار چگالی گشتاور تولیدی که رپیل گشتاور نیز باید در نظر گرفته شود [۹]. گشتاور کل یک ماشین جمع گشتاور متوسط و گشتاور ضربانی<sup>۲۳</sup> است که خود گشتاور ضربانی ناشی از دو مولفه رپیل گشتاور و گشتاور دندان‌های است [۱۰].

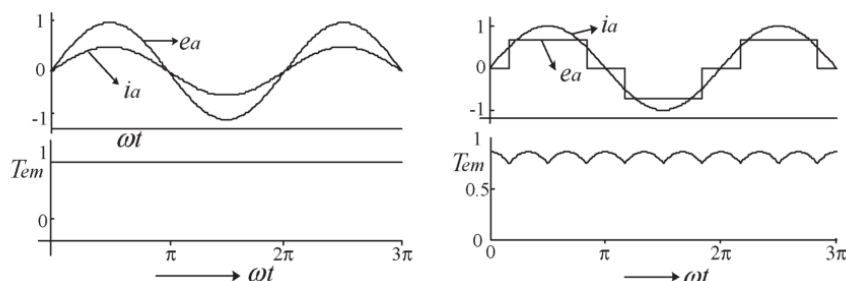
موتورهای آهن‌ربای دائم سینوسی شباهت زیادی با دیگر انواع ماشین‌های جریان متناوب دارند. برای مثال اگر ولتاژ القایی یک ماشین آهن‌ربای دائم و شکل موج جریان آن کاملاً سینوسی باشند، گشتاور یکنواخت و هموارتری نتیجه خواهد داد. در ماشین‌های آهن‌ربای دائم سینوسی، در حالت بی‌بار، چگالی شار در طول فاصله هوایی به طور سینوسی تغییر می‌کند [۱۰].

همانطور که در شکل ۳-۱ نشان داده شده است، هر وضعیت غیرایده‌آلی مثل اعوجاج شکل موج جریان استاتور ناشی از کلیدزنی مبدل تغذیه و یا اعوجاج شکل موج ولتاژ القایی ناشی از فاصله هوایی غیریکنواخت، موجب جریان و چگالی شار غیرسینوسی می‌شوند که نتیجه آن مولفه‌های گشتاور

---

<sup>23</sup> pulsating torque

ضربانی نامطلوب ماشین است. به عبارت دیگر گشتاور ماشین با مربع چگالی شار در فاصله هوایی متناسب است. اگر شکل موج چگالی شار دچار اعوجاج باشد گشتاور ضربانی اجتناب‌ناپذیر است [۱۰].



شکل (۳-۱): ریپل گشتاور برای ماشین‌های با شکل موج ولتاژ القایی (الف) سینوسی ب) مربعی [۱۰]

روش‌های مختلفی برای حداقل کردن مولفه‌های گشتاور ضربانی ماشین‌های آهن‌ربای دائم دیسکی وجود دارد. در حالت کلی، روش‌های حداقل‌سازی می‌توانند به دو دسته بزرگ و کلی طبقه‌بندی شوند؛ اولین دسته شامل روش‌های اصلاح طراحی ماشین برای حداقل‌سازی مولفه‌های گشتاور ضربانی و رسیدن به گشتاوری صاف و هموار است. دومین دسته بر اساس طرح‌های کنترلی برای اصلاح شکل موج تحریک استاتور به منظور فراهم شدن گشتاوری هموار استوار می‌باشد [۱۰، ۲۱] که مطالعه انجام شده در این پژوهش در دسته اول طبقه‌بندی می‌شود.

به طور کلی اگر از اندوکتانس نشتی و مقاومت استاتور صرف‌نظر شود، گشتاور الکترومغناطیسی لحظه‌ای کلی برای هر ماشین الکتریکی می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$T_{em}(t) = \frac{1}{\omega_m} \sum_{j=1}^m e_j(t) \cdot i_j(t) \quad (3-1)$$

که در آن  $m$  تعداد فازهای ماشین،  $e_j(t)$  و  $i_j(t)$  به ترتیب ولتاژ القایی و جریان لحظه‌ای فاز  $j$  و  $\omega_m$  سرعت زاویه‌ای موتور می‌باشد. در تحلیل ریپل گشتاور فرض می‌شود موتور در اشباع نباشد،

مؤلفه‌های جریان و ولتاژ القایی فازهای مربوطه هم فاز باشند و از عکس‌العمل آرمیچر نیز صرف‌نظر شود [۲۱].

برای سیم‌پیچ سه فاز استاتور با اتصال ستاره، ولتاژ القایی و جریان فاز  $a$  می‌توانند به صورت زیر نوشته شوند:

$$e_a = E_1 \sin \omega t + E_3 \sin 3\omega t + E_5 \sin 5\omega t + E_7 \sin 7\omega t + \dots \quad (۲-۳)$$

$$i_a = I_1 \sin \omega t + I_5 \sin 5\omega t + I_7 \sin 7\omega t + I_{11} \sin 11\omega t + \dots \quad (۳-۳)$$

که  $E_n$  مقدار پیک  $n$  امین هارمونیک زمانی و ولتاژ القایی فاز است که با  $n$  امین هارمونیک فضایی چگالی شار مغناطیسی ایجاد شده است و  $I_n$  نیز مقدار پیک  $n$  امین هارمونیک زمانی جریان فاز آرمیچر است که به شکل موج جریان فاز آرمیچر وابسته است. همچنین باید توجه داشت که به علت وجود نقطه‌ی نوترال، هارمونیک‌های مضرب ۳ جریان وجود ندارند [۱۰].

با استفاده از روابط مثلثاتی حاصل ضرب  $e_a i_a$ ، از مقدار متوسط و هارمونیک‌های مرتبه زوج فاز  $a$  تشکیل شده است. گشتاور لحظه‌ای کل ماشین برابر با مجموع حاصل ضرب ولتاژ القایی و جریان هر فاز است. پس در نهایت گشتاور الکترومغناطیسی کل یا  $e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c$ ، شامل یک مقدار متوسط و هارمونیک‌های مرتبه ۶ بوده و دیگر هارمونیک‌ها حذف می‌شوند. معادله گشتاور لحظه‌ای کل مطابق فرمول زیر خواهد بود:

$$T_{em}(t) = T_0 + T_6 \cos 6\omega t + T_{12} \cos 6\omega t + T_{18} \cos 18\omega t + \dots \quad (۴-۳)$$

$$T_{em}(t) = T_0 + \sum_{n=1}^{\infty} T_{6n} \cos n6\omega t \quad (۵-۳)$$

که در آن  $T_0$  مقدار گشتاور متوسط،  $T_{6n}$  مؤلفه‌های گشتاور هارمونیک هستند که در رابطه‌ی زیر آورده شده‌اند:

$$T_0 = \frac{3}{2\omega_m} [E_1 I_1 + E_5 I_5 + E_{11} I_{11} + E_{17} I_{17} + \dots] \quad (۶-۳)$$

$$T_6 = \frac{3}{2\omega_m} [I_1(E_7 - E_5) + I_5(E_{11} - E_1) + I_7(E_1 + E_{13}) + I_{11}(E_5 + E_7) + \dots] \quad (۷-۳)$$

$$T_{12} = \frac{3}{2\omega_m} [I_1(E_{13} - E_{11}) + I_5(E_{17} - E_7) + I_7(E_{19} - E_{17}) + I_{11}(E_{23} - E_1) + \dots] \quad (۸-۳)$$

$$T_{18} = \frac{3}{2\omega_m} [I_1(E_{19} - E_{17}) + I_5(E_{23} - E_{13}) + I_7(E_{25} - E_{11}) + I_{11}(E_{29} - E_7) + \dots] \quad (۹-۳)$$

در صورتیکه جریان سیم پیچ‌ها سینوسی و متعادل فرض شوند پس خواهیم داشت [۲۱، ۱۰]:

$$T_{em} = \frac{3I_1}{2\omega_m} E_1 + \frac{3I_1}{2\omega_m} \sum_{n=1}^{\infty} [E_{6n+1} - E_{6n-1}] \cos(6n\omega t) \quad (۱۰-۳)$$

در حالت ایده‌آل که ولتاژهای القایی و جریان‌های فاز آرمیچر سینوسی هستند، گشتاور الکترومغناطیسی ثابت بوده و هیچ ریپلی ندارد. اگر یکی از آن‌ها شکل موج مربعی داشته باشد، همانطور که در شکل ۳-۱ نشان داده شده است، گشتاور منتهی به گشتاور ضربانی خواهد بود.

از آنجایی که اغلب در عمل سیم‌پیچ‌های استاتور و همچنین توزیع‌های میدان آهن‌ربا، هارمونیک‌های چگالی شار قابل توجهی ایجاد می‌کنند، ولتاژ القایی سینوسی نبوده و هارمونیک‌هایی دارد. پس حتی با یک منبع جریان فاز سینوسی هم گشتاور ضربانی وجود دارد. ضریب ریپل گشتاور می‌تواند به صورت نسبتی از ریپل گشتاور پیک تا پیک به گشتاور متوسط تعریف و به صورت زیر بیان شود:

$$TRF = \frac{T_{PP}}{T_0} = 2 \frac{\sqrt{T_6^2 + T_{12}^2 + T_{18}^2 + \dots}}{T_0} \quad (۱۱-۳)$$

که در آن  $T_{pp}$ ، ریپل گشتاور پیک تا پیک است.

از آنجایی که در نرم‌افزارهای تحلیلی به روش اجزاء محدود<sup>۲۴</sup> اندوکتانس‌ها به سادگی قابل استخراج هستند، در تحلیل سه بعدی این مقادیر در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه یکی از مزیت‌های مهم استفاده از روش اجزاء محدود توانایی محاسبه تغییرات گشتاور، مثل گشتاور دندانه‌ای، ریپل گشتاور و گشتاور کل با تغییر موقعیت روتور می‌باشد [۱۰]. در این پژوهش با محاسبه مقادیر ماتریس اندوکتانس و ولتاژهای القایی در نرم‌افزار اجزاء محدود که در فصل بعد به آن پرداخته شده، تغییرات گشتاور در حالت دائمی تحت بار ماشین با مدل‌سازی روابط حاکم بر ماشین در فصل پنجم تحلیل شده است.

### ۳-۳- ریپل گشتاور

ریپل گشتاور مؤلفه‌ای از گشتاور ضربانی است که با نیرو محرکه مغناطیسی<sup>۲۵</sup> روتور و استاتور ایجاد می‌شود. در ماشین‌های با آهن‌ربای سطحی، ریپل گشتاور به طور کلی در اثر متقابل بین نیرومحرکه مغناطیسی تولید شده توسط سیم‌پیچ‌های استاتور و نیرومحرکه مغناطیسی ناشی از آهن‌ربای روتور تولید می‌شود. هر چند در سرعت‌های بالا، ریپل گشتاور معمولاً با اینرسی سیستم فیلتر می‌شود، در سرعت‌های پایین ریپل گشتاور ممکن است تغییرات سرعت غیرقابل قبول و نویز صوتی را به دنبال داشته باشد [۱۰]. منابع اصلی تولید ریپل گشتاور را می‌توان به صورت زیر معرفی کرد [۱۰، ۲۱]:

۱- هارمونیک‌های جریان ناشی از مدولاسیون پهنای باند

۲- شکل موج ولتاژ القایی غیرایده‌آل و هارمونیکی

۳- رویدادهای کموتاسیون فاز

۴- ضربان ولتاژ لینک dc

<sup>24</sup> Finite Element Method (FEM)

<sup>25</sup> Magnetomotive Force (MMF)



۵- اشباع مغناطیسی هسته‌های روتور و استاتور ماشین

۶- تحریک با کنترلرهای الکترونیکی و ...

هارمونیک‌های ولتاژ، تلفات ماشین مثل تلفات مس در سیم‌پیچ‌های استاتور و تلفات آهن هسته‌های استاتور و روتور، یعنی مجموع تلفات جریان ادی و تلفات هیت‌ریز، را افزایش می‌دهد. این تلفات بر روی عملکرد کلی و افزایش حرارت ماشین اثر می‌گذارند. بنابراین در فرایند طراحی باید ملاحظات برای دستیابی به یک ساختار بهبود یافته ماشین در نظر گرفته شود [۱۰].

### ۳-۴- گشتاور دندانه‌ای

گشتاور دندانه‌ای مؤلفه‌ای از گشتاور ضربانی است که در اثر تغییر رلوکتانس بین شیارها و دندانه استاتور و آهن‌ربای قرار گرفته بر روی سطح روتور، ایجاد می‌شود که یک منبع ایجاد لرزش و نویز در ماشین‌های آهن‌ربای دائم شار محوری با استاتور شیاردار است.

تحریک استاتور هیچ تأثیری بر تولید گشتاور دندانه‌ای ندارد و این گشتاور مستقل از جریان بار می‌باشد. گشتاور دندانه‌ای در اثر تغییر کل انرژی ذخیره شده در فاصله هوایی و تغییر چگالی شار مغناطیسی همراه با موقعیت زاویه‌ای روتور ایجاد می‌شود. همپنین به طور جزئی‌تر می‌توان گفت در اثر متقابل شار مغناطیسی و رلوکتانس استاتور ناشی از شیارها، به صورت زیر ظاهر می‌شود [۶، ۲۱-۲۳]:

$$T_{cog}(\theta_r) = -\frac{1}{2} \varphi_g^2 \frac{dR}{d\theta_r} \quad (3-12)$$

که در آن  $\varphi_g$  شار فاصله هوایی،  $R$  رلوکتانس فاصله هوایی و  $\theta_r$  موقعیت زاویه‌ای روتور است. هر چه آهن‌ربا قوی‌تر باشد، با افزایش مقدار شار فاصله هوایی، گشتاور دندانه‌ای نیز افزایش می‌یابد. هر چند که گشتاور دندانه‌ای در اصل نتیجه توزیع غیر یکنواخت شار در فاصله هوایی است. همانطور که دندانه

به اشباع می‌رود، شار به طور مساوی در فاصله هوایی توزیع می‌شود و گشتاور دندانه‌ای کاهش می‌یابد [۹].

دوره تناوب گشتاور دندانه‌ای یا به عبارت دیگر تعداد دوره‌ها در هر چرخش مکانیکی با کوچکترین مضرب مشترک تعداد قطب‌ها،  $2p$  و تعداد شیارهای هر استاتور،  $N_s$ ، بدست می‌آید:

$$N_C = LCM(N_s, 2p) \quad (3-13)$$

فرکانس‌های بالاتر شکل موج گشتاور دندانه‌ای به معنی کاهش دامنه آن است و به همین علت به فرکانس اصلی و فرکانس‌های پایین‌تر ترجیح داده می‌شوند. بدون روش‌های کاهش گشتاور دندانه‌ای، دامنه‌ی این گشتاور ممکن است تا ۲۵٪ گشتاور نامی نیز افزایش یابد [۵].

یک شکل موج گشتاور دندانه‌ای معمول در شکل ۳-۲ نشان داده شده است؛ که مطابق با این شکل در یک موتور آهن‌ربای دائم با گام قطب کامل، گشتاور دندانه‌ای لحظه‌ای زمانی صفر است که:

۱- محور قطب با مراکز دندانه‌ها هم‌راستا باشد.

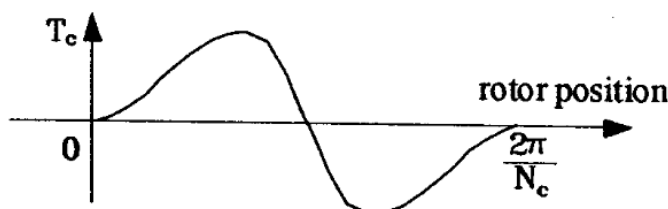
۲- محور قطب با مرکزهای شیارها هم‌راستا باشد.

دلیل این امر این است که روتور با قطب‌های آهن‌ربایی تمایل دارد در وضعیتی چرخش کند که بیش‌ترین انرژی ذخیره شود، یعنی وضعیتی:

۱- مطابق با یک موقعیت تعادل پایدار که مسیرهای شار ناشی بین لبه‌های قطب‌های آهن‌ربا حداقل طول را داشته باشند.

۲- مطابق با یک موقعیت تعادل ناپایدار، که مسیرهای شار پراکندگی از دهانه‌ی شیار عبور می‌کند.

پیک‌های مثبت و منفی گشتاور دندانه‌ای تقریباً زمانی رخ می‌دهد که محور قطب‌ها با لبه‌های شیارها در یک راستا قرار بگیرند [۸].



شکل (۳-۲): شکل موج گشتاور دندانه‌ای معمول [۸]

### ۳-۵- کاهش گشتاور دندانه‌ای

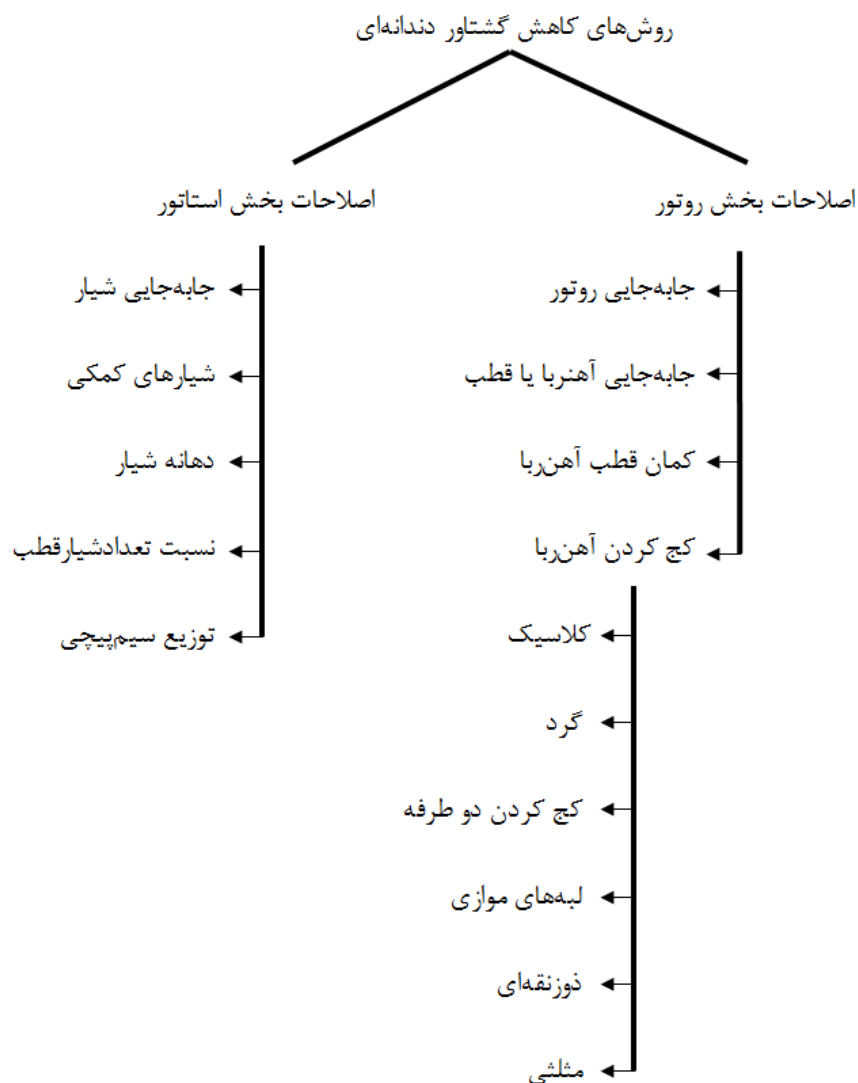
روش‌های کاهش گشتاور دندانه‌ای شامل راهکارهای مربوط به کنترل و راهکارهای مربوط به طراحی ماشین الکتریکی می‌شود. اولین راهکارها بر پایه تزریق جریان هارمونیک برای تولید یک شکل موج ریپل گشتاور است تا مؤلفه مربوط به گشتاور ضربانی گشتاور کل را حذف کند. قبل از این تکنیک‌ها بهتر است روش‌های مبتنی بر طراحی برای کمک به جلوگیری از مشکلات به هنگام ساخت و بهره‌برداری از ماشین بررسی شود.

با توجه به عوامل تولید گشتاور دندانه‌ای، آشکار است که با کاهش شار مغناطیسی پسماند آهن‌رباها و یا تغییر روکتانس روی فاصله هوایی، گشتاور دندانه‌ای کاهش می‌یابد که مورد اول عملکرد نامی ماشین AFPM را نیز کاهش می‌دهد؛ در نتیجه کاهش تغییرات رلوکتانس روش مناسبی برای کاهش گشتاور دندانه‌ای محسوب می‌شود.

برای ماشین آهن‌ربای دائم شار محوری، تضعیف گشتاور دندانه‌ای هر فاز در طول فرایند طراحی می‌تواند با ترکیب تعداد شیارهای برقطب بر فاز، انحراف شیارهای استاتور یا آهن‌ربا، تغییر ضریب کمان قطب ماشین برای جفت قطب‌های متناوب یا استفاده از قطب‌های آهن‌ربایی با عرض متغیر، ایجاد

شیارهای ساختگی روی دندانه استاتور یا جابه‌جایی استاتور و روتور در ساختارهای دوطرفه، تحقق یابد. در حالت تئوری تمامی این روش‌ها امکان‌پذیر هستند اما باید نیم‌نگاهی هم به یک مطالعه بین امکان‌سنجی تولید، عملکرد ماشین و حداقل‌سازی گشتاور دندانه‌ای داشت.

به طور کلی روش‌های حداقل‌سازی گشتاور دندانه‌ای را می‌توان به دو قسمت اصلاحات مربوط به ساختار روتور و اصلاحات مربوط به ساختار استاتور تقسیم‌بندی کرد. نمودار شکل ۳-۳ اشاره‌ای به برخی از این روش‌ها دارد [۲]:



شکل (۳-۳): نمودار معرفی روش‌های کاهش گشتاور دندانه‌ای [۲]

در روش طراحی بازگشتی، در حالی که روش‌های کاهش گشتاور دندانه‌ای مختلفی آزمایش می‌شود، طراح باید متوسط گشتاور، ولتاژ القایی و شار پراکندگی را به منظور حفظ عملکرد مطلوب ماشین مورد توجه و نظارت قرار دهد.

از نظر عملی حذف گشتاور دندانه‌ای، با توجه به اثرات حاشیه‌ای و خطاهای ابعادی غیرقابل اجتناب در فرایند ساخت، هرگز به دست نخواهد آمد.

### ۳-۵-۱- اصلاحات ساختار استاتور

یک دلیل مهم کنار گذاشته شدن و محدود شدن اصلاح ساختار استاتور برای کاهش مولفه ضربانی گشتاور، مشکلات مربوط به ساخت آن می‌باشد. به همین علت اصلاحات روی ساختار استاتور ماشین AFPM نسبت به ماشین‌های شار شعاعی کمتر عملی بوده و معمولاً ترجیح داده نمی‌شود [۲]. با این حال برخی از این روش‌ها که در مراجع مختلف ارائه شده‌اند، در ادامه معرفی می‌شوند.

### ۳-۵-۱-۱- ترکیب تعداد قطب‌ها و شیارها

با وجود محدود بودن اصلاحات روی ساختار استاتور، موثرترین روش کاهش گشتاور دندانه‌ای استفاده شده در استاتور، انتخاب مناسب نسبت تعداد شیارهای استاتور به تعداد قطب‌ها در فرایند طراحی است. در ماشین‌های شیار صحیح هر آهن‌ربای روتور موقعیت مشابهی نسبت به شیارهای استاتور دارد. در نتیجه مولفه‌های گشتاور دندانه‌ای که هم‌فاز هستند، گشتاور دندانه‌ای منته‌جه بالایی را ایجاد می‌کنند. گشتاور دندانه‌ای کل در حقیقت جمع جبری گشتاور دندانه‌ای روی همه دندانه‌ها می‌باشد [۲۴]. با این حال، در ماشین‌های شیار کسری، آهن‌رباهای روتور نسبت به شیارهای استاتور موقعیت‌های متفاوتی دارند. به همین علت مؤلفه‌های گشتاور دندانه‌ای غیرهم‌فاز با یکدیگر تولید می‌کنند که مجموع آن‌ها گشتاور دندانه‌ای کل کمتری نتیجه می‌دهد [۲].

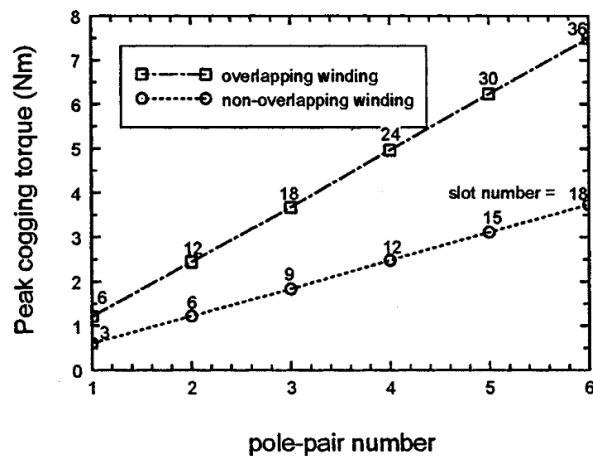
روتورهایی که گام شیار  $(q = \frac{N_s}{2p})$  صحیح دارند، هارمونیک اول گشتاور دندانه‌ای مرتبه  $q$  دارند. (مثل یک ماشین  $q=3$  و  $2p=4$  و  $N_s=12$ ). زمانی که  $N_s$  و  $p$  مضرب مشترک دارند، مانند وقتی که  $q$  برابر با کوچکترین مضرب مشترک  $N_s$  و  $2p$  برابر است و  $q > 1$ ، گشتاور دندانه‌ای به طور متناوب هر  $\frac{360}{q}$  در طول فاصله هوائی تکرار می‌شود و اولین هارمونیک گشتاور دندانه‌ای در شاخص  $N_s / q$  ظاهر می‌شود که حالتی بین بدترین و بهترین وضعیت است (مثل یک ماشین با  $q=3$  و  $p=6$  و  $N_s=21$ ). به همین علت ماشین‌های سه فازی که قطب‌های آهن‌ریا به تعداد  $6n$  دارند، مانند ۶، ۱۲، ۱۸ و...، گشتاور دندانه‌ای قابل توجه‌تری نسبت به موتورها با تعداد قطب‌های دیگر دارند [۲۴].

دوره تناوب گشتاور دندانه‌ای و شکل موج هارمونیک مرتبه اول آن، کوچکترین مضرب مشترک تعداد قطب‌ها و شیارها است.  $N_C$  بزرگتر و کوچکتر بودن تعداد قطب‌ها و یا شیارها، دامنه گشتاور دندانه‌ای را کاهش می‌دهد. در اینجا برای کمک به انتخاب  $N_s$  و  $2p$  مناسب و به منظور نشان دادن میزان مناسب بودن ترکیب‌های تعداد قطب و شیارها از نقطه نظر گشتاور دندانه‌ای، ضریب  $C_T$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

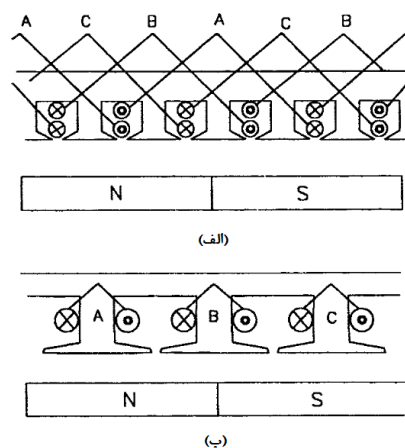
$$C_T = \frac{2pN_s}{N_C} \quad (14-3)$$

اگرچه هیچ پایه و اساس اسمی و قراردادی برای ارتباط  $C_T$  با دامنه گشتاور دندانه‌ای وجود ندارد، اما مشخص است که با ضریب  $C_T$  بزرگتر، گشتاور دندانه‌ای نیز بزرگتر خواهد بود.

برای نشان دادن اثر ترکیب تعداد قطب و شیار روی گشتاور دندانه‌ای، فرض می‌شود که آهن‌ریاها کمان قطب ۱۸۰ درجه الکتریکی دارند. شکل ۳-۴ تغییرات پیک گشتاور دندانه‌ای را برای ترکیب تعداد قطب و شیار که معمولاً در ماشین‌های بدون جاروبک DC استفاده می‌شوند، با دو نوع سیم-پیچی استاتور، روی هم و غیر روی هم مطابق شکل ۳-۵ نشان می‌دهد.



شکل (۵-۳): تغییرات پیک گشتاور دندانه‌ای به ازای ترکیب تعداد جفت قطب‌ها و شیارهای مختلف [۸]



شکل (۵-۳): توپولوژی‌های سیم‌پیچی استاتور در ماشین‌های آهن‌ربای دائم بدون جاروبک با الف) سیم‌پیچی متمرکز روی هم ب) سیم‌پیچی متمرکز غیر روی هم [۸]

با توجه به شکل ۵-۳، سطح گشتاور دندانه‌ای در موتورهای با سیم‌پیچی استاتور غیرروی هم، (برای

مقادیر  $N_s / P$  معمول  $(\frac{3}{2}, \frac{6}{4}, \frac{9}{6})$  معمولاً حدود نصف موتور مشابه با سیم‌پیچی روی هم (مقادیر  $N_s / P$

معمول  $(\frac{6}{2}, \frac{12}{4}, \frac{18}{6})$  است. دلیل این امر نیز این حقیقت است که وقتی نصف لبه‌های آهن‌رباهای قطب

N و S، در موتورهای با سیم‌پیچی غیرروی هم، با دهانه‌ی شیار مواجه است، دیگر لبه‌ها تقریباً در

مرکز دندانها هستند. در حالی که در ماشین با سیم‌پیچی روی هم تمامی لبه‌های آهن‌رباها مقابل دهانه شیار قرار دارند.

جدول ۱-۳ نیز تغییرات ضریب  $C_T$  را به ازای تعداد شیارها مختلف نشان می‌دهد. می‌توان گفت همه موتورها با تعداد شیار فرد اساساً مولفه گشتاور دندانهای یکسانی نشان می‌دهند. به‌طور مشابه برای موتورها با داشتن تعداد شیار زوج نیز این‌گونه است. البته گشتاور دندانهای در این حالت دو برابر حالت اول خواهد بود. دلیل این امر نیز مشابه آنچه قبلاً بیان شد، این است که لبه‌های قطب‌های  $N$  و  $S$  آهن‌ربا در موتورهای با تعداد شیار زوج موقعیت نسبی مشابهی با توجه به دندانها دارند که در مورد ماشین‌های با تعداد شیار فرد این‌گونه نیست. بنابراین تعداد شیارهای فرد، برای کاهش گشتاور دندانهای ترجیح داده می‌شود [۸].

جدول (۱-۳): تغییرات ضریب  $C_T$  برای تعداد شیارها و  $N_C$  مختلف

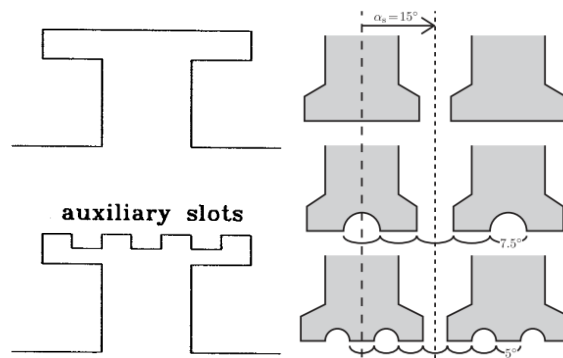
| $Q_s$ | 3 | 4 | 5  | 6 | 7  | 8 | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|-------|---|---|----|---|----|---|----|----|----|----|----|----|----|
| $N_C$ | 6 | 4 | 10 | 6 | 14 | 8 | 18 | 10 | 22 | 12 | 26 | 14 | 30 |
| $C_T$ | 1 | 2 | 1  | 2 | 1  | 2 | 1  | 2  | 1  | 2  | 1  | 2  | 1  |

### ۳-۵-۱-۲- شیار کمکی

مشخص است که افزایش مرتبه هارمونیک اصلی، منجر به کاهش بیشتر گشتاور دندانهای می‌شود. یکی از راه‌ها برای این منظور استفاده از شیارهای کمکی است. شیارهای کمکی سیم‌پیچی مسی ندارند و در استاتور تنها برای حذف گشتاور دندانهای ایجاد می‌شوند [۳]. این شیارها از نظر مغناطیسی معادل شیارهای واقعی هستند و نتیجه استفاده از آن‌ها این است که هارمونیک‌های مرتبه پایین را تضعیف و مولفه‌های هارمونیک مرتبه بالا را برجسته می‌کنند [۵]. شیارهای ساختگی را می‌توان با شکاف دندانها به منظور افزایش فرکانس گشتاور دندانهای تعریف کرد. این شیارها عمیق نبوده و سیم‌پیچی درون آن‌ها قرار نمی‌گیرد اما اگر امکان‌پذیر باشد، برای حذف گشتاور دندانهای شکاف‌های



کوچک روی دندانه کافی است [۵]. شکل ۳-۶ تعدادی از شیارهای کمکی روی دندانه‌های با عرض برابر نمایش می‌دهد.



شکل (۳-۶): شماتیکی از شیارهای کمکی ایجاد شده بر روی دندانه [۸، ۲۵]

مشخص است که هارمونیک اصلی گشتاور دندانه‌ای کوچکترین مضرب مشترک تعداد قطب‌ها و شیارهاست. پس با تعریف این شیارها مرتبه هارمونیک اصلی بسط فوریه کاهش می‌یابد [۳]. با این وجود تعداد کل شیارها همیشه باید به گونه‌ای انتخاب شود که مقدار  $C_T$  کاهش یابد [۸].

در کاربردهای سرعت پایین تعداد قطب‌ها و در نتیجه تعداد شیارهای زیادی مورد نیاز است که عرض دندانه برای ایجاد شکاف کافی نخواهد بود. با این حال درمورد عرض شیارها و دندانه‌ها، یک قاعده کلی این است که نسبت بهینه بین عرض شیار به گام شیار  $0/5$  باشد [۵].

### ۳-۱-۵-۳- دهانه شیار

عرض دهانه شیار استاتور می‌تواند اثر قابل توجهی روی سطح گشتاور دندانه‌ای داشته باشد. استفاده از شیارهای باز، قرارگیری کلاف‌ها را آسان می‌کند اما گشتاور ضربانی نیز افزایش می‌یابد که می‌توان با استفاده از گوه‌های مغناطیسی آن کاهش داد [۱۳، ۲۶]. برای همه ترکیب‌های تعداد قطب و شیار، معمولاً گشتاور دندانه‌ای با افزایش عرض دهانه‌ی شیار افزایش می‌یابد، که این مقدار در ماشین‌های بدون جاروبک با سیم‌پیچی غیر روی هم نصف مقدار معادل یک ماشین با سیم‌پیچی روی هم است [۸].

به خوبی مشخص است که استفاده از گوه‌های مغناطیسی<sup>۲۶</sup> که کاملاً دهانه‌ی شیارهای استاتور را می‌بندند، نوسانات چگالی شار و همه‌ی اثرات بعدی مثل تلفات اضافی را کاهش می‌دهد. با این حال استفاده از آن‌ها همانطور که رلوکتانس را کاهش می‌دهد، یک مسیر مناسب برای شار نشتی آهن‌ربا بین قطب‌های مجاور ایجاد می‌کند که موجب کاهش شار پیوندی استاتور در حالت بی‌بار و در نتیجه کاهش گشتاور متوسط تولیدی می‌شود [۱۱]. علاوه بر این، گوه‌های مغناطیسی، بالای هر شیار یک مسیر با رلوکتانس پایین ایجاد می‌کنند که با افزایش اندوکتانس نشتی شیار، مقدار قابل توجهی از شار عکس‌العمل آرمیچر در شرایط بار را منحرف می‌کنند. مشخص است که در ماشین‌های شیاردار در شرایط بار اثرات ناخواسته‌ای مثل ریپل گشتاور، مغناطیس زدایی ناشی از عکس‌العمل آرمیچر و تلفات آهن اضافی ناشی از تغییرات شار فرکانس بالا، پدیدار می‌شود [۱۱].

جدول ۲-۳ برای یک ماشین نمونه قطب برجسته مطرح شده در [۱۳] که برای حالت شیار باز عرض دهانه شیار  $W_O = 8/75 \text{ mm}$  دارد، مقادیر گشتاور دندانه‌ای برای عرض‌های مختلف دهانه شیار نشان می‌دهد.

جدول (۲-۳): مقادیر گشتاور دندانه‌ای برای یک ماشین با عرض شیار مختلف [۱۳]

| دهانه شیار<br>(mm) | دندانه موازی |      | دندانه دوزنقه‌ای |      |
|--------------------|--------------|------|------------------|------|
|                    | (Nm)         | (%)  | (Nm)             | (%)  |
| ۲/۰۰               | ۰/۵۴         | ۷/۵  | ۰/۷۱             | ۹/۹  |
| ۴/۲۵               | ۰/۲۶         | ۳/۶  | ۱/۳۳             | ۱۸/۵ |
| ۶/۵۰               | ۱/۰۱         | ۱۴/۰ | ۱/۶۷             | ۲۳/۲ |
| ۸/۷۵               | ۱/۱۹         | ۱۶/۵ | ۱/۱۰             | ۱۵/۳ |

### ۳-۵-۱-۴- جابه‌جایی شیار

برای ماشین‌های با ساختار دو روتور خارجی و استاتور داخلی، گشتاور دندانه‌ای کل مجموع گشتاور دندانه‌ای دو فاصله هوایی است که در حالت نرمال یکسان هستند. با جابه‌جایی یک روتور یا شیارهای

<sup>26</sup> Magnetic wedges

یک سمت استاتور برای یک زاویه مشخص، توزیع چگالی شار بی‌باری در دو فاصله هوایی و به دنبال آن گشتاور دندانه‌ای مطابق با زاویه، شیفت پیدا می‌کنند. در ماشین دوطرفه با استاتور داخلی، با جابه‌جایی شیارهای واقع در یک سمت به ازای زاویه‌ای برابر با نصف دوره‌ی تناوب گشتاور دندانه‌ای، گشتاور دندانه‌ای تولیدی در هر فاصله‌ی هوایی پلاریته‌های مخالف ولی مقدار پیک یکسان خواهند داشت [۸].

### ۳-۵-۱-۵- انحراف شیار [۵]

هسته آهنی استاتور یک ماشین AFPM اغلب از پیچیدن نوارهایی از ورقه آهن به صورت ساختاری مارپیچی یا ساختار استاتور قسمت قسمت شده، ایجاد می‌شود.

انحراف دهانه شیار از مسیر شعاعی یک ماشین AFPM، سیکل گشتاور دندانه‌ای را با یک زاویه انحراف، شیفت می‌دهد که با انتخاب مناسب این زاویه می‌توان گشتاور دندانه‌ای را حذف کرد:

$$\theta_{SK} = \frac{2\pi}{N_C} \quad (3-15)$$

در حقیقت در این زاویه، گشتاور دندانه‌ای به صورت زیر بدست می‌آید:

$$T_{SK} = \frac{1}{\theta_{SK}} \int_0^{\theta_{SK}} T_C(\theta) d\theta = \frac{1}{\theta_{SK}} \int_0^{\frac{2\pi}{N_C}} T_n \sin(nN_C\theta + \varphi_n) d\theta = 0 \quad (3-16)$$

این روش به طور قابل توجهی فرایند تولید استاتور موروک شیاردار و به دنبال آن فرایند تولید ماشین را پیچیده می‌کند و معمولاً در ماشین‌های AFPM استفاده نمی‌شود. یکی دیگر از گزینه‌های موجود در این رویکرد، انحراف آهن‌رباها با همان زاویه است. از نظر پیچیدگی ساخت، در ماشین‌های شارمحوری انحراف آهن‌رباها که به اصلاحات ساختار روتور مربوط می‌شود، ساده‌تر است. در حقیقت فاصله هوایی تخت، هندسه‌های ساده آهن‌ربا با مساحت سطحی صاف را به راحتی ممکن می‌سازد.

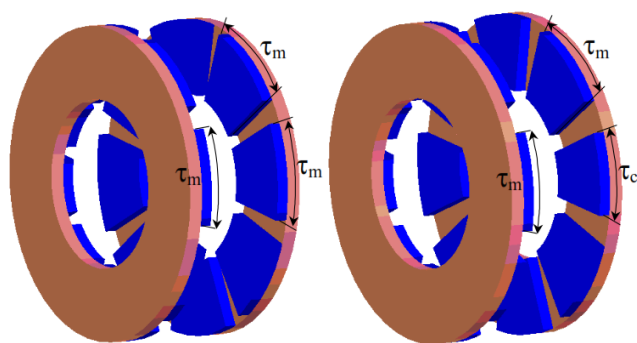
### ۳-۵-۲- اصلاحات ساختار روتور

اصلاحات بخش روتور بر تغییرات قطب‌های قرار گرفته روی آن متمرکز است. اصلاحات در ساختار روتور ماشین‌های AFPM بسیار راحت‌تر و کم‌هزینه‌تر از اصلاحات در ساختار استاتور آن‌ها است که در ماشین‌های RFPM این‌گونه نیست و به علت استوانه‌ای بودن روتور، ایجاد اصلاحات روی آن نسبت به استاتور با محدودیت بیشتری همراه است. همانطور که در شکل ۳-۱ نشان داده شده است، روش‌های کاهش گشتاور دندانه‌ای به چند طریق انتخاب کمان قطب مناسب، انحراف آهن‌ربا، جابه‌جایی جفت قطب‌ها و جابه‌جایی یا شیفت دو روتور نسبت به هم انجام می‌شوند که در ادامه هر کدام به طور جداگانه توضیح داده می‌شود.

### ۳-۵-۲-۱- انتخاب کمان قطب

انتخاب ترکیب قطب و شیار و نسبت کمان قطب به گام قطب به دیگر ضرایب عملکرد مثل شکل موج ولتاژ القایی فاز وابسته است در حالی که انتخاب نسبت کمان قطب به گام قطب آهن‌ربا گاهی به توپولوژی موتور نیز وابسته می‌شود [۸]. براساس تحقیقات انجام شده نسبت کمان آهن‌ربا به گام قطب حدود ۰/۷، گشتاور دندانه‌ای ماشین‌های AFPM را حداقل می‌کند. اما از سوی دیگر، ولتاژ القایی دچار اعوجاج شده و شار نشتی کاهش می‌یابد که گشتاور و توان خروجی تضعیف می‌شود [۵].

یکی از روش‌های شیفت فاز گشتاور دندانه‌ای تغییر کمان قطب آهن‌ربا به صورت متناوب است. به این صورت که آهن‌رباها در هر روتور، با دو کمان قطب مختلف طراحی می‌شوند [۹]. با انتخاب مناسب  $\alpha_c, \alpha_m$  که در شکل ۳-۷ نشان داده شده است، گشتاور دندانه‌ای در دو فاصله هوایی با هم خنثی شده و می‌توان گشتاور دندانه‌ای کل را حداقل کرد [۱۳]. این روش به ماشین‌های با ساختار دو روتوره و تک استاتوره اعمال می‌شود.



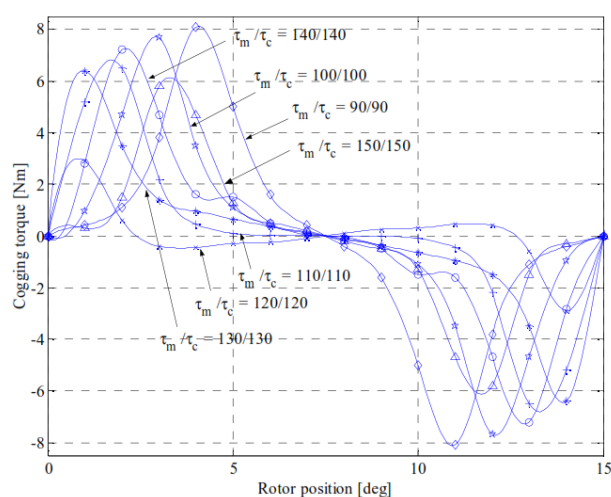
شکل (۷-۳): ماشین AFPM تک استاتور و دو روتور با الف) کمان‌های قطب آهن‌ربای یکسان ب) کمان‌های قطب آهن-ربای متفاوت با هدف کاهش گشتاور دندانه‌ای [۹]

باید توجه شود که تعریف کمان قطب آهن‌ربا از نسبت کمان قطب به گام روتور گرفته می‌شود.

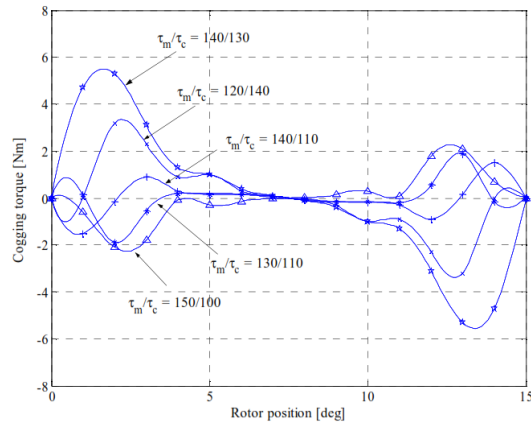
$$\alpha_m = \frac{\tau_m}{\tau_p} \quad (۱۵-۳)$$

$$\alpha_c = \frac{\tau_c}{\tau_p} \quad (۱۶-۳)$$

$\tau_m$ ,  $\tau_c$  کمان آهن‌ربا و  $\tau_p$  گام قطب روتور است. شکل ۳-۸ گشتاور دندانه‌ای را به ازای کمان‌های قطب یکسان و شکل ۳-۹ گشتاور دندانه‌ای را برای ترکیب کمان قطب‌های متفاوت یک موتور AFPM ۸ قطب و ۲۴ شیار مورد مطالعه در مرجع [۹] نشان می‌دهد.



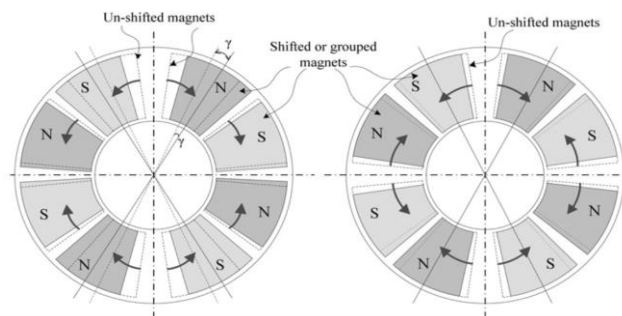
شکل (۸-۳): گشتاور دندانه‌ای به ازای کمان‌های قطب یکسان [۹]



شکل (۳-۹): گشتاور دندانه‌ای به ازای ترکیب کمان قطب‌های متفاوت [۹]

### ۳-۵-۲-۲- جابه‌جایی آهن‌ربا یا قطب

در موتورهای آهن‌ربای دائم شار محوری معمول با تعداد شیار بر قطب برفاز صحیح، گشتاور دندانه‌ای جمع گشتاور دندانه‌ای هر قطب است که همه هم‌فاز هستند و در نتیجه گشتاور دندانه‌ای کامل ماشین ایجاد می‌شود. برای جلوگیری از این اتفاق، آهن‌رباها می‌توانند به هر طرف در روتور شیفت داده شوند و یا به طور نسبی گروه‌بندی شوند. در نتیجه گشتاور دندانه‌ای هر کدام از آهن‌رباها که با هم جمع می‌شوند، می‌توانند غیرهم‌فاز بوده و در نتیجه اثر گشتاور دندانه‌ای کل کاهش یابد [۲۷، ۲۸]. به عبارت دیگر شیفت یا گروه‌بندی آهن‌رباها موجب شیفت فاز گشتاور دندانه‌ای هر روتور و در نتیجه کاهش شکل موج گشتاور دندانه‌ای مجموع می‌شود و برای یک موتور ۸ قطب، دو حالت شیفت آهن‌رباها در شکل ۳-۱۰ ارائه شده است. هر چه تعداد قطب‌ها افزایش یابد، حالت‌های گروه‌بندی نیز می‌توانند آرایش‌های متفاوت‌تری داشته باشند [۲۸].



شکل (۳-۱۰): طریقه شیفت آهن‌رباها برای یک ماشین AFPM ۸ قطب به دو صورت الف) دوتایی ب) چهارتایی [۲۸]

با این حال باید توجه داشت در آهنرباهایی که از موقعیت متقارن خود شیفت داده می‌شوند، شار پراکندگی در یک سمت آهنربا افزایش و در سمت دیگر کاهش می‌یابد. شیفت آهنرباها به این بستگی دارد که تعداد شیار بر قطب بر فاز یک عدد صحیح است یا خیر. در ماشین‌های با تعداد شیار بر فاز بر قطب صحیح، هر قطب آهنربا تعداد کاملی از چند دندانه استاتور را می‌بیند و در نتیجه اثرات گشتاور دندانه‌ای هر آهنربا همگی هم فاز بوده و با هم جمع می‌شود.

جمع گشتاور دندانه‌ای برای هر آهنربا از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$T_{cog} = \sum_{k=1}^{\infty} T_{p_k} \sin(N_s k \theta) \quad (۱۷-۳)$$

که  $T_{p_k}$  ضریب فوریه‌ی گشتاور دندانه‌ای برای هر آهنربا و  $N_s$  تعداد شیارهای استاتور است. شکل موج گشتاور دندانه‌ای کل برای تعداد  $m_1$  روتور و تعداد  $2p$  قطب به صورت زیر است:

$$T_{cog} = 2pm_1 \sum_{k=1}^{\infty} T_{p_k} \sin(N_s k \theta) \quad (۱۸-۳)$$

هر آهنربا در هر روتور، هم‌فاز با بقیه قطب‌ها است و از همین رو یک مولفه گشتاور بزرگ تولید می‌شود. اگر آهنربا شیفت یافته در نظر گرفته شود گشتاور دندانه‌ای کل هر روتور، جمع مقادیر با شیفت فاز هر آهنربا و روتور می‌شود و به صورت زیر است:

$$T_{cog} = 2pm_1 \sum_{h=0}^{2p} \sum_{k=1}^{\infty} T_{p_k} \sin(N_s K(\theta - h\gamma)) \quad (۱۹-۳)$$

که  $\gamma$  زاویه شیفت برای حذف هارمونیک‌های گشتاور است و به تعداد قطب، تعداد شیارها و نسبت قطر موتور بستگی دارد [۲۸].

گروه‌بندی آهنرباها، مجموع گشتاور دندانه‌ای هر کدام از آهنرباهای غیر هم‌فاز را کاهش می‌دهد. اگر زاویه بین آهنرباها به درستی انتخاب شود، گشتاور دندانه‌ای تا سطوح خیلی پایین کاهش می‌یابد.

مشخص است زمانی که آهنرباها شیفت داده می‌شوند، مولفه شار نشتی آهنربا افزایش می‌یابد که منجر به کاهش چگالی شار متوسط و در نتیجه گشتاور خروجی ماشین می‌شود [۲۷, ۲۸]. جدول ۳-۳ مؤلفه‌های گشتاور روتورها با آهنرباهای شیفت داده را برای یک موتور AFPM نشان می‌دهد.

جدول (۳-۳): مقایسه مقادیر گشتاور تحلیل شده در مرجع [۲۸] با قطب‌های آهنربایی شیفت یافته

| ریپل گشتاور<br>(%) | گشتاور دندانه‌ای<br>(%) | گشتاور متوسط<br>(Nm) | موتور مرجع           |
|--------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|
| ۲۵/۴               | ۲۱/۱                    | ۳۷/۷                 | موتور مرجع           |
| ۶/۰                | ۹/۲                     | ۳۷/۴                 | شیفت دوتایی قطب‌ها   |
| ۴/۷                | ۳/۱                     | ۳۵/۸                 | شیفت چهارتایی قطب‌ها |

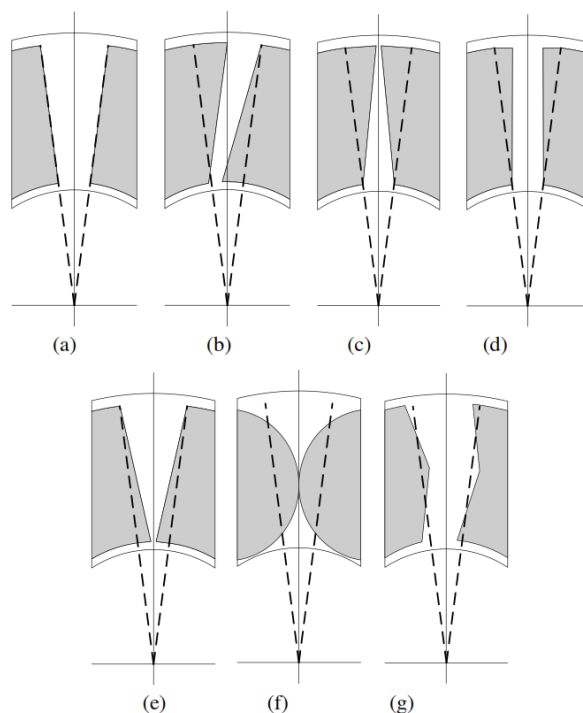
### ۳-۵-۲-۳- انحراف آهنربا

از آنجایی که گشتاور دندانه‌ای ناشی از تغییرات رلوکتانس مغناطیسی بین استاتور و روتور است، شکل قطب آهنربا نیز در تولید گشتاور دندانه‌ای نقش بسزایی دارد. با ایجاد شرایطی که لبه‌های قطب آهنربا و شیار هم‌زمان روبه‌روی هم قرار نگیرند، گشتاور دندانه‌ای به مقدار زیادی کاهش می‌یابد. از جمله شکل قطب‌های معمول، آهنربای دوزنقه‌ای است؛ شکل قطب‌های دایره‌ای و مستطیلی نیز در [۲۹, ۳۰] بررسی شده‌اند.

شکل آهنربا بر روی شکل موج‌های چگالی شار فاصله هوایی و ولتاژ القایی فاز نیز موثر است. برای آهنربای سینوسی شکل بررسی شده در [۲۰] مقدار هارمونیک‌های ولتاژ القایی نسبت به آهنربای دوزنقه‌ای بسیار کمتر است. با توجه به هدف مورد نظر مثل کاهش گشتاور دندانه‌ای، کاهش هارمونیک‌های شکل موج ولتاژ القایی و ... شکل قطب می‌تواند بهینه‌سازی شود. اما باید توجه داشت برش زدن آهنربای موجود خاصیت مغناطیسی آن‌ها را به طور قابل توجهی تضعیف می‌کند و نمی‌توان آن‌ها را به هرگونه فرم دلخواه طراحی کرد. لذا یکی از راه‌های معمول برای کاهش گشتاور دندانه‌ای، انحراف لبه‌های قطب آهنرباست.



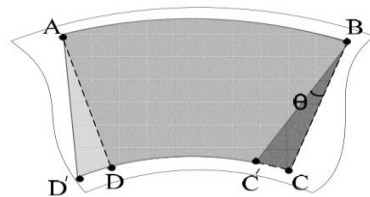
انحراف آهنربا یک روش ساده و مفید برای کاهش گشتاور دندانه‌ای است که در هر دو نوع ماشین آهنربای دائم شار شعاعی و شار محوری کاربرد دارد. در عمل، برای ماشین‌های شار شعاعی، این روش به وسیله قسمت‌بندی روتورها انجام می‌شود که فرایند ساخت را سخت و پرهزینه می‌کند. با این حال این روش در موتورهای شار محوری به آسانی انجام می‌پذیرد. چرا که سطح آهنرباهای این موتورها صاف بوده و هندسه ساده‌ای دارند. انحراف آهنرباها در موتورهای شارمحوری می‌تواند به چند حالت مختلف از قبیل، انحراف معمول، انحراف مثلثی، انحراف موازی دو طرفه، انحراف دوزنقه‌ای، انحراف دایره‌ای و انحراف در آهنربا انجام شود که در شکل ۳-۱۱ نشان داده شده است [۲، ۷].



شکل (۳-۱۱): روش‌های مختلف کج کردن آهنربا برای موتورهای AFPM (a) آهنربای دوزنقه‌ای بدون انحراف (b) انحراف آهنربای معمول، (c) انحراف آهنربای مثلثی، (d) لبه‌های موازی آهنربا، (e) انحراف آهنربای دوزنقه‌ای (f) آهنرباهای دایروی، (g) آهنرباهای با انحراف دوطرفه [۲]

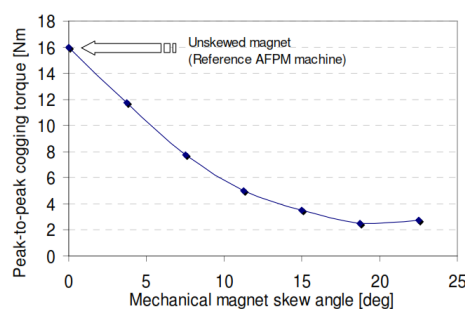
## I- کج کردن معمول آهنربا

همان‌طور که در شکل ۳-۱۲ نشان داده شده است، کج کردن آهنربا به این صورت است که آهنربای دوزنقه‌ای شکل معمول ABCD، به  $ABC'D'$  انحراف پیدا کرده است و زاویه مکانیکی  $\theta$ ، زاویه بین لبه‌های آهنربای دوزنقه‌ای و آهنربای کج شده در یک سمت یکسان می‌باشد.



شکل (۳-۱۲): تعریف زاویه انحراف آهنربا در ماشین‌های AFPM [۲]

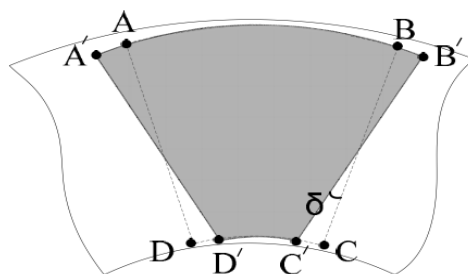
در حالت کلی پیک گشتاور دندانه‌ای، در ماشین‌های شارشعاعی به تدریج با افزایش زاویه انحراف، کاهش می‌یابد. با این حال به دلیل نشت مغناطیسی مختلف در شعاع داخلی و خارجی آهنرباهای یک ماشین شارمحوری، زاویه‌ی انحراف بهینه ممکن است دقیقاً یک گام شیار نباشد [۲۸, ۷]. در حالی که حداقل گشتاور دندانه‌ای نیز ممکن است صفر نباشد. این موضوع در شکل ۳-۱۳ نشان داده شده است. همان‌طور که زاویه انحراف از  $\frac{1}{4}$  گام شیار تا  $\frac{3}{4}$  گام شیار تغییر می‌کند، گشتاور دندانه‌ای پیک تا پیک کاهش می‌یابد و حداقل مقدار را در زاویه انحراف  $18/75$  درجه مکانیکی دارد. این در حالی است که برای ماشین مرجع در [۲۸] یک گام شیار  $15$  درجه مکانیکی است. با این حال گشتاور دندانه‌ای همان‌طور که انتظار می‌رفت، صفر نمی‌شود [۲۸].



شکل (۳-۱۳): تغییر پیک تا پیک گشتاور دندانه‌ای برای زوایای انحراف مختلف [۲۸]

## II- انحراف مثلثی [۲]

این نوع انحراف و کج کردن آهنربا به این صورت تعریف می‌شود که لبه‌های آهنرباها در قطر خارجی روتور به همدیگر نزدیکتر و در قطر داخلی روتور، همان‌طور که در شکل ۳-۱۱-C نشان داده شده است، از هم دور می‌شوند. به عبارت دیگر در شکل ۳-۱۴ آهنربای دوزنقه‌ای ABCD به A'B'C'D' انحراف پیدا می‌کند. مطابق با بررسی‌ها با افزایش زاویه انحراف  $\delta$ ، مقدار گشتاور دندانه‌ای کاهش می‌یابد.



شکل (۳-۱۳): شماتیکی از چگونگی انحراف قطب به صورت مثلثی [۲]

## III- انحراف آهنربا با لبه‌های موازی [۲]

یک روش دیگر کج کردن مطابق شکل ۳-۱۱-d موازی کردن لبه‌های مجاور در آهنربا است. باید توجه داشت که اثر استفاده از آهنرباهای با لبه‌های موازی در کاهش گشتاور دندانه‌ای، در ماشین‌های AFPM با تعداد قطب‌های پایین نسبت به ماشین‌های با تعداد قطب بالا قابل توجه‌تر خواهد بود. چرا که با افزایش تعداد قطب‌ها، لبه‌های آهنرباها و دهانه شیارها برای موازی شدن با زاویه انحراف کوچکتری، منحرف می‌شوند. که نتیجه آن کاهش گشتاور دندانه‌ای کمتر است.

## IV- انحراف دوزنقه‌ای [۲]

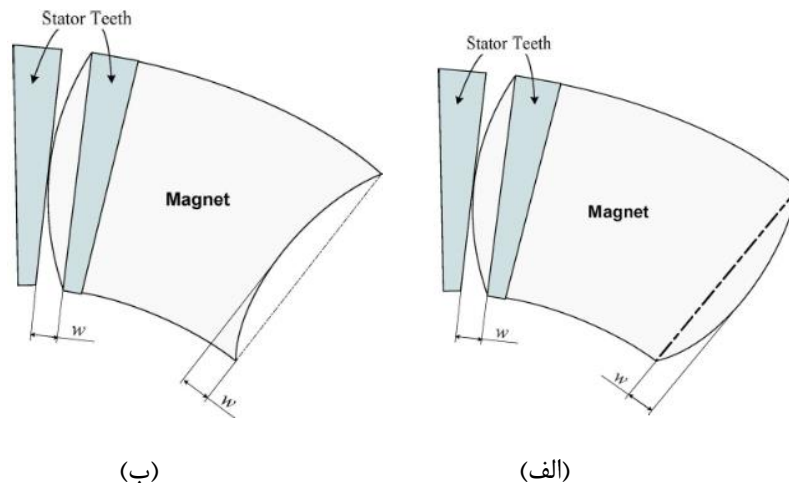
نوع دیگری از انحراف آهنربا مطابق شکل ۳-۱۱-e می‌باشد که در آن لبه‌های دو آهنربا در شعاع داخلی به هم نزدیک و در شعاع خارجی از هم دور می‌شوند. در بررسی انجام شده این روش گشتاور دندانه‌ای را حدود ۶۲٪ کاهش می‌دهد. اما با وجود اینکه شار نشتی در شعاع داخلی افزایش می‌یابد،

گشتاور متوسط را تامین می‌کند. باید توجه کرد در حالت مفرط انحراف دوزنقه‌ای، آهن‌رباها شکل مربعی به خود می‌گیرند و نتایج می‌توانند برای حالت آهن‌رباهای مربعی نیز استفاده شوند.

## V- گرد کردن لبه‌ها

گرد کردن لبه‌ها می‌تواند به دو صورت مقعر و محدب صورت گیرد که حالت مفرط گرد کردن محدب، شکل قطب را به شکل دایره‌ای تبدیل می‌کند. شکل ۳-۱۴-الف گرد شدن لبه‌های قطب به صورت محدب را نشان می‌دهد. پارامتر  $W$  در شکل ۳-۱۴ طول قسمت گرد شده آهن‌ربا است که در بررسی انجام شده برای مقداری برابر با عرض شیار، دامنه گشتاور دندانه‌ای  $40\%$  کاهش می‌یابد.

آهن‌ربای با سطح گرد شده، با یک کمان مقعر روی یک لبه در شکل ۳-۱۴-ب نشان داده شده است که پارامتر  $W$  مشابه حالت محدب تعریف می‌شود. در این حالت نیز قابلیت کاهش گشتاور دندانه‌ای مشابه حالت محدب است [۶].

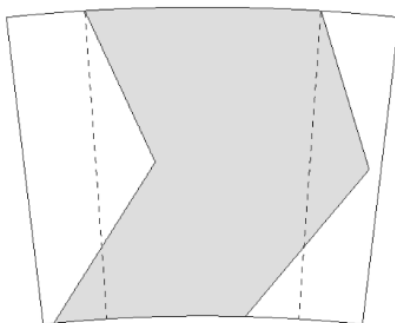


شکل (۳-۱۴): گرد کردن سطح آهن‌ربا به صورت (الف) محدب (ب) مقعر [۶]

## VI- انحراف دوگانه [۲, ۷]

در این روش هر دو کمان‌های آهن‌ربا در شعاع داخلی و شعاع متوسط دچار انحراف می‌شوند که مقدار دو زاویه انحراف ممکن است برابر و یا متفاوت باشند. با توجه به اینکه این روش در ماشین‌های شار شعاعی به خوبی برای کاهش گشتاور دندانه‌ای نتیجه داده است، ممکن است قابلیت به کارگیری برای

ماشین‌های AFPM را نیز داشته باشد. هرچند هزینه آهن‌ریا برای ماشین‌های AFPM معمولاً پایین‌تر از ماشین‌های RFPM است اما این روش اشکالاتی از قبیل پیچیدگی و هزینه‌های ساخت مضاعف را در پی دارد.



شکل (۳-۱۵): شماتیکی از آهن‌ریا با انحراف دوگانه

### ۳-۵-۲- جابه‌جایی روتور و استاتور

در ماشین‌های شارم‌حوری دوطرفه، گشتاور دندان‌های از مجموع شکل موج‌های گشتاور دندان‌های در هر فاصله‌هوائی ایجاد می‌شود. یک روش موثر برای کاهش گشتاور دندان‌های استفاده از جابه‌جایی روتور یا استاتور، به ترتیب برای ساختارهای استاتور داخلی و روتور داخلی است. نتیجه این روش کاهش متوسط گشتاور و ولتاژ القایی نیز می‌باشد. اما با یک جابه‌جایی مناسب در فرکانس گشتاور دندان‌های ممکن است این کاهش در گشتاوری بزرگ‌تر از گشتاور متوسط معمول رخ بدهد [۵].

برای ساختار دو طرفه روتور داخلی می‌توان استاتورها را نسبت به هم با زاویه‌ای شیفت داد و برای ساختار دو طرفه استاتور داخلی، شیفت روتورها نسبت به هم امکان پذیر خواهد بود. البته در مورد اول باید توجه داشت در صورت موازی بودن سیم‌پیچی‌های دو استاتور، شیفت آن‌ها نسبت به هم موجب شیفت ولتاژ فاز القایی دو استاتور نسبت به هم می‌شود که این امر در حالت موازی ایجاد جریان‌های گردشی در استاتور را موجب می‌شود [۱].



## فصل چهارم

مدل سازی اجزاء محدود و تحلیل بی باری

ماشین AFPM

## ۴-۱- مقدمه

پس از آشنایی با انواع ساختارهای ماشین AFPM در فصل دوم و معرفی ساختار ماشین مرجع، در فصل سوم به روش‌های مختلف مطالعه شده به منظور بهبود عملکرد این ماشین‌ها پرداخته شد که مطابق بررسی‌ها ساختار قطب‌ها و همچنین استاتور یا به عبارتی دیگر شیارها، تاثیر بسزایی در گشتاور دندانه‌ای، شکل موج ولتاژ القایی، رپل گشتاور و ... ایفا می‌کند. در این فصل ساختار قطب‌های مختلف در سه دسته مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس اثر بخشی روش اعمالی در دسته آخر برای شکل شیار دیگر بررسی شده است. در مجموع عملکرد ماشین با شکل قطب‌های مختلف برای حالت‌های زیر مورد مطالعه قرار گرفته است:

- ۱- قطب‌ها با لبه‌های شعاعی به دو شکل پخ شده و گرد شده و مقایسه با شکل قطب مرجع
  - ۲- شکل قطب‌ها مطابق مورد ۱ و جابه‌جایی دو روتور نسبت به یکدیگر با زاویه  $5^\circ$  مکانیکی، یا به اندازه نصف دوره تناوب گشتاور دندانه‌ای
  - ۳- انحراف قطب‌های دو روتور به صورت متقارن و نامتقارن و مقایسه با حالت مرجع
  - ۴- انحراف قطب‌های دو روتور به صورت متقارن و نامتقارن در وضعیت باز بودن شیار استاتور
- تحلیل انجام شده در این بخش مربوط به شرایط بی‌باری ماشین بوده و در نرم افزار تحلیل اجزاء محدود سه بعدی انجام شده است.

## ۴-۲- مدل‌سازی

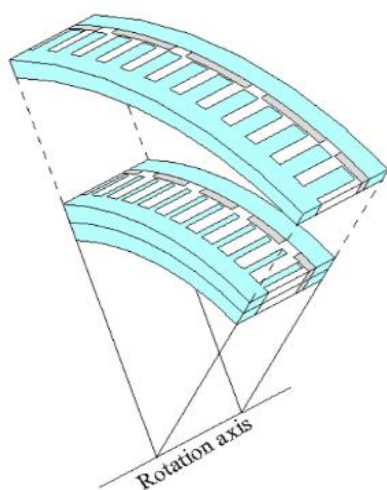
برای محاسبه ولتاژ القایی فازها و همچنین گشتاور دندانه‌ای ماشین مورد مطالعه به صورت بی‌بار و به روش اجزاء محدود در نرم‌افزار JMAG Designer مدل‌سازی شده است. در این نرم‌افزار مدل‌سازی به صورت دو بعدی و سه بعدی قابل انجام است که در تحلیل دو بعدی، بعدی که در آن تغییرات شار قابل چشم‌پوشی است، حذف می‌شود. در مدل‌سازی دو بعدی ماشین‌های شار شعاعی، بعد در راستای



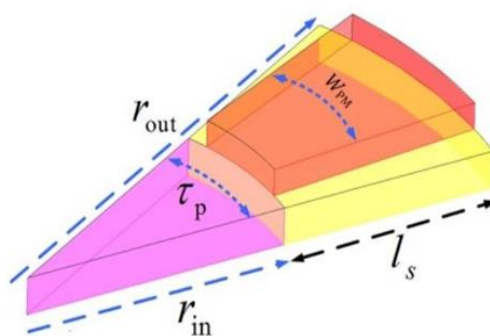
طول و در ماشین‌های شار محوری، در صورت ثابت بودن  $\alpha_p$  یا نسبت کمان آهن‌ریا به گام قطب در هر شعاع، بعد در راستای شعاع حذف می‌شود.

$$\alpha_p = \frac{W_{PM}}{\tau_p} \quad (1-4)$$

در رابطه ۱-۴  $W_{PM}$  عرض آهن‌ریا و  $\tau_p$  گام قطب است که در شکل ۱-۴-الف نیز این مقادیر نشان داده شده است و شکل ۱-۴-ب نیز قطاعی از ماشین شار محوری را به صورت برش‌هایی در شعاع‌های مختلف نشان می‌دهد. در این حالت، ماشین‌های شار محوری در شعاع متوسط مدل شده و به صورت یک ماشین خطی مورد بررسی قرار می‌گیرند. در صورتی که قطب‌های آهن‌ربایی روتور دوزنقه‌ای شکل نباشند دیگر نمی‌توان  $\alpha_p$  را در هر شعاع یکسان در نظر گرفت و برای تحلیل درست و دقیق ماشین، استفاده از مدل سه بعدی اجتناب ناپذیر است. شکل ۲-۴-۲ نمایی از یک جفت قطب ماشین را در تحلیل دو بعدی و سه بعدی نشان می‌دهد.

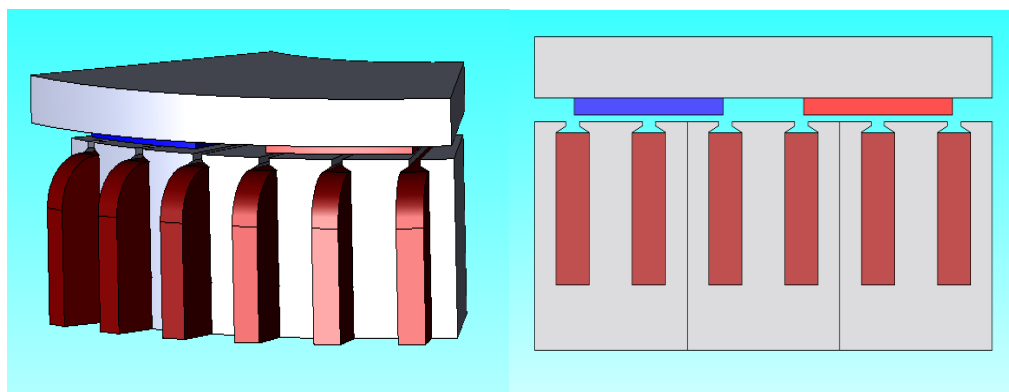


(ب)



(الف)

شکل (۱-۴): الف) معرفی کمان آهن‌ریا و گام قطب برای شکل قطب دوزنقه‌ای [۲۰]، ب) قطاعی از ماشین AFPM به صورت برش‌هایی در شعاع‌های مختلف [۷]



(ب)

(الف)

شکل (۴-۲): مدل یک جفت قطب از ماشین برای تحلیل به صورت (الف) دو بعدی (ب) سه بعدی

در این فصل بررسی شکل قطب‌ها برای حالت‌های مختلف لبه‌های شعاعی قطب‌ها مانند گرد شدن لبه‌ها و پخ کردن آن‌ها و سپس ترکیب با روش جابه‌جایی روتورها نسبت به هم انجام شده است. همچنین انحراف و کج کردن قطب‌ها برای حالتی که قطب‌های دو رتور در یک جهت (متقارن) و در خلاف جهت (نامتقارن) کج شده باشند مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت اثر بخشی دسته‌ای که عملکرد مطلوب‌تری ارائه می‌کند برای ماشین با استاتور باز نیز بررسی شده است.

برای مدل‌سازی بی‌باری، در حالت تحلیل مغناطیسی گذرا بدون وجود جریان در سیم‌پیچ‌های استاتور، روتور با سرعت سنکرون چرخانده شده و شکل موج ولتاژ القایی و همچنین گشتاور وارد بر روتورها برای حالت‌های مختلف استخراج می‌شود. مراحل انجام این کار به اختصار در ادامه توضیح داده می‌شود.

## ۱- ایجاد شکل هندسی

با وجود اینکه در نرم‌افزار JMag Designer امکان ایجاد هندسه دو بعدی و سه بعدی وجود دارد، اما به علت پیچیدگی هندسه سه بعدی ماشین مورد مطالعه و همچنین راحتی انجام این کار در نرم‌افزارهای مکانیکی مانند NX و Solid Works، مدل هندسی ماشین در نرم‌افزار Solid Works ایجاد و سپس به نرم‌افزار JMag وارد شده است. با توجه به تقارن هندسی و مغناطیسی تنها یه

جفت قطب از ماشین، یعنی ۱۲۰ درجه مکانیکی و یک روتور و نصف استاتور از آن، به صورت سه بعدی ایجاد می‌شود. شکل ۴-۲-ب نمایی از این مدل را نشان می‌دهد که پس از طراحی در نرم‌افزار Solid Works به محیط JMAG وارد شده است.

## ۲- تعیین نوع ماده اجزاء

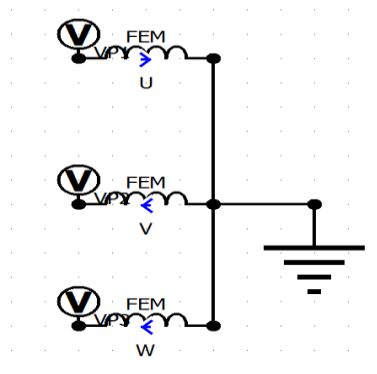
پس از طراحی مدل سه بعدی و وارد کردن آن به نرم افزار JMAG، لازم است که نوع ماده مربوط به هر قسمت مثل سیم‌پیچ‌ها، هسته‌های استاتور و روتور و قطب‌های آهنربایی تعیین شود. در ماشین مورد مطالعه با توجه به اطلاعات موجود در مرجع مورد مطالعه و همچنین خواص مواد، برای سیم‌پیچ، هسته‌های روتور و استاتور و قطب‌های آهنربایی به ترتیب موادی از جنس Copper، 50JN470، 50JN400 و NEOMAX-28EH تعیین شده است.

## ۳- تعیین شرایط و قیود

در این قسمت لازم است که از بخش Condition نرم افزار قیود حاکم بر مدل، از جمله شرایط مربوط به چرخش روتور، استفاده از تقارن، محاسبه گشتاور، جهت جریان و نوع سیم‌پیچ‌ها و... تعیین شود.

## ۴- تعیین مدار الکتریکی

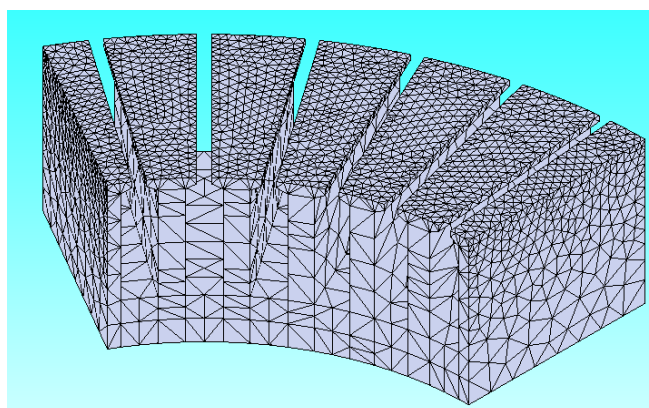
مدار الکتریکی مربوط به سیم‌پیچ‌های استاتور مطابق شکل ۴-۳ تعیین می‌شود که به علت تحلیل بی-باری ماشین، ترمینال‌های ماشین باز بوده و جریانی از آن‌ها عبور نمی‌کند؛ اما چرخش روتور و آهن-رباها و به دنبال آن تغییرات شار عبوری از سیم‌پیچ‌ها، ولتاژی در آن‌ها القا می‌کند که برای مشاهده آن در مدار از ولت‌متر استفاده شده است.



شکل (۴-۳): مدار الکتریکی و نوع اتصال سیم‌پیچ‌های استاتور در حالت بی باری

## ۵- مش‌بندی

نرم افزارهای اجزاء محدود با تقسیم بندی مدل به قسمت‌های کوچک محاسبات مورد نظر را انجام می‌دهند. به تقسیم کردن مدل به قسمت‌های کوچک اصطلاحاً مش‌بندی گفته می‌شود. اگرچه کوچک بودن این قسمت‌ها دقت محاسبه را بالا می‌برد اما از سوی دیگر زمان انجام محاسبه را نیز افزایش می‌دهد. لذا لازم است مش‌بندی به طور مناسبی انجام شود. برای این منظور در قسمت‌هایی که تغییرات شار زیاد است، مثل دندانه‌ها و سطوح نزدیک به فاصله هوایی، از مش‌های با اندازه کوچکتر و در قسمت‌هایی که تغییرات کمتر است از مش درشت‌تر استفاده شده است. شکل ۴-۴ نمایی از مش بندی استاتور را نشان می‌دهد.



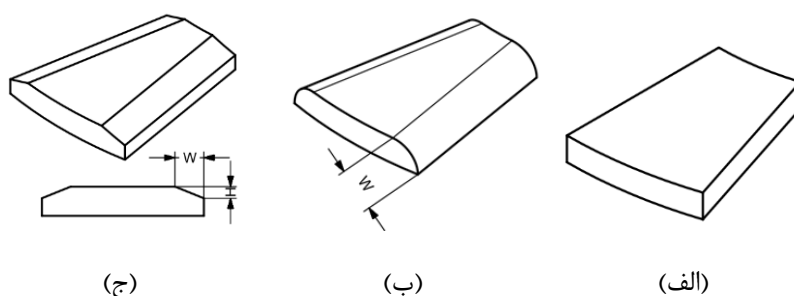
شکل (۴-۴): نمایی از مش‌بندی استاتور ماشین مورد مطالعه

## ۴-۳- تغییر شکل قطب آهن ربا

همانطور که در فصل ۲ به روش‌های کاهش گشتاور دندانه‌ای اشاره شد، در ماشین‌های شار محوری آهن‌ربای دائم، ایجاد تغییر در ساختار روتور به مراتب ساده و کم‌هزینه‌تر از اعمال تغییرات به ساختار استاتور است. یکی از این تغییرات در روتور، تغییر در شکل قطب‌های آهن‌ربا می‌باشد که البته باید توجه داشت به علت تضعیف خاصیت مغناطیسی آهن‌ربا در اثر برش و ضربه، ایجاد قطب‌های آهن-ربایی با هر شکل دلخواه امکان پذیر نخواهد بود. بدین منظور دو حالت تغییر در لبه‌های قطب و تغییر در زاویه آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

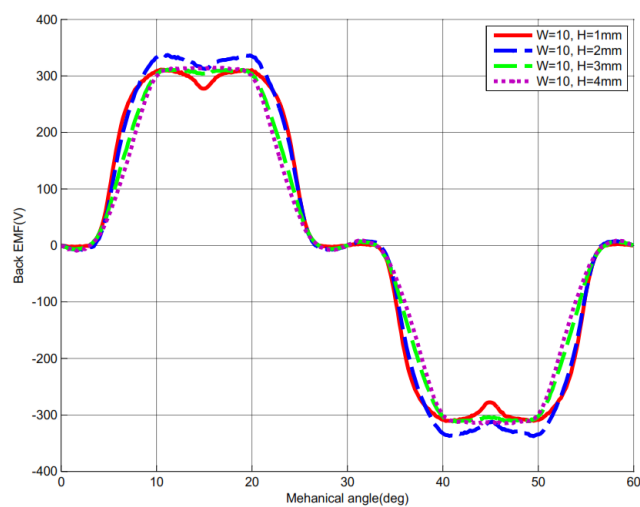
### ۴-۲-۱- قطب‌های آهن‌ربایی با لبه‌های شعاعی متفاوت

از دلایل ایجاد گشتاور دندانه‌ای تغییرات ناگهانی رلوکتانس به علت هم‌زمانی عبور لبه‌های دندانه استاتور و قطب آهن‌ربا از مقابل هم می‌باشد. با پخ کردن و یا گرد کردن این لبه‌ها شدت تغییر رلوکتانس کاهش می‌یابد که می‌تواند منجر به کاهش سطح گشتاور دندانه‌ای شود، ضمن اینکه با تغییر شکل موج چگالی شار فاصله هوایی، بر شکل موج ولتاژ القایی و هارمونیک‌های آن نیز اثرگذار خواهد بود. برای این منظور قطب آهن‌ربایی ماشین مرجع که در شکل ۴-۵-الف نشان داده شده است به دو حالت قطب با لبه‌های گرد شده شکل ۴-۵-ب و قطب با لبه‌های پخ شده شکل ۴-۵-ج تغییر داده شده و مورد بررسی قرار می‌گیرد.

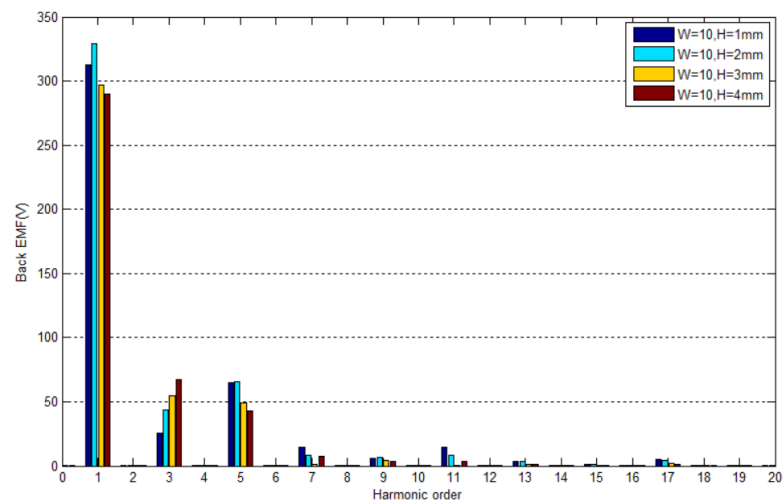


شکل (۴-۵): نمایی از قطب آهن‌ربایی (الف) مرجع، (ب) با لبه‌های گرد شده، (ج) با لبه‌های پخ شده

طرح قطب با لبه پخ شده در مراجع مطرح نشده و مطابق شکل ۴-۵ ج با دو پارامتر  $W$  و  $H$  معرفی شده است. مقدار  $W$  مشابه روش گرد کردن برابر با عرض شیار انتخاب می‌شود که این مقدار در ماشین مرجع ۱۰ میلی متر می‌باشد. برای انتخاب مقدار مناسب  $H$ ، این طرح برای مقادیر مختلفی از  $H$  بررسی شده که نتایج آن در ادامه آورده شده است که حجم قطب آهنربایی به ازای مقادیر مختلف  $H$  ثابت است. شکل موج ولتاژ القایی فاز برای مقادیر مختلف  $H$  در شکل ۴-۶ و طیف هارمونیکی مربوط به آن در شکل ۴-۷ نشان داده شده است.



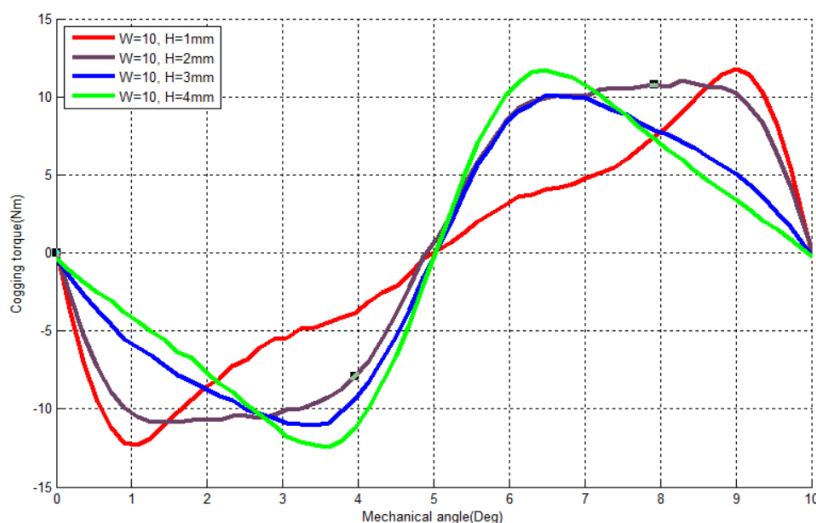
شکل (۴-۶): شکل موج ولتاژ القایی فاز برای آهنربای با لبه پخ شده به ازای  $W=10\text{mm}$  و مقادیر مختلف  $H$



شکل (۴-۷): طیف هارمونیکی شکل موج ولتاژ القایی فاز برای قطب با لبه‌های پخ شده و مقادیر مختلف  $H$

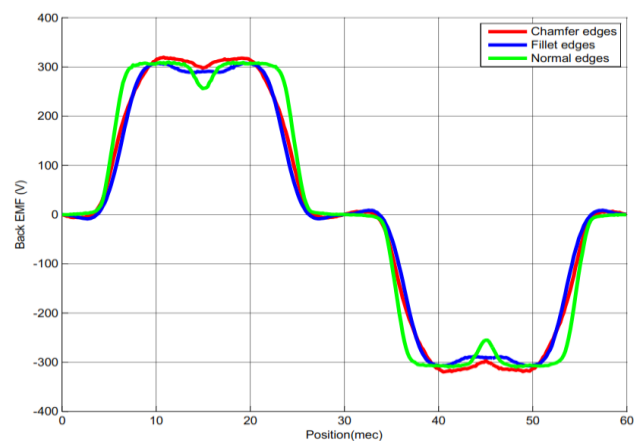
همانطور که در شکل‌ها نیز مشخص است، با افزایش مقدار  $H$  هارمونیک سوم شکل موج ولتاژ القایی افزایش و هارمونیک پنجم کاهش یافته است و پیک شکل موج حالت هموارتری دارد اما در این دو حالت نسبت به مقادیر  $H$  کمتر، مقدار هارمونیک اول کمتر است.

شکل ۴-۸ شکل موج گشتاور دندانه‌ای برای حالت‌های بررسی شده را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است کمترین مقدار پیک گشتاور دندانه‌ای برای حالت  $W=10, H=2,3\text{mm}$  رخ می‌دهد اما شکل موج گشتاور دندانه‌ای در حالت  $H=2\text{mm}$  به شکل سینوسی نزدیک‌تر است که برای ترکیب با روش جابه‌جایی روتور گزینه مناسب‌تری می‌باشد. با توجه به این نکته ضمن اینکه هارمونیک اول ولتاژ القایی فاز برای  $H=2\text{mm}$  بیشتر است، لذا با در نظر گرفتن  $H=2\text{mm}$  برای پخ کردن آهن‌رباها، در ادامه با حالت‌های گرد شدن لبه‌ها و با حالت مرجع مقایسه می‌شود.

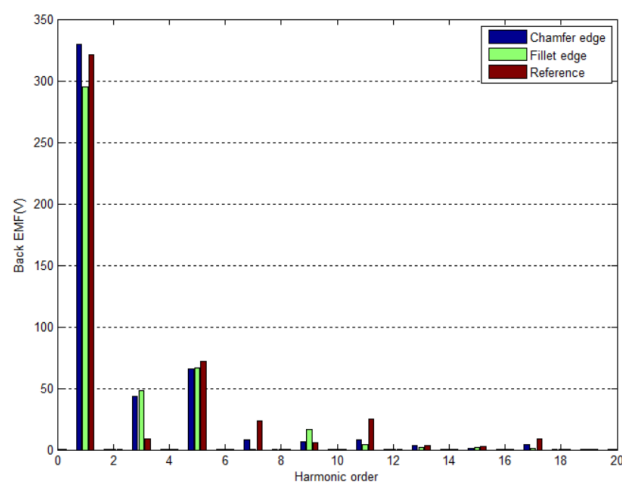


شکل (۴-۸): شکل موج گشتاور دندانه‌ای برای آهن‌ربای با لبه پخ شده برای  $W=10\text{mm}$  و مقادیر مختلف  $H$

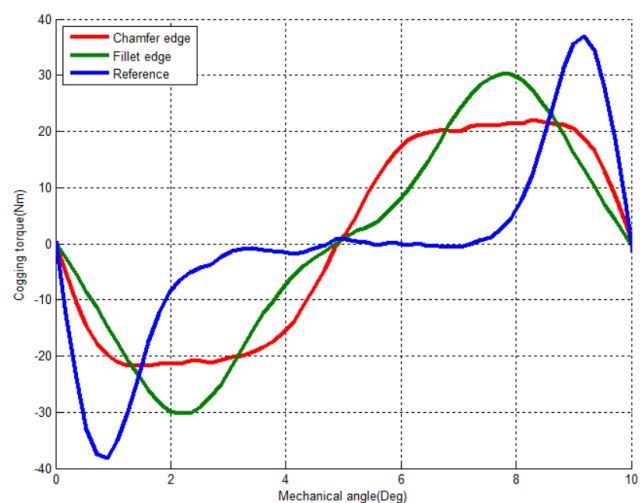
پس از تعیین طرح مناسب برای حالت پخ زدن لبه‌های قطب‌ها، این حالت با دو شکل قطب دیگر برای قطب‌آهن‌ربا، یعنی گرد کردن لبه‌ها و حالت مرجع مقایسه شده است که نتایج حاصل برای ولتاژ القایی فاز و گشتاور دندانه‌ای برای هر مورد در ادامه آورده شده است:



شکل (۴-۹): شکل موج ولتاژ القایی فازها در حالت بی بار برای قطب با لبه‌های مختلف



شکل (۴-۱۰): نمودار هارمونیک‌های ولتاژ القایی فاز برای آهن‌ربا با شکل لبه‌های مختلف



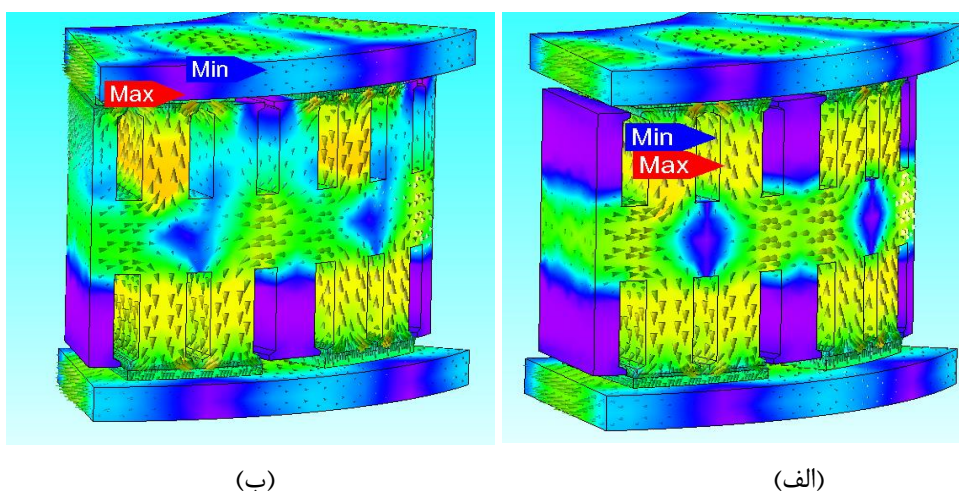
شکل (۴-۱۱): شکل موج گشتاور دندانه‌ای برای قطب با لبه‌های مختلف



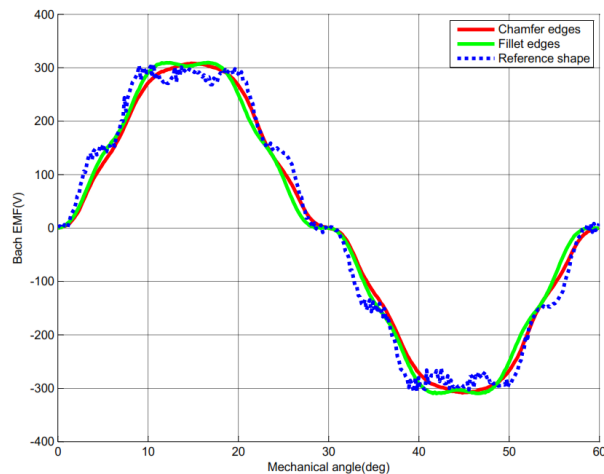
با توجه به نتایج حاصل، قطب با لبه‌های شعاعی پخ شده نسبت به دو حالت دیگر هارمونیک اول ولتاژ القایی بالاتری دارد، ضمن اینکه مقدار گشتاور دندانه‌ای کمتری را نتیجه می‌دهد.

#### ۲-۲-۴- قطب آهنربایی با لبه شعاعی متفاوت به همراه جابه‌جایی دو روتور نسبت به هم

ولتاژ القایی در یک سیم‌پیچ طبق قانون القای فارادی متناسب با تغییرات شار عبوری از آن است. با تغییر زاویه دو روتور نسبت به یکدیگر شار منتجه آن‌ها که از سیم‌پیچ می‌گذرد نیز تغییر کرده و بر شکل موج ولتاژ القایی اثر می‌گذارد. شکل ۴-۱۲ توزیع چگالی شار مغناطیسی در یک جفت قطب ماشین را برای حالت مرجع و حالتی که دو روتور نسبت به یکدیگر با زاویه  $5^\circ$  شیفت داده شده‌اند را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۴-۱۲ نیز کاملاً مشخص است، با شیفت دو روتور نسبت به هم توزیع چگالی شار استاتور و به دنبال آن ولتاژ القایی در سیم‌پیچ‌ها دچار تغییر می‌شوند. شکل موج ولتاژ القایی در سیم‌پیچ‌ها که از تغییرات شار مغناطیسی ناشی می‌شود، برای سه حالت مورد بررسی، یعنی شکل قطب مرجع، شکل قطب با لبه پخ شده و شکل قطب با لبه گرد شده و جابه‌جایی دو روتور نسبت به هم، در شکل ۴-۱۳ نشان داده شده است.

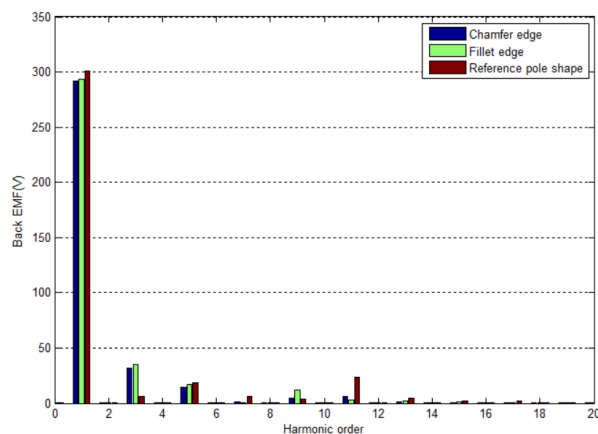


شکل (۴-۱۲): توزیع چگالی شار مغناطیسی در یک جفت قطب از ماشین در حالت (الف) مرجع و (ب) شیفت دو روتور نسبت به یکدیگر



شکل (۴-۱۳): شکل موج ولتاژ القایی فاز برای حالت‌های قطب‌های آهن‌ربایی با شکل لبه‌های مختلف و  $5^\circ$  جابه‌جایی دو روتور نسبت به هم

اگرچه مطابق شکل ۴-۱۳ شکل موج ولتاژ القایی برای ماشین با قطب‌های با لبه‌های پخ شده به شکل سینوسی نزدیک‌تر است اما مولفه هارمونیک اصلی آن کمتر از دو حالت دیگر است. ضمن اینکه این مقدار برای همه حالت‌ها کمتر از همان شکل قطب در وضعیت بدون جابه‌جایی روتورها می‌باشد.



شکل (۴-۱۴): هارمونیک‌های ولتاژ القایی فاز برای حالت‌های قطب‌های آهن‌ربایی با شکل لبه‌های مختلف و  $5^\circ$  جابه‌جایی دو روتور نسبت به هم

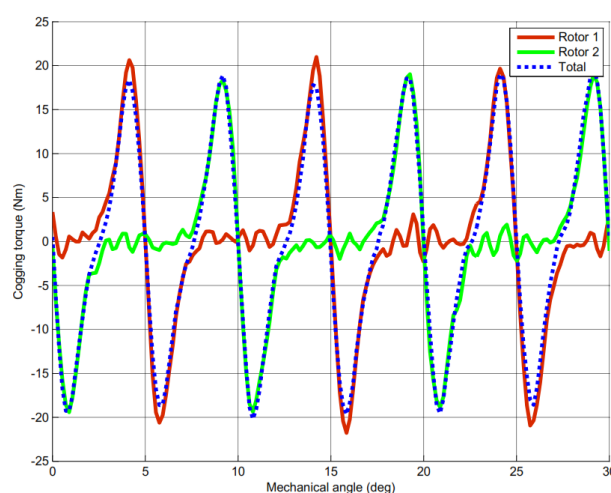
همچنین همانطور که در فصل ۲ اشاره شد، گشتاور دندانه‌ای در ماشین‌های دو طرفه با استاتور داخلی مجموع گشتاور دندانه‌ای دو روتور است. هنگامی که دو روتور با زاویه‌ای نسبت به هم شیفت پیدا می‌کنند، گشتاور دندانه‌ای ناشی از تعامل قطب‌های هر کدام از آن‌ها با دندانه‌های استاتور نیز نسبت به

هم دچار شیفت فازی می‌شوند. اگر مقدار زاویه شیفت دو روتور نسبت به هم به اندازه نصف دوره تناوب گشتاور دندانه‌ای باشد، دو روتور گشتاوری برابر با یکدیگر اما مخالف هم تولید می‌کنند و چون گشتاور دندانه‌ای کل مجموع این دو مقدار است، دامنه آن به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. در ماشین AFPM مرجع این پژوهش دوره تناوب گشتاور دندانه‌ای برابر است با:

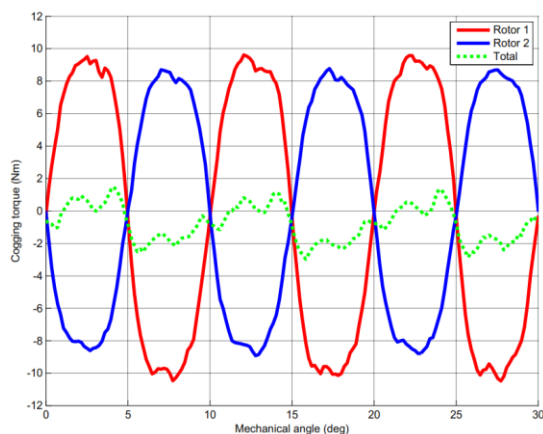
$$\text{LCM}(N_s, p) = \text{LCM}(36, 12) = 36 \quad (2-4)$$

$$T_{Co} = T/36 \quad (3-4)$$

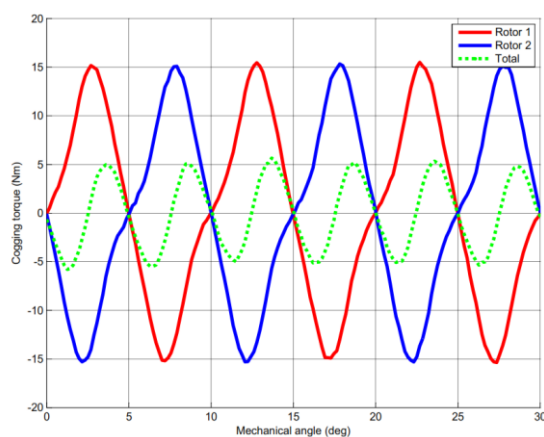
یعنی اگر دوره تناوب مکانیکی ۳۶۰ درجه باشد، دوره تناوب گشتاور دندانه‌ای ۳۶۰/۳۶ و برابر با ۱۰ درجه مکانیکی خواهد بود. بدین ترتیب زاویه شیفت دو روتور نسبت به هم نصف دوره تناوب گشتاور دندانه‌ای و ۵ درجه انتخاب شده است. برای نمایش بهتر اثر شیفت روتورها، گشتاور دندانه‌ای برای هر دو روتور و مقدار برآیند آن‌ها برای هر کدام از حالت‌های مرجع، قطب‌های با لبه پخ شده و قطب‌های با لبه گرد شده به ترتیب در شکل‌های ۴-۱۵، ۴-۱۶ و ۴-۱۷ نشان داده شده است. همچنین به منظور مقایسه بهتر، شکل موج گشتاور دندانه‌ای کل برای هر سه حالت، در شکل ۴-۱۸ آورده شده است.



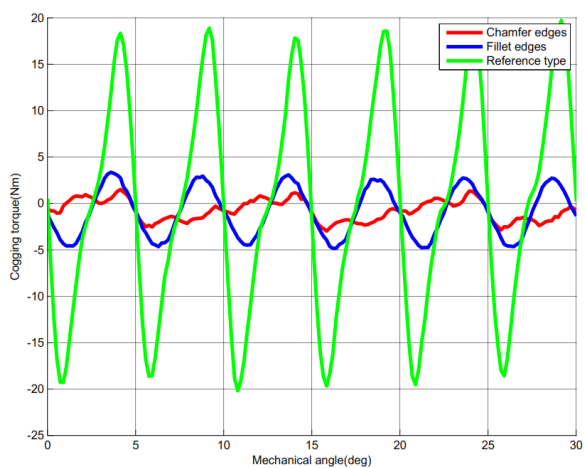
شکل (۴-۱۵): شکل موج گشتاور دندانه‌ای هر روتور و گشتاور دندانه‌ای کل ماشین AFPM با شکل قطب مرجع و ۵° جابه‌جایی دو روتور نسبت به هم



شکل (۴-۱۶): شکل موج گشتاور دندانه‌ای هر روتور و گشتاور دندانه‌ای کل برای ماشین AFPM با شکل قطب لبه‌های پخ شده و  $5^\circ$  جابه‌جایی دو روتور نسبت به هم

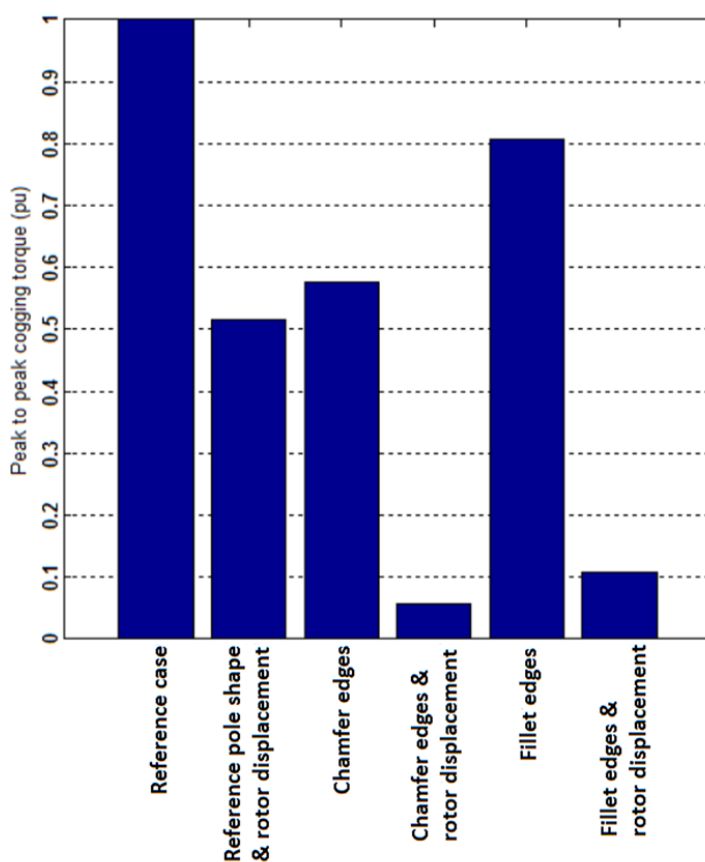


شکل (۴-۱۷): شکل موج گشتاور دندانه‌ای هر روتور و گشتاور دندانه‌ای کل برای ماشین با شکل قطب لبه‌های گرد شده و  $5^\circ$  جابه‌جایی دو روتور نسبت به هم



شکل (۴-۱۸): نمودار گشتاور دندانه‌ای کل برای ماشین با قطب‌های آهن‌ربایی با شکل لبه‌های مختلف و  $5^\circ$  جابه‌جایی دو روتور نسبت به هم

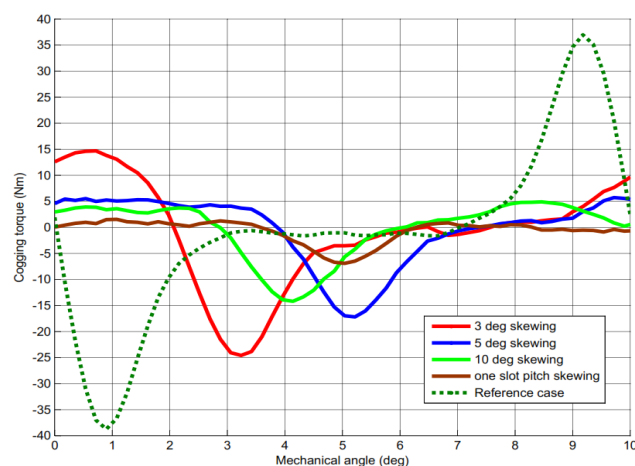
همانطور که از نتایج مشخص است، در جابه‌جایی دو روتور با زاویه نصف دوره تناوب گشتاور دندانه‌ای، هر چه شکل موج گشتاور دندانه‌ای به سینوسی نزدیک‌تر باشد، این روش ثمربخش‌تر بوده گشتاور دندانه‌ای کاهش بیشتری خواهد داشت. ضمن اینکه نتیجه در شکل ۴-۱۶ نیز قابل مشاهده است و ماشین با قطب با لبه‌های پخ شده در صورت جابه‌جایی دو روتور نسبت به هم به اندازه  $5^\circ$  بیشترین کاهش در مقدار گشتاور دندانه‌ای را نتیجه می‌دهد. برای مقایسه تاثیر ترکیب شیفت روتورها و شکل قطب‌های مختلف بررسی شده، نتایج مربوط به گشتاور دندانه‌ای در نمودار شکل ۴-۱۹ آورده شده است. مطابق نتایج به دست آمده، ماشین با قطب‌های با لبه پخ شده و  $5^\circ$  جابه‌جایی روتورها نسبت به هم بیشترین اثربخشی را در کاهش مقدار گشتاور دندانه‌ای نسبت به دیگر موارد بررسی شده داشته است.



شکل (۴-۱۹): مقایسه مقدار پیک تا پیک گشتاور دندانه‌ای برای حالت‌های مختلف شکل قطب و جابه‌جایی روتورها

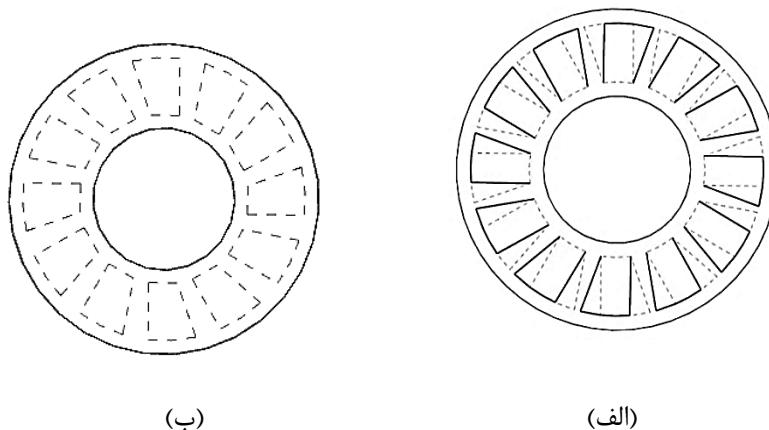
### ۴-۲-۳- انحراف قطب‌های آهنربایی روتورها به صورت متقارن و نامتقارن

همانطور که در فصل سوم در بحث تغییرات ساختار روتور اشاره شد، انحراف قطب‌های آهنربایی یکی از روش‌های موثر کاهش گشتاور دندانه‌ای است و مقدار زاویه انحراف معمولاً حداقل به اندازه یک گام شیار انتخاب می‌شود. شکل ۴-۲۰ گشتاور دندانه‌ای را برای زوایای انحراف قطب مختلف نشان می‌دهد و همانگونه که اشاره شد، با زاویه انحراف به اندازه یک گام شیار، کاهش بیشتری در مقدار گشتاور دندانه‌ای حاصل شده است.

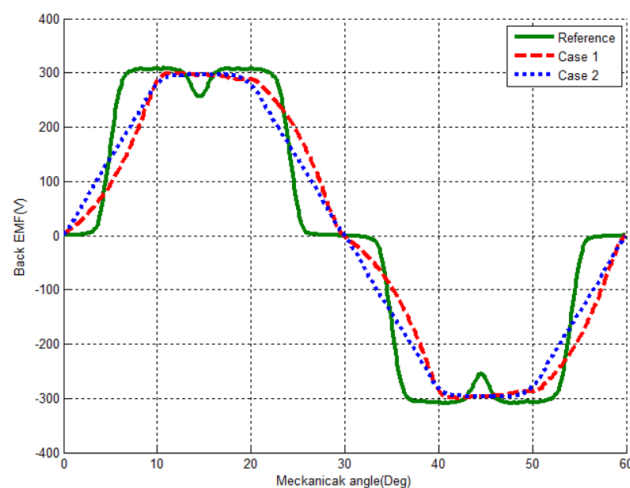


شکل (۴-۲۰): مقایسه مقدار پیک گشتاور دندانه‌ای ماشین مرجع برای زوایای مختلف انحراف آهنربا

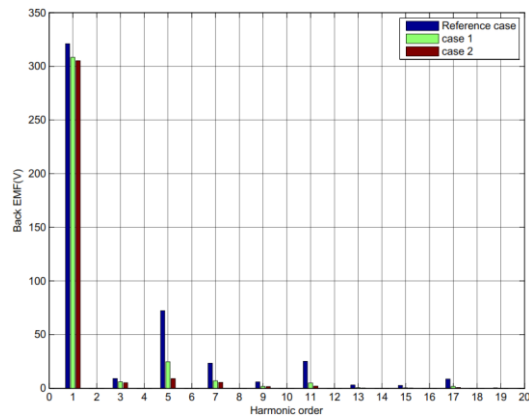
در این بخش انحراف آهنربا به دو صورت متقارن و نامتقارن برای روتورها انجام می‌شود. به این صورت که در Case1 یا متقارن، قطب‌های آهنربایی منحرف شده روی دو روتور هم جهت بوده و تمامی مساحت دو قطب رو به رو هم قرار می‌گیرد و در Case2 یا نامتقارن این انحراف برای دو روتور خلاف جهت یکدیگر است؛ مساحت دو قطب رو به رو هم نبوده و هم پوشانی کامل ندارند. برای بیان بهتر شکل ۴-۲۱ نمای بالای دو روتور و قطب‌های آن‌ها را نشان می‌دهد.



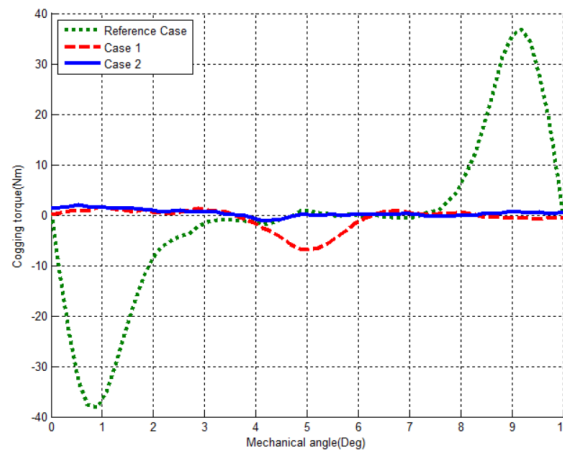
شکل (۴-۲۱): شماتیکی از نمای بالای دو روتور و قطب‌های آن‌ها در دو حالت انحراف الف) متقارن و ب) نامتقارن در نهایت این دو حالت با ماشین مرجع مقایسه می‌شود که نتایج مربوط ولتاژ القایی فاز، طیف هارمونیک آن و گشتاور دندانه‌ای این سه حالت به ترتیب در شکل‌های ۴-۲۲، ۴-۲۳ و ۴-۲۴ آورده شده است. همانطور که از شکل ۴-۲۲ مشخص است انحراف نامتقارن، شکل موج ولتاژی نزدیکتر به شکل موج سینوسی دارد. اگرچه مولفه اصلی شکل موج ولتاژ القایی در این حالت نسبت به دیگر حالت‌ها مقدار کمتر است اما مقدار دیگر مرتبه‌های هارمونیک ولتاژ نیز کاهش یافته‌اند. ضمن اینکه مقدار گشتاور دندانه‌ای نیز در این حالت به مقدار قابل توجهی نسبت به مقدار مرجع داشته است.



شکل (۴-۲۲): شکل موج ولتاژ القایی فاز برای حالت‌های انحراف متقارن و نامتقارن با شکل شیار نیمه بسته



شکل (۴-۲۳): طیف هارمونیکی ولتاژ القایی فاز برای حالت‌های انحراف متقارن و انحراف نامتقارن با شکل شیار نیمه بسته

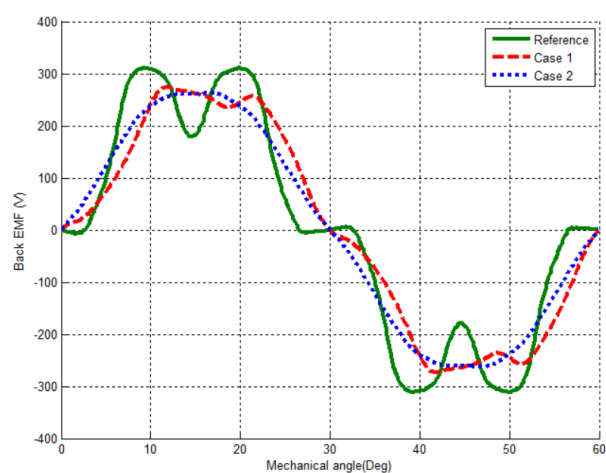


شکل (۴-۲۴): گشتاور دندانه‌ای برای حالت‌های انحراف متقارن و انحراف نامتقارن با شکل شیار نیمه بسته

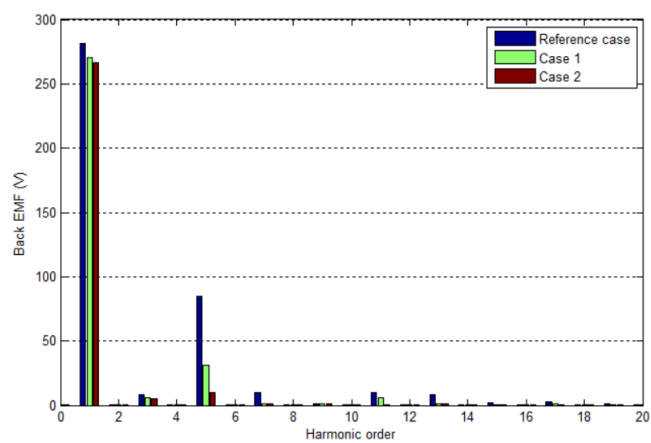
#### ۴-۲-۴- انحراف قطب‌ها به صورت متقارن و نامتقارن برای استاتور با شیار باز

مطابق با بررسی‌های انجام شده در فصل سوم، از جمله عواملی که بر مقدار گشتاور دندانه‌ای اثرگذار است مقدار باز بودن دهانه شیار است که بدترین حالت شیار کاملاً باز می‌باشد. استاتور ماشین مرجع دارای شیارهایی نیمه بسته با دهانه ۴ میلی‌متر است. در این قسمت با توجه به افزایش قابل توجه مقدار گشتاور دندانه‌ای برای ماشین با استاتور شیاردار با دهانه باز، اثربخشی روش انحراف متقارن و نامتقارن قطب‌ها برای ماشین با شیارهای باز نیز مورد بررسی قرار گرفته و در انتها با نتایج مربوط به ماشین با شیار نیمه بسته مقایسه می‌شود.

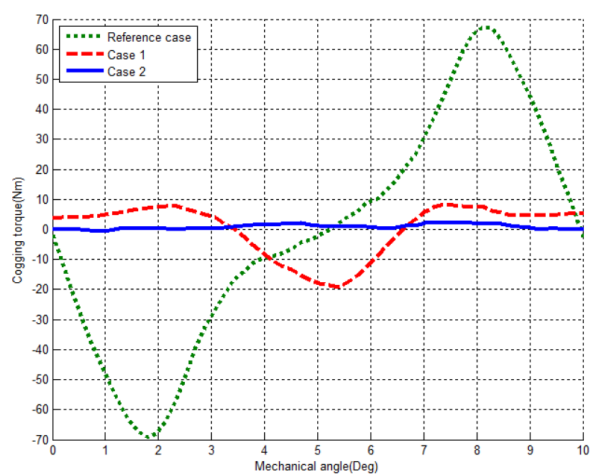




شکل (۴-۲۵): شکل موج ولتاژ القایی ماشین با شیار باز برای حالت‌های انحراف متقارن، انحراف نامتقارن و حالت مرجع

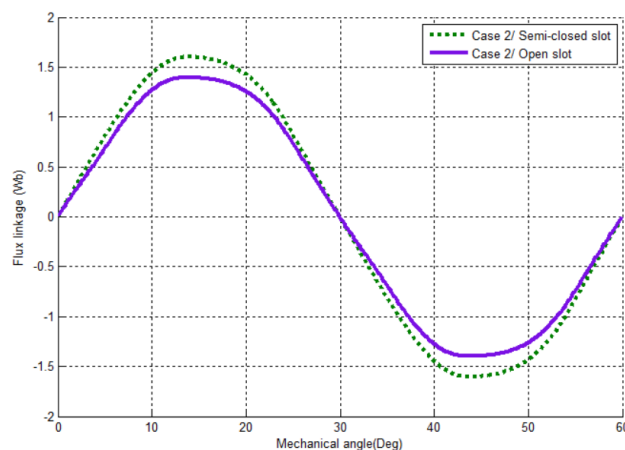


شکل (۴-۲۶): طیف هارمونیک ولتاژ القایی فاز برای حالت‌های با انحراف متقارن و نامتقارن و استاتور با شیار باز



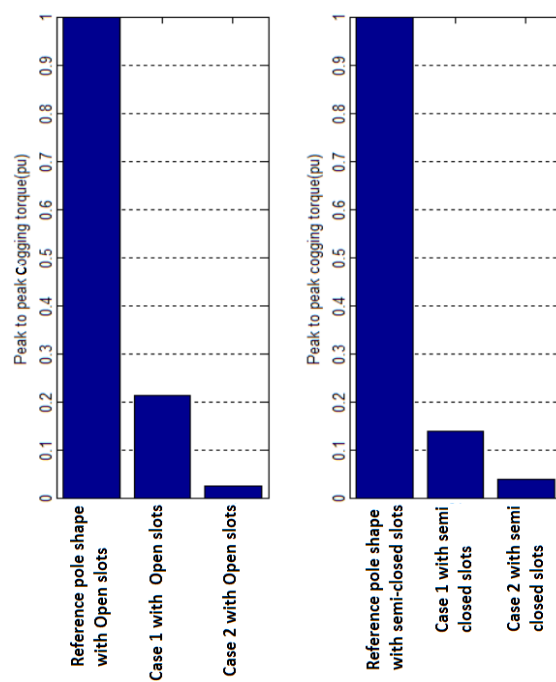
شکل (۴-۲۷): شکل موج گشتاور دندانه‌ای ماشین با شیار باز در حالت‌های انحراف متقارن، نامتقارن و حالت مرجع

در این بخش نیز انحراف نامتقارن شکلی به مراتب نزدیکتر به سینوسی ارائه می‌کند البته همانطور که در شکل ۴-۲۵ مشخص است مقدار ولتاژ القایی نسبت به شکل ۴-۲۲ کاهش یافته است که ناشی از این است که، مقدار شار عبوری از سیم‌پیچ کاهش یافته و به دنبال آن ولتاژ القایی کاهش می‌یابد. شکل ۴-۲۸ شار پیوندی عبوری از سیم‌پیچ را برای حالت انحراف نامتقارن و شیارهای باز و بسته نشان می‌دهد.



شکل (۴-۲۸): شکل موج شار پیوندی سیم‌پیچ در حالت انحراف نامتقارن برای شیار باز و نیمه‌بسته

با توجه به شکل ۴-۲۹ که مقایسه‌ای بین مقدار گشتاور دندانه‌ای در حالت متقارن و نامتقارن با شیارهای باز و نیمه‌بسته است، روش انحراف نامتقارن قطب‌ها روشی بسیار موثر در کاهش مقدار گشتاور دندانه‌ای می‌باشد که در حالت شیار باز نیز با وجود مقدار بالای گشتاور دندانه‌ای در حالت مرجع، آن را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد. مقدار پیک تا پیک گشتاور دندانه‌ای کل ماشین با روش انحراف نامتقارن برای شیارهای نیمه‌بسته و باز به ترتیب 3.14Nm و 3.8Nm می‌باشد.



شکل (۴-۲۹): نمودار مقایسه مقدار گشتاور دندانه‌ای با روش‌های انحراف متقارن و نامتقارن قطب‌ها برای ماشین‌های با شیار باز و نیمه‌بسته



## فصل پنجم

مدل سازی حالت دائمی و تحلیل بارداری

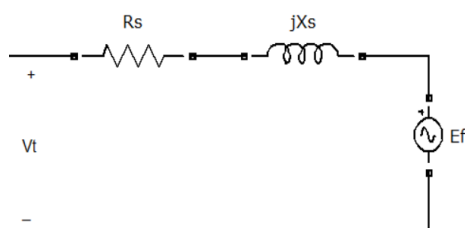
ماشین AFPM

## ۵-۱- مقدمه

پس بررسی شرایط بی باری ماشین در فصل گذشته، در این فصل به بررسی رفتار حالت دائمی تحت بار ماشین پرداخته می‌شود. برای این منظور لازم است که ولتاژ القا شده در سیم‌پیچ‌های استاتور، ناشی از قطب‌های آهنربایی روتور، اندوکتانس‌های خودی و متقابل سیم‌پیچ‌های فازها و مقدار راکتانس سنکرون ماشین در فرکانس نامی محاسبه شوند. این پارامترها از مدل سازی اجزاء محدود ماشین که در فصل قبل به آن پرداخته شد، به دست می‌آیند. با استفاده از پارامترهای نامبرده و مدل حالت دائمی ماشین سنکرون در فضای SIMULINK نرم افزار MATLAB رفتار ماشین در حالت دائمی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۵-۲- مدل سازی

در ماشین‌های سنکرون آهنربای دائم، میدان تحریک روتور توسط آهنرباهای قرار گرفته بر روی آن ایجاد می‌شود که ثابت و غیرقابل تنظیم است و بر خلاف ماشین‌های سنکرون معمول، روتور سیم‌پیچی نمی‌شود. مدل مداری حالت دائمی ماشین سنکرون آهنربای دائم برای هرفاز به شکل ۵-۱ تعریف می‌شود:



شکل (۵-۱): مدل مداری حالت دائمی ماشین سنکرون آهنربای دائم

با این فرض معادلات ولتاژ یک ماشین سنکرون چند فاز با تحریک آهنربای دائم در حالت کلی به صورت خلاصه زیر قابل بیان است:

$$[V] = [R][I] + \frac{d}{dt}([L][I]) + [E_f] \quad (۵-۱)$$

$$[E_f] = \frac{d}{dt}([\lambda_{pm}]) \quad (2-5)$$

در نتیجه معادلات ولتاژ برای یک ماشین سه فاز سنکرون نیز به صورت زیر است:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left( \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \right) + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{apm} \\ \lambda_{bpm} \\ \lambda_{cpm} \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

برای محاسبه اندوکتانس‌های خودی و متقابل هر فاز و بدست آوردن ماتریس  $L$ ، در نرم افزار اجزاء محدود، در حالت استاتیک بدون در نظر گرفتن تاثیر آهن‌رباهای دائم به سیم‌پیچی آن فاز جریان داده و جریان دیگر فازها صفر در نظر گرفته می‌شود. و سپس با در نظر گرفتن اثر آهن‌رباهای دائم و صفر در نظر گرفتن جریان‌ها روتور با سرعت سنکرون چرخانده می‌شود که ولتاژ القایی هر فاز یا همان ماتریس مربوط به  $\lambda_{pm}$  بدست می‌آید. در ادامه به محاسبه پارامترهای مدار معادل ماشین AFPM پرداخته می‌شود.

## ۵-۲-۱- محاسبه مقاومت سیم‌پیچی استاتور

رابطه کلی محاسبه مقاومت برای هر هادی به صورت زیر است:

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (4-5)$$

این رابطه با توجه به سیم‌پیچی استاتور و نوع هادی آن، برای محاسبه مقاومت استاتور به صورت زیر خواهد بود:

$$R_s = \frac{\rho_{Cu} \theta N_s l_{av}}{a_p a_c S_c} \quad (5-5)$$

که در آن  $\rho_{Cu,\theta}$  مقاومت ویژه مس در دمای  $\theta$ ،  $N_s$  تعداد دور سیم‌پیچی هر فاز استاتور،  $l_{av}$  طول متوسط یک دور سیم سیم‌پیچی هر فاز،  $a_p$  تعداد مسیرهای موازی،  $a_c$  تعداد رشته‌های هر سیم و  $S_c$  سطح مقطع هر رشته است.

$$\rho_{Cu,20^\circ C} = 1.678 \times 10^{-8} (\Omega.m) \quad (۶-۵)$$

$$\rho_{cu,\theta} = \rho_{cu,20^\circ C} (1 + \alpha(\theta - 20^\circ C)) \quad (۷-۵)$$

که  $\alpha$  ثابت دما و مقدار آن  $\alpha = 0.00393 (k^{-1})$  است. با محاسبه  $l_{av} = 0.327m$  برای طول یک دور سیم و با فرض  $a_c = a_p = 1$  مقدار مقاومت هر فاز استاتور برابر است با:

$$R_s = \frac{744 \times 0.327 \times 2.073 \times 10^{-8}}{3.26 \times 10^{-6}} = 1.54 (\Omega/Ph) \quad (۸-۵)$$

## ۵-۲-۲- محاسبه ماتریس اندوکتانس و راکتانس سنکرون ماشین

شاری که از عبور جریان از یک سیم‌پیچ تولید می‌شود را می‌توان به صورت دو مولفه در نظر گرفت: شاری که سیم‌پیچ خودی را و دیگری شاری که سیم‌پیچی دیگر را دور می‌زند. در سیستم‌های خطی که از اشباع صرف‌نظر می‌شود، از تقسیم شار پیوندی عبوری از سیم‌پیچ به جریانی که از همان سیم‌پیچ عبور می‌کند اندوکتانس خودی آن و از تقسیم شار پیوندی عبوری از سیم‌پیچ دیگر به جریانی که از سیم‌پیچ اول می‌گذرد اندوکتانس متقابل دو سیم‌پیچ محاسبه می‌شود [۳۰]. در این ماشین نیز برای محاسبه ماتریس اندوکتانس به همین طریق عمل شده است که در تحلیل مغناطیسی- استاتیکی نرم افزار JMAG با حذف قطب‌های آهن‌ربا و جریان دادن به سیم‌پیچی یک فاز استاتور و صفر در نظر گرفتن جریان دیگر سیم‌پیچ‌ها، ماتریس اندوکتانس به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$L = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0428 & -0.0094 & -0.0094 \\ -0.0094 & 0.0428 & -0.0094 \\ -0.0094 & -0.0094 & 0.0428 \end{bmatrix} [H] \quad (۹-۵)$$



برای محاسبه راکتانس سنکرون هر فاز ماشین از معادله افت پتانسیل بر روی اندوکتانس‌های خودی و متقابل در یک فاز استفاده می‌شود. این معادله برای فاز a یک ماشین چند فاز به صورت زیر است:

$$V_{as} = L_{aa} \frac{di_a}{dt} + L_{ab} \frac{di_b}{dt} + L_{ac} \frac{di_c}{dt} + \dots \quad (۱۰-۵)$$

هنگامی که سیم‌پیچ‌های استاتور به صورت ستاره زمین شده به هم متصل شده باشند در این صورت جمع جریان فازها صفر خواهد بود:

$$i_a + i_b + i_c + \dots = 0 \quad (۱۱-۵)$$

از طرف دیگر اندوکتانس متقابل بین سیم‌پیچ فاز a سیم‌پیچ فاز b، با اندوکتانس متقابل بین سیم‌پیچ فاز a سیم‌پیچ فاز c برابر است:

$$L_{ab} = L_{ac} = \dots \quad (۱۲-۵)$$

با ترکیب روابط ۱۰-۵ تا ۱۲-۵، معادله افت ولتاژ به صورت زیر خواهد بود:

$$V_{as} = (L_{aa} - L_{ab}) \frac{di_a}{dt} \quad (۱۳-۵)$$

در نتیجه راکتانس سنکرون فاز a از رابطه زیر بدست می‌آید:

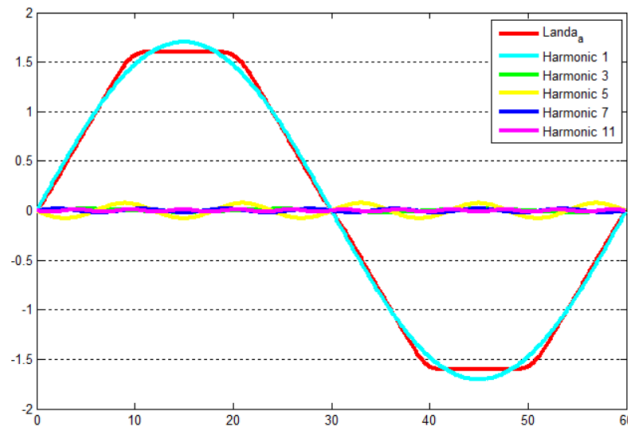
$$X_s = 2\pi f (L_{aa} - L_{ab}) \quad (۱۴-۵)$$

$$X_s = 2\pi f (L_{aa} - L_{ab}) = 60\pi(0.0428 + 0.0094) = 9.84\Omega \quad (۱۵-۵)$$

### ۵-۲-۳- محاسبه شارهای پیوندی و ولتاژ القایی فازها

با فرض صفر بودن جریان سیم‌پیچ‌ها، شار پیوندی ناشی از قطب‌های آهن‌ربایی برای هر سیم‌پیچ قابل محاسبه است. از آنجایی که روتور و در نتیجه قطب‌های آهن‌ربایی می‌چرخند و به دنبال آن چگالی شار در طول فاصله‌ی هوایی ثابت نیست، شارهای پیوندی سیم‌پیچی‌ها نیز تابعی از موقعیت روتور،  $\theta_m$  می‌باشند. با صفر بودن جریان‌های سیم‌پیچ‌های استاتور و چرخش روتور مدل سه بعدی در نرم

افزار JMAG Designer ، شکل موج شار پیوندی قابل محاسبه خواهد بود. شکل موج شار پیوندی سیم پیچ فاز a استاتور ماشین مرجع و هارمونیک‌های آن در شکل ۵-۲ نشان داده شده است که به علت تقارن نیم موج شکل، ضرایب زوج سری فوریه آن صفر هستند. همچنین با توجه به زاویه مبنای انتخاب شده و فرد بودن شکل موج، ضرایب جملات کسینوسی نیز صفر خواهد بود.



شکل (۵-۲): شکل موج شار پیوندی سیم پیچ فاز a استاتور و هارمونیک‌های آن برای ماشین مرجع

بدین ترتیب بسط سری فوریه شارهای پیوندی فازهای مختلف به صورت زیر است:

$$\lambda_{apm}(\theta_m) = \sum_{i=1,3,5,\dots} b_i \sin(6i\theta_m) \quad [wb] \quad (۱۶-۵)$$

$$\lambda_{bpm}(\theta_m) = \sum_{i=1,3,5,\dots} b_i \sin\left(i\left(6\theta_m - \frac{2\pi}{3}\right)\right) \quad [wb] \quad (۱۷-۵)$$

$$\lambda_{cpm}(\theta_m) = \sum_{i=1,3,5,\dots} b_i \sin\left(i\left(6\theta_m + \frac{2\pi}{3}\right)\right) \quad [wb] \quad (۱۸-۵)$$

که در آن  $\theta_m$  زاویه مکانیکی  $b_i$  ها ضرایب جملات سینوسی سری فوریه مطابق جدول ۵-۱ هستند:

جدول (۵-۱): ضرایب سری فوریه شکل موج شار پیوندی سیم پیچ فاز a استاتور ماشین مرجع

| $b_1$  | $b_3$  | $b_5$   | $b_7$  | $b_{11}$ |
|--------|--------|---------|--------|----------|
| ۱/۷۰۳۱ | ۰/۰۱۶۱ | -۰/۰۷۶۸ | ۰/۰۱۷۸ | -۰/۰۱۲۱  |

پس از محاسبه شار پیوندی، ولتاژ القایی فاز a از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$E_{fa} = \frac{d \lambda_{apm}}{dt} = \frac{d \lambda_{apm}}{d \theta_m} \cdot \frac{d \theta_m}{dt} \quad (۱۹-۵)$$

### ۵-۳- شبیه سازی دینامیکی حالت دائمی ماشین AFPM

اگرچه ماشین‌های AFPM به علت داشتن فرکانس‌های عملکردی متفاوت با فرکانس شبکه، به وسیله ادوات الکترونیک قدرت و درایو مورد استفاده و راه‌اندازی قرار می‌گیرند با این حال در این بخش ماشین AFPM با فرض اتصال مستقیم به شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

پس از بررسی معادلات ولتاژی و مدل مداری ماشین سنکرون AFPM، مدل آن به شکل ۵-۳ در محیط SIMULINK نرم افزار MATLAB پیاده سازی می‌شود. ترمینال‌های ماشین با بلوک شبکه به صورت یک منبع ولتاژ سه فاز با ۱۲۰ ولت مقدار موثر فاز و فرکانس ۳۰ هرتز اعمال می‌شود.

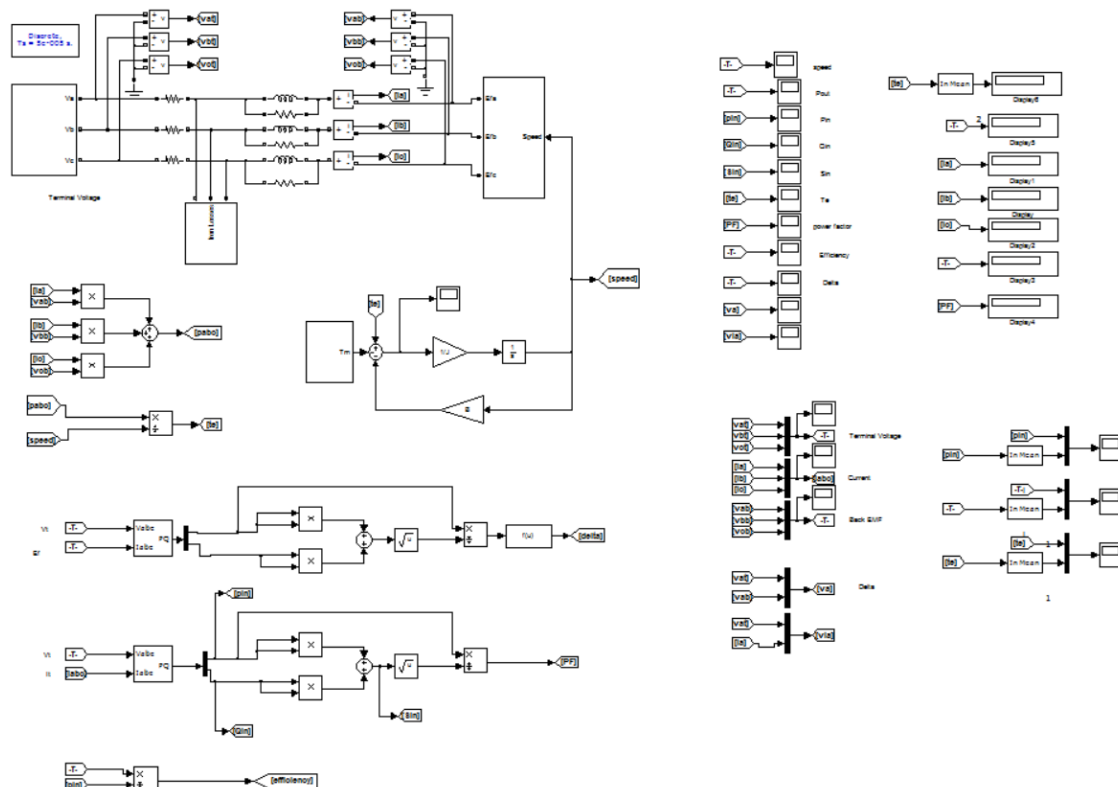
تلفات آهن به صورت سه مقاومت با اتصال ستاره در بلوک مربوطه مدل شده است. با محاسبه چگالی شار متوسط استاتور ماشین در نرم‌افزار اجزاء محدود و استفاده از اطلاعات جدول تلفات ورق هسته، مطابق جدول ۵-۲، مقدار تلفات هسته محاسبه و از رابطه ۵-۲۰ مقدار مقاومت فاز متناظر با تلفات هسته محاسبه شده است.

$$R_{iron} = \frac{V_{ph}^2}{P_{c/3}} = \frac{210^2}{9.247/3} = 14307 (\Omega/ph) \quad (۵-۲۰)$$

جدول (۵-۲): جدول اطلاعات ورق (M600-50A) هسته استاتور ماشین مرجع

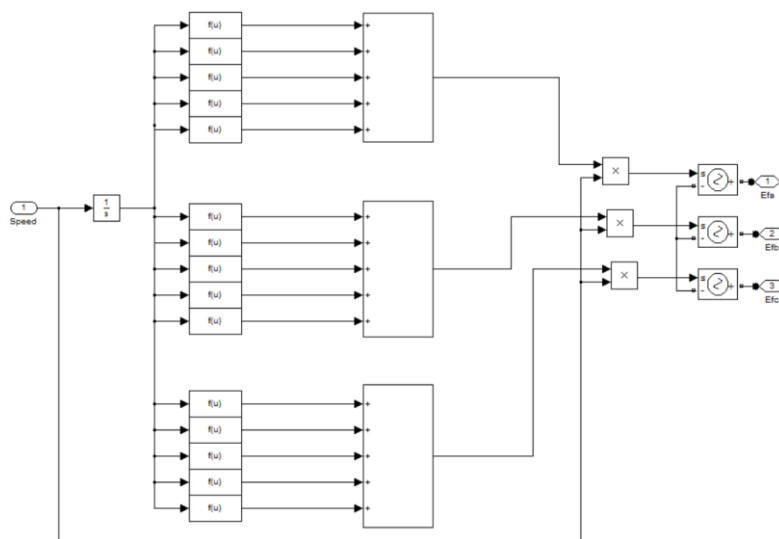
| T   | W/kg<br>at 50 Hz | VA/kg<br>at 50 Hz | A/m<br>at 50 Hz |
|-----|------------------|-------------------|-----------------|
| 0,1 | 0,04             | 0,13              | 65,6            |
| 0,2 | 0,16             | 0,35              | 83,8            |
| 0,3 | 0,33             | 0,59              | 94,1            |
| 0,4 | 0,54             | 0,87              | 103             |
| 0,5 | 0,78             | 1,18              | 110             |
| 0,6 | 1,04             | 1,51              | 118             |
| 0,7 | 1,32             | 1,88              | 127             |
| 0,8 | 1,63             | 2,28              | 136             |
| 0,9 | 1,96             | 2,73              | 147             |
| 1,0 | 2,34             | 3,25              | 159             |
| 1,1 | 2,76             | 3,86              | 177             |
| 1,2 | 3,23             | 4,62              | 205             |
| 1,3 | 3,78             | 5,68              | 255             |
| 1,4 | 4,43             | 7,55              | 370             |
| 1,5 | 5,17             | 12,8              | 718             |
| 1,6 | 5,94             | 31,7              | 1840            |
| 1,7 | 6,60             | 82,6              | 4370            |
| 1,8 | 7,06             | 176               | 8330            |

مقاومت و اندوکتانس سنکرون محاسبه شده برای هر فاز سیم‌پیچ استاتور به صورت یک مقاومت و سلف سری با منبع مدل می‌شود که مقادیر آن قبلاً محاسبه شده است.



شکل (۵-۳): شماتیک مدل ماشین شبیه سازی شده در نرم افزار MATLAB

در نهایت بلوک Back EMF است که با اطلاعات شارهای پیوندی استخراج شده از مدل اجزاء محدود، ولتاژ القایی در سیم‌پیچ‌های استاتور ناشی از شار آهن‌رباها را مدل می‌کند. شکل ۵-۴ این بلوک را نشان می‌دهد و همانطور که در شکل مشخص است ولتاژ القایی هر فاز از حاصل ضرب و جمع مجموعه‌ای از مشتقات هارمونیک‌های شکل موج شار پیوندی در سرعت زاویه‌ای مکانیکی به دست می‌آید. از آنجایی که شار پیوندی تابعی از موقعیت زاویه‌ای روتور است، ورودی هر یک از توابع مشتق شار پیوندی نیز زاویه مکانیکی است.



شکل (۴-۵): شماتیک بلوک شبیه‌سازی ولتاژ القایی

توان لحظه‌ای ورودی هر فاز از حاصل ضرب ولتاژ ورودی در جریان فاز و توان خروجی لحظه‌ای آن نیز از حاصل ضرب ولتاژ القایی در جریان آن فاز به دست می‌آید. بدین ترتیب گشتاور الکترومغناطیسی خروجی، از تقسیم مجموع توان خروجی لحظه‌ای فازها بر سرعت زاویه‌ای مکانیکی حاصل می‌شود که با توجه به روابط دینامیکی در قسمت پایین شکل ۳-۵ مدل شده است. ضمن اینکه روابط مربوط به محاسبه زاویه قدرت، ضریب قدرت و بازده نیز مدل شده‌اند.

ضریب قدرت از تقسیم توان اکتیو بر توان ظاهری محاسبه شده است که مقادیر لحظه‌ای توان‌ها با استفاده از المان اندازه‌گیری توان اکتیو و راکتیو لحظه‌ای در محیط سیمولینک متلب به دست می‌آیند. برای محاسبه زاویه بار نیز از همین روند و المان اندازه‌گیری استفاده شده است؛ با این تفاوت که ورودی‌های آن به جای ولتاژ ترمینال و جریان، ولتاژ ترمینال و ولتاژ القایی بوده است.

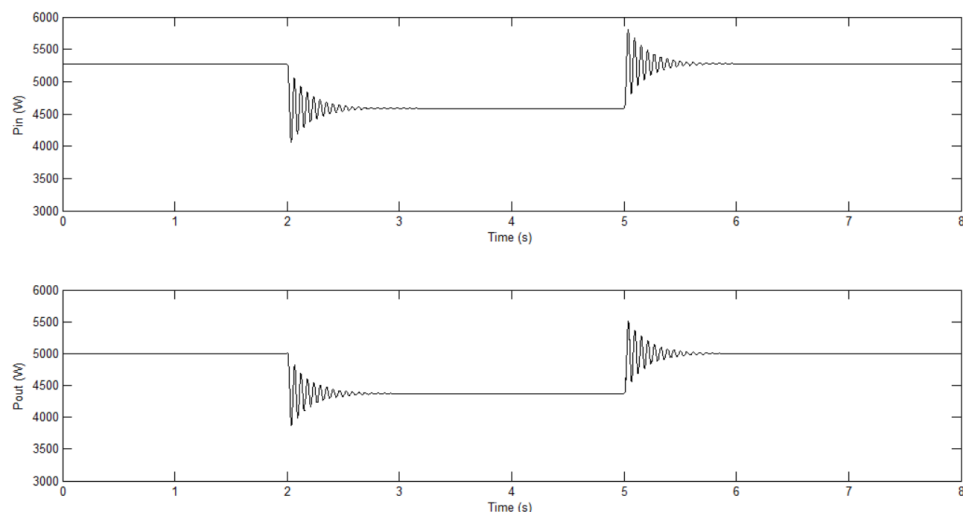
## ۴-۵- نتایج شبیه‌سازی

با توجه به روندی که برای شبیه‌سازی مدل ماشین AFPM بیان شد، برای حالت‌هایی که در فصل چهارم مورد بررسی قرار گرفتند نیز شبیه‌سازی دینامیکی حالت دائمی انجام شده و نتایج آن‌ها برای

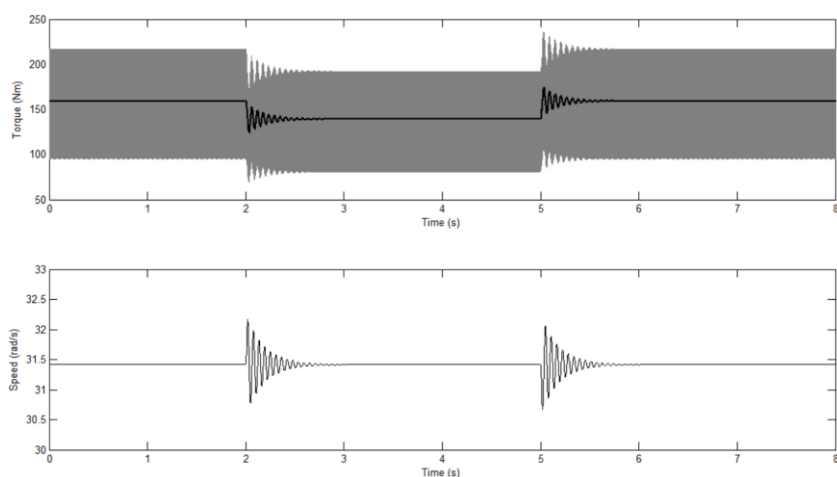
موارد مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرند. شبیه سازی به این صورت است که گشتاور بار به صورت باری اصطکاکی و برابر با مقدار گشتاور نامی ماشین فرض شده است و ماشین راه اندازی و به حالت دائمی خود می‌رسد. در این شرایط، رپل گشتاور خروجی، متوسط گشتاور خروجی، زاویه قدرت، ضریب قدرت، جریان فازها و بازده هر حالت بررسی می‌شود.

#### ۵-۴-۱- ماشین مرجع

برای بررسی دقیق عملکرد تحت بار ماشین مرجع به عنوان مرجع مورد مقایسه با حالت‌های مختلف مورد بررسی، در شرایطی که ماشین به حالت دائمی خود رسیده است در  $t=2s$  بارزدایی به ماشین اعمال شده و در  $t=5s$  بار ماشین به طور ناگهانی به مقدار نامی خود افزایش می‌یابد. نتایج در شکل- ۵-۵ تا ۵-۸ قابل مشاهده است. ماشین‌های سنکرون در هر باری با سرعت سنکرون می‌چرخند. این نکته در نمودار سرعت شکل ۵-۶ نیز مشخص که با تغییر بار در  $t=2s$ ,  $t=5s$  سرعت دچار نوسان شده و دوباره به مقدار سنکرون خود می‌رسد. اما با کاهش بار ماشین، گشتاور خروجی و به دنبال آن توان ورودی و خروجی نیز کاهش می‌یابند.

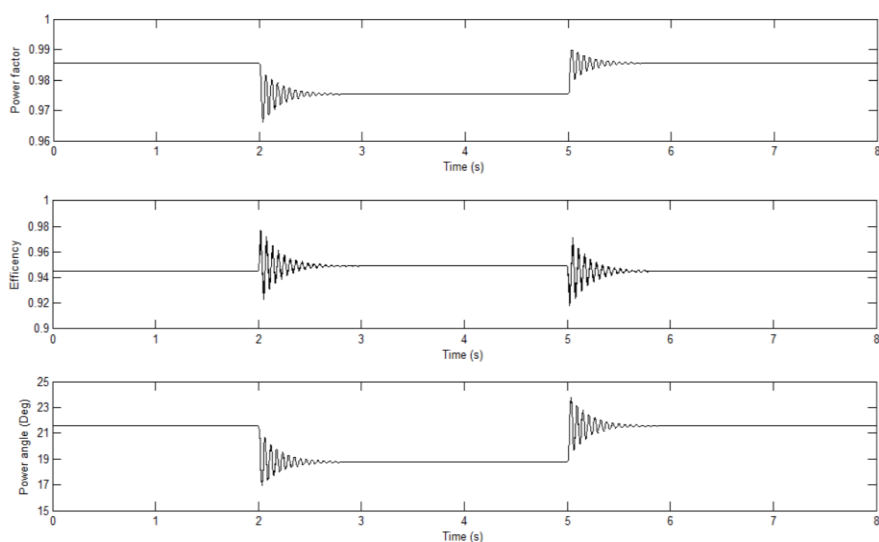


شکل (۵-۵): نمودار توان ورودی و خروجی ماشین مرجع در حالت دائمی و بارگذاری و بارزدایی



شکل (۵-۶): نمودار گشتاور خروجی و سرعت مکانیکی برای ماشین مرجع در عملکرد حالت دائمی و شرایط بارگذاری و بارزدایی

در موتورهای سنکرون میدان روتور با زاویه‌ای عقب‌تر از میدان استاتور می‌چرخد که این زاویه با نام زاویه بار، زاویه قدرت یا زاویه توان شناخته می‌شود و مقدار با افزایش بار افزایش می‌یابد. مقدار بحرانی این زاویه،  $\delta = 90^\circ$  است که با تغییر جزئی از این مقدار موتور از حالت سنکرون خارج شده و می‌ایستد. در شکل ۵-۷ نشان داده شده است که مقدار  $\delta$  با کاهش گشتاور در  $t=2s$ ، کاهش یافته و سپس در  $t=5s$  به مقدار اولیه خود بازمی‌گردد.



شکل (۵-۷): نمودار ضریب قدرت، بازده و زاویه بار ماشین مرجع در عملکرد حالت دائمی بار نامی و بارزدایی و بارگذاری

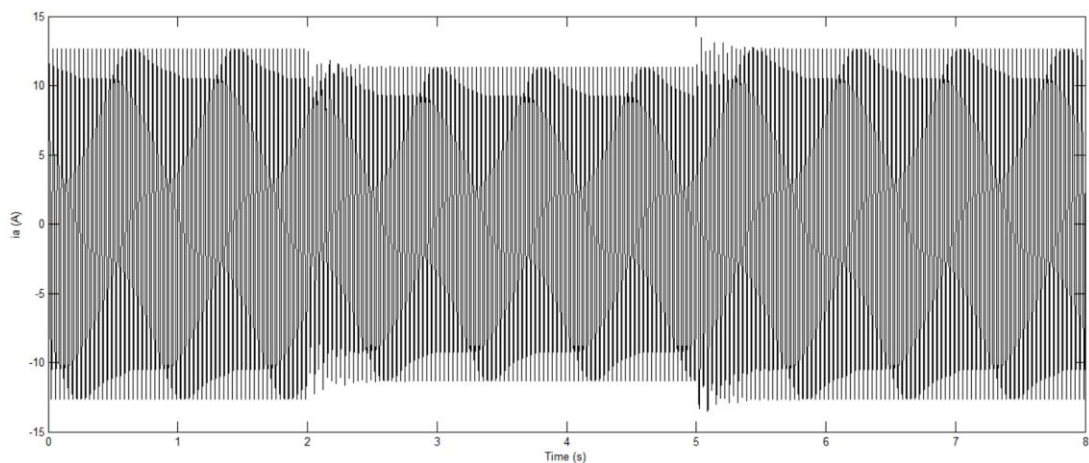
یک موتور سنکرون می‌تواند سه حالت عملکردی زیر تحریک، نرمال و فوق تحریک داشته باشد. در عملکرد زیر تحریک ماشین توان راکتیو جذب کرده و ضریب قدرت پس فاز دارد؛ در حالت نرمال همانند یک مقاومت اهمی عمل کرده و نه توان راکتیو جذب و نه تولید می‌کند؛ و در حالت فوق تحریک ضریب قدرت پیش فاز بوده و توان راکتیو تولید می‌کند. میزان زیر تحریک یا فوق تحریک بودن، تعیین کننده اندازه پس‌فازی و یا پیش‌فازی ضریب توان است [۳۱].

$E_f \cos \delta < V_t \rightarrow$  زیر تحریک

$E_f \cos \delta = V_t \rightarrow$  نرمال

$E_f \cos \delta > V_t \rightarrow$  فوق تحریک

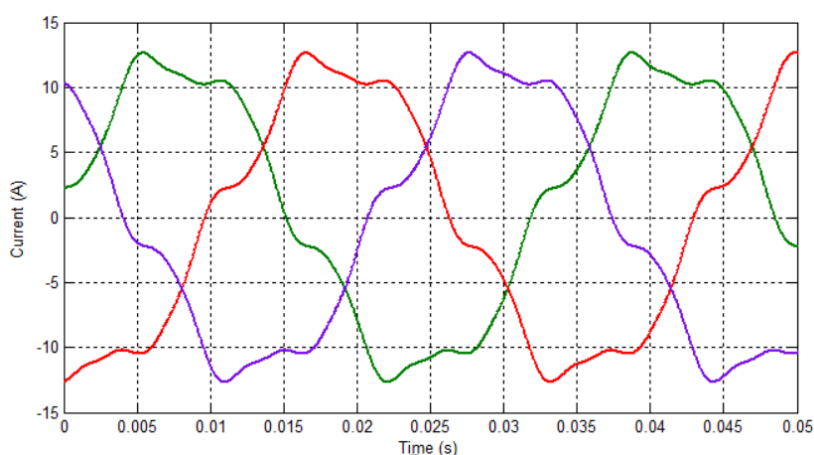
ماشین سنکرون AFPM مرجع، در رژیم عملکردی فوق تحریک عمل می‌کند. در این عملکرد، ضریب توان در بار نامی، بیشتر از ضریب توان در بارهای کمتر از آن است که این نکته در نمودار ضریب قدرت شکل ۵-۷ نیز قابل مشاهده است.



شکل (۵-۸): شکل موج تغییرات جریان فاز a استاتور ماشین مرجع در عملکرد حالت دائمی بار نامی. بارگذاری و بارزدایی



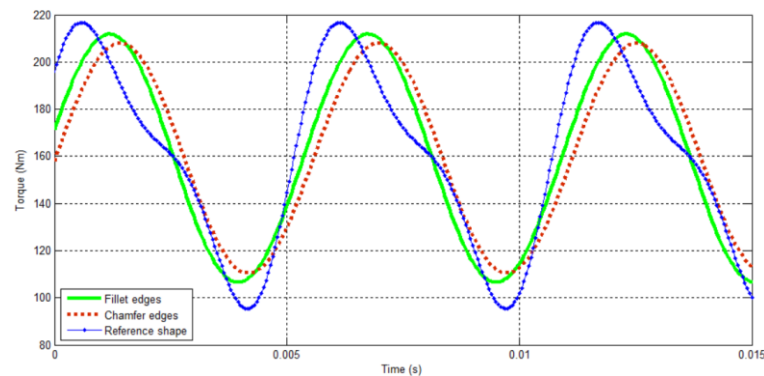
با تغییرات گشتاور بار، توان ورودی و جریان نیز تغییر می‌کند. همانطور که در شکل ۵-۸ نشان داده شده است. با بارزدایی و کاهش گشتاور جریان آرمیچر نیز کاهش یافته و پس از تغییر آن به مقدار نامی با نوساناتی مجدداً به مقدار اولیه خود می‌رسد. همچنین شکل ۵-۹ جریان‌های سه فاز متعادل استاتور برای بار نامی را در حالت دائمی نشان می‌دهد.



شکل (۵-۹): شکل موج جریان‌های سه فاز استاتور ماشین مرجع در حالت دائمی و شرایط بار نامی

#### ۵-۴-۲- ماشین با قطب‌های با لبه‌های شعاعی مختلف

با بررسی این حالت در فصل چهارم، مشابه آنچه در مدل‌سازی ماشین مرجع بیان شد، برای هر یک از شکل قطب‌ها شکل موج شار پیوندی از نرم‌افزار اجزاء محدود استخراج شده و به صورت مجموعه‌ای از شکل موج‌های سینوسی تابع زاویه مکانیکی مدل می‌شوند. شکل ۵-۱۰ شکل موج گشتاور ماشین را برای قطب‌ها با لبه‌های مختلف نشان می‌دهد که رپیل بالایی دارد. درصد رپیل گشتاور، گشتاور متوسط و برخی از پارامترهای دیگر در جدول ۵-۳ آورده شده است. قطب با لبه‌های گرد شده نسبت به دو حالت دیگر کاهش رپیل گشتاور و ضریب قدرت بیشتری را نتیجه می‌دهد. اگرچه بازده آن به مقدار جزئی کمتر از دو حالت دیگر بوده و زاویه بار آن نیز افزایش یافته است. در ماشین‌های AFPM به علت کوچک بودن زاویه بار این افزایش جزئی مشکلی در پایداری ماشین ایجاد نمی‌کند.



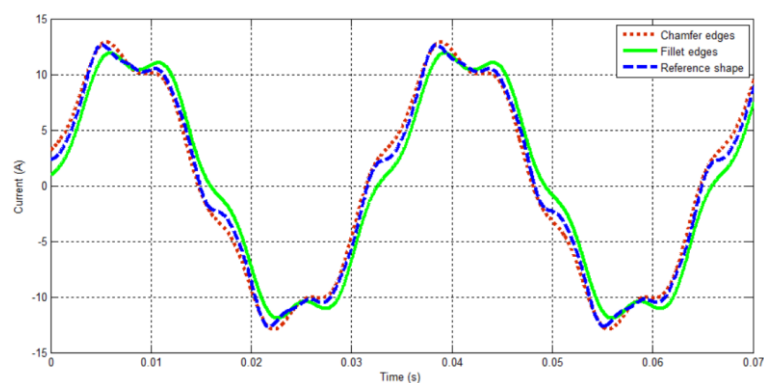
شکل (۵-۱۰): شکل موج گشتاور خروجی ماشین در بار نامی برای شکل قطب‌های با لبه‌های شعاعی مختلف

جدول (۵-۳): نتایج مدل‌سازی حالت دائمی ماشین با شکل قطب لبه‌های مختلف در شرایط بار نامی

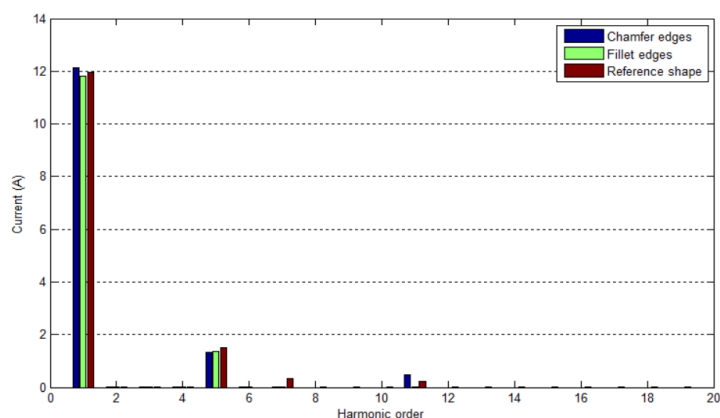
|                       | ماشین مرجع | قطب با لبه پخ شده | قطب با لبه گرد شده |
|-----------------------|------------|-------------------|--------------------|
| ریپل گشتاور (%)       | ۷۶/۲۵      | ۶۶/۰۶             | ۶۱/۳۰              |
| گشتاور متوسط (Nm)     | ۱۵۹/۱۵۱۶   | ۱۵۹/۱۵۱۲          | ۱۵۹/۱۵۲۱           |
| بازده (%)             | ۹۴/۵۰      | ۹۴/۹۳             | ۹۴/۳۷              |
| زاویه بار (Deg)       | ۲۱/۵۷      | ۲۱/۲۴             | ۲۲/۲۹              |
| ضریب قدرت             | ۰/۹۸۵۵     | ۰/۹۷۵۰            | ۰/۹۹۶۶             |
| THD (%) جریان استاتور | ۱۲/۹۲      | ۱۱/۱۵             | ۱۱/۵۹              |

شکل موج جریان فاز a استاتور ماشین و هارمونیک‌های آن برای قطب‌ها با لبه‌های شعاعی مختلف در

شرایط بار نامی به ترتیب در شکل‌های ۵-۱۱ و ۵-۱۲ آورده شده است.

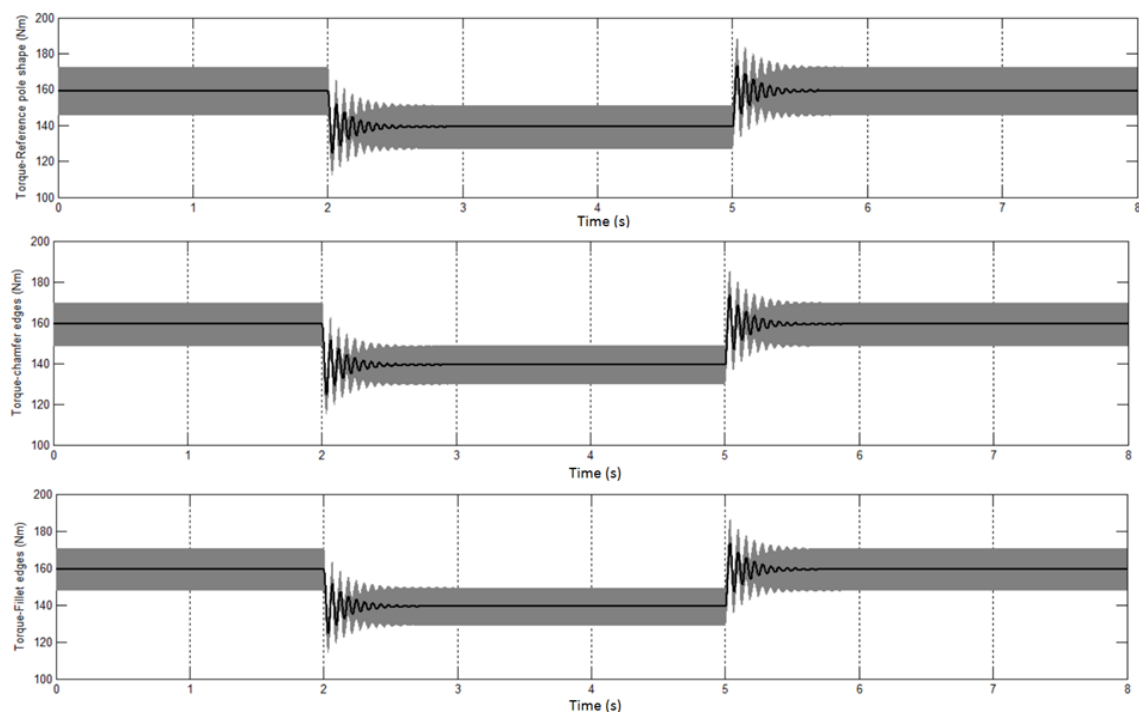


شکل (۵-۱۱): شکل موج جریان فاز a استاتور ماشین برای قطب‌ها با لبه‌های شعاعی مختلف در بار نامی

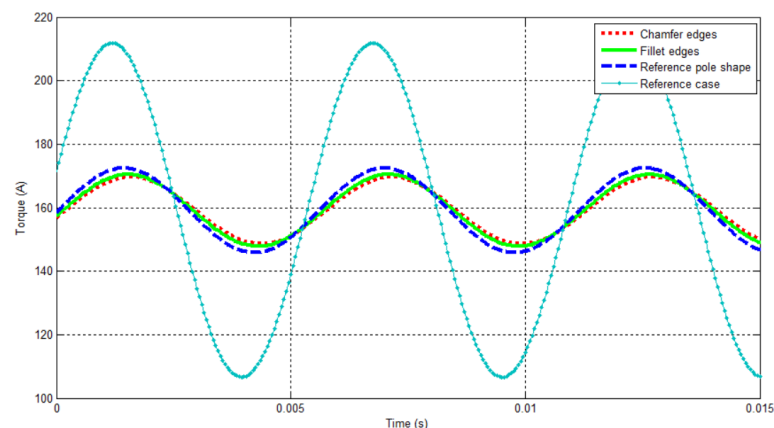


شکل (۵-۱۲): طیف هارمونیکی جریان‌های فاز a استاتور ماشین برای قطب‌ها با لبه‌های شعاعی مختلف در بار نامی

۵-۴-۳- ماشین با قطب‌های با لبه‌های شعاعی مختلف و  $5^\circ$  شیفت دو روتور نسبت به هم مطابق با تحلیل اجزاء محدود در فصل چهارم، مدل‌سازی دینامیکی حالت‌های مورد بررسی در این قسمت انجام شده است که نتایج در شکل‌های زیر قابل مشاهده می‌باشد. در این بررسی علاوه بر شکل قطب مرجع به همراه جابه‌جایی دو روتور، نتایج با عملکرد ماشین مرجع نیز مقایسه شده است.

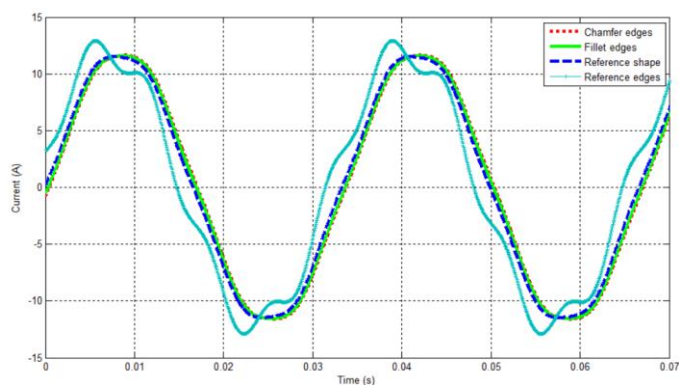


شکل (۵-۱۳): تغییرات گشتاور خروجی ماشین در شرایط بارزدایی و بارگذاری برای حالت‌های شکل قطب با لبه‌های شعاعی مختلف و  $5^\circ$  شیفت دو روتور نسبت به هم

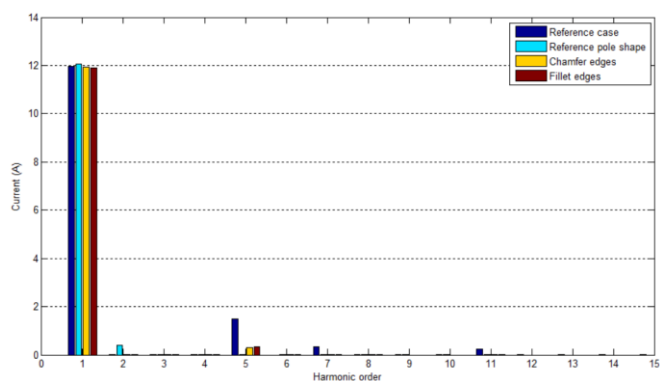


شکل (۵-۱۴): شکل موج گشتاور خروجی ماشین در بار نامی برای شکل قطب‌های با لبه‌های شعاعی مختلف و  $5^\circ$  شیف‌ت دو روتور نسبت به هم

همانطور که در شکل ۵-۱۵ مشخص است، جابه‌جایی روتورها برای هر کدام از شکل قطب‌های مطرح شده تاثیر زیادی بر شکل موج جریان گذاشته و جریان‌ها نسبت به جریان ماشین مرجع به شکل موج سینوسی نزدیک‌تر شده‌اند. می‌توان گفت اثر شیف‌ت روتورها، فارغ از شکل قطب، ریپل گشتاور و هارمونیک‌های جریان استاتور را به مقدار زیادی کاهش داده است.



شکل (۵-۱۵): شکل موج جریان‌های فاز a استاتور ماشین در بار نامی برای شکل قطب‌های با لبه‌های شعاعی مختلف و  $5^\circ$  شیف‌ت دو روتور نسبت به هم



شکل (۵-۱۶): طیف هارمونیکی جریان‌های فاز a استاتور ماشین در بار نامی برای شکل قطب‌های با لبه‌های شعاعی مختلف و  $5^\circ$  شیفت دو روتور نسبت به هم

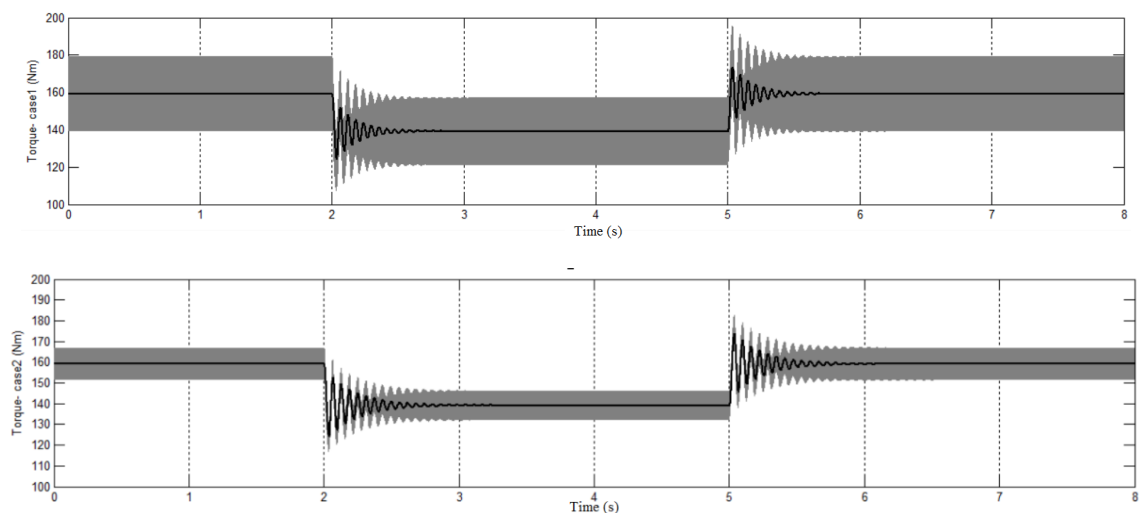
جدول (۵-۴): نتایج مدل‌سازی حالت دائمی ماشین با شکل قطب لبه‌های مختلف و  $5^\circ$  جابه‌جایی دو روتور نسبت به هم در بار نامی

| ماشین مرجع            | شکل قطب مرجع و جابه‌جایی روتور | قطب با لبه پخ شده و جابه‌جایی روتور | قطب با لبه گرد شده و جابه‌جایی روتور |
|-----------------------|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| (%) رپل گشتاور        | ۷۶/۲۵                          | ۱۳/۲۰                               | ۱۴/۲۱                                |
| (Nm) گشتاور متوسط     | ۱۵۹/۱۵۱۶                       | ۱۵۹/۱۹۲۸                            | ۱۵۹/۱۵۲۹                             |
| (%) بازده             | ۹۴/۵۰                          | ۹۴/۹۳                               | ۹۴/۷۱                                |
| (Deg) زاویه بار       | ۲۱/۵۷                          | ۲۲/۹۳                               | ۲۳/۰۸                                |
| ضریب قدرت             | ۰/۹۸۵۵                         | ۰/۹۹۴۸                              | ۰/۹۸۱۳                               |
| THD (%) جریان استاتور | ۱۲/۹۲                          | ۵/۱۵                                | ۲/۵۷                                 |

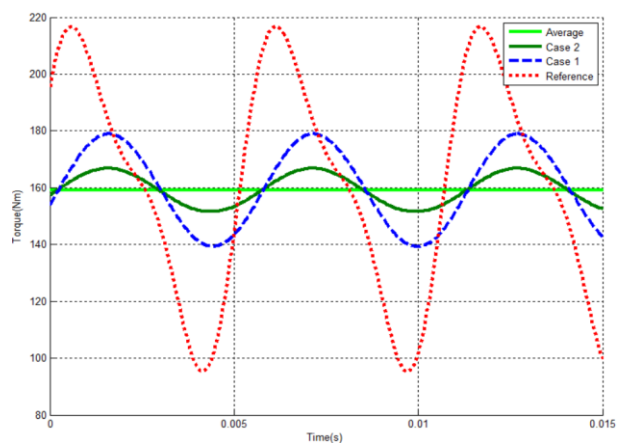
## ۵-۴-۴- ماشین با انحراف قطب‌های دو روتور به صورت متقارن و نامتقارن و استاتور

### شیار نیمه‌بسته

چگونگی اجرای این شکل قطب در فصل گذشته توضیح داده شده است و در اینجا تنها نتایج دینامیکی حالت دائمی بررسی می‌شود. در شکل ۵-۱۸ به خوبی تاثیر انحراف قطب‌ها به صورت متقارن و نامتقارن بر رپل گشتاور قابل مشاهده است.



شکل (۵-۱۷): تغییرات گشتاور خروجی ماشین در شرایط بار زدایی و بار گذاری برای شکل قطب‌های منحرف شده به صورت متقارن و نامتقارن

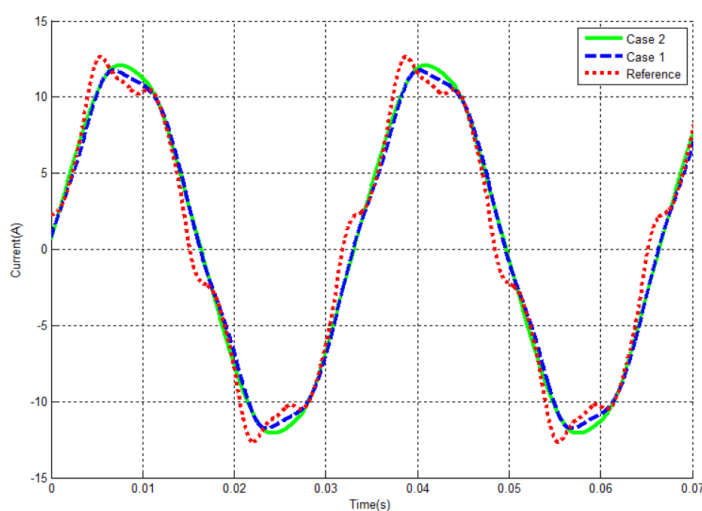


شکل (۵-۱۸): شکل موج گشتاور خروجی ماشین در بار نامی برای شکل قطب‌های منحرف شده به صورت متقارن و نامتقارن

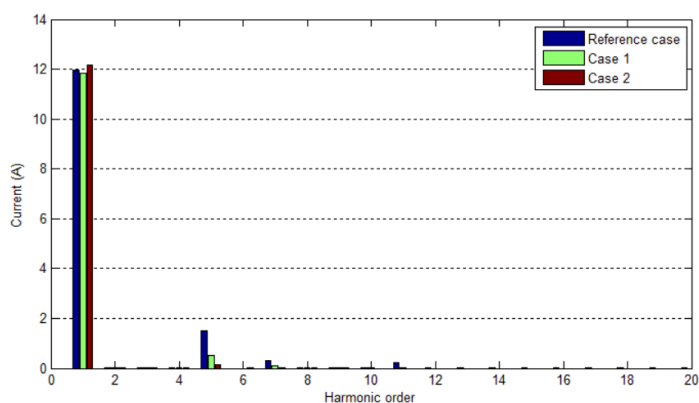
همانطور که در شکل ۵-۱۸ و نیز نتایج جدول ۵-۵ مشخص است، بدون تغییر قابل توجه در متوسط گشتاور، رپیل گشتاور به شدت کاهش می‌یابد که در مورد ۲، یعنی انحراف نامتقارن قطب‌ها، بیشترین کاهش رپیل را نتیجه می‌دهد. همچنین با توجه به شکل‌های ۵-۱۹ و ۵-۲۰ با به‌کارگیری این روش، جریان ترمینال‌های ماشین با اعوجاج کمتری روبه‌رو شده و به حالت سینوسی نزدیک‌تر شده اند که بهترین وضعیت در حالت انحراف نامتقارن نتیجه شده است.

جدول (۵-۵): نتایج مدل‌سازی حالت دائمی ماشین در بار نامی برای شکل قطب‌های منحرف شده به صورت متقارن و نامتقارن

| قطب‌های با انحراف نامتقارن | قطب‌های با انحراف متقارن | ماشین مرجع |                      |
|----------------------------|--------------------------|------------|----------------------|
| ۵/۶۲                       | ۲۵/۰۰                    | ۷۶/۲۵      | (%) رپل گشتاور       |
| ۱۵۹/۱۴۵۰                   | ۱۵۹/۱۵۲۴                 | ۱۵۹/۱۵۱۶   | (Nm) گشتاور متوسط    |
| ۹۲/۲۵                      | ۹۴/۹۰                    | ۹۴/۵۰      | (%) بازده            |
| ۲۳/۲۸                      | ۲۲/۲۵                    | ۲۱/۵۷      | (Deg) زاویه بار      |
| ۰/۹۹۸۸                     | ۰/۹۹۹۲                   | ۰/۹۸۵۵     | ضریب قدرت            |
| ۱/۴۴                       | ۴/۴۱                     | ۱۲/۹۲      | THD(%) جریان استاتور |



شکل (۵-۱۹): شکل موج جریان‌های فاز a استاتور ماشین در بار نامی برای شکل قطب‌های منحرف شده به صورت متقارن و نامتقارن

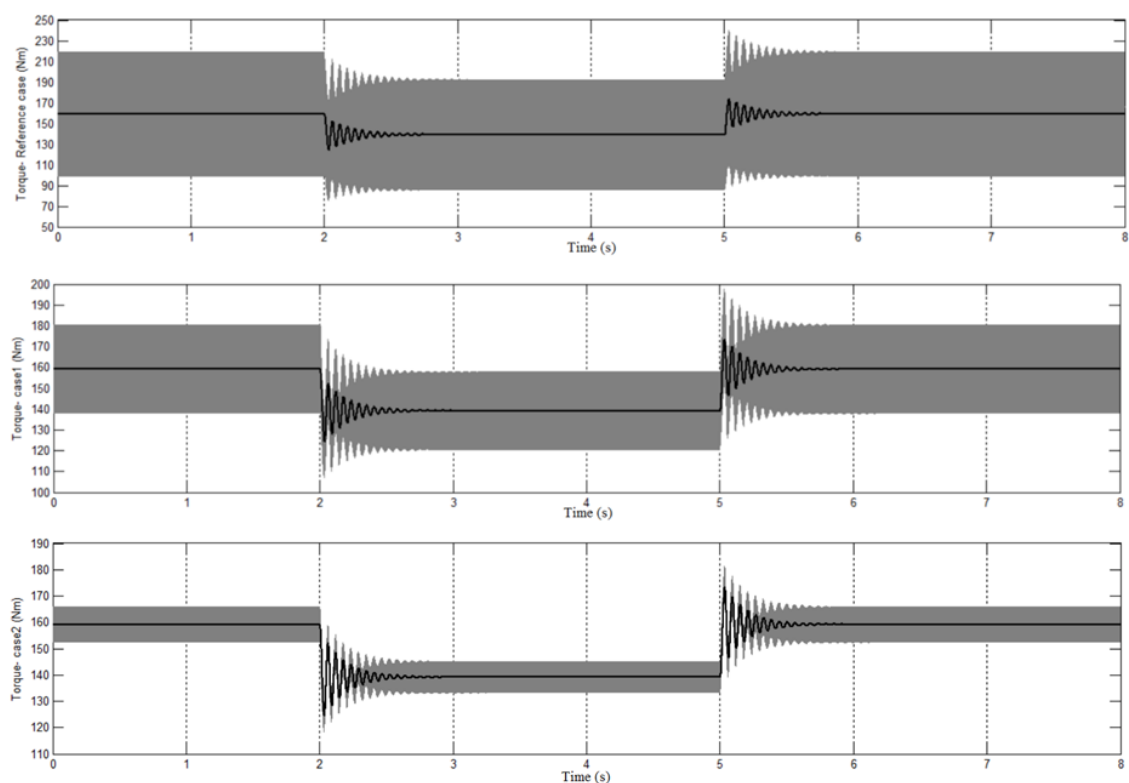


شکل (۵-۲۰): طیف هارمونیکي جریان‌های فاز a استاتور ماشین در بار نامی برای شکل قطب‌های منحرف شده به صورت متقارن و نامتقارن

#### ۵-۴-۴- ماشین با انحراف قطب‌های دو روتور به صورت متقارن و نامتقارن و استاتور با

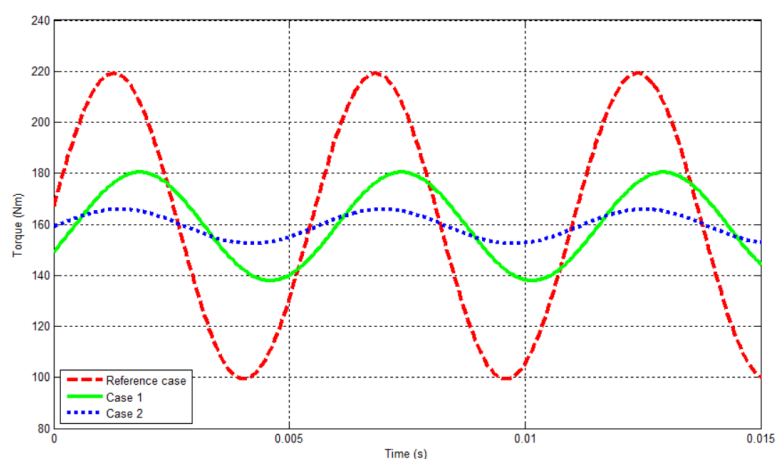
#### شیار باز

انحراف قطب‌های روتور به صورت متقارن و نامتقارن مشابه نتایج بی باری بهترین عملکرد را نسبت به دو دسته بررسی شده دیگر ارائه می‌دهد. به همین علت اثر بخشی این روش برای ماشین با استاتور شیار باز نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۵-۲۱ شکل موج گشتاور خروجی و ریپل آن را نشان می‌دهد. همچنین شکل موج گشتاور خروجی برای سه حالت به منظور مقایسه در شکل ۵-۲۲ آورده شده است.



شکل (۵-۲۳): تغییرات گشتاور خروجی ماشین در شرایط بارزدایی و بارگذاری برای حالت‌های انحراف متقارن و نامتقارن و استاتور با شیارهای باز



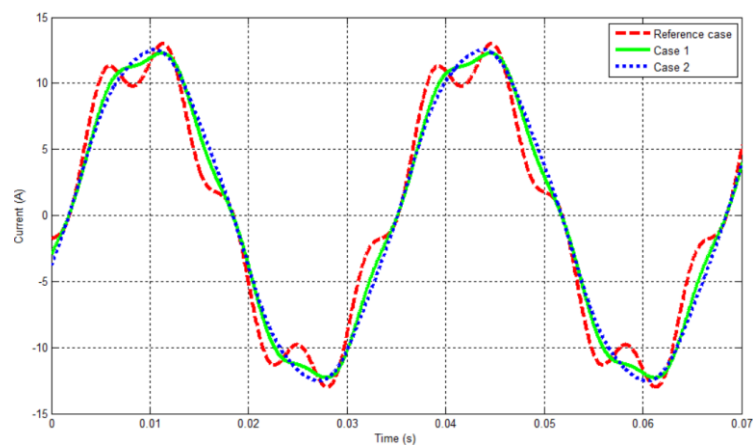


شکل (۵-۲۲): شکل موج گشتاور ماشین با استاتور شیار باز در بار نامی برای شکل قطب‌های منحرف شده به صورت متقارن و نامتقارن

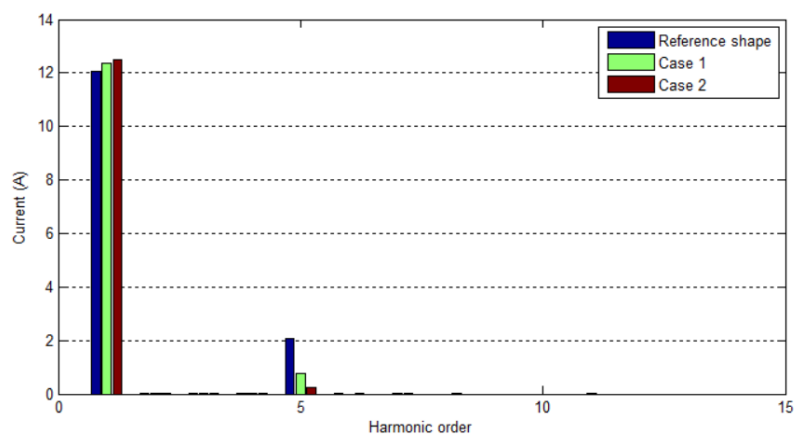
جدول (۵-۶): نتایج مدل‌سازی حالت دائمی ماشین در بار نامی برای شکل قطب‌های منحرف شده به صورت متقارن و نامتقارن

|                      | ماشین مرجع | قطب‌های با انحراف متقارن | قطب‌های با انحراف نامتقارن |
|----------------------|------------|--------------------------|----------------------------|
| (%) ریپل گشتاور      | ۷۵/۳۲      | ۲۶/۶۶                    | ۸/۴۶                       |
| (Nm) گشتاور متوسط    | ۱۵۹/۱۵۱۸   | ۱۵۹/۱۵۲۷                 | ۱۵۹/۱۵۲۹                   |
| (%) بازده            | ۹۵/۲۷      | ۹۴/۴۴                    | ۹۴/۵۵                      |
| (Deg) زاویه بار      | ۱۹/۴۹      | ۲۰/۲۱                    | ۲۰/۰۳                      |
| ضریب قدرت            | ۰/۹۷۷۶     | ۰/۹۵۰۳                   | ۰/۹۵۹۴                     |
| THD(%) جریان استاتور | ۱۷/۳۸      | ۶/۱۶                     | ۱/۹۴                       |

در این حالت نیز انحراف نامتقارن قطب‌ها کاهش ریپل قابل قبولی را ارائه می‌کند اگرچه ضریب قدرت اندکی کاهش و زاویه بار نیز اندکی افزایش داشته است اما اعوجاج جریان استاتور کاهش قابل توجهی دارد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی نسبت به استاتور با شیار نیمه بسته، باز بودن شیار استاتور کاهش جزئی ضریب قدرت را موجب می‌شود که برای تامین توان و گشتاور خروجی ثابت، افزایش جزئی جریان را به دنبال دارد.



شکل (۵-۲۳): شکل موج جریان‌های فاز a استاتور شیپار باز ماشین در بار نامی برای شکل قطب‌های منحرف شده به صورت متقارن و نامتقارن



شکل (۵-۲۴): طیف هارمونیکی جریان‌های فاز a استاتور شیپار باز ماشین در بار نامی برای شکل قطب‌های منحرف شده به صورت متقارن و نامتقارن

## فصل ششم

## نتیجه گیری

## ۱-۶- نتیجه گیری

ماشین‌های آهن‌ربای دائم با استاتور شیاردار به علت نوع ساختار استاتور با مشکلات گشتاور دندانه‌ای مواجه هستند که خود بر روی دیگر مشخصه‌های عملکردی ماشین مثل رپیل گشتاور نیز اثرگذار است. ضمن اینکه موجب لرزش و نویز در ماشین نیز می‌شود. در این تحقیق روش‌هایی مبتنی بر تغییر شکل قطب، برای بهبود عملکرد ماشین AFPM مورد ارزیابی قرار گرفت که علاوه بر کاهش گشتاور دندانه‌ای، هارمونیک‌های شکل موج ولتاژ القایی و همچنین جریان بار نیز کاهش یافت. برای بررسی بهتر تمامی حالات مورد مطالعه، نتایج در تحت جدولی واحد، جدول ۱-۶ آورده شده است:

جدول (۱-۶): نتایج شبیه‌سازی حالات مورد مطالعه در این تحقیق

| ضریب قدرت | زاویه بار (Deg) | بازده (%) | متوسط گشتاور (Nm) | رپیل گشتاور (%) |                                          |
|-----------|-----------------|-----------|-------------------|-----------------|------------------------------------------|
| ۰/۹۸۵۵    | ۲۱/۵۷           | ۹۴/۵۰     | ۱۵۹/۱۵۱۶          | ۷۶/۲۵           | ماشین مرجع                               |
| ۰/۹۷۵۰    | ۲۱/۲۴           | ۹۴/۹۳     | ۱۵۹/۱۵۱۲          | ۶۶/۰۶           | قطب با لبه‌های پخ شده                    |
| ۰/۹۹۶۶    | ۲۲/۲۹           | ۹۴/۳۷     | ۱۵۹/۱۵۲۱          | ۶۱/۳۰           | قطب با لبه‌های گرد شده                   |
| ۰/۹۹۴۸    | ۲۲/۹۳           | ۹۴/۹۳     | ۱۵۹/۱۹۲۸          | ۱۶/۷۵           | شکل قطب ماشین مرجع و ۵° شیفت روتورها     |
| ۰/۹۹۲۲    | ۲۳/۰۸           | ۹۴/۹۱     | ۱۵۹/۱۵۲۹          | ۱۳/۲۰           | قطب با لبه‌های پخ شده و ۵° شیفت روتورها  |
| ۰/۹۸۱۳    | ۲۱/۳۴           | ۹۴/۷۱     | ۱۵۹/۱۵۲۹          | ۱۴/۲۱           | قطب با لبه‌های گرد شده و ۵° شیفت روتورها |
| ۰/۹۹۹۲    | ۲۲/۲۵           | ۹۴/۹۰     | ۱۵۹/۱۵۲۴          | ۲۵/۰۰           | قطب‌های منحرف شده به صورت متقارن         |
| ۰/۹۹۸۸    | ۲۳/۲۸           | ۹۲/۲۵     | ۱۵۹/۱۴۵۰          | ۵/۶۲۵           | قطب‌های منحرف شده به صورت نامتقارن       |

بیشترین کاهش رپیل گشتاور را انحراف قطب‌ها به شکل نامتقارن نتیجه می‌دهد. ضمن اینکه بیشترین زاویه بار و کمترین گشتاور نیز در این حالت اتفاق می‌افتد؛ که در ماشین‌های AFPM به علت پایین بودن زاویه بار، این افزایش جزئی زاویه بار پایداری ماشین را دچار مشکل نخواهد داشت. همچنین می‌توان از کاهش بازده در مقابل کاهش چشمگیر رپیل گشتاور چشم‌پوشی کرد. در دیگر حالت‌های بررسی شده نیز بازده تقریباً ثابت است. ضمن اینکه در تمامی موارد اگرچه رپیل گشتاور نسبت به حالت مرجع کاهش یافته اما متوسط گشتاور تقریباً ثابت بوده است که امری مطلوب می‌-

باشد. با توجه به مواردی که اشاره شد، می‌توان حالت قطب‌های منحرف شده به صورت نامتقارن را به عنوان شکل قطبی معرفی کرد که در مجموع عملکرد بهتری ارائه می‌کند. با در نظر گرفتن عملکرد انحراف قطب‌ها به عنوان نتیجه مطلوب، این شکل قطب برای این حالت شکل شیار باز نیز مورد بررسی قرار گرفت تا اثر بخشی آن برای این شکل شیار نیز ارزیابی شود. نتایج حاصله در جدول ۶-۲ آورده شده است.

جدول (۶-۲): نتایج شبیه‌سازی انحراف قطب متقارن و نامتقارن و استاتور با شیارهای باز و نیمه بسته

| ضریب قدرت | زاویه بار (Deg) | بازده (%) | متوسط گشتاور (Nm) | ریپل گشتاور (%) |                                                                |
|-----------|-----------------|-----------|-------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------|
| ۰/۹۸۵۵    | ۲۱/۵۷           | ۹۴/۵۰     | ۱۵۹/۱۵۱۶          | ۷۶/۲۵           | ماشین مرجع - استاتور با شیار نیمه بسته                         |
| ۰/۹۷۷۶    | ۱۹/۴۹           | ۹۵/۲۷     | ۱۵۹/۱۵۱۸          | ۷۵/۳۲           | ماشین مرجع - استاتور با شیار باز                               |
| ۰/۹۹۸۸    | ۲۳/۲۸           | ۹۲/۲۵     | ۱۵۹/۱۴۵۰          | ۵/۶۲۵           | قطب‌های منحرف شده به صورت نامتقارن و استاتور با شیار نیمه بسته |
| ۰/۹۵۹۴    | ۲۰/۰۳           | ۹۴/۵۵     | ۱۵۹/۱۵۲۹          | ۸/۴۶            | قطب‌های منحرف شده به صورت نامتقارن و استاتور با شیار باز       |

به کارگیری این روش برای ماشین‌های با شیار باز نیز عملکرد مطلوبی ارائه می‌کند؛ اگرچه در این حالت نیز بازده کاهش و زاویه بار افزایش می‌یابد اما این تغییرات نسبت به ماشین با شیار نیمه بسته کمتر است؛ ضمن اینکه مقدار کاهش ریپل گشتاور نیز کمتر است.

## ۶-۲- پیشنهاداتی برای آینده

- بررسی دقیق تلفات هسته با توجه به کاهش هارمونیک‌های ولتاژ القایی و جریان ماشین
- بررسی روش انحراف نامتقارن قطب‌ها برای شکل قطب با انحراف دوطرفه
- تعیین مقدار بهینه زاویه انحراف دو روتور برای کاهش گشتاور دندانه‌ای و ریپل گشتاور
- و ...



## مراجع

- [1] J. F. Gieras, R. J. Wang, and M. J. Kamper (2004) **“Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines”** Springer Netherlands.
- [2] M. Aydin, (2008) “Magnet skew in cogging torque minimization of axial gap permanent magnet motors”, ICELMACH, pp. 1-6.
- [3] C. Breton, J. Bartolome, J. A. Benito, G. Tassinario, I. Flotats, C. W. Lu, and B. J. Chalmers,(2000) “Influence of machine symmetry on reduction of cogging torque in permanent-magnet brushless motors,” **IEEE Transactions on Magnetics**, vol. 36, no. 5, pp. 3819-3823.
- [4] W. Fei ,and P. C. K. Luk, (2008) “Cogging torque reduction techniques for axial-flux surface-mounted permanent-magnet segmented-armature-torus machines” **ISIE**, pp. 485-490.
- [5] A. P. Ferreira, A. V. Leite, and A. F. Costa, (2015) “Comprehensive analysis and evaluation of cogging torque in Axial Flux Permanent Magnet machines”, **DEMPED**, pp. 435-440.
- [6] D. A. Gonzalez, J. A. Tapia, and A. L. Bettancourt, (2007) “Design Consideration to Reduce Cogging Torque in Axial Flux Permanent-Magnet Machines”, **IEEE Transactions on Magnetics**, vol. 43, no. 8, pp. 3435-3440.
- [7] H. Tieгна, Y. Amara, and G. Barakat, (2014) “Study of Cogging Torque in Axial Flux Permanent Magnet Machines Using an Analytical Model”, **IEEE Transactions on Magnetics**, vol. 50, no. 2, pp. 845-848.
- [8] Z. Q. Zhu, and D. Howe, (2000) “Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines”,**IEEE Transactions on Energy Conversion**, vol. 15, no. 4, pp. 407-412, 2000.
- [9] M. Aydin, Q. Ronghai, and T. A. Lipo,(2003) “Cogging torque minimization technique for multiple-rotor, axial-flux, surface-mounted-PM motors: alternating magnet pole-arcs in facing rotors”, **IAS**, pp. 555-561 ,vol.1.
- [10] M. Aydin, H. Surong, and T. A. Lipo, (2006) “Torque quality and comparison of internal and external rotor axial flux surface-magnet disc machines”, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 53, no. 3, pp. 822-830.
- [11] G. D. Donato, F. G. Capponi, and F. Caricchi, (2010) “Influence of magnetic wedges on the load performance of axial flux permanent magnet machines”,**IECON** , pp. 876-882.

- [12] H. Saavedra, J. R. Riba, J. Hernandez-Guiteras, and L. Romeral, (2013) "Magnet shape influence on the performance of AFPMM in a Torus configuration", **PowerEng**, pp. 468-472.
- [13] J. Wanjiku, M. A. Khan, P. S. Barendse, and P. Pillay, (2015) "Influence of Slot Openings and Tooth Profile on Cogging Torque in Axial-Flux PM Machines", **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 62, no. 12, pp. 7578-7589.
- [14] M. Aydin, S. Huang, and T. A. Lipo, (2004) "Axial Flux Permanent Magnet Disc Machines: A Review", **Record of SPEEDAM**.
- [15] S. Kahourzade, A. Mahmoudi, H. W. Ping, and M. N. Uddin, (2014) "A Comprehensive Review of Axial-Flux Permanent-Magnet Machines", **Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering**, vol. 37, no. 1, pp. 19-33.
- [16] A. Mahmoudi, S. Kahourzade, N. A. Rahim, and W. P. Hew, (2013) "Design, Analysis, and Prototyping of an Axial-Flux Permanent Magnet Motor Based on Genetic Algorithm and Finite-Element Analysis", **IEEE Transactions on Magnetics**, vol. 49, no. 4, pp. 1479-1492.
- [17] I. Stamenkovic, N. Milivojevic, N. Schofield, M. Krishnamurthy, and A. Emadi, (2013) "Design, Analysis, and Optimization of Ironless Stator Permanent Magnet Machines", **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. 28, no. 5, pp. 2527-2538.
- [18] J. Kinnunen, (2007) "Direct-on-line axial flux permanent magnet synchronous generator static and dynamic performance", na.
- [19] J. F. Gieras, and M. Wing, (2002) "Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications, Second Edition", Taylor & Francis.
- [20] M. Shokri, N. Rostami, V. Behjat, J. Pyrhönen, and M. Rostami, (2015) "Comparison of Performance Characteristics of Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Machine With Different Magnet Shapes", **IEEE Transactions on Magnetics**, vol. 51, no. 12, pp. 1-6.
- [21] W. Fei, and P. C. K. Luk, (2012) "Torque Ripple Reduction of a Direct-Drive Permanent-Magnet Synchronous Machine by Material-Efficient Axial Pole Pairing", **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 59, no. 6, pp. 2601-2611.
- [22] A. Mahmoudi, N. A. Rahim, and W. P. Hew, (2011) "Axial-flux permanent magnet machine modeling, design, simulation and analysis," **Scientific Research and Essays**, pp. 24.
- [23] A. B. Letelier, D. A. Gonzalez, J. A. Tapia, R. Wallace, and M. A. Valenzuela, (2007) "Cogging Torque Reduction in an Axial Flux PM Machine via Stator Slot Displacement



- and Skewing”, **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 43, no. 3, pp. 685-693.
- [24] D. C. Hanselman, (1997) “Effect of skew, pole count and slot count on brushless motor radial force, cogging torque and back EMF”, **IEE Proceedings - Electric Power Applications**, vol. 144, no. 5, pp. 325-330.
- [25] Y. Yokoi, and T. Higuchi, (2015) “Stator Design of Alternate Slot Winding for Reducing Torque Pulsation With Magnet Designs in Surface-Mounted Permanent Magnet Motors”, **IEEE Transactions on Magnetics**, vol. 51, no. 6, pp. 1-11.
- [26] W. Fei, and P. C. K. Luk, (2010) “A New Technique of Cogging Torque Suppression in Direct-Drive Permanent-Magnet Brushless Machines”, **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 46, no. 4, pp. 1332-1340.
- [27] M. Gulec, and M. Aydin, (2012) “Influence of magnet grouping in reduction of cogging torque for a slotted double-rotor axial-flux PM motor”, **SPEEDAM**, pp. 812-817.
- [28] M. Gulec, and M. Aydin, (2014) “Magnet asymmetry in reduction of cogging torque for integer slot axial flux permanent magnet motors”, **IET Electric Power Applications**, vol. 8, no. 5, pp. 189-198.
- [29] F. Caricchi, F. G. Capponi, F. Crescimbin, and L. Solero, (2004) “Experimental study on reducing cogging torque and no-load power loss in axial-flux permanent-magnet machines with slotted winding”, **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 40, no. 4, pp. 1066-1075.
- [۳۰] پ. س. کراوز، (۱۳۹۱)، “تحلیل ماشین‌های الکتریکی”، ۱۳۹۱، چاپ پنجم، م. سقائیان نژاد، ح. نیک خاجوئی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.
- [۳۱] ب. بهارا، (۱۳۸۹) “ماشین‌های الکتریکی تئوری، عملکرد و کاربردها”، جلد دوم، ج. سلطانی، ح. لسانی، انتشارات قائم، تهران.

## **Abstract**

Nowadays, sorts of modern electrical machines such as Axial Flux Permanent Machine (AFPM) get special attentions in different industries. Thus, it is so important to improve the performance characteristics of AFPM. Although, the slotted stator AFPMs are superior to other types due to smaller air gap and, consequently, thinner PMs but, the stator slots increase the harmonics content of Back-EMF wave as well as increase the cogging torque, torque ripple, and consequently noise and vibration in the machine. In this thesis, with the aim of torque ripple reduction in the AFPM machine with the slotted stator, the performance of the machine in different type of the pole and slot shapes, including pole with round and chamfer radial edges, the skewed pole shape symmetrically and asymmetrically with open and semi-closed slots has been studied. The reference machine with different introduced pole shapes and topologies is modeled in JMAG Designer and MATLAB software, by using three-dimensional model of finite element and equivalent circuit of the machine, for no-load and on-load conditions, and its performance characteristics were calculated. Finally, according to the results, AFPM machine with the skewed pole shape asymmetrically better than other cases studied.

*Index Terms: Axial Flux Permanent Magnet (AFPM) machine, Cogging torque, Ripple torque, Pole shape, Slot shape*



Faculty of Electrical Engineering and Robotic

M.Sc. Thesis in Power Electronic and Machine Engineering

**investigation of the effect of pole and slot shapes on the performance  
characteristics of axial flux permanent magnet (AFPM) machine**

By:Mansoure Karimi

Supervisor:

Dr. Ahmad Darabi

Advisor:

Dr. Amir Hassannia

September 2017