

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

گروه قدرت

پایان نامه کارشناسی ارشد

مدل سازی و طراحی قفس برای ماشین سنکرون آهنربای دائم

هادی کریمی علی آباد

استاد راهنما:

جناب آقای دکتر احمد دارابی

بهمن ۱۳۹۴

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

خداوند را بسی شاکرم که از روی کرم پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه درخت پر بار وجودشان بیاسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم چرا که این دو وجود، پس از پروردگار مایه هستی‌ام بوده‌اند، دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب به من آموختند. آموزگارانی که برایم زندگی؛ بودن و انسان بودن را معنا کردند به پاس محبت‌های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند. این برگ سبزی است تحفه درویش تقدیم به پدر و مادر فداکارم.

بوسه بر دستان پر مهرتان

تشر و قدر دانی

بر خود لازم می دانم تا از راهنمایی های ارزشمند استاد ارجمند جناب آقای دکتر احمد دارابی تشر
نمایم. بی شک اتمام این پایان نامه بدون زحمات دلسوزانه ایشان امکان پذیر نبود.

تعهد نامه

اینجانب **هادی کریمی علی آباد** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق قدرت دانشکده مهندسی برق-ریاتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **مدل سازی و طراحی قفس برای ماشین سنکرون آهنربای دائم** 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 بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

در صورتی که عملکرد موتور فقط در سرعت سنکرون مد نظر باشد و هیچ گونه تغییر سرعتی نیاز نباشد، بنابراین استفاده از درایو راه انداز برای راه اندازی موتور، توجیه اقتصادی ندارد. جهت راه اندازی مستقیم موتور سنکرون مغناطیس دائم می توان از قفس به عنوان راه انداز استفاده شود. در این پایان نامه، ساختار جدیدی برای قفس موتور مغناطیس دائم شار محوری معرفی می شود و الگوریتم طراحی مناسب برای آن ارائه می گردد. بر اساس نتایج حاصل از شبیه سازی ها، ساختار قفس پیشنهاد شده قادر است موتور مغناطیس دائم شار محوری را با اتصال مستقیم به شبکه به طور مناسبی راه اندازی نماید. همچنین، این ساختار عملکرد میراکنندگی مطلوبی را نیز در موتور ایفا می کند به این معنی که، با وجود قفس، اغتشاشات سریعاً میرا شده و مدت زمان برگشت به سنکرونیزم بسیار کوتاه تر می شود. در ماشین های مغناطیس دائم، آهنربا نقش اساسی در عملکرد ماشین ایفا می کند و به همین دلیل حفظ خاصیت مغناطیسی آن ها از موارد بسیار مهمی است که باید در نظر گرفته شود. هنگامی که موتور در معرض اغتشاش بزرگی قرار گیرد ممکن است جریان غیر مغناطیس کننده استاتور شدیداً افزایش یابد. شار ناشی از این افزایش جریان یا عکس العمل آرمیچر ممکن است سبب کاهش چگالی شار آهنربای دائم به طور برگشت ناپذیر شود. نتایج شبیه سازی بی شمار انجام گرفته نشان می دهد که قفس طراحی شده برای موتور علاوه بر ایفای نقش راه اندازی مستقیم، تاثیرات منفی عکس العمل آرمیچر بر روی آهنربا را به طور قابل ملاحظه ای کاهش می دهد. در بخش های انتهایی این پایان نامه نقش مهم قفس در جلوگیری از پدیده مغناطیس زدایی با یک روش جدید مورد بررسی قرار گرفته و ساختار بهینه ای از قفس، جهت کاهش پدیده مغناطیس زدایی و همچنین راه اندازی مستقیم موفق موتور ارائه می گردد.

کلمات کلیدی: ماشین های مغناطیس دائم، شار محوری، راه اندازی مستقیم، قفس راه انداز، پدیده مغناطیس زدایی

مقالات مستخرج از پایان نامه

مقالات چاپ شده در کنفرانس بین‌المللی:

[۱] هادی کریمی علی آباد، احمد دارابی، "طراحی، مدل‌سازی و تحلیل قفس راه‌انداز برای موتور سنکرون مغناطیس‌دائم شار محوری با آهنربای سطحی"، سومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی برق، مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ۱۳۹۴

[۲] هادی کریمی علی آباد، احمد دارابی، "تحلیل مغناطیس‌زدایی موتور سنکرون مغناطیس‌دائم شار محوری با قفس راه‌انداز در حالت‌های عملکردی مختلف و بهبود ساختار قفس جهت کاهش مغناطیس‌زدایی"، سومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی برق، مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ۱۳۹۴

مقالات پذیرفته شده در کنفرانس ملی:

[۳] هادی کریمی علی آباد، احمد دارابی، "طراحی و مدل‌سازی قفس راه‌انداز برای موتور سنکرون مغناطیس‌دائم شار محوری بدون شیار به روش اجزاء محدود" بیست و چهارمین کنفرانس مهندسی برق ایران، دانشگاه شیراز، شیراز، ۱۳۹۵

فهرست مطالب

فصل اول - مقدمه.....	۱
۱-۱. مقدمه.....	۲
۲-۱. مروری بر سیر تکامل ماشین‌های مغناطیس‌دائم.....	۳
۱-۲-۱. ماشین‌های سنکرون مغناطیس‌دائم شار شعاعی (RFPM).....	۴
۲-۲-۱. ماشین‌های سنکرون مغناطیس‌دائم شار محوری (AFPM).....	۵
۳-۲-۱. ماشین‌های سنکرون مغناطیس‌دائم شار متقاطع (TFPM).....	۶
۳-۱. ماشین‌های سنکرون مغناطیس‌دائم با راه‌اندازی مستقیم (LSPMSM).....	۷
۴-۱. مشخصه‌های مهم مغناطیسی و دسته بندی مواد.....	۸
۵-۱. بررسی پدیده مغناطیس‌زدایی مواد مغناطیس‌دائم.....	۱۱
۶-۱. بررسی منحنی مغناطیس‌زدایی.....	۱۳
۷-۱. جمع‌بندی فصل.....	۱۴
فصل دوم - ساختارهای متداول قفس و مدل‌سازی‌های انجام گرفته.....	۱۵
۱-۲. مقدمه.....	۱۶
۲-۲. انواع ساختارهای قفس برای ماشین‌های سنکرون آهنربا دائم.....	۱۶
۳-۲. بررسی مدار معادل ماشین سنکرون با وجود قفس.....	۱۸
۴-۲. طراحی قفس راه‌انداز و بررسی رفتار راه‌اندازی موتور سنکرون مغناطیس‌دائم با قفس و روش‌های بهبود عملکرد راه‌اندازی.....	۲۰
۵-۲. تاثیر دمپر در کاهش پدیده مغناطیس‌زدایی.....	۲۲
۶-۲. جمع‌بندی فصل.....	۲۵

فصل سوم- معرفی و بررسی ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار محوری و انتخاب

ساختار مناسب برای قفس راه انداز..... ۲۷

۱-۳. مقدمه..... ۲۸

۲-۳. مروری بر طراحی موتور سنکرون مغناطیس دائم شار محوری..... ۲۸

۳-۳. شکل گرافیکی انواع ساختارهای مختلف قفس..... ۳۱

۴-۳. جمع بندی فصل..... ۳۵

فصل چهارم- طراحی قفس راه انداز برای ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار

محوری..... ۳۷

۱-۴. مقدمه..... ۳۸

۲-۴. الگوریتم جامع طراحی قفس راه انداز برای ماشین های سنکرون مغناطیس دائم..... ۳۸

۳-۴. تعیین پارامترهای ماشین سنکرون مغناطیس دائم با قفس..... ۴۰

۱-۳-۴. تعیین اندوکتانس سنکرون..... ۴۱

۲-۳-۴. تعیین مقاومت سیم پیچی هر فاز..... ۴۲

۳-۳-۴. تعیین اندوکتانس زیرگذرای سنکرون..... ۴۲

۴-۳-۴. تعیین اندوکتانس مغناطیسی بین قفس روتور و استاتور..... ۴۴

۴-۴. تعیین مقاومت معادل قفس روتور..... ۴۷

۱-۴-۴. تعیین مقاومت با کمک مدل سازی اجزاء محدود و آزمایش روتور قفل..... ۴۷

۲-۴-۴. تعیین تحلیلی مقاومت قفس روتور..... ۴۸

۵-۴. تعیین ابعادی مقاومت قفس روتور..... ۵۱

۶-۴. جمع بندی فصل..... ۵۳

فصل پنجم - مدل سازی راه اندازی مستقیم ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار

محوری..... ۵۵

۱-۵. مقدمه..... ۵۶

۲-۵. مدل سازی دینامیک گذرای موتور LSAFPM به روش تحلیلی..... ۵۶

۱-۲-۵. مدل سازی دینامیک گذرای موتور LSAFPM با کمک سیمولینک متلب..... ۵۷

۳-۵. نتایج شبیه سازی با استفاده از مدل سازی تحلیلی..... ۶۰

۴-۵. مدل سازی دینامیک گذرای موتور با استفاده از روش اجزاء محدود (FEM)..... ۶۴

۵-۵. بررسی عملکرد پایدار موتور سنکرون مغناطیس دائم شار محوری با قفس..... ۷۵

۶-۵. جمع بندی..... ۷۶

فصل ششم - بررسی مغناطیس زدایی در ماشین LSAFPM..... ۷۹

۱-۶. مقدمه..... ۸۰

۲-۶. مغناطیس زدایی در حالت ژنراتوری بی بار..... ۸۱

۳-۶. مغناطیس زدایی تحت بار نامی..... ۸۴

۴-۶. بررسی مغناطیس زدایی در عملکرد ترمزی موتور..... ۸۵

۵-۶. بررسی مغناطیس زدایی در شرایط راه اندازی مستقیم موتور..... ۹۰

۶-۶. جمع بندی فصل..... ۹۵

فصل هفتم - نتیجه گیری و پیشنهادات..... ۹۷

۱-۷. نتیجه گیری..... ۹۸

۲-۷. نوآوری کار انجام شده..... ۹۹

۳-۷. پیشنهادات..... ۱۰۰

مراجع..... ۱۰۱

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱): پیشرفت در زمینه تولید مواد مغناطیس دائم..... ۳
- شکل (۲-۱): ساختار مختلف ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار شعاعی..... ۵
- شکل (۳-۱): ساختار مختلف ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار محوری..... ۶
- شکل (۴-۱): ساختار یک قطب ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار متقاطع..... ۷
- شکل (۵-۱): منحنی مغناطیسی مواد (حلقه هیستریزیس)..... ۱۲
- شکل (۶-۱): منحنی مغناطیسی مواد (منحنی بازگشت)..... ۱۳
- شکل (۱-۲): ساختار مختلف قفس در ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار شعاعی..... ۱۷
- شکل (۲-۲): یک نوع ساختار قفس برای ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار محوری..... ۱۷
- شکل (۳-۲): الف) مدار معادل محور d ماشین سنکرون با روتور سیم پیچ شده. ب) مدار معادل محور q ۱۸
- شکل (۴-۲): الف) مدار معادل محور d ماشین سنکرون مغناطیس دائم. ب) مدار معادل محور q ۱۹
- شکل (۵-۲): الف) عملکرد پایدار موتور در شرایط نامی. ب) عملکرد موتور در شرایط خطا..... ۲۲
- شکل (۶-۲): الف) شارهای ناشی در خلاف جهت شار اصلی آهنربا. ب) شار ناشی بسیار ضعیف و موافق جهت شار اصلی آهنربا..... ۲۳
- شکل (۷-۲): الف) شار تولیدی میله متمرکز در شعاع خارجی روتور در جهت تقویت شار مگنت. ب) شار تولیدی میله متمرکز در شعاع خارجی روتور در جهت تقویت شار مگنت..... ۲۴
- شکل (۸-۲): محاسبه ولتاژ فازی در بار القایی نامتعادل با بررسی دو حالت با قفس و بدون قفس..... ۲۴

- شکل (۲-۹): محاسبه جریان فازی مولفه $d-q-o$ در حالت بار القایی نامتعادل..... ۲۵
- شکل (۳-۱): الف) محل قرارگیری میله‌های قفس در سطح آهنربا. ب) قفس مشابه با دمپر ماشین‌های سنکرون روتورسیم‌پیچی شده..... ۳۲
- شکل (۳-۲): کاهش چگالی شار در سطح آهنربا به واسطه وجود میله‌ها در سطح PM..... ۳۲
- شکل (۳-۳): الف) شکل گسسته موتور شار محوری مغناطیس دائم با قفس یک‌پارچه. ب) شکل کامل شده موتور با قفس یک‌پارچه..... ۳۳
- شکل (۳-۴): افزایش چگالی شار در کناره‌های آهنربا نسبت به ناحیه میانی..... ۳۳
- شکل (۳-۵): ساختار قفس با میله‌های توزیع شده در فاصله بین آهنرباها..... ۳۴
- شکل (۳-۶): الف) شکل گسسته موتور شار محوری مغناطیس دائم با قفس توزیع شده و صفحه سطحی روتور. ب) ساختار اسمبل شده..... ۳۵
- شکل (۴-۱): الگوریتم جامع طراحی قفس راه‌انداز ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم..... ۳۹
- شکل (۴-۲): مدار معادل ماشین LSPM تحت آزمایش روتور قفل..... ۴۳
- شکل (۴-۳): مدار معادل ماشین سنکرون مغناطیس دائم بدون قفس (شرایط عملکرد پایدار)..... ۴۴
- شکل (۴-۴): الف) شار پیوندی سیم‌پیچی استاتور. ب) شار عبوری از صفحه قرار داده شده در روتور..... ۴۶
- شکل (۴-۵): نمای سه بعدی قفس و پارامترهای ابعادی میله‌های قفس..... ۵۱
- شکل (۵-۱): مدار معادل ماشین LSAFPM..... ۵۷
- شکل (۵-۲): مدار معادل ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار محوری..... ۵۸
- شکل (۵-۳): شکل موج ولتاژ القایی در سیم‌پیچ‌های استاتور..... ۵۹
- شکل (۵-۴): شکل موج ولتاژ ورودی موتور..... ۶۱
- شکل (۵-۵): پاسخ سرعت از لحظه راه‌اندازی تا سنکرونیزم کامل..... ۶۱

- شکل (۵-۶): جریان موتور در فرآیند راه‌اندازی..... ۶۲
- شکل (۵-۷): الف) ولتاژ القایی ب) چند سیکل ابتدایی ولتاژ القایی ماشین..... ۶۳
- شکل (۵-۸): مش بندی ماشین LSAFPM..... ۶۵
- شکل (۵-۹): توزیع چگالی شار در سرعت سنکرون در شرایط عملکردی پایدار..... ۶۶
- شکل (۵-۱۰): نحوه تغییرات مسیر خطوط شار از راه‌اندازی تا سنکرونیسم کامل..... ۶۷
- شکل (۵-۱۱): پاسخ سرعت در مدل‌سازی دینامیک گذرایی با استفاده از FEM و مقایسه با مدل تحلیلی..... ۶۸
- شکل (۵-۱۲): الف- پاسخ سرعت به ازای صفحه به طول 0.4 میلیمتر. ب- پاسخ سرعت به ازای صفحه به طول 0.6 میلیمتر..... ۶۹
- شکل (۵-۱۳): پاسخ سرعت در انواع سائزهای مختلف ابعادی میله‌های قفس..... ۷۰
- شکل (۵-۱۴): پاسخ سرعت در ازای گشتاورهای بار مختلف با میله به طول 2.5 میلیمتر..... ۷۱
- شکل (۵-۱۵): الف- پاسخ سرعت به ازای میله قفس به طول 7.7 میلیمتر. ب- پاسخ سرعت به ازای میله قفس به طول 13 میلیمتر..... ۷۱
- شکل (۵-۱۶): حداکثر گشتاور مجاز جهت راه‌اندازی موفق نسبت به طول محوری میله‌های قفس..... ۷۲
- شکل (۵-۱۷): الف- توان ورودی موتور در پروسه بارگذاری. ب- تغییرات سرعت موتور در پروسه بارگذاری با دو قفس مسی و آلومینیومی..... ۷۴
- شکل (۵-۱۸): جریان تک میله قرار گرفته در قفس (لحظه راه‌اندازی)..... ۷۴
- شکل (۵-۱۹): الف) جریان لحظه‌ای استاتور در عملکرد سنکرون..... ۷۵
- شکل (۵-۲۰): پاسخ سرعت به ازای ورود اغتشاش در دو حالت با قفس و بدون قفس..... ۷۶
- شکل (۶-۱): منحنی مغناطیسی ماده Neomax-42 در $100^{\circ}C$ ۸۰
- شکل (۶-۲): جریان‌های گردابی در آهنربا در بی‌باری..... ۸۱

- شکل (۳-۶): موقعیت نقاط در نظر گرفته شده جهت بررسی مغناطیس‌زدایی آهنربا..... ۸۲
- شکل (۴-۶): چگالی شار نقاط مختلف تعیین شده در آهنربا در نصف دوره تناوب و در حالت ژنراتوری بی‌بار..... ۸۳
- شکل (۵-۶): چگالی شار نقاط مختلف در سطح PM در عملکرد بار نامی..... ۸۵
- شکل (۶-۶): نحوه عملکرد ترمزی در موتور سنکرون PM..... ۸۶
- شکل (۷-۶): پاسخ سرعت در حالت ترمزی و قطع از شبکه..... ۸۶
- شکل (۸-۶): جریان سه فاز استاتور در عملکرد ترمزی..... ۸۷
- شکل (۹-۶): چگالی شار در نقاط مختلف در سطح PM در لحظه ترمز..... ۸۸
- شکل (۱۰-۶): جریان راه‌اندازی موتور LSAFPM..... ۹۰
- شکل (۱۱-۶): توزیع چگالی جریان در لحظه راه‌اندازی بدون قفس در یک استپ..... ۹۱
- شکل (۱۲-۶): چگالی شار نقاط مختلف PM در زمان راه‌اندازی مستقیم موتور..... ۹۲
- شکل (۱۳-۶): ساختار بهینه شده قفس راه‌انداز ماشین سنکرون مغناطیس‌دائم شار محوری..... ۹۳
- شکل (۱۴-۶): مقایسه رفتار راه‌اندازی دو نوع قفس (پاسخ سرعت)..... ۹۳
- شکل (۱۵-۶): چگالی شار نقاط مختلف PM در زمان راه‌اندازی مستقیم موتور و مقایسه دو حالت قفس جدید و قدیم..... ۹۴

فهرست جداول

- جدول (۱-۱): رفتار مغناطیسی مواد مختلف..... ۱۰
- جدول (۲-۱): مشخصه دمای کوری مواد مغناطیسی مختلف..... ۱۱
- جدول (۱-۳): پارامترهای اولیه طراحی موتور..... ۲۹
- جدول (۲-۳): کلیه پارامترهای موتور طراحی شده..... ۲۹
- جدول (۱-۴): پارامترهای ابعادی قفس راه انداز..... ۵۳
- جدول (۱-۶): درصد مغناطیس زدایی در نقاط مختلف سطحی PM در لحظه ترمز..... ۸۹

فصل اول

مقدمه

۱-۱. مقدمه

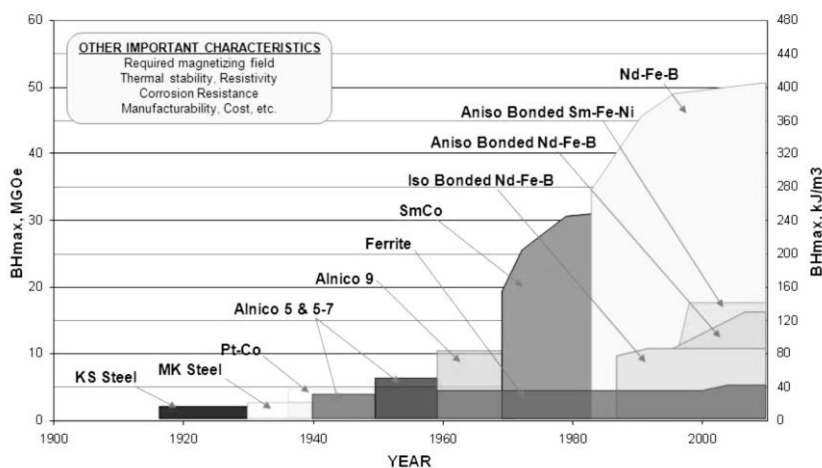
امروزه ماشین‌های الکتریکی نقش بسیار مهمی را در صنعت و در زندگی روزمره انسان‌ها به خود اختصاص داده‌اند. از لحظه تولید انرژی الکتریکی تا مصرف آن، ماشین‌های الکتریکی بیشترین نقش را ایفا می‌کنند. ماشین‌های الکتریکی با اصول تبدیل انرژی می‌توانند انرژی مورد نیاز ما را تامین کنند، اگر ماشین، انرژی مکانیکی را به الکتریکی تبدیل کند آن را ژنراتور می‌نامند و اگر انرژی الکتریکی را به مکانیکی تبدیل کند موتور نامیده می‌شود. تمامی اصول عملکرد ماشین بر پایه قوانین محکمی است که در الکترومغناطیس بنیان گذاشته شده است. از مهم‌ترین ماشین‌های موجود در صنعت می‌توان به ماشین‌های سنکرون اشاره کرد. با توجه به خاصیت این ماشین‌ها یعنی کار در سرعت سنکرون، معمولاً جهت تولید توان الکتریکی در نیروگاه‌ها از این نوع ماشین به عنوان ژنراتور استفاده می‌شود. ساختار استاتور این ماشین‌ها همانند ماشین‌های القایی هست، ولی روتور این ماشین‌ها دارای سیم‌پیچ تحریک با تغذیه یکسو می‌باشد. بدلیل مشکلات موجود در تامین و تغذیه جریان یکسو برای سیم‌پیچ تحریک به دلیل آمپرهای بالا، می‌توان به جای استفاده از تحریک سیم‌پیچی شده از آهنرباهای دائم^۱ استفاده کرد. آهنرباهای دائم تولید کننده شار مورد نیاز برای مدار تحریک می‌باشد به طوری که بدون هیچ‌گونه جریان تحریکی میدان مغناطیسی مناسب را در فاصله‌هوایی ماشین ایجاد کنند. با توجه به روند رو به رشد و پیشرفت در زمینه تولید مواد مغناطیس‌دائم، استفاده از این ماشین‌ها هم روز به روز گسترش می‌یابد. بهبود رفتار ماشین‌های سنکرون مغناطیس‌دائم^۲ موازی با افزایش تولید این ماشین‌ها انجام شده است که این مطالعات منجر به دسترسی به مواد مختلف مغناطیس‌دائم و ساختارهای مختلف ماشین‌های مغناطیس‌دائم شده است.

1 - Permanent Magnet

2 - Permanent Magnet Synchronous Machine

۲-۱. مروری بر سیر تکامل ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم

در روند تکامل ماشین‌های مغناطیس دائم توسعه ساختارهای مختلف ممکن برای ماشین هم جهت با توسعه مواد مغناطیس دائم می‌باشد. سیر مطالعات بر روی مواد مغناطیس دائم از سال ۱۹۶۶ شروع شده و توسط دکتر کرال ماده ساماروئوم کبالت^۱ ساخته شد [۱]. ادامه مطالعات به بهبود رفتار ماده ساماروم کبالت و افزایش انرژی ذخیره شده در آن منجر شد. در سال ۱۹۸۳ شرکت ژنرال موتور موفق به ساختن ماده NdFeB ^۲ شد. میزان انرژی مغناطیسی که این ماده نسبت به ساماروم کبالت تولید می‌کند بسیار بیشتر بود بنابراین سیر تکاملی ماده NdFeB شروع شد. ماده اولیه که در سال‌های ابتدایی کشف شد دارای انرژی ۲۹۰ کیلوژول بر مترمکعب بود. با توسعه فناوری و پیشرفت در ساختار ماده NdFeB در سال ۲۰۰۲ انرژی این ماده به ۴۰۹ کیلوژول بر مترمکعب افزایش پیدا کرد. در شکل (۱-۱) روند رو به رشد در تکنولوژی تولید مواد مغناطیس دائم تا سال ۲۰۱۰ آورده شده است.



شکل (۱-۱): پیشرفت در زمینه تولید مواد مغناطیس دائم [۲]

همان‌طور که در شکل (۱-۱) مشاهده می‌کنید، ماده NdFeB در اندازه ابعادی مساوی با مواد

1 - SmCo

2 - Neodymium, Iron and Boron

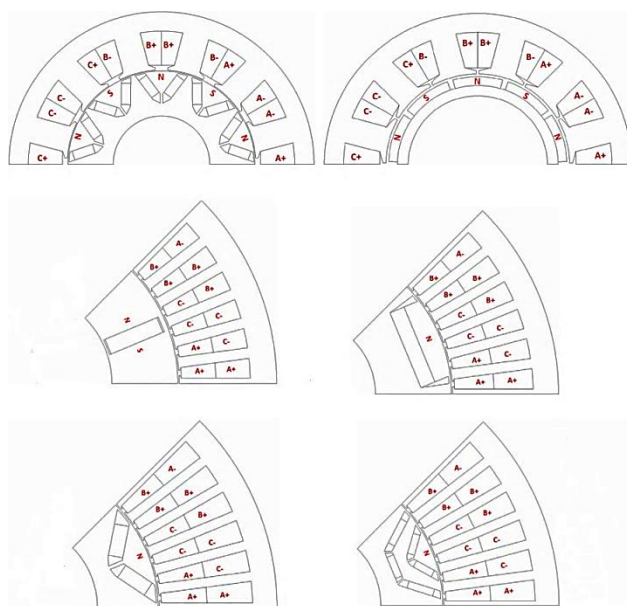
دیگر، انرژی بیشتری ذخیره می‌کند. البته موارد زیادی را می‌توان بین آهنرباها مقایسه نمود که در مقالات مربوطه به تفصیل بیان شده است.

با توجه به اینکه در ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم جریان تحریک و مشکلات ناشی از تامین جریان تحریک موجود نیست پس می‌توان به ساختارهای بسیار متفاوتی در مقایسه با ماشین‌های سنکرون با روتور سیم‌پیچی شده دست پیدا کرد. مطالعات متعددی طی چند سال اخیر به طراحی دقیق و شناخت رفتاری انواع ساختارهای مختلف ماشین‌های مغناطیس دائم پرداخته‌اند. به‌طور کلی سه نوع ماشین سنکرون مغناطیس دائم که به لحاظ ساختاری ممکن می‌باشد، معرفی شده است.

۱-۲-۱. ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم شار شعاعی^۱ (RFPM)

در این نوع ماشین‌ها همانند ماشین‌های سنکرون متداول چون جهت شار به صورت شعاعی می‌باشد شار شعاعی نامیده می‌شوند [۳]-[۶]. بدلیل اینکه سیم‌پیچ استاتور این ماشین‌ها همانند ماشین‌های معمولی می‌باشد و با توجه به تولیدات فراوان ماشین‌های سنکرون متداول، این ساختار اولین ایده برای ماشین‌های مغناطیس دائم بوده است. مطالعات زیادی بر روی نحوه قرارگیری آهنربا در روتور انجام شده است، که منجر به شناخت ساختارهای آهنربا داخلی و آهنربا سطحی شده است. در شکل زیر ساختارهای مختلف ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار شعاعی آورده شده است.

1 -Radial Flux Permanent Magnet Synchronous Machine

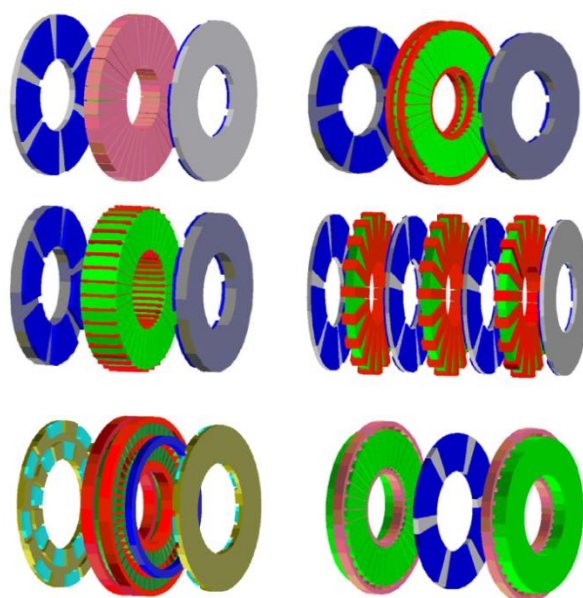


شکل (۱-۲): ساختار مختلف ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار شعاعی [۷]

۲-۲-۱. ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم شار محوری^۱ (AFPM)

در ساختارهای شار شعاعی به دلیل این که طول محوری ماشین بزرگ می‌باشد، در بعضی کاربردهای خاص محدودیت ایجاد می‌شود. در سفارشات که طول ماشین نسبت به قطر آن باید کوچک‌تر باشد استفاده از ماشین‌های شار محوری پیشنهاد می‌شود. این ساختار با توجه به مزایای فراوانی که به لحاظ توپولوژی ایجاد می‌کند با روند رو به رشد بسیار سریعی مواجه شده است. بطور کلی راندمان ماشین‌های مغناطیس دائم سنکرون بسیار بالا است اما نسبت توان به حجم (چگالی توان) ماشین شار محوری از شار شعاعی بیشتر است [۸]. همچنین قابلیت منحصر به فرد این نوع ساختار این است که می‌توانیم ماشین‌های با چند طبقه را با تکنولوژی بسیار ساده‌تر نسبت به نوع شار شعاعی تولید کرد که این امر موجب شده است که در حجم مساوی توان تولیدی ماشین‌های شار محوری از شار شعاعی بیشتر شود، همچنین ثابت بودن و حداکثر بودن راندمان در بارهای مختلف از مزایای منحصر به فرد ماشین شار محوری می‌باشد [۹، ۱۰]. در شکل زیر ساختارهای مختلف ماشین سنکرون آهنربا دائم شار محوری آورده شده است.

1 - Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machine

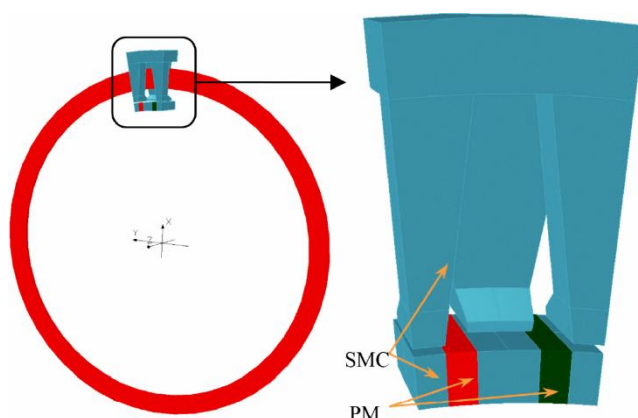


شکل (۳-۱): ساختار مختلف ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار محوری [۱۱]

۳-۲-۱. ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم شار متقاطع^۱ (TFPM)

ماشین‌های شار متقاطع به دلیل ساختاری که دارند به راحتی می‌توان تعداد فازهای ماشین را تغییر داد که این مزیت باعث می‌شود که در بارهای مختلف راندمان موتور ثابت بماند. از جمله مزیت‌های بارز این نوع ساختار نسبت به مدل‌های دیگر می‌توان به بیشتر بودن چگالی توان آن‌ها اشاره کرد [۱۲، ۱۳]. همچنین به دلیل اینکه در این ساختار معمولاً آهنرباها به صورت داخلی می‌باشد، مسیر شار عکس‌العمل آرمیچر از محل قرارگیری آهنربا نمی‌باشد، بنابراین تاثیر عکس‌العمل آرمیچر بر روی مواد مغناطیس دائم قرارگرفته درون روتور بسیار کمتر نسبت به ساختار با PMهای سطحی می‌باشد. با وجود مزایای فراوان ماشین‌های شار متقاطع، بدلیل تکنولوژی بسیار پیشرفته مورد نیاز برای ساخت موروک استاتور این نوع ماشین و همچنین نوع شکل خاص کفشک‌های روتور موارد منجر به ساخت بسیار ناچیز و مطالعات بسیار کمی در این زمینه انجام شده است. در شکل زیر ماشین شار متقاطع با قطب چنگالی آورده شده است.

1 - Transverse Flux Permanent Magnet Synchronous Machine



شکل (۱-۴): ساختار یک قطب ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار متقاطع [۱۲]

۳-۱. ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم با راه‌اندازی مستقیم (LSPMSM)^۱

در تمامی موتورهای سنکرون به دلیل اینکه تحریک این ماشین‌ها یکسو است و در سرعت صفر میدان مغناطیسی ساکن در فاصله ایجاد می‌کنند پس توانایی راه‌اندازی مستقیم در این موتورها وجود ندارد، برای استفاده ماشین به عنوان موتور، معمولاً از سیستم‌های اینورتری با فرکانس متغیر استفاده می‌کنند [۱۴]. سه راه‌حل جهت راه‌اندازی موتور سنکرون وجود دارد:

۱- چرخاندن موتور توسط یک محرک خارجی و رساندن سرعت موتور به نزدیکی سرعت سنکرون و همزمان، اتصال به شبکه و قطع محرک خارجی

۲- کاهش فرکانس تغذیه استاتور همزمان با تغییر در ولتاژ استاتور، و راه‌اندازی توسط یک سیستم کنترلی دقیق

۳- استفاده از خاصیت راه‌اندازی ماشین‌های القایی که با استفاده از قفس، راه‌اندازی موتور را انجام می‌دهند، با این تفاوت که در ماشین‌های سنکرون با توجه به وجود میدان مغناطیسی تحریک، پس از راه‌اندازی موفق، ماشین در سرعت سنکرون در شرایط نامی کار می‌کند.

1- Line Start Permanent Magnet Synchronous Machine

با توجه به نوع استفاده از موتور استفاده از راه‌حل‌های ۲ و ۳ متفاوت می‌باشد. در صورتی که موتور نیاز به کنترل سرعت در هنگام کار نامی داشته باشد، استفاده از اینورتر جهت راه‌اندازی مفید می‌باشد، اما با توجه به هزینه بسیار بالای ادوات الکترونیک قدرت و درایو مربوطه در صورتی که بخواهیم از موتور سنکرون در مواردی استفاده کنیم که فقط کار در سرعت سنکرون مورد نیاز باشد در اینجا استفاده از قفس راه‌انداز بسیار پرکاربرد جلوه می‌کند. البته استفاده از قفس در صورتی که کاربرد کنترل سرعت مدنظر باشد، باز هم مفید واقع می‌شود. به علت اینکه عملکرد اینورتر مبتنی بر کلیدزنی عناصر الکترونیک قدرت می‌باشد، هارمونیک جریان در خروجی اینورتر به موتور تزریق می‌شوند و سبب هارمونیکی شدن شار ناشی از عکس‌العمل آرمیچر در فاصله هوایی ماشین می‌شود که موجب اختلال در عملکرد پایدار موتور و سبب کاهش چگالی شار مغناطیسی آهنربا دائم می‌شود. در سال‌های اخیر مطالعات بر روی ماشین‌های سنکرون مغناطیس‌دائم با راه‌اندازی مستقیم افزایش چشم‌گیری داشته است. با مروری بر مطالعات انجام گرفته می‌توان دید که اکثر مطالعات مربوط به ماشین‌های سنکرون مغناطیس‌دائم شار شعاعی می‌باشد [۱۵]–[۱۹]. با توجه به ساختار روتور این نوع ماشین‌ها، که مشابه با روتور ماشین‌های القایی می‌باشد، می‌توان از فرایند تجربی طراحی قفس برای ماشین القایی استفاده نمود.

۴-۱. مشخصه‌های مهم و دسته‌بندی مواد

مواد را می‌توان به لحاظ خاصیت مغناطیسی آن‌ها به ۵ دسته کلی تقسیم‌بندی کرد [۲۰]:
 فرومغناطیس^۱، پارامغناطیس^۲، دیامغناطیس^۳، پادفرومغناطیس^۴ و فری مغناطیس^۵

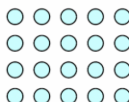
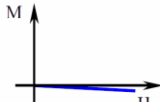
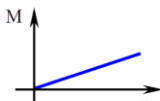
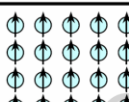
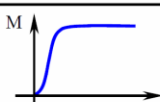
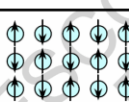
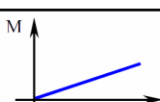
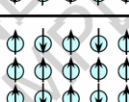
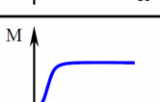
۱- **مواد فرومغناطیس**: در مواد فرومغناطیسی گشتاور مغناطیسی اتم‌ها در یک جهت و به صورت موازی می‌باشد. اگر یک ماده فرومغناطیسی را تحت میدان مغناطیسی خارجی قرار دهیم، با

1- Ferromagnetism
 2- Paramagnetism
 3- Diamagnetism
 4- Antiferromagnetism
 5- Ferrimagnetism

افزایش شدت میدان خارجی، حوزه‌های مغناطیسی بیشتری با میدان خارجی هم جهت می‌شوند. اگر شدت میدان خارجی را خیلی زیاد کنیم و تمام خطوط گشتاور مغناطیسی ماده با میدان خارجی هم جهت شده باشند با افزایش بیشتر میدان خارجی دیگر هیچ تقویت میدانی رخ نمی‌دهد در این شرایط پدیده اشباع مغناطیسی اتفاق می‌افتد. با قطع میدان خارجی هر چند هر کدام از حوزه‌ها به طور جداگانه دارای گشتاور مغناطیسی می‌باشند اما برآیند کلی میدان مغناطیسی ماده صفر می‌شود [۲۰].

۲- پارامغناطیس: در مواد پارامغناطیس هر اتم به خودی خود دارای گشتاور مغناطیسی می‌باشد اما در صورتی که میدان مغناطیسی خارجی وجود نداشته باشد، جهت این گشتاورهای مغناطیسی به صورت کاتوره‌ای در ماده پخش می‌شود. منشا این توزیع گشتاور این است که در این مواد نیروی بسیار ضعیفی بخاطر هم جهت شدن خطوط میدان حوزه‌های مغناطیسی وجود دارد. در صورتی که ماده تحت میدان مغناطیسی خارجی قرار بگیرد بسته به شدت آن میدان، جهت مغناطش اتم‌ها با میدان خارجی هم جهت می‌شود. قابل ذکر است در صورتی که میدان خارجی قطع شود دوباره جهت گشتاور مغناطیسی اتم‌ها به شکل کاتوره‌ای در ماده توزیع می‌شود. در جدول (۱-۱) جهت خطوط میدان مغناطیسی در هر نوع از مواد آورده شده است [۲۱].

جدول (۱-۱): رفتار مغناطیسی مواد مختلف [۲۱]

Type	Atomic / Magnetic Behaviour	
Dia-magnetism	 Atoms have no magnetic moment	
Para-magnetism	 Atoms have randomly oriented magnetic moments	
Ferro-magnetism	 Atoms have parallel aligned magnetic moments	
Antiferro-magnetism	 Atoms have anti-parallel aligned magnetic moments	
Ferri-magnetism	 Atoms have mixed parallel and anti-parallel aligned magnetic moments	

۳- **دیامغناطیس:** در مواد دیامغناطیس هنگامی که ماده تحت میدان خارجی نباشد، اتم‌های موجود در ماده هیچ‌گونه گشتاور مغناطیسی ندارند. در صورتی که ماده تحت میدان مغناطیس خارجی قرار گیرد جهت گشتاور مغناطیسی M اتم‌های آن، در جهت مخالف با میدان مغناطیسی شکل می‌گیرند و با آن مخالف می‌کنند.

۴- **پادفرومغناطیس:** مواد پادفرومغناطیس بسیار شبیه به مواد فرومغناطیس هستند. با توجه به ساختار گشتاور مغناطیسی اتم‌های این ماده، متوجه می‌شویم که گشتاور مغناطیسی هر اتم با اتم مجاورش تقریباً هم‌اندازه و در خلاف جهت همدیگر هستند.

۵- **فری مغناطیس:** فری مغناطیس فقط در موادی که دارای دو ساختار کریستالی دارند دیده می‌شود، گشتاور مغناطیسی اتم‌های ماده به صورت ذاتی به گونه‌ای است که ترکیبی از گشتاورهای موازی و آنتی‌موازی را تشکیل داده است. در صورتی که ماده فری مغناطیس در میدان مغناطیسی خارجی قرار بگیرد بسته به شدت میدان خطوط گشتاورهای مغناطیسی هم جهت با میدان خارجی

می‌شود. نکته قابل توجه این است که در صورت قطع میدان خارجی جهت گشتاور مغناطیسی به حالت قبل برنمی‌گردد و در جهت میدان خارجی می‌باشد. معمولاً این مواد را مغناطیس سخت هم می‌گویند.

در صنعت با قراردادن ماده فری‌مغناطیس تحت میدان خارجی شدید، آهنربا دائم تولید می‌کنند. فرآیند تولید مواد مغناطیس دائم بسته به نوع آن ماده متفاوت می‌باشد، ولی به طور کلی عبارتند از: زینترینگ، غلطک‌کاری، چکش‌کاری، تزریق در قالب و ریخته‌گری

البته نکته قابل توجه در تمامی مواد مغناطیسی، بررسی دما و تاثیر دما بر از بین بردن خاصیت مغناطیسی ماده می‌باشد. با افزایش دما و رسیدن به دمای کوری، ماده خاصیت مغناطیسی خود را از دست می‌دهد. در جدول (۱-۲) انواع مواد مغناطیسی و دمای کوری مواد آمده است.

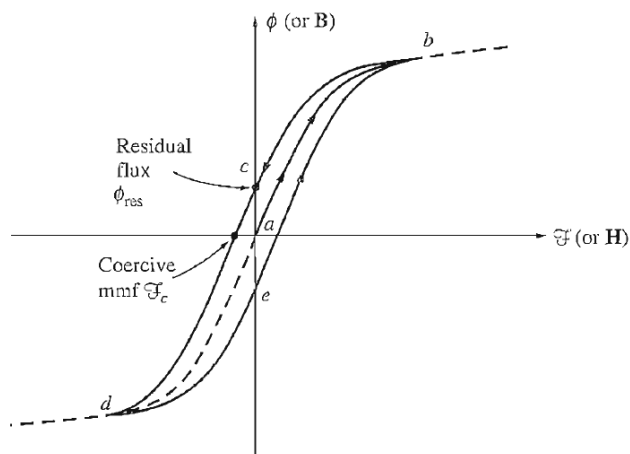
جدول (۱-۲): مشخصه دمای کوری مواد مغناطیسی مختلف [۲۱]

Material	Magnetic Structure	J_s at 298K (T)	T_c (°C)
Fe	Ferro-	2.15	770
Co	Ferro-	1.76	1131
Ni	Ferro-	0.60	358
$Nd_2Fe_{14}B$	Ferro-	1.59	585
$SmCo_5$	Ferro-	1.14	720
Sm_2Co_{17}	Ferro-	1.25	820
$BaO.6Fe_2O_3$	Ferri-	0.48	450
$SrO.6Fe_2O_3$	Ferri-	0.48	450
Fe 3wt% Si	Ferro-	2.00	740
Fe 4wt% Si	Ferro-	1.97	690
Fe 35wt% Co	Ferro-	2.45	970
Fe 78wt% Ni	Ferro-	0.70	580
Fe 50wt% Ni	Ferro-	1.55	500
$MnO.Fe_2O_3$	Ferri-	0.51	300

۱-۵. بررسی پدیده مغناطیس‌زدایی مواد مغناطیس دائم

در مواد مغناطیس دائم با توجه به اینکه تحت میدان خارجی قوی خطوط گشتاور مغناطیسی آنها هم‌جهت شده است پس این مواد تحت میدان مغناطیسی خارجی قوی در خلاف جهت گشتاور

مغناطیسی اتم‌ها، خاصیت مغناطیسی خود را از دست می‌دهند که همان پدیده دمگنتایز شدن^۱ ماده رخ می‌دهد. مهم‌ترین مشخصه مواد مغناطیسی، منحنی مغناطیسی ماده می‌باشد.



شکل (۵-۱): منحنی مغناطیسی مواد (حلقه هیستریزس) [۲۲]

همان‌طور که در شکل (۵-۱) مشاهده می‌کنید منحنی در نقطه ابتدایی از صفر شروع می‌شود. با افزایش میدان مغناطیسی خارجی تعداد حوزه‌هایی که با میدان خارجی هم‌جهت می‌شوند افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر شدت میدان خارجی حوزه‌های بیشتری هم‌جهت می‌شوند و در نهایت تمامی حوزه‌های مغناطیسی ماده با میدان خارجی هم‌جهت می‌شوند. با افزایش بیشتر میدان خارجی دیگر حوزه‌ای نیست که با میدان هم‌جهت نشده باشد و این نشان‌گر این است که هر ماده مغناطیسی، به اندازه خاصی می‌تواند میدان خارجی را تقویت کند. که این مقدار متناسب با سطح حلقه هیستریزس می‌باشد. با کاهش میدان خارجی گشتاور مغناطیسی بعضی از حوزه‌ها جهت خود را از دست می‌دهند اما تعدادی از حوزه‌ها همان جهت میدان خارجی را به خود می‌گیرند و به این صورت پدیده پسماند مغناطیسی اتفاق می‌افتد، به شکلی که با صفر کردن میدان خارجی هنوز مغناطش برآیند کلی ماده صفر نشده است. با دقت در شکل (۵-۱) در نقطه c با صفر شدن میدان خارجی مقدار چگالی شار B_r باقی می‌ماند. شدت میدانی که ماده را در مقابل بازگشت به گشتاور مغناطیسی صفر حفظ می‌کند، شدت میدان خنثی کننده می‌گویند که در مواد فری مغناطیس بسیار قوی و در مواد فرومغناطیس

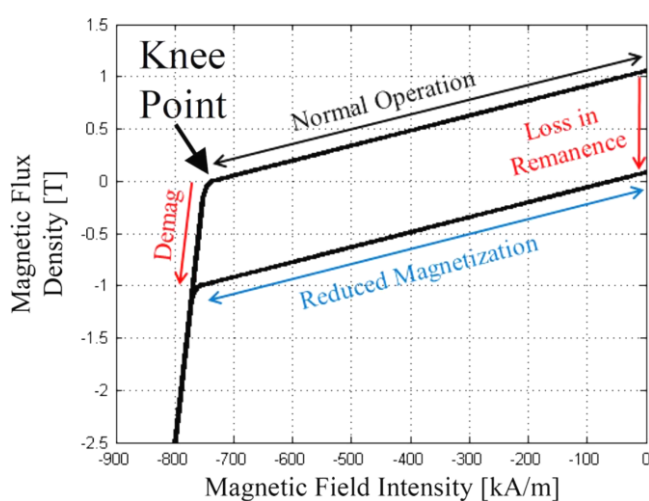
1- Demagnetizing

بسیار ضعیف است. پس می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش شدت میدان خنثی‌کننده انرژی ذخیره شده در ماده هم افزایش می‌یابد.

میزان انرژی ماده مغناطیسی متناسب با سطح حلقه هیستریزیس می‌باشد. واحد این انرژی $\frac{j}{m^3}$ است. حلقه پهن‌تر برابر است با شدت میدان خنثی‌کننده بیشتر و انرژی ذخیره شده بیشتر. اگر منحنی شکل (۵-۱) را به چهار قسمت تقسیم کنیم ربع دوم منحنی، منحنی مغناطیسی‌زدایی ماده گفته می‌شود.

۶-۱. بررسی منحنی مغناطیسی‌زدایی

در صورتی که ماده مغناطیس‌دائم تحت هر یک از عوامل خنثی‌کننده‌ی خاصیت مغناطیسی قرار بگیرد، مقدار چگالی شار مغناطیسی ماده کاهش پیدا می‌کند.



شکل (۶-۱): منحنی مغناطیسی مواد (منحنی بازگشت) [۲۳]

با توجه به شکل (۶-۱) می‌توان دید که در صورتی که تحت هر شرایطی خاصیت مغناطیسی آهنربا کاهش پیدا کند، چگالی شار ماده به سمت پایین حرکت می‌کند. نکته مهم این است که اگر چگالی شار جدید، در زیر نقطه زانویی منحنی باشد، با حذف میدان مغناطیسی خارجی، چگالی شار مغناطیسی بعضی از نواحی ماده، به مقدار اولیه خود برنمی‌گردد و در جهت منحنی جدیدی به نام

منحنی بازگشت حرکت می‌کند و مغناطیس‌زدایی برگشت ناپذیر در ماده رخ می‌دهد [۲۴]. شیب این خط تقریباً برابر با شیب حلقه هیستریزیس در نقطه B_r است.

۱-۷. جمع‌بندی فصل

در این فصل ابتدا به بررسی انواع مواد مغناطیس‌دائم موجود و روند توسعه آن‌ها اشاره شد. سپس مروری بر انواع ماشین‌های سنکرون ساخته شده با تکنولوژی آهنربادائم به جای سیم‌پیچی تحریک اشاره شده است. با توجه به اینکه عملکرد صحیح ماشین سنکرون مغناطیس‌دائم به عملکرد صحیح آهنربا در ماشین سنکرون مغناطیس‌دائم گره خورده است، بنابراین در انتها به بررسی رفتار آهنربا در ماشین می‌پردازیم.

فصل دوم

ساختارهای متداول قفس و مدل سازی های انجام

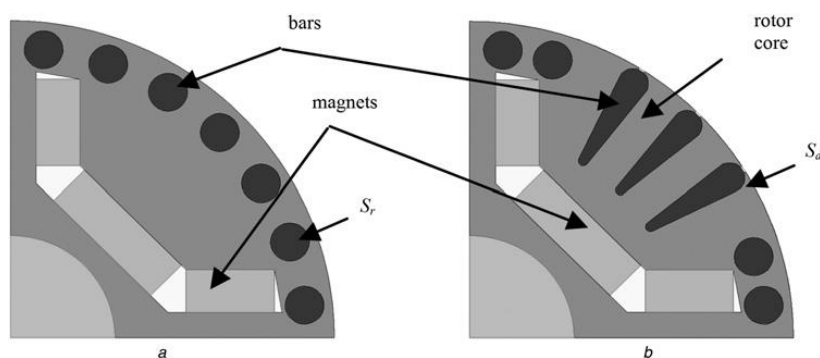
گرفته

۱-۲. مقدمه

شروع مطالعات بر روی سیم پیچ دمپر ماشین های سنکرون با روتور سیم پیچی شده از سال ۱۹۸۰ آغاز شد. در آن سال ها محققان با در نظر گرفتن تعداد میله مشخصی که به صورت تجربی ابعاد آن را در نظر می گرفتند، توزیع جریان در میله ها را محاسبه می کردند [۲۶، ۲۵]. با توسعه امکانات نرم افزاری اجزاء محدود، محققان با کمک شبیه سازی های FEM سه بعدی نقش میله های انتهایی و همچنین شکل ساختاری میله ها را در رفتار سیم پیچ دمپر مورد مطالعه قرار دادند. همچنین به بررسی نقش دمپر در کاهش هارمونیک های فاصله هوایی پرداختند. با توسعه مواد مغناطیس دائم و استفاده آن ها در ماشین های سنکرون و با توجه به اینکه تامین کننده میدان مغناطیسی تحریک در ماشین های سنکرون مغناطیس دائم، آهنرباها می باشند، پس بهبود رفتار آهنرباها در شرایط گذرای ماشین از موارد بسیار مهم می باشد، بنابراین مطالعات زیادی در مورد نقش قفس در بهبود عملکرد آهنربا دائم و حفظ خاصیت مغناطیسی آهنربا تحت شرایط گذرای انجام شده است. با در نظر گرفتن نیاز مصارف صنعتی و خانگی به اتصال مستقیم موتور به شبکه بدون درایو و به دنبال آن کاهش هزینه، طی چند سال اخیر مطالعات بیشتری روی راه اندازی مستقیم ماشین های مغناطیس دائم با کمک قفس راه انداز انجام شده است.

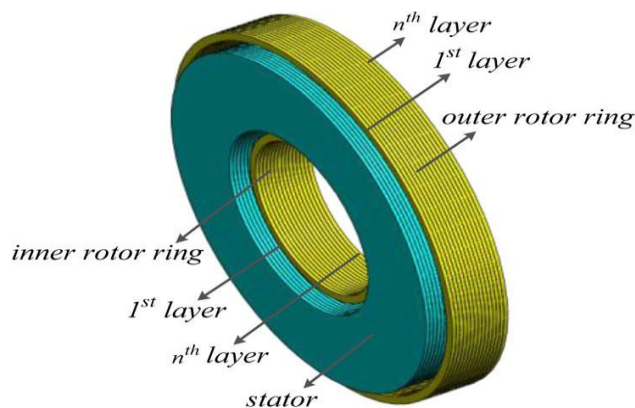
۲-۲. انواع ساختارهای قفس برای ماشین های سنکرون آهنربا دائم

با توجه به اینکه ماشین های سنکرون مغناطیس دائم تنوع ساختاری بسیار گسترده ای دارند، پس می توان ساختارهای مختلفی برای قفس این ماشین ها در نظر گرفت. اما به طور کلی ماشین های مغناطیس دائم را با دو توپولوژی شار شعاعی و شار محوری معرفی می کنند. در نوع شار شعاعی، ساختار کلی قفس، همانند قفس ماشین القایی می باشد. در [۲۷] به دو نوع ساختار میله های قفس برای ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار شعاعی با قطب های داخلی اشاره شده است.



شکل (۲-۱): ساختار مختلف قفس در ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار شعاعی [۲۷]

همان طور که در شکل (۲-۱) مشاهده می کنید میله های قفس در دو حالت متقارن و نامتقارن نشان داده شده است. البته ساختارهای متفاوت دیگری برای ماشین سنکرون شار شعاعی می توان بیان کرد، ولی فرم کلی آن به صورت تقریبی، همانند ساختار قفس ماشین القایی متداول ترسیم می شود. در ماشین های سنکرون مغناطیس دائم شار محوری مطالعات بسیار کمی در زمینه طراحی قفس راه انداز انجام شده است. طراحی و تحلیل یک نوع ساختار برای قفس راه انداز ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار محوری پرداخته شده است [۲۸]. توپولوژی بیان شده به صورت شکل (۲-۲) است.



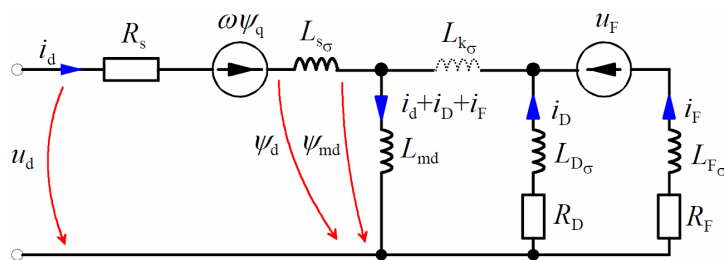
شکل (۲-۲): یک نوع ساختار قفس برای ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار محوری [۲۸]

با دقت در شکل (۲-۲) رینگ در نظر گرفته شده توسط ایشان به صورت لایه به لایه و به شکلی است که سیم پیچ های استاتور را در شعاع داخلی و خارجی دربر می گیرد، البته در صورتی که قفس به صورت یک پارچه در نظر گرفته شود باز هم عملکرد مناسب خود را نشان می دهد. تنها مطالعات در

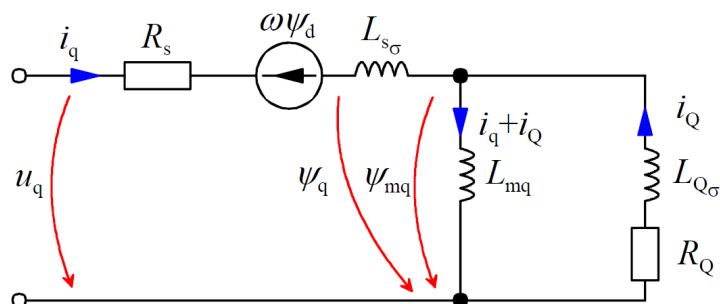
زمینه قفس راه انداز ماشین شار محوری به مورد فوق محدود می شود.

۳-۲. بررسی مدار معادل ماشین سنکرون با وجود قفس

ماشین های الکتریکی معمولاً به دو صورت تحلیلی با مدار معادل مغناطیسی و یا با مدل اجزاء محدود، مدل سازی می شوند. در مقالات متعددی به بررسی مدل تحلیلی برای ماشین های سنکرون با وجود قفس راه انداز پرداخته اند. با توجه به اینکه در ماشین های سنکرون معمولی و ماشین های سنکرون مغناطیس دائم با قطب های داخلی، ساختار مغناطیسی ماشین به صورت قطب برجسته می باشد و اندوکتانس های محور d و q برابر نیستند پس از مدار معادل d, q برای مدل تحلیلی استفاده می شود. در [۱] به بررسی و تحلیل دقیق مدار معادل ماشین سنکرون با قطب برجسته و روتور سیم پیچی شده پرداخته شده است. در شکل (۳-۲) مدار معادل کامل ماشین سنکرون کشیده شده است.



الف

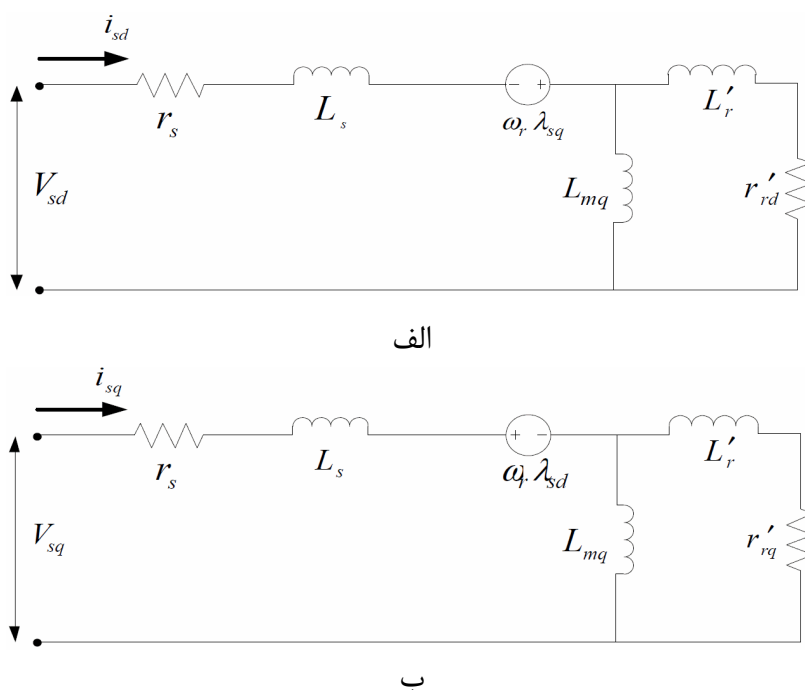


ب

شکل (۳-۲): الف) مدار معادل محور d ماشین سنکرون با روتور سیم پیچ شده. ب) مدار معادل محور q [۱]
در مدار معادل فوق R_s ، مقاومت سیم پیچی هر فاز استاتور، $\omega\psi_d$ و $\omega\psi_q$ ، مولفه ولتاژ القایی در

راستای محورهای d و q ، $L_{s\sigma}$ ، اندوکتانس نشتی استاتور، L_{mq} و L_{md} ، اندوکتانس مغناطیس کنندگی محورهای q و d ، $L_{D\sigma}$ و $L_{Q\sigma}$ ، اندوکتانس های خودی دمپر در راستای محورهای d و q ، $L_{F\sigma}$ ، اندوکتانس خودی سیم پیچ تحریک، R_F ، مقاومت سیم پیچ تحریک می باشد.

در صورتی که ماشین سنکرون با تحریک مغناطیس دائم باشد پارامتر مقاومت تحریک حذف می شود. در شکل (۲-۴) به بررسی مدار معادل تحلیلی ماشین سنکرون مغناطیس دائم با قفس راه انداز در دستگاه d, q پرداخته شده است [۲۸].



شکل (۲-۴): الف) مدار معادل محور d ماشین سنکرون مغناطیس دائم. ب) مدار معادل محور q .

در مدار معادل فوق r_s ، مقاومت سیم پیچی هر فاز استاتور، $\omega_r \lambda_{sq}$ و $\omega_r \lambda_{sd}$ ، مولفه ولتاژ القایی در راستای محورهای d و q ، L_s ، اندوکتانس استاتور، L_{mq} و L_{md} ، اندوکتانس مغناطیسی محورهای q و d ، L'_r ، اندوکتانس های خودی قفس ارجاع داده شده به استاتور، r'_{rq} ، مقاومت معادل قفس در سمت استاتور می باشد.

۴-۲. طراحی قفس راه انداز و بررسی رفتار راه اندازی موتور سنکرون

مغناطیس دائم با قفس و روش های بهبود عملکرد راه اندازی

طی سالهای اخیر مطالعات متعددی در زمینه راه اندازی مستقیم ماشین سنکرون مغناطیس دائم انجام گرفته است. در زمینه طراحی قفس ماشین های شار شعاعی با توجه به اینکه ساختار قفس تقریباً مشابه با قفس ماشین های القایی می باشد، برای طراحی، از روش های طراحی قفس برای ماشین های القایی استفاده می کنند. طراحی قفس ماشین شار شعاعی بصورت تجربی و یا با شبیه سازی به روش اجزاء محدود تعیین می گردد. البته در منابع مختلفی طراحی قفس القایی آورده شده است ولی تمامی روابط برپایه روش های تجربی می باشد. در کتاب طراحی ماشین های الکتریکی گردان [۱]، جهت طراحی میله های قفس القایی، سطح هر میله دمپر^۱ ۲۰ تا ۳۰ درصد سطح مقطع سیم پیچ های استاتور در نظر می گیرند، همچنین در ماشین های تک فاز سطح هر میله می تواند فراتر از ۳۰ درصد باشد. همچنین سطح مقطع میله های انتهایی^۲ ۳۰ تا ۵۰ درصد میله های دمپر در هر قطب در نظر گرفته می شود. اطلاعات فوق بر اساس آزمایش پس از قرار دادن میله ها و تحلیل اجزاء محدود و یا نتایج تجربی حاصل از ساخت بدست آمده است. همچنین در صورتی که قفس در ماشین های شار شعاعی جهت راه اندازی مورد استفاده قرار بگیرد، قواعد زیر باید مورد توجه قرار بگیرد که در آن Q_r تعداد شیارهای قفس روتور و Q_s تعداد شیار استاتور می باشد [۱].

۱- برای کاهش هارمونیک های گشتاور، شیارهای روتور باید از قاعده زیر پیروی کند.

$$Q_r < 1.25Q_s \quad (۱-۲)$$

$$Q_r \neq 6pg \quad (۲-۲)$$

1- Damper Bar
2- End Ring

۲- برای اینکه هارمونیک های شیارى در گشتاور سنكرون نقش كمترى داشته باشند باید داشته

باشيم:

$$Q_r \neq Q_s$$

$$Q_r \neq \frac{1}{2} Q_s \quad (3-2)$$

$$Q_r \neq 2Q_s$$

۳- جهت جلوگیری از هارمونیک های شیارى خطرناک داریم:

$$Q_r \neq Q_s \pm 2p$$

$$Q_r \neq 2Q_s \pm 2p \quad (4-2)$$

$$Q_r \neq Q_s \pm p$$

$$Q_r \neq \frac{Q_s}{2} \pm 2p$$

۴- برای کاهش لرزش های مکانیکی داریم:

$$Q_r \neq 6pg \pm 1$$

$$Q_r \neq 6pg \pm 2p \pm 1 \quad (5-2)$$

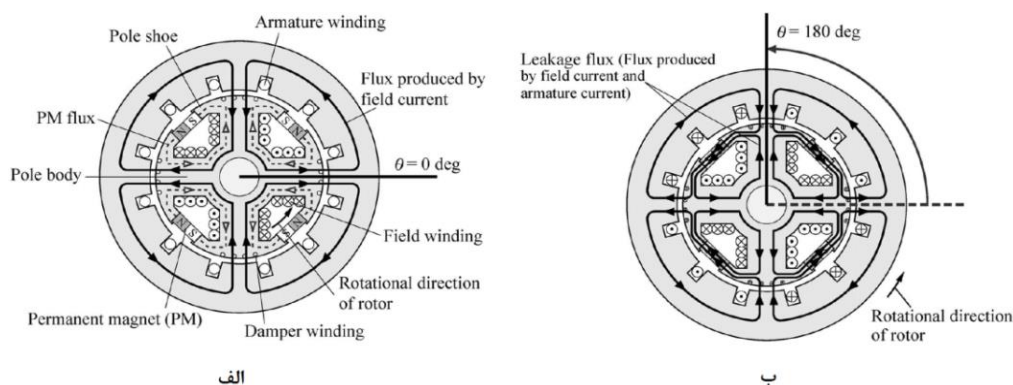
$$Q_r \neq 6pg \pm 2p \mp 1$$

تمامی قواعد تجربى فوق، برای قفس راه انداز ماشین سنكرون شار شعاعى مناسب مى باشد. برای ماشین های مغناطیس دائم شار محوری تنها در یک مقاله به طراحی قفس راه انداز روتور پرداخته شده است. در ادامه ساختاری از قفس راه انداز که در [۲۸] به آن اشاره شده است بیان می شود. در فرآیند

طراحی تحلیلی، برای طراحی حلقه های داخلی و خارجی فقط مولفه شار شعاعی را در نظر می گیرند. چون تنش مماسی برای تولید گشتاور راه اندازی کافی می باشد، بنابراین از آن برای طراحی قفس راه انداز استفاده می کنند. نتایج ساخت نشان داد که با استفاده از این روش به رفتار مناسبی جهت راه اندازی موتور سنکرون شار محوری آهنربا دائم دست پیدا شده است.

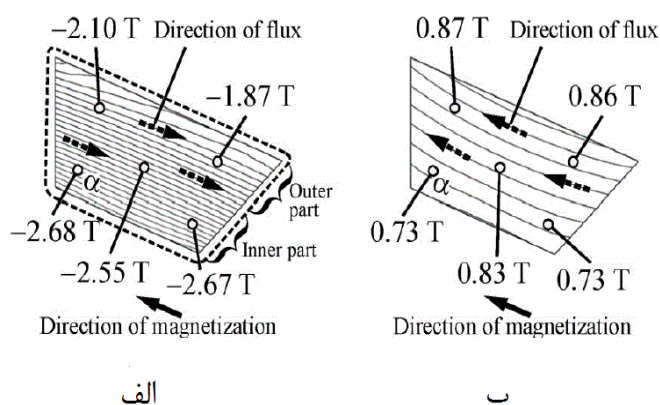
۵-۲. تاثیر دمپر در کاهش پدیده مغناطیس زدایی و کاهش نوسانات

جهت کاهش مغناطیس زدایی آهنربا روش های گوناگونی وجود دارد. در [۲۹] به تحلیل مغناطیس زدایی ماشین سنکرون قطب برجسته روتور سیم پیچی شده به همراه آهنربای دائم در شرایط خطای اتصال کوتاه سه فاز پرداخته شد.



شکل (۵-۲): الف) عملکرد پایدار موتور در شرایط نامی. ب) عملکرد موتور در شرایط بروز خطا [۲۹].

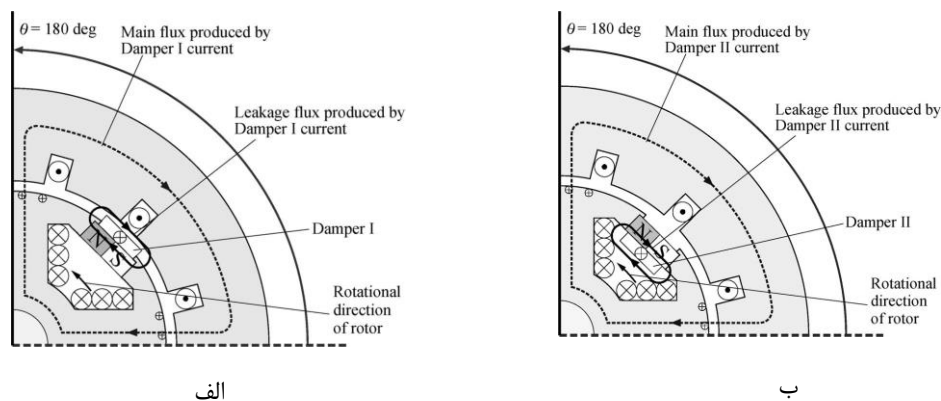
همان طور که در شکل (۵-۲) مشاهده می کنید، در حالت عملکرد پایدار و بی بار شارهای ناشی کفشک های قطب بسیار ناچیز است و هیچ شاری از مگنت ها عبور نمی کند. در شرایطی که خطای اتصال کوتاه رخ داده است شار ناشی سیم پیچی آرمیچر و کفشک قطب از آهنرباها عبور می کند. با توجه به جهت شار امکان مغناطیس زدایی وجود دارد. در شکل (۶-۲) می بینید که در الف جهت شار ناشی با جهت شار ذاتی آهنربا مخالف است.



شکل (۶-۲): الف) شارهای ناشی در خلاف جهت شار اصلی آهنربا. ب) شار ناشی بسیار ضعیف و موافق جهت

شار اصلی آهنربا [۲۹].

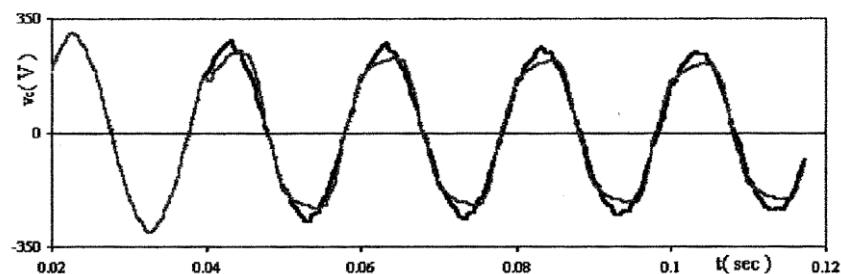
با توجه به شکل (۶-۲) مشاهده می شود که مغناطیس زدایی مگنت در شعاع داخلی بیشتر از شعاع خارجی اتفاق می افتد، این پدیده به سبب شکل خاص کفشک قطب و آهنربا می باشد. با توجه به اینکه فاصله کفشک قطبی با هم در شعاع داخلی کمتر می باشد، پس خطوط شار ناشی بیشتری از این ناحیه عبور می کند و سبب مغناطیس زدایی بیشتری در قسمت داخلی می شود. با تغییر شکل آهنربا از دوزنقه به مستطیل تا حدودی این مشکل را حل کردند. جهت بهبود عملکرد آهنرباها استفاده از میله های دمپر با ساختار مناسب بسیار مفید می باشد. به صورتی که در شعاع داخلی و خارجی در سطح آهنربا میله های دمپر را قرار دادند. نتایج شبیه سازی اجزاء محدود نشان داد که شار تولیدی دمپر می تواند به بهبود رفتار آهنربا در شرایط گذرای ماشین کمک کند. در شکل (۷-۲) جهت شار تولیدی دمپر در شرایط خطای سه فاز آورده شده است. البته در شکل زیر ساختار متمرکز دمپر را نشان داده است، ولی می توان این ساختار را به صورت توزیع شده در سطح مگنت ها در نظر گرفت.



شکل (۷-۲): الف) شار تولیدی میله متمرکز دمپر در شعاع خارجی روتور در جهت تقویت شار مگنت. ب) شار

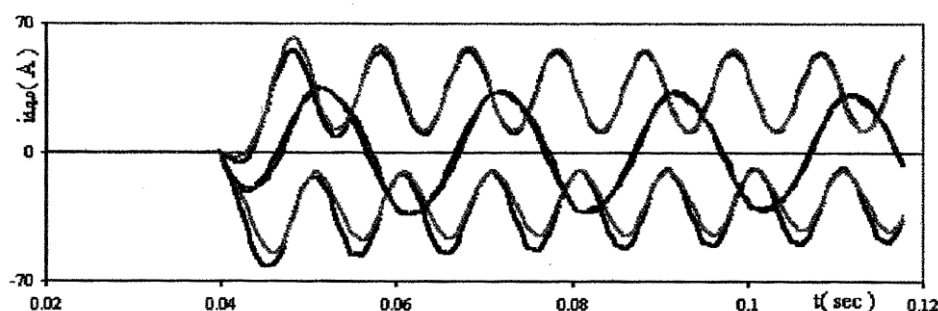
تولیدی میله متمرکز دمپر در شعاع خارجی روتور در جهت تقویت شار مگنت [۲۹].

یکی دیگر از کاربردهای قفس دمپر بهبود رفتار ماشین در صورت بروز شرایط غیر نرمال در ماشین سنکرون می باشد. در [۳۰] با تغییر میله های موجود در سطح قطب به سیم پیچی دمپر، رفتار ژنراتور سنکرون قطب برجسته در شرایط عملکردی نامتعادل به روش اجزاء محدود و اندازه گیری مورد بررسی قرار گرفت.



شکل (۸-۲): محاسبه ولتاژ فازی در بار القایی نامتعادل با بررسی دو حالت با قفس و بدون قفس دمپر [۳۰].

در شکل (۸-۲) ولتاژ فازی ژنراتور در حالت بار القایی نامتعادل در دو حالت با قفس و بدون قفس دمپر رسم شده است. نتایج نشان داده است در حالتی که قفس دمپر در کفشک قطب وجود داشته باشد، دامنه نوسانات ولتاژ نسبت به حالتی که قفس وجود نداشته باشد، کمتر می باشد. همچنین در شکل (۹-۲) به بررسی جریان ژنراتور در دو حالت با قفس و بدون قفس اشاره شده است.



شکل (۲-۹): محاسبه جریان فازی مولفه d-q-o در حالت بار القایی نامتعادل [۳۰].

در شکل (۲-۹) خط بالا، جریان محور d خط وسط، جریان مولفه o و خط پایین، جریان مولفه q می باشد. مشاهده می شود که تاثیر قفس دمپر در کاهش نوسانات جریان محور q بسیار قابل ملاحظه می باشد.

۲-۶. جمع بندی فصل

در این فصل به مطالعات انجام شده در مورد موضوع پایان نامه توسط محققان پرداخته شد. بررسی این مطالعات دید وسیعی جهت یافتن کاستی و ایجاد نوآوری در تحقیق ایجاد می کند. در این قسمت، مروری بر انواع ساختارهای قفس و روش های طراحی قفس انجام شده است. همچنین مطالعاتی که در زمینه پدیده مغناطیس زدایی در شرایط مختلف عملکردی و نقش دمپر در بهبود عملکرد ماشین در شرایط گذرای بیان شده است، به طور خلاصه مورد بحث و تحلیل قرار گرفت.

فصل سوم

معرفی و بررسی ماشین سنکرون مغناطیس‌دائم شار

محوری و انتخاب ساختار مناسب برای قفس

۳-۱. مقدمه

به جهت اینکه قفس راه انداز فقط در ابتدای راه اندازی نقش مهمی در موتور مغناطیس دائم ایفا می کند، و در هنگام کار پایدار نقشی در تولید گشتاور الکترومغناطیسی ندارد، پس ابتدا ماشین سنکرون مورد نظر بدون قفس و برای شرایط کار نامی طراحی می شود. در این فصل به طراحی پارامترهای ابعادی موتور مغناطیس دائم شار محوری می پردازیم.

۳-۲. مروری بر طراحی موتور سنکرون مغناطیس دائم شار محوری

ساختار موتورهای شار محوری به صورتی است که هر کدام از دیسک ها به تنهایی توانایی تولید گشتاور در سرعت سنکرون را دارند، به همین منظور با افزایش تعداد لایه ها چگالی گشتاور ماشین افزایش می یابد. در تمامی الگوریتم های طراحی ماشین ابتدا پارامترهای اولیه توسط مشتری تعیین می شود. این پارامترها به لحاظ ابعادی، الکتریکی، و شرایط محیطی مشخص می شوند. پارامترهای ابعادی عبارتند از: قطر خارجی ماشین، طول محوری ماشین. پارامترهای محیطی عبارتند از: دمای عملکرد نامی موتور، نحوه قرارگیری، رطوبت محیط، ارتعاشات محل نصب موتور و غیره. پارامترهای الکتریکی عبارتند از: توان موتور، تعداد فازها، ولتاژ تغذیه موتور، فرکانس نامی، راندمان، ماکزیمم چگالی شار هسته و آهنربا و بارگذاری الکتریکی موتور.

موتور سنکرون AFPM مورد نظر با تمامی جزئیات و پارامترها به دقت طراحی شده است. برای جلوگیری از طولانی تر شدن پایان نامه از بیان جزئیات طراحی خودداری شده است.

در جدول (۳-۱) پارامترهای اولیه طراحی موتور که به سفارش مشتری تعیین می گردد آورده شده است. این پارامترها به عنوان خطوط قرمز در طراحی و عامل محدودیت ساز طراحی مطرح می شود.

جدول (۳-۱): پارامترهای اولیه طراحی موتور

پارامتر	واحد	مشخصات
توان نامی	KW	۳/۷
سرعت نامی	RPM	۱۴۰۰
تعداد فازها	-	۳
تعداد لایه‌های موتور	-	۱
فرکانس نامی	Hz	۷۰
ولتاژ مؤثر نامی هر فاز	V	۸۸/۴۶
قطر خارجی هسته استاتور	mm	<۲۳۰
طول محوری کلی ماشین	mm	<۹۰

بعد از مشخص شدن پارامترهای اولیه طراحی جنس مواد مورد استفاده تعیین می‌گردد. بطور خلاصه می‌توان گفت، ماده مورد نظر برای آهنربا، NdFeB^1 یا Neomax-42 با چگالی شار متوسط ۱/۱ تسلا در نظر گرفته می‌شود. جنس هسته استاتور و روتور 50JN400 در نظر گرفته می‌شود. بعد از طراحی کامل و دقیق موتور پارامترهای ابعادی آن به صورت زیر در جدول بیان می‌شود.

جدول (۳-۲): کلیه پارامترهای موتور طراحی شده

پارامتر	واحد	مشخصات
ولتاژ القایی داخلی هر فاز ماشین	Pu	۰/۹۱۷
تعداد مسیرهای موازی جریان	-	۱
بارگذاری الکتریکی ویژه	A/m	۱۶۳۵۱/۹
دامنه چگالی شار فاصله هوایی	T	۰/۴۷۲
ماکزیمم چگالی شار در هسته استاتور	T	۱/۶
ماکزیمم چگالی شار در هسته روتور	T	۱/۶

فصل سوم..... معرفی و بررسی ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار محوری و انتخاب ساختار مناسب برای قفس

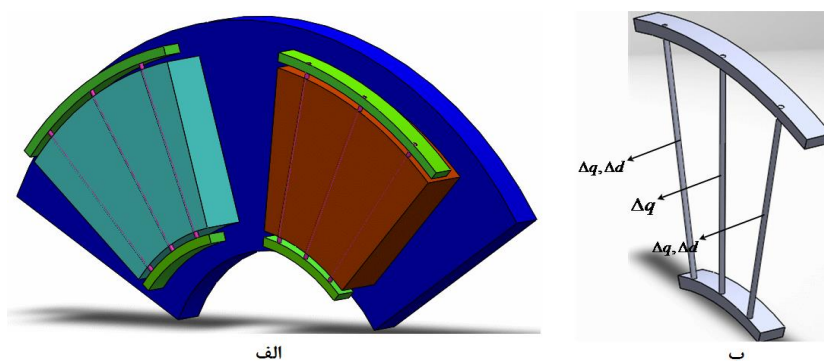
۱/۵	mm	فاصله هوایی بین سطح آهنربای دائم و سیم پیچی
۰/۶	-	نسبت قوس قطب مغناطیس دائم به گام قطب
۰/۵۱۶۲	-	نسبت قطر خارجی به قطر داخلی هسته استاتور
۲۲۰	mm	قطر خارجی هسته استاتور
۱۱۳/۶	mm	قطر داخلی هسته استاتور
۳/۲۶۳	A/mm ²	چگالی جریان در سیم پیچی
۰/۱۵	mm	ضخامت عایق سیم پیچی
۱۹۸	-	تعداد دور سیم پیچی سری استاتور در هر فاز
۳۳	-	تعداد دور سیم پیچی در هر فاز زیر هر قطب
۴	-	تعداد طبقات سیم پیچی
۹/۸	mm	ضخامت کلی سیم پیچی
۱۵/۱	mm	طول محوری هسته استاتور
۸/۱	mm	طول محوری هسته روتور
۱۳	mm	طول محوری آهنربای دائم
۱۶۵/۶۷	mΩ	مقاومت هر فاز سیم پیچی استاتور
۱۰۲/۴	W	تلفات مسی سیم پیچ استاتور
۱۸/۶	W	تلفات آهنی هسته استاتور
۳۸۳/۶۱	mΩ	راکتانس سنکرون ماشین
۱۵ درجه	°	زاویه قدرت
پس فاز ۰/۹۶	-	ضریب قدرت
۹۶	%	راندمان

در این قسمت با تمرکز بر ساختارهای مختلف ممکن برای قفس ماشین AFPM با آهنربا سطحی

و با کمک نرم‌افزار اجزاء محدود به ساختار مناسب دست پیدا می‌کنیم. چون در این تحقیق راه‌اندازی مستقیم جزء موارد مهم می‌باشد، بنابراین قفس نقش تولید گشتاور راه‌اندازی را برعهده دارد. همچنین در سرعت سنکرون قفس، نوسان سرعت را کاهش و دمپ می‌کند. شکل ساختاری مناسب برای قفس راه‌انداز از موارد بسیار مهمی است که در این قسمت به تحلیل دقیق آن می‌پردازیم.

۳-۳. شکل گرافیکی انواع ساختارهای مختلف قفس

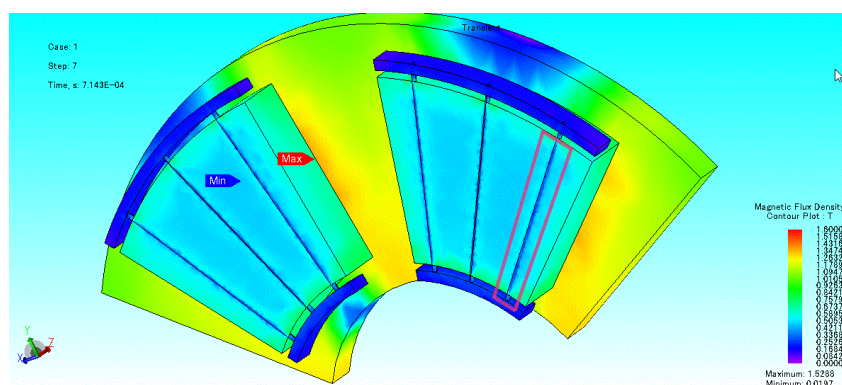
با توجه به نقش عملکردی قفس در ماشین، ساختار مورد نظر تعیین می‌گردد. در صورتی که اغتشاشی به موتور وارد گردد، تغییراتی در سرعت سنکرون ایجاد می‌شود، همچنین تغییراتی در شارهای محور d و q ایجاد می‌شود. در صورتی که بتوان این تغییرات شار را به سرعت دمپ کرد، می‌توانیم به رفتار مناسبی از قفس دست پیدا کنیم. در این صورت ساختار میله‌های قفس باید طوری باشد که تغییرات شار در راستای هر دو محور d و q در جریان میله‌ها تاثیرگذار باشد. اولین ساختاری که از میله‌های قفس (دمپر) در ذهن متبلور می‌شود، طبق الگوی ماشین‌های سنکرون روتور سیم‌پیچی شده، می‌توان به قرار دادن میله‌ها در سطح مگنت‌ها اشاره کرد.



شکل (۳-۱): الف) محل قرارگیری میله‌های قفس در سطح آهنربا. ب) قفس مشابه با دمپر ماشین‌های سنکرون روتور سیم‌پیچی شده

در شکل (۳-۱) یک نمونه از قفس دمپر قرار گرفته در سطح روتور نشان داده شده است. از معایب این ساختار قفس می‌توان به این نکته اشاره کرد که در این حالت میله‌ها، اکثراً تغییرات شار در راستای محور q را مشاهده می‌کنند و عکس‌العمل دمپی آن‌ها در مقابل این تغییرات به ماشین

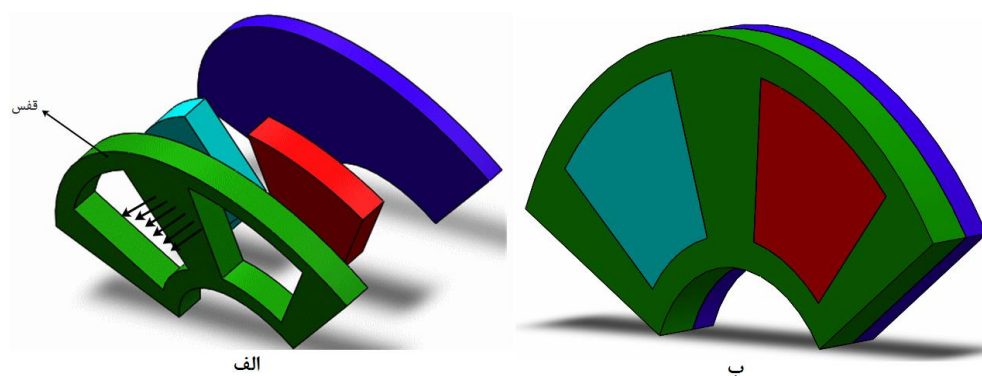
اعمال می‌شود که این رفتار عملکرد ناقصی از دمپینگ نوسانات را نشان می‌دهد. همچنین چون آهنرباها ترد و شکننده می‌باشند، امکان سوراخ‌کاری در سطح آهنربا عملاً ممکن نیست و یا به تکنولوژی بسیار بالایی نیاز دارد. همچنین با مدل‌سازی قفس فوق در نرم افزار اجزاء محدود، مشاهده شد که ناحیه‌ای از سطح مگنت (سطح فاصله هوایی) که میله‌ها داخل آن قرار گرفته هست، به موجب القای جریان در میله‌های دمپر، سبب کاهش چگالی شار آهنربا در اطراف آن ناحیه می‌شود که در شکل (۳-۲) مشخص شده است.



شکل (۳-۲): کاهش چگالی شار در سطح آهنربا به واسطه وجود میله‌ها در سطح PM

با توجه به اینکه جرم روتور از عوامل بسیار مهم در راه‌اندازی موتور می‌باشد، این ساختار دارای جرم بسیار کم می‌باشد.

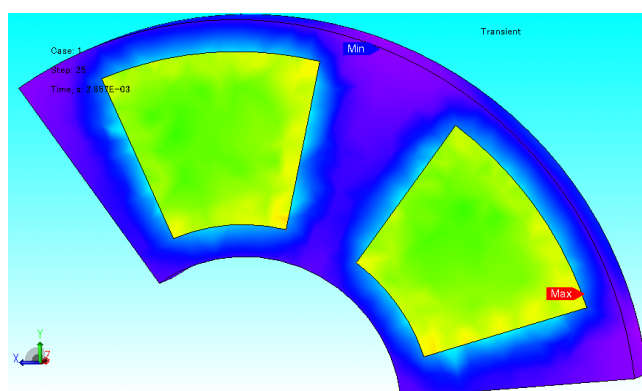
با توجه به معایب ساختار فوق، اگر آهنرباها در سطح روتور باشند فاصله بین آهنربا مکان مناسبی جهت قرارگیری قفس می‌باشد. می‌توانیم با قرار دادن میله یا صفحه در فاصله بین آهنرباها عملکرد مناسبی از قفس را در راه‌اندازی و دمپ نوسانات مشاهده کرد. این ساختار به لحاظ ساخت بسیار ساده‌تر از مورد اول است. در شکل (۳-۳) این نوع قفس را مشاهده می‌کنید.



شکل (۳-۳): الف) شکل گسسته موتور شار محوری مغناطیس‌دائم با قفس یک‌پارچه. ب) شکل کامل شده موتور با قفس یک‌پارچه

با دقت در ساختار قفس شکل (۳-۳) مشاهده می‌شود که تغییرات شار محور d و درصد زیادی از محور q به طور کامل توسط قفس مشاهده می‌گردد و رفتار دمپی مناسبی توسط قفس در مقابل تغییرات شار ناشی از عکس‌العمل آرمیچر در این ساختار می‌توان انتظار داشت. در این حالت قفس باعث می‌شود در صورتی که نوسان شدیدی به موتور وارد شود، نوسانات به سرعت دمپ گردد.

هنگامی که جریان استاتور در اثر اغتشاش زیاد باشد، به خاطر نوساناتی که در سرعت روتور ایجاد می‌شود اختلاف سرعت بین میدان دوار استاتور و روتور ایجاد شود. در این موقعیت جریان‌های گردابی در آهنرباها ایجاد می‌شود. قفس موجود دامن این جریان‌های گردابی ناشی از عکس‌العمل آرمیچر در کناره‌های مگنت را به شدت کاهش می‌دهد.

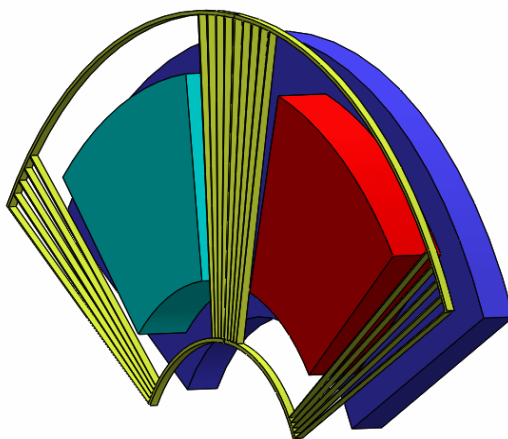


شکل (۳-۴): افزایش چگالی شار در کناره‌های آهنربا نسبت به ناحیه میانی

در شکل (۳-۴) ناحیه زرد رنگ دارای چگالی شار 0.7 تسلا و ناحیه سبز رنگ میانی آهنربا، دارای

چگالی شار 0.6 تسلا می باشد. در حالتی که قفس یک پارچه موجود نباشد، چگالی شار در کل سطح آهنربا 0.6 تسلا می باشد ولی وجود قفس، موجب افزایش چگالی شار در نواحی اطراف آهنربا دائم شده است.

در این ساختار جرم روتور به دلیل ساختار خاص قفس بسیار زیاد می باشد بنابراین جهت بهینه سازی این ساختار از قفس، می توان فاصله بین مگنت ها را بصورت میله هایی در نظر گرفت که در این ناحیه توزیع شده است. توپولوژی شکل (۳-۵) برای عملکرد مناسب قفس در حالت دمپ نوسانات معرفی می گردد.

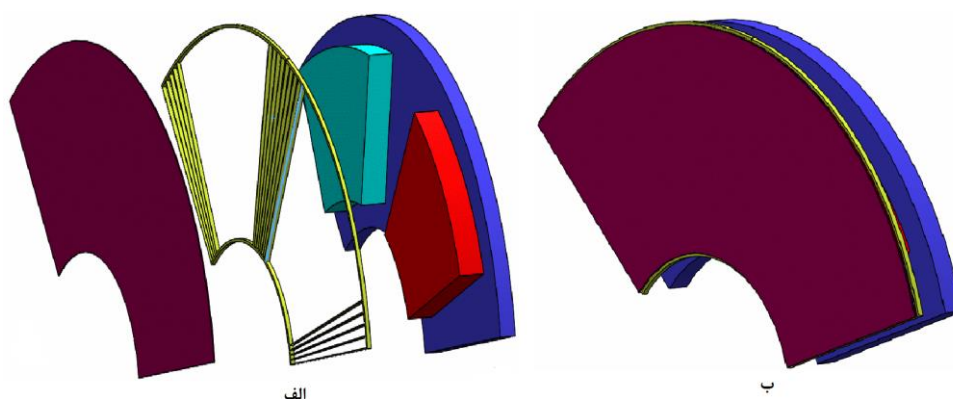


شکل (۳-۵): ساختار قفس با میله های توزیع شده در فاصله بین آهنرباها

در شکل فوق مشاهده می شود که تعدادی میله در فضای بین آهنرباها قرار می گیرد. ساختار قفس در نظر گرفته شده به لحاظ عملکرد دمپی، چون تغییرات شار محورهای d و q را تقریباً به طور کامل مشاهده می کند، بنابراین رفتار مناسبی در دمپ نوسانات از خود نشان می دهد و همچنین جرم وزنی این ساختار نسبت به حالت بالا بسیار کمتر است. نکته مهم در این ساختار این است که با تغییر زاویه بین روتور و استاتور (گردش روتور)، جریان در میله های قفس به طور آزادانه تغییر می کند که این نشان دهنده عملکرد صحیح میله ها در دمپ تغییرات شار در راستای محورهای d و q می باشد.

بخاطر اینکه آهنرباها در سطح روتور می باشند و به جهت جلوگیری از آسیب های مکانیکی و

همچنین محافظت آهنربا از القای جریان‌های گردابی به خاطر وجود شار هارمونیک ناشی از توزیع غیر سینوسی سیم‌پیچی استاتور، با توجه به بزرگ بودن فاصله‌هوایی در ماشین‌های شار محوری می‌توان از صفحه‌ای در فاصله‌هوایی این نوع ماشین به عنوان دمپ کننده نوسانات و راه‌انداز استفاده نمود. همچنین از معایب این ساختار به تکنولوژی بالای مورد نیاز در پروسه ساخت می‌باشد. همچنین ممکن است، در پروسه ساخت وجود صفحه در سطح روتور موجب افزایش فاصله هوایی موتور می‌شود. در شکل (۳-۶) بهترین ساختار جهت قفس راه‌انداز و دمپر آورده شده است.



شکل (۳-۶): الف) شکل گسسته موتور شار محوری مغناطیس دائم با قفس توزیع شده و صفحه سطحی روتور. ب) ساختار اسمبل شده

در اینجا باید توجه کرد که جنس قفس با توجه به کاربرد قفس تعیین می‌گردد. در صورتی که هدف از قفس به عنوان راه‌انداز باشد بهتر است از قفس آلومینیومی استفاده شود اما اگر هدف از قفس، نقش دمپینگ نوسانات باشد، بهتر است از قفس مسی استفاده شود اما این موضوع هیچ‌گونه قطعیتی ندارد.

۳-۴. جمع‌بندی فصل

در این فصل مروری اجمالی بر فرآیند طراحی ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار محوری نمونه پرداخته شده است. نتایج شبیه‌سازی ماشین مورد نظر نشان داد که عملکرد موتوری در سرعت

سنکرون مناسب می‌باشد. همچنین ساختارهای مختلف قفس در ماشین سنکرون مغناطیس‌دائم شار محوری مورد بررسی قرار گرفت. ساختار نهایی انتخاب شده در دو حالت عملکردی راه‌اندازی و دمپ نویس‌ها در موتور با توجه به توضیحات داده شده می‌تواند رفتار مناسبی ایجاد کند.

فصل چهارم

طراحی قفس راه‌انداز برای موتور سنکرون

مغناطیس‌دائم شار محوری

۴-۱. مقدمه

در فصل قبل به بررسی و انتخاب ساختار مناسب جهت قفس راهانداز در ماشین AFPM بدون شیار با مگنت‌های سطحی پرداختیم. طراحی قفس مبتنی بر الگوریتم جامع قابل اجرا در تمامی ماشین‌های LSPM می‌باشد. به دلیل پیچیدگی و نقش‌های متفاوت قفس در موتور سنکرون مغناطیس دائم، تاکنون به جز در موارد بسیار محدودی، قفس راهانداز به طور دقیق طراحی نشده است. به همین دلیل باید الگوریتم جامعی جهت طراحی قفس راهانداز برای ماشین ارائه گردد. در طراحی قفس ماشین AFPM موارد بسیار زیادی باید در نظر گرفته شود که بعضی از آنها به صورت محدودیت می‌باشند. از موارد جانبی کاربرد قفس، می‌توان به نقش قفس در کاهش مغناطیس‌زدایی آهنرباها و همچنین کاهش هارمونیک‌های شار مغناطیسی فاصله‌هوایی اشاره کرد که این موارد می‌توانند در بهینه‌سازی طراحی قفس کمک کنند، در فصول بعدی پدیده مغناطیس‌زدایی به تفصیل مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در این فصل به طراحی دقیق ابعادی قفس راهانداز با الگوریتم جامع و با جزئیات کامل و روابط مربوطه می‌پردازیم.

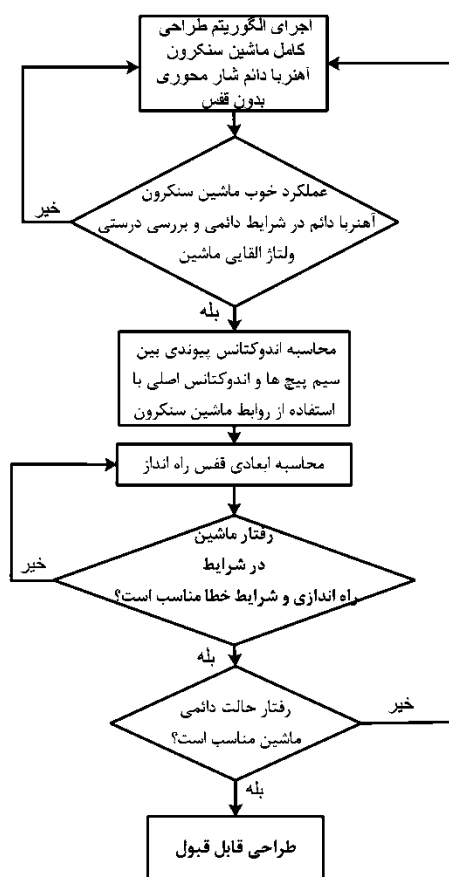
۴-۲. الگوریتم جامع طراحی قفس راهانداز برای ماشین‌های سنکرون

مغناطیس دائم

نقش قفس در ماشین بر پارامترهای زیادی تاثیرگذار است و این امر سبب پیچیدگی در طراحی قفس می‌شود. به همین دلیل در کمتر مواردی به طراحی جامع قفس اشاره شده است. در این تحقیق نقش اصلی قفس، راهاندازی مستقیم ماشین AFPM و ایجاد گشتاور راهاندازی می‌باشد.

با توجه به اینکه اولاً باید موتور طراحی شده در شرایط پایدار نامی عملکرد مناسبی داشته باشد بنابراین بررسی و نقش قفس راهانداز، در اولویت دوم طراحی ماشین LSPM قرار می‌گیرد، زیرا عملکرد ماشین در شرایط پایدار در اولویت عملکرد راهاندازی می‌باشد. بنابراین ابتدا باید ماشین

سنکرون مغناطیس‌دائم به طور کامل طراحی شود. در صورتی که تمامی پارامترهای مغناطیسی ماشین به لحاظ ولتاژ القایی، ضریب‌توان، راندمان، بحث‌های حرارتی و مغناطیس‌زدایی و غیره در شرایط پایدار و در سرعت سنکرون مناسب بود، سپس به طراحی قفس راه‌انداز می‌پردازیم. در موتورهای راه‌انداز مستقیم، قفس گشتاور راه‌اندازی مورد نیاز موتور را تامین می‌کند. همچنین می‌توان به نقش ثانویه قفس در عملکرد دائمی ماشین اشاره کرد، در صورتی که در سرعت سنکرون اغتشاشی به ماشین وارد گردد، قفس نقش دمپینگ نوسانات را ایفا می‌کند. در شکل (۴-۱) الگوریتم جامع طراحی قفس راه‌انداز در تمامی ماشین‌های مغناطیس‌دائم آورده شده است.



شکل (۴-۱): الگوریتم جامع طراحی قفس راه‌انداز ماشین‌های سنکرون مغناطیس‌دائم

با توجه به الگوریتم بیان‌شده در این فصل به طراحی قفس راه‌انداز می‌پردازیم. اصولاً با توجه به اینکه قفس در ماشین بر پارامترهای بسیار زیادی تاثیرگذار است، بنابراین طراحی آن برای تاثیر بر تمامی موارد عملاً امری غیرممکن است. در این تحقیق قفس با در نظر گرفتن یک هدف خاص،

طراحی و سپس جهت بهینه‌سازی با استفاده از مدل‌سازی تحلیلی و همچنین با استفاده از مدل‌سازی در نرم‌افزار اجزاء محدود، تاثیر قفس بر پارامترهای دیگر هم‌چون مغناطیس‌زدایی آهنربا، مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین فرضیات اولیه‌ای در طراحی قفس راهانداز باید در نظر گرفت. اولین فرضیه این است که عرض میله‌ها از جهت عرضی بین مگنت‌ها ثابت باشند. یعنی تعداد آن‌ها و عرض هر دسته میله بین آهنرباها در ابتدای طراحی ثابت در نظر گرفته می‌شود. همچنین به دلیل اینکه طول قفس در راستای شعاعی از طول شعاعی روتور بیشتر نشود و سطح مماسی میله‌ها با سیم‌پیچی استاتور، بیشتر از طول شعاعی سیم‌پیچی استاتور باشد، طول شعاعی میله‌ها به همراه حلقه‌های انتهایی و صفحه سطحی روتور، به اندازه طول شعاعی هسته روتور در نظر گرفته می‌شود. البته فرضیات بیان‌شده به لحاظ عملی کاربردی و بسیار مورد قبول واقع می‌شوند. با توضیحاتی که در فصل قبل بیان شد، چون هدف از قفس نقش راه‌اندازی آن می‌باشد، جنس قفس را آلومینیوم در نظر می‌گیریم. در این تحقیق ابتدا قفس مورد نظر طراحی می‌شود و سپس جهت بهینه‌سازی، در فصول بعد پارامترهای دیگر ماشین از قبیل دمپ نوسانات و یا مغناطیس‌زدایی مورد بحث قرار می‌گیرد و به بهینه‌ترین طراحی به لحاظ ساختاری دست پیدا می‌کنیم.

۴-۳. تعیین پارامترهای ماشین سنکرون مغناطیس دائم با قفس

جهت تعیین ابعاد قفس، در مرحله اول باید پارامترهای مغناطیسی ماشین سنکرون مغناطیس دائم با وجود قفس را تعیین نمود. با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود و با استفاده از اطلاعات بیان شده در استاندارد IEC 60034-4 می‌توان تمامی پارامترهای ماشین را تعیین کرد [۳۱]. پارامترهای مهم ماشین سنکرون مغناطیس دائم با قفس عبارتند از: اندوکتانس سنکرون، اندوکتانس خودی قفس، اندوکتانس مغناطیسی استاتور و قفس، مقاومت قفس، مقاومت استاتور، اندوکتانس سنکرون زیرگذرا

۴-۳-۱. تعیین اندوکتانس سنکرون

در یک سیستم الکترومغناطیسی، اندوکتانس خودی به صورتی است که جریانی از سیم‌پیچ عبور داده می‌شود (جریان قسمت‌های دیگر صفر باشد)، نسبت شار پیوندی همان سیم‌پیچ به جریان خودی آن سیم‌پیچ را اندوکتانس خودی می‌گویند. در صورتی که به یک فاز جریان اعمال شود (جریان فازهای دیگر صفر باشد)، از تقسیم شار پیوندی فاز دیگر بر جریان این سیم‌پیچ اندوکتانس متقابل بدست می‌آید. در ماشین سنکرون مغناطیس‌دائم جهت تعیین اندوکتانس سنکرون باید اثر آهنرباها را از سیستم مغناطیسی حذف کنیم و فقط نقش استاتور و توزیع سیم‌بندی آن بر شار پیوندی بین سیم‌پیچی‌ها مشاهده گردد. چون آهنرباها به صورت سطحی در روتور قرار می‌گیرند، با توجه به اینکه ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی آهنربا و هوا تقریباً مشابه است و با توجه به اینکه سطح سیم‌پیچی استاتور تقریباً صاف در نظر گرفته می‌شود، بنابراین اندوکتانس‌های ماشین تابعی از موقعیت روتور نیستند و ثابت می‌باشد. ماتریس اندوکتانس کلی ماشین بدون قفس به

صورت زیر است:

$$L = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} \end{bmatrix} \quad (۱-۴)$$

برای تعیین راکتانس سنکرون در ماشین قطب صاف از رابطه ولتاژ ماشین استفاده می‌کنیم:

$$V_{sa} = L_{AA} \frac{di_a}{dt} + L_{AB} \frac{di_b}{dt} + L_{AC} \frac{di_c}{dt} \quad (۲-۴)$$

همچنین در ماشین سنکرون سه فاز متقارن داریم:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (۳-۴)$$

پس با فرض قطب صاف بودن و متقارن بودن فازها نسبت به همدیگر داریم:

$$L_{AB} = L_{AC} = L_{CA} = L_{BA} = L_{BC} = L_{CB} \quad (۴-۴)$$

با ادغام معادلات فوق برای معادله ولتاژ یک فاز داریم:

$$V_{sa} = (L_{AA} - L_{AB}) \frac{di_a}{dt} \quad (5-4)$$

بنابراین راکتانس سنکرون در هر فاز ماشین به صورت زیر بیان می شود:

$$X_s = 2\pi f (L_{AA} - L_{AB}) \quad (6-4)$$

با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود، ابتدا آهنربای روتور را به صورت هوا فرض می کنیم، سپس با اعمال جریان مستقیم ۱ آمپر فقط به فاز A، شار پیوندی خودی سیم پیچ فاز A و شار سیم پیچ B را مشاهده می کنیم و اندوکتانس سنکرون بدست می آید.

۴-۳-۲. تعیین مقاومت سیم پیچی هر فاز

مقاومت هر سیم بر اساس رابطه کلی زیر تعیین می شود:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad (7-4)$$

مقاومت هر فاز سیم پیچی از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$R_{1ph} = \frac{N_s \cdot \rho \cdot l_{av}}{A \cdot a} \quad (8-4)$$

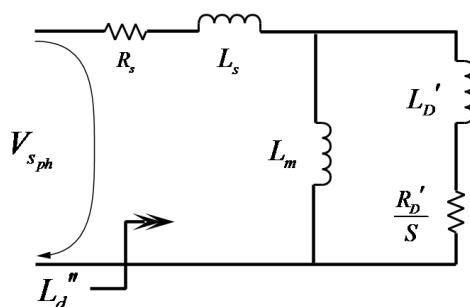
که در آن، N_s تعداد دور هر فاز، ρ مقاومت ویژه هر ماده، l_{av} طول متوسط یک دور سیم پیچی، A سطح مقطع هر دور سیم و a تعداد مسیرهای موازی جریان می باشد.

۴-۳-۳. تعیین اندوکتانس زیر گذرای سنکرون

با توجه به اینکه قفس فقط در لحظات گذرای ماشین عملکرد اصلی خود را ایفا می کند بنابراین جهت تعیین پارامترهای آن از اندوکتانس زیر گذرای سنکرون^۱ استفاده می شود. در این تحقیق با توجه

به اینکه امکان استفاده از نرم افزار اجزاء محدود وجود دارد، در تعیین پارامترها با کمک نرم افزار و با استفاده از آزمایشات مختلف در ماشین LSAFPM طبق استاندارد IEC 60034-4 [۳۱] پارامترهای مربوطه تعیین می گردد. استفاده از این روش (استفاده از استاندارد)، این امکان به ما داده می شود که بتوانیم به صورت مشابه در موارد عملی هم از این روش استفاده نمود.

طبق استاندارد IEC 60034-4 با اتصال ولتاژ سه فاز با فرکانس نامی به موتور، و با ثابت نگه داشتن روتور، آزمایش روتور قفل انجام می شود. باید دقت کرد که در این آزمایش آهنرباها از ماشین جدا شوند. نکته مهم این است که با توجه به افزایش دما در سیم پیچی ها و قفس، نباید مدت زمان این تست از ۱۰ ثانیه بیشتر شود. و یا می توان آزمایش را در نصف ولتاژ نامی انجام داد. معمولا در این تست جریان در سیم پیچ های هر فاز بیشتر از دو برابر می شود. با توجه به این که ماشین تقریبا قطب صاف فرض شده است، پس روتور در هر جهتی ثابت شود و آزمایش در همان جهت انجام شود هیچ مشکلی ایجاد نمی کند و اندوکتانس های بدست آمده برای محور d و q یکسان می باشد. در آزمایش روتور قفل مدار معادل ماشین سنکرون همانند مدار معادل ترانسفورماتور می شود، به صورتی که در شکل (۲-۴) مدار معادل مغناطیسی ماشین در آزمایش روتور قفل آمده است.



شکل (۲-۴): مدار معادل ماشین LSPM تحت آزمایش روتور قفل

مقدار اندوکتانس زیرگذرای سنکرون که در تست روتور قفل بدست می آید بصورت زیر بیان می شود:

$$L_d'' = \frac{V_{s_{ph}}}{I_{lock} \omega_s} \quad (۹-۴)$$

البته در حالت روتور قفل مقدار لغزش یک می‌باشد و همچنین با توجه به مدار معادل بیان شده برای ماشین سنکرون در حالت روتور قفل شده می‌توانیم مقدار اندوکتانس فوق زیر گذرای سنکرون بر حسب پارامترهای قفس روتور را به صورت زیر بیان کنیم [۱].

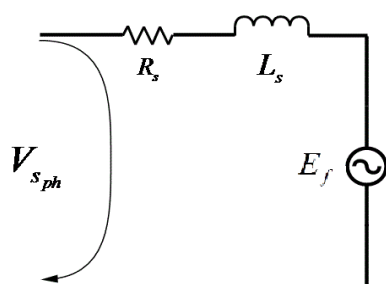
$$L_d'' = L_s + \frac{L_m \cdot L_D}{L_m + L_D} \quad (۱۰-۴)$$

بنابراین می‌توانیم مقدار اندوکتانس قفس روتور را بر حسب اندوکتانس فوق زیر گذرا و اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی بین قفس و استاتور به صورت زیر بیان کرد:

$$L_D = \frac{L_m \cdot (L_d'' - L_s)}{L_m - L_d'' + L_s} \quad (۱۱-۴)$$

۴-۳-۴. تعیین اندوکتانس مغناطیسی بین قفس روتور و استاتور

تعیین اندوکتانس مغناطیسی بین قفس روتور و استاتور از موارد مهم می‌باشد. با توجه به اینکه در سرعت سنکرون قفس دمپر در عملکرد پایدار ماشین در حالت کلی هیچ تاثیری در ماشین سنکرون ندارد، بنابراین مدار معادل ماشین در سرعت سنکرون باید به فرم زیر تبدیل گردد. یعنی پارامترهای شاخه دمپر عملاً بی اثر گردند که در شکل (۳-۴) مدل ماشین سنکرون بدون قفس آورده شده است.



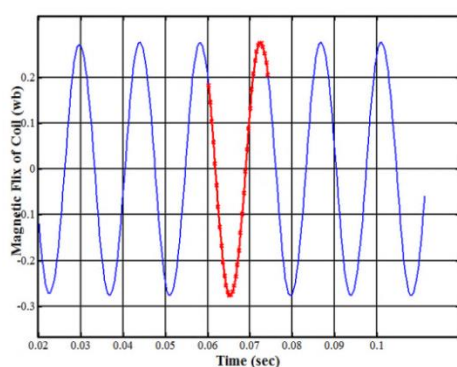
شکل (۳-۴): مدار معادل ماشین سنکرون مغناطیس دائم بدون قفس (شرایط عملکرد پایدار) [۱].

اما با توجه به ساختار موجود و با توجه به اینکه شار هارمونیک در صفحه قفس در هر جهتی می‌تواند تولید شود و اثر دمپی آن نیز متعاقباً در شار فاصله‌هوایی ایجاد می‌شود، بنابراین اثر کاهش این هارمونیک‌ها با استفاده از اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی بین قفس و استاتور بدست می‌آید.

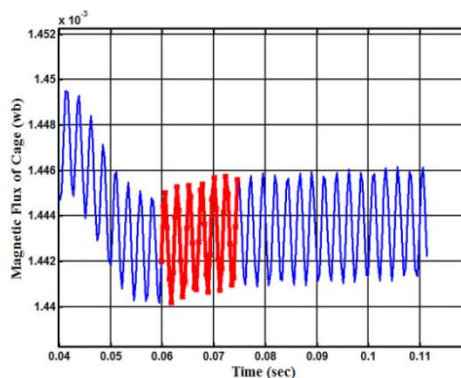
اندوکتانس مغناطیس کنندگی را با استفاده از FEM به صورت زیر تعیین می کنیم:

در صورتی که موتور با سرعت سنکرون در حال گردش باشد و جریان نامی از استاتور عبور کند و شرایط عملکردی ماشین به پایداری رسیده باشد، میزان شار پیوندی که از قفس دمپر عبور می کند تعیین کننده اندوکتانس مغناطیسی بین قفس و استاتور است. طبق فرض اولیه طراحی قفس، عرض قفس روتور بین قطبها ثابت است و همچنین صفحه سطحی در نظر گرفته شده همان طور که در شکل (۴-۶) نشان داده شده است، دارای عرض ثابتی می باشد.

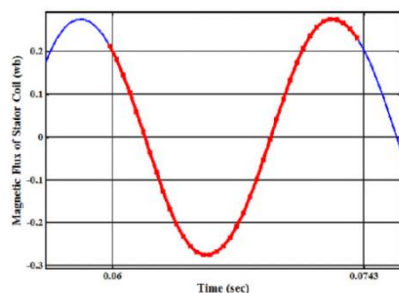
با مدل سازی ماشین فوق در شرایط سنکرون، شار عبوری از صفحه قفس با استفاده از FEM به دست آوردیم. چون موقعیت قفس نسبت به آهنربا همواره ثابت است و چون استاتور بدون شیار ساخته شده است، بنابراین هیچ گونه تغییرات شاری در قفس ناشی از PM دیده نمی شود و تمامی شاری که از قفس می گذرد به خاطر عکس العمل آرمیچر و همچنین هارمونیک های شار ناشی از توزیع غیر سینوسی سیم پیچی استاتور می باشد.



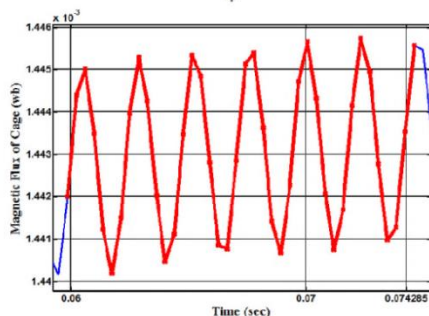
الف



ب



ج



د

شکل (۴-۴): الف) شار پیوندی سیم پیچی استاتور. ب) شار عبوری از صفحه قرار داده شده در روتور

همان طور که در شکل (۴-۴ الف) مشاهده می کنید شار مغناطیسی سینوسی هم فرکانس با منبع تغذیه در سیم پیچ ها جاری است. در شکل (۴-۴ ب) شاری که از صفحه قرار گرفته در سطح روتور می گذرد، را نشان می دهد. با توجه به اینکه ماشین به صورت دینامیک گذرای در نرم افزار اجرا می شود لحظات اولیه در نظر گرفته نشده است. در شکل (۴-۴ ج) مشاهده می شود که یک سیکل کاملاً دقیقاً برابر شده است با $\frac{1}{f} = 0.0142$. اما در شکل (۴-۴ د) شاری است که صفحه سطحی روتور آن را قطع می کند، مشاهده می شود که به دلیل هارمونیک های شار فاصله هوایی در همان بازه زمانی شکل (۴-۴ ج) تعداد سیکل های بیشتری را قطع می کند. با مشاهده دقیق تر، تعداد سیکلی که شار قفس در همان بازه زمانی طی می کند شش عدد است که این نشان دهنده این است که هارمونیک های ۵ و ۷ بسیار قوی توسط قفس احاطه شده است. البته با توزیع غیر سینوسی سیم پیچی تروئیدال، این شار هارمونیک در فاصله هوایی ناشی از سیم پیچی استاتور دور از انتظار نبود. بدلیل اختلاف سرعت این شار هارمونیک با سرعت میدان دوار استاتور، در قفس ولتاژ القا می شود. همین شار هارمونیک باعث ایجاد اندوکتانس مغناطیسی بین قفس و استاتور در سرعت سنکرون ماشین سنکرون مغناطیس دائم با قفس می شود. با این روش اندوکتانس مغناطیسی بین قفس روتور و استاتور بدست می آید.

۴-۴. تعیین مقاومت معادل قفس روتور

از جمله پارامترهای اساسی در تعیین ابعاد قفس، مقاومت سمت روتور می باشد. با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده برای ابعاد اولیه قفس که در فصل قبل بیان شد، تنها پارامتر متغیر در ابعاد قفس، عمق میله ها هست که بر اساس مقاومت بدست آمده از روابط تحلیلی تعیین می شود. برای تعیین مقاومت قفس بسته به نوع کاربرد قفس در ماشین، روش های مختلفی را می توان بیان کرد.

۴-۴-۱. تعیین مقاومت با کمک مدل سازی اجزاء محدود و آزمایش روتور قفل

در صورتی که از قفس فقط به عنوان دمپ کننده نوسانات استفاده شود می توانیم به صورت زیر مقاومت معادل قفس را تعیین کنیم. مقدار امپدانس ماشین از دید شبکه تغذیه، با توجه به مدار معادل ماشین در حالت روتور قفل از رابطه زیر تعیین می شود:

$$Z_{s_{lock}} = \frac{V_s}{I_{lock}} \quad (۱۲-۴)$$

که در آن $Z_{s_{lock}}$ امپدانس دیده شده از سمت استاتور، V_s ولتاژ فازی استاتور و I_{lock} جریان نامی در تست روتور قفل می باشد. در صورتی که اختلاف فاز ولتاژ و جریان در شرایط پایدار تست، ϕ باشد، تمامی مقاومت ماشین که از سمت شبکه دیده می شود به صورت زیر بیان می شود:

$$R_{total} = R_s + R_D' = \text{Re}(Z_{s_{lock}}) \quad (۱۳-۴)$$

پس

$$R_D' = \text{Re}(Z_{s_{lock}}) - R_s \quad (۱۴-۴)$$

که در آن R_D' مقاومت قفس روتور در سمت استاتور و R_s مقاومت هر فاز استاتور می باشد.

۴-۴-۲. تعیین تحلیلی مقاومت قفس روتور

در روش دوم به صورت کاملاً تحلیلی مقاومت قفس جهت کاربرد راهاندازی تعیین می شود، در صورتی که بخواهیم از قفس به عنوان راهانداز ماشین استفاده کنیم، ابتدا باید عوامل موثر بر رفتار راهاندازی ماشین LSAFPM مورد بحث و تحلیل قرار گیرد. در پروسه راهاندازی موتور سنکرون مغناطیس دائم گشتاورهای مختلفی تاثیرگذار هستند که عبارتند از: گشتاور قفس، گشتاور ترمزی ناشی از آهنربای دائم

- گشتاور قفس

در ماشین‌های القایی هنگام راهاندازی چون سرعت میدان دوار استاتور در فاصله هوایی برابر با سرعت سنکرون می‌باشد و روتور نسبت به این میدان دوار ساکن است، به دلیل اختلاف سرعت در میله‌های قفس، همانند عمل ترانسفورماتوری ولتاژ القا می‌شود. این ولتاژ القایی به سبب وجود حلقه‌های اتصال کوتاه سبب بروز جریان شدیدی در روتور و میله‌ها می‌شود و این جریان باعث تولید میدان مغناطیسی ساکن در روتور می‌شود. چون عامل بوجود آورده این میدان ساکن در روتور، میدان دوار استاتور می‌باشد پس روتور در جهت میدان دوار استاتور در فاصله هوایی، شتاب می‌گیرد چون درصدد است با عامل ایجاد شار در روتور مخالفت کند (طبق قانون لنز). مقدار گشتاوری که قفس القایی تولید می‌کند در ابتدا دامنه زیادی دارد و سپس با نزدیک شدن به سرعت سنکرون (سرعت میدان دوار) دامنه این گشتاور به صفر نزدیک می‌شود. در لحظه‌ای که سرعت روتور به سرعت سنکرون می‌رسد، دامنه این گشتاور صفر می‌شود و به دلیل اینرسی روتور، سرعت کاهش می‌یابد. دوباره به دلیل اختلاف سرعت بین قفس روتور و میدان دوار استاتور، در روتور گشتاوری ایجاد می‌شود که سبب افزایش سرعت روتور می‌شود و به این شکل سرعت ماشین القایی معمولاً کمتر از سنکرون می‌باشد و همواره در باند مشخصی در حال نوسان است. دامنه گشتاور راهاندازی از عوامل بسیار مهم جهت عملکرد صحیح و راهاندازی مطمئن است. در صورتی که گشتاور ثابتی از ابتدای راهاندازی بر روی شفت موتور قرار بگیرد، بسته به دامنه گشتاور قفس موتور می‌تواند راهاندازی موفق و یا ناموفق داشته باشد. گشتاور تولیدی قفس برای ماشین با قطب صاف در رابطه (۴-۱۵) آمده است [۳۲].

$$T_c = \frac{3p V_s^2 \cdot X_m^2}{2 \omega_s} \frac{s \cdot R_D'}{a + bs + cs^2} \quad (۴-۱۵)$$

$$a = (R_D')^2 [R_s^2 + (X_s + X_m)^2]$$

$$b = 2R_s R_D' X_m^2$$

$$c = (X_s X_m + X_D' X_m + X_s X_D')^2 + R_s^2 + (X_s + X_m)^2$$

– گشتاور ترمزی

در ماشین‌های القایی فرآیند راهاندازی توسط قفس انجام می‌شود. در صورتی که در کنار قفس آهنربای دائم وجود داشته باشند، آهنرباها گشتاور مخالفی با گشتاور تولیدی قفس در هنگام راهاندازی تولید می‌کنند. این گشتاور که به گشتاور ترمزی آهنربا معروف است در بعضی مواقع راهاندازی مستقیم را با مشکل مواجه می‌کند.

بدیهی است که در صورتی که بار ثابتی بر روی شفت موتور از هنگام راهاندازی قرار گیرد، موتور با جریان شدیدی راه می‌افتد و یا امکان دارد در صورتی که گشتاور بار مورد نظر بیشتر از گشتاور تولیدی قفس باشد موتور راهاندازی نشود، گشتاور مزاحم آهنربا دائم، همانند گشتاور بار، نیروی مخالفی در جهت راهاندازی موتور ایجاد می‌کند. وجود این عامل سبب لرزش و نویز شدیدی در هنگام راهاندازی می‌شود [۲۸]. در صورتی که موتور بی‌بار باشد تنها گشتاور مخالف با راهاندازی موتور سنکرون مغناطیس دائم همین گشتاور ترمزی است. این گشتاور در سرعت‌های پایین دامنه منفی قوی دارد و با افزایش سرعت کاهش می‌یابد و در سرعت سنکرون به دامنه ثابت و بسیار کمی می‌رسد [۲۸]. گشتاور ترمزی مگنت‌ها برای ماشین با قطب صاف از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$T_b = \frac{-mp}{2\omega_s} \left[\frac{R_s E_0^2 (1-s)}{R_s^2 + \omega_s^2 L_s^2 (1-s)^2} \right] \quad (۱۶-۴)$$

با توجه به توضیحات داده شده در صورتی که دامنه گشتاور تولیدی قفس در نقطه حداکثر آن برابر با دامنه گشتاور ترمزی آهنربا در نقطه حداکثری آن باشد می‌توانیم موتور را در حالت بی‌باری راهاندازی موفق نماییم. بنابراین میزان مقاومت روتور را با استفاده از این خاصیت تعیین می‌کنیم. باید این نکته را در نظر داشت که دامنه گشتاور راهاندازی قفس، به طور مستقیم به مقاومت قفس مربوط می‌شوند.

لغزشی که به ازای آن گشتاور ترمزی آهنربا حداکثر دامنه منفی را دارد به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\frac{dT_b}{ds} = 0 \quad (۱۷-۴)$$

$$\Rightarrow (R_s E_0^2)[R_s^2 + X_s^2(1-s)^2] + [2X_s^2 - 2sX_s^2].[R_s E_0^2(1-s)] = 0$$

با مرتب کردن معادله فوق بر حسب لغزش داریم:

$$s_{T_{b\max}} = 1 + \frac{\sqrt{4X_s^4 + 4X_s^2(X_s^2 - R_s^2)}}{2X_s^2} \quad (۱۸-۴)$$

$$h = \sqrt{4X_s^4 + 4X_s^2(X_s^2 - R_s^2)}$$

همچنین لغزشی که به ازای آن گشتاور تولیدی قفس حداکثر می باشد بصورت زیر بیان

$$\frac{dT_c}{ds} = 0 \quad \text{می شود:}$$

$$(۱۹-۴)$$

$$s_{T_{c\max}} = \frac{R_D'}{\sqrt{R_s^2 \left(\frac{X_m}{X_m + X_s}\right)^4 + (X_D + X_s)^2}} \quad (۲۰-۴)$$

$$d = \sqrt{R_s^2 \left(\frac{X_m}{X_m + X_s}\right)^4 + (X_D + X_s)^2}$$

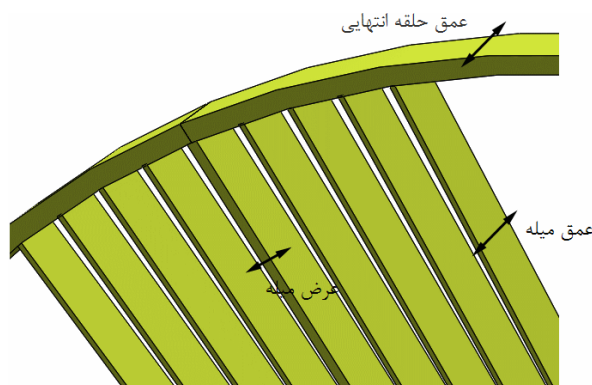
اگر لغزشی که گشتاور ترمزی را حداکثر می کند برابر با لغزشی باشد که گشتاور قفس در آن لغزش حداکثر باشد، در این حالت راهاندازی موتور به خوبی انجام می شود. به این ترتیب مقاومت قفس جهت راهاندازی مناسب تعیین می شود.

$$\text{if } (s_{T_{b\max}} = s_{T_{c\max}}) \Rightarrow R_D' \Rightarrow \text{Calculate} \quad (۲۱-۴)$$

$$\Rightarrow R_D' = d \cdot \left(1 + \frac{h}{2X_s^2}\right)$$

در شکل (۵-۴) قسمتی از قفس راه انداز برای نمایش ابعادی پارامترهای تعیین شونده آورده شده

است:



شکل (۵-۴): نمای سه بعدی قفس و پارامترهای ابعادی میله های قفس

۵-۴. تعیین ابعادی مقاومت قفس روتور

مقاومت قفس از دو ساختار قفس میله ای و صفحه سطحی روتور تشکیل شده است. برای ساختار

میله ای قفس داریم:

$$R_{bar} = \frac{\rho_{al} \cdot l_{bar}}{S_{bar}} = \frac{\rho_{al} (R_{out_{rotor}} - R_{in_{rotor}})}{w_{bar} \cdot H_{bar}} \quad (۲۲-۴)$$

$$R_{Endring} = \rho_{al} \frac{(R_{ave_{end}} \times \frac{60\pi}{180})}{w_{end} H_{end}} \quad (۲۳-۴)$$

$$R_{cage_{phase}} = \frac{R_{bar}}{8} + R_{endring_{out}} + R_{endring_{in}} \quad (۲۴-۴)$$

که در آن R_{bar} مقاومت میله روتور، ρ_{al} مقاومت ویژه آلومینیوم، l_{bar} طول میله های قفس در راستای شعاعی، S_{bar} سطح مقطع هر میله، w_{bar} عرض هر میله، H_{bar} عمق میله در راستای محوری می باشد. جهت تعیین ابعاد قفس صفحه ای شکل با تقریب مناسبی می توان فرض کرد که تعداد میله ها

بی‌نهایت و طول حلقه‌های انتهایی تقریباً صفر می‌باشد بنابراین داریم:

$$R_{Surface.Plate} = \frac{\rho_{al} \cdot l_{bar}}{S_{Plate}} = \frac{\rho_{al} (R_{out_{rotor}} - R_{in_{rotor}})}{\alpha_{Plate_{for 1 phase}} \cdot H_{bar}} \quad (۲۵-۴)$$

که در آن $\alpha_{plate_{for 1 phase}}$ زاویه قطب برای یک فاز می‌باشد. پارامتر مقاومت قفس بدست آمده برای یک فاز می‌باشد. همچنین این دامنه مقاومت در سمت روتور می‌باشد اما مقدار مقاومتی که از طریق روابط گشتاور بدست آمده پارامتر مقاومت قفس روتور در سمت استاتور می‌باشد، بنابراین باید نسبت تبدیل پارامترهای روتور به استاتور را تعیین نمود. با توجه به ساختار مشابه قفس از نظر مغناطیسی در ماشین های القایی و مغناطیس دائم سنکرون جهت تعیین ارجاع پارامترهای روتور به استاتور داریم [۱].

$$R_D' = \frac{4m_s}{m_r} (N_s K_w)^2 R_D \quad (۲۶-۴)$$

که در آن m_s تعداد فازهای استاتور، m_r تعداد فازهای روتور و $N_s K_w$ تعداد دور سیم‌پیچی مفید هر فاز می‌باشد. با توجه به ساختاری که در شکل (۴-۶) برای حالت کلی قفس نشان داده شده، قفس میله‌ای و صفحه سطحی روتور در هر فاز به صورت مدل مقاومت‌های موازی از دید استاتور می‌باشد. بنابراین مقاومت هر فاز قفس در سمت استاتور از رابطه زیر تبعیت می‌کند:

$$R_D' = \frac{R_{bar}' \times R_{Surface.Plate}'}{R_{bar}' + R_{Surface.Plate}'} \quad (۲۷-۴)$$

با مشخص شدن مقاومت قفس از طریق روابط گشتاور، می‌توانیم عمق میله‌ها را برای دستیابی به مقاومت تعیین شده بدست آوریم. بعد از تعیین پارامترهای دقیق ابعادی قفس در جدول (۴-۱) تمامی اطلاعات ساختار قفس و صفحه رسانا روتور به طور کامل آورده شده است.

جدول (۴-۱): پارامترهای ابعادی قفس راهانداز

پارامتر	واحد	مشخصات
طول شعاعی هر میله	mm	۷۲/۸
عرض هر میله (در شعاع متوسط)	mm	۰/۳۶۶
طول میله انتهایی بالایی	mm	۱۲۶/۴۳
طول میله انتهایی پایینی	mm	۴۹/۱۹
عمق هر میله	mm	۲/۵
طول شعاعی صفحه	mm	۷۲/۸
عمق صفحه	mm	۰/۴
مقاومت ویژه آلومینیوم	Ω/m	$۱۰^{-۸} \times ۲/۶۵$

۴-۶. جمع بندی فصل

جهت طراحی ابعادی قفس، ابتدا فرضیات اولیه‌ای در مورد ابعاد قفس، که در فصل قبل در مورد آنها صحبت شد در نظر گرفته می‌شود سپس، باید تمامی پارامترهای مغناطیسی ماشین سنکرون مغناطیس دائم شناسایی شوند. در این تحقیق با استفاده از استاندارد IEC60034-4 توسط آزمایش‌های مختلفی که با استفاده از FEM بر روی موتور طراحی شده انجام شده است، پارامترهای ماشین تعیین گردید. با استفاده از روابط تحلیلی ابعاد دقیق قفس تعیین گردید.

فصل پنجم

مدل سازی راه اندازی مستقیم ماشین سنکرون

مغناطیس دائم شار محوری

۵-۱. مقدمه

مدل سازی موتور LSPM از مباحث بسیار مهمی است که در سال های اخیر موضوع بحث مقالات متعددی بوده است. مدل سازی دینامیکی گذرای ماشین های الکتریکی با استفاده از شبیه سازی نرم افزار متلب انجام می شود و یا در صورتی که دقت بالاتری مورد نیاز باشد، با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود انجام می شود. با توجه به محاسبه پارامترهای مغناطیسی ماشین مورد نظر به روش تحلیلی در فصل قبل، می توانیم از مدل تحلیلی مدار معادل مغناطیسی برای مدل سازی دینامیک گذرای موتور LSAFPM استفاده نمود. با توجه به اینکه در مدل تحلیلی مواردی هم چون پدیده مغناطیس زدایی و بحث تلفات حرارتی دیده نمی شود، پس می توانیم به مدل اجزاء محدود رجوع کنیم. در این فصل علاوه بر ارائه مدل تحلیلی دینامیک گذرای موتور، رفتار دینامیکی گذرای موتور LSAFPM به روش اجزاء محدود ارائه می گردد. بدلیل اینکه تحلیل موتور به روش اجزاء محدود بسیار زمان بر و مفصل است، سعی بر این است که به مدل صحیحی از موتور، به صورت مدار معادل تحلیلی دست یافت. جهت امتحان صحت پاسخ به روش تحلیلی، انطباقی بین روش تحلیلی و اجزاء محدود انجام می شود. در صورتی که مدل تحلیلی به طور تقریبی با مدل اجزاء محدود هماهنگ باشد، می توان برای بدست آوردن مشخصه های مختلف ماشین از مدل تحلیلی نیز استفاده کرد.

۵-۲. مدل سازی دینامیک گذرای موتور LSAFPM به روش تحلیلی

با توجه به دو مدل ارائه شده در شکل (۲-۴)، معادلات مغناطیسی حاکم بر ماشین سنکرون مغناطیس دائم قطب برجسته با قفس روتور، در دستگاه dq به صورت زیر می باشد [۲۸].

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_r \lambda_{sd} + \frac{d\lambda_{sq}}{dt} \quad (۱-۵)$$

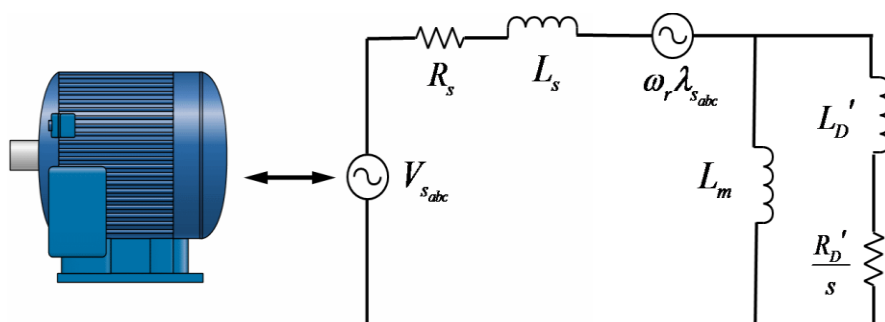
$$V_{sd} = R_s i_{sd} + \omega_r \lambda_{sq} + \frac{d\lambda_{sd}}{dt} \quad (۲-۵)$$

$$V_{rq}' = r_{rq}' i_{rq}' + \frac{d\lambda_{rq}'}{dt} = 0 \quad (۳-۵)$$

$$V_{rd}' = r_{rd}' i_{rd}' + \frac{d\lambda_{rd}'}{dt} = 0 \quad (۴-۵)$$

۵-۲-۱. مدل سازی دینامیک گذرایی موتور LSAFPM با کمک سیمولینک متلب

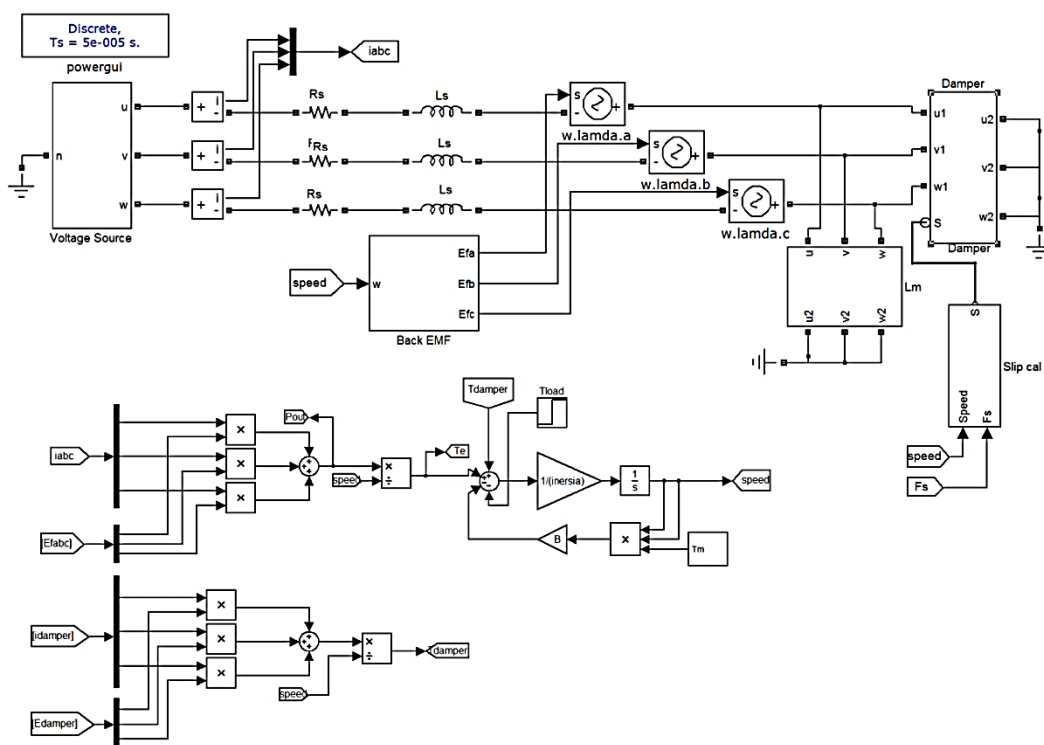
در حالت کلی مشخصه های حالت دائمی از اهمیت فوق العاده ای به لحاظ طول دوره عملکرد، بهره، نوسانات حالت دائمی سرعت، لرزش، حد پایداری حالت دائمی و ... برخوردار است. همچنین مشخصه های دینامیکی گذرایی ماشین از قبیل تغییرات سرعت، نحوه شتاب گیری موتور، توان لحظه ای، گشتاور، ولتاژ و جریان در حین شرایط مختلف عملکردی، و ... نیز حائز اهمیت هستند. برای مدل سازی رفتار دینامیکی موتور، با توجه به ساختار قطب صاف موتور در نظر گرفته شده در این طرح، می توان از مدار معادل زیر جهت تحلیل رفتار دینامیک گذرایی و حالت دائمی استفاده نمود.



شکل (۵-۱): مدار معادل ماشین LSAFPM

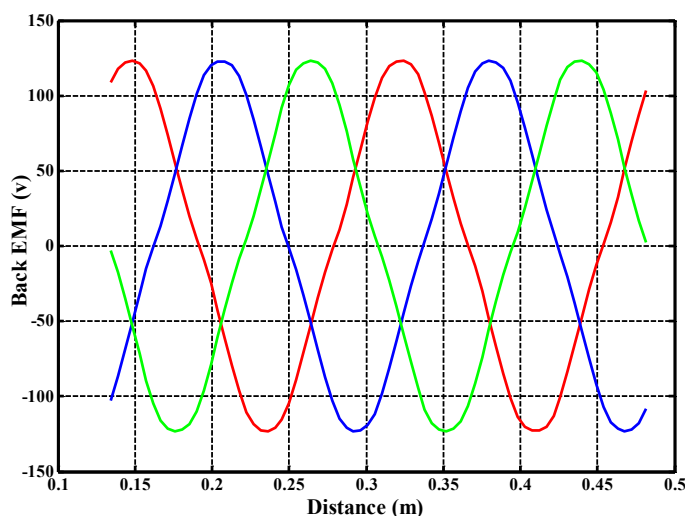
تمامی پارامترهای مدار معادل شکل (۵-۱) به جز ولتاژ القایی در هر فاز به روش تحلیلی محاسبه شده است. جهت محاسبه ولتاژ القایی ناشی از PMها در استاتور، با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود در حالت ژنراتوری موتور را در سرعت سنکرون به گردش در می آوریم، ولتاژ سیم پیچ های استاتور همان ولتاژ القایی ناشی از آهنربادائم در روتور می باشد. در شکل (۵-۲) شماتیک شبیه سازی موتور

LSAFPM سه فاز طراحی شده نشان داده شده است.



شکل (۵-۲): مدار معادل ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار محوری

ابتدا به بررسی مختصر بلوک های موجود در شماتیک شبیه سازی می پردازیم. بلوک Voltage source منبع ولتاژ سه فاز با فرکانس ۷۰ هرتز می باشد. مقاومت آرمیچر و اندوکتانس سنکرون نمایش داده شده پارامترهای ماشین سنکرون را مدل سازی می کنند. بلوک Back EMF نماینده ولتاژ القایی در سیم پیچی استاتور توسط PM ها می باشد. در شکل (۵-۳) ولتاژ القایی در ماشین مورد نظر آورده شده است.



شکل (۵-۳): شکل موج ولتاژ القایی در سیم پیچ های استاتور

بلوک Lm و بلوک Damper نشان گر پارامترهای اندوکتانس مغناطیسی و پارامترهای مربوط به قفس است که مدل کلی آن در شکل (۵-۱) آورده شده است. توان خروجی مفید موتور از حاصل ضرب ولتاژ القایی در جریان لحظه ای موتور بدست می آید. در صورتی که این توان را بر سرعت ماشین تقسیم کنیم گشتاور الکترومغناطیسی بدست می آید. با توجه به نوع موتور و سفارش مشتری، گشتاور اصطحاکاکی با مجذور سرعت مدل سازی شده است. چون گشتاور تولیدی قفس در لحظه راه اندازی و عملکرد دائمی موتور، در جهت افزایش گشتاور الکترومغناطیسی می باشد، بنابراین در شبیه سازی گشتاور تولیدی قفس در جهت افزایش گشتاور الکترومغناطیسی قرار می گیرد. معادله دینامیکی گشتاور در موتور مذکور به صورت زیر می باشد:

$$T_e + T_{Cage} = T_m + B\omega_m^2 + J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (5-5)$$

پارامتر B نماینده بار موتور علاوه بر گشتاور مقاوم بار می باشد. این پارامتر طوری مشخص شده است که در شرایط نامی و در سرعت نامی، توان ۳۷۰۰ وات در خروجی موتور تولید شود.

پارامتر J ممان اینرسی روتور می باشد. رابطه فوق نشان می دهد که هر چه J بزرگتر باشد راه اندازی موتور مشکل تر می شود به بیان دیگر، موتور نیاز به گشتاور الکترومغناطیسی و گشتاور قفس

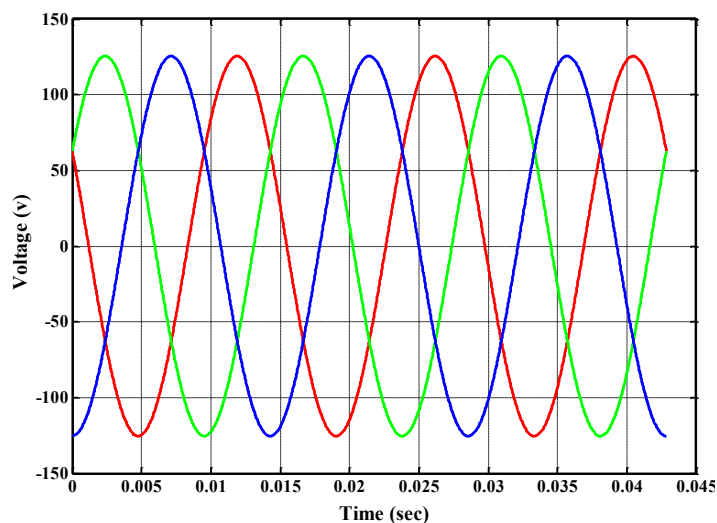
بیشتری جهت راهاندازی دارد، همچنین با بزرگ بودن J ، رفتار موتور در مقابل نوسانات بسیار کندتر می شود. پارامتر J دقیقاً متناسب با جرم روتور است. یکی از دلایلی که ساختار قفس پره‌ای در فصل ۳ انتخاب شد به دلیل کاهش جرم روتور جهت راهاندازی سریع تر و سنکرونیزم بهتر بود.

$$J_{Total} = \frac{1}{2} \sum mr_{ave}^2 \quad (۶-۵)$$

در رابطه فوق m جرم هر کدام از اجزا نصب شده بر روی روتور و r_{ave} شعاع متوسط هر کدام از اجزاء می باشد. چون برای ماشین های طراحی شده در این تحقیق اطلاعات جامعی از متعلقات و رابط- های بین موتورها و پروانه در دسترس نمی باشد اینرسی مورد استفاده در شبیه سازی همان مقادیر حداقل محاسبه شده برای روتور می باشد. بدین ترتیب، نتایج نوسانات سیگنال های بدست آمده در شبیه سازی های ارائه شده در این بخش بدبینانه خواهد بود و بطور قاطع می توان ادعا کرد که نوسانات موتور واقعی، در تمامی حالت ها کمتر از مقادیر بدست آمده از شبیه سازی ها خواهد بود.

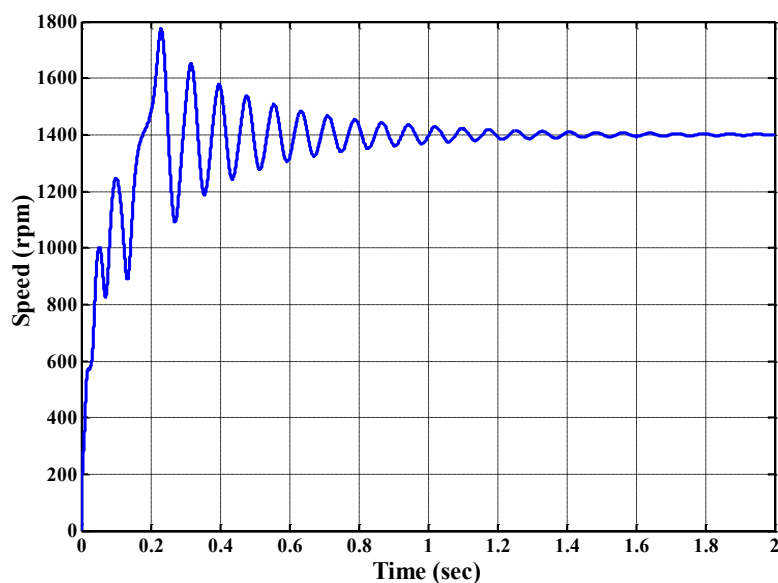
۵-۳. نتایج شبیه سازی با استفاده از مدل سازی تحلیلی

با توجه به مدار معادل، شکل موج ولتاژ ورودی در شکل (۴-۵) آمده است. چون موتور به صورت مستقیم راهاندازی می شود بنابراین جریان شدیدی در چند سیکل راهاندازی از شبکه کشیده می شود. این دامنه جریان شدید در عملکرد واقعی سبب افت ولتاژ در ترمینال موتور می شود. در صورتی که این افت ولتاژ از حدی بیشتر شود ممکن است راهاندازی مستقیم موتور با مشکل مواجه شود.



شکل (۵-۴): شکل موج ولتاژ ورودی موتور

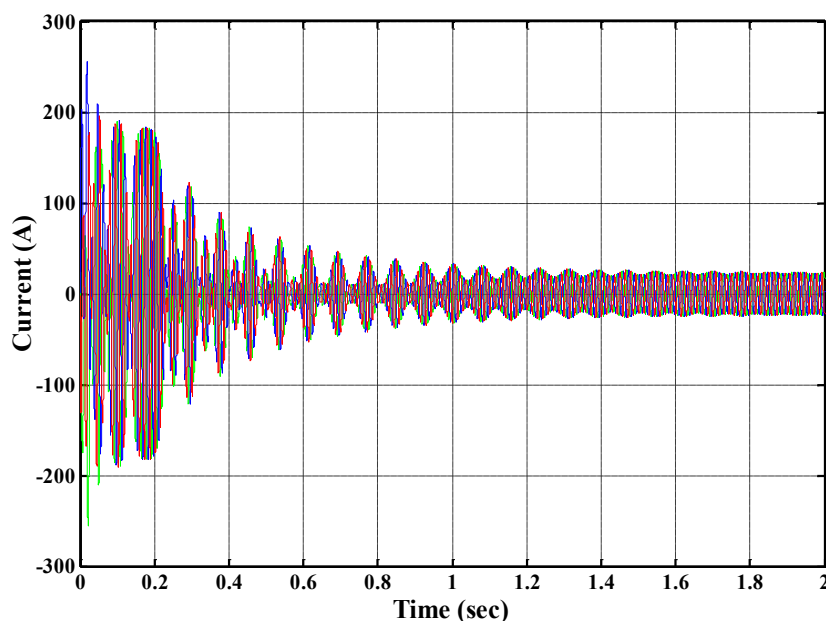
از مشخصه‌های بسیار مهم موتور با راه اندازی مستقیم بررسی پاسخ سرعت موتور در لحظه راه اندازی و سنکرونیزم می‌باشد. در شکل (۵-۵) پاسخ سرعت در لحظه راه اندازی موتور به صورت مستقیم آورده شده است.



شکل (۵-۵): پاسخ سرعت از لحظه راه اندازی تا سنکرونیزم کامل

در شکل (۵-۵) مشاهده می‌شود که به دلیل وجود قفس، راه اندازی ماشین سنکرون مغناطیس دائم از سرعت صفر آغاز شده است. با دقت در منحنی مشاهده می‌شود که در فرآیند

سنکرونیزم سرعت نسبت به سرعت سنکرون دارای اورشوت^۱ می باشد. دامنه اورشوت دقیقاً متناسب با پارامترهای قفس می باشد. هر چه گشتاور راه اندازی قفس بیشتر باشد پاسخ سریع تر و مقدار اورشوت بیشتر می شود. البته اورشوت بالا متناسب با جریان ورودی شدیدتر و نوسانات بیشتر هست. همانند مباحث کنترلی باید حد بهینه ای از اورشوت برای راه اندازی موتور انتخاب کرد به طوری که دامنه آن شدید نباشد و همچنین از طرفی سرعت سنکرونیزم موتور بالا باشد. بعد از نوسانات شدید حول سرعت سنکرون، دامنه این نوسانات حول پوشی کاهش یافته و در نهایت سرعت با نوسان بسیار کمی به سرعت سنکرون می رسد. در شکل (۵-۶) جریان ورودی موتور آورده شده است.



شکل (۵-۶): جریان موتور در فرآیند راه اندازی

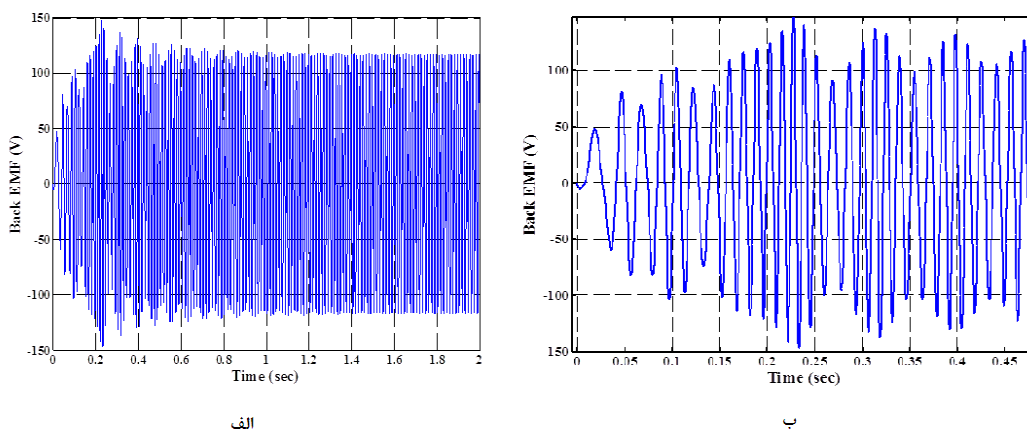
در شکل فوق، جریان لحظه ای موتور مشاهده می شود که در ابتدا همانند ماشین های القایی جریان بسیار شدیدی از شبکه کشیده می شود، علت آن را می توان با نگاهی به مدار معادل ماشین LSPM فهمید. چون مقاومت در مسیر استاتور کوچک می باشد و همچنین دامنه بسیار کم ولتاژ القایی در سرعت های پایین کم است و ولتاژ ورودی موتور ثابت است، پس جریان شدیدی از استاتور در هنگام راه اندازی عبور می کند.

یکی از مشکلات ماشین های مغناطیس دائم عدم دسترسی و تغییر در شار مدار تحریک می باشد و همواره با یک شار ثابت در سیستم تحریک مواجه هستیم. در عملکرد موتوری، نقش میزان زاویه قدرت δ و یا به بیان بهتر $E_f \cos \delta$ یک نقش اساسی است که به صورت زیر بیان می شود.

$$E_f \cos \delta > V_t \Leftrightarrow \text{فوق تحریک} \quad (7-5)$$

$$E_f \cos \delta < V_t \Leftrightarrow \text{زیر تحریک} \quad (8-5)$$

در شکل (7-5) عملکرد دینامیکی گذرای ولتاژ القایی نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود در ابتدا دامنه ولتاژ القایی صفر (جریان بالا در استاتور) و با افزایش سرعت دامنه ولتاژ القایی افزایش (کاهش جریان در استاتور) می یابد. پیک ولتاژ القایی در شرایط عملکردی سنکرون ۱۲۰ ولت می باشد.



شکل (7-5): الف) ولتاژ القایی ب) چند سیکل ابتدایی ولتاژ القایی ماشین

از مهم ترین عوامل در راه اندازی موتور، مقاومت قفس راه انداز می باشد. با توجه به تئوری ماشین القایی [۳۳] به ازای مقدار مقاومت روتور در لغزش ماکزیمم، گشتاور راه اندازی حداکثر می شود در صورتی که مقاومت از آن حد بیشتر و یا کمتر گردد گشتاور راه اندازی کاهش می یابد. همچنین در صورتی که مقاومت روتور از مقاومت بحرانی بیشتر شود، موتور راه اندازی موفق نمی شود. می توانیم

طراحی را به نحوی انجام دهیم که به ازای آن مقاومت در سمت روتور، حداکثر گشتاور راه اندازی را داشته باشیم. در زیر خلاصه ای از این روش را که بر مبنای تئوری ماشین های القایی می باشد بیان می کنیم [۳۳].

$$T_{start} = \frac{R_D' U^2}{(R_s + C_1 R_D')^2 + (X_s + C_2 X_D')^2} \quad (۹-۶)$$

$$C = 1 + \frac{X_s}{X_m}$$

با توجه به اینکه گشتاور راه اندازی به طور مستقیم تابعی از مقاومت روتور می باشد داریم:

$$\frac{dT_{start}}{dR_D'} = 0 \quad (۱۰-۵)$$

به این شکل مقاومت روتور برای داشتن حداکثر گشتاور راه اندازی با استفاده از پارامترهای موتور بدست می آید:

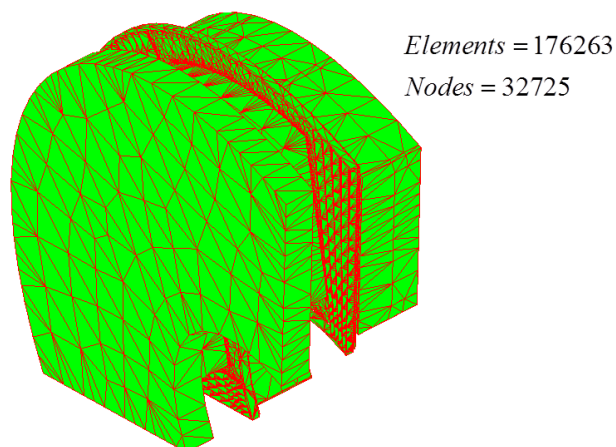
$$R_D' = \sqrt{R_s^2 + (X_s + X_D')^2} \quad (۱۱-۵)$$

۴-۵. مدل سازی با استفاده از روش اجزاء محدود (FEM)

در راه اندازی مستقیم موتور، جریان بسیار شدیدی از استاتور عبور می کند (طبق شکل (۵-۶)). در موتورهای القایی این افزایش جریان باعث افت ولتاژ در منبع تغذیه و همچنین سبب اشباع در هسته استاتور می شود، ولی در موتور با تحریک مغناطیس دائم علاوه بر موارد اشاره شده، چگالی شار آهنربا به طور متوسط کاهش پیدا می کند. با توجه به اینکه در مدل سازی با استفاده از سیمولینک متلب اثرات کاهش چگالی شار آهنربا در هنگام راه اندازی و همچنین اثرات تغییرات کاهش چگالی شار هسته استاتور در نظر گرفته نمی شود، جهت مدل سازی دقیق تر و جامع تر از روش FE استفاده می کنیم. با توجه به دقت و صحت پاسخی نرم افزارهای مبتنی بر روش حل FE، در این تحقیق با

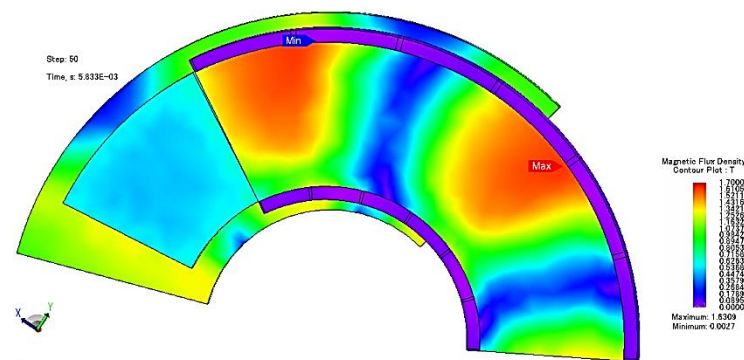
اجرای روش دینامیک گذرایی در نرم افزار JMag Designer 12 به پاسخهای دقیقی از رفتار موتور سنکرون مغناطیس دائم با راه انداز مستقیم دست پیدا می کنیم. همچنین با توجه به اینکه نتایج مدل اجزاء محدود با نتایج ساخت تقریباً مشابه می باشد، صحت مدل تحلیلی ارائه شده در قسمت قبل با مدل اجزاء محدود مورد مقایسه قرار خواهد گرفت.

ابتدا ماشین طراحی شده در نرم افزار Solidwork رسم می گردد، سپس ساختار رسم شده به نرم افزار JMag وارد می شود. در شکل (۵-۸) ساختار مش بندی شده ماشین مورد نظر آورده شده است.



شکل (۵-۸): مش بندی موتور LSAFPM

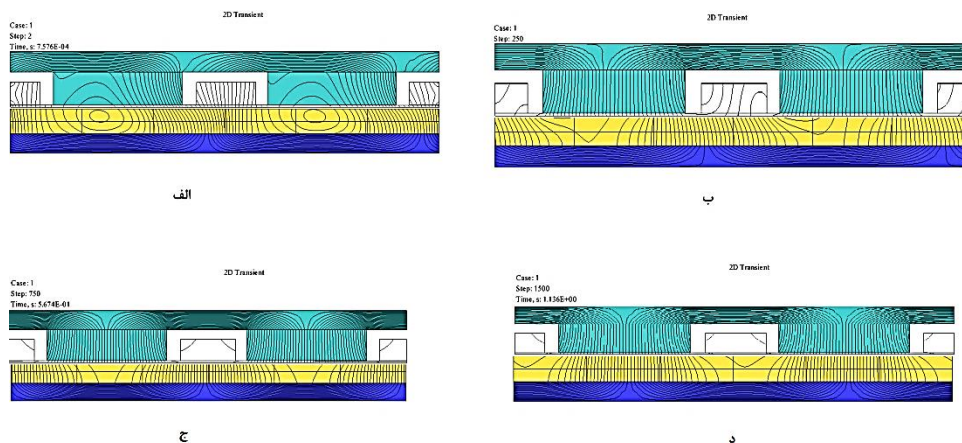
برای کاهش حجم محاسبات در نرم افزار اجزاء محدود و کاهش زمان محاسباتی، با توجه به تقارن شعاعی و محوری موجود، ساختار ۱۲۰ درجه شکل فوق را در نظر گرفتیم. با معرفی شرایط مرزی مناسب برای ساختار ارائه شده، رفتار ماشین کامل را در خروجی نتایج مشاهده می کنیم. توزیع چگالی شار در شرایط عملکرد نامی ماشین در شکل (۵-۹) آورده شده است.



شکل (۵-۹): توزیع چگالی شار در سرعت سنکرون

همان طور که مشاهده می شود در نقاطی از هسته استاتور چگالی شار $1/63$ و در نقاطی $0/08$ تسلا شده است. چون در هر موقعیت مکانی روتور، چگالی شار در استاتور در نقطه ای مینیمم و در نقطه ای ماکزیمم است با گردش روتور امکان دارد نقطه ای که چگالی شارش ماکزیمم بوده، حالا مینیمم گردد پس، معمولاً جهت محاسبه چگالی شار هسته استاتور مقدار متوسط توزیع چگالی شار را در نظر می گیرند.

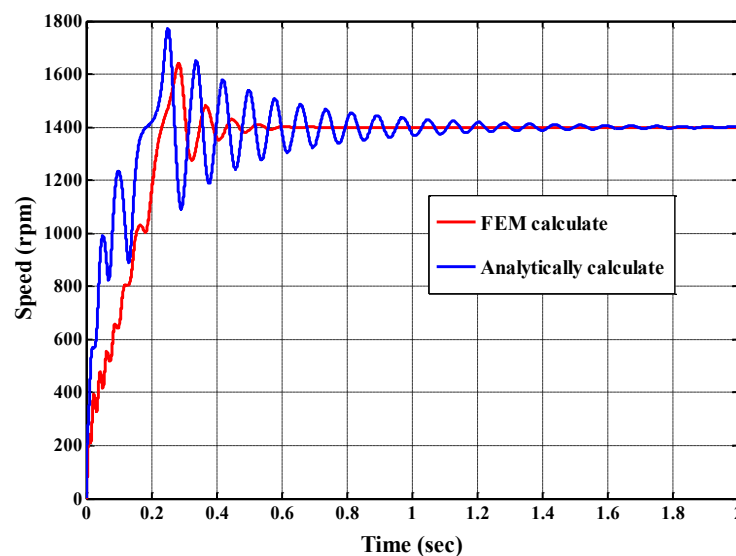
در زمان راه اندازی موتور به دلیل وجود میدان دائمی ناشی از PM ها در روتور، زاویه بین میدان استاتور و روتور بسیار زیاد است. در فرآیند افزایش سرعت روتور اختلاف این زاویه کاهش پیدا می کند. چون شار PM در فاصله هوایی همواره ساکن و ثابت است و حتی در هنگام خاموشی موتور هم این شار وجود دارد، بنابراین با افزایش سرعت موتور PM گشتاور ترمزی در مقابل افزایش سرعت ایجاد می کند. گشتاور ترمزی PM در هنگام راه اندازی از همین عامل نشات می گیرد. در شکل (۵-۱۰) نحوه تغییرات خطوط شار بین روتور و استاتور با افزایش سرعت نشان داده شده است:



شکل (۵-۱۰): نحوه تغییرات مسیر خطوط شار از راه اندازی تا سنکرونیسم کامل

با دقت در شکل (۵-۱۰) الف سرعت روتور بسیار کم است و اختلاف بین میدان دوار استاتور و میدان ساکن روتور بسیار زیاد است. همان طور که ملاحظه می شود خطوط شار از قسمتی از PMها بیشتر عبور می کند که این امر ممکن است سبب افزایش مغناطیس زدایی در نقاطی از PM گردد. در ب با توجه به اینکه در استپ ۲۵۰ام عکس گرفته شده است، خطوط شار توزیع بیشتری در سطح PM پیدا کرده اند. در ج و د مشخص است که میدان دوار استاتور تقریباً با میدان دوار روتور به حالت سنکرون درآمده است. با توجه به اینکه ضریب نفوذ نسبی مس تقریباً مانند هوا است، بنابراین خطوط شار مغناطیسی بعد از خروج از PMها اندکی شکفته می شوند که سبب تلفات در ماشین می شود. البته با مقایسه شکل الف و ب با د مشاهده می شود، هنگامی که سرعت موتور به مقدار سرعت سنکرون می رسد این نشتی شار هم به شدت کاهش پیدا می کند.

در شکل (۵-۱۱) منحنی پاسخ سرعت در مدل سازی دینامیکی گذرای با استفاده از FE برای موتور LSAFPM آورده شده است. همچنین مقایسه ای با پاسخ سرعت در مدل تحلیلی ارائه شده در قسمت قبل بیان شده است.

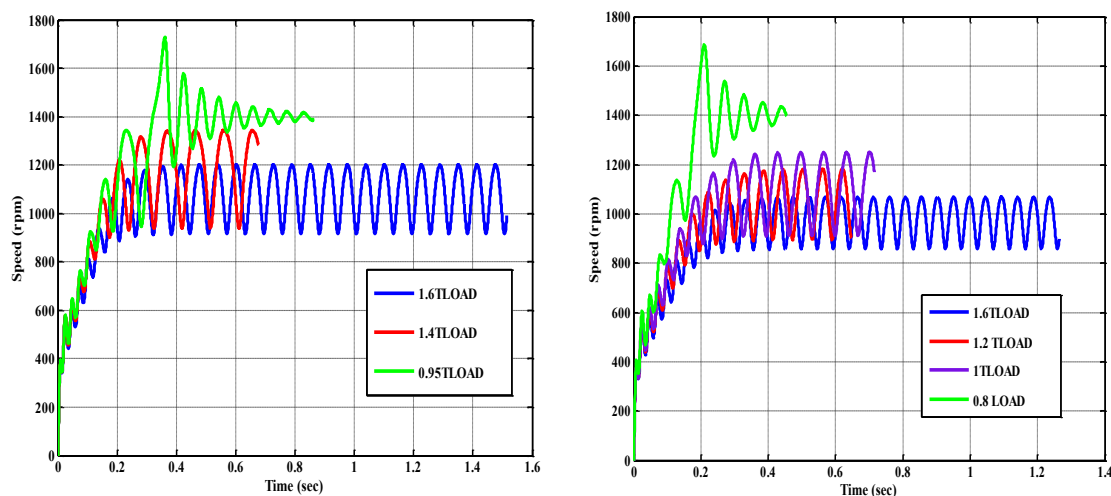


شکل (۵-۱۱): پاسخ سرعت در مدل سازی دینامیک گذرای با استفاده از FEM و مقایسه با مدل تحلیلی

همان طور که مشاهده می شود، مدل تحلیلی رفتاری تقریباً مشابه با مدل اجزاء محدود نشان می دهد و این صحتی بر طراحی قفس راه انداز ارائه شده در فصل قبل می باشد. البته سرعت پاسخ در مدل تحلیلی اندکی سریع تر می باشد زیرا در مدل تحلیلی رفتار اشباع هسته استاتور دیده نشده، همچنین در مدل تحلیلی دامنه ولتاژ القایی فقط تابعی از سرعت می باشد، در صورتی که پدیده های اشباع و مغناطیس زدایی بر شار تولیدی توسط PM بسیار تاثیر گذار است و شار PM در ابتدای راه اندازی تا رسیدن به سرعت نامی دائماً در حال تغییر است اما در مدل تحلیلی شار PM ثابت فرض شده است.

همچنین می توان از مدل سازی دینامیک گذرای در روش اجزاء محدود در طراحی موتور با راه اندازی مستقیم با استفاده از آزمون و خطا نیز استفاده نمود. طبق ساختاری که در [۲۸] بیان شده است می توان با قرار دادن صفحه آلومینیومی یا مسی در سطح فاصله هوایی و مماس با سطح آهنربا روتور، گشتاور راه اندازی برای موتور سنکرون مغناطیس دائم شار محوری ایجاد نمود. در مدل سازی به روش FE دو طول مختلف برای صفحه قرار گرفته در سطح روتور تعیین گردید. بررسی رفتار راه اندازی مستقیم موتور، با استفاده از این دو نوع قفس نشان می دهد که هیچ کدام از این دو ساختار

به تنهایی توانایی راه اندازی موتور تحت بار نامی را ندارد و باید در بارهای کمتر از بار نامی راه اندازی مستقیم شود و سپس بارگذاری انجام شود که به لحاظ مسائل مکانیکی در بعضی از کاربردها ممکن است با مشکلاتی مواجه گردد. در شکل (۵-۱۲) پاسخ سرعت با صفحه به طول محوری ۰/۴ و ۰/۶ میلی متر بیان گردیده است.



الف

ب

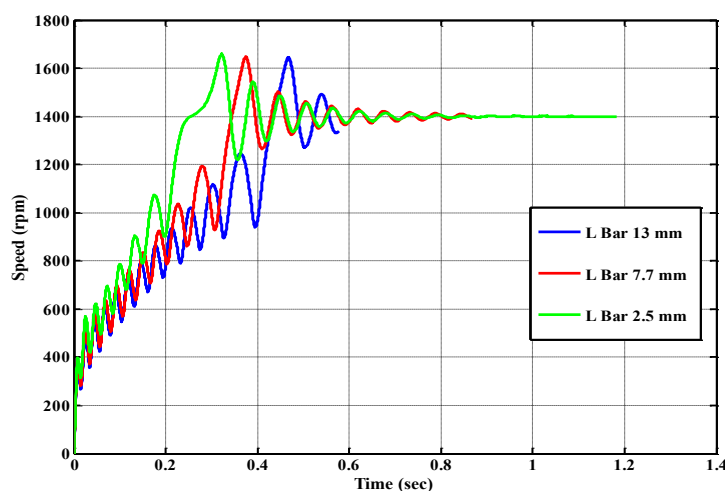
شکل (۵-۱۲): الف- پاسخ سرعت به ازای صفحه به طول ۰/۴ میلی متر. ب- پاسخ سرعت به ازای صفحه به طول ۰/۶ میلی متر

همان طور که در شکل (۵-۱۲ الف) مشاهده می شود، با قرار دادن صفحه به طول محوری ۰/۴ میلی متر موتور در ۰/۹۵ بار نامی راه اندازی موفق داشته است. با افزایش ضخامت محوری صفحه در راستای فاصله هوایی، گشتاور راه اندازی موتور به شدت کاهش پیدا کرده است و تنها قابلیت راه اندازی در ۰/۸ بار نامی برای موتور ممکن می شود. بنابراین هرچه ضخامت صفحه قرار گرفته در سطح روتور کمتر باشد، گشتاور راه اندازی بیشتری تولید می گردد. البته با توجه به چگالی جریان بالای صفحه در لحظه راه اندازی محدودیت هایی از لحاظ ضخامت مدنظر قرار می گیرد. در ادامه تحلیل ما صفحه ۰/۴ میلی متر را در نظر می گیریم.

با توجه به اینکه وجود صفحه به تنهایی گشتاور راه اندازی مناسبی برای موتور ایجاد نمی کند.

علاوه بر صفحه از قفس آلومینیومی در فضای بین آهنربا استفاده می کنیم. وجود قفس علاوه بر افزایش گشتاور راه اندازی موتور، سبب استحکام مکانیکی آهنربا در مقابل نیروهای محوری و شعاعی می گردد. در این قسمت با قرار دادن سه ساختار قفس و با تغییر در طول محوری میله قفس پاسخ سرعت و همچنین سرعت سنکرونیزم مورد بررسی قرار می گیرد.

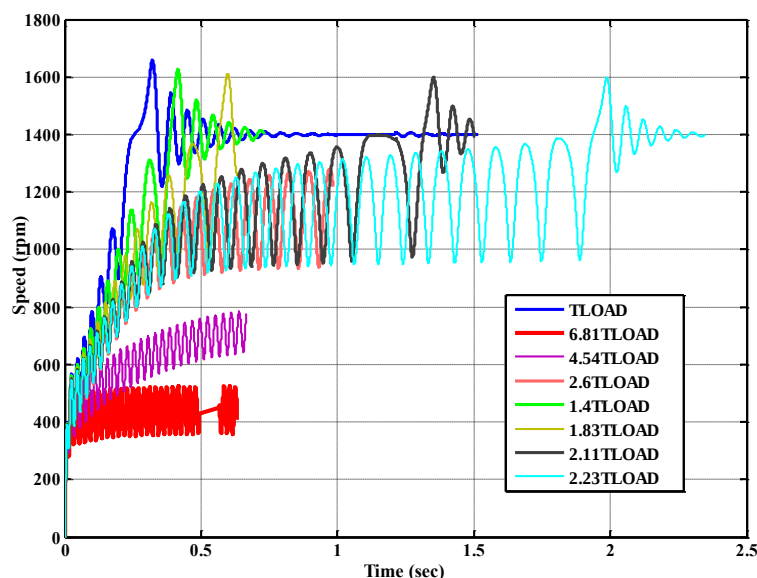
به لحاظ سادگی در فرآیند ساخت استفاده از قفس با عمق زیاد بسیار راحت تر می باشد. اما در صورتی که هدف، ایجاد گشتاور راه اندازی زیاد می باشد، نتایج مدل سازی به روش اجزاء محدود نشان می دهد که با میله های نازک تر راه اندازی با گشتاور بیشتری همراه است. در شکل (۵-۱۳) پاسخ سرعت در فرآیند راه اندازی با در نظر گرفتن سه حالت برای میله ها قرار داده شده است.



شکل (۵-۱۳): پاسخ سرعت در انواع سایزهای مختلف ابعادی میله های قفس

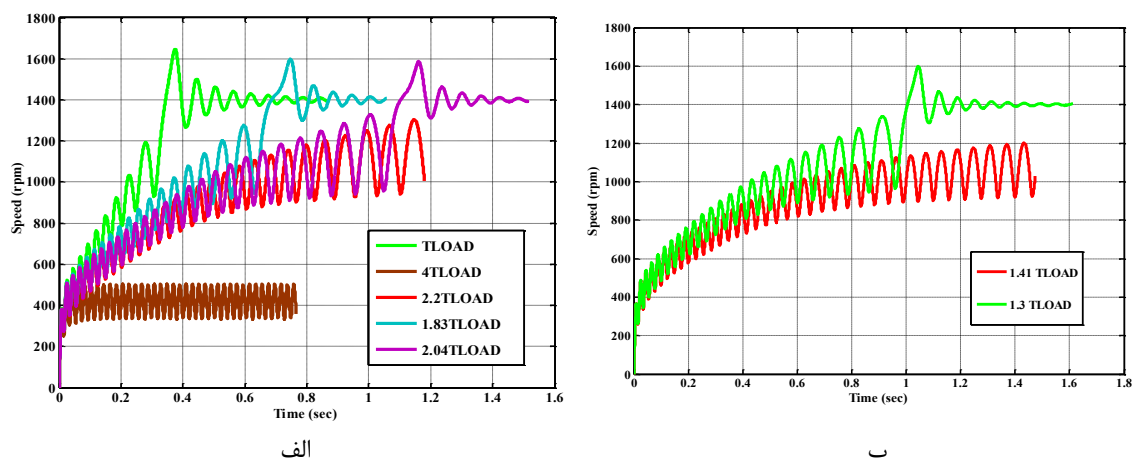
همانطور که در شکل (۵-۱۳) مشاهده می شود در صورتی که عمق میله ها از سطح فاصله هوایی کمتر باشد، پاسخ سرعت سریع تر و گشتاور راه اندازی بیشتر می باشد. با توجه به اینکه در عمل، ممکن است از ابتدا باری بر روی محور موتور قرار داشته باشد، بنابراین باید ساختار هر قفس و سقف تولید گشتاور راه اندازی آن مورد بررسی قرار گیرد تا به این شکل، نحوه استفاده از این موتور و موارد استفاده آن تعیین گردد. در شکل (۵-۱۴) پاسخ سرعت در فرآیند راه اندازی برای قفس با میله های

نازک (۲/۵ میلی متر از سطح فاصله هوایی) به ازای گشتاور بار ثابت اولیه، در حالت های مختلف رسم گردیده است.



شکل (۵-۱۴): پاسخ سرعت در ازای گشتاورهای بار مختلف با میله قفس به طول ۲/۵ میلی متر

همچنین به طور مشابه برای قفس با میله های به طول ۷/۷ میلی متر و ۱۳ میلی متر از سطح فاصله هوایی پاسخ سرعت به ازای گشتاورهای راه اندازی مختلف در شکل (۵-۱۵) رسم گردیده شده است.

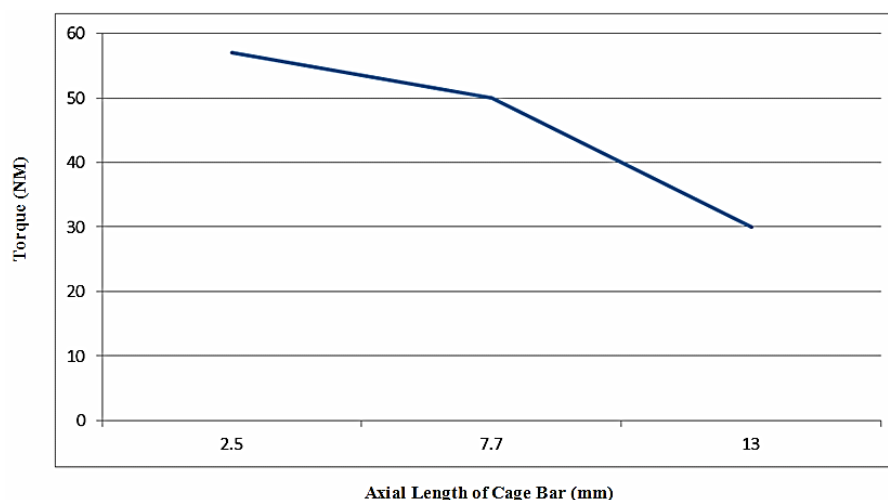


شکل (۵-۱۵): الف- پاسخ سرعت به ازای میله قفس به طول ۷/۷ میلی متر. ب- پاسخ سرعت به ازای میله قفس به طول ۱۳ میلی متر

نتایج مدل سازی به روش اجزاء محدود نشان می دهد که در صورتی که از قفس با میله های نازک استفاده کنیم می توانیم باری با گشتاور ۲/۵ برابر گشتاور نامی در هنگام راه اندازی به حرکت در

بیاوریم و موتور هر چند با نوساناتی ولی به سرعت سنکرون برسد. البته باید ذکر کرد که با توجه به کاهش سرعت راه اندازی موتور، خطر مغناطیس زدایی برگشت ناپذیر وجود دارد که می توان با انتخاب جنس مناسب برای آهنربا تا حدودی این اثر را کاهش بخشید. با توجه به اینکه هدف از ایجاد راه اندازی مستقیم برای موتور سنکرون مغناطیس دائم ترویج کاربرد این موتور از موارد خاص به موارد عام می باشد، بنابراین از این خاصیت می توان در موارد راه اندازی ضربه ای که بسیار در صنعت مورد استفاده قرار می گیرد بهره برد.

نتایج شبیه سازی نشان می دهد در صورتی که طول میله های موجود در قفس کوتاه تر باشد حداکثر گشتاور راه اندازی بیشتری را داریم. در شکل (۵-۱۶) حداکثر گشتاور تولیدی به ازای هر نوع قفس در فرآیند راه اندازی بیان شده است.

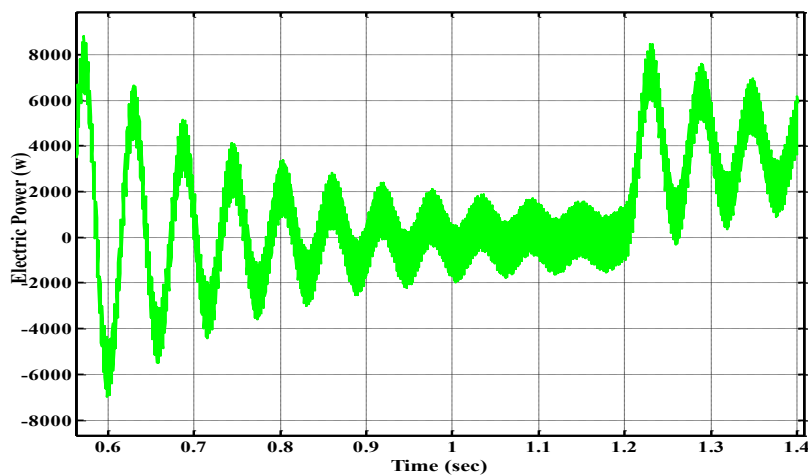


شکل (۵-۱۶): حداکثر گشتاور مجاز جهت راه اندازی موفق نسبت به طول محوری میله های قفس

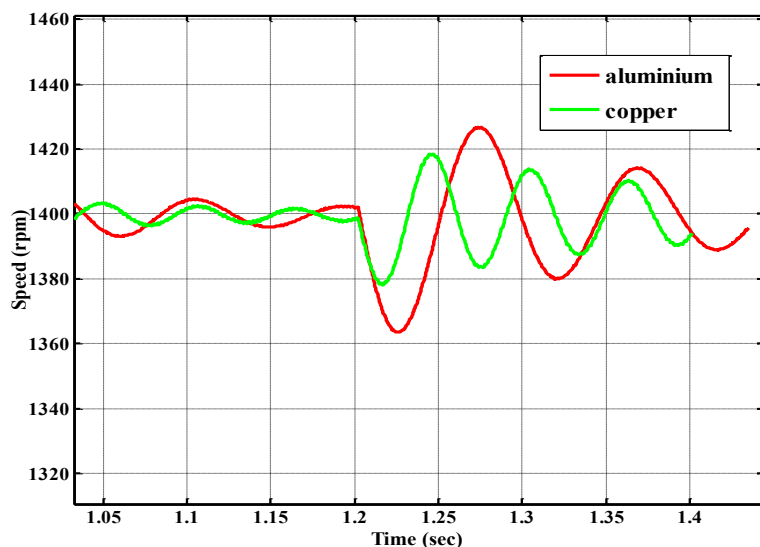
با دقت در شکل (۵-۱۶) مشاهده می شود تغییرات در طول قفس تغییر محسوسی در حداکثر گشتاور راه اندازی دارد. همچنین مشاهده می شود که تغییرات طول قفس رابطه غیرخطی با سقف گشتاور تولیدی دارد.

با توجه به این که راه اندازی موفق در بار نامی سبب مغناطیس زدایی برگشت ناپذیر آهنربا می شود،

بهتر است راه اندازی بی باری انجام شود و سپس بارگذاری روی شفت موتور انجام گیرد. از این خاصیت می توان در میکسر ها نیز استفاده نمود. هنگامی که بارگذاری انجام می شود، زاویه δ مقدار بیشتری می شود و اختلاف سرعت میدان دوار استاتور و روتور زیاد می شود. در صورتی که موتور سنکرون مغناطیس دائم هیچ گونه قفسی نداشته باشد، دامنه این نوسانات سرعت با شیب بسیار کندی کاهش می یابد اما، وجود قفس نقش دمپینگ این نوسانات را ایفا می کند. در شکل (۵-۱۷-الف) دامنه توان ورودی موتور در پروسه بارگذاری بیان شده است. در زمان $1/2$ ثانیه، باری معادل با توان نامی موتور روی شفت قرار داده شده است. مشاهده می شود که توان موتور به سمت ۳۷۰۰ وات در حال نوسان است. در صورتی که بتوان از قفس مسی استفاده نمود، به جهت مقاومت ویژه کمتر این ماده نسبت به آلومینیوم سرعت سنکرونیسم دوباره موتور بسیار افزایش پیدا می کند که نشان دهنده نقش بهتر قفس مسی در مقابل با قفس آلومینیومی در عملکرد دمپری می باشد. در شکل (۵-۱۷-ب) پاسخ سرعت موتور در پروسه بارگذاری بیان شده است.



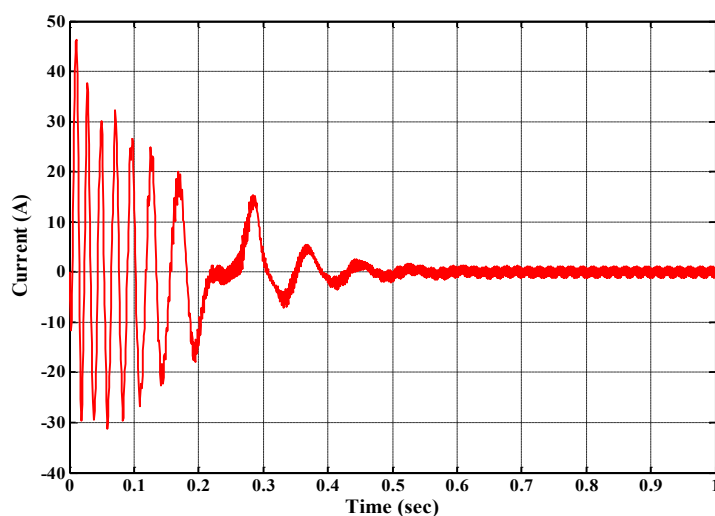
الف



ب

شکل (۵-۱۷): الف- توان ورودی موتور در پروسه بارگذاری. ب- تغییرات سرعت موتور در پروسه بارگذاری با دو قفس مسی و آلومینیومی

در شکل (۵-۱۸) جریان میله بین هر قطب رسم شده است. با توجه به شکل، مشاهده می شود که جریان شدیدی در هنگام راه اندازی از میله ها عبور می کند که این امر سبب تلفات مسی زیادی در میله ها در هنگام راه اندازی می شود، همچنین در صورت عدم رعایت استحکامات کافی ممکن است در اثر نیروهای مغناطیسی وارده به میله، میله های روتور قطع شود و در عمل راه اندازی با مشکل مواجه شویم.

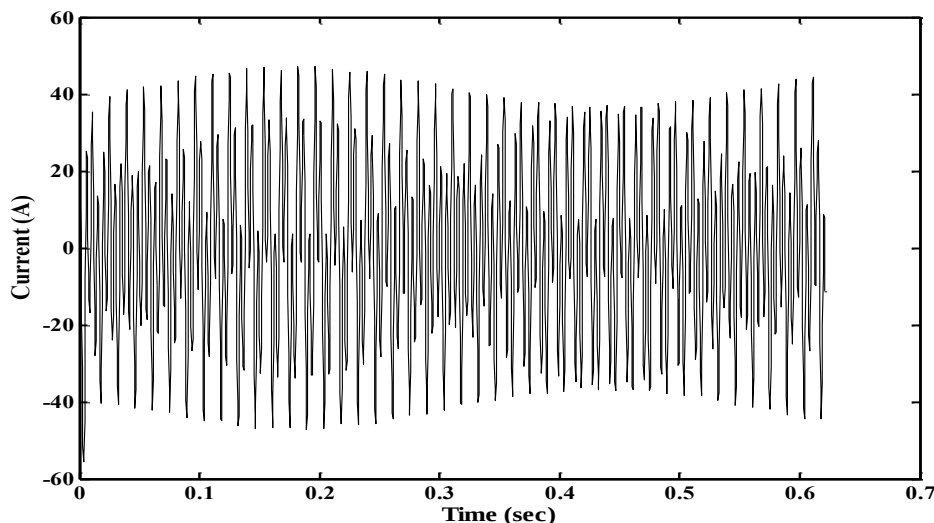


شکل (۵-۱۸): جریان میله قرار گرفته بین هر قطب در قفس (لحظه راه اندازی)

۵-۵. بررسی عملکرد پایدار موتور سنکرون مغناطیس دائم شار

محوری با قفس

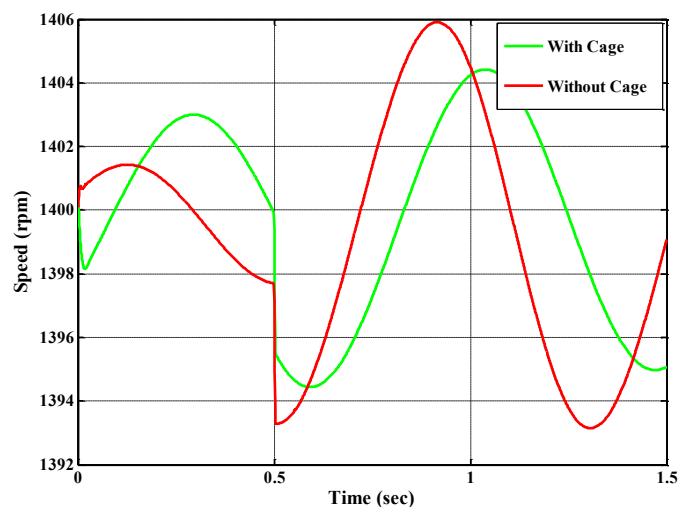
در موتورهای سنکرون مغناطیس دائم بدون قفس، با تغذیه موتور توسط درایو فرکانس متغیر، عمل راه اندازی موتور انجام می شود. در صورتی که در عملکرد سنکرون، موتور به منبع ولتاژ نامی اتصال پیدا کند، در حالت پایدار جریان هارمونیکی از شبکه دریافت می کند. وجود این جریان هارمونیکی می تواند سبب ایجاد شار هارمونیکی در فاصله هوایی گردد و به دنبال آن ایجاد تلفات در روتور و استاتور را به دنبال دارد. در شکل (۵-۱۹) جریان لحظه ای استاتور در ماشین سنکرون معمولی در شرایط عملکرد پایدار و در حالت مینیمم جریان موتور و ضریب قدرت ۰/۹۶، با استفاده از تحلیل FEM آمده است.



شکل (۵-۱۹): جریان لحظه ای استاتور در عملکرد سنکرون در حالت مینیمم جریان موتور

یکی از کاربردهای بسیار مهم قفس در شرایط عملکرد نامی موتور، دمپ نوسانات و حفظ سنکرونیزم موتور می باشد. در موقعیتی که بار ناخواسته روی شفت موتور قرار گیرد، سرعت به شکل لحظه ای کاهش پیدا می کند. این کاهش سرعت روتور، سبب القای ولتاژ در قفس و به دنبال آن ایجاد

جریان در میله های قفس می شود. گشتاور تولیدی توسط قفس در جهت کاهش نوسانات می باشد. در حالتی که ماشین بدون قفس باشد سنکرون سازی دوباره موتور با سرعت کمتری انجام می گیرد. در شکل (۵-۲۰) مقایسه ای بین دو موتور سنکرون مغناطیس دائم شار محوری با قفس و بدون قفس با وارد کردن اغتشاش انجام شده است. تمامی شرایط عملکردی و دامنه گشتاور مزاحم وارد شده در هر دو موتور یکسان می باشد.



شکل (۵-۲۰): پاسخ سرعت به ازای ورود اغتشاش در دو حالت با قفس و بدون قفس با گشتاور لحظه ای ۴ نیوتون متر

با دقت در شکل فوق مشاهده می شود که دامنه نوسانات با وارد شدن اغتشاش در حالتی که قفس وجود داشته باشد بسیار کمتر از حالت دیگر است.

۵-۶. جمع بندی

در این فصل به مدل سازی ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار محوری با قفس راه انداز پرداخته شد. در این تحقیق ابتدا با استفاده از مدل تحلیلی ماشین مورد نظر مدل سازی دینامیک گذرای انجام شد. جهت افزایش دقت در نتایج مدل سازی، با استفاده از FEM، مدل سازی دینامیک گذرای انجام شد و سپس مقایسه ای بین این دو روش انجام شد. نتایج شبیه سازی در هر دو روش نشان داد که طراحی قفس به روش تحلیلی کامل درست بوده است. همچنین نقش قفس در عملکرد دمپینگ

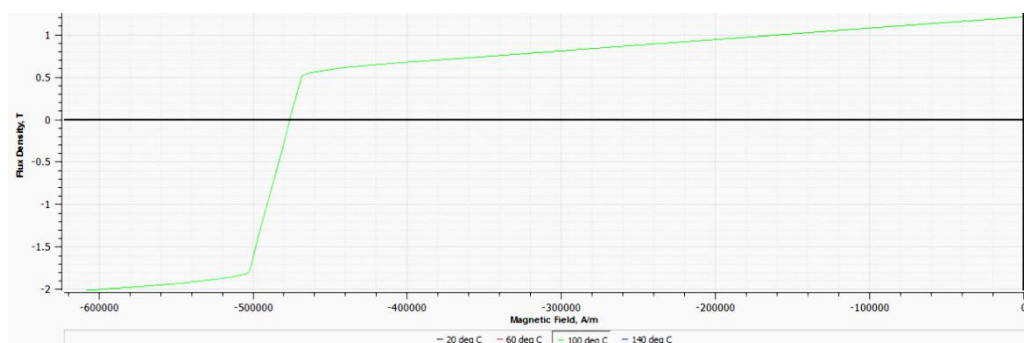
نوسانات توسط مدل سازی اجزاء محدود مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که سرعت سنکرونیزم با وجود قفس بسیار سریع تر از حالتی است که قفس وجود ندارد.

فصل ششم

بررسی مغناطیس‌زدایی در ماشین LSAFPM

۶-۱. مقدمه

در این فصل پدیده مغناطیس‌زدایی آهنربا و تاثیر آن بر عملکرد آهنربا و ماشین بیان می‌شود. جهت بررسی پدیده مغناطیس‌زدایی رژیم‌های عملکردی مختلفی را در نظر می‌گیریم. در تحلیل این پدیده، ابتدا نقاط مختلفی از سطح آهنربا را در نظر می‌گیریم و در بازه زمانی خاصی چگالی شار مغناطیسی آن نقطه را در هر کدام از شرایط عملکردی مشخص می‌کنیم. همچنین به نقش قفس در کاهش پدیده مغناطیس‌زدایی در شرایط عملکردی خاص پرداخته می‌شود. با استفاده از نتایج FEM سه بعدی، ساختار میله‌ها را جهت کاهش پدیده مغناطیس‌زدایی تغییر می‌دهیم تا به طراحی بهینه ساختاری برای میله‌ها هم به جهت راه‌اندازی و هم کاهش مغناطیس‌زدایی دست پیدا کنیم. در این فصل به بررسی و تحلیل رفتار مغناطیس‌زدایی آهنربا در ماشین سنکرون شار محوری در شرایط عملکردی خاص می‌پردازیم. نوع آهنربا در نظر گرفته شده در این ماشین Neomax-42 می‌باشد. علت انتخاب این ماده به خاطر وزن کمتر نسبت به NdFeB می‌باشد. دمای کاری در نظر گرفته در شرایط نامی در سطح فاصله‌هوایی ۸۰ درجه بود، اما به دلیل اینکه در کاتالوگ این ماده دمای ۸۰ درجه موجود نمی‌باشد، دمای بالاتر یعنی ۱۰۰ درجه انتخاب شد. منحنی مغناطیسی ماده Neomax-42 در شکل (۶-۱) آورده شده است.



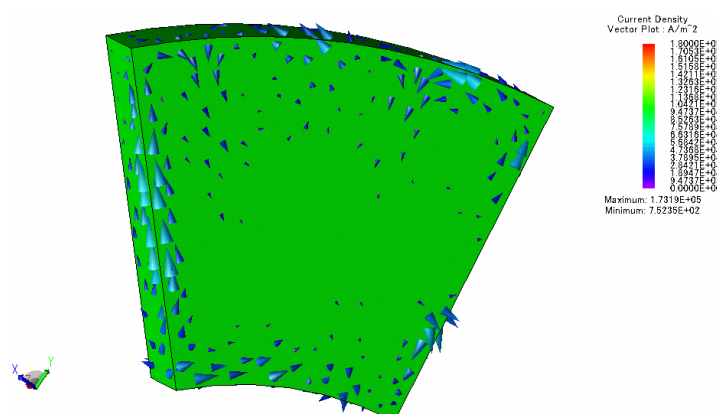
شکل (۶-۱): منحنی مغناطیسی ماده Neomax-42 در 100 °C

می‌توان گفت در صورتی که چگالی شار مغناطیسی آهنربا روی منحنی خطی کاهش پیدا کند، هرگز مغناطیس‌زدایی برگشت ناپذیر رخ نخواهد داد. در بعضی از مواد منحنی مغناطیسی ماده در ربع

دوم را به صورت کاملاً خطی در نظر می‌گیرند، با این فرض هرگز مغناطیس‌زدایی برگشت ناپذیر در این مواد اتفاق نمی‌افتد.

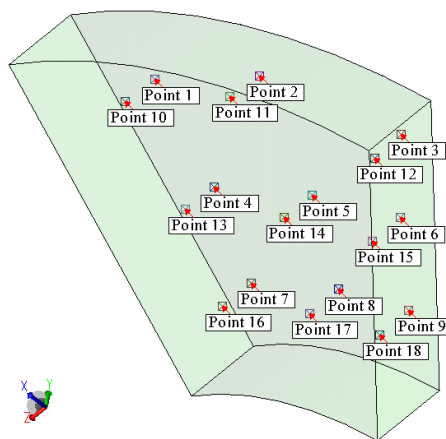
۶-۲. مغناطیس‌زدایی در حالت ژنراتوری بی‌بار

بهترین حالت کاری برای PMها به لحاظ مغناطیسی، حالت ژنراتوری بی‌بار است. در این شرایط چون جریان استاتور صفر است بنابراین عکس‌العمل آرمیچر صفر است. تنها عامل جهت کاهش چگالی شار آهنربا وجود جریان گردابی در PMها می‌باشد. با شبیه‌سازی FE سه بعدی اثر مغناطیس‌زدایی در حالت ژنراتوری بی‌بار بررسی می‌گردد. در شکل (۶-۲) جریان‌های گردابی جاری در PM نشان داده شده است.



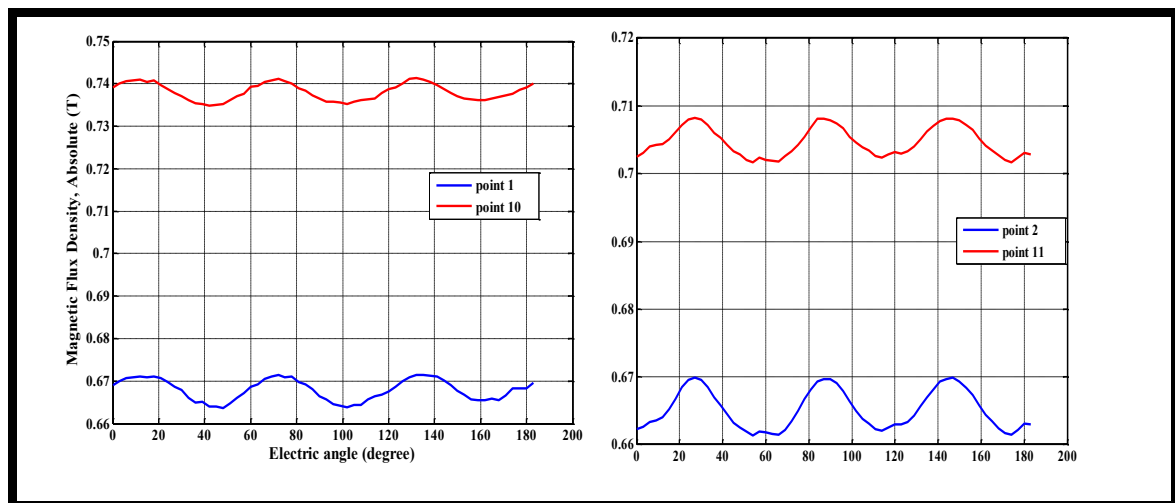
شکل (۶-۲): جریان‌های گردابی در آهنربا

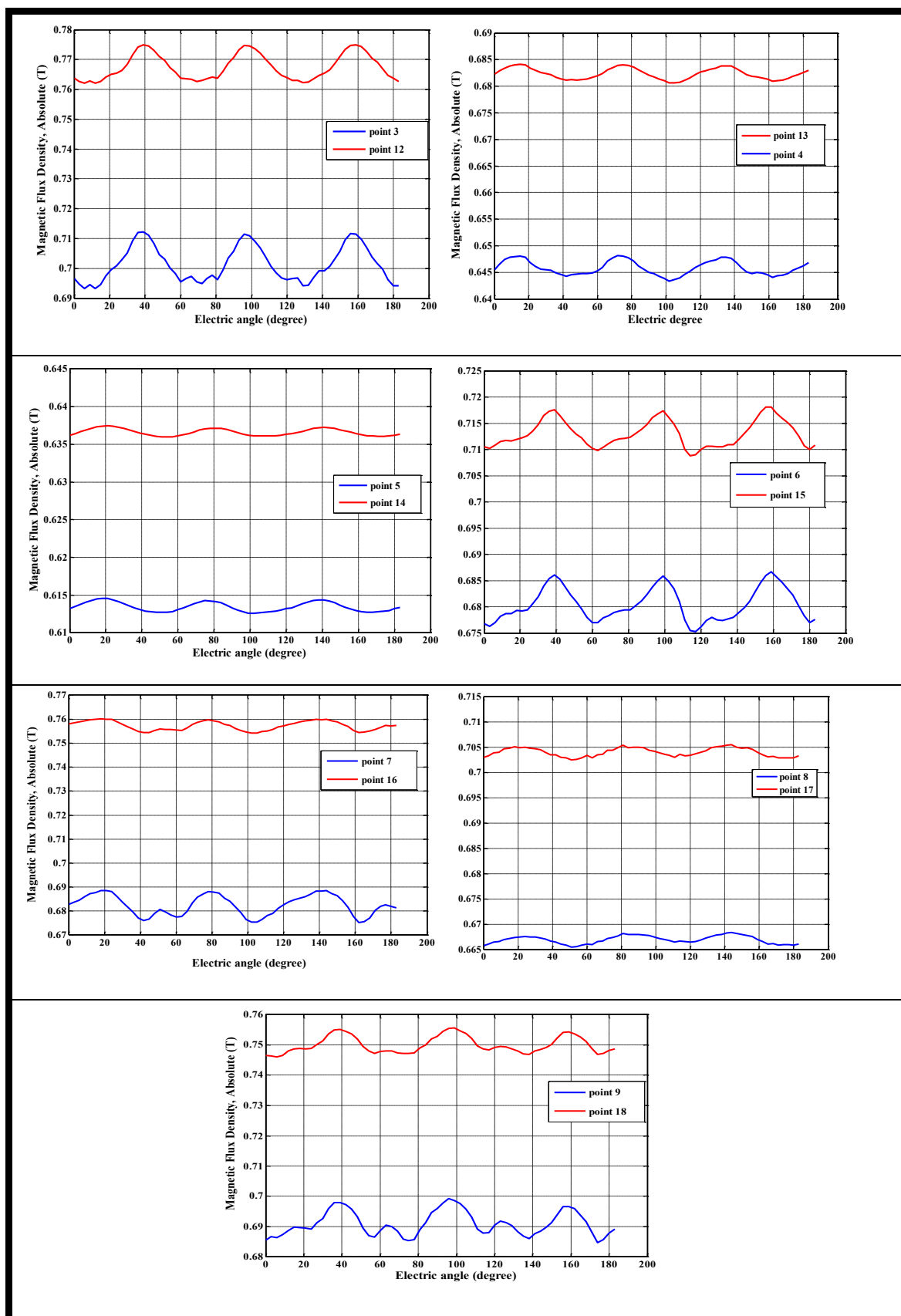
در اکثر مطالعات قبلی در مورد مسائل مغناطیس‌زدایی، درصد مغناطیس‌زدایی فقط در یک استپ زمانی خاص آورده شده است. با توجه به اینکه عکس‌العمل آرمیچر به جریان لحظه‌ای استاتور و همچنین به موقعیت روتور بستگی دارد، بنابراین بهتر است چگالی شار آهنربا در نقاط مختلف سطح آن دیده شود و همچنین به جای اینکه در یک استپ زمانی اطلاعات داده شود، در بازه زمانی خاصی آورده شود. در شکل زیر نقاط تعیین شده در PM جهت بدست آوردن چگالی شار PM آورده شده است.



شکل (۳-۶): موقعیت نقاط در نظر گرفته شده جهت بررسی مغناطیس‌زدایی آهنربا

در شکل (۳-۶)، نقاط ۱ تا ۹ در سطح PM مماس با فاصله هوایی قرار دارد و نقاط ۱۰ تا ۱۹ در موقعیت X,Y یکسان با نقاط قبلی ولی در عمق PM قرار گرفته‌اند. در اشکال زیر چگالی شار نقاط مختلف PM در بازه نصف دوره تناوب با شبیه سازی سه بعدی FEM در حالت ژنراتوری بی‌بار آورده شده است.



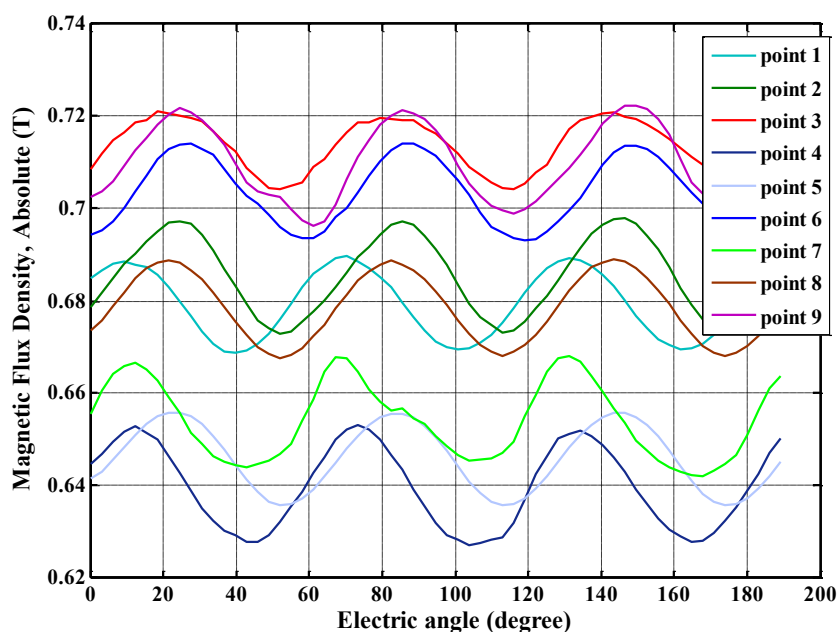


شکل (۶-۴): چگالی شار نقاط مختلف تعیین شده در آهنربا در نصف دوره تناوب و در حالت ژنراتوری بی‌بار

همان‌طور که در شکل (۴-۶) دیده می‌شود، در هر نقطه با چرخش روتور، چگالی شار مغناطیسی دیده شده متفاوت می‌باشد، همچنین مشاهده می‌شود که در نقطه ۵ کم‌ترین چگالی شار بدست آمده است. نقطه ۵ در مرکز آهنربا قرار گرفته است. در شکل فوق هیچ‌کدام از نقاط در نظر گرفته شده مغناطیس‌زدایی برگشت ناپذیر نداشته‌اند. نکته بسیار مهم این است که همواره چگالی شار در سطح PM مماس با فاصله هوایی کاهش بیشتری نسبت به نقاط داخلی PM دارد، بنابراین در ادامه تحلیل، جهت بررسی حالات عملکردی دیگر فقط نقاط سطحی PM جهت بررسی مغناطیس‌زدایی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۶. مغناطیس‌زدایی تحت بار نامی

در عملکرد پایدار ماشین تحت بار نامی، جریانی با مولفه‌های هارمونیک از استاتور عبور می‌کند. در شکل (۵-۲۰) جریان نامی ماشین تحت بار نامی آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود هارمونیک‌های ۵ و ۷ درصد بالایی از مولفه‌های هارمونیک جریان در میله روتور را به خود اختصاص داده‌اند. بنابراین شار فاصله‌هوایی ناشی از جریان استاتور، دارای مولفه‌های هارمونیک می‌باشد که باعث کاهش چگالی شار آهنربا می‌شود. در شکل (۵-۶) منحنی چگالی شار آهنربا در نقاط مختلف در نظر گرفته شده است.



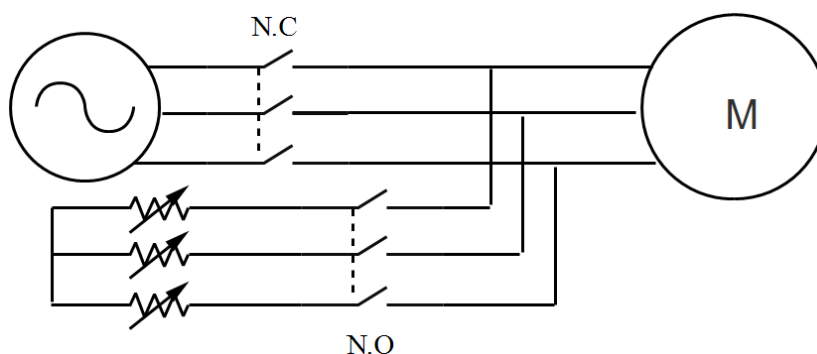
شکل (۶-۵): چگالی شار نقاط مختلف در سطح PM در عملکرد بار نامی

در مقایسه نقطه به نقطه چگالی شار مغناطیسی در حالت بی باری و بار نامی مشاهده می‌شود که چگالی شار در حالت عملکرد بار نامی به طور نسبی در تمامی نقاط کاهش اندکی پیدا کرده است اما همچنان بالای نقطه زانویی می‌باشد که این موضوع یکی از مواردی است که صحت طراحی اولیه ماشین را اثبات می‌کند.

۶-۴. بررسی مغناطیس‌زدایی در عملکرد ترمزی موتور

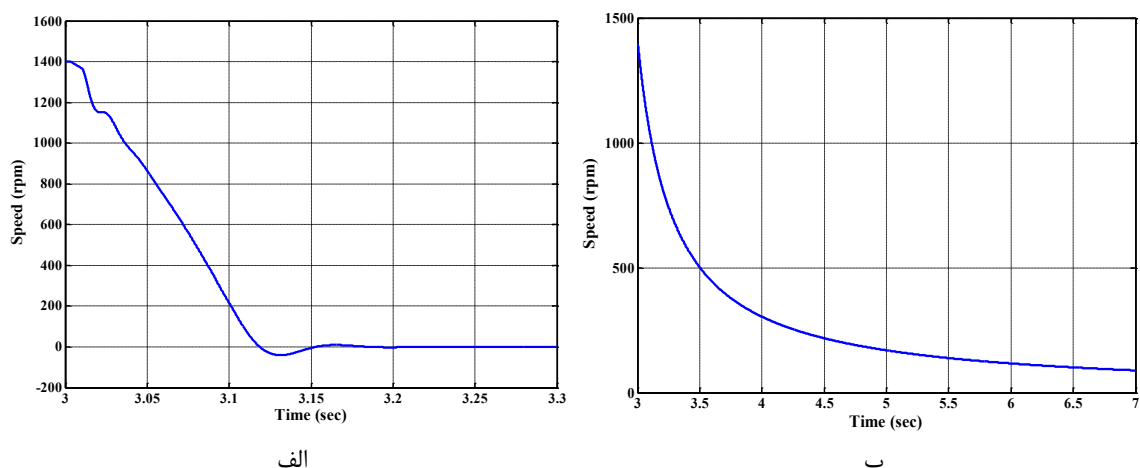
موتورهای با تکنولوژی آهنربا دائم با توجه به وجود شار دائمی در روتور در هنگام قطع از شبکه، مدت زمان زیادی طول می‌کشد تا به سرعت صفر برسند. بسته به کاربرد موتور، ممکن است این موضوع سبب اختلال در عملکرد مناسب موتور گردد. به همین دلیل ترمز الکتریکی جهت توقف موتور در دستور کار قرار می‌گیرد. همانند ترمز جریان مخالف در ماشین‌های القایی که از معکوس کردن جهت میدان دوار استاتور و روتور در یک لحظه خاص استفاده می‌شود، در ماشین‌های PM می‌توان از این خاصیت استفاده نمود. در این حالت با قطع موتور از شبکه و اتصال کوتاه کردن ترمینال‌های استاتور، جریان شدیدی در استاتور تولید می‌شود که از تقابل میدان مغناطیسی تولید شده توسط

استاتور و میدان روتور، گشتاور ترمزی در موتور ایجاد می‌گردد [۳۴]. چون شار در فاصله هوایی ماشین بسیار زیاد است در لحظه ای که ترمینال استاتور به صورت اتصال کوتاه باشد به علت امپدانس کمی که در مسیر استاتور وجود دارد و همچنین دامنه Back Emf تقریباً صفر است بنابراین، جریان شدیدی از سیم‌پیچ می‌گذرد. این جریان سبب مغناطیس‌زدایی آهنربا می‌گردد. در شکل (۶-۷) نحوه ترمزگیری بیان شده در ماشین سنکرون PM آمده است.



شکل (۶-۶): نحوه عملکرد ترمزی در موتور سنکرون PM

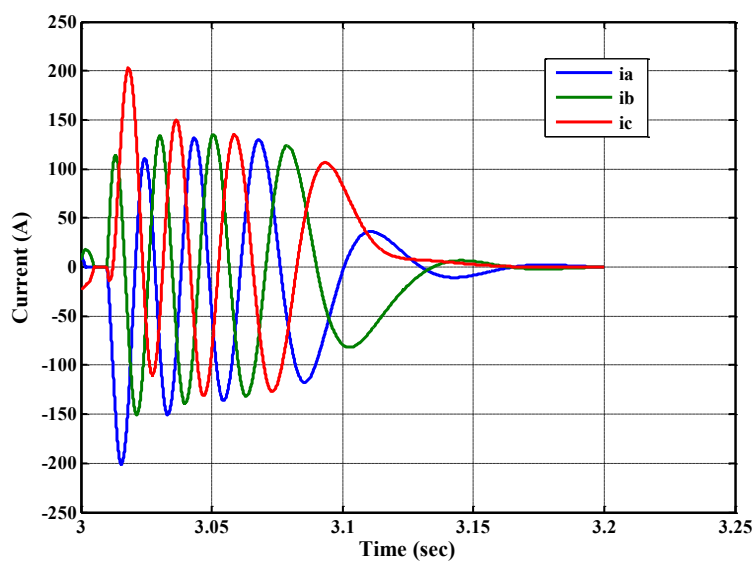
همچنین در شکل (۶-۷) نحوه شتاب‌گیری منفی سرعت در دو حالت با ترمز و بدون ترمز آمده است.



شکل (۶-۷): نحوه کاهش سرعت (الف) حالت ترمزی (ب) قطع موتور از شبکه بدون ترمز

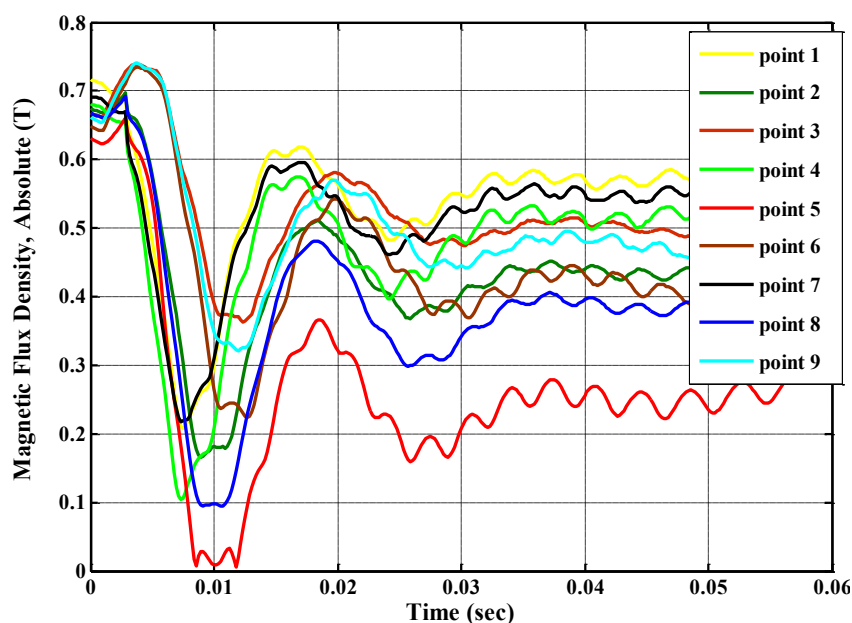
هر چه اختلاف زمان بین قطع از شبکه و اتصال کوتاه شدن سه‌فاز بیشتر باشد نیروی ترمزی ضعیف‌تر و جریان ضعیف‌تری از استاتور می‌گذرد. در شکل (۶-۸) جریان اتصال کوتاه عبوری از

سیم‌پیچ استاتور در لحظه ترمزی آورده شده است.



شکل (۶-۸): جریان سه فاز استاتور در عملکرد ترمزی

البته می‌توان با سری کردن مقاومت در مسیر اتصال کوتاه، دامنه جریان عبوری از سیم‌پیچ‌ها را کاهش داد که جهت کوتاه کردن مطالب پایان‌نامه از بیان آن اجتناب شده است. با توجه به شدت جریان که تا ۸ برابر جریان نامی در لحظه اتصال کوتاه افزایش پیدا کرده است، این امکان وجود دارد که مغناطیس‌زدایی برگشت ناپذیر رخ دهد. در شکل (۶-۹) چگالی شار مغناطیسی در نقاط مشخص شده در سطح PM در لحظه وقوع اتصال کوتاه استاتور آورده شده است.



شکل (۶-۹): چگالی شار در نقاط مختلف در سطح PM در لحظه ترمز

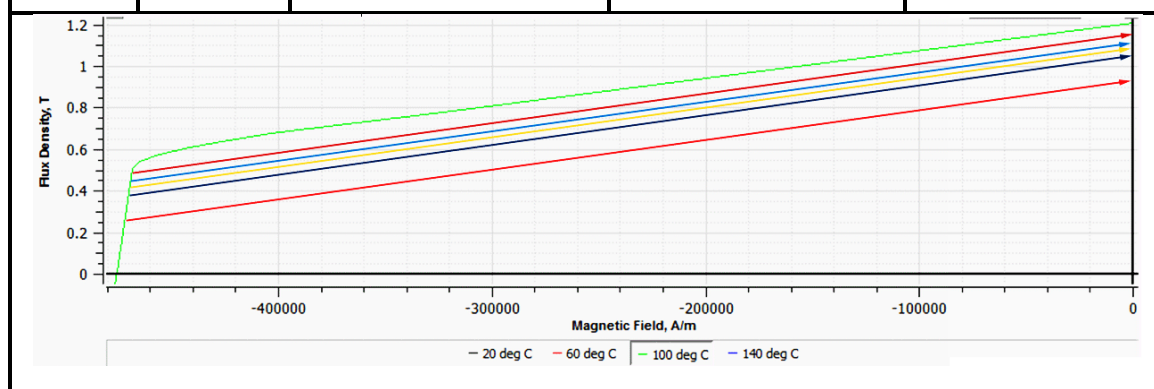
همان‌طور که مشاهده می‌شود در لحظه اتصال کوتاه چگالی شار تمامی نقاط به شدت کاهش پیدا کرده است. با توجه به کاهش چگالی شار از ۰/۵ تسلا (نقطه زانویی) در تمامی نقاط و با در نظر گرفتن منحنی چگالی شار نامی آهنربای Neomax-42 مشاهده می‌شود که در تمامی نقاط مغناطیس‌زدایی برگشت‌ناپذیر رخ داده است. در نقاط ۷ و ۹ و ۱۰ مغناطیس‌زدایی برگشت‌ناپذیر در بازه زمانی کمی رخ داده است اما در نقاط ۵ و ۶ و ۸ مدت زمان مغناطیس‌زدایی بیشتر می‌باشد. معمولاً تحلیل مغناطیس‌زدایی در هر ناحیه و یا نقطه در PM بر حسب درصد بیان می‌شود، که از رابطه زیر بدست می‌آید [۷۳۴].

$$Demagnetization\ value = \left(1 - \frac{B_r}{B_{r0}}\right) \times 100 \quad (۱-۶)$$

در جدول (۱-۶) درصد مغناطیس‌زدایی در نقاط مختلف در بدترین شرایط به لحاظ چگالی شار مغناطیسی برای اتصال کوتاه سه‌فاز موتور بیان شده است.

جدول (۶-۱): درصد مغناطیس‌زدایی در نقاط مختلف سطحی PM در لحظه ترمز

درصد مغناطیس‌زدایی برگشت ناپذیر بعد از شرایط خطا	موثرچگالی شار نهایی	مدت زمان مغناطیس‌زدایی برگشت ناپذیر تا زیر ۰/۵ تسلا	کمترین چگالی شار	نقطه
۰	۰/۵۸	۷ میلی ثانیه	۰/۲۲	۱
۸/۳۳ %	۰/۴۵	۱۱ میلی ثانیه	۰/۱۷	۲
۰	۰/۵۱	۶/۵ میلی ثانیه	۰/۳۷	۳
۰	۰/۵۲۵	۷ میلی ثانیه	۰/۱۱	۴
۲۲/۵ %	۰/۲۶۲۶	-	۰/۰۱۵	۵
۹/۱۶ %	۰/۴۳	۱۰ میلی ثانیه	۰/۲۲۵	۶
۰	۰/۵۵	۸ میلی ثانیه	۰/۲۲	۷
۱۲/۵ %	۰/۳۹	-	۰/۰۹	۸
۴/۱۶ %	۰/۴۸	۷ میلی ثانیه	۰/۳۳	۹

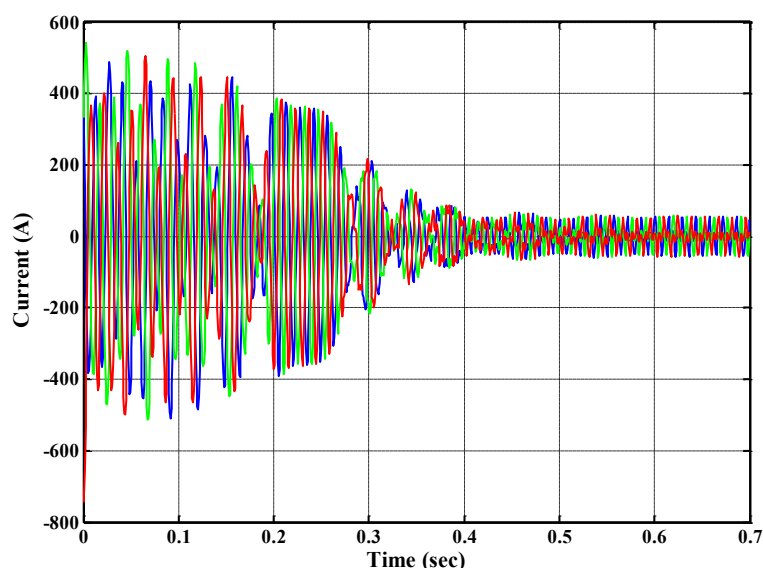


در ابتدای تحلیل بیان شد که در بسیاری از مطالعات فقط مغناطیس‌زدایی در یک استپ زمانی خاص با استفاده از FEM نمایش داده شده است که نتایج بیان شده در جدول، نمایش بازه زمانی مغناطیس‌زدایی را بسیار مهم جلوه می‌کند. همچنین موارد فوق نشان می‌دهند که ناحیه میانی PM بیشتر تحت تاثیر شارهای ناشی از عکس‌العمل آرمیچر قرار می‌گیرد و درصد مغناطیس‌زدایی بالاتری

از خود نشان می‌دهد.

۵-۶. بررسی مغناطیس‌زدایی در شرایط راه‌اندازی مستقیم موتور

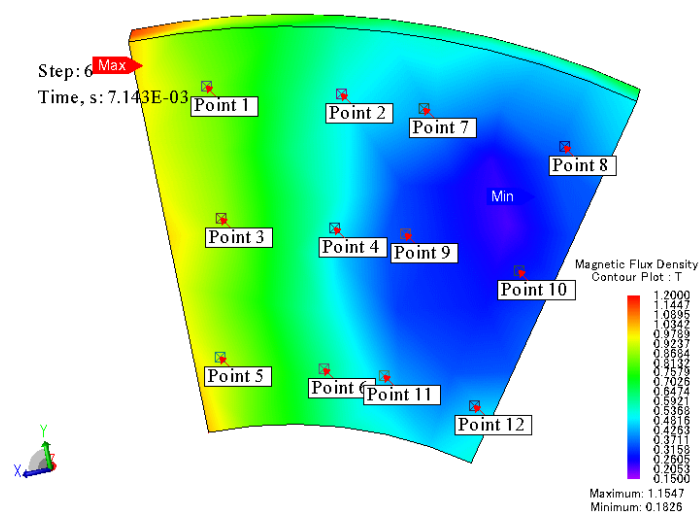
یکی از مسائل بسیار مهم جهت بررسی مغناطیس‌زدایی آهنربا، تاثیر راه‌اندازی مستقیم موتور بر آهنربا می‌باشد [۳۶،۳۵]. با توجه به مطالب بیان شده در فصل قبل، در لحظه راه‌اندازی مقدار جریان اولیه استاتور بسیار شدید می‌باشد که ممکن است باعث مغناطیس‌زدایی برگشت ناپذیر در آهنربا شود. دامنه جریان راه‌اندازی با استفاده از FEM دو بعدی در شکل (۶-۱۰) آمده است.



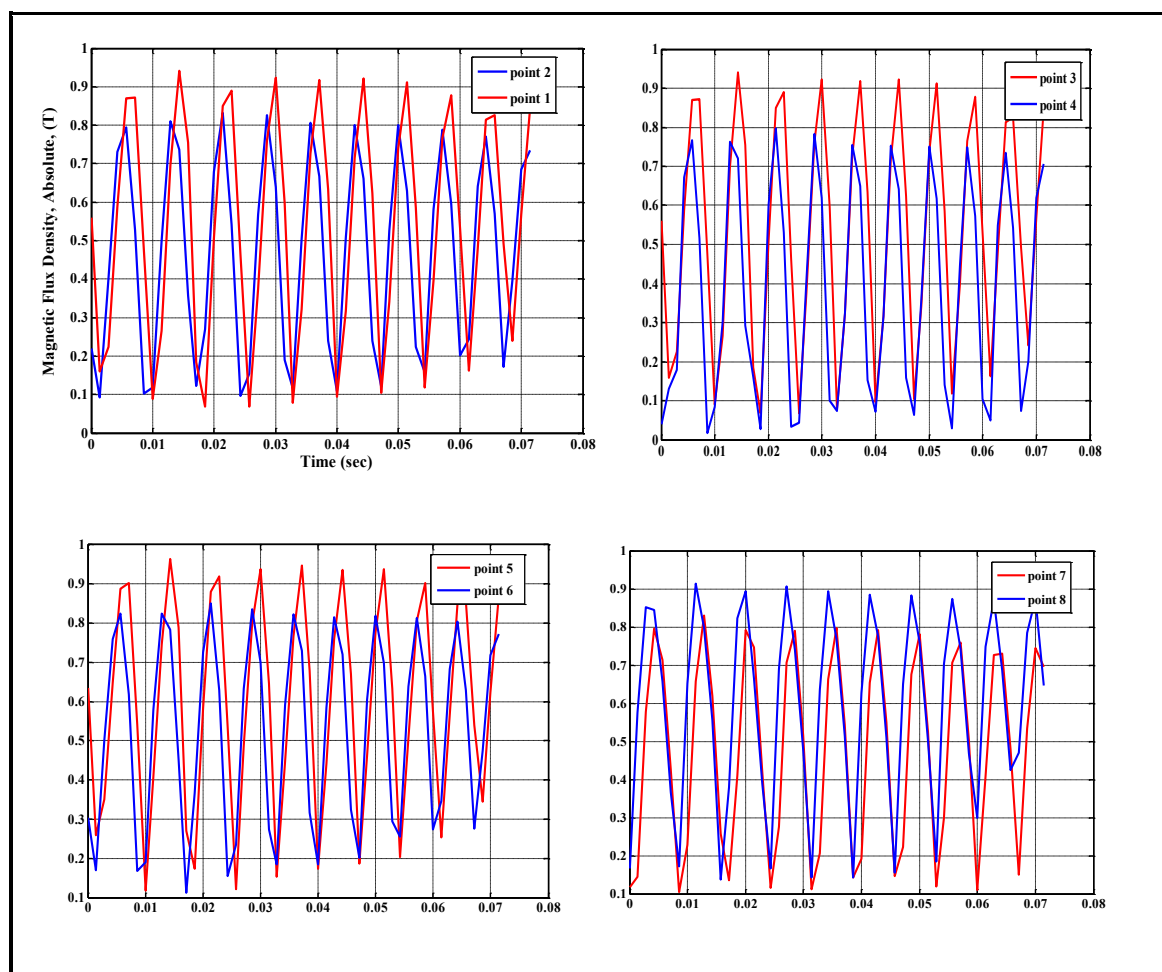
شکل (۶-۱۰): جریان راه‌اندازی موتور LSAFPM

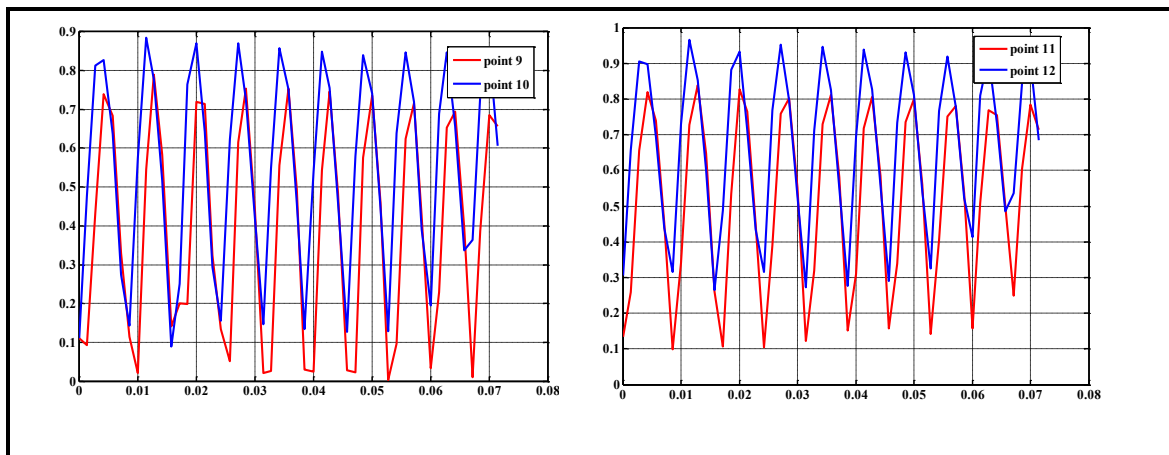
همان‌طور که مشاهده می‌شود دامنه این جریان، از جریان ترمزی بیشتر و همچنین مدت زمانی که این جریان به مقدار نامی کاهش پیدا می‌کند از جریان ترمزی زمان بیشتری طول می‌کشد، بنابراین در صورتی که مغناطیس‌زدایی برگشت‌ناپذیر در حالت راه‌اندازی بهبود پیدا کند، قطعا در حالت ترمزی به نتایج بهتری دست پیدا می‌کنیم. همچنین توجه به این نکته ضروری است که در این حالت می‌توانیم به ساختار بهینه جهت قرار دادن میله‌های قفس دست پیدا کنیم. در حالت اول با توجه به ساختار اولیه که برای میله‌های قفس قرار داده شده مغناطیس‌زدایی را بررسی می‌کنیم.

شکل (۶-۱۱) چگالی شار مغناطیسی در نقاط مختلف PM در فرآیند راه‌اندازی آورده شده است.



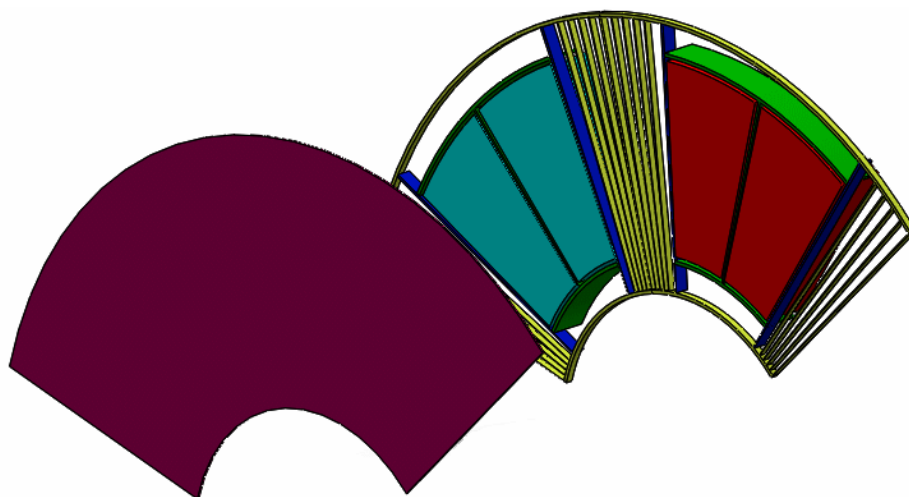
شکل (۶-۱۱): توزیع چگالی جریان در لحظه راه‌اندازی بدون قفس در یک استپ



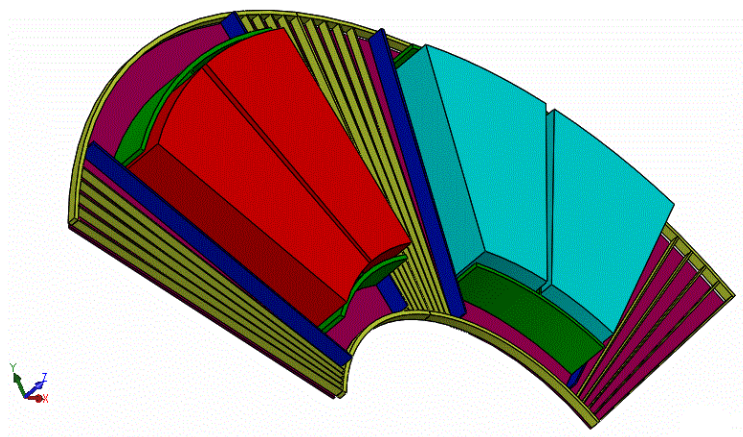


شکل (۶-۱۲): چگالی شار نقاط مختلف PM در زمان راه‌اندازی مستقیم موتور

با مشاهده شکل (۶-۱۲)، و تطبیق نقاط از نظر مکانی با شکل (۶-۱۱) می‌توان نتیجه گرفت که چگالی شار متوسط بعد از دی‌مگنتایز شدن در نواحی داخلی آهنربا دامنه کمتری نسبت به نواحی کناره آهنربا دارد. جهت بهبود رفتار ماشین از جهت کاهش مغناطیس‌زدایی آهنرباها، می‌توان میله‌ای در وسط آهنربا در هر قطب قرار داد. همچنین نواحی اطراف آهنربا به طور کامل توسط میله‌های آلومینیومی احاطه می‌شود. در شکل (۶-۱۳) ساختار جدید و بهینه نهایی جهت قفس راه‌انداز رسم شده است.



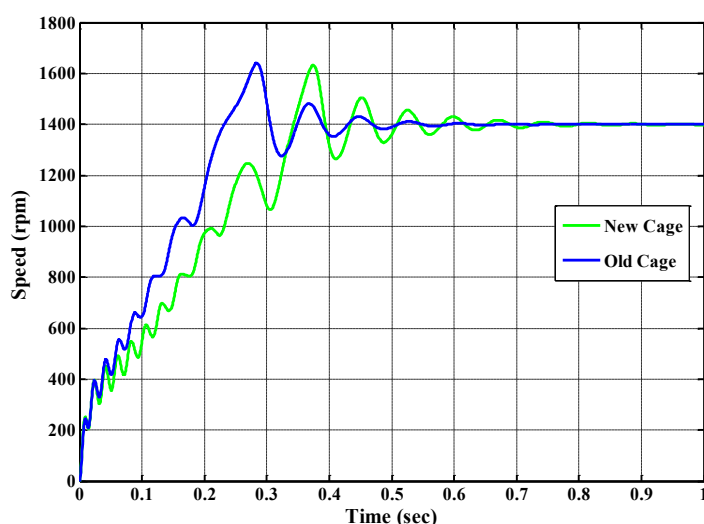
الف



ب

شکل (۶-۱۳): ساختار بهینه شده جهت قفس راه انداز ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار محوری

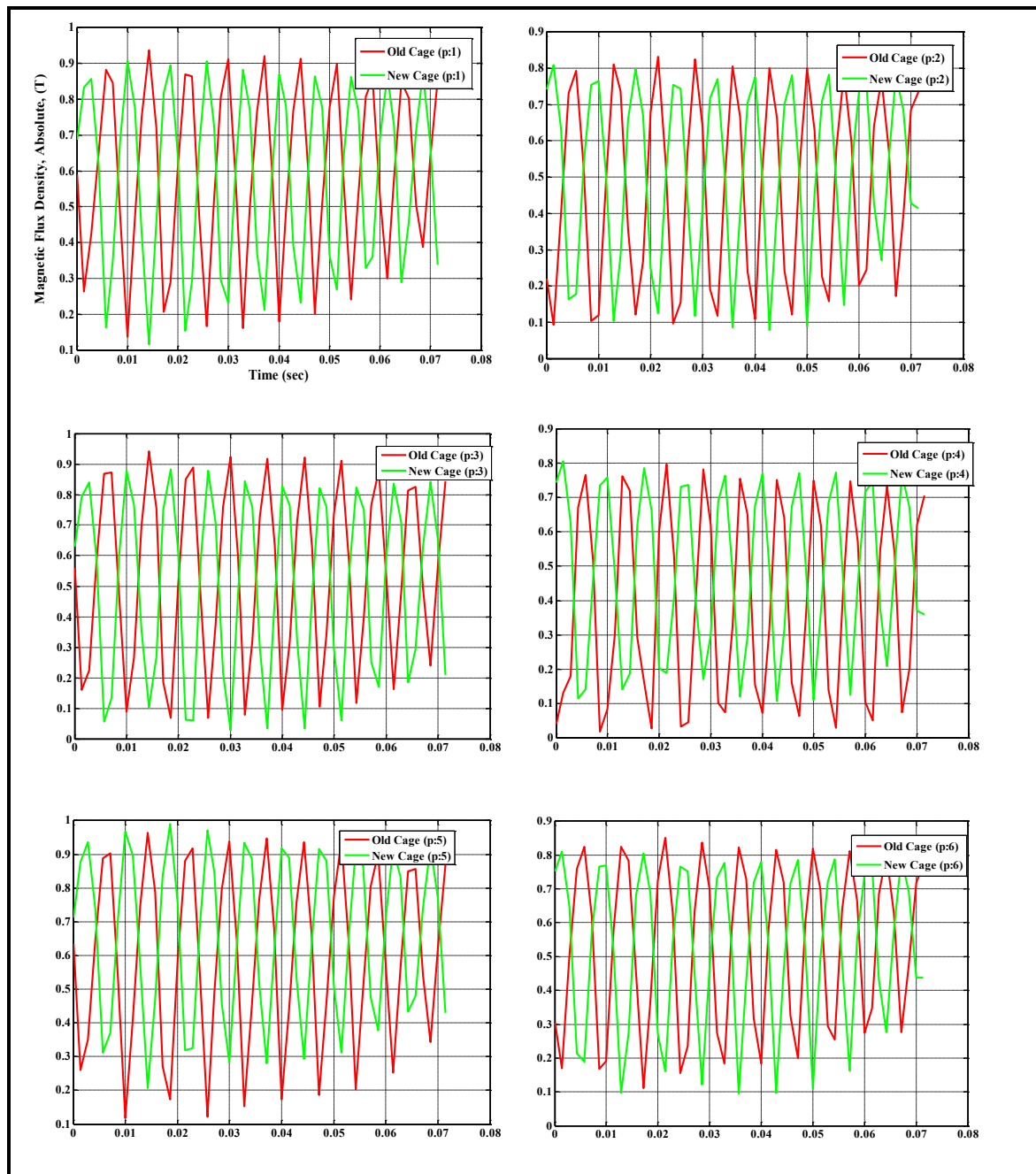
ابتدا باید دید با این ساختار قفس آیا راه اندازی درست انجام می گیرد. سپس به تحلیل در زمینه مغناطیس زدایی پرداخت. با استفاده از FEM مدل سازی دینامیک گذرای ماشین فوق شبیه سازی شده است. نتایج سرعت قفس جدید در مقایسه با قفس معمولی در شکل (۶-۱۴) نشان داده شده است.



شکل (۶-۱۴): مقایسه رفتار راه اندازی دو نوع قفس

در شکل (۶-۱۵) مقایسه ای بین چگالی شار آهنربا در دو حالت قفس جدید و قفس قدیم، در پروسه راه اندازی مستقیم موتور انجام شده است. مشاهده می شود که در اکثر نقاط در نظر گرفته شده، درصد مغناطیس زدایی در حالت قفس جدید در شرایط راه اندازی کاهش پیدا کرده است. این کاهش

درصد مغناطیس‌زدایی در نقاط میانی PM مشهود می‌باشد.



شکل (۶-۱۵): چگالی شار نقاط مختلف PM در زمان راه‌اندازی مستقیم موتور و مقایسه دو حالت قفس جدید و

قدیم

۶-۶. جمع‌بندی فصل

در این فصل به بررسی مغناطیس‌زدایی آهنربا در شرایط کاری مختلف پرداخته شد. همچنین با بررسی اثر مغناطیس‌زدایی در راه‌اندازی موتور، به ساختار جدید و بهینه‌ای جهت قفس راه‌انداز دست پیدا کردیم.

فصل هفتم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۷-۱. نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه، یکی از روش‌های بهبود عملکرد حالت گذرای ماشین‌های سنکرون مغناطیس‌دائم مورد بررسی قرار گرفت. به علت اینکه جهت راه‌اندازی موتورهای سنکرون نیاز به سیستم‌های پیچیده و گران‌قیمت کنترلی و الکترونیک قدرت می‌باشد، در کاربردهای خانگی و بعضی کاربردهای صنعتی که فقط نیاز به راه‌اندازی مستقیم می‌باشد، صرف این هزینه زیاد، مقرون به صرفه نمی‌باشد. برای حل این مشکل می‌توان از قفس در روتور به عنوان راه‌انداز استفاده نمود. در این پایان‌نامه انواع ساختارهای قفس ممکن برای ماشین سنکرون مغناطیس‌دائم شار محوری مورد بررسی قرار گرفت. ساختار انتخاب شده هم به لحاظ راه‌اندازی عملکرد مناسبی باید داشته باشد و هم به لحاظ دمپ نوسانات تمامی شارهای متغیر در زمان ورود اغتشاش باید توسط قفس دمپ گردد. بعد از انتخاب ساختار مناسب طراحی ماشین AFPM مورد بررسی قرار گرفت. در پروسه طراحی موتور، سفارشات مشتری محدودیت‌های طراحی را برای ما ایجاد می‌کند. همچنین جهت طراحی قفس، گام نخست طراحی ماشین سنکرون بدون قفس می‌باشد بطوری‌که در شرایط سنکرون تمامی خواسته‌های اولیه ما را برآورده نماید. بعد از طراحی صحیح ماشین مورد نظر به طراحی قفس می‌پردازیم. در این پایان‌نامه ابتدا به تعیین انواع پارامترهای مرتبط به ابعاد قفس پرداخته شده است. بعد از تعیین پارامترها تنها پارامتر مجهول مقاومت قفس می‌باشد. جهت تعیین مقاومت قفس، اهداف در نظر گرفته شده برای کاربرد قفس در ماشین بسیار مهم می‌باشد. در این پایان‌نامه سه الگوریتم متفاوت جهت محاسبه مقاومت قفس بیان شده است. بعد از طراحی ابعادی قفس، جهت تست عملکردی ماشین طراحی شده، مدل‌سازی دینامیک گذرای موتور را انجام می‌دهیم. ابتدا با استفاده از مدل‌سازی به روش تحلیلی شرایط راه‌اندازی و عملکرد سنکرون ماشین مورد بررسی قرار می‌گیرد. جهت ارزیابی مدل تحلیلی ارائه شده و همچنین افزایش دقت در پاسخ مدل دینامیک گذرای ماشین، از روش اجزاء محدود جهت مدل‌سازی استفاده شده است. مقایسه پاسخ‌ها صحت مدل‌سازی به روش تحلیلی را

نشان می دهند. یکی از مواردی که در عملکرد ماشین های PM بسیار مهم می باشد عملکرد آهنرباها بعد از شرایط گذرایی در ماشین می باشد. با توجه به اینکه هنگام راه اندازی جریان شدیدی از استاتور عبور می کند، بنابراین عکس العمل آرمیچر باعث کاهش چگالی شار آهنربا می شود. با بررسی دو ساختار قفس راه انداز برای موتور سنکرون مغناطیس دائم شار محوری، نتایج تحلیل مغناطیس زدایی به روش اجزاء محدود نشان داد که ساختار قفس جدید رفتار بهتری نسبت به قفس قدیم نشان می دهد. با توجه به اینکه اولویت طراحی قفس در این پایان نامه راه اندازی مستقیم موتور می باشد بنابراین در قفس بهینه جدید رفتار راه اندازی توسط FEM مورد بررسی قرار می گیرد که نشان می دهد که موتور راه اندازی موفق با این ساختار قفس نیز دارد.

۷-۲. نوآوری کارهای انجام شده

نوآوری های مطرح شده در این پایان نامه عبارتند از:

۱. ارائه الگوریتم جامع جهت طراحی قفس ماشین های سنکرون مغناطیس دائم برای اولین بار
۲. بررسی و مقایسه انواع ساختارهای قفس ممکن برای ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار محوری برای اولین بار
۳. تعیین پارامترهای مغناطیسی ماشین سنکرون شار محوری با کمک نرم افزار اجزاء محدود که تاکنون انجام نگرفته است.
۴. تعیین ابعاد دقیق قفس به روش تحلیلی جهت راه اندازی مستقیم برای اولین بار
۵. ساختار جدید مدار معادل تحلیلی ارائه شده برای ماشین های سنکرون با قطب صاف
۶. بهبود رفتار مغناطیس زدایی آهنربا با قرار دادن میله در اطراف و ناحیه میانی آهنربا و بررسی دوباره رفتار راه اندازی.

۷-۳. پیشنهادات

با بررسی‌های انجام گرفته شده جهت ادامه طرح، پیشنهاداتی در این قسمت ارائه می‌گردد:

۱. با توجه به اینکه وزن قفس از عوامل بسیار مهم در راه‌اندازی موتور می‌باشد، بنابراین در صورتی که بتوان با آلیاژی مناسب، به شکل موازی علاوه بر حفظ رفتار مغناطیسی و الکتریکی آلومینیوم، وزن قفس را کاهش داد، می‌توانیم موتور با گشتاور راه‌اندازی بالاتری نسبت به ساختار با قفس آلومینیومی داشته باشیم.

۲. در صورتی که بتوان ساختار میله‌های قفس را با زاویه نسبت به سیم‌پیچی استاتور طراحی کرد، می‌توان هارمونیک‌های شار فاصله‌هوایی با توجه به میزان زاویه میله‌های قفس، کاهش داد. ساخت این ساختار از چالش‌های پیش‌رو می‌باشد. با استفاده از آلیاژهای مخصوص می‌توان به طراحی و ساخت این ساختار دست یافت.

۳. در مطالعات مغناطیس‌زدایی، دمای سطح آهنربا ثابت در نظر گرفته شده است و عامل مغناطیس‌زدا فقط عکس‌العمل آرمیچر می‌باشد. در صورتی که بتوان دمای آهنربا را بر حسب تابعی از سرعت و دمای فاصله‌هوایی تعیین کرد، می‌توان به نتایج دقیق‌تری در تحلیل مغناطیس‌زدایی موتور دست یافت.

مراجع

- [1] J. Pyrhonen., T. Jokinen., V. Hrabovcova. (2008) “**Design Of Rotating Electrical Machines**”, John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom.
- [2] S. Shaw., S. Constantinides., (2012) “Permanent Magnets: the Demand for Rar Earths”, 8th International Rare Earths, Roskill.
- [3] W. Zhao., T. A. Lipo., B. Kwon., (2014) “Comparative Study on Novel Dual Stator Radial Flux and Axial Flux Permanent Magnet Motors with Ferrite Magnets for traction Application”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no.11.
- [4] R. Wrobel., J. Goss., (2014) “Design Considerations of a Brushless Open-Slot Radial-Flux PM Hub Motor”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.50.
- [5] G. Chan Lee., S. Min Kang., T. Uk Jung., (2013) “Permanent magnet structure design of outer rotor radial flux permanent magnet generator for reduction cogging torque with design of experiment”, International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS).
- [6] G. Chan Lee., S. Han Kam., T. Uk Jung., (2014) “Design on permanent magnet structure of radial flux permanent magnet generator for cogging torque reduction and low torque ripple”, Conference on Power Electronics and Applications (EPE'14-ECCE Europe), 2014 16th European.
- [7] G. Choi., T. M. Jahns., (2014) “Demagnetization Characteristics of Permanent Magnet Synchronous Machines”, Industrial Electronics Society, 40th Annual Conference of the IEEE, p 469 – 475.
- [8] J. F. GIERAS., R. J. WANG., M. J. KAMPER., (2005) “**Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines**”, Kluwer Academic Publishers Dordrecht.
- [9] S. Kahourzade., A. Mahmoudi., N. A. Rahim., Hew Wooi Ping., (2012) “Sizing equation and Finite Element Analysis optimum design of Axial-Flux Permanent Magnet motor for electric vehicle direct drive”, Power

- Engineering and Optimization Conference (PEDCO) Melaka, Malaysia.
- [10] O. Maloberti., R. Figueredo., C. Marchand.,_(2014) “3-D-2-D Dynamic Magnetic Modeling of an Axial Flux Permanent Magnet Motor with Soft Magnetic Composites for Hybrid Electric Vehicles”, **IEEE Transactions on Magnetics**, **vol.50**.
 - [11] A. Metin., S. Huang., T.A. Lipo., (2004) “Axial Flux Permanent Magnet Disc Machines: A Review”, University of Wisconsin-Madison College of Engineering.
 - [12] B. Zhang., T. Epskamp., M. Doppelbauer., (2014) “A Comparison of the transverse, Axial and Radial Flux PM Synchronous Motors for Electric Vehicle” Electric Vehicle Conference (IEVC), IEEE International, p 1-6.
 - [13] Zhou Jia Heyun Lin., Shuhua Fang., Yunkai Huang., (2015) “A Novel Transverse Flux Permanent Magnet Generator with Double C-Hoop Stator and Flux-Concentrated Rotor”, **IEEE Transactions on Magnetics**, **vol.51**.
 - [14] M. F. Tsai., T.C. Lee., C. S. Tseng., W. S. Syu., Y. Y. Chen., (2014) “Vector Control of Current Source Inverter-Fed Axial-Flux Permanent Magnet Motors with Space Vector Pulse Width Modulation”, Industrial Electronics (ISIE), IEEE 23rd International Symposium on, p 920-925.
 - [15] R. Tukaram Ugale., B. N. Chaudhari., S. Baka., S. S. Damhare., A.Pramanik.,_(2014) “Induced pole rotor structure for line start permanent magnet synchronous motors”, **IET Electr. Power Appl.**, Vol. 8, Iss. 4, pp. 131–140.
 - [16] M. Niaz Azari., M. Mirsalim., (2015) “Analytic modelling of a line start permanent magnet motor with slotted solid rotor”, **IET Electr. Power Appl.**, Vol. 8, Iss. 7, pp. 278–285.
 - [17] C. Jedryczka., R. M. Wojciechowski., A. Demenko., (2014) “Influence of squirrel cage geometry on the synchronisation of the line start permanent magnet synchronous motor”, **IET Sci. Meas. Technol.**, Vol. 9, Iss. 2, pp. 197–203.
 - [18] D. Stoia., M. Cernat., K. Hameyer., D. Ban., (2009) “Line-Start Permanent

- Magnet Synchronous Motors Analysis and Design”, EDPE 2009, October 12-14, Dubrovnik, Croatia.
- [19] G. S. Hans., G. Huth., (2015) “Low-power motors in PM line-start technique with surface-mounted magnets”, ETG/GMM-Symposium Innovative small Drives and Micro-Motor Systems.
 - [20] Robert F. Butler., (2004) “**PALEOMAGNETISM Magnetic Domains to Geologic Terranes**”, Boston ; Oxford : Blackwell Scientific.
 - [21] I. R. Harris., A. J. Williams (2006) “**Magnetic Materials**”, Materials Science and Engineering, Voll.H.
 - [22] S. J. Chapman, (2005) “**ELECTRIC MACHINERY FUNDAMENTALS**”, Fifth Edition.
 - [23] J. D. McFarland., T. M. Jahns., (2014) “Investigation of the Rotor Demagnetization Characteristics of Interior PM Synchronous Machines During Fault Conditions”, *IEEE Transactins on Industry Applications*, **vol. 50, no. 4.**
 - [24] J. Xin Shen., P. Li., M. Jia Jin., G. Yang., (2013) “Investigation and Countermeasures for Demagnetization in Line Start Permanent Magnet Synchronous Motors”, *IEEE Transactions on Magnetics*, **vol.49.**
 - [25] S. B. Jovanovski., (1969) “Calculation and Testing of Damper-Winding Current Distribution in a Synchronous Machine with Salient Poles”, *IEEE Transactions on Power apparatus and systems.*
 - [26] F. A. Hamilton., (1932) “Field Tests to Determine the Damping Characteristics of Synchronous Generators”, *Transactions A. I. E. E.*
 - [27] C. Jedryczka., R. Wojciechowski., A. Demenko., (2014) “Influence of squirrel cage geometry on the synchronisation of the line start permanent magnet synchronous motor”, *IET Science, Measurement and Technology.*
 - [28] A. Mahmoudi., S. Kahourzade., N. Abd Rahim., W. P. Hew., M. Nasir Uddin.,(2014) “Design, Analysis, and Prototyping of a Novel-Structured Solid-Rotor- Ringed Line-Start Axial-Flux Permanent-Magnet Motor”, *IEEE Transactions on Industrial Electronisc*, vol. 61, no. 4.

- [29] T. Hosoi., H. Watanabe., K. Shima., T. Fukami., R. Hanaoka., (2012) "Demagnetization Analysis of Additional Permanent Magnets in Salient-Pole Synchronous Machines With Damper Bars Under Sudden Short Circuits", *IEEE Transaction on Industrial lectronics* vol.59, no.6.
- [30] A. Darabi., C. Tindall., (2004) "Damper Cages in Genset Alternators: FE imulation and Measurement", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **vol. 19, no. 1.**
- [31] IEC 60034-4., Edition 3.0 2008-05., Rotating electrical machines Part 4: Methods for determining synchronous machine quantities from tests.
- [32] J. Soulard., H. Peter Nee., (2000) "Study of the Synchronization of Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motors", Industry Applications Conference. Conference Record of the 2000 IEEE,
- [33] X. Xu., Y. Cui., X. Wang., H. Feng., J. Si., (2013) "Performance of Line start Permanent Magnet Synchronous Motor with Novel Rotor Structure", International Journal of Digital Content Technology and its Applications, p 1217-1225.
- [۳۴] بهادر، ن، (۱۳۹۲)، پایان نامه کارشناسی ارشد: "بررسی پدیده مغناطیس زدایی در دو نوع ماشین مغناطیس دائم شار محوری و شار متقاطع"، دانشکده برق، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [35] K. G. Hong., H. Jin., N. Hyuk., J. Pyo Hong., (2003) "Analysis of irreversible magnet demagnetization in line-start motors based on the finite-element method", *IEEE Transactions on Magnetics*, **vol. 39.**
- [36] Jeong-Jong Lee., Young-Kyoun Kim., (2015) "Flux filter LSPM motor for the prevention of demagnetizing in permanent magnet", 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia).

Abstract

For the motors operating just at synchronous speed, the use of variable frequency drives may totally weaken the steady state characteristics. Consequently, the cage is sometimes utilized as an alternative so that to directly drive the permanent magnet synchronous motors in the line start driving mode. In this thesis, a new cage structure is introduced for Axial Flux Permanent Magnet (AFPM) motors, for which the appropriate design algorithm is presented as well. Based on the simulation results of Finite Elements Method, the proposed cage structure is capable to drive the AFPM motor with the line start operation, in a proper manner. Moreover, this structure can be regarded as an efficient damper so that to damp the oscillations produced by disturbances and consequently to enhance the final synchronism speed. In a PM synchronous machine, the magnets play significant roles in the machine performance, and hence, their magnetization should be preserved as a very important issue that necessitates an appropriate attention. In response to the probable disturbances, the armature current may be severely increased. The armature reaction thus weakens the air-gap flux density produced by PM that may lead to the demagnetization of PMs. The simulation results of FEM demonstrate that in addition to the line start operation, the cage can also compensate the demagnetization of magnets due to the armature reaction effect. In order to improve the performance of the proposed cage structure, the demagnetization phenomena is completely investigated in the machine under study by using a novel approach. Thereby, an optimal cage structure is determined ultimately so that to the demagnetization effect can be compensated as much as possible and the motor can be properly operated in the line start mode, as well.

Keywords: Permanent magnet machines, Axial flux, Line Start, Starting cage, Demagnetization phenomenon



Shahrood University of Technology
Faculty of Electrical and Robotic Engineering

Thesis Submitted for the Degree of Master of Science

Modeling and Design of Cage for a Permanent Magnet Synchronous Machine

Hadi Karimi Ali Abad

Supervisor:

Dr. Ahmad Darabi

**February
2016**