

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه شاهرود
دانشکده فنی مهندسی
گروه مهندسی برق قدرت

پایان نامه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی برق گرایش قدرت

عنوان

مدلسازی هیستریزیس و نامتقارنی فاصله هوایی در ماشین القایی قفس سنجابی به روش مدار معادل مغناطیسی

استاد راهنما

دکتر جلال نظرزاده

نگارش

سید جلال الدین حسینی

پاییز ۱۳۹۰



دانشگاه شاهرود
دانشکده فنی و مهندسی

صورت جلسه هیئت داوران رساله کارشناسی ارشد

جلسه دفاعیه پروژه کارشناسی ارشد مربوط به آقای/خانم سیدجلال الدین حسینی به شماره دانشجویی ۸۸۷۵۱۶۰۰۲ در رشته قدرت با عنوان "مدلسازی هیستریزیس و نامتقارنی فاصله هوایی در ماشین القایی قفس سنجابی به روش مدار معادل مغناطیسی" به ارزش ۶ واحد در روز ۹/۱۱/۹۰ در دانشکده فنی و مهندسی با حضور افراد ذیل تشکیل شد، نتیجه به قرار زیر است:

پروژه نامبرده با نمره ۱۹٫۱ قابل قبول می‌باشد.

پروژه نامبرده مردود می‌باشد.

پروژه نامبرده به شرط انجام اصلاحات جزئی قابل قبول می‌باشد. نمره دانشجو متعاقباً اعلام می‌شود.

<input type="checkbox"/> نام استاد راهنمای اول	دانشگاه:	امضاء:	سهم استاد (به درصد):
<input type="checkbox"/> نام استاد راهنمای دوم	دانشگاه:	امضاء:	سهم استاد (به درصد):
<input type="checkbox"/> نام استاد مشاور اول	دانشگاه:	امضاء:	سهم استاد (به درصد):
<input type="checkbox"/> نام استاد مشاور دوم	دانشگاه:	امضاء:	سهم استاد (به درصد):
<input type="checkbox"/> نام داور اول	دانشگاه:	امضاء:	
<input type="checkbox"/> نام داور دوم	دانشگاه:	امضاء:	
<input type="checkbox"/> نام داور سوم	دانشگاه:	امضاء:	
<input type="checkbox"/> نام داور چهارم	دانشگاه:	امضاء:	
<input type="checkbox"/> نام نماینده معاونت پژوهشی	محمد صالحی	امضاء:	

تذکر: تعیین سهم اساتید در صورت وجود بیش از یک استاد راهنما و مشاور ضروری است.



اظهار نامه دانشجو

شماره:

تاریخ: ۱۳۹۰/۱۱/۲۴

اینجناب سید جلال الدین حسینی دانشجوی کارشناسی ارشد رشته برق گرایش قدرت دانشکده فنی مهندسی دانشگاه شاهد، گواهی می‌دهم که پایان نامه تدوین شده حاضر با عنوان؛ "مدلسازی هیستریزیس و نامتقارنی فاصله هوایی در ماشین القایی قفس سنجابی به روش مدار معادل مغناطیسی" به راهنمایی استاد محترم جناب آقای دکتر جلال نظرزاده، توسط شخص اینجناب انجام و صحت و اصالت مطالب تدوین شده در آن، مورد تأیید است و چنان چه هر زمان، دانشگاه کسب اطلاع کند که گزارش پایان نامه حاضر صحت و اصالت لازم را نداشته، دانشگاه حق دارد، مدرک تحصیلی اینجناب را مسترد و ابطال نماید هم چنین اعلام می‌دارد در صورت بهره‌گیری از منابع مختلف شامل؛ گزارش‌های تحقیقاتی، رساله، پایان‌نامه، کتاب، مقالات تخصصی و غیره، به منبع مورد استفاده و پدید آورنده آن به طور دقیق ارجاع داده شده و نیز مطالب مندرج در پایان نامه حاضر تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجناب و یا سایر افراد به هیچ کجا ارایه نشده است. در تدوین متن پایان نامه حاضر، چارچوب (فرمت) مصوب تدوین گزارش‌های پژوهشی تحصیلات تکمیلی دانشگاه شاهد به طور کامل مراعات شده و نهایتاً این که، کلیه حقوق مادی ناشی از گزارش پایان نامه حاضر، متعلق به دانشگاه شاهد می‌باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو (دست نویس):

امضاء دانشجو:

تاریخ: ۱۳۹۰/۱۱/۲۴

کلیه حقوق این اثر محفوظ و متعلق به دانشگاه شهید

می باشد.

تقدیم بہ

پیوند دہندہ فرشیان خاک و عرشیان افلاک

برافرازندہ پرچم پیروزی و رسگاری و سرملندی

معاکنندہ عدالت و صلابت و فروزندہ مشعل ہدایت

حضرت بقیہ اللہ الأعظم صاحب الزمان عجل اللہ تعالی فرجہ الشریف

تقدیم به

دست های صمیمی و قلب های مهربان و جان های فداکار

پدر و مادر عزیزم

که هماره در زندگی سرچشمه جوشش مواهب الهی بوده اند.

برای بنده کمال افتخار است که از استاد دکتر تقدیرم

جناب آقای دکتر نظرزاده

در حد خویش تشکر کنم که این پایان نامه جز باره‌نمایی‌های ایشان قابل انجام نبود.

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

د.....	فهرست اشکال
ز.....	فهرست جداول
۳.....	فصل ۱- مقدمه
۶.....	فصل ۲- مدار معادل مغناطیسی ماشین القایی قفس سنجابی
۶.....	۱-۲- معادلات جبری موتور القایی قفس سنجابی:
۱۴.....	۲-۲- ارتباط بین جریان کلاف ها و پارامترهای مدار معادل مغناطیسی:
۱۵.....	۱-۲-۲- ماتریس تعداد دور کلاف M_{tc} :
۱۵.....	۲-۲-۲- ماتریس جریان کلاف M_{cc} :
۱۶.....	۳-۲-۲- ماتریس آمپر- دور شیار M_{sat} :
۱۷.....	۴-۲-۲- ماتریس شار کلاف M_{cf} :
۱۸.....	۵-۲-۲- ماتریس شار فاز M_{pf} :
۱۹.....	۳-۲- ماتریس مربوط به ماشین قفس سنجابی:
۲۰.....	۴-۲- معادلات دیفرانسیل سیستم ماشین القایی قفس سنجابی:
۲۱.....	۵-۲- معادلات استاتور ماشین القایی:
۲۲.....	۶-۲- معادلات دیفرانسیل ولتاژ روتور ماشین قفس سنجابی:
۲۵.....	فصل ۳- روش های مدل سازی هیستریزیس
۲۶.....	۱-۳- مدل های فیزیکی هیستریزیس
۲۶.....	۱-۱-۳- مدل Jiles-Atherton [18]:
۳۰.....	۲-۱-۳- مدل Preisach:
۴۰.....	۲-۳- مدل ریاضی کولمن- همدون:
۴۲.....	۳-۳- روش مدل سازی هیستریزیس در این پایان نامه:
۴۶.....	فصل ۴- نا متقارنی فاصله هوایی و مورب بودن میله ها در ماشین های القایی
۴۷.....	۱-۱- تست های تشخیص فاصله هوایی نامتقارن:
۴۷.....	۱-۱-۴- آنالیز فرکانسی جریان (MCSA)
۴۷.....	۲-۱-۴- تست نفوذ روتور (Rotor Influence Check)

۴۸	انواع خطاها در ماشین القایی:	۲-۴
۴۸	انواع خطاهای عدم تقارن فاصله هوایی:	۳-۴
۴۸	عدم همراستایی محور رتور و استاتور (Misalignment)	۱-۳-۴
۵۲	خروج از مرکزیت (Eccentricity)	۲-۳-۴
۵۳	اثر مورب بودن دندانه‌های رتور (skew) بر هدایت فاصله هوایی [45]:	۴-۴
۵۸	شبه سازی و آزمایش موتور القایی قفس سنجابی	۵
۵۸	شبه سازی موتور القایی قفس سنجابی:	۱-۵
۶۹	آزمایش موتور القایی قفس سنجابی:	۲-۵
۷۶	نتیجه گیری و پیشنهادات	۶
۷۶	نتیجه گیری:	۱-۶
۷۶	پیشنهادات:	۲-۶
۸۴	مراجع	۷

فهرست اشکال

صفحه	عنوان
۹	شکل ۲-۱: مدار معادل مغناطیسی بخشی از ماشین
۱۱	شکل ۲-۲: تبدیل نورتن برای نوشتن معادلات گره در یوغ استاتور
۱۱	شکل ۲-۳: تبدیل نورتن برای نوشتن معادلات گره در یوغ رتور
۱۳	شکل ۲-۴: منحنی اشباع هسته موتور القایی با هسته فولادی
۱۴	شکل ۲-۵: سیم بندی تک لایه توزیع یافته استاتور در موتور ۲ قطب ۲۴ شیار
۱۷	شکل ۲-۶: شار دندانه و شار کلاف
۱۹	شکل ۲-۷: طرح کلی جریان قسمت های حلقه (I_r) و میله (I_b) در قفسه
۲۲	شکل ۲-۸: اتصالات (a) شکل چند ضلعی (b) شکل ستاره
۲۲	شکل ۲-۹: سیم بندی به شکل چند ضلعی m فازه در استاتور
۲۵	شکل ۳-۱: دسته بندی روشهای مدلسازی هیستریزیس
۲۵	شکل ۳-۲: منحنی ها و حلقه های مشخصه مغناطیسی مواد
۲۷	شکل ۳-۳: تاثیر پارامتر α بر مشخصه مغناطیسی، خط ممتد: $\alpha=4e-3$ و خط چین: $\alpha=1.6e-3$
۲۹	شکل ۳-۴: تاثیر پارامترهای مختلف مدل Jiles-Atherton بر مشخصه هیستریزیس
۳۱	شکل ۳-۵: مشخصه مغناطیسی دوقطبی پایه مدل Preisach
۳۲	شکل ۳-۶: دیاگرام Preisach و مثلث حدی T
۳۳	شکل ۳-۷: نواحی مثبت و منفی در دیاگرام Preisach
۳۳	شکل ۳-۸: توقف افزایش میدان مغناطیسی در ماکزیمم u_1
۳۳	شکل ۳-۹: کاهش میدان مغناطیسی
۳۴	شکل ۳-۱۰: کاهش میدان مغناطیسی تا مقدار مینیمم u_2
۳۴	شکل ۳-۱۱: افزایش مجدد میدان مغناطیسی تا u_3
۳۵	شکل ۳-۱۲: کاهش میدان مغناطیسی تا مقدار مینیمم u_4
۳۶	شکل ۳-۱۳: دیاگرام Preisach به ازاء یک میدان مغناطیسی با دامنه ماکزیمم و مینیمم نزولی
۳۶	شکل ۳-۱۴: خاصیت پاک شدن حافظه مغناطیسی با استفاده از دیاگرام Preisach
۳۷	شکل ۳-۱۵: محاسبه تلفات برای دوقطبی هایی که در ناحیه دلخواه Ω تغییر وضعیت داده اند
۳۸	شکل ۳-۱۶: محاسبه تلفات به ازاء تغییر یکنوای افزایشی میدان مغناطیسی از u_- به u_+
۴۰	شکل ۳-۱۷: یک میدان مغناطیسی نمونه با نقاط اکسترمم محلی به عنوان حافظه مدل Preisach

- شکل ۳-۱۸: پارامترهای مدل هدگدون ۴۱
- شکل ۳-۱۹: مدار معادل مغناطیسی با فرض هسته هیستریزیسی ۴۲
- شکل ۴-۱: مقایسه موتور سالم و میله شکسته ۴۸
- شکل ۴-۲: عدم همراستایی محور رتور و استاتور (Misalignment) ۴۹
- شکل ۴-۳: تقریب هدایت مغناطیسی فاصله هوایی بین دندانه‌های استاتور و رتور ۴۹
- شکل ۴-۴: معرفی پارامترهای ابعاد رتور و استاتور ۵۱
- شکل ۴-۵: عدم همراستایی محور رتور و استاتور (Misalignment) و از جلو عقب ماشین به ترتیب از راست به چپ ۵۱
- شکل ۴-۶: تغییر فاصله در طول ماشین بر اثر عدم همراستایی محور رتور و استاتور (Misalignment) ۵۲
- شکل ۴-۷: انواع خطای ناهم مرکزی (Eccentricity)، a: دینامیکی b: استاتیکی ۵۲
- شکل ۴-۸: خطای ناهم مرکزی استاتیکی (Static Eccentricity) ۵۳
- شکل ۴-۹: اثر مورب بودن دندانه‌های رتور (skew) ۵۴
- شکل ۴-۱۰: هدایت مغناطیسی وقتی پهنای دندانه‌ها یکسان نیست ۵۴
- شکل ۴-۱۱: نمای از بالای دندانه‌های استاتور و رتور ۵۵
- شکل ۴-۱۲: نمای از بالای دندانه‌های استاتور و رتور ۵۵
- شکل ۴-۱۳: نمای از بالای دندانه‌های استاتور و رتور ۵۶
- شکل ۴-۱۴: موارد دوگان skew (skew در دندانه عریض تر) ۵۶
- شکل ۵-۱: نمودار گشتاور- سرعت هسته هیستریزیسی با فاصله هوایی ثابت ۵۹
- شکل ۵-۲: نمودار سرعت در زمان راه اندازی موتور در حالت‌های مختلف هسته و فاصله هوایی ۵۹
- شکل ۵-۳: نمودار گشتاور موتور در فاصله هوایی ثابت و حالت‌های مختلف هسته ۶۰
- شکل ۵-۴: نمودار گشتاور موتور در ناهم مرکزی استاتیکی و حالت‌های مختلف هسته ۶۰
- شکل ۵-۵: نمودار گشتاور موتور در فاصله هوایی ثابت و نامتقارن و هسته هیستریزیسی ۶۱
- شکل ۵-۶: نمودار سرعت در حالت دائم موتور در حالت‌های مختلف هسته و فاصله هوایی ۶۱
- شکل ۵-۷: ولت آمپر ورودی موتور در شرایط مختلف هسته و فاصله هوایی ثابت ۶۲
- شکل ۵-۸: ولت آمپر ورودی موتور در شرایط مختلف هسته و ناهم مرکزی استاتیکی ۶۲
- شکل ۵-۹: مقایسه ولت آمپر ورودی موتور برای هسته هیستریزیسی در شرایط مختلف فاصله هوایی ۶۳
- شکل ۵-۱۰: مقایسه جریان ناهم مرکزی استاتیکی و فاصله هوایی ثابت (هسته هیستریزیسی) ۶۳
- شکل ۵-۱۱: پس فاز بودن جریان موتور به دلیل خاصیت اندوکتانسی ۶۴
- شکل ۵-۱۲: مقایسه حلقه هیستریزیس یوغ استاتور برای فاصله هوایی ثابت و شرایط ناهم مرکزی رتور ۶۴

- شکل ۵-۱۳: مقایسه حلقه هیستریزیس شاخه یکم یوغ رتور برای فاصله هوایی ثابت و شرایط ناهم‌مرکزی رتور ۶۵
- شکل ۵-۱۴: مقایسه حلقه هیستریزیس دندان‌ها برای فاصله هوایی ثابت و شرایط ناهم‌مرکزی رتور ۶۶
- شکل ۵-۱۵: دامنه مولفه‌های فرکانسی برای شرایط مختلف فاصله هوایی (هسته هیستریزیس) ، $(0 < f < 500 \text{ Hz})$ ۶۶
- شکل ۵-۱۶: دامنه مولفه‌های فرکانسی برای شرایط مختلف فاصله هوایی (هسته غیر خطی) ، $(0 < f < 500 \text{ Hz})$ ۶۷
- شکل ۵-۱۷ : دامنه مولفه‌های فرکانسی برای شرایط مختلف فاصله هوایی (هسته خطی) ، $(0 < f < 500 \text{ Hz})$ ۶۷
- شکل ۵-۱۸: تغییرات فرکانس شار دندان‌ها رتور ۶۸
- شکل ۵-۱۹ : تست آزمایشگاهی موتور القایی قفس سنجابی ۶۹
- شکل ۵-۲۰ : ولتاژ القایی در سیم واقع در فاصله هوایی بر روی شیار استاتور ۷۰
- شکل ۵-۲۱ : نتایج شبیه‌سازی و آزمایش شار دندان‌ها استاتور ۷۱
- شکل ۵-۲۲ : تاثیر مورب بودن دندان‌های رتور (skew) بر شار دندان‌ها استاتور ۷۱
- شکل ۵-۲۳: مقایسه اندوکتانس خودی فاز A استاتور برای یک بار چرخش 360° درجه‌ای رتور با سرعت سنکرون در شرایط گوناگون ۷۲
- شکل ۵-۲۴: مقایسه اندوکتانس متقابل فاز A و B استاتور برای یک بار چرخش 360° درجه‌ای رتور با سرعت سنکرون در شرایط گوناگون ۷۲
- شکل ۵-۲۵: مقایسه اندوکتانس متقابل فاز A استاتور و شار دندان‌ها یکم رتور برای دو چرخش 360° درجه‌ای رتور با سرعت سنکرون در شرایط گوناگون ۷۲
- شکل ۵-۲۶: مقایسه اندوکتانس متقابل شار دندان‌ها یکم رتور و فاز A استاتور برای دو چرخش 360° درجه‌ای رتور با سرعت سنکرون در شرایط گوناگون ۷۳
- شکل ۵-۲۷: مقایسه اندوکتانس خودی شار دندان‌ها یکم رتور برای یک چرخش 360° درجه‌ای رتور با سرعت سنکرون در شرایط گوناگون ۷۳
- شکل ۵-۲۸: مقایسه اندوکتانس متقابل شار دندان‌ها یکم و دوم رتور برای یک چرخش 360° درجه‌ای رتور با سرعت سنکرون در شرایط گوناگون ۷۳

فهرست جداول

صفحه	عنوان
۴۸	جدول ۴-۱: درصد انواع خطاها در ماشین القایی
۶۴	جدول ۵-۱: مقایسه ضریب توان برای شرایط گوناگون هسته و فاصله هوایی
۶۸	جدول ۵-۲: مقایسه اندازه مولفه‌های فرکانسی برای شرایط مختلف هسته و فاصله هوایی

چکیده:

ماشین های القایی به دلیل کاربرد وسیع در صنعت و خرابی آن شاید موجب توقف کل پروژه می شود از نظر مدل کردن و بررسی عدم تقارن، مورد اهمیت قرار دارد. مدل های زیادی تاکنون از ماشین ارائه شده است که هر کدام دارای مزایا و معایبی است. از جمله مدل هایی که دارای پیچیدگی و زمان محاسبات کمتر نسبت به روش های عددی دیگری چون روش المان محدود (FEM)^۱ می باشد، روش مدار معادل مغناطیسی (MEC)^۲ است. از جمله عواملی که دقت این مدل را بالا می برد مدل نمودن تلفات هسته از جمله هیستریزیس در ماشین است.

از آنجا که ماشین ها دارای مقدار حداقل کمی از نامتقارنی فاصله هوایی به علت لقی شفت هستند، لحاظ نمودن این مسئله در مدل ماشین، مدل را به واقعیت نزدیک می کند.

کارهای زیادی به روش FEM در زمینه مدل کردن همزمان تلفات و نامتقارنی فاصله هوایی انجام شده است ولی مقاله معتبری به روش MEC در این زمینه دیده نشده است و اکثر مقالات آزمایشگاهی و کنفرانسی است. در این پایان نامه با در نظر گرفتن فرضیه وجود هیستریزیس مغناطیسی و نیز تأثیرات هادیهای توزیع یافته روتور، نخست مدل دقیقی از ماشین القایی قفس سنجایی ارائه می گردد. در ادامه حالت نامتقارنی فاصله هوایی برای مدل مذکور طراحی و مورد شبیه سازی قرار می گیرد. نتایج شبیه سازیها حاکی از آن است که بکارگیری مدل توزیع یافته رلوکتانسی ماشین به خوبی می تواند اثرات اجزاء ماشین نظیر دندانه ها و هادی های توزیع یافته روتور و اجزاء هسته را بطور جدی مورد ارزیابی قرار دهد. در نهایت اعتبار نتایج شبیه سازی مدل ارائه شده برای موتور القایی قفس سنجایی، با استفاده از ساخته شده تست آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار می گیرد. برای این منظور از یک موتور القایی قفس سنجایی 2/5 kw در کارخانه موتورزن در تبریز، استفاده شده است.

^۱ Finite Element Method

^۲ Magnetic Element Method

فصل اول

مقدمه



فصل ۱ - مقدمه

امروزه موتورهای الکتریکی در زندگی انسانها و سبک زندگی مدرن آنها به عنوان یک عنصر اصلی قلمداد می گردد. کاربرد موتورهای القایی بسیار گسترده می باشد. بعضی از آنها در صنایع تولیدی سلسله وار و پیوسته نقش کلیدی دارند. بیشینه کاربرد موتورهای القایی در صنایع معدنی و صنایع تولیدی وسایل خانگی می باشد. موتورهای القایی اغلب در کاربردهای الکتریکی نظیر کارخانجات هسته ای، کاربردهای نظامی و هوایی که قابلیت اطمینان باید بالاتر از حد استاندارد باشد نقش اساسی دارند. این موتورها اغلب در محیط های خشن و سخت نظیر مکان های پر از گرد و خاک و مواد شیمیایی بکار گرفته می شوند. این شرایط نامساعد و موقعیت های نامطلوب سبب می شود که موتور القایی در معرض معیوب شدن قرار گیرد که حتی اوقات ممکن است در نتیجه ی آن دیگر قابل تعمیر نباشند. موتورهای القایی معیوب اگر شناسایی نشوند علاوه بر خسارت کلی به موتور کل کارخانه را نیز ممکن است مختل کند. با طراحی خوب موتور و نیز سیستم مانیتورینگ شرایط موتور، می توان از خسارات اقتصادی پیش بینی نشده جلوگیری نمود و نیز بهره وری را افزایش داد. بنابراین روش مانیتورینگ موتور برای شناسایی اولیه عیب موتور در صنعت روز به روز در حال افزایش و مورد توجه می باشد. در سالهای اخیر روش هایی برای مدل کردن ماشین القایی ارائه شده است و بسته به کاربرد، از جزئیات بیشتری همچون هیستریزیس و نامتقارنی در مدل لحاظ شده است. تحقیقات نشان می دهد نتایج مقالاتی که اثرات غیر خطی مغناطیسی را در مدل وارد نمودند خطای شبیه سازی به زیر ۵ درصد کاهش یافته است [2]. از جمله روش های مدل سازی روش دو محوری، المان محدود، تابع سیم بندی و مدار معادل مغناطیسی می باشد. روش دو محوری ساده و دارای تقریب زیادی است و کاربردهای کنترلی دارد. روش المان محدود مدلی با دقت بالا نسبت به روش های دیگری همچون تابع سیم بندی است [9] ولی کند (به خصوص وقتی که نامتقارنی در مدل باشد) می باشد [2,17]. با این روش امکان پیاده سازی هیستریزیس [8,9] و تشخیص نامتقارنی فاصله هوایی [10,11] امکان پذیر است. روش تابع سیم بندی تمام هارمونیک های سیم بندی را در نظر می گیرد ولی Skew (مورب بودن دندان های رتور) و افت MMF در مسیر شار کمتر در نظر گرفته شده است [17]. به دلیل ویژگی ها و نقاط قوت روش مدار معادل مغناطیسی، از جمله در نظر گرفتن تمام هارمونیک های فضایی سیم بندی های ماشین، و اثر مورب بودن شیارها [16] و همچنین سرعت محاسبات بالا روشی مناسب برای مدل سازی ماشین های الکتریکی می باشد.

مدلهای فیزیکی که بر اساس تئوری های فیزیکی مربوطه ارائه شده اند بطور کلی به دو دسته کلی تقسیم می شوند. دسته ای از مدلها به صورت جزئی و در محدوده اجزاء ماده مانند اتم خواص مغناطیسی را مدل سازی می کنند. این مدلها به عنوان مدل های میکروسکوپی مغناطیسی شناخته می شوند. از طرف دیگر دسته ای از مدلها رفتار کلی ماده مغناطیسی که منجر به مشخصه مغناطیسی ماده می شود را بررسی می کنند. این مدلها به نام

مدلهای ماکروسکوپی خوانده می شوند. در [17] انواع مدلها برای مدلسازی هیستریزس در نظر گرفته شده است. از جمله این روش ها روش پریساج می باشد که نسبت به روش های دیگری چون کولمن-هدگدون از دقت بالاتر ولی سرعت پایین تری برخوردار است [7]. در [5] روش Jiles-Atherton (JA) که دارای پیاده سازی آسانتر و زمان محاسبات کوتاهتری نسبت به روش پریساج است ارائه شده است. روش دیگر روش Energetic Model (EM) می باشد که نتایجی مشابه روش JA دارد [19] و مناسب برای پیاده سازی در مدار معادل مغناطیسی می باشد [6]. در [20] بیشتر به پیاده سازی این روش در مدار معادل مغناطیسی توجه شده است.

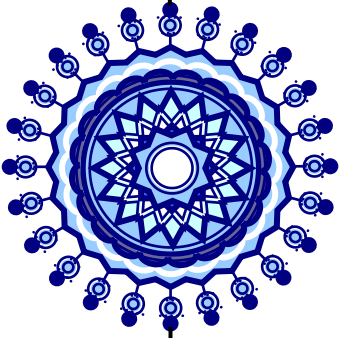
نا متقارنی ها در مقالات به دو دسته کلی (نا هم مرکزی) Eccentricity و (نا هم محوری) Misalignment تفکیک شده است [12] که دومی به علت ماهیت سه بعدی کمتر مورد توجه می باشد و اکثر مقالات در مورد Eccentricity می باشد.

در این پایان نامه با در نظر گرفتن فرضیه وجود هیستریزس مغناطیسی و نیز تأثیرات هادیهای توزیع یافته روتور، نخست مدل دقیقی از ماشین القایی قفس سنجابی ارائه می گردد. این مدل بر اساس روش گره با در نظر گرفتن هدایت‌هایی که مدل کننده‌ی پراکندگی برای mmf های موجود در یوغ استاتور و رتور می‌باشد، بیان شده است. مدل هیستریزس به کار برده شده در این مقاله روشی جدید و کارا است که علاوه بر دقت، قابلیت پیاده‌سازی بسیار راحتی نسبت روش‌های فیزیکی مدلسازی هیستریزس دارد و جزئیات کمتری از ماشین برای مدلسازی نیاز است. در این پایان نامه هیستریزس با سیم‌پیچ‌های سری شده با مقاومت‌های الکتریکی که در استاتور ثابت و در رتور متناسب با لغزش موتور می‌باشد مدل شده است. در ادامه حالت نامتقارنی فاصله هوایی برای مدل مذکور طراحی و مورد شبیه سازی قرار می گیرد. سه نوع عدم تقارن فاصله هوایی در ماشین فرض شده است که عبارتند از: عدم همراستایی محورهای رتور و استاتور، ناهم‌مرکزی دینامیکی و ناهم‌مرکزی استاتیکی. در ادامه نتایج شبیه‌سازی مدل برای ناهم‌مرکزی استاتیکی مورد بررسی قرار داده شد. نتایج شبیه سازیها حاکی از آن است که بکارگیری مدل توزیع یافته رلوکتانس ماشین به خوبی می تواند اثرات اجزاء ماشین نظیر دندانه ها و هادی های توزیع یافته روتور و اجزاء هسته را بطور جدی مورد ارزیابی قرار دهد. در نهایت اعتبار نتایج شبیه سازی مدل ارائه شده برای موتور القایی قفس سنجابی، با استفاده از ساخته شده تست آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار می گیرد. برای این منظور از یک موتور القایی قفس سنجابی 2/5kw در کارخانه موتورزن در تبریز، استفاده شده است. در فصل دوم شش نوع skew در نظر گرفته می‌شود که نوع سوم skew با $\beta = 10^\circ$ شبیه‌سازی شده است و کم شدن هارمونیک‌های شار فاصله هوایی به خوبی مشخص شده است.

فصل دوم:

مدار معادل مغناطیسی ماشین

القای



فصل ۲- مدار معادل مغناطیسی ماشین القایی قفس سنجابی

مقدمه:

از جمله روش‌های مدل‌سازی روش دو محوری، المان محدود، تابع سیم بندی و مدار معادل مغناطیسی می باشد. روش دو محوری در سال ۱۹۲۰ توسط Park ارائه شد و توسط Krause و Thomas و Stanley و Broyan گسترش یافت. این روش ساده و دارای تقریب زیادی است و کاربردهای کنترلی دارد. روش المان محدود مدلی با دقت بالا نسبت به روش های دیگری همچون تابع سیم بندی است ولی کند (به خصوص وقتی که نامتقارنی در مدل باشد) می باشد. با این روش امکان پیاده سازی هیستریزیس و تشخیص نامتقارنی فاصله هوایی امکان پذیر است. روش تابع سیم بندی تمام هارمونیک های سیم بندی را در نظر می گیرد ولی Skew (مورب بودن دندانه های رتور) و افت MMF در مسیر شار کمتر در نظر گرفته شده است.

به دلیل ویژگی ها و نقاط قوت روش مدار معادل مغناطیسی، از جمله در نظر گرفتن تمام هارمونیکهای فضایی سیم بندیهای ماشین، و اثر مورب بودن شیارها و همچنین سرعت محاسبات بالا روشی مناسب برای مدل‌سازی ماشین های الکتریکی می باشد.

۲-۱- معادلات جبری موتور القایی قفس سنجابی:

برای ایجاد یک مدار معادل مغناطیسی در ماشین القایی، باید از المان های کافی که تمامی ویژگی های الکترومغناطیسی آن را منعکس می کند، بکار گرفته شود و همچنین از المان های اضافه که سرعت محاسبات را کاهش داده و دقت قابل توجهی نیز به تحلیل افزوده نمی کند، در مدار معادل پرهیز شود. دو خواسته در مقابل هم (پیچیدگی مدل و دقت) یک مسامحه ای در انتخاب مدار معادل مغناطیسی ایجاد می کنند که برای یک دقت مشخص، زمان محاسبات کوتاه شود.

با توجه به شباهت بین میدان های الکتریکی و مغناطیسی، یک مدار معادل مغناطیسی مشابه یک مدار مقاومتی الکتریکی، براساس هدایت های مغناطیسی می تواند شکل گیرد. هدایت مغناطیسی در این مدار معادل در واقع عکس رلوکتانس می باشد که سه نوع هدایت مغناطیسی ثابت، هدایت مغناطیسی به صورت پارامتری غیر خطی و هدایت مغناطیسی ذاتاً غیر خطی می باشند.

رابطه هدایت مغناطیسی از رابطه ۲-۱ بدست می آید که تابعی از شدت میدان مغناطیسی تعریف شده است.

$$g_{x_2}^{x_1}(H) = \frac{\mu(H)A_{x_2}^{x_1}}{l_{x_2}} \quad (x_2 = 1, 2, \dots, h \text{ or } x_2 = 1, 2, \dots, k \ \& \ x_1 = sy, st, ry, rt) \quad 2-1$$

ضریب نفوذپذیری مغناطیسی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu(H) = b \times e^{aH^2} \quad 2-2$$

در فوق a و b یک ضریب ثابت می‌باشد.

بدین ترتیب با در نظر داشتن انواع هدایت‌هایی مغناطیسی که در مدار معادل مغناطیسی ماشین القایی شیار عمیق موجود می‌باشد و منابع mmf یک قسمت از مدار معادل مغناطیسی آن که در آن دو دندانه روتور و دو دندانه استاتور و قسمت‌های یوغ و شیار در آن معادل شده است، در شکل ۲-۱ نمایش داده شده است. هر دو سمت استاتور و روتور و همچنین المان‌هایی که در فاصله‌هوائی قرار گرفته است، به ساده‌ترین شکل نمایش داده شده‌اند. یک هدایت مغناطیسی بین هر دندانه استاتور و هر دندانه روتور در فاصله‌هوائی قرار می‌گیرد؛ برای نمونه $g_{i,j}$ ، هدایت مغناطیسی بین دندانه‌های i ام استاتور و j ام روتور می‌باشد. در این مدار معادل h و k به ترتیب بیانگر تعداد المان‌های استاتور و روتور می‌باشند.

در این پایان‌نامه مدل‌سازی موتور القایی به روش گره انجام شده است در ادامه جزئیات این روش شرح داده می‌شود.

معادله گره در گره i ام استاتور در فاصله‌هوائی به صورت زیر است:

$$\varphi_i^{st} = (u_i^{st} - u_{i-1}^{st})g^{s\sigma} + (u_i^{st} - u_{i+1}^{st})g^{s\sigma} + (u_i^{st} - u_1^{rt})g_{i,1} + \dots + (u_i^{st} - u_j^{rt})g_{i,j} + \dots + (u_i^{st} - u_k^{rt})g_{i,k} \quad 3-2$$

۴-۲

$$-\varphi_j^{rt} = (u_j^{rt} - u_{j-1}^{rt})g^{r\sigma} + (u_j^{rt} - u_{j+1}^{rt})g^{r\sigma} + (u_j^{rt} - u_1^{st})g_{1,j} + \dots + (u_j^{rt} - u_i^{st})g_{i,j} + \dots + (u_j^{rt} - u_h^{st})g_{h,j}$$

$g^{s\sigma}$ و $g^{r\sigma}$ به ترتیب هدایت مغناطیسی بین دندانه‌های رتور و استاتور می‌باشد که از روابط ۲-۵ و ۲-۶ محاسبه می‌شوند:

$$g^{s\sigma} = \mu_0 * \frac{A^{s\sigma}}{L^{s\sigma}} \quad 5-2$$

$$g^{r\sigma} = \mu_0 * \frac{A^{r\sigma}}{L^{r\sigma}} \quad 6-2$$

به طوری که μ_0 ، $A^{s\sigma}$ ، $L^{s\sigma}$ ، $A^{r\sigma}$ و $L^{r\sigma}$ به ترتیب نفوذپذیری هوا، سطح مقطع جانبی و طول فاصله‌هوائی دو دندانه استاتور و رتور می‌باشند.

بردار شارها در شاخه‌های شکل ۲-۲ به صورت برداری به صورت زیر بدست می‌آید:

۷-۲

$$\Phi_{st} = \left(\varphi_1^{st} \quad \varphi_2^{st} \quad \dots \quad \varphi_i^{st} \quad \dots \quad \varphi_h^{st} \right)^T$$

$$\Phi_{sy} = \left(\varphi_1^{sy} \quad \varphi_2^{sy} \quad \dots \quad \varphi_i^{sy} \quad \dots \quad \varphi_h^{sy} \right)^T$$

$$\Phi_{rt} = \left(\varphi_1^{rt} \quad \varphi_2^{rt} \quad \dots \quad \varphi_i^{rt} \quad \dots \quad \varphi_k^{rt} \right)^T$$

$$\Phi_{ry} = \left(\varphi_1^{ry} \quad \varphi_2^{ry} \quad \dots \quad \varphi_i^{ry} \quad \dots \quad \varphi_k^{ry} \right)^T$$