

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی الکترونیک قدرت و ماشین‌های الکتریکی

کنترل مقاومت روتور ترکیبی برای بهبود مشخصه شتابگیری آزاد
موتور القایی خطی دوطرفه

نگارنده: مهسا جلالی

اساتید راهنما

دکتر احمد دارابی

دکتر امیر حسن‌نیا خیبری

شهریور ۱۳۹۷

شماره ۱۵۹۳، ۱۰۲۰۲
تاریخ: ۱۴، ۲، ۹۷

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

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

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای مهسا جلالی با شماره دانشجویی ۹۴۰۵۰۹۴ رشته مهندسی برق- قدرت گرایش الکترونیک قدرت تحت عنوان: کنترل مقاومت روتور ترکیبی برای بهبود مشخصه شتابگیری آزاد موتور القایی خطی دوطرفه که در تاریخ ۱۳۹۷/۰۶/۱۴ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: <u> </u>)	<input checked="" type="checkbox"/>
مردود	<input type="checkbox"/>
نوع تحقیق:	<input checked="" type="checkbox"/> نظری <input type="checkbox"/> عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر احمد داریابی	استاد	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر احمد حسن نیکبخت	استادیار	
۳- استاد مشاور	—	—	—
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر سید علی حسینی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر محمد رضا بسمی	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر سید مصطفی میرزایی	استادیار	

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

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

تقدیر و تشکر:

حمد و سپاس کردگاری را سزااست که رخصت کسب علم و دانش را به ما عطا فرموده است. اکنون که به فضل خدا در این موقعیت قرار گرفته‌ام بر خود لازم می‌دانم تا از تمامی عزیزانی که در این پایان نامه از راهنمایی‌ها و مساعدت‌های ایشان بهره برده‌ام، قدردانی نمایم.

سپاس فروان از زحمات بی دریغ کلیه اساتید گرانقدرم که در تمام مراحل همواره پشتیبان و حامی بنده بوده‌اند. به ویژه از اساتید ارزشمندم جناب آقای دکتر دارابی و جناب آقای دکتر حسن‌نیا خیبری که همواره راهنما و راه‌گشای بنده در اتمام و اكمال این پایان نامه بوده‌اند، کمال تقدیر و تشکر را دارم. در پایان از خانواده خوبم که از آغاز تاکنون همواره مشوق و پشتیبان اینجانب بوده‌اند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

تعهد نامه

اینجانب مهسا جلالی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق قدرت دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بهبود مشخصه شتاب در موتور القایی خطی دو طرفه با تغییر جنس و ضخامت ثانویه تحت راهنمایی دکتر احمد دارابی و دکتر امیر حسن‌نیا خیبری متعهد می‌شوم:

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد.

چکیده

در بین انواع موتورهای خطی، موتورهای القایی خطی به دلیل مزایای فراوانی از جمله هزینه ساخت پایین و ساختار ساده بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. موتورهای القایی خطی به سه دسته موتورهای یک طرفه، دو طرفه و لوله‌ای تقسیم می‌شوند. در این پایان نامه با استفاده از الگوریتم طراحی موتور القایی خطی دو طرفه و ایجاد تغییراتی در ساختار ثانویه از جمله تغییر جنس و ضخامت هادی ثانویه که منجر به تغییر مقاومت ثانویه موتور خواهد شد مشخصه عملکردی موتور به خصوص مشخصه نیرو بر حسب سرعت برای کاربرد در یک شتاب‌دهنده مورد بررسی قرار می‌گیرد. به کمک شبیه سازی‌های مختلف، ضخامت بهینه که به ازای آن موتور با کمترین زمان به سرعت مطلوب می‌رسد به دست می‌آید.

کلمات کلیدی :

موتور القایی خطی، الگوریتم طراحی، نیرو، مشخصه عملکردی

مقالات مستخرج از پایان نامه

- 1- Mahsa Jalali, Ahmad Darabi and Amir Hassannia, "To check the effect of material for the secondary on the performance of double sided linear induction motor" Second National Conference Major Infrastructure of Electrical Engineering, Energy and Nabotechnology, accepted for presentation, Tehran, Iran, February 2018.
- 2- Mahsa Jalali, Ahmad Darabi and Amir Hassannia, "Comparison of performance characteristics of inear induction motor with ladder and solid secondary for use in electric vehicles" under review in Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering Journal, Submitted, 2018.

۳- مهسا جلالی، احمد دارابی، امیر حسن‌نیا خیبری "بررسی تاثیر جنس ثانویه بر روی مشخصه‌های عملکردی ماشین القایی خطی دوطرفه" ارسال شده به سی و سومین کنفرانس بین‌المللی برق.

فهرست مطالب

۱	فصل ۱ : پیشگفتار	۱
۱-۱	مقدمه	۲
۲-۱	بیان مسئله	۲
۳-۱	هدف تحقیق	۳
۴-۱	مروری بر فصل‌های پایان‌نامه	۴
۲	فصل ۲ : مروری بر موتورهای القایی خطی و مطالعات گذشته	۵
۱-۲	مقدمه	۶
۲-۲	مقایسه موتورهای خطی با دوار	۶
۳-۲	انواع موتورهای خطی	۷
۴-۲	ساختار موتورهای خطی	۸
۵-۲	موتورهای القایی خطی	۹
۱-۵-۲	اساس کار موتور القایی خطی	۹
۲-۵-۲	انواع ساختار موتورهای القایی خطی	۱۰
۱-۲-۵-۲	موتور القایی خطی یک طرفه	۱۰
۲-۲-۵-۲	موتور القایی خطی دو طرفه	۱۲
۳-۲-۵-۲	موتور القایی خطی لوله‌ای	۱۲
۳-۵-۲	برخی از مسائل خاص موتورهای القایی خطی	۱۳
۱-۳-۵-۲	اثر لبه	۱۳
۲-۳-۵-۲	بزرگ بودن فاصله هوایی	۱۴
۳-۳-۵-۲	اثر انتهای	۱۴
۴-۵-۲	کاربردهای موتورهای القایی خطی	۱۵
۱-۴-۵-۲	سیستم‌های حمل و نقل	۱۵

۱۶	آسانسورها	۲-۴-۵
۱۷	پمپ کردن فلزات مایع	۳-۴-۵
۱۷	جدا کردن آهن از سنگ آهن	۴-۴-۵
۱۸	شرکت‌های خودروسازی	۵-۴-۵
۱۸	پرتاب‌کننده‌ها	۶-۴-۵
۱۸	مروری بر مطالعات گذشته	۵-۵-۲
۲۵	جمع‌بندی	۶-۲
۲۷	فصل ۳: مدلسازی و طراحی موتورهای القایی خطی دو طرفه	۳
۲۸	مقدمه	۱-۳
۲۸	الگوریتم طراحی موتور القایی خطی دو طرفه	۲-۳
۲۸	مشخصات مطلوب موتور مورد بررسی	۱-۲-۳
۳۰	روابط طراحی موتور القایی خطی دو طرفه	۳-۳
۳۱	مدار معادل تقریبی هر فاز	۴-۳
۳۷	انتخاب فرکانس اولیه و ثانویه	۵-۳
۳۸	ماکزیمم مقدار مجاز چگالی شار فاصله هوایی	۶-۳
۳۸	محاسبه آمپر دور هر فاز	۷-۳
۳۹	ویژگی‌های حالت پایدار	۸-۳
۴۱	نیروی نامی	۹-۳
۴۴	جمع‌بندی	۱۰-۳
۴۷	فصل ۴: شبیه‌سازی اجزاء محدود و بررسی عملکرد موتورهای القایی خطی دو طرفه	۴
۴۸	مقدمه	۱-۴
۴۸	مدلسازی موتور در نرم‌افزار اجزاء محدود	۲-۴

۵۰	.....نتایج شبیه‌سازی	۳-۴
۵۱	..... جریان سیم‌پیچ‌ها	۱-۳-۴
۵۱	..... توزیع چگالی شار	۲-۳-۴
۵۲	..... خطوط شار	۳-۳-۴
۵۲	..... نیروی محرکه	۴-۳-۴
۵۳	..... چگالی شار فاصله هوایی	۵-۳-۴
۵۴	..... توان ورودی موتور	۶-۳-۴
۵۵	..... جمع‌بندی	۷-۳-۴
۵۷	..... فصل پنجم: بررسی تاثیر جنس و ضخامت ثانویه در موتورهای القایی خطی دو طرفه	۵
۵۸	..... ۱-۵- مقدمه	
۵۸	..... ۲-۵- بررسی تاثیر ضخامت ثانویه	
۵۹	..... ۳-۵- بررسی تاثیر جنس ثانویه	
۶۰	..... ۴-۵- شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود	
۶۱	..... ۵-۵- مقایسه عملکرد ساختارهای مختلف	
۶۵	..... ۶-۵- جمع‌بندی	
۶۷	..... فصل ۶: نتیجه‌گیری و پیشنهادات	
۶۸	..... ۱-۶- نتیجه‌گیری	
۶۹	..... ۲-۶- پیشنهادات	
۷۰	..... مراجع	

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۲): ساختمان ساده موتور خطی ۸
- شکل (۲-۲): ساختمان ساده موتور خطی لوله‌ای و مسطح ۸
- شکل (۳-۲): موتور خطی الف) با اولیه کوتاه ب) با ثانویه کوتاه ج) با ثانویه بدون هسته آهنی ۱۰
- شکل (۴-۲): ساختار موتور القایی خطی با ثانویه نوع شیاردار نردبانی ۱۱
- شکل (۵-۲): ساختار موتور القایی خطی با ثانویه نوع شیار یکپارچه ۱۱
- شکل (۶-۲): یک نمونه موتور القایی خطی یک طرفه ساخته شده ۱۲
- شکل (۷-۲): یک نمونه موتور القایی خطی دو طرفه ساخته شده ۱۲
- شکل (۸-۲): یک نمونه موتور القایی خطی لوله‌ای ساخته شده ۱۳
- شکل (۹-۲): توزیع عرضی چگالی شار فاصله هوایی ۱۴
- شکل (۱۰-۲): نمونه‌ای از کاربرد موتور القایی خطی در سیستم حمل و نقل ۱۶
- شکل (۱۱-۲): نمونه‌ای از کاربرد موتور القایی خطی در آسانسور ۱۶
- شکل (۱۲-۲): پمپ القایی خطی ۱۷
- شکل (۱۳-۲): کاربرد موتور القایی خطی ۱۷
- شکل (۱۴-۲): کاربرد موتور القایی خطی در پرتاب‌کننده هواپیما ۱۸
- شکل (۱۵-۲): طرح پیشنهادی سیستم اتوبوس هوایی ۱۹
- شکل (۱۶-۲): ساختار مش‌بندی گذرای دوبعدی موتور با روتور جدید و عمق پوستی مغناطیسی ۲۱
- شکل (۱۷-۲): ساختار دو بعدی ماشین قبل و بعد از بهینه‌سازی ۲۱
- شکل (۱-۳): شکل سه بعدی موتور القایی خطی ۲۸
- شکل (۲-۳): منحنی B-H هسته مغناطیسی ماشین ۳۰
- شکل (۲-۳): ساختار استاتور شیاردار و صفحه ثانویه ۳۱

- شکل (۳-۳): مدار معادل تقریبی هر فاز ۳۱
- شکل (۴-۳): نمای عمودی بخشی از اولیه ۳۳
- شکل (۵-۳): فلوچارت طراحی ۴۳
- شکل (۶-۳): مدار معادل ساده شده موتور القایی خطی طراحی شده ۴۵
- شکل (۷-۳): نمودار نیرو بر حسب سرعت برای موتور القایی خطی طراحی شده ۴۵
- شکل (۱-۴): ساختار دو بعدی موتور مورد بررسی ۴۸
- شکل (۲-۴): مش بندی یک جفت قطب موتور طراحی شده ۵۰
- شکل (۳-۴): جریان سیم پیچی های اولیه موتور طراحی شده بر حسب زمان ۵۱
- شکل (۴-۴): نقشه طیف رنگی توزیع چگالی شار موتور طراحی شده ۵۲
- شکل (۵-۴): خطوط شار داخل موتور طراحی شده ۵۲
- شکل (۶-۴): نیروی محرکه موتور طراحی شده بر حسب زمان ۵۳
- شکل (۷-۴): چگالی شار فاصله هوایی زیر یک جفت قطب موتور طراحی شده ۵۴
- شکل (۸-۴): نمودار توان ورودی موتور طراحی شده بر حسب زمان ۵۵
- شکل (۱-۵): نیروی پیشران موتور القایی خطی بر حسب سرعت برای ضخامت های مختلف ثانویه ۵۹
- شکل (۲-۵): مقادیر بهینه مقاومت به ازای سرعت های مختلف ۵۹
- شکل (۳-۵): ساختارهای در نظر گرفته شده برای ثانویه ۶۰
- شکل (۴-۵): نمودار بازده ساختارهای پیشنهادی بر حسب شاخص درصد آلومینیوم ۶۱
- شکل (۵-۵): نمودار توان ورودی ساختارهای پیشنهادی بر حسب شاخص درصد آلومینیوم ۶۲
- شکل (۶-۵): زمان همگرایی ساختارهای پیشنهادی بر حسب شاخص درصد آلومینیوم ۶۳
- شکل (۷-۵): نمودار جریان ساختارهای پیشنهادی بر حسب شاخص درصد آلومینیوم ۶۳
- شکل (۸-۵): نمودار ریپل نیروی ساختارهای پیشنهادی بر حسب شاخص درصد آلومینیوم ۶۴
- شکل (۹-۵): نمودار ضریب قدرت ساختارهای پیشنهادی بر حسب شاخص درصد آلومینیوم ۶۵

فهرست جدول‌ها

- جدول (۱-۳): مشخصات مطلوب طراحی ۲۹
- جدول (۲-۳): پارامترهای طراحی ۴۴
- جدول (۱-۴): جنس بخش‌های مختلف موتور ۴۹
- جدول (۲-۴): مقادیر متوسط چگالی شار بخش‌های مختلف موتور ۵۲
- جدول (۲-۴): ماکزیمم چگالی شار فاصله هوایی ۵۴

فصل ۱ : پیشگفتار

۱-۱- مقدمه

موتورهای خطی به دلیل ایجاد و انتقال نیروی خطی به جسم بدون نیاز به واسطه‌های مکانیکی از قبیل گیربکس یا سایر مبدل‌های حرکت دوار به حرکت خطی در صنایع نظامی بخصوص در سیستم شتاب‌دهنده‌ها و پرتاب‌کننده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. موتورهای خطی بکار رفته در شتاب‌دهنده‌ها تاثیر مستقیمی بر روی مشخصه‌های عملکردی آنها از جمله بازده، زمان شتاب‌گیری، وزن شتاب‌دهنده و ... دارد. در بین موتورهای خطی موتورهای القائی خطی بدلیل هزینه ساخت پایین و ساختار ساده بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. این نوع موتورها جایگزین موتورهای جریان مستقیم در بسیاری از کاربردهای الکترونیک قدرت شده‌اند. از آنجایی که تمرکز این پایان‌نامه بر روی موتورهای القایی خطی می‌باشد لذا در بخش‌های بعد به تعریف مسئله بر روی این نوع موتورها و اهداف انجام مطالعات مختلف بر روی موتورهای القایی خطی پرداخته می‌شود.

۱-۲- بیان مسئله

اگر چه موتورهای DC به لحاظ سادگی کنترل سرعت و گشتاور دارای توانائی‌های در خور توجه می‌باشد، اما مشکلاتی مانند پیچیدگی ساختار و ایجاد جرقه در جاروبک‌ها از عوامل بازدارنده در بکارگیری آنها در برخی از کاربردها می‌باشد. با بهره‌گیری از موتورهای القائی می‌توان مشکلات ناشی از موتورهای DC را تا حدی کاهش داد. ساختمان این موتورها ساده‌تر بوده و نگهداری از آنها راحت‌تر است. البته دشواری کنترلی این نوع موتورها را باید در نظر داشت. موتورهای سنکرون هم دارای سرعت ثابت متأثر از فرکانس شبکه یا منبع تغذیه می‌باشند و مزایای سادگی موتورهای القائی را نداشته و تنظیم سرعت در آنها را می‌توان به کمک تغییر فرکانس انجام داد [۱] و [۲]. موتورهای القایی به صورت تکفاز و سه فاز در بخش‌های مختلف صنعت، کشاورزی، خدماتی و ... استفاده می‌شوند [۳]. این موتورها می‌توانند دارای حرکت خطی یا دوار باشند. یک موتور خطی در واقع یک

موتور الکتریکی است که از حالت دوار درآمده تا بجای اینکه یک حرکت دورانی تولید کند یک حرکت خطی بوجود آورد [۴]. باتوجه به اینکه حرکت بسیاری از ماشین‌آلات صنعتی به صورت خطی می‌باشد، در صورت استفاده از موتورهای دوار به مبدل‌های مکانیکی برای تبدیل حرکت دوار به حرکت خطی نیاز است. موتورهای خطی نوع خاصی از ماشین‌های الکتریکی هستند که در آنها نیرو و حرکت خطی بدون هیچ واسطه مکانیکی و مستقیماً توسط میدان‌های مغناطیسی تولید می‌شود. بدین ترتیب، عدم استفاده از مبدل‌های مکانیکی سبب بهبود مشخصه خروجی موتور و افزایش قابلیت اطمینان خواهد شد [۵]. امروزه کاربردهای موتور خطی بطور وسیعی گسترش یافته است. از این جمله می‌توان به مواردی همچون سیستم نقاله، شتاب‌دهنده‌ها و پرتاب‌کننده‌ها، ماشین‌افزار، باز و بسته کردن پرده‌های متحرک و درهای کشویی و قطارهای با سرعت متوسط و زیاد اشاره نمود. پرکاربردترین نوع موتورهای خطی، موتور القایی خطی می‌باشد بنابراین بهبود مشخصه‌های عملکردی آنها از قبیل افزایش بازده، کاهش زمان شتابگیری و ... حائز اهمیت می‌باشد.

۱-۳-هدف تحقیق

موتورهای خطی به کار رفته در شتاب‌دهنده‌ها تأثیر مستقیمی بر روی مشخصه‌های عملکردی آنها از جمله بازده، زمان شتابگیری، وزن شتاب‌دهنده و ... دارد. پارامترهای مختلف طراحی از قبیل شکل شیارهای اولیه، عمق و عرض میله‌های ثانویه، اثر پوستی، مقاومت مؤثر ثانویه و ... بر روی مشخصه‌های عملکردی موتورهای خطی بخصوص نیروی محرکه و بازده اثر می‌گذارد. در زمینه طراحی و بهینه‌سازی موتورهای القایی خطی تحقیقات متعددی انجام گرفته است که منجر به بهبود مشخصه‌های عملکردی از قبیل افزایش بازده، کاهش وزن، بهبود روش‌های جبران‌سازی اثر انتهای و ... شده است. اما بررسی‌ها نشان می‌دهد که در زمینه بهبود مشخصه نیرو بر حسب سرعت موتورهای القایی خطی مطالعات گسترده‌ای صورت نگرفته است. در این پایان‌نامه با استفاده از الگوریتم طراحی موتور خطی و ایجاد تغییراتی در ساختار ثانویه که منجر به تغییر مقاومت ثانویه موتور خواهد شد مشخصات

عملکردی موتور بخصوص مشخصه نیرو بر حسب سرعت برای کاربرد در یک شتابدهنده بهبود داده می شود.

۱-۴- مروری بر فصل های پایان نامه

در فصل دوم انواع موتور القایی خطی معرفی و مروری بر مطالعات پیشین در مراجع انجام می شود. در فصل سوم روابط طراحی موتور القایی خطی ارائه و به کمک این روابط یک نمونه موتور طراحی می گردد. سپس در فصل چهارم موتور طراحی شده در محیط نرم افزار اجزاء محدود شبیه سازی و صحت طراحی مورد ارزیابی قرار می گیرد. در فصل پنجم به بررسی تاثیر جنس و ضخامت هادی ثانویه بر روی مشخصه شتابگیری آزاد ماشین پرداخته می شود و به کمک شبیه سازی های مختلف ضخامت بهینه که به ازای آن ماشین با کمترین زمان به سرعت مطلوب می رسد بدست می آید. در فصل ششم نتیجه گیری و پیشنهادات ارائه خواهد شد.

فصل ۲ : مروری بر موتورهای القایی خطی و

مطالعات گذشته

۲-۱- مقدمه

یک موتور خطی در واقع یک موتور الکتریکی است که از حالت دوار درآمده تا بجای اینکه یک حرکت دورانی تولید کند یک حرکت خطی بوجود آورد. کلمه‌ی خطی بیانگر نوع حرکت است که در این موتورها بوجود می‌آید. هر موتور الکتریکی دوار می‌تواند دارای همتای خطی باشد. امروزه موتورهای خطی در صنایع به ویژه در امور حمل و نقل با سرعت‌های بالا کاربرد فراوانی یافته‌اند. موتورهای خطی به دلایل زیر لزوماً بهترین انتخاب برای هر کاری که دارای حرکت خطی است، نمی‌باشد [۶]، [۷] و [۸]:

- راندمان نسبتاً کمی دارند.
- ذاتا فاصله هوایی بزرگی دارند.
- کاربردهای خاصی دارند و ممکن است برای کار خطی استفاده کننده مناسب نباشند.
- اما با وجود معایب بیان شده به دلایل زیر موتورهای خطی در صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرند:
 - ارتعاشات و صوت این موتورها نسبتاً کم است.
 - نسبت به موتورهای معمولی شتاب زیاد، اصطکاک کم و نیاز به تعمیر و نگهداری کمتری دارند.
 - در سرعت‌های بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند.
 - بدون هیچ واسط مکانیکی نیروی وارده را بر جسم متحرک انتقال می‌دهند.
- با استفاده از موتورهای خطی می‌توان با صرفنظر از چرخ‌دنده‌ها و دیگر تجهیزات به سیستمی با قابلیت اطمینان بالاتر رسید.

۲-۲- مقایسه موتورهای خطی با دوار

در این بخش موتورهای دوار با همتای خطی به طور اجمالی مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در موتورهای دوار به دلیل حرکت دورانی مفاهیمی چون گشتاور و سرعت زاویه‌ای معنا پیدا می‌کند و

مشخصه گشتاور بر حسب سرعت زاویه‌ای از اهمیت خاصی برخوردار است. در حالی که در موتورهای خطی که نوع حرکت آنها خطی می‌باشد مفاهیم نیرو و سرعت خطی مطرح می‌گردد و مشخصه نیرو بر حسب سرعت خطی معنا پیدا می‌کند. یکی از اثراتی که ناشی از ساختار موتورهای خطی می‌باشد اثر لبه است. همچنین به دلیل محدود بودن ساختار ماشین بین یک نقاط ابتدا و انتها اثر انتهایی نیز بوجود می‌آید. در ادامه فصل به توضیح این دو پدیده پرداخته خواهد شد.

تعداد قطب‌ها یکی از پارامترهای تعیین کننده در مقدار سرعت سنکرون موتورهای دوار است ولی سرعت سنکرون در موتورهای خطی به تعداد قطب‌ها بستگی ندارد بلکه به گام قطب موتور بستگی دارد. در موتورهای دوار فاصله هوایی معمولاً کوچک می‌باشد اما در موتورهای خطی فاصله هوایی زیاد است. بزرگ بودن فاصله هوایی باعث افزایش تلفات موتور می‌شود و این یکی از اشکالاتی است که همواره به موتورهای خطی وارد است.

یکی از مواردی که باعث رونق موتورهای خطی شده است قابلیت استفاده از آنها در سرعت‌های بالا است در حالی که در موتورهای دوار اینگونه نیست.

۲-۳- انواع موتورهای خطی

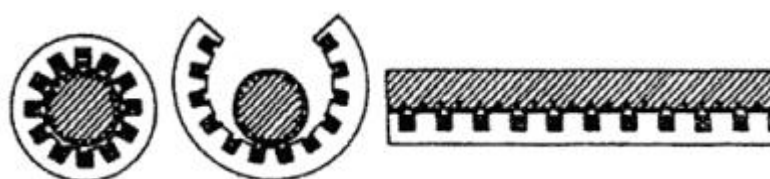
برای هر یک از انواع موتورهای دوار مشابه خطی نیز وجود دارد که عبارتند از [۶]، [۷] و [۸]:

- | | |
|-------------------------------|--|
| (۱) موتورهای القایی خطی | (۲) موتورهای سنکرون خطی |
| (۳) موتورهای جریان مستقیم خطی | (۴) موتورهای پله‌ای خطی |
| (۵) موتورهای مغناطیس دائم خطی | (۶) موتورهای مغناطیس دائم شار متقاطع خطی |

در بین این موتورها نوع القایی بخاطر مزایای فراوان بخصوص نیاز به یک منبع تغذیه ساده و ارزانتر بودن مورد توجه بیشتری قرار گرفته و انواع مدل‌های آن بصورت صنعتی به بازار عرضه شده است.

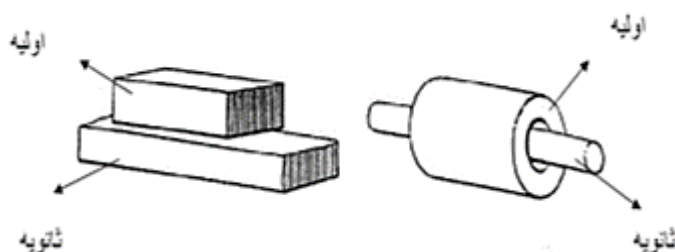
۲-۴- ساختار موتورهای خطی

یک موتور خطی می‌تواند از تغییر شکل یک موتور دوار معمولی حاصل شود. در شکل (۱-۲) ساختار یک موتور دوار متداول نشان داده شده است. مطابق شکل اگر این موتور دوار استوانه‌ای در امتداد محور بریده شده و گسترده شود موتور خطی مسطح حاصل می‌شود.



شکل (۱-۲): ساختمان ساده موتور خطی [۷]

اگر این موتور مسطح در امتداد طولی خود عمود بر امتداد جریان‌های میله‌ها لوله شود یک موتور خطی لوله‌ای بدست می‌آید. در شکل (۲-۲) ساختمان یک موتور خطی مسطح و نیز یک موتور خطی لوله‌ای در حالت بسیار ابتدایی نشان داده شده است.



شکل (۲-۲): ساختمان ساده موتور خطی لوله‌ای و مسطح

از دو قسمت اساسی موجود در هر موتور خطی، یک قسمت "اولیه" است که میدان مغناطیسی لازم را در فاصله هوایی ایجاد می‌کند. قسمت دیگر "ثانویه" است که در اثر عمل متقابل بین جریان به وجود آمده در آن و میدان مغناطیسی موجود در فاصله هوایی نیروی موتور را تولید می‌کند.

موتورهای خطی می‌توانند بصورت شتاب پایین و یا شتاب بالا طراحی و ساخته شوند. موتورهای شتاب پایین برای قطارهای مگلو و دیگر کاربردهای حمل و نقل زمینی مناسب هستند. موتورهای

شتاب بالا معمولا خیلی کوتاه هستند و برای شتاب دادن به جسمی تا سرعت بسیار زیاد و سپس رها کردن آن به کار می‌روند. این موتورها معمولا برای مطالعات برخورد سرعت بالا به عنوان تسلیحات نظامی یا به عنوان راه‌اندازنده جرمی برای پیشرانه فضاپیما به کار می‌روند [۷]، [۸] و [۹].

بدلیل اینکه تمرکز این پایان‌نامه بر روی موتورهای القایی خطی می‌باشد در ادامه به بررسی این نوع ساختار با جزئیات بیشتر پرداخته می‌شود.

۲-۵- موتورهای القایی خطی

اولیه یک موتور القایی از شبکه سه فاز تغذیه می‌شود. ثانویه نیز یک سیم‌پیچی صفحه‌ای با هسته آهنی یا بدون هسته آهنی است. هر یک از قسمت‌های اولیه و ثانویه می‌تواند نقش عضو ثابت را به خود بگیرد. در این صورت قسمت دیگر، عضو متحرک موتور خواهد بود. از نظر تغذیه موتورهای القایی خطی به دو نوع ولتاژ ثابت و جریان ثابت تقسیم‌بندی می‌شوند [۱۰].

۲-۵-۱- اساس کار موتور القایی خطی

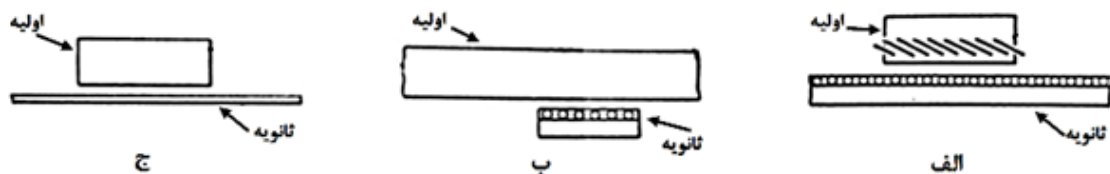
موتورهای القایی خطی بر اساس دو اصل کار می‌کنند: بر اساس اصل اول وقتی که یک آهنربای دائم روی صفحه‌ی هادی حرکت داده شود در صفحه جریان‌هایی القا می‌شود که این جریان شاری را تولید خواهد کرد. حال در فاصله هوایی دو شار وجود دارد که یکی شار مربوط به آهنربا و دیگری شار ناشی از القاء منتجه است. وجود این دو شار در فاصله هوایی باعث می‌شود که تنظیم شار در فاصله هوایی بهم بخورد. حال این اصل بیان می‌کند که به صفحه نیرویی وارد می‌شود که می‌خواهد شار را در فاصله هوایی صفر کند در نتیجه جسم متحرک شروع به حرکت کرده و از حرکت آهنربا پیروی می‌کند. اصل دوم در واقع همان قانون آمپر است که بیان می‌کند وقتی هادی حامل جریان در یک میدان مغناطیسی قرار بگیرد به آن نیرو وارد خواهد شد [۱۰].

۲-۵-۲- انواع ساختار موتورهای القایی خطی

موتورهای القایی خطی از نظر ساختار به سه نوع یک طرفه، دو طرفه و لوله‌ای تقسیم‌بندی می‌شوند. هر یک از این ساختارها به طور مفصل بررسی می‌شوند [۷]، [۱۰] و [۱۱].

۲-۵-۲-۱- موتور القایی خطی یک طرفه

بخش اولیه که می‌تواند متحرک یا ساکن باشد فقط در یک طرف بخش ثانویه که آن نیز می‌تواند ساکن یا متحرک باشد وجود دارد. یک قطعه آهن مغناطیسی نیز جهت کاهش مقاومت مغناطیسی مدار به بخش ثانویه اضافه می‌گردد. در این نوع موتور ثانویه می‌تواند از اولیه بلندتر و یا کوتاه‌تر باشد. همچنین ثانویه می‌تواند بدون هسته آهنی طراحی شود. این سه ساختار در شکل (۳-۲) نشان داده شده است.

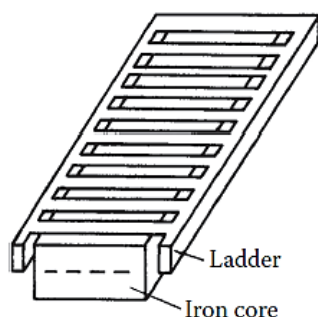


شکل (۳-۲): موتور خطی (الف) با اولیه کوتاه (ب) با ثانویه کوتاه (ج) با ثانویه بدون هسته آهنی

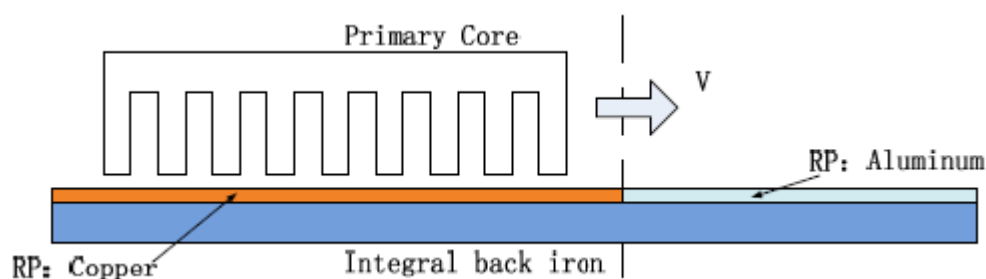
همچنین ساختار ثانویه می‌تواند شیاردار و یا بدون شیار باشد. در شکل (۴-۲) ساختار موتور القایی خطی با ثانویه نوع شیاردار نردبانی^۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در ساختار ثانویه نردبانی از میله‌های آلومینیومی استفاده شده است. با اتصال سیم‌پیچی‌های اولیه به منبع تغذیه شار متغیر با زمانی ایجاد می‌شود که این شار میله‌های آلومینیومی نشان داده شده را قطع کرده و باعث جاری شدن جریان در این میله‌ها می‌شود. این جریان میدانی در فاصله هوایی ایجاد می‌کند. در این حالت نیز کلیه سرهای میله‌ها باید اتصال کوتاه شود. در شکل (۵-۲) ساختار موتور القایی خطی با

^۱ - Ladder

ثانویه با صفحه آلومینیومی یکپارچه^۱ نشان داده شده است. نحوه راه‌اندازی این ساختار نیز مشابه موتور نوع نردبانی می‌باشد.



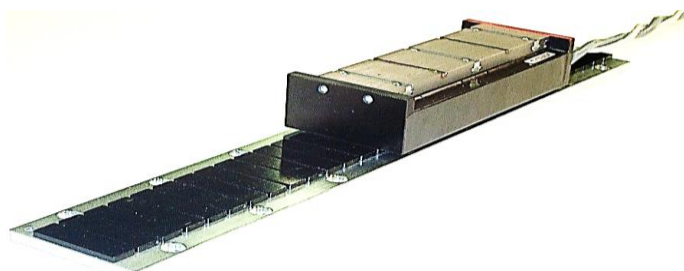
شکل (۲-۴): ساختار موتور القایی خطی با ثانویه نوع شیاردار نردبانی [۱۲]



شکل (۲-۵): ساختار موتور القایی خطی با ثانویه نوع بدون شیار یکپارچه [۱۳]

این نوع موتور برای کاربرد در وسیله نقلیه بسیار مناسب است که در آن بخش اولیه می‌تواند قسمت متحرک وسیله را تشکیل دهد و بخش ثانویه در طول مسیر ادامه داشته باشد. برای حرکت نیز نیازی به چرخ نمی‌باشد و با ایجاد یک سیستم دافعه بین دو قسمت حرکت در هوا صورت گیرد. یک نوع موتور القایی خطی یک طرفه ساخته شده در شکل (۲-۶) نشان داده شده است.

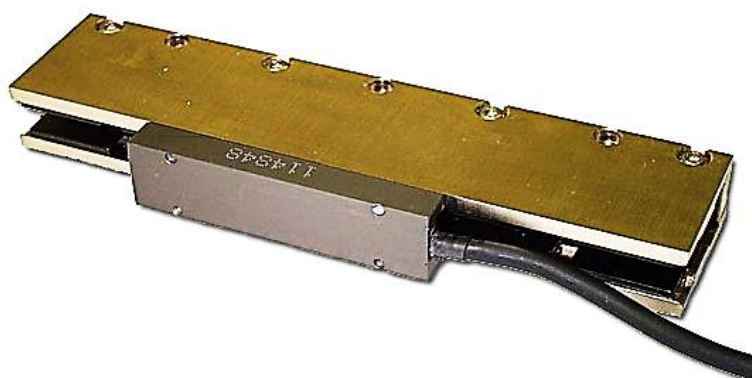
^۱ - Solid



شکل (۶-۲): یک نمونه موتور القایی خطی یک طرفه ساخته شده

۲-۲-۵-۲- موتور القایی خطی دو طرفه

در این حالت دو بخش اولیه در دو طرف ثانویه قرار می‌گیرند. اگر دو اولیه طوری تغذیه شوند که قطب‌های مقابل هم قطبیت مخالف داشته باشند ساختار خطی دو طرفه تشکیل می‌شود. در این حالت نیازی به استفاده از هسته مغناطیسی در بخش ثانویه نیست. در شکل (۷-۲) ساختار یک موتور القایی خطی دو طرفه ساخته شده نشان داده شده است.



شکل (۷-۲): یک نمونه موتور القایی خطی دو طرفه ساخته شده

۲-۲-۵-۳- موتور القایی خطی لوله‌ای^۱

هرگاه بخش اولیه موتور نوع یک طرفه در امتداد عرضی آن خمیده شود بطوریکه به یک استوانه تبدیل گردد و درون آن یک میله فلزی قرار گیرد موتور نوع لوله‌ای ایجاد می‌گردد. بنابراین اولیه به صورت یک سلونوئید خواهد بود که دارای سیم‌پیچ سه فاز است و از تمامی طول سیم‌پیچ بطور موثر

^۱ Tubular

استفاده می‌گردد. نوع لوله‌ای فاقد اتصالات انتهایی سیم‌پیچ‌ها می‌باشد و این یک مزیت است از طرف دیگر بخاطر محدودیت‌های مکانیکی فقط در ضربه‌های کوتاه کاربرد دارد. در شکل (۸-۲) یک نوع موتور القایی خطی لوله‌ای ساخته شده نشان داده شده است.



شکل (۸-۲): یک نمونه موتور القایی خطی لوله‌ای ساخته شده

۲-۵-۳- برخی از مسائل خاص موتورهای القایی خطی

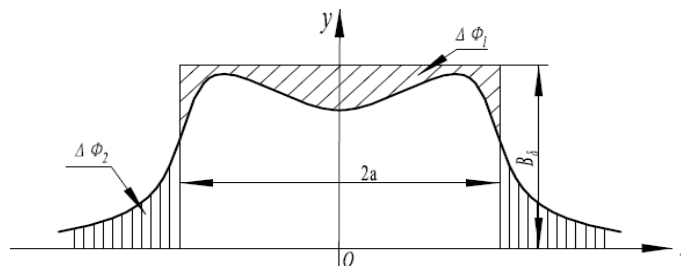
موتورهای القایی خطی با توجه به ساختار خاصی که دارند دارای معایبی هستند که عبارتند از:

۲-۵-۳-۱- اثر لبه

یکی از اثراتی که در موتور خطی وجود دارد اثر لبه است. در یک موتور القایی دوار، سیم‌پیچی روتور مسیره‌ای مشخصی را برای جریان‌های القایی در آن ارائه می‌دهد ولی در یک موتور القایی خطی ثانویه یک صفحه هادی است بنابراین مسیره‌ای معینی برای جریان‌های القایی در ثانویه وجود نخواهد داشت. تاثیر اصلی اثر لبه کاهش هدایت ثانویه می‌باشد. زمانی که ثانویه موتور القایی خطی بزرگتر از اولیه ساخته می‌شود، چگالی شار فاصله هوایی از ناحیه فعال به ناحیه لبه‌ای منتشر می‌شود. هنگام کارکرد موتور بخصوص در سرعت‌های بالا جریان گردابی در صفحه القاء می‌شود. جریان‌های القایی در صفحه ثانویه دارای چگالی جریان‌هایی با مؤلفه‌های J_x و J_z می‌باشند. نیروی محرکه موتور القایی خطی به وسیله چگالی شار مؤلفه z در ناحیه فعال تولید می‌شود. در ناحیه فعال تنها مؤلفه z وجود ندارد و مقداری مؤلفه x هم وجود دارد. مؤلفه (J_x) در ناحیه فعال باعث تولید تلفات اضافی می‌شود.

به تأثیر حضور مؤلفه J_x در ناحیه فعال اثر لبه می‌گویند. چگالی شاری که توسط جریان گردابی تولید می‌شود با چگالی شار اولیه‌ای که توسط میدان هسته‌ها تولید می‌شود به مخالفت می‌پردازد. بر اساس آن چگالی شار منتجه مطابق شکل (۹-۲) به صورت زینی شکل می‌شود.

در حالت کلی اثر لبه باعث کاهش رسانایی الکتریکی ورق آلومینیومی، اشباع مغناطیسی در موتورهای القایی خطی یک طرفه و کاهش بسیار اندک در اندوکتانس مغناطیسی می‌شود [۷].



شکل (۹-۲): توزیع عرضی چگالی شار فاصله هوایی [۷]

۲-۳-۵-۲- بزرگ بودن فاصله هوایی

یکی دیگر از معایب موتورهای القایی خطی بزرگ بودن فاصله هوایی آنها می‌باشد. طول فاصله هوایی شدیداً بر مشخصات عملکردی موتور تاثیرگذار است. فاصله هوایی زیاد بین اولیه و ثانویه در موتور یک طرفه و یا بین دو اولیه در موتور دو طرفه باعث می‌شود که جریان مغناطیس‌کنندگی افزایش پیدا کند و تا حدودی باعث کم شدن ضریب توان اولیه می‌گردد [۷].

۲-۳-۵-۲- اثر انتهایی

پدیده دیگری که در موتورهای القایی خطی وجود دارد و در موتور القایی دوار نیست و یکی از مهمترین وجه تمایز بین این دو موتور می‌باشد اثر انتهایی است. این پدیده ناشی از این امر است که اولیه در موتور القایی خطی دارای لبه ورودی است. هنگامی که اولیه حرکت می‌کند سیم‌پیچی‌های اولیه قسمت جدیدی از ثانویه را در زیر خود می‌بیند. طبق قانون لنز جریان ثانویه در منطقه ورودی از تولید شار در آن فاصله‌ی هوایی جلوگیری می‌کند و در نتیجه وقتی موتور حرکت می‌کند چگالی شار

فاصله مزبور برای اولین جفت قطب نزدیک لبه ورودی بطور قابل ملاحظه‌ای کمتر از زیر قطب‌های بعدی موتور است. همچنین طبق قانون لنز جریان که تمایل دارد شار را ثابت نگه دارد بعد از اینکه هادی ثانویه را ترک کرد در آن می‌ماند تا با کاهش شار مخالفت کند. بنابراین مقدار شار مرتبط با پیچک‌های واقع در انتهای اولیه متفاوت از بقیه پیچک‌هاست. این پدیده باعث نامتقارن شدن اندوکتانس فازها و در نتیجه نامتعادلی جریان فازها می‌گردد. این جریان باعث تلفات اهمی بدون تولید نیرو می‌شود. بنابراین اثر انتهایی باعث می‌شود که مقاومت موثر ثانویه بزرگتر شده و در نتیجه موتور بازده پایین‌تری داشته باشد.

بدیهی است که این امر در حالت سکون یا در سرعت‌های کم، صفر یا قابل اغماض بوده و اثر بسیار جزئی در معادلات موتور دارد. اما اگر موتور در سرعت بالا مورد استفاده قرار گیرد این اثر تشدید شده و دیگر قابل اغماض نخواهد بود. هر چه سرعت افزایش یابد این اثر بیشتر خواهد شد. در نتیجه اثر انتهایی حداکثر نیرویی را که موتور می‌تواند تولید کند کاهش می‌دهد [۷].

۲-۵-۴- کاربردهای موتورهای القایی خطی

موتورهای القایی خطی به دلیل ساختار خاصی که دارند و با توجه به مزایای فراوانشان می‌توانند در بسیاری از صنایع از قبیل سیستم‌های حمل و نقل، پمپ کردن فلزات مایع، شتاب‌دهنده‌ها و پرتاب-کننده‌ها، باز و بسته کردن پرده‌ها و درهای لغزان، آسانسورها، ایجاد ضربه‌های کوتاه تا دو متر، پرواز مغناطیسی و وسایل تست استحکام اتومبیل و ... مورد استفاده قرار بگیرند [۷].

۲-۵-۴-۱- سیستم‌های حمل و نقل

یکی از کاربردهای موتورهای خطی استفاده از آنها در سیستم حمل و نقل می‌باشد. به عنوان نمونه یک قطار برقی در شکل (۲-۱۰) نشان داده شده است. با توجه به این شکل ریل و قطار با هم تشکیل اولیه و ثانویه یک موتور القایی خطی را می‌دهند که با تغذیه قطار و القاء شار در داخل ریل‌ها قطار

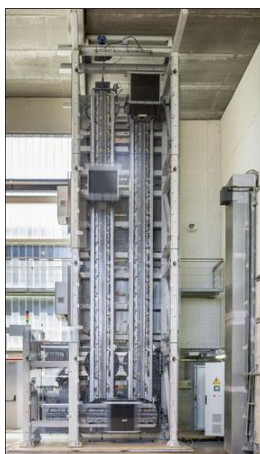
شروع به حرکت می‌کند. در سیستم حمل و نقل به لحاظ محدودیت‌هایی همچون راحتی مسافر شتاب سیستم نمی‌تواند از یک مقدار مشخص بیشتر باشد.



شکل (۲-۱۰): نمونه‌ای از کاربرد موتور القایی خطی در سیستم حمل و نقل

۲-۴-۵-۲- آسانسورها

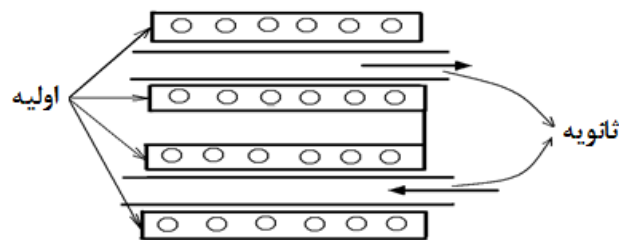
در برخی از آسانسورها از یک موتور القایی خطی برای ایجاد حرکت استفاده می‌شود. یک نمونه از این نوع آسانسورها در شکل (۲-۱۱) نشان داده شده است. با توجه به این شکل آسانسور بر روی قسمت متحرک ماشین القایی خطی نصب می‌شود و با تغذیه سیم‌پیچ‌های ماشین متحرک و در نتیجه آسانسور شروع به حرکت می‌کند.



شکل (۲-۱۱): نمونه‌ای از کاربرد موتور القایی خطی در آسانسور

۲-۵-۴-۳- پمپ کردن فلزات مایع

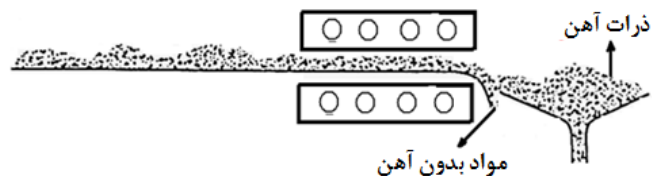
یکی دیگر از کاربردهای مهم موتورهای القایی خطی، پمپ‌های القایی خطی است که جهت پمپ کردن مایعات فلزی بکار گرفته می‌شود. کاربرد استثنائی این نوع موتورها پمپ کردن سدیم مذاب در رآکتورهای اتمی جهت خنک کردن رآکتور می‌باشد. بدین ترتیب از نشست مواد رادیواکتیو به فضای اطراف جلوگیری می‌شود. در شکل (۲-۱۲) ساختار یک پمپ القایی خطی نشان داده شده است.



شکل (۲-۱۲): پمپ القایی خطی

۲-۵-۴-۴- جدا کردن آهن از سنگ آهن

برای جدا کردن آهن از سنگ آهن نیز می‌توان از موتور القایی خطی استفاده کرد. بدین ترتیب که ابتدا سنگ آهن بوسیله سنگ‌شکن‌ها به قطعات کوچکتر تبدیل شده و سپس از طریق نوار نقاله‌ای که بالای آن قسمت ثابت موتور القایی خطی قرار دارد و بلافاصله بعد از نوار نقاله قیفی وجود دارد، ذرات آهن که براساس میدان مغناطیسی خطی اولیه شتاب گرفته‌اند به داخل قیف ریخته و از سنگ آهن جدا می‌شوند. این ساختار در شکل (۲-۱۳) نشان داده شده است.



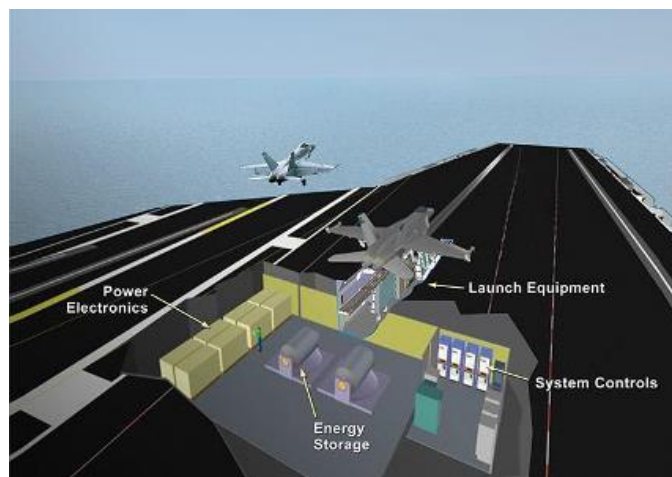
شکل (۲-۱۳): کاربرد موتور القایی خطی

۲-۵-۴-۵- شرکت‌های خودروسازی

از موتور القایی خطی برای تست اتومبیل در شرکت‌های خودروسازی استفاده می‌شود. بدین صورت که با نصب این موتورها در زیر اتومبیل از آنها به عنوان وسیله‌ای برای شبیه‌سازی شرایط اتومبیل به منظور تست مکانیکی آن استفاده می‌شود.

۲-۵-۴-۶- پرتاب‌کننده‌ها

یکی دیگر از کاربردهای موتور القایی خطی پرتاب موشک‌ها، هواپیماها و سایر تجهیزات نظامی با سرعت خیلی زیاد است. این نوع سلاح‌ها در ابتدا با شتاب ایجاد شده توسط موتور القایی خطی پرتاب شده و سپس توسط سوخت موجود در خود به مسیر تعیین شده ادامه می‌دهند. در شکل (۲-۱۴) یک پرتاب‌کننده هواپیما بر روی ناو هواپیمابر با محرکه موتور القایی خطی مشاهده می‌شود که در مسافت کوتاه هواپیما را به سرعت بسیار زیادی می‌رساند.



شکل (۲-۱۴): کاربرد موتور القایی خطی در پرتاب‌کننده هواپیما

۲-۵-۵- مروری بر مطالعات گذشته

از سال ۱۸۶۵ با توسعه تکنولوژی‌های حمل و نقل سریع‌السیر زمینی موتورهای با حرکت خطی مورد اهمیت قرار گرفتند. اولین موتور القایی خطی در سال ۱۸۹۵ برای یک شرکت بافندگی طراحی و

ساخته شد. در مورد موتورهای خطی مقالات بسیاری به چاپ رسیده است و در بسیاری از آن‌ها بطور کامل ساختار، ویژگی‌ها و کاربردهای انواع این موتورها شرح داده شده است.

آقای عبداللهی و همکارش یک اتوبوس هوایی برای حمل و نقل شهری پیشنهاد داده‌اند. نیروی حرکتی در این سیستم پیشنهادی توسط موتور خطی تولید می‌شود. موتور القایی خطی یک طرفه یا دو طرفه می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد اما موتور القایی خطی دو طرفه به دلیل مزایایی از جمله چگالی نیروی بالا ترجیح داده می‌شود. برای بررسی عملکرد موتور از روش تحلیلی یک بعدی استفاده می‌شود. در این روش اثر لبه طولی و عرضی در نظر گرفته می‌شود. سپس موتور مورد نظر طراحی شده و عملکرد آن با استفاده از روش المان محدود و مدل سازی تحلیلی ارزیابی می‌شود [۱۴].



شکل (۲-۱۵): طرح پیشنهادی سیستم اتوبوس هوایی [۱۴]

در [۱۵] ابتدا با استفاده از الگوریتم ژنتیک یک طراحی بهینه صورت گرفته است که حاصل ضرب بازده و ضریب توان به عنوان تابع هدف برای بیشینه شدن در نظر گرفته شده است و نیز از یک ساختار منحصر به فرد با استفاده از سیم ابر رسانای دما بالا در سیم پیچ اولیه، سعی در افزایش نیروی پیشیرانه و بازده با اعمال جریان بزرگ به سیم پیچ اولیه داشته است.

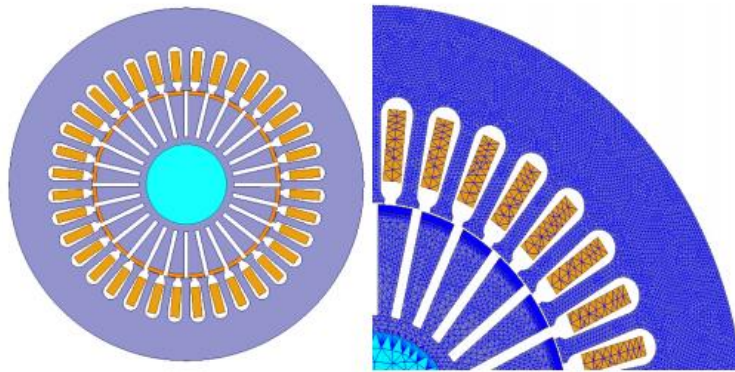
آقای جیورجی^۱ و همکارش یک الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی چندهدفه برای طراحی بهینه یک ماشین القایی ارائه کرده است. در این الگوریتم طراحی، گشتاور بار کامل، وزن ماشین و راندمان سه تابع هدف در روند بهینه‌سازی هستند که با تغییر نسبت طول به عرض دندان استاتور مقادیر بهینه توابع هدف محاسبه شده است. همچنین با بررسی مشخصه گشتاور سرعت ماشین نشان داده شده است که در حالت بهینه گشتاور ۲ درصد افزایش می‌یابد [۱۶].

در [۱۷] مدار معادل حالت دائمی یک ماشین القایی سه فاز ارائه شده است. سپس به کمک این مدار معادل یک بار با در نظر گرفتن اثر پوستی و بار دیگر بدون در نظر گرفتن این اثر مشخصه گشتاور بر حسب سرعت ماشین مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده در این مرجع نشان می‌دهد که صرف نظر کردن از اثر پوستی سبب ایجاد خطای چشمگیری در مشخصه گشتاور سرعت ماشین می‌گردد.

آقای مک گوینس^۲ و همکارانش یک ماشین القایی سرعت بالا با روتوری با ساختار جدید معرفی کرده‌اند که در شکل (۲-۱۶) نشان داده شده است. در این ساختار روتور ترکیبی از شیارهای محوری و روتور یکپارچه می‌باشد. مقایسه عملکرد این ساختار با ماشین‌های القایی متداول نشان می‌دهد که گشتاور خروجی در این نوع موتورها نسبت به انواع دیگر بالاتر می‌باشد. همچنین رپیل گشتاور ناشی از هارمونیک‌های فضایی نیز کم شده است. علاوه بر آن شیارهای محوری روتور افزایش یافته است که باعث نفوذ شار مماسی در بدنه روتور می‌گردد. در نتیجه شار مغناطیسی ناشی از جریان‌های گردابی عمیق‌تر شده و گشتاور الکترومغناطیسی بیشتری تولید می‌شود. در نهایت مشخصه گشتاور سرعت ماشین بهبود می‌یابد [۱۸].

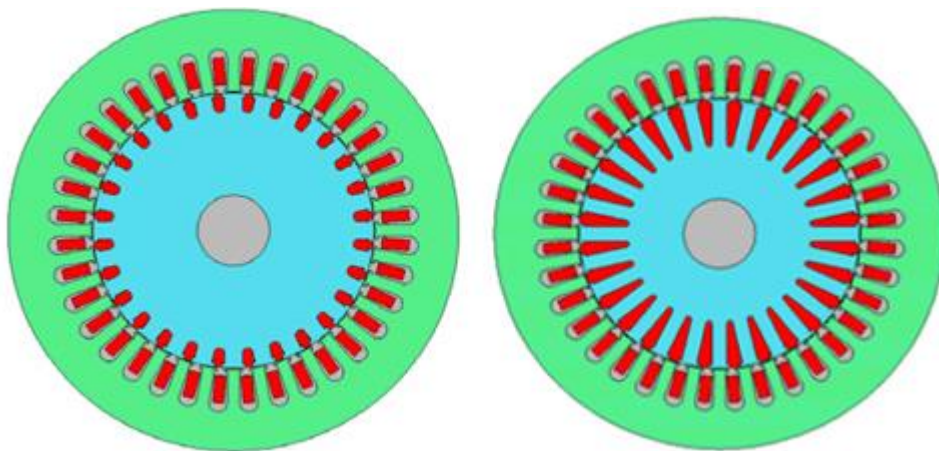
^۱ György

^۲ McGuiness



شکل (۲-۱۶): ساختار مش بندی گذرای دوبعدی موتور با روتور جدید و عمق پوستی مغناطیسی [۱۸]

در [۱۹] به طراحی بهینه یک موتور القایی قفس سنجابی با استفاده از روش اجزاء محدود پرداخته است. در این پژوهش با تغییر عمق و عرض میله‌های روتور مشخصه گشتاور سرعت و بازده ماشین مورد بررسی قرار گرفته است و با انتخاب بهینه این پارامترها راندمان ماشین ۵ درصد افزایش یافته است.



شکل (۲-۱۷): ساختار دو بعدی ماشین قبل و بعد از بهینه‌سازی [۱۹]

در [۲۰] به بررسی نیروها در یک موتور القایی خطی تحت لغزش‌های متفاوت برای کاربرد قطارهای مگلو^۱ سرعت پایین پرداخته شده است. موتور القایی خطی که در قطار مگلو به کار می رود نیروی محرک لازم برای حرکت قطار را فراهم می کند. در این پژوهش سه مدل اجزاء محدود برای بررسی اثر

^۱ Maglev

لبه عرضی، اثر انتهای طولی، شکل لبه عرضی، ورق آلومینیومی ثانویه، دما و ... بر روی نیرو بکار گرفته شده است. همچنین بر اساس مدار معادل ثانویه موتور القایی خطی، منحنی‌های نیرو، بازده و ضریب قدرت بر حسب سرعت قطار برای لغزش‌های مختلف بدست آمده است. تاثیر لبه عرضی، اثر انتهای طولی و طول فاصله هوایی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج بدست آمده اثر لبه عرضی بیشتر از اثر انتهای طولی بوده است. همچنین نشان داده شده است که دما و شکل لبه عرضی ورق آلومینیومی ثانویه تاثیر کمی بر روی نیروی محوری می‌گذارد، اما به طور قابل توجهی بر روی نیروی عمودی تحت جریان ثابت تاثیرگذار است. بنابراین، برای اندازه‌گیری نیروی عمودی با دقت، باید در طول آزمایش، دما را بررسی کرد. علاوه بر این، آزمایش نباید بیش از حد طول بکشد بخصوص در جریان بالا زیرا دما به سرعت بالا می‌رود و حتی ممکن است صفحه آلومینیوم را ذوب کند.

در [۲۱] به بهینه‌سازی عملکرد موتورهای القایی تک‌فاز با استفاده از Maxwell پرداخته است. با توجه به اینکه عملکرد ماشین در لغزش بهینه بهبود می‌یابد در این مرجع لغزش بهینه از طریق شبیه‌سازی و آزمایش و با استفاده از Maxwell به دست آمده و اعتبارسنجی شده است.

آقای نیر^۱ و همکارش با تنظیم پارامترهای طراحی به بهینه‌سازی عملکرد و بهبود گشتاور یک موتور القایی تک‌فاز پرداخته‌اند. در این مرجع تاثیر تغییرات پارامترهایی چون شیار روتور و استاتور، سیم پیچ استاتور و انتخاب ماده هسته بر طراحی موتور بررسی شده است. در انتهای هر مرحله از بهینه‌سازی، طراحی‌ها به کمک شبیه‌سازی در نرم‌افزار Maxwell ارزیابی شده است [۲۲].

بعد از طراحی بهینه موتورهای القایی خطی باید با استفاده از یکی از روش‌های تحلیل و آنالیز موتورهای الکتریکی صحت پارامترهای استخراجی تایید شود و عملکرد موتور در حالت‌های بی‌باری و بارداری

^۱ Nair

تست شود و همچنین تحلیل مگنتواستاتیک برای محاسبه میدان‌های مغناطیسی صورت گیرد، که بهترین روش برای این کار روش اجزای محدود می‌باشد. برخی از مقالات به تحلیل و آنالیز موتور القایی خطی با روش اجزای محدود پرداخته‌اند. در [۲۳] تحلیل نیرو و میدان مغناطیسی برای یک موتور القایی خطی دوطرفه صورت گرفته است. در [۲۴] با استفاده از روش اجزای محدود تحلیل دینامیک پارامترها و مشخصات موتور القایی خطی صورت گرفته است. که هر یک از این مقالات و پژوهش‌ها سعی در طراحی بهینه موتور القایی خطی با توجه به کاربرد خاص خود داشته و با تحلیل و آنالیز پارامترهای خروجی صحت طراحی خود را تایید کرده‌اند.

آقای جین^۱ و همکارانش یک ماشین القایی خطی دو طرفه با ساختار جدید معرفی کرده است. ایشان به بررسی تغییرات لغزش، اندوکتانس نشتی استاتور و اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی تحت شرایط اشباع پرداخته است [۲۵].

در [۲۶] یک روش تحلیلی برای بررسی عملکرد موتور القایی خطی دو طرفه ارائه شده است. در این روش اثر لبه‌های طولی و عرضی نیز بر عملکرد ماشین در نظر گرفته شده است. همچنین نتایج بدست آمده از روش پیشنهادی با نتایج روش اجزاء محدود و نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است.

آقای ژانگ و همکارانش نحوه مدلسازی یک ماشین القایی خطی دو طرفه را ارائه کرده‌اند. ایشان به تاثیر نحوه کوپل دو اولیه بر روی نیرو پرداخته‌اند. برای این منظور اولیه‌ها به صورت هم‌فاز، با فاز مخالف و تنها یک اولیه تغذیه شده‌اند [۲۷].

در [۲۸] یک روش تحلیلی برای بدست آوردن توزیع چگالی شار فاصله هوایی و مقدار متوسط نیروی محرکه در یک موتور القایی خطی دو طرفه با ثانویه کوتاه ارائه شده است. در این مرجع به کمک روش تحلیلی تاثیر فرکانس تغذیه، تعداد قطب‌ها و ضخامت ثانویه بر روی اثر انتهایی بررسی شده و

^۱ Jin

نتایج بدست آمده با نتایج نرم افزار اجزاء محدود مقایسه شده است.

در [۲۹] با استفاده از مدار معادل تحلیلی موتور، نیروی پیشرانه و بازدهی موتور بهینه شده است و سپس بر اساس مدل پیشنهادی، تاثیرات انتهایی موتور در سرعت ثابت کمینه شده است.

آقای صدارانگانی^۱ به بررسی یک موتور القایی خطی برای کاربرد در قطارهای برقی پرداخته و پارامترهای موتور را برای سازگاری با قطار برقی طراحی کرده است [۳۰].

در [۳۱] حداقل کردن وزن قسمت اولیه موتور القایی خطی به عنوان تابع هدف طراحی بهینه در نظر گرفته شده است. در [۳۲] طراحی با هدف ماکزیمم کردن نسبت نیرو و توان به وزن موتور انجام شده است.

در موتور القایی خطی یک شار مغناطیسی پیوسته از ابتدای یوغ اولیه وارد شده و از سمت دیگر خارج می شود. تولید ناگهانی شار و از بین رفتن آن زمینه نفوذ جریان های گردابی را در صفحه ثانویه ایجاد می کند. جریان های گردابی ایجاد شده بر مشخصه شار فاصله هوایی در راستای طولی موتور تاثیر می گذارد که علاوه بر تضعیف مشخصه شار مغناطیسی باعث افزایش سرعت می گردد [۳۳].

آقای ابراهیم امیری به بررسی اثر انتهایی طولی در موتور القایی خطی پرداخته است. در این مرجع اثر انتهایی طولی به دو نوع استاتیکی و دینامیکی (وابسته به سرعت) تقسیم شده است که تاثیر آنها را در عملکرد موتور مورد بررسی قرار گرفته است [۳۴].

در [۳۵] و [۳۶] طراحی بهینه سیم پیچی موتور القایی خطی ارائه شده است.

آقای شیری و همکارش یک روش تحلیلی جدید برای مدل کردن نیروی ترمزی اثر انتهایی طولی ارائه کرده اند [۳۷].

^۱ Sadarangani

آقای اصفهانی و همکارانش به طراحی بهینه یک موتور القایی خطی با هدف ماکزیمم کردن بازده و ضریب توان ماشین پرداخته‌اند [۳۸].

در [۳۹] اثر انتهایی طولی در دو نوع موتور القایی خطی دو طرفه با اولیه بلند و اولیه کوتاه بر اساس تئوری میدان الکترومغناطیسی بررسی شده است. همچنین مدار معادل و عامل اثر انتهایی طولی معرفی شده است. در این مرجع نشان داده شده است که به علت تفاوت در حرکت و شرایط مرزی اثر انتهایی طولی در این دو نوع متفاوت می‌باشد.

در [۴۰] مدار معادلی برای موتور القایی خطی ارائه شده است که اثر انتهایی طولی را هم در حالت دینامیکی و هم در حالت استاتیکی در نظر گرفته است. تاثیر سیم‌پیچی در جبرانسازی اثر انتهایی طولی استاتیکی نشان داده شده است.

۲-۶- جمع‌بندی

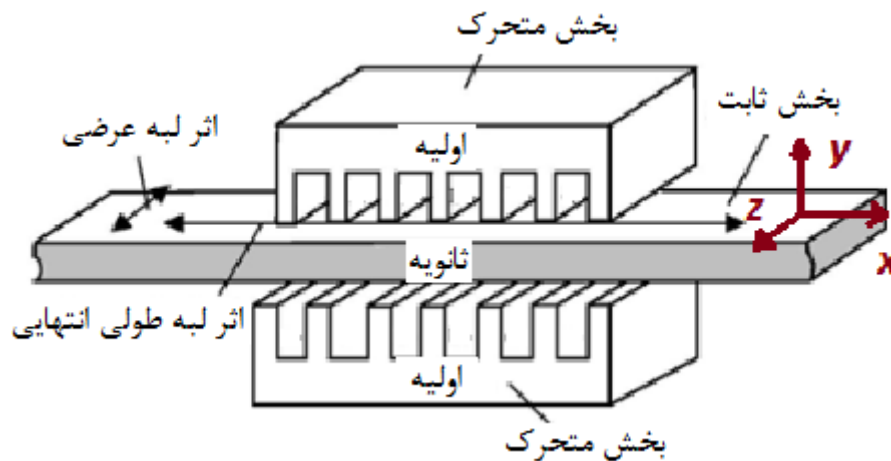
امروزه کاربرد موتورهای القایی خطی به طور وسیعی گسترش یافته است. بزرگترین مزیت موتورهای خطی ایجاد نیروی محرکه خطی بدون نیاز به مبدل‌ها می‌باشد. که این امر موجب بهبود مشخصه خروجی موتور خواهد شد. در این فصل انواع موتورهای القایی خطی، کاربرد آن‌ها و برخی از مسائل خاص این موتورها بیان شد و مطالعات پیشین مورد بررسی قرار گرفت. به طور کلی تحقیقات نشان می‌دهد که در مورد بهبود منحنی مشخصه نیرو بر حسب سرعت در موتورهای القایی خطی اطلاعات زیادی ارائه نشده و سعی شده است تا با اصلاح ساختار ثانویه برای کنترل مقاومت ثانویه در موتورهای القایی خطی این مشخصه عملکرد بهبود داده شود.

فصل ۳: مدلسازی و طراحی موتورهای القایی خطی

دو طرفه

۳-۱- مقدمه

در این فصل یک مدل تحلیلی برای به دست آوردن شکل هندسی یک موتور القایی خطی دو طرفه مانند شکل (۳-۱) ارائه شده است. در این مدل یک مدار معادل تقریبی ارائه می‌شود و با توجه به این مدار معادل پارامترهای ماشین محاسبه می‌شوند.



شکل (۳-۱): شکل سه بعدی موتور القایی خطی [۸]

۳-۲- الگوریتم طراحی موتور القایی خطی دو طرفه

۳-۲-۱- مشخصات مطلوب موتور مورد بررسی

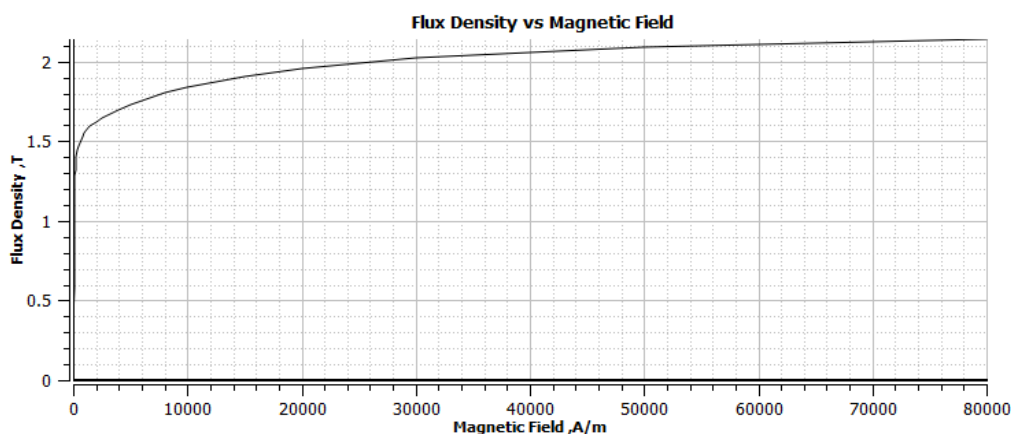
موتوری که مد نظر طراحی است در کاربرد پرتاب‌کننده^۱ القایی برای پرتاب یک گلوله استفاده می‌شود. مشخصات مطلوب طراحی در جدول (۳-۱) داده شده است. با توجه به قانون دوم حرکت نیوتن، با جرم کل سیستم نیروی موردنیاز محاسبه می‌شود.

^۱ Launcher

جدول (۱-۳): مشخصات مطلوب طراحی

پارامتر	مقدار	واحد
توان خروجی نامی (P_o)	۱/۵	kW
مقدار موثر ولتاژ تغذیه نامی (V_1)	۲۲۰	V
تعداد فازها (m)	۳	-
فرکانس تغذیه (f)	۵۰	Hz
شتاب (a)	۴۸	m/s^2
سرعت نامی حرکت ثانویه (V_r)	۲۷	m/s
جرم پرتابه (m_p)	۵۰	Kg

در این پایان نامه با در نظر گرفتن ولتاژ نامی ۲۲۰ ولت و فرکانس ۵۰ هرتز، یک DSLIM سه فاز طراحی شده است. به منظور ساده‌سازی طراحی و محاسبات، سیم پیچ‌ها دو لایه هستند. علاوه بر این طول الکتریکی سیم پیچ θ_p رادیان است. تعداد شیارهای بر قطب بر فاز اولیه (q_1) دو می‌باشد. ثابت فیزیکی μ_0 به عنوان نفوذپذیری آزاد هوا $4\pi \times 10^{-7} N/A^2$ شناخته شده است. علاوه بر این جنس سیم از مس با مقاومت حجمی $17.24 \times 10^{-9} \Omega m$ (ρ_w) و جنس ماده ای که برای ثانویه انتخاب شده آلومینیوم با مقاومت حجمی $26.56 \times 10^{-9} \Omega m$ (ρ_r) است. چگالی جریان (J_1) برای طراحی سیم پیچ اولیه $6 \times 10^6 A/m^2$ انتخاب می‌گردد. هم چنین (k_f) ضریب پرشوندگی شیار نامیده می‌شود که نشان دهنده نسبت سطح مقطع کل هادی به شیار به مساحت کل شیارهاست. معمولاً رنج ضریب پرشوندگی شیار از ۰/۴ تا ۰/۷ است [۴۱]. در این طراحی (k_f) سیم مستطیل شکل ۰/۷ در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۲-۳) منحنی B-H هسته مغناطیسی ماشین نشان داده شده است. با توجه به این منحنی حداکثر چگالی شار دندانه B_{tmax} و چگالی شار یوغ B_{ymax} ، به ترتیب ۱/۶ و ۱/۳ تسلا هستند.



شکل (۲-۳): منحنی B-H هسته مغناطیسی ماشین

۳-۳- روابط طراحی موتور القایی خطی دو طرفه

سرعت خطی هارمونیک اصلی از موج MMF تولید شده توسط سیم‌پیچ اولیه سرعت سنکرون نامیده می‌شود [۲]. در اینجا سرعت سنکرون برابر است با:

$$V_s = \frac{V_r}{1-s} = 34 \quad (۱-۳)$$

که V_r سرعت خطی بخش ثانویه متحرک DSLIM و s لغزش^۱ ماشین است. گام قطب τ به عنوان فاصله بین دو قطب مجاور تعریف می‌شود و از معادله زیر بدست می‌آید:

$$\tau = \frac{V_s}{2f} = 0.34 \quad (۲-۳)$$

گام شیار λ فاصله بین دو دندان متوالی است. رابطه بین گام قطب و گام شیار به شکل زیر است:

$$\lambda = \frac{\tau}{mq_1} = 0.0567 \quad (۳-۳)$$

پارامتر دیگری که در اینجا تعریف می‌شود نسبت عرض شیار به گام شیار (b) است. از مزایای افزایش این نسبت، دستیابی به نیرو و بازده بزرگ‌تر و راکتانس نشتی کوچک‌تر است. پس از افزایش این نسبت عرض دندان کاهش می‌یابد و شارهایی که از دندان عبور می‌کنند متراکم‌تر می‌شوند:

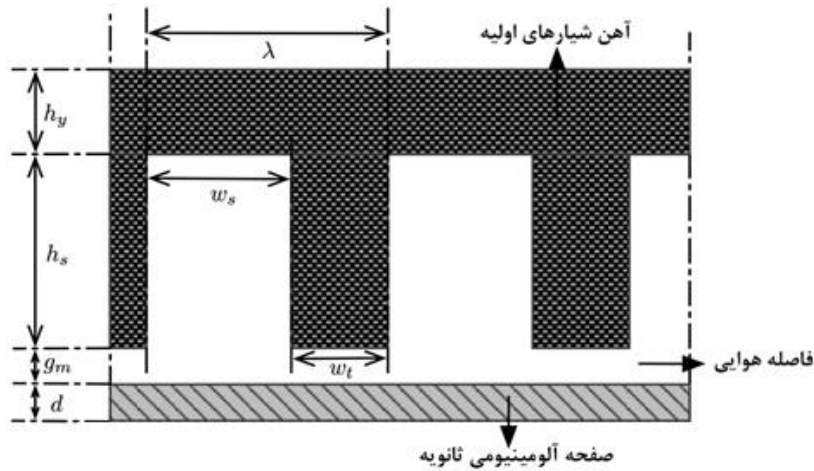
^۱ slip

$$b = \frac{w_s}{\lambda} = 0.6349 \quad (4-3)$$

همانطور که در شکل (۳-۳) نشان داده شده است گام شیار مجموع عرض شیار w_s و عرض دندان w_t

است. بنابراین عرض دندان به شکل زیر بدست می‌آید:

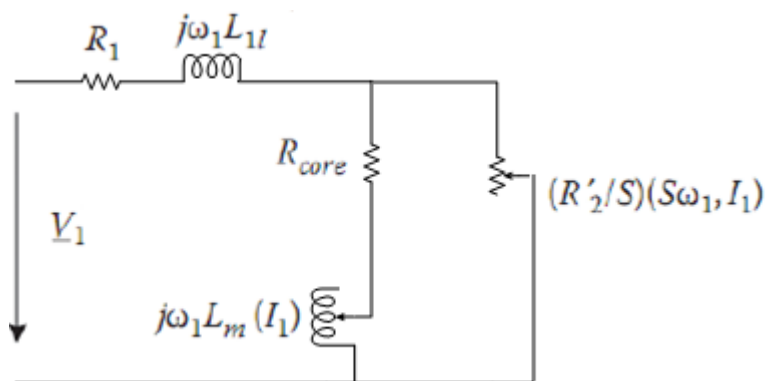
$$w_t = \lambda - w_s = 0.0207 \quad (5-3)$$



شکل (۳-۳): ساختار استاتور شیاردار و صفحه ثانویه [۴۲]

۴-۳- مدار معادل تقریبی هر فاز

مدار معادل تقریبی هر فاز ماشین القایی خطی دو طرفه در شکل (۴-۳) نشان داده شده است.



شکل (۴-۳): مدار معادل تقریبی هر فاز [۱۷]

مقاومت سیم پیچ اولیه به عنوان مقاومت استاتور شناخته شده است که از معادله اساسی زیر بدست

می آید:

$$R_1 = \rho_w \frac{l_w}{A_w} = 1.4515 \quad (۶-۳)$$

که در آن l_w طول سیم مسی در یک فاز و A_w سطح مقطع آن است. l_w را می توان از معادله زیر بدست آورد:

$$l_w = N_1 l_{w1} = 140.6 \quad (۷-۳)$$

N_1 تعداد دور سیم در هر فاز است و به شکل زیر تعریف می شود:

$$N_1 = \frac{P}{2} q_1 N_c = 380 \quad (۸-۳)$$

P تعداد قطبها و N_c تعداد دور سیم در هر شیار و l_{w1} میانگین طول یک دور از سیم پیچ اولیه بر فاز است که به شکل زیر تخمین زده می شود:

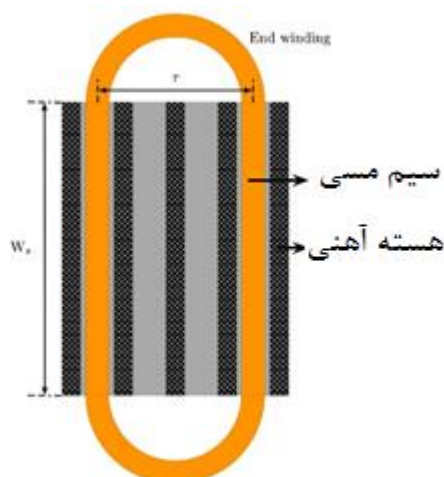
$$l_{w1} = 2(w_s + l_{ce}) = 0.37 \quad (۹-۳)$$

w_s عرض بخشی از اولیه و l_{ce} طول اتصال انتهایی^۱ با توجه به ساختار سیم پیچی است. در این مورد، ما فرض می کنیم که شکل اتصال انتهایی شبیه یک نیم دایره است. بنابراین با توجه به این اطلاعات l_{ce} به شکل زیر است:

$$l_{ce} = 2(w_s + l_{w1}) = 0.8120 \quad (۱۰-۳)$$

شکل (۵-۳) ساختار هسته اولیه با یک سیم مسی را به حالت عمودی نشان می دهد. برای مشاهده ساده تر سیم پیچ انتهایی بخشی از هسته اولیه و یک فاز و جفت قطبهای سیم پیچ کشیده می شوند:

^۱ End connection



شکل (۳-۵): نمای عمودی بخشی از اولیه [۴۲]

سطح مقطع سیم مسی بر فاز A_w است که با تقسیم جریانی که طی می‌کند بر چگالی جریان محاسبه می‌شود:

$$A_w = \frac{I_1}{J_1} = 1.67 \times 10^{-6} \quad (۱۱-۳)$$

I_1 جریان فاز اولیه است.

علاوه بر شار مفید فاصله هوایی، هر سیم پیچ شار نشتی^۱ تولید می‌کند که با سیم پیچ‌های دیگر کوپل نیست [۴۳]. این شار نشتی را می‌توان توسط راکتانس نشتی مربوطه نشان داد. راکتانس نشتی اولیه X_1 ، از راکتانس نشت شیار X_{1s} ، راکتانس نشتی اتصال انتهایی X_{1e} ، راکتانس نشت دیفرانسیل X_{1d} (برای هارمونیک‌های فضایی بالاتر) تشکیل شده است [۲]. از آن جا که در این پروژه تنها تمرکز روی حالت پایدار است X_{1d} در نظر گرفته نمی‌شود. بنابراین راکتانس نشتی اولیه به این ترتیب محاسبه می‌گردد:

$$X_1 = X_{1s} + X_{1e} \quad (۱۲-۳)$$

راکتانس نشتی شیار X_{1s} ناشی از شار نشتی عبوری از یک شیار است [۴۳]. که با معادلات زیر

^۱ Leakage flux

محاسبه می‌شود [۱]:

$$X_{1s} = \frac{8\mu_0\pi f[(\lambda_s + \lambda_d)\frac{w_s}{q_1} + \lambda_{ce}l_{ce}]N_1^2}{P} \quad (۱۳-۳)$$

λ_s ضریب نفوذپذیری نشتی شیار^۱ است [۴۲]:

$$\lambda_s = \frac{h_s(1+3k_p)}{12w_s} = 0.0759 \quad (۱۴-۳)$$

λ_d ضریب نفوذپذیری ویژه بین دندان‌هاست^۲ که به شکل زیر بدست می‌آید [۴۲]:

$$\lambda_d = \frac{5(\frac{g_0}{w_s})}{5+4(\frac{g_0}{w_s})} = 0.1361 \quad (۱۵-3)$$

h_s عمق شیار است که توسط سطح مقطع شیار A_s تخمین زده می‌شود و w_s عرض شیار است. برای

یک شیار مستطیل شکل رابطه به شکل زیر است:

$$h_s = \frac{A_s}{w_s} = 0.0082 \quad (۱۶-۳)$$

و A_s به فرم زیر تعریف می‌شود [۴۴]:

$$k_f A_s = N_c A_w \quad (۱۷-۳)$$

k_p ضریب کوتاهی گام سیم پیچی است و با معادله زیر تعریف می‌شود [۴۵]:

$$k_p = \cos(\frac{\theta_p}{2}) \quad (۱۸-۳)$$

g_0 طول فاصله هوایی مغناطیسی که از مجموع طول فیزیکی فاصله هوایی g_m و ضخامت صفحه

آلمینیومی d بدست می‌آید:

^۱ Coefficient of the slot leakage permeance

^۲ Specific permeance between the heads of teeth

$$g_0 = 2g_m + d = 0.0055 \quad (19-3)$$

عملکرد DSLIM به ضخامت صفحه رسانا بسیار حساس است [۴۶]. برای تعیین ضخامت صفحه ثانویه باید استحکام مکانیکی در نظر گرفته شود. به عبارت دیگر باید ورق آلومینیوم در مقابل نیرو مقاومت کافی را داشته باشد. در ماشین‌های خطی انحراف جریان الکتریکی متناوب یا میدان مغناطیسی متناوب به سطح یک رسانا عمق نفوذ مغناطیسی نامیده شده و با نماد δ نشان داده می‌شود:

$$\delta_{Al} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma}} = 0.012 \quad (20-3)$$

f فرکانس منبع تغذیه، μ_0 میزان نفوذپذیری آزاد هوا و σ رسانایی ویژه آلومینیوم است که مقدار آن 3.5×10^7 s/m با یکای s/m می‌باشد. باید نسبت $\frac{d}{\delta} \ll 1$ باشد تا میدان مغناطیسی به راحتی در رسانا نفوذ کند. در این طراحی ضخامت صفحه آلومینیومی به ترتیب زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{d}{\delta} \ll 1 \Rightarrow \frac{d}{0.012} \ll 1 \Rightarrow d \ll 0.012 \quad (21-3)$$

در این جا ضخامت آلومینیوم را ۳ میلی‌متر در نظر می‌گیریم.

بنابراین به نظر می‌رسد که راکتانس نشتی اتصال انتهایی یا راکتانس نشتی سیم‌پیچ انتهایی X_{1e} به دلیل وجود جریان در سیم‌پیچ انتهایی باشد که با دقت خوبی از روش‌های عددی بدست می‌آید [۴۱]:

$$X_{1e} = \frac{8\mu_0 \pi f \lambda_e l_{ce} N_1^2}{P} = 11.1095 \quad (22-3)$$

λ_e ضریب نفوذپذیری نشتی اتصال انتهایی^۱ است:

$$\lambda_e \cong 0.3(3k_p - 1) = 0.6 \quad (23-3)$$

با جایگذاری معادله (۱۳-۳) و (۲۰-۳) در معادله (۱۲-۳) می‌توانیم تخمینی از راکتانس نشتی اولیه

^۱ Coefficient of the end connection leakage permeance

تکفاز بدست آوریم:

$$X_1 \approx \frac{8\mu_0\pi f[(\lambda_s + \lambda_d)\frac{w_s}{q_1} + \lambda_e l_{ce}]N_1^2}{P} = 11.1965 \quad (24-3)$$

قبل از بدست آوردن راکتانس مغناطیسی کنندگی نیاز است که برخی از عوامل و ضرایب صفر شوند.

در مرحله اول ضریب توزیع به شکل زیر است [44]:

$$k_d = \frac{\sin(\frac{q_1\alpha}{2})}{q_1 \sin(\frac{\alpha}{2})} = 0.9659 \quad (25-3)$$

برای یک سیم پیچی با شیار بر قطب بر فاز q_1 که به اندازه α رادیان فاصله دارند، α به شکل زیر بدست می آید:

$$\alpha = \frac{\pi}{mq} = 0.5236 \quad (26-3)$$

ضریب سیم پیچی k_w از ضریب کوتاهی گام k_p در ضریب توزیع k_d بدست می آید:

$$k_w = k_p \times k_d = 0.9659 \quad (27-3)$$

علاوه بر این یک ضریب پر اهمیت در طراحی ماشین های الکتریکی ضریب کارتر k_c است که با توجه به شیاردار بودن اولیه یا ثانویه در اینجا معرفی می شود. بنابراین طول واقعی فاصله هوایی بزرگتر از طول معادل فاصله هوایی است که محاسبه می کنیم. ضریب کارتر برای هسته اولیه عبارتست از [46]:

$$k_c = \frac{\lambda}{\lambda - \gamma g_0} = 1.5701 \quad (28-3)$$

که γ به شکل زیر است:

$$\gamma = \frac{4}{\pi} \left[\frac{w_s}{2g_0} \arctan\left(\frac{w_s}{2g_0}\right) - \ln \sqrt{1 + \left(\frac{w_s}{2g_0}\right)^2} \right] = 3.7434 \quad (29-3)$$

بنابراین طول فاصله هوایی g_e با توجه به در نظر گرفتن ساختار شیاردار اولیه به شکل زیر است:

$$g_e = k_c g_0 = 0.0086 \quad (30-3)$$

و همچنین عرض معادل هسته اولیه w_{se} به شکل زیر است:

$$w_{se} = w_s + \frac{g_e}{2} = 0.0403 \quad (31-3)$$

بنابراین راکتانس مغناطیسی x_m در زیر آمده است:

$$X_m = \frac{24\mu_0 f w_{se} (k_w N_1)^2 \tau}{\pi P g_e} = 10.3029 \quad (32-3)$$

ثانویه متشکل از یک رساناست که در این جا آلومینیوم است (و با هزینه نسبتاً کمی به خوبی بدست می‌آید) [۲]. مقاومت هر فاز ثانویه به شکل زیر است:

$$R_2 = \frac{X_m}{G} = 0.1843 \quad (33-3)$$

که در آن G ضریب کیفیت^۱ نامیده می‌شود. همانطور که از نام آن مشخص است ضریب کیفیت عملکرد خوب ماشین را نشان می‌دهد. بنابراین ضریب کیفیت بزرگ‌تر تا حدی ماشین بهتر را نشان می‌دهد [۱]. با این اوصاف ضریب کیفیت تمایل دارد برای ماشینی که سایز آن افزایش یافته بیشتر شود [۴۷]. G از فرمول زیر بدست می‌آید:

$$G = \frac{2\mu_0 f \tau^2}{\pi \left(\frac{P_r}{d}\right) g_e} = 55.9107 \quad (34-3)$$

از عبارت فوق می‌توان مشاهده کرد که با افزایش گام قطب و کاهش طول فاصله هوایی ضریب کیفیت بزرگ می‌شود و در نتیجه عملکرد موتور بهینه می‌شود.

۳-۵- انتخاب فرکانس اولیه و ثانویه

فرکانس اولیه معمولاً متناسب با منبع تغذیه در دسترس تعیین می‌شود. برای به دست آوردن فرکانس ثانویه از رابطه زیر استفاده می‌شود:

^۱ Goodness factor

$$f_2 = sf_1 = 10 \quad (35-3)$$

۳-۶- ماکزیمم مقدار مجاز چگالی شار فاصله هوایی

این پارامتر در ابتدای فرآیند طراحی با توجه به سطح جریان، طول فاصله هوایی موثر، نوع ساختار ماشین و... انتخاب می‌شود. سپس به کمک این پارامتر می‌توان مقادیر سایر پارامترهای ماشین از قبیل آمپر دور هر فاز و تعداد دور سیم پیچی را تعیین کرد. مقدار ماکزیمم چگالی شار فاصله هوایی معمولاً بر اساس محدودیت‌های ذکر شده و تجربیات قبلی طراح ماشین تعیین می‌شود. پس از طراحی ماشین و شبیه سازی به کمک نرم افزار اجزاء محدود باید مقدار ماکزیمم چگالی شار فاصله هوایی به دست آمده از شبیه سازی با مقدار در نظر گرفته شده در الگوریتم طراحی برابر باشد. در غیر این صورت باید طراحی انجام شده اصلاح شود. مقدار این پارامتر در طراحی ۰/۷ تسلا در نظر گرفته می‌شود.

۳-۷- محاسبه آمپر دور هر فاز

برای محاسبه تعداد دور سیم پیچی هر فاز ابتدا باید آمپر دور آن فاز را محاسبه نمود. در اینجا به منظور محاسبه آمپر دور هر فاز از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$B_{g \max} = \mu_0 K_e = \frac{\mu_0 \theta_{1m}}{g k_c (1 + K_s) \sqrt{1 + s^2 G^2}} = 0.7 \quad (36-3)$$

$$\theta_{1m} = \frac{3\sqrt{2} \cdot N_1 I_1 k_w l}{\pi p} = 496.6722 \quad (37-3)$$

مقدار $B_{g \max}$ در رابطه (۳۶-۳) همان مقدار ماکزیمم چگالی شار مطلوب می‌باشد که در ابتدای فرآیند طراحی مشخص می‌گردد.

۳-۸- ویژگی های حالت پایدار

با توجه به شکل (۳-۴) رابطه بین ولتاژ منبع تغذیه و امپدانس معادل کل هر فاز به شکل زیر است:

$$V_{1r} = N_1(N_1 I_1) \cdot \underbrace{\left[R_1 + jX_1 + \frac{jX_m \frac{R_2}{s}}{jX_m + \frac{R_2}{s}} \right]}_Z \quad (3-38)$$

Z مقدار اندازه امپدانس است.

تعداد دور سیم پیچی توسط رابطه (۳-۳۸) محاسبه می شود. در نتیجه اندازه جریان فاز اولیه معادل زیر است:

$$I_1 = \frac{N_1 I_1}{N_1} \quad (3-39)$$

که براساس آن مقدار جریان فاز ثانویه I_2 به شکل زیر محاسبه شده است:

$$I_2 = \frac{X_m}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_m^2}} I_1 = 9.9802 \quad (3-40)$$

همچنین جریان مغناطیس کنندگی برابر است با:

$$I_m = \frac{\frac{R_2}{s}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_m^2}} I_1 = 0.8926 \quad (3-41)$$

اگر چگالی شار فاصله هوایی را برای موتورهای بزرگ کمتر از ۰/۷ تسلا نگه داریم، آن گاه تلفات آهن ناچیز است [۲] و [۴۸]. هنگامی که فرکانس ورودی ثابت باشد توان ورودی به شکل زیر است:

$$P_{in} = P_o + mI_1^2 R_1 + mI_2^2 R_2 \quad (3-42)$$

که در آن $mI_1^2 R_1$ توان تلف شده در اولیه و $mI_2^2 R_2$ توان تلف شده در ثانویه است.

همچنین توان ورودی را می توان به کمک رابطه زیر به دست آورد:

$$P_i = mV_1 I_1 \cos \varphi = 1836 \quad (43-3)$$

که در این رابطه m تعداد فازهای ماشین می‌باشد [۲]. بنابراین پس از مشخص شدن توان ورودی به کمک رابطه (۴۲-۳) می‌توان با استفاده از رابطه (۴۳-۳) ضریب قدرت ماشین را به دست آورد.

نیروی الکترومغناطیسی را می‌توان با توجه به توان خروجی به شکل زیر محاسبه کرد [۱]:

$$F_s = \frac{P_o}{V_r} = 55.55 \quad (44-3)$$

اولیه یک DSLIM متشکل از هسته آهنی و سیم مسی در اطراف دندانه است. با توجه به شکل (۳-۳) مجموع اندازه یوغ و دندانه که محاسبه خواهد شد، اندازه هسته آهنی می‌باشد.

طول هسته اولیه عبارت است از:

$$L_s = \tau P = 3.4 \quad (45-3)$$

یوغ اولیه بالای هسته قرار دارد که در شکل (۳-۳) نشان داده شده است. شار در یوغ نصف فاصله هوایی است [۷]. بنابراین ارتفاع یوغ که شار بدون اشباع را حمل می‌کند می‌تواند توسط [۴۸] محاسبه شود:

$$h_y = \frac{B_{gavg} \tau}{2B_{ymax}} = 0.0022 \quad (46-3)$$

با استفاده از L_s ، w_s و h_y ، حجم یوغ V_{yoke} به دست می‌آید:

$$V_{yoke} = L_s w_s h_y = 0.0002692 \quad (47-3)$$

علاوه بر این، حجم یک دندانه از هسته اولیه به شکل زیر است:

$$V_{tooth} = w_s \omega_t h_s = 0.00000611 \quad (48-3)$$

به دلیل اندازه یکنواخت دندانه، حجم کل دندانه به صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$V_{teeth} = (mPq_1)V_{tooth} = 0.000366 \quad (49-3)$$

که mpq_1 تعداد شیارها در هسته اولیه است. بنابراین حجم هسته آهنی اولیه V_{iron} می‌باشد:

$$V_{iron} = V_{yoke} + V_{teeth} = 0.0006352 \quad (50-3)$$

وزن کل هسته آهنی به شکل زیر است:

$$W_i = \rho_i V_{iron} = 4.999 \quad (51-3)$$

ρ_i چگالی آهن و برابر با $7.87 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$ است. پس از بدست آوردن طول سیم مسی در یک فاز I_w (از معادله ۴-۷) و ضرب نمودن آن در تعداد فازها (m) می‌توان طول کل سیم مسی را که برای سیم پیچ‌های استاتور موردنیاز است بدست آورد:

$$T_w = ml_w = 421.8 \quad (52-3)$$

وزن سیم مسی W_c به شکل زیر است:

$$W_c = \rho_c A_w T_w = 6.3115 \quad (53-3)$$

که ρ_c چگالی مس و برابر $8.96 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$ است. بنابراین جرم اولیه W_{stator} که شامل جرم آهن و سیم مسی است به راحتی بدست می‌آید:

$$W_{stator} = W_i + W_c = 11.3105 \quad (54-3)$$

۳-۹- نیروی نامی

یکی از اهداف مهم طراحی DSLIM تولید نیروی کافی است که می‌تواند در کاربردی مانند لانچر یک جرم را با ماکزیمم نیرو پرتاب نماید. بلبرینگ و تجهیزات و اتصالات مکانیکی دیگر، بخشی از وزن اولیه را شامل می‌شود. جرم کل سیستم از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$m_t = W_{stator} + m_p = 61.3105 \quad (55-3)$$

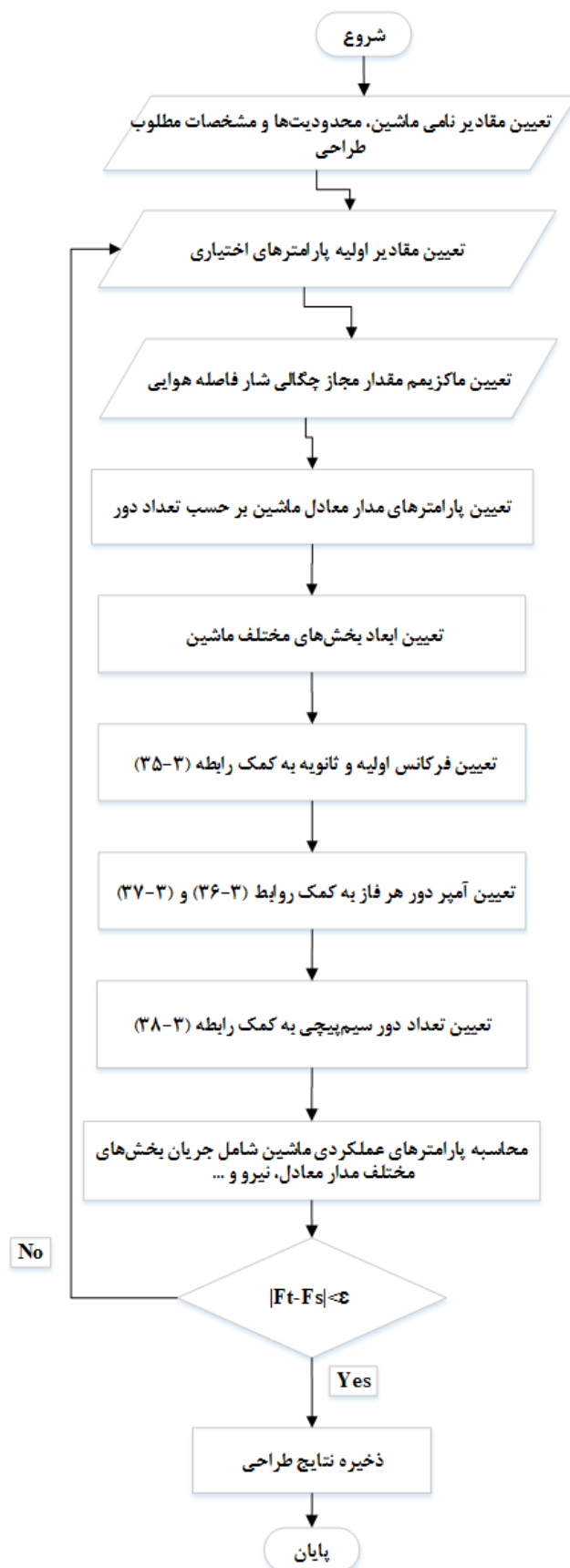
m_p جرم پرتابه است و حدوداً 50 kg در نظر می‌گیریم.

نیروی مورد نیاز که توسط سیستم پیشران تولید می‌شود از قانون دوم حرکت نیوتن به دست می‌آید:

$$F_t = m_t(a + g) \quad (۵۶-۳)$$

a شتاب سیستم و g شتاب گرانشی با مقدار $۹/۸ \text{ m/s}^2$ است. اگر $F_t \geq F_s$ باشد می‌توان تصمیم گرفت طراحی ماشین مورد نظر قابل قبول است.

با استفاده از روابط ارائه شده الگوریتمی برای طراحی ماشین القایی خطی دو طرفه در نظر گرفته شده است. فلوچارت این الگوریتم در شکل (۶-۳) نشان داده شده است. با توجه به این الگوریتم ابتدا مقادیر نامی ماشین شامل توان نامی، سرعت نامی، ولتاژ تغذیه، نیرو و ... مشخص می‌شود. همچنین در این مرحله محدودیت‌های طراحی از قبیل حداکثر ابعاد (طول، عرض و ارتفاع) ماشین، حداکثر وزن، حداقل بازده و .. تعیین می‌شود. بدلیل اینکه تعداد روابط طراحی موجود کمتر از تعداد مجهولات می‌باشد لذا برخی از متغیرها باید بصورت اختیاری انتخاب شود. مقادیر این متغیرها معمولاً بر اساس محدودیت‌های طراحی و تجربه مشخص می‌شود. بعنوان مثال بارگذاری الکتریکی، چگالی جریان سیم‌پیچ‌های اولیه و ... در این مرحله مشخص می‌شود. در مرحله بعد ماکزیمم مقدار مجاز چگالی شار فاصله هوایی مشخص می‌شود. سپس کلیه پارامترهای مدار معادل الکتریکی ماشین شامل راکتانس اولیه، راکتانس مغناطیس‌کنندگی و ... بر حسب تعداد دور سیم‌پیچی اولیه نوشته می‌شود. پس از حل معادلات موجود کلیه ابعاد ماشین به راحتی محاسبه می‌شود. در مرحله بعد با توجه به مقدار فرکانس اولیه و لغزش ماشین فرکانس سمت ثانویه مشخص می‌شود. سپس آمپر دور هر فاز با استفاده از رابطه (۳-۳۷) بدست می‌آید. با مشخص شدن آمپر دور هر فاز تعداد دور سیم‌پیچی هر فاز نیز بدست می‌آید. در مرحله بعد پارامترهای عملکردی ماشین شامل نیرو، بازده و ... بدست می‌آید. مقدار نیروی بدست آمده با مقدار نیروی مطلوب مقایسه می‌شود و چنانچه خطای حاصله کمتر از مقدار مجاز باشد طراحی قابل قبول خواهد بود در غیر این صورت با تغییر مقادیر پارامترهای اختیاری فرآیند طراحی مجدداً تکرار می‌شود.



شکل (۳-۶): فلوچارت طراحی

۳-۱۰- جمع بندی

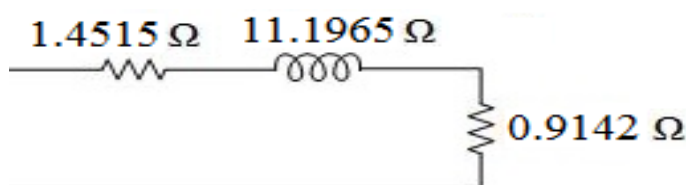
پارامترهای طراحی در جدول (۳-۲) آورده شده است. همانطور که مشخص است مقدار کل نیروی تولید شده از نیروی مورد نیاز بزرگتر است. هم چنین مقدار ماکزیمم چگالی شار فاصله هوایی در حدود ۰/۷ تسلا کنترل شده است.

جدول (۳-۲): پارامترهای طراحی

مقدار	واحد	نماد	پارامتر
۰/۰۰۰۰۰۰۱۶۷	m ²	A _w	سطح مقطع سیم مسی بر فاز
۰/۶۳۴۹	-	b	نسبت عرض شیار به گام شیار
۱/۳	T	B _{ymax}	ماکزیمم چگالی شار مغناطیسی یوغ
۳	mm	d	ضخامت صفحه آلومینیومی
۸/۶	mm	g _e	طول معادل فاصله هوایی
۱/۲۵	mm	g _m	طول فیزیکی فاصله هوایی
۸/۲	mm	h _s	عمق شیار
۱۰/۰۲	A	I ₁	جریان فاز اولیه
۳۴۰۰	mm	L _s	طول هسته اولیه
۳۸۰	-	N ₁	تعداد دور سیم در هر فاز
۱/۴۵۱۵	Ω	R ₁	مقاومت سیم پیچ اولیه
۰/۱۸۴۳	Ω	R ₂	مقاومت هر فاز ثانویه
۰/۲	-	s	لغزش
۳۴	m/s	V _s	سرعت سنکرون
۳۶	mm	w _s	عرض شیار

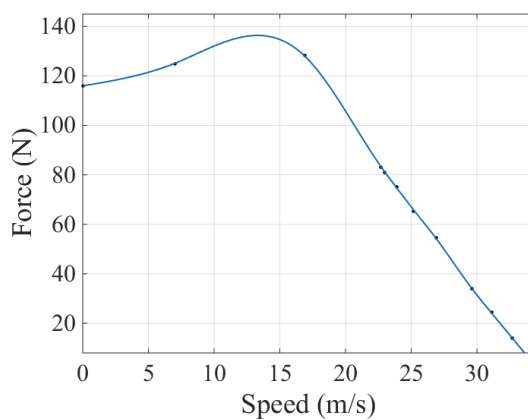
۲۰/۷	mm	w_t	عرض دندانه
۱۱/۱۹۶۵	Ω	X_1	راکتانس نشتی اولیه
۰/۴۸	-	$\cos \varphi$	ضریب قدرت ورودی
۸۱/۷	%	η	بازده
۳۴۰	mm	τ	گام قطب

به منظور درک بهتر مقادیر پارامترهای مدار معادل موتور طراحی شده که از الگوریتم طراحی بدست آمده است در شکل (۷-۳) نشان داده شده است. در این شکل از راکتانس مغناطیس‌کنندگی و تلفات هسته صرف‌نظر شده است.



شکل (۷-۳): مدار معادل ساده شده موتور القایی خطی طراحی شده

با استفاده از الگوریتم بدست آمده مقادیر نیرو به ازای سرعت‌های مختلف برای موتور محاسبه شده است. در شکل (۸-۳) نمودار نیرو بر حسب سرعت برای موتور طراحی شده رسم شده است.



شکل (۸-۳): نمودار نیرو بر حسب سرعت برای موتور القایی خطی طراحی شده

فصل ۴: شبیه‌سازی اجزاء محدود و بررسی عملکرد

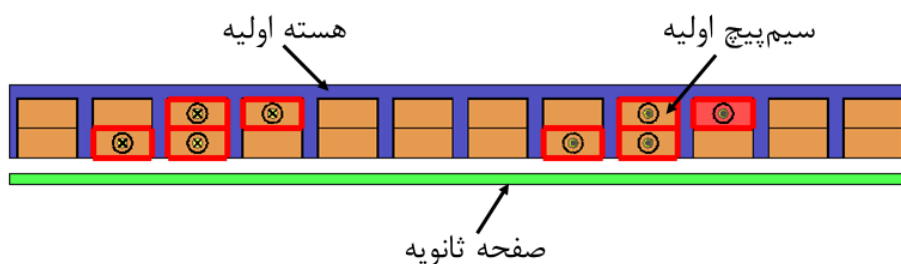
موتورهای القایی خطی دو طرفه

۴-۱- مقدمه

در بخش قبل ابعاد یک موتور القایی خطی ۱/۵ کیلووات به کمک روابط طراحی تعیین شد. در این بخش به کمک نرم‌افزار اجزاء محدود JMAG Designer صحت طراحی انجام شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور ابتدا بر اساس ساختار واقعی این نوع موتور که در شکل (۲-۷) نشان داده شده است مراحل مدلسازی و شبیه‌سازی آن به کمک روش اجزاء محدود شرح داده می‌شود. سپس نتایج بدست آمده مورد نقد و بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۲- مدلسازی موتور در نرم‌افزار اجزاء محدود

اولین گام در مدلسازی به کمک روش اجزاء محدود، ترسیم هندسه مسئله مورد نظر است. این کار می‌تواند به کمک امکانات ترسیمی خود نرم‌افزار انجام شود. در شکل (۴-۱) ساختار دو بعدی موتور نشان داده شده است. در این شکل سیم‌پیچی مربوط به یک فاز ماشین زیر یک جفت قطب نشان داده شده است. با توجه به این شکل سیم‌پیچی ماشین بصورت دوطبقه و گام کسری (به اندازه یک شیار کوتاه شده است) انجام شده است.



شکل (۴-۱): ساختار دو بعدی موتور مورد بررسی

پس از ترسیم هندسه باید جنس هر یک از بخش‌های موتور طراحی شده را مشخص کرد. این کار با توجه به جدول (۴-۱) انجام می‌شود.

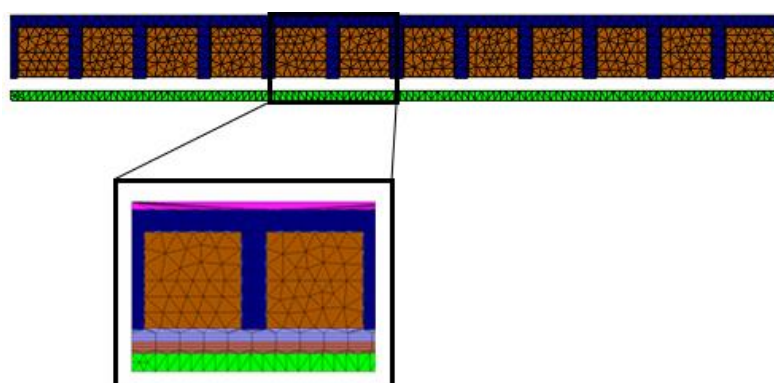
جدول (۴-۱): جنس بخش‌های مختلف موتور

جنس	قطعه
50JN470	هسته اولیه
آلومینیوم	صفحه ثانویه
مس	سیم‌پیچ

در این شبیه‌سازی از یک مدار تغذیه سیم‌پیچ استاتور که معادلات آن به صورت همزمان با معادلات میدان روش اجزاء محدود حل می‌شود، استفاده می‌گردد. در این مدار الکتریکی از منبع ولتاژ برای تغذیه موتور استفاده شده است. منبع ولتاژ می‌تواند دارای هر شکل موج ولتاژ دلخواهی باشد. با تغییر این منبع ولتاژ می‌توان شرایط عملکردی مختلف را مدلسازی نمود. مثلاً در حالت اتصال کوتاه این منبع ولتاژ صفر فرض می‌شوند. در هر شرایط واقعی بار و ولتاژ دیگری، می‌توان ولتاژ القایی را با استفاده از شبیه‌سازی‌های دینامیکی گذرای بدست آورد. همچنین می‌توان در محیط اجزاء محدود تأثیر منبع تغذیه با محتویات هارمونیک (ناشی از درایو) را بر روی رفتار موتور بررسی نمود.

یکی از قابلیت‌های بسیار کاربردی نرم‌افزار اجزاء محدود شرط مرزی تکرار است. به کمک این قابلیت می‌توان در سیستم‌های متقارن به جای ترسیم کل شکل بخشی از شکل را رسم کرده و تحلیل‌های مختلف مورد نیاز را بر روی این بخش انجام داده و در نهایت نتایج را به کل شکل تعمیم داد. این کار باعث کاهش حجم و زمان محاسبات می‌گردد. با توجه به شکل (۴-۱) در ساختار مورد بررسی نیز بجای ترسیم کل شکل تنها یک جفت قطب آن رسم شده است. از دیگر ویژگی‌های نرم‌افزار اجزاء محدود شرط مرزی تقارن می‌باشد. به کمک این قابلیت می‌توان تنها نصف موتور را در محیط نرم‌افزار شبیه‌سازی نمود و نتایج را برای کل شکل بدست آورد. در ساختار مورد بررسی نیز کل ساختار نسبت به وسط ثانویه متقارن است. لذا تنها یک اولیه و نصف ثانویه شبیه‌سازی می‌شود.

اکنون برای بدست آوردن پارامترهای خروجی موتور القایی خطی باید تحلیل گذرا صورت گیرد، بدین منظور ابتدا قسمت‌هایی از موتور که حرکت خطی انجام می‌دهند مشخص شده و تنظیمات مربوط به سرعت حرکت اعمال می‌شود. با توجه به این‌که هدف تحلیل عملکرد حالت دائمی یک ماشین القایی خطی با سرعت ۲۷ متر بر ثانیه می‌باشد، این سرعت ثابت ثانویه باید به طریق مناسب برای نرم‌افزار تعریف شود. یکی از مهم‌ترین مراحل مدلسازی به کمک روش اجزاء محدود، مش‌بندی است. مش‌بندی تأثیر زیادی بر روی دقت جواب‌ها دارد. در حالت کلی مش‌بندی با مش‌های بزرگ و تعداد کم باعث پایین آمدن دقت و مش‌بندی ریز و تعداد زیاد باعث افزایش تصاعدی زمان حل مورد نیاز می‌شود. درک صحیح و پیش‌بینی نحوه توزیع چگالی شار داخل موتور کمک شایانی به انتخاب مش‌بندی مناسب خواهد کرد. به این ترتیب که در قسمت‌هایی که اندازه یا جهت چگالی شار دارای تغییرات زیادی است، مش‌بندی به صورت ریز و در قسمت‌هایی که چگالی شار دارای تغییرات زیادی نمی‌باشد، مش‌بندی به صورت درشت‌تر انجام می‌شود. به عنوان مثال قسمت‌هایی از ثانویه و اولیه که نزدیک فاصله هوایی قرار دارند، باید دارای مش‌بندی ریز باشند. شکل (۴-۲) یک مش‌بندی انجام شده روی موتور القایی خطی مورد نظر را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۲): مش‌بندی یک جفت قطب موتور طراحی شده

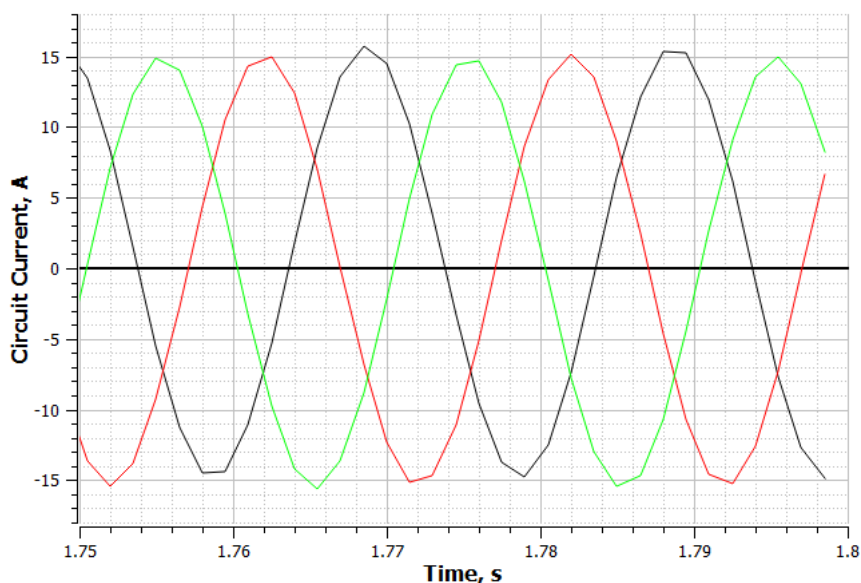
۴-۳- نتایج شبیه‌سازی

پس از اتمام پروسه حل (مرحله Processing)، مرحله مشاهده نتایج و استخراج نتایج، که به

مرحله Post Processing معروف است شروع می‌شود.

۴-۳-۱- جریان سیم‌پیچ‌ها

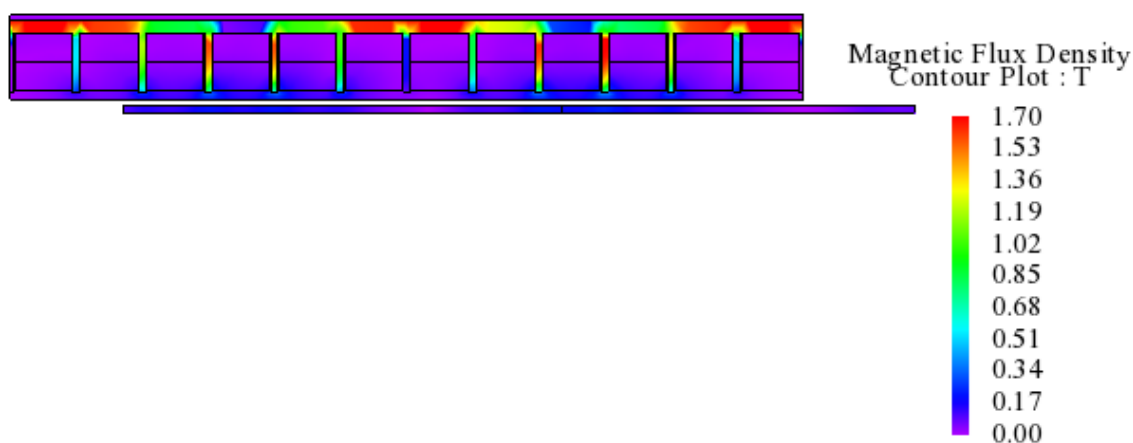
با توجه به این‌که جریان و فرکانس نامی به ترتیب $۱۰/۰۲$ آمپر و ۵۰ هرتز است، در نتیجه یک جریان سه فاز سینوسی با دامنه و فرکانس نامی موتور توسط سیم‌پیچی‌های اولیه از منبع تغذیه کشیده می‌شود. شکل موج جریان در شکل (۴-۳) نشان داده شده است.



شکل (۴-۳): جریان سیم‌پیچی‌های اولیه موتور طراحی شده بر حسب زمان

۴-۳-۲- توزیع چگالی شار

شکل (۴-۴) توزیع چگالی شار میدان مغناطیسی در داخل موتور را بصورت یک طیف رنگی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود هیچ نقطه‌ای از موتور به اشباع نرفته است و دامنه چگالی شار در بخش‌های مختلف با آنچه در فرآیند طراحی در نظر گرفته شده است مطابقت دارد. به منظور درک بهتر مقادیر متوسط چگالی شار بخش‌های مختلف ماشین در جدول (۴-۲) داده شده است. با توجه به این جدول نیز می‌توان نتیجه گرفت که هیچ بخش ماشین دچار اشباع نشده است.



شکل (۴-۴): نقشه طیف رنگی توزیع چگالی شار موتور طراحی شده

جدول (۲-۴): مقادیر متوسط چگالی شار بخش‌های مختلف موتور

مقدار (T)	بخش
۱/۳	یوغ
۱/۶	دندان
۰/۴۷	فاصله هوایی

۴-۳-۳- خطوط شار

شکل (۵-۴) خطوط شار مغناطیسی در داخل موتور را نشان می‌دهد. در واقع این خطوط مسیره‌های عبور شار در داخل موتور را مشخص می‌کند. با توجه به این خطوط می‌توان تعداد و محل قطب‌های موتور را تعیین کرد.

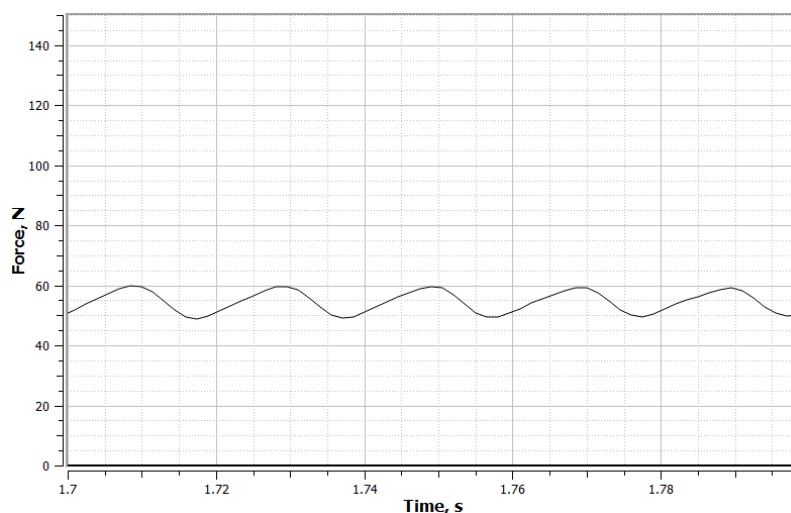


شکل (۵-۴): خطوط شار داخل موتور طراحی شده

۴-۳-۴- نیروی محرکه

با توجه به شکل زیر همان‌طور که مشخص است، نیرو حول ۵۵ نیوتن که همان مقدار در نظر گرفته

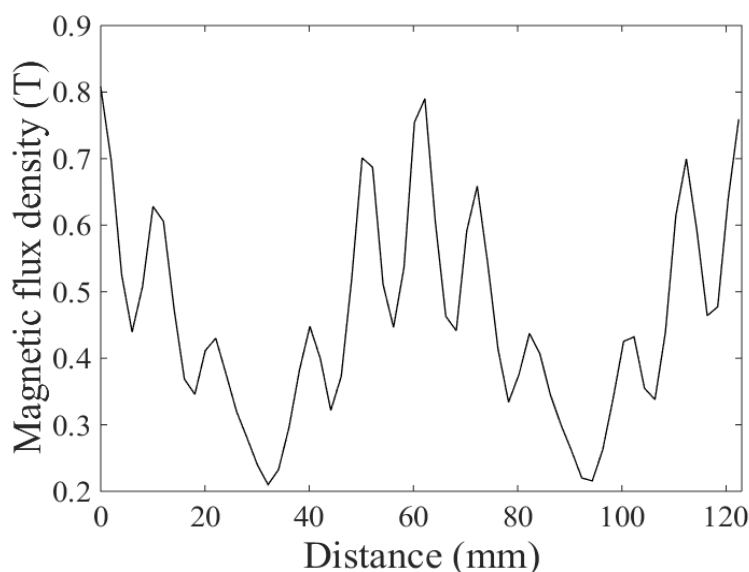
شده در طراحی می‌باشد، نوسان می‌کند. همچنین دامنه نوسانات نیرو حول این مقدار بسیار ناچیز می‌باشد که این مسئله باعث کاهش ارتعاشات و صوت موتور می‌شود. لازم به ذکر است که نوسانات نیرو در این ساختار در مقایسه با نوع نردبانی بسیار کمتر می‌باشد. در نوع نردبانی به دلیل وجود هارمونیک‌های فضایی نیروی حاصله دارای نوسانات بسیار زیادی می‌باشد. بنابراین در مواردی که نوسانات نیرو حائز اهمیت است بهتر است تا حد امکان از نوع نردبانی استفاده نشود.



شکل (۴-۶): نیروی محرکه موتور طراحی شده بر حسب زمان

۴-۳-۵- چگالی شار فاصله هوایی

در شکل (۴-۷) تغییرات چگالی شار فاصله هوایی زیر یک جفت قطب ماشین نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که دامنه چگالی شار در زیر هر قطب ماکزیمم می‌باشد. بنابراین از روی این شکل نیز می‌توان به دو قطب بودن ساختار شبیه‌سازی شده در محیط نرم‌افزار پی برد.



شکل (۷-۴): چگالی شار فاصله هوایی زیر یک جفت قطب موتور طراحی شده

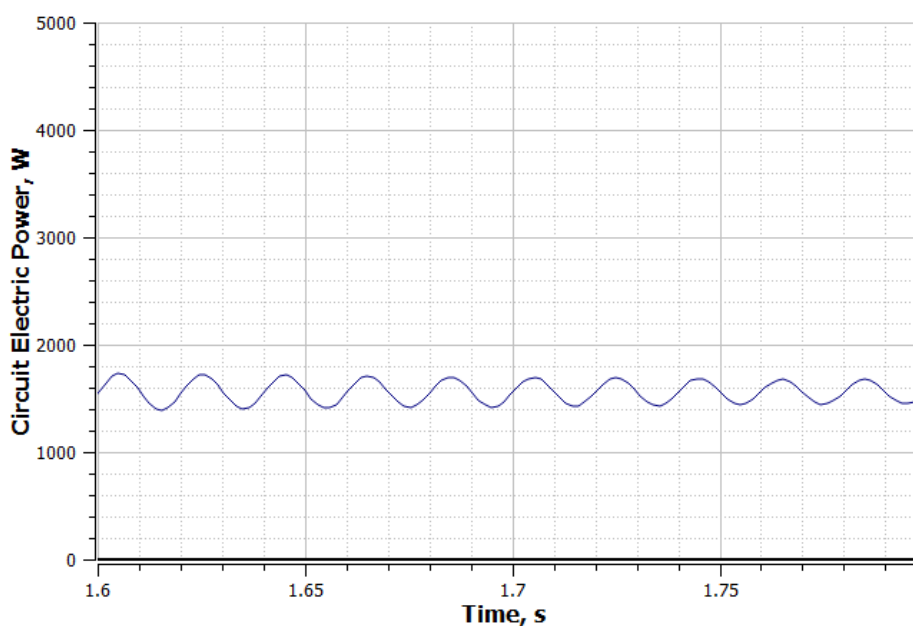
به منظور مقایسه بهتر مقدار ماکزیمم و متوسط چگالی شار فاصله هوایی و مقدار متوسط نیروی پیشران بدست آمده از نرم‌افزار و مقدار در نظر گرفته شده در الگوریتم طراحی در جدول (۳-۴) داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود خطای موجود بین دو مقدار قابل قبول می‌باشد.

جدول (۳-۴): ماکزیمم چگالی شار فاصله هوایی

پارامتر	الگوریتم طراحی	نرم‌افزار
ماکزیمم چگالی شار فاصله هوایی (T)	۰/۷	۰/۷۴
مقدار متوسط چگالی شار فاصله هوایی (T)	۰/۴۴	۰/۴۷
مقدار متوسط نیروی پیشران (N)	۵۵	۵۵/۷

۴-۳-۶- توان ورودی موتور

توان ورودی لحظه‌ای موتور که در واقع از حاصلضرب مقادیر لحظه‌ای ولتاژ و جریان موتور بدست می‌آید در شکل (۸-۴) نشان داده شده است. مقدار توان لحظه‌ای از جمع توان خروجی مورد نظر و تلفات نیز قابل محاسبه می‌باشد. هر چقدر تلفات ماشین کمتر باشد مقدار توان کشیده شده از منبع نیز کاهش می‌یابد.



شکل (۴-۸): نمودار توان ورودی موتور طراحی شده بر حسب زمان

۴-۳-۷- جمع‌بندی

در این فصل به منظور صحت عملکرد روابط ابعادی و الگوریتم طراحی ارائه شده، موتور طراحی شده در فصل قبل به کمک نرم‌افزار اجزاء محدود JMAG Designer شبیه‌سازی شد. سپس برخی از مشخصه‌های عملکردی آن از قبیل چگالی شار، نیروی پیشران و ... به کمک نرم‌افزار بدست آمد. همچنین مقادیر این پارامترها توسط الگوریتم طراحی بدست آمد. مقایسه چگالی شار بدست آمده از نرم‌افزار و الگوریتم طراحی نشان می‌دهد که مقادیر این دو با یکدیگر مطابقت دارد. همچنین مقادیر نیروی پیشران بدست آمده از نرم‌افزار و الگوریتم طراحی ۵۵ نیوتن می‌باشد. لذا نیروهای بدست آمده نیز با یکدیگر مطابقت دارد. بنابراین مقایسه نتایج بدست آمده روابط ابعادی و الگوریتم طراحی ارائه شده در فصل قبل را تایید می‌کند.

فصل پنجم: بررسی تاثیر جنس و ضخامت ثانویه در

موتورهای القایی خطی دو طرفه

۵-۱- مقدمه

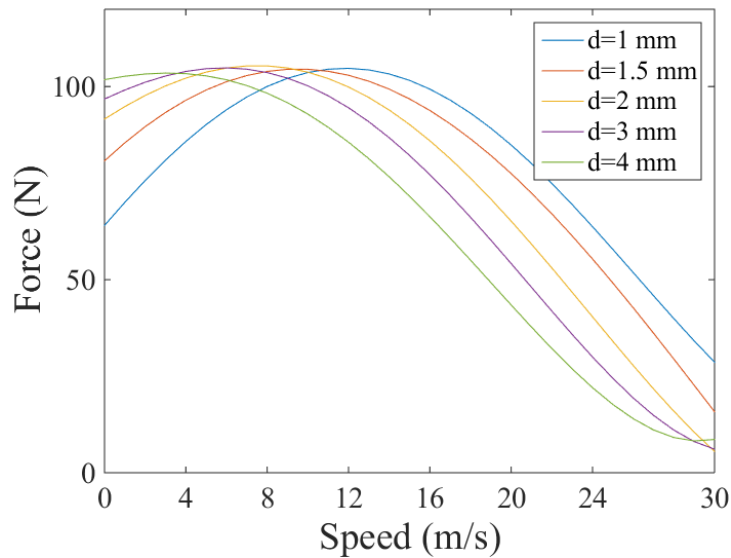
برای اینکه بتوانیم یک موتور القایی خطی را بصورت بهینه طراحی کنیم، ابتدا باید تأثیر هر یک از پارامترهای ابعادی موتور را بر روی مشخصه‌های عملکردی آن بررسی کنیم. به همین منظور با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود JMAG Designer با تغییر پارامترهای ابعادی مختلف موتور شبیه‌سازی‌های مختلفی انجام داده و تغییرات مشخصه‌های عملکردی حائز اهمیت بررسی می‌شود. در ادامه تأثیر ضخامت صفحه هادی ثانویه، جنس صفحه هادی ثانویه و ... بر روی مشخصه‌های عملکردی ماشین بررسی می‌شود.

۵-۲- بررسی تاثیر ضخامت ثانویه

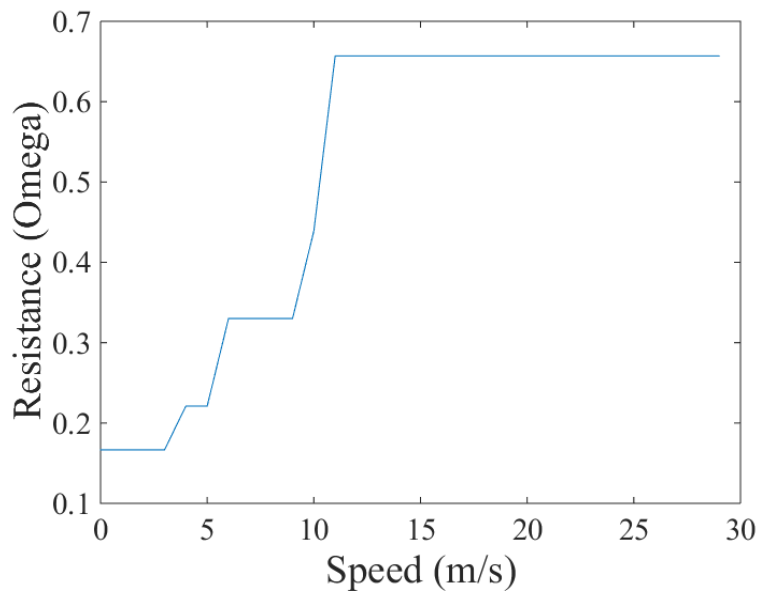
یکی از پارامترهایی که بر روی عملکرد موتور القایی خطی موثر است، ضخامت صفحه هادی ثانویه می‌باشد. این پارامتر بطور چشمگیری بر روی نیروی پیشران ماشین تأثیرگذار است. در اینجا به منظور بررسی تأثیر این پارامتر بر عملکرد ماشین با تغییر ضخامت ثانویه موتور نیروی پیشران محاسبه می‌شود.

برای تغییر ضخامت ثانویه باید عمق نفوذ صفحه رسانا نیز در نظر گرفته شود لذا با توجه به توضیحات ارائه شده در فصل قبل و با در نظر گرفتن رابطه (۳-۲۱) ضخامت‌های مختلفی برای صفحه رسانای ثانویه در نظر گرفته شده است. در شکل (۵-۱) نیروهای پیشران بدست آمده بر حسب سرعت به ازای مقادیر مختلف ضخامت ثانویه رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت ثانویه مقدار نیروی پیشران در لحظه راه‌اندازی افزایش پیدا می‌کند بطوریکه به ازای $d=4$ mm ماکزیمم نیروی راه‌اندازی بدست می‌آید. با توجه به این شکل می‌توان مقادیر بهینه مقاومت ثانویه در بازه‌های سرعت مختلف را بدست آورد. برای این منظور در هر بازه سرعت که مقدار نیروی ماکزیمم مشخص شده مقاومت متناسب با این نیرو استخراج می‌شود. در شکل (۵-۲) مقادیر مقاومت بهینه بر حسب

سرعت رسم شده است.



شکل (۵-۱): نیروی پیشران موتور القایی خطی بر حسب سرعت برای ضخامت‌های مختلف ثانویه



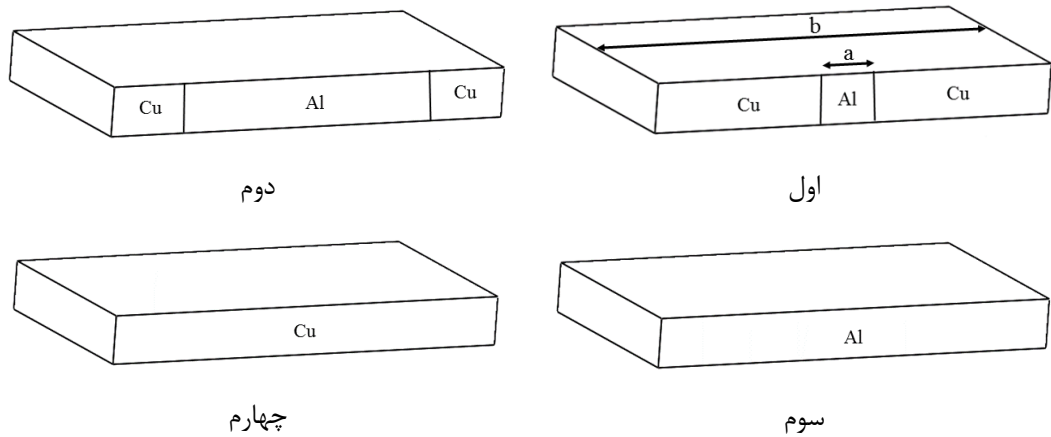
شکل (۵-۲): مقادیر بهینه مقاومت به ازای سرعت‌های مختلف

۵-۳- بررسی تاثیر جنس ثانویه

یکی از مسائل مهم در هنگام طراحی ماشین القایی خطی با ثانویه یکپارچه انتخاب جنس ثانویه است.

در این نوع ماشین جنس ثانویه معمولا آلومینیوم و یا مس می‌باشد. انتخاب جنس ثانویه معمولا با

توجه به مشخصه‌های عملکردی مطلوب طراح انتخاب می‌شود. مطابق شکل (۳-۵) جنس ثانویه را می‌توان بطور کامل از مس و یا آلومینیوم و یا ترکیبی از این دو انتخاب کرد.



شکل (۳-۵): ساختارهای در نظر گرفته شده برای ثانویه

در ادامه با در نظر گرفتن برخی مشخصه‌های عملکردی حائز اهمیت مانند بازده، ریپل نیرو، ضریب قدرت و ... به بررسی تاثیر جنس ثانویه بر روی این مشخصه‌های عملکردی پرداخته می‌شود.

۴-۵- شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود

با شبیه‌سازی ماشین به کمک نرم‌افزار اجزاء محدود عملکرد آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. با توجه به پاسخ سریع تحلیل دوبعدی در اینجا نیز از تحلیل دوبعدی برای بررسی عملکرد ماشین استفاده می‌شود. بدلیل تقارن موجود در ساختار می‌توان تنها با شبیه‌سازی بخشی از ماشین و تعمیم آن به کل ساختار به کمک نرم‌افزار به تحلیل رفتار ماشین پرداخت. این امر باعث کاهش زمان شبیه‌سازی ماشین و کاهش محاسبات می‌گردد. بنابراین در اینجا تنها یک جفت قطب ماشین شبیه‌سازی می‌گردد.

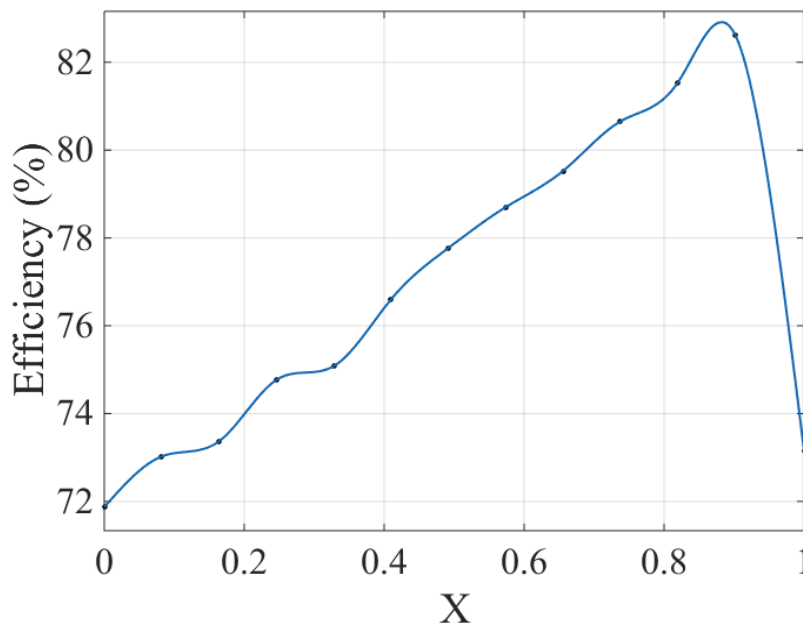
مطابق شکل (۳-۵) از دو ماده آلومینیوم و مس برای جنس ثانویه استفاده شده است. در دو حالت تمام ثانویه از آلومینیوم یا مس تشکیل شده است اما در سایر موارد بخشی به مس و بخش دیگر به

آلومینیوم اختصاص داده شده است. با توجه به شکل (۳-۵) در حالت ترکیبی اگر فرض شود که مقدار آلومینیوم a و طول کل b باشد در اینصورت شاخص درصد آلومینیوم که در واقع نسبت طول هادی با جنس آلومینیوم به طول کل هادی می باشد برابر است با:

$$X = \frac{a}{b} \quad (۱-۵)$$

۵-۵- مقایسه عملکرد ساختارهای مختلف

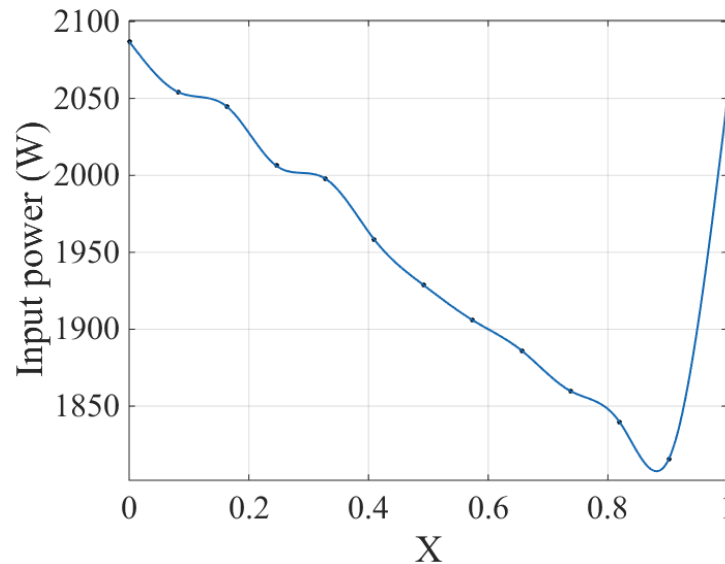
مهمترین پارامتری که معمولا در طراحی بیشتر ماشینهای الکتریکی مطرح می شود بازده ماشین می باشد. برای شبیه سازیهای انجام شده بازده ماشین محاسبه شده است. البته در کلیه این شبیه سازیها از تلفات بادخوری و اصطکاک هوا صرف نظر شده است. نتایج بدست آمده بصورت نمودار شکل (۴-۵) می باشد.



شکل (۴-۵): نمودار بازده ساختارهای پیشنهادی بر حسب شاخص درصد آلومینیوم

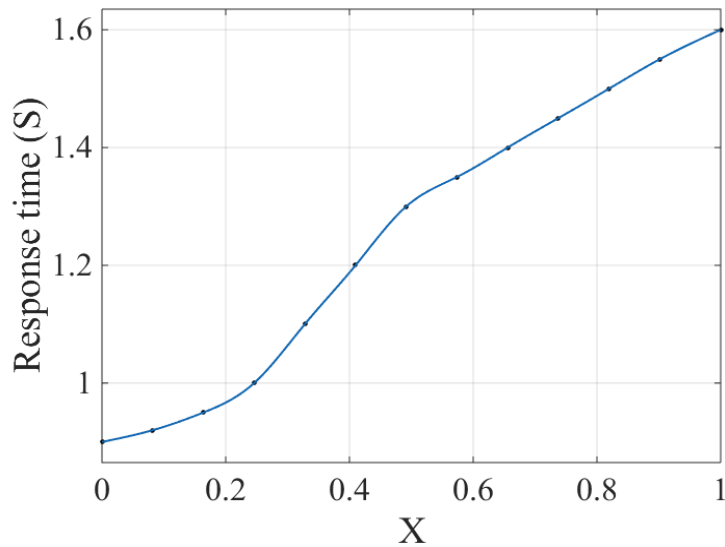
در شکل (۵-۵) توان ورودی ماشین به ازای حالت های مختلف بررسی شده نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می شود که با افزایش مقدار X توان ورودی کاهش یافته و در $X=0.9$ به

مینیمم مقدار خود می‌رسد. در واقع با توجه به نمودار بازده همانطور که انتظار می‌رفت در این نقطه باید کمترین مقدار توان از منبع تغذیه دریافت شود.



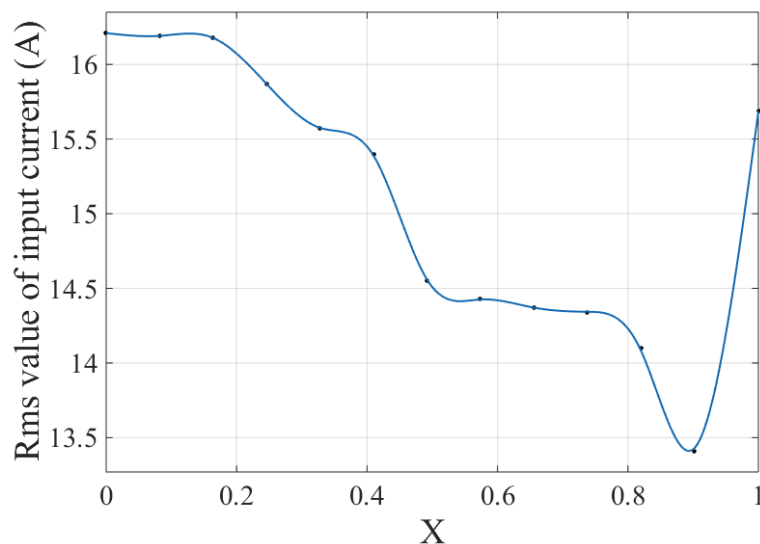
شکل (۵-۵): نمودار توان ورودی ساختارهای پیشنهادی بر حسب شاخص درصد آلومینیوم

هر چقدر سرعت پاسخ سیستم بالاتر باشد زمان رسیدن به حالت نامی و دستیابی به شرایط مطلوب کمتر خواهد بود. در بسیاری از کاربردها این زمان بسیار حائز اهمیت است بنابراین در این بخش این فاکتور برای ساختارهای پیشنهادی بررسی شده است. نتایج حاصل در نمودار شکل (۵-۶) ارائه شده است. با توجه به این شکل با افزایش مقدار X زمان رسیدن به حالت سرعت نامی نیز افزایش پیدا می‌کند.



شکل (۵-۶): زمان همگرایی ساختارهای پیشنهادی بر حسب شاخص درصد آلومینیوم

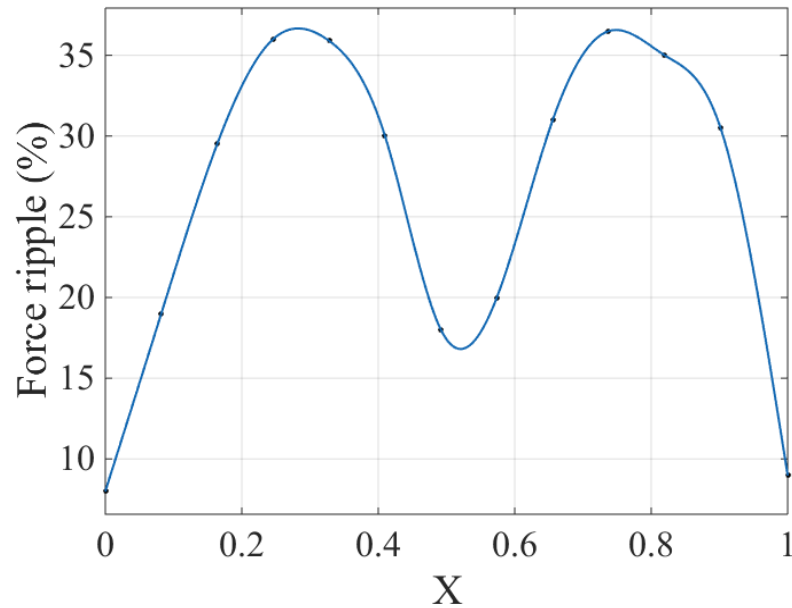
تغییر مقدار X بر روی مقدار جریان کشیده شده از منبع نیز تاثیرگذار است. در شکل (۵-۷) جریان ورودی ماشین نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می شود با افزایش X مقدار جریان کاهش یافته و نهایتاً در $X=0.9$ به مینیمم مقدار خود می رسد. با افزایش بیشتر X مقدار جریان افزایش می یابد. تغییرات جریان باعث تغییر تلفات اهمی ماشین می شود که نهایتاً بر روی بازده ماشین تاثیر می گذارد.



شکل (۵-۷): نمودار جریان ساختارهای پیشنهادی بر حسب شاخص درصد آلومینیوم

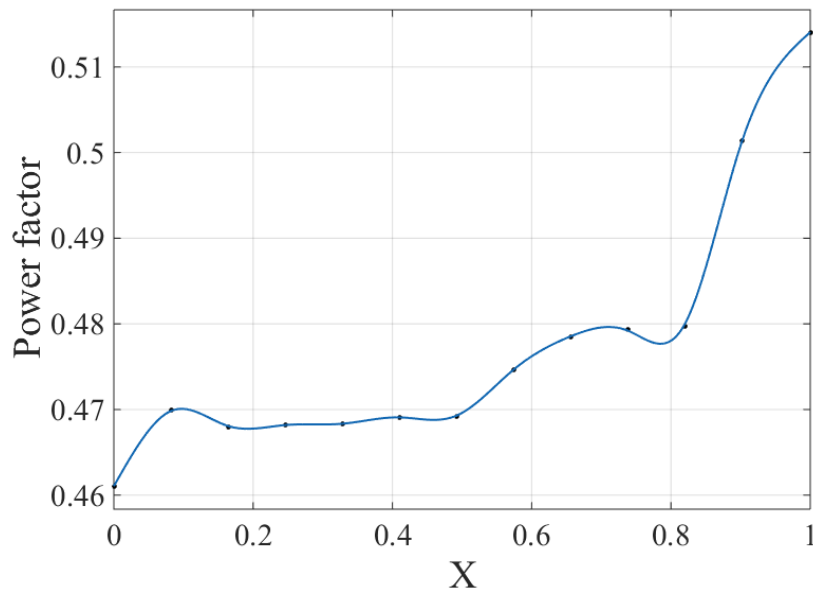
ریپل نیرو یکی از عوامل ایجاد ارتعاشات و نویز در ماشین های الکتریکی است. در بسیاری از موارد

بخصوص در کاربردهای نظامی این ریپل باید تا حد ممکن کم باشد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که تغییر جنس ثانویه تاثیر بسزایی بر روی ریپل نیرو دارد. در شکل (۸-۵) نتایج حاصل برای ساختارهای مطرح شده ارائه شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که در حالتی که از ترکیب آلومینیوم و مس استفاده شده است به ازای $X=0.5$ مینیمم مقدار ریپل را خواهیم داشت.



شکل (۸-۵): نمودار ریپل نیروی ساختارهای پیشنهادی بر حسب شاخص درصد آلومینیوم

ضریب قدرت که در واقع اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ ورودی ماشین می‌باشد یکی از پارامترهای مهم در تحلیل ماشین‌های الکتریکی است. هر چقدر مقدار این پارامتر بیشتر باشد ماشین جریان کمتری از منبع تغذیه می‌کشد. در شکل (۹-۵) تغییرات ضریب قدرت بر حسب تغییرات X نشان داده شده است.



شکل (۵-۹): نمودار ضریب قدرت ساختارهای پیشنهادی بر حسب شاخص درصد آلومینیوم

۵-۶- جمع بندی

در این فصل تاثیر دو پارامتر مهم در طراحی ماشین القایی خطی یعنی ضخامت و جنس هادی ثانویه بر روی مشخصه‌های عملکردی ماشین بررسی شد. نشان داده شد که تغییرات ضخامت صفحه هادی تاثیر زیادی بر روی نیروی پیشران ماشین دارد اما این تاثیر به طور خطی با ضخامت صفحه هادی ثانویه تغییر نمی کند بنابراین در هنگام طراحی ماشین باید ضخامت بهینه انتخاب گردد. همچنین جنس ثانویه نیز بر روی مشخصه‌های حائز اهمیت از قبیل ریپل نیرو، بازده، ضریب قدرت و ... تاثیر دارد که متناسب با میزان اهمیت هر یک از این پارامترها باید جنس ثانویه انتخاب گردد.

فصل ۶: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه پارامترها و ساختار انواع موتورهای القایی خطی بررسی و شناسایی شد. همچنین معادلات ابعادی و مدار معادل الکتریکی آن استخراج شد. در فصل ۳ با توجه به روابط بدست آمده برای موتور القایی خطی دو طرفه الگوریتم طراحی با استفاده از نرم‌افزار متلب ارائه شد و به کمک این الگوریتم یک نمونه ماشین طراحی و مقادیر ابعادی و پارامترهای خروجی آن بدست آمد. در فصل ۴ به کمک نرم‌افزار اجزاء محدود ماشین نمونه طراحی شده شبیه‌سازی شد و صحت الگوریتم طراحی مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس تاثیر پارامترهای موثر بر روی مقاومت ثانویه از قبیل ضخامت و جنس ثانویه بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که ضخامت و جنس ثانویه موتورهای القایی خطی دو طرفه تاثیر زیادی بر روی مشخصه‌های عملکردی ماشین از قبیل نیروی پیشران، بازده، سرعت پاسخ سیستم و ریپل نیرو دارد بنابراین مقدار این دو پارامتر باید به طور صحیح توسط طراح انتخاب شود. بطور کلی با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت:

۱- با توجه به سرعت حرکت ماشین و با استفاده از نمودار بدست آمده برای نیرو بر حسب سرعت

(شکل ۵-۱) می‌توان ضخامت بهینه را برای بخش ثانویه انتخاب کرد.

۲- در صورتی که شاخص درصد آلومینیوم (X) برابر با $0/9$ انتخاب شود ماکزیمم بازده حاصل می‌شود.

۳- به ازای شاخص درصد آلومینیوم برابر با $0/9$ مینیمم توان اکتیو از منبع تغذیه کشیده می‌شود.

۴- با افزایش شاخص درصد آلومینیوم زمان مورد نیاز برای رسیدن به حالت دائمی موتور افزایش می‌یابد بنابراین در حالتی که از مس خالص برای بخش ثانویه استفاده شود موتور در کمترین زمان ممکن به حالت دائمی خود می‌رسد.

۵- به ازای شاخص درصد آلومینیوم برابر با $0/9$ کمترین جریان از منبع کشیده می‌شود.

۶- در صورتی که از ترکیب آلومینیوم و مس برای بخش ثانویه استفاده شود ریپل نیرو نسبت به حالتی که از مس و یا آلومینیوم خالص استفاده شود افزایش می‌یابد. در حالت ترکیبی بهتر است که شاخص درصد آلومینیوم برابر با ۰/۵ انتخاب شود تا ریپل نیرو حداقل شود.

۶-۲- پیشنهادات

با توجه به اینکه یک الگوریتم طراحی برای موتور القایی خطی دو طرفه نوشته شد و تحلیل موتور با روش اجزاء محدود صورت گرفت و یک طراحی بهینه انجام شد با این حال برخی کارها نیز می‌تواند در ادامه این کار برای بهبود عملکرد موتورهای القایی خطی دو طرفه صورت گیرد که در زیر به چند مورد اشاره می‌شود:

- ۱- مدلسازی و تحلیل سه‌بعدی موتور القایی خطی دو طرفه می‌تواند به طراح کمک کند تا مدل دقیق‌تری از موتور داشته و مطالعه موثرتری جهت بهبود طراحی انجام دهد.
- ۲- می‌توان از سایر روش‌های عددی تحلیل ماشین مانند روش مدار معادل مغناطیسی برای تحلیل موتور القایی خطی دو طرفه استفاده کرد تا بتوان برخی پدیده‌های مختلف از جمله خطاهای سیم‌بندی و ... را مدل کرد.
- ۳- با مدلسازی خطاهای مختلف روی موتور القایی خطی دو طرفه می‌توان خطاهای مختلف را شناسایی کرد و در نتیجه موتوری با قابلیت تحمل خطا به همراه کنترلر مربوطه طراحی کرد.
- ۴- بهینه‌سازی می‌تواند با الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی صورت گیرد و نتایج بدست آمده با هم مقایسه شود تا بهترین طراحی انتخاب شود.
- ۵- بهینه‌سازی می‌تواند روی پارامترهای مختلف از جمله تعداد قطب، عرض اولیه و سیم‌بندی صورت گیرد.

- [1] Boldea I., Nasar S. A. (1976), “**Linear Motion Electric Machines**”, Wiley Interscience.
- [2] Gieras J. F. (1994), “**Linear Induction Drives**”, Clarendon.
- [3] Laithwaite E. R. (1966), “**Induction Machines for Special Purposes**”, NEWNES (GB).
- [4] Boldea I., Naser S. (1985), “**Linear Motion Electromagnetic Systems**”.
- [5] Nasar S. A., Boldea I. (1987), “**Linear Electric Motors: Theory, Design, and Practical Applications**”.
- [6] Boldea I., Nasar S. A. (1997) “Linear electric actuators and generators”, IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record, P MA1/1.1-MA1/1.5, Milwaukee, WI, USA.
- [7] Boldea I., Nasar S. A. (2010), “The Induction Machine Handbook” CRC press.
- [8] Xu W., Zhu J. G., Zhang Y. et al. (2010) “Equivalent circuits for single-sided linear induction motors” IEEE T IND APPL, **46**, **6**, pp **2410-2423**.
- [9] [Online]. Available: http://www.eefocus.com/dongxl/blog/13-2/300962_1d76b.html.
- [10] King F., Lundström M., Salovaara S. et al. (2012) “Articulated funicular and the tubed mega frame”, Council on Tall Buildings and Urban Habitat, P 563, Shanghai.
- [11] Laithwaite E. (1974), “Linear Electric Motors. Engineering (London)”, 214, 648-651.
- [12] Yamada H. (1986), “Handbook of Linear Motor Applications”, Kogyo Chosakai.
- [13] Pawluk K., Szczepański W. (1974), “Linear Electric Motor”, WNT, Warsaw.
- [14] Abdollahi S. E., Mirzayee M. and Mirsalim M. (2015) “Design and analysis of a double-sided linear induction motor for transportation” IEEE T MAGN, **51**, **7**, pp **1-7**.
- [15] Zhao J., Zhang W., Fang J., Yang Zh., Q. Zheng T., Liu, Y. (2010), “Design of HTS linear induction motor using GA and the finite element method”, 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, P 527-531, Taichung, Taiwan.
- [16] György T., Biró K. (2016) “Co-evolutionary optimization design of a three-phase induction machine with external rotor”, ICEM22, P 1394-1398, Lausanne, Switzerland.
- [17] Cipin R., Patocka M. (2013), “Skin effect in rotor bars of induction motor in form of transfer function”, IECON, P 3149-3153, Vienna.
- [18] McGuinness D. T., Gulbahce M. O., Kocabas D. A. (2015) “Novel rotor design for high-speed solid rotor induction machines”, ELECO9, P 579-583, Bursa, Turkey.
- [19] Gyftakis K. N., Katsantonis I. and Kappatou J. (2014) “Optimization of the electromagnetic characteristics of a 3-phase squirrel-cage induction motor using FEM” J. of. MATER SCI ENG, A **4**, **3**, pp **65-72**.

- [20] Yamamura S., Ito H. and Ishulawa Y. (1972) "Theories of the linear, induction motor and compensated linear induction motor" IEEE T POWER AP SYST, **PAS-91,4**, pp **1700-1710**.
- [21] Sobhani S., Yaghoobi H., Samakoosh M. (2013) "Optimize efficiency and torque in the single-phase induction motor by adjusting the design parameters", EEEIC12, P 237-241, Wroclaw, Poland.
- [22] Nair K. N., Umamaheswari B. (2012), "LabVIEW Based Performance Optimization of Single Phase Induction Motors", Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, P 1-5, San Francisco, USA.
- [23] Manna M. S., Marwaha S., Marwaha A., Garg N., Singh S. (2011), "Computations of electromagnetic forces and fields in double sided linear induction motor (DLIM) using finite element method", 3rd International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing, P 96-100, Bangalore, India.
- [24] Han J., Li Y., Du Y., Xu W., Jin N. (2008), "Dynamic characteristics study of single-sided linear induction motor with finite element method", Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, P 439-444, China.
- [25] Jin X., Xidang Y., Weiming M., Yuxing Zh., Zhaolong S. (2014), "Nonlinear calculation methods of long primary double-sided linear induction motor", ICEMS, P 1774, Hangzhou, China.
- [26] Yang T., Zhou L. and Li L. (2011) "Influence of design parameters on end effect in long primary double-sided linear induction motor" IEEE T PLASMA SCI, **39, 1**, pp **192-197**.
- [27] Zhang Y., Zhang M., Ma W. et al. (2012) "Modeling of a double-stator linear induction motor" IEEE T ENERGY CONVER, **27, 3**, pp **572-579**.
- [28] Shiri A., Shoulaie A. (2012), "Design optimization and analysis of single-sided linear induction motor, considering all phenomena", IEEE T ENERGY CONVER, **27, 2**, pp **516-525**.
- [29] Lee H. W., Lee S. G., Park Ch., Lee J., Park H. J. (2008), "Characteristic analysis of a linear induction motor for a lightweight train according to various secondary schemes", IJR, **1, 1**, pp **6-11**.
- [30] Sadarangani C. (2006), "**Electrical Machines: Design and Analysis of Induction and Permanent Magnet Motors. Division of Electrical Machines and Power Electronics**", School of Electrical Engineering, Royal Inst. of Technology.
- [31] Osawa S., Wada M., Karita M., Ebihara D., Yokoi T. (1992), "Light-weight type linear induction motor and its characteristics", IEEE T MAGN, **28, 4**, pp **3003-3005**.
- [32] Kitamura M., Hino N., Nihei H., Ito M. (1998), "A direct search shape optimization based on complex expressions of 2-dimensional magnetic fields and forces", IEEE T MAGN, **34, 5**, pp **2845-2848**.
- [33] Kang G., Nam K. (2005), "Field-Oriented Control Scheme for Linear Induction Motor with the End Effect", IEE Proceedings Electric Power Applications, P 1565-1572.
- [34] Amiri E. (2013), "Study of Linear Induction Motor End Effects Using 3-D FEM and Equivalent Circuit", P 3165-3170, Austria.
- [35] Laporte B., Takorabet N., and Vinsard G. (1997), "An approach to optimize

- winding design in linear induction motors”, IEEE T MAGN, **33**, **2**, pp **1844-1847**.
- [36] Mishima T., Hiraoka M., Nomura T. (2005), “A study of the optimum stator winding arrangement of LIM in maglev systems”, IEEE Int. Conf. Electr. Mach. Drives, P 1238-1242, USA.
- [37] Shiri A., Shoulaie A. (2012), “End effect braking force reduction in high-speed single-sided linear induction machine”, Energy Conversion and Management, **61**, pp **43-50**.
- [38] Isfahani A. H., Lesani H., Ebrahimi B. M. (2007), “Design optimization of linear induction motor for improved efficiency and power factor”, IEEE Int. Conf. Electr.Mach. Drives, P 988- 991, Turkey.
- [39] Junyong L., Weiming M. (2011), “Research on end effect of linear induction machine for high-speed industrial transportation”, IEEE T PLASMA SCI, **39**, **1**, pp **116-120**.
- [40] Amiri E., Mendrelá E. A. (2014), “A novel equivalent circuit model of linear induction motors considering static and dynamic end effects”, IEEE T MAGN, **50**, **3**, pp **120-128**.
- [41] Wallmark O. (2014), “**AC Machine Analysis-Fundamental Theory**”, KTH royal institute of technology.
- [42] Hu Y., (2015), PhD. Thesis, “**Linear Induction Motor Investigation and Design for Articulated Funiculator**”, KTH royal institute of technology school of electrical engineering.
- [43] Chapman S. (2005), “**Electric Machinery Fundamentals**”, Tata McGraw-Hill Education.
- [44] Gieras J., Eastham A. and Dawson G. (1986) “The influence of conductive cap thickness on the performance of single-sided linear induction motors” J. of. ELECTR MACH POW SYST, **11**, **2**, pp **125-136**.
- [45] Heller B. and Hamata V. (1977), “**Harmonic Field Effects in Induction Machines**”, Elsevier Science & Technology.
- [46] Brice C. W. and Patterson D. J. (2002), “**Electric Machine Goodness: Classic Results Revisited in Light of Contemporary Machine Design**”, Univeristy of South Carolina.
- [47] Isfahani A. H., Ebrahimi B., Lesani H. (2008) “Design optimization of a low-speed single-sided linear induction motor for improved efficiency and power factor” IEEE T MAGN, **44**, **2**, pp **266-272**.
- [48] Neto T. F. and Pontes R. “Design of an Elevator Prototype Propelled by a Linear Induction Motor” Eletrônica de Potência, pp **181-187**.

Abstract:

Among various types of linear motors, the linear induction motor has been more attractioned due to its many advantages such as low cost construction and simple structure. Linear induction motors are devided into three categories i.e. single sided, double sided and tubular motors. In this thesis, by using a double sided linear induction motor design algorithm and doing changes in the secondary conductor plate structure, including material variation and secondary thickness which will change the motor's secondary resistance, the performance characteristics of the motor in particular the force characteristic versus speed for application in accelerator are investigated. Then, by using different simulations, the optimum thickness is obtained which allows the motor to reach the optimum speed at the lowest possible time.

Keywords:

Linear induction motor, design algorithm, force, performance characteristic



Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical and Robotics Engineering

M.Sc. Thesis in Power Electronic and Machine Engineering

**Control of hybrid rotor resistance for improving free
acceleration characteristic of double-sided linear
induction motor**

By: Mahsa Jalali

Supervisors:

Dr Ahmad Darabi

Dr Amir Hassannia Kheibari

September 2018