دانشگاه صنعتی شیراز

دانشکده مهندسی برق و الکترونیک گروه قدرت

پایان نامه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی برق گرایش قدرت

طراحی بهینه ماشین‌های خطی لوله‌ای توسط روش‌های فرا ابتکاری

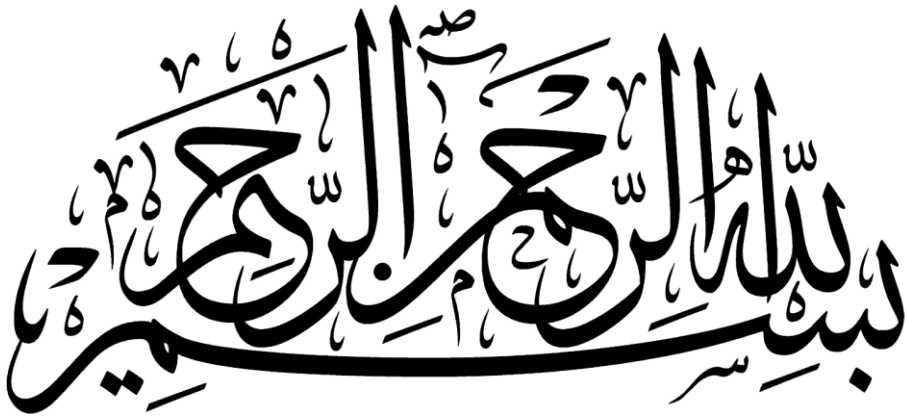
نگارش:

رسول همتی

استاد راهنما:

دکتر اکبر رهیده

بهمن ماه ۹۲


بسم الله الرحمن الرحيم

بسمه تعالی

طراحی بهینه ماشین‌های خطی لوله‌ای توسط روش‌های فرا ابتکاری

پایان نامه ارائه شده به عنوان بخشی از فعالیتهای تحصیلی

نگارش:

رسول همتی

برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

گروه قدرت دانشکده مهندسی برق و الکترونیک
دانشگاه صنعتی شیراز

ارزیابی پایان‌نامه توسط هیات داوران با درجه: بسیار خوب

دکتر اکبر رهیده استادیار در رشته مهندسی برق- قدرت (استاد راهنما)

دکتر محمد مردانه استادیار در رشته مهندسی برق- قدرت (داور)

دکتر امیرحسین رجائی استادیار در رشته مهندسی برق- قدرت (داور)

مدیر امور آموزشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه صنعتی شیراز است.

تأییدیه‌ی صحت و اصالت نتایج

باسمه تعالی

اینجانب رسول همتی دانشجوی رشته برق قدرت مقطع تحصیلی کارشناسی ارشد به شماره دانشجویی ۹۰۱۱۴۰۴۱ تأیید می‌نماید کلیه نتایج این پایان‌نامه/رساله، بدون هیچ‌گونه دخل و تصرف، حاصل مستقیم پژوهش صورت گرفته توسط اینجانب است. در مورد اقتباس مستقیم و غیرمستقیم از سایر آثار علمی، اعم از کتاب، مقاله، پایان‌نامه با رعایت امانت و اخلاق علمی، مشخصات کامل منبع مذکور درج شده است.

در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص مقامات ذی‌صلاح دانشگاه صنعتی شیراز، مطابق قوانین و مقررات مربوط و آئین نامه‌های آموزشی، پژوهشی و انضباطی و ... عمل خواهد شد و اینجانب حق هرگونه اعتراض و تجدیدنظر را، نسبت به رأی صادره، از خود ساقط می‌کند. همچنین، هرگونه مسئولیت ناشی از تخلف نسبت به صحت و اصالت نتایج مندرج در پایان‌نامه/رساله در برابر اشخاص ذی‌نفع (اعم از حقیقی و حقوقی) و مراجع ذی‌صلاح (اعم از اداری و قضایی) متوجه اینجانب خواهد بود و دانشگاه صنعتی شیراز هیچ‌گونه مسئولیتی در این زمینه نخواهند داشت.

تبصره ۱- کلیه حقوق مادی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شیراز است.

تبصره ۲- اینجانب تعهد می‌نماید بدون اخذ مجوز از دانشگاه صنعتی شیراز دستاوردهای این پایان‌نامه/ رساله را منتشر نکند و یا در اختیار دیگران قرار ندهد.

نام و نام خانوادگی دانشجو: رسول همتی

تاریخ و امضاء

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

کلیه حقوق مادی و معنوی مترتب بر نتایج پایان نامه متعلق به دانشگاه و انتشار نتایج نیز تـابع مقرارت دانشگاهی است و با موافقت استاد راهنما به شرح زیر، بلامانع است:

■ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله برای همگان بلامانع است.

□ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.

□ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله تا تاریخ ..... ممنوع است.

نام استاد راهنما: دکتر اکبر رهیده

تاریخ:

امضا:

تقدیم به:

پدر، مادر و برادر عزیزم.

تشکر و قدردانی:

اکنون که این رساله به پایان رسیده است بر خود لازم می‌دانم از زحمات بی‌دریغ اساتید گروه قدرت دانشکده مهندسی برق و الکترونیک دانشگاه صنعتی شیراز به ویژه استاد راهنمای ارجمندم جناب آقای دکتر اکبر رهیده تشکر و قدردانی نمایم.

چکیده

طراحی بهینه ماشین‌های خطی لوله‌ای توسط روش‌های فرا ابتکاری

نگارش :
رسول همتی

در این پایان‌نامه ابتدا مروری بر ماشین‌های خطی، اهمیت و برخی از کاربردهای آن‌ها انجام گرفته است و سپس انواع متداول تر ماشین‌های خطی لوله‌ای آهنربای دائم تشریح شده است. در ادامه با استفاده از معادلات ماکسول، معادلات تحلیلی دو بعدی توزیع چگالی شار، نیروی ضد محرکه الکتریکی و همچنین نیروی محوری برای چندین نمونه از ماشین‌های خطی لوله‌ای آهنربای دائم استخراج شده است. ماشین‌های مطالعه شده همگی دارای ساختار آرمیچر بدون شیار و آهنربای دائم با مغناطیس شدگی شعاعی، هالبچ، هالبچ ذوزنقه‌ای و هالبچ دو طرفه است. به دلیل فرض خطی بودن سیستم (صرف‌نظر کردن از اثر اشباع) توزیع شار ناشی از آهنربا و همچنین توزیع ناشی از عکس‌العمل آرمیچر به صورت مجزا محاسبه شده‌اند. نتایج مدل تحلیلی دو بعدی با نتایج مدل عددی دو بعدی از نرم‌افزار ماکسول مقایسه شده که نتایج مقایسه بیانگر دقت عمل مدل تحلیلی می‌باشد. در نهایت با استفاده از مدل تحلیلی ارائه‌شده، یک ماشین خطی لوله‌ای با ساختار آرمیچر بدون شیار و مغناطیس شدگی شعاعی با یوغ فرو مغناطیس آرمیچر و میدان به طور بهینه طراحی شده است. اهداف مسئله طراحی، حداقل کردن تلفات توان و حجم ماشین در نظر گرفته شده‌اند، قیود مسئله طراحی شامل تولید نیروی محوری مورد نیاز و نگه‌داشتن چگالی شار یوغ آرمیچر و میدان زیر مقدار از پیش تعیین‌شده می‌باشد و پارامترهای بهینه‌سازی شامل ضخامت شعاعی آهنربا، ضخامت شعاعی یوغ استاتور و غیره می‌باشد. لازم به ذکر است که مسئله بهینه‌سازی توسط روش ازدحام ذرات حل شده است. پس از طراحی نتایج برخی کمیت‌های ماشین مانند نیروی محوری، نیروی ضد محرکه الکتریکی و شار پیوندی به صورت تحلیلی دو بعدی ارائه‌شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: ماشین خطی لوله‌ای، مدل تحلیلی دو بعدی، بهینه‌سازی ازدحام ذرات

فهرست مطالب

۱.فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- مروری بر کارهای انجام‌شده ۴

۱-۳- کاربردهای ماشین‌های خطی ۱۱

۲.فصل دوم: مروری بر انواع ماشین‌های خطی لوله‌ای ۱۲

۲-۱- مقدمه ۱۳

۲-۲- توپولوژی‌های موتور سنکرون خطی ۱۸

۲-۲-۱- موتورهای مغناطیس دایم با ریل واکنشی فعال ۲۰

۲-۲-۲- موتورهای آهنربای دائم با ریل واکنشی غیرفعال ۳۱

۲-۲-۳- موتورها با تحریک الکترومغناطیسی ۳۳

۲-۲-۴- موتورها با سیستم تحریک ابررسانا ۳۴

۲-۲-۵- موتورهای رلوکتانس متغیر ۳۵

۳.فصل سوم: معادلات تحلیلی دو بعدی ۳۷

۳-۱- مقدمه ۳۸

۳-۲- معادلات تحت تأثیر میدان آهنربای دائم ۴۰

۳-۲-۱- معادلات میدان آهنربای دائم برای مغناطیس شدگی شعاعی ۴۱

۳-۲-۲- معادلات میدان آهنربای دائم برای مغناطیس شدگی هالبچ ۶۱

۳-۲-۳- معادلات میدان آهنربای دائم برای مغناطیس شدگی هالبچ ذوزنقه‌ای ۸۰

۳-۲-۴- معادلات میدان آهنربای دائم برای مغناطیس شدگی هالبچ دو طرفه ۸۴

۳-۳- محاسبه نیرو ۹۱

۳-۴- محاسبه میدان ناشی از عکس‌العمل آرمیچر ۹۳

۳-۵- محاسبه شار پیوندی ناشی از عکس‌العمل آرمیچر ۹۵

٤.فصل چهارم: بهینه‌سازی و نتایج شبیه‌سازی ۹٦

۴-۱- مقدمه ۹۷

۴-۲- انواع روش‌های بررسی‌شده ۹۷

۴-۲-۱- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات ۹۸

۴-۲-۲- الگوریتم بهینه‌سازی فازی تطبیقی تجمع ذرات ۱۰۱

۴-۲-۳- الگوریتم بهینه‌سازی آموزش و یادگیری ۱۰۲
۴-۳- خروجی بهینه‌سازی ۱۰۵

۵.فصل پنجم: جمع‌بندی و پیشنهادها **۱۱٤**
۵-۱- نتیجه‌گیری ۱۱۵
۵-۲- پیشنهادها ۱۱۵

مراجع **۱۱۷**

پیوست‌ها **۱۲۱**

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱ توپولوژی ماشین خطی لوله‌ای آهنربای داخلی با مغناطیس شدگی شعاعی به صورت دو بعدی..... ۴
شکل ۱-۲ توپولوژی ماشین خطی لوله‌ای آهنربای داخلی با مغناطیس شدگی شعاعی به صورت سه بعدی ۴
شکل ۱-۳ توپولوژی ماشین خطی لوله‌ای آهنربای خارجی با مغناطیس شدگی شعاعی به صورت دو بعدی..... ۵
شکل ۱-۴ توپولوژی ماشین خطی لوله‌ای آهنربای خارجی با مغناطیس شدگی شعاعی به صورت سه بعدی ۵
شکل ۱-۵ توپولوژی ماشین خطی لوله‌ای آهنربای داخلی با مغناطیس شدگی محوری ۶
شکل ۱-۶ توپولوژی ماشین خطی لوله‌ای آهنربای داخلی با مغناطیس شدگی هالبچ ایده آل ۶
شکل ۱-۷ بردارهای واحد در مختصات استوانه‌ای..... ۷
شکل ۱-۸ ماشین خطی لوله‌ای آهنربای داخلی با مغناطیس شدگی محوری با ساختار جدید..... ۸
شکل ۱-۹ ماشین خطی لوله‌ای آهنربای داخلی شیاردار با مغناطیس شدگی محوری با ساختار جدید ۸
شکل ۱-۱۰ ماشین خطی لوله‌ای آهنربای دائم با مغناطیس شدگی شبه هالبچ ۹
شکل ۱-۱۱ موتور خطی لوله‌ای آهنربای دائم ۱۰
شکل ۲-۱ موتورهای خطی سه فاز [۱۹]..... ۱۵
شکل ۲-۲ موتور پله‌ای خطی آهنربای دائم [۱۹]..... ۱۷
شکل ۲-۳ ساختار کلی ماشین‌های الکتریکی ۱۸
شکل ۲-۴ موتور سنکرون خطی آهنربای دائم با هسته آرمیچری شیاردار: (الف) آهنربای دائم روی سطح، (ب) آهنربای دائم کاشته شده.۱-آهنربای دائم،۲-آهن میانی، ۳-یوغ. ۱۹
شکل ۲-۵ توزیع شار مغناطیسی در بخش‌های طولی موتور سنکرون خطی آهنربای دائم دفن شده: (الف) یوغ غیر فرو مغناطیسی، (ب) یوغ فرو مغناطیسی ۲۰
شکل ۲-۶ موتور سنکرون خطی دو طرفه با آرایه‌ی هالبچ آهنربای دائم..... ۲۱
شکل ۲-۷ دمپرهای موتور سنکرون خطی آهنربای دائم نوع سطحی: (الف) پوشش آلومینیومی، (ب) کفش قطب فولاد جامد. ۱-آهنربای دائم، ۲-دمپر، ۳-یوغ..... ۲۲

شکل ۲-۸ آهنربای دائم مورب در موتور سنکرون خطی: (الف) یک ردیف، (ب) دو ردیف ...۲۳
شکل ۲-۹ موتور سنکرون خطی آهنربای دائم مسطح دو طرفه: (الف) دو سیستم آرمیچر خارجی، (ب) یک سیستم آرمیچر داخلی.....۲۴
شکل ۲-۱۰ موتور سنکرون خطی آهنربای دائم: (a) هسته آرمیچری یک طرفه، (b) سیم‌پیچی هسته-هوای داخلی یک طرفه.....۲۸
شکل ۲-۱۱ موتور سنکرون خطی شیاردار لوله‌ای شکل یک طرفه: (الف) با سیستم آرمیچری خارجی، (ب) با سیستم آرمیچری داخلی.....۲۸
شکل ۲-۱۲ موتور سنکرون خطی آهنربای دائم شار متعامد.۱-سیم‌پیچی آرمیچر، ۲-هسته ورق بندی شده آرمیچر، ۳-آهنربای دائم، ۴-هسته فرو مغناطیس.....۳۱
شکل ۲-۱۳ موتور سنکرون خطی آهنربای دائم دو طرفه هم قطب با ریل واکنشی غیرفعال. ۱- آهنربای دائم، ۲- سیم‌پیچی آرمیچر، ۳- مجموعه آرمیچر، ۴- یوغ، ۵- ریل عکس‌العمل.....۳۲
شکل ۲-۱۴ موتور سنکرون خطی آهنربای دائم یک طرفه با ریل واکنشی غیرفعال. ۱- آهنربای دائم، ۲-سیم‌پیچی آرمیچر، ۳-مجموعه آرمیچر، ۴- یوغ، ۵-ریل واکنشی فرو مغناطیس ۳۳
شکل ۲-۱۵ سیستم تحریک الکترومغناطیسی موتور سنکرون خطی هسته-هوایی یک طرفه مسطح. ۱- قطب برجسته، ۲- سیم‌پیچی تحریک dc، ۳- ریل فرو مغناطیسی (یوغ)، ۴- سیستم آرمیچر.....۳۴
شکل ۲-۱۶ موتور سه فاز هسته-هوای سنکرون خطی با سیستم تحریک ابررسانا. ۱- کلاف‌های آرمیچر، ۲- کلاف‌های تحریک ابررسانا.....۳۵
شکل ۲-۱۷ موتور سنکرون خطی رلوکتانس متغیر. (الف) استیل ورقه ورقه شده، (ب) سدهای شار ۳۶
شکل ۳-۱ مؤلفه مغناطیس شدگی شعاعی آهنربای دائم ۴۲
شکل ۳-۲ مغناطیس شدگی شعاعی آهنربای دائم در جهت فلش نشان داده‌شده ۴۲
شکل ۳-۳ ناحیه بندی ماشین خطی لوله‌ای با مغناطیس شدگی شعاعی.....۴۵
شکل ۳-۴ چگالی شار در راستای r برای ناحیه فاصله هوایی در حالت ۱.....۵۳
شکل ۳-۵ چگالی شار در راستای r برای ناحیه فاصله هوایی در حالت ۲.....۵۴
شکل ۳-۶ چگالی شار در راستای r برای ناحیه فاصله هوایی در حالت ۳.....۵۴
شکل ۳-۷ چگالی شار در راستای r برای ناحیه فاصله هوایی در حالت ۴.....۵۵
شکل ۳-۸ چگالی شار در راستای r برای ناحیه آهنربای دائم در حالت ۱ .....۵۵

شکل ۳-۹ چگالی شار در راستای r برای ناحیه آهنربای دائم در حالت ۲ ..... ۵۶
شکل ۳-۱۰ چگالی شار در راستای r برای ناحیه آهنربای دائم در حالت ۳ ..... ۵۶
شکل ۳-۱۱ چگالی شار در راستای r برای ناحیه آهنربای دائم در حالت ۴ ..... ۵۷
شکل ۳-۱۲ چگالی شار در راستای z برای ناحیه فاصله هوایی در حالت ۱ ..... ۵۷
شکل ۳-۱۳ چگالی شار در راستای z برای ناحیه فاصله هوایی در حالت ۲ ..... ۵۸
شکل ۳-۱۴ چگالی شار در راستای z برای ناحیه فاصله هوایی در حالت ۳ ..... ۵۸
شکل ۳-۱۵ چگالی شار در راستای z برای ناحیه فاصله هوایی در حالت ۴ ..... ۵۹
شکل ۳-۱۶ چگالی شار در راستای z برای ناحیه آهنربای دائم در حالت ۱ ..... ۵۹
شکل ۳-۱۷ چگالی شار در راستای z برای ناحیه آهنربای دائم در حالت ۲ ..... ۶۰
شکل ۳-۱۸ چگالی شار در راستای z برای ناحیه آهنربای دائم در حالت ۳ ..... ۶۰
شکل ۳-۱۹ چگالی شار در راستای z برای ناحیه آهنربای دائم در حالت ۴ ..... ۶۱
شکل ۳-۲۰ مؤلفه‌های M_r و M_z برای مغناطیس شدگی هالبچ ۶۲
شکل ۳-۲۱ مؤلفه‌های مغناطیس شدگی هالبچ در نرم‌افزار ماکسول ۶۲
شکل ۳-۲۲ ناحیه بندی ماشین خطی لوله‌ای با مغناطیس شدگی هالبچ ۶۵
شکل ۳-۲۳ چگالی شار در راستای r برای ناحیه فاصله هوایی در حالت ۱ ..... ۷۲
شکل ۳-۲۴ چگالی شار در راستای r برای ناحیه فاصله هوایی در حالت ۲ ..... ۷۳
شکل ۳-۲۵ چگالی شار در راستای r برای ناحیه فاصله هوایی در حالت ۳ ..... ۷۳
شکل ۳-۲۶ چگالی شار در راستای r برای ناحیه فاصله هوایی در حالت ۴ ..... ۷۴
شکل ۳-۲۷ چگالی شار در راستای r برای ناحیه آهنربای دائم در حالت ۱ ..... ۷۴
شکل ۳-۲۸ چگالی شار در راستای r برای ناحیه آهنربای دائم در حالت ۲ ..... ۷۵
شکل ۳-۲۹ چگالی شار در راستای r برای ناحیه آهنربای دائم در حالت ۳ ..... ۷۵
شکل ۳-۳۰ چگالی شار در راستای r برای ناحیه آهنربای دائم در حالت ۴ ..... ۷۶
شکل ۳-۳۱ چگالی شار در راستای z برای ناحیه فاصله هوایی در حالت ۱ ..... ۷۶
شکل ۳-۳۲ چگالی شار در راستای z برای ناحیه فاصله هوایی در حالت ۲ ..... ۷۷
شکل ۳-۳۳ چگالی شار در راستای z برای ناحیه فاصله هوایی در حالت ۳ ..... ۷۷
شکل ۳-۳۴ چگالی شار در راستای z برای ناحیه فاصله هوایی در حالت ۴ ..... ۷۸
شکل ۳-۳۵ چگالی شار در راستای z برای ناحیه آهنربای دائم در حالت ۱ ..... ۷۸
شکل ۳-۳۶ چگالی شار در راستای z برای ناحیه آهنربای دائم در حالت ۲ ..... ۷۹

شکل ۳-۳۷ چگالی شار در راستای z برای ناحیه آهنربای دائم در حالت ۳ ..... ۷۹
شکل ۳-۳۸ چگالی شار در راستای z برای ناحیه آهنربای دائم در حالت ۴ ..... ۸۰
شکل ۳-۳۹ مغناطیس شدگی هالبچ: (الف) هالبچ متعارف، (ب) هالبچ ذوزنقه‌ای ۸۱
شکل ۳-۴۰ ناحیه بندی آهنربای ذوزنقه‌ای ۸۱
شکل ۳-۴۱ چگالی شار در راستای r برای ناحیه فاصله هوایی، $\alpha_m = 60$ ۸۲
شکل ۳-۴۲ چگالی شار در راستای r برای ناحیه فاصله هوایی، $\alpha_m = 120$ ۸۳
شکل ۳-۴۳ چگالی شار در راستای z برای ناحیه فاصله هوایی، $\alpha_m = 60$ ۸۳
شکل ۳-۴۴ چگالی شار در راستای z برای ناحیه فاصله هوایی، $\alpha_m = 120$ ۸۴
شکل ۳-۴۵ ساختار سه بعدی ماشین خطی لوله‌ای آهنربای دائم با مغناطیس شدگی هالبچ دو طرفه ۸۵
شکل ۳-۴۶ ساختار مغناطیس شدگی ماشین خطی لوله‌ای آهنربای دائم با مغناطیس شدگی هالبچ دو طرفه ۸۶
شکل ۳-۴۷ چگالی شار در راستای r برای ناحیه ۲ ..... ۸۶
شکل ۳-۴۸ چگالی شار در راستای r برای ناحیه ۳ ..... ۸۷
شکل ۳-۴۹ چگالی شار در راستای r برای ناحیه ۴ ..... ۸۷
شکل ۳-۵۰ چگالی شار در راستای z برای ناحیه ۲ ..... ۸۸
شکل ۳-۵۱ چگالی شار در راستای z برای ناحیه ۳ ..... ۸۸
شکل ۳-۵۲ چگالی شار در راستای z برای ناحیه ۴ ..... ۸۹
شکل ۳-۵۳ پتانسیل برداری در ناحیه ۲ ..... ۸۹
شکل ۳-۵۴ پتانسیل برداری در ناحیه ۳ ..... ۹۰
شکل ۳-۵۵ پتانسیل برداری در ناحیه ۴ ..... ۹۰
شکل ۳-۵۶ توزیع سیم‌پیچی ۹۲
شکل ۳-۵۷ توزیع جریان یک فاز سیم‌پیچی ۹۴
شکل ۴-۱ چند نمونه همسایگی توپولوژیک ۹۹
شکل ۴-۲ توابع عضویت برای NBF، NBU، ω ۱۰۲
شکل ۴-۳ تابع هدف الگوریتمها ۱۰۷
شکل ۴-۴ چگالی شار عبوری از استاتور در الگوریتم PSO ۱۰۷
شکل ۴-۵ چگالی شار عبوری از استاتور در الگوریتم AFPSO ۱۰۸

شکل ۴-۶ چگالی شار عبوری از استاتور در الگوریتم TLBO ۱۰۸
شکل ۴-۷ نیروی محوری وارد شده به سیم‌پیچی در الگوریتم PSO ۱۰۹
شکل ۴-۸ نیروی محوری وارد شده به سیم‌پیچی در الگوریتم AFPSO ۱۰۹
شکل ۴-۹ نیروی محوری وارد شده به سیم‌پیچی در الگوریتم TLBO ۱۱۰
شکل ۴-۱۰ نیروی محوری وارد شده به سیم‌پیچی ۱۱۱
شکل ۴-۱۱ نیروی ضد محرکه الکتریکی ۱۱۲
شکل ۴-۱۲ شار پیوندی ۱۱۲
شکل ۴-۱۳ جریان ورودی سه فاز سیم‌پیچی‌ها ۱۱۳

فهرست جدول‌ها

جدول ۲-۱ موتور شیاردار در مقابل موتور بدون شیاردار..... ۲۵
جدول ۲-۲ موتور خطی بدون جاروبک آهنربای دائم یک طرفه مسطح سه فاز با سیستم خنک‌سازی طبیعی تولیدشده توسط آنوراد [۱۷]..... ۲۶
جدول ۲-۳ موتور خطی بدون جاروبک آهنربای دائم یک طرفه مسطح سه فاز با سیستم خنک‌سازی طبیعی تولیدشده توسط کولمورگن [۱۷]..... ۲۷
جدول ۲-۴ موتور بدون جاروبک خطی آهنربای دائم مسطح دو طرفه با سیم‌پیچی آرمیچری سه فاز داخلی هسته-هوایی تولیدشده توسط شرکت تریلوژی [۱۷]..... ۲۹
جدول ۲-۵ اطلاعات موتور سنکرون خطی لوله‌ای شکل تولیدشده توسط شرکت سوزلر[۱۷]... ۳۰
جدول ۴-۱ قواعد فازی برای ω ۱۰۲
جدول ۴-۲ بیشترین و کمترین مقادیر پارامترهای بهینه‌سازی ۱۰۵
جدول ۴-۳ پارامترهای بهینه‌سازی ۱۰۶
جدول ۴-۴ پارامترهای ماشین خطی لوله ای..... ۱۱۱

فهرست نشانه‌های اختصاری

بردار پتانسیل مغناطیسی	$\mathbf{A}$
بردار چگالی شار مغناطیسی	$\mathbf{B}$
بردار واحد در راستای شعاعی	$\boldsymbol{e_r}$
بردار واحد در راستای مماسی	$\boldsymbol{e_\theta}$
بردار واحد در راستای محوری	$\boldsymbol{e_z}$
بردار نیرو	$\boldsymbol{F}$
بردار شدت میدان مغناطیسی	$\mathbf{H}$
جریان الکتریکی	$\boldsymbol{i}$
بردار چگالی جریان الکتریکی	$\mathbf{J}$
بردار مغناطیس شدگی آهنربای دائم	$\mathbf{M}$
عملگر کرل	$\boldsymbol{\nabla \times}$
عملگر دیورژانس	$\boldsymbol{\nabla .}$
عملگر لاپلاس	$\boldsymbol{\nabla^2}$

فهرست کلمات اختصاری

AC	Alternating current
DC	Direct Current
Gbest	Global Best
Lbest	Local Best
LSM	Linear Synchronous Machine
Pbest	Personal Best
PSO	Particle Swarm Optimization
AFPSO	Adaptive Fuzzy Particle Swarm Optimization
BF	Best Fitness
UF	Unchanged Fitness
TLBO	Teaching learning based optimization

فصل اول: مقدمه