بسم الله الرحمن الرحيم

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه شهید مدنی آذربایجان
دانشکده فنی و مهندسی
گروه برق

پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد

رشته مهندسی برق قدرت

مدل‌سازی اجزاء محدود، طراحی و ساخت عملی ژنراتور سنکرون شارمحور ۴۰۰ هرتز

استاد راهنما:
دکتر وحید بهجت

استاد مشاور:
دکتر محمدرضا بنایی

پژوهشگر:
بابک نیری خضرلو

۹۲ / ۱۰
تبریز / ایران

تقدیم وسپاس

ستایش خدای را سزاست که حمد را بهای نعمت‌ها و پناهگاه از بلاها و وسیله رسیدن به نعمت‌ها و بهشت جاویدان و موجب افزایش احسان و کرمش قرار داد. درود بر پیامبر رحمت و پیشوای رهبران الهی و چراغ روشنی بخش امت، که ریشه‌های وجودش بزرگواری و درخت اصل و نصبش پربرگ و پرثمر بوده است و درود بر اهل بیتش که چراغ‌های روشنی بخش تاریکی‌ها و وسیله نجات امت‌ها و نشانه‌های روشن دین و مرکز ثقل فضیلت و برتری می‌باشند.

این پایان‌نامه را به: اسطوره تلاش پدرم، تندیس مهربانی مادرم و به کهکشان عشق همسرم و تمامی فرزانگانی که افتخار شاگردی آنان را داشته‌ام تقدیم می‌کنم.

تشکر وقدردانی

حمد و سپاس خداوندی را که دوستدار جویندگان علم است و همواره همراه آنان، سپاس او را که ابواب طریقت علم‌آموزی را بر من گشود و یاری کرد تا در این راه از علم وتجربه اساتیدی بس گرانقدر بهره‌مند گردم. در اینجا بر خود لازم می‌دانم از استاد ارجمند جناب آقای دکتر وحید بهجت که نهایت تلاش را در راهنمایی اینجانب جهت انجام این پایان‌نامه ارائه نمودند و راهنمایی‌های ایشان مشوق و موجد علاقه در تمام مراحل بود، تشکر و قدردانی نموده و توفیق روزافزون ایشان را از خداوند منان خواستارم.

بابک نیری خضرلو

دی ۱۳۹۲

تبریز، ایران

چکیده

امروزه ماشین‌های آهنربای دائم جایگاه وسیعی در صنعت پیدا کرده‌اند که از بین آنها ماشین‌های آهنربای دائم از نوع شارمحوری از ساختارهای جدید و پرکاربرد این ماشین‌ها می‌باشند که در دهه‌های اخیر به خاطر گشتاور و راندمان بالا و حجم کم در مقایسه با ماشین‌های شارشعاعی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این ماشین‌ها دارای صدا ولرزش کمتری نسبت به ماشین‌های مرسوم(شعاعی محور)دارند. ماشین‌های شارمحوری آهنربای دائم (AFPM)[1] برخلاف ماشین‌های شارشعاعی دارای ساختارهای متنوعی می‌باشند، بنابراین برای انتخاب ساختار و طرح بهینه، مقایسه بین طرح‌های مختلف ماشین‌های شارمحوری با آهنربای دائم ضروری به نظر می‌رسد که در این پایان‌نامه ضمن معرفی ساختارهای مختلف، با هم مقایسه شده‌اند. با توجه به سیر صعودی استفاده از ماشین‌های شارمحور با آهنربای دائم در کاربردهای گوناگون، خصوصاً در کاربردهای که با محدودیت حجم مواجه هستند، بررسی محدودیت‌های طراحی این ماشین‌ها اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کنند. از جمله این ماشین‌ها، ژنراتورهای سنکرون شارمحوری با آهنربای دائم و سرعت بالاست که در میکروتوربین‌ها و توربین‌های گازی و همچنین در کاربردهای فرکانس بالا (٤٠٠ هرتز) مورد استفاده قرار می‌گیرند. در سیستم‌های فرکانس بالا با توجه به اینکه وزن و حجم از پارامترهای مهم طراحی به شمار می‌روند، کلیه مدارهای الکترونیکی و مخابراتی و کنترلی بر پایه فرکانس ٤٠٠ هرتز طراحی می‌شوند. بنابراین به یک ژنراتور سنکرون شارمحوری با آهنربای دائم ٤٠٠ هرتزی مورد نیاز است که بتواند توان مورد نیاز این سیستم‌ها را تأمین کند و از لحاظ اندازه ابعاد وحجم و وزن کم باشد و همچنین دارای قدرت و توان مورد نیاز نیز باشد.

در این پایان‌نامه یک ژنراتور سنکرون شارمحوری با آهنربای دائم، ابتدا مطالعه و تحقیق و طراحی خواهد شد و سپس با استفاده از نرم‌افزار ماکسول مدل‌سازی شده و در نهایت به صورت عملی ساخته و تست خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: ماشین‌های شارمحور، آهنربای دائم، ژنراتور، سنکرون ،٤٠٠ هرتز

---

١. Axial Flux Permanent Magnet

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه ۱

۱-۱- تاریخچه ماشین‌های شار محوری..... ۲

فصل ۲: انواع ساختار و کاربردهای ماشین‌های شارمحوری..... ٤

۲-۱- ماشین‌های شار محوری..... ۵

۲-۱-۱- انواع ماشین‌های شار محوری..... ۵

۲-۱-۲- انواع ساختارهای ماشین‌های شار محوری..... ٦

۲-۱-۲-۱- ساختار یک طرفه با هسته استاتور شیاردار..... ۷

۲-۱-۲-۲- ساختار یک طرفه با هسته استاتور بدون شیار..... ۷

۲-۱-۲-۳- دو طرف روتور و وسط استاتور شیاردار(AFIS) ۸

۲-۱-۲-٤- دو طرف روتور و وسط استاتور بدون شیار (AFIS)..... ۹

۲-۱-۲-۵- دو طرف استاتور شیاردار و وسط روتور (AFIR)..... ۱۰

۲-۱-۲-٦- دو طرف استاتور بدون شیار و وسط روتور (AFIR) ۱۱

۲-۱-۲-۷- ساختار چند سطحه (دارای چند روتور و چند استاتور)..... ۱۱

۲-۱-۳- انواع ساختار ماشین‌های شارمحوری دوطرفه، از نظر تنظیم قطب‌های روتور..... ۱۲

۲-۱-۳-۱- ساختار (NN)..... ۱۲

۲-۱-۳-۲- ساختار (NS)..... ۱۳

۲-۱-٤- کاربردهای ماشین شارمحوری..... ۱٤

۲-۱-٤-۱- وسایل نقلیه الکتریکی هیبریدی.....۱٤
۲-۱-٤-۲- سیستم‌های دریایی (محرک مستقیم پروانه کشتی و زیردریایی).....۱٤
۲-۱-٤-۳- حفاری.....۱٥
۲-۱-٤-٤- وسایل خانگی و بیمارستانی.....۱٥
۲-۱-٤-٥- سیستم‌های تولید پراکنده (توربین‌های بادی).....۱٥
۲-۱-۳-٦- ژنراتورهای سرعت بالا ۱٦
۲-۱-٥- مزایای ماشین‌های شارمحوری.....۱٦
۲-۱-٦- معایب ماشین‌های شارمحوری.....۱٦
۲-۱-۷- انواع مواد مورد استفاده در ماشین‌های شارمحوری (AFPM).....۱۷
۲-۱-۷-۱- مواد مصرفی در هسته.....۱۷
۲-۱-۷-۲- جنس مواد آهنربای دائم مورد استفاده در ماشین‌های شارمحوری.....۱۷
۲-۲- مقایسه دو ماشین سنکرون (AFPM) با دو جنس مختلف هسته روتور.....۱۹
۲-۲-۱- مقایسه دو ماشین مورد نظر از نظر تلفات.....۲۱
۲-۲-۲- مقایسه دو ماشین مورد نظر از لحاظ بازدهی بر حسب سرعت دو ماشین.....۲۱
۲-۲-۳- افت ولتاژ تولیدی در اثر گرم شدن هسته روتور.....۲۲
۲-۳- مکانیزم تولید گشتاور در ماشین‌های شار محوری(AFPM).....۲۳
۲-۳-۱- روابط گشتاور در ماشین‌های شار محوری(AFPM).....۲۳
۲-٤- وجود یا عدم وجود هسته استاتور در ماشین‌های شارمحوری.....۲۷
۲-٤-۱- عدم وجود هسته استاتوردر ماشین شارمحوری.....۲۷
۲-٤-۲- وجود هسته استاتوردر ماشین شارمحوری.....۲۸

۲-۵- ساختار استاتور در ماشین‌شارمحوری.....۲۸

۲-۵-۱- ساختار استاتور بدون شیار در ماشین‌شارمحوری.....۲۸

۲-۵-۲- ساختار استاتور شیاردار در ماشین‌شارمحوری.....۳۱

۲-٦- تأثیر طول فاصله هوایی برماشین (AFPM) ۳۲

۲-۷- تأثیر ضخامت آهنربا بر ماشین (AFPM) ۳۲

۲-۸- تأثیر ضخامت هسته روتور برماشین (AFPM) ۳۳

۲-۹- تأثیر ضخامت هسته روتور برماشین (AFPM) ۳٤

۲-۱۰- مقایسه ماشین شارمحوری با ماشین شعاعی‌محور آهنربای دائم.....۳٤

۲-۱۰-۱- اثر نسبت طول به قطر در ماشین شعاعی‌محور و نسبت شعاع داخلی به خارجی استاتور در ماشین شارمحوری.....۳٦

۲-۱۰-۲- اثر آهنربای فریت.....٤۰

۲-۱۰-۳- مقایسه وزن و هزینه مواد مصرف شده(آهن و مس و آهنربا) در هردو ماشین..٤٤

۲-۱۰-٤- مقایسه وزن و هزینه مواد مصرف شده(آهن و مس و آهنربا) در هردو ماشین..٤٥

۲-۱۰-۵- اثر تعداد قطب‌ها.....٤٥

۲-۱۱- کاربرد ماشین‌شارمحوری در سیستم‌های تولید پراکنده بادی.....٤۷

۲-۱۲- طراحی وساخت ژنراتور ٤۰۰ هرتز شارمحوربدون هسته، با آهنربای دائم.....۵٤

۲-۱۲-۱- مقایسه کلاف ذوزنقه‌ای شکل با لوزی شکل.....۵٤

۲-۱۲-۲- گشتاور تولیدی ماشین.....۵۵

۲-۱۲-۳- تلفات جریان گردشی.....۵٦

۲-۱۲-٤- معیارهای طراحی.....۵٦

۲-۱۳- طراحی و ساخت یک ژنراتور سنکرون شار محور با آهنربای دائم بدون هسته، که کاربرد در اتومبیل دارد.....۵۹

۲-۱۳-۱- مدل سازی و طراحی.....۶۰

۲-۱٤- ژنراتور سنکرون شارمحوری با آهنربای دائم و هسته هوایی با سرعت بالا (HSAFPMG) ۶۷

۲-۱٤-۱- ساختار ماشین.....۶۸

۲-۱۵- گشتاور دندانه‌ای.....۷۱

۲-۱۵-۱- عوامل مهم جهت کاهش گشتاور دندانه‌ای در ماشین‌های شارمحوری.....۷٤

۲-۱۵-۱-۱- نسبت تعداد شیار استاتور به تعداد قطب روتور.....۷۵

۲-۱۵-۱-۲- شیارهای اظافی در دندانه‌های استاتور.....۷۵

۲-۱۵-۱-۳- نسبت بهینه کمان قطب آهنربا به گام قطب.....۷۵

فصل۳: طراحی ژنراتور سنکرون شارمحوری با آهنربای دائم و هسته هوایی فرکانس بالا.....۷۷

۳-۱- بارگذاری مغناطیسی ویژه.....۷۸

۳-۲- بارگذاری الکتریکی ویژه.....۷۸

۳-۳- معادله خروجی ماشین‌های ac.....۷۹

۳-٤- عوامل موثر در اندازه ماشین‌های دوار.....۷۹

۳-٤-۱- سرعت.....۸۰

۳-٤-۲- بارگذاری مغناطیسی ویژه.....۸۰

۳-٤-۲-۱- چگالی شار ماکزیمم.....۸۱

۳-٤-۲-۲- چگالی شار ماکزیمم.....۸۱

۳-٤-۲-۳- تلفات هسته.....۸۱

۳-٤-۳- بارگذاری الکتریکی ویژه.....۸۲

۳-۵- بارگذاری الکتریکی و بارگذاری مغناطیسی در ماشین‌های شارمحوری.....۸۳

۳-٦- تعیین تعداد کلاف سیم‌پیچی آرمیچر.....۸۵

۳-۷- تعیین تعداد دورهای هر کلاف سیم‌پیچی آرمیچر.....۸٦

۳-۸- تعیین ضخامت آهنربا.....۸۷

۳-۹- تعیین ضخامت روتور و استاتور ماشین شارمحوری.....۸۸

فصل٤: شبیه‌سازی و ساخت مولد سنکرون شارمحوری با آهنربای دائم با استفاده از FEM...۸۹

٤-۱- شبیه‌سازی مولد سنکرون شارمحور با آهنربای دائم.....۹۰

٤-۲- ساخت ژنراتور سنکرون شارمحوری با آهنربای دائم.....۹۹

فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادات.....۱۰۹

فهرست اشکال

شکل(۲-۱) جهت شارمغناطیسی در انواع ماشین‌های الکتریکی.....۵

شکل(۲-۲) انواع ساختارهای ماشین‌های شار محوری.....٦

شکل(۲-۳) ساختار یک طرفه با هسته استاتور شیاردار.....۷

شکل(۲-٤) ساختار یک طرفه با هسته استاتور بدون شیار.....۸

شکل (۲-۵) ماشین‌شار محور با دو طرف روتور و وسط استاتور شیاردار(AFIS-NN).....۹

شکل(۲-٦) ماشین‌شار محور با دو طرف روتور و وسط استاتور بدون شیار (AFIS-NN).....۱۰
شکل(۲-۷) ماشین‌شار محور با دو طرف استاتور شیاردار و وسط روتور(AFIR).....۱۰
شکل(۲-۸) ماشین‌شار محور با دو طرف استاتور بدون شیار و وسط روتور(AFIR).....۱۱
شکل(۲-۹) ساختار چند سطحه یک ماشین شارمحور با هسته استاتور.....۱۱
شکل(۲-۱۰) مسیر شارمغناطیسی در ماشین شارمحوری چند سطحه با هسته استاتور.....۱۲
شکل (۲-۱۱) ساختار چند سطحه یک ماشین شارمحور بدون هسته استاتور.....۱۲
شکل(۲-۱۲) مسیر شارمغناطیسی در ماشین شارمحور نوع (NN).....۱۳
شکل(۲-۱۳) مسیر شارمغناطیسی در ماشین شارمحور نوع (NS) ۱۳
شکل(۲-۱٤) : موتور شارمحور مورد استفاده در کشتی.....۱۵
شکل(۲-۱۵) منحنی تولید انواع آهنرباها در سالهای مختلف با قدرت‌های مختلف.....۱۹
شکل(۲-۱٦) استاتور هر دو ماشین سنکرون شارمحوری(AFPMSM).....۲۰
شکل(۲-۱۷) روتور ماشین سنکرون شارمحوری(AFPMSM) ۲۰
شکل(۲-۱۸) : مقایسه تلفات بی‌باری در انواع هسته روتور.....۲۱
شکل(۲-۱۹) نمودار بازده بر حسب سرعت ماشین.....۲۲
شکل(۲-۲۰) افت ولتاژ تولیدی در اثر گرم شدن آهنرباها.....۲۲
شکل(۲-۲۱) توزیع سینوسی هادیها بر روی قطب‌های استاتور.....۲۳
شکل (۲-۲۲) منحنی گشتاور سرعت ماشین بر حسب فواصل هوایی متغیر.....۲۷
شکل(۲-۲۳) ساختار ماشین شار محور چندسطحه با استاتور بدون شیار.....۲۹
شکل(۲-۲٤) شکل روتور واستاتور بدون شیارمورق شده.....۲۹
شکل(۲-۲۵) منحنی تغییرات (Back-EMF) دو استاتور با افزایش سرعت ماشین.....۳۰

شکل(۲-۲۶) منحنی تغییرات تلفات هسته دو استاتور با افزایش سرعت ماشین..... ۳۰

شکل(۲-۲۷) منحنی تغییرات جریان فاز با افزایش سرعت ماشین در دو استاتور..... ۳۱

شکل(۲-۲۸) ساختار شکل استاتور شیار دار قبل از سیم‌پیچی و بعد از سیم‌پیچی..... ۳۲

شکل(۲-۲۹) ژنراتور شارمحوری با هسته استاتور و دارای دو روتور..... ۳۵

شکل(۲-۳۰) مسیر شار مغناطیسی..... ۳۵

شکل(۲-۳۱) ماشین شعاعی‌محور با دو روتور با آهنربای دائم..... ۳۶

شکل(۲-۳۲) نسبت گشتاور به جرم موثر ماده بر نسبت طول به قطر در ماشین شعاعی محور با آهنربای (NdFeB)..... ۳۷

شکل(۲-۳۳) نسبت گشتاور به جرم موثر ماده بر نسبت قطر داخلی به قطر خارجی استاتور در ماشین شارمحور با آهنربای (NdFeB)..... ۳۸

شکل(۲-۳۴) چگالی گشتاور بر نسبت طول موثر به قطر در ماشین شعاعی محور با آهنربای (NdFeB)..... ۳۸

شکل(۲-۳۵) چگالی گشتاور بر نسبت قطر داخلی به قطر خارجی استاتور در ماشین شارمحوری با آهنربای (NdFeB)..... ۳۹

شکل(۲-۳۶) بازده بر نسبت طول موثر به قطر در ماشین شعاعی محور با آهنربای (NdFeB) ۳۹

شکل(۲-۳۷) بازده بر نسبت قطر داخلی به قطر خارجی استاتور در ماشین شارمحوری با آهنربای (NdFeB)..... ۴۰

شکل(۲-۳۸) نسبت گشتاور به جرم موثر ماده بر نسبت قطر داخلی به قطر خارجی استاتور در ماشین شعاعی‌محور با آهنربای فریت..... ۴۱

شکل(۲-۳۹) نسبت گشتاور به جرم موثر ماده بر نسبت قطر داخلی به قطر خارجی استاتور در ماشین شارمحوری با آهنربای فریت..... ۴۱

شکل(۲-٤۰) چگالی گشتاور بر نسبت طول به قطر در ماشین شعاعی محور با آهنربای آهنربای فریت.....٤۲

شکل(۲-٤۱) چگالی گشتاور بر نسبت قطر داخلی به قطر خارجی استاتور در ماشین شارمحوری با آهنربای فریت.....٤۲

شکل(۲-٤۲) بازده بر نسبت طول به قطر در ماشین شعاعی محور با آهنربای فریت.....٤۳

شکل(۲-٤۳) بازده ماشین بر نسبت قطر داخلی به قطر خارجی استاتور در ماشین شارمحوری با آهنربای فریت.....٤۳

شکل(۲-٤٤) چگالی گشتاور بر تعداد قطب برای ماشین شعاعی محور با آهنربای (NdFeB).....٤٦

شکل(۲-٤٥) چگالی گشتاور بر تعداد قطب برای ماشین شار محور با آهنربای (NdFeB).....٤٦

شکل(۲-٤٦) بازده بر تعداد قطب برای ماشین شعاعی محور با آهنربای(NdFeB).....٤۷

شکل(۲-٤۷) بازده بر تعداد قطب برای ماشین شار محور با آهنربای (NdFeB).....٤۷

شکل(۲-٤۸) ماشین شارمحور مورد استفاده در سیستم تولید پراکنده بادی.....٤۸

شکل(۲-٤۹) توزیع شار مغناطیسی در ماشین‌شارمحوری.....٤۹

شکل(۲-٥۰) مدار معادل مغناطیسی ماشین شار محوری.....٥۰

شکل(۲-٥۱) مسیر شار نشتی آهنربا به آهنربا.....٥۱

شکل(۲-٥۲) مسیر شار نشتی آهنربا به هوا.....٥۱

شکل (۲-٥۳) منحنی تغییرات K_{fi} را برحسب فاصله آهنرباها.....٥۲

شکل (۲-٥٤) روتور و قطب‌های آهنربا.....٥۲

شکل (۲-٥٥) ولتاژ تولید شده در سرعت‌های متفاوت.....٥۳

شکل (۲-٥٦) نتایج عملی وFEM و تحلیلی ولتاژ تولید شده در هر فاز.....٥۳

شکل(۲-۵۷) انواع شکل‌های سیم‌پیچی ماشین شارمحوری (a) : کلاف ذوزنقه‌ای(b) : کلاف لوزی شکل..... ۵۵
شکل(۲-۵۸) شکل موج ولتاژ ماشین شارمحوری..... ۵۷
شکل(۲-۵۹) منحنی تلفات بی‌باری با سرعت ماشین..... ۵۸
شکل(۲-۶۰) منحنی افت ولتاژ مولد با جریان بار..... ۵۸
شکل(۲-۶۱) ساختار مدل ارائه شده مولد شارمحور..... ۶۰
شکل(۲-۶۲) مسیرشارمغناطیسی در مولد..... ۶۰
شکل(۲-۶۳) کلاف مورد استفاده در مولد..... ۶۲
شکل(۲-۶۴) چیدن قطب‌های آهنربا..... ۶۴
شکل(۲-۶۵) مولد شار محورساخته شده..... ۶۴
شکل(۲-۶۶) موقعیت نسبی هر استاتور در سرعت‌های متفاوت..... ۶۵
شکل(۲-۶۷) منحنی تغییرات شیفت فاز با افزایش سرعت مولد..... ۶۵
شکل(۲-۶۸) شدت میدان مغناطیسی دیسک آهنی روتور..... ۶۶
شکل (۲-۶۹) ولتاژ تولیدی مولد در سرعت ۱۰۰۰ rpm..... ۶۶
شکل(۲-۷۰) ولتاژ تولیدی مولد در سرعت ۱۰۰۰ rpm با FEM..... ۶۷
شکل(۲-۷۱) نمودار هارمونیک ولتاژ تولید شده..... ۶۷
شکل(۲-۷۲) ولتاژ تولیدی ژنراتور در سرعت‌های مختلف..... ۷۰
شکل(۲-۷۳) ولتاژ تولیدی ژنراتور در سرعت‌های مختلف و تحت بارهای مختلف..... ۷۰
شکل(۲-۷۴) توان خروجی ژنراتور در سرعت‌های مختلف و زیر بارهای مختلف..... ۷۱
شکل(۲-۷۵) ماشین شارمحوری با دو روتور و یک استاتور..... ۷۳

شکل(۲-۷۶) شکل موج گشتاور دندانه‌ای ماشین شارمحوری بدون اعمال عوامل کاهشی.....۷٤
شکل(۲-۷۷) شکل موج گشتاور دندانه‌ای برای α_p های مختلف.....۷٦
شکل (۲-۷۸) تغییرات پیک تا پیک شکل موج گشتاور دندانه‌ای به ازای کمان‌های مختلف.....۷٦
شکل (۳-۱) تغییرات گشتاور با نسبت قطر داخلی به قطر بیرونی(k_D) ماشین شارمحوری.....۸۵
شکل(٤-۱) ژنراتور شارمحوری با آهنربای دائم.....۹۱
شکل(٤-۲) دیسک روتور و ترتیب قرار دادن قطب‌های آهنربا روی آن.....۹۲
شکل (٤-۳) کلاف‌های سیم‌پیچی و یکی از دیسک‌های روتور.....۹۳
شکل (٤-٤) سربندی کلاف‌ها به صورت سری و ستاره.....۹۳
شکل (٤-۵) چگالی شار مغناطیسی کل ماشین.....۹٤
شکل (٤-٦) چگالی شار مغناطیسی آهنرباها.....۹٤
شکل (٤-۷) بردار چگالی شار مغناطیسی آهنرباها.....۹۵
شکل (٤-۸) : چگالی شار مغناطیسی در یکی از دیسک‌های روتور و قطب‌های روتور.....۹۵
شکل (٤-۹) جهت بردار چگالی شار مغناطیسی در یکی از دیسک‌های روتور.....۹٦
شکل (٤-۱۰) جهت چگالی شار مغناطیسی در داخل ماشین شارمحوری.....۹٦
شکل (٤-۱۱) جهت بردار چگالی جریان کلاف‌ها.....۹۷
شکل (٤-۱۲) مش‌بندی دیسک‌ها و قطب‌های مولد سنکرون شارمحوری.....۹۷
شکل(٤-۱۳) ولتاژ خروجی سه فاز ژنراتور سنکرون شارمحوری.....۹۸
شکل(٤-۱٤) ولتاژ خروجی یک فاز ژنراتور سنکرون شارمحوری.....۹۸
شکل (٤-۱۵) جریان خروجی سه فاز ژنراتور سنکرون شارمحوری.....۹۹
شکل (٤-۱٦) کلاف‌های سیم‌پیچی و نگهدارنده سیم‌پیچ‌ها.....۱۰۰

شکل(٤-١٧) کلاف‌های سیم‌پیچی و نگهدارنده سیم‌پیچ‌ها.....١٠١

شکل (٤-١٨) دیسک آهنی روتور با قطب‌های آهنربای دائم.....١٠٢

شکل(٤-١٩) دیسک آهنی روتور با قطب‌های آهنربای دائم.....١٠٣

شکل (٤-٢٠) هر دو دیسک آهنی روتور با قطب‌های آهنربای دائم.....١٠٤

شکل (٤-٢١) ژنراتور ساخته شده شارمحوری سه‌فاز با آهنربای دائم.....١٠٥

شکل (٤-٢٢) خروجی سه‌فاز ولتاژ.....١٠٦

شکل (٤-٢٣) خروجی تک‌فاز ولتاژ.....١٠٦

شکل (٤-٢٤) شکل موج ولتاژ و جریان.....١٠٧

شکل(٤-٢٥) ژنراتور شارمحور (٦/٥ MW) با قطر(٩/٦ m) ١٠٨

فهرست جداول

جدول (٢-١) جرم مواد موثر و هزینه.....٤٤

جدول (٢-٢) مقایسه تلفات و بازدهی در هر دو ماشین.....٤٥

جدول(٢-٣) مشخصات فنی مولد.....٦٣

جدول (٢-٤) مشخصات ماشین شارمحوری با دو روتور و یک استاتور.....٧٣

جدول (٤-١) مشخصات ژنراتور ساخته شده.....٩٠

فصل ۱:

مقدمه

۱-۱- تاریخچه ماشین‌های شارمحوری

تاریخچه ماشین‌های شارمحوری نشان می‌دهد اولین ماشین شارمحوری توسط فارادی اختراع شد که در واقع یک ماشین شارمحوری آهنربای دائم DC بود. در ابتدای کار به علت عدم وجود آهنربای دائم با مشخصه B-H خوب، این ماشین‌ها نتوانستند جایگاه گسترده‌ای برای خود ایجاد کنند. درسال ۱۹۸۳ با کشف آهنربای دائم خاک کمیاب، ماشین‌های شارمحوری آهنربای دائم (AFPM) به طور چشم‌گیری گسترش یافتند. بعد از آن تحقیقات متنوعی روی این نوع از ماشین‌ها انجام گرفته است. این ماشین‌ها به دلیل پیشرفت تکنولوژی مواد جایگاه بهتری پیدا کرده‌اند. ماشین‌های شارمحوری به دلیل امکان داشتن قطب زیاد و سرعت کم در بالابرها مورد استفاده قرار می‌گیرند. موتورهای شارمحوری آهنربای دائم به صورت ویژه در سیستم رانش خودروهای الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این موتورها برای استفاده در خودرو، جهت جاسازی درچرخ خودرو، به خاطر شکل دیسکی که دارند بسیار مناسب هستند. در دهه‌های اخیر به دلیل قابلیت‌های ویژه این ماشین‌ها از جمله، گشتاور بالا در سرعت‌های پایین، چگالی توان بالا نسبت به ماشین‌های شارشعاعی وبازده بالا، به شدت مورد توجه پژوهش‌گران و صاحبان صنعت قرار گرفته‌اند. ماشین‌های شارمحوری به دلیل ساختاری که دارند امکان ایجاد تعداد قطب زیاد در آنها وجود دارد، به همین دلیل می‌توانند مستقیماً به توربین‌هایی که با سرعت پایین می‌چرخند وصل شوند و انرژی الکتریکی تولید کنند. توربین‌های سرعت پایین در نیروگاههای برق‌آبی و بادی مورد استفاده قرار می‌گیرند[۱].

با توجه به سیر صعودی استفاده از ماشین‌های شارمحوری آهنربای دائم در کاربردهای گوناگون، خصوصاً در کاربردهای که با محدودیت حجم مواجه هستند، بررسی و مطالعه و تحقیق و در نهایت یک نمونه عملی طراحی و ساخته خواهد شد. از جمله این ماشین‌ها، ژنراتورهای سنکرون شارمحوری با آهنربای دائم و سرعت بالا که در میکروتوربین‌ها و توربین‌های گازی و همچنین در کاربردهای فرکانس بالا (٤٠٠ هرتز) در سیستم‌های هوافضا مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این سیستم‌ها با توجه به اینکه وزن و حجم از پارامترهای مهم طراحی به شمار می‌روند، کلیه مدارهای الکترونیکی و مخابراتی و کنترلی بر پایه فرکانس ٤٠٠ هرتز طراحی می‌شوند. بنابراین به یک ژنراتور سنکرون شارمحوری با آهنربای دائم ٤٠٠ هرتزی مورد نیاز است که بتواند توان مورد نیاز این سیستم‌ها را تأمین کند و از لحاظ اندازه و حجم و وزن کم باشد و همچنین دارای قدرت و توان مورد نیاز نیز باشد. برخلاف ماشین‌های شارشعاعی که یک ساختار تقریبا یکسانی دارند، ماشین‌های شارمحوری ساختارهای مختلفی دارند. ماشین‌های شارمحوری می‌توانند دارای یک یا چندین فاصله

هوایی داشته باشند و دارای هسته استاتور شیاردار یا بدون شیار باشند. از خصوصیات قابل توجه دیگر این ماشین‌ها، فاصله هوایی متغیر و قابل تنظیم آنها است. از مزایای دیگر ماشین‌های شارمحوری با آهنربای دائم، امکان ساخت یک ماشین الکتریکی با تعداد قطب زیاد می‌باشد. در نتیجه می‌توانند با توربین‌های سرعت پایین در سیستم‌های تولید پراکنده بادی کوپل مستقیم شده و مورد استفاده قرار گیرند. هزینه کم و بازده بالا از دیگر خصوصیات این نوع از ماشین‌ها است که علت آن عدم وجود جاروبک و سیم‌پیچ تحریک می‌باشد[۲].

فصل ۲:

انواع ساختار و کاربردهای ماشین‌های شارمحوری