دانـــشگاه یـــزد

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

گروه قدرت ـ الکترونیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

مهندسی برق ـ قدرت

طراحی موتور القایی سه‌فاز معکوس‌گرد

استادراهنما: دکتر احمد میرزایی

استادمشاور: دکتر آرش کیومرثی

پژوهش و نگارش: وحید کوفی

شهریورماه ۱۳۹۱

بسم الله الرحمن الرحیم

تقدیم به پدر بزرگوار و مادر مهربانم

تشکر و قدردانی

منت خدای را که توان و همت عطا نمود و دشواریها را آسان ساخت، وگرنه نه ادراک را یارای دانستن بود و نه قلم را یارای نگاشتن...

با سپاس و قدردانی فراوان از جناب آقای دکتر احمد میرزایی که در طول دوره تحصیل با هدایت و راهنمایی عالمانه، مسیر حرکت را به من نشان دادند و با نکته‌سنجی و تیزبینی خویش، موجبات انجام یک پروژه هرچه کم‌نقص‌تر و صحیح‌تر را فراهم نمودند. امیدوارم که همواره موفق و سر بلند باشند. همچنین با تشکر فراوان از جناب آقای دکتر آرش کیومرثی که جز با مشورت استادانه، تجربه و دقت‌نظر ایشان انجام هیچ کاری امکان‌پذیر نمی‌بود. امیدوارم که همواره موفق و سربلند باشند.

در عین حال بر خود واجب و لازم می‌دانم تا از اساتید عالم و بزرگوار گروه قدرت دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه یزد تشکر کنم، بخصوص جناب آقای دکتر علیرضا صدیقی که بنده را در طول دوره کارشناسی ارشد، از دیدگاه‌ها و نظریات خویش بهره‌مند نمودند. همچنین با تشکر و قدردانی فراوان از جناب آقای دکتر شاه‌نظری که راهنمایی‌هایشان در زمان ارائه سمینار، چراغ راهی برای ادامه کار بود. از جناب آقای دکتر حیدری نیز کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم.

در پایان از همسر مهربان و فداکارم که با صبر و حوصله، خستگی و عدم حضورم را تحمل نموده و همواره مشوق اصلی‌ام بوده است، بسیار سپاسگزارم.

چکیده

به منظور کاهش تلفات و افزایش کارایی وسایل نقلیه دریایی، امروزه استفاده از دو پروانه هم‌محور که در خلاف جهت یکدیگر می‌چرخند(CRP)، به عنوان یک راهکار موثر مورد توجه قرار دارد. در حال حاضر استفاده از موتورهای الکتریکی معکوس‌گرد (که امکان چرخش همزمان استاتورشان نیز فراهم شده)، به‌جای موتورهای مکانیکی در حال افزایش است. موتورهای معکوس‌گرد نیز همانند موتورهای خطی به منظور حذف چرخ‌دنده‌ها و متعاقبا، افزایش راندمان و قابلیت اطمینان سیستم محرک وسایل نقلیه، طراحی می‌شوند. در این پایان‌نامه، یک موتور القایی قفس سنجابی سه فاز، ۱۹۰ کیلووات، ۱۱ کیلوولت، ۱۲۰ هرتز و با اتصال ستاره، به منظور جایگزینی با یک موتور DC سری طراحی شده است. علاوه بر ساختار ساده و قابلیت اطمینان بالا، موتور القایی قفس سنجابی به دلیل نداشتن سیستم کموتاسیون و سیستم مجزای تحریک، مزیت قابل ملاحظه‌ای برای قرار گرفتن به‌جای موتور DC، به منظور تولید نیرومحرکه CRP را دارد. روش کار در این پایان‌نامه بدین صورت است که در ابتدا برخی از پارامترها به صورت اولیه و در رنج مناسبی مقداردهی شده‌اند، سپس موتور توسط روابط تقریبی حاکم بر حالت دائمی طراحی شده است، پس از آن بوسیله شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار Ansoft Maxwell، مقادیر دقیق پارامترها و متغیرها بدست آورده شده‌اند. در ادامه با استفاده از این مقادیر و تکرار عملیات گفته شده، یک طرح درست‌تر بدست آمده و این عملیات تا یافتن یک طرح کارآمد ادامه یافته است. در مرحله بعد، الگوریتم ژنتیک به عنوان روشی با قابلیت بهینه‌سازی چندمنظوره، برای یافتن طرح بهینه انتخاب شده است. قبل از شرکت هر طرح در عملیات بهینه‌سازی، لازم است تا یک مجموعه از ارزیابی‌ها و آماده‌سازی‌ها بر روی طرح مورد نظر انجام پذیرد. عملیات آماده‌سازی دنباله‌ها در این پایان‌نامه در چهار مرحله انجام شده و در محیط نرم افزار MATLAB برنامه‌نویسی شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی طرح بهینه، نشان دهنده کاهش قابل ملاحظه‌ای در وزن و تلفات موتور است.

کلیدواژه: پروانه‌های معکوس‌گرد، موتور القایی معکوس‌گرد، المان محدود، الگوریتم ژنتیک.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه..... ۱

۱-۱- پروانه‌های معکوس‌گرد..... ۱

۱-۲- برتری موتورهای الکتریکی نسبت به موتورهای مکانیکی..... ۲

۱-۳- برتری موتورهای AC در مقایسه با موتورهای DC..... ۳

۱-۴- اجزای اصلی یک موتور معکوس‌گرد نمونه..... ۶

۱-۵- بررسی اثر گشتاور بار بر حرکت معکوس‌گرد موتور ۷

۱-۶- رئوس مطالب ارائه شده..... ۱۰

فصل دوم: طراحی اولیه موتور القایی سه‌فاز معکوس‌گرد..... ۱۲

۲-۱- مقدمه..... ۱۲

۲-۲- معادله خروجی..... ۱۲

۲-۳- تعیین مقادیر اولیه و بررسی تاثیر پارامترها بر عملکرد موتور..... ۱۴

۲-۴- محاسبه مقدار اولیه برای ابعاد اصلی..... ۱۵

۲-۵- محاسبه مقدار اولیه برای فاصله هوایی..... ۱۷

۲-۶- طراحی اولیه سیم‌پیچی و هسته استاتور..... ۱۸

۲-۷- طراحی اولیه روتور قفس‌سنجابی..... ۲۳

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل سوم: شبیه‌سازی و آنالیز طرح اولیه..... ۲۸

۳-۱- مقدمه..... ۲۸

۳-۲- دریافت داده‌ها..... ۳۰

۳-۳- آنالیز داده‌ها..... ۳۲

فصل چهارم: بهینه‌سازی موتور مورد طراحی..... ۳۵

۴-۱- مقدمه..... ۳۵

۴-۲- الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی چند منظوره..... ۳۶

۴-۳- روش آماده‌سازی دنباله‌ها در این پایان‌نامه..... ۳۸

۴-۴- حل مسئله بهینه‌سازی..... ۴۲

۴-۵- بررسی نتایج حاصل از بهینه‌سازی..... ۴۵

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات..... ۵۰

۵-۱- نتیجه‌گیری..... ۵۰

۵-۲- پیشنهادات..... ۵۲

پیوست..... ۵۴

فهرست منابع و مآخذ..... ۷۰

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه

جدول(۱-۱): پارامترهای گشتاور موتورهای مورد استفاده در شبیه سازی شرایط معکوس‌گرد.....۸

فصل دوم: طراحی اولیه موتور القایی سه‌فاز معکوس‌گرد

جدول(۲-۱): جدول تعیین قطب فازهای استاتور در طراحی اولیه.....۲۰

فصل سوم: شبیه‌سازی و آنالیز طرح اولیه

جدول(۳-۱): مقادیر پارامترها و متغیرهای موتور طراحی شده.....۳۳

فصل چهارم: بهینه‌سازی موتور مورد طراحی

جدول(۴-۱): مقایسه طرح بهینه با طرح اولیه.....۴۶

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

جدول(۵-۱): مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی طرح بهینه و طرح اولیه.....۵۱

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه

شکل(۱-۱): موتور ۵ مگاوات با تکنولوژی HTS و یک موتور ۲/۵ مگاوات معمولی.....۵

شکل(۱-۲): دیاگرام شماتیک موتور سنکرون ۳۶/۵ مگاوات.....۵

شکل(۱-۳): سیستم نیرو محرکه CRP دو موتوره.....۶

شکل(۱-۴): طرح شماتیک موتور مغناطیس‌دائم بدون جاروبک معکوس‌گرد.....۷

شکل(۱-۵): مشخصه‌های سرعت موتور اول داده شده در جدول(۱-۱).....۱۰

شکل(۱-۶): مشخصه‌های سرعت موتور دوم داده شده در جدول(۱-۱).....۱۰

فصل دوم: طراحی اولیه موتور القایی سه‌فاز معکوس‌گرد

شکل(۲-۱): دیاگرام سیم‌پیچی استاتور در طراحی اولیه.....۲۰

شکل(۲-۲):تاثیر گشتاورهای هارمونیکی بر مشخصه گشتاور اصلی.....۲۴

فصل سوم: شبیه‌سازی و آنالیز طرح اولیه

شکل(۳-۱): مشخصه منحنی مغناطیسی هسته روتور و استاتور.....۳۰

شکل(۳-۲): مقطع موتور مورد طراحی پس از تعیین ابعاد اصلی.....۳۱

شکل(۳-۳): سیم پیچی استاتور موتور مورد طراحی.....۳۲

شکل(۳-۴): جریان فاز نسبت به سرعت نسبی بین روتور و استاتور در طراحی اولیه.....۳۴

شکل(۳-۵): گشتاور نسبت به سرعت نسبی بین روتور و استاتور در طراحی اولیه.....۳۴

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

فصل چهارم: بهینه‌سازی موتور مورد طراحی

شکل(۴-۱): فلوچارت مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک..... ۳۷

شکل(۴-۲): سطح مقطع شیار استاتور..... ۴۰

شکل(۴-۳): سطح مقطع شیار روتور..... ۴۰

شکل(۴-۴): الگوریتم روش آماده‌سازی دنباله‌ها برای شرکت در عملیات بهینه‌سازی..... ۴۱

شکل(۴-۵): ۲۰ متغیر مورد استفاده در بهینه‌سازی ۴۳

شکل(۴-۶): منحنی نشان دهنده تابع هدف بهترین دنباله در هر نسل..... ۴۵

شکل(۴-۷): منحنی گشتاور ـ سرعت طرح بهینه ۴۶

شکل(۴-۸): منحنی گشتاور ـ سرعت طرح اولیه ۴۷

شکل(۴-۹): فرم دوبعدی طرح بهینه به همراه نحوه مش‌بندی ۴۷

شکل(۴-۱۰): فرم سه‌بعدی طرح بهینه..... ۴۸

شکل(۴-۱۱): منحنی گشتاور ـ زمان طرح بهینه ۴۸

شکل(۴-۱۲): منحنی جریان استاتور ـ زمان طرح بهینه ۴۹

فصل اول

مقدمه

۱-۱- پروانه‌های معکوس‌گرد

سیستم مکانیکی متشکل از دو پروانه(ملخ) هم‌محور که دارای حرکت دورانی مختلف‌الجهت هستند، به CRP[۱] مشهور است. چنین سیستمی در کاربردهایی از قبیل توربین‌های بادی و تولید نیرومحرکه برای هلیکوپترها، هواپیماهای تک‌سرنشین، کشتی‌ها و زیردریایی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیستم CRP جایگزینی برای سیستم‌های رایج تک‌پروانه‌ای است. این سیستم‌ها از جهت بازیابی بخشی از انرژی که در سیستم تک‌پروانه‌ای از دست می‌رود، فواید هیدرودینامیکی زیادی دارند[۱]. به عنوان نمونه در توربین‌های بادی، ماکزیمم انرژی قابل حصول در صورت استفاده از دو پروانه معکوس‌گرد به جای یک پروانه، از ۵۹ درصد به ۶۴ درصد کل انرژی قابل دسترسی، افزایش می‌یابد[۲]. همچنین نتایج تحقیقات نشان داده که استفاده از پروانه‌های معکوس‌گرد در شناورهای دریایی، حداقل ۱۵ درصد صرفه‌جویی انرژی را در مقایسه با سیستم‌های رایج تک‌پروانه‌ای در پی داشته است[۳]. بنابراین کار بر روی پروانه‌های معکوس‌گرد به علت کاهش هزینه انرژی و افزایش راندمان، همواره دارای جذابیت فراوانی است. در تحقیقات انجام شده راجع به روش‌های مختلف صرفه‌جویی سوخت و افزایش کارایی در تجهیزات تولید کننده نیرومحرکه کشتی‌ها و زیردریایی‌ها، روش‌های متعددی برای کاهش تلفات انرژی، ابداع و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. یکی از بهترین روش‌های ارائه شده، بهره‌برداری از CRP است.

اولین کار تحقیقاتی در مورد سیستم CRP در ایالات متحده در سال ۱۹۷۰ صورت پذیرفت، بعد از

۱- counter rotating propeller

آن یک کمپانی ژاپنی بوسیله نصب یک سیستم CRP در یک یدک‌کش توانست به مقدار ۱۵٪ صرفه‌جویی در انرژی داشته باشد. نتایج ترغیب کننده این تجربه، طراحی سیستم CRP را برای کشتی‌های فوق سنگین سرعت بخشید[۳]. در سالهای اخیر، استفاده از CRP در شناورهای تندرو مورد توجه زیادی قرار گرفته است[۴]. تحقیقات راجع به نحوه استفاده از سیستم CRP بر روی شناورهای دریایی ادامه یافت تا اینکه به استفاده از موتورهای مکانیکی همراه با گیربکس‌های بزرگ جهت ایجاد حرکت معکوس‌گرد منجر گردید، سپس با حذف گیربکس و استفاده از موتورهای الکتریکی معکوس‌گرد که روتور و استاتور آنها در خلاف جهت یکدیگر حرکت می‌کنند، استفاده از سیستم CRP را در وضعیت مطلوب امروزی قرار داد.

۱-۲- برتری موتورهای الکتریکی نسبت به موتورهای مکانیکی

تکنولوژی‌های الکتریکی مرتبط با صنعت کشتی‌سازی، بیشتر در صنایع نظامی مورد توجه و علاقه قرار دارند و دلیل اصلی این علاقه، امکان جداسازی سیستم تولید انرژی از موتورهای راه انداز پروانه‌هاست. در عین حال استفاده از موتورهای الکتریکی در کشتی‌های مسافری و باری نیز مورد توجه قرار دارد و دلیل اصلی آن وزن کمتر این موتورها و راندمان بالای آنها نسبت به موتورهای مکانیکی است که می‌تواند موجب کاهش مصرف انرژی و پایین آوردن هزینه‌ها گردد.

جداسازی سیستم تولید انرژی از موتورهای محرک که تنها در صورت استفاده از انرژی الکتریکی ممکن است، در کشتی‌های نظامی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، چرا که با اصلاح آرایش ظاهری کشتی می‌تواند موجب افزایش کارایی‌های نظامی آن گردد. از جهت دیگر انرژی الکتریکی برخلاف انرژی مکانیکی در مواردی که بخشی از کشتی دچار خرابی شود، می‌تواند به آسانی به سمت سیستم‌های محرک سالم یا سیستم‌های جنگی بحرانی انتقال داده شود. همچنین صدای کم موتورهای الکتریکی از جهت استتار برای کاربردهای نظامی اهمیت ویژه‌ای دارد.

آنگونه که تخمین زده شده، حرکت به سمت موتورهای الکتریکی در کاربردهای دریایی، سالانه تولید ژنراتورها و موتورهای محرک به ارزش ۲ تا ۴ میلیارد دلار را در ده سال آینده در پی‌خواهد داشت [۳].

از دیگر مزایای استفاده از موتورهای الکتریکی معکوس‌گرد به جای موتورهای مکانیکی در صنایع دریایی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- با توجه به اینکه موتورهای الکتریکی معکوس‌گرد، امکان حذف گیربکس‌های بزرگ را فراهم آورده‌اند، موجب کاهش تلفات و وزن وسیله نقلیه دریایی شده‌اند.
۲- به علت مقدار مناسب چگالی حجمی و وزنی گشتاور در موتورهای الکتریکی، استفاده از آنها می‌تواند موجب افزایش انعطاف‌پذیری در طراحی کشتی‌ها و زیردریایی‌ها شود.
۳- استفاده از موتورهای الکتریکی امکان انتخاب ناحیه مناسب برای تولید توان را فراهم می‌سازد.
۴- موتورهای الکتریکی ذاتا کم صدا هستند.
۵- به علت کارایی بالای مبدل‌های تریستوری که امروزه در دسترس‌ترین انتخاب کارآمد برای سیستم های الکترونیک قدرت هستند، بهره‌برداری از این موتورها در شرایط خاص در کاربردهای دریایی امکان‌پذیر می‌گردد.
۶- به علت ظهور مواد مغناطیس دائم با توانایی تولید میدان‌های قوی، امکان طراحی موتورهای مغناطیس دائم که دارای چگالی گشتاور بالایی هستند، جهت تولید نیرو محرکه کشتی فراهم شده است.
۷- موتورهای معکوس‌گرد با حذف گیربکس‌ها و برخی از تجهیزات مکانیکی دیگر، موجب افزایش قابلیت اطمینان سیستم‌های محرک کشتی می‌گردند.
۸- مزیت‌های جانبی دیگر از جمله کاهش آلودگی‌های زیست محیطی، کاهش نیروی انسانی به علت امکان استفاده از سیستم‌های اتوماتیک و افزایش عمر کشتی.

۱-۳- برتری موتورهای AC در مقایسه با موتورهای DC

موتورهای DC به علت داشتن محدوده مناسب تغییرات سرعت، توانایی استارت زیر بار و گشتاور شکست بالا، برای مدت زمان زیادی در عرصه نیرو محرکه کشتی‌ها و زیر دریایی‌ها تنها انتخاب مناسب بودند. با این حال وجود سیستم کموتاسیون در موتورهای DC، موجب پیچیدگی ساختار این موتورها شده و هزینه ساخت و نگهداری آنها را بالا برده است. همچنین افت توان در سیستم کموتاسیون و نیاز به جریان تحریک، علاوه بر بالا بردن حرارت، موجب کاهش راندمان موتورهای DC می‌گردد. در عین حال موتورهای DC به علت ساختار مکانیکی‌شان دارای نرخ پایین گشتاور و راندمان نسبت به وزن هستند.

از آنجا که سازندگان موتورهای الکتریکی تولید کننده نیرو محرکه کشتی‌ها و زیر دریایی‌ها به موتورهایی با راندمان بالا، وزن کم و صدای کمتر علاقه‌مند بودند و از این جهت که موتورهای AC در مقایسه با موتورهای DC دارای توان خروجی بالاتر، ساختار ساده‌تر، هزینه ساخت کمتر، قابلیت

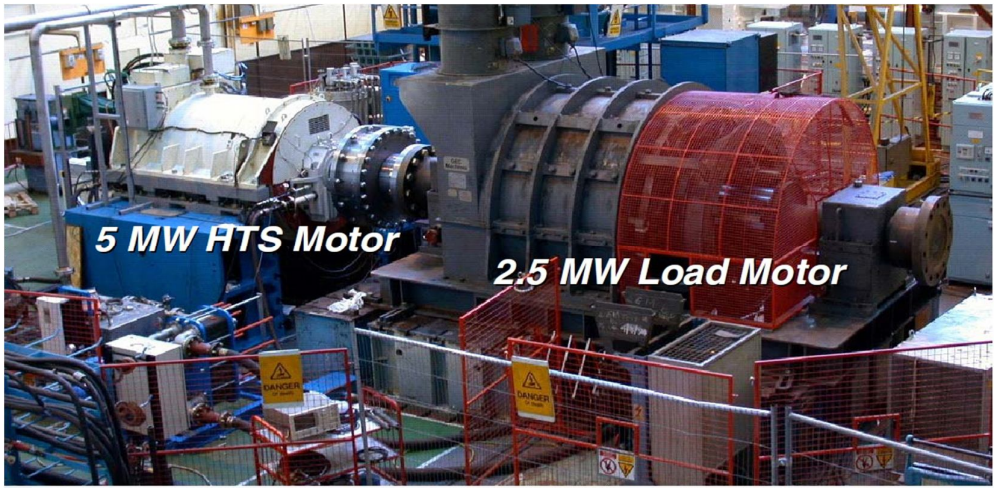
اطمینان بیشتر و سایز و وزن کوچکتر هستند، توانستند در عرصه نیرو محرکه دریایی جایگزینی مناسب برای موتورهای DC شوند [۵].

با پیشرفت‌های الکترونیک قدرت و ظهور تئوری‌های کنترلی مدرن، بخصوص تکنولوژی کنترل برداری، کارایی موتورهای AC در عرصه نیرو محرکه دریایی روز به روز افزایش یافت. با پیدایش و پیشرفت سریع تکنولوژی ابررساناهای دمای بالا و مغناطیس دائم‌ها، موتورهای AC مختلفی جهت کاربردهای دریایی طراحی و ساخته شده‌اند. امروزه موتورهای AC مورد استفاده در سیستم های محرک دریایی از نوع موتورهای سنکرون، القایی و مغناطیس دائم هستند. به منظور آشنایی با پیشرفتهای صورت پذیرفته در زمینه ساخت موتورهای معکوس‌گرد AC، و از آنجا که این موضوع می‌تواند به عنوان چشم‌اندازی در جهت پیشرفته‌سازی موتور مورد طراحی در این پایان‌نامه در آینده به حساب آید، ذکر چند نمونه لازم است.

در مرجع [۵] این پایان‌نامه، راجع به مزیت‌های یک موتور الکتریکی معکوس‌گرد مغناطیس دائم خاص با نام multi-stage pm disc motor جهت استفاده برای نیرو محرکه کشتی و همچنین سایر کاربردهایی که نیاز به حرکت معکوس‌گرد دارند، بحث شده است. این نوع موتور مغناطیس دائم دارای خصوصیاتی از قبیل ساختار سیم‌پیچی خنک شونده به وسیله آب، حذف جاروبک، قطب بدون چاک و ... است. خصوصیات این نوع موتور موجب گردیده تا تلفات هیسترزیس و آهنی هسته کاهش محسوسی یابد، همچنین عدم وجود جاروبک، مانع از افزایش دمای موتور به علت تلفات توان توسط جاروبک می‌شود. مجموع این خصوصیات، نرخ بالای گشتاور و راندمان نسبت به وزن موتور را در پی‌داشته که آن را به طور ویژه برای کاربردهای دریایی مناسب می‌سازد.

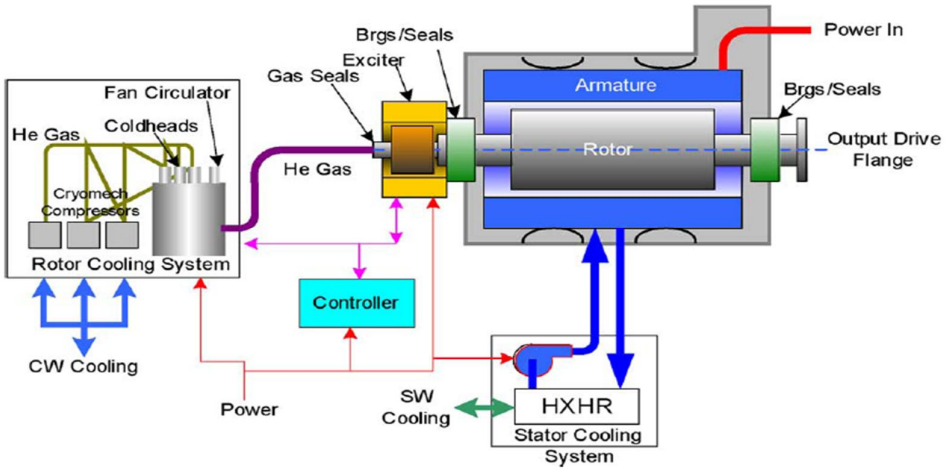
مرجع [۶] راجع به فناوری‌های جدید در طراحی موتورهای الکتریکی برای کاربردهای دریایی است. فناوری‌های مورد بحث در این مقاله، سوپر کنداکتورها و سیستم‌های خنک کننده پیشرفته هستند. با توجه به سرعت رشد و تمایل زیاد به این فناوری‌ها، آینده طراحی موتورهای الکتریکی در کاربردهای دریایی به این سمت خواهد بود چرا که چنین فناوری‌هایی امکان ساخت موتورها را در حجم و وزن بسیار کمتر از حد معمول امکان‌پذیر می‌سازد. ساخت موتورها در حجم و وزن کمتر، به معنای نرخ بالای گشتاور و راندمان نسبت به وزن است و همچنین موجب کاهش نویز و صدای موتور می‌گردد. اولین موتور ساخته شده توسط فناوری سوپر کنداکتورها، یک موتور ۲۰۰ اسب بخار و ۱۸۰۰ دور در دقیقه بوده که در سال ۱۹۹۶ توسط شرکت آمریکایی Rockwell Automation ساخته شده است. شکل(۱-۱) یک موتور ۵ مگاوات و ۲۳۰ دور در دقیقه ساخته شده برای ناوگان دریایی آمریکا را نشان می‌دهد، چنانچه ملاحظه می‌گردد این موتور در مقایسه با

یک موتور ۲/۵ مگاوات معمولی بسیار کوچکتر است. سیم‌پیچی استاتور این موتور توسط یک سیکل بسته گاز هلیم خنک‌سازی می‌شود.



شکل(۱-۱): یک موتور ۵ مگاوات ساخته شده با فناوری HTS و یک موتور ۲/۵ مگاوات معمولی [۳]

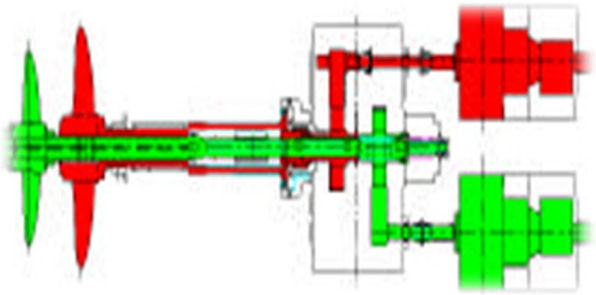
در مرجع [۷] نتایج تست‌های یک موتور سنکرون ۳۶/۵ مگاوات بیان گردیده است. این موتور توسط فناوری‌های روز ابررساناها برای نصب در کشتی‌های بزرگ ساخته شده است. شکل(۱-۲) دیاگرام شماتیک این موتور سنکرون را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل(۱-۲) دیده می‌شود، روتور و استاتور این موتور به صورت مجزا توسط دو نوع گاز مختلف خنک‌سازی می‌شوند. این گاز علاوه بر خنک‌سازی استاتور، شرایط عایقی مناسبی را نیز فراهم می‌کند. همچنین روتور نیز توسط یک سیستم درزگیری شده ساکن، توسط گاز هلیم خنک سازی می‌شود.



شکل(۱-۲): دیاگرام شماتیک موتور سنکرون ۳۶/۵ مگاوات[۴].

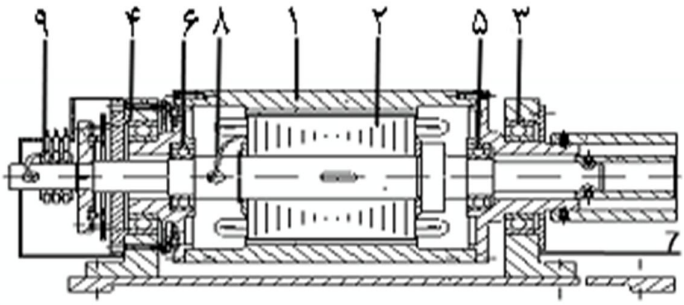
۱-۴- اجزای اصلی یک موتور معکوس‌گرد نمونه

مرجع [۴] یک سیستم الکتریکی-مکانیکی شامل موتور الکتریکی متصل به گیربکس را برای اتصال به CRP معرفی کرده است. مرجع [۸] نیز از یک سیستم متشکل از دو موتور الکتریکی برای این منظور نام برده است. شکل(۱)، ساختار این سیستم را نشان می‌دهد. مهمترین مزیت این سیستم، قابلیت اطمینان بالا به علت توانایی ادامه کار آن بصورت یک جهته، در صورت از کار افتادن یکی از موتورها است. اشکال اساسی این سیستم نیز، تلفات بالا به علت وجود تسمه و چرخ‌دنده و همچنین حجم و وزن و قیمت بالا به علت استفاده از دو موتور است.



شکل(۱-۳): سیستم نیرو محرکه CRP دو موتوره[۴]

همانطور که در قطارهای برقی طراحی موتورهای خطی و استفاده از آن به جای موتورهای دوار، به علت حذف سیستم مبدل حرکت دورانی به خطی انجام شده است، طراحی موتورهای معکوس‌گرد نیز با هدف حذف گیربکس و در پی آن کاهش تلفات و افزایش قابلیت اطمینان صورت می‌پذیرد. یک موتور معکوس‌گرد نمونه در شکل(۱-۳) نشان داده شده است. استاتور مغناطیس‌دائم با شماره ۱ علامت‌گذاری شده است که با مجموعه مقاوم‌سازهایی که با ۳ و ۴ علامت‌گذاری شده‌اند می‌چرخد. امکان چرخش روتور دارای آرمیچر، که با شماره ۲ علامت‌گذاری شده، با مقاوم‌سازهای نشان داده شده با ۵ و ۶ فراهم می‌شود. سیم‌پیچی‌های چند فازه که با شماره ۸ علامت‌گذاری شده‌اند در نهایت به ترمینال و حلقه‌های لغزان سه‌تایی نشان داده شده با شماره ۹ متصل می‌شوند.



شکل(۱-۴): طرح شماتیک موتور مغناطیس‌دائم بدون جاروبک معکوس‌گرد

۱-۵- بررسی اثر گشتاور بار بر حرکت معکوس‌گرد موتور

بهره‌برداری معکوس‌گرد از موتورهای الکتریکی با ایجاد شرایطی که امکان چرخش آزاد استاتور یک موتور الکتریکی معمولی به وجود آید، توسط نیروی عکس‌العمل روتور امکان‌پذیر می گردد. برای تعیین روابط حاکم بر متغیرهای موتور در هنگام بهره‌برداری معکوس‌گرد از یک موتور القایی سه‌فاز، معادلات ولتاژ و گشتاور الکترومغناطیسی به شکل تعریف شده برای موتورهای القایی سه‌فاز معمولی خواهند بود با این تفاوت که به جای سرعت روتور، باید سرعت نسبی بین روتور و استاتور که حاصل جمع سرعت‌های آنهاست، جایگزین شود. اما معادله گشتاور خروجی به علت حرکت متقابل روتور و استاتور، نمی‌تواند مانند معادله گشتاور خروجی موتور در حالت معمولی باشد. برای موتورهای معکوس‌گرد لازم است تا معادله گشتاور خروجی هم برای روتور و هم برای استاتور بیان گردد. روابط (۱-۱) و (۱-۲) معادلات گشتاور خروجی یک موتور معکوس‌گرد را بیان می‌کنند.

$$J_1 p\omega_{r1} = T_{em} - T_{m1} - B_1\omega_{r1} \qquad (1-1)$$

$$J_2 p\omega_{r2} = T_{em} - T_{m2} - B_2\omega_{r2} \qquad (1-2)$$

که ω_{r1} و ω_{r2} سرعت‌های زاویه‌ای، J_1 و J_2 اینرسی، B_1 و B_2 ضریب میرایی و T_{m1} و T_{m2} گشتاور بار روتور و استاتور هستند.

برای موتورهای معکوس‌گرد گشتاورهای الکترومغناطیسی که در روتور و استاتور عمل می‌کنند دارای مقدار یکسانی هستند، اما در جهات معکوس اعمال می‌شوند. به هر حال گشتاورهای الکترو مغناطیسی یکسان، همواره به معنای سرعت یکسان روتور و استاتور در حالت دائم نیست، چرا که اینرسی‌ها و ضرایب میرایی و بارهای مکانیکی روتور و استاتور متفاوت هستند. اگر پارامترهای

روتور و استاتور با یکدیگر اختلاف زیادی داشته باشند، موجب می‌شود که یکی از آنها (روتور یا استاتور) به آرامی متوقف گردد و موتور معکوس‌گرد، به یک موتور نرمال یک‌جهته تبدیل خواهد شد. برای آنالیز اثر این پارامترها در کاراکترهای سرعت، مطالعات بر روی دو موتور نمونه با پارامترهای مختلف انجام شده است [۹]. پارامترهای این دو موتور در جدول(۱-۱) نشان داده شده است. $T_{o۱}$ و $T_{o۲}$ گشتاورهای بی‌باری و $T_{m۱}$ و $T_{m۲}$ بارهای مکانیکی روتور و استاتور هستند. گشتاور بار کل را می‌توان بصورت زیر نشان داد:

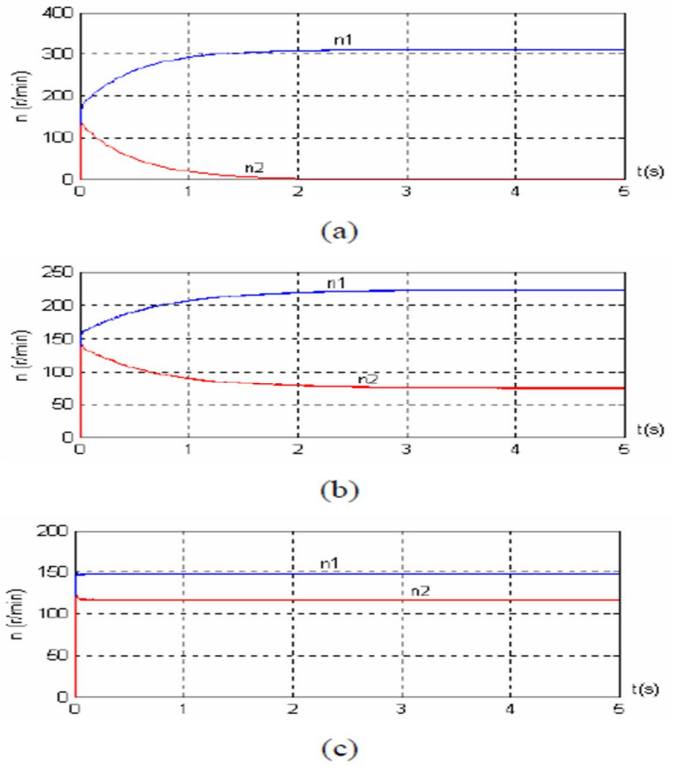
$$T_{L۱} = T_{o۱} + T_{m۱} \qquad (۳-۱)$$

$$T_{L۲} = T_{o۲} + T_{m۲} \qquad (۴-۱)$$

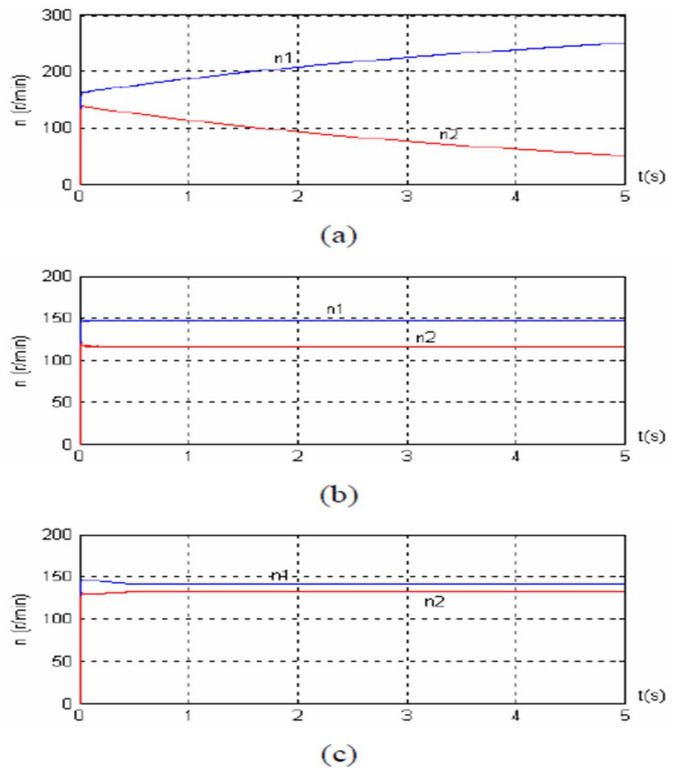
جدول(۱-۱): پارامترهای گشتاور موتورهای مورد استفاده در مطالعه شرایط معکوس‌گرد[۵]

	J_1	J_2	B_1	B_2	T_{01}	T_{02}	T_{m1}	T_{m2}	Fig. No.
	Kgm^2		Nm/(rad/s)		Nm		Nm		
I	13.2e-3	15.0e-3	0.01	0.03	0.5	2.5	0.0	0.0	2-(a)
							2.0	0.0	2-(b)
							$0.0003\cdot\omega_r^2$	$0.0003\cdot\omega_r^2$	2-(c)
II	13.2 e-3	15.0e-3	0.001	0.003	0.2	0.8	2.0	2.0	3-(a)
							$0.0003\cdot\omega_r^2$	$0.0003\cdot\omega_r^2$	3-(b)
							$0.000325\cdot\omega_r^2$	$0.000275\cdot\omega_r^2$	3-(c)

نتایج شبیه‌سازی با بارهای مکانیکی مختلف برای این دو موتور در شکل‌های (۱-۵) و (۱-۶) نشان داده شده است.



شکل(۱-۵): مشخصه‌های سرعت موتور اول داده شده در جدول(۱-۱)[۵]



شکل(۱-۶): مشخصه‌های سرعت موتور دوم داده شده در جدول(۱-۱)[۵]

نکات مورد توجه در این دو شکل به شرح زیر است:

۱- اگر گشتاور بی‌باری روتور و استاتور نامساوی باشد، شرایط معکوس‌گرد برای حالت دائمی در بی باری فراهم نمی‌شود و همانطور که در شکل(۱-۵-a) دیده می‌شود، روتور یا استاتور با گشتاور بی باری بالاتر به آهستگی متوقف خواهد شد. با اضافه کردن گشتاور مکانیکی و برابر شدن گشتاور بار کل، روتور و استاتور با سرعتهای نابرابر در حالت دائم، همانطور که در شکل(۱-۵-b) نشان داده شده است، خواهند چرخید.

۲- برای بارهای مکانیکی با گشتاور ثابت، گشتاورهای بی‌باری روتور و استاتور نباید تفاوت داشته باشند، در غیر این صورت همانطور که در شکل(۱-۶-a) دیده می‌شود گردش معکوس دچار خطا خواهد شد، حتی اگر گشتاور مکانیکی ثابت یکسانی به روتور و استاتور اعمال گردد.

۳- اگر بارهای مکانیکی وابسته به سرعت روتور باشند (مانند فن و پمپ)، حرکت معکوس‌گرد به راحتی بدست می‌آید در این مورد برای ایجاد حرکت معکوس‌گرد، گشتاور بی‌باری یکسان برای روتور و استاتور الزامی نیست زیرا سرعت حالت دائم روتور و استاتور بوسیله تغییر گشتاور بارهای مکانیکی تنظیم می‌شود، به شکل‌های (۱-۶-b) و (۱-۶-c) توجه شود.

۴- سرعت روتور و استاتور در حالت دائم تحت گشتاور بار یکسان ($T_{L1}=T_{L2}$)، بوسیله ضرایب میرایی تاثیر پذیرفته است. اینرسی روتور و استاتور برای تعیین شرایط دینامیکی تاثیرگذار است اما بر روی سرعت حالت دائم روتور و استاتور اثری ندارد.

۱-۶- رئوس مطالب ارائه شده

در فصل دوم، برخی از پارامترهای موتور القایی مورد طراحی بصورت اولیه مقداردهی شده‌اند. مقداردهی اولیه این پارامترها پس از انجام تحقیقات لازم و بررسی چگونگی تاثیر این پارامترها بر متغیرها و مشخصه‌های موتور، انجام شده است. سپس موتور توسط برخی از روابط تجربی و همچنین روابط حاکم بر حالت دائمی، بصورت اولیه طراحی شده است. روابط و روش‌های بکار گرفته شده برای طراحی اولیه، مقادیر اولیه در نظر گرفته شده برای پارامترها و دلایل استفاده از این مقادیر، در این فصل بطور کامل شرح داده شده است. طرح اولیه بدست آمده در فصل دوم، به منظور حصول مقدار دقیق پارامترها، منحنی‌ها و مشخصه‌های حالت دائمی موتور، در فصل سوم این پایان‌نامه شبیه‌سازی شده است. جزئیات مربوط به دریافت و آنالیز داده‌ها و برخی از نتایج حاصل از شبیه‌سازی، در این فصل آورده شده است. تشریح روش مورد استفاده برای بهینه‌سازی موتور مورد طراحی و همچنین فلوچارت پیشنهادی برای آماده‌سازی دنباله‌ها، مطالب ارائه شده در