دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

درایو موتور BLDC سه فاز توسط اینورتر Z-Source تغذیه شده توسط پیل سوختی

مصطفی نورالهی علمداری

استاد راهنما :

دکتر علی دستفان

استاد مشاور:

دکتر امین حاجی زاده

زمستان ۱۳۹۰

به نام خداوند بخشنده ی مهربان

تقدیر و تشکر:

من بسیار خود را مدیون استاد راهنمای خود، آقای دکتر دستفان می دانم. راهنمایی های ایشان در موقعیتهای مختلف، سبب شد تا قادر باشم این پایان نامه را به پایان برسانم. مهارتهای تخصصی ایشان بر هیچکس پوشیده نیست. من علاوه بر پایان نامه، درسهای الکترونیک قدرت و کیفیت توان را با ایشان گذرانده ام و به جرات میتوانم بگویم که در مدت آشنایی با ایشان بود که با مفاهیم ناب الکترونیک قدرت آشنا شدم. همچنین بر خود لازم میدانم که از زحمات استاد مشاور خود، آقای دکتر حاجی زاده تشکر نمایم. ایشان بخصوص در بحث پیلهای سوختی، راهنمایی های بسیار مفید و موثری داشتند. همچنین از کلیه دوستان و هم کلاسی‌های خود در دانشگاه صنعتی شاهرودکهبا یاری‌ها و راهنمایی‌های ایشان، بسیاری از سختی‌ها برایم آسان‌تر شد، کمال تشکر وقدردانی را دارم. در پایان، این پایان نامه را به پدر و مادر نازنینم و همسر عزیزم که یار و همراه همیشگی من بودند و وجودشان همواره برای من آرامش بخش بود، تقدیم می نمایم.

مصطفی نورالهی علمداری

زمستان ۱۳۹۰

مقالات مستخرج از پایان نامه

- مصطفی نورالهی علمداری، علی دستفان و امین حاجی زاده،"*جذب حداکثر توان از پیلهای سوختی در خودروهای هیبرید*"، نخستین کنفرانس ملی انرژی، فناورهای خودرو، توسعه پایدار، پژوهشکده نیرو، آبان ۹۰

چکیده :

در چند سال اخیر نیاز به استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر نظیر انرژی خورشیدی، پیل های سوختی و انرژی بادی افزایش یافته است. از این میان پیل های سوختی به دلیل عدم آلودگی، بازدهی بالا و مستقل بودن از شرایط آب و هوایی، منابع انرژی بسیار مفیدی هستند. روش مرسوم برای کنترل این پیل ها استفاده از یک مبدلdc/dc می باشد.در کاربردهای سه فاز مانند درایو موتورهای ac، یک اینورتر هم باید در مسیر مبدل dc/dc قرار گیرد تا بتواند توان سه فاز به موتور تحویل بدهد. استفاده از دو مبدل در کنارهم، سبب کاهش بازدهی و هزینه بالا می شود. در سال ۲۰۰۳ مبدلی مطرح شد که این مشکلات را بهبود می بخشید. این مبدل به دلیل شبکه ی امپدانسی که بکار می برد، Z-Source نامیده شد. ساختار این مبدل بگونه ای است که می تواند هر دو عمل افزایش ولتاژ و اینورتری را با هم انجام دهد.

هدف این پایان نامه درایو موتور BLDCسه فاز توسط اینورتر Z-SOURCE تغذیه شده توسط پیل سوختی می باشد.

ابتدا پیل های سوختی،اینورترهای Z-SOURCE و موتورهای بدون جاروبک مغناطیس دائم معرفی و بررسی می شوند. سپس مشخصه های مختلف پیل سوختی بدست آمده و پیل سوختی، اینورتر Z-SOURCEو سیستم کنترلی موتور PMSM در محیط سیمولینک شبیه سازی شده است. کنترل موتور با استفاده از اینورتر معمولی و اینورتر Z-SOURCE در حالتی که تغذیه پیل سوختی باشد، شبیه سازی و مقایسه شده است.شبیه سازی ها نشان می دهند که استفاده از اینورتر Z-SOURCE سبب ایجاد ریپل گشتاور کمتر نسبت به اینورتر معمولی می شود.

کلمات کلیدی: پیل سوختی PEM، اینورتر منبع ولتاژی، اینورتر Z-SOURCE، موتور بدون جاروبک مغناطیس دائم، کنترل پروژی، درایو موتورهای ac، ریپل گشتاور، هیسترزیس.

فهرست مطالب

فصل اول ۱

مقدمه ۱

فصل دوم ۷

پیل سوختی ونحوه ی کنترل آن ۷

۲-۱- مقدمه ۸

۲-۲- پیل سوختی وانواع آن ۱۰

۲-۳- مدلسازی پیل سوختیPEM ۱۵

۲-۴- سیستم کنترلی استفاده شده در پیل سوختی ۲۱

۲-۵- شکل موج های ولتاژوتوان پیلهای سوختی ۲۲

فصل سوم ۲۴

موتورBLDC ونحوه ی کنترل آن ۲۴

۳-۱- مقدمه ۲۵

۳-۲- مدل ریاضی موتور BDCM ۲۷

۳-۳- کنترل موتورBDCM ۳۰

۳-۴-مدل ریاضی موتور PMSM ۳۵

۳-۵- مقایسه ی موتورهای PMSMو BDCM ۳۷

۳-۶- روشهای کنترل موتورهایPMSM ۳۸

۳-۶-۱- کنترل اسکالر (کنترل ولت-هرتز) ۳۹

۳-۶-۲- روش کنترل برداری ۴۰

۳-۶-۲-۱- روشDTC ۴۰

۳-۶-۲-۲- روشFOC ۴۱

۳-۷- بررسی دقیقتر روشFOC ۴۲

فصل چهارم ۴۹

کنترل موتورBLDC بااینورترZ-Sourceتغذیه شده توسط پیل سوختی ۴۹

فهرست مطالب

۴-۱- مقدمه ۵۰

۴-۲- مبدل Z-Source ۵۰

۴-۲-۱- تفاوتهای مبدل ZS ومبدلهای معمولی ۵۰

۴-۲-۲- اصول عملکرد مبدل ZS ۵۴

۴-۲-۳- مقالات ارائه شده درزمینه ی مبدل ZS ۵۷

۴-۲-۴- روشهای کنترل (کلیدزنی) درمبدل ZS ۵۹

۴-۲-۴-۱- روش کنترل ساده (SBC) ۶۰

۴-۲-۴-۲- روش کنترل ماکزیمم بهره (MBC) ۶۲

۴-۲-۴-۳- روش کنترل ماکزیمم بهره ی ثابت (CBC) ۶۵

۴-۲-۴-۴- روش بردارفضایی(SV) برای کنترل اینورتر ZS ۶۸

۴-۲-۵- نحوه ی محاسبه ی امپدانسهای شبکه ZS ۷۰

۴-۳-پیاده سازی مدل پیل سوختی در Simulink ۷۳

۴-۴-پیاده سازی مدل کنترلی موتوردر Simulink ۷۷

فصل پنجم ۸۴

نتایج شبیه سازی ۸۴

۵-۱- مقدمه ۸۵

۵-۲- پارامترهای پیل سوختی، شبکه ی ZS وموتور PMSM ۸۷

۵-۳- مشخصه ی پیل سوختی ۸۸

۵-۴- بررسی سیستم شامل باتری و VSI ۹۱

۵-۵- بررسی سیستم شامل پیل سوختی و VSI ۹۶

۵-۶- بررسی سیستم شامل پیل سوختی وشبکه ی ZS ۹۹

۵-۷- بررسی سیستم شامل پیل سوختی و ZSI ۱۰۲

۵-۸- بررسی نتایج ۱۰۵

۵-۹- بررسی فشارواکنش دهنده ها ۱۰۸

فهرست مطالب

فصل ششم ۱۱۱

نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۱۱

۶-۱- نتیجه گیری ۱۱۲

۶-۲- پیشنهادات ۱۱۳

مراجع ۱۱۴

فهرست شکل‌ها

شکل ۲-۱ ساختار پیل سوختی ۱۰

شکل ۲-۲ خلاصه ی کاربردها ومزایای اصلی پیل سوختی ۱۴

شکل ۲-۳ شماتیک یک PEMFC ۱۶

شکل ۲-۴ ساختارکلی پیل سوختی ۲۲

شکل۲-۵ شکل موج ولتاژنسبت به جریان دریک پیل سوختی[۳] ۲۲

شکل ۳-۱ مدارمعادل موتورBDCM ۲۹

شکل ۳-۲ ولتاژضدمحرکه وجریان موتور[۲۴] ۲۹

شکل ۳-۳ شکل موجهایEMF،جریان وخروجیهای سنسورهای هال[۲۵] ۳۱

شکل۳-۴ مقطع عرضی موتور BDCMوتوالی انرژی دارشدن فازها ۳۲

شکل ۳-۵ ساختارطرح کنترل ولتاژ ۳۲

شکل ۳-۶ ساختارطرح کنترل جریانdc ۳۳

شکل ۳-۷ ساختارطرح کنترل جریان لینکac ۳۴

شکل۳-۸ مدارمعادلPMSM با استفاده ازمعادلات دینامیک[۲۳] ۳۷

شکل ۳-۹ مدارمعادل حالت مانای موتور[۲۳] ۳۷

شکل۳-۱۰ روشهای مختلف کنترلیPMSM ۳۹

شکل۳-۱۱ ساختارروشDTC ۴۱

شکل۳-۱۲ مقایسه ی سیگنالهای مرجع تحت شرایط عملکردحالت مانا ۴۳

شکل ۳-۱۳ طرح ساده ی کنترل گشتاور ۴۵

شکل ۳-۱۴ کنترل هیسترزیس ۴۵

شکل ۳-۱۵ دیاگرام بردارفضایی برای تولیدگشتاوربهینه دردستگاه روتور ۴۶

شکل ۳-۱۶ کنترل گشتاوردردستگاه مرجع روتور ۴۷

شکل ۳-۱۷ ساختارمورداستفاده درروش کنترلFOC ۴۷

شکل۴-۱ اینورترمنبع ولتاژی ۵۱

فهرست شکل‌ها

شکل ۴-۲ کلید بکاررفته درVSI ۵۱

شکل ۴-۳ یک اینورترمنبع جریانی ۵۲

شکل ۴-۴کلید بکار رفته درCSI ۵۲

شکل ۴-۵ ساختارکلی یک مبدلZ-Source ۵۳

شکل۴-۶ مبدلZSدرحالت اتصال کوتاه شدن ساق (ST) ۵۴

شکل۴-۷ مبدلZSدرهشت حالت معمول ۵۵

شکل۴-۸ روش کنترل ساده[۳۲] ۶۰

شکل ۴-۹ بهره ی ولتاژ درروشSBC،([۵۶]) ۶۱

شکل ۴-۱۰ استرس ولتاژنسبت به بهره ی ولتاژ[۵۶] ۶۲

شکل ۴-۱۱ کلیدزنی درروشMBC([۵۶]) ۶۳

شکل ۴-۱۲ منحنی بهره ی ولتاژ نسبت به شاخص مدولاسیون[۵۶] ۶۴

شکل ۴-۱۳ استرس ولتاژ درروشMBC،([۵۶]) ۶۵

شکل۴-۱۴ روش کنترلCBC([۵۷]) ۶۷

شکل ۴-۱۵ منحنی بهره ی ولتاژ نسبت به شاخص مدولاسیون[۵۷] ۶۷

شکل ۴-۱۶ مقایسه ی استرس ولتاژی درروشهای مختلف[۵۷] ۶۸

شکل ۴-۱۷ هشت حالت ممکن کلیدزنی برای یک VSI([۵۸]) ۶۸

شکل ۴-۱۸هشت بردار پایه ممکن درصفحه ی $d-q$ ([۵۸]) ۶۹

شکل ۴-۱۹ نحوه وزمان کلیدزنی برای مبدلZS([۵۹]) ۷۰

شکل ۴-۲۰شکل v_{L1} و v_{C1} نسبت به زمان[۶۰] ۷۲

شکل ۴-۲۱ مدل هیدروژن ۷۳

شکل ۴-۲۲ مدل آب درسمت آند ۷۳

شکل ۴-۲۳ مدل آند ۷۴

شکل ۴-۲۴مدل اکسیژن ۷۴

فهرست شکل‌ها

شکل ۴-۲۵ مدل نیتروژن ۷۵

شکل ۴-۲۶ مدل آب درسمت کاتد ۷۵

شکل۴-۲۷ مدل کاتد ۷۶

شکل۴-۲۸ مدلسازی تولیدولتاژدرپیل ۷۶

شکل۴-۲۹ کنترل کننده ی اول ۷۷

شکل ۴-۳۰ کنترل کننده ی دوم ۷۷

شکل ۴-۳۱ نحوه ی تولیدجریانهای مرجع سه فاز ۷۸

شکل۴-۳۲ تبدیل ازدستگاه روتوربه دستگاه سه فازabc ۷۸

شکل۴-۳۳ پیاده سازی کنترل هیسترزیس درمحیط سیمولینک ۷۹

شکل ۴-۳۴ سیستمFOC ۷۹

شکل۴-۳۸طرحی برای کنترل زمانSTدرروش هیسترزیس ۸۱

شکل ۴-۳۹ مدارشبیه سازی شده درمحیط سیمولینک ۸۲

شکل۵-۱ باتری،مبدلdc/dc،اینورتر و موتورPMSM ۸۵

شکل۵-۲ پیل سوختی، مبدلdc/dc، اینورتر و موتورPMSM ۸۵

شکل۵-۳ پیل سوختی، شبکهZS، مبدلdc/dc، اینورتر، موتورPMSM ۸۶

شکل۵-۴پیل سوختی،اینورترZSوموتور PMSM ۸۶

شکل۵-۵جریان ورودی به پیل سوختی ۸۹

شکل ۵-۶توان خروجی ازپیل سوختی ۸۹

شکل ۵-۷ولتاژپیل سوختی ۹۰

شکل ۵-۸شکل موج سرعت درزمانیکه سیستم شامل باتری وVSIباشد ۹۲

شکل ۵-۹شکل موج گشتاورزمانیکه سیستم شامل باتری وVSIباشد ۹۳

شکل ۵-۱۰شکل موجهای جریانهای سه فازدرزمانیکه سیستم شامل باتری وVSIباشد ۹۴

شکل ۵-۱۱شکل موج جریان فازها درحالتیکه سیستم شامل باتری وVSIباشد (درزمان ۱.۷ تا ۲ ثانیه) ۹۴

شکل ۵-۱۲شکل موج جریانها درمحورهایdوq درحالتیکه سیستم شامل باتری وVSIباشد ۹۵

فهرست شکل‌ها

شکل ۵-۱۳شکل موج گشتاورزمانیکه سیستم شامل پیل سوختی وVSIباشد..... ۹۷

شکل ۵-۱۴شکل جریان فازها درزمانیکه سیستم شامل پیل سوختی وVSIباشد(دربازه ۱.۷ تا ۲ ثانیه)..... ۹۷

شکل ۵-۱۵جریانهای محورهایdوqزمانیکه سیستم شامل پیل سوختی وVSIباشد..... ۹۸

شکل ۵-۱۶شکل موج گشتاورزمانیکه سیستم شامل پیل سوختی وشبکهZSباشد..... ۹۹

شکل ۵-۱۷شکل موج جریان فازها درزمانیکه سیستم شامل پیل سوختی وشبکه ZSباشد(دربازه ی زمانی۱.۷تا۲ ثانیه)..... ۱۰۰

شکل ۵-۱۸جریانهای محورهایdوqزمانیکه سیستم شامل پیل سوختی وشبکهZSباشد..... ۱۰۱

شکل ۵-۱۹شکل موج گشتاورزمانیکه سیستم شامل پیل سوختی واینورترZSIباشد..... ۱۰۲

شکل۵-۲۰شکل موج جریان فازها درزمانیکه سیستم شامل پیل سوختی وZSI باشد(دربازه ی زمانی۱.۷تا۲ ثانیه)..... ۱۰۳

شکل ۵-۲۱جریانهای محورهای dوq زمانیکه سیستم شامل پیل سوختی وZSI باشد..... ۱۰۴

شکل۵-۲۲مقایسه ی گشتاورها (ازبالابه پایین به ترتیب مربوط به پیل سوختی وVSI،پیل سوختی وشبکه ی ZS وپیل سوختی و ZSI)..... ۱۰۶

شکل۵-۲۳ شکل موج جریان اعمالی به پیل سوختی..... ۱۰۸

شکل۵-۲۴شکل موج ولتاژ،فشاراکسیژن و فشار هیدروژن..... ۱۰۸

شکل۵-۲۵شکل موج فشار اکسیژن و فشار هیدروژن..... ۱۰۹

شکل۵-۲۶زمانهای روشن وخاموش بودن کلیدها..... ۱۱۰

فهرست جداول

جدول ۲-۱ پارامترهای پیل سوختی ۹

جدول ۲-۲ اطلاعات انواع مختلف پیل سوختی ۱۴

جدول ۳-۱ توالی کلیدزنی[۲۵] ۳۱

جدول۱-۵پارامترهای پیل سوختی ۸۷

جدول۲-۵پارامترهای شبکه Z-Source ۸۸

جدول۳-۵پارامترهای موتور PMSM ۸۸

فصل اول

مقدمه

استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر(همانند انرژی بادی، انرژی خورشیدی و پیل های سوختی)در سالیان اخیر به سرعت افزایش یافته است.از دلایل عمده این امر می توان به مشکلات مربوط به آلودگی های ناشی از سوخت های فسیلی و محدودیت این منابع اشاره نمود. پیل های سوختی، سیستم های تولید توان الکتریکی هستند که بر خلاف انرژی های بادی و خورشیدی، مستقل از شرایط آب و هوایی می باشند و مادامی که هیروژن و اکسیژن وجود داشته باشد، می توانند انرژی الکتریکی تولید کنند.

پیل سوختی، یک تجهیز الکتروشیمیایی است که انرژی شیمیایی را مستقیما به انرژی الکتریکی تبدیل می کند. اساسا یک سیستم پیل سوختی شامل سه بخش می باشد که عبارتند از: یک رفورمر، یک استک و مبدل توان. رفورمر سوخت ورودی را می گیرد و گاز هیدروژن تولید می نماید و سپس این گاز را به استک تحویل می دهد. در استک، هیدروژن گرفته شده از رفورمر و اکسیژن هوا، با هم واکنش الکتروشیمیایی ایجاد می کنند و از این طریق توان الکتریکی dc تولید می گردد. سطح ولتاژdc خروجی از پیل سوختی، پایین می باشد. لذا از یک مبدل توان استفاده می شود تا این ولتاژ dc کم، به ولتاژ dc یا ac با مقدار بالا تبدیل شود. از خصوصیات این منابع انرزی می توان به بازدهی بالا و عدم ایجاد آلودگی اشاره نمود. یک پیل سوختی فقط الکتریسیته، آب و حرارت تولید می کند و اگر فقط از انرژی الکتریکی آن استفاده شود، بازدهی آن در حدود ۴۰٪ می شود. اما اگر بصورت CHP از آن استفاده گردد بازدهی آن به حدود ۸۰٪ می رسد. بنابراین پیل های سوختی منابع توان dc هستند که مطمئن، تمیز و پر بازده می باشند. انواع مختلف پیل سوختی، بر حسب الکترولیت بکار رفته در آنها طبقه بندی می شوند که این الکترولیت می تواند بطور مثال غشاء تبادل پروتون PEM[۱]، اسید فسفریک و... باشد که در فصل بعدی به آنها پرداخته خواهد شد.

[۱] Proton Exchange Membrane

با مقایسه انواع مختلف پیل های سوختی که در فصل دوم به آنها اشاره خواهد شد، مشاهده می شود که پیل های سوختی PEM به دلیل دمای عملکردی پایین، چگالی توان بالا وراه اندازی سریع گزینه مناسبی برای کاربردهای خانگی و کاربردهای مربوط به خودروهای هیبرید می باشد.

هدف از این پایان نامه، مطالعه سیستم الکترونیک قدرتی است که واسط بین یک پیل سوختی و یک موتور PMSM است و می تواند این ساختار را کنترل نماید. ولتاژ خروجی پیل سوختی کم می باشد و نیز همانگونه که درفصل دوم بررسی خواهد شد، ولتاژ پیل با جریان آن رابطه غیر خطی دارد و با افزایش جریان پیل، ولتاژ آن کاهش می یابد. این ولتاژ باید افزایش یابد و سپس به یک اینورتر اعمال شود تا بتواند ولتاژ ac مناسب در خروجی آن ایجاد نماید. برای دست یابی به این منظور، در خروجی پیل سوختی یک مبدل dc/dc افزاینده و یک اینورتر dc/ac قرار داده می شود. اینورترها را می توان به دو دسته ی اینورترهای منبع ولتاژی[۱] و اینورترهای منبع جریانی[۲] تقسیم نمود. اینورترهای VSI دارای معایبی هستند که از جمله ی آنها می توان به موارد ذیل اشاره نمود :

- ولتاژ ac خروجی لزوما کمتر از ولتاژ لینک dc است.
- هیچ گاه کلید های روی یک ساق نمی توانند با هم روشن شوند.

بنابراین هنگامیکه منبع انرژی، پیلسوختی است، مبدل dc/dc علاوه بر جبران نمودن ولتاژ سطح پایین پیل، کاهش ولتاژ ناشی از وجود اینورتر را هم جبران می نماید. قرار گرفتن دو مبدل کنار هم، سبب افزایش هزینه ی سیستم و کاهش بازدهی آن می گردد . این دلایل سبب شد که در سال ۲۰۰۳، یک توپولوژی جدید از اینورترها به عنوان اینورتر Z-Source مطرح گردید.

در این ساختار از یک شبکه ی امپدانسی خاص، در قسمت لینک dc اینورتر استفاده می شود. این امر سبب ایجاد ویژگی های خاصی برای اینورتر می شود که قبلا ممکن نبود. یکی از این خواص، امکان

[۱] Voltage Source Inverter (VSI)
[۲] Current Source Inverter (CSI)

اتصال کوتاه شدن هر دو کلید موجود در یک ساق، بطور همزمان می باشد. این حالت را ST[1] می نامند.

شبکه امپدانسی بکاررفته در این ساختار، شامل دو سلف و دو خازن می باشد که به صورت X شکل به هم متصل می شوند. اینورترهای Z-SOURCE دارای این مزیت هستند که به دلیل امکان وجود حالاتST، نویزهای EMI[2] نمی توانند روی آنها تاثیر بگذارند.همچنین این اینورترها می توانند ولتاژهایی بیشتر از ولتاژ dc ورودی، در خروجی تولید نمایند. ولتاژ خروجی اینورتر ZS به سادگی با کنترل زمان ST قابل کنترل است. هدف از این پایان نامه، کنترل یک موتور ac توسط اینورتر Z-SOURCE تغذیه شده توسط پیل سوختی می باشد.

موتورهای ac، شامل موتورهای بدون جاروبک مغناطیس دائم و موتورهای القایی، دارای کاربردهای گوناگونی می باشند. برتری اساسی موتورهای ac نسبت به موتورهای dc عبارت است از: عدم وجود ارتباط الکتریکی بین قسمتهای ساکن و گردان. بنابراین در موتورهای ac مشکلات مربوط به کموتاسیون و جاروبک دیگر وجود ندارد. همچنین این موتورها دارای بازدهی بیشتری نسبت به موتورهای dc هستند.

در موتورهای ac کنترل سرعت از طریق کنترل دامنه و فرکانس ولتاژ انجام می شود.سرعت موتور به سرعت میدان مغناطیسی استاتورکه با فرکانس ولتاژ می چرخد، وابسته است.لذا با تغییر فرکانس، سرعت موتور تغییر می کند.اما بدون استفاده از روش های کنترل برداری (نظیر DTCوFOC)،موتورهای ac برای کاربردهای سرعت متغیر مناسب نیستند،دلیل اینامر تزویج بین شار و گشتاور است.

[1] Shoot through
[2] Electromagnetic interference

موتورهای بدون جاروبک مغناطیس دائم دارای مزایای زیادی از قبیل گشتاور زیاد، اندازه کوچک، بازدهی بالا و هزینه نگهداری کم هستند.درایو مورد استفاده برای کنترل این نوع موتور، یک اینورتر است که در آن با کنترل کلیدهای اینورتر، سرعت وگشتاور موتور قابل کنترل است.لازم به ذکر است که گشتاور موتور باید بگونه ای کنترل شود که دارای ریپل کمی باشد چرا که وجود ریپل در گشتاور سبب ایجاد لرزش در موتور و ایجاد صدمات مکانیکی می شود.

از کاربردهای خاص این موتورها، استفاده در زیردریایی ها می باشد.اما در اینگونه کاربردها باید ملاحظاتی در نظر گرفته شود.تولید امواج ناشی از ریپل گشتاور و انتشار آن ها در آب، باعث ردیابی زیر دریایی می شود.لذا کاهش ریپل در این کاربردها بسیار مهم است[۱]. همچنین از دیگر کاربردهای موتورهای بدون جاروبک مغناطیس دائم، در خودروهای هیبرید که مجهز به پیل سوختی هستند، می باشد. لذا با توجه به نیازها و کاربردهای اشاره شده، موتور در نظر گرفته شده در این پایان نامه یک موتور BLDC می باشد.

در فصل بعد مفاهیم مربوط به پیل های سوختی بطور کامل تشریح می شود. انواع مختلف پیل سوختی از لحاظ توان تولیدی، دمای عملکرد و پارامترهای دیگر معرفی و بررسی می گردند. سپس پیل سوختی PEM بطور خاص مورد بررسی قرار می گیرد. معادلات الکتروشیمیایی و نحوه ی ولتاژسازی آن بیان می گردد. همچنین معادلات فشار گازهای موجود در پیل بطور کامل تشریح می گردد.

در فصل سوم موتورهای بدون جاروبک مغناطیس دائم بررسی می شوند.این موتورها را می توان (از لحاظ شکل موج ولتاژ ضد محرکه) به دو دسته ی موتورهای سینوسی و ذوزنقه ای تقسیم بندی نمود که معادلات هر دو نوع موتور بیان شده و مختصرا روش های مختلف کنترل این موتورها بیان می گردند.